



تشخیص نوع ناهمسانگردی و تعیین ضرایب تانسور سفتی قطعات ساخت افزایشی پلیمری با استفاده از امواج فراصوتی

علیرضا باقری بومی، فرهنگ هنرور*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

* تهران، کد پستی 1969764499، honarvar@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 7 مهر 1401
داوری اولیه: 7 آبان 1401
پذیرش: 13 آبان 1401

کلیدواژگان:

ساخت افزایشی
ساخت رشته رسوبی
امواج فراصوتی
تانسور الاستیسیته
امپدانس صوتی
تضعیف موج

در کاربردهای پزشکی و صنعتی اطلاع از خواص مکانیکی قطعات از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از موثرترین روش‌ها برای اندازه‌گیری خواص الاستیک قطعات روش آزمون غیرمخرب فراصوتی است. در این مقاله، اندازه‌گیری خواص الاستیک قطعاتی که با فرایند ساخت افزایشی ذوب رسوبی ساخته شده‌اند، با استفاده از آزمون فراصوتی انجام خواهد شد. بدین منظور قطعه‌ای با هندسه‌ای خاص از جنس پلیمر PLA به روش ساخت رشته رسوبی (FFF) ساخته می‌شود و سرعت موج در جهت‌های مختلف این قطعه اندازه‌گیری می‌شود. با فرض اینکه نوع ناهمسانگردی در این قطعه ساختار اورتوتروپیک با نه ثابت الاستیک است، ضرایب الاستیک قطعه بر اساس سرعت‌های اندازه‌گیری شده محاسبه می‌شود. سپس با وارون‌سازی تانسور الاستیک، ضرایب الاستیک مهندسی از جمله مدول یانگ، نسبت پواسون و مدول برشی قطعه نیز به دست می‌آیند. با بررسی دقیق ضرایب الاستیک اندازه‌گیری معلوم شد که نوع ناهمسانگردی ساده‌تر از ساختار اورتوتروپیک است و بدین جهت ناهمسانگردی شش‌وجهی (همسانگردی عرضی) با پنج ثابت الاستیک روی آن بررسی شد. نتایج نشان داد که ناهمسانگردی قطعه ساختار شش‌وجهی است. آزمون کشش نیز روی نمونه‌هایی از این ماده در جهت‌های مختلف انجام و نتایج آن با نتایج آزمون فراصوتی مقایسه و نشان داد که نتایج آزمون‌های فراصوتی و کشش تطابق خوبی دارند. برای تکمیل بحث، خواص دیگر آکوستیکی قطعه، از جمله تضعیف و امپدانس صوتی نیز در جهت‌های مختلف اندازه‌گیری و ارزیابی شد. روش فراصوتی معرفی شده در این مقاله می‌تواند برای تعیین اندازه‌گیری خواص الاستیک قطعات ناهمسانگرد ساخت افزایشی به کار رود و تغییرات احتمالی به وجود آمده در خواص الاستیک این قطعات را با دقت بالایی تشخیص دهد.

Determination of the type of anisotropy and stiffness tensor in additive manufacturing polymer components by using ultrasonic waves

Alireza Bagheri-Bami, Farhang Honarvar*

Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B. 1969764499, honarvar@kntu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 29 September 2022
First Decision: 29 October 2022
Accepted: 4 November 2022

Keywords:

Additive Manufacturing
Fused Filament Fabrication (FFF)
Ultrasonic waves
Elasticity tensor
Acoustic impedance
Wave attenuation

Abstract

Mechanical properties of engineering components are of importance in medical and industrial applications. Ultrasonic nondestructive testing is one of the most effective methods for assessing the elastic properties of materials. The purpose of this paper is to evaluate the elastic properties of components made by fused filament fabrication (FFF) additive manufacturing process by using ultrasonic waves. This is accomplished by fabricating a test specimen with a predetermined geometry from PLA polymer by FFF process. The ultrasonic wave velocity is then measured in this test specimen along different directions. The elastic coefficients of the specimen are then calculated from the measured wave velocities by assuming orthotropic structure for the specimen. The engineering elastic coefficients, such as Young's modulus, Poisson's ratio, and shear modulus are also found by inverting the elastic tensor. Considering that some of the measured elastic constants of this material were almost identical, the hexagonal that was simpler than orthotropic. Based on the results, it can be concluded that the sample has hexagonal anisotropy. The tensile testing results obtained from tensile samples made from the same material were compared with ultrasonic test results and were in good agreement. Other acoustic properties of this material such as sound attenuation and acoustic impedance were also measured and discussed. It is concluded that the ultrasonic method is very efficient in measuring the elastic properties of polymer components manufactured by FFF process and can be used for determination of changes in elastic properties of the material due to variations in the process parameters.

1- مقدمه

استفاده از برنامه‌های رایانه‌ای و چاپگرهای سه‌بعدی لایه‌های مواد بر روی هم چیده شده و قطعه ساخته می‌شود. با تغییر در چگونگی چیدمان لایه‌ها و نیز تغییر در شکل، اندازه و جهت

ساخت افزایشی¹ یک روش جدید ساخت است که در آن با

¹ Additive manufacturing

Please cite this article using:

A. Bagheri-Bami, F. Honarvar, Determination of the type of anisotropy and stiffness tensor in additive manufacturing polymer components by using ultrasonic waves, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 6, pp. 36-48, 2022 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بررسی سرعت امواج را اندازه‌گیری کردند و سپس با استفاده از آن به محاسبه ضرایب الاستیک پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که ضرایب الاستیک در راستای لایه‌گذاری با دو راستای دیگر متفاوت است؛ ولی در دو راستای دیگر درون لایه ضرایب الاستیک به هم نزدیک بودند. آنها سپس با توجه به ناهمسانگرد بودن قطعه، تفاوت تضعیف موج در هر راستا را اندازه‌گیری کردند. لونگ هوانگ [9] و همکاران نیز در مطالعه‌ای به بررسی خواص الاستیک قطعات پلیمری ساخته‌شده به روش ساخت رشته ذوبی⁸ پرداختند. آنها در این مطالعه از قطعات پلاستیک گرمانرم نوع اکریلیک بوتادین استرین⁹ استفاده کردند و در دو حالت خشک و اشباع شده در آب، سرعت موج و چگالی قطعات را اندازه‌گیری کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که سرعت موج طولی تقریباً دو برابر سرعت موج عرضی است. آنها همچنین تضعیف موج به روش پارامتر لگاریتمی را بررسی کردند که نتایج به‌دست‌آمده نسبت به نمونه گزارش‌شده در دیگر مراجع مقدار تضعیف 6 دسی‌بل را نشان می‌داد. بی‌لینگ یپ [10] و همکاران خواص الاستیک قطعات ساخته‌شده از جنس PC-ABS با روش ساخت افزایشی FFF را بررسی کردند. آنها در تحقیقاتشان از دو نوع جهت‌دهی لایه‌گذاری 0/0 و 90/0 درجه برای ساخت قطعات استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که جهت‌دهی در لایه‌ها باعث ایجاد ناهمسانگردی در قطعات می‌شود. آنها همچنین نشان دادند که راستای لایه‌گذاری ضعیف‌ترین حالت را برای سرعت صوت و مقدار مدول الاستیسیته دارا است. در تحقیق دیگری بی‌لینگ یپ و همکاران [11] نیز با استفاده از آزمون غیرمخرب فراصوتی به مطالعه خواص الاستیک قطعات چاپ سه‌بعدی از جنس اکریلونیتریل استرین اکریلات پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات آنها نشان داد که چسبندگی کم بین لایه‌ها و تفاوت زاویه‌های الگوی چینش در روش تولید، علت تغییر در خواص مکانیکی قطعات است. آنها همچنین مقادیر مدول یانگ و نسبت پواسون را اندازه‌گیری کردند که نتایج روش فراصوتی مطابقت خوبی با آزمون کشش داشت. اما، نتایج آزمون فراصوتی برای مدول یانگ به دلیل کرنش دینامیکی، مقادیر بالاتری را نسبت به روش آزمون کشش استاتیکی نشان می‌داد. یاقی جین¹⁰ و همکاران [12] طی مطالعه‌ای خواص الاستیک ناهمسانگرد قطعات ساخت افزایشی را به‌صورت نقشه‌های دوبعدی ارائه دادند. آنها با طراحی و تولید قطعاتی با چاپگر سه‌بعدی، نمونه‌ها

آنها، می‌توان قطعاتی با خواص مختلف از مواد فلزی، پلیمری و سرامیکی تولید کرد [1-6]. ساخت افزایشی به روش ساخت رشته ذوبی¹ (FFF) که به آن مدل‌سازی رسوب ذوبی² (FDM) هم گفته می‌شود، یکی از متداول‌ترین روش‌ها در بازار و صنعت است.

در روش FDM یا FFF، یک رشته پلیمری از درون شیپوره داغی که متصل به چاپگر است، عبور می‌کند و پس از نرم (ذوب) شدن در جهت موردنظر قرار داده می‌شود. چگونگی قرار گرفتن رشته‌ها و لایه‌های تشکیل‌شده از این رشته‌ها، بر خواص الاستیک قطعه ساخته‌شده موثر است. با تغییر نحوه چیدمان رشته‌ها و لایه‌ها، می‌توان خواص الاستیک قطعه ساخته‌شده را تغییر داد. قطعاتی که به این روش ساخته می‌شوند، معمولاً ناهمسانگرد هستند و خواص آنها در جهت‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است [2].

خواص الاستیک قطعات را می‌توان با دو روش مخرب و غیرمخرب اندازه‌گیری کرد [1، 2]. معمولاً آزمایش‌های مخرب به دلیل آسیب به قطعات و دورریز ماده مقرون‌به‌صرفه نیستند؛ هرچند همچنان از آنها استفاده می‌شود. یکی از روش‌های دقیق در اندازه‌گیری خواص الاستیک قطعات، آزمون غیرمخرب فراصوتی است [1]. در این روش با ارسال امواج فراصوتی به درون ماده و اندازه‌گیری سرعت موج، خواص الاستیک قطعه اندازه‌گیری می‌شود [7]. در نتیجه، این روش به‌طور خاص برای اندازه‌گیری خواص مواد و قطعات ناهمسانگرد بسیار موثر و پرکاربرد است.

آمادو-بکر [7] و همکاران طی مطالعه‌ای به بررسی خواص الاستیک قطعات ساخت افزایشی با ساختار همسانگرد عرضی³ یا شش‌وجهی⁴ پرداختند. آنها در این مطالعه از جنس نایلون 12 و از روش تفجوشی لیزر⁵ برای ساخت قطعات استفاده کردند و از معادله کریستوفل و روش آزمون فراصوتی برای محاسبه و تعیین ثوابت الاستیک بهره جستند. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نشان داد که افزایش پارامتر چگالی انرژی، باعث افزایش سرعت موج، مدول یانگ و نسبت پواسون⁶ می‌شود. ریچارد لیونگر [8] و همکاران نیز در مطالعاتشان خواص الاستیک نمونه‌های پلیمری از جنس ورو وایت پلاس⁷ را با استفاده از معادلات کریستوفل و روش آزمون فراصوتی بررسی کردند. آنها در این

¹ Fused Filament Fabrication (FFF)

² Fused Deposition Modeling (FDM)

³ Transverse isotropic

⁴ Hexagonal

⁵ SLS: Selective Laser Sintering

⁶ Poisson's ratio

⁷ VERO WITH PLUS

⁹ ASA: Acrylonitrile Styrene Acrylate

¹⁰ Yuqi Jin

بررسی قرار می‌گیرد.

ساختار این مقاله به صورت زیر می‌باشد. در بخش دوم به مطالعه روش اندازه‌گیری ضرایب الاستیک برای قطعات ساخت افزایشی پرداخته می‌شود. در بخش سوم فرایند انجام آزمایش و چگونگی اندازه‌گیری پارامترها توضیح داده می‌شود و سرانجام در بخش پایانی نتایج به دست آمده ارائه و بحث و بررسی می‌شوند.

2- اندازه‌گیری ضرایب الاستیک

ساخت افزایشی یکی از روش‌های جدید برای ساخت قطعات است. در این فرایند قطعاتی تولید می‌شود که معمولاً ناهمسانگرد هستند. برای تعیین خواص الاستیک این قطعات ناهمسانگرد از روش‌های مختلفی استفاده شده است. یکی از موثرترین و کم‌هزینه‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری خواص الاستیک، آزمون فراصوتی است. تغییر شکل الاستیک قطعات همسانگرد و ناهمسانگرد تابع قانون هوک است. معادله (1) قانون هوک را که تنش و کرنش را به یکدیگر مرتبط می‌سازد، به دست می‌دهد [15]:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\epsilon_{kl} \quad (1)$$

در این معادله، تانسور مرتبه چهار الاستیسیته، تنش را با کرنش مرتبط می‌سازد و ضرایب سفتی⁴ ماده را نیز معین می‌کند [15، 16]. در صورت همگن بودن ماده، ضرایب الاستیک را می‌توان مستقل از مکان در نظر گرفت. بر اساس اصل وویت⁵، تانسور مرتبه چهار ضرایب الاستیک را می‌توان به صورت یک ماتریس 6×6 نوشت [7]. خواص ماده با تغییر ساختار آن تغییر خواهد کرد. با توجه به چگونگی قرار گرفتن لایه‌ها و آرایش ساختار در فرایند ساخت افزایشی سه‌بعدی، حالت‌های مختلفی از ناهمسانگردی در این قطعات قابل ایجاد است. برای تعیین نوع ساختار، بهتر است ابتدا ساختاری با بالاترین تعداد ضرایب الاستیک در نظر گرفته شود که خواص الاستیک آن به روش فراصوتی قابل اندازه‌گیری باشد. آنگاه در صورت مساوی بودن بعضی از ثوابت الاستیک اندازه‌گیری شده، نسبت به ساده‌سازی ماتریس الاستیک اقدام کرد.

ناهمسانگردی قطعات در اثر خصوصیات ساختارهای درون ماده به وجود می‌آید. رفتار تنش-کرنش قطعات ناهمسانگرد وابسته به جهت بارگذاری آنها است. موادی با ساختار یافی یا لایه‌ای که دارای جهت در لایه‌گذاری و الیاف باشند، معمولاً ناهمسانگرد نیز هستند. این مواد با توجه به آرایش اتمی خاصی

را با زوایای الگوی چینش خاصی طراحی کردند و ساختند. آنها برای ساخت قطعات از 5 الگوی چینش متفاوت با فواصل 25 درجه استفاده کردند. علاوه بر این، آنها از دو قطر شیپوره¹ متفاوت برای ساخت قطعات بهره بردند و اثر قطر شیپوره بر روی سرعت موج را نیز بررسی کردند. در کار آنها از روش غوطه‌وری برای اندازه‌گیری موج طولی استفاده شده است. همچنین، یک نمونه پلیمری ساخته شده به روش فرایند تزریق پلاستیک نیز با قطعه پلیمری ساخته شده با فرایند ساخت افزایشی مقایسه شده است. نتایج آنها نشان می‌دهد که به طور کلی سرعت موج عرضی با افزایش قطر شیپوره کاهش می‌یابد و در نتیجه آن مدول برشی نیز کاهش می‌یابد. همچنین، مقادیر مدول یانگ حاصل از آزمون کشش نیز با افزایش زاویه و نیز افزایش قطر شیپوره کاهش می‌یابد. شانگخین کوان و ژودو یونگ² [13] در تحقیقی به تعیین خواص الاستیک قطعه کامپوزیتی ساخته شده به روش ساخت افزایشی FFF در راستاهای مختلف پرداختند. آنها برای هر یک از پارامترهای سرعت لایه‌گذاری، قدرت لیزر و ضخامت لایه‌ها چهار سطح را در نظر گرفتند. برای اندازه‌گیری فراصوتی نیز از سیگنال‌های موج طولی و روش غوطه‌وری استفاده کردند و با استفاده از روابط تقریبی مدول‌های الاستیسیته و تضعیف موج را در راستاهای مختلف اندازه‌گیری کردند. چ-هوا یانگ³ و همکاران [14] طی تحقیقی به بررسی تأثیر تابش پرتو فرابنفش بر روی ناهمگنی لایه‌های قطعات پلیمری، حین ساخت این قطعات با استفاده از روش ساخت افزایشی FFF پرداختند. آنها به دلیل ضخامت پایین قطعه از منحنی پراکندگی و موج هدایت شده لمب برای به دست آوردن ضرایب الاستیک استفاده کردند و این ضرایب را با نتایج استخراج شده از آزمون کشش اعتبارسنجی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش لایه‌ها، مدول یانگ افزایش می‌یابد.

در تحقیق حاضر، ابتدا با استفاده از روش آزمون غیرمخرب فراصوتی، ناهمسانگرد بودن قطعات پلیمری ساخته شده با فرایند ساخت افزایشی FFF نشان داده می‌شود و سپس با اندازه‌گیری فراصوتی تانسور الاستیسیته⁴ ماده، نوع ناهمسانگردی قطعه و در نتیجه خواص الاستیک آن معین می‌شود. برای راستی‌آزمایی نتایج فراصوتی، این نتایج با نتایج حاصل از آزمون کشش مقایسه می‌شود. علاوه بر این، برای تکمیل بحث، سایر ویژگی‌های آکوستیک قطعه، از جمله امپدانس صوتی و تضعیف آن نیز مورد

⁴ Stiffness coefficient

⁵ Voigt

¹ Nozzle

² Shangqin Yuan and Xudong Yu

³ Che-Hua Yang

اصلی، باید روی سطوح اصلی اندازه‌گیری شود. درحالی‌که برای اندازه‌گیری سرعت موج عرضی، باید در ابتدا جهت‌های انتشار و ارتعاش معین شوند. سرعت‌های $V_{ij/ij}$ شبه‌طولی یا شبه‌عرضی هستند [10، 11]. در روش فراصوتی، از قطعه‌ای که دارای سطوحی با شیب 45 درجه است برای اندازه‌گیری سرعت موج در جهت‌های غیراصلی (شبه طولی و عرضی) استفاده می‌شود [20]. درحالی‌که سرعت موردنظر $V_{ij/ij}$ است، جهت انتشار موج $\frac{(i+j)}{2}$ و جهت ارتعاش در صفحه ij خواهد بود [21]. در بخش 1-2 به تشریح چگونگی اندازه‌گیری سرعت‌های مختلف موج و محاسبه ضرایب الاستیک خواهیم پرداخت. علاوه بر ضرایب الاستیک، پارامترهای دیگری نیز برای ارزیابی قطعات پلیمری وجود دارد [8، 23]. دو پارامتر رایج برای ارزیابی کیفیت قطعات پلیمری تضعیف‌ظاهری موج⁵ و امپدانس صوتی⁶ هستند [22، 24].

با این پارامترها می‌توان میزان تضعیف‌شدن یا از بین رفتن موج در محیط‌ها و مواد مختلف را ارزیابی کرد. تضعیف موج به فرکانس و جنس قطعه بستگی دارد. هرچه محیط فشرده‌تر باشد، تضعیف موج بیشتر است.

امپدانس صوتی حاصل ضرب چگالی ماده در سرعت موج است که با اندازه‌گیری این دو پارامتر می‌توان امپدانس صوتی را محاسبه کرد [26]:

$$z = \rho \times V \quad (4)$$

واحد امپدانس صوتی ریل⁷ است و آن را با حرف z نشان می‌دهند.

تضعیف موج را نیز می‌توان به‌روش فراصوتی اندازه‌گیری کرد [25]. برای محاسبه ضریب تضعیف α از معادله زیر استفاده می‌شود [26، 27]:

$$\alpha = \frac{-20 \times \log_{10} \left(\frac{A_n}{A_{n+1}} \right)}{2 \times l} \quad (5)$$

که در آن A_n دامنه n امین پژواک بازتابیده از دیواره پستی قطعه و $A_{(n+1)}$ دامنه $n+1$ امین پژواک بازتابیده از دیواره پستی و l ضخامت قطعه است [26]. واحد تضعیف موج در معادله (5) دسی‌بل بر میلی‌متر (dB/mm) است. این اندازه‌گیری با استفاده از استاندارد ASTM-E664-93 صورت می‌گیرد [27].

که در اثر جهت‌دهی¹ در الیاف و لایه‌های آنها می‌شود، رفتار یکسانی در جهت‌های مختلف نخواهند داشت. همچنین، خصوصیات مواد مهندسی دارای تقارن‌هایی است که بسیاری از این تقارن‌ها بر رفتار ماده و پیچیدگی ناهمسانگردی آن مؤثر است.

وجود تقارن پیچیدگی روابط تنش-کرنش مواد را کاهش می‌دهد [17]. ساختارهای ناهمسانگرد رایج در مواد مهندسی معمولاً دارای یکی از ساختارهای اورتوتروپیک یا شش‌وجهی (هگزاگونال) هستند. ساختار اورتوتروپیک نسبت به ساختار شش‌وجهی ساختار کاملتری است که بیشترین تعداد ضرایب الاستیک را دارا است [18]. برای تعیین خواص الاستیک به‌روش فراصوتی، سرعت امواج طولی و عرضی در قطعه باید در جهات مختلف اندازه‌گیری شود [16]. برای محاسبه ضرایب الاستیک از معادلات کریستوفل-کلوین استفاده می‌شود:

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl,j} \quad (2)$$

$$(\Gamma_{il} - \rho \cdot V^2 \cdot \delta_{il}) \cdot u_l = 0 \quad (3)$$

در معادله‌های (2) و (3)، Γ_{il} تانسور کریستوفل، u_l بردار جابه‌جایی، C_{ijkl} تانسور ضرایب الاستیک، ε_{kl} تانسور کرنش، V سرعت موج، ρ چگالی، و δ_{il} دلتای کرونگر² است. معادله (3)، یک معادله مقدار ویژه با سه جواب است که این جواب‌ها دوبه‌دو برهم عمودند. دو جواب مربوط به موج عرضی و یک جواب مربوط به موج طولی است. با اندازه‌گیری سرعت‌های موج در ماده و به‌کارگیری معادله کریستوفل، می‌توان ضرایب الاستیک را برای هر ساختار ناهمسانگردی به‌دست آورد.

در بحث حاضر، ساختارهای اورتوتروپیک و شش‌وجهی (همسانگرد عرضی) بررسی خواهند شد. در جداول 1 و 2 تعداد ضرایب الاستیک و معادله‌های مربوط به هر یک از این ساختارها ارائه شده است [19]. در جدول 1 ساختار اورتوتروپیک با 9 ثابت الاستیک و در جدول 2 ساختار شش‌وجهی (همسانگرد عرضی) با 5 ثابت الاستیک آمده است [20]. در ماتریس 6×6 ضرایب الاستیک، برای هر درایه C_{ij} ، اگر $i = j$ باشد، راستای موردنظر راستای اصلی است و اگر $i \neq j$ باشد، راستا شبه‌طولی³ یا شبه‌عرضی⁴ است [7]. در این حالت، سرعت $V_{i/j}$ وقتی $i = j$ باشد، سرعت موج طولی در راستای اصلی است. اگر $i \neq j$ باشد، سرعت موج متناظر با موج عرضی است و در این حالت، i جهت انتشار و j جهت ارتعاش ذرات ماده است. سرعت در راستای

¹ Raster

² Kronecker delta

³ Quasi longitudinal

⁴ Quasi shear

⁵ Attenuation

⁶ Acoustic impedance

⁷ Rayl

جدول 1 معادله‌های ضرایب سفتی در ساختار اورتوتروپیک [15].

Table 1 The orthotropic stiffens equations [15].

معادله	جهت ارتعاش	جهت انتشار	نوع موج
$C_{11} = \rho V_{11}^2$	[100]	[100]	طولی خالص
$C_{22} = \rho V_{22}^2$	[010]	[010]	طولی خالص
$C_{33} = \rho V_{33}^2$	[001]	[001]	طولی خالص
$C_{44} = \rho V_{23}^2 = \rho V_{32}^2$	[010]	[001]	عرضی خالص
$C_{55} = \rho V_{13}^2 = \rho V_{31}^2$	[100]	[001]	عرضی خالص
$C_{66} = \rho V_{12}^2 = \rho V_{21}^2$	[100]	[010]	عرضی خالص
$C_{12} = \sqrt{(C_{11} + C_{66} - 2\rho V_{12/12}^2)(C_{22} + C_{66} - 2\rho V_{12/12}^2)} - C_{66}$	[110]	[010]	شبه طولی یا شبه عرضی
$C_{13} = \sqrt{(C_{11} + C_{55} - 2\rho V_{13/13}^2)(C_{33} + C_{55} - 2\rho V_{13/13}^2)} - C_{55}$	[101]	[001]	شبه طولی یا شبه عرضی
$C_{23} = \sqrt{(C_{22} + C_{44} - 2\rho V_{23/23}^2)(C_{33} + C_{44} - 2\rho V_{23/23}^2)} - C_{44}$	[011]	[001]	شبه طولی یا شبه عرضی

جدول 2 معادله‌های ضرایب سفتی در ساختار شش‌وجهی [7].

Table 2 The hexagonal stiffens equations [7]

معادله	جهت ارتعاش	جهت انتشار	نوع موج
$C_{11} = \rho V_{11}^2$	[100]	[100]	طولی خالص
	[100]	[010]	عرضی خالص
$C_{33} = \rho V_{33}^2$	[001]	[001]	طولی خالص
	[001]	[010]	عرضی خالص
$C_{13} = \sqrt{-2(\rho V_{13/13}^2 - \frac{1}{2}(C_{11} + C_{33}) - C_{44})^2 - \frac{1}{2}(C_{11} + C_{33} + 2C_{44})^2} + 4((C_{11} + C_{44})(C_{33} + C_{44}))^{1/2}$ $- C_{44}$	[101]	[001]	شبه طولی یا شبه عرضی

ضخامت قابل چاپ، حداکثر ضخامت قابل چاپ و جنس قطعه.

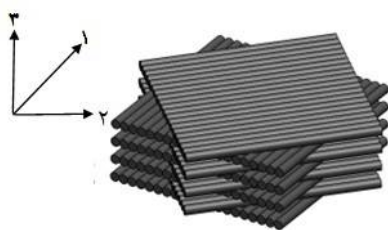


Fig. 1 The schematic of laying in solid works software

شکل 1 نمایش لایه‌گذاری با کمک نرم افزار سالیدورکس

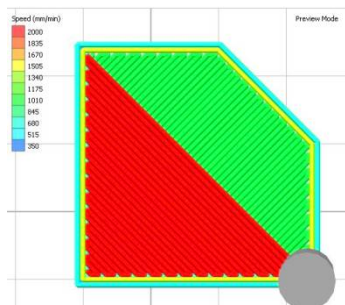


Fig. 2 The +45/-45 degree layering in Simplify 3D software

شکل 2 لایه‌گذاری در حالت +45/-45 در نرم افزار سیمپلی‌فای

1-2- فرایند آزمایش و اندازه‌گیری

برای انجام آزمایش، قطعه‌ای مکعب شکل با گوشه‌های پخ‌دار ساخته شد. برای اندازه‌گیری سرعت از سطوح بزرگ و اصلی و برای اندازه‌گیری سرعت موج در جهات شبه‌اصلی از سطوح پخ‌دار این قطعه استفاده می‌شود. مطابق شکل 1، با استفاده از نرم‌افزار طراحی سالیدورکس¹ قطعه موردنظر طراحی شد. چینش لایه‌ها در این قطعه به صورت $45^\circ/+45^\circ$ است (شکل 2). پارامترهای نرم‌افزاری طراحی این قطعه نیز در جدول 4 داده شده است. قطعه طراحی شده با فرمت STL به نرم‌افزار اسلایسر² داده شد و سپس کدهای آن به چاپگر سه‌بعدی FFF انتقال یافت. با تغییر زاویه چینش، ضخامت لایه و سرعت لایه‌گذاری می‌توان خواص قطعه را به‌طور دلخواه تغییر داد. با تغییر پارامترهای ورودی چاپگر، می‌توان تغییرات دلخواه را در خواص مختلف ماده از جمله مدول یانگ، ضریب پواسون و مدول برشی ایجاد کرد. پارامترهای دیگری که در تولید قطعه موثرند عبارتند از: قطر شیپوره، ضخامت رشته پلیمری، دمای دستگاه، حداقل

¹ Solid Works

² Slicer

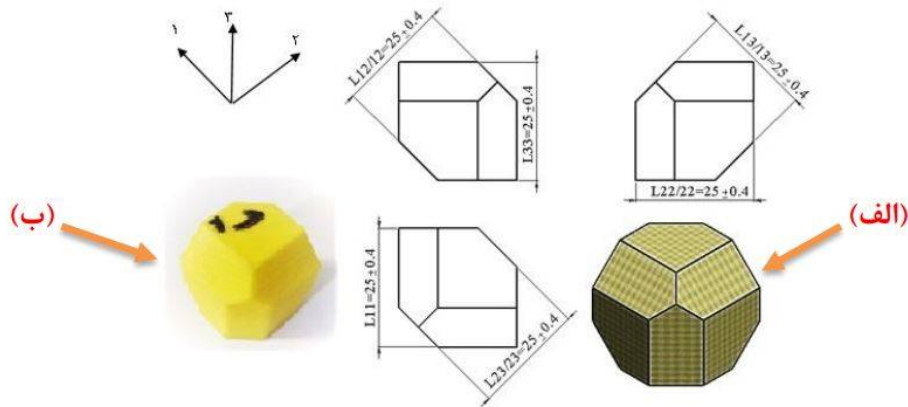


Fig. 3 The multi edge sample for determination the elastic coefficient A) Design of dimension in solid works software, B) As-built sample

شکل 3 نمونه چندوجهی برای تعیین خواص الاستیک قطعات، الف) ابعاد قطعه طراحی شده در نرم افزار سالیدورکس و ب) نمونه چاپ شده

$$V_p \quad (4)$$

که در این معادله $t_p - t_r$ زمان پرواز، l طول قطعه و V_p سرعت موج در قطعه است [7].
شکل 4 تجهیزات انجام آزمایش را نشان می‌دهد.

پارامترهایی که در نرم افزار قابل تغییرند در جدول 3 داده شده است و جدول 4 پارامترهای سخت افزاری طراحی را به دست می‌دهد. در شکل 3 نمونه آزمایشی که با چاپگر سه بعدی کریت بات¹ ساخته شده است را نشان می‌دهد.

جدول 3 پارامترهای نرم‌افزاری برای تولید قطعه

Table 3 The software parameters for manufacturing specimen

پارامترهای ضخامت لایه عرض چینش	سرعت چینش [mm/min]	زاویه چینش [°]	نرم‌افزاری	مقادیر
0/2	2000	+45/-45		

جدول 4 پارامترهای سخت‌افزاری برای تولید قطعه

Table 4 Hardware parameters for manufacturing specimen

پارامترهای سخت‌افزاری	دمای ساخت [° C]	ضخامت فیلامنت [mm]	قطر شیپوره [mm]	مقادیر
	200	1/75	0/4	

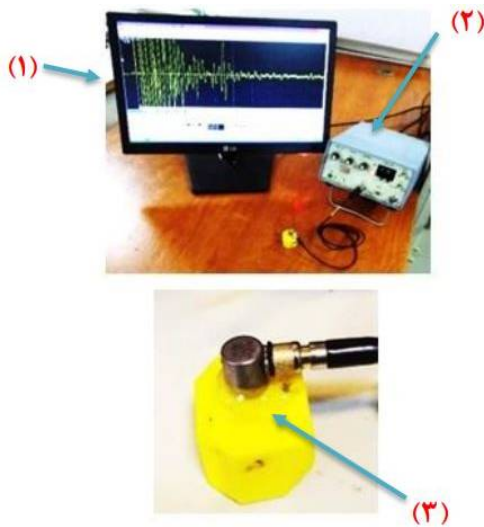


Fig. 4 Equipment for catching ultrasonic signals 1) Display 2) Pulser-receiver 3) Sample and probe

شکل 4 تجهیزات مورد استفاده برای دریافت سیگنال‌های فراصوتی، 1) صفحه نمایش، 2) فرستنده - گیرنده فراصوتی، 3) قطعه و کاوند

برای اندازه‌گیری خواص الاستیک قطعه به روش فراصوتی، یک کاوند² فراصوتی تماسی³ بر روی قطعه قرار داده می‌شود. این کاوند موجی را به داخل قطعه ارسال می‌کند. موج درون قطعه انتشار می‌یابد و پس از برخورد با سطح پشتی قطعه، دوباره به کاوند بازمی‌گردد. سپس زمان رفت و برگشت موج (زمان پرواز) بر روی سیگنال دریافتی اندازه‌گیری و با داشتن ضخامت قطعه و زمان پرواز، سرعت موج محاسبه می‌شود. در آزمایش‌های انجام شده، برای اندازه‌گیری سرعت موج طولی از کاوند 4 مگاهرتی موج طولی و برای اندازه‌گیری سرعت موج عرضی از کاوند 5 مگاهرتی موج عرضی استفاده شد. سرعت موج از معادله (4) قابل محاسبه است:

شکل‌های 5 و 6 به ترتیب سیگنال‌های دریافتی را برای امواج طولی و عرضی نشان می‌دهند. برای انتقال موج به درون ماده، باید در محل تماس کاوند و قطعه از ماده واسطه که می‌تواند ژل، روغن یا گریس باشد، استفاده کرد. در آزمایش‌هایی که با موج طولی انجام شد، از روغن و در آزمایش‌های موج عرضی، از عسل (به خاطر داشتن لزجت بالا) به عنوان ماده واسطه

¹ Createbot super mini-2000

² Probe

³ Normal contact

استفاده از استاندارد ASTM-E494-10 انجام شد [۲۸، ۲۹]. مقادیر سرعت صوت اندازه‌گیری شده برای پلیمر پلی‌لاکتیک‌اسید با نتایج یاگر و همکارانش [۳۰] به خوبی مطابقت داشت.

با استفاده از نسبت سرعت در راستاهای مختلف، می‌توان میزان ناهمسانگردی را در صفحات و محورهای مختلف نشان داد [31، 32]. در اینجا، باتوجه به سرعت‌هایی که اندازه‌گیری و بررسی شده است، نسبت سرعت‌ها محاسبه و در جدول 7 گزارش شده است. به هر میزان که نسبت سرعت‌ها بزرگ‌تر باشد، ناهمسانگردی در آن راستا و صفحه متناظر با آن بیشتر است. باتوجه به جدول 8، که بر اساس جدول 7 محاسبه شده است، هر قدر مقدار نسبت سرعت‌ها بیشتر باشد، ناهمسانگردی نیز بیشتر است.

در راستاهای اصلی، میزان ناهمسانگردی (در صفحات 1 و 2) بیشترین میزان را دارد. همچنین، در راستاهای 1 و 3 کمترین میزان ناهمسانگردی باتوجه به پارامتر نسبت سرعت موج وجود دارد. در این حالت، باتوجه به نزدیکی مقادیر، در برخی حالات نوعی تقارن در ساختار دیده می‌شود. در راستای محورهای 2 و 3 مقدار ناهمسانگردی محوری بیشتر از دو محور دیگر است و ناهمسانگردی دو محور متعامد دیگر، مقادیر بسیار نزدیک‌تری دارند. به دلیل نزدیکی مقادیر در دو نسبت، وجود نوعی از تقارن در قطعه محتمل است.

3-2- اندازه‌گیری چگالی

چگالی قطعات با استفاده از استاندارد ASTM D792 و بر اساس قانون ارشمیدس⁵ اندازه‌گیری شد [26]. ابتدا وزن نمونه در آب مقطر و هوا به‌طور جداگانه با ترازوی دیجیتال تا چهار رقم اعشار اندازه‌گیری شد تا یک مقدار نسبی برای چگالی به دست آید. سپس، این مقدار در معادله زیر قرار داده شد:

$$\rho = \frac{\rho_w}{1 - \left(\frac{w_w}{w_A}\right)} \quad (5)$$

که در آن چگالی آب مقطر و وزن قطعه در آب مقطر و w_A وزن قطعه در هوا (حالت خشک) و ρ چگالی ماده موردنظر برحسب کیلوگرم بر مترمکعب است. وزن قطعه در حالت خشک 10/2372 گرم و در حالت غوطه‌ور 2/0377 گرم به دست آمد. چگالی آب نیز در حالت استاندارد 998 کیلوگرم بر مترمکعب است. در نتیجه، بر اساس معادله (5)، مقدار چگالی قطعه برابر 1246/0180 کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

استفاده شد. برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه پالس‌ساز-گیرنده فراصوتی 5057 PR ساخت شرکت پانامتریکس¹ کشور آمریکا استفاده شد (شکل 4).

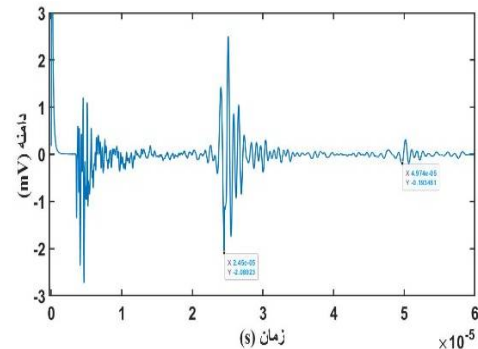


Fig. 5 The ultrasonic signal measured by the longitudinal probe

شکل 5 سیگنال اندازه‌گیری شده با کاوند موج طولی

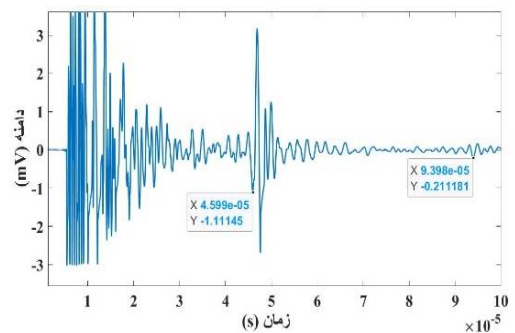


Fig. 6 The ultrasonic signal measured by the shear probe

شکل 6 سیگنال اندازه‌گیری شده با کاوند موج عرضی

3- نتایج

3-1- نتایج اندازه‌گیری سرعت موج

ابعاد قطعه با کولیس دیجیتالی با تفکیک‌پذیری 0/01 میلی‌متر و با سه بار تکرار اندازه‌گیری و مقدار انحراف معیار اندازه‌گیری در جدول 5 گزارش شده است. باتوجه به اینکه جنس پلیمری قطعه بعد از ساخت دارای کاهش ابعادی² است، میزان کاهش ابعادی در هر راستا نسبت به مقدار طراحی شده 25 میلی‌متر در نرم‌افزار سالیدورکس در جدول 5 داده شده است.

مقادیر سرعت‌های اندازه‌گیری شده، با روش همبستگی متقابل³، و نیز روش تخمین تأخیر زمانی⁴ محاسبه و در جدول 6 داده شده است. سرعت بیشتر نشان‌دهنده تراکم بیشتر ماده در آن راستا است. به‌طور کلی، سرعت موج طولی در مواد همواره از سرعت موج عرضی بیشتر است. اندازه‌گیری سرعت موج با

¹ Panametrics

² Shrinkage

³ Cross correlation

⁴ Time delay estimate

⁵ Archimedes' law

جدول 5 مقادیر ابعاد قطعه اندازه‌گیری شده در هر راستا با توجه به مقدار 25 میلی‌متری در نرم‌افزار طراحی و کاهش ابعادی در هر راستا

Table 5 The values of dimension length in any direction for 25 mm length sample which designed in software and its shrinkage

طول وجوه اصلی [mm]			طول وجوه پخدار [mm]			نوع طول
l_{11}	l_{22}	l_{33}	$l_{12/12}$	$l_{13/13}$	$l_{23/23}$	پارامتر
24/64±0/01	24/98±0/04	24/75±0/06	25/16±0/06	24/84±0/05	25/12±0/09	مقادیر

جدول 6 مقادیر سرعت‌های اندازه‌گیری شده در هر راستا با توجه به قطعه چندوجهی و ساختار اورتوتروپیک

Table 6 The values of measuring velocity in any directions in multi edge sample and orthotropic structure

طولی خالص [m/s]			عرضی خالص [m/s]			شبه طولی [m/s]			نوع سرعت
V_{11}	V_{22}	V_{33}	V_{12}	V_{13}	V_{23}	$V_{12/12}$	$V_{13/13}$	$V_{23/23}$	پارامتر
1930±20	1950±40	2040±40	1060±50	1070±10	1050±40	1900±30	1940±40	1980±50	مقادیر

جدول 7 میزان ناهمسانگردی در راستاهای مختلف باتوجه به سرعت‌های اندازه‌گیری شده

Table 7 The values of anisotropy with speed ratio in any directions

ناهمسانگردی در راستاهای اصلی		ناهمسانگردی در صفحات متقارن		ناهمسانگردی محوری موج طولی و عرضی	
سرعت‌های موج طولی	مقادیر	سرعت‌های موج عرضی	مقادیر	نسبت سرعت طولی و عرضی	مقادیر
V_{11}/V_{22}	0/99	V_{12}/V_{13}	0/99	V_{11}/V_{12}	1/81
V_{11}/V_{33}	0/95	V_{13}/V_{23}	1/02	V_{11}/V_{13}	1/80
V_{22}/V_{33}	0/96	V_{12}/V_{23}	1/02	V_{22}/V_{23}	1/86

وارون برای ساختارهای مختلف، مقدار نسبت پواسون متفاوت است. آرترور بالاتر [33] نیز در مقاله‌ای این مقادیر را برای ساختارهای شش‌وجهی ارائه داده است.

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{13}}{E_1} & \frac{-\nu_{13}}{E_1} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.26 & -0.07 & -0.06 & 0 & 0 & 0 \\ -0.07 & 0.27 & -0.09 & 0 & 0 & 0 \\ -0.13 & -0.06 & 0.25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.71 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.71 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.74 \end{bmatrix} \text{ (GPa)}$$

(8)

معادله کلی و عمومی نسبت پواسون بنا به جهت آن به صورت $\nu_{ji} = -\frac{S_{ij}}{S_{jj}}$ و طبق قانون دست راست، معین می‌شود.

3-3- نتایج ضرایب و ثوابت الاستیک

با وارون کردن معادله قانون هوک می‌توان به مدول‌های یانگ، برشی و نسبت‌های پواسون دست یافت. معکوس قانون هوک عبارت است از:

$$\epsilon_i \quad (6)$$

که در آن $[S] = [C]^{-1}$ ماتریس تن‌دهی¹ است [31]. ضرایب تانسور الاستیک با فرض ساختار اورتوتروپیک برای قطعه از معادله (7) بدست می‌آیند و باتوجه به سرعت و چگالی مقاطع، محاسبه می‌شوند. تانسور ارائه شده در معادله **Error!** مدول یانگ، مدول برشی² و نسبت‌های پواسون در راستاهای مختلف به دست آیند.

$$[C_{ij}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.64 & 1.59 & 1.61 & 0 & 0 & 0 \\ 1.59 & 4.75 & 2.00 & 0 & 0 & 0 \\ 1.61 & 2.00 & 5.18 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.42 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.43 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.37 \end{bmatrix} \text{ (GPa)}$$

(7)

این مقادیر در معادله (8) داده شده است. در تانسورهای

¹ Compliance matrix
² Shear moduli

گرفت که مقادیر E_1 و E_2 به هم نزدیک هستند.

نتایج ارائه شده در معادله (8) با استفاده از معادلات ارائه شده در

جدول 1 و وارون سازی ماتریس محاسبه شده است. ضرایب الاستیک به ترتیب از بیشترین به کمترین مقادیر ضرایب طولی به صورت نامعادله $C_{11} \geq C_{22} \geq C_{33} \geq C_{44} \geq C_{55} \geq C_{66}$ و برای ضرایب برشی به صورت نامعادله $C_{44} \geq C_{55} \geq C_{66}$ هستند که با توجه به نوع ناهمسانگردی این روابط به دست آمده است. به دلیل نزدیک بودن مقادیر ضرایب C_{44} و C_{55} و نیز نزدیک بودن مقادیر C_{11} و C_{22} ، استنباط می‌شود که می‌توان از ساختارهای با تقارن بیشتر نیز برای این قطعه استفاده کرد. با توجه به خصوصیت الاستیک قطعات ناهمسانگرد، ضرایب تانسور الاستیک می‌توانند از ساختار اورتوتروپیک تبعیت کنند. بنا بر گزارش یپ و همکارانش [11] اگر ساختار لایه‌گذاری 45/45 درجه و لایه‌بندی با زاویه 45- درجه باشد، آنگاه تانسور متقارن تر از نوع ناهمسانگرد عرضی با تعداد 5 ضریب خواهد بود.

به دلیل نزدیک بودن مقادیر $C_{12} \approx C_{13} \approx C_{23} \approx C_{33}$ می‌توان ناهمسانگردی قطعه را همسانگردی فرض کرد. با استفاده از معادلات جدول 1 تانسور الاستیک آن محاسبه و در معادله (9) داده شده است. برای به دست آوردن مدول یانگ، مدول برشی و نسبت‌های پواسون در راستاهای مختلف، باید وارون معادله (9) محاسبه شود.

$$[C_{ij}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.64 & 1.64 & 1.37 & 0 & 0 & 0 \\ 1.64 & 4.64 & 1.37 & 0 & 0 & 0 \\ 1.37 & 1.37 & 5.18 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.42 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.42 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.37 \end{bmatrix} \text{ (GPa)} \quad (10)$$

جدول 8 ثوابت الاستیک به دست آمده بر اساس سرعت‌های اندازه‌گیری شده

برای هر یک از ساختارها

Table 8 The elastic constants of the two structures obtained by measurement of wave velocities

ثابت‌های الاستیک	مقادیر ثابت‌های ساختار اورتوتروپیک	مقادیر ثابت‌های ساختار شش‌وجهی
E_1 (GPa)	3/91	3/71
E_2 (GPa)	3/76	3/71
E_3 (GPa)	4/13	4/55
G_{12} (GPa)	1/37	1/36
G_{13} (GPa)	1/43	1/41
G_{23} (GPa)	1/42	1/41
ν_{12}	0/24	0/38
ν_{21}	0/25	0/38
ν_{13}	0/23	0/23
ν_{31}	0/22	0/19
ν_{23}	0/35	0/23
ν_{32}	0/32	0/19

از مقادیر محاسبه شده می‌توان فهمید که در ساختار اورتوتروپیک ثوابت E_1 و E_2 به هم نزدیک و از مقدار ثابت E_3 کمتر هستند (جدول 8). برای چینش لایه‌ها به صورت 45/+45- درجه، نزدیکی مقادیر ضرایب الاستیک در دو راستا را یپ و

معادله (10) ثوابت مدول یانگ، مدول برشی و نسبت‌های پواسون را که با وارون‌گیری از معادله (9) به دست آمده، ارائه می‌دهد. ضرایب الاستیک مهندسی در جدول 8 برای هر یک از دو ساختار اورتوتروپیک و شش‌وجهی داده شده است. در ساختار اورتوتروپیک مقدار مدول یانگ در راستای 1 نسبت به راستای 2، به میزان 3/83 درصد بیشتر است. همچنین، مدول یانگ در راستای 3 نیز نسبت به راستای 1، 5/32 درصد و در راستای 3 نسبت به 2، 8/95 درصد بیشتر است. با توجه به این درصدها و نیز با توجه به اینکه در معادله (9) $C_{22} \approx C_{11}$ ، می‌توان نتیجه

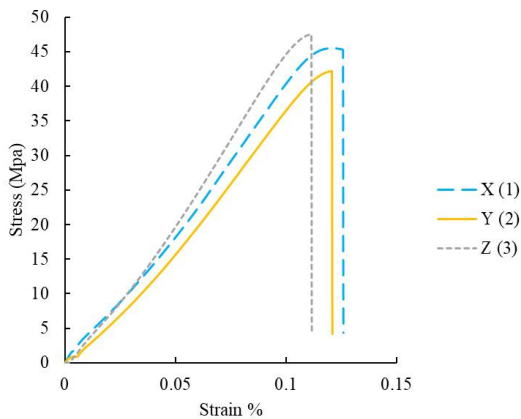


Fig. 7 Tensile test results in different directions

شکل 7 مقایسهٔ آزمون کشش در راستاهای مختلف

3-5- نتایج اندازه‌گیری امپدانس صوتی

شکل‌های 8 و 9 امپدانس صوتی را به ترتیب برای موج طولی و عرضی در راستاهای مختلف نشان می‌دهد. در راستایی که ماده تراکم بیشتری دارد، امپدانس صوتی نیز بیشتر است. با استفاده از معادله (4) مقادیر امپدانس صوتی در قطعه به دست آمده است. امپدانس صوتی نشان‌دهندهٔ میزان از بین رفتن انرژی موج در هنگام انتشار است. افزایش مقدار امپدانس صوتی در یک راستا، مانند راستای 3، که در آن امپدانس صوتی بیشترین مقدار را دارد، ناشی از بیشتر بودن تراکم ماده در این راستا است. موج عرضی نیز در راستای 3، بیشترین امپدانس صوتی را داشته است (شکل 8). در شکل‌های 8 و 9 منظور از Z_{ij} راستای مورد اندازه‌گیری متناسب با راستای اندازه‌گیری سرعت‌های صوت است.

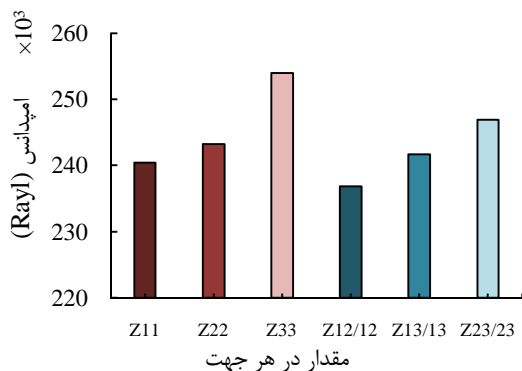


Fig. 8 The impedance of longitudinal wave in different directions

شکل 8 امپدانس صوتی برای سیگنال موج طولی در جهت‌های مختلف

3-6- نتایج اندازه‌گیری تضعیف موج

تضعیف موج عبارت است از میزان کاهش دامنهٔ موج در طول انتشار. برای اندازه‌گیری دامنه می‌توان از سیگنال دریافتی تبدیل فوریه² (FFT) گرفت (شکل 10).

² Fast Fourier Transformer (FFT)

همکارانش [11] نیز گزارش کرده‌اند. با توجه به نزدیکی مقادیر ثوابت C_{11} و C_{33} ، می‌توان ساختار تانسور را شش‌وجهی در نظر گرفت. در این تحقیق، مدول یانگ برای راستاهای 1 و 2 در ساختار همسانگرد عرضی مقدار یکسان 3/71 گیگاپاسکال است. در این صورت، تانسور معکوس و اثرگذاری کهادها¹ روی مقادیر سایر مؤلفه‌های تانسور و سایر ثوابت الاستیسیته طبق جدول 8، تأثیر خواهد گذاشت. یاگر و همکارانش [30] اندازهٔ مدول در راستای لایه‌گذاری را نسبت به صفحهٔ لایه‌گذاری بزرگتر یافتند. دلیل این امر ارتفاع لایه‌گذاری 0/1 میلی‌متری آنها است که کمتر از عرض لایه‌گذاری است. یاقی‌چین و همکارانش [12] نیز نشان دادند که کاهش قطر شیپوره باعث افزایش مدول یانگ خواهد شد.

3-4- آزمون کشش

برای اعتبارسنجی نتایج فراصوتی، آزمون کشش در راستاهای اصلی انجام شد. نتایج آزمون کشش تا حدی با نتایج آزمون فراصوتی تفاوت دارد؛ ولی روند کلی این آزمون‌ها با روش فراصوتی مطابقت قابل‌قبولی دارد. نتایج آزمون کشش در جدول 9 ارائه شده است. در شکل 7 نیز نمودارهای آزمون کشش در راستاهای مختلف آورده شده است. مقادیر مدول یانگ به دست آمده به روش فراصوتی برای ساختار اورتوتروپیک نسبت به آزمون کششی اندکی بیشتر است. در راستای 1، مقادیر مدول یانگ حاصل از آزمون‌های فراصوتی و کششی به ترتیب 3/91 مگاپاسکال و 3/82 مگاپاسکال است که اختلاف 2/4 درصد را نشان می‌دهد. در راستای 2، مدول یانگ حاصل از آزمون فراصوتی 3/91 مگاپاسکال و مدول یانگ حاصل از آزمون کششی 3/82 مگاپاسکال است و تفاوت آنها نیز 2/4 درصد است. در راستای 3، آزمون فراصوتی دارای مقدار 4/13 مگاپاسکال و آزمون کشش مقدار 4/01 مگاپاسکال که اختلاف آنها حدود 2/9 است، به دست می‌دهد. این اختلاف‌ها ناشی از آن است که آزمون کششی روشی استاتیکی و آزمون فراصوتی روشی دینامیکی است.

جدول 9 نتایج آزمون کشش در راستاهای مختلف

Table 9 The results of tensile tests in any directions

جهت آزمون کشش	مدول الاستیک (GPa)	تنش نهایی (MPa)	افزایش طول (%)
X (1)	3/82	44/90	6/20
Y (2)	3/67	44/60	5/40
Z (3)	4/01	42/80	4/20

¹ Cofactors

در تحقیق سول و همکاران این روش اندازه‌گیری برای تضعیف موج به‌کارگرفته شده است و در برخی موارد تضعیف موج عرضی کمتر از تضعیف موج طولی بوده است. در تحقیق لیوینگ و همکاران تضعیف موج عرضی بیشتر از موج طولی است [8، 26]. دلیل این امر احتمالاً به‌دلیل جنس پلیمری ماده است؛ زیرا در تحقیق لیوینگز ماده از جنس پلیمر و در کار سول ماده از جنس فلز بوده است [8، 26]. در تحقیق یاقی و یونیز با افزایش ضخامت لایه‌گذاری، میزان تضعیف کاهش یافته است [12]. در کار نادیمپالی و همکاران نیز تضعیف موج با کاهش ضخامت لایه افزایش داشته است [23].

در تحقیق حاضر، با استفاده از استاندارد ASTM E664، اندازه‌گیری تضعیف موج به‌روش غوطه‌وری با استفاده از یک کاوند یک مگاهرتزی انجام شد. تضعیف موج در سیگنال‌های موج طولی در راستای لایه‌گذاری با ضخامت 0/25 میلی‌متر، نسبت به چینش درون لایه که ضخامت آن 0/4 میلی‌متر است، کمتر بود. تضعیف در راستای 3 برابر با 1/2 دسی‌بل بر سانتی-متر بود و در دو راستای اصلی 1 و 2 به ترتیب مقادیر 1/9 و 2/2 دسی‌بل بر سانتی‌متر به‌دست آمد. در راستاهای فرعی نیز مقدار تضعیف نزدیک به 2 دسی‌بل بر سانتی‌متر بود. وجود فاصله هوایی، ضخامت لایه و تراکم ماده در میزان تضعیف موج موثر است.

4- نتیجه‌گیری

با انتخاب پارامترهای قابل تغییر در فرایند تولید قطعات به‌روش ساخت افزایشی می‌توان خواص مکانیکی آنها را تغییر داد. در این مقاله با انتخاب سه پارامتر نوع چینش لایه‌ها، ضخامت لایه‌ها و سرعت لایه‌گذاری، قطعه‌ای با فرایند ساخت افزایشی ساخته شد و سپس، به روش ارزیابی غیرمخرب فراصوتی ثوابت الاستیک این قطعه اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری ضرایب الاستیک حاکی از ناهمسانگرد بودن قطعه است. تغییرات سرعت صوت در هر راستا اندازه‌گیری و ناهمسانگردی قطعه با استفاده از معادلات کریستوفل معین و میزان ناهمسانگردی در جهت‌های مختلف محاسبه شد. سپس با وارون‌گیری از تانسور ضرایب الاستیک مقادیر مدول یانگ، مدول برشی و نسبت پواسون در هر راستا به‌دست آمد. نتایج نشان داد که مقادیر C_{11} و C_{22} بسیار به هم نزدیک هستند. نزدیک بودن مقادیر ضرایب الاستیک در دو این دو راستا نشان‌دهنده این است که ساختار ماده می‌تواند ناهمسانگردی ساده‌تری داشته باشد. بنابراین، از ساختار شش‌وجهی برای این قطعه استفاده شد. با استفاده از

با اعمال تبدیل فوریه سریع بر روی سیگنال می‌توان دامنه را بر اساس قله‌های سیگنال با دقت بیشتری اندازه‌گیری کرد. در شکل 11 تضعیف موج طولی در جهات مختلف قطعه نشان داده شده است. در این شکل، منظور از α_{ij} میزان تضعیف در راستا و جهت ij مطابق با جهت‌های اندازه‌گیری سرعت صوت است.

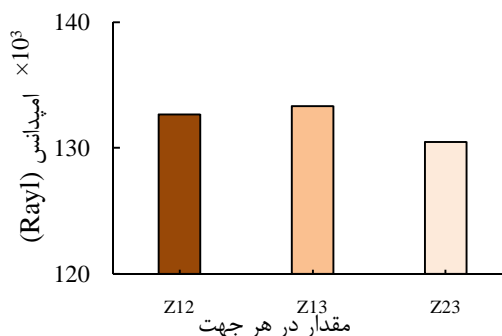


Fig. 9 The impedance of transverse wave in different directions

شکل 9 امپدانس صوتی برای سیگنال موج عرضی در جهت‌های مختلف

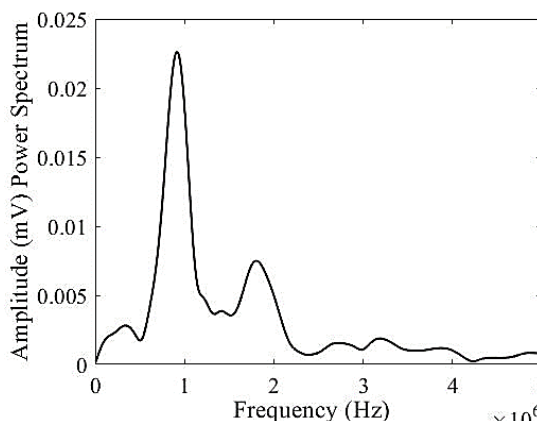


Fig. 10 Frequency spectrum for measuring amplitude

شکل 10 طیف فرکانسی برای اندازه‌گیری دامنه موج

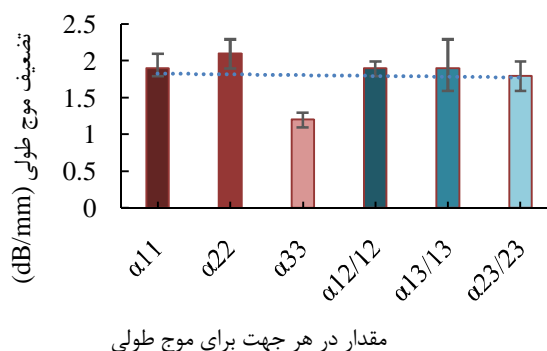


Fig. 11 The attenuation values of waves in any directions which catching with 1 MHz immersion probe

شکل 11 میزان تضعیف موج در راستاهای مختلف قطعه، با توجه به سیگنال دریافتی در آن جهت توسط تراگذار 1 مگاهرتزی

6- مراجع

- [1] F. Honarvar and A. Varvani-Farahani, "A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control," *Ultrasonics*, p. 106227, 2020.
- [2] G. D. Goh, Y. L. Yap, H. Tan, S. L. Sing, G. L. Goh, and W. Y. Yeong, "Process-structure-properties in polymer additive manufacturing via material extrusion: A review," *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, vol. 45, no. 2, pp. 113-133, 2020.
- [3] S. K. Everton, M. Hirsch, P. Stravroulakis, R. K. Leach, and A. T. Clare, "Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing," *Materials & Design*, vol. 95, pp. 431-445, 2016.
- [4] C.-H. Liu, N. Jeyaprakash, and C.-H. Yang, "Material characterization and defect detection of additively manufactured ceramic teeth using non-destructive techniques," *Ceramics International*, vol. 47, no. 5, pp. 7017-7031, 2021.
- [5] I.-C. Lee, N. Jeyaprakash, and C.-H. Yang, "Characterization of ceramic phononic crystals prepared with additive manufacturing: Ultrasonic technique and finite element analysis," *Ceramics International*, vol. 46, no. 17, pp. 27550-27560, 2020.
- [6] T.-H. Tsai, N. Jeyaprakash, and C.-H. Yang, "Non-destructive evaluations of 3D printed ceramic teeth: Young's modulus and defect detections," *Ceramics International*, 2020.
- [7] A. Amado Becker, J. Ramos Grez, M. J. Yañez, Y. Vargas, and L. Gaete, "Elastic tensor stiffness coefficients for SLS Nylon 12 under different degrees of densification as measured by ultrasonic technique," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 14, no. 5, pp. 260-270, 2008.
- [8] R. Livings, V. Dayal, and D. Barnard, "Characterization of 3D rapid prototyped polymeric material by ultrasonic methods," in *AIP Conference Proceedings*, 2015, vol. 1650, no. 1: American Institute of Physics, pp. 807-816.
- [9] L. Huang, R. R. Stewart, N. Dyaour, and J. Baez-Franceschi, "3D-printed rock models: Elastic properties and the effects of penny-shaped inclusions with fluid substitution," *Geophysics*, vol. 81, no. 6, pp. D669-D677, 2016.
- [10] Y. L. Yap, W. Toh, R. Koneru, K. Lin, K. M. Yeoh, C. M. Lim, J. S. Lee, N. A. Plemping, R. Lin, and T. Y. Ng, "A non-destructive experimental-cum-numerical methodology for the characterization of 3D-printed materials—polycarbonate-acrylonitrile butadiene styrene (PC-ABS)," *Mechanics of Materials*, vol. 132, pp. 121-133, 2019.
- [11] Y. L. Yap, W. Toh, R. Koneru, Z. Y. Chua, K. Lin, K. M. Yeoh, C. M. Lim, J. S. Lee, N. A. Plemping, and R. Lin, "Finite element analysis of 3D-Printed Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA) with Ultrasonic material characterization," *International*

ساختار شش‌وجهی، مدول یانگ در هر راستا محاسبه شد و نتایج نشان داد که E_3 که در راستای لایه‌نشانی است، بزرگتر از مدول یانگ در دو راستای دیگر است.

برای اعتبارسنجی نتایج آزمون فراصوتی از آزمون کشش در راستاهای مختلف استفاده شد. نتایج آزمون کشش نشان می‌دهد که مدول یانگ در راستاهای مختلف با آزمون فراصوتی مطابقت نسبی دارد. برای راستی‌آزمایی نتایج ناهمسانگردی و یافتن سایر خصوصیات آکوستیک قطعه، از آزمون فراصوتی استفاده شد. بدین منظور، تضعیف موج و امپدانس صوتی قطعه اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان می‌دهد که تضعیف در راستایی که ضخامت لایه کمتر است، مقدار کمتری دارد و در راستای α_{22} تضعیف کمترین مقدار را داشته است. عواملی همچون چسبندگی بین لایه‌ها، فاصله‌هایی ایجادشده در حین فرایند، ضخامت لایه‌ها نسبت به یکدیگر و تداخل لایه‌ها، باعث ایجاد تفاوت در تضعیف موج در جهات مختلف می‌شود. در تحقیقات آتی، بحث بهینه‌سازی و تأثیر پارامترهای ورودی ساخت افزایشی بر روی خواص الاستیک قطعه ساخته‌شده بررسی خواهد شد.

5- فهرست علائم

A_n	دامنه موج
C_{ij}	تانسور ضرایب الاستیک
E	مدول یانگ (GPa)
G	مدول برشی (GPa)
l	طول ابعادی (mm)
S_{ij}	ماتریس تن‌دهی (GPa)
t	زمان (s)
u	بردار جابجایی
V_{ij}	سرعت موج ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)
w	وزن (Kg)
z	امپدانس صوتی (Rayl)

علائم یونانی

α	تضعیف موج ($\text{dB}\cdot\text{mm}^{-1}$)
σ	تنش (MPa)
ε	کرنش
ρ	چگالی ($\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
δ	کرونکر دلتا
ν	نسبت پواسون
Γ	تانسور کریستوفل-کلوین

- King, L. Yang, and B. E. Stucker, "In-situ non-destructive evaluation of ultrasonic additive manufactured components," in *Solid Freeform Fabrication: 27th Annual International, Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference (TOC), Austin, TX, Aug, 2016*, pp. 8-10.
- [24] H. Heo, Y. Jin, D. Yang, C. Wier, A. Minard, N. B. Dahotre, and A. Neogi, "Manufacturing and Characterization of Hybrid Bulk Voxeled Biomaterials Printed by Digital Anatomy 3D Printing," *Polymers*, vol. 13, no. 1, p. 123, 2021.
- [25] Z. Liu, J. Zhan, M. Fard, and J. L. Davy, "Acoustic properties of multilayer sound absorbers with a 3D printed micro-perforated panel," *Applied Acoustics*, vol. 121, pp. 25-32, 2017.
- [26] T. Sol, S. Hayun, D. Noiman, E. Tiferet, O. Yeheskel, and O. Tevet, "Nondestructive ultrasonic evaluation of additively manufactured AlSi10Mg samples," *Additive Manufacturing*, vol. 22, pp. 700-707, 2018.
- [27] *Standard Practice for the Measurement of the Apparent Attenuation of Longitudinal Ultrasonic Waves by Immersion Method*, ASTM, 2005.
- [28] *Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials*, ASTM, 2011.
- [29] D. Foster, M. Dapino, and S. Babu, "Elastic constants of ultrasonic additive manufactured Al 3003-H18," *Ultrasonics*, vol. 53, no. 1, pp. 211-218, 2013.
- [30] A. Jäger, S. Johannesmann, L. Claes, M. Webersen, B. Henning, and M. Kupnik, "Evaluating the influence of 3D-printing parameters on acoustic material properties," in *2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2017: IEEE, pp. 1-4.
- [31] M. Zahedi, S. K. Najafi, J. Füssl, and M. Elyasi, "Characterization of Engineering Elastic Parameters of Oriented Strand Board (OSB) Manufactured from Poplar (*Populus deltoides*) Strands Using Ultrasonic Contact Pulse Transmission," *Drvna industrija: Znanstveni časopis za pitanja drvne tehnologije*, vol. 71, no. 3, pp. 227-234, 2020.
- [32] M. Saadat-Nia, L. Brancheriau, P. Gallet, A. A. Enayati, K. Pourtahmasi, and F. Honavar, "Ultrasonic wave parameter changes during propagation through poplar and spruce reaction wood," *BioResources*, vol. 6, no. 2, pp. 1172-1185, 2011.
- [33] A. Ballato, "Poisson's ratio for tetragonal, hexagonal, and cubic crystals," *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 43, no. 1, pp. 56-62, 1996.
- Journal of Computational Materials Science and Engineering*, vol. 8, no. 01, p. 1950002, 2019.
- [12] Y. Jin, T. Yang, H. Heo, A. Krokhin, S. Q. Shi, N. Dahotre, T.-Y. Choi, and A. Neogi, "Novel 2D dynamic elasticity maps for inspection of anisotropic properties in fused deposition modeling objects," *Polymers*, vol. 12, no. 9, p. 1966, 2020.
- [13] S. Yuan and X. Yu, "Ultrasonic non-destructive evaluation of selectively laser-sintered polymeric nanocomposites," *Polymer Testing*, vol. 90, p. 106705, 2020.
- [14] C.-H. Yang, N. Jeyaprasaksh, and C.-K. Chan, "Inhomogeneous mechanical properties in additively manufactured parts characterized by nondestructive laser ultrasound technique," *NDT & E International*, vol. 116, p. 102340, 2020.
- [15] M. H. Sadd, *Elasticity: theory, applications, and numerics*. Academic Press, 2009.
- [16] J. L. Rose, *Ultrasonic guided waves in solid media*. Cambridge university press, 2014.
- [17] R. Acevedo, P. Sedlak, R. Kolman, and M. Fredel, "Residual stress analysis of additive manufacturing of metallic parts using ultrasonic waves: State of the art review," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 9457-9477, 2020.
- [18] M. Mah and D. R. Schmitt, "Determination of the complete elastic stiffnesses from ultrasonic phase velocity measurements," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 108, no. B1, pp. ECV 6-1-ECV 6-11, 2003.
- [19] G. Saunders and T. Seddon, "The elastic behaviour of tetrahedral materials with vacant sites," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 37, no. 9, pp. 873-882, 1976.
- [20] W. Van Buskirk, S. Cowin, and R. N. Ward, "Ultrasonic measurement of orthotropic elastic constants of bovine femoral bone," *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 103, no. 2, pp. 103: 67-72, 1981.
- [21] H. Javidrad and S. Salemi, "Determination of elastic constants of additive manufactured Inconel 625 specimens using an ultrasonic technique," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 107, no. 11, pp. 4597-4607, 2020.
- [22] S. Wang, Y. Noh, J. Brown, S. Roujol, Y. Li, S. Wang, R. Housden, M. C. Ester, M. Al-Hamadani, and R. Rajani, "Development and testing of an ultrasound-compatible cardiac phantom for interventional procedure simulation using direct three-dimensional printing," *3D Printing and Additive Manufacturing*, vol. 7, no. 6, pp. 269-278, 2020.
- [23] V. K. Nadimpalli, J. K. Na, D. T. Bruner, B. A.