

Novel Approach for Simultaneous Measurement of Elastic Properties and Attenuation Coefficients of ABS Polymers Using Ultrasonic Scattering

Vajihehsadat Sajadi¹  | Farhang Honarvar¹  | Mohammadreza kari² 

1. NDE Lab., Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: honarvar@kntu.ac.ir
2. Medical Physics, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin 53705, USA. E-mail: mohammadrezakari@gmail.com

ABSTRACT

Article Information:

Research Article

Received 16 July 2024

Revised 06 Sep. 2024

Accepted 17 Oct. 2024

Keywords:

Wave Velocity,
Attenuation coefficient of
the polymer material,
Acoustic Scattering,
Inverse Problem,
Non-Destructive
Ultrasonic Testing.

In this paper, we present an innovative, non-destructive method for the simultaneous evaluation of the elastic properties and attenuation coefficients of polymeric filaments utilized in the Fused Deposition Modeling (FDM) additive manufacturing process. This method is grounded in the theory of acoustic wave scattering, where polymer filaments are immersed in water and subjected to acoustic waves. The scattered waves carry detailed and comprehensive information about the elastic properties and attenuation coefficients of the filaments. To extract this information, we employ an inverse method that involves comparing the resonance frequencies observed in the scattered signals with the predictions made by a theoretical model. Our data analysis process integrates advanced techniques, including deconvolution and genetic algorithms, which enable the precise and accurate measurement of critical parameters such as longitudinal and transverse velocities, density, and both longitudinal and transverse attenuation coefficients in a single experiment. The findings from our experiments reveal that, for the ABS filaments studied, the longitudinal and transverse velocities are 2280 m/s and 956 m/s, respectively, while the longitudinal and transverse attenuation coefficients are measured at $0.012ka$ and $0.024ka$ Nepers, respectively, with a filament density of 1006 kg/m^3 . These experimental results were validated through comparison with ultrasonic pulse-echo tests performed on ABS rods with a diameter of 25 mm, confirming the accuracy of our method. Specifically, the errors in measuring longitudinal and transverse velocities were found to be less than 2.5% and 13%, respectively, while the density measurement exhibited an impressively low error margin of just 0.2%. Furthermore, the error in the longitudinal attenuation coefficient at a frequency of 0.5 MHz was approximately 6%, and the error in the transverse attenuation coefficient at a frequency of 5 MHz was about 12%. This research not only demonstrates the accuracy and reliability of our proposed method but also contributes significantly to a deeper understanding of the properties and behavior of polymers used in additive manufacturing processes.

Cite this article: Sajadi, VS., Honarvar, F., & Kari, M. (2024). Novel Approach for Simultaneous Measurement of Elastic Properties and Attenuation Coefficients of ABS Polymers Using Ultrasonic Scattering. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (4), 86-98.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2024.473635.1151>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

روشی نوین برای اندازه‌گیری همزمان خواص کشسانی و ضرایب تضعیف پلیمرهای ABS با بهره‌گیری از پراکندگی فراصوتی

وجیهه‌سادات سجادی^۱ | فرهنگ هنرور^۱ | محمدرضا کاری^۲

۱. دانشکده مهندسی مکانیک، آزمایشگاه ارزیابی غیرمخرب، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، رایانامه: honarvar@kntu.ac.ir

۲. دانشکده فیزیک پزشکی، دانشگاه ویسکانسین - مدیسن، آمریکا، رایانامه: mohammadrezakari@gmail.com

چکیده:

در این مقاله، یک روش نوآورانه و غیرمخرب برای ارزیابی همزمان خواص کشسانی و ضرایب تضعیف رشته‌های پلیمری به‌کاررفته در فرایند ساخت افزایشی FDM معرفی شده است. این روش مبتنی بر نظریه پراکندگی امواج صوتی است که در آن رشته‌های پلیمری در آب غوطه‌ور شده و تحت تأثیر امواج صوتی قرار می‌گیرند. امواج پراکنده‌شده اطلاعات دقیقی درباره خواص کشسانی و ضرایب تضعیف این رشته‌ها فراهم می‌کنند. استخراج این اطلاعات با استفاده از یک روش معکوس انجام می‌شود که فرکانس‌های تشدید سیگنال‌های پراکنده را با پیش‌بینی‌های مدل نظری مقایسه می‌کند. تحلیل داده‌ها با بهره‌گیری از تکنیک‌های دیکانولوشن و الگوریتم ژنتیک، امکان اندازه‌گیری دقیق سرعت‌های طولی و عرضی، چگالی، و ضرایب تضعیف طولی و عرضی را تنها در یک آزمایش فراهم می‌سازد. نتایج حاکی از آن است که برای رشته‌های ABS مورد استفاده در این مقاله سرعت‌های طولی و عرضی به ترتیب ۲۲۸۰ و ۹۵۶ متربرثانیه و ضرایب تضعیف امواج طولی و عرضی به ترتیب برابر با $0.12ka$ و $0.24ka$ نپر و و چگالی 1006 کیلوگرم بر مترمکعب است. این نتایج با آزمون‌های فراصوتی بازتابی بر روی میله‌های ABS با قطر ۲۵ میلی‌متر مقایسه و دقت اندازه‌گیری‌ها تأیید شد، به طوری که سرعت‌های طولی و عرضی به ترتیب با خطای کمتر از $2/5$ و 13 درصد و چگالی با خطای $0/2$ درصد اندازه‌گیری شده است. همچنین، خطای ضرایب تضعیف امواج طولی در فرکانس $0/5$ مگاهرتز حدود ۶ درصد و خطای ضرایب تضعیف امواج عرضی در فرکانس ۵ مگاهرتز حدود ۱۲ درصد است. این پژوهش نشان می‌دهد که روش پیشنهادی نه تنها به صورت دقیق سرعت‌های طولی و عرضی، چگالی و ضرایب تضعیف پلیمرها را اندازه‌گیری می‌کند، بلکه می‌تواند درک عمیق‌تری از رفتار پلیمرهای مورد استفاده در ساخت افزایشی فراهم کند.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۵/۲۶

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۶/۱۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۷/۲۶

کلیدواژگان:

سرعت موج،

ضریب تضعیف ماده

پلیمری،

پراکندگی آکوستیک،

روش معکوس،

آزمون غیرمخرب فراصوتی.

استناد: سجادی، وجیهه‌سادات؛ هنرور، فرهنگ؛ و کاری، محمدرضا. (۱۴۰۲). روشی نوین برای اندازه‌گیری همزمان خواص کشسانی و ضرایب تضعیف پلیمرهای ABS با بهره‌گیری از پراکندگی فراصوتی. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳ (۴)، ۸۶-۹۸.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2024.473635.1151>



۱- مقدمه

فرایندهای تولید و طراحی محصولات در صنایع مختلف، به ویژه در حوزه ساخت افزایشی، کمک کند.

بسیاری از پژوهشگران خواص مواد پلیمری را با استفاده از روش‌های متنوع بررسی کرده‌اند که در ادامه برخی از آنها را توضیح می‌دهیم. یودین و همکاران [۱] یک پژوهش تجربی در مورد تأثیر ضخامت لایه، صفحه چاپ^۵ و جهت‌گیری بر خصوصیات مکانیکی قطعات چاپ‌شده سه‌بعدی انجام دادند. در این پژوهش آزمون‌های کشش و فشار برای ارزیابی مدول یانگ، استحکام تسلیم و استحکام شکست نمونه‌ها انجام شده است. پایلیو و همکاران [۲] نشان دادند که هیچ وابستگی بین فرکانس و سرعت فراصوتی در مواد پلیمری و کامپوزیت وجود ندارد، درحالی‌که تضعیف فراصوتی در این مواد به شدت به فرکانس وابسته است و با افزایش فرکانس، افزایش می‌یابد. فیاض‌بخش و همکاران [۳] تأثیر فواصل^۶ رشته‌ها را بر مقاومت کششی، مدول و کرنش شکست قطعات چاپ‌شده سه‌بعدی به روش FFF را با آزمایش کشش بررسی کردند و نتایج آزمایش‌ها را به‌عنوان داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی اجزای محدود و تأیید آنها استفاده کردند. کارابوتوو و همکاران [۴] برای اندازه‌گیری سرعت فراصوتی و میزان تضعیف در محدوده وسیعی از فرکانس از روش لیزر اپتواکوستیک بهره بردند. آنها نشان دادند که روابط کرامرز-کرونیک^۷ بین تضعیف و سرعت فاز در محدوده فرکانس ۱-۱۰ مگاهرتز بدون در نظر گرفتن مکانیسم خاصی از فروپاشی انرژی موج صوتی اولیه در طول انتشار معتبر است. کوینتانا و همکاران [۵] برای ارزیابی تأثیر فرایند تولید بر ویژگی‌های مکانیکی قطعات چاپ‌شده سه‌بعدی، آزمایشاتی از جمله تحلیل مکانیکی پویا (DMA) و آزمون فراصوتی انجام دادند. در این تحقیق، گرانول اولیه برای ساخت رشته‌های پلیمری ذوب و به‌عنوان ماده اصلی استفاده و تعدادی قطعه نیز به همان ابعاد چاپ شد. نتایج نشان داد مدول کشسانی قطعات چاپ‌شده کمی کمتر از ماده اصلی است و ضریب تانژانت تلفات ماده $(\tan \delta)$ ^۸ نیز برای ماده اصلی بیشتر از مواد چاپ‌شده است. هنرور و فراهانی [۶] روش‌های آزمایش فراصوتی که برای محصولات ساخت

این مقاله به بررسی دقیق اندازه‌گیری سرعت‌های طولی و عرضی-که مرتبط با خواص کشسانی ماده است-، ضرایب تضعیف طولی و عرضی و چگالی رشته‌های پلیمری ABS^۱ - که به عنوان ماده اولیه در روش‌های ساخت افزایشی استفاده می‌شوند - با استفاده از آزمون غیرمخرب فراصوتی می‌پردازد. مدل‌سازی رسوب ذوب‌شده^۲ (FDM) که به‌عنوان روش ساخت رشته‌ای ذوب‌شده^۳ (FFF) نیز شناخته می‌شود، می‌تواند برای کاربردهای مختلفی استفاده شود. با توجه به استفاده روزافزون از قطعات تولیدشده با روش ساخت افزایشی^۴ (AM)، تخمین ویژگی‌های مواد اولیه آنها نیز بسیار مهم است. اندازه‌گیری سرعت‌های طولی و عرضی، ضرایب تضعیف و چگالی در قطعات تولیدشده با روش‌های ساخت افزایشی بسیار حیاتی است، زیرا این ویژگی‌ها به‌طور مستقیم بر یکپارچگی مکانیکی و عملکرد آکوستیکی قطعات تأثیر می‌گذارند. اندازه‌گیری دقیق سرعت‌ها، خواص کشسانی و رفتار مکانیکی مواد را نشان می‌دهد که برای طراحی مطمئن و پیش‌بینی تحمل بار ضروری است. ضرایب تضعیف توانایی مواد در جذب انرژی صوتی و کاهش امواج آکوستیکی را نشان می‌دهند که برای کاهش صدا و بهبود کیفیت صوت در محیط‌های مختلف بسیار مهم است. چگالی نیز بر وزن و خواص مکانیکی تأثیر می‌گذارد و تضمین می‌کند که قطعات مطابق با نیازهای کاربردی و استحکام مورد نظر باشند. بنابراین، اندازه‌گیری دقیق این پارامترها برای بهینه‌سازی طراحی، بهبود عملکرد محصولات و رعایت استانداردهای صنعتی ضروری است. در این پژوهش، با استفاده از روش‌های پیشرفته اندازه‌گیری، امکان اندازه‌گیری همزمان سرعت‌های طولی و عرضی، ضرایب تضعیف طولی و عرضی و چگالی رشته‌های پلیمری تنها با یک آزمایش غیرمخرب فراهم شده است. نتایج حاصل از این پژوهش با مدل‌های تحلیلی پیشرفته مقایسه شده‌اند تا دقت اندازه‌گیری‌ها به حداکثر برسد و می‌تواند به توسعه روش‌های غیرمخرب برای ارزیابی خواص کشسانی، فیزیکی و آکوستیکی مواد پلیمری و بهبود

⁵ Printing Plane

⁶ gaps

⁷ Kramers-Kronig relations

⁸ the material loss tangent ($\tan \delta$)

¹ Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)

² Fused Deposition Modeling (FDM)

³ Fused filament fabrication (FFF)

⁴ Additive Manufacturing (AM)

بافت‌های نرم و استخوانی استفاده شوند. زاهاریا و همکاران [۱۴]، عملکرد جذب صوتی پنل‌های چاپ‌شده سه‌بعدی با در نظر گرفتن سه نوع ماده، سه تنظیم داخلی، و پنج چگالی مختلف را ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که پنل‌های با تنظیم مثلی و چگالی پرکردن ۴۰٪ و ۶۰٪ بهترین عملکرد صوتی را دارند و می‌توانند در صنایع هواپیما، خودرو و ساختمان استفاده شوند. از جمله پیشنهاد‌های این پژوهش استفاده از پنل‌های با تنظیم مثلی و مواد پلی‌لاکتیک اسیدی با چگالی پرکردن ۴۰٪ و ضخامت ۸ میلی‌متر است که دارای خواص جذب صوتی بالایی هستند. سیمونا ماتی و همکاران [۱۵]، تأثیر رشته‌های پلی‌لاکتیک‌اسید با سه قطر نازل مختلف و شش تنظیم داخلی متفاوت بر خواص صوتی پنل‌های جذب صدای ساخته‌شده به روش چاپ سه‌بعدی را بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که ویژگی‌های صوتی نمونه‌ها به شدت تحت تأثیر مواد استخراج شده، قطر نازل و تنظیمات داخلی قرار دارند. برخی از نمونه‌ها میزان بیشتری از جذب صوت و کاهش انتقال آن را نشان می‌دهند که می‌توانند در طراحی و ساخت سازه‌های صوتی اهمیت زیادی داشته باشند.

مقلله حاضر، یک رویکرد غیرمخرب برای اندازه‌گیری سرعت‌های طولی و عرضی، ضرایب تضعیف طولی و عرضی و چگالی رشته‌های پلیمری غوطه‌ور در آب با هدف نهایی تعیین خواص کشسانی و خواص آکوستیکی آنها از طریق تجزیه و تحلیل داده‌های پراکندگی صوتی معرفی می‌کند. این رویکرد شامل اندازه‌گیری طیف فشار پس‌زمینه نرمال‌شده تحلیلی، یعنی تابع شکل^{۱۱}، برای نمونه استوانه‌ای و تطبیق آن با طیف تجربی نمونه با استفاده از یک روش معکوس است. اگرچه روش‌هایی برای تعیین این ویژگی‌ها وجود دارد، اما اکثر آنها مخرب بوده و هیچ‌کدام از آنها قادر به اندازه‌گیری همزمان این پارامترها در یک آزمایش نیستند. این روش برای رشته‌های پلیمری مورد استفاده در فرایند FDM برای اندازه‌گیری سرعت‌های طولی و عرضی و ضرایب تضعیف طولی و عرضی موج و چگالی این رشته‌ها اعمال

افزایشی به کار گرفته شده، حین فرایند^۱ و بعداز آن^۲، را مرور کردند. جین و همکاران [۷] روش جدید آزمایش فراصوتی غوطه‌وری برای ارزیابی چگالی مواد چاپ‌شده با FDM را ارائه دادند. این روش اولین آزمایش غیرمخرب و غیرتماسی برای تعیین کیفیت قطعات چاپ سه‌بعدی FDM بود. چگالی مؤثر بررسی شده با مقادیر تحلیلی محاسبه‌شده توافق زیادی داشت. کانجی اونو [۸] تضعیف طولی فراصوتی مواد مهندسی شامل فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها، کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف، چوب و سنگ را به‌طور جامع ارزیابی کرد. این اندازه‌گیری‌ها با استفاده از دو روش آزمایشی قابل‌اعتماد انجام شده و نتایج آنها دسته‌بندی شده است. این مجموعه داده‌های تضعیف جدید در انتخاب مواد، طراحی و پروتکل‌های بازرسی غیرمخرب بسیار ارزشمند است. وی [۹] تضعیف فراصوتی امواج عرضی مواد مهندسی مختلف را نیز ارزیابی و جمع‌آوری کرد. مرادی و همکاران [۱۰] آزمایشات کششی را برای تعیین خواص مکانیکی قطعات ساخته‌شده از طریق فرآیند FDM انجام دادند. آنها خصوصیات مکانیکی مانند کشش^۳، تنش^۴، کشیدگی^۵، انرژي^۶ و مدول یانگ^۷ را به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفتند و اثر الگوهای پرکردن^۸ را روی این پارامترها بررسی کردند. تزال و همکاران [۱۱] تأثیر ضخامت لایه و جهت چاپ بر مقاومت ضربه‌ای پلاستیک‌های مهندسی، از جمله ABS، PLA، PET-G، و PC که با روش ساخت افزایشی تولید شده‌اند، را بررسی کردند. آنتینیو و همکاران [۱۲]، خواص آکوستیک رشته‌های ترموپلاستیک چاپ سه‌بعدی، از جمله ضریب تضعیف، سرعت صوت و امپدانس صوتی را با استفاده از روش‌های عبوری^۹ و بازتابی^{۱۰} بررسی کردند. ما و همکاران [۱۳] ویژگی‌های مکانیکی و تصویربرداری پلیمرهای چاپ سه‌بعدی (PLA، PA12، و LCR) را بررسی کردند. آنها نشان دادند این مواد با مدول کشسانی بالا (بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال)، برای شبیه‌سازی استخوان‌ها مناسب هستند. خواص صوتی این مواد با بافت واقعی تفاوت داشت، اما سرعت صوت نمونه‌ها نزدیک به سرعت موج در پوست انسان بود. بنابراین، مواد چاپ سه‌بعدی می‌توانند برای شبیه‌سازی

⁷ Young's modulus

⁸ infill-patterns (IPs)

⁹ transmission-through

¹⁰ pulse-echo

¹¹ Form function

¹ in situ

² offline

³ extension

⁴ stress

⁵ elongation

⁶ energy

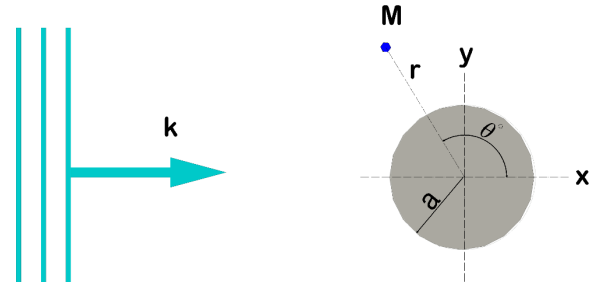
می‌شود.

۲- مدل تحلیلی

در این بخش، مدل ریاضی پراکندگی موج صوتی هارمونیک صفحه‌ای از یک استوانه الاستیک به اختصار ارائه می‌شود. در شکل ۱ یک موج آکوستیکی صفحه‌ای تک‌فرکانس که در فرکانس $\omega/2\pi$ به یک استوانه غوطه‌ور بی‌نهایت طولانی در زاویه α می‌تابد، نشان داده شده است. شعاع استوانه a و چگالی آن ρ و چگالی سیال اطراف نمونه ρ_w است. مسئله در یک سیستم مختصات استوانه‌ای (r, θ, z) حل می‌شود که در آن محور z با محور استوانه منطبق است. فشار p_i موج طولی صفحه‌ای در نقطه دلخواه M با مختصات (r, θ, z) مطابق با معادله [۱۶] است:

$$p_i = p_0 \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n i^n J_n(k_{\perp} r) \cos(n\theta) e^{i(k_{zz}z - \omega t)} \quad (1)$$

که در آن دامنه موج تابش، ε_n ضریب نیومن^۱ ($\varepsilon_0 = 1$ و $\varepsilon_n = 2$ برای $n \geq 1$) تابع بسل نوع اول از مرتبه n بردار موج، $k_z = k \sin \alpha$ ، $k_{\perp} = k \cos \alpha$ و r بردار موقعیت نقطه M است. علاوه بر این، $|k| = \omega/c_w$ تعریف می‌شود به طوری که ω فرکانس زاویه‌ای و c_w سرعت موج طولی در سیال اطراف استوانه است. موج پراکنده شده p_s در نقطه دلخواه M از معادله موج پیروی می‌کند و از معادله ۲ محاسبه می‌شود [۱۶]:



شکل ۱ هندسه مورد استفاده در روش تحلیلی

$$p_s = p_0 \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n i^n A_n H_n^{(1)}(k_{\perp} r) \cos(n\theta) e^{k_{zz}z} \quad (2)$$

در این معادله A_n ضرایب پراکندگی هستند که در [۱۶]

آمده است. میدان فشار پراکنده شده معمولاً در میدان دور ($r \gg a$) برای یک زاویه ثابت θ برای گستره‌ای از فرکانس محاسبه می‌شود. طیف دامنه میدان دور، که تابع فرم نامیده می‌شود، از معادله زیر به دست می‌آید [۱۷]:

$$f_{\infty}(\theta, ka) = \left(\frac{2r}{a}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{p_s}{p_0}\right) e^{-k_{\perp} r i} \quad (3)$$

تابع فرم کل به صورت مجموع مدهای نرمال تکی نوشته می‌شود:

$$f_{\infty}(\theta, ka) = \sum_{n=0}^{\infty} f_n(\theta, ka) \quad (4)$$

به طوری که مد نرمال برای هر n به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f_n(\theta, ka) = \frac{2}{\sqrt{i\pi k_{\perp} a}} \varepsilon_n A_n \cos(n\theta) \quad (5)$$

روش حل ارائه شده برای استوانه توپر همسانگرد عرضی غوطه‌ور با در نظر گرفتن روابط زیر، برای یک استوانه همسانگرد غوطه‌ور نیز با در نظر گرفتن روابط زیر قابل استفاده است:

$$c_{11} = c_{33} \text{ و } c_{12} = c_{13} \text{ و } c_{44} = (c_{11} - c_{12})/2 \quad (6)$$

با فرض مختلط بودن عدد موج، قسمت موهومی آن ویژگی‌های تضعیف ماده پلیمری را نشان می‌دهد. عدد موج طولی و موج عرضی مختلط \bar{k}_L و \bar{k}_T به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۸]:

$$\bar{k}_L = k \frac{c}{c_L} (1 - i\beta_L) \quad (7)$$

$$\bar{k}_T = k \frac{c}{c_T} (1 - i\beta_T) \quad (8)$$

که در آنها β_L و β_T ضرایب جذب با واحد نپر (β_L و $\beta_T \ll 1$) هستند. با در نظر گرفتن اعداد موج مختلط در معادلات، آرگومان‌های توابع بسل نیز مختلط خواهند شد [۱۹]. این ضرایبها به فرکانس وابسته هستند [۸،۹] و معمولاً به صورت عبارتهای خطی و توانی ظاهر می‌شوند [۸،۹]. قسمت‌های خطی، اغلب به عنوان عبارتهای ناشی از تضعیف ویسکوز شناخته می‌شوند و برای β_L و β_T به صورت روابط ۹ و ۱۰ نوشته می‌شوند [۸،۹].

¹ Neumann factor

$$\beta_L = C_d f \quad (9)$$

$$\beta_T = C_{dt} f \quad (10)$$

تشدید در آن وجود نداشته باشد، نیاز است [۱۸]. برای این منظور، از یک رشته تنگستن با قطر ۰/۱ میلی‌متر استفاده می‌شود. از آنجا که مقادیر ka برای رشته تنگستن در بازه فرکانسی مورد استفاده در آزمایش‌ها بسیار کوچک است، هیچ‌کدام از فرکانس‌های تشدید آن تحریک نمی‌شوند و طیف فرکانسی آن مطابق با شکل ۳-ا، در مقایسه با رشته پلیمری ABS در شکل ۳-ب، یکنواخت است.

برای حذف اثرات سیستم اندازه‌گیری، از معادله ۱۱ استفاده می‌شود [۱۸]:

$$|f_{\infty}^r| = \left| \frac{S(\omega)}{S'(\omega)} \right| \left(\frac{a'r}{r'a} \right)^{\frac{1}{2}} (e^{ik(r'\cos\alpha' - r\cos\alpha)}) |f_{\infty}^r| \quad (11)$$

در رابطه ۱۱، $S(\omega)$ طیف پراکندگی نمونه آزمایشگاهی و $S'(\omega)$ طیف فرکانسی رشته تنگستن است که به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری می‌شوند و $|f_{\infty}^r|$ تابع فرم تحلیلی حاصل از رشته تنگستن به‌عنوان استوانه مرجع است که از معادله ۱۲ به‌دست می‌آید [۱۸].

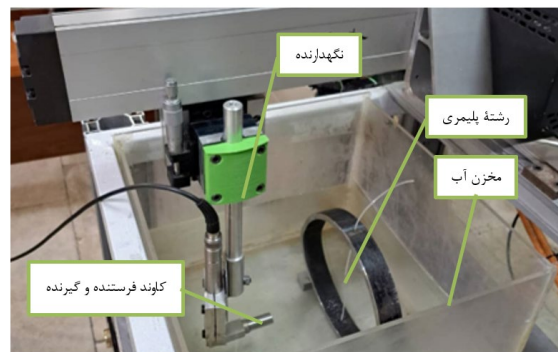
$$f_{\infty}^r = \left(\frac{2r'}{a'} \right)^{\frac{1}{2}} \left| \frac{P'_s(\omega)}{P_o(\omega)} \right| (e^{-ik(r'\cos\alpha')}) \quad (12)$$

در رابطه ۱۲، α' شعاع رشته تنگستن، $P_o(\omega)$ طیف فشار روی نمونه تنگستن در نقطه‌ای به مختصات r' و $P'_s(\omega)$ طیف پراکندگی رشته تنگستن هستند [۱۸].

که در آنها C_d و C_{dt} به ترتیب ثابت تضعیف ناشی از تضعیف امواج طولی و عرضی هستند. عبارت‌های توانی معمولاً از پراکندگی ریلی ناشی می‌شوند. برای بسیاری از مواد در محدوده فرکانس‌های رایج فراصوتی (از ۲۰ کیلوهرتز تا ۲۰ مگاهرتز)، روابط خطی کافی هستند [۸،۹]. از این‌رو، در این مقاله از عبارت‌های توانی صرف‌نظر شده است.

۳- روش آزمایشگاهی

برای اندازه‌گیری تابع فرم نمونه‌های استوانه‌ای از روش پالس کوتاه و جداسازی و شناسایی فرکانس‌های تشدید^۱ MIIR استفاده می‌شود [۲۰]. در MIIR، جسم هدف با یک پالس کوتاه که دوره تناوب آن نسبت به قطر هدف تقسیم بر سرعت صوت کوچک است، تحریک می‌شود [۲۰]. چیدمان آزمایش MIIR در شکل ۲ نشان داده شده است.

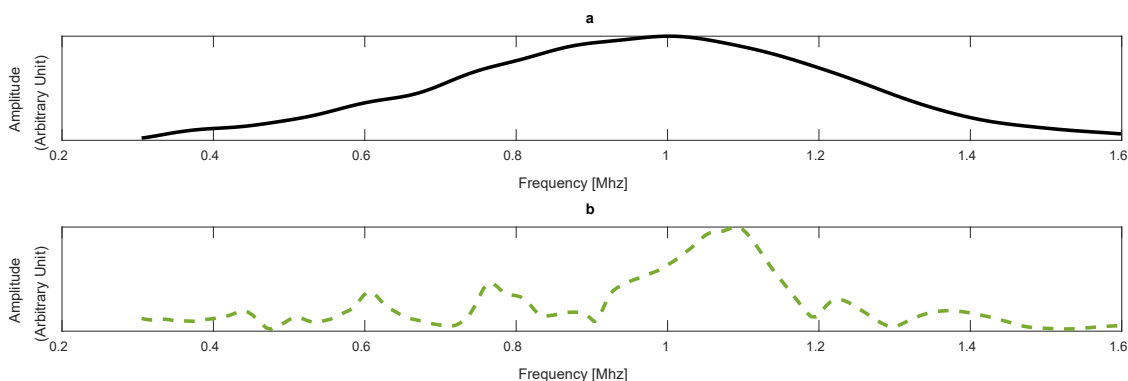


شکل ۲) چیدمان آزمایش رشته پلیمری

با گرفتن تبدیل فوریه سریع از اکوی برگشتی طیف فرکانسی به‌دست می‌آید. برای مقایسه تابع فرم تحلیلی و آزمایشگاهی باید اثر تراگذار فرستنده و گیرنده از آن حذف شود که اینکار با روش دی‌کانولوشن انجام می‌گیرد. برای تفکیک اثرات سیستم اندازه‌گیری به‌منظور دستیابی به تابع فرم آزمایشی، به یک طیف فرکانس مرجع که هیچ اثر

(MIIR)

¹ Method of Isolation and Identification of Resonances



شکل ۳) طیف فرکانسی تجربی (a) رشته تنگستن (b) رشته پلیمری ABS

مشخصات ماده پلیمری مورد استفاده در این مقاله در جدول ۱ آمده است. سیستم داده‌برداری استفاده‌شده در این تحقیق، شامل یک کارت آنالوگ به دیجیتال^۱ است که روی برد اصلی کامپیوتر نصب می‌شود. این کارت مدل CS14100-1M ساخت شرکت گج^۲ است. کارت از نوع ۱۴ بیتی، دارای فرکانس نمونه‌برداری (f_s) ۱۰۰ مگاسمپل بر ثانیه و نسبت سیگنال به نویز^۳ ۶۳ دسیبل است. کاوند فراصوتی که در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است کاوند غوطه‌وری دایروی با فرکانس مرکزی ۱ مگاهرتز و قطر ۱۲/۷ میلیمتر است. کاوند ۱ مگاهرتز دارای پهنای باند بین

۵۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلوهرتز است. در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد، قطر رشته پلیمری ABS ۱/۷۵ میلیمتر است. طول آن نیز برابر با ۳۰ سانتیمتر انتخاب شده است. طول نمونه‌ها به اندازه کافی بلند است تا اثرات لبه انتهایی به حداقل برسد. برای تحقق شرط انجام اندازه‌گیری در میدان دور [۲۲] و امکان استفاده از تابع فرم که در واقع میدان فشار پراکندگی در فاصله‌ای دور از استوانه است ($r > 10a$), در آزمایش‌های انجام‌شده کاوند فراصوتی در فاصله ۱۵ سانتیمتری از استوانه و دقیقاً در وسط آن قرار گرفته است.

جدول ۱) مشخصات مواد مورد استفاده در آزمایش

ماده	سرعت موج عرضی (m/s)	سرعت موج طولی (m/s)	قطر (mm)	نوع نمونه	چگالی (kg/m^3)
ABS	۹۴۴ [۲۱]	۲۲۷۰ [۲۱]	۱/۷۵	رشته	۱۰۰۴
آب	---	۱۴۸۰	---	---	۱۰۰۰

۴- نتایج و بحث

با روش پیشنهادی این مقاله، امکان اندازه‌گیری پنج مشخصه سرعت‌های طولی و عرضی موج، چگالی و ضرایب طولی و عرضی موج ماده پلیمری وجود دارد. این داده‌ها برای ارزیابی خواص کشسانی، فیزیکی و همچنین، خواص ماده در جذب و پراکندگی انرژی ضروری هستند. در این بخش از تحقیق، طیف فرکانسی آزمایشی و تابع فرم تحلیلی برای رشته پلیمری ABS ترسیم و با استفاده از یک الگوریتم

معکوس‌سازی بر مبنای الگوریتم ژنتیک هر ۵ پارامتر مذکور اندازه‌گیری می‌شوند. شایان ذکر است که عدد موج عددی مختلط در نظر گرفته شده که بخش موهومی آن نشان‌دهنده خواص تضعیف ماده ناشی از رفتار ویسکوالاستیک است [۸،۹]. با این وجود، به دلیل پیچیدگی‌های مدل‌سازی و با هدف ساده‌سازی تحلیل‌های اولیه، رفتار مکانیکی ماده به صورت الاستیک خطی فرض شده است. چراکه تنش‌ها و کرنش‌های مورد بررسی در

³ SNR

¹ A/D Card

² Gage

خطا مقادیر مناسب استفاده شده است. مقادیر اولیه به دست آمده عبارت است از:

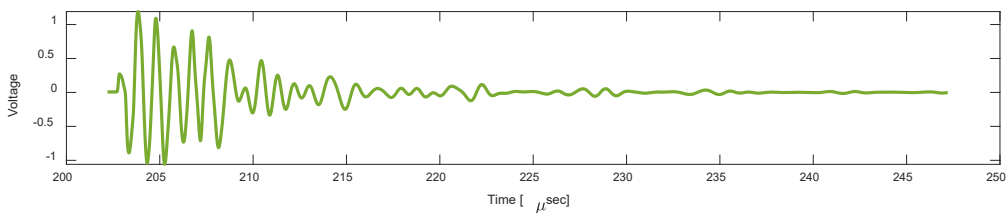
$$\beta_l = 0.014ka \quad (13)$$

$$\beta_s = 0.023ka \quad (14)$$

که در آن، β_l و β_s ضرایب تضعیف طولی و عرضی و واحد آنها نپرز است. مطابق با توضیحات بخش ۲، رابطه این ضرایب با فرکانس به صورت خطی در نظر گرفته شده است. همچنین، چگالی رشته پلیمری نیز به عنوان مجهول در نظر گرفته شده است. اگر چگالی آب را به عنوان چگالی مرجع در نظر بگیریم، در هربار اجرای الگوریتم معکوس سازی چگالی میله برابر با ضریبی از چگالی آب در نظر گرفته می شود. این نسبت چگالی (ρ_c/ρ_f) برای رشته پلیمری ABS از ۱ تا ۱/۰۱ انتخاب شده است.

۴-۲ نتایج آزمایشگاهی

نمونه رشته پلیمری ABS مطابق مشخصات جدول ۱ از نظر ظاهری و ابعادی بررسی و سپس آزمایش شد. شکل ۵ سیگنال بازگشتی از نمونه را در تابش عمود نشان می دهد. که در آن اکوی اول اکوی بازتابی^۱ ناشی از بازتابش از جسم صلب است و اکوهای دیگر که به دنبال اکوی اول ظاهر شده اند، به دلیل تشدید ایجاد شده توسط امواج سطحی است که رشته را احاطه کرده و امواج ایستاده تولید می کند [۱۶]. با گرفتن تبدیل فوریه سریع از کل سیگنال برگشتی طیف فرکانسی آزمایشگاهی به دست می آید.



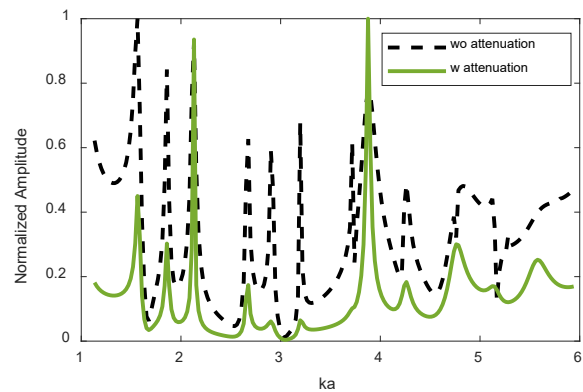
شکل ۵) سیگنال بازگشتی از رشته پلیمری ABS

محور افقی در شکل ۶ با توجه به پهنای باند کاوند ۱ مگاهرتز (۵۰۰ کیلوهرتز تا ۱.۵ مگاهرتز) مورد استفاده در اندازه گیری های تجربی انتخاب می شود.

محدوده ای قرار دارند که تأثیرات غیرخطی چندان محسوس نیستند. این فرض به دلیل محدودیت های محاسباتی و همچنین براساس نتایج برخی از تحقیقات قبلی که رفتار خطی را در شرایط مشابه تأیید کرده اند، اتخاذ شده است [۲۱].

۴-۱ نتایج تحلیلی

تابع فرم تحلیلی رشته ABS بدون و با در نظر گرفتن ضرایب تضعیف دلخواه در شکل ۴ نشان داده شده است. خواص مورد استفاده برای محاسبه تابع فرم در جدول ۱ آمده است. سرعت های عرضی و طولی در این جدول از مقادیر به دست آمده در [۲۱] استخراج شده است که به عنوان مقادیر اولیه این پارامترها در نظر گرفته شده است. و ضرایب تضعیف در این مرحله به دلخواه در نظر گرفته شده است.



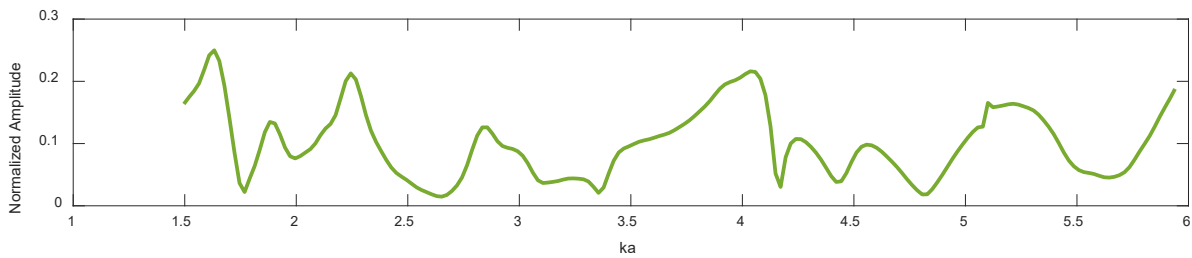
شکل ۴) تابع فرم تحلیلی برای رشته ABS بدون و با در نظر گرفتن تضعیف

برای تعیین مقادیر اولیه ضرایب تضعیف از روش سعی و

a

برای استخراج توابع فرم تجربی و حذف اثرات سیستم اندازه گیری از رشته تنگستن، که در بخش ۳ معرفی شد، استفاده شده است [۱۸]. طیف فرکانسی تجربی برای نمونه ABS در شکل ۶ ترسیم شده است. محدوده مقادیر ka

¹ Specular echo



شکل ۶) طیف فرکانسی تجربی رشته پلیمری ABS

یک کد متلب برای بهینه‌سازی پارامترهای سرعت‌های طولی و عرضی موج، چگالی و ضرایب تضعیف طولی و عرضی موج با استفاده از رویکرد الگوریتم ژنتیک [۲۳] نوشته شد. این فرایند با بارگیری داده‌های تجربی ذخیره‌شده در یک متغیر آغاز می‌شود. پارامترهای بهینه‌شده در جدول ۲ ارائه شده است.

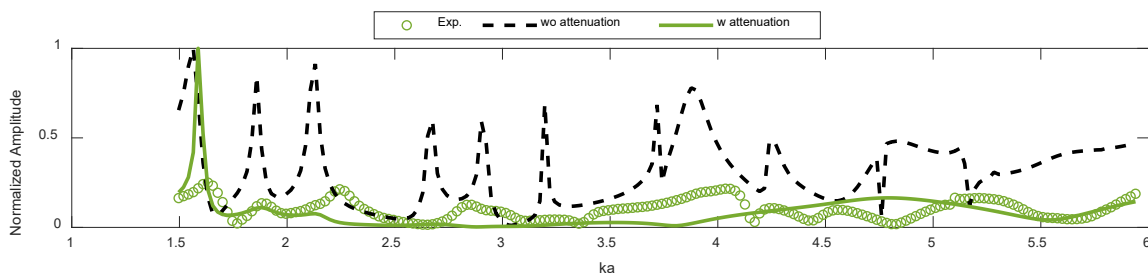
همچنین نمودارهای تجربی و تحلیلی با و بدون در نظر گرفتن تضعیف با استفاده از پارامترهای بهینه‌شده در شکل ۷ رسم شده است، به طوری که بهترین انطباق بین تابع فرم تحلیلی و آزمایشگاهی ایجاد شود. لازم به ذکر است که این انطباق در نقاط فرکانس‌های تشدید مدنظر است چراکه فرکانس‌های تشدید به طور مستقیم به این خواص وابسته هستند [۲۱].

همان‌طور که گفته شد، از یک روش معکوس برای تعیین سرعت طولی و عرضی موج، ضرایب تضعیف طولی و عرضی و چگالی استولنه‌ها با برازش توابع فرم تجربی آنها با توابع فرم تحلیلی استفاده می‌شود. این کار شامل در نظر گرفتن مقادیر اولیه‌ای برای این پارامترها است. الگوریتم محاسبه تابع فرم تحلیلی، فرض‌های اولیه را به تدریج اصلاح می‌کند تا زمانی که یک تکران از پیش تعریف‌شده به دست آید. تابع هدف مورد استفاده [۲۳] (مطابق با معادله ۱۳) اختلاف بین دامنه فرکانس‌های محاسبه‌شده از معادلات تحلیلی و اندازه‌گیری شده را به حداقل می‌رساند.

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^n \left[(|f_{\infty}|_i^{\text{theory}} - |f_{\infty}|_i^{\text{experiment}})^2 \right] \quad (13)$$

جدول ۲) مقادیر پارامترهای بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک

چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	تضعیف طولی (نپر)	تضعیف عرضی (نپر)	سرعت طولی (متر بر ثانیه)	سرعت عرضی (متر بر ثانیه)
۱۰۰۶	۰/۰۱۲ka	۰/۰۲۴ka	۲۲۸۰	۹۵۶/۳۷



شکل ۷) مقایسه نمودارهای تجربی و تحلیلی با و بدون در نظر گرفتن تضعیف

از آنجاکه نمونه‌های رشته ABS دارای قطر ۱/۷۵ میلی‌متر و بسیار نازک هستند، امکان انجام آزمون‌های فراصوتی روی آنها ممکن نیست. بنابراین، از استوانه‌ای با جنس ABS با قطر ۲۵

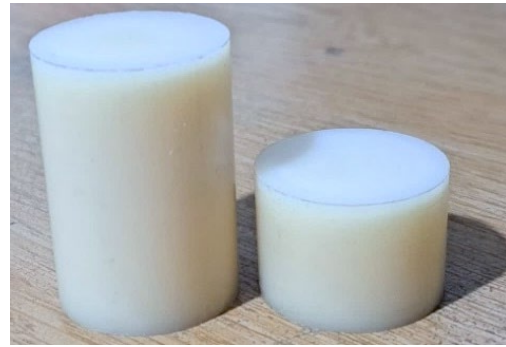
برای راستی‌آزمایی نتایج، سرعت طولی و عرضی، ضرایب تضعیف طولی و عرضی و چگالی با روش دیگری نیز اندازه‌گیری و با مقادیر به دست آمده مقایسه شده است.

برای اندازه‌گیری ضرایب تضعیف نیز از دو نمونه ۲۰ و ۴۰ میلیمتری استفاده شده است. با داشتن دامنه‌های امواج اندازه‌گیری شده، پارامتر تضعیف (α) براساس دامنه‌های اندازه‌گیری شده و مسافت‌های پیموده شده، از معادله زیر، اندازه‌گیری می‌شود [۵]:

$$\alpha = \frac{\ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right)}{(Z_2 - Z_1)} \quad (14)$$

که در آن، A_i ها و Z_i ها به ترتیب دامنه موج اندازه‌گیری شده و مسافت حرکت هر یک از دو موج است [۵]. نتایج به دست آمده برای سرعت طولی و ضریب تضعیف طولی از روش بازتابی با کاوند ۰/۵ مگاهرتزی و سرعت عرضی و ضریب تضعیف عرضی با کاوند ۵ مگاهرتزی در جدول ۳ ارائه شده است.

میلیمتر استفاده و دو نمونه استوانه‌ای از آن با طول ۲۰ میلیمتر و ۴۰ میلیمتر بریده شد. سپس با استفاده از کاوندهای تماسی از نوع طولی و عرضی با فرکانس‌های مرکزی ۰/۵ و ۵ مگاهرتز آزمایش بازتابی روی آنها انجام شد. شکل ۸ نمونه‌های استفاده شده در این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. برای انجام آزمون بازتابی [۲۴]، کاوندها روی سطح دایروی بالای نمونه‌ها قرار می‌گیرند و یک موج طولی و یا عرضی به داخل نمونه ارسال می‌شود. سپس از آنجاکه کاوندها هم به عنوان فرستنده و هم گیرنده عمل می‌کنند، اکوی ناشی از برگشت موج از سطح پایینی نمونه‌ها دریافت می‌شود. با اندازه‌گیری فاصله زمانی بین اکوی رفت و برگشت و داشتن مسافت طی شده، می‌توان سرعت امواج طولی و عرضی ارسال شده را محاسبه کرد.



شکل ۸) نمونه استوانه‌های ABS برای اندازه‌گیری ضرایب تضعیف به روش بازتابی

جدول ۳) ضریب تضعیف طولی و عرضی، سرعت طولی و عرضی اندازه‌گیری شده با روش بازتابی

تضعیف طولی	تضعیف عرضی	سرعت طولی	سرعت عرضی
(Np/mm)	(Np/mm)	(m/s)	(m/s)
(کاوند ۰/۵ مگاهرتز)	(کاوند ۵ مگاهرتز)	(کاوند ۰/۵ مگاهرتز)	(کاوند ۵ مگاهرتز)
۰/۰۱۲	۰/۰۲۹	۲۲۲۶	۱۰۹۶.۵

ASTM D792 چگالی نمونه با واحد کیلوگرم بر مترمکعب محاسبه می‌شود:

$$\rho = 997.6 \frac{m_1}{m_1 - m_2} \quad (15)$$

با مقایسه جدول‌های ۲ و ۳، خطای نسبی مقادیر اندازه‌گیری شده از روش ارائه شده این مقاله با مقادیر به دست آمده از روش بازتابی و روش اندازه‌گیری چگالی محاسبه و در جدول ۴ جمع‌آوری شده است. آزمون فراصوتی پراکندگی

اندازه‌گیری چگالی نمونه‌های استفاده شده در این تحقیق به این صورت است که ابتدا نمونه با یک ترازوی دقیق وزن شده و وزن آن (m_1) یادداشت می‌شود. سپس نمونه مورد نظر در یک بشر که پر از آب مقطر است تحت شرایط هم‌دما غوطه‌ور می‌شود و بار دیگر وزن آن (m_2) اندازه‌گیری می‌شود. این وزن نیز یادداشت شده و سپس با استفاده از معادله زیر و چگالی آب در همان دما طبق استاندارد

مرکزی کاوند ۱ مگاهرتز انجام شده است که با توجه به معادله ۱۶ مقدار ka محاسبه و با تقسیم بر مسافت طی شده موج در راستای قطر رشته پلیمری ABS، ضرایب تضعیف طولی و عرضی با واحد نپربر میلی‌متر به ازای فرکانس ۱ مگاهرتز محاسبه می‌شود.

$$ka = \frac{2\pi fa}{c_f} \quad (16)$$

در رابطه ۱۶، f فرکانس کاوند، a شعاع سطح مقطع و c_f سرعت موج فراصوتی در آب است. همان‌طور که در جدول ۴ ملاحظه می‌شود، سرعت طولی و سرعت عرضی به ترتیب با خطای کمتر از ۲/۵ درصد و حدود ۱۳ درصد، ضریب تضعیف طولی و ضریب تضعیف عرضی به ترتیب با خطای حدود ۶ درصد و حدود ۱۲ درصد، و در نهایت چگالی با خطای ۰/۲ درصد محاسبه شده است. بخشی از این تفاوت تضعیف بین یک رشته با قطر ۱/۷۵ میلی‌متر و یک میله گرد با قطر ۲۵ میلی‌متر، که هر دو از یک جنس ساخته شده‌اند، به دلیل تفاوت در فرکانس نیاز است.

نیاز است.

جدول ۴) مقایسه چگالی، سرعت طولی و عرضی و ضرایب تضعیف

پارامتر	به‌دست آمده در این مقاله	به‌دست آمده از روش ASTM D792 و بازتابی	درصد خطای نسبی
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	۱۰۰۶	۱۰۰۴	۰/۲
سرعت عرضی (متر بر ثانیه)	۹۵۶/۳۷	۱۰۹۶.۵	۱۲/۸
سرعت طولی (متر بر ثانیه)	۲۲۸۰	۲۲۲۶	۲/۴۳
ضریب تضعیف عرضی (نپربر میلی‌متر)	۰/۰۲۵۵ @ ۱ MHz	۰/۰۲۹ @ ۵ MHz	۱۲/۲
ضریب تضعیف طولی (نپربر میلی‌متر)	۰/۰۱۲۷ @ ۱ MHz	۰/۰۱۲ @ ۰/۵ MHz	۶/۱

همزمان این ویژگی‌ها را در یک آزمایش فراهم می‌کند که نسبت به روش‌های موجود یک پیشرفت قابل توجه در حوزه شناسایی و ارزیابی مواد است. با به‌کارگیری دیکانولوشن و الگوریتم ژنتیک، سرعت طولی و سرعت عرضی به ترتیب با خطای کمتر از ۲/۵ و ۱۳ درصد و ضرایب تضعیف طولی و عرضی به ترتیب با خطای کمتر از ۶ و ۱۳ درصد، و چگالی با خطای ۰/۲ درصد اندازه‌گیری شدند. تفاوت‌های مشاهده شده

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از یک روش نوآورانه فراصوتی مبتنی بر داده‌های پراکندگی آکوستیک، سرعت طولی و عرضی، چگالی و ضرایب تضعیف طولی و عرضی رشته‌های پلیمری ABS که در فرایند ساخت افزایشی به‌کار می‌روند، اندازه‌گیری شدند. این روش برای اولین بار امکان اندازه‌گیری

پیشنهادی نه تنها کارایی اندازه‌گیری ویژگی‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه به حوزه وسیع‌تر روش‌های ارزیابی غیرمخرب (NDE) برای پلیمرها کمک می‌کند. در نتیجه، یافته‌های این مطالعه با ارائه درکی عمیق‌تر از رفتار پلیمرها در ساخت افزایشی، پتانسیل پیشرفت در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هوافضا و پزشکی را دارد.

۶- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

material characterization, and process control. *Ultrasonics*, 108, 106227.

7. Jin, Y., Walker, E., Heo, H., Krokhin, A., Choi, T. Y., & Neogi, A. (2020). Nondestructive ultrasonic evaluation of fused deposition modeling based additively manufactured 3D-printed structures. **Smart Materials and Structures**, 29(4), 045020.
8. Ono, K. (2020). A comprehensive report on ultrasonic attenuation of engineering materials, including metals, ceramics, polymers, fiber-reinforced composites, wood, and rocks. **Applied Sciences**, 10(7), 2230.
- [9] Ono, K. (2020). Dynamic viscosity and transverse ultrasonic attenuation of engineering materials. *Applied Sciences*, 10(15), 5265.
- [10] Moradi, M., Aminzadeh, A., Rahmatabadi, D., & Hakimi, A. (2021). Experimental investigation on mechanical characterization of 3D printed PLA produced by fused deposition modeling (FDM). *Materials Research Express*, 8(3), 035304.
11. Tezel, T., Ozenc, M., & Kovan, V. (2021). Impact properties of 3D-printed engineering polymers. **Materials Today Communications**, 26, 102161.
- [12] Antoniou, A., Evripidou, N., Giannakou, M., Constantinides, G., & Damianou, C. (2021). Acoustical properties of 3D printed thermoplastics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 149(4), 2854-2864.
- [13] Ma, D., Gao, R., Li, M., & Qiu, J. (2022). Mechanical and medical imaging properties of 3D-printed materials as tissue equivalent materials. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 23(2), e13495.

ضرایب تضعیف بین رشته‌های با قطر ۱/۷۵ میلی‌متر و میله‌های گرد با قطر ۲۵ میلی‌متر در وهله اول به فرکانس مرکزی کاوند مورد استفاده و افزایش پراکندگی در قطرهای بزرگ‌تر ارتباط دارد. ویژگی‌های ساختاری و روش‌های تولید متفاوت آن‌ها نیز از دیگر عوامل مؤثر هستند. اهمیت این تحقیق در توانایی آن در تسهیل اندازه‌گیری سریع و دقیق خواص کشسانی، فیزیکی و صوتی پلیمرها نهفته است. این قابلیت به‌ویژه برای صنعت ساخت افزایشی ارزشمند است، جایی که درک خواص مواد برای بهبود فرایندهای تولید و تضمین کیفیت محصولات نهایی بسیار مهم است. روش

۷- منابع

- [1] Uddin, M. S., Sidek, M. F., Faizal, M. A., Ghomashchi, R., & Pramanik, A. (2017). Evaluating mechanical properties and failure mechanisms of fused deposition modeling acrylonitrile butadiene styrene parts. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(8), 081018.
- [2] Pylaev, A. E., Kostikova, E. A., Yurkov, A. L., Kalugin, D. I., Malakho, A. P., Avdeev, V. V., Lepin, V. N., Oktyabr'skaya, L. V., & Minchuk, S. V. (2018). Velocity and attenuation of acoustic waves in polymers and polymer composites. **Polymer Science, Series D*, 11, 272-276.
- [3] Fayazbakhsh, K., Movahedi, M., & Kalman, J. (2019). The impact of defects on tensile properties of 3D printed parts manufactured by fused filament fabrication. *Materials Today Communications*, 18, 140-148.
- [4] Karabutov, A. A., Podymova, N. B., & Sokolovskaya, Y. G. (2019). Local Kramers-Kronig relations between the attenuation coefficient and phase velocity of longitudinal ultrasonic waves in polymer composites. *Acoustical Physics*, 65, 158-164.
- [5] Quintana, J. L., Redmann, A., Capote, G. A., Pérez-Irizarry, A., Bechara, A., Osswald, T. A., & Lakes, R. (2019). Viscoelastic properties of fused filament fabrication parts. *Additive Manufacturing*, 28, 704-710.
- [6] Honarvar, F., & Varvani-Farahani, A. (2020). A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation,

- [24] Rose, J. L. (1999). *Ultrasonic waves in solid media* (1st ed.). Cambridge University Press.
- [14] Zaharia, S. M., Pop, M. A., Cosnita, M., Croitoru, C., Matei, S., & Spîrchez, C. (2023). Sound Absorption Performance and Mechanical Properties of the 3D-Printed Bio-Degradable Panels. *Polymers*, 15(18), 3695.
- [15] Matei, S., Pop, M. A., Zaharia, S. M., Coșniță, M., Croitoru, C., Spîrchez, C., & Cazan, C. (2024). Investigation into the Acoustic Properties of Polylactic Acid Sound-Absorbing Panels Manufactured by 3D Printing Technology: The Influence of Nozzle Diameters and Internal Configurations. *Materials*, 17(3), 580.
- [16] Honarvar, F., & Enjilela, E. (2006). Resonance acoustic spectroscopy. In *Handbook of Applied Solid State Spectroscopy* (pp. 351-409).
- [17] Flax, L., Dragonette, L. R., & Überall, H. (1978). Theory of elastic resonance excitation by sound scattering. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 63(3), 723-731.
- [18] Honarvar, F. (1997). *Nondestructive Evaluation of Cylindrical Components by Resonance Acoustic Spectroscopy* [dissertation]. Canada: University of Toronto.
- [19] Vogt, R. H., Flax, L., Dragonette, L. R., & Neubauer, W. G. (1975). Monostatic reflection of a plane wave from an absorbing sphere. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 57(3), 558-561.
- [20] Maze, G., Taconet, B., & Ripoché, J. (1981). Influence des ondes de "galerie à écho" sur la diffusion d'une onde ultrasonore plane par un cylindre. *Physics Letters A*, 84(6), 309-312.
- [21] Sajadi, V., Honarvar, F., & Kari, M. (2024). Utilizing the derivative of unwrapped phase in ultrasonic nondestructive evaluation of elastic properties of polymer filaments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 155(2), 1391-1405.
- [22] Veksler, N. D. (2012). *Resonance acoustic spectroscopy*. Springer Science & Business Media.
- [23] Kari, M., & Honarvar, F. (2014). Characterization of a cylindrical rod by inversion of acoustic scattering data. *Ultrasonics*, 54(6), 1559-1567.