مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، تیر 1399، دوره 7، شماره 4، ص‌ص. 1- 9

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی قطعات چاپ شده سه بعدی با استفاده از فیلامنت‌های پلاستیک ABS پر شده با آلومینا

آرمان قلی‌زاده روشن[1]، عباس ذوالفقاری[2]*، محسن شاکری[3]

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک-ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

2- استادیار، مهندسی مکانیک-ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

3- استاد، مهندسی مکانیک-ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

* بابل، صندوق پستی 4714871167، zolfaghari@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 خرداد 1398

پذیرش: 22 آبان 1398

ارائه در سایت: تیر 1399

کلیدواژگان:

چاپ سه بعدی

رسوب مذاب

فیلامنت کامپوزیتی

آلومینا

چکیده

در سال‌های اخیر، روش‌های چاپ سه بعدی (ساخت افزودنی) مورد توجه مراکز تحقیقاتی و صنایع مختلف قرار گرفته است. از بین این فرایندهای چاپ سه بعدی، روش رسوب مذاب[1] به دلیل سادگی فرایند و ارزان بودن تجهیزات متداول‌تر بوده است. در این روش از فیلامنت‌های پلیمری، برای نمونه‌سازی و یا در برخی موارد به منظور ساختن یک قطعه سازه‌ای استفاده می‌شود. در این تحقیق فیلامنت‌های کامپوزیتی که از زمینه پلیمری ABS و کسرهای حجمی مختلف اکسید آلومینیوم (آلومینا) تشکیل شده‌اند، تولید شدند. خواص مکانیکی و فیزیکی قطعات چاپ شده با این فیلامنت‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمون کشش نشان داد که با افزایش کسر حجمی آلومینا استحکام‌های کششی به دلیل ایجاد حفره‌های بین لایه‌ای کاهش می‌یابند. در نمونه 20 درصد حجمی آلومینا، استحکام کششی تا 70 درصد کاهش یافت. ولی در آزمون فشاری، تا 10 درصد حجمی استحکام‌های فشاری 74 درصد کاهش یافته و سپس استحکام فشاری افزایش می‌یابد. آزمون تغییر شکل حرارتی نیز انجام شد و به دلیل ضعیف بودن استحکام‌ها دمای تغییر شکل حرارتی 11 درصد کاهش یافت. آنالیز توزین حرارتی، نشان داد که با افزایش آلومینا پایداری حرارتی قطعات چاپ شده افزایش یافت. انقباض طولی در سه جهت برای قطعه چاپ شده اندازه‌گیری شده و ناهمسانگردی در انقباض بحث شد. همچنین با افزایش آلومینا تا 15 درصد حجمی، سختی تا 27 درصد کاهش یافته است و پس از آن سختی کمی افزایش یافت. با افزایش آلومینا تا 20 درصد حجمی، اعوجاج قطعات تا 91 درصد کاهش می‌یابد.

Investigation of physical and mechanical properties of 3D printed parts by using of ABS plastic filaments filled by alumina

Arman Gholizadeh Roshan, Abbas Zolfaghari*, Mohsen Shakeri

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

* P.O.B. 4714871167 Babol, Iran

Article Information

Original Research Paper
Received 4 June 2019
Accepted 13 November 2019
Available July 2020

Keywords:
3D Printing
Fused Deposition Modeling
Composite Filament
Alumina

Abstract

In recent years, 3D printing methods (additive manufacturing) have been attracted in research centers and industry. Among several 3D printing processes, fused deposition modeling (FDM) was more popular. In this method, plastic filaments were used for rapid prototyping or manufacture of a structural part. In this research, composite filaments compounded by a polymeric matrix and different volume fraction of aluminum oxide (alumina), were produced. Mechanical and physical properties of printed parts by these filaments were evaluated. Tensile test results showed that with increase of the volume fraction of alumina, tensile strengths were decreased because of inter layer voids. For 20% volumetric of alumina, tensile strength was decreased up to 70%. But in compression test, compressive strength was decreased 74% with increase of alumina till 10% and then compressive strength increased. Also, heat deflection temperature test was conducted and 11% decrease in heat deflection temperature was obtained, because of lower strengths of composites. Thermogravimetric analysis (TGA) showed that with increase of alumina, thermal stability of printed parts was increased. Linear shrinkage was measured for printed part in three directions and anisotropic shrinkage was explained. Also with increase of alumina till 15% volumetric, hardness was decreased to 27% and after that the hardness was increased a little. With increase of alumina till 20% volumetric, warpage of parts was decreased to 91%.

[1] Fused deposition modeling

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Gholizadeh Roshan, A. Zolfaghari, M. Shakeri, Investigation of physical and mechanical properties of 3D printed parts by using of ABS plastic filaments filled by alumina, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 4, pp. 1- 9, 2020 (in Persian)

1- مقدمه

در یک نوع طبقه‌بندی روش‌های ساخت، فرایندها به سه دسته ماشین‌کاری، شکل دهی (یا قالبگیری) و افزودنی تقسیم می‌شود. در فرایندهای ساخت افزودنی قطعات بصورت لایه-لایه ساخته می‌شود. بر طبق تعریف استانداردهای ISO/ASTM، یک فرایند ساخت افزودنی به این صورت تعریف شده است: فرایند اتصال مواد برای ساختن اجسام از اطلاعات سه بعدی مدل که معمولاً بصورت لایه روی لایه بوده و بنابراین برخلاف روش‌های ساخت کاهشی است. فرایندهای ساخت افزودنی (چاپ سه بعدی) بر مبنای سه دسته کلی مایعی، پودری و جامد طبقه بندی می‌شوند. هر کدام از این دسته بندی‌ها نیز شامل فرایندهای دیگری می‌باشند. از میان همه این فرایندها روش رسوب مذاب[1] که از دسته فرایندهای ساخت افزودنی از نوع جامد است، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در این فرایند ابتدا مدل دیجیتالی سه بعدی از قطعه توسط نرم افزارهای طراحی ایجاد می‌شود. این مدل سپس توسط نرم افزارهای برش کننده به لایه‌های متعددی تبدیل می‌شود. هر چه تعداد این لایه‌ها افزایش یابد، دقت قطعه چاپ شده و همچنین زمان چاپ آن افزایش می‌یابد. شکل 1 شماتیکی از این فرایند را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشخص است لایه‌ها روی همدیگر قرار می‌گیرند و شکل هندسی مورد نظر چاپ می‌گردد. از طرفی در بین لایه‌ها و فیلامنت‌ها فضاهای خالی بوجود می‌آید که موجب کاهش خواص مکانیکی آن‌ها نسبت به قطعات تزریق شده با پلاستیک می‌گردد [1]. همچنین خواص این قطعات به جهت چاپ لایه‌ها بستگی دارد. به‌عنوان نمونه در شکل 1، استحکام کششی در راستای x بالاتر از جهات y و z می‌باشد.

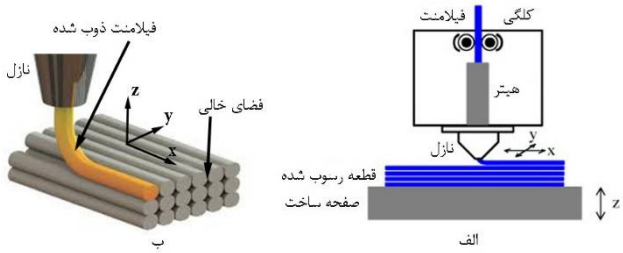

Fig. 1 a) Fused deposition modeling; b) microstructure of printed part

شکل 1 الف) فرایند رسوب مذاب؛ ب) میکرو ساختار قطعه چاپ شده

در این روش بیشتر از فیلامنت‌های پلیمری اکریلونیتریل بوتادین استایرن[2]، پلی لاکتیک اسید[3] و پلی کربنات[4] استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر روی جایگزینی فیلامنت‌های متداول انجام شده است. این جایگزینی به منظور بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی قطعات چاپ شده و استفاده کاربردی ویژه از آن‌ها انجام می‌شود. در واقع برای عبور از فرایندهای نمونه سازی سریع به ساخت سریع به فیلامنت‌هایی با خواص مکانیکی و فیزیکی بالاتری نیاز است.

فیلامنت‌های تقویت شده با شیشه، به‌عنوان ماده جایگزین با استحکام بالا برای چاپ سه بعدی مورد توجه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزودن 18 درصد وزنی فیبر شیشه به ABS، استحکام کششی 58 درصد افزایش یافت. لازم به ذکر است که با افزودن فیبر شیشه، فیلامنت ترد شده و برای بهبود پرینت پذیری آن‌ها پلی اتیلن چگالی پایین به ترکیب اضافه شده است [2]. فیلامنت‌های پلی آمید[5] پر شده با ذرات آهن در ابعاد میکرون نیز برای ابزار سازی سریع یک اینسرت در قالب تزریق پلاستیک مورد استفاده قرار گرفت. با افزایش ابعاد ذرات آهن و مقدار درصد حجمی آن استحکام کششی به ترتیب افزایش و کاهش یافت. خواص حرارتی اینسرتهای تولید شده نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و مشخص شد که با افزایش درصد ذرات آهن هدایت حرارتی اینسرت نیز افزایش می‌یابد. اینسرتهای چاپ شده در قالب تزریق پلاستیک بکار گرفته شد و قطعات تولید شده حاکی از این بود که می‌توان از این روش برای تزریق پلاستیک با تیراژ کم استفاده شود. درصدهای وزنی آهن 30 و 40 بوده و برای پراکندگی بهتر ذرات آهن در زمینه پلیمری از استئارات کلسیم استفاده شده است [3، 4]. اثر اضافه نمودن کنف، اکسید تیتانیوم و الاستومر ترموپلاستیک به زمینه ABS، نیز بررسی شد. مقدار افزودنی استفاده شده 5 درصد وزنی بود. از بین آنها اکسید تیتانیوم بیشترین اثر را در افزایش استحکام کششی نمونه¬های چاپ شده داشت [5]. اثر افزودن 5 درصد وزنی آلومینا به ABS نشان داد که استحکام کششی قطعات چاپ شده به مقدار 15 درصد کاهش یافت. این کاهش استحکام به علت بوجود آمدن حفره‌ها در قطعه چاپ شده بود [6]. دسته دیگری از تحقیقات وجود دارند که بر روی پرینت سه بعدی فیلامنت‌های کامپوزیتی پر شده با پودر سرامیک یا فلز کار کرده‌اند. در این نوع، فرایند تف‌جوشی بر روی قطعه انجام می‌شود. در اثر تف‌جوشی، بخش پلیمری قطعه کامپوزیتی ذوب شده و پودر در اثر حرارت به هم جوش موضعی خواهند شد. نالتی و همکاران [7] با افزودن 55% حجمی یک نوع پودر

[1] Fused deposition modeling (FDM)
[2] Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)
[3] Polylactic acid (PLA)
[4] Polycarbonate (PC)
[5] Polyamide (PA)

سرامیک به یک پلیمر قطعات کاربردی سرامیک‌های پیزوالکتریک را با استفاده از فرایند رسوب مذاب تولید کردند. با ایجاد تغییرات سخت افزاری و نرم افزاری در چاپگرهای سه‌بعدی رسوب مذاب و معلق سازی ذرات سرامیکی آلومینا و زیرکونیا در یک اتصال دهنده پارافینی و رسوبدهی آن توسط یک نازل در دستگاه چاپ سه‌بعدی، قطعات سرامیکی ساخته شد. مقدار حجمی زیرکونیا و آلومینا به ترتیب 45% و 65% بوده است. بعد از ساخت اولیه قطعات برای متراکم شدن و حذف اتصال دهنده، در دمای 1600 درجه سانتی‌گراد و زیرکونیا در دمای 1500 درجه سانتی‌گراد هر کدام به مدت 2 ساعت زینتر شدند. نتایج نشان داد که قطعات تف جوشی شده دارای تراکم 99% هستند. همچنین مشاهدات تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی بر چسبندگی خوب بین لایه‌ها دلالت می‌کند [8]. ذرات آلومینا تا درصدهای حجمی 60 درصد با اتصال دهنده پلیمری که ترکیبی از پلی اتیلن و پارافین بود توسط یک میکسر دو مارپیچ مخلوط شده و با استفاده از یک اکسترودر تک مارپیچ فیلامنت کامپوزیتی تهیه شد. با این فیلامنت‌ها و استفاده از روش رسوب مذاب قطعات چاپ شدند. در درصدهای بالاتر از 50 درصد حجمی، عملیات تف جوشی انجام شده و چگالی قطعه اندازه‌گیری شد که 98 درصد مقدار تئوری آلومینا بود [9].

در تحقیق حاضر فیلامنت‌های کامپوزیتی ABS/آلومینا در درصدهای حجمی مختلف آلومینا تولید شدند. قابلیت پرینت پذیری فیلامنت‌های کامپوزیتی در کسرهای حجمی مختلف بررسی شد. سپس قطعات پرینت شده با آزمون‌های مکانیکی و حرارتی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. همچنین دقت ابعادی قطعات و برخی خواص فیزیکی فیلامنت‌ها و قطعات نیز بررسی شد.

2- مواد

از ABS گرید N70 محصول پتروشیمی قائد بصیر به‌عنوان زمینه پلیمری استفاده شده است. پودر آلومینا با ذرات 40 میکرون به‌عنوان پر کننده سرامیکی در نظر گرفته شده است. از اسید استئاریک[1] به عنوان عاملی برای پخش بهتر ذرات سرامیکی در زمینه پلیمری استفاده شد. همچنین به منظور اتصال مستحکمتر بین ذرات سرامیکی و زمینه پلیمری از سازگارکننده ABS پیوند زده شده با مالئیک انیدرید[2] محصول شرکت آریا پلیمر پیشگام از گرید ABS-g-101 استفاده شده است. در جدول 1 چگالی و نقطه ذوب مواد بکار گرفته شده در این تحقیق آمده است.

جدول1 مشخصات مواد استفاده شده

Table 1 Properties of used materials

مواد	چگالی (gr/cm^3)	نقطه ذوب °C
ABS	1/04	220
آلومینا	3/95	2072
اسید استئاریک	0/94	70
ABS-g-101	1/05	190

همان‌طور که اشاره شد هدف از این تحقیق بررسی اثر افزودن پودر سرامیک به فیلامنت‌های پلیمری در چاپ سه بعدی قطعات می‌باشد. با توجه به مطالعات انجام شده، مواد داده شده در جدول 2 برای تولید فیلامنت‌ها و چاپ قطعات در نظر گرفته شده است. تبدیلات درصد حجمی و وزنی مطابق با روابط داده شده در مراجع مربوط به مواد مرکب مانند [10] انجام شده است. چگالی تئوری مطابق با قانون مخلوط‌ها به دست می‌آید:

$$(\rho_{th})_c = \rho_{Al}V_{Al} + \rho_{ABS}V_{ABS} \quad (1)$$

در رابطه (1)، $(\boldsymbol{\rho_{th}})_c$ چگالی تئوری کامپوزیت، $\boldsymbol{\rho_{Al}}$ چگالی آلومینا، V_{Al} کسر حجمی آلومینا، $\boldsymbol{\rho_{ABS}}$ چگالی پلیمر ABS و V_{ABS} کسر حجمی پلیمر ABS می‌باشد. کسر وزنی آلومینا m_{Al} از رابطه (2) به دست می‌آید:

$$m_{Al} = \frac{\rho_{Al}}{(\rho_{th})_c}V_{Al} \quad (2)$$

با توجه به اینکه مجموع کسرهای حجمی و همچنین وزنی آلومینا و ABS برابر 1 می‌باشد، می‌توان کسر وزنی ABS را نیز به دست آورد. در همه نمونه‌های کامپوزیتی مقادیر 3 و 10 درصد وزنی به ترتیب اسید استئاریک و سازگار کننده به کل مخلوط اضافه شده است.

جدول 2 درصدهای وزنی مواد استفاده شده

Table 2 Weight percentages of used materials

کد نمونه‌ها	درصد حجمی آلومینا	درصد وزنی آلومینا
Al0-ABS100	0	0
Al5-ABS95	5	14/7
Al10-ABS90	10	26/3
Al15-ABS85	15	35/6
Al20-ABS80	20	43/1

3- تجهیزات و آزمایش‌ها

ابتدا مواد تشکیل دهنده کامپوزیت در خشک کنی با دمای 85 درجه سانتی‌گراد و به مدت 2 ساعت رطوبت زدایی شدند. برای

[1] Stearic acid
[2] Maleic anhydride grafted ABS

مخلوط کردن پودر سرامیک با ABS از دستگاه اکسترودر دو پیچه همسوگرد به قطر 62/5 میلی‌متر و نسبت طول به قطر 22/4 استفاده شد. در دای انتهایی سر اکسترودر سوراخی به قطر 1/8 میلی‌متر ایجاد شده تا رشته‌های کامپوزیتی تولید شود. برای خرد کردن این رشته‌ها از خرد کن پلاستیک استفاده شده است. دمای نواحی مختلف اکسترودر دو مارپیچه به ترتیب برای نواحی 1 الی 4 بر روی 150، 200، 210 و 190 درجه سانتی‌گراد تنظیم شدند.

اندازه‌گیری شاخص جریان مذاب[1] به‌عنوان یک معیار برای ویسکوزیته و جریان پذیری گرانول‌های کامپوزیتی محسوب می‌شود. این آزمون مطابق با استاندارد ASTM D1238، تحت بار 10 کیلوگرم و در دمای 220 درجه سانتی‌گراد انجام شده است. پس از تولید گرانول‌های کامپوزیتی، دوباره آن‌ها در خشک کن با دمای 85 درجه سانتی‌گراد و به مدت 2 ساعت حرارت دیدند تا رطوبت زدایی شوند. سپس گرانول‌های کامپوزیتی وارد اکسترودر تک پیچه‌ای به قطر 45 میلی‌متر و نسبت طول به قطر 30 شدند تا فیلامنت‌های کامپوزیتی تولید شوند. از حمام آب برای خنک‌کاری و از یک کشنده با دور قابل تنظیم جهت دست‌یابی به قطر مناسب فیلامنت استفاده شده است. دمای نواحی مختلف اکسترودر به ترتیب از ورودی مواد تا دای بر روی 190، 220، 220 و 210 درجه سانتی‌گراد تنظیم شده بود. بعد از پایدار شدن دمای نواحی اکسترودر تولید فیلامنت آغاز شد. همچنین اکسترودر بر 3 دور بر دقیقه و سرعت خطی کشنده 44 میلی‌متر بر ثانیه تنظیم شدند. در دای انتهایی اکسترودر، سوراخی با قطر 1/8 میلی‌متر ایجاد شده که با تنظیمات دور اکسترودر و سرعت خطی کشنده فیلامنت‌هایی به قطر 1/75±0/1 میلی‌متر قابل تولید بود. واضح است که با افزایش دور کشنده در زمانی که دور اکسترودر ثابت است، قطر فیلامنت کاهش می‌یابد. به منظور مقایسه، فیلامنت‌های ABS نیز در این تحقیق تولید شدند. شکل 2 تجهیزات تولید فیلامنت را نشان می‌دهد.

برای آزمون‌های کششی و فشاری از دستگاه سنتام مدل STM-250 استفاده شده است. آزمون کشش و فشار به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM D638 type IV و ASTM D695 انجام شده است. سرعتهای آزمون کشش و فشار نیز به ترتیب 5 و 1/3 میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. آزمون دمای تغییر شکل حرارتی[2] که یک آزمون مکانیکی-حرارتی است، برای اندازه‌گیری خواص حرارتی قطعات چاپ شده انجام شده است.

Fig. 2 Equipment for filament production

شکل 2 تجهیزات تولید فیلامنت

این آزمون مطابق با استاندارد ASTM D648 و با تنش 1/82 مگاپاسکال و نرخ افزایش دمای 2 درجه سانتی‌گراد بر دقیقه انجام شده است. دمایی که در آن نقطه میانی نمونه به اندازه 0/25 میلی‌متر جابجا شود، به‌عنوان دمای تغییر شکل حرارتی گزارش شده است. آنالیز توزین حرارتی[3] نیز بر روی قطعات انجام شده است تا مقدار جرم باقی‌مانده از قطعات پرینت شده را با تغییر دما نشان دهد. این آزمون مطابق با استاندارد ASTM E1131 انجام شده است. در این آزمون 11/5 میلی‌گرم از مواد، از دمای محیط تا 800 درجه سانتی‌گراد با نرخ افزایش دمای 10 درجه سانتی‌گراد بر دقیقه در اتمسفر نیتروژن تحت حرارت قرار گرفتند. بخش پلیمری در اثر حرارت تجزیه شده و از بین می‌رود و جرم سرامیک باقی‌مانده اندازه‌گیری می‌شود. برای چاپ سه بعدی قطعات از چاپگر سه بعدی کوانتوم استفاده شده است. در ابتدا از نازل‌هایی به قطر 0/4 و 0/6 میلی‌متر استفاده شد. اما این فیلامنت‌ها قابل اکسترود شدن نبودند. زیرا به دلیل ویسکوزیته بالای فیلامنت‌ها در سر نازل نیاز به نیروی فشاری بیشتری است. اما این فیلامنت‌ها به دلیل تردی بالایی که دارند تحمل این نیرو را نداشته و در حین چاپ، می‌شکنند. برای کاهش مقاومت در برابر عبور مذاب از دهانه خروجی نازل، می‌بایست قطر نازل افزایش یابد. در نهایت از نازلی با قطر 0.8 میلی‌متر در آزمایش‌ها استفاده شد. ابتدا فایل سه بعدی نمونه-های آزمون کشش و فشار مطابق با ابعاد استانداردهای مربوطه با پسوند stl با نرم افزار کتیا طراحی شده و سپس به نرم افزار Cura برای تهیه G-code داده می‌شود. متغیرهای چاپ سه بعدی در جدول 3 آمده است. در شکل 3 نمونه‌های چاپ شده آزمون‌های کششی و فشاری نشان داده شده است.

[1] Melt flow index (MFI)
[2] Heat deflection temperature: HDT
[3] Thermogravimetric analysis (TGA)

جدول 3 پارامترهای تنظیم شده برای چاپ سه بعدی

Table 3 Adjusted paramters for 3D printing

ضخامت لایه (mm)	0/2
چگالی پر شدن (%)	100
سرعت چاپ (mm/s)	30
دمای نازل (°C)	240
قطر نازل (mm)	0/8

Fig. 3 Printed specimens of tensile and compression tests

شکل 3 نمونه‌های چاپ شده آزمون‌های کشش و فشار

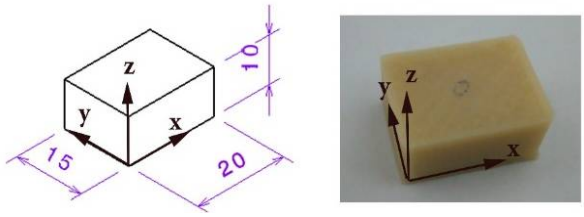

Fig. 4 Dimensions of specimen and directions for measurement of shrinkage (dimensions are in mm)

شکل 4 ابعاد نمونه و جهات برای اندازه‌گیری انقباض (ابعاد به میلی‌متر هستند)

برای بررسی ریز ساختار قطعات چاپ شده، از روش عکسبرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی[1] استفاده شد. جهت شکستن نمونه‌ها از نیتروژن مایع استفاده شد تا قطعه بصورت ترد شکسته شود و تخلخل‌های داخلی تحت تاثیر قرار نگیرد. آزمون سختی نیز به منظور بررسی اثر افزودن پودر سرامیک در قطعات چاپ شده مطابق با استاندارد ASTM D2240 انجام شد. انقباض ابعادی در سه جهت مختلف x، y و z برای نمونه‌های مکعب مستطیل به ابعاد 10×15×20 میلی‌متر انجام شده است. شکل 4 ابعاد نمونه و جهات اندازه‌گیری را نشان می‌دهد.

درصد انقباض خطی S_l از رابطه (3) به دست می‌آید:

$$S_l = \frac{l_1 - l_2}{l_1} \times 100 \qquad (3)$$

که در آن l_1 طول طراحی شده و l_2 طول چاپ شده قطعه (بعد از انقباض) می‌باشد که با کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شده است. برای اندازه‌گیری اعوجاج نیز از نمونه‌های چاپ شده مکعب مستطیلی به ابعاد 4×12×65 میلی‌متر استفاده شد. یک طرف نمونه‌ها توسط گیره‌ای مهار شده و مقدار بالاآمدگی انتهای دیگر بوسیله کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شده و این عدد به‌عنوان معیاری از اعوجاج گزارش می‌شود. شکل 5 روش اندازه‌گیری اعوجاج را نشان می‌دهد.

4- نتایج و بحث

با افزایش درصد حجمی پودر سرامیک، ویسکوزیته و در نتیجه شاخص جریان مذاب کاهش می‌یابد. نتایج حاصله از آزمون اندازه‌گیری شاخص جریان مذاب که در نمودار شکل 6 آمده است، این را نشان می‌دهد. فیلامنت‌های کامپوزیتی تولید شده نوساناتی در قطر داشته‌اند. برای نشان دادن این نوسانات، در فواصل 30 سانتیمتری از طول فیلامنت قطر فیلامنت اندازه‌گیری شده که در نمودار شکل 7 نشان داده شده است.

همان‌طور که مشخص است با افزایش درصد حجمی پودر سرامیک، نوسانات در قطر فیلامنت کاهش می‌یابد. پلاستیک‌های خالص نسبت به پلاستیک‌های پر شده به تغییرات دمایی و فشاری در داخل اکسترودر حساس‌ترند. به دلیل خاصیت ویسکوالاستیک[2] پلیمرها و پدیده متورم شدن[3] هنگامی که از روزنه دای خارج می‌شوند قطر آن‌ها افزایش می‌یابد. اما برای پلیمرهای پر شده از آنجایی که درصد پلیمر کمتری برای متورم شدن وجود دارد مقدار تورم پایینتر بوده و در نتیجه تغییرات قطر فیلامنت کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است در قطر فیلامنت بالاتر از 1/85 میلی‌متر عملیات چاپ امکان پذیر نبود. زیرا قبل از ورود به نازل گرم، در قسمت انتهای داغ فیلامنت گیر می‌کرد. میانگین قطرهای به دست آمده در نمودار شکل 7 در نرم افزار Cura اعمال شده تا قطعه بر اساس قطر واقعی فیلامنت چاپ شود و در نتیجه دقت ابعادی قطعه افزایش یابد. همچنین در شکل 7 فیلامنت‌های تولید شده Al10-ABS90 نشان داده شده است. شکل‌های 8 و 9 به ترتیب نمودارهای تنش- کرنش در آزمون‌های کششی و فشاری را برای قطعات چاپ شده نشان می‌دهد.

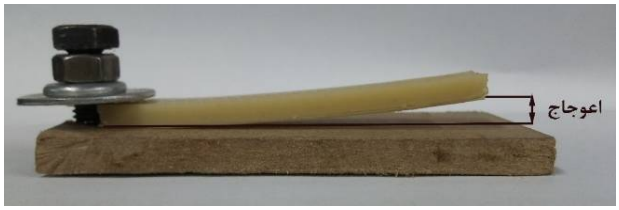

Fig. 5 Procedure of measurement of warpage

شکل 5 روش اندازه‌گیری اعوجاج

[1] Scanning electron microscope (SEM)

[2] Viscoelastic

[3] Swelling

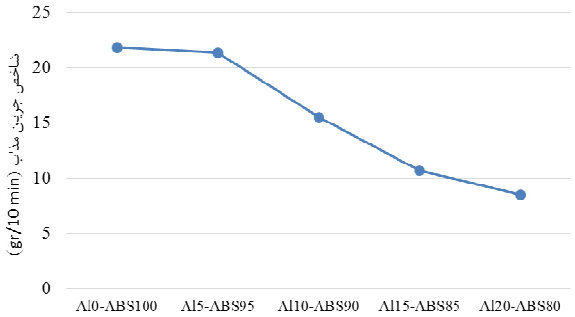

Fig. 6 Melt flow indexes obtained from pure and composite materials

شکل 6 شاخص‌های جریان مذاب به دست آمده از مواد خالص و کامپوزیتی

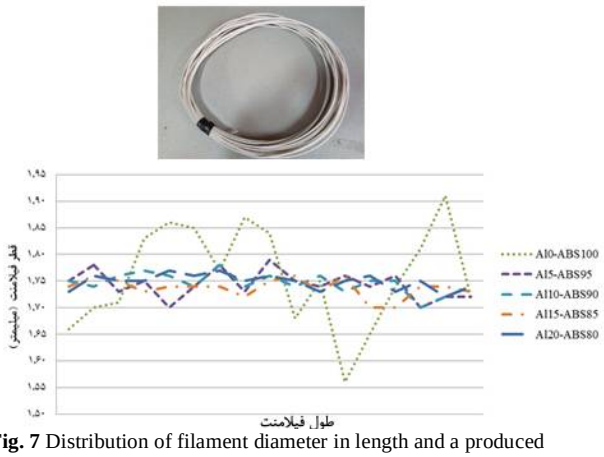

Fig. 7 Distribution of filament diameter in length and a produced filament by single screw extruder

شکل 7 توزیع قطر فیلامنت در طول آن و یک فیلامنت تولید شده با اکسترودر تک پیچه

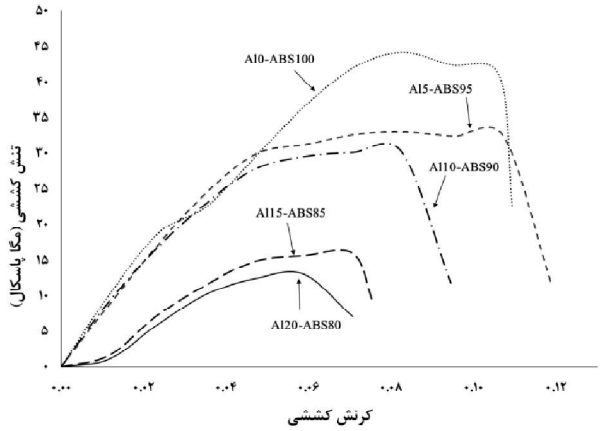

Fig. 8 Stress-strain diagram in tensile test

شکل 8 نمودار تنش-کرنش در آزمون کششی

از نمودارهای اشکال 8 و 9 می‌توان مقادیر استحکام‌ها و مدول‌ها را استخراج نمود که در شکل‌های 10 و 11 نشان داده شده است. همان‌طوری که مشخص است با افزودن پودر سرامیک مقادیر استحکام و مدول کششی کاهش می‌یابد. اما استحکام و مدول فشاری با افزودن پودر سرامیک تا 10 درصد کاهش یافته و پس از آن افزایش می‌یابد. البته این مقادیر هنوز از نمونه خالص Al0-ABS100 پایینتر هستند. دلیل این کاهش استحکام را می‌توان به وجود حفره‌های ریز و عدم چسبندگی ناکافی لایه‌ها به همدیگر نسبت داد. با افزودن پودر سرامیک، قابلیت چسبندگی لایه‌ها و رشته‌ها به همدیگر کاهش می‌یابد. در شکل 12 این حفره‌ها را برای قطعات کامپوزیتی می‌توان مشاهده نمود. در حالیکه در نمونه خالص، ریز ساختار عاری از تخلخل می‌باشد. نتایج حاصل از پژوهش محققان دیگر نیز با نتایج این تحقیق مطابقت دارد [11، 12].

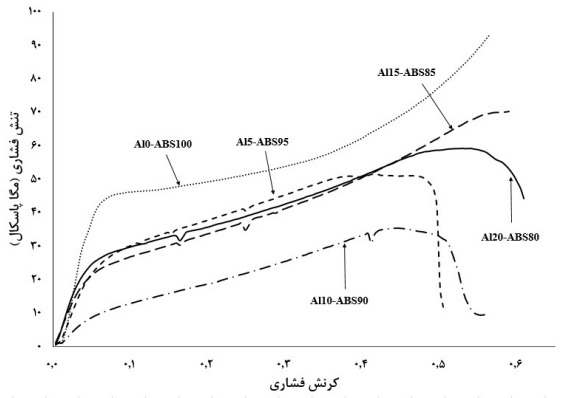

Fig. 9 Stress-strain diagram in compressive test

شکل 9 نمودار تنش-کرنش در آزمون فشاری

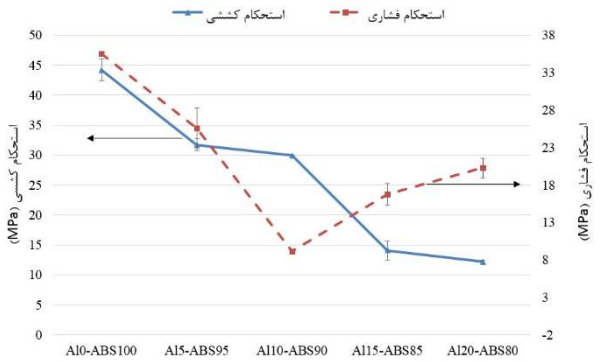

Fig. 10 Tensile and compressive strengths

شکل 10 استحکام‌های کششی و فشاری

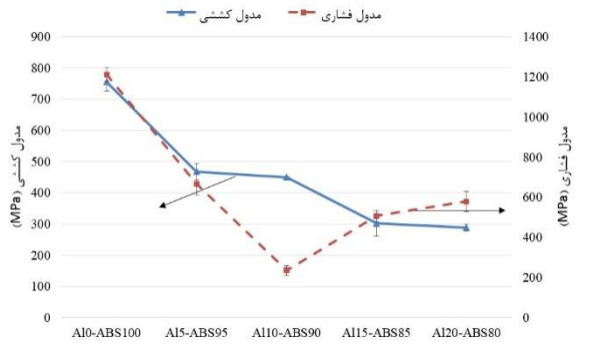

Fig. 11 Tensile and compressive moduli

شکل 11 مدول‌های کششی و فشاری

نتایج آزمون تغییر شکل حرارتی برای نمونه‌های خالص، 10 و 20 درصد حجمی پودر سرامیک در نمودار شکل 13 آمده است. با توجه به اینکه آلومینا ماده‌ای سرامیکی و مقاوم به حرارت است انتظار می‌رفت که در نمونه‌های کامپوزیتی دارای آلومینا، دمای تغییر شکل حرارتی افزایش می‌یافت. اما می‌بایست ذکر شود که ماهیت این آزمون حرارتی-مکانیکی است. یعنی نمونه تحت خمش سه نقطه‌ای در دمای بالا قرار دارد. اما همان‌طوری که بیان شد به دلیل وجود حفره‌ها، نمونه‌های کامپوزیتی خواص مکانیکی پایین‌تری دارند. بنابراین می‌توان استنباط کرد که خواص مکانیکی بر حرارتی غلبه کرده و در نهایت منجر به کاهش دمای تغییر شکلی می‌شود.

نتایج آنالیز توزین حرارتی برای دو ماده خالص و پر شده با 20 درصد حجمی سرامیک در شکل 14 آمده است. همان‌طوری که مشخص است شروع تجزیه شدن برای هر دو ماده حدود 386 درجه سانتی‌گراد بوده که نشان دهنده تجزیه شدن بخش پلیمری آن یعنی ABS می‌باشد. شیب نمودار تجزیه شدن برای کامپوزیت کمتر بوده که نشان دهنده سرعت تجزیه شدن پایینر ABS موجود در ماده کامپوزیتی است. این مورد به تقابل فیزیکی و شیمیایی بین پودر سرامیک و بخش پلیمری آن ارتباط دارد [13]. در دمای 800 درجه سانتی‌گراد تمامی ماده ABS در نمونه Al0-ABS100 از بین رفته است. در حالی‌که در ماده کامپوزیتی، مقدار 39/4 درصد سرامیک باقی مانده است. این درصد با درصد وزنی 43/1 محاسبه شده در جدول 2، حدود 8 درصد اختلاف دارد. کومار و همکارانشان [14] نیز نتایجی مشابه با این تحقیق را ارائه کردند.

نتایج آزمون سختی در شکل 15 آمده است. همان‌طوری که مشخص است برخلاف انتظار با افزایش پودر سرامیک به فیلامنت، بطور کلی سختی کاهش یافت. با افزایش آلومینا تا 15 درصد حجمی، سختی 27 درصد کاهش یافته است و پس از آن سختی کمی افزایش یافت.

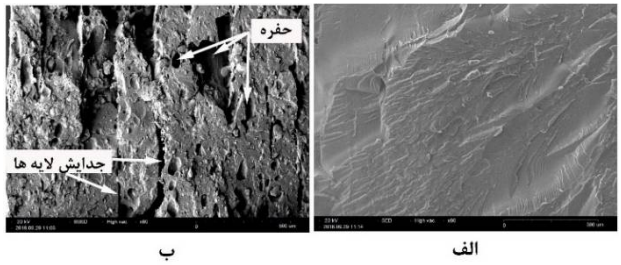

Fig. 12 SEM pictures of a) Al0-ABS100, b) Al5-ABS95

شکل 12 تصاویر SEM از نمونه‌های الف) Al0-ABS100، ب) Al5-ABS95

این کاهش سختی می‌تواند ناشی از وجود حفره‌ها در قطعات کامپوزیتی باشد. زیرا سوزن اندازه‌گیری دستگاه سختی سنج، در این حفره‌ها وارد شده و در نتیجه مقدار نفوذ بالاتری (سختی کمتری) را نشان دهد.

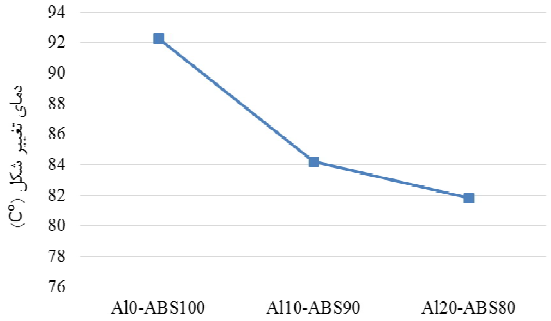

Fig. 13 Results of heat deflection temperature test

شکل 13 نتایج آزمون دمای تغییر شکل حراتی

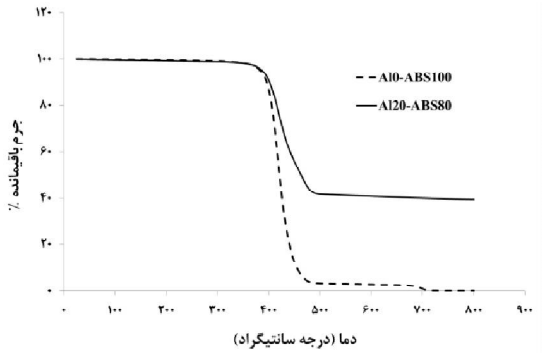

Fig. 14 TGA analysis for pure and composite materials

شکل 14 نمودار آنالیز توزین حرارتی برای ماده خالص و کامپوزیتی

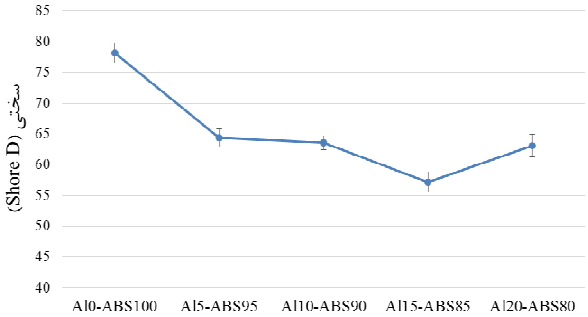

Fig. 15 Results of hardness test

شکل 15 نتایج آزمون سختی

انقباض جهت دار نمونه‌ها در شکل 16 آمده است. برای قطعات چاپ شده سه بعدی همانند فرایند تزریق پلاستیک انقباض ناهمسانگرد است. در فرایند تزریق پلاستیک انقباض مواد در جهت جریان و عمود بر جریان با هم برابر نیستند. از آنجایی که در این تحقیق الگوی منظمی برای جهت پرینت در نظر گرفته نشده است بنابراین نمی‌توان روی مقدار انقباض‌ها و تفاوت‌های آنها نظری ارائه کرد.

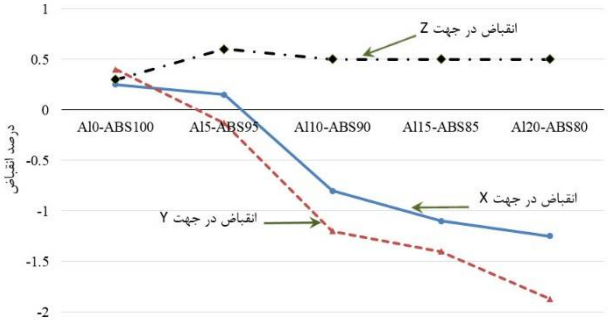

Fig. 16 Results of dimensional shrinkage of printed parts

شکل 16 نتایج انقباض ابعادی قطعات چاپ شده

اما بطور کلی انقباض ناهمسانگرد مشاهده می‌شود. از آنجایی که انقباض مواد سرامیک در دمای فرایندی بسیار ناچیز است، با افزایش درصد سرامیک مقادیر انقباض قطعات کامپوزیتی کاهش می‌یابد.

در جهت ضخامت در همه نمونه‌ها، کاهش ارتفاع وجود داشته اما در جهات صفحه‌ای xy در برخی نمونه‌ها انقباض منفی به دست آمد. انقباض منفی نشان دهنده انبساط نمونه در آن جهت است. نویسندگان دلیل انبساط طول را در ایجاد حفره داخلی دانسته‌اند. همان طور که مشخص است مقدار حجم استفاده شده برای تمامی قطعات یکسان است. زیرا طول فیلامنت مشخصی برای چاپ قطعات مصرف شده است. اما حفره‌ها حجمی از قطعه را اشغال کرده و باعث افزایش طول در برخی از جهات می‌شود. در نتیجه، می‌بایست چگالی تجربی کاهش یابد. برای اثبات این فرضیه، درصد حجمی تخلخل در نمونه بصورت تجربی اندازه‌گیری شد. ابتدا چگالی تجربی قطعه $(\rho_{exp})_c$ با روش ارشمیدس اندازه‌گیری شده و سپس با استفاده از رابطه (4) کسر حجمی تخلخل V_v محاسبه می‌شود [10].

$$V_v = \left[1 - \frac{(\rho_{exp})_c}{(\rho_{th})_c}\right] \quad (4)$$

نتایج چگالی تئوری و اندازه‌گیری شده در جدول 4 و درصدهای تخلخل محاسبه شده در نمودار شکل 16 نشان داده شده است. همان‌طوری که مشخص است با افزایش درصد حجمی سرامیک، مقادیر تخلخل نیز افزایش یافته است. این تخلخل‌ها نشان دهنده عدم چسبندگی مناسب فیلامنت‌های ذوب شده به همدیگر می‌باشد. این امر تأیید دیگری بر کاهش خواص مکانیکی که در آزمون‌ها به دست آمد، نیز می‌باشد.

اعوجاج در یک قطعه پلیمری، ناشی از اختلاف در انقباض بین نواحی مختلف قطعه می‌باشد. مقادیر اندازه‌گیری شده اعوجاج در شکل 17 آمده است. بطور کلی اعوجاج و بلند شدگی در گوشه‌های قطعات چاپ شده با ABS ایجاد می‌شود. دلیل این امر به نحوه انتقال حرارت فیلامنت مذاب در حین چاپ با محیط اطراف شامل بستر، لایه‌های زیرین و هوای محیط بر می‌گردد. کاملاً مشخص است که با افزایش درصد سرامیک اعوجاج کاهش می‌یابد. زیرا ضریب انبساط حرارتی مواد کامپوزیتی به دلیل وجود سرامیک، کمتر است. ضریب انبساط حرارتی پایینتر کامپوزیت نشان دهنده درصد انقباض پایینتر آن بوده و هر چه مقدار انقباض کمتر باشد تفاوت در انقباض‌ها کمتر و در نتیجه اعوجاج نیز کاهش می‌یابد [15].

جدول 4 چگالی‌های تئوری و اندازه‌گیری شده

Table 4 Theoretical and measured densities

نمونه	چگالی تئوری (gr/cm^3)	چگالی تجربی (gr/cm^3)
Al0-ABS100	1/04	1/03
Al5-ABS95	1/16	1/04
Al10-ABS90	1/29	1/06
Al15-ABS85	1/41	1/15
Al20-ABS80	1/52	1/22

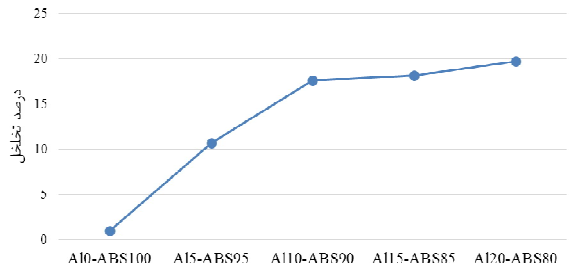

Fig. 16 Results of void contents

شکل 16 نتایج مقادیر تخلخل

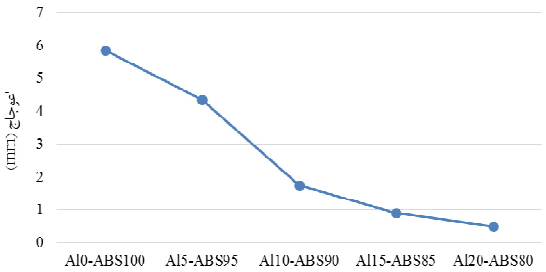

Fig. 17 Results of warpage measurement

شکل 17 نتایج اندازه‌گیری اعوجاج

5- نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق تولید فیلامنت‌های کامپوزیتی سرامیکی، بکارگیری آنها در چاپ سه بعدی و بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی قطعات پرینت شده می‌باشد. در این تحقیق فیلامنت‌های کامپوزیتی با 5، 10، 15 و 20 درصد حجمی پودر

سرامیک تولید شدند. قابلیت چاپ این فیلامنت‌ها نسبتاً خوب بوده ولی دارای مشکلاتی مانند تردی مخصوصاً در درصدهای بالا نیز می‌باشد. یکنواختی قطر فیلامنت تولید شده برای مواد کامپوزیتی بهتر از مواد خالص بود. با افزایش درصد سرامیک در فیلامنت، مشخصات مکانیکی شامل خواص کششی، فشاری و سختی کاهش یافته است که به وجود حفره‌ها در قطعه چاپ شده بر می‌گردد. عکسبرداری الکترونی و اندازه‌گیری تخلخل در قطعه چاپ شده، این موضوع را تأیید می‌کند. آنالیز توزین حرارتی نیز نشان می‌دهد که قطعات کامپوزیتی پایداری حرارتی بیشتری دارند. اما اعوجاج قطعه که یکی از عوامل تاثیر گذار بر دقت ابعادی است، با فیلامنت‌های دارای پودر سرامیک کاهش چشمگیری داشته است. بنابراین در کاربردهایی که نیاز به دقت ابعادی بالاتری است، این فیلامنت‌ها به دلیل کاهش اعوجاج مناسب هستند.

6- تقدیر و تشکر

این تحقیق از پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد دفاع شده در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل استخراج شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های مالی دانشگاه و اختصاص گرنت به شماره BNUT/391012/96 برای پیشبرد این پژوهش تشکر و قدردانی نمایند.

7- مراجع

[1] Dawoud M, Taha I, Ebeid SJ. Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques. Journal of Manufacturing Processes. 2016; 21:39-45.

[2] Zhong W, Li F, Zhang Z, Song L, Li Z. Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling. Materials Science and Engineering: A. 2001; 301(2):125-30.

[3] Masood SH, Song WQ. Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modelling. Materials & Design. 2004;25(7):587-94.

[4] Song WQ, Masood SH. Thermal characteristics of a new metal/polymer material for FDM rapid prototyping process. Assembly Automation. 2005; 25(4):309-15.

[5] Torrado Perez AR, Roberson DA, Wicker RB. Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials. Journal of Failure Analysis and Prevention. 2014; 14(3):343-53.

[6] Torrado AR, Shemelya CM, English JD, Lin Y, Wicker RB, Roberson DA. Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing. Additive Manufacturing. 2015; 6:16-29.

[7] Danforth SC, McNulty TF, Bandyopadhyay A, Safari A, Mohammadi F, Shanefield DJ. Development of a binder formulation for fused deposition of ceramics. Rapid Prototyping Journal. 1998;4(4):144-50.

[8] Scheithauer U, Schwarzer E, Richter H-J, Moritz T. Thermoplastic 3D Printing—An Additive Manufacturing Method for Producing Dense Ceramics. International Journal of Applied Ceramic Technology. 2015; 12(1):26-31.

[9] Nötzel D, Eickhoff R, Hanemann T. Fused Filament Fabrication of Small Ceramic Components. Materials (Basel, Switzerland). 2018; 11(8):1463.

[10] Kaw AK. Mechanics of Composite Materials Taylor & Francis; 2006. 457 p.

[11] Kar KK, Srivastava S, Rahaman A, Nayak SK. Acrylonitrile-butadiene-styrene nanocomposites filled with nanosized alumina. Polymer Composites. 2008;29(5):489-99.

[12] Kumar N, Jain PK, Tandon P, Pandey PM. Additive manufacturing of flexible electrically conductive polymer composites via CNC-assisted fused layer modeling process. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2018; 40(4):175.

[13] Xianfeng Y, Hehan X, Qinglong H, Zhe Z, Xiewen X, Li Z, et al. Study of thermal degradation mechanism of binders for ceramic injection molding by TGA-FTIR. Ceramics International. 2019; 45(8):10707-17.

[14] Kumar V, RamKumar J, Aravindan S, Malhotra SK, Vijai K, Shukla M. Fabrication and characterization of ABS nano composite reinforced by nano sized alumina particulates. International Journal of Plastics Technology. 2009; 13(2):133-49.

[15] Fitzharris ER, Watanabe N, Rosen DW, Shofner ML. Effects of material properties on warpage in fused deposition modeling parts. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018; 95(5):2059-70.