



## مروری بر مطالعات تجربی و عددی انجام شده بر روی روش لایه نشانی همجوش

چکیده: در سال های اخیر، فناوری چاپ سه بعدی به ویژه در نمونه سازی و ساخت قطعات با سرعت بالا و هزینه پایین، نقش مهمی ایفا کرده است. در این میان، روش لایه نشانی همجوش به عنوان یکی از اقتصادی ترین و پرکاربردترین روش های چاپ سه بعدی شناخته می شود. این روش از مواد مختلفی مانند پلی لاکتیک اسید و اکریلونیتریل بوتادین استایرن به عنوان ماده اولیه استفاده می کند و پارامترهایی نظیر دمای نازل، ضخامت لایه و سرعت چاپ، تأثیر مستقیمی بر کیفیت نهایی قطعه دارند. با توجه به تأثیر قابل توجه این پارامترها بر ویژگی هایی مانند استحکام کششی، مدول یانگ، استحکام خمشی و همچنین پایداری ابعادی، مطالعات تجربی و عددی متعددی برای بررسی این اثرات انجام شده اند. توسعه استفاده از این روش در کاربردهای صنعتی لزوم بررسی مطالعات انجام شده در این زمینه را برجسته می کند. هدف از انجام این پژوهش، مرور و تحلیل انتقادی این مطالعات از دو دیدگاه تجربی و عددی است تا مشخص شود کدام پارامترها نقش کلیدی تری در بهینه سازی خواص مکانیکی و کاهش هزینه ساخت دارند. نتایج نشان می دهند که برخی پارامترها از جمله ضخامت لایه و سرعت چاپ، تأثیر بیشتری بر ویژگی هایی مانند استحکام کششی و زمان/هزینه ساخت دارند. همچنین، یکی از نکات مهم در این روش، ایجاد توازن مناسب میان پارامترهای چاپ برای دستیابی به قطعاتی با خواص مکانیکی بهینه و هزینه تولید پایین است. یافته های این پژوهش با نتایج تحقیقات پیشین نیز همخوانی دارد.

واژه های راهنما: چاپ سه بعدی، لایه نشانی همجوش، پارامترهای چاپ، تحلیل تجربی، شبیه سازی عددی

### فاطمه ابراهیمی

دانشجوی دکتری،  
دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی،  
دانشگاه شهید بهشتی، تهران

### امیرمسعود رضادوست\*

دانشیار،  
پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران،  
گروه کامپوزیت، تهران

### عسل حسینی منزه

استادیار

### روح الله سرفراز

استادیار،  
دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی،  
دانشگاه شهید بهشتی، تهران

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۱

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷

## A review of the experimental and numerical studies on fused deposition modeling

### Fatemeh Ebrahimi

Ph.D. Student, Faculty of  
Mechanical and Energy  
Engineering, Shahid  
Beheshti University,  
Tehran

### Amir Masoud Rezadoust\*

Associate Professor, Iran  
Polymer and  
Petrochemical Research  
Institute, Composite  
Group, Tehran

### Asal Hosseini Monazzah

Assistant Professor

### Roohollah Sarfaraz

Assistant Professor,  
Faculty of Mechanical and  
Energy Engineering,  
Shahid Beheshti  
University, Tehran

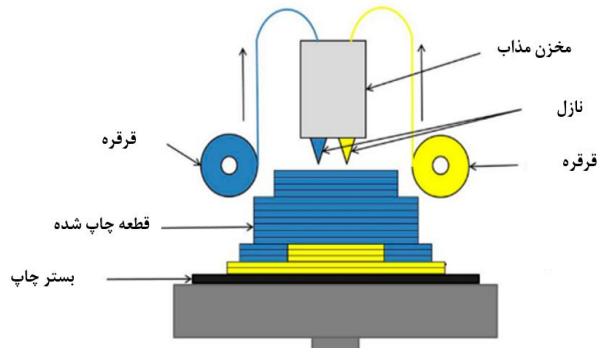
**Abstract:** In recent years, 3D printing technology has played an important role, especially in prototyping and manufacturing parts with high speed and low cost. Among the various methods, fused deposition modeling (FDM) is known as one of the most economical and widely used. This method uses materials such as polylactic acid (PLA) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS), and parameters like nozzle temperature, layer thickness, and print speed directly affect the final quality of the part. Due to their significant impact on properties such as tensile strength, Young's modulus, flexural strength, and dimensional stability, many experimental and numerical studies have been conducted. The growing industrial use of this method highlights the need to review and evaluate these studies. This research aims to review and critically analyze them from both experimental and numerical perspectives to identify the key parameters in optimizing mechanical properties and reducing costs. Results show that parameters such as layer thickness and print speed have a greater effect on tensile strength and production time/cost. Achieving a proper balance among printing parameters is essential to produce parts with optimal properties and low cost. The findings are also consistent with previous research.

**Keywords:** 3D printing, Fused Deposition Modeling (FDM), Printing parameters, Experimental analysis, Numerical simulation

## ۱- مقدمه

به دلیل سادگی، هزینه کم و دسترسی آسان به یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای ساخت قطعات تبدیل شده است [۷]. این روش بیشتر برای چاپ فیلامنت‌های پلیمری استفاده می‌شود و به‌ویژه برای نمونه‌سازی سریع مناسب است. با این حال، در تکنیک‌های مبتنی بر بستر پودری مانند SLS و SLM هزینه‌ها و زمان ساخت معمولاً بالا هستند [۸] که ممکن است محدودیت‌هایی در کاربردهای گسترده ایجاد کند. علاوه بر این، روش DLP نیز به دلیل هزینه بالای مواد اولیه کمتر از روش لایه‌نشانی همجوش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

این روش در ۳۰ سپتامبر ۱۹۸۹ در ایالات متحده توسط اسکات کرامپ<sup>۱۱</sup> ثبت اختراع شد [۹]. اساس این روش به بیان ساده، ذوب مواد خام و ایجاد لایه‌ای نازک از ماده با هندسه به-دست آمده از برش‌های متوالی مقطع یک جسم سه‌بعدی است. ماده مورد استفاده به صورت فیلامنتی که در یک قرقره قرار دارد، توسط یک چرخ محرک کشیده می‌شود. سر نازل با دمای کنترل شده، جهت ایجاد قابلیت جریان‌پذیری، قرار می‌گیرد. نازل دقیقاً مواد را در یک لایه‌ی فوق نازک هدایت کرده، تا ساختاری لایه به لایه تولید شود [۱۰]. طرحواره‌ای از روش لایه‌نشانی همجوش<sup>۱۲</sup> در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱ قسمت‌های مختلف دستگاه لایه‌نشانی همجوش [۱۱]

در این روش معمولاً طراحی محصول با استفاده از نرم‌افزارهای مدل‌سازی نظیر سالیدورکز<sup>۱۳</sup> انجام شده و فایل خروجی با قالب استریولیتوگرافی<sup>۱۴</sup> ایجاد می‌شود. سپس فایل خروجی توسط نرم‌افزارهایی مانند سیمپلیفای<sup>۱۵</sup> به لایه‌های نازک دوبعدی تقسیم می‌گردد. ابتدا نازل طبق مسیر داده شده

ساخت افزایشی<sup>۱</sup>، روشی نوآورانه جهت ایجاد فرصت‌های جدید برای شرکت‌هایی است که به دنبال بهبود کارایی تولید می‌باشند. تولید قطعات با استفاده از مجموعه روش‌های ساخت افزایشی به‌طور قابل توجهی روش‌های سنتی را ساده کرده و این پتانسیل را دارد که در دهه‌های آینده به روش ساختی پرکاربرد تبدیل شود [۱]. ساخت افزایشی که با عنوان چاپ سه‌بعدی نیز شناخته می‌شود، روشی ساختی مبتنی بر افزودن مواد به صورت لایه به لایه، جهت ایجاد ساختار یکپارچه می‌باشد [۲]. این روش برای ساخت قطعات با اشکال پیچیده بسیار مناسب بوده و پتانسیل بالایی برای کاهش زمان و هزینه ساخت محصول دارد [۳]. با مدیریت درست مواد اولیه در این روش، ضایعات ناشی از ساخت کمتر می‌شود و مزایایی مانند افزایش سرعت ساخت و کیفیت بالاتر نسبت به تولید معمولی را فراهم می‌آورد که باعث محبوبیت روزافزون این فناوری شده است [۴]. روش ساخت افزایشی به سرعت در بخش‌های مختلف صنعتی شامل: خودروسازی و هواپیماسازی تا زیست پزشکی به‌کار گرفته شده و توسعه یافته است [۵]. فرآیندهای ساخت افزایشی به گونه‌های مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند. به‌عنوان مثال این روش را می‌توان براساس نوع مواد مورد استفاده طبقه‌بندی کرد [۶]:

الف) ساخت افزایشی مبتنی بر ماده اولیه جامد که روش‌های آن عبارتند از: لایه‌نشانی همجوش (بکارگیری فیلامنت<sup>۲</sup> به‌عنوان ماده اولیه) و ساخت اشیاء لایه‌ای<sup>۳</sup> (بکارگیری ورق به‌عنوان ماده اولیه).

ب) ساخت افزایشی مبتنی بر ماده اولیه پودر که روش‌های آن عبارتند از: چاپ سه‌بعدی جوهر افشان<sup>۴</sup>، ذوب پرتو الکترونی<sup>۵</sup>، تفجوشی لیزری انتخابی<sup>۶</sup>، ذوب لیزری انتخابی<sup>۷</sup> و لایه‌نشانی لیزری فلزات<sup>۸</sup>.

ج) ساخت افزایشی مبتنی بر ماده اولیه مایع که روش‌های آن عبارتند از: استریولیتوگرافی<sup>۹</sup> و پردازش نور دیجیتال<sup>۱۰</sup>.

هر فرآیند با توجه به مواد مورد استفاده و خواص محصول نهایی، تفاوت‌های مشخصی با سایر فرایندها دارد. روش لایه-نشانی همجوش که با نام لایه‌نشانی ذوبی نیز شناخته می‌شود،

<sup>9</sup> Stereolithography

<sup>10</sup> Digital Light Processing (DLP)

<sup>11</sup> Scott Crump

<sup>12</sup> Fused Deposition Modeling (FDM)

<sup>13</sup> Solidworks

<sup>14</sup> Stereolithography (STL)

<sup>15</sup> Simplify

<sup>1</sup> Additive Manufacturing (AM)

<sup>2</sup> Filament

<sup>3</sup> Laminated Object Manufacturing (LOM)

<sup>4</sup> Inkjet 3d Print (3DP)

<sup>5</sup> Electron Beam Melting (EBM)

<sup>6</sup> Selective Laser Sintering (SLS)

<sup>7</sup> Selective Laser Melting (SLM)

<sup>8</sup> Laser Metal Deposition (LMD)

استفاده قرار می‌گیرد [۱۷]. با توجه به توضیحات فوق، مزایا و معایب کلی این روش را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

- مزایا:
  - عدم استفاده از مواد سمی و در نتیجه امکان استفاده از تجهیزات حتی در فضاهای اداری،
  - عدم نیاز به انجام عملیات پیچیده پس از فرآیند ساخت،
  - فناوری ساده، بی‌صدا و ایمن،
  - امکان تولید اشیاء و قطعات کاربردی با هندسه‌ی پیچیده،
  - امکان بکارگیری طیف نسبتاً گسترده‌ای از پلیمرها،
- معایب:
  - استحکام ناکافی قطعات در جهت عمود بر راستای چاپ،
  - وابستگی دقت ابعادی قطعه به ضخامت لایه،
  - احتمال ایجاد عیوب سطحی و داخلی کوچک ناشی از اتصال ناقص لایه‌ها [۱۸].

روش لایه‌نشانی همجوش به‌دلیل هزینه پایین و سادگی استفاده می‌شود.

با توجه به موارد ذکر شده در این پژوهش به بررسی مطالعات تجربی و عددی انجام شده مرتبط با روش لایه‌نشانی همجوش پرداخته می‌شود. در سال ۱۳۹۴ پژوهشی با موضوع مروری بر روش مدل‌سازی لایه‌نشانی همجوش [۱۹] انجام شد که صرفاً مقالات تجربی تا سال ۲۰۱۶ را شامل می‌شود، اما مقاله حاضر به بررسی مقالات مرتبط با این موضوع تا سال ۲۰۲۳ و همچنین علاوه بر بررسی مطالعات تجربی به بررسی مطالعات عددی نیز پرداخته است.

## ۲- مطالعات تجربی

در این بخش به بررسی مطالعات تجربی صورت گرفته توسط محققان، جهت بررسی اثر ماده اولیه و پارامترهای چاپ بر خواص مکانیکی قطعات ساخته‌شده به روش لایه‌نشانی همجوش پرداخته شده است. جهت ساخت، زاویه ساخت، تراکم چاپ، ضخامت لایه، سرعت چاپ، قطر نازل، دمای نازل و الگوی چاپ از جمله پارامترهای مورد بررسی هستند. برخی از این پارامترها

توسط نرم‌افزار در بستر چاپ (صفحه  $X-Y$ ) حرکت کرده و همزمان با خروج کنترل شده مواد از نازل، لایه‌نشانی اولین لایه صورت می‌گیرد. پس از تکمیل یک لایه، نازل چاپگر در جهت عمود بر صفحه (راستای  $Z$ ) به اندازه تعریف شده در نرم‌افزار (ضخامت لایه) به سمت بالا حرکت کرده و یا بستر چاپ به اندازه ضخامت یک لایه به پایین حرکت می‌کند. در ادامه لایه‌ی جدید در لایه‌ی قبلی نفوذ کرده و بین دو لایه اتصال ایجاد می‌شود. لایه‌نشانی متوالی مواد تا شکل‌گیری کامل قطعه ادامه می‌یابد. پس از تکمیل قطعه، می‌توان آن را از بستر چاپ به صورت دستی یا شیمیایی (استفاده از استون) جدا کرد [۱۲]. برخی از پارامترهای مؤثر در این روش به دو دسته تقسیم می‌شود، که عبارتند از:

- پارامترهایی که صرفاً توسط نرم‌افزار قابل تغییر هستند؛ این پارامترها خود به دو دسته مجزا تقسیم می‌شوند.
  - ✓ پارامترهایی با بازه‌های تغییراتی کوچک: ضخامت لایه<sup>۱</sup>، سرعت چاپ<sup>۲</sup>، تعداد خطوط دیواره<sup>۳</sup>، ضخامت دیواره<sup>۴</sup>، ضخامت لایه بالا<sup>۵</sup>، ضخامت لایه پایین<sup>۶</sup>، پارامترهای رشته خروجی از نازل<sup>۷</sup>.
  - ✓ پارامترهایی با بازه‌های تغییراتی بزرگ: چگالی پرکردن<sup>۸</sup> و الگوی پرکردن<sup>۹</sup>.
- پارامترهایی که هم با دستگاه و هم با نرم‌افزار قابل تغییر هستند، همانند: دمای چاپ<sup>۱۰</sup>، دمای صفحه ساخت<sup>۱۱</sup>، قطر نازل<sup>۱۲</sup> و فن خنک‌کننده<sup>۱۳</sup> [۱۳].

با توجه به تعدد پارامترها، شناسایی تأثیر و تعیین مقادیر بهینه آن‌ها برای دستیابی به قطعات با کیفیت، اهمیت بالایی دارد [۱۴]. علاوه بر پارامترهای فرایند، جنس فیلامنت مورد استفاده نیز در کیفیت قطعه مؤثر است. در چاپ روش لایه‌نشانی همجوش معمولاً از پلیمرهای ترموپلاستیک متنوعی مانند پلی-لاکتیک اسید<sup>۱۴</sup>، اکریلونیتریل بوتادین استایرن<sup>۱۵</sup>، پلی آمید<sup>۱۶</sup> و پلی کربنات<sup>۱۷</sup> استفاده می‌شود [۱۵، ۱۶]. علاوه بر این، انواع فیلامنت‌های ساخته شده از مواد مرکب حاوی پلیمرها به عنوان زمینه و تقویت‌کننده‌هایی همانند چوب، ذرات سرامیکی یا فلزی، الیاف کوتاه و پیوسته نیز در روش لایه‌نشانی همجوش مورد

<sup>10</sup> Printing Temperature

<sup>11</sup> Build Plate Temperature

<sup>12</sup> Nozzle Diameter

<sup>13</sup> Cooling

<sup>14</sup> Polylactic Acid (PLA)

<sup>15</sup> Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

<sup>16</sup> Polyamide (PA)

<sup>17</sup> Polycarbonate (PC)

<sup>1</sup> Layer Thickness

<sup>2</sup> Printing Speed

<sup>3</sup> Number Of Wall Lines

<sup>4</sup> Wall Thickness

<sup>5</sup> Top Layer Thickness

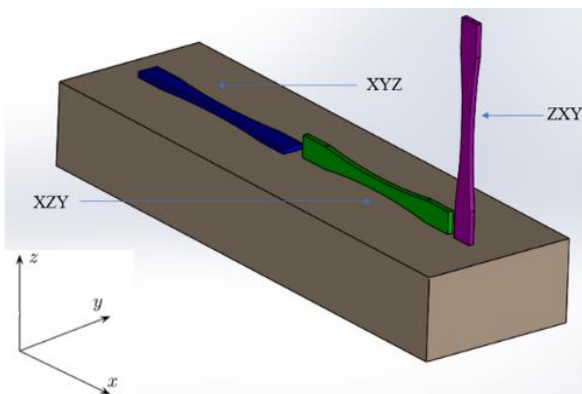
<sup>6</sup> Bottom Layer Thickness

<sup>7</sup> Raster Parameters

<sup>8</sup> Infill Density

<sup>9</sup> Infill Pattern

همچنین نمونه‌های چاپ شده با پلی اتر کتون کتون<sup>۱</sup> در جهت روی لبه (XZY)، بهترین خواص خمشی و در جهت عمودی (ZXY) (شکل (۳))، کمترین مقاومت خمشی را نشان می‌دهند. شایان ذکر است نحوه نام‌گذاری جهات چاپ از بزرگترین بعد به کوچکترین بعد از چپ به راست نوشته می‌شود. به‌طور مثال منظور از چاپ در جهت XZY به این معنا می‌باشد که X و Y به ترتیب بزرگترین و کوچکترین بعد را در هندسه قطعه دارا هستند [۲۴].



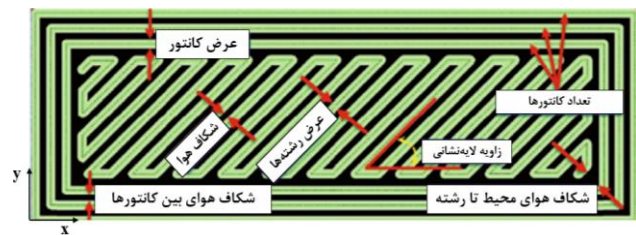
شکل ۳ جهتهای چاپ [۲۳]

## ۲-۲- ضخامت لایه

ضخامت لایه نقش مهمی در کیفیت قطعات دارد که به‌طور قابل توجهی بر زمان چاپ تأثیر می‌گذارد؛ به‌گونه‌ای که با کاهش ضخامت لایه به‌طور قابل توجهی زمان لازم جهت چاپ افزایش می‌یابد [۲۴]. نتایج تجربی نشان می‌دهند که زبری سطوح تولید شده توسط فرآیند لایه‌نشانی همجوش با افزایش ضخامت لایه افزایش می‌یابد. در واقع شکاف‌های بین لایه‌ها علت اصلی زبری سطح هستند که با افزایش ضخامت لایه، این شکاف‌ها بزرگتر شده و زبری سطح افزایش می‌یابد [۲۵، ۲۶].

این پارامتر بر خواص مکانیکی قطعات چاپ شده نیز مؤثر است. سرعت چاپ کم و ضخامت لایه پایین منجر به افزایش مقاومت کششی، مدول یانگ، استحکام تسلیم و استحکام خمشی قطعات می‌شود؛ زیرا پیوند بین لایه‌ای محکمی ایجاد می‌گردد (نمودار (۲)) [۲۰، ۲۴، ۲۷-۲۹]. از سوی دیگر افزایش ضخامت لایه جهت دستیابی به استحکام ضربه بیشتر توصیه می‌شود (نمودار (۳)) [۲۹، ۳۰]. همچنین دیده شده است با افزایش ضخامت لایه، سختی راکول کاهش می‌یابد که پیامد افزایش زبری و در نتیجه ایجاد حفره‌های هوای بزرگتر بین لایه‌ها است (نمودار (۳)) [۲۹].

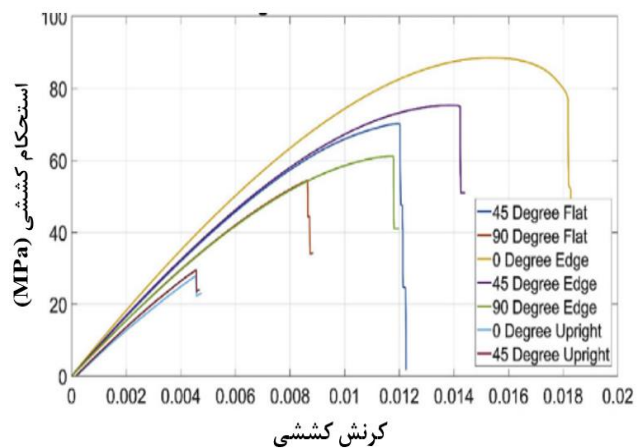
در شکل (۲) ارائه شده است که در ادامه به صورت کامل در بخش مناسب مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۲ پارامترهای چاپ [۱۰]

## ۲-۱- جهت ساخت

خواص مکانیکی قطعات چاپ شده به‌شدت تابع جهت ساخت می‌باشد. به‌عنوان مثال در نمودار (۱)، اثر جهت ساخت بر رفتار کششی قطعات ساخته شده از یک ترموپلاستیک با کارایی بالا با نام تجاری ULTEM<sup>TM</sup> 9085 مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشاهده گردید که جهت لبه بالاترین استحکام کششی را دارد [۲۰]. نه تنها خواص کششی، بلکه استحکام فشاری، استحکام خمشی و زمان ساخت نیز با تغییر جهت ساخت تغییر می‌کند [۲۱، ۲۲].

نمودار ۱ میانگین نتایج تنش-گرنش کششی برای ماده ULTEM<sup>TM</sup> 9085 [۲۰]

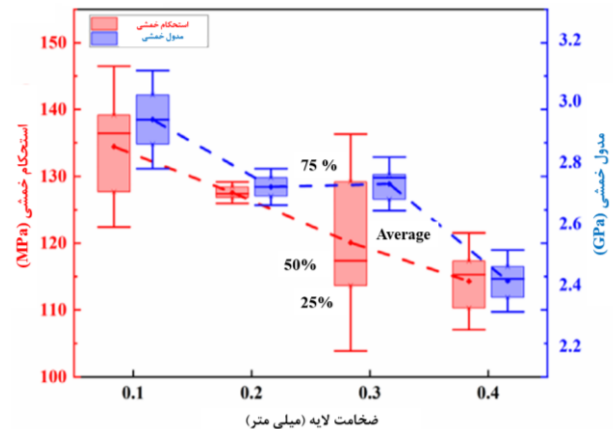
جهت ضخامت نمونه‌ها در روش ساخت افزایشی، می‌تواند در هر یک از جهات X، Y و Z باشد که در شکل (۳) نشان داده شده است. همچنین مشخص گردید جهت لبه (XZY) جهت چاپی است که بهترین نتیجه را از نظر خواص مکانیکی ارائه می‌دهد. به‌طور کلی، بالاترین مقدار میانگین استحکام نهایی به‌دست آمده برای پلی‌کربنات در جهت ساخت XZY به‌دست آمد [۲۳].

<sup>1</sup> Polyetherketoneketone (PEKK)

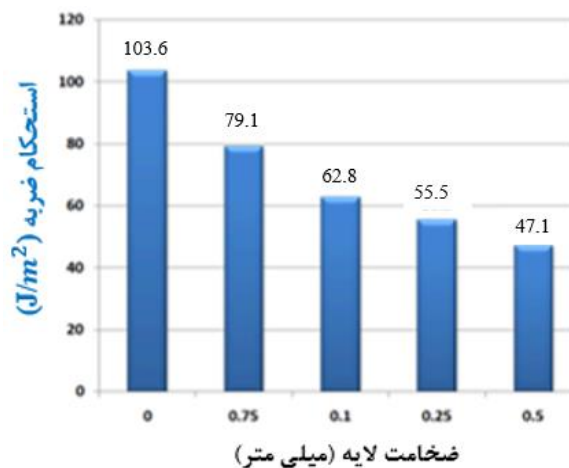
یانگ بهتر می‌شود. همچنین سبب افزایش طول در هنگام شکست می‌گردد [۳۱]. بررسی اثر متقابل ضخامت لایه و ماده مصرفی نشان می‌دهد که تأثیر ضخامت، مستقل از نوع ماده بوده و مقدار بهینه این پارامتر در حدود ۰/۱۶ تا ۰/۳ میلی‌متر می‌باشد [۳۰]. عملاً مشخص نیست که اگر مجموعه‌ای از پارامترهای بهینه به چاپگرهای سه‌بعدی دیگر منتقل شود، چه نتایجی به دست می‌آید [۳۲]. اگر زیبایی و دقت ظاهری قطعه در اولویت باشد، ضخامت لایه‌های پایین‌تر برای این امر مناسب‌تر است [۳۳].

## ۲-۳- زاویه لایه‌نشانی<sup>۲</sup>

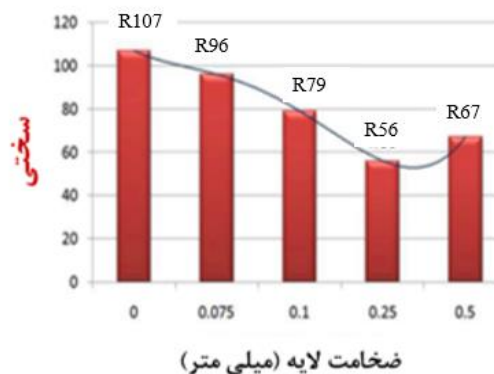
این زاویه جهت لایه‌نشانی مواد را نسبت به محور X نشان می‌دهد (شکل (۲)). به‌طور کلی زاویه لایه‌نشانی ممکن است از ۰ درجه تا ۹۰ درجه متغیر باشد [۳۴]. نتایج نشان می‌دهد که در برخی موارد جهت‌گیری ۰ درجه نسبت به راستای اعمال نیرو دارای بالاترین حد نهایی و استحکام تسلیم است؛ زیرا تراز مولکول‌ها به موازات محور تنش می‌باشد، در حالی که زوایای ۴۵ تا ۹۰ درجه به عنوان ضعیف‌ترین جهت شناسایی شد که در آن‌ها پیوند بین لایه‌ای ضعیف مشاهده می‌شود [۳۵]. همچنین مشخص گردیده، نمونه با زاویه لایه‌نشانی  $\pm 45^\circ$  درجه دارای حداکثر استحکام کششی و ضربه می‌باشد، در حالی که لایه‌نشانی ۰/۹۰ درجه حداکثر مقاومت خمشی را دارا است. این پارامتر همچنین بر روی مکانیزم و علت شکست نیز تأثیر می‌گذارد. به‌عنوان مثال در نمونه متشکل از فیلامنت ULTEM™ 9085 شکست در زاویه لایه‌نشانی  $\pm 45^\circ$  درجه صرفاً به دلیل شکست فیلامنت رخ داده، در حالی که شکست نمونه ساخته شده با زاویه لایه‌نشانی ۹۰ درجه، ناشی از پدیده لایه‌لایه شدن اولیه و سپس شکستگی فیلامنت است [۲۰]. همچنین در نمونه‌های کامپوزیت پلاستیکی تقویت شده با فیبر کربن<sup>۳</sup> با زاویه لایه‌نشانی ۰/۹۰ درجه استحکام کششی، مدول یانگ و استحکام تسلیم بیشتری نسبت به نمونه‌هایی با زاویه لایه‌نشانی  $\pm 45^\circ$  درجه داشته؛ در حالی که نمونه‌های نوع دوم چقرمگی و شکل‌پذیری بالاتری دارند. این تفاوت نسبت به نمونه‌ی ساخته شده بدون تقویت‌کننده (فیلامنت ULTEM™ 9085) ناشی از نقش الیاف تقویت‌کننده به عنوان پارامتر حاکم بر خواص مکانیکی کامپوزیت است. سطوح شکست مربوط به نمونه‌های کامپوزیت تقویت شده با فیبر کربن در شکل (۴) نشان داده شده است [۲۸].



نمودار ۲ تغییرات استحکام و مدول خمشی پلی اتر کتون چابی با ضخامت لایه‌های مختلف (۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ میلی‌متر) [۲۴]



### الف



### ب

نمودار ۳ الف- تغییر استحکام ضربه با افزایش ضخامت لایه،

ب- تغییرات سختی راکول با ضخامت لایه [۲۹]

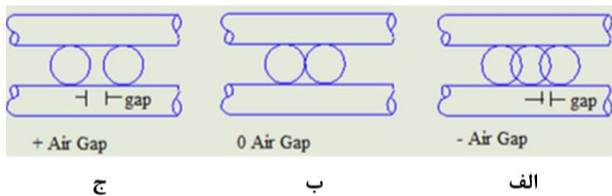
نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱</sup> نشان می‌دهد که ضخامت لایه کوچک‌تر، یکپارچگی قطعه را با افزایش ناحیه پیوند بین لایه‌ها بهبود بخشیده و منجر به استحکام نهایی و مدول

<sup>3</sup> Carbon Fiber-Reinforced Plastic (CFRP)

<sup>1</sup> Scanning Electron Microscope (SEM)

<sup>2</sup> Raster angle

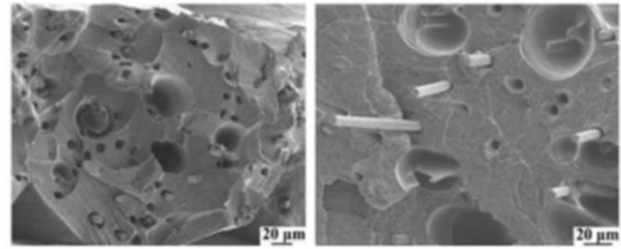
پیوندهای بهتر بین لایه‌های مجاور در شکاف‌های هوا منفی منجر به شکستن قطعه در کرنش بیشتر می‌شود [۲۳]. جهت کاهش شکاف هوای واقعی می‌توان دمای نازل را افزایش داد که همراه با افزایش استحکام خمشی می‌باشد [۲۴].



شکل ۵ انواع شکاف هوا؛ الف- منفی، ب- صفر، ج- مثبت [۲۴]

## ۲-۵- سرعت چاپ

این پارامتر به عنوان سرعت حرکت نازل در هنگام لایه‌نشانی مواد بر روی بستر چاپ در امتداد صفحه XY شناخته می‌شود. زمان و سرعت چاپ رابطه مستقیم با هم دارند. با این حال، تأثیر سرعت چاپ، هنگام چاپ لایه‌هایی با ضخامت نازک‌تر به دلیل تغذیه‌ی کافی ماده ناچیز است [۴۱، ۴۲] و به‌طور کلی، سرعت چاپ باید متناسب با سرعت خروج ماده از نازل باشد [۲۶]. افزایش سرعت چاپ به دلیل کاهش چگالی قطعات چاپ شده، تأثیر منفی بر استحکام کششی داشته، اگر چه به علت کاهش فاصله زمانی لایه‌گذاری، دمای لایه زیرین هنگام لایه‌نشانی لایه بالایی در سطح مطلوب‌تری باقی مانده و سبب بهبود نفوذ لایه‌ها در یکدیگر می‌شود [۲۶-۲۸]. سرعت چاپ بالاتر می‌تواند به‌طور مؤثر مصرف انرژی را کاهش داده؛ هرچند زبری سطح را افزایش می‌دهد [۲۷]. در پژوهشی دیگر برخلاف مراجع [۲۶-۲۸] بررسی شده، سرعت چاپ تأثیر کمی بر استحکام کششی داشته، اما به‌طور قابل توجهی بر هزینه‌های تولید تأثیر می‌گذارد. هرچند نرخ تغذیه پایین به پیوند بین لایه‌ای کمک کرده، اما تولید را کاهش و هزینه‌های آن را افزایش می‌دهد؛ زیرا هنگامی که سرعت چاپ کندتر باشد، کل زمان چاپ برای یک نمونه افزایش می‌یابد [۳۰، ۴۳]. در تناقض با موارد [۳۰، ۴۳]، در پژوهش انجام گرفته توسط وانگ و همکارانش [۴۴]، مشخص گردید با افزایش سرعت چاپ، استحکام کششی نمونه‌ها تا حد قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد افزایش سرعت چاپ در ضخامت لایه یکسان، افزایش زبری سطح را سبب می‌شود [۴۵]. با توجه به پژوهش‌های ذکر شده این پارامتر نیز مستقل از نوع ماده می‌باشد. پیدا کردن سرعت بهینه، بسیار با اهمیت است که این مقدار بدون در نظر گرفتن ملاحظات تولید



شکل ۴ سطوح شکست نمونه‌های کامپوزیت تقویت شده با فیبر کربن ساخته شده با دو زاویه لایه‌نشانی؛ الف- [۰/۹۰]، ب- [۴۵/+۴۵] [-۲۸]

در ادامه بررسی‌ها، خواص مکانیکی فیلامنت متشکل از پلی اتیلن ترفتالات<sup>۱</sup> بازیافتی در سه زاویه لایه‌نشانی موازی (۰°)، مورب (۴۵°) و عمود (۹۰°) و دو جهت ساخت عمودی و افقی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد زاویه لایه‌نشانی تأثیر قابل توجهی بر شکل‌پذیری دارد. نمونه‌های چاپ شده با زاویه لایه‌نشانی مورب (۴۵°) و عمود (۹۰°) درجه، ازدیاد طول در مقادیر شکست کمتر از ۱۰ درصد را نشان دادند، در حالی که نمونه‌های موازی (۰°) درجه، ازدیاد طول بیش از ۲۰۰ درصد را دارا بودند. همچنین نمونه‌های چاپ شده در جهت عمودی (۹۰°) درجه) استحکام بسیار کمتری در مقایسه با نمونه‌های افقی دارند. این تفاوت را می‌توان به همجوشی ضعیف بین لایه‌های چاپ شده نسبت داد [۳۶]. نمونه‌های چاپ شده با زاویه‌ی ۰ درجه بالاترین استحکام کششی را داشتند و به دنبال آن [۰/۹۰] و [۴۵، +۴۵] و کمترین آن ۹۰ درجه بود [۳۷].

## ۲-۴- شکاف هوا<sup>۲</sup>

این پارامتر نشان‌دهنده فاصله بین لایه‌نشانی دو لایه‌ی مجاور است. مقدار شکاف هوا می‌تواند صفر، مثبت یا منفی باشد (شکل ۵)، که قابلیت تنظیم در نرم‌افزار سیمپلیفای و یا نرم‌افزارهای مشابه را دارد. در مورد شکاف هوای صفر، مواد لایه‌نشینی شده فقط با یکدیگر در تماس هستند. در حالت شکاف هوای مثبت، دو لایه‌ی مجاور از هم جدا شده و در نتیجه ساختاری با استحکام پایین ایجاد می‌شود. شکاف هوای منفی زمانی استفاده می‌شود که ساختار متراکم‌تری مورد نیاز بوده و محدودیت زمانی وجود ندارد [۳۸، ۳۹]. همچنین شکاف هوای منفی خواص مکانیکی مواد مانند استحکام کششی و سفتی را افزایش می‌دهد [۲۰، ۳۸]. بهترین خواص مکانیکی برای همه جهات با استفاده از شکاف هوای شطرنجی منفی به‌دست می‌آید [۴۰]. همچنین

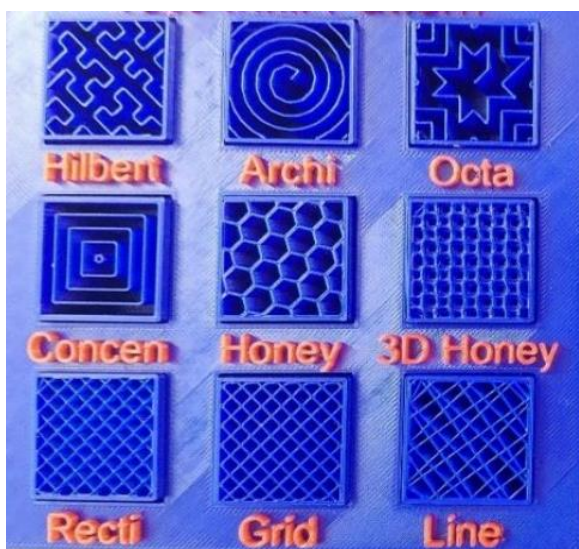
<sup>۲</sup> Air gap

<sup>۱</sup> Polyethylene Terephthalate (PET)

همچنین در نمونه‌های متخلخل (دارای تراکم پرشوندگی کمتر از ۱۰۰٪)، نسبت نیروی تحمل شده ماکزیمم به جرم نزدیک به یکدیگر می‌باشند؛ اما این مقدار در تراکم پرشوندگی ۱۰۰٪ بالاتر است که می‌تواند به دلیل افزایش قابل توجه چسبندگی رشته‌ها باشد [۴۹]. علاوه بر این نشان داده شد درصد بازیابی نیرو برای نمونه‌های چاپ شده با تراکم پرشوندگی ۵۰٪ بالاتر از ۱۰۰٪ می‌باشد [۵۰].

## ۲-۷- الگوی پرکردن

طرح هندسی منظمی که جهت چاپ ساختار داخلی قطعات در حال چاپ استفاده می‌گردد، الگوی پرکردن نامیده می‌شود. از جمله الگوهای پرکننده رایج می‌توان به الگوهای شش ضلعی، خطی و الماسی اشاره کرد (شکل (۶)) [۵۱]. الگوی پرکردنی که معمولاً در روش لایه‌نشانی همجوش استفاده می‌شود، الگوی شش ضلعی است. در پژوهشی ارتباط تأثیر الگوی پرکردن با خواص مکانیکی نشان داده شده است؛ به نحوی که الگوهای مختلف می‌تواند منجر به نتایج مختلفی در خواص کششی یا فشاری گردد. ممکن است یک الگو تحت یک بارگذاری خواص مکانیکی خوبی را نشان دهد، اما تحت بارگذاری دیگر اینگونه نباشد. الگوی پرکننده متحدالمرکز و مستطیلی مقادیر تقریباً مشابه و بالاتری از استحکام کششی را برای تراکم پر شدن ۱۰۰٪ نشان می‌دهد [۵۲].



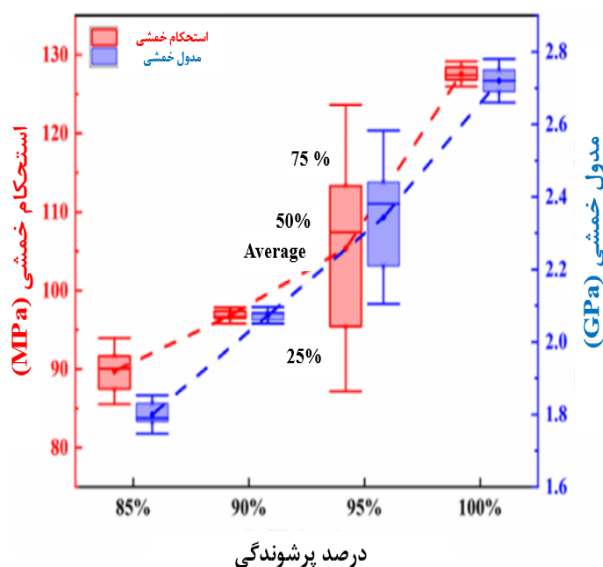
شکل ۶ انواع الگوهای پرکننده [۵۴]

پژوهشگران پس از بررسی اثر الگوهای مختلف پر کردن پلی-لاکتیک اسید به این نتیجه رسیدند که نوع پر کردن مستطیلی دارای استحکام کششی بهینه و نوع پرکردن مثلثی دارای

بین ۴۶ تا ۶۵ میلی‌متر بر ثانیه پیشنهاد شده است؛ زیرا در صورتی که سرعت بالاتر از سرعت بهینه باشد، پیوند لایه‌ها به خوبی ایجاد نمی‌گردد [۳۰] و در سرعت‌های کمتر از مقدار بهینه، استحکام ضربه در جایی که توزیع حفرات داخل هر لایه غیریکنواخت است، کاهش می‌یابد [۴۵].

## ۲-۶- چگالی پرکردن

چگالی پرکردن، حجم ماده چاپ شده روی بستر را نشان می‌دهد. مطالعات نشان داده است، چگالی کم پرکننده در ساختار داخلی موجب تضعیف خواص مکانیکی می‌گردد [۴۶، ۴۷]. چگالی پر شدن بیشتر به معنای شکاف هوای کوچکتر بوده، که سبب افزایش جرم مواد لایه‌نشانی شده در همان حجم قطعه گردیده و آن را متراکم‌تر می‌کند [۴۸]. چگالی پرکننده بر مصرف انرژی، استحکام، سختی، زمان تولید و وزن قطعات ساخت به روش لایه-نشانی همجوش تأثیر می‌گذارد. چگالی پرکردن نسبت به پارامترهای مؤثر دیگر، بالاترین میانگین اثر را بر استحکام کششی قطعه تولید شده به روش لایه‌نشانی همجوش دارد [۲۷]. همچنین افزایش چگالی پر کردن عملکرد خمشی قطعه چاپ شده را بهبود می‌بخشد که نتایج آن در نمودار (۴) نشان داده شده است [۲۴]. همچنین مشاهده گردید اختلاف داده‌ها در درصد پرشوندگی ۹۵٪ بیشتر از درصد‌های پرشوندگی دیگر است که لازم است این پارامتر در هر قطعه به‌طور جداگانه بررسی شود. در پژوهشی دیگر نتیجه بر آن شد که با کاهش درصد پرشوندگی نیروی تحمل شده توسط قطعه کاهش می‌یابد.



نمودار ۴ استحکام و مدول خمشی پلی‌اترکتون کتون چاپی با تراکم‌های مختلف پرکننده (۸۵٪، ۹۰٪، ۹۵٪، ۱۰۰٪) [۲۴]

در نمونه‌های ساخته شده با پلی‌اتر اتر کتون<sup>۱</sup> دمای نازل بالاتر می‌تواند پر کردن حفره‌ها و منافذ را تسهیل نمود؛ زیرا منجر به سیالیت بهتر رشته پلی‌اتر کتون می‌شود [۵۸]. برای داشتن بهترین خواص، لازم است دمای بهینه مشخص گردد. به‌عنوان مثال این مقدار برای پلی‌لاکتیک اسید در بازه ۲۲۰-۲۰۱ درجه سانتی‌گراد می‌باشد [۳۰]. به‌طور مثال در پژوهشی این مقدار ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد؛ زیرا با افزایش دما، پاشش ماده به اطراف زیادتر شده و زبری افزایش می‌یابد [۵۹]. شایان ذکر است که دمای بهینه نازل تابع جنس فیلامنت مورد استفاده در روش لایه‌نشانی همجوش است [۳۰، ۵۸].

### ۳-۲- مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌های عددی

علاوه بر مطالعات تجربی انجام شده، مطالعات عددی هم به بررسی تأثیر پارامترهای فرآیندی بر رفتار مکانیکی و رئولوژیکی پرداخته و در مواردی میزان همپوشانی نتایج تجربی و شبیه‌سازی مقایسه شده است. استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی سبب می‌شود که در استفاده از ماده و زمان صرفه‌جویی شده و با حداقل آزمون‌های آزمایشگاهی بتوان خواص مکانیکی و عیوب قطعه چاپ شده را در شبیه‌سازی‌ها پیش‌بینی و سپس پارامترهای فرآیندی را بهینه نمود.

### ۳-۱- شبیه‌سازی فرآیند چاپ

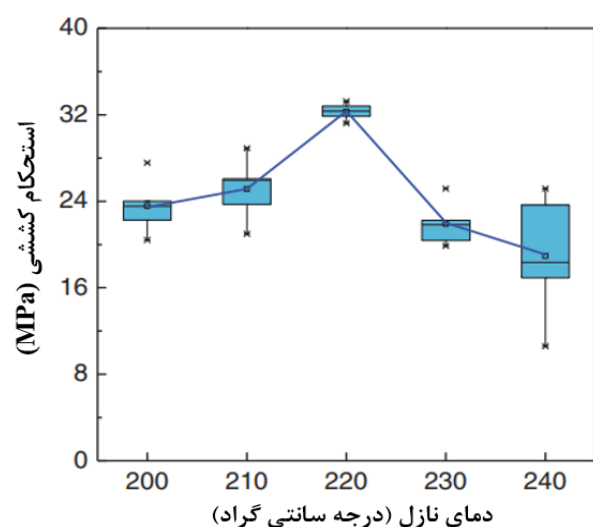
قطعات چاپ شده به روش لایه‌نشانی همجوش تغییرات زیادی اعم از دما، تنش و اعوجاج (انحنای داشتن جزئی نسبت به حالت مطلوب آن) را در حین فرآیند تجربه می‌کنند. به‌طور مثال، رشته مذاب با دمای بالا، در طول لایه‌نشانی روی لایه پشتیبان<sup>۲</sup> سریع سرد می‌شود. در نتیجه، قطعات تولید شده با استفاده از روش لایه‌نشانی همجوش اغلب می‌توانند از هندسه طراحی شده منحرف شده و عملکرد مکانیکی آن‌ها به دلیل اعوجاج‌ها و تنش‌های پسماند که در طول فرآیند چاپ انباشته می‌شوند، تحت تأثیر قرار گیرد. این عیوب هندسی و تنش‌های پسماند می‌تواند به‌طور قابل توجهی بر طول عمر قطعات چاپ شده به روش لایه‌نشانی همجوش تأثیر بگذارد. از این‌رو شبیه‌سازی المان محدود<sup>۳</sup> (با استفاده از نرم‌افزارهایی مانند آباکوس و انسیس) می‌تواند به عنوان ابزاری پیش‌بینی‌کننده برای درک تأثیر این متغیرها و همچنین کاهش تأثیر منفی آن‌ها در قطعات چاپ شده مورد استفاده قرار گیرد [۶۰].

بیشترین مدول یانگ است [۴۷]. نکته حائز اهمیت این است که اثر این خاصیت به نوع ماده‌ای که چاپ می‌شود، وابسته است [۴۷، ۵۳].

### ۲-۸- دمای نازل (دمای اکستروژن)

دمایی که المنت‌های مجاور نازل تأمین کرده، تا مواد در محل نازل در دمایی بالاتر از نقطه ذوب قرار گرفته و به صورت مذاب از آن خارج شوند، تحت عنوان دمای نازل شناخته می‌شود [۲۸]. این پارامتر بر گرانروی مواد مورد استفاده و در نتیجه‌ی آن بر ویژگی‌های ریزساختاری و مکانیکی قطعه تأثیر می‌گذارد. با کاهش دمای اکستروژن، دقت ابعادی بدلیل امکان کنترل میزان جریان‌پذیری، بهبود می‌یابد. درحالی‌که، خواص مکانیکی قطعات چاپ شده مانند سفتی و استحکام نهایی در نتیجه همجوشی کمتر بین لایه‌ها کاهش می‌یابد [۴۴، ۵۵]. بنابراین تعیین بهینه میزان دمای اکستروژن با اهمیت است [۵۶]. خواص مکانیکی دینامیکی و رفتار رئولوژیکی مواد چاپ شده با روش لایه‌نشانی همجوش با تغییر دمای نازل تغییر می‌کند. هنگامی که دمای نازل بسیار پایین است، سیالیت مواد اکستروژن شده ضعیف بوده، که همراه با استحکام پیوند بین لایه‌های ضعیف می‌باشد [۲۸، ۵۷].

همانطور که در نمودار (۵) مشاهده می‌شود، افزایش دمای نازل تا مقدار معینی به دلیل ایجاد پیوند بهتر، منجر به افزایش خواص کششی شده و بعد از آن به دلیل ایجاد منافذ بیشتر در داخل نمونه، کاهش خواص کششی را به دنبال دارد [۲۸].



نمودار ۵ اثرات دمای نازل بر استحکام کششی [۲۸]

<sup>3</sup> Finite Element Analysis (FEA)

<sup>1</sup> Polyether Ether Ketone (PEEK)

<sup>2</sup> Supporting layer

## ۳-۲- شبیه‌سازی‌های حرارتی

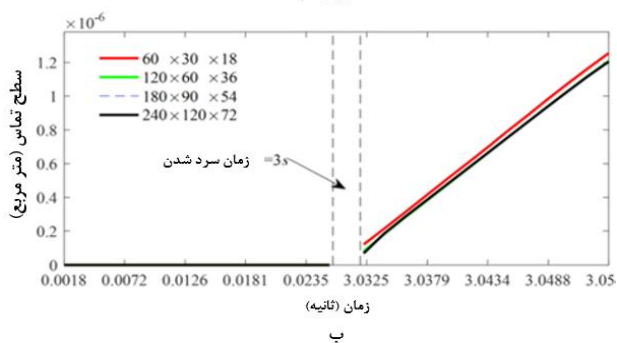
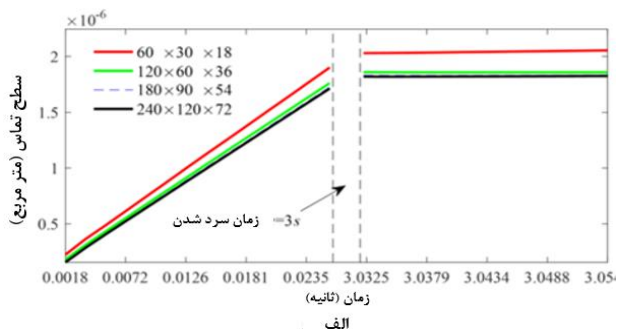
از جمله مطالعات عددی صورت گرفته در زمینه شبیه‌سازی حرارتی می‌توان به بررسی اثرات شرایط انتقال حرارت واقعی با استفاده از مدل‌های یک بعدی (در جهت عمودی یا همان ارتفاع) در محیط یک ماشین ساخت افزایشی با پتانسیل گسترش برای بررسی اجزای سه‌بعدی اشاره نمود [۶۱].

در رابطه با شبیه‌سازی حرارتی فرایند، می‌توان به شبیه‌سازی مکانیسم پیوند سطحی، در فرآیند لایه‌نشانی همجوش به کمک نظریه انتشار بین مولکولی پلیمری مبتنی بر انتقال حرارت برای پیوند پلی‌اورتان ترموپلاستیک<sup>۱</sup> و اکریلونیتریل بوتادین استایرن اشاره کرد. در این پژوهش، یک مدل عددی، اثر دمای نازل و سرعت چاپ جهت را بر استحکام پیوند سطحی اکریلونیتریل بوتادین استایرن/ پلی‌اورتان ترموپلاستیک پیش‌بینی نموده، که با نتایج تجربی نیز ارزیابی شده است [۶۲].

در مطالعه دیگری، رفتار حرارتی پلی‌لاکتیک اسید در طول فرآیند لایه‌نشانی همجوشی از منظر اثرات دمای نازل، سرعت اکستروژن و ضخامت لایه بر حداکثر اعوجاج عمودی و حداکثر تنش حرارتی به کمک مدلی عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج یدست آمده از این مدل نشان می‌دهد که کاهش دمای اکستروژن، کاهش سرعت چاپ و کاهش ب می‌دهد

ضخامت لایه، سبب کاهش اعوجاج عمودی و تنش حرارتی پسماند می‌شود [۶۳]. در زمینه شبیه‌سازی‌های حرارتی، مدل توسعه یافته جهت تخمین مساحت منطقه تماس با بستر چاپ نیز قابل توجه است. نتایج این مدل نشان می‌دهد که پس از لایه‌نشانی، سطح تماس با افزایش زمان افزایش یافته و پس از حدود ۳ ثانیه سرد شدن، با افزایش زمان این سطح ثابت می‌ماند. نتایج این بررسی در نمودار (۶) ارائه شده است [۶۴].

از دیگر پژوهش‌های مرتبط در حوزه شبیه‌سازی، پیش‌بینی تغییر شکل حرارتی قطعه کار در طول فرآیند، برای قطعات ساخته شده از رشته‌های پلی‌آمید ۶۶ تقویت‌شده با پودر کربن است. در این مطالعه از نرم‌افزار دیجیمت<sup>۲</sup> برای تجزیه و تحلیل خواص فیزیکی پلی‌آمید ۶۶ حاوی کربن و پیش‌بینی میزان مناسب کربن استفاده شده است. سپس خواص مواد به عنوان ورودی نرم‌افزار انسیس<sup>۳</sup> استفاده شده تا مشخص گردد که افزودن پودر کربن تا چه میزان در کاهش ضریب انتقال حرارتی<sup>۴</sup> مفید است (جدول (۱)) [۶۵].



نمودار ۶ تغییرات میزان تماس با تغییر زمان برای چهار وضوح مختلف؛ الف- منطقه تماس با سطح پایین، ب- ناحیه تماس بین دو رشته [۶۴]

جدول ۱ پارامترهای کامپوزیت دارای خصوصیات فیزیکی عددی با محتوای کربن متفاوت [۶۵]

wt%	CTE ( $\times 10^{-5}$ )	E ( $10^9$ )	$\nu$
	1/°C	pa	
۲۰	۵/۸۸۹۲	۱/۷۶۳۲	۰/۳۸۷۹
۱۵	۶/۲۲۴۴	۱/۶۲۷۵	۰/۳۹۱
۱۰	۶/۵۵۴۵	۱/۵۰۶۵	۰/۳۹۴
۰	۶/۸۷۹۷	۱/۳۹۷۰۲	۰/۳۹۷

در مطالعه‌ای به بررسی انتقال حرارت با مدل‌سازی رئولوژیکی داده‌های افت فشار ناشی از فرآیند، پرداخته شد. در این حالت فشار نازل با نظارت بر توان مصرفی برای هدایت انتهای داغ (جزئی از چاپگر که لایه به لایه مواد را از طریق یک نازل گرم، ذوب و اکستروژن می‌کند) در طول چاپ اندازه‌گیری می‌شود. در نهایت، نشان داده شد که رسوب مواد در ناحیه مورد استفاده برای ذوب/نرم شدن پلیمر به‌طور قابل توجهی سرعت انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. یا به‌طور کلی می‌توان گفت انتقال حرارت بر افت فشار در سراسر نازل تأثیر گذاشته و سرعت چاپ را محدود می‌کند [۶۶].

<sup>3</sup> Ansys

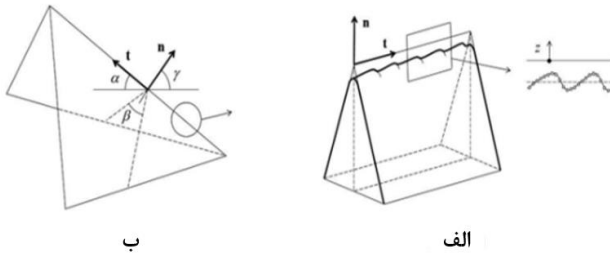
<sup>4</sup> Coefficient of thermal expansion (CTE)

<sup>1</sup> Thermoplastic Polyurethane (TPU)

<sup>2</sup> Digimat

## ۳-۳- شبیه‌سازی جریان مذاب

است. در این روش، انحراف از شکل لبه اسمی (شکل ۸-الف) به عنوان تابعی از ضخامت لایه و سه زاویه‌ی مشخص (شکل ۸-ب) تعریف شد و وابستگی آن به هندسه قطعه و جهت ساخت مشخص گردید و در نهایت صحت شبیه‌سازی با داده‌های تجربی موجود تأیید شد. در این پژوهش اثر پارامترهای دیگری مانند پل زدن<sup>۳</sup> (چاپ یک قسمت صاف و افقی از مدل بدون پشتیبانی لایه زیرین) نادیده گرفته شده است [۶۹].

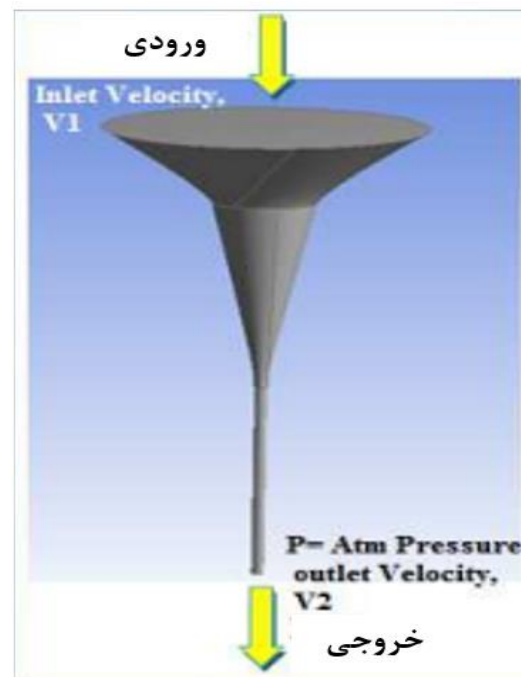


شکل ۸ الف- انحراف از شکل لبه اسمی، ب- زوایای متغیر [۶۹]

مطالعه پارامتری اعوجاج قطعات در روش لایه‌نشانی همجوشی با استفاده از تحلیل المان محدود سه‌بعدی نشان می‌دهد که، سرعت چاپ مهم‌ترین عامل مؤثر بر اعوجاج قطعات و به دنبال آن ضخامت لایه است. همچنین اثر عرض رشته چاپ شده بر اعوجاج به تنهایی ناچیز است. با این حال، اثرگذاری عرض رشته و ضخامت لایه برهم قابل توجه است. به‌طور کلی تنش‌های پسماند در قطعات تولیدی به روش لایه‌نشانی همجوشی، با افزایش ضخامت لایه کاهش می‌یابد. همچنین اعوجاج با افزایش عرض رشته و همچنین ضخامت لایه، افزایش می‌یابد [۷۰]. مدل‌سازی تشکیل پیوند بین رشته‌های پلیمری در فرآیند مدل‌سازی لایه‌نشانی همجوشی در ابعاد ماکرو، اثر پارامترهای تولید مانند خنک‌سازی را بر ویژگی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی تأیید می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که دمای اکستروژن نسبت به دمای پوشش (دمای سطح قطعه) تأثیر بیشتری بر رشد گلوبی در ناحیه پیوند دارد. همچنین کنترل بهتر خنک‌کننده ممکن است اثرات چشمگیری بر خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی قطعه نهایی داشته باشد [۷۱].

در پژوهشی به بررسی تجربی و المان محدود زبری سطح و استحکام کششی نمونه‌های استاندارد ساخته شده از پلی‌لاکتیک اسید با تراکم چاپ مختلف، پرداخته شد. همچنین تجزیه و تحلیل المان محدود بر روی نمونه‌های شبیه‌سازی جهت یافتن تفاوت‌های بین فرآیندهای چاپ و شبیه‌سازی انجام شد. نتایج نشان داد که نمونه‌های شبیه‌سازی کیفیت سطحی بهتری در

رفتار جریان مذاب و اثرات هندسه خروجی نازل بر آن، در ماده پلی‌لاکتیک اسید تقویت شده با نانو الیاف کربن بررسی شده است. رفتار جریان مذاب به شدت تحت تأثیر ویژگی رئولوژیکی مواد است. افت فشار با افزایش گرانشی افزایش می‌یابد. پس از شبیه‌سازی خروجی نازل مشخص گردید، تغییرات فشار و سرعت خروجی، با کاهش قطر نازل افزایش و با افزایش زاویه نازل کاهش می‌یابد. تغییرات فشار و سرعت برای نازل‌هایی با سطح مقطع یکسان، حداقل است [۶۷]. اثر رفتار جریان مذاب در روش لایه-نشانی همجوشی برای برخی از پلیمرها، همانند اکریلونیتریل بوتادین استایرن، پلی‌پروپیلن<sup>۱</sup> و پلی‌اتیلن چگالی بالا<sup>۲</sup> و مخلوط اکریلونیتریل بوتادین استایرن با ۱۰ درصد آهن، با استفاده از تجزیه و تحلیل المان محدود توسط نرم‌افزار انسیس مشخص شده است. در موارد فوق، در صورتی که قطر نازل از قطر ورودی کوچکتر باشد (شکل (۷))، سرعت خروج ماده افزایش می‌یابد [۶۸].



شکل ۷ طرحواره از قطر ورودی و قطر خروجی (نازل) [۶۸]

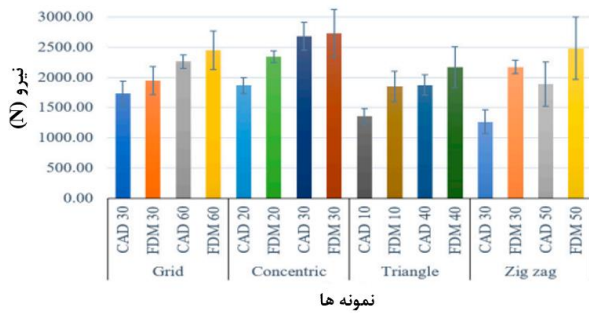
## ۳-۴- شبیه‌سازی اثر پارامترهای چاپ

جهت شبیه‌سازی مشخصات لبه‌های قطعه تولید شده توسط فرآیند روش لایه‌نشانی همجوشی یک حل عددی پیشنهاد شده

<sup>3</sup> Bridging

<sup>1</sup> Polypropylene (PP)

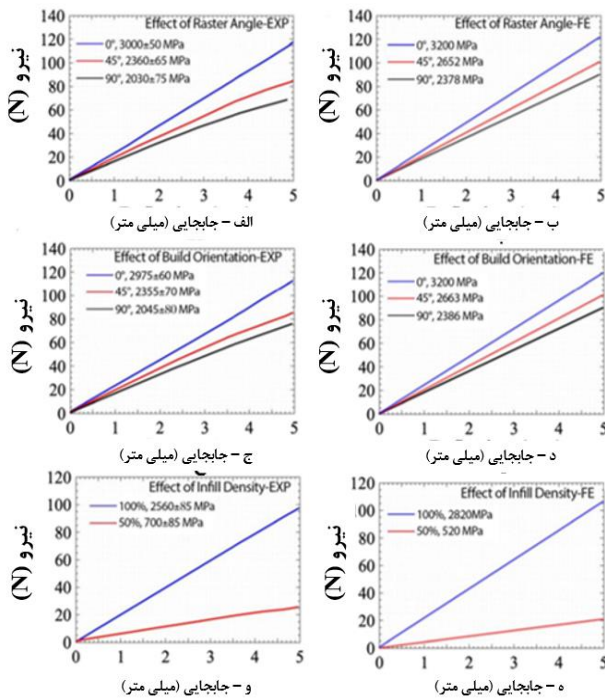
<sup>2</sup> High-density polyethylene



نمونه ها

نمودار ۷ مقایسه حداکثر استحکام در نمونه‌های چاپی [۷۲]

اثر پارامترهای فرآیند چاپ مانند تراکم چاپ و جهت ساخت بر پاسخ الاستیک قطعات چاپ شده نیز به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نمودار (۸) و تطابق خوب شبیه‌سازی‌ها با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که استفاده از این روش، ابزاری قابل اعتماد برای پیش‌بینی پاسخ الاستیک قطعات چاپ شده سه‌بعدی است. این رویکرد به کاهش تعداد تکرارهای آزمایشی و هزینه‌های ساخت کمک می‌کند [۷۳].



نمودار ۸ الف، ب- اثر زاویه لایه‌نشانی، ج، د- جهت ساخت؛ و، ه- چگالی پر کردن در نمودارهای نیرو بر حسب جابجایی در بارگذاری خمشی سه نقطه با جنس اکریلونیتریل بوتادین استایرن [۷۳]

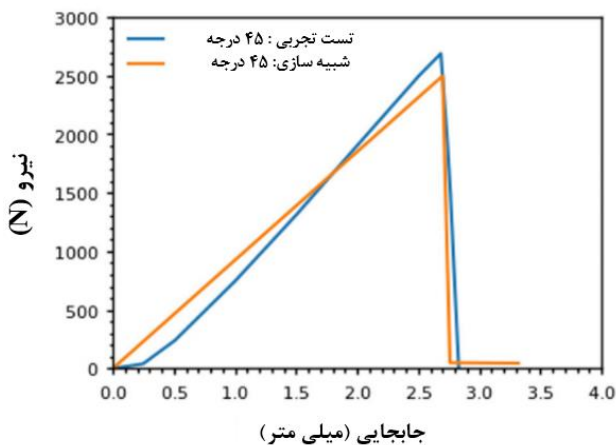
در پژوهشی دیگر، با استفاده از تجزیه و تحلیل مکانیکی-دینامیکی، تفاوت‌ها در خواص مکانیکی دیواره تک رشته‌ای ساخته شده از پلی‌اتراکتون تحت طیف وسیعی از شرایط چاپ بررسی گردید. مدل ارائه شده، دما و سرعت چاپ را به خواص مکانیکی قطعات پلیمری تولید شده با استفاده از روش لایه‌نشانی

مقایسه با نمونه‌های تولیدی دستگاه لایه‌نشانی همجوش دارند. در حالی که آزمایش‌های کشش نشان داد، الگوهای تولید شده توسط روش لایه‌نشانی همجوش از نظر استحکام و سختی نسبت به نمونه‌های شبیه‌سازی شده مستحکم‌تر می‌باشند. مطابق با نتایج شبیه‌سازی، الگوهای شبکه‌ای و متحدالمرکز بهترین کیفیت سطح را داشته و الگوی زیگزاگ بدترین کیفیت را به دلیل طراحی غیربهبوده و چسبندگی ضعیف دارا می‌باشند. در ادامه، آزمایش استحکام کششی و تجزیه و تحلیل میکروسکوپی نشان داد که یک الگوی متحدالمرکز در هر دو روش شبیه‌سازی با آباکوس و روش لایه‌نشانی همجوش بالاترین استحکام را داراست، در حالی که الگوی زیگزاگ ضعیف‌ترین استحکام مکانیکی را دارد [۷۲]. نتایج با جزئیات بیشتر در جدول (۲) و نمودار (۷) نشان داده شده است.

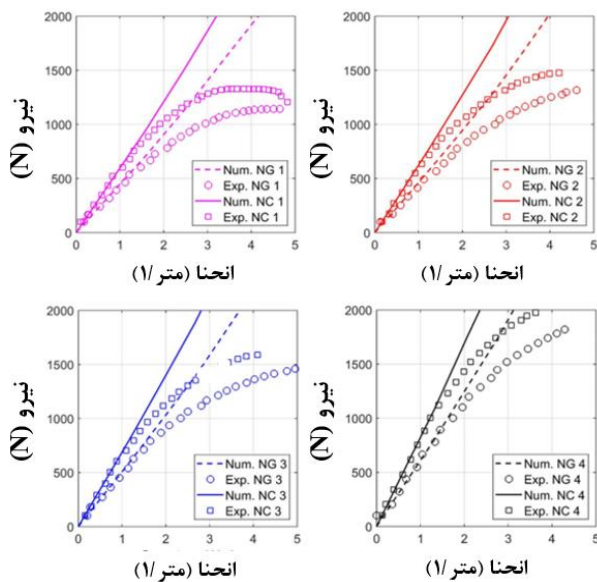
جدول ۲ میانگین زبری نمونه‌های چاپ شده [۷۲]

Point	Grid Pattern				Zigzag Pattern			
	Part	Ra (µm)	Part	Ra (µm)	Part	Ra (µm)	Part	Ra (µm)
1	CAD 30%	2.37	FDM 30%	2.54	CAD 30%	6.78	FDM 30%	2.78
2		2.17		2.77		5.6		3.3
3		2.45		2.93		6.11		3.4
4		3.49		3.14		5.63		2.93
5		3.1		2.89		7.3		2.27
Average		2.72		2.85		6.28		2.94
Standard deviation		0.56		0.22		0.74		0.45
1	CAD 60%	2.52	FDM 60%	3.07	CAD 50%	4.83	FDM 50%	3.73
2		2.19		3.57		4.88		3.81
3		2.25		2.42		4.5		2.94
4		2.78		2.02		4.7		3.47
5		2.54		2.3		4.3		3.26
Average		2.45		2.67		4.64		3.45
Standard deviation		0.24		0.63		0.24		0.36
	Concentric pattern				Triangle pattern			
1	CAD 20%	2.12	FDM 20%	3.11	CAD 10%	3.47	FDM 10%	3.12
2		2.86		3.33		2.64		3.7
3		2.4		3.25		3.78		4.17
4		2.78		3.61		3.4		4.96
5		2.62		3.17		2.77		3.81
Average		2.55		3.29		3.21		3.95
Standard deviation		0.30		0.20		0.49		0.68
1	CAD 30%	1.97	FDM 30%	3.08	CAD 40%	2.83	FDM 40%	3.11
2		2.23		3.89		3.03		3.85
3		2.38		2.74		3.13		4.41
4		2.56		3.47		2.87		3.9
5		2.77		2.22		3.04		2.82
Average		2.38		3.08		2.98		3.62
Standard deviation		0.31		0.64		0.13		0.64

نمودار (۱۰) نشان می‌دهد، که مدل مواد همسانگرد عرضی الاستیک قادر به پیش‌بینی فاز خطی تغییر شکل با دقت خوبی بوده و قادر به تخمین صحیح سفتی اجزا می‌باشد. علاوه بر این، امکان ارزیابی توزیع تنش در بخش‌ها و جهت‌های مختلف اجزا با بکارگیری مدل فوق فراهم است [۷۷]. باید توجه داشت که این مدل در انحنای مشخصی، تطابق خود را با تست تجربی از دست می‌دهد که نشان دهنده‌ی عدم قطعیت این مدل در تمام انحنایها می‌باشد.



نمودار ۹ نتایج مطالعات عددی بر روی نمونه‌های چاپی با استفاده از  $\phi = 45^\circ$  [۷۶]

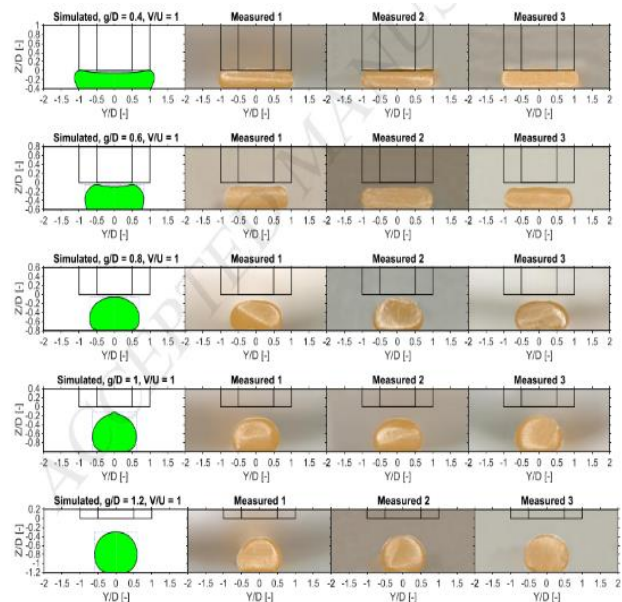


نمودار ۱۰ مقایسه نتایج تجربی و عددی از نظر بار در مقابل انحنای دو ماده مورد بررسی و برای چهار هندسه پرکننده؛ (۱=۱۶ میلی‌متر، الف=۱۲ میلی‌متر، ب=۸ میلی‌متر، ج=۴ میلی‌متر (د)) [۷۷]

در پژوهشی دیگر توسط راز و همکارانش [۷۸]، روش لایه‌نشانی همجوش شبیه‌سازی شد. در ابتدا بر اساس ارزیابی

همجوش مرتبط می‌کند. بنابراین، پایه‌ای برای اتصال بهتر کریستال‌ها جهت افزایش عملکرد مکانیکی پلی‌اترکتون چاپ شده با این روش می‌باشد [۷۴].

تأثیر پارامترهای چاپ بر سطح مقطع یک رشته چاپ شده توسط لایه‌نشانی همجوش بررسی گردید. در این پژوهش با استفاده از میکروسکوپ نوری، سطح مقطع رشته‌های اکستروژده شده برای ضخامت لایه‌ها و سرعت‌های مختلف چاپ اندازه‌گیری شد. بسته به پارامترهای چاپ، سطح مقطع رشته می‌تواند از تقریباً دایره‌ای تا یک شکل مستطیلی دراز با لبه‌های گرد (شکل (۹)) متفاوت باشد. مدل عددی پیشنهادی تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان داده و قادر است تغییرات مورفولوژی رشته فوق را برای شرایط مختلف چاپ به تصویر بکشد [۷۵].



شکل ۹ سطح مقطع‌های متفاوت در شرایط فرآیندی مختلف [۷۵]

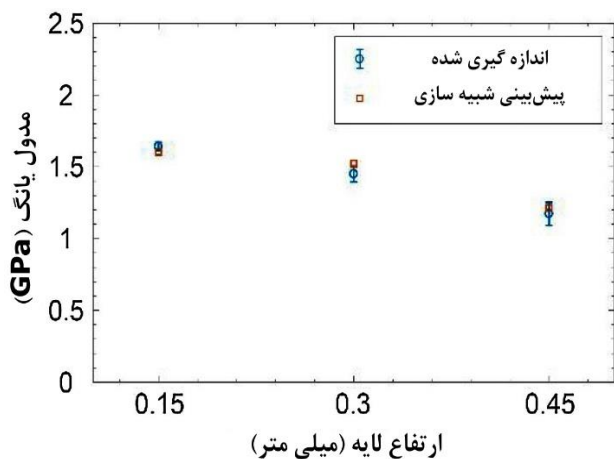
### ۳-۵- سایر شبیه‌سازی‌ها

با توجه به اینکه سایر موارد شبیه‌سازی متمرکز بر پارامترهای از فرایند لایه‌نشانی همجوشی می‌باشد که کمتر مورد بررسی قرار گرفته است، به صورت تجمیعی در این دسته‌بندی به آن‌ها پرداخته خواهد شد. اثر جهات چاپ بر رفتار شکست و پیش‌بینی محل آن در قطعات، به کمک مدلی عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. شایان ذکر است بدون حل جزئیات ریزساختار، تطابق خوبی بین نتایج عددی با نتایج تجربی وجود دارد. (نمودار (۹)) [۷۶].

جهت پیش‌بینی خواص مکانیکی، از یک مدل همسانگرد عرضی با انجام آنالیز ضمنی استاتیکی غیرخطی المان محدود با استفاده از کد LS-DYNA استفاده شد. نتایج بدست آمده در

دستیابی به این روش می‌تواند منجر به کاهش قابل توجهی در تعداد آزمایش‌های تجربی شده، و در زمان و هزینه صرفه‌جویی کرد [۷۳].

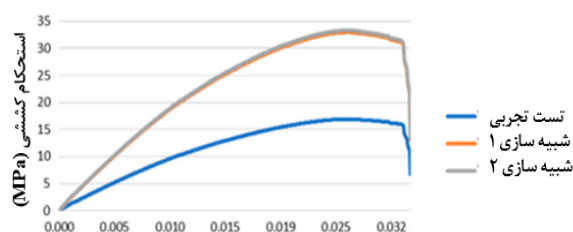
روش‌هایی برای تخمین مدول الاستیک مؤثر نمونه‌های ساخته شده به روش لایه‌نشانی همجوش، بر مبنای تحلیل المان محدود پیشنهاد شده است. رابطه بین مدول ذاتی مواد، هندسه چاپی و مدول الاستیک مؤثر با خطایی کمتر از ۱۰ درصد نسبت به نتایج تجربی مشخص شد. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که توزیع تنش داخلی و مدول الاستیک مؤثر چگونه با ساختار لایه ای یک نمونه تغییر می‌کند [۷۹]. در مطالعه‌ای دیگر توسط فنگ و همکاران [۸۰]، به بررسی خواص مکانیکی قطعات چاپ شده به روش لایه‌نشانی همجوش با پارامترهای فرایندی متنوع پرداخته شده است. تغییر استحکام و مدول با تغییرات هندسی که با نتایج اسکن میکروسی‌تی<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شده‌اند، با نتایج شبیه‌سازی المان محدود مطابقت خوبی دارد (نمودار (۱۲)). نتایج نشان می‌دهد، افزایش ارتفاع لایه همراه با کاهش سطح پیوند، کاهش استحکام کششی عرضی و مدول یانگ می‌باشد. شایان ذکر است ارائه‌ی دلایل این تغییرات با شبیه‌سازی، پیچیدگی کمتری نسبت به حالت تجربی دارد.



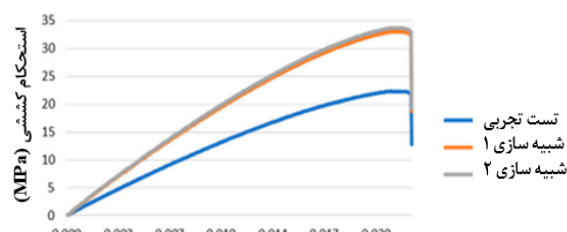
نمودار ۱۲ مقایسه مدول یانگ اندازه‌گیری شده در آزمون‌های عرضی و پیش‌بینی‌های مربوطه از روش المان محدود [۸۰]

در مطالعه‌ای به تحلیل حرارتی فرآیند چاپ لایه‌نشانی همجوش با استفاده از یک کد شبیه‌سازی توسعه‌یافته می‌پردازد که نتایج آن با دقت بیش از ۹۹٪ در مقایسه با راه‌حل‌های تحلیلی اعتبارسنجی شده است. اثرات گرمادهی بین لایه‌ها و درون لایه‌ها نیز بررسی گردیده است. نتایج این پژوهش برای تخمین میزان اتصال بین لایه‌ای قابل استفاده می‌باشد [۸۱].

تجربیه تصاویر میکروسکوپی از هندسه‌ی مقطع یک نمونه کششی چاپ شده، اتصال بین رشته‌ها تعیین گردید. شبیه‌سازی‌های المان محدود با در نظر گرفتن طول‌های مختلف قطعه با آزمایش‌های تجربی اعتبارسنجی شدند. این روش از یک سو، تخمین عددی سطح مقطع واقعی یک نمونه و تصحیح منحنی‌های تنش-کرنش تجربی و از سوی دیگر، تعیین دقیق مدول یانگ یک نمونه کششی چاپ شده با روش‌های مختلف را امکان‌پذیر می‌سازد. با تأیید این روش خواص مکانیکی نمونه‌های سه‌بعدی را می‌توان بدون آزمایش کشش فیزیکی، فقط با استفاده از شبیه‌سازی پیش‌بینی کرد، که به طراحان اجازه می‌دهد قطعات را با چگالی‌های متغیر چاپ کرده و بدین ترتیب به میزان قابل توجهی در مواد و زمان صرفه‌جویی نمایند. هرچند برخی از این شبیه‌سازی با ارزیابی تجربی تطابق مناسبی نداشته و لازم است دقیق‌تر مورد بررسی قرار گیرند (نمودار (۱۱)).



الف - کرنش کششی



ب - کرنش کششی

نمودار ۱۱ نتایج نمودارهای تنش-کرنش با نرخ‌های پرشدگی؛

الف - ۲۰٪ - ب - ۶۰٪ [۷۸]

جهت بررسی تاثیر جهت‌گیری‌های مختلف چاپ بر خواص الاستیک، شبیه‌سازی دیگری انجام شد، که تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد. مشابه با مطالعات تجربی که در قسمت‌های قبل به آن اشاره شد، مشاهده گردید که تغییر در چگالی پرکننده به‌طور قابل توجهی بر خواص مکانیکی قطعات تأثیر می‌گذارد. روش‌های عددی توسعه‌یافته در این مطالعه توانایی پیش‌بینی خواص الاستیک سازه‌های چاپ شده را دارد.

<sup>1</sup> Micro-CT

## ۴- نتیجه گیری

## ۵- مراجع

- با توجه به حجم پژوهش‌های انجام شده، اهمیت بررسی روش لایه‌نشانی همجوش به‌دلیل نوظهور بودن آن و نیاز به شناخت جنبه‌های مختلف مؤثر بر کارایی و استفاده بهینه از این روش به‌خوبی روشن است. در این مطالعه به تحلیل مطالعات تجربی و عددی در حوزه روش لایه‌نشانی همجوش پرداخته شده و تأثیر پارامترهای چاپ شامل جهت ساخت، زاویه ساخت، تراکم چاپ، ضخامت لایه، سرعت چاپ، قطر نازل، دمای نازل و الگوی چاپ بر خواص مکانیکی قطعات چاپ شده به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مدل‌ها و شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته در این زمینه به تفصیل بررسی شدند. براساس نتایج تجربی، به‌طور کلی مشاهده گردید که جهت ساخت و الگوی پرکردن تأثیر بسزایی در خواص مکانیکی قطعه دارد و انتخاب بهینه این پارامترها ضروری است. همچنین، ضخامت لایه کم و دمای نازل بالا منجر به افزایش مقاومت کششی، مدول یانگ، استحکام تسلیم و خمشی مواد می‌شود و جهت‌گیری صفر درجه بیشترین استحکام نهایی و تسلیم را فراهم می‌آورد. از سوی دیگر، شکاف هوا با مقادیر منفی باعث افزایش خواص مکانیکی مانند استحکام و سفتی می‌گردد، ولی در عین حال سرعت ساخت را کاهش می‌دهد. افزون بر این، افزایش سرعت چاپ تأثیر منفی بر استحکام کششی، زبری سطح و چگالی قطعات چاپ شده دارد. همچنین، افزایش چگالی پر کردن موجب بهبود عملکرد خمشی قطعه چاپ شده می‌شود. نهایتاً، نتایج نشان می‌دهند که با کاهش دمای نازل، دقت ابعادی بهبود می‌یابد.
- مطالعات عددی نشان می‌دهند که الگوهای شبکه‌ای و متحدالمرکز بیشترین کیفیت سطح را دارند. همچنین، تغییرات فشار و سرعت خروجی با کاهش قطر نازل افزایش و با افزایش زاویه نازل کاهش می‌یابد. به‌طور کلی، کاهش کیفیت سطح ناشی از اعوجاج، همواره یکی از چالش‌های روش لایه‌نشانی همجوش است که نتیجه تنش‌های پسماند می‌باشد. این تنش‌ها در قطعات تولید شده به روش لایه‌نشانی همجوش با افزایش ضخامت لایه، افزایش می‌یابند. بررسی کلی مطالعات نشان می‌دهد که لازم است دقت شبیه‌سازی‌های عددی افزایش یابد و تأثیرات متقابل پارامترها بر یکدیگر نیز مورد بررسی قرار گیرد تا عدم قطعیت‌ها از بین بروند. به‌طور کلی، با توجه به دقت قابل قبول روش‌های ارائه شده در شبیه‌سازی‌ها، می‌توان فرایند را بهینه‌سازی کرده و زمان و هزینه تولید قطعات را کاهش داد. نتایج به‌دست آمده در این پژوهش با مقالات مشابه [۸، ۱۰] مقایسه گردید که مطابقت خوبی را در ارتباط با اهمیت پارامترهای چاپ و همچنین تأثیر هر پارامتر نشان می‌دهد.
- [1] J. M. Framinan, P. Perez-Gonzalez, and V. Fernandez-Viagas, "An overview on the use of operations research in additive manufacturing," *Annals of Operations Research*, vol. 322, no. 1, pp. 5-40, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-022-05040-4>.
- [2] R. Subramani *et al.*, "Advancements in 3D printing materials: A comparative analysis of performance and applications," *Applied Chemical Engineering*, pp. 3867-3867, 2024, doi: <https://doi.org/10.59429/ace.v7i2.3867>.
- [3] G. Prayitno, F. Imaduddin, and Z. Arifin, "Recent progress of fused deposition modeling (FDM) 3D printing: constructions, parameters and processings," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1096, no. 1: IOP Publishing, p. 012045, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1096/1/012045>.
- [4] N. Divakaran, J. P. Das, A. K. PV, S. Mohanty, A. Ramadoss, and S. K. Nayak, "Comprehensive review on various additive manufacturing techniques and its implementation in electronic devices," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 62, pp. 477-502, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.01.002>.
- [5] S. C. Daminabo, S. Goel, S. A. Grammatikos, H. Y. Nezhad, and V. K. Thakur, "Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D printing): techniques for polymer material systems," *Materials today chemistry*, vol. 16, p. 100248, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100248>.
- [6] H. Hasdiansah, R. I. Yaqin, P. Pristiansyah, M. L. Umar, and B. H. Priyambodo, "FDM-3D printing parameter optimization using taguchi approach on surface roughness of thermoplastic polyurethane parts," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 17, no. 6, pp. 3011-3024, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s12008-023-01304-w>.
- [7] D. Vinay *et al.*, "Parametric analysis of processing variables for enhanced adhesion in metal-polymer composites fabricated by fused deposition modeling," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 38, no. 3, pp. 331-354, 2024, doi: <https://doi.org/10.1080/01694243.2023.2228496>.
- [8] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172-196, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.

- [18] A. D. Mazurchevici, D. Nedelcu, and R. Popa, "Additive manufacturing of composite materials by FDM technology: A review," 2020. [Online]. Available: <https://nopr.niscpr.res.in/handle/123456789/54873>.
- [19] B. Najafloo, M. Razavi-Nouri, and A. M. Rezadoust, "A Review on Fused Deposition Modeling Method," (in persian), *Basparesh*, vol. 6, no. 3, pp. 74-85, 2016. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Mohammad-Razavi-nouri/publication/304539208\\_A\\_Review\\_on\\_Fused\\_Deposition\\_Modeling\\_Method/links/5867543808ae6eb871b0ecc5/A-Review-on-Fused-Deposition-Modeling-Method.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mohammad-Razavi-nouri/publication/304539208_A_Review_on_Fused_Deposition_Modeling_Method/links/5867543808ae6eb871b0ecc5/A-Review-on-Fused-Deposition-Modeling-Method.pdf).
- [20] K. I. Byberg, A. W. Gebisa, and H. G. Lemu, "Mechanical properties of ULTEM 9085 material processed by fused deposition modeling," *Polymer Testing*, vol. 72, pp. 335-347, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.10.040>.
- [21] K. Ashtankar, A. Kuthe, and B. S. Rathour, "Effect of build orientation on mechanical properties of rapid prototyping (fused deposition modelling) made acrylonitrile butadiene styrene (abs) parts," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2013, vol. 56406: American Society of Mechanical Engineers, p. V011T06A017, doi: <https://doi.org/10.1115/IMECE2013-63146>.
- [22] M. Eryıldız, "Effect of build orientation on mechanical behaviour and build time of FDM 3D-printed PLA parts: an experimental investigation," *European Mechanical Science*, vol. 5, no. 3, pp. 116-120, 2021, doi: <https://doi.org/10.26701/ems.881254>.
- [23] M. Shojib Hossain, D. Espalin, J. Ramos, M. Perez, and R. Wicker, "Improved mechanical properties of fused deposition modeling-manufactured parts through build parameter modifications," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 136, no. 6, p. 061002, 2014, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4028538>.
- [24] C. Xu *et al.*, "Effect of processing parameters on flexural properties of 3D-printed polyetherketoneketone using fused deposition modeling," *Polymer Engineering & Science*, vol. 61, no. 2, pp. 465-476, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/pen.25590>.
- [25] V. Reddy, O. Flys, A. Chaparala, C. E. Berrimi, V. Amogh, and B. G. Rosen, "Study on surface texture of Fused Deposition Modeling," *Procedia Manufacturing*, vol. 25, pp. 389-396, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.108>.
- [9] T. Diez, "THE IMPACTS OF REORIENTING A FUSED DEPOSITION MODELING 3D PRINTER WITH RESPECT TO GRAVITY," 2023. [Online]. Available: <https://scholarworks.calstate.edu/concern/projects/5425kh702>.
- [10] R. B. Kristiawan, F. Imaduddin, D. Ariawan, Ubaidillah, and Z. Arifin, "A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters," *Open Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 639-649, 2021, doi: <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0063>.
- [11] N. Mohan, P. Senthil, S. Vinodh, and N. Jayanth, "A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 12, no. 1, pp. 47-59, 2017, doi: <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1274490>.
- [12] P. K. Penumakala, J. Santo, and A. Thomas, "A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 201, p. 108336, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108336>.
- [13] V. Cojocar, D. Frunzaverde, C.-O. Miclosina, and G. Marginean, "The influence of the process parameters on the mechanical properties of PLA specimens produced by fused filament fabrication—A review," *Polymers*, vol. 14, no. 5, p. 886, 2022, doi: <http://doi.org/10.3390/polym14050886>.
- [14] N. K. Suniya and A. K. Verma, "A review on optimization of process parameters of fused deposition modeling," *Research on Engineering Structures & Materials*, vol. 9, no. 2, pp. 631-659, 2023, doi: <http://dx.doi.org/10.17515/resm2022.520ma0909>.
- [15] J. D. Kechagias, "Surface roughness assessment of ABS and PLA filament 3D printing parts: structural parameters experimentation and semi-empirical modelling," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-12, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14232-0>.
- [16] S. Y. Park *et al.*, "Comparison of translucency, thickness, and gap width of thermoformed and 3D-printed clear aligners using micro-CT and spectrophotometer," *Scientific reports*, vol. 13, no. 1, p. 10921, 2023, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36851-5>.
- [17] A. Karimi, D. Rahmatbadi, and M. Baghani, "Various FDM mechanisms used in the fabrication of continuous-fiber reinforced composites: a review," *Polymers*, vol. 16, no. 6, p. 831, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/polym16060831>.

- thermoplastics prepared by fused deposition modeling (FDM) based additive manufacturing technique," *Materials Today: Proceedings*, vol. 90, pp. 256-261, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.212>.
- [35] O. S. Es-Said, J. Foyos, R. Noorani, M. Mendelson, R. Marloth, and B. A. Pregger, "Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 15, no. 1, pp. 107-122, 2000, doi: <https://doi.org/10.1080/10426910008912976>.
- [36] A. A. Bakır, R. Atik, and S. Özerinç, "Effect of fused deposition modeling process parameters on the mechanical properties of recycled polyethylene terephthalate parts," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 138, no. 3, p. 49709, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/app.49709>.
- [37] S. H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright, "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS," *Rapid prototyping journal*, vol. 8, no. 4, pp. 248-257, 2002, doi: <https://doi.org/10.1108/13552540210441166>.
- [38] T. N. A. T. Rahim, A. M. Abdullah, and H. Md Akil, "Recent developments in fused deposition modeling-based 3D printing of polymers and their composites," *Polymer Reviews*, vol. 59, no. 4, pp. 589-624, 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/15583724.2019.1597883>.
- [39] F. Rayegani and 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, pp. 509-519, 2014, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5835-2>.
- [40] V. Schöppner and K. P. KTP, "Mechanical properties of fused deposition modeling parts manufactured with Ultem\* 9085," in *Proceedings of the 69th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers (ANTEC'11)*, Boston, MA, USA, 2011, pp. 1-5. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Volker-Schoeppner/publication/284341800\\_Mechanical\\_properties\\_of\\_fused\\_deposition\\_modeling\\_parts\\_manufactured\\_with\\_ULTEMzast9085/links/5c73971b458515831f6cd501/Mechanical-properties-of-fused-deposition-modeling-parts-manufactured-with-ULTEM-zast9085.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Volker-Schoeppner/publication/284341800_Mechanical_properties_of_fused_deposition_modeling_parts_manufactured_with_ULTEMzast9085/links/5c73971b458515831f6cd501/Mechanical-properties-of-fused-deposition-modeling-parts-manufactured-with-ULTEM-zast9085.pdf)
- [41] L. Kačergis, R. Mitkus, and M. Sinapius, "Influence of fused deposition modeling process parameters on the transformation of 4D printed morphing structures," *Smart Materials and Structures*, vol. 28, no. 10, p. 105042, 2019, doi: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab3d18>.
- [26] P. Wang, B. Zou, H. Xiao, S. Ding, and C. Huang, "Effects of printing parameters of fused deposition modeling on mechanical properties, surface quality, and microstructure of PEEK," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 271, pp. 62-74, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.03.016>.
- [27] E. U. Enemuoh, S. Duginski, C. Feyen, and V. G. Menta, "Effect of process parameters on energy consumption, physical, and mechanical properties of fused deposition modeling," *Polymers*, vol. 13, no. 15, p. 2406, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13152406>.
- [28] F. Ning, W. Cong, Y. Hu, and H. Wang, "Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: Effects of process parameters on tensile properties," *Journal of composite materials*, vol. 51, no. 4, pp. 451-462, 2017, doi: <https://doi.org/10.1177/0021998316646169>.
- [29] P. Shubham, A. Sikidar, and T. Chand, "The influence of layer thickness on mechanical properties of the 3D printed ABS polymer by fused deposition modeling," *Key engineering materials*, vol. 706, pp. 63-67, 2016, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.706.63>.
- [30] L. Sandanamsamy *et al.*, "A comprehensive review on fused deposition modelling of polylactic acid," *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 8, no. 5, pp. 775-799, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00356-w>.
- [31] J. M. Barrios and P. E. Romero, "Improvement of surface roughness and hydrophobicity in PETG parts manufactured via fused deposition modeling (FDM): An application in 3D printed self-cleaning parts," *Materials*, vol. 12, no. 15, p. 2499, 2019, doi: <http://doi.org/10.3390/ma12152499>.
- [32] D. Popescu, A. Zapciu, C. Amza, F. Baci, and R. Marinescu, "FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review," *Polymer Testing*, vol. 69, pp. 157-166, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020>.
- [33] M. Heidari-Rarani, N. Ezati, P. Sadeghi, and M. Badrossamay, "Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 35, no. 12, pp. 2435-2452, 2022, doi: <https://doi.org/10.1177/0892705720964560>.
- [34] S. Shashikumar and M. Sreekanth, "The effect of printing parameters on tensile properties of

- Mechanical Engineering Science*, vol. 235, no. 10, pp. 1811-1827, 2021, doi: <https://doi.org/10.1177/0954406219856383>.
- [51] R. Srinivasan, K. N. Kumar, A. J. Ibrahim, K. Anandu, and R. Gurudhevan, "Impact of fused deposition process parameter (infill pattern) on the strength of PETG part," *Materials Today: Proceedings*, vol. 27, pp. 1801-1805, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.777>.
- [52] J. Joudaki and S. A. Naghavi Alhoseini, "Comparison of Tensile Strength for 3D Printed Parts Fabricated by Fused Filament Fabrication (FFF)," (in persian), *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 9, no. 5, pp. 40-48, 2022, doi: <https://doi.org/10.22034/ijme.2022.160058>.
- [53] M. Q. Tanveer, G. Mishra, S. Mishra, and R. Sharma, "Effect of infill pattern and infill density on mechanical behaviour of FDM 3D printed Parts-a current review," *Materials today: proceedings*, vol. 62, pp. 100-108, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.310>.
- [54] S. Abidaryan, M. Barmouz, and S. K. Hedayati, "Effect of infill percentage and raster angle in fused deposition modeling (FDM) process on shape memory properties of poly (lactic acid) and comparison with compression molding," (in persian), *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 7, no. 5, pp. 14-23, 2020. [Online]. Available: [https://www.iranjme.ir/article\\_110680\\_en.html](https://www.iranjme.ir/article_110680_en.html).
- [55] A. Qattawi, "Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 36, pp. 164-174, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.09.025>.
- [56] A. J. Sheoran and H. Kumar, "Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research," *Materials Today: Proceedings*, vol. 21, pp. 1659-1672, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.296>.
- [57] S. Wang, Y. Ma, Z. Deng, S. Zhang, and J. Cai, "Effects of fused deposition modeling process parameters on tensile, dynamic mechanical properties of 3D printed polylactic acid materials," *Polymer testing*, vol. 86, p. 106483, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106483>.
- [58] P. Zarean *et al.*, "Effect of printing parameters on mechanical performance of material-extrusion 3D-printed PEEK specimens at the Point-of-care," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 3, p. 1230, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/app13031230>.
- [42] T. van Manen, S. Janbaz, and A. A. Zadpoor, "Programming the shape-shifting of flat soft matter," *Materials Today*, vol. 21, no. 2, pp. 144-163, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.08.026>.
- [43] L. Miazio, "Impact of print speed on strength of samples printed in FDM technology," *Agricultural Engineering*, vol. 23, no. 2, pp. 33-38, 2019. [Online]. Available: <https://intapi.sciendo.com/pdf/10.1515/agriceng-2019-0014>.
- [44] L. Wang, J. E. Sanders, D. J. Gardner, and Y. Han, "Effect of fused deposition modeling process parameters on the mechanical properties of a filled polypropylene," *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 3, pp. 205-214, 2018. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40964-018-0053-3>.
- [45] M. Ramesh and K. Panneerselvam, "Mechanical investigation and optimization of parameter selection for Nylon material processed by FDM," *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 9303-9307, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.697>.
- [46] M.-H. Hsueh *et al.*, "Effect of printing parameters on the tensile properties of 3D-printed polylactic acid (PLA) based on fused deposition modeling," *Polymers*, vol. 13, no. 14, p. 2387, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13142387>.
- [47] M. Khosravi, S. M. Hosseini, and M. Lakhi, "Investigation of parameters affecting the roughness and cylindricality of holes in PLA parts made of 3D printing by fused deposition modeling process using response surface method," (in persian), *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 11, no. 3, pp. 119-133, 2021, doi: <https://doi.org/10.22044/jsfm.2021.2209>.
- [48] A. P. Agrawal, V. Kumar, J. Kumar, P. Paramasivam, S. Dhanasekaran, and L. Prasad, "An investigation of combined effect of infill pattern, density, and layer thickness on mechanical properties of 3D printed ABS by fused filament fabrication," *Heliyon*, vol. 9, no. 6, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16531>.
- [49] A. Qattawi, B. Alrawi, and A. Guzman, "Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: a design-for-manufacturing approach," *Procedia Manufacturing*, vol. 10, pp. 791-803, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.079>.
- [50] H. K. Dave, N. H. Patadiya, A. R. Prajapati, and S. R. Rajpurohit, "Effect of infill pattern and infill density at varying part orientation on tensile properties of fused deposition modeling-printed polylactic acid part," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of*

- no. 5, pp. 1097-1107, 2018, doi: <https://doi.org/10.1122/1.5022982>.
- [67] M. Papon, A. Haque, and M. Sharif, "Effect of nozzle geometry on melt flow simulation and structural property of thermoplastic nanocomposites in fused deposition modeling," in *Proceedings of The American Society for Composites, Thirty-Second Technical Conference October*, 2017. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Easir-Arafat-Papon-2/publication/320877727\\_Effect\\_of\\_Nozzle\\_Geometry\\_on\\_Melt\\_Flow\\_Simulation\\_and\\_Structural\\_Property\\_of\\_Thermoplastic\\_Nanocomposites\\_in\\_Fused\\_Deposition\\_Modeling/links/5a007b3aaca2725286d90977/Effect-of-Nozzle-Geometry-on-Melt-Flow-Simulation-and-Structural-Property-of-Thermoplastic-Nanocomposites-in-Fused-Deposition-Modeling.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Easir-Arafat-Papon-2/publication/320877727_Effect_of_Nozzle_Geometry_on_Melt_Flow_Simulation_and_Structural_Property_of_Thermoplastic_Nanocomposites_in_Fused_Deposition_Modeling/links/5a007b3aaca2725286d90977/Effect-of-Nozzle-Geometry-on-Melt-Flow-Simulation-and-Structural-Property-of-Thermoplastic-Nanocomposites-in-Fused-Deposition-Modeling.pdf).
- [68] N. Sa'ude, M. Ibrahim, and M. H. I. Ibrahim, "Melt flow behavior of polymer matrix extrusion for fused deposition modeling (FDM)," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 660, pp. 89-93, 2014, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.66.0.89>.
- [69] A. Armillotta, "Simulation of edge quality in fused deposition modeling," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 25, no. 3, pp. 541-554, 2019, doi: <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2018-0151>.
- [70] Y. Zhang and K. Chou, "A parametric study of part distortions in fused deposition modelling using three-dimensional finite element analysis," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 222, no. 8, pp. 959-968, 2008, doi: <https://doi.org/10.1243/09544054JEM990>.
- [71] C. Bellehumeur, L. Li, Q. Sun, and P. Gu, "Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process," *Journal of manufacturing processes*, vol. 6, no. 2, pp. 170-178, 2004, doi: [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(04\)70071-7](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(04)70071-7).
- [72] M. Lalegani Dezaki, M. K. A. M. Ariffin, A. Serjouei, A. Zolfagharian, S. Hatami, and M. Bodaghi, "Influence of infill patterns generated by CAD and FDM 3D printer on surface roughness and tensile strength properties," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 16, p. 7272, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/app11167272>.
- [73] H. Gonabadi, Y. Chen, A. Yadav, and S. Bull, "Investigation of the effect of raster angle, build orientation, and infill density on the elastic response of 3D printed parts using finite element microstructural modeling and homogenization
- [59] M. Khalilian, S. Golabi, and M. Khodaei, "Characterization of Thermal and Structural Properties of Poly Lactic Acid Parts Fabricated By Fused Depositing Modeling," (in persian), *Advanced Processes in Materials Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 77-85, 2022, doi: <http://doi.org/10.30495/apme.2021.1892982.1979>.
- [60] B. Courter, V. Savane, J. Bi, S. Dev, and C. J. Hansen, "Finite element simulation of the fused deposition modelling process," in *Proceedings of the NAFEMS World Congress*, 2017, pp. 11-14. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Jing-Bi/publication/313819691\\_Finite\\_Element\\_Simulation\\_of\\_the\\_Fused\\_Deposition\\_Modelling\\_Process/links/59ea620f4585151983c7f042/Finite-Element-Simulation-of-the-Fused-Deposition-Modelling-Process.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jing-Bi/publication/313819691_Finite_Element_Simulation_of_the_Fused_Deposition_Modelling_Process/links/59ea620f4585151983c7f042/Finite-Element-Simulation-of-the-Fused-Deposition-Modelling-Process.pdf).
- [61] K. Pooladvand and C. Furlong, "Thermo-mechanical investigation of fused deposition modeling by computational and experimental methods," in *Mechanics of Composite and Multifunctional Materials, Volume 7: Proceedings of the 2016 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics*, 2017: Springer, pp. 45-54. [Online]. Available: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-41766-0\\_6](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-41766-0_6).
- [62] J. Yin, C. Lu, J. Fu, Y. Huang, and Y. Zheng, "Interfacial bonding during multi-material fused deposition modeling (FDM) process due to inter-molecular diffusion," *Materials & Design*, vol. 150, pp. 104-112, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.04.029>.
- [63] X. Zhou, S.-J. Hsieh, and Y. Sun, "Experimental and numerical investigation of the thermal behaviour of polylactic acid during the fused deposition process," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 12, no. 3, pp. 221-233, 2017, doi: <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1317214>.
- [64] H. Xia, J. Lu, S. Dabiri, and G. Tryggvason, "Fully resolved numerical simulations of fused deposition modeling. Part I: fluid flow," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 24, no. 2, pp. 463-476, 2018, doi: <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2016-0217>.
- [65] F. Li, J. Sun, H. Xie, K. Yang, and X. Zhao, "Thermal deformation of PA66/carbon powder composite made with fused deposition modeling," *Materials*, vol. 13, no. 3, p. 519, 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/ma13030519>.
- [66] D. D. Phan, Z. R. Swain, and M. E. Mackay, "Rheological and heat transfer effects in fused filament fabrication," *Journal of Rheology*, vol. 62,

- printing," *Materials*, vol. 14, no. 16, p. 4625, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14164625>.
- [78] L. Racz and M. C. Dudesu, "Numerical investigation of the infill rate upon mechanical proprieties of 3D-printed materials," *Polymers*, vol. 14, no. 10, p. 2022, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/polym14102022>.
- [79] L. Fang *et al.*, "Estimations of the effective Young's modulus of specimens prepared by fused filament fabrication," *Additive Manufacturing*, vol. 42, p. 101983, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101983>.
- [80] L. Fang, Y. Yan, O. Agarwal, J. E. Seppala, K. J. Hemker, and S. H. Kang, "Processing-structure-property relationships of bisphenol-A-polycarbonate samples prepared by fused filament fabrication," *Additive Manufacturing*, vol. 35, p. 101285, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101285>.
- [81] B. Apaçoğlu-Turan, K. Kırkköprü, and M. Çakan, "Numerical Modeling and Analysis of Transient and Three-Dimensional Heat Transfer in 3D Printing via Fused-Deposition Modeling (FDM)," *Computation*, vol. 12, no. 2, p. 27, 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/computation12020027>.
- techniques," *The international journal of advanced manufacturing technology*, pp. 1-26, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07940-4>.
- [74] J. Pu, C. McIlroy, A. Jones, and I. Ashcroft, "Understanding mechanical properties in fused filament fabrication of polyether ether ketone," *Additive Manufacturing*, vol. 37, p. 101673, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101673>.
- [75] M. P. Serdeczny, R. Comminal, D. B. Pedersen, and J. Spangenberg, "Experimental validation of a numerical model for the strand shape in material extrusion additive manufacturing," *Additive Manufacturing*, vol. 24, pp. 145-153, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.09.022>.
- [76] M. R. Khosravani, S. Rezaei, H. Ruan, and T. Reinicke, "Fracture behavior of anisotropic 3D-printed parts: Experiments and numerical simulations," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 19, pp. 1260-1270, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.068>.
- [77] M. Scapin and L. Peroni, "Numerical simulations of components produced by fused deposition 3D