

Introducing Technique of Elastic Coefficients of Inconel 625 Parts Produced by Additive Manufacturing Method via Ultrasonic Testing

Mohammad Riahi¹, Hamidreza Javidrad^{2*}, Sina Salemi²

1- Professor, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology

2- MSc Student, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology

*h_javidrad@mecheng.iust.ac.ir

Abstract

Nature of additive manufacturing processes dictate direction-related properties to the final parts and this degree of anisotropy is highly dependent on process parameters and machine setup. Therefore, properties in such materials should be known in any direction. There are several methods including destructive and non-destructive techniques for specifying mechanical properties in parts. Using ultrasonic testing, as a nondestructive method, in order to determine elastic constants for rocks, woods, composite and wrought materials indicative of its reliability and validity, as well as its repeatability. In this paper, 9 independent elastic constant for orthotropic additively manufactured direct metal laser sintering (DMLS) parts are determined from longitudinal and transverse ultrasound velocities via contact ultrasonic testing for different manufacturing process parameters. This work also carried out comparisons between mechanical properties of as-built parts in three principle directions, as well as ultrasound wave velocities.

Keywords: Additive Manufacturing, Direct Metal Laser Sintering, Elastic constants, Ultrasonic testing, Inconel-625.

معرفی تکنیک تعیین ضرایب ثابت الاستیک قطعات تولید افزایشی اینکونل ۶۲۵ بوسیله آزمون فراصوتی

محمد ریاحی^۱، حمیدرضا جاویدراد^{۲*}، سینا سالمی^۳

۱- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، مرکز پیشرو آزمون‌های مکانیکی و غیرمخرب

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، مرکز پیشرو آزمون‌های مکانیکی و غیرمخرب

*h_javidrad@mecheng.iust.ac.ir

چکیده

طبیعت فرآیندهای تولید تجمعی حاکی از وجود خواص تابع جهت در ریز ساختار مواد می‌باشد. این درجه ناهمسانگرد کاملاً وابسته به پارامترهای فرآیند و همچنین راه‌اندازی اولیه ماشین است. بنابراین، خواص این نوع مواد در هر کدام از جهت‌ها باید شناخته شده باشند. متدهای متنوعی از قبیل مخرب و غیرمخرب برای تعیین خواص مکانیکی مواد وجود دارند. بکارگیری روش آزمون فراصوتی برای تعیین ضریب ثابت الاستیک برای سنگ، چوب، مواد مرکب، و فلزات کار شده بیانگر قابلیت بالا، اعتبارسنجی قابل قبول و قابلیت تکرار آن است. در این مقاله، ۹ ضریب ثابت الاستیک برای قطعات تولید شده تجمعی بوسیله سینرینگ لیزری مستقیم فلزات مشخص شده است که از محاسبه سرعت موج‌های طولی و برشی بوسیله اندازه‌گیری تماسی برای پارامترهای مختلف تولید بدست آمده است. در این پژوهش، همچنین مقایسه بین خواص مکانیکی قطعات حین تولید در سه جهت اصلی محوری علاوه بر محاسبه سرعت در هر جهت انجام شده است.

کلمات کلیدی: تولید تجمعی، سینترینگ لیزری مستقیم فلزات، ضرایب ثابت الاستیک، آزمون فراصوتی، اینکونل ۶۲۵.

۱- مقدمه

گسترده‌ای در ساخت قطعات نیروگاهی و قطعات مهمی که در دمای بالا کار می‌کنند؛ دارد [۲]. با پیشرفت و گسترش فرایندهای افزایشی در صنایع گوناگون، از جمله هوافضا و پزشکی، نیاز به اطلاع از خواص مکانیکی قطعات ساخته شده به این روش‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. قطعات تولید افزایشی با توجه به کثرت پارامترهای موثر در طی فرایند (قدرت لیزر، سرعت پیشروی لیزر^۳، ضخامت هر لایه، استراتژی ساخت و غیره)، دارای خواص مکانیکی گوناگونی هستند [۳]. این در حالیست که قطعات ساخته شده به روش تولید افزایشی نیز به دلیل ساخت جهت‌دار قطعات، مانند کامپوزیت‌ها دارای خواص ناهمسانگردی می‌باشند [۴] که این امر نیاز به دانستن خواص مکانیکی در تمامی جهات را دوچندان می‌کند. به عبارت دیگر، خواص مکانیکی به نوعی جهت‌دار بوده و در جهات مختلف با هم تفاوت دارند [۵].

تولید افزایشی (Additive Manufacturing) که جدیدترین روش تولید قطعات در صنعت است به فرایندهایی اطلاق می‌شود که در طی آن، قطعه به صورت لایه لایه از روی مدل سه‌بعدی ساخته می‌شود که در تقابل با متدهای رایج سنتی می‌باشد. در روش‌های سنتی با برداشتن تدریجی سطوح از قطعات به تولید و شکل دهی به مرحله نهایی می‌رسند. از جمله فرایندهای تولید افزایشی، روش ذوب انتخابی لیزری^۱ می‌باشد که در حال حاضر در صنعت از مقبولیت بالایی برخوردار است. این روش قابلیت تولید قطعات کاربردی با خواص مکانیکی نزدیک به مواد کار شده^۲ را دارا می‌باشد [۱].

از جمله مواد مهم مورد استفاده در روش ذوب انتخابی لیزری، اینکونل ۶۲۵ می‌باشد که به دلیل دارا بودن مقاومت به خستگی حرارتی و خزش بالا، کاربردهای

¹Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

²Wrought

³Scan speed

SLS^۱ تولید شده بود را استخراج کرده و با نمونه آزمون کشش و نتایج حاصل از محاسبات عددی مقایسه کردند. نتایج، تناسب خوبی را بین نتایج حاصل از آزمون فراصوت و آزمون کشش نشان دادند. در مرجع [۱۳]، نویسندگان اقدام به استخراج سرعت‌های طولی قطعات ساخته شده از جنس Ti-6Al-4V به روش فراصوت تماسی پرداخته‌اند که البته با توجه به عدم برش قطعات و عدم بکارگیری میله^۲ زاویه‌ای، امکان استخراج المان‌های ماتریس سفتی و در نتیجه خواص الاستیکی قطعات نبوده است. در [۱۴] نیز نویسندگان از روش فراصوت تماسی برای استخراج ماتریس سفتی قطعات تولید شده از جنس آلومینیوم که به روش تولید افزایشی فراصوت^۳ تولید شده بودند را با فرض ساختار همسانگرد صفحه‌ای^۴ این قطعات مورد استفاده قرار دادند و نشان دادند که افزایش تعداد حفره‌ها در نمونه موجب کاهش میزان المان‌های سفتی و در نتیجه استحکام نمونه می‌شود.

با توجه به جدول (۱)، مشاهده می‌شود علیرغم ظهور روش‌های پیشرفته بر پایه فراصوت برای استخراج خواص مکانیکی مواد، روش تماسی طی سال‌های متعددی برای استخراج خواص الاستیکی مواد گوناگون بکار گرفته شده و با دقت مناسبی (با حدود ۱۰ درصد خطا) این خواص را بدست می‌دهد [۱۲].

همچنین اختلاف نتایج روش فراصوت تماسی با روش غوطه‌وری در حدود ۵٪ گزارش شده است [۲۶]. لذا روش فراصوت پالس-اکو تماسی برای آزمون نمونه‌های تولید افزایشی بکار گرفته شد. در این مقاله، برای قطعات ساخته شده از جنس اینکسل ۶۲۵ به روش ذوب انتخابی لیزری با پارامترهای مختلفی که در محدوده کاری مطلوب می‌باشند؛ به استخراج سرعت انتشار امواج طولی و عرضی و ثوابت الاستیک قطعات به روش فراصوت پالس-اکو تماسی می‌پردازیم.

برای بکارگیری قطعات ساخته شده به روش تولید افزایشی در صنعت، دانستن خواص مکانیکی قطعات بسیار مهم است. برای دستیابی به این خواص، روش‌های مختلفی موجود است که به دو دسته کلی آزمون‌های مخرب و آزمون‌های غیرمخرب تقسیم می‌شوند.

آزمون‌های مخرب مانند آزمون کشش نیازمند تجهیزات گران قیمت آزمایشگاهی و تعداد کثیری نمونه استاندارد آزمون در جهات مختلف می‌باشند. این در حالیست که نمونه آزمون در انتهای آزمون دیگر قابل استفاده نمی‌باشد و با توجه به گران بودن هزینه ساخت قطعات تولید افزایشی، این آزمون بسیار هزینه‌بر خواهد بود. آزمون‌های غیرمخرب شامل آزمون‌های ارتعاشی [۶، ۷، ۸] و آزمون‌های پایه فراصوتی (جدول ۱) می‌باشند که در بین آن‌ها آزمون فراصوت از نظر هزینه، دقت و سرعت پاسخگویی نسبت به سایر روش‌ها ارجحیت دارد. بکارگیری آزمون فراصوت می‌تواند منجر به صرفه جویی در زمان استخراج نتایج و نیز داده‌های مورد پردازش بشود. آزمون فراصوت به روش‌های گوناگونی از جمله روش تماس مستقیم، روش غوطه‌وری و روش فراصوت لیزری انجام می‌گیرد.

قابلیت اطمینان بالا و صحت نتایج حاصله از روش‌های پایه فراصوتی در زمینه استخراج خواص مکانیکی پیشتر برای مواد مختلف به اثبات رسیده است [۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲]. هر چند استخراج خواص الاستیکی قطعات ناهمسانگرد تولید شده به روش‌های تولید افزایشی فلزی به روش غیرمخرب فراصوت آنطور که باید مورد توجه واقع نشده است. این آزمون می‌تواند به عنوان ملاکی از خواص الاستیکی حاصل شده بوسیله ساخت افزایشی با سری پارامترهای مشخص، برای سفارشات آتی و قطعات صنعتی مورد استفاده قرار گیرد. استفاده از روش‌های پایه فراصوتی برای دستیابی به ثوابت الاستیکی مواد سابقا برای موادی چون فلزات، چوب‌ها، سنگ‌ها، مواد کامپوزیتی و پلیمری بکار گرفته شده است که در جدول (۱) شماری از تحقیقات انجام گرفته در این حوزه، با تمرکز بر روش پالس-اکو، بر حسب سال انتشار آن‌ها آمده است. به عنوان مثال، نویسندگان در مرجع [۱۲] با بکارگیری روش فراصوت تماسی توانستند ثابت‌های الاستیکی ماده نایلون ۱۲ را که طی فرایند افزایشی

¹Selective Laser Sintering (SLS)

² Probe

³Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM)

⁴Transversely isotropic

جدول ۱- پیشینه پژوهشی دربارگیری روش‌های پایه فراصوت به منظور استخراج ثوابت الاستیکی مواد گوناگون.

Reference No.	Publication Year	Testing Method	Testing Material	Specimen Shape	Degree of anisotropy
[9]	1981	Direct contact	Bovine Femoral Bone	Polyhedron with 18 parallel faces	Orthotropic
[10]	1997	Direct contact	Rock	Cylindrical	Transversely isotropic
[11]	2000	Direct contact	Composite	Cubic (with machining in 45° direction)	Orthotropic
[15]	2003	Immersion	Composite	Cubic	Anisotropic
[16]	2008	Direct contact	over-consolidated shale	Cubic (with two 45° parallel faces)	Transversely isotropic
[12]	2008	Direct contact	Nylon 12 (Manufactured by SLS process)	Cubic (with four 45° parallel faces)	Transversely isotropic
[17]	2011	Direct contact	Concrete	Cubic & Cylindrical	Isotropic
[18]	2012	Laser Ultrasonic	Wood	Cylindrical	Orthotropic
[14]	2013	Direct contact	Al 3003-H18 (Manufactured by UAM process)	Cubic	Transversely isotropic
[19]	2014	Direct contact	Rock	Spherical	Anisotropic
[20]	2014	Pulsed Ultrasonic Polar Scan	CFRPs	Cubic	Orthotropic
[21]	2015	Direct contact	AISI 316L stainless steel	Cylindrical	Isotropic
[13]	2016	Direct contact	Ti6Al4V (Manufactured by DMLS process)	Cubic	Orthotropic
[22]	2016	Direct contact	Metal alloys	Cubic	Isotropic
[23]	2017	Direct contact	Wood	Cubic	Orthotropic
[24]	2018	Laser Ultrasonic	Composite	Cubic	Transversely isotropic
[25]	2018	Laser Ultrasonic	Inconel-625	Stepped sample	Isotropic

۲- تئوری انتشار موج و خواص مکانیکی

ماتریس سفتی هر ماده به عنوان شناسنامه ساختاری آن ماده تلقی می‌شود که از طریق قانون هوک (معادله ۱)، کرنش ایجاد شده در قطعه را به تنش مربوط می‌سازد.

$$T_{ij} = C_{ijkl} E_{kl} \quad (1)$$

که در آن T_{ij} مولفه‌های ماتریس تنش، E_{kl} مولفه‌های ماتریس کرنش و C_{ijkl} مولفه‌های ماتریس سفتی ماده می‌باشند که معمولاً برای راحتی به شکل C_{ij} نمایش داده می‌شود. ماتریس سفتی، یک ماتریس متقارن است که در حالت کلی برای مواد ناهمسانگرد از بیست و یک مولفه مستقل تشکیل شده است. مولفه‌های این ماتریس در رابطه (۲)

نمایش داده شده‌اند.

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ & & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ & & & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ & & & & C_{55} & C_{56} \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Sym

در یک ماده ناهمسانگرد، المان‌های ماتریس سفتی از طریق مقادیر ویژه و بردارهای ویژه حاصل از حل معادله کریستفل^۱ برای انتشار امواج فراصوت در ماده بدست می‌آیند [۲۷]. با این حال، برای مواد ارتوتروپیک این ۲۱ ثابت به ۹ ثابت کاهش می‌یابد که از روابط (۳) بدست می‌آیند [۹].

$$\begin{aligned} C_{11} &= \rho \cdot V_{1/1}^2 \\ C_{22} &= \rho \cdot V_{2/2}^2 \\ C_{33} &= \rho \cdot V_{3/3}^2 \\ C_{44} &= \rho \cdot V_{2/3}^2 \\ C_{55} &= \rho \cdot V_{1/3}^2 \\ C_{66} &= \rho \cdot V_{1/2}^2 \\ C_{23} &= \frac{\sqrt{(C_{22} + C_{44} - 2\rho \cdot V_{23/23}^2) \cdot (C_{33} + C_{44} - 2\rho \cdot V_{23/23}^2)}}{2} - C_{44} \\ C_{13} &= \frac{\sqrt{(C_{11} + C_{55} - 2\rho \cdot V_{12/12}^2) \cdot (C_{33} + C_{55} - 2\rho \cdot V_{12/12}^2)}}{2} - C_{55} \\ C_{12} &= \frac{\sqrt{(C_{11} + C_{66} - 2\rho \cdot V_{13/13}^2) \cdot (C_{22} + C_{66} - 2\rho \cdot V_{13/13}^2)}}{2} - C_{66} \end{aligned} \quad (3)$$

که در این معادلات $V_{i/i}$ سرعت امواج طولی در راستای i ، $V_{i/j}$ سرعت‌های امواج عرضی با راستای انتشار i و راستای

پولاریزیشن j ، $V_{ij/ij}$ سرعت امواج گوسی-طولی با راستای انتشار و پولاریزیشن در صفحه ij می‌باشند. برای استخراج $V_{ij/ij}$ لازم است که نمونه در راستای ۴۵ درجه نسبت به صفحه ij برش بخورد [۱۱]. در این روابط، i و j مقادیر ۱، ۲ و ۳ را می‌پذیرد و بیانگر راستاهای اصلی می‌باشد. با داشتن ماتریس سفتی برای جهات اصلی یک نمونه، می‌توان به کمک ماتریس‌های دوران، خواص الاستیکی را در هر راستای دلخواه بدست آورد [۲۷].

حال با محاسبه معکوس ماتریس سفتی، ماتریسی حاوی مقادیر ثوابت الاستیکی ماده مستقیماً قابل استخراج خواهد بود.

$$[S] = [C]^{-1} \quad (4)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix}$$

که در آن E_i مدول یانگ در راستای i ، G_{ij} مدول برشی در صفحه ij و ν_{ij} نیز ضریب پواسون می‌باشند که i و j مقادیر ۱، ۲ و ۳ را می‌پذیرد و بیانگر راستاهای اصلی می‌باشد. لازم به ذکر است که مدول‌های برشی به دشواری طی آزمون مخرب قابل استخراج می‌باشند و تا به حال تحقیقی در رابطه با مشخص کردن مدول برشی قطعات تولیدافزایشی به روش مخرب انجام نگرفته است. البته، مدول‌های برشی از طریق روابط (۵) نیز از روی خواص الاستیک دیگر قابل محاسبه هستند [۲۸].

$$\begin{aligned} G_{12} &= \frac{\sqrt{E_1 E_2}}{2(1 + \sqrt{\nu_{12} \nu_{21}})} \\ G_{13} &= \frac{\sqrt{E_1 E_3}}{2(1 + \sqrt{\nu_{13} \nu_{31}})} \\ G_{23} &= \frac{\sqrt{E_2 E_3}}{2(1 + \sqrt{\nu_{23} \nu_{32}})} \end{aligned} \quad (5)$$

²Polarization direction

¹Christoffel's equation

۳- سخت افزار و ادوات آزمایش

۳-۱- ماده و دستگاه ساخت نمونه‌ها و آزمون

دستگاه بکارگرفته شده برای ساخت نمونه‌ها، مدل EOSINTM250 extended با لیزر ۲۰۰ وات بوده و ماده ساخت از جنس اینکسل ۶۲۵ که از جمله مواد پرکاربرد در صنایع گوناگون مهندسی است؛ با ترکیباتی که در جدول (۲) آمده، استفاده شده است. همچنین دمای پیش گرم میز ساخت نیز ۸۰ درجه سلسیوس تنظیم گردید. پودر مورد استفاده نیز از شرکت EOS و مطابق با استانداردهای UNS N06625, AMS 5666F, AMS 5599G, W.Nr 2.4856, DIN NiCr22Mo9Nb تهیه گردیده است.

جدول ۲- ترکیبات پودر اینکسل ۶۲۵ مورد استفاده [۲۹].

Element	Wt%
Ni	58.00
Cr	20.00 - 23.00
Mo	8.00 - 10.00
Nb	3.15 - 4.15
Fe	5.00
Ti	0.40
Al	0.40
Co	1.0
C	0.10
Ta	0.05
Si	0.50
Mn	0.50

با توجه به اهمیت و تاثیرپذیری بالای خواص مکانیکی قطعات از پارامترهای ساخت، قطعاتی با پارامترهای ساختی متفاوت در محدوده مجازی که توسط محققان پیشین بدست آمده است، طراحی شد. از جمله تاثیرگذارترین پارامترهای ساختی در خواص مکانیکی قدرت لیزر، سرعت پیشروی، ضخامت لایه‌ها، فاصله پاس‌ها^۱ و استراتژی ساخت می‌باشد که معمولاً چهار پارامتر اول در قالب چگالی انرژی^۲ بیان می‌شوند که از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$E = \frac{P}{v \cdot t \cdot h} \quad (5)$$

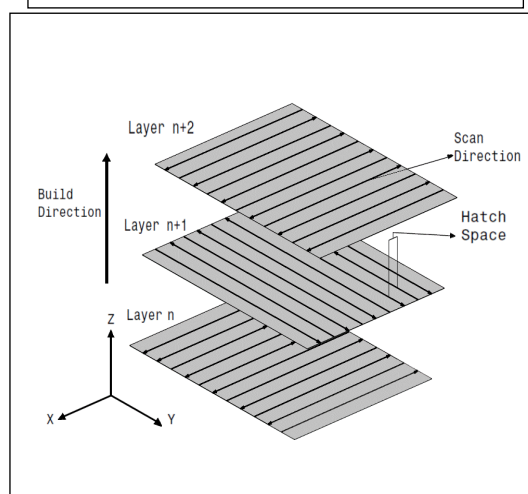
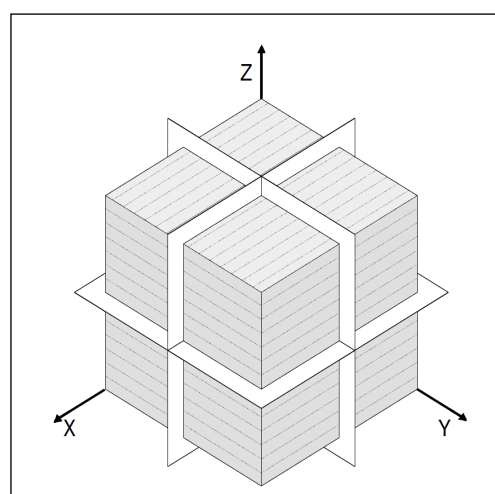
که در آن P و v به ترتیب قدرت و سرعت حرکت لیزر^۳، t ضخامت هر لایه و h فاصله پاس‌های متوالی می‌باشد.

¹Hatch space

²Energy density

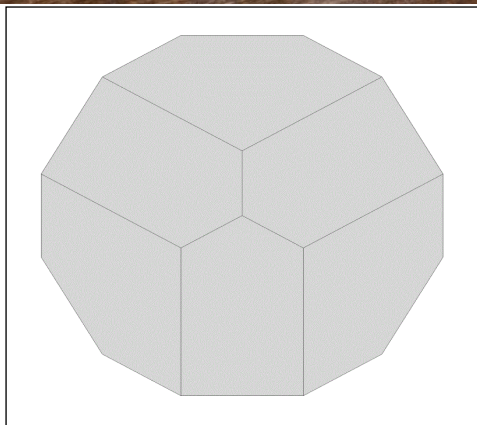
³Laser speed

در عمل، محاسبه همه ۲۱ المان ماتریس سفتی بسیار دشوار بوده و علاوه بر این، عدم وجود دانش به جهات اصلی قطعه این دشواری را چند برابر می‌کند؛ چرا که برای استفاده از روابط ذکر شده باید سعی و خطاهای بیشماری انجام شود تا جهات اصلی ماده مشخص شود. دلیل این امر این است که در مواد ناهمسانگرد هر سه مود انتشار موج توأمان اتفاق می‌افتد و تفکیک آن‌ها از هم بسیار دشوار است [۱۰]. با توجه به ماهیت قطعات ساخته شده به روش تولید افزایشی، فرض ارتوتروپیک بودن این قطعات مطلوب بوده و کاملاً کاربردی می‌باشد. شکل (۱) شماتیک یک قطعه ساخته شده به روش ذوب انتخابی لیزری را به همراه محورهای تقارن آن نشان می‌دهد.



شکل ۱- شماتیک محورهای تقارن قطعه ساخته شده و استراتژی اسکن در چینش لایه‌ها.

است [۹]. بیشینه ابعاد نمونه ها $30 \times 30 \times 30$ میلی متر و به گونه ای انتخاب شدند تا میله های معمول فضای کافی برای ایجاد تماس با سطح قطعه و دریافت سیگنال برگشتی مورد نظر را داشته باشند. قبل از انجام آزمون، قطعات پولیش خورده و سپس تمامی فاصله ها و ابعاد بوسیله کولیس به دقت 0.02 میلی متر اندازه گیری شده است. برای محاسبه چگالی قطعات نیز از روش ارشمیدوس^۱ استفاده شده است. برای این کار، جرم نمونه ها در هوا و آب به کمک ترازوی آزمایشگاهی با دقت 0.001 گرم و آب مقطر اندازه گیری شد. هر اندازه گیری به طور مجزا و برای اطمینان از صحت آن ها، سه مرتبه انجام گرفته است.



شکل ۲- شماتیک نمونه ساخته شده و نمونه ها جهت آزمون.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- رابطه بین چگالی و چگالی انرژی

شکل (۳) رابطه بین چگالی انرژی و چگالی نمونه های تولید شده را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش چگالی انرژی شاهد افزایش میزان چگالی قطعات هستیم. تا چگالی انرژی حدود 125 ژول بر میلی متر مکعب، میزان چگالی با شیب زیادی افزایش یافته و از چگالی انرژی

میله های نرمال و زاویه ای بکار گرفته شده و تجهیزات آزمون فراصوت همگی ساخت شرکت Karl Deutsch می باشند و قبل از انجام آزمون ها به خوبی کالیبره شده اند. میله نرمالو زاویه ای دارای فرکانس اسمی 4 مگاهرتز و قطر کریستال به ترتیب 12 میلی متر و 8×9 میلی متر می باشند. سرعت انتشار موج طولی و عرضی از روی زمان پرواز موج در تمامی وجوه (18 وجه برای هر قطعه) محاسبه و هر اندازه گیری برای افزایش دقت کار سه مرتبه انجام گردید. ضمناً تمامی اندازه گیری ها در دمای محیط انجام گرفته شده است.

۲-۳- آماده سازی نمونه ها

هشت سری پارامتر ساخت متفاوت در محدوده چگالی انرژی بین 108 تا 156 ژول بر میلی متر مکعب انتخاب گردید تا اثر افزایش چگالی انرژی برروی چگالی، سرعت انتشار امواج فراصوت و خواص مکانیکی نمونه ها بررسی گردد. برای استراتژی اسکن نیز از پاس های موازی با زوایای صفر و نود درجه در همه لایه ها استفاده شده است تا جهات اصلی نمونه ها با مسیرهای اسکن در یک راستا قرار گیرند. این امر موجب سادگی استخراج المان های ماتریس سختی می شود. برای کاهش میزان تنش پسماند در قطعه، هر پاس لیزر طی دو مسیر هم راستا اسکن شدند [۳۰]. ضخامت لایه ها 20 میکرون در نظر گرفته شد که برای تمامی قطعات ثابت بود. لازم به ذکر است که برروی قطعات هیچگونه عملیات حرارتی انجام نگرفته است.

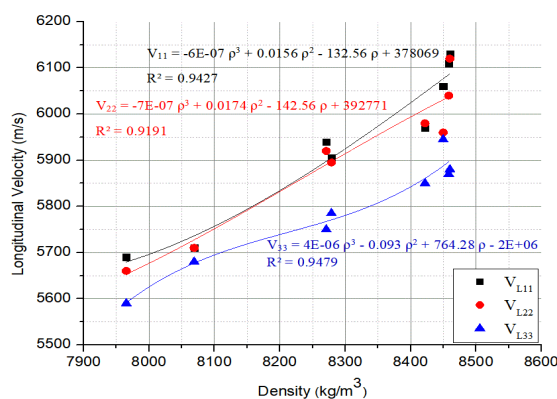
جدول ۳- پارامترهای ساخت

Sample No.	Laser Power (W)	Hatch Space (μm)	Scan Speed (mm/s)	Energy Density (J/mm^3)
S1	156	80	900	108.3
S2	150	90	750	111.1
S3	169	90	800	117.4
S4	195	90	900	120.4
S5	195	100	800	121.9
S6	182	90	725	139.5
S7	195	80	800	152.3
S8	175	80	700	156.2

هندسه بلوک ها به طوری طراحی شده است که تمامی خواص الاستیکی در راستاهای اصلی با بکارگیری میله های تماسی نرمال و زاویه ای قابل استخراج باشند. هندسه مورد نظر به شکل هجده وجهی است که در مقالات پیشین برای استخراج خواص الاستیکی استخوان مورد استفاده قرار گرفته

¹Archimedes method

دهنده رابطه بین چگالی جرمی و سرعت‌های طولی در راستاهای اصلی است؛ ρ چگالی جرمی نمونه‌ها، V_{11} ، V_{22} و V_{33} به ترتیب سرعت‌های موج طولی در راستای اصلی X ، Y و Z می‌باشند. مشاهده می‌شود با افزایش چگالی جرمی، سرعت موج طولی در هر سه راستای اصلی افزایش یافته است؛ با این حال، شیب افزایش سرعت در راستای X بیشتر از راستاهای دیگر بوده است. با وجود اعمال استراتژی اسکن زیگزاگ^۱، مشاهده می‌شود سرعت موج طولی در راستای X و Y با هم اندکی تفاوت دارد، هرچند این تفاوت کمتر از ۱٪ می‌باشد. این در حالیست که سرعت موج طولی در راستای Z از سرعت در راستای X یا Y در حدود ۵٪ کمتر است. دلیل این امر به کیفیت اتصال بین لایه‌ها، سطح وسیع‌تر عیوب داخلی در صفحه X - Y و تفاوت‌های اندک در چگالی لایه‌ها با هم برمی‌گردد [۱۲]. لذا می‌توان ساختار تولید شده طی این استراتژی اسکن را کم و بیشه ساختار ایزوتروپیک عرضی نزدیک دانست. علاوه بر این، مشاهده می‌شود برای نمونه‌های شماره ۲، ۵ و ۶ میزان ناهمسانگردی کمینه بوده است.

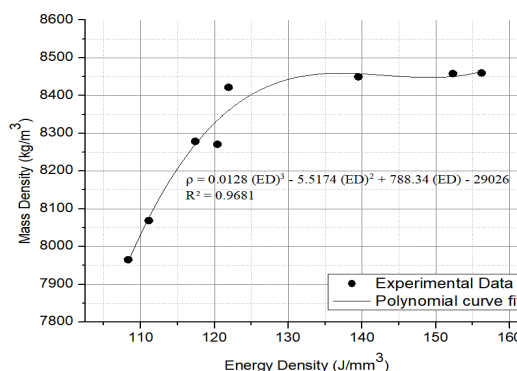


شکل ۴- رابطه بین چگالی و سرعت موج طولی در راستاهای اصلی

در شکل (۵) سرعت‌های امواج عرضی بدست آمده در صفحات اصلی بر حسب چگالی جرمی نمونه‌ها رسم شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، سرعت عرضی در صفحه Y - Z دارای بیشترین مقادیر بوده؛ در حالی که سرعت عرضی در صفحه X - Y کمترین مقادیر را دارا بوده است. دلیل این امر را می‌توان به گذر موج به موازات لایه‌های نمونه‌ها دانست که موجب شده ارتعاش ذرات ماده با موانع ساختاری مواجه شود و سرعت آن افت کند. اختلاف بین سرعت‌های موج عرضی در دو صفحه X - Z و Y - Z در حدود

^۱Zigzag

۱۲۵ تا ۱۵۶ ژول بر میلی‌متر مکعب تقریباً ثابت بوده است. با مقایسه مقادیر بدست آمده با مقدار چگالی مرجع 8440 kg/m^3 برای اینکسل ۶۲۵ [۳۱]، مشاهده می‌شود در سه مورد از نمونه‌ها مقدار بدست آمده بیشتر می‌باشد. این در حالیست که برای اینکسل ۶۲۵ تولید شده به روش DMLS، تا میزان چگالی 8570 kg/m^3 نیز گزارش شده است [۳۲]. با این حال برای اطلاع از دلیل این پدیده و حصول اطمینان از میزان حفره و عیوب داخلی احتمالی نیاز به انجام آزمایش‌های میکروساختاری می‌باشد. به داده‌های حاصل از اندازه‌گیری چگالی برحسب چگالی انرژی، تابع توانی از درجه سه منطبق شد تا بتوان در این محدوده برای چگالی انرژی‌های قابل تولید، میزان چگالی قابل دستیابی را تخمین زد. با مقایسه نتایج بدست آمده با تحقیقات پیشین مشاهده می‌شود، مقادیر بدست آمده برای چگالی در تناسب خوبی با تحقیقات پیشین می‌باشند. در مرجع [۳۲]، محققین برای پارامترهای مشابه نمونه شماره پنج به چگالی 8424 kg/m^3 رسیده بودند که با مقدار بدست آمده در این تحقیق اختلاف بسیار اندکی دارد. همچنین در مرجع [۳۳]، پارامترهای مشابه نمونه شماره سه بکارگرفته شد و چگالی مشابهی نیز بدست آمد.



شکل ۳- نمودار رابطه بین چگالی جرمی و چگالی انرژی

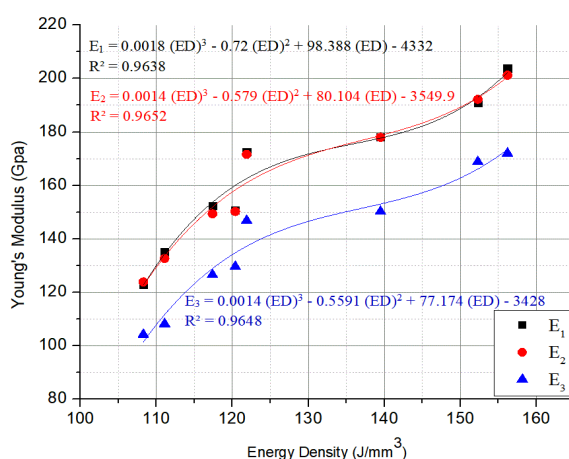
۲-۴- رابطه بین چگالی جرمی و سرعت انتشار امواج

سرعت انتشار امواج فراصوت در مواد به خواص ساختاری آن ماده برمی‌گردد. از آنجایی که سرعت انتشار موج فراصوت در قطعات تولید افزایشی از پارامترهای ساختی و میزان تخلخل قطعات تاثیر می‌پذیرد [۳۴، ۳۵]، تاثیر میزان چگالی جرمی بر روی سرعت امواج طولی و عرضی در هر سه راستای اصلی و راستاهای ۴۵ درجه مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن در شکل‌های (۴) تا (۶) آورده شده است. در شکل (۴) که نشان

۳-۴- رابطه بین چگالی انرژی و خواص مکانیکی

با توجه به سرعت‌های بدست آمده، المان‌های ماتریس سفتی نمونه‌ها از روابط (۳) استخراج شد و با محاسبه معکوس ماتریس سفتی، ماتریسی متشکل از ثوابت الاستیکی ماده (رابطه ۴) بدست آمد.

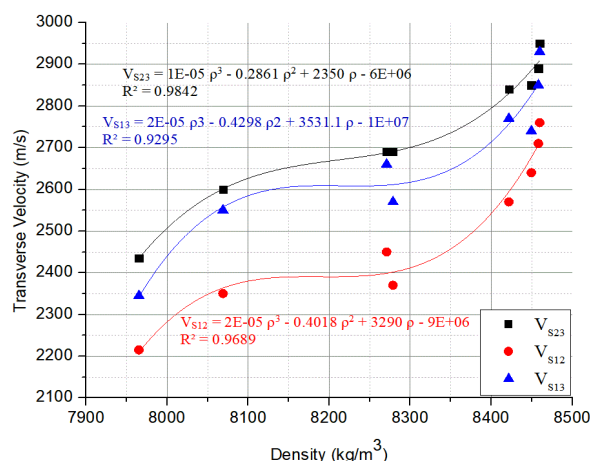
شکل (۷) رابطه بین چگالی انرژی و مدول یانگ در راستاهای اصلی را نشان می‌دهد. اندیس‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب بیانگر جهات X ، Y و Z می‌باشند. مشاهده می‌شود، مدول‌های یانگ در هر سه راستای اصلی با افزایش چگالی انرژی و به طبع، چگالی جرمی نمونه‌ها، افزایش یافته‌اند [۳۶]. دلیل این امر عموماً به خاطر کم شدن میزان تخلخل در نمونه‌ها می‌باشد [۳۷]. شیب افزایش در هر سه راستا تقریباً یکی بوده و همچنین مشاهده می‌شود در دو راستای X و Y که عمود به جهت ساخت بوده‌اند، مدول یانگ تقریباً یکسان بوده است. این مسئله با توجه به استراتژی اسکن انتخابی قابل پیش‌بینی بود. با این حال، مدول یانگ در راستای ساخت نمونه‌ها اختلاف زیادی با دو راستای دیگر دارد [۳۸]. دلیل این امر، ساختار لایه‌ای و عمود بودن مرز دانه‌ها (چینش لایه‌ها) به راستای گذر موج (و یا به عبارتی، راستای اعمال نیرو) می‌باشد. طبق شکل (۷)، با افزایش چگالی انرژی به میزان 50 J/mm^3 از نمونه شماره یک به نمونه شماره هشت، شاهد افزایش حدوداً 80 GPa به مدول یانگ در راستاهای عمود به راستای ساخت هستیم که این مسئله بسیار حائز اهمیت بوده و نیاز به توجه و مطالعات بیشتر دارد.



شکل ۷- رابطه بین چگالی انرژی و مدول یانگ در راستاهای اصلی

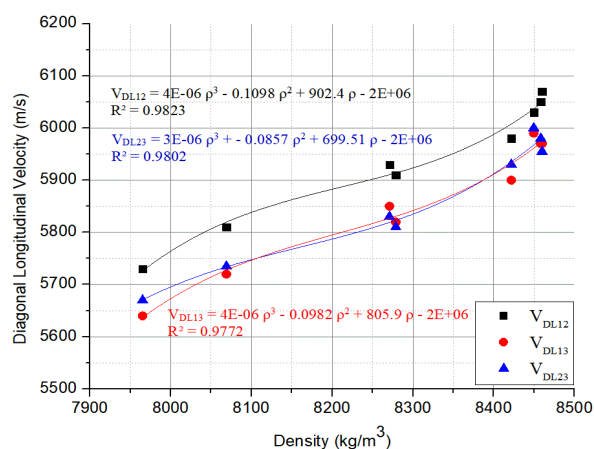
از طرف دیگر، با مقایسه نتایج بدست آمده با مطالعات پیشین، نزدیکی قابل قبولی بین نتایج دیده شد. به عنوان مثال،

۵٪ بود؛ در حالی که تفاوت این سرعت‌ها با سرعت موج عرضی در صفحه $X-Y$ در حدود ۱۰٪ می‌باشد. با این حال، مشاهده می‌شود که در نمونه‌های ۷ و ۸ این سه سرعت نزدیک‌ترین مقادیر را به هم داشته‌اند که دلیل آن می‌تواند عدم وجود عیوب ساختاری و اتصال موثر لایه‌ها به هم باشد.



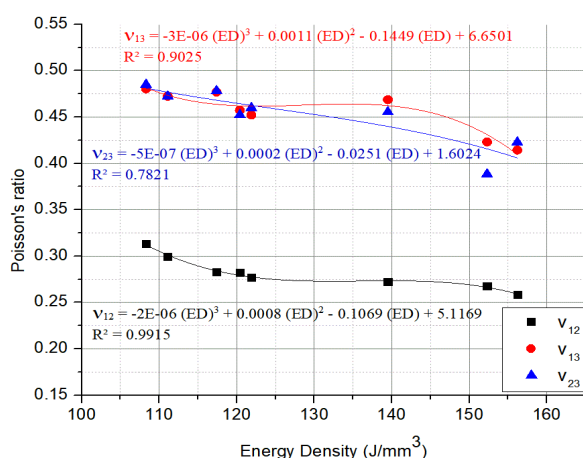
شکل ۵- رابطه بین چگالی و سرعت موج عرضی در صفحات اصلی

در رابطه با سرعت‌های موج طولی در راستاهای ۴۵ درجه، با افزایش چگالی انرژی، مقادیر سرعت‌ها در هر سه راستا افزایش یافته است؛ هرچند این افزایش در راستاهای گوناگون درخور افت و خیز نیز شده است (شکل ۶). با این حال، مشاهده می‌شود سرعت در راستای $X-Y$ بیشترین مقدار را داشته، ولی در کل این اختلاف‌ها از کمتر از اختلاف سرعت‌های موج طولی در راستاهای اصلی بوده و از ۲٪ تجاوز نکرده است.



شکل ۶- رابطه بین چگالی و سرعت موج طولی در راستاهای ۴۵ درجه

شکل (۱۰) نشان دهنده رابطه ضرایب پواسون در صفحات اصلی با چگالی انرژی می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش چگالی انرژی و طبعاً چگالی جرمی، میزان تداخل نمونه‌ها کاهش یافته که این امر موجب شده است که میزان ضریب پواسون در هر سه صفحه اصلی کاهش یابد. اثبات این پدیده به صورت عددی در مرجع [۴۰] آمده است. از طرف دیگر مشاهده می‌شود ضریب پواسون در صفحه X-Y کمتر از دو صفحه دیگر است؛ چرا که در مورد V_{12} ، نیرویه موازات صفحات ساخت اعمال شده و کرنش جانبی در صفحه X-Y به دلیل کشش‌ها و اصطکاک بین لایه‌ای کمترین مقدار را دارا می‌باشد. این مسئله، پیشتر در نمونه‌های کامپوزیتی دیده شده است [۱۱]. همچنین با توجه به فرض ارتوتروپیک بودن نمونه‌ها، مشاهده می‌شود ضریب پواسون در دو صفحه X-Z و Y-Z اندکی متفاوت هستند [۳۸]. در دو صفحه X-Z و Y-Z مقادیر ضرایب پواسون نسبتاً بالا بوده و به مرز بالایی مقدار مورد انتظار برای فلزات (مقدار ۰/۵) نزدیک شده و به مواد متخلخل و کامپوزیت‌ها گرایش پیدا کرده است [۵]. به همین دلیل نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه و بررسی تاثیر میزان تخلخل بر روی ضرایب پواسون حس می‌شود.



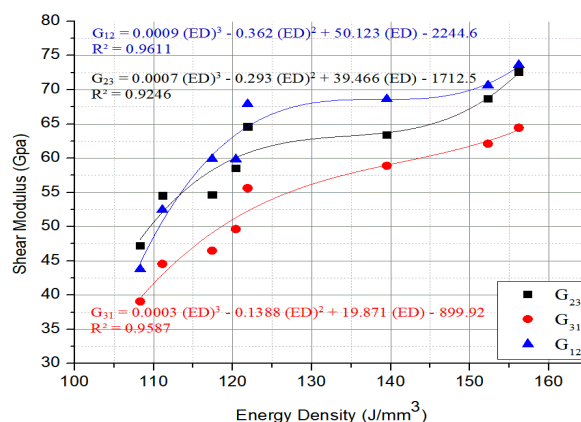
شکل ۱۰- رابطه بین چگالی انرژی و ضریب پواسون در صفحات اصلی

با توجه به نتایج بدست آمده، فرض ارتوتروپیک بودن نمونه‌ها صحیح بوده و کاربردی می‌باشد. دلیل این انحراف از ساختار همسانگرد صفحه‌ای به توزیع غیریکنواخت عیوب ساختاری و میزان پایداری حوضچه مذاب^۱ در طی فرایند ساخت باز می‌گردد.

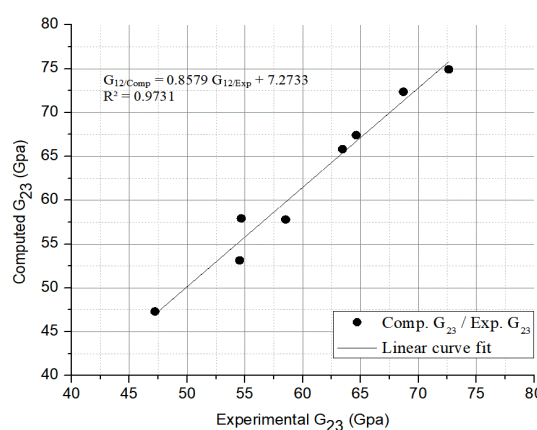
^۱Melt pool

پارامترهای انتخاب شده برای نمونه شماره ۵، مشابه پارامترهای مرجع [۳۹] می‌باشد و نتایج بدست آمده از آزمون کشش این نمونه در مرجع ذکر شده، مدول یانگ میانگین ۱۷۵ Gpa را در راستای عمود بر جهت ساخت گزارش کرده که با نتایج بدست آمده در این مقاله مطابقت دارد.

شکل (۸) رابطه بین مدول برشی در صفحات اصلی را با چگالی انرژی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود، کمترین میزان مدول برشی در صفحه X-Z تجربه شده است. این نتیجه از روی شکل (۶) که سرعت‌های موج طولی در راستاهای ۴۵ درجه را نشان می‌داد نیز قابل پیش‌بینی بود. علاوه بر این، این مقادیر از روی روابط (۵) نیز قابل استخراج هستند. به عنوان نمونه، محاسبات برای G_{23} از روی ثوابت الاستیک دیگر تعیین شده و با مقادیر بدست آمده از روی اندازه‌گیری سرعت‌ها در شکل (۹) مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ماکزیمم خطای حاصل شده در حدود ۰/۵٪ است که دقت اندازه‌گیری سرعت‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۸- رابطه بین چگالی انرژی و مدول برشی در صفحات اصلی



شکل ۹- نسبت G_{23} محاسبه شده به G_{23} تجربی

- Processing Tech. 249, (2017), pp. 255 – 263. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.042>.
- [4] Y. Kok, X. P. Tan, P. Wang, M. L. S. Nai, N. H. Loh, E. Liu, S. B. Tor, "Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review", *Materials and Design* 139, (2018), pp. 565 – 586. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.021>
- [5] L. Hitzler, J. Hirsch, B. Heine, M. Merkel, W. Hall, A. Öchsner, "On the Anisotropic Mechanical Properties of Selective Laser-Melted Stainless Steel", *Materials* 10, (2017), 1136; doi:10.3390/ma10101136.
- [6] M. M. Jalili, A. S. Pirayeshfar, S. Y. Mousavi, "Non-Destructive Acoustic Test (NDAT) to Determine Elastic Modulus of Polymeric Composites", in: EWGAE 2010, Vienna, 8th to 10th September.
- [7] M. Alfano, L. Pagnotta, "Determining the elastic constants of isotropic materials by modal vibration testing of rectangular thin plates", *Journal of Sound and Vibration* Volume 293, Issues 1–2, (2006), pp. 426 – 439. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.10.021>
- [8] P. S. Frederiksen, "Experimental Procedure and Results for the Identification of Elastic Constants of Thick Orthotropic Plates." *Journal of Composite Materials*, vol. 31, no. 4, (1997), pp. 360 – 382, doi:10.1177/002199839703100403.
- [9] W. C. Van Buskirk, S. C. Cowin, R. N. Ward, "Ultrasonic Measurement of Orthotropic Elastic Constants of Bovine Femoral Bone", *Journal of Biomechanical Engineering* Vol. 103, (1981), pp. 67 – 72. doi:10.1115/1.3138262
- [10] J. J. Liao, T., -B. Hu, C. -W. Chang, "Determination of Dynamic Elastic Constants of Transversely Isotropic Rocks Using a Single Cylindrical Specimen", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 34, No. 7, (1997), pp. 1045 – 1054. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)90198-2](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)90198-2)
- [11] S. Mistou, M. Karama, "Determination of the Elastic Properties of Composite Materials by Tensile Testing and Ultrasound Measurement", *Journal of Composite Materials*, vol. 34, No. 20, (2000), pp. 1696 – 1709. <https://doi.org/10.1106/UY4R-FG3H-HKGW-UD3Q>
- [12] A. Amado-Becker, J. Ramos-Grez, M. J. Yañez, Y. Vargas, L. Gaete, "Elastic tensor stiffness coefficients for SLS Nylon 12 under different degrees of densification as measured by ultrasonic technique", *Rapid Prototyping Journal* 14/5 (2008), pp. 260 – 270, DOI 10.1108/13552540810907929.
- [13] L. B., Malefane, W. B. du Preez, M., Maringa, "Testing for homogeneity and orthotropy of Ti6Al4V (ELI) parts built by Direct Metal Laser Sintering", in: 17th Annual Conference of the Rapid Product Development Association of South Africa, 2016.
- [14] D. R. Foster, M. J. Dapino, S. S. Babu, "Elastic constants of Ultrasonic Additive Manufactured AL 3003-H18", *Ultrasonics* 53, (2013), pp. 211 – 218. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.06.002>
- [15] M. Mah, D. R. Schmitt, "Determination of the complete elastic stiffnesses from ultrasonic phase velocity measurements", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, NO. B1, 2016, (2003). <https://doi.org/10.1029/2001JB001586>
- [16] R. C. K. Wong, D. R. Schmitt, D. Collis, R. Gautam, "Inherent transversely isotropic elastic parameters of over-consolidated shale measured by ultrasonic waves and their comparison with static and acoustic in situ log measurements", *Journal of Geophysics and Engineering* 5,

۵- نتیجه گیری

هشت نمونه از جنس اینکل ۶۲۵ به روش DMLS با پارامترهای مختلف ساخته شد و به کمک روش غیرمخرب فراصوت تماسی، سرعت امواج فراصوت در راستاهای اصلی و راستاهای ۴۵ درجه و همچنین ثوابت الاستیکی و چگالی جرمی نمونه‌ها مشخص گردید. نتایج نشان دادند که مقدار چگالی جرمی در نمونه‌ها متاثر از چگالی انرژی می‌باشد؛ هرچند مطالعات وسیع‌تری برای مشخص شدن تاثیر مجزای هر پارامتر بر روی چگالی جرمی لازم است. رابطه بین سرعت امواج طولی و عرضی در راستاهای اصلی و سرعت موج طولی در راستاهای ۴۵ درجه با چگالی انرژی مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی، سرعت انتشار امواج فراصوت با افزایش چگالی انرژی در محدوده ۱۰۸ تا ۱۵۶ ژول بر میلی‌متر مکعب افزایش یافت. مدول یانگ در دو راستای X و Y که عمود بر جهت ساخت بودند، حدود ۱/۲ برابر مدول یانگ در جهت ساخت بدست آمدند. مدول برشی در سه صفحه اصلی بدست آمد و به عنوان نمونه در یک صفحه به کمک روابط نیز محاسبه شد. مشاهده شد در صفحه X-Z مدول برشی کمترین مقدار را برای تمامی نمونه‌ها داشت. در رابطه با ضرایب پواسون، مشاهده شد ضرایب پواسوندر نمونه‌ها رفتاری مشابه کامپوزیت‌ها نشان داده و ν_{12} مقدار کمتری از دو ثابت ν_{31} و ν_{23} دارند؛ هرچند مطالعات بیشتری بر روی ضرایب پواسون و مقادیر آنها لازم است. در نتیجه، روش فراصوت پالس-اکو تماسی قادر به استخراج ثوابت الاستیکی مدول یانگ، مدول برشی و ضرایب پواسون در راستاهای اصلی را در نمونه‌های تولید شده به روش افزایشی را دارا بوده و از دقت قابل قبولی برخوردار است.

۶- منابع

- [1] S. Pal, N. Gubeljak, R. Hudak, G. Lojen, V. Rajtukova, J. Predan, V. Kokol, I. Drstvensek, "Tensile properties of selective laser melting products affected by building orientation and energy density", *Materials Science and Engineering: A*, Volume 743, (2019), pp. 637 – 647. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.130>
- [2] J. A. Gonzalez, J. Mireles, S. W. Stafford, M. A. Perez, C. A. Terrazas, R. B. Wicker, "Characterization of Inconel 625 fabricated using powder-bed-based additive manufacturing technologies", *Journal of Materials Processing Tech.* 264, (2019), pp. 200 – 210. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.031>
- [3] E. Liverani, S. Toschi, L. Ceschini, A. Fortunato, "Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel", *Journal of Materials*

- [30] H. Shipley, D. McDonnell, M. Culleton, R. Coull, R. Lupoi, G. O'Donnell, D. Trimble, "Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: A review", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 128, (2018), pp. 1 – 20. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2018.01.003>
- [31] *Metals Handbook*, Vol.1 - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM International 10th Ed. 1990.
- [32] M. A. Anam, D. Pal, B. Stucker, "Modeling and Experimental validation of Nickel-based super alloy (Inconel 625) made using Selective Laser Melting", in: *Proceeding of the 24th Annual International Solid Free form Fabrication Symposium-An Additive Manufacturing Conference*, Austin, TX, USA, (2013), pp. 463–473. DOI: 10.13140/2.1.4009.1201
- [33] L. E. Criales, Y. M. Arisoy, B. Lane, S. Moylan, A. Donmez, T. Özel, "Laser powder bed fusion of nickel alloy 625: Experimental investigations of effects of process parameters on melt pool size and shape with spatter analysis", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 121, (2017), pp. 22–36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.03.004>
- [34] X. Chen, D. R. Schmitt, J. A. Kessler, J. Evans, R. Kofman, "Empirical relations between ultrasonic P-wave velocity, porosity and uniaxial compressive strength", *CSEG RECORDER*, VOL. 40 NO. 05, MAY 2015, pp. 24 – 29.
- [35] B. Chawre, "Correlations between ultrasonic pulse wave velocities and rock properties of quartz-mica schist", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volume 10, Issue 3, June 2018, pp. 594 – 602. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.01.006>
- [36] A. V. Manoylov, F. M. Borodich, H. P. Evans, "Modelling of elastic properties of sintered porous materials", *Proceedings of the Royal Society A* 469: 20120689, (2013). <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2012.0689>
- [37] H. Gong, K. Rafi, H. Gu, G. D. Janaki Ram, T. Starr, B. Stucker, "Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by selective laser melting and electron beam melting", *Mater. Des.* 86, (2015), pp. 545 – 554. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.147>
- [38] J. Bräunig, T. Töppel, B. Müller, M. Burkhardt, T. Hipke, W. –G. Drossel, "Advanced Material Studies for Additive Manufacturing in terms of Future Gear Application", *Advances in Mechanical Engineering* Volume 2014, 10 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/741083>
- [39] C. U. Brown, G. Jacob, M. Stoudt, S. Moylan, J. Slotwinski, A. Donmez, "Interlaboratory Study for Nickel Alloy 625 Made by Laser Powder Bed Fusion to Quantify Mechanical Property Variability", *Journal of Materials Engineering and Performance* Volume 25, Issue 8, (2016), pp. 3390 – 3397. <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2169-2>
- [40] M. Arnold, A. R. Boccaccini, G. Ondracek, "Prediction of the Poisson's ratio of porous materials", *Journal of Materials Science*, Volume 31, Issue 6, (1996), pp. 1643 – 1646. <https://doi.org/10.1007/BF00357876>
- (2008), pp. 103 – 117. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/5/1/011>
- [17] R. Gonçalves, M. G. Júnior, I. M. Lopes, "Determining the Concrete Stiffness Matrix through Ultrasonic Testing", *Eng. Agric., Jaboticabal*, v.31, n.3, (2011), pp.427 – 437. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162011000300003>
- [18] R. Longo, T. Delaunay, D. Laux, M. El Mouridi, O. Arnould, E. Le Clézio, "Wood elastic characterization from a single sample by resonant ultrasound spectroscopy", *Ultrasonics* 52, (2012), pp. 971 – 974. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.08.006>
- [19] T. Svitek, V. Vavryčuk, T. Lokajíček, M. Petružálek, "Determination of elastic anisotropy of rocks from P- and S-wave velocities: numerical modelling and lab measurements", *Geophysical Journal International* 199, (2014), pp. 1682–1697. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu332>
- [20] M. Kersemans, A. Martens, N. Lammens, K. Van Den Abeele, J. Degrieck, F. Zastavnik, L. Pyl, H. Sol, W. Van Paepegem, "Identification of the Elastic Properties of Isotropic and Orthotropic Thin-Plate Materials with the Pulsed Ultrasonic Polar Scan", *Experimental Mechanics* 54, (2014), pp.1121 – 1132. DOI 10.1007/s11340-014-9861-7.
- [21] S. Z. Khan, T. M. Khan, Y. F. Joya, M. A. Khan, S. Ahmed, A. Shah, "Assessment of material properties of AISI 316L stainless steel using non-destructive testing", *Nondestructive Testing and Evaluation*, V. XX, No. X, (2015), pp. 1–11. <http://dx.doi.org/10.1080/10589759.2015.1121265>
- [22] E. Hu, W. Wang, "The Elastic Constants Measurement of Metal Alloy by Using Ultrasonic Nondestructive Method at Different Temperature", *Mathematical Problems in Engineering* Volume 2016, Article ID 6762076, 7 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6762076>
- [23] J. Crespo, J. R. Aira, C. Vázquez, M. Guaita, "Comparative Analysis of the Elastic Constants Measured via Conventional, Ultrasound, and 3-D Digital Image Correlation Methods in *Eucalyptus globulus* Labill", *BioResources* 12 (2), 2017, pp. 3728 – 3743.
- [24] Y. Zhan, C. Liu, X. Kong, Y. Li, "Measurement of fiber reinforced composite engineering constants with laser ultrasonic", *Applied Acoustics* 139 (2018), pp. 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.04.036>
- [25] A. Shukla, "Determination of elastic constants of Inconel-625 superalloy, using laser-based ultrasonic", *Journal of Theoretical and Applied Physics* 13, (2019), pp. 49 – 54. <https://doi.org/10.1007/s40094-018-0311-2>
- [26] D. A. P. Paterson, W. Ijomah J. F. C. Windmill, "Elastic constant determination of unidirectional composite via ultrasonic bulk wave through transmission measurements: A review", *Progress in Materials Science*, Volume 97, August 2018, pp. 1 – 37. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.04.001>
- [27] W. C. Van Buskirk, S. C. Cowin, R. Carter Jr, "A theory of acoustic measurement of the elastic constants of a general anisotropic solid", *Journal of Materials Science* 21, (1986), pp. 2759 – 2762, DOI 10.1007/BF00551484.
- [28] J. Summerscales, "The bulk modulus of carbon fibers", *Journal of Materials Science Letters* 19, (2000), pp. 15 – 16. <https://doi.org/10.1023/A:1006731210592>
- [29] EOS Nickel Alloy IN625 Material Data Sheet. Electro Optical Systems. https://dmlstechnology.com/images/pdf/EOS_NickelAlloy_IN625.pdf