



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، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

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

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۰۷

چکیده

به منظور 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، به حداقل رساندن مداخلات در ساختار تاریخی و استفاده از روش‌های غیرمخرب برای مطالعه و شناخت عناصر آن، یکی از الزامات مورد نیاز 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، به صورت 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 در نهایت 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، جداسازی آلوده‌ها 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 مورد علاقه جامعه فنی، به‌ویژه در شصت‌سال گذشته است [2]. این روش‌ها امروزه نه‌تنها 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 خدشه‌دار 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 شاخه 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 تزیینات 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 مصدوم 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 غیرتهداجمی 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 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 خفیه‌ها 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 گونه‌ها 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. Rodriguez-Maniscal et al. | Evaluating the performance of sonic and ultrasonic tests for the inspection of rammed earth constructions [5] | ۱۵ |

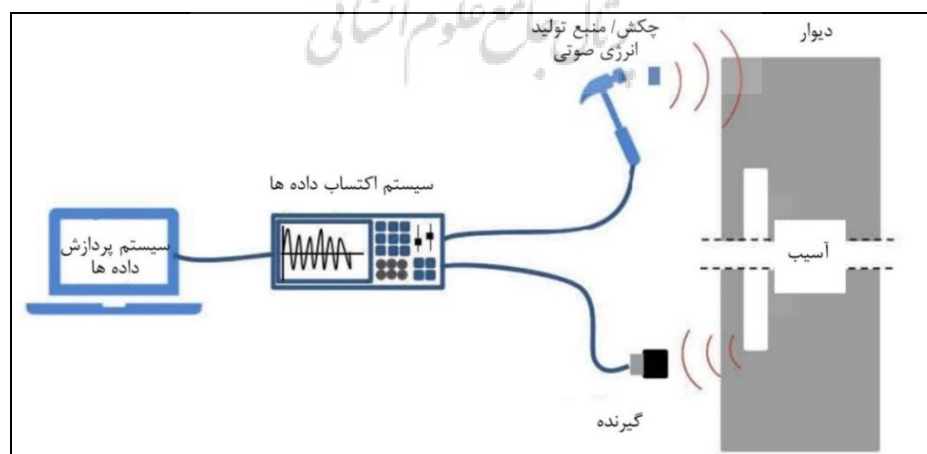
۳. معرفی روش‌های سنجش آکوستیک

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

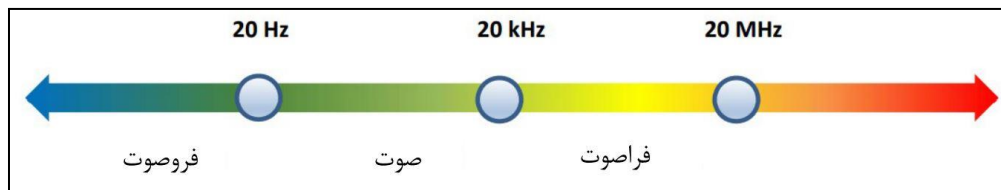
باید توجه داشت که آزمایش‌های مرتبط با سرعت پالس‌های سونیک و اولتراسونیک، در زمینه مربوط به نظریه‌های بنیادین، اهداف آزمایش و کاربرد، بسیار مشابه هم هستند. آنچه سبب تمایز این دو نوع آزمایش می‌شود، مربوط به اختلاف فرکانس امواج انتشاری، طول موج و مشخصات فنی ابزار مورد استفاده برای تولید هر کدام است. فرکانس 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 هریک 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].

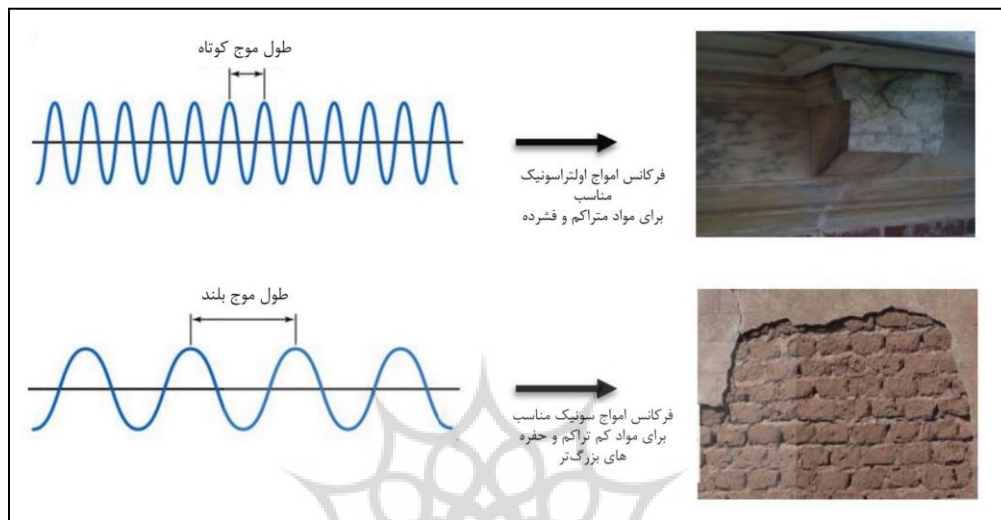


شکل ۱: نحوه عملکرد آزمون‌های صوتی [3]

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 هریک [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، جداسازی 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 نه تنها 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 هریک از این روش‌ها خواهیم پرداخت.

۳-۲-۱. انتقال صوتی

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 به‌علت انجام آزمایش فقط در یک وجه سازه موردنظر، انتقال غیرمستقیم آسان‌ترین روش به‌علت 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 نه‌تنها 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، به‌جای 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 به‌نحوی 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 به‌دست‌آوردن 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 تزیینات انجام شده در عناصر و همچنین ارزیابی غیرمستقیم خصوصیات مکانیکی مصالح کاربرد دارد [9].

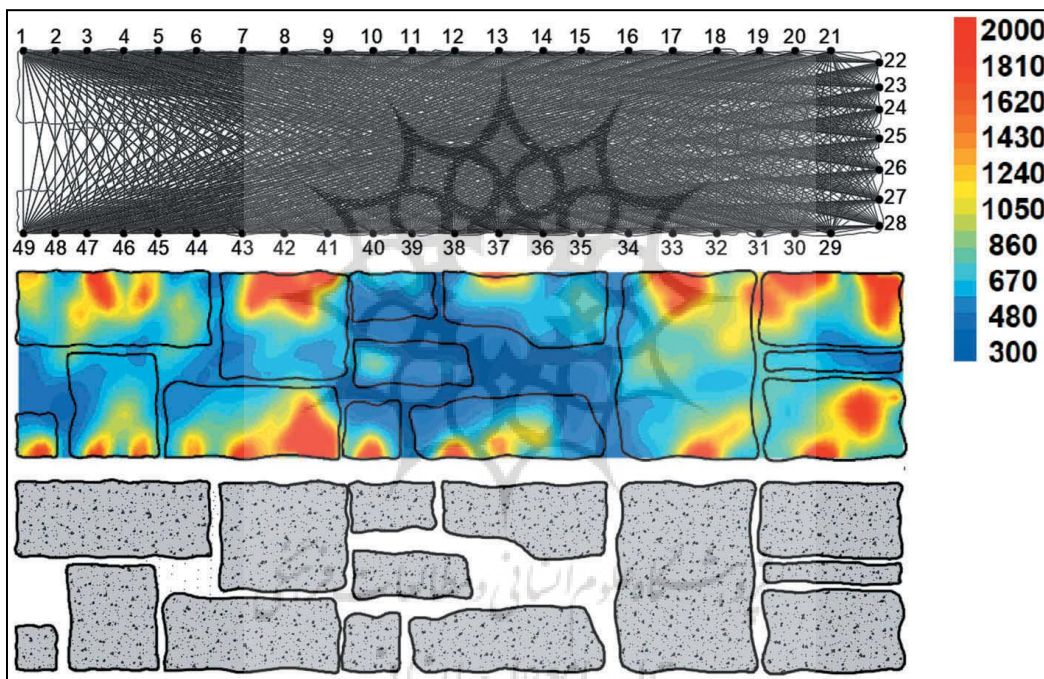
این روش، شامل انتقال امواج صوتی از طریق ضخامت دیواره یا سازه تحت آزمایش در یک مسیر مستقیم است. انتشار امواج در یک‌طرف سازه، توسط ضربه چکش^۶ یا یک منبع تولیدکننده پالس صوتی انجام می‌شود. یک شتاب‌سنج، در وجه دیگر ساختار در نقطه مقابل چکش قرار می‌گیرد که سیگنال‌های منتقل شده در طرف دیگر دیوار را دریافت 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 به‌علت 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 به‌علت 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 موردنظر 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

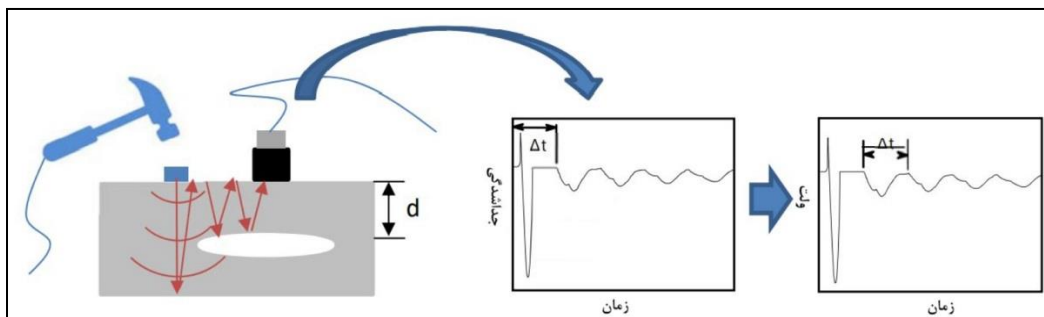
۳-۲-۳. انعکاس صوتی

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].

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



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
- بهره‌موری 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]

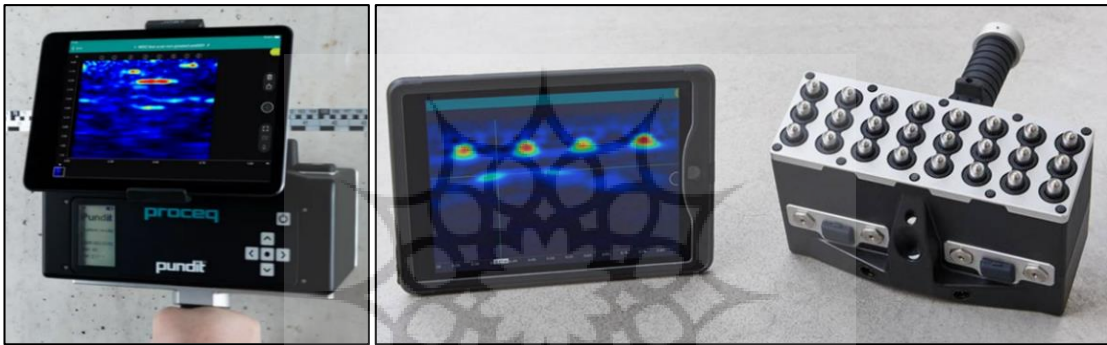
Fig. 6: An example of an oscilloscope

۵. داده‌های روش‌های آکوستیک

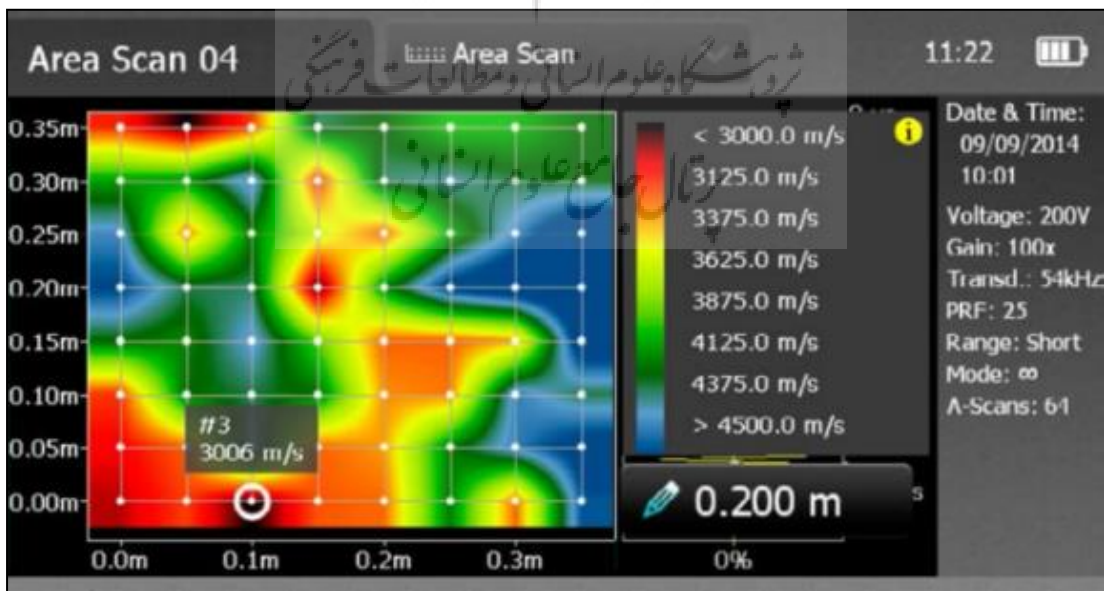
نتایج پردازش داده‌ها ممکن است در قالب نقشه‌های توپوگرافی خاکستری یا رنگی به صورت دو یا سه‌بعدی نمایش داده شود (شکل ۱۰ و ۱۱). نتایج برش‌نگاری را می‌توان به صورت نقشه‌های تداعی سرعت نمایش داد؛ تصاویری رنگی که در آن، هر رنگ نماینده یک سرعت است. این نوع تجسم، به ما امکان ارزیابی مستقیم ترکیبات داخلی ساختار 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].

Pundit PL-200 and Pundit PL-200PE

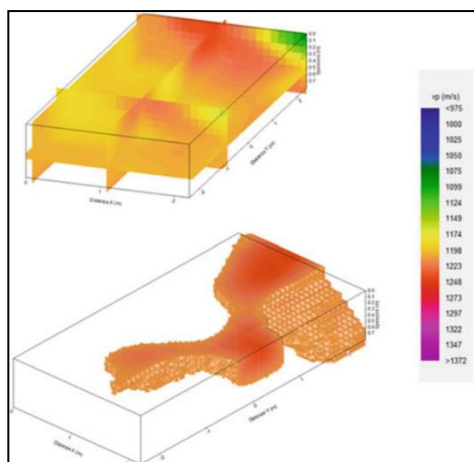
- طراحی شده برای استفاده در محیط‌های سخت و غیرقابل دسترسی [21]
- صفحه‌نمایش با بالاترین وضوح و شفاف‌ترین تصویر موجود در بازار
- حافظه فلش هشت گیگابایتی که امکان ذخیره تا حداکثر صد هزار اسکن را دارد.
- تجسم دوبعدی برای آزمایش یکنواختی در سازه مورد مطالعه
- طبقه‌بندی رنگ قابل تعریف توسط کاربر بر اساس سرعت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



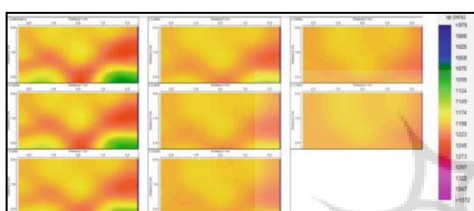
شکل ۷ و ۸: Pundit PD8000 یکی از جدیدترین فناوری‌ها برای آزمایش اولتراسونیک [19]
Figs. 7 and 8: Pundit PD8000, one of the newest technologies for ultrasonic testing



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



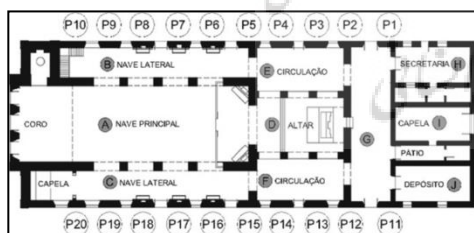
شکل ۱۰: نقشه‌های توزیع سرعت به صورت برش‌های دوبعدی [8]
Fig. 10: Velocity distribution shown as 2D depth slices



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

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

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].

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).

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

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

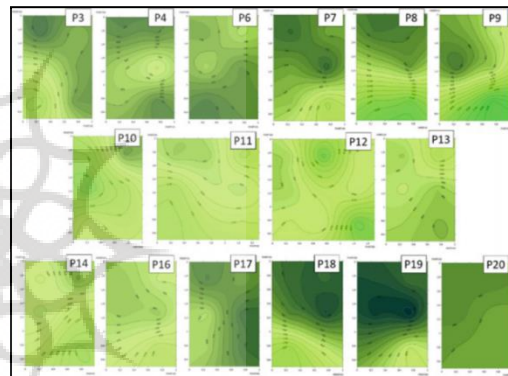
با در نظر گرفتن ناهمسانگردی سنگ، سرعت پالس اولتراسونیک در سه جهت عمود بر هم اندازه‌گیری شد. حداقل سه نمونه برای هر نوع سنگ و به‌طور میانگین، ۳-۵ اندازه‌گیری در هر جهت محاسبه شد. دقت اندازه‌گیری سرعت در این روش انتقال، ± 50 متر بر ثانیه فرض شد. اندازه‌گیری سرعت اولتراسونیک روی هر دو نمونه خشک و اشباع‌شده 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: تصویر بردش‌نگاری 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

۳-۶. برش‌نگاری صوتی برای ارزیابی دیوارهای بنایی

۱-۳-۶. معرفی سوژه و روند آزمایش

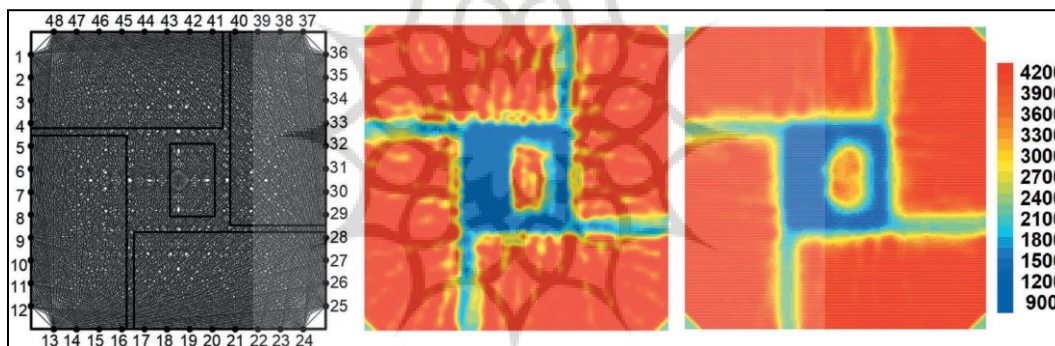
در این بخش از مقاله، نتایج چند برش‌نگاری صوتی روی عناصر ساختمان‌های بنایی ارائه شده است [9]. این آزمایش‌ها باهدف تعیین سازگاری و دقت این روش در تعیین مورفولوژی عناصر مورد بررسی انجام

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

| 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 |

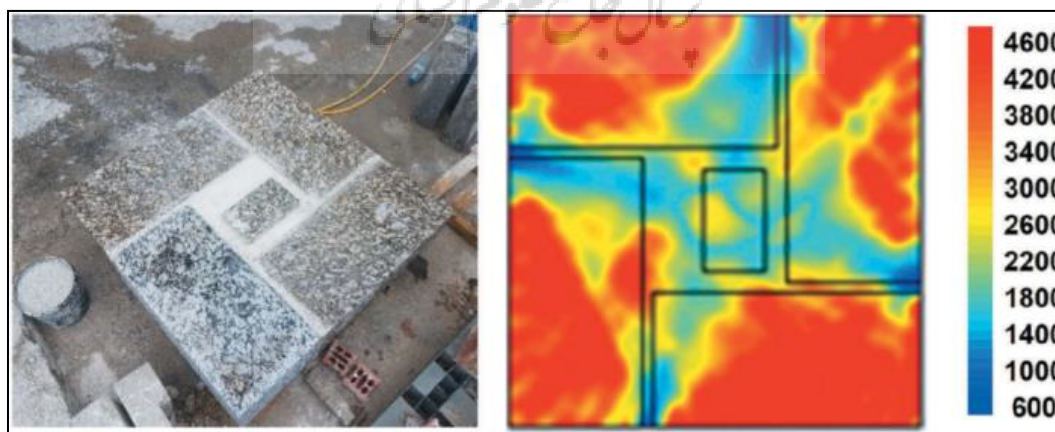
شکل ۱۵: سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی برای ارزیابی وضعیت سنگ مرمر (سرعت امواج بر اساس متر بر ثانیه)

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



شکل ۱۶: نتایج برش‌نگاری حاصل از نمونه‌های ایده‌آل آزمایشگاهی. از چپ به راست: (الف) مسیرهای پرتوهای در نظر گرفته‌شده در طول آزمایش، (ب) تصویر برش‌نگاری 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 برش‌نگاری حاصل از نمونه‌های حقیقی

Fig. 17: Sonic tomography obtained on real samples

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. در نهایت، برای افزایش دقت این نوع آزمایش، طول موج مورد استفاده برای آزمایش باید تقریباً برابر اندازه آسیب‌های داخلی مصالح باشد.

۷. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر، به‌منظور 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 به‌طور 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

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

- اگر خصوصیتی به جهت‌گیری آن در فضا بستگی داشته باشد، آن خصوصیت ناهمسانگرد (انیزوتروپ) است.
- sonic transmission method
- Sonic tomography
- sonic reflection method/Impact-Echo test
- Ultrasonic reflection method
- force hammer
- همه محیط‌های مادی کم‌وبیش 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).
- مبدل‌هایی که وظیفه تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی (صوت) و برعکس آن را برعهده دارند.
- ضربه (نماد I یا I₁)، در مکانیک کلاسیک به‌صورت 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.
- Oscillometer نوسان‌سنج، دستگاهی برای اندازه‌گیری نوسانات و امواج است.

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]