


## Investigating the Mechanical Properties of Polymer Composite Materials made by 3D Printing Method

Research Article

Abbas Savabpour<sup>1</sup> , Javad Kadkhodapour<sup>2</sup>, Ali Pourkamali Anaraki<sup>3</sup>

DOI: [10.22067/jacsm.2023.81972.1182](https://doi.org/10.22067/jacsm.2023.81972.1182)

### 1. Introduction

3D printing is one of the most important technologies in the world, which has received a lot of attention in the last few years. Due to its unique features, this technology has been able to find its place well within different industries and jobs. 3D printing is done by rapid prototyping of a computer designed model in which objects are produced directly by adding materials layer by layer. Compared with traditional manufacturing, rapid prototyping can make complex shapes easily. This technology helps in early detection and reduction of design errors, at the same time, it does not require any tools, molds and devices, and only requires a little human intervention.

Multi-material printing in 3D printing has attracted attention for a wide range of applications. In multi-material printing technology, it is possible to combine different polymer materials in the form of a composite material according to the need, and achieve the desired properties from them.

Two filaments were used in this study to investigate the mechanical properties of composite structures. The samples were made by a 3D printer in such a way that several samples were made from each of the filaments, and finally, a number of samples were created in composite form (layer on layer). Then, all of the samples were analyzed and evaluated in the tensile test and their mechanical properties were calculated.

### 2. The materials

The filaments used in this study included ABS (acrylonitrile butadiene and styrene) filament and TPU (polyurethane filament) filament. A 3D printer was used to print these materials.

### 3. The proposed solution

By using hard (ABS) and soft (TPU) polymers, four polymer structure samples including two single material samples and two composite material samples were made

by 3D printer through additive layering method. Then, the mechanical properties of this sample were compared and evaluated by means of tensile test. Finally, simulation was done for these samples by the software.

**3.1. The standard.** The manufacturing of all polymer parts for tensile testing was done using ASTM D638-14 standard, which can be seen in Table 1.

**3.2. Tensile test conditions.** Tensile test of all samples was done at room temperature. The tensile test speed is 5 mm/min in all samples. For constructing tensile test models, the fourth row (IV) standard of Table 1 that can be used in hard and soft materials, was used.

**3.3. Simulation conditions.** The software simulation of tensile test samples was done in ABAQUS software version 2018. In this simulation, the minimum and maximum stress values in polymer samples are investigated. These samples are stuck from one side and subjected to the maximum tensile force obtained from the tensile test from the other side.

**3.4. The results obtained from the tensile test.** The highest force (759 N) is tolerated by the ABS sample and the lowest strain to failure (6%) is achieved by this sample. The force of 744 (N) is tolerated by the TPU sample. It should be noted that the highest strain to failure (800%) was obtained for this sample.

In ABS & TPU & ABS sandwich sample, less force is tolerated than the ABS sample (613 N vs. 759 N). Moreover, the strain to failure of this sample is equal to the ABS sample (6%).

In the TPU & ABS & TPU sandwich sample, the force of 321 N is tolerated, which is less than other samples. Moreover, the strain to failure of this sample is 22%, which is almost 4 times of ABS and sandwich ABS & TPU & ABS samples.

\*Manuscript received: April 16, 2023. Revised, May 28, 2023, Accepted, July 25, 2023.

<sup>1</sup>. Corresponding author. MSc, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei University, Tehran, Iran,

Email: [a.savabpour65@gmail.com](mailto:a.savabpour65@gmail.com)

<sup>2</sup>. Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei University, Tehran, Iran.

<sup>3</sup>. Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei University, Tehran, Iran.

**3.5. Results obtained from tensile test simulation.** In order to determine the stress in different parts of each of the samples, the Mises stress values obtained from the simulation in different polymer structures are given.

The simulated sample of ABS material shows that the maximum stress is in the middle part of the structure and its value is almost close to the real sample of tensile test. The simulated sample of TPU material shows that the maximum stress is in the middle part of the structure and its value is almost close to the real sample of tensile test. It is clear from the simulated sample of ABS & TPU & ABS sandwich structure that the highest amount of stress belongs to the 2 outer layers, which is ABS material with a larger modulus of elasticity, the middle single layer of TPU material with a small elasticity modulus is under the lowest stress.

It can be seen from the simulated sample of TPU & ABS & TPU sandwich structure that the highest stress value belongs to the middle single layer, which is higher than ABS material with elasticity modulus. The two outer layers of TPU material with a small modulus of elasticity are subjected to minimal stress.

#### 4. Conclusion

In this article, in order to improve the mechanical properties of polymer materials, several examples of single-material structures composed of ABS and TPU filaments have been created by a 3D printer. Then, these samples are subjected to real static tensile load in the laboratory environment by the tensile testing machine. Through the output data of this tensile test, the mechanical properties of these samples have been calculated and finally compared. According to the obtained results, we were able to increase the strain to failure in the composite samples (TPU & ABS & TPU) by almost 4 times compared to the ABS sample and the ABS & TPU & ABS sample.


**Table 1. Standard dimensions according to the type of material**

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II		Type III	Type IV <sup>B</sup>	
W-Width of narrow section <sup>E,F</sup>	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02) <sup>B,C</sup>
L-Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02) <sup>C</sup>
WO-Width overall, min <sup>G</sup>	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+6.4 (+0.25)
WO-Width overall, min <sup>G</sup>	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+3.18 (+0.125)
LO-Length of overall, min <sup>H</sup>	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G-Gage length <sup>I</sup>	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010) <sup>C</sup>
G-Gage length <sup>I</sup>	...	...	...	25 (1.00)	...	±0.13 (±0.005)
D-Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) <sup>J</sup>	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)
R-Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04) <sup>C</sup>
RO-Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	±1 (±0.04)



### بررسی خواص مکانیکی مواد مرکب پلیمری ساخته شده به روش پرینت سه بعدی\*

مقاله پژوهشی

عباس صواب پور<sup>(۱)</sup>  جواد کدخداپور<sup>(۲)</sup> علی پورکمالی انارکی<sup>(۳)</sup>

DOI: 10.22067/jacsm.2023.81972.1182

**چکیده** ماده مرکب یک جامد غیر یک نواخت است که از دو یا چند ماده مختلف تشکیل شده است که به صورت مکانیکی یا متالورژی به هم پیوند خورده اند. این مواد تشکیل دهنده، خواص شیمیایی و فیزیکی کاملاً متفاوتی دارند و برای ساخت ماده‌ای که شبیه به هیچ کدام از این مواد نیست با هم ادغام می‌شوند. در مطالعات پیشین، ساخت و بررسی ساختارهای ساندویچ مواد پلیمری با دو ماده با خواص فیزیکی مشابه (دو ماده سخت) انجام شده بود، ولی در این تحقیق، دو پلیمر با خواص فیزیکی کاملاً متفاوت با هم ترکیب شده و یک ساختار ساندویچی جدید ساخته شده است. این مطالعه با هدف بررسی و تلاش برای افزایش عملکرد مکانیکی ساختارهای تک لایه و چند لایه مرکب (ساندویچی) چاپ شده از مواد پلیمری سخت (ABS) و نرم (TPU) و مقایسه این نمونه‌ها با تهیه ساختارهای مرکب مختلف از این پلیمرها انجام شده است. روش ساخت مواد پلیمری مورد استفاده از این تحقیق، استفاده از تکنولوژی پرینت سه بعدی (لایه گذاری افزایشی) می‌باشد. نتایج در قالب تست کشش آزمایشگاهی و شبیه سازی در محیط نرم افزاری آباکوس به دست آمده است. این نتایج حاکی از آن است که با تغییر لایه‌ها و مواد، مقدار کرنش تا شکست نمونه‌های مرکب تا حدود ۴ برابر افزایش پیدا کرده است. لازم به ذکر است که ساخت نمونه‌های تست کشش، در این پروژه طبق استاندارد انجمن مواد و آزمون آمریکا انجام شده است.

**واژه‌های کلیدی** خواص مکانیکی، ساختارهای مرکب، پرینت سه بعدی، ABS، TPU.

### Investigating the Mechanical Properties of Polymer Composite Materials Made by 3D Printing Method

Abbas Savabpour

Javad Kadkhodapour

Ali Pourkamali Anaraki

**Abstract** A composite structure is a non-uniform solid that consists of two or more different materials with different kinds that are mechanically bonded together. These structures have completely different chemical and physical properties and they merge together to make a substance that is not similar to any of these materials. In previous studies, the construction and investigation of sandwich structures of polymer materials were done with two materials with similar physical properties (two hard materials), but in this research, two polymers with completely different physical properties were combined and a new sandwich structure was made. This study aims to investigate and try to increase the mechanical performance of single-layer and multi-layer composite (sandwich) structures printed from hard (ABS) and soft (TPU) polymer materials and comparing these samples by preparing different composite structures from these polymers. The method of making polymer materials used in this research is the use of 3D printing technology (incremental layering). The results have been obtained in the form of laboratory tensile test and simulation in the Abaqus software environment. These results indicate that with the change of layers and materials, the amount of strain to failure of the composite samples has increased up to about 4 times. It should be noted that the construction of the tensile test samples in this project was done according to the standard of the American Association of Materials and Testing.

**Key Words** Mechanical Properties, Composite Materials, 3D Printing, ABS, TPU.

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۲/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۵/۳ می‌باشد.

Email: a.savabpour65@gmail.com

(۱) نویسنده مسئول، کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید رجایی، تهران.

(۲) دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید رجایی، تهران.

(۳) استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید رجایی، تهران.

## مقدمه

یکی از مهم‌ترین تکنولوژی‌های روز دنیا که در چند سال اخیر به شدت مورد توجه قرار گرفته، پرینت سه‌بعدی است. این تکنولوژی به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی که دارد، توانسته جای خود را به خوبی در صنایع مختلف و مشاغل مختلف باز کند.

پرینت سه‌بعدی با نمونه‌سازی سریع یک مدل طراحی شده کامپیوتری انجام می‌شود که در آن اشیا مستقیماً با افزودن مواد به صورت لایه به لایه تولید می‌شوند. در مقایسه با تولید سنتی، نمونه‌سازی سریع می‌تواند اشکال پیچیده را به راحتی بسازد. این تکنولوژی به تشخیص زودهنگام و کاهش خطاهای طراحی کمک می‌کند، در عین حال نیازمند هیچ گونه ابزار، قالب و وسایلی نبوده و تنها مستلزم دخالت اندک انسان است.

چاپ سه‌بعدی با استفاده از چندین ماده در یک زمان، قابلیت کلیدی تولید افزایشی است که پتانسیل آن را در برابر سایر روش‌های تولید فعلی افزایش می‌دهد. این روش می‌تواند نیاز به مونتاژ را حذف کرده، مراحل پس پردازش را از بین برده، سبب ترقی طراحی کارآمد اشیای چند منظوره شده و زمان تولید و همچنین هزینه‌ها را کاهش دهد [1,2].

اکستروژن چند ماده در پرینت سه‌بعدی به دلیل طیف وسیعی از موارد مورد توجه قرار گرفته است. در تکنولوژی چاپ چند ماده‌ای، می‌توان با توجه به نیاز، مواد پلیمری مختلف را به صورت ماده مرکب با هم ترکیب نموده و به خواص مورد نظر از آن‌ها دست یافت. به دلیل توانایی این فناوری در تهیه مواد خاص، می‌توان به کاربرد گسترده آن در زمینه‌های مختلف از جمله رباتیک شامل ساخت مفاصل و اندام ربات‌ها [3-6] و پزشکی شامل ساخت اعضای مصنوعی بدن انسان [7-9] و... اشاره کرد.

یکی دیگر از کاربردهای چاپ چند ماده‌ای، ایجاد ساختارهای مرکب به منظور دستیابی به خواص مکانیکی متفاوت از مواد تشکیل دهنده آن‌ها به صورت مجزا است، که این تفاوت در خواص مکانیکی شامل تغییر در استحکام کششی و مدول الاستیسیته و کرنش تا شکست است. مقالات مختلفی در این زمینه ارائه شده است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌کنیم.

دینش یاداو و همکاران [10] در سال ۲۰۱۹ در پژوهشی،

بهینه‌سازی پارامترهای فرایند چاپ در پرینترهای سه‌بعدی برای مواد پلیمری مرکب را مورد بررسی قرار دادند. مقاله حاضر به بررسی اثرات چگالی مواد، چگالی Infill و دمای اکستروژن بر استحکام کششی ABS، PETG و آزمایش چند ماده می‌پردازد. چند متریکال با ادغام ۵۰ درصد ABS و ۵۰ درصد PETG لایه به لایه در پرینت سه‌بعدی ساخته شده‌اند. در مجموع ۳۰ قطعه آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D638-(IV) با چگالی Infill، دمای اکستروژن و چگالی مواد مختلف چاپ شد. علاوه بر این، چگالی و دمای اکستروژن برای افزایش استحکام کششی واحدهای ساخته شده بهینه شده است. در نهایت با انجام چندین مرحله تغییر در پارامترهای چاپ، استحکام کششی نمونه‌های پلیمری مواد مرکب تا ۴,۵۴ درصد افزایش یافته است.

لوپز و همکاران [11] در سال ۲۰۱۸ رفتار مکانیکی مواد مرکب پلیمری ساخته شده به روش پرینت سه‌بعدی را مورد بررسی قرار داده‌اند. این مقاله به عملکرد مکانیکی اشیای چاپی چند ماده‌ای می‌پردازد، ابتدا چند نمونه تک ماده توسط یک سر اکستروژن چاپ شده و رفتار مکانیکی این ساختارها توسط دستگاه تست کشش به دست آمده است. در مرحله بعد چند نمونه دو ماده‌ای توسط دو سر اکستروژن چاپ شده و رفتار مکانیکی این ساختارها نیز توسط دستگاه تست کشش به دست آمده است. فیلامنت‌های مورد استفاده در این پروژه PLA، TPU و PET هستند.

دیود باکا و رفیق احمد [12] در تحقیقی در سال ۲۰۲۰، مقایسه خواص مکانیکی مواد مرکب پلیمری با تکنولوژی ساخت پرینتر سه‌بعدی تک‌نازل و چندنازل به روش اکستروژن انجام داده‌اند. به همین منظور نمونه‌های تست کشش مواد پلیمری از سه فیلامنت ABS و PLA و HPIS ساخته شده است. ابتدا کلیه نمونه‌های تک‌ماده و مواد مرکب با استفاده از تکنولوژی تک‌نازل در پرینتر سه‌بعدی ساخته شده و در ادامه مجدداً کلیه نمونه‌های تست کشش با استفاده از پرینتر چندنازل تکرار شده است. نتایج حاصل از این تست کشش، مقادیر مدول یانگ، استحکام کششی و کرنش تا شکست، نشان می‌دهد که نمونه‌های ساخته شده در نازل تکی دارای پیوند کامل‌تری بین مواد مرکب هستند.

در مقاله [13]، از ترکیب دو ماده پلی لاکتید (PLA)،

می‌شود. فرایند تولید افزایشی یک شیء، با قرار دادن لایه‌های متوالی از مواد اولیه ایجاد می‌شود و این روند تا تکمیل قطعه ادامه می‌یابد. هر یک از این لایه‌ها را می‌توان به عنوان یک مقطع افقی نازک برش از قطعه نهایی مشاهده کرد. چاپ سه‌بعدی امکان تولید اشکال پیچیده را با استفاده از مواد کمتر نسبت به روش‌های سنتی فراهم می‌کند که شامل برش یا ماشین‌کاری شی از یک بلوک بزرگ‌تر است [15].

چاپگر سه‌بعدی، یک جسم جامد سه‌بعدی را از یک مدل دیجیتال می‌سازد. این، شامل دستگاه چاپ سه‌بعدی است که به یک بازوی رباتیک چند محوره متصل شده است. بازو از یک نازل تشکیل شده است که پودر فلز یا سیم را روی یک سطح رسوب می‌دهد و یک منبع انرژی (لیزر، پرتو الکترونی یا قوس پلاسما) که آن را ذوب می‌کند و یک جسم جامد را تشکیل می‌دهد [15].

### فیلامنت ABS

فیلامنت ABS، بخشی از خانواده پلیمرهای ترموپلاستیک بوده که از ترکیب سه ماده «اکریلونیتریل»، «بوتادین» و «استایرن» به‌دست می‌آید. این ترموپلاستیک ارزان، با دوام و سبک وزن بوده و به راحتی از اکسترودر خارج می‌گردد، به همین خاطر برای استفاده در پرینتر سه‌بعدی بسیار محبوب است. قطعات ساخته شده از فیلامنت ABS در پرینتر سه‌بعدی سفتی بالایی دارند و می‌توانند در دماهای پایین ضربات را تا حدودی تحمل کنند [14].

### فیلامنت TPU

TPU یا فیلامنت پلی اورتان، یک الاستومر ترموپلاستیک است که قابلیت انعطاف‌پذیری بسیار بالایی دارد. این ماده ترکیبی به علت سهولت پردازش بسیار بالا و همچنین استحکام و دوام خوبی که دارد، به عنوان یک عملکرد همه‌کاره محسوب می‌شود. قطعات ساخته شده از فیلامنت TPU به راحتی و بدون شکستگی و از دست دادن شکل اصلی خود می‌توانند خم یا کشیده شوند. از برخی خواص ویژه این محصول می‌توان به نرمی، کرنش بالا و... اشاره کرد [16].

ترموپلاستیک پلی اورتان (TPU) جهت بهبود چقرمگی PLA استفاده شده است. نتایج مقاله نشان می‌دهد که عملکرد ماده مرکب PLA / TPU، ماده PLA را از شکست شکننده به شکست انعطاف‌پذیر تغییر داده است. کرنش تا شکست برای ترکیب ۲۰ درصد PLA و ۸۰ درصد TPU بدون افت آشکار در استحکام کششی به ۳۵۰٪ رسیده است.

مقاله [14] جهت ارزیابی عملکرد مکانیکی ساختارهای ساندویچی ساخته شده از مواد مرکب حاصل از فیلامنت‌های ABS و PLA استفاده شده است. ساخت کلیه نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM638 نسخه ۲۰۱۴ و به وسیله پرینتر سه‌بعدی انجام شده است. ابتدا نمونه‌ها با فیلامنت ABS ساخته شده و خواص مکانیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مرحله بعد نمونه‌ها از فیلامنت PLA ساخته شده و مورد تست قرار گرفتند. در نهایت ساختارها به صورت ساندویچی (لایه روی لایه) قرار گرفته و در آزمون کشش مورد تحلیل و ارزیابی واقع شدند، که مشخص گردید نمونه ساخته شده از فیلامنت PLA دارای تنش تسلیم بالاتری است.

لازم به ذکر است که در مقاله حاضر، جهت بررسی خواص مکانیکی ساختارهای مرکب از دو فیلامنت ABS و TPU استفاده شده است. ساخت نمونه‌ها به وسیله پرینتر سه‌بعدی انجام شده است، به این صورت که تعدادی از نمونه‌ها از فیلامنت ABS و تعدادی از فیلامنت TPU ساخته شده‌اند و در نهایت تعدادی از نمونه‌ها به صورت مرکب (لایه روی لایه) ایجاد شده‌اند. سپس کلیه نمونه‌ها در آزمون کشش مورد تحلیل و ارزیابی واقع شده و خواص مکانیکی آن‌ها محاسبه شده است.

### مواد مورد استفاده

در این قسمت، کلیه ابزار و مواد مورد نیاز که در این پروژه مورد استفاده قرار گرفته‌اند، به تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند.

### پرینتر سه‌بعدی

در واقع پرینتر سه‌بعدی یا همان ساخت افزایشی که امروزه در صنعت به نام‌های دیگری همچون شبیه‌ساز فیزیکی هم شهرت دارد، به فرایند تولید قطعات سه‌بعدی از فایل دیجیتالی گفته

### راه حل پیشنهادی

در این مقاله، با استفاده از پلیمرهای سخت (ABS) و نرم (TPU)، چهار نمونه ساختار پلیمری شامل دو نمونه تک ماده و دو نمونه ماده مرکب توسط پرینتر سه بعدی به روش لایه گذاری افزایشی ساخته شده است و خواص مکانیکی این نمونه‌ها به وسیله آزمون کشش مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته و در نهایت شبیه سازی برای این نمونه‌ها در محیط نرم افزاری انجام شده است.

چاپ کلیه نمونه‌ها به وسیله پرینتر سه بعدی Sizan1 صورت گرفته است که در شکل (۱) قابل مشاهده است. لایه گذاری کلیه نمونه‌ها به صورت ۴۵ درجه نسبت به محور کشش و با لایه گذاری به ضخامت ۰/۱ میلی متر انجام شده است. شکل (۲) زاویه لایه گذاری نمونه‌های پلیمری را توسط پرینتر سه بعدی نشان می دهد.



شکل ۳ دستگاه تست کشش ZWICK ROELL

با توجه به این که خروجی دستگاه تست کشش، داده‌های نیرو-جابجایی و تنش-جابجایی است، جهت بررسی بیشتر خواص مکانیکی نمونه‌های تست شده، از روابط موجود در درس مقاومت مصالح [17] استفاده شده که این فرمول‌ها در ذیل آمده است.

با داشتن تغییرات طول و طول مؤثر اولیه نمونه، کرنش از رابطه (۱) به دست می آید.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1)$$

که  $\varepsilon$  مشخص کننده کرنش،  $\Delta L$  تغییرات طول و  $L_0$  طول اولیه را نشان می دهند.

مدول کششی نمونه‌ها با داشتن تنش و کرنش در محدوده الاستیک تست کشش از رابطه (۲) (قانون هوک) (Hooke law) به دست می آید.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

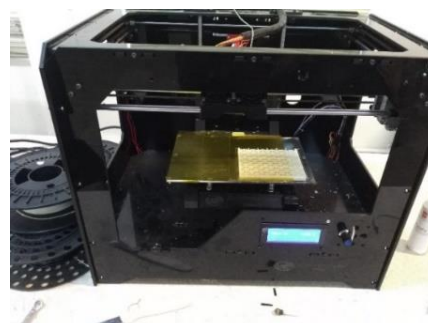
که در آن  $E$  نشان دهنده مدول کششی و  $\sigma$  مشخص کننده تنش تسلیم است.

### بررسی رفتار مکانیکی تک ماده ABS و TPU و ماده

### مرکب TPU-ABS تحت آزمون کشش و شبیه سازی

#### استاندارد مورد استفاده

ساخت کلیه قطعات پلیمری جهت آزمون کشش با استفاده از استاندارد ASTM D638-14 انجام شده است که در شکل (۴) قسمت‌های (a) و (b) و جدول (۱) قابل مشاهده است.



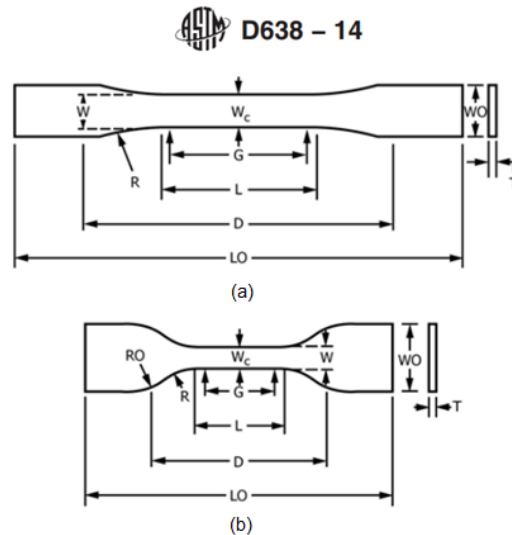
شکل ۱ پرینتر سه بعدی Sizan1



شکل ۲ زاویه ۴۵ درجه لایه گذاری در چاپ [13]

لازم به ذکر است که ماده ABS، در دمای ۲۴۰ درجه سانتی گراد و با سرعت ۸۰ میلی متر بر ثانیه با سطح بستر گرم در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد اکستروود شده است و ماده TPU در دمای ۲۵۰ درجه سانتی گراد و با سرعت ۳۰ میلی متر بر ثانیه با دمای سطح بستر گرم ۵۰ درجه سانتی گراد اکستروود شده است. در ضمن، چگالی اینفیل ساخت نمونه‌ها برای هر دو ماده ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شده است.

تست کشش کلیه نمونه‌ها به وسیله دستگاه تست کشش ZWICK ROELL مدل Z100 انجام شده است که در

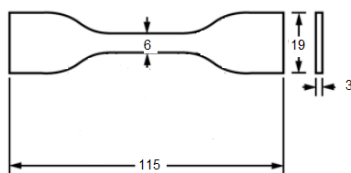


شکل ۴ (a) استانداردهای نوع ۱، ۲، ۳ و ۵ (b) استاندارد نوع ۴

جدول ۱ ابعاد استاندارد با توجه به نوع ماده

Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV <sup>B</sup>	Type V <sup>C,D</sup>	
W-Width of narrow section <sup>E,F</sup>	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02) <sup>B,C</sup>
L-Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02) <sup>C</sup>
WO-Width overall, min <sup>G</sup>	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+6.4 (+0.25)
WO-Width overall, min <sup>G</sup>	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+3.18 (+0.125)
LO-Length of overall, min <sup>H</sup>	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G-Gage length <sup>I</sup>	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010) <sup>C</sup>
G-Gage length <sup>I</sup>	...	...	...	25 (1.00)	...	±0.13 (±0.005)
D-Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) <sup>J</sup>	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)
R-Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04) <sup>C</sup>
RO-Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	±1 (±0.04)

مبنای نوع چهارم جدول استاندارد را نشان می‌دهد.



شکل ۵ ابعاد نمونه کشش طبق استاندارد ASTM D638-14

### شرایط آزمون کشش

تست کشش کلیه نمونه‌ها در دمای اتاق انجام شده است. سرعت تست کشش در کلیه نمونه‌ها ۵ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده است. جهت ساخت مدل‌های تست کشش از استاندارد ردیف چهارم (IV) جدول (۱) که قابل استفاده در مواد سخت و نرم است، استفاده شده است.

به منظور دقیق‌تر بودن نتایج، سه نمونه برای هر نوع پلیمر ساخته و تست شده است و از میانگین ۳ نمونه به عنوان مبنا در نتایج استفاده شده است.

### شرایط شبیه‌سازی

شبیه‌سازی نرم‌افزاری نمونه‌ها در نرم‌افزار آباکوس نسخه ۲۰۱۸

شکل (۵) ابعاد نمونه‌های ساخته شده جهت تست کشش بر

نسبت به نمونه ABS تحمل می‌شود (۶۱۳ در مقابل ۷۵۹ نیوتن). همچنین کرنش تا شکست این نمونه برابر نمونه ABS بوده که معادل ۶ درصد است.

در نمونه ساندریج TPU & ABS & TPU نیروی ۳۲۱ نیوتن تحمل می‌شود که نسبت به سایر نمونه‌ها کمتر است. همچنین، کرنش تا شکست این نمونه ۲۲ درصد است که تقریباً ۴ برابر نمونه ABS و ساندریج ABS & TPU & ABS می‌باشد.

همچنین، کرنش کلیه نمونه‌ها در نیروی ۲۰۰ نیوتن مورد مقایسه قرار گرفته است که نتایج به صورت نمودار میله‌ای در شکل (۸) قابل مشاهده است. با توجه به نمودار مذکور، بیشترین مقدار کرنش مربوط به نمونه TPU (۳۲ درصد) و کمترین مقدار مربوط به نمونه‌های ABS و ABS & TPU & ABS (۲ درصد) می‌باشد.

علاوه بر این، در نمودار ۹ نیروها در کرنش ۵ درصد مورد مقایسه قرار گرفته‌اند که با توجه به این نمودار، بیشترین نیرو (معادل ۶۰۰ نیوتن) توسط نمونه ABS و کمترین نیرو (معادل ۵۰ نیوتن) توسط نمونه TPU تحمل می‌شود.

شکل (۱۰)، کلیه نمونه‌های پلیمری قبل و بعد از تست کشش را نشان می‌دهد.

جدول (۲) مقادیر به دست آمده مدول، نیرو و تنش را در آزمون کشش برای ۴ ساختار پلیمری نشان می‌دهد.

انجام شده است. در این شبیه‌سازی مقادیر حداقل و حداکثر تنش در نمونه‌های پلیمری مورد بررسی قرار می‌گیرد. در واقع این نمونه‌ها از یک سمت به صورت گیردار درآمده و از سمت دیگر تحت نیروی کششی حداکثر به دست آمده از آزمون کشش قرار می‌گیرند.

## نتایج و بحث

نتایج مقاله شامل نتایج به دست آمده از آزمون کشش و نتایج حاصل از شبیه‌سازی آزمون کشش انجام شده می‌باشد که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرند.

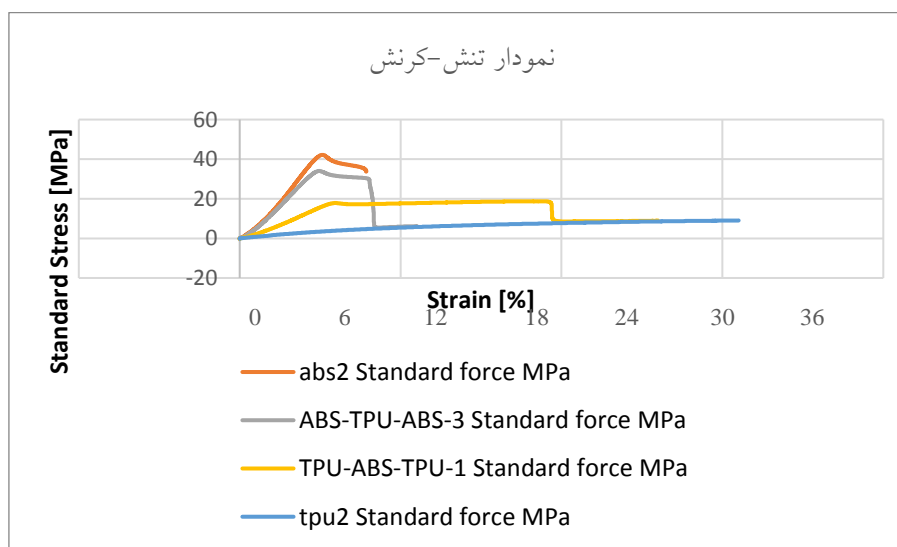
### نتایج به دست آمده از آزمون کشش

شکل (۶) و (۷) به ترتیب منحنی‌های تنش-کرنش و نیرو-جابه‌جایی به دست آمده از آزمون کشش ساختارهای پلیمری چهار نمونه را نشان می‌دهد.

با توجه به نمودارهای (۶) و (۷) نتایج زیر حاصل شده است. بیشترین نیرو (۷۵۹ نیوتن) توسط نمونه ABS تحمل می‌شود و کمترین کرنش تا شکست (۶ درصد) توسط این نمونه انجام شده است.

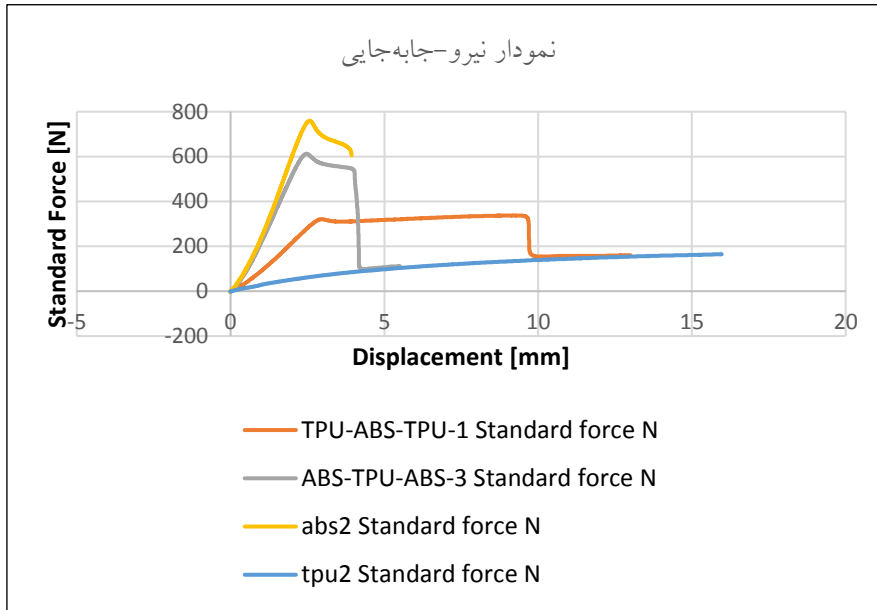
نیروی ۷۴۴ نیوتن توسط نمونه TPU تحمل می‌شود. لازم به ذکر است که بیشترین کرنش تا شکست (۸۰۰ درصد) برای این نمونه به دست آمده است.

در نمونه ساندریج ABS & TPU & ABS نیروی کمتری

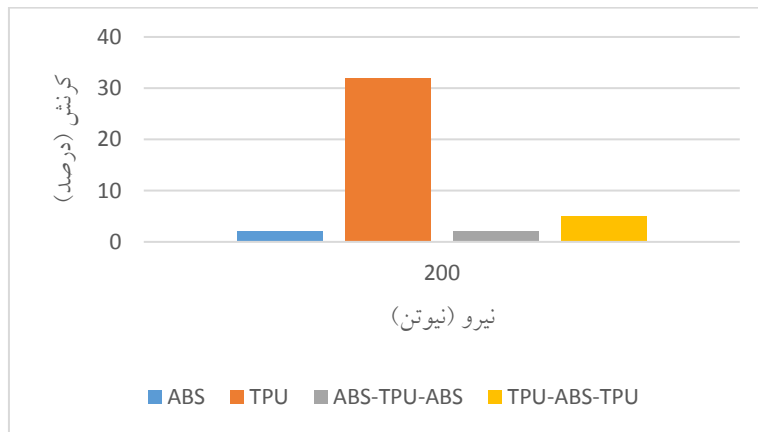


شکل ۶ منحنی تنش-کرنش چهار نمونه تست کشش

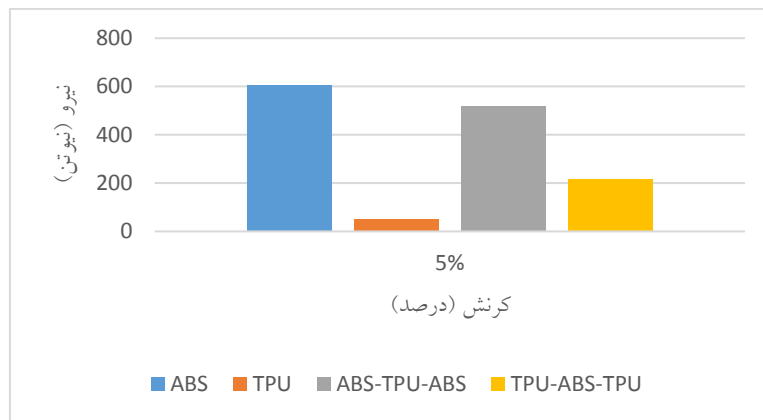




شکل ۷ منحنی نیرو-جابجایی چهار نمونه تست کشش



شکل ۸ مقایسه کرنشها در نیروی ثابت ۲۰۰ نیوتن



شکل ۹ مقایسه نیروها در کرنش ۵ درصد



شکل ۱۰ نمونه‌های (a) قبل و (b) بعد از تست کشش

جدول ۲ خواص مکانیکی ۴ ساختار پلیمری تحت تست کشش

نوع پلیمر	حداکثر بار (نیوتن)	بار شکست (نیوتن)	بار در کرنش ۵ درصد (نیوتن)	استحکام کششی نهایی (مگا پاسکال)	مدول کششی (مگا پاسکال)
ABS	۷۵۹	۶۰۶	۶۰۵	۴۲/۱۵	۵۴۰/۳۸
TPU	۷۴۴	۷۴۰	۵۲	۴۱/۳۲	۴/۳۸
ABS & TPU & ABS Sandwich	۶۱۳	۴۰۲	۵۲۰	۳۴/۰۱	۴۵۴/۶۷
TPU & ABS & TPU Sandwich	۳۲۱	۳۳۸	۲۱۷	۱۷/۸۳	۱۹۸/۹۹

### نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی آزمون کشش

به منظور تعیین تنش در قسمت‌های مختلف هر یک از نمونه‌ها، مقادیر تنش میز حاصل از شبیه‌سازی در ساختارهای پلیمری مختلف در شکل‌های (۱۱) الی (۱۴) آورده شده است.

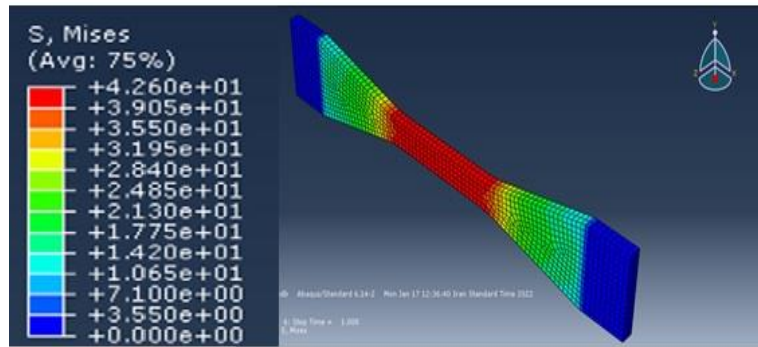
نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی آزمون کشش ماده ABS نشانگر آن است که حداکثر تنش در قسمت میانی ساختار بوده و مقدار آن تقریباً نزدیک به نمونه واقعی تست کشش است.

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی آزمون کشش ماده TPU نشانگر آن است که حداکثر تنش در قسمت میانی ساختار بوده و مقدار آن تقریباً نزدیک به نمونه واقعی تست کشش است.

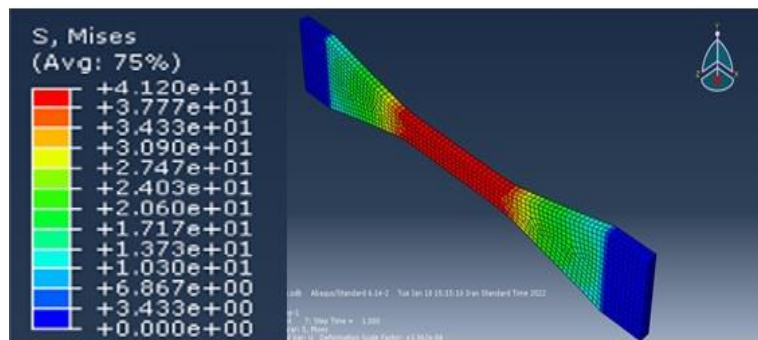
آنچه که از نتایج حاصل از شبیه‌سازی آزمون کشش ساختار ساندویچی ABS & TPU & ABS مشخص است، بیشترین مقدار تنش مربوط به ۲ لایه بیرونی است که از ماده ABS با

مدول الاستیسیته بزرگ‌تر می‌باشد، تک لایه میانی از ماده TPU با مدول الاستیسیته کوچک تحت کمترین تنش قرار گرفته است. تنش در این ساختار نسبت به تک ماده ABS و تک ماده TPU بیشتر است، زیرا با اضافه شدن تک لایه TPU، سطح مقطع ماده ABS کوچک شده است.

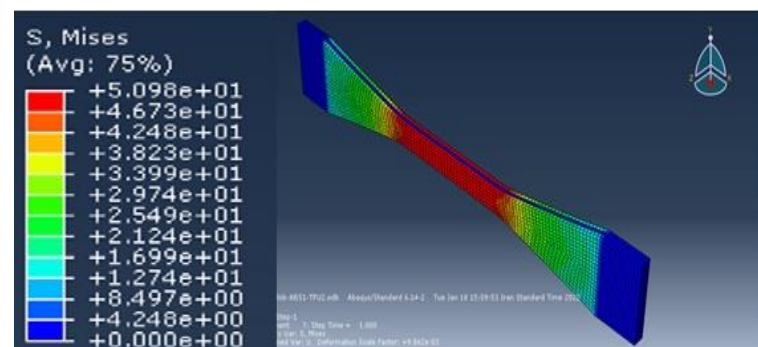
همان‌طور که از نمونه شبیه‌سازی شده ساختار ساندویچی TPU & ABS & TPU مشخص است، بیشترین مقدار تنش مربوط به تک لایه میانی است که از ماده ABS با مدول الاستیسیته بزرگ‌تر می‌باشد. دو لایه بیرونی از ماده TPU با مدول الاستیسیته کوچک تحت کمترین تنش قرار گرفته است. تنش در این ساختار در مقایسه با کلیه نمونه‌ها بیشتر است، زیرا با اضافه شدن دو لایه TPU، سطح مقطع ماده ABS به کوچک‌ترین مقدار خود بین نمونه‌ها رسیده است.



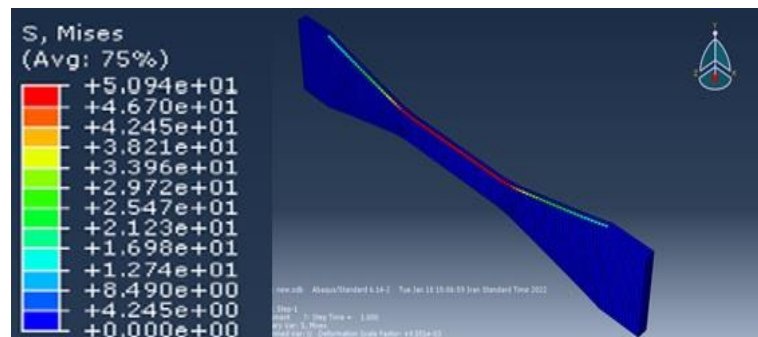
شکل ۱۱ نمایش تنش ماده ABS در محیط نرم‌افزاری آباکوس



شکل ۱۲ نمایش تنش ماده TPU در محیط نرم‌افزاری آباکوس



شکل ۱۳ نمایش تنش ساختار ساندویچی ABS & TPU & ABS در محیط نرم‌افزاری آباکوس



شکل ۱۴ نمایش تنش ساختار ساندویچی TPU & ABS & TPU در محیط نرم‌افزاری آباکوس

فهرست علائم و اختصارات		نتیجه‌گیری
تغییر طول (mm)	$\Delta L$	در این مقاله، جهت بهبود خواص مکانیکی مواد پلیمری، چند
طول اولیه (mm)	$L_0$	نمونه ساختار تک‌ماده‌ای و مرکب از فیلامنت‌های ABS و TPU
مدول الاستیسیته (MPa)	E	توسط پرینتر سه‌بعدی ایجاد شده است. سپس این نمونه‌ها در
تنش عمودی (MPa)	$\sigma$	محیط آزمایشگاه توسط دستگاه تست کشش به صورت واقعی
		تحت بار کشش ایستایی قرار گرفته‌اند. از طریق داده‌های
		خروجی این آزمون کشش، خواص مکانیکی این نمونه‌ها
		محاسبه و در نهایت مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به
		نتایج به دست آمده، توانستیم در نمونه‌های مرکب (TPU & ABS
		و TPU & ABS)، کرنش تا شکست را نسبت به نمونه ABS و
		نمونه TPU & ABS، تقریباً ۴ برابر افزایش دهیم. لازم
		به ذکر است که تست کشش انجام شده در محیط نرم‌افزاری نیز
		شبیه‌سازی شده است.
واژه نامه		
خواص مکانیکی	Mechanical Properties	
ساختارهای مرکب	Composite Materials	
پرینت سه‌بعدی	3D Printing	
تقدیر و تشکر		

## مراجع

- [1] <https://idesign3d.ir/>
- [2] <https://all3dp.com/>
- [3] "Overcoming 3D printing speed limitations of flexible soft plastics with Arnitel® ID," [Online]. Available: Link: [https://www.dsm.com/content/dam/dsm/engineering-materials/ja-jp/documents/Arnitel\\_ID\\_3D\\_printing.pdf](https://www.dsm.com/content/dam/dsm/engineering-materials/ja-jp/documents/Arnitel_ID_3D_printing.pdf).
- [4] J. Zeb Gul, M. Sajid, M. Muqet Rehman, Gh. Uddin Siddiqui, I. Shah, K. Kim, J. Lee, K. Hyun Choi, "3D printing for soft robotics – a review," *Science and Technology of Advanced Materials*, vol. 19, no. 1, pp. 243–262, 2018.
- [5] F. Rosa, M. Bordegoni, A. Dentelli, A. Sanzone, A. Sotgiu, "Print-in-Place of Interconnected Deformable and Rigid Parts of Articulated Systems," *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 555 – 562, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.149>
- [6] M. Soreni-Harari, R. St. Pierre, C. McCue, K. Moreno, S. Bergbreiter, "Multimaterial 3D Printing for Microrobotic Mechanisms," *SOFT ROBOTICS*, 2019. <https://doi.org/10.1089/soro.2018.0147>
- [7] R. R. Torrealba, S. B. Udelman, A. J. Rivas, F. J. Carvalho, "A start-up project to create customised 3D-printed hand prostheses affordable in developing countries," *ResearchGate*, 2017.
- [8] R. Melnikova, A. Ehrmann, K. Finsterbusch, "3D printing of textile-based structures by Fused Deposition Modelling (FDM) with different polymer materials," *Global Conference on Polymer and Composite Materials*, (2014). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/62/1/012018>
- [9] J. Kwon, J. Ock, N. Kim, "Mimicking the Mechanical Properties of Aortic Tissue with Pattern-Embedded 3D Printing for a Realistic Phantom," *Materials (Basel)*, vol. 13, no.21, 2020.
- [10] D. Yadav, D. Chhabra, R. Kumar Garg, A. Ahlawat, A. Phogat, "Optimization of FDM 3D printing process parameters for multi-material using artificial neural network," *Materials Today: Proceedings*, 2019.
- [11] L.R. Lopes, A.F. Silva, O.S. Carneiro, "Multi-Material 3D Printing: the Relevance of Materials Affinity on the

- Boundary Interface Performance," *Additive Manufacturing*, vol. 23, pp. 45-52, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.027>
- [12] D. Baca, R. Ahmad, "The impact on the mechanical properties of multi-material polymers fabricated with a single mixing nozzle and multi-nozzle systems via fused deposition modeling," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 4509-4520, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04937-3>
- [13] F. Feng, L. Ye, "Morphologies and Mechanical Properties of Polylactide/ Thermoplastic Polyurethane Elastomer Blends," *Journal of Applied Polymer Science*, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.32863>
- [14] Shabana, R.V.Nikhil Santosh, J. Sarojini, K.Arun Vikram, V.V.K.Lakshmi, "Evaluating the Mechanical Properties of Commonly Used 3d Printed ABS and PLA Polymers with Multi Layered Polymers," *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, vol.8, no.6, 2019.
- [15] M. Shamaas, "Introduction to 3D Printer", ResearchGate, (2022).
- [16] <https://elsapaco.com/>
- [17] F. Beer, E. R. Johnston, Jr., J. DeWolf, D. Mazurek, *Mechanics of Materials*, 2011.

