

Estimation of Uncertainty in Measurement of Ultrasonic Wave Attenuation

Ramin Shabani¹, Farhang Honarvar^{2*}

1- PhD Candidate, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology

2- Professor, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology

*honarvar@kntu.ac.ir

Abstract

High sensitivity, high accuracy and almost no limitations on type of test material has made ultrasonic testing (UT) a desirable nondestructive testing method. Ultrasonic wave velocity and attenuation are two important parameters that affect an ultrasonic test. Attenuation is the loss of wave energy and reduction in wave amplitude during the propagation of waves through the material. In this paper, the attenuation coefficient is measured in an St37 specimen at a frequency of 1 MHz. The test is conducted in pulse-echo mode with immersion technique. The sources of error are identified, and the measurement uncertainty is calculated. In this measurement, the sources of error include errors due to measuring the length of the part and the amplitude of the echoes reflected from the back surface of the part. The attenuation coefficient is 39.33 dB/m and the measurement uncertainty is ± 8.8 dB/m. The noise in the pulser-reciever system is found to be the main source of error in the measurement of amplitudes of reflected echoes from which the attenuation coefficient is calculated.

Keywords: Attenuation, Ultrasonic testing, Uncertainty, Immersion.

محاسبه عدم قطعیت در اندازه‌گیری ضریب تضعیف امواج فراصوتی

رامین شعبانی^۱، فرهنگ هنرور^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

*honarvar@kntu.ac.ir

چکیده

روش فراصوتی به دلیل دارا بودن مزایایی همچون حساسیت، دقت و سرعت بالا و نداشتن محدودیت از نظر جنس ماده مورد بازرسی، از اهمیت خاصی در تعیین خواص مواد و شناسایی موقعیت و ابعاد عیوب برخوردار است. معمولاً در این روش، دو متغیر سرعت و تضعیف موج اندازه‌گیری می‌شود. تضعیف موج به معنای از دست رفتن انرژی موج و کاهش دامنه آن در هنگام انتشار است. در این مقاله، ضریب تضعیف امواج طولی با فرکانس 1 MHz به روش غوطه‌وری و در حالت بازتابی (pulse-echo) در یک قطعه استوانه‌ای شکل از جنس فولاد St37 اندازه‌گیری و عدم قطعیت اندازه‌گیری محاسبه می‌شود. در این اندازه‌گیری، منابع خطا شامل خطاهای ناشی از اندازه‌گیری طول قطعه و دامنه پژواک‌های بازتابیده از سطح پشتی قطعه است. مقدار ضریب تضعیف 39.33 dB/m و عدم قطعیت اندازه‌گیری $8.8 \text{ dB/m} \pm$ به دست آمده است. بررسی‌ها نشان داد که نویز دستگاه ارسال و دریافت امواج فراصوتی موجب ایجاد خطا در اندازه‌گیری دامنه پژواک‌های بازتابیده از سطح پشتی قطعه می‌شود و موثرترین عامل در افزایش عدم قطعیت اندازه‌گیری ضریب تضعیف امواج فراصوتی است.

واژگان کلیدی: تضعیف موج، امواج فراصوتی، عدم قطعیت، آزمون غوطه‌وری

۱- مقدمه

بامبر^۷ و هیل^۸ [۷] تغییرات سرعت و تضعیف امواج فراصوتی را در بافت‌های بدن با تغییر دما، بررسی کردند. در اندازه‌گیری ضریب تضعیف امواج فراصوتی، از تجهیزات الکترونیکی متعددی استفاده می‌شود. در این تجهیزات نویز وجود دارد و این نویز باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری دامنه پژواک‌ها و در نتیجه ایجاد خطا در اندازه‌گیری ضریب تضعیف امواج فراصوتی می‌شود. بنابراین تعیین عدم قطعیت اندازه‌گیری ضریب تضعیف امواج فراصوتی برای تعیین دقت اندازه‌گیری ضروری است. در این مقاله، روش اندازه‌گیری ضریب تضعیف امواج فراصوتی و چگونگی محاسبه عدم قطعیت اندازه‌گیری توضیح داده می‌شود. تضعیف در یک قطعه فولاد کربنی به روش غوطه‌وری و در حالت بازتابی اندازه‌گیری می‌شود و مقدار تضعیف موج و عدم قطعیت آن گزارش می‌شود.

آزمون فراصوتی یک روش رایج در تشخیص عیوب و تعیین خواص مواد است. در این روش، دو پارامتر سرعت و تضعیف موج اندازه‌گیری می‌شود. تضعیف امواج فراصوتی به معنی از دست رفتن انرژی موج در طول انتشار است و کاربردهای متعددی از جمله تعیین اندازه دانه‌بندی و تشخیص میکروتورک‌ها دارد [۱-۳]. مقالات متعددی در زمینه کاربرد تضعیف امواج فراصوتی وجود دارد. گرین^۱ و دوک^۲ [۴] مشاهده کردند که تضعیف امواج فراصوتی نسبت به آسیب‌خستگی در مراحل اولیه بسیار حساس است. بیرینگ^۳ و همکارانش [۵] تغییرات سرعت و تضعیف امواج فراصوتی در فولادهای کم آلیاژ را در اثر حمله هیدروژنی^۴ بررسی کردند. جنرازیو^۵ [۶] از اندازه‌گیری تضعیف امواج فراصوتی برای تعیین مراحل مختلف فرایند تبلور مجدد^۶ استفاده کرد.

⁵Generazio⁶Recrystallization⁷Bamber⁸Hill¹Green²Duke³Birring⁴Hydrogen Attack

۳-۱- تعریف معادله

معادله (۱) برای محاسبه ضریب تضعیف امواج فراصوتی استفاده می‌شود و برای محاسبه عدم قطعیت اندازه‌گیری نیز استفاده خواهد شد. برای محاسبه عدم قطعیت اندازه‌گیری ضریب تضعیف، باید خطاهای ناشی از اندازه‌گیری طول قطعه و دامنه دو پژواک متوالی اندازه‌گیری شود.

۳-۲- ایجاد مدل خطا

مدل خطا یک عبارت جبری است که خطای کل را در کمیتی حاصل از ترکیب تمامی خطاهای متغیرهای اندازه‌گیری دربردارد. برای تشکیل مدل خطا باید از معادله (۲) که نشان‌دهنده وابستگی خطا به سه متغیر طول و دامنه پژواک‌های متوالی است، نسبت به تمامی متغیرها مشتق گرفت و آنها را با هم جمع کرد [۹]:

$$\alpha = f(L, A_n, A_{n+1}) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_\alpha &= (\partial\alpha/\partial L) \varepsilon_L + (\partial\alpha/\partial A_n) \varepsilon_{A_n} + \\ &(\partial\alpha/\partial A_{n+1}) \varepsilon_{A_{n+1}} = a_L \varepsilon_L + a_{A_n} \varepsilon_{A_n} + \\ &a_{A_{n+1}} \varepsilon_{A_{n+1}} \end{aligned} \quad (3)$$

معادله‌ی بالا به این معنی است که خطا در اندازه‌گیری L ، A_n و A_{n+1} منجر به خطا در اندازه‌گیری ضریب تضعیف می‌شود.

۳-۳- ایجاد مدل عدم قطعیت

اگر n عامل در ایجاد خطا مشارکت داشته باشند، عدم قطعیت نتیجه R از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۰]:

$$u_R = t_{\nu,95} \left[\sum_{i=1}^n a_{x_i} u_{x_i} \right]^{0.5} \quad (95\%) \quad (4)$$

در معادله (۴)، u_{x_i} عدم قطعیت عامل x_i و a_{x_i} ضریب حساسیت عامل x_i است. میزان مشارکت عدم قطعیت عامل x_i در عدم قطعیت نتیجه R با عبارت $a_{x_i} u_{x_i}$ تخمین زده می‌شود. $t_{\nu,95}$ و ν به ترتیب ضریب توزیع و درجه آزادی هستند و بر اساس تعداد تکرار اندازه‌گیری‌ها تعیین می‌شوند. برای تعیین عدم قطعیت در اندازه‌گیری ضریب تضعیف امواج فراصوتی از معادله (۴) استفاده می‌شود. این معادله با در نظر

در شکل ۲، اولین پژواک از سطح تماس آب با سطح بالایی قطعه بازتابیده است. با افزایش فاصله بین تراگذار و قطعه، فاصله بین دو پژواک متوالی (پژواک‌های اول و دوم) بازتابیده از سطح مشترک آب و قطعه، افزایش می‌یابد. سرعت موج طولی در فولاد چهار برابر سرعت موج طولی در آب است؛ در نتیجه، با افزایش فاصله بین تراگذار و قطعه، پژواک‌های بازتابیده از سطح پشتی قطعه ظاهر می‌شوند. هرچه فاصله بین تراگذار و قطعه بیشتر شود، تعداد پژواک‌های (بازتابیده از سطح پشتی قطعه) بیشتری قابل تشخیص است. دو نکته در تشخیص پژواک‌های بازتابیده از سطح پشتی قطعه وجود دارد. نکته اول این است که با تغییر فاصله بین تراگذار و قطعه، فاصله بین این پژواک‌ها ثابت می‌ماند. همچنین، فاصله زمانی بین دو پژواک متوالی بازتابیده از سطح پشتی قطعه برابر $2L/c$ است و L و c به ترتیب، طول قطعه و سرعت موج طولی هستند. بنابراین، با اطلاع از مقادیر L و c می‌توان فاصله زمانی بین دو پژواک متوالی بازتابیده از سطح پشتی قطعه را محاسبه و از آن در تشخیص این پژواک‌ها استفاده کرد.

با استفاده از نسبت دامنه دو پژواک متوالی بازتابیده از سطح پایین قطعه و با اندازه‌گیری طول قطعه، ضریب تضعیف، α ، در قطعه با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود [۸]:

$$\alpha = \frac{10}{L} \log \frac{A_n}{A_{n+1}} \quad (1)$$

در معادله (۱)، L طول قطعه و A_n و A_{n+1} دامنه‌های دو پژواک متوالی بازتابیده از سطح پشتی قطعه هستند.

۳-۴- عدم قطعیت اندازه‌گیری ضریب تضعیف امواج فراصوتی

اندازه‌گیری فرایندی است که در آن مقداری به کمیتی نسبت داده می‌شود. نتیجه یک اندازه‌گیری وقتی کامل است که با عدم قطعیت نتیجه همراه باشد. عدم قطعیت محدوده حداکثر خطا در نتیجه را به دست می‌دهد. مراحل فرایند تحلیل عدم قطعیت چند متغیره به صورت زیر است [۹]:

۱. تعریف معادله
۲. ایجاد مدل خطا
۳. ایجاد مدل عدم قطعیت
۴. تعیین خطاهای فرایند اندازه‌گیری
۵. تخمین عدم قطعیت‌های فرایند اندازه‌گیری
۶. محاسبه عدم قطعیت اجزاء
۷. ترکیب اجزای عدم قطعیت

جدول ۳- میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و ضریب تضعیف

متغیر	\bar{L} (mm)	\bar{A}_n (mV)	\bar{A}_{n+1} (mV)	$\bar{\alpha}$ (dB/m)
مقدار	۲۹/۹۳	۲۴/۶۳	۱۸/۷۸	۳۹/۳۳

۳-۵- تخمین عدم قطعیت فرایند اندازه‌گیری

عدم قطعیت‌های اندازه‌گیری، مانند خطاهای اندازه‌گیری، به دو دسته سیستماتیک و تصادفی تقسیم‌بندی می‌شوند. بنابراین، هر منبع خطا دارای دو عدم قطعیت است: $u_{L,sys}$ ، $u_{A_n,sys}$ و $u_{A_{n+1},sys}$ عدم قطعیت‌های سیستماتیک هستند. این عدم قطعیت‌ها با توجه به دقت دستگاه که توسط سازنده دستگاه اعلام می‌شود، تعیین می‌شوند. عدم قطعیت‌ها سیستماتیک برابر با نصف دقت دستگاه در نظر گرفته شده است [۱۰]. در نتیجه، خواهیم داشت:

$$u_{L,sys} = 0.005 \text{ mm} \quad (9)$$

$$u_{A_{n+1},sys} = u_{A_n,sys} = 0.005 \text{ mV} \quad (10)$$

$u_{L,ran}$ ، $u_{A_n,ran}$ و $u_{A_{n+1},ran}$ عدم قطعیت‌های تصادفی هستند. این نوع از عدم قطعیت‌ها با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده و انجام محاسبات آماری تعیین می‌شوند. مقادیر اندازه‌گیری شده در جدول ۲ ارائه شده است. به دلیل کمتر بودن تعداد تکرارها، برای محاسبات آماری از آمار اندازه-محدود و توزیع استیودنتس تی^۱ استفاده می‌شود [۱۰]. بنابراین، عدم قطعیت‌های تصادفی با توجه به معادله‌های زیر محاسبه می‌شود:

$$u_{L,ran} = S_{\bar{L}} \quad (11)$$

$$u_{A_n,ran} = S_{\bar{A}_n} \quad (12)$$

$$u_{A_{n+1},ran} = S_{\bar{A}_{n+1}} \quad (13)$$

در معادله‌های (۱۱) تا (۱۳)، $S_{\bar{i}}$ انحراف معیار مقادیر میانگین منبع خطای i است و از معادله (۱۴) محاسبه می‌شود [۱۰]:

$$S_{\bar{i}} = S_i / \sqrt{4} \quad (14)$$

در معادله (۱۴)، S_i انحراف معیار ۴ تکرار اندازه‌گیری برای هر یک از منابع خطا است. عدم قطعیت‌های تصادفی به صورت زیر هستند:

گرفتن منابع ایجاد خطا در اندازه‌گیری ضریب تضعیف امواج فراصوتی به صورت زیر خواهد بود:

$$u_{\alpha} = t_{v,95} [(a_L u_L)^2 + (a_{A_n} u_{A_n})^2 + (a_{A_{n+1}} u_{A_{n+1}})^2]^{0.5} \quad (95\%) \quad (5)$$

اندازه‌گیری L ، A_n و A_{n+1} مستقل از یکدیگر صورت می‌گیرد؛ بنابراین، همبستگی بین خطاها وجود ندارد.

۳-۴- تعیین خطاهای فرایند اندازه‌گیری

شناسایی خطاهای یک اندازه‌گیری برای تخمین عدم قطعیت آن ضروری است. در اندازه‌گیری ضریب تضعیف امواج فراصوتی، منابع خطا شامل خطاهای اندازه‌گیری L ، A_n و A_{n+1} است. این خطاها را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\varepsilon_L = \varepsilon_{L,ran} + \varepsilon_{L,sys} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{A_n} = \varepsilon_{A_n,ran} + \varepsilon_{A_n,sys} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{A_{n+1}} = \varepsilon_{A_{n+1},ran} + \varepsilon_{A_{n+1},sys} \quad (8)$$

در معادله‌های (۶) تا (۸)، زیرنویس sys نشان‌دهنده خطای سیستماتیک و زیرنویس ran نشانگر خطای تصادفی است. دقت وسایل اندازه‌گیری طول و دامنه در جدول ۱ بیان شده است. مقدار کمیت‌های اندازه‌گیری شده نیز در جدول ۲ آمده است.

جدول ۱- دقت وسایل اندازه‌گیری

متغیر	طول (mm)	ایزار اندازه‌گیری دامنه (mV)
مقدار	۰/۰۱	۰/۰۱

جدول ۲- مقادیر اندازه‌گیری شده

شماره	L (mm)	A_n (mV)	A_{n+1} (mV)
۱	۲۹/۹۳	۲۴/۷۸	۱۸/۸۶
۲	۲۹/۹۴	۲۴/۵۴	۱۸/۹۸
۳	۲۹/۹۳	۲۵/۲۱	۱۹/۳۵
۴	۲۹/۹۳	۲۳/۹۹	۱۷/۹۴

¹Student's t distribution

$$u_{\alpha} = 0.0088 \text{ dB/mm (95\%)} \quad (25)$$

بنابراین، مقادیر ضریب تضعیف و عدم قطعیت اندازه‌گیری در فرکانس 1 MHz، عبارت است از:

$$\alpha = 39.33 \pm 8.8 \text{ dB/m (95\%)} \quad (26)$$

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، نحوه اندازه‌گیری ضریب تضعیف امواج فراصوتی توضیح داده شد. آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌ای از فولاد St37 صورت گرفت و ضریب تضعیف موج طولی با فرکانس 1 MHz محاسبه شد. منابع خطا در اندازه‌گیری ضریب تضعیف امواج فراصوتی شناسایی شدند و عدم قطعیت اندازه‌گیری ضریب تضعیف موج طولی با فرکانس 1 MHz محاسبه شد. دلیل عمده وجود عدم قطعیت 8.8 dB/m در اندازه‌گیری ضریب تضعیف موج طولی وجود نویز و اثر آن بر دامنه سیگنال‌ها است.

۵- منابع

- [1] H. Willems and K. Gobbeles (1981). Characterization of microstructure by backscatter ultrasonic waves, *Material Science*, Vol. 15, 549-553.
- [2] D.K. Mak (1986). Determination of grain size, hysteresis constant and scattering factor of polycrystalline material using ultrasonic attenuation. *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 25, No.3, 253-255.
- [3] A. B. Bouda, S. Lebaili, A. Benchaala (2003). Grain size influence on ultrasonic velocities and attenuation. *NDT & E International*, Vol. 36, Issue 1, 1-5.
- [4] R. E. Green, J. C. Duke (1979). Ultrasonic and Acoustic Emission detection of fatigue damage. *International Advances in Nondestructive Testing*, Vol. 6, 125-177.
- [5] A.S. Birring, M. L. Bartlett, K. Kawano (1989). Ultrasonic detection of hydrogen attack in steels. *Corrosion*, Vol. 45, No. 3, 259-263.
- [6] E.R. Generazio (1998). Ultrasonic attenuation measurements to determine onset, degree and completion of recrystallization. *Materials Evaluation*, Vol. 46, 1198-1203.
- [7] J. C. Bamber, C. R. Hill (1979). Ultrasonic Attenuation and Propagation Speed in Mammalian Tissues as a Function of Temperature. *Ultrasound in Medicine and Biology*, Vol. 5, No. 2, 149-157.
- [8] ASTM, 2015. *ASTM E664/664M-15*. The American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
- [9] NASA Measurement Quality Assurance Handbook ANNEX 3, 2010.
- [10] R. S. Figliola, D. E. Beasley, (2011). *Theory and Design for Mechanical Measurements*, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., pp 118-199.

$$u_{L,ran} = 0.0025 \text{ mm} \quad (15)$$

$$u_{A_n,ran} = 0.26 \text{ mV} \quad (16)$$

$$u_{A_{n+1},ran} = 0.3 \text{ mV} \quad (17)$$

۳-۶- محاسبه عدم قطعیت اجزاء

برای محاسبه عدم قطعیت یک منابع خطا از جذر مجموع مجذور عدم قطعیت‌های سیستماتیک و تصادفی آن منبع خطا استفاده می‌شود [۱۰].

$$u_L = \sqrt{(u_{L,sys})^2 + (u_{L,ran})^2} = 0.0056 \text{ mm} \quad (18)$$

$$u_{A_n} = \sqrt{(u_{A_n,sys})^2 + (u_{A_n,ran})^2} = 0.26 \text{ mV} \quad (19)$$

$$u_{A_{n+1}} = \sqrt{(u_{A_{n+1},sys})^2 + (u_{A_{n+1},ran})^2} = 0.3 \text{ mV} \quad (20)$$

ضرایب حساسیت نیز برای این منابع خطا بر اساس معادله (۳) قابل محاسبه است:

$$a_L = \left(\frac{\partial \alpha}{\partial L} \right)_{(L, A_n, A_{n+1})} = -1.3 \times 10^{-3} \quad (21)$$

$$a_{A_n} = \left(\frac{\partial \alpha}{\partial A_n} \right)_{(L, A_n, A_{n+1})} = 5.9 \times 10^{-3} \quad (22)$$

$$a_{A_{n+1}} = \left(\frac{\partial \alpha}{\partial A_{n+1}} \right)_{(L, A_n, A_{n+1})} = -7.7 \times 10^{-3} \quad (23)$$

تعداد تکرارها برابر ۴ است، بنابراین درجه آزادی ۷ برابر ۳ است و در نتیجه ضریب توزیع برابر است با [۱۰]:

$$t_{3,95} = 3.18 \quad (24)$$

۳-۷- ترکیب اجزاء عدم قطعیت

عدم قطعیت‌های محاسبه شده در معادله‌های (۱۸) تا (۲۰) و ضرایب حساسیت محاسبه شده در معادله‌های (۲۱) تا (۲۳) و ضریب توزیع $t_{3,95}$ در معادله ۵ جایگزین می‌شوند و عدم قطعیت اندازه‌گیری ضریب تضعیف امواج فراصوتی بدست می‌آید: