

Development of an Ultrasonic Testing Method for B-Scan Detection of Notch in Polymer Additively Manufactured Components

Alireza Bagheri-Bami¹  | Ramin Shabani²   |

1. Department of mechanical Engineering, K. N. Toosi university of technology, Tehran, Iran. E-mail: a.bagheri.bami@email.kntu.ac.ir
2. Department of Aerospace Engineering, The Shahid Sattari University of Aeronautical Engineering, Tehran, Iran. E-mail: rshabani@ssau.ac.ir

Article Information:

Research Article

Received 18 July 2026

Revised 16 Sep. 2026

Accepted 20 Oct. 2026

Keywords:

Additive manufacturing,
Polymer,
Ultrasonic testing,
Defect,
B scan.

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) is an emerging manufacturing technology in which components are fabricated layer by layer. Among the various additive manufacturing techniques, polymer material extrusion is one of the most widely used processes for producing polymer components. Despite the numerous advantages of this process, the occurrence of defects during manufacturing is inevitable. Therefore, the assessment and monitoring of component integrity, including the determination of material properties and the detection of common defects, still require further investigation. In addition, the development of evaluation methods for nondestructive testing systems specifically designed for AM polymer components is of considerable importance. In this study, a mechanized B-scan system was designed and developed to establish an ultrasonic testing method for the evaluation of polymer components. First, the ultrasonic wave velocity in the components was measured to determine the accurate location of defects based on the measured acoustic properties. The ultrasonic wave velocity was measured as 2165 m/s, with a measurement error of less than 1%, indicating a high level of measurement accuracy. Then, the notch defect in the standard V1 calibration block was used as a reference for designing artificial notches in AM polymer components. In this way, the artificial defects introduced during the fabrication of the components can be represented by notches equivalent to those in the reference calibration block, thereby providing reference defects for evaluating the ultrasonic inspection capability of AM polymer components. Subsequently, the performance of the ultrasonic probes and their resolution capability were evaluated according to the characteristics of the reference block. Ultrasonic tests were then performed using both contact and immersion techniques to compare and validate the two methods. Finally, the performance of the immersion B-scan method was evaluated for locating notches with different dimensions, and an appropriate linear scanning speed in the range of 16–24 mm/min, with an average value of 20 mm/min, was determined as the optimal operating range of the developed system.

Cite this article: Bagheri-Bami, A., Shabani, S. (2025). Development of an Ultrasonic Testing Method for B-Scan Detection of Notch in Polymer Additively Manufactured Components. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 5 (1), 52-64.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.592472.1177>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

ایجاد روشی برای آزمون فراصوتی قطعات ساخت افزایشی پلیمری به‌منظور عیب‌یابی شیار

به‌روش روبش B

علیرضا باقری‌بمی^۱ | رامین شعبانی^۲ | ✉^۱. دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، رایانامه: a.bagheri.bami@email.kntu.ac.ir^۲. دانشکده هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران، رایانامه: rshabani@ssau.ac.ir

چکیده:

ساخت افزایشی یکی از فناوری‌های نوین تولید است که قطعات را به‌صورت لایه‌به‌لایه ایجاد می‌کند. در میان روش‌های مختلف این فناوری، روش روزن‌رانی ماده پلیمری یکی از متداول‌ترین فرایندهای ساخت قطعات پلیمری محسوب می‌شود. با وجود مزایای فراوان این روش، احتمال ایجاد عیوب در حین تولید اجتناب‌ناپذیر است. از این‌رو، ارزیابی و پایش سلامت قطعات، شامل تعیین خواص مواد و شناسایی عیوب متداول، همچنان به تحقیقات بیشتری نیاز دارد. علاوه‌براین، توسعه روش‌هایی برای ارزیابی سامانه‌های آزمون نامخرب ویژه قطعات ساخت افزایشی پلیمری نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، به‌منظور توسعه روشی برای ارزیابی فراصوتی قطعات پلیمری، یک سامانه روبشگر روبش B طراحی و ساخته می‌شود. ابتدا، سرعت امواج فراصوت در قطعات اندازه‌گیری شد تا موقعیت دقیق عیوب بر اساس خواص آکوستیک سنجیده‌شده، تعیین گردد. سرعت امواج فراصوت ۲۱۶۵ متر بر ثانیه با خطای اندازه‌گیری کمتر از ۱ درصد تعیین شد که نشان‌دهنده دقت بالای اندازه‌گیری است. سپس، از عیب‌شیار (ناچ) موجود در بلوک کالیبراسیون استاندارد V1 به عنوان مرجعی برای طراحی شیارهای مصنوعی در قطعات پلیمری تولیدشده به روش ساخت افزایشی (AM)، استفاده شد. بدین ترتیب، عیوب مصنوعی ایجادشده، با شیارهایی معادل شیارهای موجود در بلوک کالیبراسیون مرجع، شبیه‌سازی شدند و عیوب مرجعی برای ارزیابی قابلیت بازرسی فراصوتی قطعات پلیمری تولیدشده به روش ساخت افزایشی فراهم گردید. در ادامه، عملکرد پروب‌های فراصوت و توان تفکیک آن‌ها بر اساس ویژگی‌های بلوک مرجع ارزیابی شد. سپس آزمون‌های فراصوتی با استفاده از هر دو روش تماسی و غوطه‌وری انجام گرفت تا این دو روش با یکدیگر مقایسه و اعتبارسنجی شوند. در نهایت، عملکرد روش B-scan غوطه‌وری برای مکان‌یابی شیارهایی با ابعاد مختلف ارزیابی شد و سرعت اسکن خطی مناسب در محدوده ۱۶ تا ۲۴ میلی‌متر بر دقیقه (با میانگین ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه) به عنوان محدوده عملیاتی بهینه برای سیستم توسعه‌یافته، تعیین گردید.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۵/۰۴/۲۷

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۵/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۷/۲۸

کلیدواژگان:

ساخت افزایشی،

پلیمر،

آزمون فراصوتی،

عیب،

روبش B.

استناد: باقری‌بمی، علیرضا و شعبانی، رامین. (۱۴۰۴). ایجاد روشی برای آزمون فراصوتی قطعات ساخت افزایشی پلیمری به‌منظور عیب‌یابی شیار به‌روش روبش B. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۵ (۱)، ۵۲-۶۴.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: http://doi.org/10.30494/jndt.2026.592472.1177



۱- مقدمه

ساخت افزایشی^۱ به مجموعه‌ای از فرایندهای تولید اطلاق می‌شود که در آنها قطعه به صورت لایه‌به‌لایه و مستقیماً بر اساس یک مدل رایانه‌ای ساخته می‌شود. با گسترش پژوهش‌ها و توسعه این فناوری، ساخت افزایشی جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف یافته و امکان تولید قطعات با هندسه‌های پیچیده را فراهم کرده است؛ قطعاتی که ساخت آنها با روش‌های سنتی دشوار یا حتی ناممکن است. این قابلیت، علاوه بر توسعه روش‌های تولید، موجب کاهش دورریز مواد و افزایش بهره‌وری در فرایندهای ساخت شده است.

روش‌های متعددی برای ساخت افزایشی وجود دارد که یکی از متداول‌ترین آنها، روزن‌رانی ماده پلیمری^۲ است. دستیابی به قطعاتی با کیفیت مطلوب در این روش مستلزم انتخاب صحیح پارامترهای فرایند است تا ویژگی‌های ساختاری و مکانیکی موردنظر حاصل شود. در غیر این صورت، عیوبی مانند تخلخل^۳، ترک، جابجایی، ریزش بیش از حد ماده، لایه‌شدگی^۴، عدم رسوب ماده و سایر ناپیوستگی‌ها ایجاد می‌شوند که خواص مکانیکی قطعه را کاهش داده و کاربرد آن را در مصارف صنعتی با محدودیت مواجه می‌کنند. از این رو، قطعات تولیدشده علاوه بر پایش و بازرسی حین تولید، نیازمند انجام آزمون‌های دوره‌ای و ارزیابی‌های پس از ساخت نیز هستند [۱].

روش‌های مختلفی برای بازرسی این قطعات به کار گرفته شده است. در میان این روش‌ها، رادیوگرافی به دلیل هزینه بالا، الزامات ایمنی و زمان‌بر بودن تحلیل داده‌ها، یکی از پرهزینه‌ترین روش‌های بازرسی محسوب می‌شود. روش فراصوتی لیزری عمده‌تاً برای آشکارسازی عیوب سطحی و زیرسطحی مناسب بوده و عملکرد آن به کیفیت سطح قطعه وابسته است [۳ و ۲]. روش‌های نوین دیگری مانند آرایه فازی تشخیص عیب را در هر نقطه و هر عمقی امکان‌سنجی می‌کنند. با این حال این روش‌ها هزینه بالا و تجهیزات بسیار گران‌قیمتی را لازم دارند [۴].

با وجود پژوهش‌های گسترده، هنوز هیچ روش واحدی

که بتواند یک سامانه جامع و بهینه برای بازرسی قطعات ساخت افزایشی، به‌ویژه قطعات پلیمری، ارائه دهد، معرفی نشده است [۲].

زلتمن و همکاران [۵] در مطالعه خودشان چالش‌های تولیدی و امنیتی در چاپ سه‌بعدی را بررسی کرده و تأثیر عیوب داخلی زیر میلی‌متری و تغییر جهت چاپ بر عملکرد مکانیکی قطعات پلیمری را مطالعه می‌کند. آنها همچنین قابلیت تشخیص این عیوب توسط بازرسی‌های معمول فراصوتی را ارزیابی کرده‌اند. مشخص شد که عیوب کوچک می‌توانند از دید بازرسی‌های فراصوت مخفی بمانند، در حالی که تغییر در جهت‌گیری چاپ می‌تواند استحکام و کرنش شکست قطعه را به‌طور جدی کاهش داده و در عین حال منجر به شکست فاجعه‌بار شود. ریاحی و جاویدراد [۳ و ۲] در تحقیقشان، فرایند ساخت یک بلوک واسنجی اختصاصی حاوی عیوب داخلی استوانه‌ای و مکعبی را با استفاده از روش ذوب گرینشی لیزر^۵ تشریح کرده‌اند. این کار برای رفع نیاز به بلوک‌هایی متناسب با عیوب خاص قطعات ساخت افزایشی انجام شده است. بررسی‌های میکروسکوپی و متالورژیکی نشان داد که حفره‌های تعبیه‌شده با دقت ابعادی بسیار بالا ساخته شده‌اند و پودرهای ذوب‌نشده داخل آنها به‌خوبی عیوبی مانند عدم ذوب را شبیه‌سازی می‌کنند. گروزدانیچ و همکاران [۶] در تحقیقی تأثیر پارامترهای ساخت مانند ضخامت لایه و جهت‌گیری بازتابنده‌های صفحه‌شکل بر کیفیت آزمون فراصوت در قطعات ساخته‌شده با روش DMLS^۶ را بررسی می‌کنند. تمرکز مطالعه بر کاهش اثر پلکانی در سطوح منحنی داخلی است. در نتایج مشخص شد که جهت‌گیری دیسک، عامل تعیین‌کننده در پاسخ فراصوتی است و بهترین نتیجه در زاویه صفر درجه (راستای لایه‌ها) به‌دست می‌آید؛ همچنین برای دیسک‌های کوچک، ضخامت لایه^۷ ۲۰ میکرومتر تکرارپذیری را بهبود می‌بخشد. فیاض‌بخش و همکاران [۴] در پژوهشی از آزمون فراصوتی آرایه فازی با فرکانس بسیار بالای ۵۰ مگاهرتز برای شناسایی عیوب عمده (شکاف‌ها) در نمونه‌های PLA ساخته‌شده به روش FFF^۷ استفاده کرده‌اند. این مطالعه اولین تلاش برای

^۵ Selective laser melting (SLM)

^۶ Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

^۷ Fused filament fabrication (FFF)

^۱ Additive manufacturing (AM)

^۲ Fused deposition modeling (FDM)

^۳ Porosity

^۴ Delamination

اعتمادی که عیوبی مشابه عیوب واقعی ایجاد شده در فرایند ساخت افزایشی را شبیه‌سازی کنند، احساس می‌شود. در سال‌های اخیر، به‌منظور یکپارچه‌سازی و استانداردسازی روش‌های ارزیابی قطعات تولید شده به روش ساخت افزایشی، استلنداردهایی در زمینه نحوه اجرای آزمون‌های نامخرب^۵ تدوین شده‌اند که جدیدترین نسخه آن با عنوان ISO/ASTM TR 52905:2023 منتشر شده است [۱۱ و ۱۰].

در این پژوهش، ابتدا سرعت امواج فراصوتی طولی در قطعه پلیمری PLA اندازه‌گیری می‌شود؛ سپس آزمون فراصوتی در دو حالت تماسی و غوطه‌وری، جهت بررسی تفکیک‌پذیری سیگنال‌های فراصوتی در قطعه‌ای با عیوب مصنوعی مشابه با شیار موجود در سنجه V1، انجام می‌شود. در ادامه با استفاده از آزمون غوطه‌وری و روبش B، به عیب‌یابی قطعات ساخت افزایشی پلیمری پرداخته می‌شود. برای انجام روبش B، یک دستگاه روبشگر با قابلیت تنظیم سرعت حرکت کاوند استفاده می‌شود. همچنین، سه قطعه مرجع برای اندازه‌گیری سرعت امواج، ارزیابی قابلیت تفکیک‌پذیری و عیب‌یابی طراحی و ساخته شد.

۲- آزمایش‌های تجربی

۲-۱- طراحی و ساخت قطعات ساخت افزایشی

سنجه استاندارد V1 (شکل ۱) یکی از بلوک‌های مرجع متداول برای ارزیابی عملکرد تجهیزات آزمون فراصوتی است. در این سنجه استاندارد، عیوب مصنوعی با ابعاد و هندسه مشخص تعبیه شده‌اند تا صحت اندازه‌گیری، عملکرد کاوند و قابلیت آشکارسازی عیوب ارزیابی شود. از آنجا که در این پژوهش دستگاهی برای بازرسی قطعات پلیمری طراحی و ساخته شده است، به‌منظور ارزیابی آن و ایجاد یک بازرسی مناسب برای این دسته از مواد، طراحی و ساخت قطعه‌ای با عیوب مصنوعی برای ارزیابی در قطعات پلیمری در این تحقیق صورت خواهد گرفت. آنجا که تاکنون استلنداردهای مشخصی برای بلوک‌های مرجع فراصوتی ویژه قطعات پلیمری ارائه نشده است [۱۸ - ۱۲ و ۹]، ابعاد این بلوک با

تصویربرداری با وضوح بالا از ساختار لایه‌چینی داخلی قطعات پلیمری است. تصاویر به‌دست‌آمده به‌خوبی زوایای الگوی چینش و ساختار لایه‌ها را نشان دادند و تأیید شد که با افزایش عرض شکاف‌ها، مدول ینگ و استحکام کششی قطعه به‌طور مستقیم کاهش می‌یابد. ایر و همکاران [۷] از روش طیف‌سنجی فاز فراصوتی برای مقایسه نامخرب خواص کشسانی قطعات ABS ساخته‌شده با روش‌های مختلف تولید افزایشی و تزریق پلاستیک استفاده کرده‌اند. این روش امکان تعیین مدول الاستیسیته را در تمام جهات فضایی فراهم می‌کند. وجود یک رابطه خطی بین چگالی قطعات و مدول کشسانی آنها تأیید شد و مشخص گردید که این روش نسبت به آزمون‌های مخرب، انحراف معیار بسیار کمتری دارد که نشان‌دهنده دقت و تکرارپذیری بالاتر آن در ارزیابی مکانیکی است. چابوت و همکاران [۸] به توسعه روش پایش عیوب در قطعات فلزی ساخته‌شده با روش‌های WAAM^۲ و LMD^۳ با استفاده از آزمون فراصوت آرایه فازی و روبش B، C و D پرداختند. محققان بر روی واسنجی روشی برای تعیین ابعاد دقیق حفره‌ها تمرکز کرده‌اند. نتایج نشان داد که این روش قادر به شناسایی و تعیین اندازه حفره‌هایی در بازه ۰/۶ تا ۱ میلی‌متر است و قابلیت اجرای در هر لحظه از زیر بستر ساخت را دارد که به کنترل کیفیت در حین تولید کمک شایانی می‌کند. طاهری و همکاران [۹] در پژوهشی به بررسی پایش در لحظه فرایند ساخت افزایشی فلزی DED^۴ با استفاده از علائم صوتی و الگوریتم خوشه‌بندی K-means می‌پردازند. هدف اصلی این مطالعه، شناسایی تغییرات در شرایط فرایند و بروز عیوب در حین ساخت قطعه است. محققان موفق شدند با دقت بیش از ۸۷ درصد، شرایط مختلف فرایند را در باندهای فرکانسی بالا و پایین طبقه‌بندی کنند و نشان دادند که این روش می‌تواند سیگنال‌های مربوط به عیوب را به‌خوبی از نوفه پس‌زمینه دستگاه تشخیص دهد. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی درباره کاربرد آزمون‌های نامخرب، به‌ویژه روش ارزیابی و آزمون فراصوتی، برای ارزیابی قطعات ساخت افزایشی انجام شده است. بااین‌حال، همچنان نیاز به تولید بلوک‌های مرجع قابل

^۴ Direct Energy Deposition (DED)

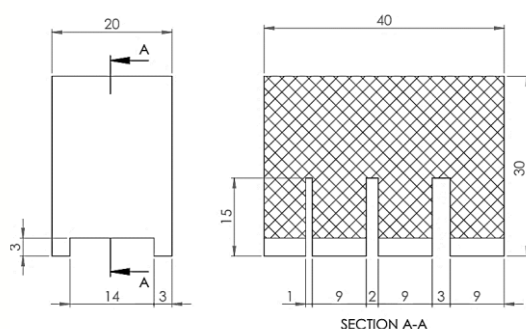
^۵ Non-destructive testing (NDT)

^۱ Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)

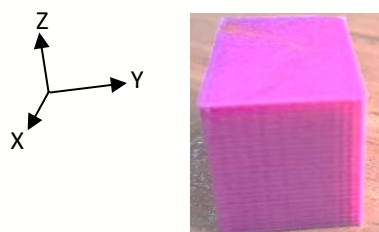
^۲ Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

^۳ Laser Metal Deposition (LMD)

در این پژوهش، سه نوع بلوک آزمون با اهداف مختلف طراحی و ساخته می شود. نخست، بلوکی برای اندازه گیری سرعت انتشار موج فراصوتی در ماده پلیمری طراحی شود. بلوک دوم به منظور ارزیابی قابلیت تفکیک پذیری کاوندها، بر اساس شیار (با عرض ۲ میلی متر) موجود در سنجۀ استاندارد V1 ساخته می شود (شکل ۲). همچنین، بلوک سوم که در شکل ۳ نشان داده شده است، شامل سه شیار با ضخامت های متفاوت طراحی شده تا امکان ارزیابی عملکرد سیستم در روبش B و بررسی قابلیت تشخیص عیوب با ابعاد مختلف فراهم شود. تمامی نمونه ها از ماده PLA¹ ساخته شدند. بر اساس اطلاعات کالانمای شرکت YOSO و تولید کشور چین، چگالی اسمی این ماده برابر با ۱۲۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب است [۱۲]. پس از ساخت نمونه ها به روش چاپ سه بعدی، اندازه گیری شد که مقدار آن حدود ۱۲۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. این کاهش چگالی در قطعه تولید شده به دلیل ایجاد حفره ها در اثر داغ شدن ماده در حین تولید است [۱۲].

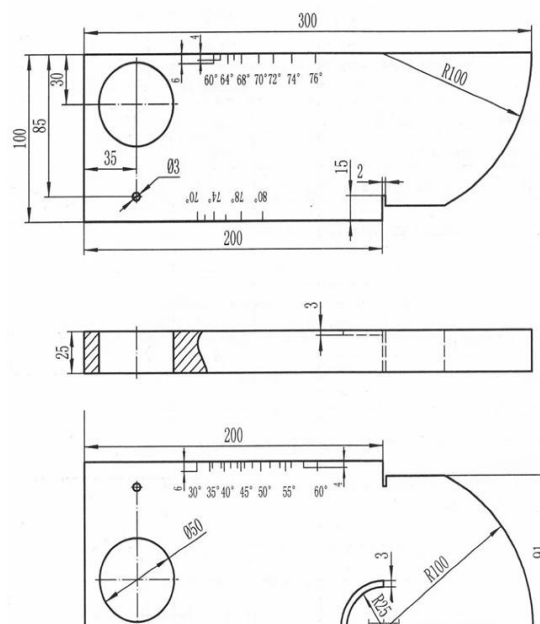


شکل ۳) ابعاد قطعه طراحی شده برای بررسی آزمون روبش B، قطعه با شیارهای (عیوب) متفاوت ۱، ۲ و ۳ میلی متری

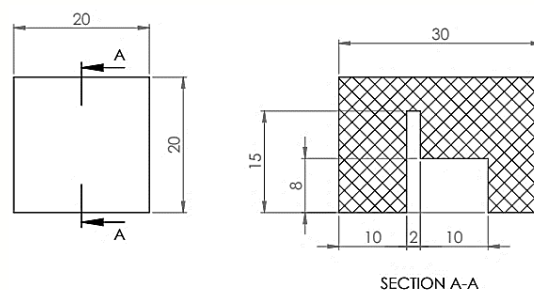


شکل ۴) قطعه پلیمری برای بررسی سرعت موج و خواص آکوستیکی (راستای عمود و در جهت لایه گذاری قطعه است.)

الهام از سنجۀ استاندارد فولادی V1 و با در نظر گرفتن ویژگی های انتشار امواج فراصوت در پلیمرها تعیین می شود.



شکل ۱) ابعاد بلوک استاندارد سنجۀ V1 [۳]



شکل ۲) ابعاد قطعه طراحی شده برای بررسی تفکیک پذیری موج و عیب شیار در هر کاوند متناسب با سنجۀ V1

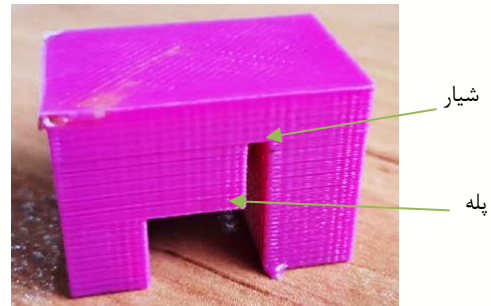
یکی از نکاتی که برای ابعاد قطعات پلیمری باید در نظر گرفت، تضعیف بالای موج در پلیمرها نسبت به فلزات مانند فولاد است که برای کاهش تضعیف، طول قطعه کوتاه تر در نظر گرفته شد. با توجه به تضعیف بیشتر امواج فراصوت در مواد پلیمری نسبت به فلزات، بررسی ابعاد شیارها، قابلیت آشکارسازی آنها و دقت اندازه گیری از اهداف اصلی این بخش از پژوهش است.

¹ Polylactic acid (PLA)

به عنوان قطعه مرجع برای تعیین سرعت موج در ماده PLA مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۵ و ۶، به ترتیب، قطعات ساخته شده برای تفکیک پذیری و عیب شیار در روبش B را نشان می دهند. پارامترهای در نظر گرفته شده برای ساخت قطعه بنابر تجربه محققین و سایر پژوهش ها بهترین پارامترها برای ساخت بهتر قطعه و انتقال موج فراصوتی در قطعات بوده است [۱۲]. همچنین، در این تحقیق ناهمسانگردی قطعه مد نظر نبوده و فقط در راستای چینش بررسی ها صورت گرفت، زیرا خواص سرعت موج در این قطعات در راستاهای مختلف نزدیک به یکدیگر است. سرعت موج در تحقیق انجام شده در سه راستا بدین صورت بوده است: سرعت در راستای چاپ که راستای اندازه گیری در این مقاله است برابر ۲۱۸۰ متر برثانیه بوده و دو راستای دیگر که تقریباً همسان هستند به دلیل تقارن محوری به صورت همسانگرد عرضی^۵ بیان می شود. در دو راستای دیگر سرعت ها برابر ۲۲۴۰ و ۲۲۲۰ متر برثانیه اندازه گیری شده بود که در طول قطعه ۲۵ میلی متری بوده است [۱۲].

۲-۲- ساخت دستگاه روبشگر B

در این پژوهش، به منظور انجام روبش خطی B، یک سامانه حرکتی با استفاده از برد آردوینو، موتور پله ای، پیچ لیداسکرو با گام ۰/۲ میلی متر (پیچ راهنما) و سایر اجزاء مکانیکی طراحی و ساخته شده است (شکل ۷). این سامانه امکان جابه جایی دقیق و کنترل شده کاوند فراصوتی را در امتداد مسیر آزمون فراهم می کند. برای دستیابی به حرکت خطی پایدار و دقیق، از دو میله راهنما، بلبرینگ ها و قطعات نگهدارنده استفاده شد. مجموعه متحرک شامل دو پایه نگهدارنده و یک نگهدارنده کاوند است که روی میله های راهنما و پیچ لیداسکرو قرار گرفته اند.



شکل ۵) قطعه ساخته شده مناسب با سنجه V1 برای بررسی تفکیک پذیری سیگنال و یافتن عیب مصنوعی شیار در روبش B



شکل ۶) قطعه با شیارهای متفاوت برای روبش B

پارامترهای چاپ سه بعدی با استفاده از نرم افزار Simplify3D تنظیم شدند. در این پژوهش، قطر شیپوره^۱ ۰/۴ میلی متر، ضخامت لایه^۲ ۰/۲ میلی متر، سرعت چاپ^۳ ۲۰۰۰ میلی متر بر دقیقه، زاویه الگوی چینش ۴۵- و ۴۵+ درجه و دمای شیپوره ۲۱۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته می شود. همچنین، به منظور فراهم شدن شرایط مناسب برای انتشار امواج فراصوت و جلوگیری از هدر رفت انرژی با دینامیک چگالی هوا و تضعیف ناشی از وجود حفره های داخلی، میزان پرشوندگی^۴ برابر با ۱۰۰ درصد انتخاب می شود. برای اندازه گیری سرعت انتشار موج فراصوت، قطعه نشان داده شده در شکل ۴ با ابعاد ۲۰ × ۲۰ × ۲۰ میلی متر و با استفاده از پارامترهای یاد شده ساخته می شود. این نمونه

^۴ Infill

^۵ Transvers isotropic

^۱ Nozzle diameter

^۲ Layer thickness

^۳ Printing speed



شکل ۷) دستگاه ساخته‌شده برای بررسی آزمون فراصوتی به روش روبش B

است. استفاده از این دو کاوند امکان مقایسه عملکرد آزمون فراصوتی به دو روش تماسی و غوطه‌وری در ارزیابی قدرت تفکیک و قابلیت آشکارسازی عیوب فراهم می‌کند. همچنین در روش تماسی از روغن SONAGEI-W (T-09) ساخت شرکت Sonatest برای ماده واسط و در روش غوطه‌وری از آب به‌عنوان ماده واسط استفاده شد.

۱-۳-۲- آزمون فراصوتی تماسی و غوطه‌وری در

حالت روبش A

از این روش برای اندازه‌گیری سرعت موج (شکل ۸) و ارزیابی قابلیت تفکیک‌پذیری کاوندها (شکل ۹) استفاده می‌شود.

۲-۳-۲- آزمون فراصوتی غوطه‌وری روبش B

رویش B مجموعه‌ای از رویش‌های A است که در امتداد یک مسیر خطی و هم‌زمان با حرکت کاوند ثبت می‌شوند. در این روش، داده‌های حاصل به‌صورت یک تصویر مقطعی نمایش داده می‌شوند که در آن محور افقی بیانگر موقعیت کاوند در طول مسیر رویش و محور عمودی نشان‌دهنده عمق یا زمان پرواز امواج فراصوتی است. بنابراین، رویش B امکان مشاهده تغییرات ضخامت و موقعیت عیوب را در امتداد مسیر حرکت کاوند فراهم می‌کند [۱۸].

مشخصات تنظیمات دستگاه در جدول ۱ برای روش تماسی و روش غوطه‌وری آورده شده است.

فرمان‌های حرکتی از طریق نرم‌افزار به برد آردوینو ارسال شده و موتور پله‌ای بر اساس این فرمان‌ها به حرکت درمی‌آید. سپس، حرکت دورانی موتور به‌وسیله یک کوپلینگ فنری به پیچ لیداسکرو منتقل شده و در نهایت به حرکت خطی نگهدارنده کاوند تبدیل می‌شود. به‌منظور جلوگیری از خروج مجموعه متحرک از محدوده کاری، در انتهای محدوده حرکتی یک حسگر توقف مکانیکی تعبیه می‌شود. همچنین، سرعت حرکت کاوند متناسب با نرخ برداشت داده توسط دستگاه فرستنده-گیرنده فراصوتی تنظیم و ارزیابی انجام می‌شود تا شرایط مناسب برای انجام رویش B و ثبت دقیق سیگنال‌ها فراهم شود.

۳-۲- آزمون فراصوتی

در این پژوهش، از یک دستگاه عیب‌یاب Sonatest Sitescan D20+ استفاده شد و همچنین، با توجه به کاوندهای موجود در آزمایشگاه و با در نظر گرفتن اثر فرکانس بر تضعیف بالای موج در مواد پلیمری، دو نوع کاوند فراصوتی برای انجام آزمون‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. کاوند نخست، کاوند نرمال تماسی Sonatest SLG2-10 با فرکانس مرکزی ۲ مگاهرتز و قطر المان پیزوالکتریک ۱۰ میلی‌متر است. کاوند دوم، یک کاوند غوطه‌وری تخت ساخت شرکت URNDT چین با فرکانس مرکزی ۲ مگاهرتز و قطر المان پیزوالکتریک ۸ میلی‌متر



شکل ۸) تجهیزات و تنظیمات مورد استفاده برای اندازه‌گیری سرعت موج قطعه پلیمری



شکل ۹) ارزیابی سنج ساخته شده براساس بلوک V1 در روش غوطه‌وری

اندازه‌گیری دقیق و صحیح باید سرعت درست ماده ناشناخته را اندازه‌گیری و در دستگاه ثبت شود تا مکان و موقعیت درست و صحیح عیب تشخیص داده شود. در تنظیمات موجود دستگاه نزدیکترین سرعت به سرعت موج طولی در این ماده، ۲۲۰۰ متر برثانیه است و بنابر فواصل اندازه‌گیری شده از سیگنال برگشتی و طول واقعی قطعه، مقدار سرعت از معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$\frac{C}{L} = \frac{2200}{x_2 - x_1} \quad (1)$$

در این معادله، C سرعت واقعی موج، L طول واقعی قطعه، x_1 و x_2 به ترتیب، فاصله کاوند تا روی قطعه و فاصله کاوند تا انتهای قطعه بر اساس سرعت ۲۲۰۰ متر برثانیه هستند.

همان‌طور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده، سیگنال‌های بازتاب شده از قطعه ثبت شدند. از دروازه یک

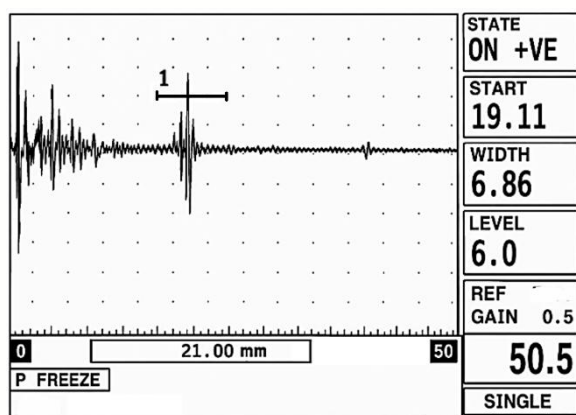
جدول ۱) تنظیمات دستگاه برای ارزیابی قطعات پلیمری PLA

پارامتر تماسی	مقدار	پارامتر غوطه‌وری	مقدار
ZERO	0.762	حالت دروازه	ON +VE
سرعت صوت	2165 m/s	شروع دروازه	38.11 mm
دامنه نمایش	60 mm	عرض دروازه	6.86 mm
تأخیر	0.00	ارتفاع دروازه	6.0 %
بهره	48.5 dB	بهره	50.5 dB

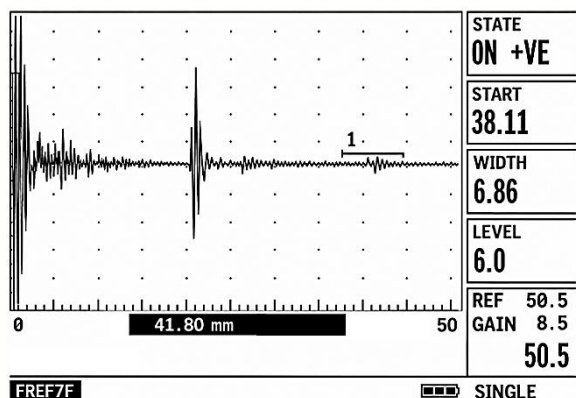
۳- نتایج و بحث

برای تعیین مکان عیب در دستگاه باید سرعت موج در قطعه را تعیین کرد. بنابراین باید روشی ایجاد کرد تا سرعت موج صحیح با این دستگاه مشخص شود. باتوجه به اینکه در دستگاه سرعت‌های خاصی تعریف شده است، برای

مقدار آن با قرار دادن دروازه روی سیگنال ثبت شد. شکل ۱۳، سیگنال‌های بازتاب‌شده از قطعه شکل ۵ را در روش غوطه‌وری نشان می‌دهد. بازتاب اول سیگنال سطح قطعه است، بازتاب دوم سیگنال شیار و بازتاب سوم سیگنال پله را مشخص می‌کند. در شکل ۱۳، سه بازتاب به خوبی تفکیک شده و می‌توان از این تنظیمات دستگاه برای انجام روبش B استفاده نمود.



شکل ۱۰) قرار دادن دروازه روی بازتاب اول کف قطعه



شکل ۱۱) قرار دادن دروازه روی بازتاب دوم کف قطعه

نتایج به‌دست‌آمده از شکل‌های ۱۲ و ۱۳ و جدول ۳، نشان دادند که روش تماسی قادر است عمق شیار قطعه شکل ۵ را با درصد خطای کمتر از ۳ درصد تعیین کند. همچنین، بازتاب‌های مربوط به شیار، پله و کف قطعه به خوبی از یکدیگر تفکیک شدند که بیانگر توانایی مناسب در تشخیص عیوب و تفکیک سیگنال‌های بازتابی است. البته

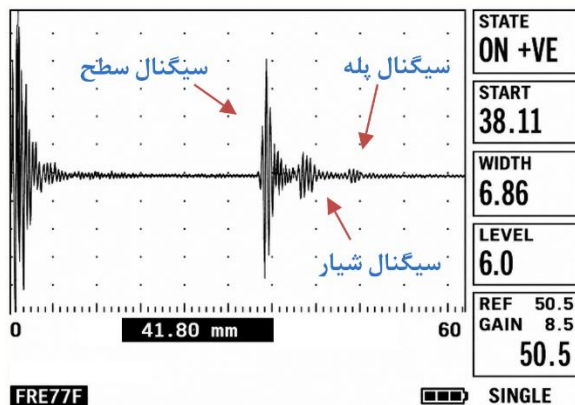
برای خواندن محل بازتاب سطح قطعه (x_1) و کف قطعه (x_2) با هدف اندازه‌گیری سرعت موج، استفاده شده است. مقادیر L ، x_1 و x_2 در ۵ بار تکرار اندازه‌گیری در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲) تکرار اندازه‌گیری طول قطعه				
ردیف	x_1 (mm)	x_2 (mm)	Δx (mm)	L
۱	۲۱/۰۰	۴۲/۰۰	۲۱/۰۰	۲۰/۴۵
۲	۲۱/۰۰	۴۱/۸۰	۲۰/۸۰	۲۰/۵۳
۳	۲۰/۹۲	۴۱/۸۰	۲۰/۸۸	۲۰/۵۵
۴	۲۱/۰۰	۴۱/۷۰	۲۰/۷۰	۲۰/۵۰
۵	۲۱/۰۰	۴۱/۸۰	۲۰/۸۰	۲۰/۵۰

با محاسبه میانگین این مقادیر و قرار دادن مقادیر در معادله (۱)، در نهایت سرعت ماده به مقدار ۲۱۶۵ متر بر ثانیه محاسبه شد. مقدار عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت با احتمال ۹۵ درصد و با استفاده از روند توضیح داده شده در مرجع [۱۹]، برابر ۲۱/۳ متر بر ثانیه (۱ درصد خطا) تخمین زده شد. سرعت اندازه‌گیری‌شده در راستای مورد نظر برای عیب‌یابی نسبت به قطعه معادل با همین پارامترها ساخت، با طول ۲۵ میلی‌متری در تحقیق پیشین نویسندگان [۱۲] این مقاله مقدار ۲۱۸۰ متر بر ثانیه بوده که اختلاف ۰/۶ درصدی نسبت به این دستگاه و روش داشته است که نشان از دقت بالای اندازه‌گیری در روش ذکر شده دارد. پس از اندازه‌گیری سرعت و تنظیم آن در دستگاه، باید قابلیت تفکیک‌پذیری کاوندها توسط قطعه شکل ۵ ارزیابی شود. این موضوع به دو روش تماسی و غوطه‌وری صورت می‌گیرد. مطابق شکل ۱۲، در روش تماسی، سه بازتاب اصلی در سیگنال روبش A مشاهده می‌شود. بازتاب نخست مربوط به سطح شیار، بازتاب دوم مربوط به پله تعبیه‌شده در قطعه و بازتاب سوم ناشی از سطح پایین قطعه است. محل هر یک از بازتاب‌ها دروازه یک مشخص می‌گردد. برای ارزیابی دقت اندازه‌گیری، آزمون ۵ بار تکرار به صورت همسان^۱ شد و نتایج حاصل در جدول ۳ ارائه شده است.

موقعیت‌های تعیین‌شده در جدول ۳ براساس بلندترین قله توسط دستگاه فرستنده – گیرنده تشخیص داده شد و

^۱ Duplicate repetition



شکل ۱۳) سیگنال دریافتی از قطعه پلیمری در آزمون غوطه‌وری برای ارزیابی تفکیک پذیری



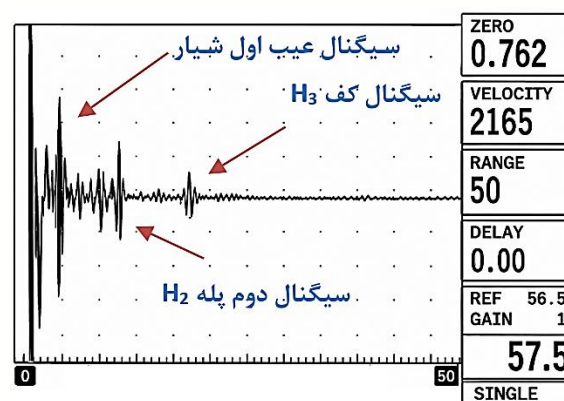
شکل ۱۴) روبش B برای تعیین موقعیت و عمق عیب در قطعه دارای سه شیار در حالت غوطه‌وری

باتوجه به توان موتور و محدوده عملکرد دستگاه امکان انجام روبش B در بازه سرعت ۱ تا ۲۰۰ دور بر دقیقه وجود دارد. نتایج آزمایش‌ها طبق جدول ۴ نشان داد که در تمام سرعت‌های بررسی‌شده، سامانه با استفاده از کاوند ۲ مگاهرتزی قادر به تشخیص هر سه شیار بوده و کیفیت آشکارسازی سیگنال‌ها حفظ می‌شود. البته باتوجه به گام پیچ ۰/۲ میلی‌متری طراحی‌شده سرعت‌ها خطی قابل تبدیل هستند. همچنین، تمام سرعت‌ها از ۱۰ تا ۲۰۰ به صورت افزایش پله ای ۱۰ دور بر دقیقه با سه بار تکرار، بررسی شد.

در روش غوطه‌وری، به دلیل سهولت در تنظیم موقعیت کاوند و حذف محدودیت‌های ناشی از تماس مستقیم، تفکیک سیگنال‌ها به‌ویژه در ناحیه نزدیک^۱ کاوند، نسبت به روش تماسی عملکرد بهتری دارد. از طرفی به دلیل وجود ستون آب بین کاوند و قطعه، تضعیف موج در روش غوطه‌وری نسبت به روش تماسی افزایش می‌یابد و سیگنال کف قطعه در این حالت قابل تشخیص نیست.

جدول ۳) اطلاعات آزمون تماسی برای سیگنال‌های دریافت‌شده

درصد خطا	عمق عیب (mm)		منشأ سیگنال
	توسط کولیس	روش فراصوتی	
۲/۴	5 ± 0.1	5.12 ± 0.05	عیب (شیار) H ₁
۱/۲۳	12.2 ± 0.1	12.35 ± 0.04	عیب (پله) H ₂
۰/۷	20.6 ± 0.1	20.46 ± 0.05	بازتاب کف H ₃



شکل ۱۵) آزمون تماسی برای ارزیابی تفکیک پذیری سه بازتاب شیار، پله و کف قطعه

پس از ارزیابی قابلیت تفکیک‌پذیری، روبش B با همان تنظیمات (بجز بهره) و با استفاده از کاوند غوطه‌وری، بر روی قطعه دارای سه شیار (شکل ۶) به روش غوطه‌وری انجام می‌شود. در شکل ۱۴، با تنظیم دروازه اول و حذف سیگنال سطح قطعه دارای سه شیار، می‌توان عیب‌های قطعه را تشخیص داد. باتوجه به شکل ۱۴، تصویر روبش B در صفحه نمایش در هر لحظه ثبت می‌شود، در این حالت با رسیدن به عیب، دامنه سیگنال تغییر کرده و عمق و موقعیت عیب در تصویر روبش B مشخص می‌شود.

¹ Near Field

فراصوت برای ماده PLA در راستای ساخت قطعه، اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که سرعت انتشار موج در این راستا برابر با $2165 \pm 21/3$ متر بر ثانیه (خطای کمتر از ۱ درصد) است و این مقدار به عنوان سرعت مرجع در تنظیمات دستگاه برای تعیین موقعیت و عمق عیوب مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه، به منظور ارزیابی قابلیت تفکیک‌پذیری، بلوک پلیمری با الگوبرداری از سنجۀ استاندارد فولادی V1 ساخته شد و آزمون‌های فراصوتی به دو روش تماسی و غوطه‌وری روی آن انجام گرفت. نتایج نشان داد که در هر دو روش، سه بازتاب اصلی به خوبی از یکدیگر تفکیک شده و موقعیت آنها با دقت خطای زیر ۳ درصد تعیین شد. این موضوع بیانگر توانایی مناسب در تشخیص عیوب و تفکیک سیگنال‌های بازتابی در قطعات پلیمری است. در نهایت، آزمون روبش B روی قطعه‌ای با شیارهایی بزرگ‌تر و کوچک‌تر از شیار استاندارد (۲ میلی‌متر) انجام شد. نتایج نشان داد که سامانه قادر است موقعیت شیارها را در امتداد مسیر روبش نمایش دهد و تصویر مقطعی از ناپیوستگی‌های موجود در قطعه ارائه کند. بنابر نتایج بررسی شده دستگاه با توجه به محدودیت‌های موتور پله‌ای و زمان بازرسی بازه ۱۶ تا ۲۴ میلی‌متر بر دقیقه برای حرکت دستگاه را پیشنهاد می‌دهد که میانگین آن سرعت حرکت خطی ۲۰ میلی‌متر بر دقیقه است. بررسی کمی دقت اندازه‌گیری این سامانه برای تعیین موقعیت و عمق عیب، در کارهای آتی انجام خواهد پذیرفت.

۵- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۶- منابع

- [1] Honarvar, F., & Varvani-Farahani, A. (2020). A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control. *Ultrasonics*, 108, 106227.
- [2] Riahi, M., & Javidrad, H. R. (2020). Production of ultrasonic test piece by utilization of additive manufacturing technique. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 56(10), 843-852.
- [3] Riahi, M., & Javidrad, H. (2021). Utilization of Special Characteristics in the Manufacturing of Additive Manufacturing Parts for Precise Calibration of Ultrasonic Test Equipment. *NDT Technology*, 2(8), 27-40. (in persian)

جدول ۴) تشخیص عیوب در قطعه دارای سه شیار، در

سرعت‌های مختلف در طی روبش B				
سرعت موتور (RPM)	سرعت خطی معادل (mm/min)	عیب ۱ میلی‌متر	عیب ۲ میلی‌متر	عیب ۳ میلی‌متر
۱	۰.۲	✓	✓	✓
۱۰	۲	✓	✓	✓
۴۰	۸	✓	✓	✓
۸۰	۱۶	✓	✓	✓
۱۰۰	۲۰	✓	✓	✓
۱۲۰	۲۴	✓	✓	✓
۱۵۰	۳۰	✓	✓	✓
۲۰۰	۴۰	✓	✓	✓

بالاین حال، انتخاب سرعت بهینه تنها براساس قابلیت تشخیص عیب انجام نمی‌شود، بلکه عواملی مانند زمان انجام آزمون، افزایش دمای موتور و اجزای مکانیکی و هزینه‌های عملیاتی نیز باید در نظر گرفته شوند. بر این اساس، سرعت ۱۰۰ دور بر دقیقه به عنوان سرعت پیشنهادی انتخاب شد، زیرا ضمن حفظ دقت در تشخیص عیوب، از گرم شدن بیش از حد موتور و کنترل‌گرها جلوگیری کرده و تعادل مناسبی بین زمان انجام آزمون، عملکرد سیستم و کاهش هزینه‌های عملیاتی ایجاد می‌کند. بنابر تجربه محققین در این دستگاه در سرعت‌های زیر ۱ تا ۸۰ دور بر دقیقه زمان زیادی برای آزمون صرف می‌شود و در سرعت‌های بالای ۱۲۰ تا ۲۰۰ نیز به دلیل قفل شدن دستگاه و فشار به موتور پله‌ای و سوختن موردی درایور دستگاه، بهترین حالت سرعت‌های ۸۰ تا ۱۲۰ است و میانگین این سرعت‌ها ۱۰۰ به عنوان سرعت بهینه در نظر گرفته شد. در این تحقیق، هدف اصلی، ساخت و تطبیق مکانیزم حرکتی روبش B با دستگاه عیب‌یاب فراصوتی بوده است. بررسی کمی دقت اندازه‌گیری این سامانه برای تعیین موقعیت و عمق عیوب در روبش B، در کارهای آتی انجام خواهد پذیرفت.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سامانه‌ای برای تعیین موقعیت و عمق عیوب با استفاده از روش روبش B طراحی و ساخته شد. همچنین، به منظور واسنجی سامانه و بررسی قابلیت آن در بازرسی قطعات ساخت افزایشی، قطعات پلیمری طراحی و ساخته شدند. از آنجا که تعیین دقیق موقعیت عیب به سرعت انتشار موج در ماده وابسته است، ابتدا سرعت موج

- [13] Cummings, I., Hillstrom, E., Newton, R., Flynn, E., & Wachtor, A. (2016, May). In-process ultrasonic inspection of additive manufactured parts. In *Topics in Modal Analysis & Testing, Volume 10: Proceedings of the 34th IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics 2016* (pp. 235-247). Cham: Springer International Publishing.
- [14] Oliveira, T. F. D., Cavalheiro, A. C. M., Tsuzuki, M. D. S. G., Buiochi, F., Leão Neto, P., Silva, G. C. D., ... & Andrade, J. H. L. D. (2025). Ultrasonic characterization of 3D-printed polymer objects. *Ultrasonics*, 149, 1-11.
- [15] Chen, Y., Peng, X., Kong, L., Dong, G., Remani, A., & Leach, R. (2021). Defect inspection technologies for additive manufacturing. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 3(2), 022002.
- [16] Lee, J., Hasanian, M., Saboonchi, H., Baechle, M., & Taheri, H. (2020, April). Ultrasonic evaluation of polymer additively manufactured parts for defect inspection and structural integrity assessment. In *Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, Civil Infrastructure, and Transportation XIV* (Vol. 11380, pp. 260-270). SPIE.
- [17] Zimmermann, R., Mohseni, E., Vithanage, R. K., Lines, D., Foster, E., Macleod, C. N., ... & Ding, J. (2022). Increasing the speed of automated ultrasonic inspection of as-built additive manufacturing components by the adoption of virtual source aperture. *Materials & Design*, 220, 110822.
- [18] Jiang, L., Chen, Y., Cao, J., Li, Y., Ye, Y., Zhang, J., ... & Yan, J. (2026). A laser-piezo hybrid ultrasonic focusing method based on diffracted shear waves for detection of embedded defects in metal additive manufacturing. *Measurement Science and Technology*, 37(2), 025202.
- [19] R. Shabani, F. Honarvar, Variation of Longitudinal Ultrasonic Wave Velocity in the Presence of Thermal Gradient; Part 2: Experimental Study and Uncertainty Analysis, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 10-16, 2016. (in Persian)
- [4] Fayazbakhsh, K., Honarvar, F., Amini, H., & Varvani-Farahani, A. J. A. M. (2021). High frequency phased array ultrasonic testing of thermoplastic tensile specimens manufactured by fused filament fabrication with embedded defects. *Additive Manufacturing*, 47, 102335.
- [5] Zeltmann, S. E., Gupta, N., Tsoutsos, N. G., Maniatakos, M., Rajendran, J., & Karri, R. (2016). *Manufacturing and security challenges in 3D printing*. *Jom*, 68(7), 1872-1881.
- [6] Grozdanić, M., Mihaljević, M., Cajner, H., & Godec, D. (2025). Influence of layer thickness and disc orientation on additively manufactured disc-shaped reflectors for ultrasonic testing. *Journal of nondestructive evaluation*, 44(2), 60.
- [7] Eyer, P., Enzler, S., Trauth, A., & Weidenmann, K. A. (2024). Investigating the mechanical properties of polymer samples from different additive manufacturing processes using ultrasonic phase spectroscopy. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 11(2), 666-674.
- [8] Chabot, A., Laroche, N., Carcreff, E., Rauch, M., & Hascoët, J. Y. (2020). Towards defect monitoring for metallic additive manufacturing components using phased array ultrasonic testing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(5), 1191-1201.
- [9] Taheri, H., Koester, L. W., Bigelow, T. A., Faierson, E. J., & Bond, L. J. (2019). In situ additive manufacturing process monitoring with an acoustic technique: clustering performance evaluation using K-means algorithm. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141(4), 041011.
- [10] Soleymani, A., & Riahi, M. (2024). Investigating Non-destructive Tests Used in the Inspection of Parts Produced by Additive Manufacturing (AM) Method. *NDT Technology*, 3(3), 108-123. (in persian)
- [11] ASTM International. (2023). *Additive Manufacturing of Metals—Nondestructive Testing and Evaluation—Defect Detection in Parts*. ASTM International.
- [12] Bagheri-Bami, A., & Honarvar, F. (2022). Determination of the type of anisotropy and stiffness tensor in additive manufacturing polymer components by using ultrasonic waves. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 9(6), 36-48. (in persian)