



اندازه‌گیری ضرایب تضعیف امواج فراصوتی طولی و عرضی در مواد پلیمری با استفاده از پراکندگی آکوستیک

وجیهه سادات سجادی^۱، فرهنگ هنرور^{۱*}، محمدرضا کاری^۲

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- گروه فیزیک پزشکی، دانشگاه ویسکانسین-مدیسن، مدیسن، آمریکا

* ایمیل نویسنده مسئول: honarvar@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۶ تیر ۱۴۰۳

پذیرش: ۳۰ مهر ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

ضریب تضعیف

پلیمر

پراکندگی آکوستیک

روش معکوس

آزمون غیرمخرب فراصوتی

این مقاله به بررسی ضرایب تضعیف در استوانه‌های پلیمری ABS با بهره‌گیری از یک روش پیشرفته فراصوتی که در آن از حل یک مسئله معکوس پراکندگی امواج آکوستیک استفاده می‌شود، می‌پردازد. این روش منحصر به فرد امکان اندازه‌گیری همزمان سرعت‌های طولی و عرضی و همچنین ضرایب تضعیف طولی و عرضی را تنها با یک آزمایش فراهم می‌کند. برای این منظور، از یک کاوند فراصوتی غوطه‌وری با فرکانس مرکزی ۱ مگاهرتز و قطر ۱۲/۷ میلی‌متر استفاده و تحلیل داده‌ها با استفاده از روش‌های دیکانونلوشن و الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود. با انجام آزمایش‌های لازم و حل مسئله معکوس، ضرایب تضعیف امواج طولی و عرضی رشته‌های پلیمری ABS به ترتیب $0.02015ka$ و $0.0236ka$ نپر به دست آمده و این مقادیر با نتایج آزمون فراصوتی بازتابی بر روی میله ABS با قطر ۲۵ میلی‌متر مقایسه شده است. نتایج به دست آمده خطای ۹/۹ درصد برای ضریب تضعیف امواج طولی و ۱۶ درصد برای ضریب تضعیف امواج عرضی را نشان می‌دهد. تفاوت نتایج روش پیشنهادی و آزمون فراصوتی بازتابی می‌تواند ناشی از ویژگی‌های ساختاری مواد، فرکانس مرکزی کاوند و افزایش پراکندگی در قطرهای بزرگ‌تر باشد. روش پیشنهادی می‌تواند برای بهبود فرایندهای تولید و کیفیت محصولات در صنایع مختلف، از جمله خودروسازی، هوافضا و تجهیزات پزشکی به کار رود.

Measurement of attenuation coefficients of longitudinal and transverse ultrasonic waves in polymer materials using acoustic scattering

Vajihehsadat Sajadi¹, Farhang Honarvar^{1*}, Mohammadreza Kari²

1- Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Medical Physics, University of Wisconsin-Madison, Madison, USA

* Corresponding Author's Email: honarvar@kntu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 16 July 2024

Accepted: 21 October 2024

Keywords:

Attenuation Coefficient

Polymer

Acoustic Scattering

Inverse Problem

Non-Destructive Ultrasonic Testing

Abstract

This paper investigates the attenuation coefficients of ABS polymer cylinders using an advanced ultrasonic method based on solving the inverse problem of acoustic wave scattering. The method allows for the simultaneous measurement of both longitudinal and transverse wave velocities, as well as their respective attenuation coefficients, in a single experiment. An immersion ultrasonic transducer with a center frequency of 1 MHz and a diameter of 12.7 mm was employed, and the data were analyzed using deconvolution techniques and a genetic algorithm. The longitudinal and transverse wave attenuation coefficients of ABS polymer filaments were found to be $0.02015ka$ and $0.0236ka$ nepers, respectively. These results were compared with those obtained from a pulse-echo ultrasonic test on an ABS rod with a 25 mm diameter, showing an error margin of 9.9% for the longitudinal attenuation coefficient and 16% for the transverse attenuation coefficient. The observed discrepancies between the proposed method and the pulse-echo test likely arise from differences in material structure, transducer center frequency, and increased scattering in larger diameter rods. This method holds potential for improving production processes and product quality in industries such as automotive, aerospace, and medical.

Please cite this article using:

Sajadi VS, Honarvar F, Kari MR. Measurement of attenuation coefficients of longitudinal and transverse ultrasonic waves in polymer materials using acoustic scattering. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Nov 21;11(9):26-39. doi: 10.22034/ijme.2024.467487.1985 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

اندازه‌گیری ضرایب تضعیف^۱ در مواد پلیمری، به‌ویژه در کاربردهای صنعتی و پزشکی، از اهمیت بالایی برخوردار است و این ضرایب اطلاعات مهمی را در مورد خواص مکانیکی و ساختاری دربردارند. مقاله حاضر به اندازه‌گیری ضرایب تضعیف طولی و عرضی مواد پلیمری ABS با روش‌های پیشرفته فراصوتی مبتنی بر پراکندگی آکوستیک می‌پردازد. مواد پلیمری به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردشان مانند سبکی، انعطاف‌پذیری بالا و سهولت قالب‌گیری در صنایع مختلف، به‌ویژه خودرو، هوافضا و تجهیزات پزشکی موردتوجه هستند. بنابراین، درک دقیق خواص مکانیکی و تضعیف فراصوتی این مواد می‌تواند عملکرد و کیفیت محصول را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد. علاوه‌براین، هدف این تحقیق شناسایی رفتار صوتی رشته‌های پلیمری مورداستفاده در فرایندهای ساخت افزودنی است. این فرایندها که به‌دلیل روش‌های تولید نوآورانه‌شان موردتوجه هستند، نیاز به درک جامعی از خواص صوتی مواد پلیمری دارند. در این مقاله با بررسی و مقایسه مدل‌های ریاضی پراکندگی آکوستیک و فرکانس‌های تشدید تجربی رشته‌های پلیمری، ضرایب تضعیف رشته‌های پلیمری ABS به‌دست خواهد آمد. نتایج این تحقیق برای ارزیابی غیرمخرب (NDE) خواص کشسانی رشته‌های پلیمری قابل استفاده است. چنین نتایجی طراحی محصول و فرایندهای تولید قطعات ساخت افزودنی را بهبود خواهد بخشید.

بسیاری از پژوهشگران ضرایب مواد پلیمری را با استفاده از روش‌های متنوعی بررسی کرده‌اند که در ادامه برخی از آنها خواهد آمد. بیوا و همکاران [۱] با انجام تحلیل عددی به بررسی تضعیف موج طولی در کامپوزیت اپوکسی تقویت‌شده با ذرات شیشه و پلی‌متیل‌متاکریلات^۲ سخت‌شده با ذرات لاستیک پرداختند. در کامپوزیت شیشه/اپوکسی، تضعیف موج به‌دلیل جذب در ماتریس و پراکندگی از ذرات اتفاق می‌افتد، درحالی‌که در ترکیب لاستیک/پلی‌متیل‌متاکریلات، تضعیف به‌دلیل جذب در ذرات نیز ایجاد می‌شود. آنها تأثیر خاصیت انعطاف‌پذیری ماتریس بر روی ویژگی‌های پراکندگی فرکانس پایین، ارتباط فرکانس و شعاع ذرات در فرایند پراکندگی، جذب و ویژگی‌های تضعیف را بررسی کرده‌اند. همچنین، آنها نتایج عددی را با داده‌های آزمایشگاهی تضعیف موج طولی در دو کامپوزیت مقایسه کرده‌اند. نویسندگان مقاله پیشین [۲] خواص پراکندگی و تضعیف موج در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف یک‌جهته را نیز به‌صورت تئوری با یک طرح دیفرانسیل میکرومکانیکی^۳ تجزیه و تحلیل کرده‌اند و خواص ویسکوالاستیک ماتریس پلیمری را نیز در این طرح در نظر گرفته‌اند. تحلیل انجام‌شده نشان می‌دهد که تأثیر فرکانس و کسر حجم فیبر در تضعیف کامپوزیت با داده‌های تجربی کم‌وبیش مطابقت دارد. میتری و همکاران [۳] تابع فرم تئوری سیگنال برگشتی استوانه‌های معلق در سیال غیرلزج را با گنجاندن ضرایب تضعیف اصلاح کردند و وابستگی فرکانسی آن را برای مواد پلیمری تجزیه و تحلیل کردند و نشان دادند چگونه این ضرایب بر خواص استوانه مؤثر است. لرج و همکاران [۴] یک روش تخمین ضریب تضعیف باندپهن را ارائه کردند که ترکیبی از دو بخش است: ۱) نسبت‌های دامنه طیف پژواک سطح جلویی، بازتاب اول سطح پشتی و بازتاب دوم سطح پشتی از سطح اتصال مواد با هندسه صفحه مانند و ۲) روش آزمایشی اصلاح پراش برای جلوگیری از تلفات پراش. با این روش ضریب تضعیف، ضریب بازتاب و چگالی ماده قابل تخمین است. مدل‌ها، رویه‌های آزمایشی و روش‌های پردازش سیگنال که از اجرای این روش پشتیبانی می‌کنند در کار آنها ارائه شده است. مازیکا و همکاران [۵] مطالعاتی بر روی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مواد پلاستیکی مورداستفاده در ساخت لوله‌های پلیمری انجام دادند. هدف اصلی این مطالعه اندازه‌گیری سرعت و تضعیف امواج فراصوتی در راستای طول لوله‌های پلاستیکی بوده است. نتایج نشان می‌دهد که سرعت امواج طولی به‌طور تقریباً خطی به فرکانس بستگی دارد و همچنین، تضعیف این امواج به‌شدت به فرکانس وابسته است؛ به‌طوری‌که دامنه سیگنال‌های با فرکانس‌های بالاتر از ۴ مگاهرتز به‌شدت کاهش می‌یابد. پایلیو و همکاران [۶] نشان دادند که هیچ وابستگی بین فرکانس و سرعت فراصوتی در مواد پلیمری و کامپوزیتی وجود ندارد، درحالی‌که تضعیف فراصوتی در آنها به‌شدت به فرکانس وابسته است و با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد. کالکرنی و همکاران [۷]، از روش اجزای محدود برای بررسی انتشار امواج فراصوتی در کامپوزیت با ماتریس پلیمری استفاده کردند. تجزیه و تحلیل آن‌ها با یک مدل اجزای محدود سه‌بعدی با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام و ویژگی‌های تضعیف امواج طولی فراصوتی در ماتریس مدل‌سازی و ارزیابی شده است. کارابوتوو و همکاران [۹] برای اندازه‌گیری میزان تضعیف و سرعت فراصوتی در

¹ Attenuation Coefficient

² PMMA

³ Micromechanical Differential Scheme

محدوده وسیعی از فرکانس از روش لیزر اپتواکوستیک استفاده کردند و نشان دادند که روابط کرامرز-کرونینگ^۱ 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. کویینتانا و همکاران [۱۰] برای بررسی تأثیر فرایند تولید بر ویژگی‌های مکانیکی قطعات چاپ‌شده سه‌بعدی، آزمایش‌هایی شامل تحلیل مکانیکی پویا (DMA) و آزمون فراصوتی انجام دادند. آن‌ها گرانول اولیه برای ساخت رشته‌های پلیمری را ذوب و به‌عنوان ماده اصلی استفاده و تعدادی قطعه نیز به همان ابعاد چاپ کردند. نتایج این تحقیق نشان داد مدول کشسانی قطعات چاپ‌شده کمی کمتر از ماده اصلی است و ضریب تانژانت تلفات ماده $(\tan \delta)$ ^۲ نیز برای ماده اصلی بیشتر از مواد چاپ شده است. کانجی اونو [۱۱] تضعیف فراصوتی مواد مهندسی شامل فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها و کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف، چوب و سنگ را به‌طور جامع بررسی کرده است. این اندازه‌گیری به دو روش انجام شده و نتایج آن‌ها دسته‌بندی شده است. کانجی اونو [۱۲] تضعیف فراصوتی امواج عرضی را نیز در مواد مهندسی مختلف ارزیابی و دسته‌بندی کرده است. آنتینیو و همکاران [۱۳]، خواص آکوستیک رشته‌های ترموپلاستیک چاپ سه‌بعدی، از جمله ضریب تضعیف، سرعت صوت و امپدانس صوتی را با استفاده از روش‌های عبوری^۳ و بازتابی^۴ بررسی کردند. ما و همکاران [۱۴] به مطالعه و بررسی ویژگی‌های مکانیکی و تصویربرداری پلیمرهای چاپ سه‌بعدی (PLA، PA12، LCR) پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که این مواد با مدول کشسانی بالا (بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال) برای شبیه‌سازی استخوان مناسب هستند. خواص صوتی این مواد با بافت واقعی تفاوت داشت، اما سرعت صوت نمونه‌ها به سرعت موج در پوست انسان نزدیک بود. بنابراین، مواد چاپ سه‌بعدی می‌توانند برای شبیه‌سازی بافت‌های نرم و استخوانی استفاده شوند. زاهاریا و همکاران [۱۵]، عملکرد جذب صوتی پنل‌های چاپ‌شده سه‌بعدی با استفاده از سه نوع ماده، سه تنظیم داخلی، و پنج چگالی مختلف را ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که پنل‌های با تنظیم مثلثی و چگالی پرکردن ۴۰٪ و ۶۰٪ دارای بالاترین عملکرد صوتی هستند و می‌توانند در صنایع هواپیما، خودرو و ساختمان به‌کار روند. از جمله پیشنهادهای این پژوهش این بود که استفاده از پنل‌های با تنظیم مثلثی و مواد پلی‌لاکتیک اسیدی با چگالی پرکردن ۴۰٪ و ضخامت ۸ میلی‌متر دارای خواص جذب صوتی بالایی است. سیمونا مانی و همکاران [۱۶]، تأثیر رشته‌های پلی‌لاکتیک اسید با سه قطر نازل مختلف و شش تنظیم داخلی متفاوت بر خواص صوتی پنل‌های جذب صدا که با چاپ سه‌بعدی ساخته شده بودند را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که ویژگی‌های صوتی نمونه‌ها به شدت تحت تأثیر مواد استخراج‌شده، قطر نازل و تنظیمات داخلی قرار دارد. برخی از نمونه‌ها مقادیر بیشتری از جذب صوت و کاهش انتقال صوت را دارند که این نتایج می‌توانند در طراحی و ساخت سازه‌های صوتی اهمیت زیادی داشته باشند. باقری و هنرور [۱۷] خواص مکانیکی قطعات ساخته‌شده با فرایند ساخت افزایشی ذوب‌رسوبی^۵ (FFF) را با روش آزمون فراصوتی بررسی کردند. آن‌ها قطعه‌ای از جنس PLA را به روش FFF ساخته و سرعت موج را در جهت‌های مختلف اندازه‌گیری کردند. با فرض ناهمسانگردی اورتوتروپیک، ضرایب الاستیک قطعه محاسبه و با آزمون کشش مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که قطعه ساخته‌شده ساختار شش‌وجهی (همسانگرد عرضی) دارد. همچنین، خواص آکوستیکی قطعات، از جمله تضعیف و امپدانس صوتی آن‌ها نیز ارزیابی شدند. روش فراصوتی ارائه‌شده می‌تواند برای تعیین دقیق خواص الاستیک قطعات ناهمسانگرد ساخت افزایشی استفاده شود. قلی‌زاده روشن و همکاران [۱۸]، خواص مکانیکی و فیزیکی قطعات چاپ‌شده با رشته‌های کامپوزیتی ABS و اکسید آلومینیوم (آلومینا)^۶ را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش کسر حجمی آلومینا، استحکام کششی به دلیل حفره‌های بین‌لایه‌ای کاهش می‌یابد. آزمون تغییر شکل حرارتی نیز نشان داد که پایداری حرارتی با افزایش آلومینا بهبود و سختی تا ۱۵ درصد کاهش و سپس کمی افزایش می‌یابد. همچنین، اعوجاج قطعات با افزایش آلومینا تا ۹۱ درصد کاهش یافت.

مقاله حاضر به بررسی خواص آکوستیکی و ضرایب تضعیف مواد و رشته‌های پلیمری می‌پردازد. در پژوهش حاضر به روش فراصوتی و با استفاده از پراکندگی آکوستیک، ضرایب تضعیف طولی و عرضی این مواد اندازه‌گیری می‌شود. درمقایسه با مطالعات گذشته که معمولاً به‌استفاده از روش‌های مخرب و انجام آزمایش‌های متعدد برای تعیین این ضرایب متکی بوده‌اند، در این مقاله از یک روش

¹ Kramers-Kronig Relations

² The Material Loss Tangent ($\tan \delta$)

³ Transmission-Through

⁴ Pulse-Echo

⁵ Fused Filament Fabrication (FFF)

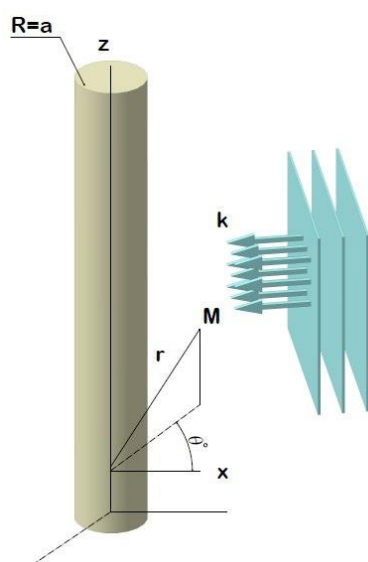
⁶ Filament

⁷ Alumina

غیرمخرب که قابلیت اندازه‌گیری همزمان ضرایب تضعیف طولی و عرضی را تنها با انجام یک آزمایش فراهم می‌آورد، استفاده می‌شود. این نوآوری به‌طور معناداری کارایی آزمایش را با کاهش زمان و هزینه بهبود می‌بخشد. پراکندگی امواج آکوستیک از یک جسم کشسان پدیده پیچیده‌ای است که شامل تولید انواع مختلفی از امواج سطحی در داخل و خارج جسم است. به‌عنوان مثال، در مورد یک جسم استوانه‌ای کشسان، هنگامی که یک موج صوتی به‌طور عمودی به استوانه‌ای که در آب قرار گرفته برخورد می‌کند، علاوه بر بازتابش آینه‌ای موج، امواج سطحی نیز در مرز استوانه ایجاد می‌شود. این امواج سطحی، چه در محیط بیرونی و چه در داخل جسم، در مرز استوانه و آب انتشار می‌یابند [۱۹].

۲- مدل تئوری

در این بخش، مدل ریاضی پراکندگی موج صوتی هارمونیک صفحه‌ای از یک استوانه الاستیک به‌اختصار بررسی می‌شود. شکل ۱ یک موج آکوستیک صفحه‌ای تک‌رنگ بی‌نهایت را نشان می‌دهد که با فرکانس $\omega/2\pi$ و زاویه α به یک استوانه غوطه‌ور بی‌نهایت بلند می‌تابد. شعاع استوانه a ، چگالی استوانه ρ و چگالی سیال اطراف آن ρ_w است. مسئله در یک سیستم مختصات استوانه‌ای (r, θ, z) حل می‌شود که در آن محور z با محور استوانه منطبق است.



شکل ۱ هندسه مورد استفاده در روش تحلیلی

فشار p_i موج در نقطه دلخواه M به مختصات (r, θ, z) عبارت است از [۱۹]:

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

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 k بردار موج، $k_{\perp} = k \cos \alpha$ ، $k_z = k \sin \alpha$ و بردار موقعیت نقطه M است. علاوه بر این، $|k| = \omega / c_w$ ، 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 عبارت است از [۱۹]

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

در این معادله A_n ضرایب پراکندگی هستند که در [۱۹] 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 تابع فرم نامیده می‌شود و از معادله زیر به‌دست می‌آید [۲۰]:

¹ Neumann Factor

$$f_{\infty}(\theta, ka) = \left(\frac{2r}{a}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{p_s}{p_0}\right) e^{-k_1 r i} \quad (3)$$

تابع فرم کل را می‌توان به صورت مجموع مدهای نرمال نوشت:

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

و مدهای نرمال برای هر n به صورت زیر است:

$$f_n(\theta, ka) = \frac{2}{\sqrt{i\pi k_1 a}} \epsilon_n A_n \cos(n\theta) \quad (5)$$

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

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

که در آن ضرایب کشسانی استوانه هستند. یکی از ویژگی‌های مواد پلیمری استفاده از آن‌ها به عنوان جاذب انرژی و تضعیف‌کننده ارتعاش است. با فرض مختلط بودن عدد موج، قسمت موهومی عدد موج ویژگی‌های جذب‌کننده ماده را به خود اختصاص می‌دهد [۳]. اعداد موج طولی و عرضی مختلط به صورت زیر تعریف می‌شوند [۲۱]:

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

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

که در آنها β_L و β_T ضرایب جذب با واحد نپر ($\beta_L, \beta_T \ll 1$) هستند. با در نظر گرفتن اعداد موج مختلط در معادلات، آرگومان‌های توابع بسل نیز مختلط خواهند شد [۲۲]. این ضرایب‌ها به فرکانس وابسته هستند و معمولاً به صورت عبارتهای خطی و توانی ظاهر می‌شوند. قسمت‌های خطی، اغلب به عنوان عبارتهای ناشی از تضعیف ویسکوزیته شناخته می‌شوند و برای β_L و β_T به صورت زیر است [۱۱، ۱۲]:

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

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

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 است [۱۱، ۱۲]. از این رو، در این مقاله از عبارتهای توانی صرف نظر شده است.

۳- روش آزمایشگاهی

در این پژوهش از روش پالس کوتاه و جداسازی و شناسایی فرکانس‌های تشدید^۱ MIIR [۲۳] برای اندازه‌گیری تابع فرم نمونه‌های استوانه‌ای استفاده می‌شود. در MIIR، جسم هدف با پالس کوتاهی تحریک می‌شود که دوره تناوب آن نسبت به قطر هدف تقسیم بر سرعت صوت کوچک است [۲۳]. چیدمان آزمایش MIIR در شکل ۲ نشان داده شده است.

با اعمال تبدیل فوریه سریع به پژواک بازتابیده از استوانه، طیف فرکانسی به دست می‌آید. برای مقایسه تابع فرم تحلیلی و آزمایشگاهی، لازم است اثرات تراگذار فرستنده و گیرنده حذف شود که اینکار با روش دی‌کانولوشن انجام می‌شود. به منظور تفکیک اثرات سیستم اندازه‌گیری و دستیابی به تابع فرم آزمایشی، به یک طیف فرکانس مرجع نیاز است که هیچ اثر تشدید در آن وجود نداشته باشد [۲۱]. برای این منظور، از یک رشته تنگستن با قطر ۰/۱ میلی‌متر استفاده می‌شود. از آنجاکه مقادیر ka برای رشته تنگستن در بازه فرکانسی مورد استفاده در آزمایش‌ها بسیار کوچک است، هیچ کدام از فرکانس‌های تشدید آن تحریک نمی‌شوند و طیف فرکانسی آن مطابق با شکل ۳-ب، در مقایسه با رشته پلیمری ABS در شکل ۳-الف، یکنواخت است. برای حذف اثرات سیستم اندازه‌گیری، از معادله ۱۱ استفاده می‌شود [۲۱]:

¹ Method of Isolation and Identification of Resonances (MIIR)

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

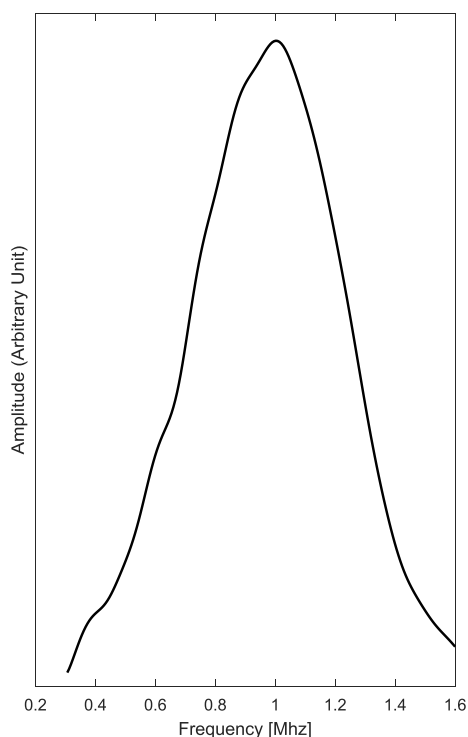
در رابطه ۱۱، $S(\omega)$ طیف پراکندگی نمونه آزمایشگاهی و $S'(\omega)$ طیف فرکانسی رشته تنگستن است که به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری می‌شوند و $|f_{\infty}^r|$ تابع فرم تحلیلی حاصل از رشته تنگستن به عنوان استوانه مرجع است که از معادله ۱۲ به دست می‌آید. [۲۱].

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

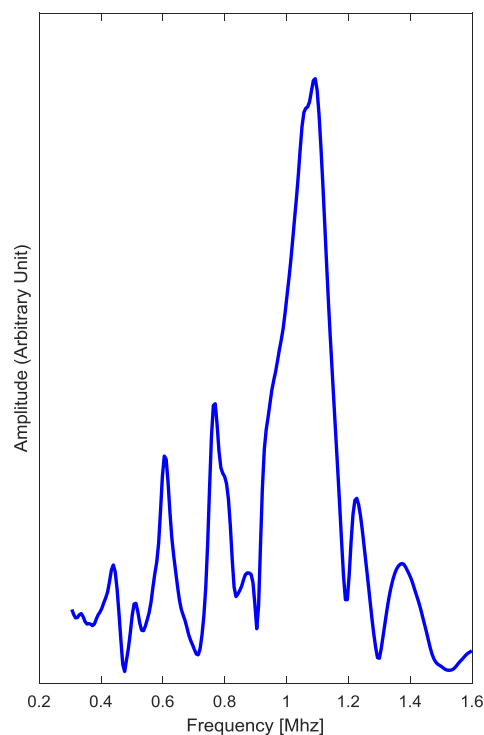
در رابطه ۱۲، α' شعاع رشته تنگستن، $P_o(\omega)$ طیف فشار روی نمونه تنگستن در نقطه ای به مختصات r' و $P_s'(\omega)$ طیف پراکندگی رشته تنگستن هستند [۲۱]. مشخصات ماده پلیمری مورد استفاده در این مقاله در جدول ۱ آمده است.



شکل ۲ چیدمان آزمایش رشته پلیمری



(ب)



(الف)

شکل ۳ طیف فرکانسی تجربی الف) رشته پلیمری ABS ب) رشته تنگستن

جدول ۱ مشخصات مواد مورد استفاده در آزمایش

ماده	سرعت موج عرضی (m/s)	سرعت موج طولی (m/s)	قطر (mm)	نوع نمونه	دانسیته (kg/m ³)
ABS	[۲۴] ۹۴۴	۲۲۷۰ [۲۴]	۱/۷۵	رشته	۱۰۰۴
آب	---	۱۴۸۰	---	---	۱۰۰۰

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 گیج^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 استفاده شده 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 [۲۵] 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.

۴- نتایج و بحث

هدف اصلی این تحقیق، یافتن ضرایب تضعیف رشته‌های پلیمری است. با این وجود، با روش پیشنهادی این مقاله، امکان اندازه‌گیری چهار پارامتر شامل سرعت طولی و عرضی موج و همچنین ضرایب تضعیف طولی و عرضی ماده پلیمری وجود دارد و با داشتن این موارد، مدول کشسانی ماده قابل اندازه‌گیری است. این داده‌ها برای محاسبه دقیق مدول‌های کشسانی و همچنین ارزیابی جامع خواص مکانیکی و توانایی ماده در جذب و پراکندگی انرژی ضروری هستند. به‌طور کلی، در نمودار تابع فرم، تیزی‌های متعددی مشاهده می‌شود که ناشی از فرکانس‌های تشدید استوانه است. با برخورد موج با سطح استوانه، امواج سطحی ایجاد می‌شوند و به دور استوانه حرکت می‌کنند. از آنجا که موج صفحه‌ای بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود، در برخورد با سطح استوانه حالت تقارن دارد و هر موج در یک فرکانس خاص ایجاد و از هر طرف به دور استوانه حرکت می‌کند. این امواج ممکن است هنگام برخورد باهم تداخل سازنده داشته باشند و یکدیگر را تقویت کنند یا با تداخل مخرب یکدیگر را تضعیف کنند. در تداخل سازنده، تداخل امواج سطحی باعث ایجاد موجی ایستا روی سطح استوانه می‌شود که منجر به تقویت دامنه یا مد ارتعاشی است که باعث ارتعاش استوانه می‌شود. برای اهداف سبک [۲۶]، مانند ABS، تداخل تا حد زیادی سازنده است، که به ایجاد پیک‌های تداخل در تابع فرم منجر می‌شود. در این بخش از تحقیق، طیف فرکانسی آزمایشی و تابع فرم تحلیلی برای رشته پلیمری ABS ترسیم و با استفاده از یک الگوریتم معکوس‌سازی^۴ بر مبنای الگوریتم ژنتیک هر ۴ پارامتر سرعت طولی و عرضی موج و ضرایب تضعیف عرضی و طولی موج اندازه‌گیری می‌شوند.

۴-۱- نتایج تئوری

تابع فرم تحلیلی رشته ABS بدون و با در نظر گرفتن ضرایب تضعیف در شکل ۴ نشان داده شده است. خواص مورد استفاده برای محاسبه تابع فرم در جدول ۱ آمده است. سرعت‌های عرضی و طولی در این جدول از مقادیر به‌دست آمده در [۲۴] استخراج شده است.

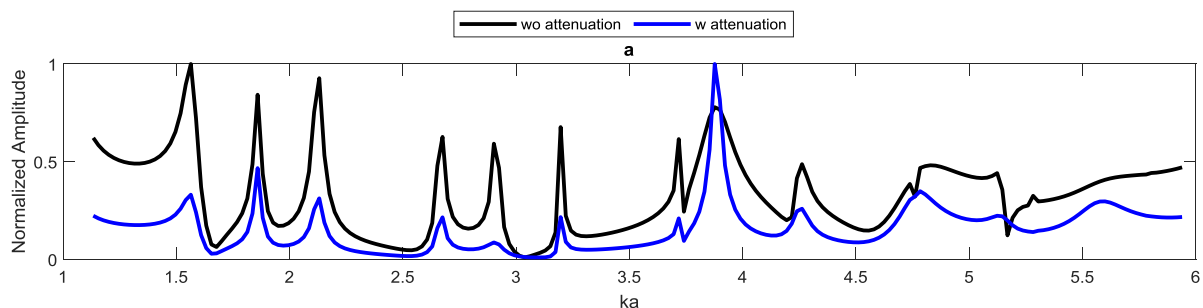
برای تعیین مقادیر اولیه ضرایب تضعیف، ابتدا مقادیری از مراجع متفاوت انتخاب می‌شود [۱۰، ۱۳] و سپس با روش سعی و خطا مقادیر مناسب به‌دست می‌آید و اثر تغییرات در ضرایب مقدار اولیه بررسی می‌شود. شکل ۵ به ترتیب اثر تغییرات ضریب تضعیف طولی و عرضی را نشان می‌دهد. با داشتن طیف فرکانسی آزمایش و تطبیق آن با تابع فرم تحلیلی از طریق الگوریتم معکوس‌سازی، مقادیر دقیق این ضرایب تعیین خواهد شد.

¹ A/D Card

² Gage

³ SNR

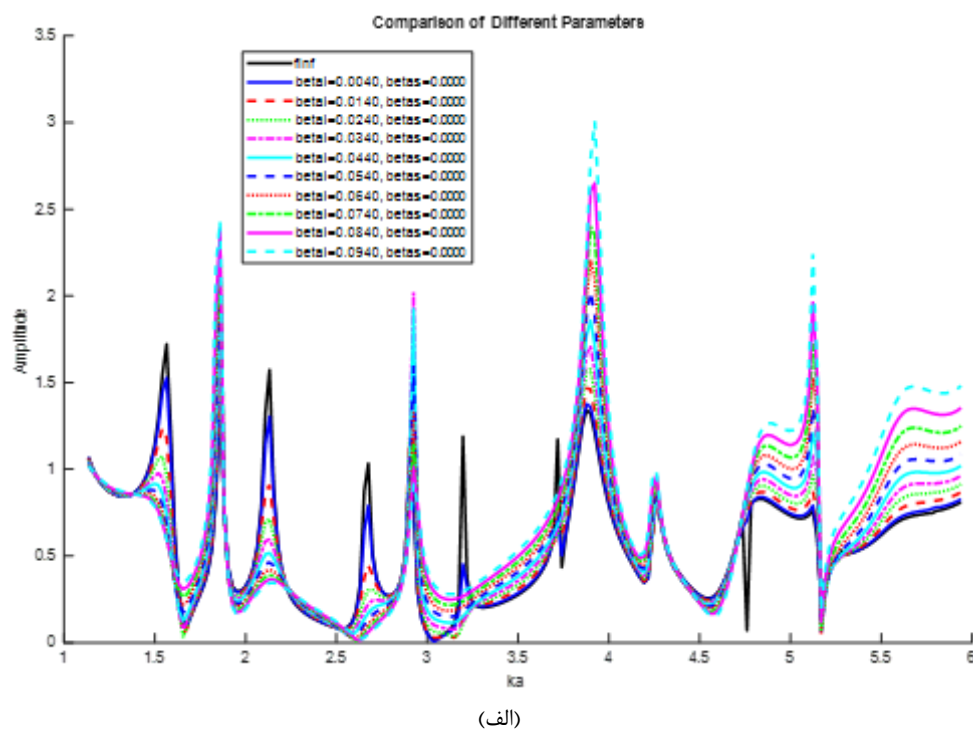
⁴ Inverse Problem



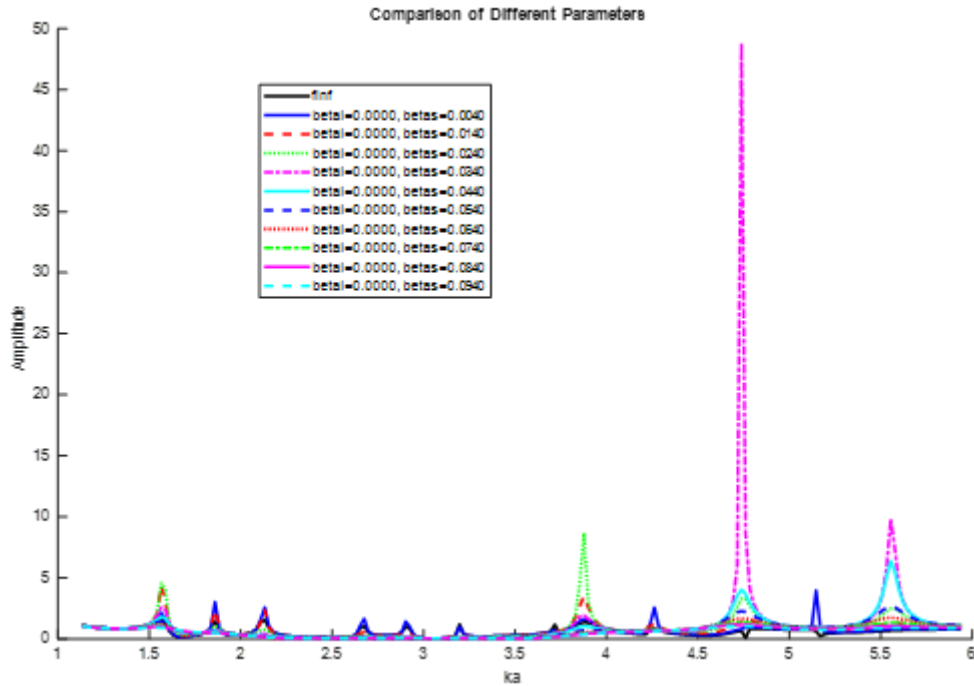
شکل ۴ تابع فرم تحلیلی برای رشته ABS بدون و با در نظر گرفتن تضعیف

تجزیه و تحلیل نمودارهای شکل ۵-الف و ۵-ب به‌وضوح تفاوت‌های تاثیر ضریب تضعیف طولی و عرضی بر تابع فرم را نشان می‌دهد. در نمودار شکل ۵-الف، مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب تضعیف طولی β_L ، دامنه امواج به‌طور کلی کاهش می‌یابد. این کاهش دامنه‌ها نشان‌دهنده جذب بیشتر انرژی است، درحالی‌که الگوی کلی قله‌ها و نقاط فرورفتگی حفظ می‌شود و تغییرات در پهنای قله‌ها ناچیز می‌ماند. این امر بیانگر این است که ضریب تضعیف طولی عمدتاً بر دامنه امواج تاثیرگذار است؛ بدون اینکه جابه‌جایی یا تغییر فاز محسوسی ایجاد کند. در مقابل، نمودار شکل ۵-ب نشان‌دهنده تغییرات ناشی از تغییر ضریب تضعیف عرضی β_S است. در این نمودار، دامنه تغییرات به‌مراتب بیشتر است و به‌ویژه در $ka \cong 4.5$ ، یک قله برجسته دیده می‌شود که با تغییر β_S به‌شدت تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد. این تغییرات حاکی از آن است که ضریب تضعیف عرضی تاثیر بیشتری بر رفتار امواج عرضی دارد و می‌تواند منجر به تیزتر شدن قله‌ها و کاهش دامنه آن‌ها شود. در این حالت، ضریب تضعیف عرضی علاوه بر کاهش دامنه‌ها، پهنای قله‌ها را نیز تحت‌تأثیر قرار می‌دهد و باعث پراکندگی و جذب بیشتر انرژی امواج عرضی می‌شود. همچنین، تیزی‌های تند در اثر تضعیف حذف می‌شوند.

به‌طور کلی، این تفاوت‌ها حاکی از آن است که ضریب تضعیف طولی بیشتر بر کاهش دامنه و ضریب تضعیف عرضی بر تغییرات دامنه و پهنای قله‌ها تاثیر می‌گذارد. این نتایج اهمیت زیادی در تحلیل و طراحی مواد پلیمری دارند و می‌توانند در بهینه‌سازی خواص مکانیکی و آکوستیکی این مواد برای کاربردهای مختلف استفاده شوند و فهم بهتری از رفتار موج در مواد پلیمری به‌دست دهند.



(الف)



(ب)

شکل ۵ اثر تغییرات ضریب تضعیف بر تابع فرم الف) تغییر در ضریب تضعیف طولی ب) تغییر در ضریب تضعیف عرضی

مقادیر اولیه به دست آمده عبارت است از:

$$\beta_l = 0.024ka$$

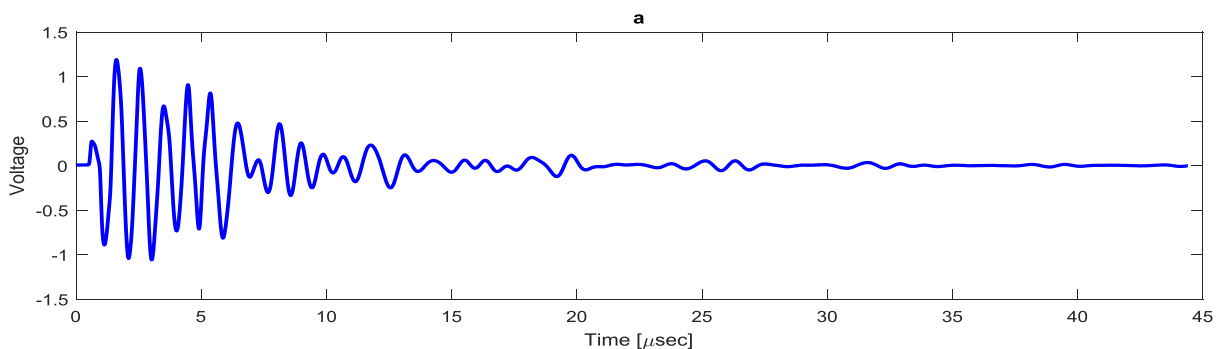
$$\beta_s = 0.014ka$$

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.

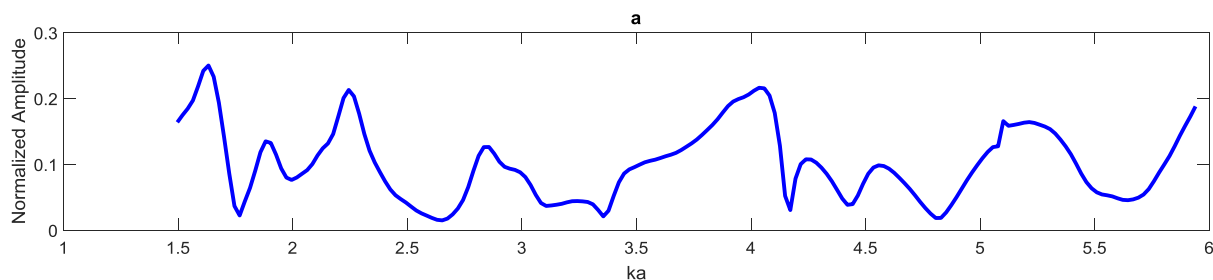
۲-۴- نتایج آزمایشگاهی

نمونه رشته پلیمری ABS مطابق مشخصات جدول ۱ از نظر ظاهری و ابعادی بررسی و سپس آزمایش شد. شکل ۶ سیگنال بازگشتی از نمونه را در تابش عمود نشان می‌دهد.

برای استخراج توابع فرم تجربی و حذف اثرات سیستم اندازه‌گیری از رشته تنگستن که در بخش ۳ معرفی شد، استفاده شده است [۲۱]. طیف فرکانسی تجربی برای نمونه ABS در شکل ۷ ترسیم شده است. محدوده مقادیر ka در محور افقی در شکل ۷ با توجه به پهنای باند کاوند ۱ مگاهرتز (۵۰۰ کیلوهرتز تا ۱/۵ مگاهرتز) مورد استفاده در اندازه‌گیری‌های تجربی انتخاب می‌شود.



شکل ۶ سیگنال بازگشتی از رشته پلیمری ABS



شکل ۷ طیف فرکانسی تجربی رشته پلیمری ABS

از یک روش معکوس برای تعیین سرعت امواج طولی و عرضی که مرتبط با ثابت‌های کشسانی استوانه هستند و ضرایب تضعیف طولی و عرضی موج در استوانه‌ها با برازش توابع فرم تجربی آن‌ها با توابع فرم تحلیلی استفاده می‌شود. این فرایند شامل در نظر گرفتن مقادیر اولیه‌ای برای سرعت امواج طولی و عرضی و ضرایب تضعیف طولی و عرضی است. الگوریتم محاسبه تابع فرم تحلیلی، به تدریج فرض‌های اولیه را اصلاح می‌کند تا زمانی که یک تفرانس از پیش تعریف شده به دست آید. تابع هدف مورد استفاده [۲۷] (مطابق با معادله ۱۳) اختلاف بین دامنه فرکانس‌های محاسبه شده از معادلات تئوری و اندازه‌گیری شده را به حداقل می‌رساند.

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

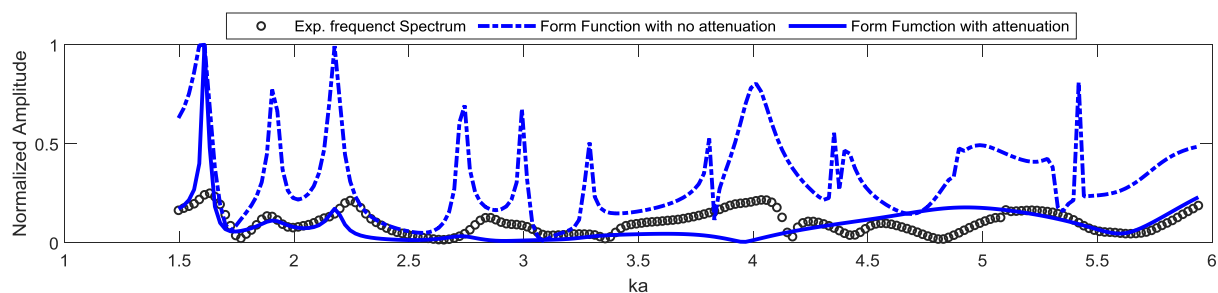
هدف اصلی این بخش تعیین ضرایب تضعیف استوانه پلیمری است. با توجه به مطالب گفته شده، رابطه ضرایب تضعیف با فرکانس خطی فرض شده است. یک کد متلب برای بهینه‌سازی پارامترهای سرعت طولی و عرضی موج و ضرایب تضعیف طولی و عرضی موج با استفاده از رویکرد الگوریتم ژنتیک [۲۷] نوشته شده است. این فرایند با بارگیری داده‌های تجربی ذخیره شده در یک متغیر آغاز می‌شود.

بخش‌های مختلف کد شامل تعریف داده‌های تجربی، تعریف تابع هدف مشابه رابطه ۱۳، حدس اولیه برای پارامترهای سرعت طولی، سرعت عرضی، تضعیف طولی و تضعیف عرضی، تنظیمات مربوط به الگوریتم ژنتیک (از جمله حداکثر تعداد نسل‌ها و اندازه جمعیت که در اینجا ۱۰۰۰ نسل و ۱۰۰ فرد در نظر گرفته شده) است. با اجرای برنامه، پارامترهای بهینه شده مطابق جدول ۲ به دست آمده است.

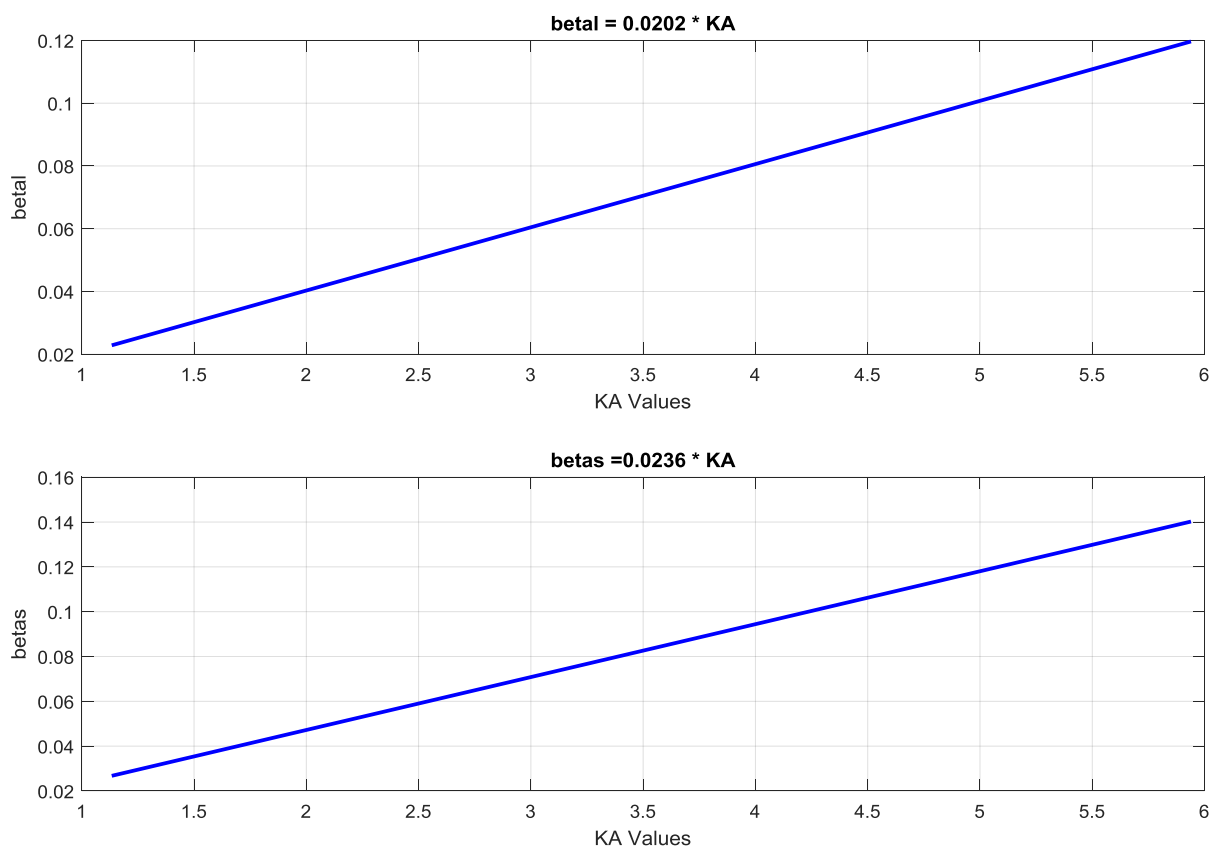
جدول ۲ مقادیر پارامترهای بهینه شده با الگوریتم ژنتیک

سرعت طولی (متر بر ثانیه)	سرعت عرضی (متر بر ثانیه)	تضعیف طولی (نپر)	تضعیف عرضی (نپر)
۲۲۷۰	۹۷۵/۰۰۸	ka ۰/۰۲۰۱۵	ka ۰/۰۲۳۶۱

شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب، مقایسه نمودارهای تجربی و تئوری با و بدون در نظر گرفتن تضعیف و نمودارهای ضرایب تضعیف بر حسب ka را نشان می‌دهند.



شکل ۸ مقایسه نمودارهای تجربی و تئوری با و بدون در نظر گرفتن تضعیف



شکل ۹ ضرایب تضعیف موج طولی و موج عرضی بر حسب ka

برای راستی‌آزمایی نتایج، سرعت‌های طولی و عرضی و همچنین ضرایب‌های تضعیف طولی و عرضی با استفاده از یک روش دیگر اندازه‌گیری و با مقادیر به‌دست آمده مقایسه شده است. 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 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 ۱۰، ۰/۵ و ۵ مگاهرتز آزمایش‌هایی روی آنها انجام شد. شکل ۱۰ نمونه‌های استفاده‌شده در این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. برای انجام آزمون بازتابی [۲۸]، 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 به‌عنوان 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 طی‌شده، می‌توان سرعت امواج طولی و عرضی ارسال‌شده را محاسبه کرد. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۳ آمده است.



شکل ۱۰ نمونه استوانه‌های ABS برای اندازه‌گیری سرعت و ضرایب تضعیف به روش بازتابی

جدول ۳ سرعت طولی و عرضی اندازه‌گیری شده به روش‌های مختلف

ضخامت (میلی‌متر)	سرعت طولی (متر بر ثانیه)	سرعت عرضی (متر بر ثانیه)
۲۰	روش بازتابی (کاوند ۱۰ مگاهرتز)	روش بازتابی (کاوند ۰/۵ مگاهرتز)
	۲۲۲۷	۲۲۳۴
۴۰	روش بازتابی (کاوند ۱۰ مگاهرتز)	روش بازتابی (کاوند ۵ مگاهرتز)
	۲۲۲۵	۱۱۰۴

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 [۱۰]:

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

که در آن، A_1 و Z_1 ها به ترتیب دامنه موج اندازه‌گیری شده و مسافت حرکت هر یک از دو موج است [۱۰]. نتایج به دست آمده برای تضعیف طولی از روش‌های بازتابی با دو کاوند ۱۰ و ۰/۵ مگاهرتزی و همچنین تضعیف عرضی با کاوند ۵ مگاهرتزی در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴ ضریب تضعیف طولی و عرضی اندازه‌گیری شده با روش‌های مختلف

تضعیف طولی (Np/mm)	تضعیف عرضی (Np/mm)
روش بازتابی (کاوند ۱۰ مگاهرتز)	روش بازتابی (کاوند ۵ مگاهرتز)
۰/۰۲۷	۰/۰۲۹
روش بازتابی (کاوند ۰/۵ مگاهرتز)	روش بازتابی (کاوند ۵ مگاهرتز)
۰/۰۱۲	۰/۰۲۹

با مقایسه جدول‌های ۲، ۳ و ۴، خطای نسبی مقادیر اندازه‌گیری شده از روش ارائه شده این مقاله با میانگین مقادیر به دست آمده از روش بازتابی محاسبه و در جدول ۵ جمع‌آوری شده است. آزمون فراصوتی پراکندگی با استفاده از کاوند ۱ مگاهرتز انجام شده است که با توجه به معادله ۱۵ مقدار ka محاسبه و با تقسیم بر مسافت طی شده موج در راستای قطر رشته پلیمری ABS، ضرایب تضعیف طولی و عرضی با واحد نپر بر میلی‌متر به ازای فرکانس ۱ مگاهرتز محاسبه می‌شود.

$$ka = \frac{2\pi fa}{c_f} \quad (15)$$

در رابطه ۱۵، f فرکانس کاوند، a شعاع سطح مقطع و c_f سرعت موج فراصوتی در آب است. همان‌طور که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود، ضریب تضعیف طولی با خطای ۹/۹ درصد و ضریب تضعیف عرضی با خطای ۱۶ درصد نسبت به روش آزمون فراصوتی بازتابی محاسبه شده است. بخشی از این تفاوت در مقدار 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، ناشی از تفاوت در فرکانس مرکزی کاوند مورد استفاده برای انجام آزمون بازتابی و آزمون پراکندگی است. محدوده ka با کاوند ۵ و ۱۰ مگاهرتز خارج از محدوده آزمون پراکندگی با کاوند ۱ مگاهرتزی است که این موضوع خود به اختلاف در اعداد به دست آمده منجر می‌شود و از طرفی وابستگی ضرایب تضعیف موج به فرکانس را به خوبی نشان می‌دهد.

جدول ۵ مقایسه سرعت‌ها و ضرایب تضعیف

پارامتر	به دست آمده در این مقاله	میانگین به دست آمده از آزمایش فراصوتی بازتابی	درصد خطای نسبی
سرعت عرضی (متر بر ثانیه)	۹۷۵/۰۰۸	۱۰۹۶/۵	۱۱/۰۸
سرعت طولی (متر بر ثانیه)	۲۲۷۰	۲۲۲۶	۲
ضریب تضعیف عرضی (نپر بر میلی‌متر)	۰/۰۲۵ @ ۱MHz	۰/۰۲۹ @ ۵MHz	۱۶
ضریب تضعیف طولی (نپر بر میلی‌متر)	۰/۰۲۱۴ @ ۱MHz	۰/۰۱۹۵	۹/۹

همچنین، رشته $1/75$ میلی‌متری که به‌طور خاص در فرایند ساخت افزایشی استفاده می‌شود، برای ذوب و اکستروژن آسان طراحی شده و دارای ریزساختار بهینه‌سازی شده برای رسوب‌گذاری لایه‌به‌لایه است. در مقابل، میله 25 میلی‌متری برای روش‌های ساخت سنتی مانند ماشین‌کاری طراحی شده است که نیاز به خواص مکانیکی و یکپارچگی ساختاری متفاوت دارد. بنابراین، به‌نظر می‌رسد شیوه تولید قطعات بر مقدار ضرایب تضعیف موج فراصوتی آن‌ها اثر دارد. این اثر در مطالعه‌ای دیگر نیز نشان داده است [۱۰]. با این حال، برای تأیید یافته‌ها و نتیجه‌گیری مطمئن، مجموعه داده‌های بزرگ‌تری مورد نیاز است. همان‌طور که انتظار می‌رود، ضریب تضعیف عرضی بیشتر از ضریب تضعیف طولی است و مقدار این ضرایب با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از یک روش نوین فراصوتی مبتنی بر پراکندگی آکوستیک، ضرایب تضعیف طولی و عرضی رشته‌های پلیمری ABS اندازه‌گیری شد. این روش برای نخستین بار امکان اندازه‌گیری همزمان سرعت‌های طولی و عرضی و ضرایب تضعیف طولی و عرضی را در یک آزمایش فراهم می‌کند که یک پیشرفت قابل توجه نسبت به روش‌های موجود است. با به‌کارگیری دیکانولوشن و الگوریتم ژنتیک، ضرایب تضعیف طولی و عرضی به ترتیب با خطای اندازه‌گیری $9/9$ درصد و 16 درصد اندازه‌گیری شدند. تفاوت‌های مشاهده‌شده در ضرایب تضعیف بین رشته‌های با قطر $1/75$ میلی‌متر و میله‌های گرد با قطر 25 میلی‌متر به ویژگی‌های ساختاری و شیوه‌های تولید متفاوت آنها بستگی دارد. همچنین، فرکانس مرکزی کاوند مورد استفاده و افزایش پراکندگی در قطرهای بزرگ‌تر از دیگر عوامل تأثیرگذار هستند. این پژوهش نشان داد که روش پیشنهادی دقت قابل‌قبولی دارد و می‌تواند به‌طور مؤثری در مطالعات آتی و توسعه روش‌های ارزیابی غیرمخرب برای مواد پلیمری به‌کار گرفته شود. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، با ارائه درک بهتری از رفتارهای آکوستیکی پلیمرها به بهبود فرایندهای تولید و افزایش کیفیت محصولات نهایی در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هوافضا و تجهیزات پزشکی کمک خواهد کرد.

References

- [1] Biwa S, Idekoba S, Ohno N. Wave attenuation in particulate polymer composites: independent scattering/absorption analysis and comparison to measurements. *Mechanics of materials*. 2002 Oct 1;34(10):671-82. doi: 10.1016/S0167-6636(02)00167-9
- [2] Biwa S, Watanabe Y, Ohno N. Analysis of wave attenuation in unidirectional viscoelastic composites by a differential scheme. *Composites science and technology*. 2003 Feb 1;63(2):237-47. doi: 10.1016/S0266-3538(02)00202-6
- [3] Mitri FG, Zine El Abidine EA, Chapelon JY. Acoustic backscattering form-function of absorbing cylinder targets. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2004;115(4):1411-3. doi: 10.1121/1.1649332
- [4] Lerch TP, Cepel R, Neal SP. Attenuation coefficient estimation using experimental diffraction corrections with multiple interface reflections. *Ultrasonics*. 2006 Jan 1;44(1):83-92. doi: 10.1016/j.ultras.2005.07.003
- [5] Mažeika L, Šlitteris R, Vladišauskas A. Measurement of velocity and attenuation for ultrasonic longitudinal waves in the polyethylene samples. *Ultrasonics/Ultrasound*. 2010 Dec 16;65(4):12-5.
- [6] Pylaev AE, Kostikova EA, Yurkov AL, Kalugin DI, Malakho AP, Avdeev VV, Lepin VN, Oktyabr'skaya LV, Minchuk SV. Velocity and attenuation of acoustic waves in polymers and polymer composites. *Polymer Science, Series D*. 2018 Jul;11:272-6. doi: 10.1134/S1995421218030152
- [7] Kulkarni SS, Tabarraei A, Ghag PP. A finite element approach for study of wave attenuation characteristics of epoxy polymer composite. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition 2018 Nov 9* (Vol. 52149, p. V009T12A042). American Society of Mechanical Engineers. doi: 10.1115/IMECE2018-87873
- [8] Liu Z, Oswald J, Belytschko T. XFEM modeling of ultrasonic wave propagation in polymer matrix particulate/fibrous composites. *Wave Motion*. 2013 Apr 1;50(3):389-401. doi: 10.1016/j.wavemoti.2012.10.007
- [9] Karabutov AA, Podymova NB, Sokolovskaya YG. Local Kramers-Kronig relations between the attenuation coefficient and phase velocity of longitudinal ultrasonic waves in polymer composites. *Acoustical Physics*. 2019 Mar;65:158-64. doi: 10.1134/S1063771019020052
- [10] Quintana JL, Redmann A, Capote GA, Pérez-Irizarry A, Bechara A, Osswald TA, Lakes R. Viscoelastic properties of fused filament fabrication parts. *Additive Manufacturing*. 2019 Aug 1;28:704-10. doi: 10.1016/j.addma.2019.06.003

- [11] Ono K. A comprehensive report on ultrasonic attenuation of engineering materials, including metals, ceramics, polymers, fiber-reinforced composites, wood, and rocks. *Applied Sciences*. 2020 Mar 25;10(7):2230. doi: [10.3390/app10072230](https://doi.org/10.3390/app10072230)
- [12] Ono K. Dynamic viscosity and transverse ultrasonic attenuation of engineering materials. *Applied Sciences*. 2020 Jul 30;10(15):5265. doi: [10.3390/app10155265](https://doi.org/10.3390/app10155265)
- [13] Antoniou A, Evripidou N, Giannakou M, Constantinides G, Damianou C. Acoustical properties of 3D printed thermoplastics. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2021 Apr 1;149(4):2854-64. doi: [10.1121/10.0004772](https://doi.org/10.1121/10.0004772)
- [14] Ma D, Gao R, Li M, Qiu J. Mechanical and medical imaging properties of 3D-printed materials as tissue equivalent materials. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*. 2022 Feb;23(2):e13495. doi: [10.1002/acm2.13495](https://doi.org/10.1002/acm2.13495)
- [15] Zaharia SM, Pop MA, Cosnita M, Croitoru C, Matei S, Spîrchez C. Sound Absorption Performance and Mechanical Properties of the 3D-Printed Bio-Degradable Panels. *Polymers*. 2023 Sep 7;15(18):3695. doi: [10.3390/polym15183695](https://doi.org/10.3390/polym15183695)
- [16] Matei S, Pop MA, Zaharia SM, Coșniță M, Croitoru C, Spîrchez C, Cazan C. 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*. 2024 Jan 25;17(3):580. doi: [10.3390/ma17030580](https://doi.org/10.3390/ma17030580)
- [17] Bagheri-Bami A, Honarvar F. Determination of the type of anisotropy and stiffness tensor in additive manufacturing polymer components by using ultrasonic waves. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2022 Aug 23;9(6):36-48. doi: [10.22034/IJME.2022.160940](https://doi.org/10.22034/IJME.2022.160940) [In Persian]
- [18] Gholizadeh Roshan A, Zolfaghari A, Shakeri M. Investigation of physical and mechanical properties of 3D printed parts by using of ABS plastic filaments filled by alumina. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Jun 21;7(4):1-9. [In Persian]
- [19] Honarvar F, Enjilela E. Resonance acoustic spectroscopy. *Handbook of Applied Solid State Spectroscopy*. 2006:351-409. doi: [10.1007/0-387-37590-2_8](https://doi.org/10.1007/0-387-37590-2_8)
- [20] Flax L, Dragonette LR, Überall H. Theory of elastic resonance excitation by sound scattering. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1978 Mar 1;63(3):723-31. doi: [10.1121/1.381780](https://doi.org/10.1121/1.381780)
- [21] Honarvar F. *Nondestructive Evaluation of Cylindrical Components by Resonance Acoustic Spectroscopy [dissertation]*. Canada: University of Toronto, 1997.
- [22] Vogt RH, Flax L, Dragonette LR, Neubauer WG. Monostatic reflection of a plane wave from an absorbing sphere. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1975 Mar 1;57(3):558-61. doi: [10.1121/1.380483](https://doi.org/10.1121/1.380483)
- [23] Maze G, Taconet B, Ripoché J. Influence des ondes de "galerie à écho" sur la diffusion d'une onde ultrasonore plane par un cylindre. *Physics Letters A*. 1981 Aug 10;84(6):309-12. doi: [10.1016/0375-9601\(81\)90768-4](https://doi.org/10.1016/0375-9601(81)90768-4)
- [24] Sajadi V, Honarvar F, Kari M. Utilizing the derivative of unwrapped phase in ultrasonic nondestructive evaluation of elastic properties of polymer filaments. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2024 Feb 1;155(2):1391-405. doi: [10.1121/10.0024892](https://doi.org/10.1121/10.0024892)
- [25] Veksler ND. *Resonance acoustic spectroscopy*. Springer Science & Business Media; 2012 Dec 6.
- [26] Numrich SK, Howell WE, Subrahmanyam JV, Überall H. Acoustic ringing response of the individual resonances of an elastic cylinder. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1986 Oct 1;80(4):1161-9. doi: [10.1121/1.393806](https://doi.org/10.1121/1.393806)
- [27] Kari M, Honarvar F. Characterization of a cylindrical rod by inversion of acoustic scattering data. *Ultrasonics*. 2014 Aug 1;54(6):1559-67. doi: [10.1016/j.ultras.2014.04.006](https://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.04.006)
- [28] Rose JL. *Ultrasonic waves in solid media*. New York: Cambridge University Press; 1999.