

Ultrasonic measurement of the case depth of carburized steel parts

Mostafa Heydari¹  | Farhang Honarvar² 

1. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: m.heydari2@email.kntu.ac.ir
2. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: honarvar@kntu.ac.ir

Article Information:

Research Article

Received 12 June 2026

Revised 06 August 2026

Accepted 04 Oct. 2026

Keywords:

Ultrasonic
Non-Destructive Testing,
Backscattering,
Surface Hardness,
Immersion Method,
Signal Processing.

ABSTRACT

The strength and fatigue resistance of components subjected to cyclic and alternating loading, such as crankshafts and gears, are enhanced through diffusion surface hardening processes. Determining the hardened case depth is one of the essential quality control procedures that is typically required after the hardening process. Therefore, this study investigates the measurement of this important control parameter using a non-destructive ultrasonic technique. The ultrasonic method employed in this research is the immersion ultrasonic backscatter technique, in which a 25 MHz transducer is used to measure the depth of thin hardened layers. The hardened specimen is made of DIN 1.7131 steel and has undergone a carburizing heat treatment. The acquired ultrasonic signals are analyzed using signal processing techniques, including noise reduction and detection of the echo reflected from the hardened-layer boundary. The obtained results are then compared with the case depth measured using the conventional destructive method. The results obtained from measurements at 96 locations showed that the hardened case depth of the investigated specimen ranged from 0.76 to 1.24 mm, while the effective case depth determined by the destructive test was approximately 0.867mm, demonstrating good agreement with the ultrasonic measurements. Furthermore, the use of the 25 MHz transducer enabled the detection of the echo reflected from the interface between the martensitic case and the ferrite-pearlite core, making it possible to non-destructively measure hardened layers thinner than 1 mm with satisfactory accuracy. Therefore, the proposed method can be employed as an efficient quality control technique for surface-hardened components in various industrial applications.

Cite this article: Heydari, M., Honarvar, F. (2025). Ultrasonic measurement of the hardened layer depth of hardened steel parts by carbonization method. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 5 (1), 31-41.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.577386.1175>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

اندازه‌گیری فراصوتی عمق لایه سخت‌شده قطعات فولادی سخت‌کاری‌شده به روش کربن‌دهی

مصطفی حیدری^۱ | فرهنگ هنرور^۲^۱. گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران؛ رایانامه: m.heydari2@email.kntu.ac.ir^۲. گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران؛ رایانامه: honarvar@kntu.ac.ir

چکیده:

مقاومت و استحکام قطعاتی که در معرض بارگذاری‌های چرخه‌ای و خستگی متناوب قرار دارند - مانند میل‌لنگ و چرخ‌دنده - با استفاده از سخت‌کاری‌های نفوذی افزایش می‌یابد. تعیین عمق لایه سخت‌شده از فرایندهای کنترلی است که معمولاً لازم است بعد از سخت‌کاری انجام شود. از این‌رو، در این مقاله به مطالعه اندازه‌گیری این متغیر کنترلی و پراهمیت به‌روش نامخرب فراصوتی خواهیم پرداخت. روش فراصوتی که در این پژوهش به کار گرفته خواهد شد، روش مورد استفاده، آزمون فراصوتی غوطه‌وری مبتنی بر پراکندگی برگشتی است که در آن از کاوند ۲۵ MHz برای اندازه‌گیری عمق لایه‌های سخت‌شده با ضخامت کم استفاده می‌شود. قطعه سخت‌شده از جنس فولاد با استاندارد DIN ۱/۷۱۳۱ است که تحت عملیات سخت‌کاری کربن‌دهی قرار گرفته است. سیگنال‌های دریافتی با اعمال فیلترهای پردازش سیگنال، شامل حذف نوفه و آشکارسازی پژواک مرز لایه سخت‌شده، تحلیل می‌شوند و نتایج به‌دست‌آمده با نتایج حاصل از اندازه‌گیری عمق لایه به‌روش مخرب مقایسه می‌شود. نتایج حاصل از اندازه‌گیری بر روی ۹۶ نقطه نشان داد که عمق لایه سخت‌شده در نمونه مورد بررسی در بازه ۰/۷۶ تا ۱/۲۴ میلی‌متر قرار دارد و عمق مؤثر لایه سخت‌شده آزمون مخرب حدود ۰/۸۶۷ میلی‌متر است که با نتایج آزمون فراصوتی تطابق خوبی دارد. همچنین، استفاده از کاوند ۲۵ MHz امکان آشکارسازی پژواک ناشی از مرز بین لایه مارتنزیتی و مغز فریت-پرلیتی را فراهم کرد و اندازه‌گیری نامخرب لایه‌های سخت‌شده با ضخامت کمتر از ۱ میلی‌متر را امکان‌پذیر ساخت. بنابراین، از روش پیشنهادی می‌توان به‌عنوان روشی کارآمد برای کنترل کیفیت قطعات سخت‌کاری‌شده در صنایع مختلف استفاده کرد.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۵/۰۳/۲۲

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۵/۰۵/۱۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۷/۱۲

کلیدواژگان:

آزمون نامخرب فراصوتی،

پراکندگی برگشتی،

سخت‌کاری سطحی،

روش غوطه‌وری،

پردازش سیگنال.

استناد: حیدری، مصطفی؛ و هنرور، فرهنگ. (۱۴۰۴). اندازه‌گیری فراصوتی عمق لایه سخت‌شده قطعات فولادی سخت‌کاری‌شده به روش کربن‌دهی. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۵ (۱)، ۳۱-۴۱.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.577386.1175>

۱- مقدمه

سخت‌کاری سطحی یکی از موضوعات مهم در صنایع مختلف مهندسی است. سخت‌کاری سطحی برای بهبود خواص مکانیکی، مقاومت به سایش و خوردگی و همچنین افزایش زمان عمر و کارایی قطعات فلزی در مراحل پایانی ساخت قطعات استفاده می‌شود. سخت‌کاری سطحی یک فرایند عملیات حرارتی است که افزایش سختی سطح و نرم نگه‌داشتن مغز قطعات از نتایج ارزشمند آن است. ترکیب سطح سخت و مغز نرم امکان تحمل تنش و خستگی بالایی را فراهم می‌سازد. فرایند سخت‌کاری سطحی به روش‌های مختلفی همچون به‌کارگیری انرژی، نفوذ و پوشش‌دهی (تغییر سطح) قابل انجام است. یکنواخت‌بودن عمق سختی در قسمت‌های مختلف قطعات در روش سخت‌کاری نفوذی از مزایای این روش نسبت به دیگر روش‌هایی است که به‌صورت موضعی انجام می‌شوند. کربن‌دهی یک روش سخت‌کاری سطحی است که با نفوذ کربن به داخل سطح فلز، لایه‌ای سخت و مقاوم ایجاد می‌کند. این فرایند معمولاً شامل گرم کردن فولاد در حضور یک محیط غنی از کربن است و در صنایع مختلف به‌دلیل مزایای منحصربه‌فرد این روش مانند مقاومت در برابر بارگذاری و شکست خستگی از آن استفاده می‌شود. فرایندهای کربن‌دهی مایع، کربن‌دهی گازی و کربن‌دهی پلاسما انواع مختلف این روش هستند. فرایند مورد استفاده برای ایجاد لایه سخت‌شده در این مقاله از نوع گازی است. قطعه فلزی در محیطی حاوی گازهای دارای کربن مانند متان یا پروپان و در دمایی بین ۸۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد [۱]. گازها به سطح فلز نفوذ می‌کنند و کربنات‌های سختی را تشکیل می‌دهند. این روش منجر به عمق سختی با خواص یکنواخت در قطعه می‌شود. کاربرد عمده آن در قطعات خودرو، ابزارهای برش و قالب‌های صنعتی است. یکی از مهم‌ترین پارامترهای ارزیابی کیفیت فرایند سخت‌کاری سطحی، اندازه عمق لایه سخت‌شده است که روش معمول و استاندارد آن استفاده از دستگاه سختی‌سنج میکرو ویکرز براساس استاندارد ASTM-E384-17 است که تخریب قطعه را به‌همراه دارد [۲]. تخریب قطعات، چالشی جدی برای صنایع است که اندازه‌گیری نامخرب راه حل مناسبی برای آن است. از انواع روش‌های

نامخرب در اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده، روش‌های صوتی، الکترومغناطیسی، حرارتی و نوری را می‌توان نام برد. تاکنون اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده به‌کمک فراصوت با استفاده از تکنیک بازتابی زاویه‌ای، تضعیف پالس فراصوتی، اندازه‌گیری زمان پرواز، تداخل‌سنجی فراصوتی و پراکندگی برگشتی فراصوتی انجام شده است که در ادامه به‌طور مختصر به شرح آن‌ها می‌پردازیم.

جوزف و هربرت کراتکامر روش بازتابی زاویه‌ای را ارائه دادند [۳]. امواج فراصوتی به سطح ماده ارسال و امواج بازتابی از مرزهای مختلف داخل ماده دریافت می‌شوند. عمق لایه سخت‌شده با اندازه‌گیری زمان برگشت این امواج محاسبه می‌شود. این روش برای لایه‌های سطحی و نزدیک به سطح کارآمد است و می‌تواند لایه‌های نازک تا متوسط را با حداقل ضخامت ۰/۱ میلی‌متر با دقت اندازه‌گیری کند [۳]. بلیتز و سیمپسون [۴] با به‌کارگیری روش تضعیف پالس متوجه شدند که با افزایش عمق و تضعیف امواج، دقت نتایج کاهش می‌یابد. در این روش، یک پالس فراصوتی به درون جسم ارسال می‌شود که در هنگام عبور از جسم به‌تدریج تضعیف می‌شود. امواج بازگشتی از لایه‌های مختلف دریافت و میزان تضعیف آنها در حین عبور از ماده اندازه‌گیری می‌شود. لایه‌های سخت‌شده معمولاً باعث تضعیف بیشتر امواج می‌شوند. این روش برای اندازه‌گیری عمق لایه‌های سطحی و نیمه‌عمقی سخت‌شده مناسب است.

سیلک [۵] با استفاده از روش زمان پرواز دو کاوند فراصوتی را در دو طرف منطقه مورد بازرسی قرار داد. کاوند فرستنده یک پالس فراصوتی به درون ماده ارسال می‌کرد و امواج فراصوتی از مرز لایه‌های مختلف ماده پراکنده و بازتاب می‌شدند و به کاوند گیرنده می‌رسیدند. زمان پرواز این امواج اندازه‌گیری و بر اساس آن عمق لایه سخت‌شده اندازه‌گیری شد.

میسون [۶] روش تداخل‌سنجی فراصوتی را برای اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده ارائه کرد. در این روش، دو موج فراصوتی هم‌فرکانس به درون ماده ارسال می‌شوند و پس از برخورد با مرزهای مختلف ماده، با یکدیگر تداخل می‌کنند. الگوی تداخل امواج حاصل تحلیل می‌شود و تغییرات فاز و دامنه امواج بررسی می‌شود. تغییرات در فاز و دامنه امواج تداخلی به عمق لایه‌های مختلف ماده بستگی

می‌شود. تشکیل فاز مارتنزیت با سختی بالا در ناحیه سطحی، در حالی که مغز قطعه عمدتاً شامل ساختار فریت-پرلیت با سختی پایین‌تر است، موجب ایجاد اختلاف در اندازه دانه، چگالی نابه‌جایی‌ها، خواص الاستیک و ضرایب پراکندگی صوتی می‌شود. هنگامی که موج فراصوتی به ناحیه گذار بین لایه سخت‌شده و مغز نرم می‌رسد، به دلیل تغییر ناگهانی در ویژگی‌های آکوستیکی محیط، بخشی از انرژی موج بازتابیده و بخشی دیگر در اثر اختلاف ریزساختار پراکنده می‌شود. این تغییر در انرژی موج برگشتی باعث ایجاد یک مؤلفه قابل تشخیص در سیگنال دریافتی می‌شود که می‌توان از آن به‌عنوان نشانگر مرز بین لایه سخت‌شده و مغز قطعه استفاده کرد.

با وجود پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه اندازه‌گیری نامخرب عمق لایه سخت‌شده، همچنان تعیین دقیق مرز بین لایه سخت و مغز قطعه در نمونه‌های دارای عمق سختی کم، به دلیل هم‌پوشانی پژواک‌ها، تضعیف سیگنال و تغییرات ناشی از شرایط اندازه‌گیری، یکی از چالش‌های اصلی روش‌های فراصوتی محسوب می‌شود. علاوه‌براین، در اغلب مطالعات پیشین از تغییرات سرعت انتشار موج، ضریب تضعیف یا دامنه سیگنال به‌عنوان شاخص اندازه‌گیری استفاده شده و کاربرد مستقیم سیگنال‌های پراکندگی برگشتی برای تعیین مرز ریزساختاری لایه سخت‌شده کمتر مورد توجه قرار گرفته است. نوآوری پژوهش حاضر در استفاده از روش پراکندگی برگشتی فراصوتی در حالت غوطه‌وری برای اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده ناشی از فرایند کربن‌دهی در فولاد DIN1.7131 است. در این پژوهش، با به‌کارگیری یک کاوند ۲۵ MHz، امکان تفکیک پژواک ناشی از مرز بین لایه مارتنزیتی و مغز فریت-پرلیتی فراهم شده است. همچنین به‌منظور افزایش دقت اندازه‌گیری، سیگنال‌های فراصوتی با استفاده از مجموعه‌ای از فیلترهای دیجیتال در محیط برنامه‌نویسی Python پردازش شده و مناسب‌ترین سیگنال برای استخراج زمان پرواز و تعیین عمق لایه سخت‌شده انتخاب شده است.

علاوه‌براین، به‌منظور ارزیابی اعتبار روش پیشنهادی، نتایج اندازه‌گیری فراصوتی با نتایج حاصل از آزمون مخرب ریزسختی ویکرز مطابق استاندارد ASTM E384-17 مقایسه شده است.

دارد و از آنها برای محاسبه عمق لایه سخت‌شده استفاده می‌شود. گود و رز [۷] از روش‌های پیشرفته امواج هدایت‌شده برای اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده استفاده کردند. در این روش، امواج فراصوتی با زاویه خاصی به سطح ماده ارسال می‌شوند. زاویه انتخاب‌شده بستگی به نوع ماده و ویژگی‌های هندسی قطعه دارد. این امواج فراصوتی هدایت‌شده در ماده حرکت می‌کنند و توانایی نفوذ در عمق‌های مختلف را دارند. این امواج فراصوتی هنگام برخورد با لایه‌های سخت‌شده یا عیوب داخلی، بازتابیده و پراکنده می‌شوند.

در روش پراکندگی برگشتی فراصوتی نیز امواج فراصوتی به درون ماده ارسال و هنگام برخورد با ناپیوستگی‌ها و مرزهای مختلف پراکنده می‌شوند. امواج پراکنده‌شده سپس دریافت و تحلیل می‌شوند. لایه‌های سخت‌شده ممکن است امواج فراصوتی را به طرق مختلفی پراکنده سازند که از آن برای محاسبه عمق لایه سخت‌شده استفاده می‌شود. از پژوهش‌های انجام‌شده در این موضوع، می‌توان به مقلله باقری و همکاران [۸] با موضوع اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده قطعات فولادی اشاره کرد. همچنین در تکنیک فراصوتی غوطه‌وری نیز از روش پراکندگی برگشتی استفاده و عمق سخت‌شده ۱/۲۲ میلی‌متر در قطعات فولادی با موفقیت اندازه‌گیری شده است [۹].

اندازه‌گیری عمق سخت‌شده با روش پراکندگی برگشتی یک روش نامخرب و پیشرفته است که برای بررسی خواص سطحی و عمقی قطعات فلزی سخت‌شده به روش نفوذی نیز قابل‌استفاده است. این روش با استفاده از امواج فراصوتی فرکانس بالا که از قطعات فلزی عبور می‌کنند، اطلاعات مفیدی در مورد ساختار داخلی و تغییرات خواص مکانیکی قطعات فلزی ارائه می‌دهد [۱]. پراکندگی امواج وابسته به اندازه دانه در ساختار قطعات است به‌طوری‌که با افزایش اندازه دانه، میزان پراکندگی امواج نیز افزایش می‌یابد. از آنجایی‌که ساختار مغز قطعه دانه‌بندی درشت‌تری نسبت به ساختار لایه سخت‌شده دارد، امواج فراصوتی با برخورد به مغز نرم قطعه شروع به پراکنده‌شدن می‌کنند. تفاوت در دانه‌بندی ساختار قطعات معیاری برای اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده در نظر گرفته می‌شود [۱۰]. در فرایند کربن‌دهی، نفوذ اتم‌های کربن به سطح فولاد موجب تغییر ترکیب شیمیایی و در نتیجه تغییر ریزساختار ماده پس از عملیات حرارتی

۲- روش اندازه‌گیری لایه سخت‌شده سطحی

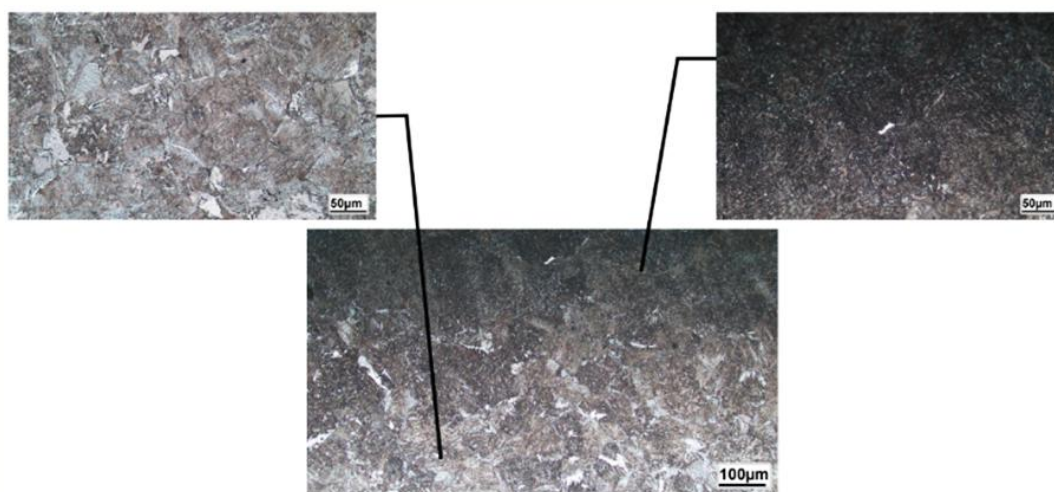
امواج فراصوتی در اثر تغییر در خصوصیات محیطی که موج در آن حرکت می‌کند، پدیده‌های مختلفی از جمله بازتابش، شکست، پراش^۱، پراکندگی و جذب را تجربه می‌کنند. پراکندگی امواج فراصوتی می‌تواند ناشی از ذرات ریز، حباب‌ها، یا تخلخل‌های موجود در ماده باشد [۱۱، ۱۲]. اندازه و شکل این ریزساختارها نقش مهمی در الگوی پراکندگی ایفا می‌کند. هنگامی که امواج فراصوتی با ریزساختارهای موجود در ماده برخورد می‌کنند، در جهت‌های مختلفی پراکنده می‌شوند و بخشی از این امواج به کاوند بازمی‌گردد که به آن امواج پراکندگی برگشتی گفته می‌شود. از این امواج می‌توان برای اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده قطعات فولادی که به‌روش نفوذی کربن‌دهی سخت شده‌اند، استفاده کرد.

تفاوت در ریزساختار و دانه‌بندی قطعات سخت‌شده با بزرگ‌نمایی‌های ۲۰۰ میکرون و ۱۰۰ میکرون با استفاده از میکروسکوپ نوری در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده

است. در شکل‌های (۱) و (۲)، لایه سخت‌شده دارای فازهای کربید - مارتنزیت و مغز قطعه شامل فازهای فریت-پرلیت با دانه‌بندی درشت‌تر است. تغییر ریزساختار بین دو لایه سخت‌شده و مغز نرم قطعه ناحیه گذرای ایجاد می‌کند که در پراکندگی امواج تأثیرگذار است و امواج با برخورد به این ناحیه دچار پراکندگی می‌شوند و بخشی از این امواج به کاوند بازمی‌گردد.



شکل (۱) ناحیه سخت‌شده در مقیاس ۲۰۰ میکرون.



شکل (۲) ناحیه سخت‌شده در مقیاس ۱۰۰ میکرون.

سخت‌شده قطعه، ضخامت لایه سخت‌شده محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$HD = \frac{t V_T}{2} \cos \beta \quad (۱)$$

در معادله (۱)، HD عمق لایه سخت‌شده، t زمان پرواز، V_T سرعت امواج عرضی در فولاد و β زاویه شکست موج عرضی

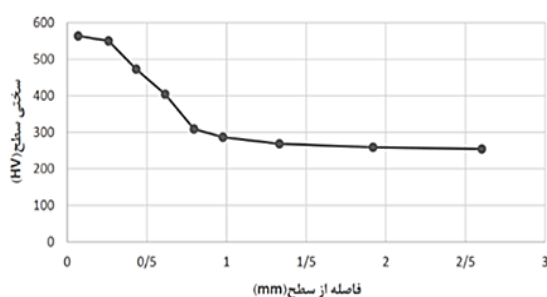
جهت اندازه‌گیری پراکندگی برگشتی از امواج عرضی به دلیل طول موج کمتر و پراکندگی و زمان پرواز بیشتر نسبت به امواج طولی استفاده می‌شود. با استفاده از معادله (۱) با محاسبه اختلاف زمان دریافت پژواک‌های فراصوتی اول و دوم به ترتیب پژواک حاصل از برخورد به سطح سخت‌کاری‌شده و پژواک حاصل از برخورد به ناحیه گذرای بین مغز نرم و سطح

¹ Diffraction

۳- آزمایش‌های انجام‌شده

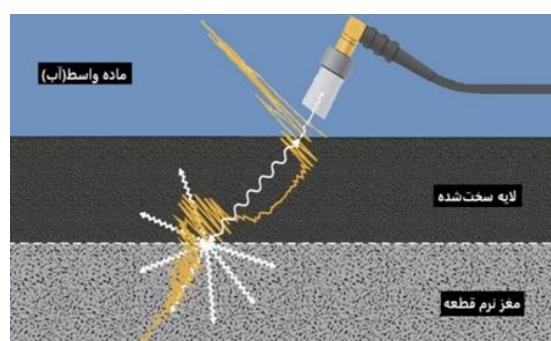
برای انجام آزمون، تجهیزات شامل دستگاه فرستنده - گیرنده فراصوتی، کارت تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال با نرخ نمونه‌برداری ۱۰۰ مگاهرتز، کاوند فراصوتی غوطه‌وری ۲۵ مگاهرتز، نگهدارنده کاوند فراصوتی به همراه مخزن آب و بلوک ۷ شکل فراهم شد. آزمون بر روی یک نمونه استوانه‌ای شکل از جنس فولاد آلیاژی سمانتیون با استاندارد (DIN ۱۷۱۳۱) با قطر ۳۴ میلی‌متر و طول ۲۰۰ میلی‌متر که به روش نفوذی کربن‌دهی تحت عملیات سخت‌کاری قرار گرفت، انجام شد. عمق لایه سخت‌شده قطعه به روش مخرب میکروسختی‌سنجی ویکرز نیز اندازه‌گیری شد. نمودار حاصل از آزمون میکروسختی‌سنجی در شکل (۴)، نمایش داده شده است [۱۴]. برای انجام آزمون فراصوتی غوطه‌وری نیازمند تنظیم دقیق کاوند نسبت به سطح قطعه هستیم. زاویه بهینه بین ۱۶ تا ۱۸ درجه بود و فاصله کاوند از قطعه نیز باتوجه‌به فاصله کانونی کاوند تنظیم شد. چگونگی انجام آزمون در شکل (۵) نشان داده شده است که در آن نحوه قرارگیری قطعه موردنظر و کاوند دیده می‌شود.

نمودار سختی استوانه کربن‌دهی‌شده



شکل (۴): نمودار سختی واقعی قطعه سخت‌کاری‌شده.

است. به‌منظور اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده به روش غوطه‌وری (شکل ۳)، کاوند متمرکزکننده با فرکانس ۲۵ مگاهرتز، فاصله کانونی^۱ ۲ اینچ (۵۰/۸۰ میلی‌متر) و زاویه بهینه در مخزن آب قرار می‌گیرد. باتوجه‌به کم‌بودن ضخامت لایه سخت‌شده حاصل از فرایند کربن‌دهی، استفاده از کاوندهای فراصوتی با فرکانس بالا ضروری است. افزایش فرکانس امواج فراصوتی موجب کاهش طول موج و در نتیجه افزایش توانایی تفکیک ناپیوستگی‌ها و تغییرات ریزساختاری در نواحی نزدیک به سطح می‌شود. از آنجاکه در این پژوهش هدف، شناسایی ناحیه گذار از لایه سخت‌شده به مغز نرم قطعه با استفاده از تغییرات پراکندگی برگشتی امواج است، کاوند ۲۵ مگاهرتز به دلیل داشتن حساسیت بالا نسبت به تغییرات کوچک ساختاری و قابلیت تفکیک بالا انتخاب شده است. اگرچه افزایش فرکانس موجب افزایش حساسیت اندازه‌گیری می‌شود، اما باعث افزایش تضعیف موج در ماده و حساسیت بیشتر به نوفه‌های محیطی نیز خواهد شد. بنابراین، انتخاب فرکانس ۲۵ مگاهرتز به عنوان یک هماهنگی مناسب بین قدرت تفکیک، عمق نفوذ و نسبت سیگنال به نوفه در محدوده مورد بررسی انجام شد. کاوند امواج فراصوتی را از طریق آب به درون قطعه می‌فرستد و در اثر برخورد امواج با سطح قطعه و ناحیه گذار پراکندگی روی می‌دهد. با پردازش سیگنال‌های دریافتی و اعمال فیلترهای بهبوددهنده براساس معادله (۱)، عمق لایه سخت‌شده محاسبه می‌شود.



شکل (۳): طرح‌واره انجام آزمون فراصوتی غوطه‌وری.

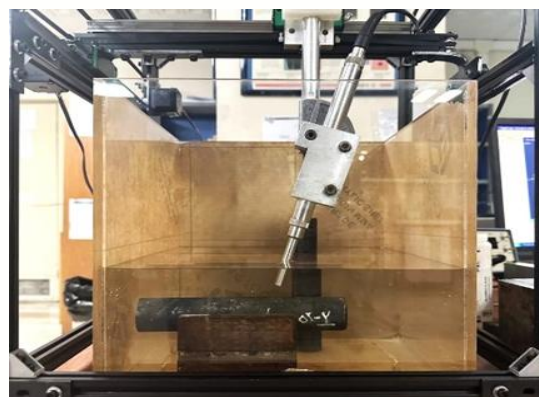
¹ Focal length

است. در روش پراکندگی برگشتی، پارامتر اصلی مورد بررسی، تغییرات دامنه و انرژی سیگنال پراکنده شده است. از آنجا که انرژی موج فراصوتی با مجموع دامنه‌های مؤلفه‌های بازگشتی مرتبط است، تغییرات انرژی سیگنال نسبت به تغییرات لحظه‌ای دامنه، معیار پایدارتر و قابل اعتمادتری برای تشخیص ناحیه گذار محسوب می‌شود. باین‌حال، در این پژوهش برای تعیین موقعیت مرز لایه سخت‌شده، مکان قله (زمان رسیدن پژواک) مورد استفاده قرار گرفته و دامنه سیگنال پس از اعمال فیلترهای مناسب برای افزایش نسبت سیگنال به‌نوفه و بهبود قابلیت تفکیک بررسی شده است.

سیگنال‌ها در ابتدا یکسو شده و در مرحله بعد به‌کمک فیلترهای هموارکننده و کاهش‌دهنده اختلال‌های اضافی پردازش می‌شوند. دلیل نزدیک به هم بودن پژواک‌های دریافتی عمق کم لایه سخت‌کاری شده است. جهت رسیدن به دقت لازم در اندازه‌گیری زمان رسیدن پژواک‌های موردنظر و کاهش نوفه سیگنال دریافتی پردازشی مناسب اعمال شد تا در نهایت اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده انجام شود.

۴- تحلیل و پردازش سیگنال

سطح نمونه سخت‌کاری شده به چندین بخش تقسیم شد و با حرکت کاوند در طول ۱۶ سانتی‌متر، در شش زاویه مختلف و در مجموع بر روی ۹۶ نقطه، عمق لایه سخت‌شده اندازه‌گیری شد. در شکل (۶)، نمونه سیگنال حاصل از آزمون فراصوتی نمایش داده شده است که در آن دو پژواک موردنظر مشخص شده‌اند. به دلیل نزدیکی زمانی این پژواک‌ها به یکدیگر، تفکیک دقیق سیگنال‌های دریافتی دشوار است و این مسئله می‌تواند دقت اندازه‌گیری عمق لایه را کاهش دهد. به منظور افزایش دقت تحلیل، نرم‌افزاری در محیط پایتون برای اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده طراحی و پیاده‌سازی شد. این نرم‌افزار با هدف کاهش نوفه و بهبود کیفیت سیگنال، داده‌های دریافتی را تقویت کرده و با اعمال فیلترهای مناسب مورد تحلیل قرار می‌دهد. در این نرم‌افزار، سیگنال اولیه پس از تعریف متغیرهای مربوط به هر فیلتر، به‌صورت مرحله‌ای و حداکثر از سه نوع فیلتر مختلف عبور داده می‌شود.



شکل (۵): چگونگی قرارگیری کاوند و قطعه جهت انجام آزمون.

امواج منتشرشده پس از برخورد به سطح قطعه پراکنده شده و مقداری از امواج پراکنده شده مجدداً توسط کاوند دریافت می‌شوند. امواج برگشتی از سطح موردنظر باتوجه به بررسی قطعه سخت‌کاری شده، اطلاعاتی حاوی برخورد امواج به ناحیه گذرای لایه سخت‌شده و مغز قطعه به ما می‌دهد. امواج پس از دریافت به دستگاه فرستنده-گیرنده ارسال شده و کارت آنالوگ به دیجیتال (A/D) تعبیه شده در سیستم، سیگنالی دیجیتال به عنوان خروجی به دست می‌دهد. سیگنال دریافتی با اعمال فیلترهای مناسب پردازش می‌شود. این سیگنال دارای پژواک‌های متفاوتی است. پژواک اول، نتیجه برخورد امواج به سطح قطعه و دلیل اصلی تولید آنها زبری سطح است و پژواک بعدی حاصل برخورد امواج به ناحیه گذرا است. به عبارتی سیگنال به دست آمده از انجام آزمون فراصوتی شامل دو پژواک اول و دوم به عنوان معیار سنجش اختلاف زمان برای به دست آوردن عمق لایه سخت‌شده است.

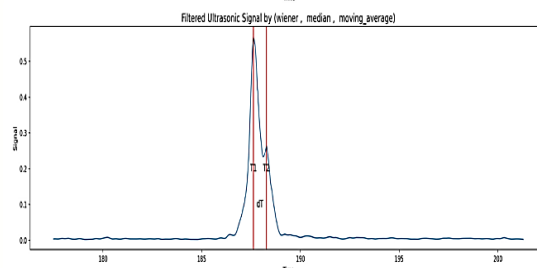
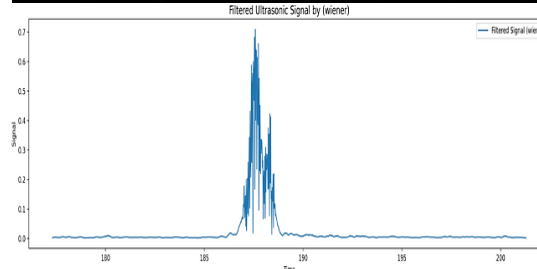
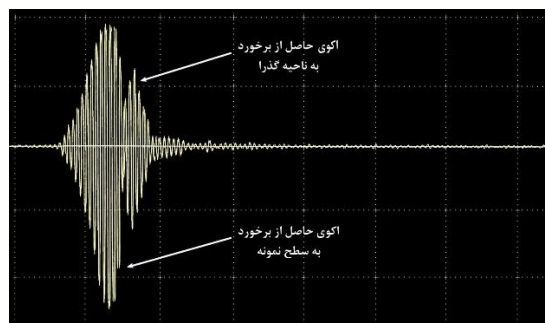
ظهور پژواک دوم در سیگنال‌های فراصوتی را می‌توان به تغییرات ریزساختاری در مرز بین لایه سخت‌شده و مغز نرم قطعه نسبت داد. در ناحیه سطحی نمونه کربن‌دهی شده، ساختار مارتنزیتی دارای سختی بالا، اندازه دانه متفاوت و چگالی بیشتر ناهنجاری‌ها نسبت به ساختار فریت-پرلیت مغز است. این تفاوت ریزساختاری موجب تغییر در ضریب پراکندگی امواج فراصوتی و اختلاف در امپدانس آکوستیکی دو ناحیه می‌شود. در نتیجه، هنگام رسیدن موج به ناحیه گذار، بخشی از انرژی موج به سمت کاوند بازتابیده شده و به‌صورت یک مؤلفه مشخص در سیگنال دریافتی ظاهر می‌شود که در این پژوهش به عنوان پژواک دوم از آن یاد شده

برای حذف نوفه‌های ضربه‌ای به کار می‌رود و با جایگزینی هر نمونه سیگنال با میانه نمونه‌های اطراف آن، بدون استفاده از روابط خطی، عمل فیلترگذاری انجام می‌شود؛ از این رو یک فیلتر غیرخطی محسوب می‌شود.

فیلتر میانگین متحرک نوع دیگری از فیلترهای دیجیتالی است که در پردازش سیگنال به‌عنوان یک فیلتر پایین‌گذر با پاسخ ضربه محدود در نظر گرفته می‌شود. این فیلتر به‌دلیل ساختار ساده پاسخ ضربه، برای هموارسازی سیگنال و کاهش نوفه کاربرد دارد. همچنین، تکرار دوره‌ای فرکانس‌های ناچ در حوزه فرکانس باعث می‌شود این فیلتر در حذف برخی تداخل‌ها و هارمونیک‌ها نیز مؤثر باشد. در این پژوهش، پس از یکسوسازی سیگنال اولیه دریافتی، پردازش سیگنال با به‌کارگیری ترکیبی از فیلترهای وینر، میانه و میانگین متحرک انجام شد. در مرحله نخست، فیلتر وینر اعمال شد. در مرحله دوم، فیلتر میانه با اندازه هشتت میدان پذیرنده کانولوشن برابر ۵ به کار گرفته شد و در نهایت، فیلتر میانگین متحرک با طول پنجره ۲۰ اعمال گردید. این ترکیب فیلترگذاری موجب شد موقعیت پژواک‌ها به‌وضوح قابل تشخیص باشد و با اعمال دروازه‌های مشخص بر روی دو قله پژواک موردنظر، دقت اندازه‌گیری عمق لایه مؤثر به‌طور قابل توجهی افزایش یابد. مطابق شکل (۶)، شناسایی موقعیت پژواک‌های موردنظر در نرم‌افزار بر اساس الگوریتم تشخیص قله انجام شد؛ به گونه‌ای که قله نخست مربوط به بازتاب از سطح قطعه و قله دوم ناشی از بازتاب از ناحیه گذار بین لایه سخت‌شده و مغز قطعه است. اختلاف زمانی بین این دو پژواک به‌عنوان معیار اصلی محاسبه عمق لایه سخت‌شده در نظر گرفته شد.

۵- نتایج و بحث

بر اساس تحلیل آماری عدم قطعیت نتایج حاصل از آزمون فراصوتی و آزمون مخرب، با محاسبه درصد خطا و انحراف معیار مشاهده شد که در ضخامت‌های کم لایه سخت‌شده و با استفاده از کاوندهای فراصوتی با فرکانس بالا، اندازه‌گیری عمق لایه امکان‌پذیر است؛ هرچند دقت اندازه‌گیری در این محدوده نسبت به عمق‌های بیشتر کاهش می‌یابد. آزمون‌ها بر روی نمونه موردنظر که تحت عملیات سخت‌کاری سطحی



شکل ۶ نمونه‌ای از سیگنال‌های حاصل از آزمون فراصوتی و نمایش تغییرات فیلترهای مورد استفاده. (برحسب دامنه به زمان).

فیلتر وینر یکی از روش‌های متداول پردازش سیگنال است که به‌طور گسترده برای کاهش نوفه و بهبود کیفیت سیگنال‌های فراصوتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فیلتر به‌گونه‌ای طراحی شده است که با استفاده از یک مدل آماری، تخمینی بهینه از سیگنال اصلی ارائه می‌دهد، مشروط بر آنکه سیگنال و نوفه هر دو ایستا بوده و دارای مشخصات طیفی معین باشند. معیار عملکرد فیلتر وینر کمینه‌سازی خطای میانگین مربعات بین سیگنال واقعی و سیگنال فیلترشده است؛ به‌طوری‌که ضمن حفظ اطلاعات مفید سیگنال، میزان نوفه به حداقل برسد.

فیلتر میانه نیز با قرار دادن یک پنجره متحرک بر روی سیگنال عمل می‌کند، به گونه‌ای که مقدار میانه نمونه‌های داخل پنجره به‌عنوان خروجی فیلتر انتخاب می‌شوند. در این فیلتر طول پنجره عددی فرد بوده و مقدار میانی، دنباله مرتب‌شده خروجی را تشکیل می‌دهد. فیلتر میانه عمدتاً

از فرایند کربن‌دهی در سطح قطعه تقریباً یکنواخت است، با این حال به دلیل کم‌بودن عمق سختی، تعداد نقاط اندازه‌گیری افزایش داده شد تا دقت و قابلیت اعتماد نتایج بهبود یابد. مقادیر اندازه‌گیری‌شده به روش فراصوتی در جدول (۱) و مقایسه نتایج آزمون فراصوتی و آزمون مخرب در جدول (۲) ارائه شده است.

کربن‌دهی قرار گرفته بودند انجام و نتایج حاصل از روش‌های مخرب و نامخرب به‌منظور مقایسه ارائه شد. نتایج نشان‌دهنده این بود که استفاده از کاوند ۲۵ مگاهرتز امکان آشکارسازی تغییرات ناشی از ناحیه انتقال سختی را در لایه‌های کم‌عمق فراهم کرده است و انتخاب فرکانس بالا برای اندازه‌گیری لایه‌های سخت‌شده نازک حاصل از فرایند کربن‌دهی مناسب بوده است. نتایج نشان می‌دهد که عمق لایه سخت‌شده حاصل

جدول (۱) نتایج اندازه‌گیری آزمون فراصوتی.

عمق لایه سخت‌شده نقطه	عمق لایه سخت‌شده نقطه	عمق لایه سخت‌شده نقطه	عمق لایه سخت‌شده نقطه	عمق لایه سخت‌شده نقطه	عمق لایه سخت‌شده نقطه	عمق لایه سخت‌شده نقطه	عمق لایه سخت‌شده نقطه	عمق لایه سخت‌شده نقطه	عمق لایه سخت‌شده نقطه	عمق لایه سخت‌شده نقطه	عمق لایه سخت‌شده نقطه
۱/۱۶	۸۱	۱/۰۴	۶۵	۱/۰۷	۴۹	۱/۱۰	۳۳	۱/۰۰	۱۷	۰/۹۷	۱
۰/۹۰	۸۲	۰/۹۵	۶۶	۱/۱۷	۵۰	۱/۱۳	۳۴	۱/۰۳	۱۸	۱/۱۲	۲
۱/۰۷	۸۳	۱/۰۲	۶۷	۰/۸۹	۵۱	۰/۹۸	۳۵	۰/۹۰	۱۹	۰/۹۵	۳
۱/۰۶	۸۴	۱/۰۶	۶۸	۱/۰۷	۵۲	۱/۲۴	۳۶	۱/۱۹	۲۰	۱/۱۷	۴
۱/۰۲	۸۵	۱/۱۵	۶۹	۰/۸۸	۵۳	۱/۰۱	۳۷	۱/۰۸	۲۱	۱/۱۱	۵
۱/۱۱	۸۶	۱/۰۵	۷۰	۱/۰۶	۵۴	۱/۱۱	۳۸	۱/۰۴	۲۲	۰/۹۱	۶
۱/۲۳	۸۷	۰/۹۸	۷۱	۱/۲۴	۵۵	۱/۰۰	۳۹	۱/۱۷	۲۳	۰/۸۲	۷
۰/۹۳	۸۸	۰/۸۸	۷۲	۱/۲۶	۵۶	۱/۰۸	۴۰	۱/۰۴	۲۴	۰/۸۱	۸
۱/۰۸	۸۹	۰/۹۷	۷۳	۰/۸۱	۵۷	۰/۹۱	۴۱	۰/۷۶	۲۵	۰/۹۰	۹
۰/۹۱	۹۰	۱/۰۲	۷۴	۱/۱۶	۵۸	۱/۰۵	۴۲	۰/۸۵	۲۶	۱/۰۳	۱۰
۱/۱۸	۹۱	۰/۹۱	۷۵	۱/۱۶	۵۹	۱/۰۶	۴۳	۰/۹۳	۲۷	۰/۹۹	۱۱
۰/۹۸	۹۲	۰/۸۸	۷۶	۱/۱۴	۶۰	۰/۸۷	۴۴	۱/۱۱	۲۸	۰/۹۸	۱۲
۰/۷۶	۹۳	۱/۰۸	۷۷	۱/۲۳	۶۱	۰/۹۷	۴۵	۱/۱۹	۲۹	۰/۹۷	۱۳
۰/۹۸	۹۴	۱/۰۳	۷۸	۰/۹۱	۶۲	۰/۸۵	۴۶	۱/۲۲	۳۰	۰/۹۷	۱۴
۱/۱۰	۹۵	۱/۰۰	۷۹	۱/۱۰	۶۳	۱/۰۱	۴۷	۱/۰۱	۳۱	۱/۱۷	۱۵
۱/۱۲	۹۶	۱/۰۴	۸۰	۰/۹۷	۶۴	۱/۱۸	۴۸	۰/۹۸	۳۲	۰/۸۶	۱۶

جدول (۲) نتایج نهایی

میانگین عمق سختی آزمون (میلی‌متر) میانگین عمق سختی واقعی (میلی‌متر) درصد خطا انحراف معیار			
۱/۰۱۷	۰/۸۶۷	۱۳	۰/۱

مقادیر اندازه‌گیری‌شده نشان داد که داده‌های حاصل از آزمون فاقد داده‌های پرت هستند. همچنین مشخص شد که کاهش نوفه با استفاده از فیلترهای مختلف، در صورت انتخاب نامناسب پارامترها، می‌تواند منجر به تغییر در ویژگی‌های سیگنال اصلی شود. به‌منظور دستیابی به سطح اطمینان قابل قبول، انجام آزمون‌ها در محدوده دقت به‌دست‌آمده مورد

به‌منظور تحلیل رفتار داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های مهندسی، از مفاهیم احتمال و آمار برای توصیف رفتار متغیرهای تصادفی پیوسته مشترک استفاده شد. داده‌هایی که خارج از بازه تغییرات نرمال قرار می‌گیرند، می‌توانند موجب برآورد نادرست میانگین نمونه شده و در نتیجه، میزان عدم قطعیت تصادفی را افزایش دهند. بررسی داده‌های پرت در

حاصل از تحلیل سیگنال‌ها نشان داد که فیلتر کردن سیگنال بدون تغییر ویژگی‌های اصلی موج امکان‌پذیر است، اما انتخاب نامناسب پارامترهای فیلتر می‌تواند موجب جابه‌جایی موقعیت قله‌ها و ایجاد خطا در تخمین زمان پرواز شود. از دیدگاه کاربرد صنعتی، روش پیشنهادی نسبت به روش‌های متداول مبتنی بر آزمون میکروویکرز دارای مزیت مهم عدم تخریب قطعه است. این ویژگی امکان استفاده از روش فراصوتی را برای کنترل کیفیت قطعات تولیدی، پایش قطعات در حین سرویس و ارزیابی قطعات حساس مانند چرخ‌دنده‌ها و قطعات تحت بارگذاری خستگی فراهم می‌کند. باین‌حال، برای افزایش قابلیت تعمیم روش، بررسی اثر عواملی مانند زبری سطح، تغییرات ریزساختاری ناشی از فرایندهای مختلف سخت‌کاری و تأثیر شرایط اتصال کاوند به قطعه در مطالعات آینده ضروری است.

۶- نتیجه‌گیری

مقایسه نتایج نشان‌دهنده مقدار خطای بیشتر در هنگام استفاده از امواج فراصوتی فرکانس بالا در ضخامت و عمق‌های پایین بود. می‌توان به این نتیجه رسید که اندازه‌گیری در عمق‌های کم قطعات سخت‌شده نفوذی و از نوع کربن‌دهی‌شده امکان‌پذیر است و این امر می‌تواند در صنعت برای اندازه‌گیری این نوع سخت‌کاری بدون قرارگرفتن قطعات در معرض آسیب کاربردی به کار برده شود. ناحیه‌گذاری مغز نرم و سطح سخت‌شده اطلاعات مفیدی را داراست و این ساختار بسته به نوع عملیات سخت‌کاری متفاوت است و این تفاوت در کیفیت داده‌های دریافتی از آزمون تأثیر قابل‌توجهی دارد. یکنواخت بودن عمق لایه سخت‌شده در سطح قطعه به‌خوبی نشان‌دهنده تفاوت این نوع عملیات حرارتی نسبت به سایر عملیات‌های موضعی است و با توسعه روش انجام‌شده و بهبود شرایط اندازه‌گیری می‌توان درصد خطای اندازه‌گیری را تا کمترین حد کاهش داد. در نهایت، نتایج نشان می‌دهد که با توسعه روش ارائه‌شده و بهبود شرایط اندازه‌گیری، از جمله انتخاب بهینه کاوند، تنظیم پارامترهای پردازش سیگنال و کاهش منابع خطا، می‌توان دقت اندازه‌گیری را افزایش داد و درصد خطای حاصل را به حداقل رساند.

ارزیابی قرار گرفت. بر این اساس، محدوده دقت برای نمونه مورد اندازه‌گیری برابر با ۰/۰۳۸۷ به‌دست آمد که نشان‌دهنده اعتبار نتایج حاصل در بازه دقت تعیین‌شده است.

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که روش پراکندگی برگشتی فراصوتی قابلیت اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده حاصل از فرایند کربن‌دهی را دارد. مقایسه نتایج آزمون فراصوتی با نتایج حاصل از اندازه‌گیری پروفیل سختی به روش میکروویکرز نشان داد که روند تغییرات عمق لایه سخت‌شده در هر دو روش یکسان است. این تطابق بیانگر آن است که تغییرات ریزساختاری ایجادشده در اثر نفوذ کربن، موجب تغییر در رفتار پراکندگی امواج فراصوتی شده است و می‌توان از این تغییرات برای تعیین مرز تقریبی بین لایه سخت‌شده و مغز نرم قطعه استفاده کرد. نتایج به‌دست‌آمده با مطالعات پیشین انجام‌شده در زمینه اندازه‌گیری عمق سخت‌کاری با روش‌های فراصوتی مطابقت دارد. در مطالعات باقری و همکاران [۸]، امکان اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده در قطعات فولادی با استفاده از تحلیل سیگنال‌های پراکندگی برگشتی فراصوتی بررسی شده است. همچنین، در پژوهش‌های مبتنی بر آزمون فراصوتی غوطه‌وری، عمق‌های سخت‌شده در حدود میلی‌متر با استفاده از تحلیل تغییرات انرژی سیگنال‌های برگشتی اندازه‌گیری شده است [۹]. نتایج پژوهش حاضر نیز نشان داد که با استفاده از کاوند فرکانس بالا (۲۵ مگاهرتز) می‌توان تغییرات ناشی از لایه‌های کم‌عمق سخت‌شده را آشکارسازی کرد. استفاده از فرکانس بالاتر موجب افزایش حساسیت به تغییرات ریزساختاری نزدیک به سطح می‌شود. اگرچه افزایش حساسیت به نوفه و نیاز به پردازش دقیق‌تر سیگنال نیز از محدودیت‌های این روش محسوب می‌شود.

یکی از عوامل مؤثر بر دقت اندازه‌گیری ضخامت کم لایه سخت‌شده و نزدیک بودن ناحیه انتقال سختی به سطح قطعه است. در لایه‌های کم‌عمق، فاصله زمانی بین مؤلفه‌های مختلف سیگنال کاهش یافته و تفکیک بازتاب‌های مربوط به سطح، ناحیه‌گذار و سایر مرزهای داخلی دشوارتر می‌شود. به همین دلیل، استفاده از روش‌های پردازش سیگنال دیجیتال و انتخاب دقیق پارامترهای فیلترینگ نقش مهمی در استخراج ویژگی‌های مرتبط با عمق سخت‌شده دارد. نتایج

۷- منابع

1. Davis, J.R., *Surface hardening of steels: understanding the basics*. 2002: ASM international.
2. Hardness, A.B., *Standard test method for microindentation hardness of materials*. ASTM Committee: West Conshohocken, PA, USA, 1999. 384: p. 399.
3. Krautkrämer, J. and H. Krautkrämer, *Ultrasonic testing of materials*. 2013: Springer Science & Business Media.
4. Blitz, J. and G. Simpson, *Ultrasonic methods of non-destructive testing*. Vol. 2. 1995: Springer Science & Business Media.
5. Silk, M.G., *Ultrasonic transducers for nondestructive testing*. 1984.
6. Mason, W.P., R.N. Thurston, and A.D. Pierce, *Physical acoustics: principles and methods*. (No Title), 2000.
7. Rose, J.L., *A baseline and vision of ultrasonic guided wave inspection potential*. Journal of pressure vessel technology, 2002. 124(3): p. 273-282.
8. Honarvar, F. and R.B. Borouji, *Case depth: ultrasonic measurement*. Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys (Online Version), 2016: p. 652-663.
9. Baqeri, R., F. Honarvar, and R. Mehdizad, *Case depth profile measurement of hardened components using ultrasonic backscattering method*. 18th WCNDT, 2012.
10. Honarvar, F., A. Bahadory, and M. Bayat Kazazi, *Case depth measurement of steel components by contact ultrasonic backscattering technique*. NDT Technology, 2022. 2(9): p. 69-76.
11. Honarvar, F. (2020). *Nondestructive Testing: Fundamentals, Methods and Applications*, K. N. Toosi University of Technology Press. (in Persian)
12. Wolfe, R.M. and G. Yang, *Nondestructive methods to determine hardening depth can be cost-efficient, but also challenging*.
13. Willems, H., *Nondestructive determination of hardening depth in induction hardened components by ultrasonic backscattering*, in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Volume 10B*. 1991, Springer. p. 1707-1713.
14. Lieferbedingungen, T., *Case hardening steels - Technical delivery conditions English version of DIN EN 10084:2008-06*, in *DIN EN 10084*. June 2008.