



## بررسی اثر متغیرهای فرآیند بر استحکام کامپوزیت‌های پلیمری-فلزی ساخته شده با چاپگر سه بعدی FDM

مجتبی نبی‌پور<sup>1</sup>، امیرحسین بهروش<sup>2\*</sup>، بهنام آخوندی<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی 14115-111، amirhb@modares.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 آبان 1395

پذیرش: 25 آذر 1395

ارائه در سایت: 15 دی 1395

کلید واژگان:

چاپگر سه بعدی

FDM فرآیند

کامپوزیت‌های پلیمری-فلزی

متغیرهای چاپ

### چکیده

در این مقاله به بررسی اثر متغیرهای چاپ بر استحکام کششی قطعات کامپوزیتی پلیمری-فلزی ساخته شده با چاپگر سه بعدی FDM پرداخته شده است. در سال‌های اخیر استفاده از چاپگرهای سه بعدی در صنایع گوناگون روزافزون بوده و فرآیند FDM یکی از متداول‌ترین روش‌های تولید قطعه در این حوزه می‌باشد. با این‌که پژوهش‌های گسترده‌ای در این بخش انجام شده ولی در زمینه توسعه مواد اولیه و استفاده از آن‌ها در فرآیند FDM پژوهش‌های محدودی صورت گرفته است. در این تحقیق قطعات تولید شده از جنس کامپوزیت پلیمری-فلزی با درصد وزنی ثابت 25% پودر فلز بوده و از پودر مس به‌عنوان جزء فلزی و از گرانول ABS به عنوان پلیمر استفاده شده است. رشته‌های کامپوزیتی در یک فرآیند جداگانه تولید شده و متغیرهای بهینه آن گزارش شده است. چهار متغیر قطر نازل، ارتفاع لایه، الگوی پرشدن و دمای نازل در سه سطح برای بررسی انتخاب شده و جهت تعیین میزان اثر هر متغیر و یافتن سطوح بهینه برای هر کدام، از روش تاگوچی استفاده گردید. شاخص اثر اصلی، نسبت سیگنال به نویز و تحلیل واریانس به‌منظور بررسی متغیرها به کار گرفته شد و سطوح بهینه آن‌ها محاسبه گردید. در نهایت قطعه بهینه براساس تحلیل‌های روش تاگوچی ساخته شد و برای تایید آزمایش‌ها و نتایج مورد استفاده قرار گرفت.

## Effect of Printing Parameters on Mechanical Strength of Polymer-Metal Composites Printed via FDM 3D Printer

Mojtaba Nabipour, Amir Hossein Behravesh\*, Behnam Akhondi

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

\* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, amirhb@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 08 November 2016  
Accepted 15 December 2016  
Available Online 04 January 2017

Keywords:  
3D Printer  
FDM Process  
Polymer-Metal Composites  
Print Parameters

### ABSTRACT

This paper presents an experimental study on the effects of printing parameters on the tensile strength of the polymer-metal composites printed via Fused Deposition Modeling (FDM) technique. In the recent years, 3D printer systems have been widely employed in various industries. FDM is one of the most widely used 3D printer systems worldwide due to its simplicity and lower cost. Although extensive research works have been carried out in the area of 3D printing, less efforts have been reported in developing new materials and their use in FDM process. The materials utilized in this study consisted of Cu particles in ABS polymeric matrix with a constant 25 wt.% of metal powder. The filament production line was implemented to adapt with the manufacturing process. The printing variables were selected as nozzle (orifice) diameter, layer height, fill pattern and nozzle temperature that were examined in three levels. Taguchi method was employed to find the optimal FDM process parameters. The main effect, signal-to-noise ratio and analysis of variance were employed to analyze the process parameters in order to achieve optimum tensile strength of the composite material specimens. Finally, the specimens were produced at the optimized parameters to confirm the tests and method.

### 1- مقدمه

روش FDM<sup>1</sup> گسترده‌ترین روش در بخش نمونه‌سازی سریع می‌باشد. دلایل اصلی افزایش استفاده از روش FDM و محبوبیت آن را می‌توان در ساده بودن فرآیند، قابلیت اطمینان و توانایی تولید قطعات پیچیده از مواد ترموپلاستیک عنوان کرد. عموماً در روش FDM از پلاستیک‌های گرمانرمی مانند ABS<sup>2</sup> و PLA<sup>3</sup> استفاده می‌شود. این فرآیند به‌طور خلاصه به صورت رسوب گذاری

از زمان معرفی اولین دستگاه‌های تجاری نمونه‌سازی سریع در سال 1986، طیف گسترده‌ای از این ماشین‌ها جنبه تجاری پیدا کرده و بسیاری از سیستم‌های جدید در نقاط مختلف جهان ظهور پیدا کرده‌اند. نمونه‌سازی سریع به عنوان یک تکنولوژی کلیدی مطرح شده که موجب کوتاه شدن زمان توسعه محصولات از حیث ساخت نمونه اولیه می‌شود [1].

<sup>1</sup> Fused deposition modeling

<sup>2</sup> Acrylonitrile butadiene styrene

<sup>3</sup> Polylactic acid

### Please cite this article using:

M. Nabipour, A. H. Behravesh, B. Akhondi, Effect of Printing Parameters on Mechanical Strength of Polymer-Metal Composites Printed via FDM 3D Printer, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 145-150, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بایاهای مواد اکستروژن شده از طریق یک نازل می‌باشد که نازل از رشته‌های پلاستیکی گرم‌انرم تغذیه می‌شود. قاعده کلی در عملکرد روش FDM این پتانسیل بالقوه را برای استفاده از مواد با قابلیت‌های متنوع و نو جهت استفاده در صنایع گوناگون نشان می‌دهد. برای این کار لازم است مواد اولیه جهت این کار به رشته‌های مناسب با قطر و استحکام کافی تبدیل شوند [2].

با استفاده از مواد جدید در ساخت رشته‌ها می‌توان کاربرد قطعات تولید شده در روش FDM را گسترش داد. در طی سال‌های اخیر تحقیقات محدودی در جهت توسعه مواد جدید برای فرآیند FDM انجام شده است. محققان در دانشگاه راتگرز<sup>1</sup> جزء اولین افرادی بودند که در زمینه توسعه استفاده از مواد فلزی و سرامیکی برای فرآیند FDM در جهت بهبود خواص قطعات تولید شده تلاش کردند [4,3].

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که خواص قطعات تولید شده با روش FDM، تابعی از متغیرهای فرآیند بوده که می‌توان با تنظیم صحیح آن‌ها به بهبود خواص قطعه تولیدی کمک کرد. از آن‌جا که خواص مکانیکی قطعات تولید شده بسیار مهم هستند لذا مطالعه اثر متغیرهای فرآیند بر روی خواص مکانیکی بسیار ضروری خواهد بود، بنابراین بهبود خواص با انتخاب تنظیمات و متغیرهای مناسب امکان‌پذیر است [5].

در سال 2003 مسعود و همکاران جزء نخستین افرادی بودند که موفق به تولید قطعات کامپوزیتی پلیمری-فلزی با استفاده از چاپگر سه بعدی FDM شدند. قطعات ساخته شده از جنس آهن/نایلون بوده و برای تولید اینسرت قالب‌های تزریق پلاستیک مورد استفاده قرار گرفتند [2]. در سال 2011 نیکزاد و همکاران به بررسی خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری-فلزی پرداختند که در این پژوهش از فلز مس و پلیمر ABS استفاده شد [6]. در سال 2004 لی و همکاران به بهینه‌سازی متغیرهای چاپ قطعات ساخته شده از جنس ABS با چاپگر سه بعدی FDM پرداختند. در این پژوهش متغیرهای همپوشانی بین رشته‌ها، زاویه رشته‌ها، عرض رشته‌ها و ضخامت لایه‌ها مورد بررسی قرار گرفته و از روش تاگوچی<sup>2</sup> برای بهینه‌سازی عملکرد الاستیک قطعات استفاده شد [7]. در سال 2009 کومار و همکاران هم به بهینه‌سازی متغیرهای چاپ قطعات تولید شده با روش FDM پرداختند. در این پژوهش متغیرهای ارتفاع لایه‌ها، جهت‌گیری قطعه روی میز، عرض رشته‌ها، زاویه رشته‌ها و همپوشانی بین رشته‌ها بر روی پلاستیک ABS مورد بررسی قرار گرفته و از الگوریتم جستجوی غذای باکتری‌ها<sup>3</sup> جهت بهینه‌سازی استحکام کششی نمونه‌ها استفاده شد [5]. در سال 2014 رایگانی و همکاران نیز با بررسی متغیرهای جهت‌گیری قطعات، زاویه رشته‌ها، عرض رشته و همپوشانی بین رشته‌ها و استفاده از الگوریتم‌های روش گروهی برای داده‌های دسته‌بندی شده<sup>4</sup> و تکامل تفاضلی<sup>5</sup> به بهینه‌سازی استحکام کششی قطعات ABS تولید شده با روش FDM پرداختند [8].

پس از آماده‌سازی مواد اولیه مرحله بعدی استفاده از خط تولید رشته است. "شکل 1" نمای کلی خط تولید رشته را نشان می‌دهد. این خط تولید شامل دستگاه اکستروژر، حدیده تولید فیلامنت، حمام آب خنک کننده و دستگاه کشنده می‌باشد. در این پژوهش از دستگاه اکستروژر دو پیچچه همسو-گرد آزمایشگاهی با ماردون‌هایی به قطر 40 mm و توان 5.5 KW استفاده شد. مواد اولیه پس از مرحله آمیخته‌سازی خشک، وارد دستگاه اکستروژر شده و با افزایش دما و نرم شدن از حدیده دستگاه به صورت رشته خارج می‌شود. پس از خروج مواد، رشته توسط کشنده از میان حمام آب گذر کرده تا هم خنک شده و هم قطر مناسب به دست آید. قطر مناسب برای رشته‌های کامپوزیتی جهت استفاده در فرآیند FDM و دستگاه چاپگر سه بعدی استفاده شده در این تحقیق 1.7 mm تا 1.8 mm می‌باشد. "شکل 2" نمای شماتیک حدیده تولید رشته، "شکل 3" نمونه رشته‌های تولید شده و جدول 1 متغیر-های بهینه تولید را نشان می‌دهد.

### 3- طراحی آزمایش

#### 3-1- دیدگاه تاگوچی

روش تاگوچی یک تکنیک شناخته شده است که به روش سیستماتیک و موثر را برای طراحی بهینه فراهم می‌کند. این روش به‌طور گسترده برای طراحی محصول و بهینه‌سازی فرآیند استفاده می‌شود. این امر به خاطر مزایای روش تاگوچی در طراحی آزمایش‌ها، شامل ساده‌سازی برنامه آزمایش و امکان‌سنجی مطالعه برهم‌کنش بین متغیرهای مختلف می‌باشد [9]. تعداد آزمایش‌های کمتر به معنی کاهش زمان و هزینه می‌باشد. این موضوع مخصوصاً در مورد فرآیندهای نمونه‌سازی سریع که نسبتاً هزینه بالایی دارند صادق است. تاگوچی برای آزمایش‌ها، یک آرایه متعامد از متغیرها و سطوح آن‌ها را ارائه می‌دهد. بر طبق روش تاگوچی فقط حداقل تعداد آزمایش‌های لازم انجام می‌شود [10].

#### 3-2- انتخاب متغیرهای فرآیند

برای این تحقیق چهار متغیر قطر نازل، ارتفاع لایه، الگوی پرشدن و دمای نازل در سه سطح انتخاب شد. جهت انتخاب یک آرایه متعامد مناسب برای آزمایش بایستی تمامی درجات آزادی محاسبه شوند. تعداد درجات آزادی یک کمیت با ارزش است، زیرا کمینه تعداد شرایط رفتاری را تعیین می‌کند

### 2- فرآیند ساخت رشته‌های کامپوزیتی

دو پلاستیک گرم‌انرم ABS و PLA جزء اصلی‌ترین مواد مورد استفاده در روش FDM می‌باشند. هدف از ساخت کامپوزیت‌های پلیمری-فلزی و اضافه کردن پودر فلز به پلاستیک‌های گرم‌انرم مانند ABS افزایش قابلیت رسانایی حرارتی و الکتریکی به منظور افزایش کارایی و عملکرد قطعات ساخته شده

<sup>1</sup> Rutgers

<sup>2</sup> Taguchi

<sup>3</sup> Bacterial Foraging Technique

<sup>4</sup> Group method for data handling

<sup>5</sup> Differential evolution

<sup>6</sup> Novudor

<sup>7</sup> Paraffin wax

<sup>8</sup> Stearic acid

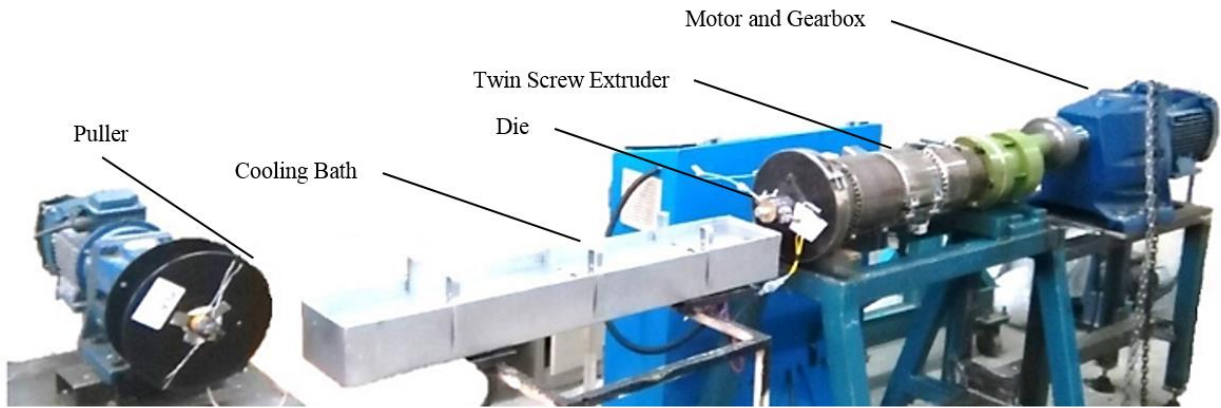


Fig. 1 Filament production line

شکل 1 نمای کلی خط تولید رشته

جدول 1 متغیرهای بهینه تولید رشته

Table 1 Optimum parameters for filament production

قطر رشته (mm)	سرعت کشنده (rpm)	سرعت اکسترودر (rpm)	قطر نازل حدیده (mm)	دمای نازل حدیده (°C)
1.7-1.8	8	8	3	215

و برای هر متغیر برابر با یک واحد کمتر از تعداد سطوح می‌باشد [11]. به عنوان مثال برای یک متغیر با سه سطح، دو درجه آزادی وجود دارد. برطبق نظر تاگوچی آرایه‌هایی برای انتخاب مناسب هستند که تعداد سطوح آن حداقل برابر و یا بزرگتر از درجه‌های آزادی لازم باشد [12]. در این تحقیق چهار متغیر در سه سطح بررسی شده‌اند پس در مجموع هشت درجه آزادی وجود دارد که با توجه به کمینه کردن آزمایش‌ها گزینه پیشنهادی روش تاگوچی آرایه متعامد L9 می‌باشد، چون هر آزمایش 3 بار تکرار شده در مجموع 27 آزمایش انجام شده است. لازم به ذکر است که بقیه متغیرهای فرآیند ثابت در نظر گرفته شده است. جدول 2 متغیرهای مورد بررسی و سطوح آن‌ها، و جدول 3 آرایه متعامد انتخاب شده بر اساس روش تاگوچی را نشان می‌دهد.

جدول 2 متغیرها و سطوح

Table 2 Parameters and levels

متغیرها	سطوح 1	سطوح 2	سطوح 3
قطر نازل (mm)	0.5	1	1.5
ارتفاع لایه (mm)	0.1	0.2	0.3
الگوی پر شدن	+45/-45	0/90	30/60
دمای نازل (°C)	230	240	250

جدول 3 آرایه متعامد استفاده شده برای آزمایش‌ها

Table 3 Experimental plan using orthogonal array

شماره قطعه	قطر نازل	ارتفاع لایه	الگوی پر شدن	دمای نازل
L1	1	1	1	1
L2	1	2	2	2
L3	1	3	3	3
L4	2	1	2	3
L5	2	2	3	1
L6	2	3	1	2
L7	3	1	3	1
L8	3	2	1	3
L9	3	3	2	1

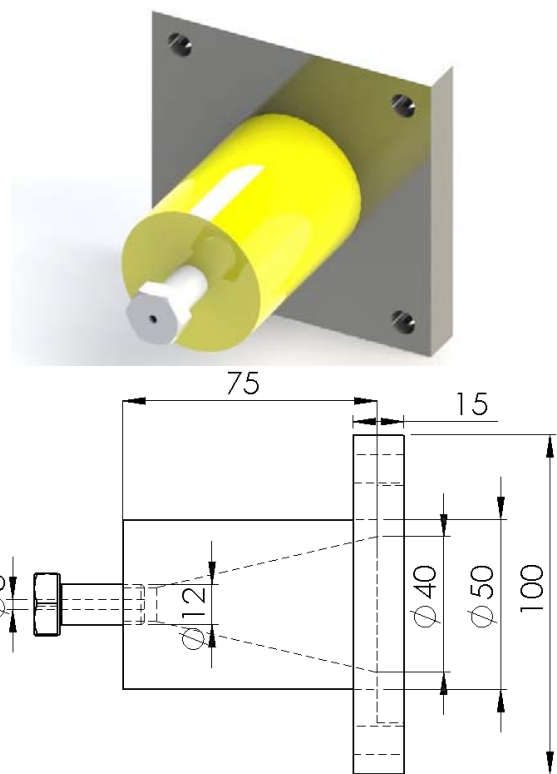


Fig. 2 Schematic illustration of filament production die

شکل 2 نمای شماتیک حدیده تولید رشته



Fig. 3 FDM filament produced from ABS-Cu composite material

شکل 3 نمونه رشته‌های کامپوزیتی تولید شده از جنس ABS/مس

#### 4- ساخت نمونه‌های کامپوزیتی

برای ساخت قطعات آزمون کشش از چاپگر سه بعدی کوانتوم<sup>1</sup> کلاس 2020 استفاده شد. در ابتدا فایل CAD<sup>2</sup> قطعات آزمون کشش براساس استاندارد ASTM-D638 نوع IV در نرم‌افزارهای طراحی ترسیم شده و سپس با پسوند STL<sup>3</sup> ذخیره می‌شود. فایل STL ورودی نرم‌افزار چاپگر سه بعدی بوده و پس از اعمال متغیرهای چاپ، خروجی آن فایل G-Code برای دستگاه چاپگر سه بعدی می‌باشد.

در این پژوهش از رشته‌های کامپوزیتی با 25% وزنی پودر فلز جهت ساخت نمونه‌ها و برای آزمون کشش نیز از دستگاه اینسترون<sup>4</sup> مدل 5500 استفاده شد. "شکل 4" نمونه قطعه ساخته شده با چاپگر سه بعدی و جدول 4 نتایج حاصل از آزمون کشش براساس میانگین استحکام کششی برای هر آزمایش را نشان می‌دهد.

برای بررسی اثر افزودن پودر مس به پلیمر ABS دو نمونه کشش مشابه از نظر متغیرهای چاپ و اندازه مورد بررسی قرار گرفتند، یک نمونه ABS خالص و نمونه دیگر دارای 25% ذرات مس می‌باشد. "شکل 5" نتایج حاصل از آزمون کشش برای این دو نمونه را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار با افزودن ذرات فلز استحکام حداکثر 15% و کرنش حداکثر 29% نسبت به ماده خالص کاهش یافته‌اند.

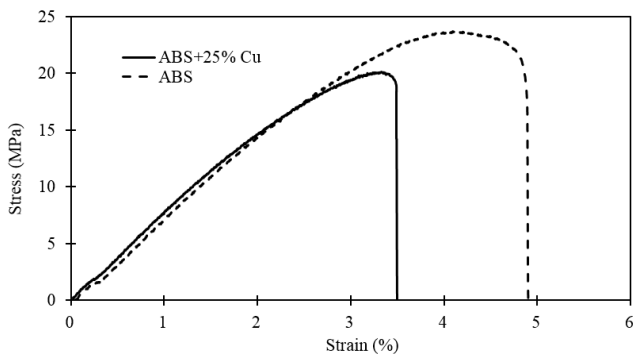


Fig. 5 Tensile test of pure ABS and composite specimen

شکل 5 نتایج آزمون کشش برای نمونه کامپوزیتی و ABS خالص

#### 5- بحث و نتیجه‌گیری

##### 5-1- اثر اصلی<sup>5</sup>

این تحلیل به منظور بررسی اثر متغیرها بر مقادیر خروجی انجام می‌شود. نتایج این تحلیل در "شکل 6" نشان داده شده است.

در بخش اول نتایج نشان دهنده این است که هرچه قطر نازل کوچکتر باشد استحکام کششی بیشتر خواهد بود. در هنگام چاپ نمونه‌ها، همپوشانی بین رشته‌ها یکسان در نظر گرفته شده است با این توضیح این نتایج نشان دهنده این است که با استفاده از نازل کوچکتر، قسمت‌های بیشتری از قطعه نسبت به نازل بزرگتر به خصوص در قسمت طول سنجه<sup>6</sup> پر می‌شود و میزان فضاهای خالی کمتر خواهد بود که این امر موجب اتصال بهتر رشته‌ها مخصوصاً بین پوسته و قسمت مرکزی شده و موجب افزایش استحکام خواهد شد.

در بخش دوم نتایج نشان دهنده این است که هر چه ارتفاع لایه‌ها کمتر باشد استحکام کششی بیشتر خواهد بود. با ثابت فرض کردن دمای نازل و دمای کف، هرچه ارتفاع لایه کمتر باشد، گرادیان دمایی در امتداد ضخامت لایه بیشتر شده و این موضوع موجب اتصال قویتر بین لایه‌ها می‌شود، در نتیجه استحکام افزایش می‌یابد [5].

در بخش سوم نتایج نشان می‌دهد الگوی پرشدن 0/90 نسبت به الگوهای 30/60 و 45/45+ استحکام بیشتری را حاصل می‌کند. به‌طور کلی هرچه رشته‌ها در امتداد طول نمونه باشند استحکام کششی بیشتری را نتیجه می‌دهند، با این‌که در الگوی پرشدن 0/90 رشته‌ها یکی در میان در راستای طول هستند با این وجود استحکام بیشتری را در راستای طول قطعه نسبت به دو الگوی دیگر نتیجه می‌دهند.

در بخش چهارم دمای نازل برای چاپ قطعات بررسی شده و نتایج نشان دهنده این است که در دمای 240 °C استحکام کششی بیشتری حاصل شده است. دمای 240 °C، دمای نازل رایج پیشنهاد شده برای چاپ قطعات ABS می‌باشد<sup>7</sup>. در دمای پایین‌تر گرانیروی ماده بیشتر شده و در یک ارتفاع لایه ثابت گرادیان حرارتی کاهش می‌یابد، در نتیجه اتصال بین لایه‌ها ضعیف‌تر می‌شود. در دمای بالاتر هرچند که گرادیان دمایی بیشتر می‌شود ولی با زیاد شدن سیالیت ماده خروجی از سر نازل، ماده به اندازه‌ای روان می‌شود که بر روی سطح قطعه پخش شده و اتصال ضعیف‌تری را ایجاد می‌کند، علاوه بر این دقت ابعادی قطعه نیز در اینجا کاهش می‌یابد.

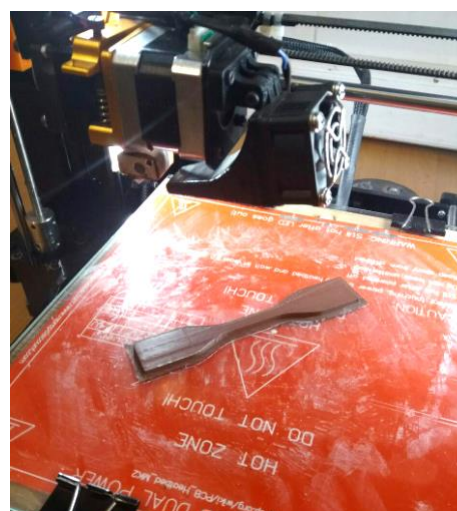


Fig. 4 Composite specimen produced by 3D printer

شکل 4 نمونه قطعه ساخته شده با چاپگر سه بعدی

جدول 4 میانگین استحکام کششی

Table 4 Average of tensile strength

استحکام کششی (MPa)	شماره آزمایش
25.2	L1
30.39	L2
17.64	L3
24.5	L4
19.5	L5
20.5	L6
25.26	L7
11.55	L8
19.80	L9

<sup>1</sup> Quantom

<sup>2</sup> Computer-aided design

<sup>3</sup> STereoLithography

<sup>4</sup> Instron

<sup>5</sup> Main effect

<sup>6</sup> Gage Length

<sup>7</sup> CreatBot 3D printer, user manual, English V7.0

### 3-5- تحلیل واریانس<sup>۳</sup>

این تحلیل به منظور مشخص شدن سهم هر متغیر بر خروجی مورد بررسی انجام می‌شود. به این منظور روابط به صورت زیر بیان می‌شود [10]:

$$SS_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 - C.F \quad (2-الف)$$

$$C.F = \frac{T^2}{n} \quad (2-ب)$$

در این روابط مجموع مربع انحرافات،  $C.F$  فاکتور تصحیح و  $T$  بیانگر مجموع خروجی آزمایش‌ها می‌باشند. برای نشان دادن میزان تاثیر هر متغیر بر خروجی از مشخصه  $F$  استفاده می‌شود که به صورت زیر بیان می‌شود [11]:

$$F = \frac{MS_{\alpha}}{MS_e} \quad (3)$$

در این رابطه  $MS_{\alpha}$  میانگین مربعات برای هر متغیر و  $MS_e$  میانگین مربعات خطا می‌باشند. جدول 6 تحلیل واریانس برای آزمایش‌های انجام شده را نشان می‌دهد.

### 4-5- آزمایش تایید<sup>۴</sup>

پس از به دست آوردن نتایج و مشخص شدن سطح بهینه برای هر متغیر باید با استفاده از این سطوح، قطعه بهینه را تولید کرده و با نتیجه پیش بینی مقایسه کرد تا صحت روش طراحی آزمایش مشخص شود. تاگوچی از رابطه زیر مقدار بهینه را پیش‌بینی می‌کند [13]:

$$y_{opt} = m + (m_{Aopt} - m) + (m_{Bopt} - m) \quad (4-الف)$$

$$+ (m_{Copt} - m) + (m_{Dopt} - m) \quad (4-ب)$$

در این روابط  $m$  میانگین عملکرد،  $T$  مجموع میانگین نتایج بدست آمده و  $n$  تعداد کل آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به تحلیل اثر اصلی سطح بهینه برای هر متغیر جهت حداکثر شدن استحکام مشخص شد. با استفاده از فرمول پیش‌بینی و سطوح بهینه، مقدار حداکثر تنش کششی محاسبه شده و به همراه سطوح آن در جدول 7 نشان داده شده است.

با استفاده از سطوح بدست آمده، قطعه بهینه با چاپگر سه بعدی ساخته شد تا مقدار استحکام کششی آن با مقدار پیش‌بینی شده به منظور تایید آزمایش‌ها و تحلیل‌های صورت گرفته، مقایسه شود. جدول 8 نتایج حاصل را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج بدست آمده، تفاوت مقدار واقعی و پیش‌بینی شده 0.95% مقدار واقعی بوده و بیانگر صحت و درستی آزمایش‌ها و تحلیل‌های انجام شده می‌باشد.

### 6- نتیجه گیری

در این تحقیق تولید قطعات کامپوزیت پلیمری-فلزی با استفاده از چاپگر سه بعدی FDM جهت حداکثر کردن استحکام کششی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا رشته‌های کامپوزیتی فلزی-پلیمری از جنس فلز مس و پلیمر ABS تولید شد و متغیرهای بهینه فرآیند ساخت آن نیز گزارش گردید.

سپس با استفاده از یک چاپگر سه بعدی، قطعات دمبلی شکل از جنس کامپوزیت برای آزمون کشش تولید شد. متغیرهای فرآیند چاپ شامل قطر نازل، ارتفاع لایه، الگوی پر شدن و دمای نازل بوده و از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش استفاده شد، سپس سطوح بهینه برای هر متغیر جهت

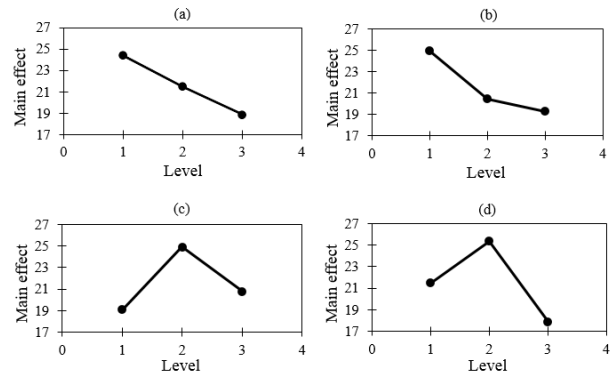


Fig. 6 Analysis of main effect (a) nozzle diameter (b) layer height (c) fill pattern (d) nozzle temperature

شکل 6 نتایج تحلیل اثر اصلی (a) قطر نازل (b) ارتفاع لایه (c) الگوی پر شدن (d) دمای نازل

### 2-5- بررسی نسبت سیگنال به نویز<sup>۱</sup>

این نسبت میزان حساسیت خروجی مورد بررسی را به متغیرهای غیر قابل کنترل در آزمایش نشان می‌دهد. هر چه نسبت سیگنال به نویز بیشتر باشد مطلوبتر است، زیرا مقادیر بیشتر سیگنال به نویز مقادیر کوچکتر واریانس نتایج را حول مقدار هدف نشان می‌دهد. مشخصه انتخاب شده در این آزمایش مقادیر بزرگتر-بهرتر<sup>۲</sup> می‌باشد. به منظور بررسی نسبت سیگنال به نویز، روابط به صورت زیر بیان می‌شوند [10]:

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (1-الف)$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10}(MSD) \quad (1-ب)$$

در این روابط  $MSD$  میانگین مربع انحرافات،  $y_i$  خروجی هر آزمایش،  $n$  تعداد آزمایش‌ها و  $S/N$  بیانگر نسبت سیگنال به نویز می‌باشند. با توجه به اینکه هر آزمایش 3 بار تکرار شده پس در مجموع 27 آزمایش انجام شده است. جدول 5 مقادیر سیگنال به نویز را برای آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است این نسبت مقادیر بزرگ و نزدیک به هم را نشان می‌دهد که بیان کننده تاثیر بالای عوامل قابل کنترل بر عوامل غیر قابل کنترل می‌باشد و هرچه این نسبت بیشتر باشد یعنی تنظیمات عوامل سیگنال موجب کمینه شدن اثر عوامل نویز می‌شود.

جدول 5 نسبت سیگنال به نویز

Table 5 Signal to noise ratio

نسبت سیگنال به نویز	شماره آزمایش
28.03	L1
29.65	L2
24.93	L3
27.78	L4
25.80	L5
26.23	L6
28.05	L7
21.25	L8
25.93	L9

<sup>3</sup> Analysis of variance

<sup>4</sup> Confirmation test

<sup>1</sup> Signal to noise ratio

<sup>2</sup> Larger is better

جدول 6 تحلیل واریانس

Table 6 Analysis of variance

متغیر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F	میزان تاثیر (%)
قطر نازل	2	138.2	69.1	42.65	19.38
ارتفاع لایه	2	161.6	80.8	49.88	22.67
الگو پرشدن	2	160.6	80.3	49.57	22.53
دمای نازل	2	252.3	126.2	77.90	35.42
خطا	18	37.3	1.62		
مجموع	26	750			100

IV عدد چهار

### 8- مراجع

- [1] P. F. Jacobs, Stereolithography and other RP&M technologies: from rapid prototyping to rapid tooling: Society of Manufacturing Engineers, 1995.
- [2] S. Masood, W. Song, Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using fused deposition modelling, *Materials & Design*, Vol. 25, No. 7, pp. 587-594, 2004.
- [3] G. Wu, N. A. Langrana, R. Sadanji, S. Danforth, Solid freeform fabrication of metal components using fused deposition of metals, *Materials & Design*, Vol. 23, No. 1, pp. 97-105, 2002.
- [4] M. Allahverdi, S. Danforth, M. Jafari, A. Safari, Processing of advanced electroceramic components by fused deposition technique, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 21, No. 10, pp. 1485-1490, 2001.
- [5] S. K. Panda, S. Padhee, S. Anoop Kumar, S. Mahapatra, Optimization of fused deposition modelling (FDM) process parameters using bacterial foraging technique, *Intelligent Information Management*, Vol. 1, No. 02, pp. 89, 2009.
- [6] M. Nikzad, S. Masood, I. Sbarski, Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for fused deposition modeling, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 6, pp. 3448-3456, 2011.
- [7] B. Lee, J. Abdullah, Z. Khan, Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 169, No. 1, pp. 54-61, 2005.
- [8] F. Rayegani, G. C. Onwubolu, Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE), *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 73, No. 1-4, pp. 509-519, 2014.
- [9] W. p. Yang, Y. Tarng, Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 84, No. 1, pp. 122-129, 1998.
- [10] R. Roy, A primer on the Taguchi method, competitive manufacturing series, *New York*, pp. 7-80, 1990.
- [11] G. Taguchi, S. Chowdhury, Y. Wu, *Taguchi's quality engineering handbook*: Wiley, pp. 501-523, 2005.
- [12] R. K. Roy, *Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*: John Wiley & Sons, pp. 95-105, 2001.
- [13] M. S. Phadke, *Quality engineering using robust design*, prentice hall, Englewood Cliffs, NJ, pp. 222-227, 1989.

جدول 7 سطوح و مقدار بهینه پیش‌بینی شده

Table 7 Optimum levels and value

متغیر	سطح بهینه	حداکثر استحکام کششی پیش‌بینی شده (MPa)
قطر نازل	1	34.90
ارتفاع لایه	1	
الگوی پرشدن	2	
دمای نازل	2	

جدول 8 نتایج آزمایش تایید

Table 8 Result of confirmation test

مقدار پیش‌بینی شده (MPa)	مقدار واقعی (MPa)	اختلاف (MPa)
34.90	34.57	0.33

حداکثر شدن استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیتی محاسبه گردید. نازل به قطر 0.5 mm، ارتفاع لایه به اندازه 0.1 mm، الگوی پرشدن 0/90 و دمای نازل 240 °C به عنوان سطوح بهینه هر متغیر ارائه گردید. در نهایت قطعه نمونه در شرایط بهینه ساخته شده، بیشترین استحکام کششی را در این شرایط تایید کرد.

### 7- فهرست علائم

C.F	فاکتور تصحیح
m	میانگین عملکرد
MSD	میانگین مربع انحرافات
MS <sub>α</sub>	میانگین مربعات برای هر متغیر
MS <sub>e</sub>	میانگین مربعات خطا
n	تعداد آزمایش‌ها
S/N	نسبت سیگنال به نویز
T	مجموع خروجی آزمایش‌ها
y <sub>i</sub>	خروجی هر آزمایش

علائم یونانی