



ISAV2022

دوازدهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات

تهران - ایران ۲۳ و ۲۴ آذر ماه ۱۴۰۱



بررسی اثر جنس پلیمر و پارامترهای ساخت قطعات ساخت افزایشی بر روی خواص الاستیک اندازه‌گیری شده به روش آزمون فراصوتی

علیرضا باقری‌بمی*^ا، فرهنگ هنرور^ب

^ا ایران، تهران، میدان ونک، خیابان ملاصدرا، خیابان پردیس پلاک ۷، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، مهندسی مکانیک، کد پستی ۱۹۹۱۹۴۳۳۴۴، دانشجوی دکتری.

^ب ایران، تهران، میدان ونک، خیابان ملاصدرا، خیابان پردیس پلاک ۷، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، مهندسی مکانیک، کد پستی ۱۹۹۱۹۴۳۳۴۴، استاد.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: A.BAGHERI.BAMI@EMAIL.KNTU.AC.IR

چکیده

امروزه روش ساخت افزایشی برای ساخت قطعات به سرعت در حال توسعه است. اطلاع از خواص مکانیکی قطعاتی که از این فرایند تولیدی به دست می‌آیند، نیز بسیار با اهمیت است. در این مقاله، خواص الاستیک و خصوصیات آکوستیک دو نوع ماده پلیمری بررسی خواهد شد. یکی از روش‌های اندازه‌گیری خواص الاستیک قطعات روش آزمون غیرمخرب فراصوتی است. تغییر در پارامترهای ساخت، از جمله جنس قطعه، سرعت لایه‌گذاری و ضخامت لایه بر روی خواص الاستیک قطعه ساخته شده مؤثر است. از این رو، تأثیرات تغییرات این پارامترها بر روی خواص نهایی قطعات ساخته شده بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر این پارامترها، خواص الاستیک و آکوستیک با گرفتن سیگنال‌های فراصوتی قطعات تغییرات زیادی خواهد داشت. چهار نمونه که دو نمونه آنها از جنس ABS و دو نمونه از جنس PLA استفاده شد. همچنین، از دو ضخامت لایه و سرعت لایه‌گذاری استفاده شد. ضرایب الاستیک با تانسور اورتوتروپیک برای قطعات ناهمسانگرد و تضعیف موج برای جهت‌های مختلف محاسبه شد.

کلمات کلیدی: ساخت افزایشی؛ آزمون فراصوتی؛ خواص الاستیک؛ خواص آکوستیک.

۱- مقدمه

ساخت افزایشی یکی از روش‌های نوین ساخت قطعات است. در این روش ساخت با قراردادن لایه‌های مواد بر روی هم، محصول نهایی ساخته می‌شود. در بسیاری از کاربردها، اطلاع از خواص مکانیکی قطعات از اهمیت بسزایی برخوردار است. یکی از روش‌های مؤثر برای اندازه‌گیری خواص الاستیک قطعات، روش آزمون غیرمخرب فراصوتی است [۱].

ریچارد لیوینگر^۱ [۲] و همکاران در مطالعاتشان خواص الاستیک نمونه‌های پلیمری از جنس ورو وایت پلاس^۲ را با استفاده از معادلات کریستوفل و روش آزمون فراصوتی بررسی کردند. آنها سرعت امواج را اندازه‌گیری کردند و با استفاده از آن به محاسبه ضرایب الاستیک پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که ضرایب الاستیک در راستای لایه‌گذاری با دو راستای دیگر متفاوت است؛ ولی در دو راستای دیگر، ضرایب الاستیک به هم نزدیک بود. آنها سپس با توجه به ناهمسانگرد بودن قطعه، تضعیف موج در هر راستا را اندازه‌گیری و با هم مقایسه کردند. لونگ هوانگ^۳ [۳] و همکاران نیز در مقاله‌شان به بررسی خواص الاستیک قطعات پلیمری ساخته‌شده با استفاده از روش رسوبی ذوبی^۴ پرداختند. آنها از قطعات پلاستیک گرم‌نرم از نوع اکریلیک بوتادین استرین^۵ استفاده و در دو حالت خشک و اشباع‌شده در آب، سرعت موج و چگالی قطعات را اندازه‌گیری کردند. نتایج آنها نشان داد که سرعت موج طولی در این مواد تقریباً دو برابر سرعت موج عرضی است. آنها همچنین تضعیف موج را به روش پارامتر لگاریتمی بررسی کردند که نتایج به‌دست آمده نسبت به نمونه‌هایی که دیگر محققان گزارش کرده بودند، تضعیف ۶ دسی‌بل را نشان می‌داد. یی لینگ یپ^۶ [۴] و همکاران، خواص الاستیک قطعات ساخته‌شده از جنس PC-ABS با روش ساخت افزایشی را مورد بررسی قرار دادند. آنها در تحقیقات‌شان از دو نوع جهت‌دهی لایه‌گذاری ۰/۰ و ۹۰/۰ درجه برای ساخت قطعات استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده 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 مدول الاستیسیته در پی دارد. در تحقیق دیگری یی لینگ یپ [۵] و همکاران با استفاده از آزمون غیرمخرب فراصوتی به مطالعه خواص الاستیک قطعات تولیدشده با چاپگر سه‌بعدی و از جنس اکریلونیتریل استرین اکریلات^۷ پرداختند. نتایج به‌دست آمده 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 روش آزمون کشش داشت. اما، نتایج آزمون فراصوتی برای مدول یانگ به دلیل کرنش دینامیکی، مقادیر بالاتری از روش آزمون کشش استاتیکی داشت. یاقی جین^۸ [۶] و همکاران در پژوهشی خواص الاستیک ناهمسانگرد قطعات ساخت افزایشی را به صورت نقشه‌های دوبعدی ارائه دادند. آنها با طراحی و تولید قطعات ساخت افزایشی، نمونه‌ها را با زوایای الگوی چینش متفاوت ساختند. برای ساخت قطعات از ۵ نوع الگوی چینش با فواصل ۲۵ درجه استفاده شد. همچنین، آنها از دو نوع قطر شیپوره^۹ برای ساخت قطعات بهره بردند و اثر قطر شیپوره بر روی سرعت موج را نیز بررسی کردند. آنها از روش غوطه‌وری برای اندازه‌گیری سرعت موج طولی استفاده کردند و نمونه ساخته‌شده را با قطعه‌ای پلیمری که با روش فرایند تزریق پلاستیک ساخته شده بود، مقایسه کردند. نتایج نشان داد که به‌طور کلی سرعت موج عرضی با افزایش قطر شیپوره کاهش و متعاقب آن مدول برشی نیز کاهش می‌یابد. علاوه‌براین، نتایج آنها نشان داد که مقادیر مدول یانگ از آزمون کشش نیز با افزایش زاویه و افزایش قطر شیپوره کاهش می‌یابد.

در این مقاله، با استفاده از چاپگر سه‌بعدی قطعاتی را از دو نوع ماده پلیمری پلی لاکتیک اسید^{۱۰} و اکریلیک بوتادین استرین ساخته می‌شود و تغییرات خواص الاستیک آنها را بر اثر تغییر در پارامترهای مختلف ساخت بررسی خواهد شد.

۲- روش فرایند و مواد

خواص الاستیک مواد تابع قانون هوک^{۱۱} است. قانون هوک (معادله (۱)) ارتباط تنش و کرنش را به صورت خطی بیان می‌کند و تانسور الاستیسیته (معادله (۲)) این دو پارامتر را به هم مرتبط می‌سازد [۷]. تانسور الاستیسیته در معادله (۲) مربوط به یک ماده اورتوتروپیک با ۹ ثابت الاستیک مستقل است.

¹ Richard Livings

² VERO WITH PLUS

³ Long Huang

⁴ FDM: Fused Deposition Method

⁵ ABS: Acrylonitrile Butadiene Styrene

⁶ Yee Ling Yap

⁷ ASA: Acrylonitrile Styrene Acrylate

⁸ Yuaqi Jin

⁹ Nozzle

¹⁰ PLA: poly lactic acid

¹¹ Hook's law

$$\sigma_i = C_{ij} \cdot \varepsilon_j \quad (1)$$

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

همچنین، از معادله کریستوفل^{۱۲} (معادله (۳)) برای یافتن ضرایب الاستیک استفاده می شود [۸].

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

در معادله کریستوفل با مرتبط ساختن سرعت موج و چگالی قطعات می توان ضرایب الاستیک را حساب کرد. در عمل، با به کارگیری آزمون فراصوتی، زمان پرواز موج^{۱۳} از روی سیگنال فراصوتی در جهتی معین در قطعه به دست می آید و با استفاده از آن و داشتن ابعاد قطعه، سرعت موج در جهت مورد نظر محاسبه می شود. اطلاع از چگالی قطعات نیز برای محاسبه ضرایب الاستیک قطعه مورد نیاز است که با روش ارشمیدس^{۱۴} اندازه گیری می شود. اگر ساختار قطعه اورتوتروپیک^{۱۵} فرض شود (۹ ثابت الاستیک)، با وارون کردن تانسور الاستیسیته مقادیر مدول یانگ، مدول برشی و نسبت پواسون برای هر راستا محاسبه خواهد شد. معادلات (۴)، (۵) و (۶)، ضرایب الاستیک تانسور اورتوتروپیک حاصل از معادله کریستوفل را برای راستاهای مختلف به دست می آید.

$$C_{ii} = \rho \cdot V_{ii}^2, \{i = 1, 2, 3\} \quad (4)$$

$$C_{mm} = \rho \cdot V_{ij}^2, \{m = 4, 5, 6\}, \{i \neq j = 1, 2, 3\} \quad (5)$$

$$C_{ij} = \sqrt{(C_{ii} + C_{mm} - 2 \cdot \rho \cdot V_{ij/ij}^2) \cdot (C_{jj} + C_{mm} - 2 \cdot \rho \cdot V_{ij/ij}^2)} - C_{mm}, \quad (6)$$

$$\{m = 4, 5, 6\}, \{i \neq j = 1, 2, 3\}, \{C_{55} \propto C_{13}, C_{66} \propto C_{12}, C_{44} \propto C_{23}\}$$

با استفاده از چاپگر سه بعدی کریت بات مینی^{۱۶} ۲۰۰۰ قطعات معکب مربعی برش خورده به طول ضلع ۲۵ میلی متر از جنس های پلیمری ABS و PLA ساخته شد. برای مقایسه تأثیر فرایند ساخت بر روی ضرایب الاستیک و سایر خواص آکوستیک دو نمونه از هر جنس با استفاده از فرایند ساخت افزایشی FFF ساخته شد. پارامترهای ساخت این چهار قطعه در جدول (۱) داده شده است. طراحی قطعات با نرم افزار سالیدورکس^{۱۷} و کدهای دستوری قطعات برای ساخت در نرم افزار اسلایسر^{۱۸} است، آماده شد. برای

¹² Christoffel

¹³ TOF: Time of Flight

¹⁴ Archimedes

¹⁵ Orthotropic

¹⁶ Create bot mini-2000

¹⁷ Solid works

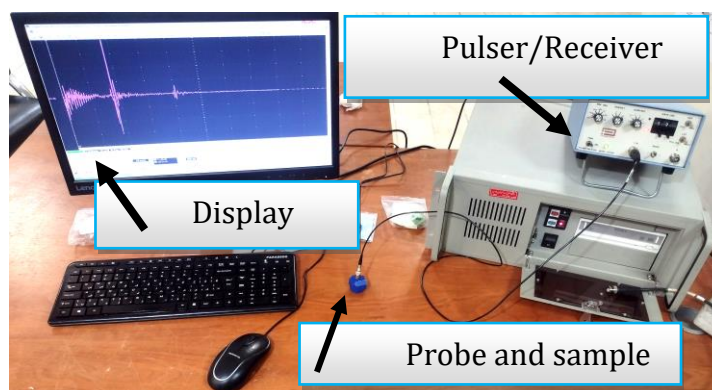
¹⁸ Slicer software

طراحی قطعه از پارامترهای ثابت دیگری نیز استفاده شد، زاویه درون لایه‌ها $45^\circ/45^\circ$ - درجه در نظر گرفته شد. همچنین، از عرض 0.4 میلی‌متر برای لایه‌ها و از قطر 0.4 میلی‌متر برای شیپوره^{۱۹} استفاده شد. با قراردادن کاوند فراصوتی روی قطعات سیگنال فراصوتی دریافت شد و با کمک روش تخمین زمانی^{۲۰} و همبستگی متقابل^{۲۱} و بر اساس استاندارد ASTM-E494، سرعت موج در قطعات به دست آمد [۹]. طول قطعات با کولیس با دقت 0.01 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. چگالی قطعات نیز با کمک استاندارد ASTM-D792، اندازه‌گیری شد [۱۰]. مقدار تضعیف موج که از خصوصیات آکوستیک قطعات است نیز با استاندارد ASTM-E664 بررسی شد [۱۱].

جدول ۱. پارامترهای نمونه‌سازی آزمایش‌ها

پارامتر	ماده مورد استفاده	سرعت لایه‌گذاری (mm/min)	ضخامت لایه‌گذاری (mm)
نمونه ۱	PLA	۲۰۰۰	۰.۲
نمونه ۲	ABS	۲۰۰۰	۰.۲
نمونه ۳	PLA	۳۰۰۰	۰.۳
نمونه ۴	ABS	۳۰۰۰	۰.۳

برای انجام اندازه‌گیری‌های فراصوتی از یک دستگاه فرستنده - گیرنده فراصوتی پانامتریکس^{۲۲} و کاوند فراصوتی ۵ مگاهرتزی برای موج عرضی و کاوند ۱۰ مگاهرتزی برای موج طولی به صورت تماسی استفاده شد (شکل (۱)). برای اندازه‌گیری تضعیف موج در قطعات نیز یک کاوند فراصوتی غوطه‌وری ۱ مگاهرتزی به کار گرفته شد. ابعاد قطعات طراحی شده در نرم‌افزار سالدورکس و قطعات ساخته شده، در شکل (۲) مشخص شد.



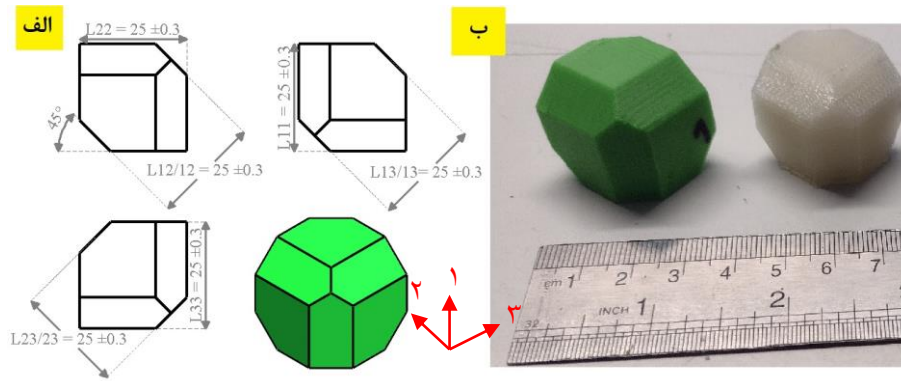
شکل ۱. تجهیزات مورد استفاده برای اندازه‌گیری سیگنال فراصوتی.

¹⁹ Nozzle

²⁰ TDE :Time Delay Estimate

²¹ Cross correlation

²² Panametrics



شکل ۲. الف) نمونه طراحی و ب) نمونه ساخته شده از دو جنس پلیمر برای آزمایش فراصوتی.

۳- نتایج

در جدول (۲) چگالی قطعات و در جدول (۳) طول آنها داده شده است. قطعات با استفاده از روش آزمون غیرمخرب فراصوتی و به وسیله کاوندهای تماسی ارزیابی شدند. سپس، با استفاده از سیگنال‌های فراصوتی دریافتی مقادیر سرعت موج از روابط کریستوفل به دست آمد که در جدول (۴) ارائه شده است. جداول (۵) و (۶) نیز ضرایب و ثوابت الاستیک را به ترتیب برای ساختار اورتوتروپیک ارائه می‌دهند.

جدول ۲. چگالی قطعات اندازه‌گیری شده

ردیف	نمونه ۱ (g/cm ³)	نمونه ۲ (g/cm ³)	نمونه ۳ (g/cm ³)	نمونه ۴ (g/cm ³)
مقدار	۱/۱۶ (±۰/۰۶)	۱/۰۰ (±۰/۰۲)	۱/۱۷ (±۰/۰۲)	۱/۰۱ (±۰/۰۷)

جدول ۳. طول ابعادی نمونه‌ها در راستاهای اصلی و شبه اصلی

راستا ردیف	راستای اصلی			راستای شبه اصلی		
	L _{۱۱} (mm)	L _{۲۲} (mm)	L _{۳۳} (mm)	L _{۱۲/۱۲} (mm)	L _{۱۳/۱۳} (mm)	L _{۲۳/۲۳} (mm)
نمونه ۱	۲۵/۵۲ (±۰/۰۲)	۲۴/۷۳ (±۰/۰۸)	۲۴/۹۴ (±۰/۰۸)	۲۵/۲۴ (±۰/۰۷)	۲۵/۴۱ (±۰/۰۹)	۲۴/۹۵ (±۰/۰۷)
نمونه ۲	۲۶/۶۳ (±۰/۰۱)	۲۵/۱۲ (±۰/۰۷)	۲۴/۹۵ (±۰/۰۵)	۲۴/۶۵ (±۰/۰۲)	۲۵/۷۵ (±۰/۰۱)	۲۵/۰۲ (±۰/۰۳)
نمونه ۳	۲۵/۴۵ (±۰/۰۲)	۲۴/۷۸ (±۰/۰۹)	۲۴/۶۴ (±۰/۰۵)	۲۴/۴۵ (±۰/۰۷)	۲۵/۱۵ (±۰/۰۸)	۲۴/۶۷ (±۰/۰۹)
نمونه ۴	۲۶/۱۷ (±۰/۰۵)	۲۴/۹۸ (±۰/۰۳)	۲۴/۸۲ (±۰/۰۳)	۲۴/۷۶ (±۰/۰۶)	۲۵/۵۸ (±۰/۰۵)	۲۴/۹۸ (±۰/۰۶)

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت لایه‌گذاری و ضخامت لایه‌گذاری مقادیر ثوابت الاستیک کاهش یافته است. مقادیر مدول‌های الاستیک ABS هم از PLA کمتر است. در شکل (۳) تضعیف ظاهری موج برای هر یک از راستاهای مختلف دو قطعه ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود، مقدار تضعیف قطعات ABS کمتر از PLA است.

جدول ۴. سرعت‌های اندازه‌گیری شده برای راستاهای مختلف قطعات

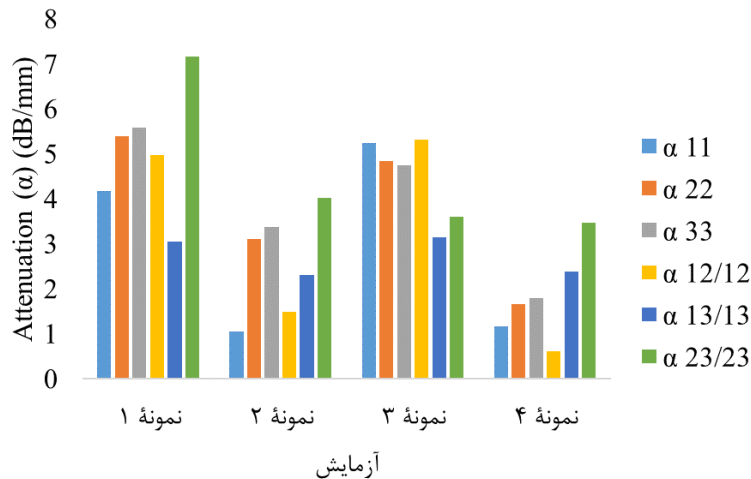
ردیف	سرعت موج طولی در راستای اصلی			سرعت موج طولی در راستای شبه‌اصلی			سرعت موج عرضی در راستای اصلی		
	V_{11} (m/s)	V_{22} (m/s)	V_{33} (m/s)	$V_{12/12}$ (m/s)	$V_{13/13}$ (m/s)	$V_{23/23}$ (m/s)	V_{66} (m/s)	V_{55} (m/s)	V_{44} (m/s)
نمونه ۱	۲۰۷۰(±۱۰)	۲۲۰۰(±۱۰)	۲۲۰۰(±۱۰)	۲۱۵۰(±۲۰)	۲۰۳۰(±۳۰)	۲۰۹۰(±۱۰)	۱۰۹۰(±۲۰)	۱۰۵۰(±۴۰)	۱۰۹۰(±۱۰)
نمونه ۲	۲۲۰۰(±۱۰)	۲۲۵۰(±۲۰)	۲۲۱۰(±۲۰)	۲۲۰۰(±۲۰)	۲۱۹۰(±۱۰)	۲۲۴۰(±۶۰)	۱۰۱۰(±۲۰)	۱۰۱۰(±۳۰)	۹۹۰(±۱۰)
نمونه ۳	۲۲۱۰(±۱۰)	۲۱۲۰(±۱۰)	۲۱۴۰(±۱۰)	۲۱۹۰(±۸۰)	۲۲۱۰(±۷۰)	۲۲۰۰(±۹۰)	۱۰۱۰(±۸۰)	۱۰۲۰(±۹۰)	۹۹۰(±۱۰)
نمونه ۴	۱۹۹۰(±۵۰)	۲۰۹۰(±۲۰)	۲۱۰۰(±۱۰)	۲۱۶۰(±۵۰)	۲۱۴۰(±۱۰)	۲۱۵۰(±۱۰)	۱۰۱۰(±۱۰)	۱۰۰۰(±۲۰)	۹۹۰(±۱۰)

جدول ۵. ضرایب الاستیک تانسور اورتوتروپیک

ضرایب الاستیک (GPa)	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴
C_{11}	۴/۹۷	۴/۸۴	۵/۷۱	۴/۰۰
C_{22}	۵/۱۶	۴/۹۷	۵/۲۵	۴/۴۱
C_{33}	۵/۶۲	۴/۸۸	۵/۳۵	۴/۴۵
C_{12}	۲/۰۷	۳/۱۶	۳/۵۴	۳/۱۵
C_{13}	۱/۵۹	۲/۶۸	۳/۴۵	۳/۰۰
C_{23}	۲/۰۵	۲/۷۱	۳/۵۲	۳/۲۸
C_{44}	۱/۳۷	۱/۰۲	۱/۱۹	۱/۰۳
C_{55}	۱/۲۷	۱/۰۲	۱/۲۱	۱/۰۱
C_{66}	۱/۳۷	۰/۹۸	۱/۱۴	۰/۹۸

جدول ۶. ثوابت الاستیک تانسور اورتوتروپیک

ثوابت الاستیک	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴
E_{11} (GPa)	۴/۰۶	۲/۵۴	۲/۹۴	۱/۵۴
E_{22} (GPa)	۴/۳۷	۲/۶۳	۲/۴۷	۱/۵۴
E_{33} (GPa)	۴/۶۹	۳/۰۷	۲/۶۴	۱/۷۶
G_{12} (GPa)	۱/۳۷	۱/۰۲	۱/۱۹	۱/۰۳
G_{23} (GPa)	۱/۲۷	۱/۰۲	۱/۲۱	۱/۰۱
G_{13} (GPa)	۱/۳۷	۰/۹۸	۱/۱۴	۰/۹۸
ν_{12}	۰/۳۲	۰/۴۹	۰/۳۶	۰/۴۷
ν_{21}	۰/۳۰	۰/۴۸	۰/۳۶	۰/۴۷
ν_{23}	۰/۲۹	۰/۳۲	۰/۴۲	۰/۴۷
ν_{32}	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۴۵	۰/۴۱
ν_{13}	۰/۱۹	۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۳۷
ν_{31}	۰/۱۷	۰/۲۸	۰/۳۶	۰/۳۲



شکل ۳. تضعیف ظاهری موج در نمونه‌ها و راستاهای مختلف برای هر نمونه.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله ضرایب الاستیک و تضعیف موج در قطعات ساخت افزایشی از دو جنس مختلف اندازه‌گیری شده است. از هر یک از دو قطعه، دو نمونه ساخته شد که هر نمونه با پارامترهای متفاوتی ساخته شده است. با اندازه‌گیری سرعت موج در جهات مختلف قطعه و با استفاده از معادله کریستوفل، ضرایب الاستیک و سایر خصوصیات آکوستیکی قطعات به دست آمد. مقادیر تضعیف ظاهری موج نشان می‌دهد که قطعه از جنس PLA نسبت به قطعه ABS تضعیف بیشتری دارد. همچنین، سرعت موج در PLA نسبت به ABS بیشتر است. با توجه به نمونه‌های بررسی شده، پارامترهای دیگر طراحی قطعات مانند سرعت لایه‌گذاری و ضخامت لایه‌گذاری نیز در اندازه سرعت موج و در نتیجه ضرایب الاستیک قطعه مؤثرند. براین اساس، افزایش ضخامت لایه و سرعت لایه‌گذاری باعث کاهش ضرایب الاستیک و تضعیف ظاهری که از دیگر خواص آکوستیک و الاستیک است، می‌شود.

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*, vol. 108. Elsevier B.V., Dec. 01, (2020).
2. R. Livings, V. Dayal, and D. Barnard, "Characterization of 3D rapid prototyped polymeric material by ultrasonic methods," in *AIP Conference Proceedings*, vol. 1650, pp. 807–816, (2015).
3. L. Huang, N. Dyaour, and R. R. Stewart, "Elastic properties of 3D-printed physical models: Fluid substitution observations in cracked media," in *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, vol. 34, pp. 3100–3104, (2015).
4. Y. L. Yap, W. Toh, R. Koneru, K. Lin, K. M. Yeoh, C. M. Lim, J. S. Lee, N. A. Plemping, R. Lin, T. Y. Ng, K. I. Chan, H. Guang, W. Y. B. Chan, S. S. Teong, and G. Zheng, "A non-destructive experimental-cum-numerical methodology for the characterization of 3D-printed materials—polycarbonate-acrylonitrile butadiene styrene (PC-ABS)," *Mech. Mater.*, vol. 132, pp. 121–133, May (2019).
5. Y. L. Yap, W. Toh, R. Koneru, Z. Y. Chua, K. Lin, K. M. Yeoh, C. M. Lim, J. S. Lee, N. A. Plemping, R. Lin, T. Y. Ng, K. I. Chan, H. Guang, W. Y. B. Chan, S. S. Teong, and G. Zheng, "Finite element analysis of 3D-Printed Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA) with Ultrasonic material characterization," *Int. J. Comput. Mater. Sci. Eng.*, vol. 8, no. 1, Mar. (2019).
6. Y. Jin, T. Yang, H. Heo, A. Krokhn, 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 (Basel)*, vol. 12, no. 9, (2020).

7. M. H. Sadd, *Elasticity: theory, applications, and numerics*. Academic Press, (2009).
8. J. L. Rose, *Ultrasonic guided waves in solid media*. Cambridge university press, (2014).
9. ASTM E494-20, "Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials," *Am. Soc. Test. Mater. Int.*, vol. 03.03, p. 14, (2021).
10. ASTM D792-20, "Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement," *Am. Soc. Test. Mater. Int.*, vol. 08.01, p. 6, (2020).
11. ASTM E664/E664M-10, "Standard Practice for the Measurement of the Apparent Attenuation of Longitudinal Ultrasonic Waves by Immersion Method," *Am. Soc. Test. Mater. Int.*, vol. 03.03, p. 3, (2015).