

Case Depth Measurement of Steel Components by Contact Ultrasonic Backscattering Technique

Alireza Bahadory, Farhang Honarvar*, Mahdi Bayat Kazazi

Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

*honarvar@kntu.ac.ir

Abstract

Surface hardening is one of the common methods to improve the surface properties of steel components such as axles and gears. One of the control parameters measured in this process is the case depth, which can be measured by either destructive or nondestructive methods. In this paper, the ultrasonic nondestructive backscattering technique is utilized to measure the case depth of steel shafts. Measurements are carried out on four steel shafts with different case depths by using contact ultrasonic testing method. The ultrasonic signals collected from these shafts are rectified and filtered by smoothing filters. Comparison of the results of the ultrasonic tests with those of the destructive tests confirms the capability and high precision of the ultrasonic backscattering technique in measuring the case depth. The maximum error in ultrasonic backscattering measurements was less than 4%. Due to its nondestructive and portable nature, this technique can be a good choice for quality control induction hardened components with a case depth of 2 mm or more.

Keywords: Surface Hardening, Induction Hardening, Ultrasonic Testing, Contact Method, Backscattering

اندازه‌گیری فراصوتی عمق لایه سخت‌شده قطعات فولادی به روش پراکندگی برگشتی تماسی

علیرضا بهادری، فرهنگ هنرور*، مهدی بیات کزازی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
honarvar@kntu.ac.ir*

چکیده: سخت‌کاری یکی از روش‌های بهبود خواص سطح در قطعات فولادی از جمله محورها و چرخ‌دنده‌ها است. یکی از پارامترهای کنترلی که باید در این فرایند اندازه‌گیری شود، عمق لایه سخت‌شده است که به روش‌های مخرب یا غیرمخرب قابل اندازه‌گیری است. در این مقاله، تکنیک اندازه‌گیری عمق سختی به روش فراصوتی پراکندگی برگشتی با به‌کارگیری کاوند تماسی پیاده‌سازی و از آن برای اندازه‌گیری عمق سختی قطعات فولادی استفاده شده است. اندازه‌گیری‌ها بر روی چهار محور فولادی با عمق‌های سختی متفاوت انجام شده است. سیگنال‌های فراصوتی اندازه‌گیری‌شده بر روی این چهار قطعه پس از یکسوسازی با فیلترهای هموارکننده پردازش شده‌اند. مقایسه نتایج حاصل از آزمون غیرمخرب پراکندگی برگشتی با نتایج آزمایش‌های مخرب میکرو ویکرز نشان می‌دهد که این روش توانایی و دقت بالایی در اندازه‌گیری عمق سختی دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بیشینه خطای اندازه‌گیری به روش فراصوتی پراکندگی برگشتی کمتر از ۴٪ بوده است. باتوجه به غیرمخرب و قابل حمل بودن، این روش می‌تواند گزینه مناسبی برای کنترل کیفیت نمونه‌های سخت‌کاری‌شده به روش القایی با عمق سختی بیش از ۲ میلی‌متر باشد.

واژگان کلیدی: سخت‌کاری سطحی، روش القایی، امواج فراصوتی، روش تماسی، پراکندگی برگشتی

۱- مقدمه

بسیاری از قطعات فولادی مورد استفاده در صنعت مانند میل‌لنگ، میل‌بادامک، چرخ‌دنده و محور نیاز به بهبود سختی سطح به منظور مقاومت در برابر سایش و ضربه دارند. سخت‌کاری سطحی یک فرآیند عملیات حرارتی است که موجب افزایش سختی سطح خارجی شده و در عین حال مغز قطعه را نسبتاً نرم نگه می‌دارد. ترکیب یک سطح سخت و یک مغز نرم در مهندسی مدرن بسیار ارزشمند است؛ زیرا در این صورت قطعه می‌تواند تنش و خستگی بسیار بالایی را تحمل کند. فرایند سخت‌کاری سطحی به روش‌های مختلفی همچون کربن‌دهی، نیتروژن‌دهی، سخت‌کاری شعله‌ای، سخت‌کاری القایی و سخت‌کاری لیزری قابل انجام است که در این بین روش سخت‌کاری القایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این روش، هنگامی که جریان الکتریکی متناوب با فرکانس بالا از سیم‌پیچ عبور می‌کند، میدان مغناطیسی در اطراف سیم‌پیچ ایجاد می‌شود [۱].

حال اگر قطعه‌ای فولادی در معرض میدان مغناطیسی سیم پیچ قرار گیرد، خطوط جریان مغناطیسی از قطعه عبور می‌کنند و باعث ایجاد جریان گردابی بر روی سطح قطعه می‌شوند. ایجاد جریان گردابی نیز باعث گرم‌شدن سطح قطعه می‌شود. بدین ترتیب، در مدت چند ثانیه ضخامت از سطح نمونه به دمای آستنیت می‌رسد که با خنک‌کاری سریع آن، سطح قطعه کاملاً سخت می‌شود. میزان سختی سطح و عمق لایه سخت‌شده، مهم‌ترین پارامترهای ارزیابی کیفیت فرایند سخت‌کاری سطحی هستند. مطابق استاندارد ISO ۱۸۲۰۳، روش استاندارد برای اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده، استفاده از دستگاه سختی سنج میکرو ویکرز^۱ است [۲]. سختی سنج میکرو ویکرز، سختی سطح برش‌خورده را در فواصل معین از سطح بالایی به سمت مغز قطعه اندازه‌گیری می‌کند. اگرچه این روش بسیار دقیق است، اما علاوه بر اینکه موجب تخریب قطعه می‌شود، زمان‌بر و پرهزینه نیز هست و برای بازرسی در محل

¹ Micro-Vickers hardness testing machine

در روش تشدید الکترومغناطیسی از تراگذارهای EMAT⁷ برای اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده استفاده می‌شود. این تراگذارها نوع خاصی از تراگذارهای فراصوتی هستند که برای تولید امواج فراصوتی در مواد رسانا استفاده می‌شوند. به‌منظور اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده بر روی محورهای از کاوندهای EMAT در فرکانس‌های مختلف استفاده می‌شود. باتوجه‌به اینکه فرکانس‌های بالا تحت تاثیر خواص سطح محور و فرکانس‌های پایین تحت تاثیر میانگین خواص محور هستند، با مقایسه پاسخ فراصوتی فرکانس‌های بالا و پایین، عمق لایه سخت‌شده قابل اندازه‌گیری است [۶].

در روش فراصوت لیزری، از ترکیبی از لیزر و یک فرورونده هوشمند الکتریکی برای اندازه‌گیری غیرمخرب عمق لایه سخت‌شده استفاده می‌شود [۷]. فرورونده الکتریکی این قابلیت را دارد که هم سختی و هم عمق لایه سخت‌شده قطعه را اندازه‌گیری کند. در این روش، نوک فرورونده در تماس با سطح قطعه قرار می‌گیرد و هم‌زمان سیستم تولید لیزر نیز یک پرتو لیزر را به نقطه‌ای در مجاورت نوک فرورونده می‌تاباند. در اثر برخورد لیزر به سطح و گرم شدن آن، امواج فراصوتی در قطعه ایجاد می‌شود. با عبور موج از ناحیه سخت‌شده، بخشی از آن از ناحیه گذرا (مرز ناحیه سخت و نرم) بازتابیده می‌شود و بخش دیگر به داخل مغز نرم قطعه نفوذ می‌کند. حسگر تعبیه‌شده در فرورونده، موج بازتابیده را تشخیص می‌دهد و سیگنالی متناسب با اختلاف زمانی بین لحظه برخورد لیزر به سطح و لحظه بازتاب موج از ناحیه گذرا تولید می‌کند. با تحلیل سیگنال و مقایسه آن با سیگنال نمونه‌های واسنجی⁸، عمق لایه سخت‌شده اندازه‌گیری می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به امکان اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده در انواع روش‌های سخت‌کاری سطحی اشاره کرد [۸].

باقری و همکاران از روش پراکندگی برگشتی برای اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده قطعات سخت‌کاری‌شده به روش القایی استفاده کردند [۸،۹]. در این روش، با استفاده از تکنیک غوطه‌وری و با تنظیم کاوند تحت زاویه‌ای معین، امواج فراصوتی به درون قطعه ارسال می‌شود. با پراکنده

هم چندان مناسب نیست. بدین ترتیب، اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده به‌صورت غیرمخرب به چالشی جدی برای صنایعی که به آن نیاز دارند، تبدیل شده است. روش‌های غیرمخرب مورد استفاده برای تعیین عمق لایه سخت‌شده، به اندازه‌گیری خواص مختلف قطعه می‌پردازند. سپس، با مرتبط‌ساختن این خواص با عمق لایه سخت‌شده، عمق سختی اندازه‌گیری می‌شود. بر این اساس، روش‌های غیرمخرب را بر اساس اصل فیزیکی به‌کار گرفته‌شده برای اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده به سه گروه روش‌های الکترومغناطیسی، روش‌های صوتی و روش‌های حرارتی تقسیم‌بندی می‌کنند [۳]. روش‌های اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده به‌روش صوتی شامل روش بازتابی زاویه‌ای²، استفاده از امواج سطحی³، روش تشدید الکترومغناطیسی⁴، روش فراصوت لیزری⁵ و روش پراکندگی برگشتی⁶ است که در ادامه فرایند اندازه‌گیری به‌وسیله هر یک از این روش‌ها به‌اختصار شرح داده خواهد شد.

روش بازتابی زاویه‌ای، توسط گود و رز برای اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده بیش از ۲ میلی‌متر معرفی شد [۴]. در این روش از یک سیستم فراصوتی، که محدوده فرکانسی امواج آن در محدوده مگاهرتز است، برای تجزیه و تحلیل ریزساختار و اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده استفاده می‌شود. این روش به‌دلیل موانع متعددی همچون اثر مبهم اکوی سطح جلویی و نسبت سیگنال‌به‌نوفه⁷ بسیار پایین، برای عمق سختی بیشتر از ۲ میلی‌متر استفاده نشده است. تاکاهاشی و همکاران با به‌کارگیری امواج سطحی روشی را برای اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده قطعات فولادی توسعه دادند و از آن برای بازرسی قطعات سخت‌شده به روش نیتروژن‌دهی استفاده کردند [۵]. در این روش، دو کاوند⁸ فراصوتی به فاصله تقریبی ۶ میلی‌متر از هم بر روی سطح یک قطعه فولادی قرار می‌گیرند. از آنجایی که تغییرات سرعت امواج سطحی متناسب با ضخامت لایه سخت‌شده است، با مقایسه سرعت امواج سطحی بر روی قطعات فولادی می‌توان عمق لایه سخت‌شده را با دقت بهتر از ۲۰ میکرومتر اندازه‌گیری کرد.

⁷ Signal-to-noise ratio (SNR)

⁸ Probe

⁹ Electromagnetic acoustic transducer

¹⁰ Calibration

² Pulse-echo angulation

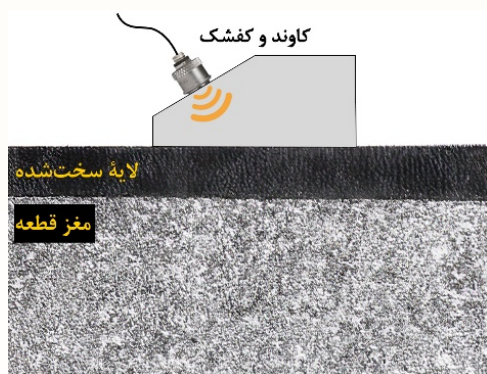
³ Rayleigh waves

⁴ Electromagnetic resonance

⁵ Laser ultrasound

⁶ Backscattering

ساختار مارتنزیتی است؛ ولی مغز قطعه ساختار فریت-پرلیتی دارد و دانه‌بندی آن درشت‌تر است. در هنگام عبور موج فراصوتی از لایه سخت‌شده، هیچ‌گونه پراکندگی‌ای ایجاد نمی‌شود؛ اما مطابق شکل ۱، هنگامی که امواج فراصوتی از مرز دو ناحیه عبور می‌کنند، به دلیل تغییر ریز ساختار، پراکندگی قابل توجهی روی می‌دهد.



شکل ۱: طرح‌واره چگونگی انجام آزمون

برای اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده با استفاده از روش پراکندگی برگشتی، معمولاً از امواج عرضی استفاده می‌شود؛ زیرا امواج عرضی نسبت به امواج طولی دارای پراکندگی بیشتر، طول موج کمتر و زمان پرواز بیشتری هستند. با اندازه‌گیری اختلاف زمانی اکوی سطح و اکوی حاصل از پراکندگی برگشتی و با جایگذاری آن‌ها در معادله زیر [۱۳]:

$$CHD = \frac{1}{2} V t \cos \beta \quad (1)$$

می‌توان عمق لایه سخت‌شده یعنی CHD را به دست آورد. در معادله (۱)، V سرعت امواج عرضی در فولاد، t زمان پرواز و β زاویه شکست موج عرضی است.

به منظور اندازه‌گیری لایه سخت‌شده به روش تماسی مطابق با شکل ۱، یک کاوند فراصوتی زاویه‌ای بر روی قطعه قرار داده می‌شود و موج فراصوتی با زاویه معینی به درون قطعه ارسال و در سطح قطعه و ناحیه گذرا تا حد زیادی پراکنده می‌شود. با پردازش سیگنال حاصل از پراکندگی سطح قطعه و ناحیه گذرا و استفاده از معادله (۱)، عمق لایه سخت‌شده اندازه‌گیری می‌شود.

شدن موج از سطح قطعه و ناحیه گذرا، سیگنالی به دست می‌آید که با پردازش و مقایسه آن با سیگنال نمونه‌های واسنجی، عمق لایه سخت‌شده قابل اندازه‌گیری است. این روش قابلیت اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده بیش از یک میلی‌متر را داراست. از آنجا که روش غوطه‌وری محدودیت‌هایی نظیر نیاز به مخزن آب، قابل حمل نبودن را داراست، در این روش امکان انجام آزمون در محل وجود ندارد. از این رو، چند شرکت خارجی با طراحی کفشک‌های مخصوص توانسته‌اند اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده را به روش تماسی انجام دهند [۱۰، ۱۱].

در این مقاله، پیاده‌سازی روش اندازه‌گیری عمق سختی به روش فراصوتی پراکندگی برگشتی با استفاده از کاوندهای تماسی ارائه خواهد شد. این روش برای اندازه‌گیری عمق سختی بر روی چند قطعه سخت‌کاری شده به کار گرفته شده است که نتایج این اندازه‌گیری‌ها گزارش و با نتایج آزمون مخرب میکروویکرز مقایسه می‌شود. از مزایای این روش نسبت به روش مخرب می‌توان به سرعت بالای اندازه‌گیری، صرفه‌جویی در هزینه و معیوب نشدن قطعه پس از اندازه‌گیری اشاره کرد؛ همچنین از مهم‌ترین مزیت‌های روش پراکندگی برگشتی نسبت به سایر روش‌های فراصوتی می‌توان به محدوده وسیع اندازه‌گیری (بالای ۲ میلی‌متر)، عدم نیاز به واسنجی و اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده بر روی طیف وسیعی از آلیاژهای فولاد با هندسه‌های مختلف اشاره کرد.

۲- روش اندازه‌گیری

تضعیف فراصوتی به معنای کاهش دامنه و شدت امواج فراصوتی در هنگام انتشار است. یکی از عوامل ایجاد این پدیده، پراکندگی امواج فراصوتی است [۱۲]. پراکندگی به دلیل تغییر شدید خواص ماده در مرز دانه‌هایی که ابعاد آنها تقریباً با طول موج برابر است، رخ می‌دهد. به طور کلی، امواج فراصوتی در تمام جهت‌ها پراکنده می‌شوند. برخی از این امواج پراکنده‌شده به سمت کاوند بازمی‌گردند که به آنها امواج پراکندگی برگشتی گفته می‌شود. برای اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده قطعات فولادی که به روش القایی سخت‌کاری شده‌اند، می‌توان از تکنیک پراکندگی برگشتی استفاده کرد. در این روش، از تفاوت دانه‌بندی لایه سخت‌شده و مغز نرم قطعه استفاده می‌شود. لایه سخت‌شده دارای



شکل ۲: موقعیت‌دهی کاوند و کفشک نسبت به قطعه

برای تعیین فاصله زمانی بین دو اکو، ابتدا سیگنال‌ها یک سو می‌شوند و با عبور از فیلتر هموارکننده^{۱۱} برای انجام تحلیل آماده می‌شوند (شکل ۴).

پس از به‌دست آوردن شکل پردازش‌شده سیگنال، برای اندازه‌گیری فاصله زمانی دو اکو از دو دروازه^{۱۲} استفاده می‌شود. در نهایت، با جایگذاری اختلاف زمانی بین دو اکو و قراردادن آن در رابطه (۱)، عمق لایه سخت‌شده به‌دست می‌آید.

۴- نتایج و تحلیل

سطح هر یک از قطعات مورد آزمایش به ۸۰ قسمت تقسیم و آزمون فراصوتی بر روی هر یک از این قسمت‌ها انجام شد. در شکل ۵، سیگنال‌هایی حاصل از هر یک از چهار نمونه آزمایش، نشان داده شده است. همچنین، در جدول ۲ نتایج حاصل از اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده بر روی نمونه شماره ۳ به‌عنوان نمونه آورده شده است.

در جدول ۳، نتایج حاصل از اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده نمونه‌ها آورده شده است. در این جدول، میانگین عمق سختی برابر با میانگین عمق لایه سختی اندازه‌گیری شده در ۸۰ نقطه بر روی سطح نمونه و اندازه واقعی عمق سختی اندازه‌گیری شده در آزمون مخرب است. همان‌طور که در جدول ۳ دیده می‌شود، انحراف معیار اندازه‌گیری ناچیز است که نشان از پراکندگی کم داده‌ها نسبت به میانگین اندازه‌گیری دارد. درخصوص خطای حاصل از

۳- آزمایش‌های انجام‌شده

تجهیزات لازم برای انجام آزمون شامل دستگاه فرستنده-گیرنده فراصوتی، کارت تبدیل آنالوگ به دیجیتال با نرخ نمونه‌برداری ۱۰۰ مگاهرتز، کاوند فراصوتی تماسی با فرکانس ۱۵ مگاهرتز و کفشک مخصوصی است که برای انجام آزمایش‌ها طراحی شده است. آزمایش‌ها بر روی ۴ محور فولادی می‌شود که به‌روش القایی و با عمق‌های سختی مختلفی سخت‌کاری سطحی شده‌اند.

در ابتدا و قبل از انجام آزمون‌های فراصوتی، عمق لایه سخت شده هر یک از این نمونه‌ها با روش میکرو ویکرز اندازه‌گیری شده است. مقادیر اندازه‌گیری شده عمق لایه‌های سخت‌شده در جدول ۱ داده شده است.

جدول ۱: عمق لایه سخت‌شده نمونه‌ها

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴
عمق لایه سخت‌شده (mm)	۲/۷۹	۳/۰۱	۴/۲۹	۷/۷۴

برای انجام آزمون به روش تماسی نیاز به ساخت کفشکی است که به کاوند فراصوتی متصل شود و امکان ارسال موج در زاویه موردنظر را به‌درون قطعه فراهم سازد. زاویه کفشک به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که موج ارسالی حداکثر انرژی ممکن را دارا باشد. فاصله کاوند تا سطح قطعه نیز به‌روش تجربی و با سعی وخطا معین می‌شود. در شکل ۲، چگونگی موقعیت‌دهی کاوند و کفشک نسبت به قطعه نشان داده شده است.

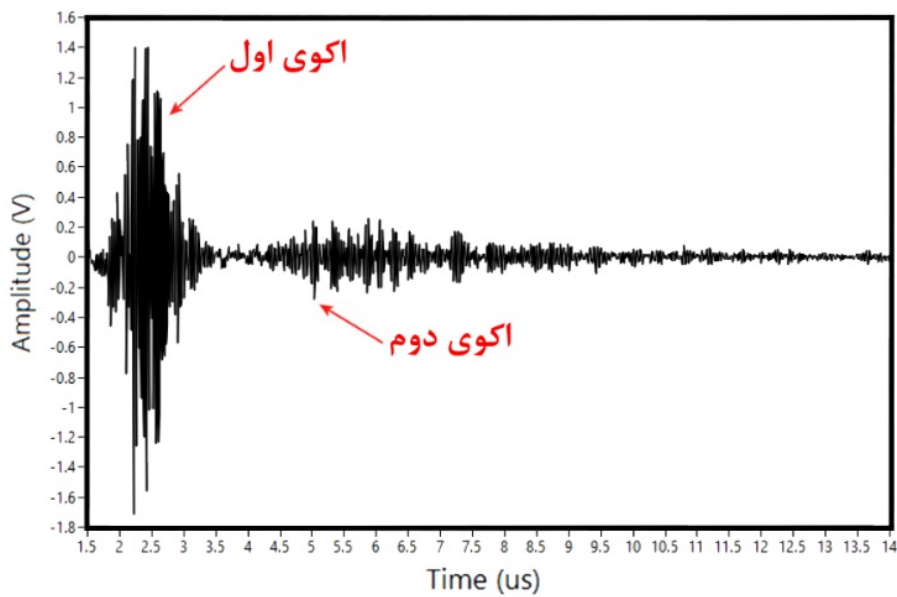
نمونه‌ای از سیگنال‌های فراصوتی به‌دست آمده از آزمایش‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. این سیگنال شامل دو اکو است که اکوی اول ناشی از پراکندگی برگشتی موج از سطح قطعه و اکوی دوم ناشی از پراکندگی برگشتی موج در سطح تماس لایه سخت‌شده و مغز نرم قطعه (ناحیه گذرا) است. پراکندگی برگشتی از سطح قطعه وابسته به زبری سطح قطعه و پراکندگی برگشتی از ناحیه گذرا وابسته به اندازه دانه‌بندی است. هرچند این دو منبع پراکندگی متفاوت هستند؛ اما شکل کلی اکوی مربوط به آن‌ها شبیه‌به‌هم است. از این‌رو، می‌توان از فاصله زمانی بین این دو اکو به‌عنوان معیاری برای اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده استفاده کرد.

¹² Gate

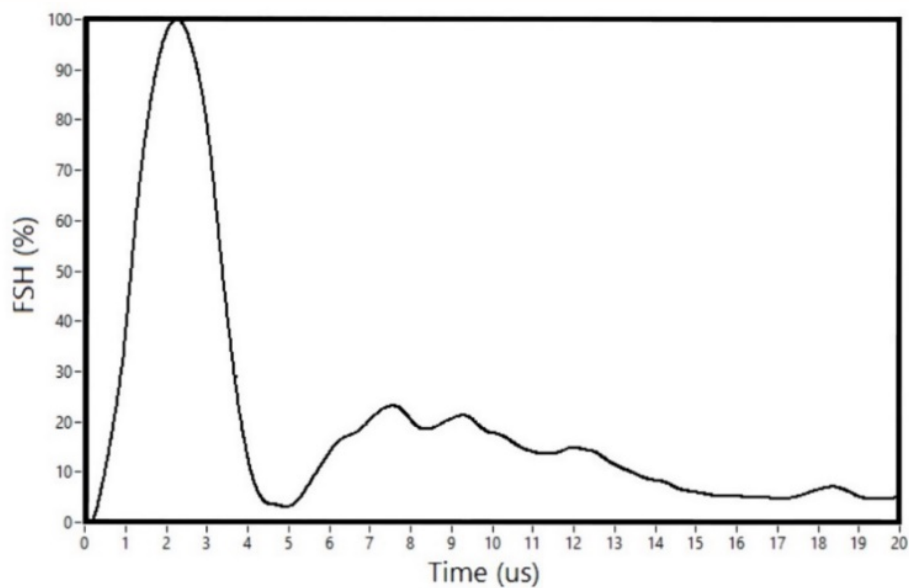
¹¹ Smoothing filter

است، این‌درحالی است که ویلمز خطای اندازه‌گیری‌های در آزمون فراصوتی غوطه‌وری را $\pm 10\%$ گزارش کرده است [۱۳]. از این‌رو می‌توان گفت، خطای به‌دست آمده از اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده به‌روش تماسی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های صورت‌گرفته به‌روش غوطه‌وری از کمتر است و این امر نشان از دقت بالاتر روش تماسی نسبت به روش غوطه‌وری دارد.

اندازه‌گیری، باتوجه‌به‌اینکه آزمون مخرب تنها در یک نقطه انجام شده‌اند؛ ولی آزمون فراصوتی در نقاط مختلفی از محور صورت‌گرفته است و همچنین به دلیل اینکه عمق سختی در نقاط مختلف نمونه یکسان نیست، خطایی در مقایسه نتایج آزمون غیرمخرب و آزمون مخرب وجود دارد که میزان آن برای هر یک از نمونه‌ها در جدول ۳ داده شده است. مطابق با اطلاعات این جدول بیشترین درصد خطای اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده با روش تماسی برابر با 4%

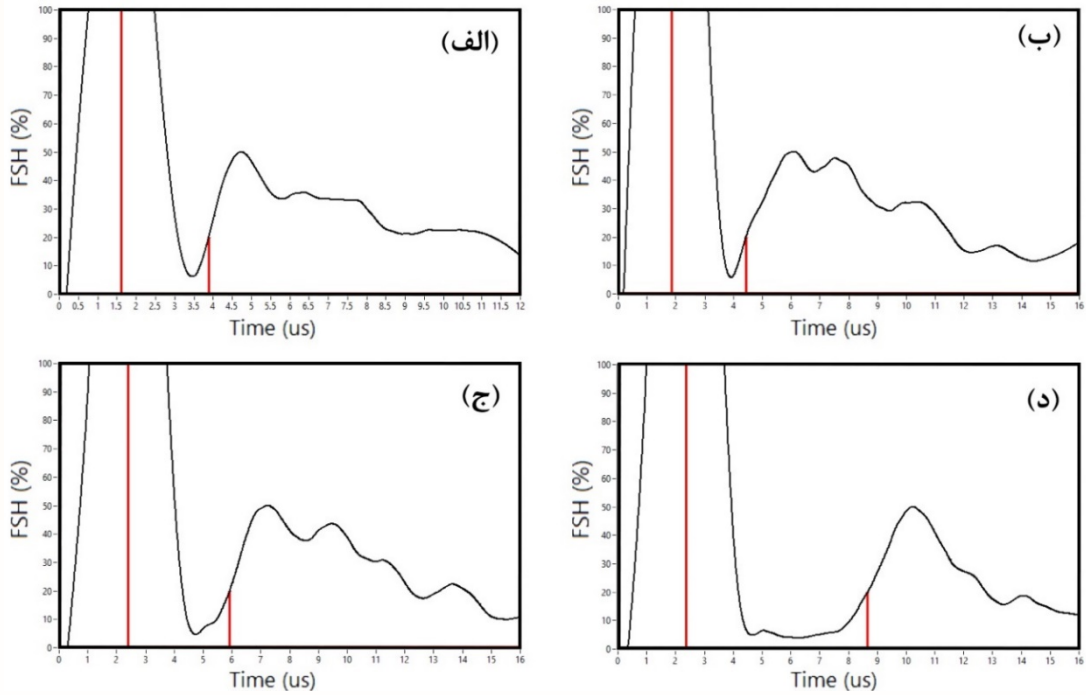


شکل ۳: سیگنال دریافتی از سطح قطعه و ناحیه گذرا



شکل ۴: سیگنال یک‌سو و فیلترشده

اندازه‌گیری فراصوتی عمق لایه سخت‌شده قطعات فولادی به روش پراکندگی برگشتی تماسی



شکل ۵: سیگنال نهایی (الف) نمونه ۱ (ب) نمونه ۲ (ج) نمونه ۳ (د) نمونه ۴

جدول ۲: نتایج حاصل از اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده بر روی نمونه شماره ۳

نقطه	عمق لایه سخت شده (mm)	نقطه	عمق لایه سخت شده (mm)	نقطه	عمق لایه سخت شده (mm)	نقطه	عمق لایه سخت شده (mm)
۱	۴/۱۲	۲۱	۴/۰۵	۴۱	۴/۰۰	۶۱	۴/۰۳
۲	۴/۱۹	۲۲	۴/۲۴	۴۲	۴/۰۸	۶۲	۴/۰۶
۳	۴/۰۹	۲۳	۴/۱۲	۴۳	۴/۱۰	۶۳	۴/۱۱
۴	۴/۲۰	۲۴	۴/۲۰	۴۴	۴/۰۹	۶۴	۴/۱۲
۵	۴/۱۳	۲۵	۴/۱۴	۴۵	۴/۱۶	۶۵	۴/۱۱
۶	۴/۱۶	۲۶	۴/۲۰	۴۶	۴/۱۷	۶۶	۴/۱۵
۷	۴/۲۶	۲۷	۴/۲۳	۴۷	۴/۱۸	۶۷	۴/۱۰
۸	۴/۲۶	۲۸	۴/۱۵	۴۸	۴/۱۴	۶۸	۴/۱۸
۹	۴/۱۵	۲۹	۴/۲۵	۴۹	۴/۲۰	۶۹	۴/۲۳
۱۰	۴/۳۱	۳۰	۴/۰۵	۵۰	۴/۰۱	۷۰	۴/۲۲
۱۱	۴/۰۲	۳۱	۴/۱۰	۵۱	۴/۰۸	۷۱	۴/۱۵
۱۲	۴/۰۸	۳۲	۴/۰۷	۵۲	۴/۳۰	۷۲	۴/۱۶
۱۳	۴/۱۸	۳۳	۴/۱۹	۵۳	۴/۲۰	۷۳	۴/۱۵
۱۴	۴/۱۹	۳۴	۴/۱۸	۵۴	۴/۱۲	۷۴	۴/۲۶
۱۵	۴/۱۲	۳۵	۴/۲۰	۵۵	۴/۱۷	۷۵	۴/۲۲
۱۶	۴/۲۳	۳۶	۴/۲۰	۵۶	۴/۱۲	۷۶	۴/۱۹
۱۷	۴/۲۷	۳۷	۴/۱۷	۵۷	۴/۱۹	۷۷	۴/۱۴
۱۸	۴/۱۰	۳۸	۴/۲۸	۵۸	۴/۰۳	۷۸	۴/۰۶
۱۹	۴/۲۸	۳۹	۴/۳۰	۵۹	۴/۲۲	۷۹	۴/۲۴
۲۰	۴/۲۰	۴۰	۴/۲۶	۶۰	۴/۰۲	۸۰	۴/۲۹

جدول ۳: نتایج حاصل از اندازه‌گیری عمق لایه سخت‌شده

شماره نمونه	میانگین عمق سختی (mm)	عمق سختی واقعی (mm)	انحراف معیار	درصد خطا
۱	۲/۷۳	۲/۷۹	۰/۰۸	۲/۱۵
۲	۳/۱۳	۳/۰۱	۰/۰۹	۳/۹۹
۳	۴/۱۶	۴/۲۹	۰/۰۸	۳/۰۳
۴	۷/۷۳	۷/۷۴	۰/۱۰	۰/۱۳

- [9] Baqeri, R.; Honarvar, F.; Mehdizad, R., *Case depth profile measurement of hardened components using ultrasonic backscattering method*, 18th World conference on nondestructive testing, Durban, South Africa. 2012.
- [10] Kobelco inspection & service co, *Measuring the induction hardened layer depth without cutting products*, <https://www.sisco.kobelco.com/english/service/product/index.html>
- [11] Theiner, W.; Kern, R.; Stroh, M., *Process Integrated Nondestructive Testing of Ground and Case Depth Hardened Parts*, European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT2002), Barcelona, Spain, June, 17-21, 2002
- [12] Honarvar, F., *Nondestructive testing: principles, methods & applications*, K. N. Toosi university press, 2020. (In Persian)
- [13] Willems, H., *Nondestructive Determination of Hardening Depth in Induction Hardened Components by Ultrasonic Backscattering*. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. 1991;10B:1707-1713.

۵- نتیجه‌گیری

یکی از پارامترهای کلیدی در کنترل کیفیت فرایند سخت‌کاری القایی، عمق لایه سخت‌شده است. در این مقاله، تکنیک فراصوتی پراکندگی برگشتی برای اندازه‌گیری فراصوتی عمق لایه سخت‌شده به روش تماسی پیاده‌سازی شد. اندازه‌گیری‌ها بر روی چهار نمونه سخت‌کاری‌شده به روش القایی و با عمق‌های سختی مختلف صورت گرفت. پس از انجام آزمون بر روی قطعات و پردازش سیگنال‌های به‌دست‌آمده، عمق لایه سخت‌شده قطعات محاسبه شد. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با نتایج حاصل از آزمون مخرب نشانگر دقت بالای این روش است. در خصوص خطای حاصل از اندازه‌گیری، از آنجایی که آزمون مخرب تنها در یک نقطه انجام شده؛ ولی آزمون فراصوتی در نقاط مختلفی از محور صورت گرفته است و همچنین به‌دلیل اینکه عمق سختی در نقاط مختلف نمونه یکسان نیست، خطایی در مقایسه نتایج آزمون غیرمخرب و آزمون مخرب وجود دارد که بیشترین مقدار این خطا ۴٪ است. با توسعه این روش، محدودیت‌های انجام این گونه آزمون‌ها به روش غوطه‌وری رفع و اندازه‌گیری عمق سختی قطعات در محل امکان‌پذیر خواهد شد.

۶- منابع

- [1] Golozar, M. A., *Heat treatment of steels & cast iron*, Isfahan university of technology press, 2017. (In Persian)
- [2] ISO 18203:2016(en), *Steel-Determination of the thickness of surface-hardened layers*, ISO copyright office, Geneva, Switzerland.
- [3] Graja, P.; Meyendorf, N., *Characterization of Materials Microstructure and Surface Gradients using Advanced Techniques*, Springer International Publishing, Cham, 2021; 1-20
- [4] Good, M. S.; Rose, J. L. *Measurement of thin case depth in hardened steel by ultrasonic pulse-echo angulation techniques*, In *Nondestructive Methods for Material Property Determination*; Ruud, C.O., Green, Jr., R.E., Eds.; New York: Plenum Press: New York, 1984; 189-203.
- [5] Takahashi, F.; Izumi, S.; Nishimura, A., *Intelligent Measurement and Diagnostic Techniques for Non-Destructive Inspections*, Hitachi Review, Tokyo, Japan, 1999; 48(5); 296-301.
- [6] George, A. A., *Electromagnetic Induction of Ultrasonic Waves: EMAT, EMUS, EMAR, EMAT Consulting*, San Luis Obispo, CA.
- [7] Roger, W. P., *Electronic intelligent indenter*, United States Patent, Patent No. 6904806, June 14, 2005.
- [8] Honarvar, F.; Bagheri Borouji, R., *Case Depth: Ultrasonic Measurement*, Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys 2016; 652-663.