

## بررسی عوامل تأثیرگذار بر استحکام قطعات ساخته شده توسط چاپگرهای سه بعدی FFF

**چکیده:** ساخت افزودنی مبتنی بر اکستروژن یک روش تولید نوظهور است که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته و اساس کار چاپگرهای سه بعدی FFF است. در این روش، پلیمر ذوب شده از طریق یک نازل به صورت لایه به لایه روی هم قرار می‌گیرد تا یک جسم سه بعدی ایجاد شود. به دلیل انجماد سریع لایه‌ها ممکن است فضاها و حفره‌هایی بین لایه‌ها ایجاد شود که این فضاها خالی منجر به کاهش خواص مکانیکی از جمله استحکام قطعات می‌شوند. از آن جا که پیش بینی و بهبود خواص مکانیکی از چالش‌های این روش تولید است، هدف از این مطالعه، بررسی عوامل موثر بر استحکام قطعات تولید شده توسط FFF است. از جمله عوامل تأثیرگذار می‌توان به دمای نازل، درصد پر شدن، راستای نمونه، زاویه رسوب گذاری رشته‌ها، ضخامت لایه و قطر نازل اشاره کرد. طبق نتایج پژوهش‌های پیشین می‌توان گفت که افزایش دمای نازل، درصد پر شدن و قطر نازل و کاهش ضخامت لایه منجر به افزایش سطح تماس رشته‌های ذوب شده و همچنین کاهش فضاها خالی بین رشته‌ها می‌شود و بدین ترتیب استحکام قطعات تولید شده بهبود می‌یابد. هم چنین، استفاده از زاویه رسوب گذاری هم جهت با محور کشش می‌تواند تا حد زیادی استحکام قطعات را افزایش دهد.

**واژه‌های راهنما:** استحکام، ساخت افزودنی مبتنی بر اکستروژن، چاپ سه‌بعدی، پارامترهای چاپ، ساخت رشته ذوب شده

محمدرضا پوربافرانی  
دانشجوی کارشناسی ارشد  
روح اله عزیزی تفتی\*  
استادیار،  
دانشکده مهندسی مکانیک،  
دانشگاه یزد، یزد

مقاله مروری  
دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶  
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۳

Mohammad Reza  
Pourbafrani  
MSc Student

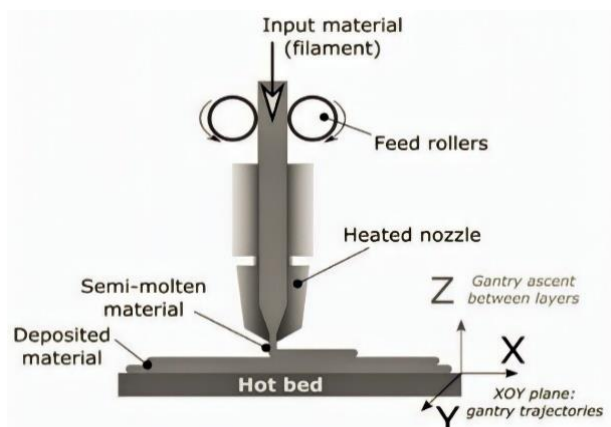
Roohallah Azizi  
Tafti\*  
Assistant Professor,  
Faculty of Mechanical  
Engineering  
Yazd University,  
Yaz

## Investigating the factors affecting the strength of parts produced by FFF 3D printers

**Abstract:** Nowadays, extrusion-based additive manufacturing is an emerging manufacturing method that is receiving much attention and is the basis of FFF 3D printers. In this method, molten polymer is deposited layer by layer through a nozzle to create a three-dimensional object. Due to the rapid freezing of the layers, small gap and cavities may be created between the layers and lead to a decrease in the mechanical properties, including the strength of the parts. Since predicting and improving the mechanical properties is one of the challenges of this production method, the purpose of this study is to investigate the factors affecting the strength of parts produced by FFF. Investigation of the previous studies shows that the influencing factors are the nozzle temperature, filling percentage, sample alignment, filament deposition angle, layer thickness and nozzle diameter. Furthermore, it is concluded that increasing the nozzle temperature, filling percentage, and nozzle diameter and decreasing the layer thickness improve the strength of the produced parts. This is due to an increase in the contact surface of the deposited filaments as well as a decrease in the empty gaps between them. Also, considering the deposition angle in the tension axis of the part can greatly increase its strength.

**Keywords:** Strength, Extrusion-based Additive Manufacturing, 3D Printing, Printing Parameters, Fused Filament Fabrication

## ۱- مقدمه



شکل ۱ فرآیند ساخت رشته ذوب شده (FFF) [۳]

ساخت افزودنی یا چاپ سه بعدی یک فناوری جدید است که از رسوب لایه به لایه مواد برای ساخت قطعات بر اساس مدل طراحی شده به کمک رایانه استفاده می‌کند. در این روش، مدل رایانه‌ای به تعدادی مقطع دوبعدی تفکیک شده و داده‌های حاصل به چاپگر انتقال داده می‌شود. گیبسون و همکاران ساخت افزودنی را به چند دسته طبقه‌بندی کردند که عبارتند از همجوشی بستر پودر<sup>۱</sup>، پلیمریزاسیون<sup>۲</sup>، اکستروژن مواد<sup>۳</sup>، جت مواد<sup>۴</sup>، رسوب مستقیم انرژی<sup>۵</sup> و جت بایندر<sup>۶</sup> [۱]. در میان روش‌های ساخت افزودنی، ساخت رشته ذوب شده (FFF)<sup>۷</sup> از دسته‌ی اکستروژن مواد، بیش‌ترین توجه، توسعه و نوآوری را به دلیل هزینه کم تجهیزات و عملکرد ساده در چند دهه اخیر به خود جلب کرده است [۲].

FFF با علامت تجاری مدل‌سازی رسوب ذوب شده<sup>۸</sup> (FDM)، در سال ۱۹۸۸ توسط شرکت استراتاسیس (Stratasys) ابداع شد. در این روش تولید، بعد از تبدیل مدل رایانه‌ای به کدهای حرکتی توسط نرم‌افزار، رشته‌ی پلیمری در یک نازل تا دمایی بالاتر از دمای ذوب حرارت داده می‌شود. سپس، با حرکت کنترل عددی شده‌ی نازل در دو جهت طولی و عرضی، پلیمر ذوب شده روی بستر چاپ رسوب داده شده و یک لایه ایجاد می‌گردد. پس از تکمیل هر لایه، بستر چاپ به اندازه‌ی ارتفاع یک لایه در جهت عمودی حرکت کرده و شرایط برای رسوب لایه بعدی فراهم می‌شود (شکل ۱). در نهایت، با روی هم قرار گرفتن این لایه‌ها، قطعه ایجاد می‌شود [۳]. در این روش، معمولاً از پلیمرهای ترموپلاستیک مانند پلی‌لاکتیک‌اسید<sup>۹</sup> (PLA) و اکریلونیتریل بوتادین استایرن<sup>۱۰</sup> (ABS) استفاده می‌شود [۱]. در سال‌های اخیر، به دلیل صرفه اقتصادی و دقت مطلوب FFF، استفاده از این روش تولید برای ساخت بسیاری از محصولات رواج یافته است. از کاربردهای FFF می‌توان به ساخت مدل‌های ریخته‌گری [۴]، ساخت نمونه‌های اولیه محصولات [۱]، تولید داربست‌های زیستی در زمینه مهندسی بافت [۵] و ساخت ایمپلنت‌های پزشکی [۶] اشاره کرد.

عدم هم‌پوشانی لایه‌ها و ایجاد فضاهای خالی بین لایه‌ای از چالش‌های روش تولید FFF است که از یک سو، باعث کاهش خواص مکانیکی قطعات چاپ شده می‌شود و از سوی دیگر، پیش‌بینی خواص مکانیکی را مشکل‌تر می‌کند [۷]. بنلی و همکاران [۸] با استفاده از روش‌های عددی و تجربی عوامل موثر بر خواص مکانیکی قطعات چاپ شده به روش FFF را بررسی کردند. طبق نتایج آن‌ها، راستای نمونه و جهت‌گیری رسوب رشته‌ها از عوامل موثر بر خواص مکانیکی قطعات چاپ شده هستند. کوزنتسوف و همکاران [۹] تأثیر دمای نازل، سرعت چاپ و سرعت خنک‌شدن را بر خواص مکانیکی قطعات چاپ شده به روش FFF بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که دمای نازل مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر استحکام قطعات چاپ شده است. میزان اثرگذاری راستای نمونه، ارتفاع لایه، درصد پرشدن بر خواص مکانیکی قطعات چاپ شده توسط راجو و همکاران [۱۰] مطالعه شد. آن‌ها در این بررسی از طراحی آزمایش تاگوچی و آزمون‌های تجربی استفاده کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که ارتفاع لایه بیش از سایر پارامترها بر خواص مکانیکی قطعات تأثیرگذار است. در این مطالعه تلاش شده است پارامترهای موثر بر استحکام قطعات چاپ شده به روش FFF بررسی شوند. بر اساس نتایج ارائه شده در پژوهش‌های پیشین، پارامترهایی مانند دمای نازل [۹]، درصد پرشدن [۱۰]، ارتفاع لایه [۱۰]، قطر نازل [۱۱]، زاویه رسوب رشته‌ها [۸] و زاویه

<sup>1</sup> Powder Bed Fusion

<sup>2</sup> Polymerization

<sup>3</sup> Material Extrusion

<sup>4</sup> Material Jetting

<sup>5</sup> Directed Energy Deposition

<sup>6</sup> Binder Jetting

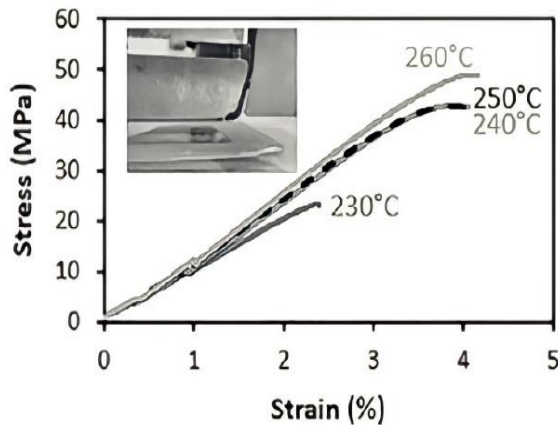
<sup>7</sup> Fused Filament Fabrication

<sup>8</sup> Fused Deposition Modeling

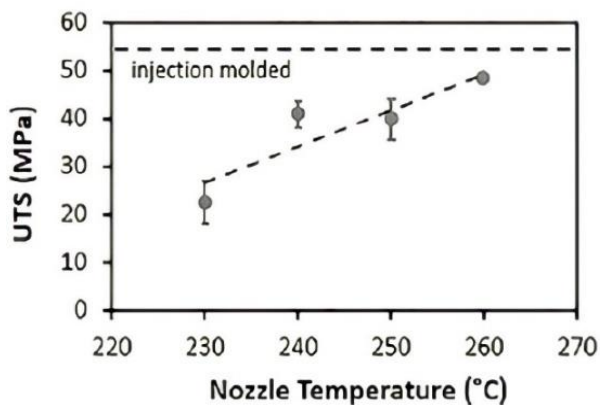
<sup>9</sup> Polylactic Acid

<sup>10</sup> Acrylonitrile Butadiene Styrene<sup>9</sup>

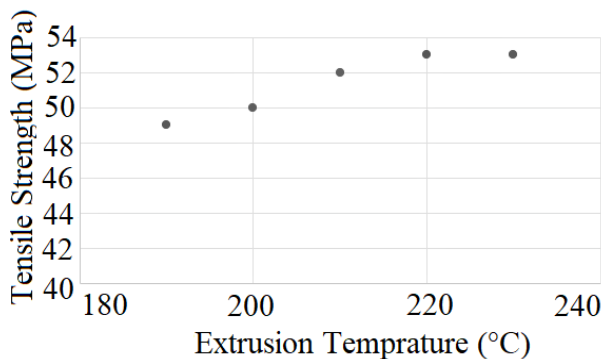
آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش دمای اکستروژن منجر به کاهش ویسکوزیته ماده می‌گردد که این امر باعث می‌شود تا سطح مقطع رشته اکستروژده از شکل دایره‌ای دور شده و بیضی شکل گردد. این امر به نوعی باعث افزایش سطح تماس بین رشته‌ها در لایه‌های متوالی شده و استحکام قطعه را افزایش می‌دهد.



شکل ۲ تنش بر حسب کرنش در دماهای مختلف نازل [۱۳]



شکل ۳ تأثیر دمای نازل بر استحکام کششی نهایی قطعات چاپ‌شده از جنس PET [۱۳]



شکل ۴ استحکام قطعات چاپ‌شده از جنس PLA بر حسب دمای نازل [۱۴]

ساخت قطعه [۸] از عوامل تأثیرگذار بر خواص مکانیکی از جمله استحکام قطعات هستند.

## ۲- عوامل تأثیرگذار بر استحکام قطعات ساخته‌شده در

### فرآیند FFF

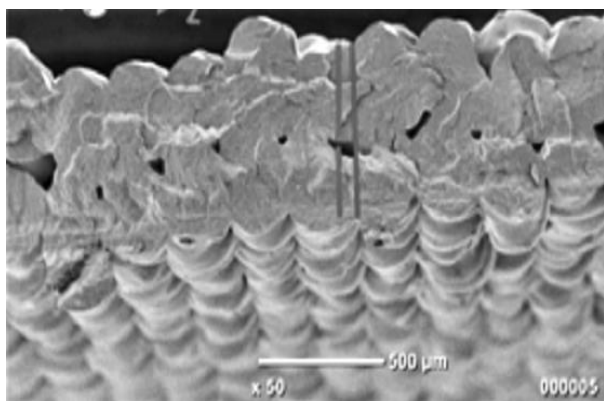
#### ۲-۱- دمای نازل

منظور از دمای نازل دمای پلیمر ذوب‌شده در هنگام اکستروژن است که معمولاً بالاتر از دمای ذوب آن پلیمر در نظر گرفته می‌شود. اگر دمای نازل پایین باشد، چسبندگی لایه‌ها به یکدیگر و استحکام قطعه پایین خواهد بود. دمای نازل خیلی بالا سبب ریزش پلیمر ذوب‌شده و چسبندگی نامطلوب لایه‌ها خواهد شد. بنابراین، در مواد اولیه مختلفی که در پرینترهای سه‌بعدی استفاده می‌شوند، یافتن دمای مناسب برای نازل جهت خروج پلیمر ذوب‌شده از آن اهمیت بسیار بالایی دارد. در بیش‌تر پلیمرهای مورد استفاده در پرینترهای سه‌بعدی، بازه‌ی مناسب برای دمای ذوب از طرف شرکت سازنده پیشنهاد می‌شود [۱۲]. باکیر و همکاران [۱۳] با مطالعه عوامل تأثیرگذار بر استحکام کششی نهایی قطعات پلی‌اتیلن ترفتالات<sup>۱</sup> (PET) در فرآیند ساخت افزودنی دریافتند که با افزایش دمای نازل، استحکام کششی نهایی قطعات ساخته‌شده افزایش می‌یابد. در این مطالعه، آن‌ها نمونه‌ها را بر اساس استاندارد آزمون کشش ASTM D638-4 چاپ کردند. آن‌ها استحکام کششی نهایی را در دماهای نازل ۲۳۰°C، ۲۴۰°C، ۲۵۰°C و ۲۶۰°C بررسی کردند (شکل ۲). آن‌ها هم‌چنین استحکام کششی نهایی را در دماهای ذکرشده مطالعه کردند (شکل ۳) و دریافتند که با افزایش دما، استحکام کششی نهایی نیز افزایش می‌یابد. آن‌ها دماهای بالاتر از ۲۶۰°C را نیز مطالعه نمودند که در این دماها پلیمر دچار تخریب شد. با توجه به نتایج آزمون کشش، آن‌ها دمای ۲۶۰°C را به عنوان بهترین دما برای چاپ سه‌بعدی PET معرفی کردند.

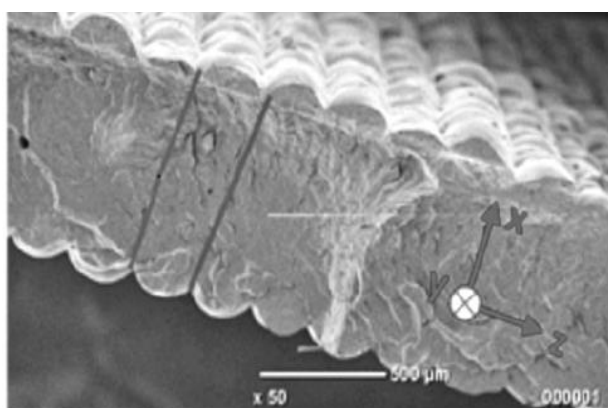
جاتی و همکاران [۱۴] دمای نازل را به عنوان پارامتر موثر بر استحکام کششی نهایی قطعات چاپ‌شده توسط فرآیند ساخت افزودنی مبتنی بر اکستروژن در نظر گرفتند. در این مطالعه، آن‌ها اثر پنج دمای نازل ۱۹۰°C، ۲۰۰°C، ۲۱۰°C، ۲۲۰°C و ۲۳۰°C را بر خواص مکانیکی قطعات چاپ‌شده از جنس PLA بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که با افزایش دما، استحکام کششی نهایی افزایش می‌یابد (شکل ۴).

<sup>1</sup> Polyethylene Terephthalate

چارلون و همکاران [۱۷] با بررسی تأثیر دمای نازل بر خواص مکانیکی قطعات چاپ شده از جنس PP دریافتند که با افزایش دمای نازل، استحکام پیوند بین رشته‌ها افزایش می‌یابد که در نتیجه، باعث افزایش استحکام کششی نهایی قطعه می‌گردد. آن‌ها در مطالعه خود برای بررسی این موضوع نمونه‌هایی را که در دماهای  $170^{\circ}\text{C}$ ،  $175^{\circ}\text{C}$  و  $180^{\circ}\text{C}$  چاپ شده بودند با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۲</sup> (SEM) بررسی کردند. تصاویر SEM نشان می‌دهد که با افزایش دمای نازل، تداخل بین لایه‌ها کاهش می‌یابد که این موضوع باعث افزایش چسبندگی بین رشته‌ها شده و در نهایت باعث افزایش استحکام کششی نهایی قطعه می‌گردد (شکل‌های ۷ و ۸).



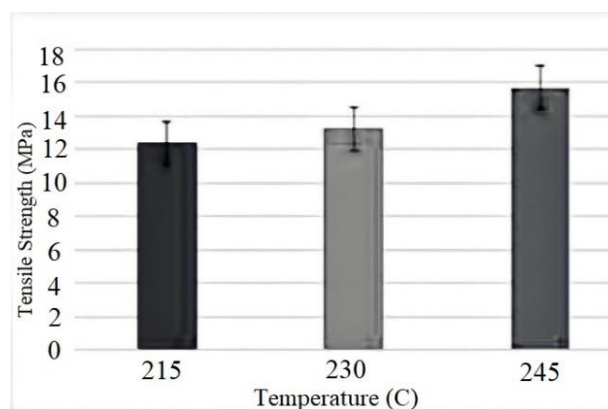
شکل ۷ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱</sup> (SEM) مربوط به نمونه چاپ شده از جنس PP در دمای نازل  $175^{\circ}\text{C}$  [۱۷]



شکل ۸ تصویر SEM مربوط به نمونه چاپ شده از جنس PP در دمای نازل  $180^{\circ}\text{C}$  [۱۷]

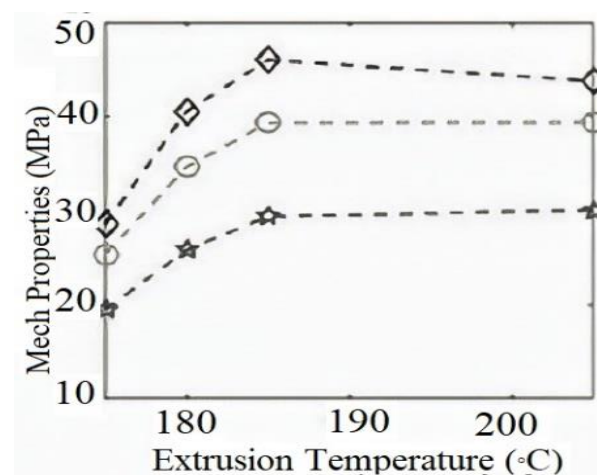
وانگ و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۲۰ در مطالعه‌ی خود بر روی فرآیند چاپ سه‌بعدی پلی‌اتراکتون<sup>۳</sup> (PEEK)، کامپوزیت

برایان وو و همکاران [۱۵] تأثیر سه دمای نازل  $215^{\circ}\text{C}$ ،  $230^{\circ}\text{C}$  و  $245^{\circ}\text{C}$  را بر خواص مکانیکی قطعات چاپ شده از رشته‌های پلی‌پروپیلن<sup>۱</sup> (PP) را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش دمای نازل، استحکام قطعات چاپ شده افزایش می‌یابد (شکل ۵).



شکل ۵ تأثیر دمای نازل بر استحکام نمونه‌های چاپ شده از جنس PP [۱۵]

در پژوهش علافانی و همکاران [۱۶] پارامترهای موثر بر خواص مکانیکی قطعات چاپ شده از جنس PLA بررسی شد. آن‌ها خواص مکانیکی نمونه‌ها را در دماهای نازل  $175^{\circ}\text{C}$ ،  $180^{\circ}\text{C}$  و  $205^{\circ}\text{C}$  بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش دمای نازل، مدول یانگ، استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی افزایش می‌یابد (شکل ۶).

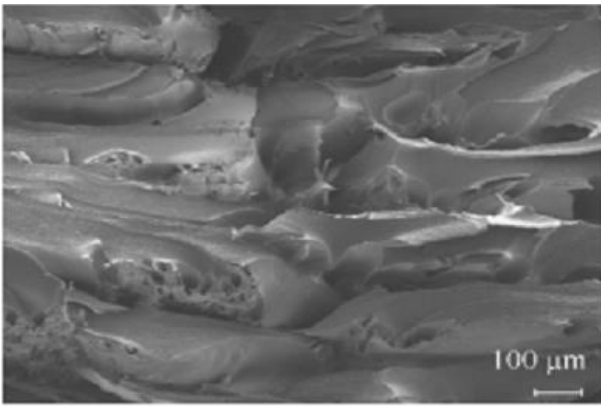


شکل ۶ تأثیر دمای نازل بر خواص مکانیکی قطعات چاپ شده از جنس PLA (E مدول یانگ، Sy استحکام تسلیم و Ts استحکام کششی نهایی) [۱۶]

<sup>1</sup> Polypropylene

<sup>2</sup> Scanning Electron Microscope

<sup>3</sup> Polyether Etherketone

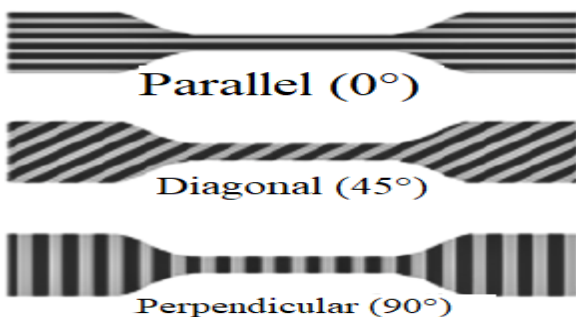


شکل ۱۱ SEM نمونه چاپ شده PEEK در دمای نازل  
[۱۸] ۴۴۰°C

عسگری و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۱ تأثیر چهار پارامتر دمای نازل، جهت گیری رسوب رشته‌ها، الگوی پرشدن و ارتفاع لایه را بر خواص مکانیکی قطعات چاپ شده از جنس پلی‌اکسی‌متیلن<sup>۳</sup> (POM) بررسی کردند. در این مطالعه از طراحی آزمایش تاگوجی استفاده شده است و نتایج نشان داد که دمای نازل پس از جهت‌گیری رسوب رشته‌ها مهم‌ترین عامل اثرگذار بر استحکام نهایی کشش قطعات چاپ شده است. همچنین نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش دمای نازل استحکام نهایی کششی قطعات چاپ شده افزایش می‌یابد.

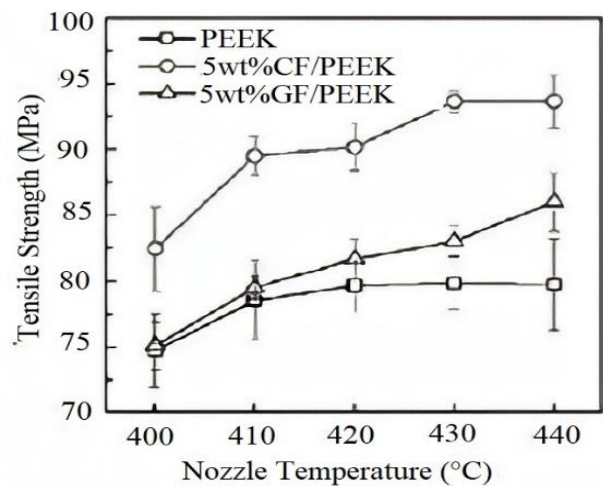
## ۲-۲- جهت‌گیری رسوب رشته‌ها

جهت‌گیری رسوب رشته‌ها زاویه‌ی مسیر چاپ نسبت به محور بارگذاری نمونه است. باکیر و همکاران [۱۳] در مطالعه خود تأثیر سه جهت رسوب ۰° (موازی)، ۴۵° (مورب) و ۹۰° (عمود) را بر استحکام نمونه‌های چاپ شده از جنس PET بررسی کردند (شکل ۱۲).

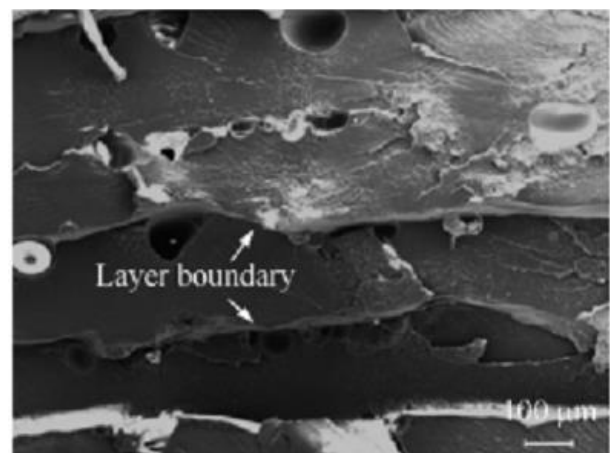


شکل ۱۲ جهت‌گیری رشته‌های چاپ شده نسبت به محور بارگذاری [۱۳]

پلی‌اترکتون و الیاف شیشه<sup>۱</sup> (GF/PEEK) و همچنین کامپوزیت پلی‌اترکتون و فیبرکربن<sup>۲</sup> (CF/PEEK)، تأثیر دمای نازل را بر خواص مکانیکی قطعات چاپ شده از این مواد بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش دمای نازل، برای هر سه ماده مورد نظر، خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی نهایی افزایش می‌یابد (شکل ۹). همچنین، برای بیان علت این پدیده، آن‌ها نمونه‌ها را با استفاده از SEM بررسی کردند (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). تصاویر SEM نشان می‌دهد که با افزایش دمای نازل، لایه‌ها با یکدیگر پیوند بهتری برقرار کرده و مرزهای بین لایه‌ای که محل تمرکز تنش هستند کاهش می‌یابند.



شکل ۹ تأثیر دمای نازل بر استحکام کششی نهایی PEEK، CF/PEEK و GF/PEEK [۱۸]

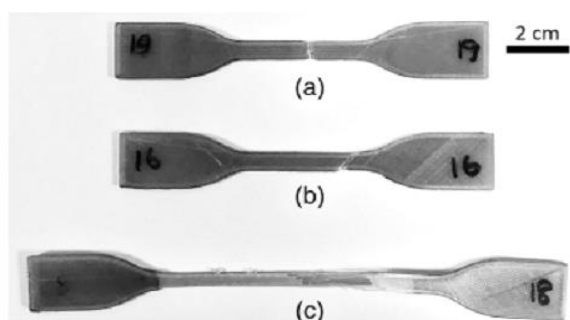


شکل ۱۰ تصویر SEM نمونه چاپ شده PEEK در دمای نازل  
[۱۸] ۴۰۰°C

<sup>1</sup> Polyether Etherketone/ Glass Fiber

<sup>2</sup> Polyether Etherketone/ Carbon Fiber

<sup>3</sup> Polyoxymethylene



شکل ۱۴ سطح مقطع نمونه‌ها پس از شکست با جهت‌گیری رشته مختلف (a جهت‌گیری رشته عمود، b مورب و c موازی) [۱۳]

نتایج مشابهی را زیمیان و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۵ گزارش نمودند که برای بررسی تأثیر جهت‌گیری رسوب رشته‌ها از چهار زاویه  $0^\circ$ ،  $45^\circ$ ،  $90^\circ$  و  $45^\circ/45^\circ$  (مقاطع) برای چاپ قطعاتی از جنس ABS استفاده کردند. آن‌ها بیش‌ترین استحکام کششی نهایی (۲۵ مگاپاسکال) را برای نمونه‌های با زاویه رشته  $0^\circ$  مشاهده نمودند. با توجه به این‌که در این نمونه‌ها، رشته‌ها هم جهت با محور کشش بودند در حین آزمون کشش، رشته‌ها کشیده شدند تا در نهایت، شکست رخ داد. اما در نمونه‌های دیگر، تمرکز تنش در فاصله بین لایه‌ها باعث کاهش استحکام قطعات گردید.

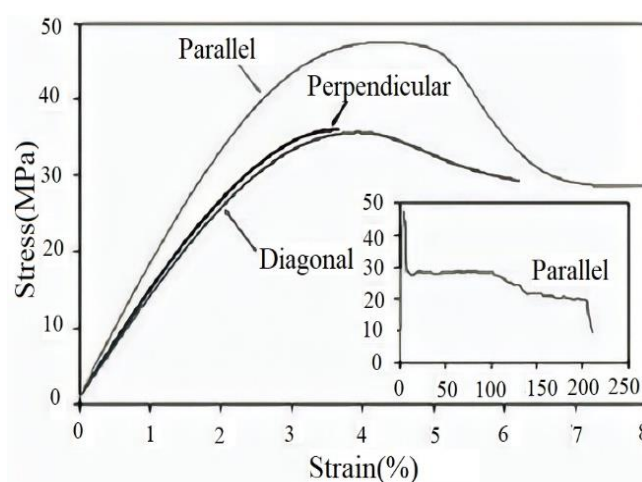
نداگوندی و همکاران [۲۰] به وسیله آزمون کشش و با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی با در نظر گرفتن سه سطح  $0^\circ$ ،  $30^\circ$  و  $60^\circ$  برای زاویه رسوب رشته‌های ذوب‌شده از جنس ABS، استحکام کششی نهایی قطعات را بررسی کردند. آن‌ها نیز به نتایجی مشابه با دو پژوهش قبلی رسیدند.

عسگری و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۱ تأثیر چهار پارامتر دمای نازل، جهت‌گیری رسوب رشته‌ها، الگوی پرشدن و ارتفاع لایه را بر خواص مکانیکی قطعات چاپ‌شده از جنس POM بررسی کردند. آن‌ها در این مطالعه از طراحی آزمایش تاگوچی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که زاویه رسوب رشته مهم‌ترین عامل اثرگذار بر استحکام کششی نهایی قطعات چاپ‌شده است. در این مطالعه آن‌ها سه زاویه رشته  $0^\circ/90^\circ$ ،  $30^\circ/60^\circ$  و  $45^\circ/45^\circ$  را بررسی کردند که بیش‌ترین استحکام نهایی کشش در زاویه رشته  $90^\circ/0^\circ$  بدست آمد. آن‌ها دلیل این مسئله را هم جهت بودن لایه‌ها با نیروی کششی اعمال شده بیان کردند.

## ۲-۳- راستای نمونه

منظور از راستای نمونه امتداد آن نسبت به بستر چاپ است. باکیر و همکاران [۱۳] تأثیر دو راستای عمودی و افقی را بر خواص مکانیکی نمونه‌ها بررسی کردند (شکل ۱۵).

نتایج آزمون کشش نشان داد که نمونه‌ها با جهت‌گیری موازی نسبت به دیگر جهت‌گیری‌ها نه تنها از استحکام کششی نهایی بیش‌تری برخوردار هستند (شکل ۱۳) بلکه افزایش طول بالاتری را تا شکست تجربه می‌کنند به طوری که افزایش طول میانگین ۱۹۹ درصد برای آن‌ها مشاهده شد (جدول ۱). در حالی که در جهت‌گیری مورب، افزایش طول میانگین بسیار کم‌تری برابر با  $7/9$  درصد دیده شد و جهت‌گیری عمود افزایش طول میانگین  $3/3$  درصد را نشان داد. این در حالی است که استحکام کششی نهایی و مدول الاستیک جهت‌گیری‌های عمود و مورب نزدیک به هم و کم‌تر از جهت‌گیری موازی است.

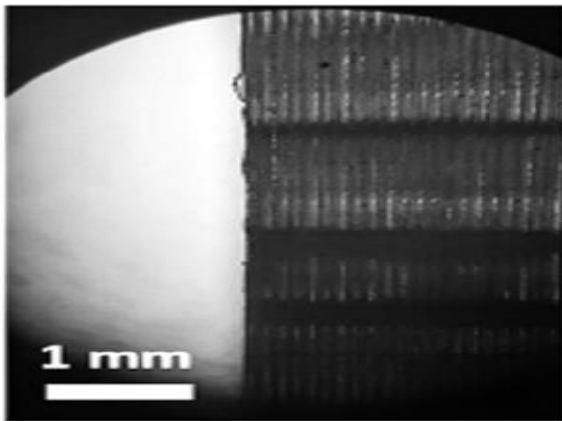


شکل ۱۳ تأثیر جهت‌گیری رسوب رشته‌های PET بر روی نمودار تنش-کرنش [۱۳]

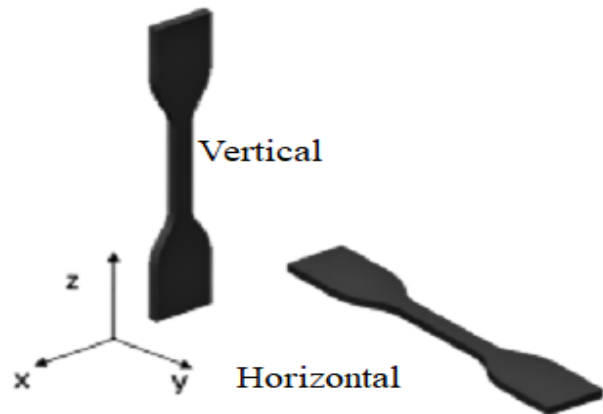
جدول ۱ تأثیر جهت‌گیری رسوب رشته‌های PET بر خواص مکانیکی قطعات [۱۳]

Raster orientation	UTS (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Elongation at break (%)
Perpendicular	33.3±2.4	1.44±0.8	3.3±1.2
Diagonal	35.8±1.0	1.41±1.0	7.9±5.3
Parallel	47.7±0.2	1.73±0.2	199±1.2

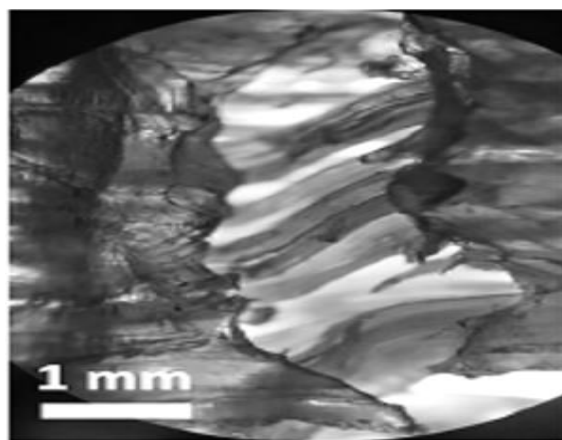
آن‌ها با بررسی محل شکست نمونه‌ها دریافتند که نمونه‌ها با جهت‌گیری‌های مورب و عمود در سطح مشترک بین رشته‌ها دچار شکست شدند اما نمونه با جهت‌گیری موازی پس از تجربه‌ی یک کاهش سطح مقطع قابل‌توجه شکسته است (شکل ۱۴).



شکل ۱۶ سطح مقطع شکست نمونه‌ی چاپ‌شده در راستای عمودی زیر میکروسکوپ نوری [۱۳]



شکل ۱۵ جهت‌گیری نمونه افقی و عمودی با زاویه رشته  $0^\circ$  [۱۳]



شکل ۱۷ سطح مقطع شکست نمونه‌ی چاپ‌شده در راستای افقی زیر میکروسکوپ نوری [۱۳]

راستای نمونه یکی از پارامترهای بررسی‌شده توسط حکمت و همکاران [۲۱] است. در این بررسی که با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی انجام شد، راستای نمونه بیش‌ترین تأثیرگذاری را بر استحکام قطعات چاپ‌شده از جنس PLA داشته است. آن‌ها دو حالت مسطح و روی لبه را در نظر گرفتند (شکل ۱۸) و با انجام آزمون کشش دریافتند که قطعاتی که در حالت روی لبه چاپ شدند استحکام بیش‌تری نسبت به قطعات مسطح دارند (شکل ۱۹).



شکل ۱۸ نمونه‌های چاپ‌شده به صورت مسطح (سمت چپ) و به صورت روی لبه (سمت راست) [۲۱]

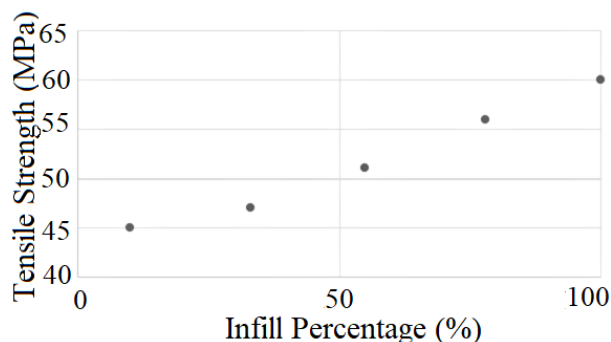
جدول ۲ خواص مکانیکی نمونه‌های چاپ‌شده توسط آن‌ها در دو راستای افقی و عمودی را نشان می‌دهد. نمونه‌ها با راستای افقی دارای میانگین استحکام کششی نهایی ۴۷/۷ مگاپاسکال بودند، در حالی که میانگین استحکام کششی نهایی نمونه‌های عمودی کم‌تر از نصف این مقدار (۲۳/۵ مگاپاسکال) بود. تفاوت قابل توجهی نیز برای ازدیاد طول در هنگام شکست مشاهده شد. به صورتی که نمونه‌های عمودی در افزایش طول میانگین بسیار کم ۱/۴ درصد دچار شکست شدند در حالی که نمونه‌ها با راستای افقی افزایش طول میانگین ۱۸۹/۹ درصدی را تجربه کردند.

جدول ۲ خواص مکانیکی با راستای نمونه افقی (و عمودی با دمای نازل  $240^\circ\text{C}$  و ۸۰ درصد پرشدن [۱۳])

Specimen orientation	UTS (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Elongation at break (%)
Horizontal (with parallel raster)	47.7±0.2	1.73±0.2	198.9±11.8
Vertical	23.5±1.4	1.67±0.5	1.4±0.1

آن‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری از سطح مقطع شکست نمونه‌ها بعد از آزمون کشش عکس‌برداری کردند (شکل‌های ۱۶ و ۱۷). همان‌طور که شکل ۱۶ نشان می‌دهد نمونه‌هایی که در راستای عمودی چاپ شدند در محل اتصال رشته‌ها شکسته‌اند و تغییرشکل قابل توجهی در شکل ظاهری رشته‌ها دیده نمی‌شود. این در حالی است که رشته‌های نمونه‌هایی که در راستای افقی چاپ شدند در هنگام شکست تغییرشکل زیادی یافته‌اند (شکل ۱۷).

است که مواد بیش تری در قطعه‌ی ساخته‌شده رسوب کرده و در نتیجه، چگالی قطعه افزایش می‌یابد. بنابراین، برای کشیدن و شکستن نمونه به نیروی بیش تری نیاز است که این امر باعث افزایش استحکام کششی نهایی قطعه چاپ‌شده می‌شود.



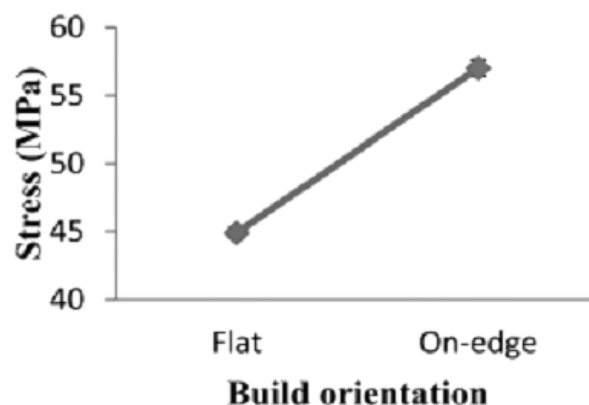
شکل ۲۰ تأثیر درصد پرشدن بر استحکام کششی نهایی نمونه‌های چاپ‌شده از جنس PLA [۱۴]

ویسنت و همکاران [۲۲] با استفاده از طراحی آزمایش فاکتوریال کامل و انتخاب دو سطح برای درصد پرشدن نتیجه گرفتند که درصد پرشدن از عوامل تأثیرگذار بر روی خواص مکانیکی قطعات چاپ‌شده از جنس ABS است. آن‌ها هم چنین دریافتند که با افزایش درصد پرشدن، استحکام کششی نهایی و سفتی قطعات چاپ‌شده افزایش می‌یابد.

ملنکا و همکاران [۲۳] با استفاده از روش طراحی آزمایش فاکتوریال کامل، میزان اثرگذاری سه پارامتر راستای نمونه، ارتفاع لایه و درصد پرشدن را بر خواص مکانیکی قطعات چاپ‌شده از PLA بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که درصد پرشدن بیش ترین تأثیر را بر خواص مکانیکی قطعات چاپ‌شده دارد و با افزایش درصد پرشدن، استحکام کششی قطعات چاپ‌شده افزایش می‌یابد. هم چنین ارتفاع لایه و راستای نمونه به ترتیب در رده‌های دوم و سوم از نظر میزان اثرگذاری قرار گرفتند.

علافقانی و همکاران [۱۶] در پژوهش خود تأثیر درصد پرشدن را بر خواص مکانیکی قطعات چاپ‌شده از جنس PLA بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش درصد پرشدن، مدول الاستیک، استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی افزایش می‌یابد. آن‌ها گزارش دادند که درصد پرشدن تأثیر بیش تری بر استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی دارد (شکل ۲۱).

حکمت و همکاران [۲۱] هفت پارامتر تأثیرگذار بر استحکام کششی نهایی قطعات چاپ‌شده از جنس PLA را با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی بررسی کردند. در این مطالعه، آن‌ها سه



شکل ۱۹ مقایسه‌ی استحکام نمونه‌های چاپ‌شده به صورت روی لبه با نمونه‌های مسطح [۲۱]

#### ۴-۲- درصد پرشدن

درصد پرشدن را می‌توان معیاری برای متخلخل بودن قطعه کار در نظر گرفت که با هم رابطه‌ی عکس دارند به صورتی که با افزایش درصد پرشدن، تخلخل کاهش می‌یابد. باکیر و همکاران [۱۳] تأثیر درصد پرشدن را بر خواص مکانیکی نمونه‌های چاپ‌شده از جنس PET بررسی کردند. آن‌ها در مطالعه خود نمونه‌هایی را با پنج درصد پرشدن متفاوت چاپ کردند که جدول ۳ نتایج حاصل از آزمون کشش آن‌ها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد پرشدن، استحکام کششی نهایی و مدول الاستیک افزایش می‌یابد. در عین حال، درصد پرشدن تأثیر مشخصی بر درصد افزایش طول در هنگام شکست نداشته است.

جدول ۳ خواص مکانیکی نمونه‌های PET با درصدهای پرشدن متفاوت [۱۳]

Infill ratio (%)	UTS (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Elongation at break (%)
20	14.2±3.2	0.7±0.03	6.9±0.5
40	16.2±2.7	0.7±0.07	5.7±0.5
60	17.9±1.1	0.8±0.03	6.2±1.8
80	35.8±1.0	1.4±0.10	5.6±1.5
100	45.3±1.0	1.7±0.17	7.2±1.2

جاتی و همکاران [۱۴] تأثیر درصد پرشدن را بر خواص مکانیکی قطعات چاپ‌شده از جنس PLA بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش درصد پرشدن، استحکام کششی نهایی قطعات چاپ‌شده افزایش می‌یابد (شکل ۲۰). آن‌ها این موضوع را این گونه توضیح دادند که درصد پرشدن بیش تر به این معنی



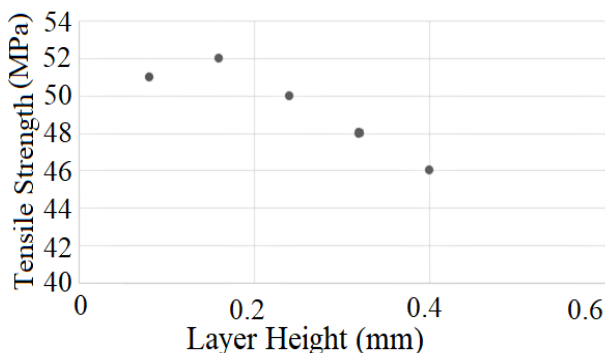
رادوان و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۱۹ تأثیر سه پارامتر درصد پرشدن، ارتفاع لایه و زاویه رسوب رشته‌ها را بر خواص مکانیکی قطعات چاپ‌شده از جنس ABS مطالعه کردند. در این مطالعه که از طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شده است نتایج نشان که مهم‌ترین عامل تأثیرگذار بر استحکام کششی نهایی قطعات چاپ‌شده درصد پرشدن است. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش درصد پرشدن استحکام کششی نهایی قطعات چاپ‌شده افزایش می‌یابد.

بایستیستا و همکارانش [۲۶] در سال ۲۰۲۰ تأثیر پارامترهای فرآیند FFF بر خواص مکانیکی داربست‌های زیستی از جنس PLA را بررسی کردند. آن‌ها داربست‌ها را در سه درصد پرشدن ۳۰، ۵۰ و ۷۰ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش درصد پرشدن، استحکام فشاری داربست‌ها افزایش می‌یابد اما تخلخل داربست‌ها که برای رشد و تکثیر سلولی مفید است کاهش می‌یابد.

از دست و همکاران [۲۷] نیز با مطالعه با بررسی تخلخل داربست‌های زیستی تولیدشده از جنس PLA نتایج مشابهی را گزارش کردند. از دست و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۲۱ با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی میزان اثرگذاری پارامترهای ضخامت لایه، زاویه رسوب رشته‌ها و درصد پرشدن را بر روی خواص مکانیکی قطعات چاپ‌شده از جنس PLA بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد درصد پرشدن موثرترین عامل بر روی استحکام ضربه قطعات چاپ‌شده است و با افزایش درصد پرشدن، استحکام ضربه قطعات افزایش می‌یابد.

## ۲-۵- ارتفاع لایه

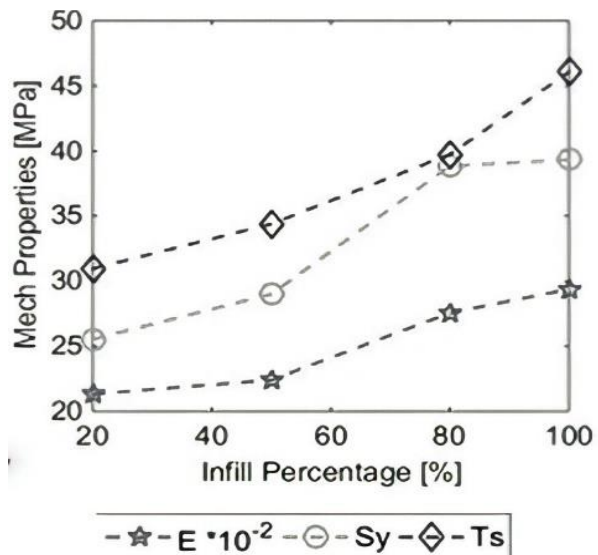
جاتی و همکارانش [۱۴] مشاهده کردند که با افزایش ارتفاع لایه، استحکام کششی نهایی قطعات چاپ‌شده از جنس PLA کاهش می‌یابد (شکل ۲۴).



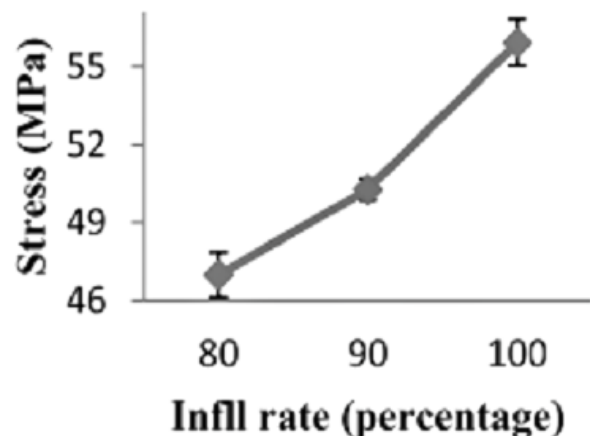
شکل ۲۴ استحکام کششی بر حسب ارتفاع لایه نمونه‌های چاپ‌شده از جنس PLA [۱۴]

هراندز و همکاران [۲۹] نیز نتایج مشابه جاتی گزارش دادند. آن‌ها با استفاده از مدل‌سازی عددی خواص مکانیکی

درصد پرشدن ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ را در نظر گرفتند. آن‌ها دریافتند که با افزایش درصد پرشدن، استحکام قطعات افزایش می‌یابد (شکل ۲۲) و هم‌چنین از بین پارامترهای بررسی‌شده، درصد پرشدن پس از راستای نمونه و قطر نازل سومین پارامتر تأثیرگذار بر استحکام قطعات چاپ‌شده است.

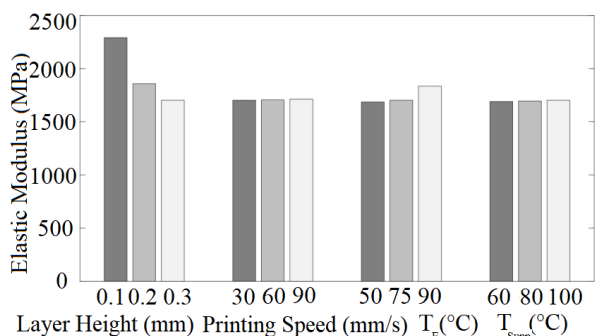


شکل ۲۱ تأثیر درصد پرشدن بر خواص مکانیکی قطعات چاپ‌شده از جنس PLA (مدول یانگ، E) استحکام تسلیم Sy و استحکام کششی نهایی Ts) [۱۶]

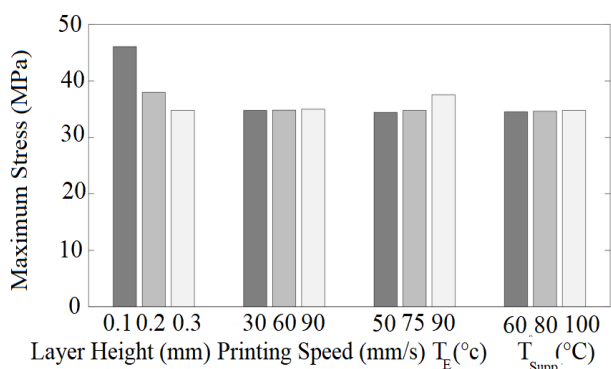


شکل ۲۲ تأثیر درصد پرشدن بر استحکام کششی نهایی قطعات چاپ‌شده از PLA [۲۱]

حیدری و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۲۰ میزان اثرگذاری سه پارامتر درصد پرشدن، ارتفاع لایه و سرعت چاپ را بر استحکام کششی نهایی قطعات چاپ‌شده بررسی کردند. آن‌ها در این مطالعه از طراحی آزمایش تاگوچی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش درصد پرشدن و سرعت چاپ و هم‌چنین کاهش ضخامت لایه‌ها استحکام کششی نهایی نمونه‌های چاپ‌شده از جنس PLA افزایش می‌یابد.



شکل ۲۷ مقایسه تأثیرگذاری دمای بستر، دمای نازل، سرعت چاپ و ارتفاع لایه بر مدول الاستیک قطعات چاپ شده از جنس ABS [۲۹]

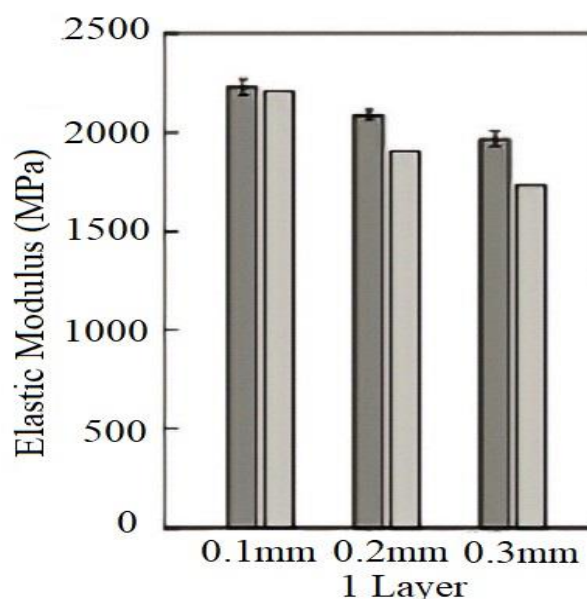


شکل ۲۸ مقایسه تأثیرگذاری دمای بستر، دمای نازل، سرعت چاپ و ارتفاع لایه بر تنش نهایی قطعات چاپ شده از جنس ABS [۲۹]

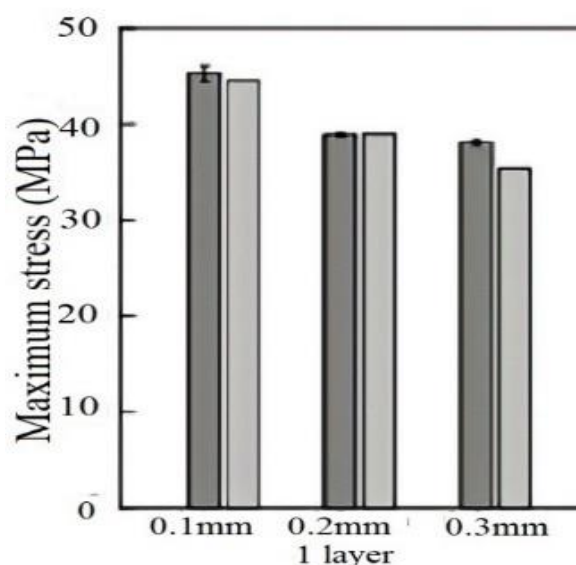
خاتونی و همکاران [۳۰] برای مطالعه چگونگی تأثیرگذاری ارتفاع لایه بر استحکام قطعات چاپ شده، قطعاتی از جنس PLA را با سه ضخامت ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ میلی متر چاپ کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش ارتفاع لایه، استحکام کششی نهایی قطعات کاهش می‌یابد (شکل ۲۹). همچنین، برای درک بهتر این موضوع، از نمونه‌ها عکس‌های SEM تهیه شد (شکل ۳۰ و ۳۱). با توجه به تصاویر SEM، با افزایش ارتفاع لایه، سطح تماس بین لایه‌ها کاهش می‌یابد که این مسئله باعث کاهش چسبندگی بین لایه‌ها و در نتیجه کاهش استحکام کششی نهایی می‌شود.

وانگ و همکاران [۱۸] تأثیر ارتفاع لایه را بر روی خواص مکانیکی قطعات چاپ شده از جنس PEEK، GF/PEEK و CF/PEEK بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش ارتفاع لایه، استحکام کششی نهایی قطعات کاهش می‌یابد (شکل ۳۲). با افزایش ارتفاع لایه، فاصله بین لایه‌ها افزایش یافته است و تخلخل و حفره‌ها در بین لایه‌ها افزایش می‌یابد که این امر باعث تمرکز تنش و همچنین کاهش چسبندگی بین لایه‌ها می‌شود و به این ترتیب، استحکام قطعات چاپ شده با افزایش ارتفاع لایه کاهش می‌یابد (شکل‌های ۳۳ و ۳۴).

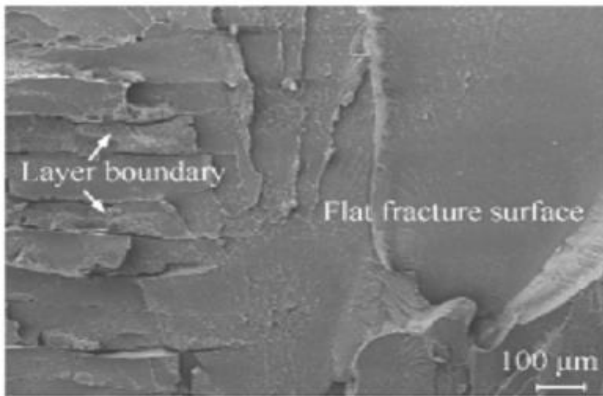
قطعات چاپ شده از جنس ABS را تخمین زدند و سپس نتایج را با داده‌های تجربی مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش ارتفاع لایه، خواص مکانیکی از جمله مدول الاستیک و استحکام کششی نهایی کاهش می‌یابد (شکل‌های ۲۵ و ۲۶). همچنین، آن‌ها با بررسی اثر دمای نازل، دمای بستر و سرعت چاپ بر خواص مکانیکی و مقایسه آن‌ها با تأثیر ارتفاع لایه دریافتند که ارتفاع لایه بیش‌ترین تأثیرگذاری را بر روی خواص مکانیکی دارد (شکل‌های ۲۷ و ۲۸).



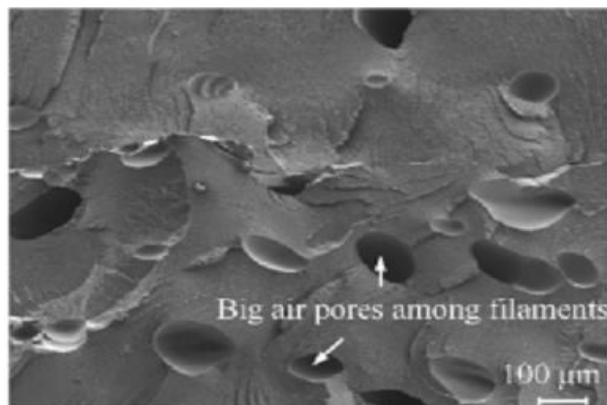
شکل ۲۵ مدول الاستیک قطعات چاپ شده از جنس ABS بر حسب ارتفاع لایه [۲۹]



شکل ۲۶ استحکام کششی نهایی قطعات چاپ شده از جنس ABS بر حسب ارتفاع لایه [۲۹]



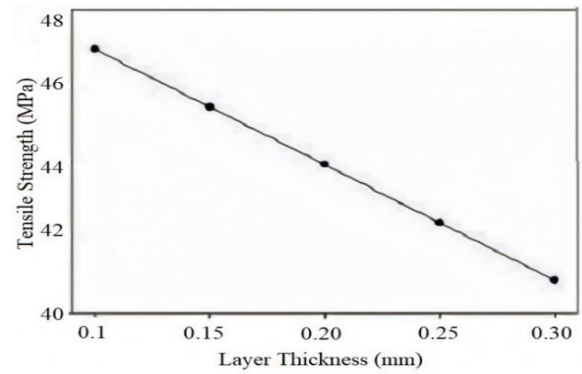
شکل ۳۳ تصویر SEM سطح نمونه با ارتفاع لایه ۰/۱ میلی‌متر [۱۸]



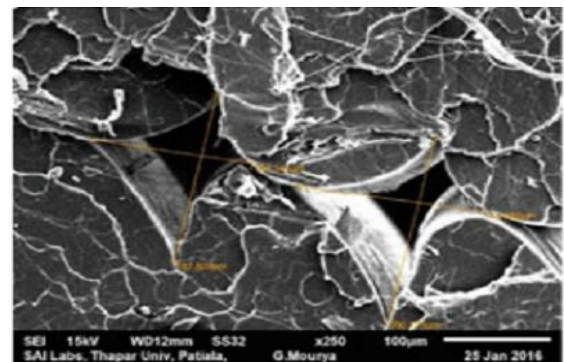
شکل ۳۴ تصویر SEM سطح نمونه با ارتفاع لایه ۰/۲ میلی‌متر [۱۸]

## ۲-۶- قطر نازل

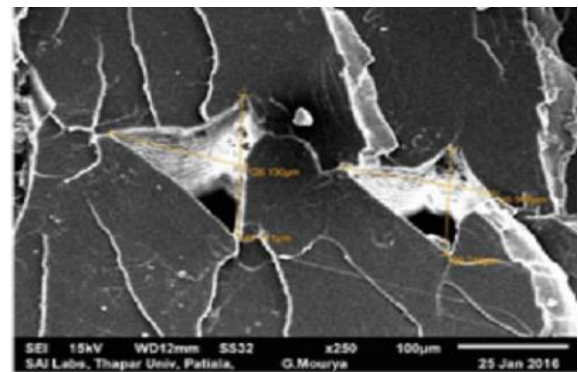
قطر نازل یکی از پارامترهایی است که بر میزان مواد خارج شده از نازل تأثیرگذار است و بر همین اساس، تغییر قطر نازل ممکن است بر استحکام قطعات چاپ شده نیز تأثیرگذار باشد. تریبونو و همکاران [۱۱] تأثیر قطر نازل را بر چگالی و استحکام قطعات چاپ شده بررسی کردند. آن‌ها در مطالعه خود از چهار نازل با قطرهای ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ میلی‌متر، دمای بستر ۶۰ °C و دمای نازل ۲۲۰ °C برای چاپ رشته‌هایی از جنس PLA استفاده کردند. بررسی‌های آن‌ها نشان داد که با افزایش قطر نازل، چگالی و استحکام قطعات چاپ شده افزایش می‌یابد (شکل ۳۵ و ۳۶). برای بررسی بیشتر این موضوع از نمونه‌ها عکس برداری SEM انجام شد که نتایج نشان داد با افزایش قطر نازل، فاصله بین رشته‌های چاپ شده کاهش می‌یابد و در نتیجه، باعث کاهش تخلخل و افزایش چگالی قطعات می‌شود. هم‌چنین، با کاهش فضاهای خالی بین رشته‌های ذوب شده، سطح تماس بین رشته‌ها افزایش می‌یابد که در نهایت منجر به افزایش استحکام کششی نهایی می‌شود (شکل‌های ۳۷ و ۳۸).



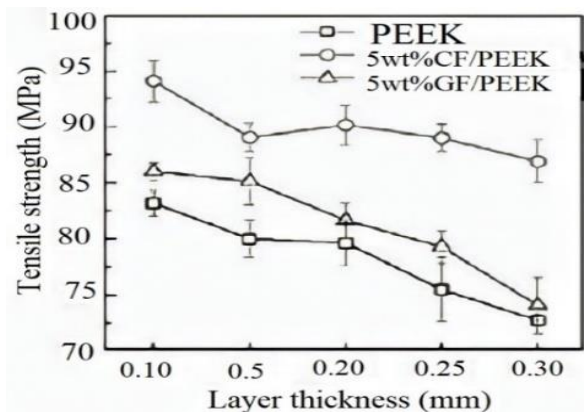
شکل ۲۹ ارتفاع لایه بر حسب استحکام کششی قطعات چاپ شده از جنس PLA [۳۰]



شکل ۳۰ تصویر SEM سطح مقطع نمونه چاپ شده از جنس PLA با ارتفاع لایه ۰/۲ میلی‌متر [۳۰]

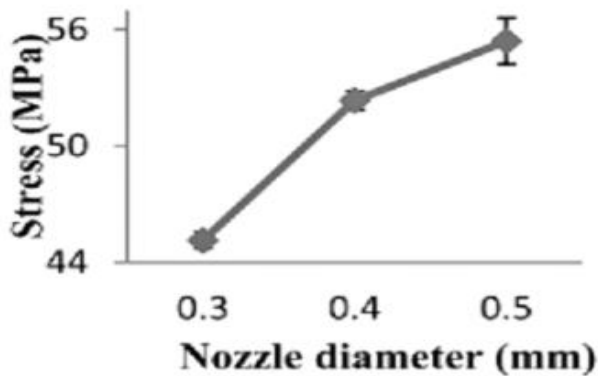


شکل ۳۱ سطح مقطع نمونه از جنس PLA با ارتفاع لایه ۰/۱ میلی‌متر [۳۰]



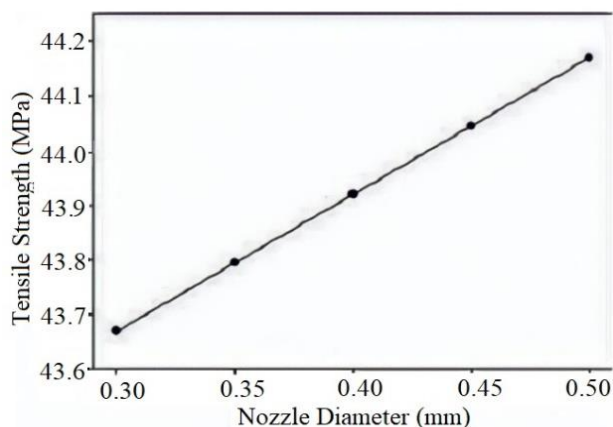
شکل ۳۲ اثر ارتفاع لایه بر استحکام [۱۸]

حکمت و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۲۱ میزان اثرگذاری هفت پارامتر بر استحکام قطعات چاپ‌شده را بررسی کردند. این پارامترها عبارتند از راستای نمونه، جهت‌گیری رسوب رشته‌ها، قطر نازل، درصد پرشدن، دمای نازل، تعداد پوسته و سرعت چاپ. در این بررسی، از روش طراحی آزمایش تاگوچی با تعداد ۱۸ آزمایش با هدف تعیین میزان تأثیرگذاری پارامترها بر استحکام قطعات چاپ‌شده از جنس PLA استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش قطر نازل، استحکام کششی نهایی قطعات افزایش می‌یابد (شکل ۳۹). همچنین، آن‌ها دریافتند که از نظر میزان اثرگذاری، قطر نازل تأثیر قابل‌توجهی بر استحکام قطعات چاپ‌شده دارد به گونه‌ای که بعد از راستای نمونه در رده دوم پارامترهای تأثیرگذار قرار گرفت.

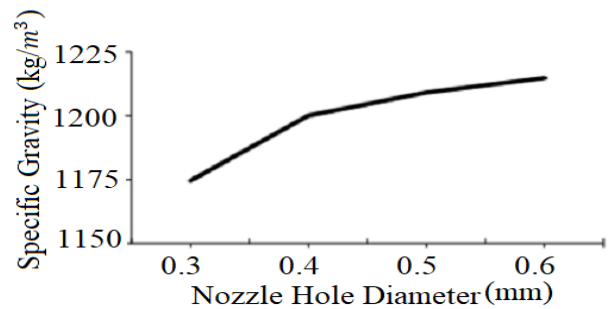


شکل ۳۹ تأثیر قطر نازل بر استحکام کششی نهایی قطعات چاپ‌شده از جنس PLA [۲۱]

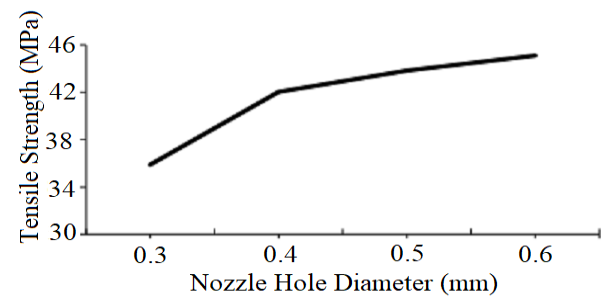
خاتونی و همکاران [۳۰] برای بررسی تأثیر قطر نازل بر استحکام قطعات چاپ‌شده، نمونه‌هایی را با پنج قطر نازل ۰/۳، ۰/۳۵، ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵ میلی‌متر چاپ کردند. نتایج آزمون کشش نشان داد که با افزایش قطر نازل، استحکام کشش قطعات چاپ‌شده افزایش می‌یابد (شکل ۴۰).



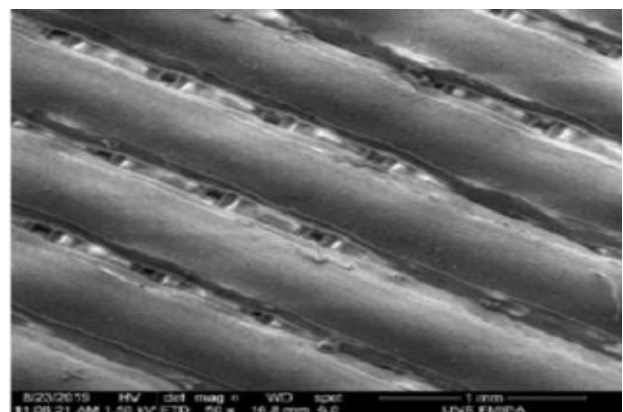
شکل ۴۰ اثر قطر نازل بر استحکام [۳۰]



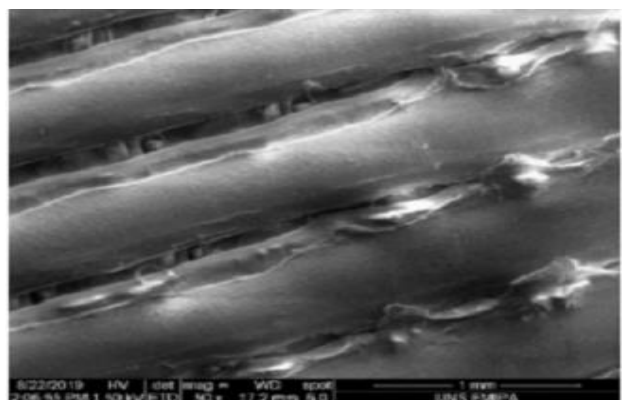
شکل ۳۵ تأثیر قطر نازل بر چگالی قطعات چاپ‌شده از جنس PLA در دمای بستر ۶۰ °C و دمای نازل ۲۲۰ °C [۱۱]



شکل ۳۶ تأثیر قطر نازل بر استحکام کششی نهایی قطعات چاپ‌شده از جنس PLA در دمای بستر ۶۰ °C و دمای نازل ۲۲۰ °C [۱۱]



شکل ۳۷ تصویر SEM سطح نمونه با قطر نازل ۰/۳ میلی‌متر در رشته‌هایی از جنس PLA [۱۱]



شکل ۳۸ تصویر SEM سطح نمونه با قطر نازل ۰/۴ میلی‌متر در رشته‌هایی از جنس PLA [۱۱]

parameters: a review of current research and future prospects, *Adv. Manuf*, Vol. 3, No. 1, pp. 42–53, (2015).

[3] Zaman, U.K.U., Boesch, E., Siadat, A., Rivette, M., Baqai, A., Impact of fused deposition modeling (FDM) process parameters on strength of built parts using Taguchi's design of experiments, *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 101, pp. 1215–1226, (2019).

[4] Lee, C., Chua, C., Cheah, C., Tan, L., Feng, C., Rapid investment casting: direct and indirect approaches via fused deposition modelling, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, Vol. 23, pp. 93–101, (2004).

[5] Zhang, B., Seong, B., Nguyen, V., Byun, D., 3D printing of high-resolution PLA-based structures by hybrid electrohydrodynamic and fused deposition modeling techniques, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 26, No. 2, pp. 25015, (2016).

[6] Van Noort, R., The future of dental devices is digital, *Dental Materials*, Vol. 28, No. 1, pp. 3–12, (2012).

[7] Coogan, T.J., Kazmer, D.O., Healing simulation for bond strength prediction of FDM, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 23, No. 3, pp. 551–561, (2017).

[8] Bellini, A., Güçeri, S., Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9, No. 4, pp. 252–264, (2003).

[9] Kuznetsov, V.E., Solonin, A.N., Tavitov, A., Urzhumtsev, O., and Vakulik, A., Increasing strength of FFF three-dimensional printed parts by influencing on temperature-related parameters of the process, *Prototyping Journal*, Vol. 26, No. 1, pp. 107–121, (2020).

[10] Raju, M., Gupta, M.K., Bhanot, N., Sharma, V., A hybrid PSO–BFO evolutionary algorithm for optimization of fused deposition modelling process parameters, *J Intell Manuf*, Vol. 30, No. 7, pp. 2743–2758, (2019).

[11] Triyono, J., Sukanto, H., Saputra, R., Smaradhana, D., The effect of nozzle hole diameter of 3D printing on porosity and tensile strength parts using polylactic acid material, *Open Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 762–768, (2020).

[12] Asgari, A., Dadgar, Y., and Morad Sheikhy, M., Investigation of the effect of process variables on the mechanical properties of printed parts made of polyoxymethylene using a 3D printer by Fused Deposition Modeling (FDM), *Karafan*, Vol. 18, No. 1, pp. 167–187, (2021). (in Persian)

[13] Bakır, A., Atik, R., and Özerinç, S., Effect of fused deposition modeling process parameters on the mechanical properties of recycled polyethylene terephthalate parts, *Appl Polym*, Vol. 138, No. 3, pp. 49709–49721, (2020).

## ۲- نتیجه گیری

در این مطالعه، عوامل موثر بر استحکام قطعات چاپ شده به وسیله ساخت افزودنی مبتنی بر اکستروژن بررسی شده است. این عوامل عبارتند از دمای نازل، درصد پرشدن، راستای نمونه، جهت گیری رسوب رشته‌ها، ارتفاع لایه و قطر نازل که جمع بندی نتایج ارائه شده در پژوهش های پیشین را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- با افزایش دمای نازل، ویسکوزیته مواد کاهش یافته و سطح مقطع رشته‌ها از حالت دایره‌ای به بیضی شکل تغییر می کند که باعث افزایش سطح تماس رشته‌ها شده و در نهایت منجر به افزایش استحکام کششی نهایی قطعات چاپ شده می شود. به همین دلیل پیشنهاد می شود در فرآیند FFF دمای نازل را تا محدوده‌ای که باعث تخریب مواد نشود بالا در نظر گرفت.

۲- قطعاتی که رسوب گذاری رشته‌ها در آن‌ها هم جهت با محور بارگذاری است استحکام کششی بیشتری از خود نشان می دهند به همین علت پیشنهاد می شود جهت بارگذاری قطعه قبل از ساخت شناسایی شود و رسوب گذاری رشته‌ها در همان جهت انجام شود.

۳- راستای نمونه از مهم ترین عوامل تأثیرگذار بر استحکام است که راستای افقی روی لبه منجر به بیش ترین استحکام کششی می شود.

۴- با افزایش درصد پرشدن تخلخل کاهش یافته و چگالی و استحکام افزایش می یابد. بنابراین با توجه به وزن مورد نظر قطعات، می توان با افزایش درصد پرشدن، قطعات با استحکام بالاتری را چاپ نمود.

۵- با افزایش ارتفاع لایه‌ها، حفره‌های موجود بین لایه‌ها افزایش می یابد که این موضوع باعث افزایش نقاط تمرکز تنش و کاهش استحکام قطعات می شود. بنابراین پیشنهاد می شود برای افزایش استحکام قطعات چاپ شده کمترین ارتفاع لایه برای چاپ انتخاب شود.

۶- با افزایش قطر نازل، میزان مواد خارج شده از نازل افزایش می یابد که این موضوع باعث افزایش چگالی و کاهش فضای خالی بین لایه‌ها می شود و بدین ترتیب استحکام قطعات افزایش می یابد. این پارامتر یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر استحکام قطعات چاپ شده است که پیشنهاد می شود برای افزایش استحکام قطعات، نازل هایی با قطر بالا برای چاپ استفاده شود.

## ۴- مراجع

[1] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Additive Manufacturing Technologies, *Springer*, (2015).

[2] Mohamed, O.A., Masood, S.H., and Bhowmik, J.L., Optimization of fused deposition modeling process

- [23] Melenka, G., Schofield, J., Dawson, M., Carey, J., Desktop 3D printer material properties and dimensional accuracy, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 21, No. 5, pp. 618–627, (2015).
- [24] Heidari, M., Ezati, N., Sadeghi, P., and Badrossamay MR., Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 118, No. 81746, pp. 1-18, (2020). (in Persian)
- [25] Radhwan, M., Shayfull, Z., Hadj Abdellah, A., Irfan, A., and Kamarudin, K., Optimization parameter effects on the strength of 3D printing process using taguchi method, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2129, No. 1, pp. 1–6, (2019).
- [26] Baptista, R., Guedes, M., Pereira, M.F.C., Maurício, A., Carrelo, H., and Cidade, T., On the effect of design and fabrication parameters on mechanical performance of 3D printed PLA scaffolds, *Bioprinting*, Vol. 20, No. 96, pp. 1–17, (2020).
- [27] Azdast, A., Hasanzadeh, R., Polylactide scaffold fabrication using a novel combination technique of fused deposition modeling and batch foaming: dimensional accuracy and structural properties, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 114, pp. 1309–1321, (2021). (in Persian)
- [28] Hasanzadeh, R., Azdast, T., Optimization of FDM 3D printing process parameters of biodegradable poly lactic acid polymeric samples, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 21, No. 2, pp. 69-78, (2021). (in Persian)
- [29] Hernandez, S., Gonzalez, D., and Jérusalem, A., Design of FDM 3D printed polymers: an experimental-modelling methodology for mechanical property prediction, *Materials & Design*, Vol. 188, No. 108414, pp. 1–27, (2020).
- [30] Khatwani, J., Srivastava, V., Effect of process parameters on mechanical properties of solidified PLA parts fabricated by 3D printing process, *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, Vol. 1, No. 1, pp. 95–104, (2018).
- [14] Jatti, V., Jatti, S., and Patel, A., A study on effect of fused Deposition modeling process parameters on mechanical properties, *International Journal of Scientific & Technology Research*, Vol. 8, No. 11, pp. 689–693, (1994).
- [15] Vo, B., Ajibade, A., and Rosengren, M., The effect of 3D printing temperature on the mechanical properties of polypropylene, *Journal of Undergraduate Chemical Engineering Research*, Vol. 8, No. 1, pp. 24–31, (2019).
- [16] Alafaghani, A., Qattawi, A., Alrawi, B., Guzman, A., Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: A design-for-manufacturing approach, *Procedia Manufacturing*, Vol. 10, No. 1, pp. 791–803, (2017).
- [17] Charlon, S., Boterff, J., and Soulestin, J., Fused filament fabrication of polypropylene: Influence of the bead temperature on adhesion and porosity, *Additive Manufacturing*, Vol. 38, No. 1, pp. 1–8, (2021).
- [18] Wang, P., Zou, B., Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 1, No. 5, pp. 236–246, (2021).
- [19] Ziemian, S., Okwara, M., and Ziemian, C.W., Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 21, No. 3, pp. 270–278, (2015).
- [20] Nidagundi, V., Keshavamurthy, R., and Prakash, C., Studies on parametric optimization for fused deposition modelling process, *Materials Today*, Vol. 2, No. 4, pp. 1691–1699, (2015).
- [21] Hikmat, M., Rostam, S., and Ahmed, Y., Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology, *Results in Engineering*, Vol. 11, No. 100264, pp. 1–10, (2021).
- [22] Vicente, C., Martins, T., Leite, M., Ribeiro, A., Influence of fused deposition modeling parameters on the mechanical properties of ABS parts, *Polym Adv Technol*, Vol. 33, No. 3, pp. 501–507, (2020).