



A Short Introduction to the Concept and Application of Acoustic Methods as a Non-Destructive Approach to Studying and Understanding Architectural Heritage

Sajad Moazen ¹, Sepideh Banayee ^{2*}, Helia Vali ³

- ¹. Assistant Professor, Renovation course Group, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of science and technology, Tehran, IRAN.
- ². M.A student in Historical Buildings Restoration, Renovation course Group, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, IRAN.
- ³. M.A student in Historical Buildings Restoration, Renovation course Group, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, IRAN.

Received: 28/11/2021

Accepted: 05/05/2022

Abstract

The correct protection and improvement of historical buildings should start with appropriate knowledge and pathology in order to investigate the causes of erosion of the structure, and studies on such buildings should involve the minimal amount of intervention and full compliance with the physical integrity and attention to the principles and basics of architectural heritage protection. So one of the main challenges of studying and identifying historical monuments is the need to take samples of building materials to analyze mechanical and physical characteristics. Currently, a relatively wide range of destructive (DT) and semi-destructive (MDT) methods are currently available for the evaluation and inspection of historical buildings. However, if we want to apply the least amount of intervention and refrain from harming the physical integrity of historical buildings, it is not possible to collect samples with the dimensions that are usually used in new buildings to determine the characteristics of the materials. For this reason, a variety of non-destructive methods (NDT) are used alone or in combination to determine the characteristics of the materials and structure of the building under study. In general, it can be concluded that minimizing interventions in the historical structure and using non-destructive methods to study and identify its elements is one of the requirements for improving the condition of cultural heritage. Among non-destructive methods, acoustic techniques are among the most commonly used methods in recent decades, and provide us with critical information about the quality and protective status of the elements under study. The purpose of this study is to investigate the performance, capacity, and results of using acoustic wave propagation in heritage building conservation. This article is a review of scientific research from the last six years in the field of studies and research related to acoustic tests and a summary of the basic technical principles, equipment required, how to perform tests, applications, limitations in relationship with the conditions of the site and finally the analysis of the data obtained from these tests. Studies show that using different materials and structures behave differently against the propagation of acoustic waves, as well as cracks and internal cavities. As a result, the same difference in behavior can be used to assess the quality of buildings and materials, identify existing heterogeneities, injuries, especially cracks, detachment of wall coatings, and control the effectiveness of therapeutic measures.

Keywords: Mechanical properties of historical buildings, non-destructive methods, intervention and cognition, acoustic methods (sonic and ultrasonic).

*Corresponding Author: banayee_sepideh@arch.iust.ac.ir

Introduction

Protecting a built cultural heritage requires a deep knowledge of the building construction and restoration history, the structure of the building, the nature and properties of the building materials, and analysis and evaluation of the external and internal factors affecting the body of the building, such as the state of tension, humidity, and climatic conditions. Given the specific artistic and aesthetic values of such buildings, sampling on a large scale to determine the composition and properties of building materials is not always possible due to its destructive effects. On the other hand, examining features such as crack depth or even walls' internal structure should be performed on-site and in relation to the structure's fabric, and it is not possible to sample and study such characteristics in a laboratory. Therefore, on-site non-destructive tests are the best way to check and analyze the properties of such buildings. Among non-destructive tests, sonic and ultrasonic tests are the most widely used in historic buildings to evaluate parameters such as masonry quality through the wall section morphology, presence of voids and flaws, cracks and their distribution patterns, and detection of changes on the materials' physical characteristics. The method consists of measuring the time of propagation of the sonic and ultrasonic waves through a material. The wave propagation velocities (WPV) depend on the density and the stiffness of the material. Moreover, wave propagation can be affected by the presence of damage (cracking, voids). Sadly, the technical community of Iran does not pay enough attention to the use of non-destructive tests in the fields of understanding and interventions of historical monuments, and destructive tests are widely used in pathology and measuring the impact of treatment measures. Also, studies in the field of acoustic tests as one of the most practical branches of these methods are rather scant and the lack of these studies in the field of historical monuments is evident. The present paper, by reviewing and analyzing the studies conducted in this field, especially in the European community in recent years, tried to introduce acoustic techniques and their application in evaluating the quality of materials of historical buildings and choosing the right intervention approach, and finally encouraging specialists in the field of the cultural heritage of Iran to a wider application of the proposed tests.

Discussion

The basic idea is to pass the acoustic wave through inside the material, measuring the time of its propagation to another point (Figure 1). Once the distance between the points from which the wave was transmitted and received is known, it is then possible to determine the average speed in the propagation section. Therefore, these methods can provide information to detect the thickness and position of the weathering layer, and the physical properties of different materials, including mechanical characteristics and the state of cracking, fractures, and other discontinuous elements. Especially, Sonic pulse velocity tests are recommended for homogeneous structures and materials. Thus, it is commonly used to assure the effectiveness of injected reparations and is suitable to be applied on historical buildings. Sonic pulse tests do not yield quantitative results but are very helpful in providing qualitative information about the material or element's state of conservation. While ultrasound, with its higher frequencies and shorter wavelength, should be avoided to check multilayer structures and it is suggested for very compact materials such as marble, metal, timber, or reinforced concrete, sonic velocity pulse is suitable for masonry testing.

The results of data processing may be visualized in the form of 3D or 2D gray- or color-scale contour maps, or others. Interpretation of the results is a fundamental and critical step. In many cases, sonic and ultrasonic tests alone cannot resolve all the ambiguities and some additional information or calibrations (from complementary investigations, from local invasive and other noninvasive measurement, from a priori knowledge of the building, from expertise on construction techniques) is required. Macroscopic inclusions (e.g., beams, voids, chimney flues, presence of different materials) can be detected by means of direct test or tomography. In general, it is not possible to associate the velocity anomalies to the nature of the targets. The defaulters of the targets can be only inferred from assumptions or other information or directly checked with a local invasive test, whose positioning can be chosen on the basis of the S or US test results. If the resolution of sonic tomography is sufficient, it is possible to detect inner and outer layers of walls, which will appear as areas with different sonic velocities.

Conclusions

Large-scale non-destructive testing is available at the site of the historical monument and in direct contact with the body of the building. These tests answer many of the questions related to cultural heritage with minimal damage to the historical monument and in compliance with the principle of minimum intervention, saving time and saving money. Some of these tests do not require complex and expensive equipment and can be easily implemented by conservation experts. Accordingly, a brief discussion about noninvasive sonic and ultrasonic methods for the built cultural heritage was addressed here. Studies show that through the correlation between the speed of acoustic waves and the intrinsic properties of the studied samples, the mechanical parameters of the structure can be evaluated in situ. This feature can be widely used in assessing the physical condition and pathology of historic buildings, but it is important to remember that choosing the most appropriate method of an acoustic test with respect to site conditions is the most vital step. The use of acoustic techniques in recent decades by the technical community due to non-invasiveness, ease of use, and especially compatibility with historical buildings, has increased and these tests are one of the most commonly applied methods among the other types of non-destructive tests. However, in Iran, these techniques are not yet widely used in historical buildings, and researches about these methods still remain rare. It is hoped that this study will trigger further studies in this field, especially considering the specific cultural context of Iran, because, although the subject of the conservation and preservation of historical and cultural monuments around the world has similarities in general, different parts of the world, based on their different cultural, economic, social and political contexts, differ in the details of these methods and we need to understand these details. We must return to the context of our country and seek the roots of the protection of historical monuments in an understanding derived from our context and environment. In the end, it can be concluded that today in the world, acoustic tests are widely used as a type of non-destructive test, and with the advancement of technology, many of the previous limitations in the implementation of these tests have been resolved, though there still remain some complications, especially in the field of data analysis. In order to increase the accuracy of acoustic tests according to the existing restrictions related to the site, it is recommended to combine these tests with other types of non-destructive tests.



آشنایی با مفهوم و کاربرد سنجش آکوستیک به‌عنوان یک روش غیرمخرب در مطالعه و شناخت میراث معماری

سجاد مؤذن^۱، سپیده بنایی^{۲*}، هلیا ولی^۳

۱. استادیار، گروه مرمت دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مرمت و احیای بناها و بافت‌های تاریخی، گروه مرمت، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد مرمت و احیای بناها و بافت‌های تاریخی، گروه مرمت، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷

چکیده

به‌منظور انجام هرگونه اقدامی در راستای محافظت از یک ساختمان تاریخی، آگاهی از خواص مکانیکی مصالح و عناصر سازنده آن اقدامی ضروری است که این امر باید با وارد آمدن حداقل آسیب به کالبد و بافت بنای تاریخی همراه باشد. در حقیقت، به‌حداقل رساندن مداخلات در ساختار تاریخی و استفاده از روش‌های غیرمخرب برای مطالعه و شناخت عناصر آن، یکی از الزامات موردنیاز برای بهبود وضعیت میراث فرهنگی است. در میان روش‌های غیرمخرب، تکنیک‌های آکوستیک یکی از رایج‌ترین روش‌های مورد استفاده در چند دهه اخیر هستند که اطلاعات مهمی درباره کیفیت و وضعیت حفاظتی عناصر مورد مطالعه در اختیار ما قرار می‌دهند. هدف این پژوهش، بررسی عملکرد، ظرفیت و نتایج استفاده از انتشار امواج آکوستیک برای تجزیه و تحلیل وضعیت حفاظتی بناهای میراثی است. این مقاله، به‌صورت مروری و با بررسی مقاله‌های علمی معتبر از شش سال اخیر در حوزه مطالعات و پژوهش‌های مربوط به آزمون‌های آکوستیک انجام شده و خلاصه‌ای از اصول فنی اولیه، تجهیزات مورد نیاز، نحوه انجام آزمایش‌ها، کاربردها، محدودیت‌های موجود در رابطه با شرایط سایت و درنهایت تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از این آزمون‌ها را ارائه می‌دهد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که مصالح و سازه‌های مختلف و همچنین آسیب‌هایی همچون ترک‌ها و حفره‌های داخلی، در برابر انتشار امواج آکوستیک رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. در نتیجه، از همین تفاوت رفتار می‌توان برای ارزیابی کیفیت ساختمان‌ها و مصالح، شناسایی ناهمگنی‌های موجود، آسیب‌ها مخصوصاً ترک‌ها، جداشدگی اندودها در دیوارها و کنترل اثربخشی اقدامات درمانی استفاده کرد.

واژگان کلیدی: بناهای تاریخی، روش‌های غیرمخرب، شناخت، مداخله، امواج ساکن، روش‌های سنجش آکوستیک (سونیک) و اولتراسونیک).

* نویسنده مسئول مکاتبات: تهران، تهران، نارمک، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده معماری و شهرسازی، گروه مرمت.
پست الکترونیکی: banayee_sepideh@arch.iust.ac.ir

۱. مقدمه

اولین و شاید مهم‌ترین آزمون غیرمخربی که باید برای مطالعه و شناخت بناهای تاریخی مورد استفاده قرار بگیرد، مشاهده و بررسی میدانی متخصصان است. مشاهده بصری و بازرسی میدانی، امکان برنامه‌ریزی روند مطالعاتی و انتخاب مناسب‌ترین تکنیک‌ها را فراهم می‌کند. مشاهده بصری یک گام بسیار مهم است اما نباید فراموش کرد که برای بررسی عمیق مصالح و آسیب‌شناسی ساختار مورد مطالعه، به‌تنهایی کافی نیست؛ بنابراین، بازرسی‌های میدانی باید با روش‌های غیرمخرب برای بررسی دقیق ساختار داخلی و کیفیت مواد میراث فرهنگی ترکیب شوند [1]. توسعه راهکارها و روش‌های غیرمخرب برای نگهداری، مقاوم‌سازی و استحکام‌بخشی بناهای تاریخی از موضوعات موردعلاقه جامعه فنی، به‌ویژه در شصت‌سال گذشته است [2]. این روش‌ها امروزه نه تنها در فرآیندهای تولید بلکه همچنین برای ارزیابی وضعیت حفاظتی ساختمان‌ها در راستای جلوگیری از آسیب‌های احتمالی در آینده مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌علاوه، آزمون‌های غیرمخرب برای ارزیابی شدت آسیب‌هایی که قبلاً ظاهر شده‌اند و مستندنگاری نحوه گسترش آسیب‌ها برای انتخاب بهترین راهکار درمانی و اطمینان از اثربخشی درمان‌های صورت‌گرفته کاربرد دارند. ویژگی منحصر به فرد این تکنیک‌ها، امکان انجام آزمایش بدون خدشه دار کردن یکپارچگی و بدون نیاز به نمونه‌برداری، در مقابل روش‌های مخرب و نیمه‌مخرب است. این ویژگی، کاربرد این آزمون‌ها را خصوصاً در حوزه بناهای تاریخی، با توجه به مقررات سخت‌گیرانه‌ای که نسبت به حفاظت آن‌ها وجود دارد، متناسب می‌سازد [3]. یک بنای تاریخی از مصالح مختلفی مانند سنگ، آجر، خشت و همچنین ملات‌هایی همچون آهک و گچ ساخته می‌شود و در دیوارهای تاریخی نیز لایه‌های مختلفی وجود دارد. به‌همین منظور، مداخله در سازه بنای تاریخی باید با تشخیص دقیق و در قالب کمترین ناسازگاری با سندیت تاریخی (اصالت تاریخی) بنا باشد. به‌علاوه، مطالعه جزئیات اجرایی و همین‌طور رفتار مکانیکی سازه در تشخیص صحیح، کمک‌کننده است [4]. در میان انواع

آزمون‌های غیرمخرب، آزمون‌های سونیک و اولتراسونیک، بیشترین کاربرد را در ساختمان‌های تاریخی برای ارزیابی پارامترهایی مانند کیفیت مصالح ساختمان‌های بنایی، تشخیص وجود حفره‌ها و نقص‌ها، ترک‌ها و الگوی توزیع آن‌ها و تشخیص تغییرات به‌وجودآمده در خصوصیات فیزیکی مواد دارند [2]. این آزمون‌ها، مبتنی بر انتشار امواج صوتی و فراصوتی درون ماده مورد مطالعه و سپس اندازه‌گیری سرعت انتقال امواج است. سرعت انتشار امواج صوتی درون ماده مورد نظر، بستگی به چگالی و سختی آن دارد. به‌علاوه، آسیب‌هایی از جمله ترک‌ها و حفره‌های درون مصالح، سرعت انتشار امواج درون ماده را تحت تأثیر قرار می‌دهند [5]. متأسفانه جامعه فنی کشور ایران، نسبت به کاربرد آزمون‌های غیرمخرب، در حوزه شناخت و مداخلات بناهای تاریخی، توجه کافی را نداشته و آزمون‌های مخرب در آسیب‌شناسی و سنجش روند تأثیر اقدامات درمانی صورت‌گرفته، کاربرد گسترده‌ای دارند. همچنین مطالعات و پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه آزمون‌های آکوستیک به‌عنوان یکی از کاربردی‌ترین شاخه‌های این روش‌ها، بسیار کم بوده و همان مطالعات انجام‌شده نیز در رشته‌های عمران صورت گرفته و کمبود این مطالعات در حوزه آثار تاریخی به‌چشم می‌خورد. مقاله پیش رو، با بررسی و تحلیل مطالعات انجام‌شده در این حوزه به‌خصوص در جامعه اروپایی در سال‌های اخیر، سعی در معرفی تکنیک‌های آکوستیک و کاربرد آن در بررسی کیفیت مصالح بناهای تاریخی و انتخاب رویکرد صحیح مداخلاتی و در نهایت تشویق متخصصان حوزه میراث فرهنگی ایران، در به‌کارگیری گسترده آزمون‌های مطرح‌شده دارد.

۲. پیشینه پژوهش

در این پژوهش، مقاله‌های علمی معتبر در حوزه مطالعات و پژوهش‌های مربوط به آزمون‌های آکوستیک از سال ۲۰۰۳ تا سال ۲۰۲۱ بررسی گردید و هدف اصلی و نتایج به‌دست‌آمده از آن‌ها در قالب جدول ۱ تهیه شده است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که امروزه در جهان از

پیچیدگی‌هایی به‌خصوص در زمینه‌ی تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده وجود دارد. برای افزایش دقت آزمون‌های آکوستیک با توجه به محدودیت‌های موجود در رابطه با سایت توصیه می‌شود این نوع آزمون‌ها، با دیگر انواع آزمون‌های غیرمخرب ترکیب شوند (جدول ۱).

آزمون‌های آکوستیک به‌عنوان یکی از انواع آزمون‌های غیرمخرب، به‌طور گسترده‌ای انجام می‌شود و با پیشرفت تکنولوژی، بسیاری از محدودیت‌های سابق در راستای اجرای این نوع آزمون‌ها رفع شده است؛ هرچند که هنوز این محدودیت‌ها، به‌طور کامل برطرف نشده است و

جدول ۱: تفسیر مقالات مورد استفاده در پژوهش

Table 1: Interpretation of articles used in research

ردیف	عنوان مقاله	نویسنده	سال	هدف	تکنولوژی مورد استفاده	نتیجه‌گیری
۱	ONSITEFORMASONRY-A European Research Project: On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry [6]	Maierhofer et al.	2003	ترکیب مؤثر و مفید روش‌های مختلف غیرمخرب و نیمه‌مخرب برای ارزیابی دقیق ایمنی سازه و آسیب‌های فیزیکی سازه تاریخی	انتقال صوتی و انعکاس فراسوتی	ارائه دستورالعمل‌ها و پروتکل‌هایی برای انتخاب مناسب‌ترین روش برای حل مشکلات مربوط به بناهای تاریخی با سطوح ارزیابی متفاوت بر اساس دستاوردهای علمی و فنی
۲	Nondestructive quality control of reinforced masonry buildings [7]	Diego Arosio et al.	2012	توسعه روش‌های ارزیابی کیفیت برای بناهای تقویت‌شده ملرن بر اساس روش‌های آزمایش غیرمخرب	روش سونیک	توسعه روش بررسی کیفیت اجر تقویت‌شده بر اساس فناوری رادار نفوذکننده به زمین و ادغام با آزمایش سونیک برای افزایش دقت تشخیص آسیب‌ها
۳	Seismic and Sonic Applications on Artifacts and Historical Buildings [8]	G. Leucci	2017	بررسی کاربردهای روش‌های غیرمخرب انتشار امواج صوتی و مافوق صوتی برای ارزیابی وضعیت بناهای تاریخی	روش اولتراسونیک	بحث کوتاهی در مورد کاربرد روش‌های غیرتهاجمی صوتی و اولتراسونیک در میراث فرهنگی
۴	Sonic tomography for masonry walls characterization [9]	Luchin et al.	2018	استفاده از آزمایش‌های سرعت پالس‌های صوتی برای تشخیص مورفولوژی، آسیب‌های پنهان و تخلخل‌های موجود در عناصر سازه‌ای	برش‌نگاری صوتی	به‌تازگی، آزمایش‌های سونیک با تکنولوژی برش‌نگاری برای امکان بازسازی مورفولوژی عناصر داخلی ترکیب شده‌اند. از این تکنیک به دلیل غیرتهاجمی بودن، اجرای آسان و سازگاری با بناهای تاریخی، به‌طور گسترده استفاده می‌شود.
۵	An innovative methodology for the non-destructive diagnosis of architectural elements of ancient historical buildings [10]	Silvana Fais et al.	2018	بررسی ویژگی‌های مصالح سنگی مورد استفاده در بناهای تاریخی و عناصر معماری با استفاده از تکنولوژی لیزر اسکنر برای مدل‌سازی سه‌بعدی اشیاء مورد بررسی و بررسی‌های	تکنیک‌های آکوستیک	ضرورت ادغام تکنیک‌های مختلف برای حفاظت از میراث فرهنگی به دلیل اهداف مختلف در شرایط گوناگون، مصالح مختلف موجود، دقت‌های گوناگون موردنیاز

		محلّی با استفاده از تکنیک‌های آکوستیک				
استفاده از دامنه‌ی مناسب‌تر انتشار امواج و استفاده از ابزار تجربی مناسب برای استانداردسازی اندازه‌گیری‌ها در جهت بهبود کاربرد برش‌نگاری اولتراسونیک و افزایش دقت اندازه‌گیری‌ها	برش‌نگاری اولتراسونیک	بهبود کاربرد برش‌نگاری اولتراسونیک با استفاده از اطلاعات مربوط به میرایی و زمان انتقال امواج	2018	Domenico Camassa et al.	Improvements of the ultrasonic tomography for applications to historical masonry constructions [11]	۶
در رابطه با آزمون‌های غیرمخرب، استانداردهای بسیار کمی طراحی شده و همین استانداردهای کم نیز، معمولاً به دلیل پیچیدگی‌هایی که دارند، توسط کاربران رعایت نمی‌شوند. در نتیجه، در این مقاله سعی بر آسان‌سازی پروتکل‌های اجرایی آزمون‌های غیرمخرب شده است.	معرفی مجموعه روش‌های سنجش آکوستیک	تجزیه و تحلیل روش‌های مختلف غیرمخرب و ارائه قواعدی برای اجرای سه تکنیک غیرمخرب خاص: گرماسنجی مادون قرمز، رادار نفوذکننده به زمین و آزمون‌های آکوستیک	2019	M. Crespo Cuesta	Non-destructive diagnostics techniques for historical buildings: methodological guidelines and operations protocols [3]	۷
این روش‌ها را نمی‌توان همواره به‌عنوان راهی مطمئن برای تعیین نفوذ مخلوط‌های تزریق مورد استفاده در ساختار بنایی تلقی کرد و هنوز محدودیت‌هایی در این راستا وجود دارد.	برش‌نگاری صوتی و آزمون اولتراسونیک	ارزیابی امکان، محدودیت‌ها و شرایط استفاده از برش‌نگاری و آزمون اولتراسونیک در جهت ارزیابی تأثیر تزریقات انجام‌شده از طریق تحقیقات تجربی در ساختمان‌های بنایی تقویت‌شده	2019	Radek Zigler	Evaluation Of Masonry Grouting Effectiveness Using Thermography And Ultrasonic Methods [12]	۸
خرابی سنگ مرمر به‌طور مؤثر با استفاده از همبستگی بین سرعت پالس‌های اولتراسونیک و تخلخل سنگ به‌تنهایی قابل ارزیابی است.	آزمون اولتراسونیک	بررسی تأثیر حرارت مصنوعی روی سنگ مرمر بر اساس اندازه‌گیری سرعت موج مافوق صوت	2020	A. Ahmad	Investigation of Marble Deterioration and Development of a Classification System for Condition Assessment Using Non-Destructive Ultrasonic Technique [13]	۹
نتایج نشان داد که سرعت و زمان انتقال امواج اولتراسونیک هر دو تحت تأثیر تغییرات دمای فصلی قرار دارند.	آزمون اولتراسونیک	تعیین عملکرد ساختاری دیوارهای تاریخی شهر دیاربکر ترکیه با انجام تکنیک‌های غیرمخرب	2020	N. Işık et al.	Nondestructive testing techniques to evaluate the structural damage of historical city walls [14]	۱۰
توسعه مدل‌های عددی و همچنین کمک به درک صحیح ظرفیت بارگیری بناهای تاریخی برزیل، همچنین، تشخیص دوره‌های تاریخی ساخت آجرها با توجه به	آزمون اولتراسونیک	بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آجرهای خشکی برزیلی از قرن ۱۸ تا ۲۰ میلادی از جمله شاخص جذب آب، سرعت پالس	2020	E. Araújo et al.	Physical and mechanical characterization of traditional Brazilian clay bricks from different centuries [15]	۱۱

ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی آجرهای خشتی برزیل و سرعت پالس اولتراسونیک		اولتراسونیک و مقاومت فشاری				
طبیعت غیرتهاجمی و حساسیت بالای تکنیک انتشار صوتی یک ابزار تحقیق و کاربردی مفید برای نظارت بر سازه‌های بنایی ارائه می‌دهد.	آزمون سونیک	بررسی کاربرد تکنیک انتشار صوتی برای سازه‌های بنایی، پرداختن به چالش‌های خاص استفاده از این تکنیک و یافته‌های اخیر	2020	Els Verstryngne et al.	A review on acoustic emission monitoring for damage detection in [16] masonry structures	۱۲
امکان بهره‌گیری از نقشه برداری سرعت پالس اولتراسونیک برای شناسایی کیفیت چسبندگی اندود و مصالح دیواره، شناسایی یک الگوی استاندارد برای توزیع امواج اولتراسونیک درون مصالح و ارائه دیدگاهی جدید در راستای تفسیر داده‌های حاصل از آنالیز الگوی توزیع امواج	آزمون اولتراسونیک	مشخص کردن سرعت امواج فراسوت دیوارهای خارجی کلیسای Nossa Senhora در برزیل و تشخیص ناهمگونی بناها برای جمع‌آوری داده‌های کمی در مورد وضعیت حفاظتی کلیسا	2020	E. Araújo et al.	A New Approach for Assessment of the Coating Mortar Adherence in Ancient Masonries Through Ultrasonic Data [2]	۱۳
برای تجزیه و تحلیل مواد ناهمسانگرد، الگوی توزیع امواج مافوق صوت می‌تواند راهی جایگزین در مقابل روش‌های مخرب برای توصیف بناها باشد.	آزمون اولتراسونیک	ارائه دیدگاهی جدید برای تشخیص حفره‌ها و فضاهای خالی در ساختمان‌های سنتی بر اساس آزمون‌های غیرمستقیم اولتراسونیک	2021	Rodrigues et al.	A Novel Approach for Detection of Voids in Traditional Load-Bearing Masonries Based on Ultrasonic Data [17]	۱۴
نتایج نشان می‌دهد که آزمون سونیک، یک ابزار معتبر برای ارزیابی و بررسی این گونه ساختارهاست. عملکرد آزمون سونیک بهتر از آزمون اولتراسونیک هست که می‌تواند با توجه به محدودیت‌های مختلف، بهتر عمل کند.	آزمون سونیک	توسعه آزمون‌های غیرمخرب قابل اطمینان برای بررسی سازه‌های ساخته‌شده از خاک کوبیده شده	2021	J.D. Rodríguez-Maniscal et al.	Evaluating the performance of sonic and ultrasonic tests for the inspection of rammed earth constructions [5]	۱۵

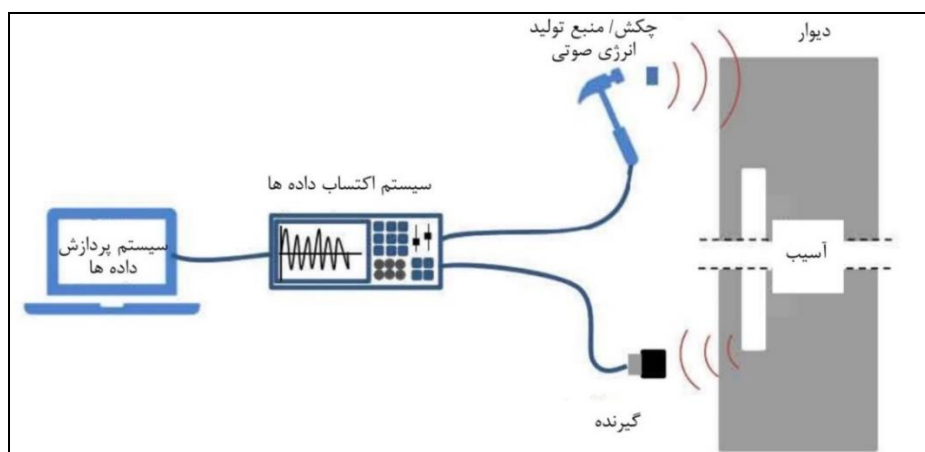
۳. معرفی روش‌های سنجش آکوستیک

صوت‌شناسی یا آکوستیک، یکی از شاخه‌های علم فیزیک است و موضوع آن بررسی موج‌های مکانیکی در گازها، مایه‌ها و جامدات از جمله نوسان‌ها، صدا، فراسوت و فروصوت است. آنچه در این پژوهش بدان پرداخته

می‌شود، امواج آکوستیک است که خود شاخه‌ای از علم آکوستیک محسوب می‌شود. ایده اصلی این روش‌ها، عبور موج صوتی از داخل ماده و اندازه‌گیری زمان انتشار آن تا رسیدن به یک نقطه دیگر است. از دو مبدل، یکی برای انتشار و دیگری برای دریافت پالس‌های صوتی استفاده

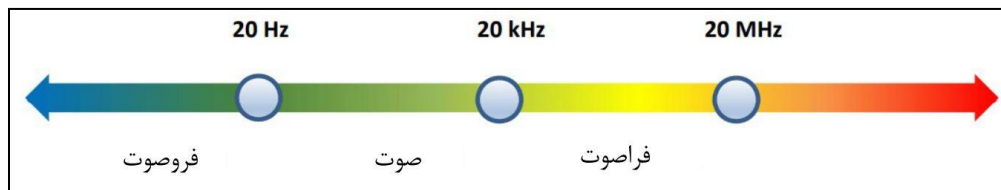
باید توجه داشت که آزمایش‌های مرتبط با سرعت پالس‌های سونیک و اولتراسونیک، در زمینه مربوط به نظریه‌های بنیادین، اهداف آزمایش و کاربرد، بسیار مشابه هم هستند. آنچه سبب تمایز این دو نوع آزمایش می‌شود، مربوط به اختلاف فرکانس امواج انتشاری، طول موج و مشخصات فنی ابزار مورد استفاده برای تولید هر کدام است. فرکانس امواج سونیک، در بازه بیست هرتز تا بیست کیلوهرتز قرار می‌گیرد و امواج اولتراسونیک، فرکانس‌های بالاتر از بیست کیلوهرتز، معمولاً بازه مابین صد کیلوهرتز تا بیست مگاهرتز را شامل می‌شوند (شکل ۲). وضوح نتیجه نهایی و عمق نفوذ، به فرکانس امواج ارسالی بستگی دارد؛ امواج با فرکانس‌های پایین‌تر، عمق نفوذ بیشتر، ولی وضوح کمتری را ارائه می‌دهند و برعکس. لازم به ذکر است که انتخاب دامنه فرکانس و طول امواج، بسته به نوع سازه مورد مطالعه [8]، ارتباط مستقیمی با اندازه آسیب‌ها یا حفره‌های درون ماده دارد. به‌طور معمول، آزمون‌های سونیک، برای اطمینان از اثربخشی تزیقات و درمان‌های صورت گرفته کاربرد دارند. این آزمون‌ها، برای تحلیل‌های کمی مناسب نیستند اما اطلاعات کیفی مناسبی درباره مصالح یا وضعیت حفاظتی عناصر، در اختیار ما قرار می‌دهند. در مقابل، استفاده از امواج اولتراسونیک، با فرکانس بالاتر و طول موج کوتاه‌تر، برای ارزیابی ساختارهای چندلایه، توصیه نمی‌شود و بهتر است برای بررسی مواد بسیار فشرده، مانند مرمر، فلز، چوب یا بتن مسلح مورد استفاده قرار بگیرد (شکل ۳) [3].

می‌شود (شکل ۱). در صورتی که فاصله بین نقطه‌ای که سیگنال از آن منتشر می‌شود و نقطه‌ای را که سیگنال در آن دریافت می‌شود، بدانیم؛ بر اساس زمان و فاصله انتشار، می‌توانیم متوسط سرعت موج صوتی در مقطع انتشار سیگنال را محاسبه کنیم [2] و سپس به بررسی ارتباط میان این میانگین سرعت با کیفیت و نوع ماده آزمایش‌شده بپردازیم. این روش‌ها می‌توانند اطلاعات مهمی برای تعیین ضخامت و موقعیت لایه‌های دچار هوازدگی، خصوصیات فیزیکی مصالح مختلف، شامل خصوصیات مکانیکی و وضعیت ترک‌ها، شکستگی‌ها و دیگر جداشدگی‌ها در اختیار ما قرار دهند [8]. امواج صوتی و فراصوتی، هنگام انتشار در محیط‌های جامد، مایع و حتی گازی سرعت‌های مختلفی ارائه می‌دهند؛ در واقع، برای هر یک از مواد، شناسایی یک محدوده معمول از انتشار موج صوتی ممکن است که بر اساس آن، استفاده از میانگین سرعت انتشار امواج برای آنالیز و تحلیل خصوصیات مختلف مصالح، میسر می‌شود [2]. به‌طور کلی، سرعت انتشار یک موج صوتی، رابطه‌ای مستقیم با تراکم و چگالی ماده‌ای که موج در آن منتشر می‌شود، همچنین خصوصیات الاستیک ماده مورد نظر دارد. ذکر این نکته لازم است که در دماهای مختلف سرعت صوت تغییر می‌کند و تغییر سرعت این امواج خطی نیست. آسیب‌هایی همچون شکستگی‌ها، حفره‌ها یا کاهش تراکم در ملات‌ها سرعت انتشار کمتری نسبت به برآورد استاندارد مواد در شرایط نرمال دارند [3].

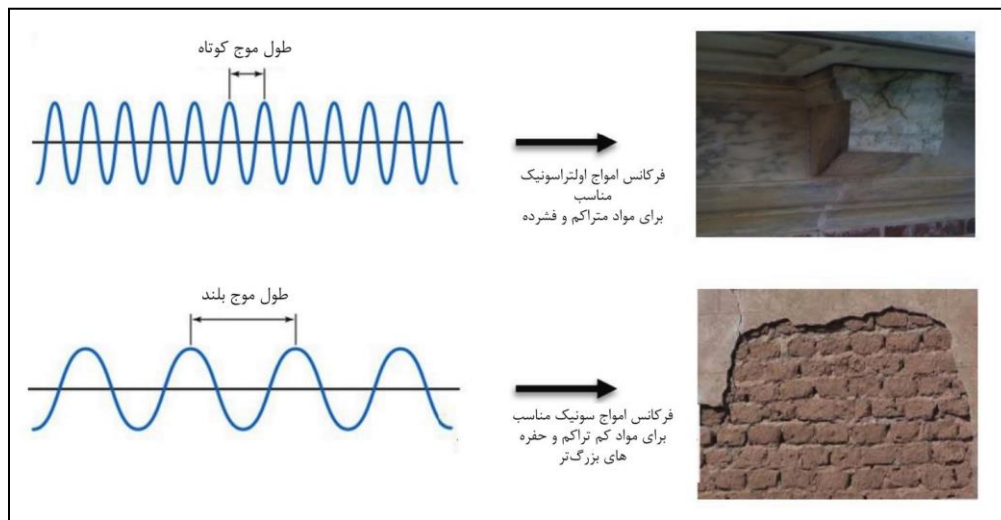


شکل ۱: نحوه عملکرد آزمون‌های صوتی [3]

Fig. 1: Scheme of Sonic pulse velocity test



شکل ۲: طبقه‌بندی گروه‌های صوتی بر اساس فرکانس [3]
Fig. 2: Sound waves bands classification.



شکل ۳: رابطه بین طول موج و فرکانس امواج سونیک و اولتراسونیک، تراکم و آسیب پیشنهادی برای هر یک [3]
Fig. 3: Relation between wavelength and frequency. Suggested size flaws/densities for each

۳-۱. کاربرد آزمون‌های آکوستیک

- آزمون‌های سونیک و اولتراسونیک، برای ارزیابی پارامترهایی مانند کیفیت ساختاری، شناسایی حفره‌ها و نقص‌های سازه، ترک‌ها و الگوی توزیع آن‌ها، جدایش‌های اندودها و تشخیص تغییرات به‌وجودآمده در خصوصیات فیزیکی مواد، بسیار کاربردی هستند [2]. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که چگونه حفره‌ها و فضاهای خالی موجود در ساختار بناها می‌توانند در زمان انتشار موج سونیک و اولتراسونیک تأثیر بگذارند که این فرآیند نه‌تنها امکان شناسایی ناهنجاری‌ها هم‌چنین شناسایی محل دقیق آن‌ها را فراهم می‌کند [17].
- برای ارزیابی اثر تکنیک‌های مقاوم‌سازی و استحکام‌بخشی در ساختمان‌های بنایی می‌توان از آزمون‌های سونیک و اولتراسونیک استفاده کرد [2].
- از آزمون‌های اولتراسونیک می‌توان برای شناسایی ناهمگنی‌های موجود در ساختمان‌های تاریخی و نیز برای تشخیص اینکه آیا اتصالات دیوارها خواص

ساختاری مشابهی دارند، استفاده کرد. هم‌چنین ثابت‌شده است که قسمت‌های بازشو و بخش‌های باربر می‌توانند بر رفتار امواج اولتراسونیک در ساختمان‌ها تأثیر بگذارند [2].

- از آزمون‌های صوتی و مافوق صوت می‌توان در ترکیب با دیگر آزمون‌های غیرمخرب و نیمه‌مخرب برای تخمین خواص مکانیکی مواد ناهمسانگرد^۱ استفاده کرد [2].

۳-۲. انواع روش‌های اجرای تکنیک‌های سنجش آکوستیک

- روش‌های معمول آزمایش آکوستیک عبارت‌اند از:
 - انتقال صوتی^۲
 - برش‌نگاری صوتی^۳
 - انعکاس صوتی^۴
 - انعکاس فراصوتی^۵ [8]
- در ادامه، به تفصیل هر یک از این روش‌ها خواهیم پرداخت.

۳-۲-۱. انتقال صوتی

این روش، شامل انتقال امواج صوتی از طریق ضخامت دیواره یا سازه تحت آزمایش در یک مسیر مستقیم است. انتشار امواج در یک طرف سازه، توسط ضربه چکش^۶ یا یک منبع تولیدکننده پالس صوتی انجام می‌شود. یک شتاب‌سنج، در وجه دیگر ساختار در نقطه مقابل چکش قرار می‌گیرد که سیگنال‌های منتقل شده در طرف دیگر دیوار را دریافت می‌کند. سرعت محاسبه شده در این روش، میانگین سرعت همه امواج منتقل شده است و ارزیابی موقعیت دقیق و میزان هرگونه ناهمگنی احتمالی در این روش ممکن نیست [8]. نکته مهم دیگر، در تحلیل عناصر از طریق روش‌های صوتی، تعریف روش انتقال به معنی تنظیم نحوه قرارگیری مبدل در عنصر مورد مطالعه است. سه روش برای تنظیم مبدل‌ها وجود دارد: قراردادن مبدل‌ها در وجوه موازی عنصر مورد مطالعه، قراردادن مبدل‌ها در وجوه متعامد و قراردادن هر دو مبدل فرستنده و گیرنده در یک وجه؛ که این نحوه تنظیم به ترتیب، انتقال مستقیم، انتقال نیمه‌مستقیم و انتقال غیرمستقیم نامیده می‌شود (شکل ۴) [3]. در میان انواع روش‌های انتقال موج صوتی درون ماده مورد آزمایش، روش انتقال مستقیم، دقیق‌ترین روش هست اما اغلب به علت محدودیت‌های مرتبط با شرایط دسترسی سایت، امکان بهره‌گیری از این روش محدود می‌شود؛ زیرا در اغلب سایت‌ها، دسترسی به هر دو وجه موازی ساختار مورد مطالعه، ممکن نیست. روش انتقال مستقیم، برای شناسایی ناهمگنی‌های مصالح و ترک‌ها، صفحات جدا شده، حفره‌های داخلی و اثربخشی استحکام‌بخشی‌های صورت گرفته توصیه می‌شود. روش انتقال نیمه‌مستقیم، دقت کمتری نسبت به انتقال مستقیم دارد اما به علت دسترسی آسان‌تر به هر دو وجه متعامد ساختار مورد مطالعه در اغلب سایت‌ها، برای بررسی‌های در محل و غالباً برای اطمینان از اثربخشی استحکام‌بخشی‌های صورت گرفته مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این میان، انتقال غیرمستقیم، به دلیل عمق نفوذ کمتر، برای تحقیقات مورد نظر چندان مطلوب نیست. از آنجاکه هر دو مبدل ارسال سیگنال و دریافت آن، در یک وجه یکسان قرار می‌گیرند، این روش، بیشتر اطلاعاتی درباره لایه‌های

نزدیک به سطح، به نسبت لایه‌های درونی‌تر، در اختیار ما قرار می‌دهد؛ بنابراین، دفعات تکرار آزمایش هم در جهت عمود و هم در جهت افقی، باید افزایش یابد. باید توجه داشت که به علت انجام آزمایش فقط در یک وجه سازه مورد نظر، انتقال غیرمستقیم آسان‌ترین روش به علت دسترسی راحت‌تر در میان دو روش دیگر محسوب می‌شود و بیشتر برای شناسایی ترک‌های سطحی و آسیب‌های نزدیک به سطح، مورد استفاده قرار می‌گیرد [3].

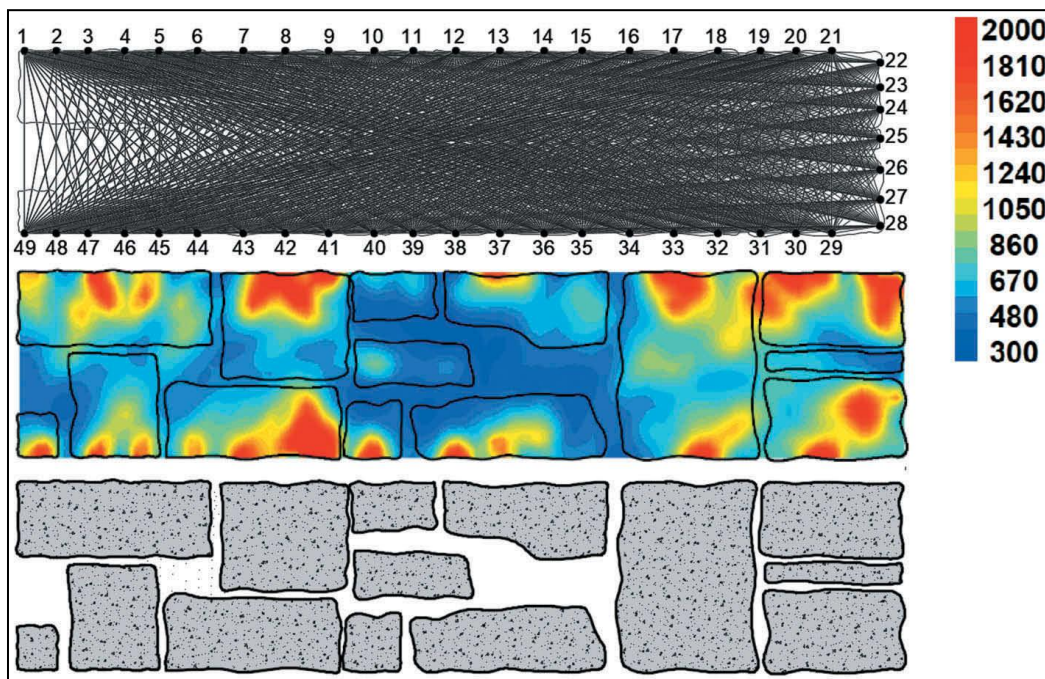
۳-۲-۲. برش‌نگاری صوتی

این روش، روش بهبودیافته شیوه انتقال صوتی با نقشه‌هایی با وضوح بالاتر است، زیرا آزمایش‌ها نه تنها در جهت مستقیم بلکه در امتداد مسیرهایی که عمود بر سطح دیواره‌ها نیستند، نیز انجام می‌شوند [3]. تفاوت برش‌نگاری صوتی با روش‌های انتقال، در استفاده هم‌زمان از چندین گیرنده در نقاط مختلف سازه، به جای اندازه‌گیری یک‌به‌یک مسیر پرتوهای عبوری است. شبکه متراکمی از پرتوهای عبوری، از طریق دیواره سازه یا مقطع ساختار مورد مطالعه عبور می‌کنند؛ که هر یک از آن‌ها، در زمان مشخصی مابین منبع تولید پالس و منبع گیرنده منتقل می‌شوند [8]. این پرتوهای عبوری باید به نحوی درون ساختار مورد مطالعه توزیع شوند که تا حد امکان، تمامی حجم ساختار را پوشش دهند [1]. با محاسبه زمان انتشار هر موج، سرعت هر تک‌پالس صوتی محاسبه شده و سرعت‌های متفاوت این پرتوهای عبوری در کنار هم قرار داده می‌شوند [3]. در نهایت، این زمان‌های انتقال، برای به دست آوردن یک بازسازی دوبعدی یا سه‌بعدی از نحوه توزیع سرعت، درون ساختار مورد مطالعه پردازش می‌شوند. برای افزایش دقت نتایج حاصل شده، آگاهی دقیق از مدل هندسی و ساختار نمونه مورد مطالعه ضروری است. سرانجام، از طریق شناسایی اختلاف سرعت موجود بین این پالس‌ها، می‌توان نقص‌های بافت داخلی سازه را شناسایی کرد (شکل ۴) [8]. برش‌نگاری صوتی برای تشخیص مورفولوژی داخلی بنا و آسیب‌های درونی همانند حفره‌ها و ترک‌ها، کنترل مداخلات تعمیراتی انجام شده همانند تزیقات انجام شده در عناصر و همچنین ارزیابی غیرمستقیم خصوصیات مکانیکی مصالح کاربرد دارد [9].

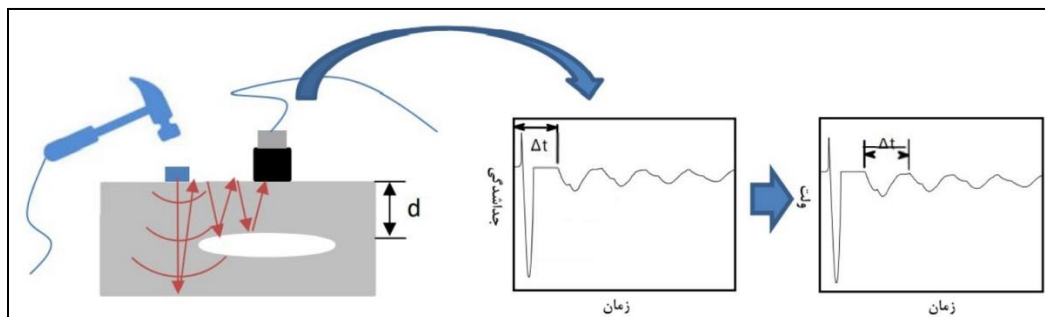
۳-۲-۳. انعکاس صوتی

در روش انعکاس صوتی، هر دو مبدل فرستنده و گیرنده در یک وجه یکسان از ساختار مورد مطالعه قرار دارند؛ امواج مکانیکی ثبت‌شده توسط گیرنده، امواج مستقیماً منعکس‌شده توسط هرگونه نقص و ناپیوستگی داخلی مانند ترک‌ها، جداشدگی‌ها یا حتی وجه پشتی سازه مورد مطالعه است [1]، [8]. برخلاف دور روش قبلی که در آن‌ها سرعت انتشار امواج از طریق شیوه انتقال محاسبه می‌شد؛ این روش قادر به محاسبه عمق و سایز ناهمگونی‌ها، حفره‌ها یا ترک‌های درون ضخامت ساختار از طریق شیوه بازتاب یا انعکاس هست. زمانی که پرتوی عبوری به ماده دیگری داخل ساختار

برای مثال، سطح بیرونی لایه‌ها، حفره‌های داخل مصالح یا جبهه مقابل عنصر موردنظر، با مقاومت‌های آکوستیک متفاوت برخورد می‌کند، بخشی از موج با سرعت متفاوتی از ماده عبور می‌کند و بخشی دیگر، به‌عنوان یک پژواک به سطح اولیه منعکس می‌شود. گیرنده‌ها، انرژی مکانیکی امواج بازتاب‌شده را به سیگنال‌های الکتریکی در بازه زمان تبدیل کرده و به‌صورت دیجیتالی آن را به نمایش می‌گذارند. از روش انعکاس صوتی برای محاسبه ابعاد و شناسایی شکل داخلی، نوع و خصوصیات مواد پرکننده، ترک‌ها و حفره‌های موجود در بافت داخلی ساختار مورد مطالعه استفاده می‌شود (شکل ۵) [3].



شکل ۴: نمونه مسیر پرتوهای عبوری و تصاویر حاصل از برش‌نگاری صوتی [9]
Fig. 4: sample of crossing ray paths and SPV tomography obtained



شکل ۵: روش انعکاس صوتی و نحوه عملکرد گیرنده که انرژی مکانیکی را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند [3].

Fig. 5: Impact-echo method and lecture of receiver which transforms the mechanical energy into electrical signal.

۳-۲-۴. انعکاس فراصوتی

امواج اولتراسونیک، توسط یک مبدل پیزوالکتریک^۸ با فرکانس‌هایی بیشتر از بیست کیلوهرتز و با طول موجی در محدوده ۵۰-۱۰۰ میلی‌متر تولید و منتشر می‌شوند. در آزمایش امواج اولتراسونیک، مسئله اصلی، غلبه بر مشکل برقراری اتصال مناسب مبدل به سطح مورد مطالعه است؛ که اغلب، سطح ناهمواری است و امواج توسط ناهمگنی‌های موجود در سطوح پراکنده می‌شوند [8].

۴. تجهیزات، طراحی آزمایش و روند کسب داده‌ها

تجهیزات مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های سونیک و اولتراسونیک، از اجزای متعددی تشکیل شده است. موج مکانیکی، توسط یک مبدل مجهز به یک حسگر پیزوالکتریک برای ثبت نیروی ضربه^۹ تولید می‌شود فرکانس و مقدار انرژی این نیروی ضربه را خصوصیات منبع تولید تعیین می‌کند. ارتعاشات ماده پس از انتشار امواج، به وسیله شتاب‌سنج اندازه‌گیری می‌شود [8]. با توجه به فرکانس مورد نیاز برای آزمایش، تنوع زیادی در انتخاب شتاب‌سنج وجود دارد. برای آزمون‌های سونیک با فرکانس‌های پایین، با توجه به شرکت‌های تولیدکننده مختلف، گیرنده‌هایی با محدوده بین ۰٫۱ تا ۴۸۰۰ هرتز یا ۰٫۲ تا ۶ هزار هرتز در بازار وجود دارند [6]. مرحله بعد، پس از دریافت امواج مکانیکی توسط مبدل گیرنده یا همان شتاب‌سنج، پردازش و ثبت تکانه‌های موج توسط یک نوسان‌سنج^{۱۰} است که پالس‌های مکانیکی دریافت‌شده را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌کند (شکل ۶). این سیگنال‌های الکتریکی، به شکل امواجی الکتریکی در تابع زمان روی صفحه‌نمایش دیجیتال نشان داده می‌شوند و همه این اطلاعات، در یک کامپیوتر ذخیره می‌شوند. به‌تازگی، بیشتر آزمایش‌ها با یک دستگاه و به‌صورت یکپارچه انجام می‌شود [3].

۴-۱. معرفی برخی از جدیدترین ابزارهای آزمایش اولتراسونیک

- Pundit، ابزار اندازه‌گیری سرعت پالس و برش‌نگاری اولتراسونیک

ابزاری با نام Pundit برای آزمایش سرعت پالس و برش‌نگاری اولتراسونیک، یکی از ابزارهای تولیدی شرکت Proceq است. این ابزار برای ارزیابی یکپارچگی ساختاری، مکان‌یابی عیوب و حفره‌های بتن و سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. شرکت تولیدکننده در مورد این ابزار می‌نویسد: نقص‌های ساختاری باعث آسیب‌های جدی و فروپاشی می‌شوند. آزمایش اولتراسونیک اطلاعاتی در مورد استحکام و یکنواختی بتن، سنگ، کامپوزیت، سرامیک، چوب و اپوکسی ارائه می‌دهد و می‌تواند برای تشخیص و مکان‌یابی حفره‌ها، لایه‌لایه‌شدگی، لوله‌ها، ترک‌ها و عیوب مورد استفاده قرار گیرد. Proceq Pundit متنوع‌ترین ابزارهای آزمون اولتراسونیک را به‌صورت کاربردی و قابل حمل ارائه می‌دهد [19].

Pundit PD8000

- تصویربرداری ساختاری، تشخیص شی و نقص با استفاده از روش انعکاس اولتراسونیک [21]
- وضوح تصویر در اعماق بالا
- ارزیابی کامل ساختار در محل با پشتیبانی و حالت‌های مختلف تجسم از جمله واقعیت افزوده
- بهره‌وری بی‌نظیر در محل و گردش کار دیجیتالی
- دارای کاربردهایی از جمله مکان‌یابی نقص‌های تزریق، ارزیابی کیفی، مکان‌یابی نقص‌های زیرسطحی، اندازه‌گیری ضخامت از طریق یک وجه، تعیین سرعت امواج برای برآورد همگنی و استحکام، مکان‌یابی لایه‌لایه‌شدگی و حفره‌ها (شکل ۷ و ۸).



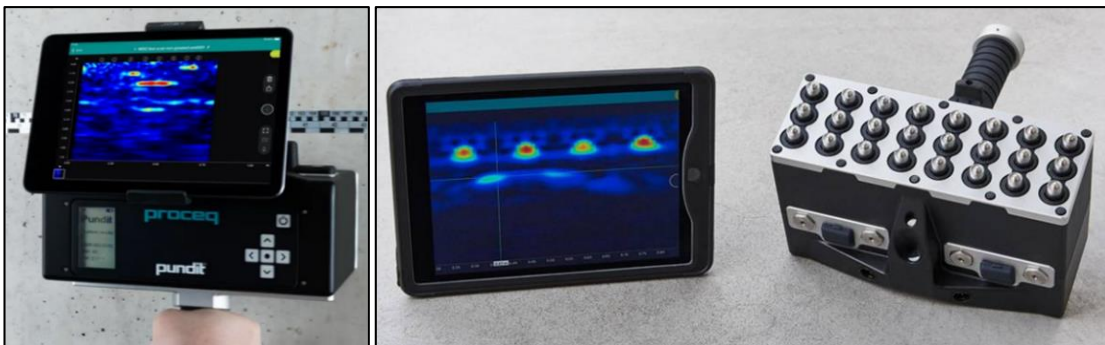
شکل ۶: نمونه یک نوسان‌سنج [18]

Fig. 6: An example of an oscilloscope

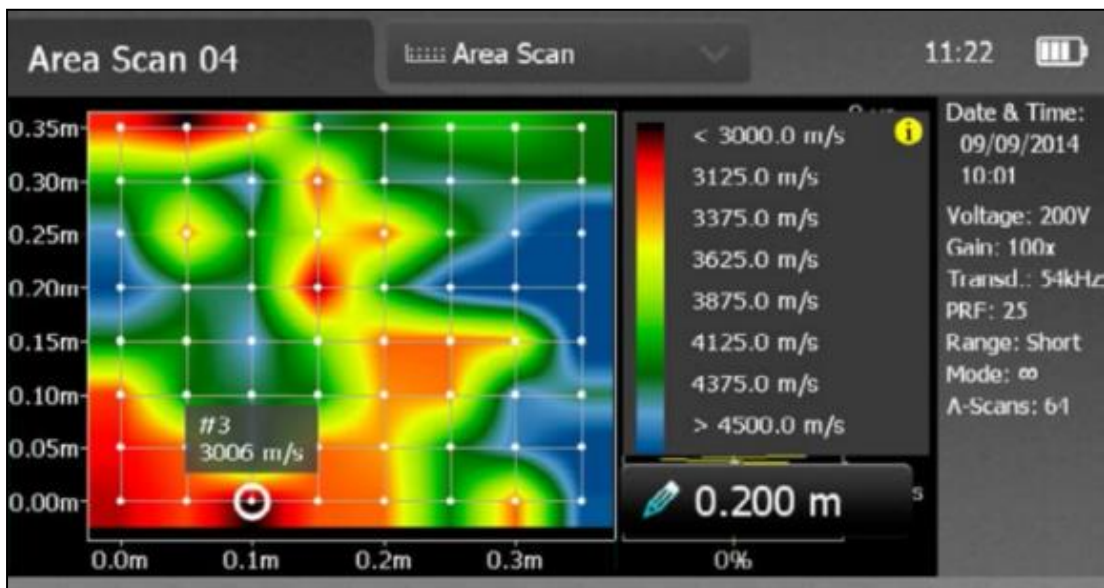
۵. داده‌های روش‌های آکوستیک

نتایج پردازش داده‌ها ممکن است در قالب نقشه‌های توپوگرافی خاکستری یا رنگی به صورت دو یا سه‌بعدی نمایش داده شود (شکل ۱۰ و ۱۱). نتایج برش‌نگاری را می‌توان به صورت نقشه‌های تداعی سرعت نمایش داد؛ تصاویری رنگی که در آن، هر رنگ نماینده یک سرعت است. این نوع تجسم، به ما امکان ارزیابی مستقیم ترکیبات داخلی ساختار مواد را می‌دهد؛ به نحوی که هرگونه افزایش یا کاهش سرعت در نواحی عمومی، نشان‌دهنده تغییر مواد، وجود نقص، حفره‌ها یا الگوهای ترک پراکنده است [8].

- طراحی شده برای استفاده در محیط‌های سخت و غیرقابل دسترسی [21]
- صفحه‌نمایش با بالاترین وضوح و شفاف‌ترین تصویر موجود در بازار
- حافظه فلش هشت گیگابایتی که امکان ذخیره تا حداکثر صد هزار اسکن را دارد.
- تجسم دوبعدی برای آزمایش یکنواختی در سازه مورد مطالعه
- طبقه‌بندی رنگ قابل تعریف توسط کاربر بر اساس سرعت امواج یا زمان انتقال (شکل ۹)



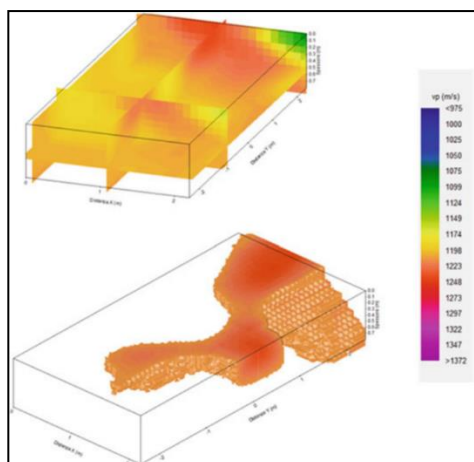
شکل ۷ و ۸: Pundit PD8000 یکی از جدیدترین فناوری‌ها برای آزمایش اولتراسونیک [19]
Figs. 7 and 8: Pundit PD8000, one of the newest technologies for ultrasonic testing



شکل ۹: Pundit PL-200PE [21]
Fig. 9: Pundit PL-200PE

۵. داده‌های روش‌های آکوستیک

نتایج پردازش داده‌ها ممکن است در قالب نقشه‌های توپوگرافی خاکستری یا رنگی به صورت دو یا سه‌بعدی نمایش داده شود (شکل ۱۰ و ۱۱). نتایج برش‌نگاری را می‌توان به صورت نقشه‌های تداعی سرعت نمایش داد؛ تصاویری رنگی که در آن، هر رنگ نماینده یک سرعت است. این نوع تجسم، به ما امکان ارزیابی مستقیم ترکیبات داخلی ساختار مواد را می‌دهد؛ به نحوی که هرگونه افزایش یا کاهش سرعت در نواحی عمومی، نشان‌دهنده تغییر مواد، وجود نقص، حفره‌ها یا الگوهای ترک پراکنده است [8].



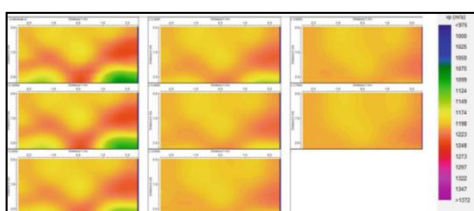
شکل ۱۰: نقشه‌های توزیع سرعت به صورت برش‌های دوبعدی [8]
Fig. 10: Velocity distribution shown as 2D depth slices

۶. نمونه‌های آزمون آکوستیک

۶-۱. کلیسای Nossa Senhora da Expectação

۶-۱-۱. معرفی سوژه و روند آزمایش

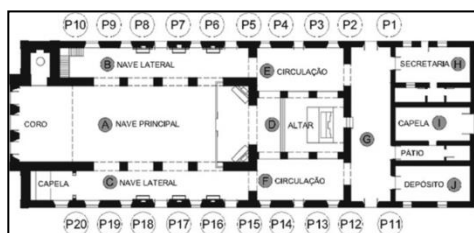
یک آزمایش بر مبنای اندازه‌گیری‌های مربوط به امواج اولتراسونیک در دیوارهای خارجی کلیسای Nossa Senhora da Expectação در برزیل ساخته شده در سال ۱۷۰۹، نمونه یک ساختمان باروک به سبک بومی انجام شد و نتایج نشان داد که نقشه‌برداری از سرعت پالس اولتراسونیک می‌تواند برای شناسایی چسبندگی و یا عدم چسبندگی بین اندود و مصالح دیوار استفاده شود. در ابتدا، دیوارهای کلیسا به بیست پانل از P1 به P20 تقسیم شد. هر پانل نیز به فریم‌های ۰٫۵*۰٫۵ متر تقسیم شد [2]. (شکل ۱۲ و ۱۳).



شکل ۱۱: نقشه‌های توزیع سرعت به صورت حجم‌های سه‌بعدی [8]
Fig. 11: Velocity distribution shown as 2D depth slices



شکل ۱۲: نمای جلویی و نقاط آزمایش در کلیسای Nossa Senhora da Expectação
Fig. 12: Frontal façade and lateral section of the Nossa Senhora da Expectação Church



شکل ۱۳: پلان کلیسا و موقعیت قرارگیری پانل‌های اندازه‌گیری
Fig. 13: Plant of the Nossa Senhora da Expectação Church and location of measurement panels

۶-۱-۲. نتایج

در یک نگاه کلی، زمانی که چسبندگی مناسبی میان اندود و آجرها وجود دارد، به‌غیراز چارچوب پیرامون بازشوها؛ پالس اولتراسونیک، در بخش پایه پانل‌ها سرعت بیشتری دارد که میزان این سرعت، به تدریج که ارتفاع پانل افزایش می‌یابد، روند نزولی پیدا می‌کند. این رفتار پالس‌ها، به علت تمرکز بار ناشی از وزن ساختمان در قسمت پایه پانل‌هاست. مقادیر پایین سرعت‌های اولتراسونیک وجود آسیب را نشان می‌دهد که این آسیب می‌تواند از شکاف‌های داخل ساختار تا عدم چسبندگی ملات به آجر متغیر باشد. همچنین، اختلاف زیاد سرعت پالس‌ها در یک

پانل یکسان ناشی از بالابودن سطح ناهمگونی در ساختار دیوار هست؛ بنابراین، با توجه به اینکه هر ماده دارای سرعت مشخصی از انتشار پالس اولتراسونیک بر اساس چگالی است، وجود آسیب‌هایی مانند حفره‌ها یا

افزایش خلل و فرج درون سنگ مرمر و کاهش چشمگیر سرعت موج مافوق صوت در سنگ مرمر منجر می‌شود. در نهایت، رابطه‌ای ساده مابین سرعت امواج مافوق صوتی و خلل و فرج درون سنگ مرمر مطرح شد و یک سیستم طبقه‌بندی برای ارزیابی روند تخریب سنگ مرمر ایجاد گردید. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تخریب سنگ مرمر را صرف‌نظر از ویژگی‌های ساختاری آن، می‌توان از طریق اندازه‌گیری‌های غیرمخرب سرعت امواج مافوق صوت ارزیابی کرد.

۶-۲-۲. روند آزمایش

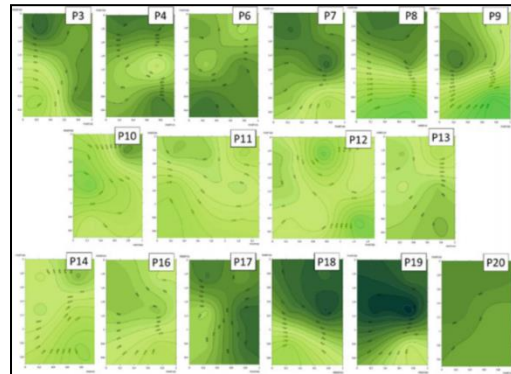
با در نظر گرفتن ناهمسانگردی سنگ، سرعت پالس اولتراسونیک در سه جهت عمود بر هم اندازه‌گیری شد. حداقل سه نمونه برای هر نوع سنگ و به‌طور میانگین، ۳-۵ اندازه‌گیری در هر جهت محاسبه شد. دقت اندازه‌گیری سرعت در این روش انتقال، ± 50 متر بر ثانیه فرض شد. اندازه‌گیری سرعت اولتراسونیک روی هر دو نمونه خشک و اشباع‌شده از آب انجام شد؛ زیرا سرعت امواج مافوق صوت در سنگ تحت تأثیر میزان اشباع آب قرار دارد.

۶-۲-۳. نتایج

نتایج به‌دست‌آمده تأیید می‌کند که خرابی سنگ مرمر به‌طور مؤثر با استفاده از همبستگی بین سرعت پالس‌های اولتراسونیک و تخلخل سنگ به‌تنهایی قابل ارزیابی است. به‌نظر می‌رسد این نتیجه با یافته‌های قبلی مغایرت داشته باشد که بر اهمیت پارامترهای ساختاری سنگ در توصیف خرابی سنگ مرمر تأکید می‌کنند. برخی نتایج شاخص این آزمایش عبارت‌اند از:

- کاهش سرعت موج اولتراسونیک در نتیجه افزایش اختلاف درجه حرارت
- کاهش محسوس سرعت موج اولتراسونیک با کوچک‌ترین افزایش در تخلخل سنگ
- کاهش سرعت امواج با افزایش هوازدگی سنگ مرمر در نتیجه افزایش تدریجی تراکم و عرض ترک‌ها (شکل ۱۵)

ناهمگونی‌های دیگر می‌تواند بر الگوی توزیع امواج اولتراسونیک تأثیر بگذارد. در نتیجه، انجام آزمایش‌های اولتراسونیک می‌تواند ابزار مفیدی برای ارزیابی آثار تاریخی باشد. علاوه بر اینکه از نقشه توزیع انتشار امواج اولتراسونیک می‌توان برای تشخیص ناهنجاری‌ها در بناها استفاده کرد، این نقشه‌ها همچنین می‌توانند برای شناسایی شباهت‌های ساختاری در دیوارهای یک ساختمان بنایی مورد استفاده قرار بگیرند؛ تشخیص اینکه آیا همه دیوارها در یک‌زمان و با تکنیک مشابه ساخته شده‌اند یا خیر. به‌عبارت‌دیگر این آزمون می‌تواند تا حدودی ما را در تهیه دوره‌بندی تغییرات کالبدی کمک کند (شکل ۱۴).



شکل ۱۴: تصاویر برش‌نگاری حاصل از آزمایش‌های اولتراسونیک در کلیسا
Fig. 14: Ultrasonic velocity mapping of the masonry panels of the Nossa Senhora da Expectação Church

۶-۲. مطالعه روند تخریب سنگ مرمر و توسعه یک سیستم طبقه‌بندی با استفاده از تکنیک اولتراسونیک

۶-۲-۱. معرفی سوژه

نمونه‌های مختلفی از سنگ مرمرهای تاریخی یونان و ترکیه مورد استفاده در سازه‌های رومی در دو سایت باستان‌شناسی در اردن انتخاب شدند و سپس این نمونه‌ها تحت تأثیر چهارچرخه حرارتی در درجه حرارت‌های مختلف قرار گرفتند [13]. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات حرارت به‌خصوص در دماهای کمتر از دویست درجه سانتی‌گراد باعث ایجاد ترک‌های مویی مشخصی در سنگ مرمر می‌شود. ترک‌های رشدیافته در نهایت به

شده است. تأثیر تعداد نقاط بررسی و هموارسازی نویز نیز در نظر گرفته شده است. در ابتدا، نتایج یک برش نگاری به دست آمده از یک مقطع آزمایشی در شرایط ایده آل آزمایشگاهی نشان داده شده است. سپس، برش نگاری صوتی نمونه‌هایی حقیقی در ساختمان‌های بنایی نشان داده شده است و نتایج این دو مورد، با هم مقایسه شده است (شکل ۱۶ و ۱۷).

۳-۶. برش نگاری صوتی برای ارزیابی دیوارهای بنایی

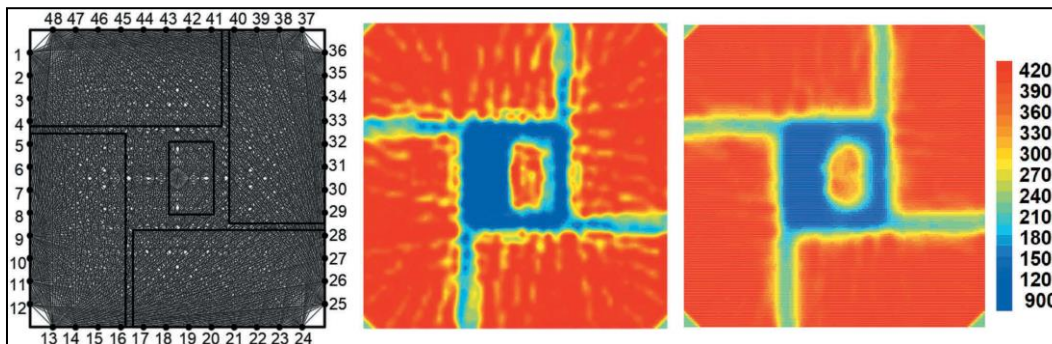
۱-۳-۶. معرفی سوژه و روند آزمایش

در این بخش از مقاله، نتایج چند برش نگاری صوتی روی عناصر ساختمان‌های بنایی ارائه شده است [9]. این آزمایش‌ها با هدف تعیین سازگاری و دقت این روش در تعیین مورفولوژی عناصر مورد بررسی انجام

سرعت پالس	درصد تخلخل	درجه تخریب	رنگ	شرح
> 5.0	< 0.25	1	سبز	سالم
3.5- 5.0	0.25 - 0.5	2	آبی	افزایش تخلخل
2.5 - 3.5	0.5 - 1.0	3	زرد	شروع تجزیه
1.5 -2.5	1.0 - 3.0	4	بنفش	خطر تخریب
< 1.5	> 3.0	5	قرمز	تخریب کامل ساختاری

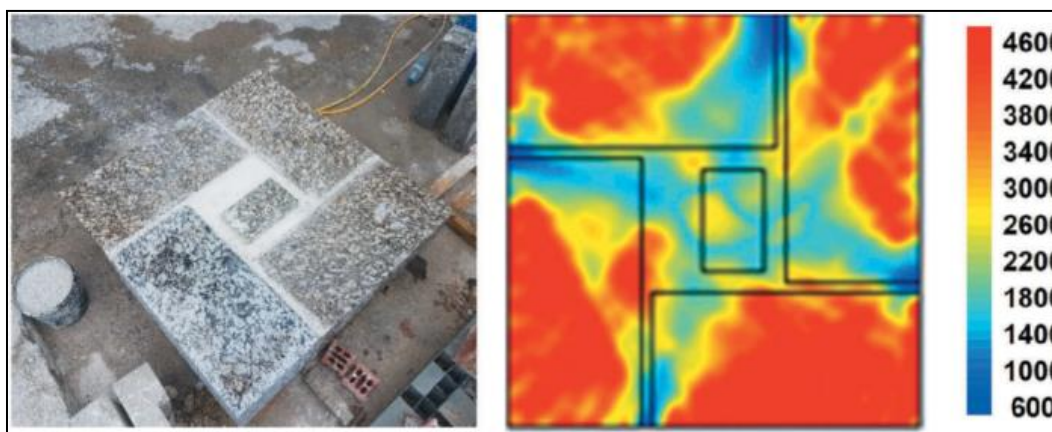
شکل ۱۵: سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی برای ارزیابی وضعیت سنگ مرمر (سرعت امواج بر اساس متر بر ثانیه)

Fig. 15: The proposed classification system for assessing marble condition



شکل ۱۶: نتایج برش نگاری حاصل از نمونه‌های ایده آل آزمایشگاهی. از چپ به راست: (الف) مسیرهای پرتوهای در نظر گرفته شده در طول آزمایش، (ب) تصویر برش نگاری بدون حذف اثرات نویز و (ج) با حذف اثرات نویز

Fig. 16: Ideal Section. From left to right: (a) rays paths considered during the tests, (b) tomographic image without, and (c) with smoothing. Mesh dimensions of about 9.5 cm x 9.5 cm. Velocities are in m/sec



شکل ۱۷: نتایج برش نگاری حاصل از نمونه‌های حقیقی

Fig. 17: Sonic tomography obtained on real samples

سازگاری با بناهای تاریخی، بسیار مورد توجه بوده و این آزمون‌ها یکی از رایج‌ترین روش‌های مورد استفاده در میان انواع آزمون‌های غیرمخرب بوده‌اند. نباید فراموش کرد که در صورت ترکیب صحیح این نوع آزمون با دیگر انواع آزمون‌های غیرمخرب از جمله روش‌های حرارت‌سنجی مادون قرمز، دقت آزمایش بالا می‌رود و احتمال بروز خطا کاهش پیدا می‌کند.

پی‌نوشت‌ها

۱. اگر خصوصیتی به جهت‌گیری آن در فضا بستگی داشته باشد، آن خصوصیت ناهمسانگرد (انیزوتروپ) است.
2. sonic transmission method
3. Sonic tomography
4. sonic reflection method/Impact-Echo test
5. Ultrasonic reflection method
6. force hammer
۷. همه محیط‌های مادی کم‌بیش در مقابل عبور صوت از خود مقاومت نشان می‌دهند. میزان مقاومت صوتی اغلب وابسته به چگالی محیط است. هرچه چگالی محیط بیشتر باشد مقاومت هم بیشتر است. مقاومت آکوستیکی در ارتباط با نسبت نفوذپذیری موج هوایی در محیط پذیرش تفسیر می‌شود (پویش آواسینا، بی‌تا).
۸. مبدل‌هایی که وظیفه تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی (صوت) و برعکس آن را برعهده دارند.
۹. ضربه (نماد I یا I₁)، در مکانیک کلاسیک به صورت انتگرال نیرو نسبت به زمان تعریف می‌شود که بیان‌کننده میزان تغییر تکانه جسم در اثر نیروی وارده است. نیروی وارده به یک جسم، به آن تغییر سرعت (شتاب) می‌دهد.
۱۰. Oscillometer نوسان‌سنج، دستگاهی برای اندازه‌گیری نوسانات و امواج است.

۶-۳-۲. نتایج

نتایج نشان می‌دهد که برش‌نگاری صوتی، یک آزمایش بسیار مفید و غیرتهاجمی برای بازرسی عناصر ساختمان‌های بنایی و تحلیل مورفولوژی داخلی این عناصر است. همچنین، وضوح تصاویر برش‌نگاری با درصد پوشش سطح مورد مطالعه با پرتوهای صوتی ارتباط مستقیم دارد. درنهایت، برای افزایش دقت این نوع آزمایش، طول موج مورد استفاده برای آزمایش باید تقریباً برابر اندازه آسیب‌های داخلی مصالح باشد.

۷. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر، به منظور بررسی عملکرد، ظرفیت و نتایج استفاده از انتشار امواج آکوستیک برای تجزیه و تحلیل وضعیت حفاظتی بناهای تاریخی انجام گرفت. مطالعات نشان می‌دهد که از طریق همبستگی بین سرعت امواج آکوستیک و خصوصیات مکانیکی نمونه‌های مورد مطالعه می‌توان پارامترهای مکانیکی ساختار را در محل ارزیابی کرد. از این ویژگی می‌توان به طور گسترده در خصوص ارزیابی وضعیت کالبدی و آسیب‌شناسی و آسیب‌نگاری بناهای تاریخی بهره گرفت، اما نباید فراموش کرد که انتخاب مناسب‌ترین روش اجرای آزمون آکوستیک با توجه به محدودیت‌های سایت، مهم‌ترین گام در فرآیند مطالعاتی خواهد بود که خود مستلزم شناخت دقیق ساختار مورد مطالعه و عناصر تشکیل‌دهنده آن است. استفاده از تکنیک‌های آکوستیک در چند دهه اخیر توسط جامعه فنی به دلیل غیرتهاجمی بودن، سهولت کاربرد و خصوصاً

References

- [1] Menéndez B. Non-destructive techniques applied to monumental stone conservation: IntechOpen; 2016.
- [2] Araújo E, Bessa M, Sousa I, Fontenele A, Luz R, Vieira M, et al. A New Approach for Assessment of the Coating Mortar Adherence in Ancient Masonries Through Ultrasonic Data. In: J. M. P. Q. Delgado, editor. Case Studies in Building Constructions. 15: Springer; 2021. p. 55-81.
- [3] Crespo Cuesta M. Non-destructive diagnostics techniques for historical buildings: methodological guidelines and operations protocols: University of Cantabria; 2019-09-08.
- [4] Qanbari Zabiullah. Investigating and explaining the yield of non-destructive tests (NDT) and semi-destructive (MDT) in the wall pathology of monuments. International Architecture, Urban Development, Civil, Art and

- Environment Conference; Future horizons, look in the past: 2015. [in Persian]
- [قنبری ذبیح الله. بررسی و تبیین عملکرد انواع آزمون‌های غیرمخرب (NDT) و نیمه‌مخرب (MDT) در آسیب‌شناسی دیوار بناهای تاریخی. کنفرانس بین‌المللی معماری، شهرسازی، عمران، هنر و محیط‌زیست؛ افق‌های آینده، نگاه به گذشته: ۱۳۹۴]
- [5] Rodríguez-Mariscal JD, Canivell J, Solís M. Evaluating the performance of sonic and ultrasonic tests for the inspection of rammed earth constructions. *Construction and Building Materials*. 2021;299:123854.
- [6] Maierhofer C, Ziebolz A, Kopp C. ONSITEFORMASONRY-A European Research Project: On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry 2003.
- [7] Arosio D, Munda S, Zanzi L, Porto Fd, Mosele F. Nondestructive quality control of reinforced masonry buildings. *Journal of infrastructure systems*. 2012;18(1):34-46.
- [8] Leucci G. Seismic and Sonic Applications on Artifacts and Historical Buildings. *Sensing the Past*. 16: Springer, Cham; 2017. p. 153-73.
- [9] Luchin G, Ramos LF, D'Amato M. Sonic tomography for masonry walls characterization. *International Journal of Architectural Heritage*. 2020;14(4):589-604.
- [10] Fais S, Casula G, Cuccuru F, Ligas P, Bianchi MG. An innovative methodology for the non-destructive diagnosis of architectural elements of ancient historical buildings. *Scientific reports*. 2018;8(1):1-11.
- [11] Camassa D, Castellano A, Fraddosio A, Piccioni MD. Improvements of the ultrasonic tomography for applications to historical masonry constructions. *Structural Analysis of Historical Constructions*: Springer; 2019. p. 447-55.
- [12] Zigler R. Evaluation Of Masonry Grouting Effectiveness Using Thermography And Ultrasonic Methods. *Civil Engineering Journal*. 2019(4).
- [13] Ahmad A. Investigation of Marble Deterioration and Development of a Classification System for Condition Assessment Using Non-Destructive Ultrasonic Technique. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*. 2020;20(3):75-89.
- [14] Işık N, Halifeoğlu FM, Ipek S. Nondestructive testing techniques to evaluate the structural damage of historical city walls. *Construction and Building Materials*. 2020;253:119228.
- [15] Araújo E, Sousa I, Paz R, Costa CH, Mesquita E. Physical and mechanical characterization of traditional Brazilian clay bricks from different centuries. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*. 2020;5(1):1-12.
- [16] Verstryngne E, Lacidogna G, Accornero F, Tomor A. A review on acoustic emission monitoring for damage detection in masonry structures. *Construction and Building Materials*. 2020;268:121089.
- [17] Rodrigues T, Damasceno Filho F, Paz R, Mesquita E, Martini R. A Novel Approach for Detection of Voids in Traditional Load-Bearing Masonries Based on Ultrasonic Data. *Case Studies in Building Constructions*. 15: Springer, Cham; 2021. p. 83-98.
- [18] Alibaba Group. UNI-T UTD1062C 2Channels 60MHz 250MS/s Handheld Portable Digital Multimeter Oscilloscope Oscillograph Oscillometer [Available from: http://s.click.aliexpress.com/deep_link.htm?aff_short_key=AAae2f6&dl_target_url=https://www.aliexpress.com/item/UNI-T-UTD1062C-2Channels-60MHz-250MS-s-Handheld-Portable-Digital-Multimeter-Oscilloscope-Oscillograph-Oscillometer/32807732605.html&af=homeimprovementproducts0008&cv=32807732605&cn=17102017&dp=Tools]
- [19] Screening Eagle Technologies. Pundit Ultrasonic Pulse and Echo Technologies 2021 [Available from: <https://www.proceq.com/products/list/Category/pundit-ultrasonic-pulse-velocity-and-pulse-echo-testing/>]
- [20] Screening Eagle Technologies. PD8000 2021 [Available from: <https://www.screeningeagle.com/en/products/pundit-pd8000>]
- [21] Proceq SA. Pundit PL-200 and Pundit PL-200PE 2014 [Available from: https://www.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Pundit%20PL-2_Sales%20Flyer_English_high.pdf]