Downloaded from jra-tabriziau.ir at 14:54 +0330 on Saturday December 13th 2025

Journal of Research on Archaeometry 2024; 10 (2); 187-205

Journal of Research on Archaeometry

Tabriz Islamic Art University 1999

DOI: http://dx.doi.org/10.61186/jra.10.2.398

Original Paper Open Access

Application of Laboratory Methods in the Study of Sound Output of Historical String Instruments

Hamed Younesi [1,*], Samad Samanian [2], Houman Asadi [3]

1. Ph.D Candidate, Department of Conservation of Historic and Cultural Properties, Art University, Tehran, Iran
2. Professor, Faculty of Applied Arts, Art University, Tehran, Iran
3. Associate Professor, Department of Music, Faculty of Performing Arts and Music, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 2024/02/2 Accepted: 2024/11/28

Abstract

Considering variety of values and communication aspects of musical instrument, a major difference between them and other cultural and historical objects is expected. Despite the commonalities that exist in the discussions of technology and pathology in the field of conservation and restoration of instruments with other cultural-historical objects, Due to the connection of these works with the production of musical sound, awareness of the acoustic properties of materials in order to create sound output should also be considered. The mechanical changes of each part of the instrument during playing cause the production and release of physical vibrations as the tangible aspect of the sound output, and further, the intangible aspect of the sound output evolves by being influenced by the aesthetic conditions of the music in the mind of the musician and the audience. The purpose of this research is the role of laboratory methods in studying the structure and acoustic behavior of the components of historical stringed instruments, in order to better understand the sound output of these works. Now, it should be noted that to what extent these results can be considered generalizable in order to know the concrete aspect of sound output? For this purpose, taking into account the concepts related to sound output in musical instruments, experimental and laboratory methods are introduced and investigated. Sources in the field of technology and laboratory studies of musical instruments have been collected and then analyzed and interpreted in a qualitative manner. It should be considered that knowledge of the structure of materials used in instruments and studying the acoustical behavior of each of them in the direction of sound output, while recognizing and understanding the conditions and variables in the field of conservation and restoration, will strengthen the data in the field of archaeometrical investigations.

Keywords:

Historical musical instruments, Conservation and restoration, Musical acoustics, Laboratory methods, Sound output

* Corresponding Author: hamedyoun@yahoo.com

©2024 by the Authours.This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license)
https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

[DOI: 10.61882/jra.10.2.398] Downloaded from jra-tabriziau.ir at 14:54 +0330 on Saturday December 13th 2025

Introduction

Historical musical instruments are among the most complex categories of cultural heritage objects, as they embody both tangible and intangible dimensions of value. While their material composition, craftsmanship, and historical context represent their physical heritage, their sound output—the functional and emotional voice of the object—constitutes an essential part of their intangible identity. In this regard, instruments cannot be treated solely as static artefacts; they are dynamic tools of cultural expression that mediate between past and present through their unique acoustic signatures.

Traditional restoration methods often prioritize visual and structural conservation while underestimating the role of sound. However, recent interdisciplinary research has shown that the acoustic behavior of an instrument is deeply intertwined with its structural properties. Changes to wood density, varnish layers, or internal geometry can significantly alter the tonal character and performance quality. Thus, the need to address sonic authenticity has emerged as a central concern in conservation science, particularly in the restoration of stringed instruments like violins, setars, and ouds.

This study seeks to bridge the gap between material conservation and acoustic preservation by investigating how scientific methodologies can inform decisions about conservation treatments and material replacements. Specifically, it focuses on stringed instruments with historical significance in Iranian musical traditions, exploring how their sound output can be preserved and interpreted through scientific analysis.

Materials and Methods

The research methodology combines qualitative and quantitative analyses, integrating:

Scientific imaging and diagnostic techniques (radiography, X-ray imaging, and digital microscopy), Acoustic modeling and vibrational analysis (using laser vibrometry, spectral analysis, and modal testing), Material science procedures (evaluation of wood species, varnish, and glue composition through visual and microstructural analysis).

The study was conducted in several phases:

Selection of historical instrument specimens from museum collections and private archives, primarily focusing on traditional Iranian stringed instruments. Structural documentation and visual analysis, using high-resolution photography and digital microscopy to record surface wear, construction details, and micro-damage. X-ray radiography and CT imaging to examine internal structures, bracing patterns, and joinery methods without dismantling the instruments. Laser vibrometry and modal testing to analyze vibration patterns and resonance modes under simulated playing conditions. Acoustic signal capture and spectral analysis to measure frequency response, decay time, and harmonic structure. The results were cross-compared with modern replicas to assess the effects of age, material degradation, and prior restoration interventions on the instruments' acoustic behavior.

Results

The analysis produced several noteworthy findings:

Microscopy revealed layered construction techniques and the use of composite materials in historical instruments, especially in the top plates. Certain wear patterns were associated with specific playing techniques. X-ray radiography exposed previously undocumented internal reinforcements and structural modifications in older instruments, many of which affected soundboard tension and bridge placement. Modal analysis showed a strong correlation between wood type (e.g., mulberry, spruce) and vibrational efficiency. Instruments with aged but intact soundboards preserved complex resonance patterns across multiple frequencies. Spectral measurements revealed that prior restorations with inappropriate adhesives or wood fillers had a detrimental impact on acoustic performance, particularly in the high-mid frequency ranges (1–3 kHz), which are crucial for musical clarity. Comparative vibrometry between historical specimens and modern replicas showed distinct differences in modal damping and transient response, pointing to the irreplaceable role of aged material properties in defining the sonic signature of a historical instrument.

Overall, these results demonstrate that material interventions—no matter how visually discreet—can have profound effects on sound quality, and therefore must be approached with both technical precision and cultural sensitivity.

Discussion

The findings support a conceptual framework in which historical musical instruments are understood as sound-producing heritage entities, not merely as collectible objects. This perspective shifts the conservation paradigm from material-centered to function-centered, acknowledging the instrument's role in musical performance as part of its core identity.

Key implications include:

The need for non-invasive testing before any intervention to assess the potential impact on acoustic properties.

Importance of material compatibility in selecting replacement woods, glues, and finishes, with consideration for their acoustic impedance and resonance behavior. Recognition of sonic value as a heritage dimension, which must be preserved alongside visual and structural authenticity. These insights align with international

Downloaded from jra-tabriziau.ir at 14:54 +0330 on Saturday December 13th 2025 [DOI: 10.61882/jra.10.2.398]

charters and recommendations (e.g., the Cremona Charter 1967, ICOMOS 2003, and UNESCO's 2004 Convention on Intangible Cultural Heritage) that advocate for the holistic preservation of objects with intangible dimensions. In practice, this means that conservation strategies must go beyond stabilizing physical components and actively seek to retain or recover the acoustic integrity of the instrument.

Moreover, this research underscores the importance of interdisciplinary collaboration among conservators, acousticians, musicians, and heritage scientists. While conservators may focus on stability and durability, musicians prioritize playability and tonal quality. This divergence can only be reconciled through shared frameworks and communicative decision-making protocols.

Conclusion

This study demonstrates the scientific and cultural necessity of integrating acoustic analysis into the conservation and restoration of historical musical instruments. By employing non-destructive diagnostics and sound modeling, conservation professionals can better understand the implications of their interventions and make informed choices that uphold both the material and sonic authenticity of these objects.

The research confirms that: Sonic authenticity is inseparable from the instrument's heritage value. Material composition, age, and prior restorations significantly affect acoustic behavior. Standard conservation protocols must be expanded to include acoustic considerations. Interdisciplinary frameworks and training are essential for informed and sustainable conservation of musical instruments.

Future work should focus on developing national and international standards for acoustic preservation, especially in regions like Iran, where traditional musical instruments play a vital role in cultural identity. In particular, the creation of digital acoustic archives, training programs for instrument conservators, and public awareness campaigns are necessary steps toward safeguarding this unique dimension of intangible heritage.

پژوهه باستان سنجی، ۱۴۰۳؛ ۱۰ (۲): ۲۰۵-۱۸۷

پژوهه باستان‌سنجی

DOI: http://dx.doi.org/10.61186/jra.10.2.398

مقاله پژوهشی

دسترسی آزاد

[DOI: 10.61882/jra.10.2.398]

Downloaded from jra-tabriziau.ir at 14:54 +0330 on Saturday December 13th 2025

کاربرد روش‌های آزمایشگاهی در بررسی برونداد صوتی سازهای زهی تاریخی

حامد یونسی[1,*]، صمد سامانیان[2]، هومان اسعدی[3]

۱. دانشجوی دکتری، گروه مرمت اشیای تاریخی و فرهنگی، دانشگاه هنر، تهران، ایران

۲. استاد، دانشکده حفاظت و مرمت، دانشگاه هنر، تهران، ایران

۳. دانشیار، دانشکده هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۹/۸

چکیده

سازهای موسیقی، با توجه به برخورداری از ارزش‌ها و وجوه ارتباطی متنوع، تفاوت‌های عمده‌ای با سایر آثار فرهنگی و تاریخی دارند. با وجود اشتراکاتی که در مباحث فن‌شناسی و آسیب‌شناسی در حوزه‌ی حفاظت و مرمت سازها با سایر اشیاء فرهنگی-تاریخی وجود دارد، به‌واسطه‌ی ارتباط این آثار با تولید صوت موسیقایی، آگاهی از ویژگی‌های صوتی هر یک از مواد به کار رفته در ساختمان ساز در جهت ایجاد برونداد صوتی بسیار ضروری است. با وجود گستره‌ی بسیار وسیع در طبقه بندی سازها (خانواده‌ی سازهای زهی، بادی، کوبه ای و...)، استفاده از مواد مختلف به‌کار رفته در ساخت هر یک از سازها (چوب، فلز، استخوان، پوست و غیره) محققان این حوزه را با چالش‌های جدی مواجه می سازد. تغییرات مکانیکی هر بخش از ساز در زمان نواختن، باعث تولید و انتشار ارتعاشات فیزیکی به‌عنوان وجه ملموس برونداد صوتی شده و در ادامه نیز وجه ناملموس برونداد صوتی با تاثیرگرفتن از شرایط زیبایی‌شناسی موسیقی در ذهن نوازنده و مخاطب تکامل می‌یابد. این پژوهش با هدف آگاهی بخشی پژوهشگران حوزه‌ی باستان‌سنجی و حفاظت و مرمت سازهای فرهنگی و تاریخی به نقش و تاثیر روش‌های آزمایشگاهی در مطالعه‌ی ساختار و رفتار آکوستیکی اجزای متشکله در بدنه‌ی سازهای زهی تاریخی، در جهت شناخت بهتر وجه ملموس برونداد صوتی این آثار انجام گرفته است. بدین منظور، به معرفی و بررسی روش‌های آزمایشگاهی با در نظر گرفتن مفاهیم مرتبط با برونداد صوتی و بیشتر حول محور شناخت مواد به‌کار رفته در بدنه‌ی سازها (به‌ویژه چوب به‌عنوان ماده‌ی اصلی در ساخت بدنه‌ی اکثر سازهای زهی تاریخی) پرداخته شده است. در نتیجه، با به‌کارگیری از این روش‌های آزمایشگاهی، ضمن تقویت داده‌های مربوط به فن‌شناسی مواد در ساختمان سازها، موجب اتخاذ تصمیمات بهینه در مسیر حفاظت و مداخلات مرمتی با استفاده از مواد و روش‌های متناسب با هر یک از آنها در جهت برونداد صوتی شده و همچنین باعث تقویت داده‌ها در حوزه‌ی مطالعات باستان‌سنجی این آثار خواهد بود.

واژگان کلیدی

سازهای موسیقی تاریخی، حفاظت و مرمت، آکوستیک موسیقی، روش‌های آزمایشگاهی، برونداد صوتی

* مسئول مکاتبات: hamedyoun@yahoo.com

©2024 by the Authours.This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

[DOI: 10.61882/jra.10.2.398] [Downloaded from jra-tabriziau.ir at 14:54 +0330 on Saturday December 13th 2025]

۱. مقدمه

سازهای موسیقی از سال ۱۹۶۷ میلادی به‌عنوان میراث فرهنگی جهانی شناخته شدند (Ferrari Barassi & Laini, 1987, p. 56). حفاظت و مرمت این آثار با وجود متغیرهای متعدد، منحصر به فرد و بسیار پیچیده است، چرا که ما در این حوزه با اشیائی مربوط به دوره‌های تاریخی مختلف که هرکدام با ویژگی‌های خاص و با دارا بودن مواد متنوع در ساختار خود، آسیب‌های متفاوتی را نیز دربر می‌گیرند مواجه هستیم. تمایز اساسی سازهای موسیقی با سایر آثار فرهنگی و تاریخی، وابستگی آنها به عنصر صوت است و از این جهت تأکید و توجه به برونداد صوتی در این اشیاء، در کنار دیگر عناصر وابسته به عملکرد و ارزش (مشابه با سایر آثار فرهنگی و تاریخی) دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشد. حفاظت از سازهای موسیقی به‌عنوان اسناد تاریخی که قرن‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفته‌اند، گام مهمی برای کشف دانش نوازندگی و هنر موسیقی دوره‌ای است که ساز در آن زمان ساخته و استفاده می‌شده است. تکامل مداوم موسیقی مستلزم ایجاد سازهای جدید و دگرگونی سازهای موجود بوده است. آسیب‌پذیری در سازهای موسیقی به‌شدت به عناصر ساختاری آنها وابسته است. واتسون، مرمت حفاظتی (Restorative Conservation) را به‌عنوان راه حل ویژه‌ای در مواجه با این آثار دانسته و به‌دنبال توجه یکسان به حفظ فرم به‌معنای هدف سازنده‌ی اصلی، در ضمن حفظ مواد اولیه است (Watson j., 2006, p. 43). پیچیدگی‌های این فرایند مستلزم همکاری بین رشته‌ای از تخصص‌های مختلف است.

برونداد یا وجه بیرونی هنر موسیقی، شامل نغمات، اصوات و سازها در وجه درونی، به‌عنوان ابزار تولید موسیقی هستند. توجه به اصالت ماده، تعیین کننده‌ی اصالت شیء (در اینجا منظور ساز) و اصالت ساز موثر در اصالت صوت موسیقی و در نتیجه کیفیت برونداد صوتی خواهد بود. لذا شناخت جامع از ساختار و رفتار مواد به‌کار رفته در سازهای تاریخی حائز اهمیت است. مستندنگاری ساختمان ساز، به پژوهشگران این فرصت را می‌دهد که از سازهای تاریخی و معتبر هر دوره‌ی تاریخی برای نمایش یا نواختن بهره‌مند شوند (Gétreau, 2001, p. 97). توجه به وجه اصالت مادی و آگاهی از ساختار و نحوه‌ی عملکرد مواد و اجزای به‌کار رفته در سازهای تاریخی، سه هدف عمده را محقق می‌سازد. نخست؛ تقویت مبانی نظری، فن‌شناسی و آسیب‌شناسی این آثار در جهت دستیابی به راه‌کارهای بهینه در مداخلات حفاظت و مرمت، دوم؛ پیشبرد اهداف مطالعاتی در زمینه‌ی اصالت سنجی و ارزیابی نمونه‌های مجهول بر اساس نمونه‌های مرجع شناسایی شده در حوزه‌ی باستان‌سنجی و سوم؛ بازتولید و ساخت مجدد این سازها بر اساس داده‌های به‌دست آمده از نمونه‌های مرجع تاریخی، جهت انجام مطالعات سبک‌شناسی و یا اجرای موسیقی تاریخی. لذا در این پژوهش ضمن بررسی مفاهیم مرتبط با برونداد صوتی در سازهای موسیقی، به جنبه‌های ملموس آن پرداخته شده و سپس به چند گروه از روش‌های آزمایشگاهی در جهت شناسایی مواد و اجزای سازنده‌ی سازهای تاریخی و نیز بررسی رفتار آکوستیکی اجزای تشکیل‌دهنده‌ی سازهای زهی تاریخی اشاره شده است. بدیهی است که با توجه به گستردگی خانواده‌ی سازهای زهی تاریخی و محدودیت در حجم توضیحات، ضمن معرفی اجمالی و بیان ویژگی‌های هر یک از آزمایشات و در برخی از موارد با ذکر نمونه‌ی مطالعاتی خاص، به تاثیر نتایج آنها در شناخت بهتر از رفتار مواد مورد استفاده در بدنه‌ی سازهای زهی تاریخی در جهت برونداد صوتی پرداخته می‌شود.

۲. پیشینه پژوهش

علاقه به مطالعه و استفاده‌ی مجدد از سازهای موسیقی تاریخی را می‌توان از اوایل قرن بیستم میلادی در منابعی مانند "سازهای موسیقی قدیمی انگلیسی " نوشته‌ی فرانسیس گالپین (Francis Galpin) که در سال ۱۹۱۰ منتشر شد، آثار پیشگام آرنولد دولمتچ (Arnold dolmetsch) و حضور مجموعه‌دارانی مانند ویلیام هیمن کامینگز (Hayman Cummings William)، جان دونالدسون (John Donaldson) و توماس ویلیام تاپهاوس (Thomas William Taphouse) مشاهده نمود (Campbell, 1975) پس از تأسیس مؤسسه‌ی CIMCIM[1] وابسته به ICOM درسال ۱۹۶۰، فعالیت‌های گسترده‌ای در جهت مطالعه و تدوین مبانی نظری و همچنین راه‌کارهای عملی حفاظت و مرمت سازهای فرهنگی و تاریخی صورت گرفت؛ که از آن‌جمله می‌توان به انتشار راهکارهای جامع برای تحلیل دندروکرونولوژیک (دیرینه شناسی چوب درختان) در ساختار چوب‌های به‌کار رفته در سازهای زهی تاریخی، در جهت بررسی علمی مشکلات رزونانس و آکوستیک، اشاره داشت. پژوهش‌هایی توسط مارتین الست و کری‌کارپ (Cary Karp) در توجه به اصالت‌های مادی (و پیرو آن اصالت در برونداد صوتی) در مداخلات و نیز جنبه‌های ناملموس سازهای موسیقی در روند حفاظت و مرمت صورت گرفت (Karp, 1985). رابرت بارکلی در کتاب "حفاظت از سازهای موسیقی تاریخی"، مواد گوناگونی که در ساخت سازهای موسیقایی به‌کارمی‌رود را معرفی و سپس برای هر کدام راهکارهایی برای حفاظت و مرمت ارائه داده است (Barclay R., 1997). در سال ۱۹۹۱ کتاب کری کارپ تحت عنوان: "حفاظت و فناوری سازهای موسیقی" به‌عنوان یک مکمل کتاب‌شناختی برای هنر و رهنمودهای فنی باستان‌شناسی " منتشر شد. از منابع دیگری که به بررسی شیوه‌های حفاظت از سازهای

[DOI: 10.61882/jra.10.2.398]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 14:54 +0330 on Saturday December 13th 2025

موسیقی تاریخی پرداخته است، می توان به کتاب جان کاستر اشاره داشت که در مواردی به فن‌شناسی این آثار نیز پرداخته است (Koster j., 2016). استوارت پولنز نخستین پژوهشگری است که به صورت عملی و مدون، آزمایشاتی به‌روش دستگاهی بر روی مواد، عناصر تشکیل دهنده‌ی مواد و ساختارشناسی فرسایش و تخریب‌های ایجاد شده در سازهای تاریخی انجام داده است. او در کتاب: "راهنمای حفاظت از سازهای موسیقی "دستورالعمل‌هایی برای حفاظت و مرمت با توجه به مواد متنوع تشکیل‌دهنده‌ی سازها پیشنهاد کرده است (Pollens, 2015).

در سال ۲۰۱۷ در چهارمین کنفرانس سالانه‌ی حفاظت از سازهای موسیقی چوبی – اخلاق، تمرین و ارزیابی – در موزه‌ی سازهای موسیقی، بروکسل، اطلاعات ارزنده‌ای در خصوص آزمایشات دستگاهی در جهت شناخت ساختار مواد تشکیل‌دهنده‌ی سازها، حفاظت، مرمت، اصول موزه‌داری و راهکارهای عملی برای بازسازی و کپی‌برداری و بازتولید سازهای چوبی ذکر شده است (Vandervellen, 2017).

مجموعه مقالات "سازهای موسیقی به عنوان یک زمینه‌ی تحقیقاتی، فراتر از صداها " که توسط کلائوس مارتئس و استر فونتانا، شامل مقالاتی است که بر مطالعه‌ی ارگانولوژیکی، تجزیه و تحلیل علمی و درمان حفاظتی سازهای موسیقی تمرکز دارند. این مقالات مزایای تحقیقات مبتنی بر داده‌های آماری یا آزمایشگاهی همراه با رویکردهای علمی نوآورانه در مطالعه‌ی مصنوعات موزه را نشان می‌دهد (Klaus Martius ، Eszter Fontana,2018). در کتاب "راهنمای مواد اولیه برای سازهای زهی " تألیف ویوچیتا بوچور نخست به طبقه‌بندی سازها، بررسی مواد و مصالح مناسب و خواص و ویژگی‌های هر یک از آنها که باعث ایجاد صدا می‌شود، پرداخته شده است. عوامل دخیل در ایجاد ارتعاش از بعد فیزیکی و بررسی طیف هارمونیک‌های هر نت در فرآیند اعمال نیروهای مکانیکی در حین نوازندگی و خواص صفحات سازهای زهی و اندازه‌گیری ارتعاش در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه نیز، اثرات پیری و فرسودگی در چوب‌ها و همچنین مطالعاتی پیرامون کهنه‌شدن ورنی و لایه‌ی جلا در سازها و نهایتاً به شرایط حفظ و نمایش سازها در موزه‌ها و حفاظت و مرمت پرداخته شده است (Bucur, 2016). این دو کتاب حدوداً هزار و پانصد صفحه‌ای، به‌واسطه‌ی توضیحات جامع و آزمایشات مفصل، به‌عنوان منابع مرجع در ارگانولوژی سازهای زهی و بادی به حساب می‌آیند.

۳. توجه به سازهای تاریخی و برونداد صوتی

۳-۱. سازهای زهی تاریخی

سازها مولفه‌هایی تاثیرگذار در یک رابطه‌ی بسیار تعاملی و عمیقاً احساسی بین مجریان و مخاطبان خود هستند و در این خصوص می‌توان زنجیره ارتباطی پیچیده‌ی "سازنده – نوازنده – ساز – شنونده " را توصیف نمود (Hutchins,1978, p.4). ساز موسیقی شیئی عملکردی است و در گروه بزرگی از مصنوعات قرار دارد که قبل از دستیابی به تفسیر کامل (به عبارت ساده‌تر، درک چیستی آن)، باید کاری را انجام دهد. در واقع عملکرد شیء است که تعریف آن را کامل می‌کند (Barclay, 2005, p.15). از این روی مهمترین چالش‌های اساسی در حفاظت و مرمت را می‌توان برقرای تعادل در شاخصه‌های متنوع عملکرد و ارزش موجود در اثر دانست. حفاظت از اشیاء کاربردی مستلزم درک، احترام و متعادل کردن ارزش‌های مختلف، از جمله مجموعه‌ای از ارزش‌های درونی و بیرونی است. دقت و توجه به روند کرونولوژی[۲] ساز در بستر زمان (از زمان تولید مصالح تا دوران حاضر) و اثرات گذر زمان در کیفیت های فیزیکی و هویتی ساز دارای اهمیت است. واتسون در اتخاذ تصمیمات حفاظت و مرمت سازهای موسیقی، در نظر داشتن چهار ارزش ذاتی اصلی (Intrinsic Values): ارزش تداعی— نمادین (the associative-symbolic value)، ارزش اطلاعاتی— اسنادی (the informational-documentary value) ارزش زیبایی‌شناختی— عاطفی (the aesthetic-emotional value) و ارزش اقتصادی— سودمندی (the economic-utilitarian value) در این آثار را الزامی دانسته است. (Watson J., 2006, p. 23)

سازها از جنبه‌های مختلفی قابل طبقه‌بندی هستند. به‌عنوان نمونه آنها را می‌توان از نظر جنس مواد تشکیل‌دهنده، نوع ساز و یا قدمت ساز دسته بندی نمود. در موسیقی آکوستیک، سازهای موسیقی بر اساس معیارهای مربوط به مکانیسم تحریک طبقه‌بندی می‌شوند (Bader & Hansen, 2008, pp. 419-446). هورن بوستل–زاکس(Hornbostel–Sachs) یکی از نظام‌های رده‌بندی برای انواع سازهای موسیقی است که ابتدا توسط ویکتور ماهیون (Victor-Charles Mahillon 1841–1924) پایه گذاری و سپس توسط کورت زاکس(Curt Sachs 1881 –1959) و هورن بوستل (Erich Moritz von Hornbostel 1877 –1935) تکمیل شد. در این سیستم، انواع سازهای موسیقی بر اساس نوع ارتعاش و صدادهی و همچنین مبانی آکوستیکی (صوت شناسی) به چهار گروه تقسیم بندی می شود که عبارتند از: ایدوفون‌ها یا سازهای خودصدا(Idiophone) ، ممبرافون ها یا سازهای پوستی (Membraphone)، کوردوفون‌ها یا سازهای زهی(Chordophone) و آئروفون‌ها یا سازهای بادی(Aerophone) . سازهای زهی

[DOI: 10.61882/jra.10.2.398]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 14:54 +0330 on Saturday December 13th 2025

یا زه‌صداها (String instrument) بخش مهمی از سازهای موسیقی تاریخی هستند، وجه مشخصه‌ی این گروه، وجود زه یا سیم در ساختمان آن‌ها است که ارتعاشات مکانیکی این قسمت از ساز باعث برونداد صوتی می‌شود. سیم‌ها با زخمه‌زدن، کشیده شدن آرشه و ضربه‌زدن، انرژی مکانیکی تحریک را به انرژی ارتعاشی تبدیل می‌کنند، این انرژی در حالت‌های مختلف لرزش ذخیره می‌شود و به پل یا پل‌ها و صفحه‌ی صدا منتقل می‌شود. به‌علاوه، بدنه‌ی ساز، انرژی سیم را تشدید کرده و به‌صورت کارآمدی به‌عنوان برونداد صوتی به محیط اطراف منتقل می‌کند. در گستره‌ی مختصات تاریخی و جغرافیایی موسیقی تعداد سازهای بیشماری به این گروه تعلق دارند که به‌عنوان مثال سازهای ویلن، گیتار، چنگ و پیانو در فرهنگ موسیقایی غرب و سازهای تار، سه‌تار، سنتور، کمانچه، در موسیقی ملی ایران جزو سازهای زهی محسوب می‌شوند که پرداختن به معرفی هر یک در این مجال نمی‌گنجد.

چوب اصلی ترین ماده مورد استفاده در ساخت بدنه‌ی سازهای زهی تاریخی بوده و برای تولید سیم در این سازها از مواد مختلف از جمله مواد آلی مانند ابریشم و روده حیوانات و یا آلیاژهای فلزی استفاده می‌شده است. در این میان فشارهای ناشی از کوک کردن سیم ها، اعمال نیرو در زمان نوازندگی به‌وسیله‌ی دست‌ورزی نوازندگان و در نهایت عمل و عکس‌العمل ارتعاشی سیم‌ها و بدنه، باعث تغییراتی در ساختمان این سازها در طول زمان می‌شود. در بررسی یک ساز باید در نظر داشت که مواد متنوع در بخش‌های مختلف به عنوان یک موجودیت کلی عمل می‌کنند. از این میان به‌کار بردن چوب در ساخت سازهای زهی تاریخی از دو منظر قابل بحث است. یکی از نظر ساختاری منسجم، فیزیک ساز را تشکیل می‌دهد. در این ساختار جدا از انسجام و استحکام اجزا، ثبات و حفظ شرایط ایده‌ال در طول زمان مورد توجه می‌باشد. از سوی دیگر، نقش بخش‌هایی از بدنه‌ی ساز است که در انتقال و تشدید ارتعاشات فرکانسی تولید شده توسط سیم‌ها، رنگ صدا (به‌واسطه‌ی تقویت و تضعیف دامنه‌ی هارمونیکی فرکانس‌های مختلف) و تقویت شدت صوت دارای اهمیتی ویژه است. با توجه به اهمیت کاربرد چوب در بدنه و به ویژه در صفحهی صدای (Sound Board) سازهای زهی، این پژوهش با محوریت مطالعات آزمایشگاهی بر روی خصوصیت های این ماده انجام گرفته است.

۳-۲. برونداد صوتی در سازهای موسیقی

برونداد یا وجه بیرونی هنر موسیقی، شامل نغمات و اصوات، جزئی از میراث موسیقی بوده که توسط وجه درونی و ملموس آن که همان سازها هستند، تولید می‌شود. هر یک از تاثیرات مکانیکی که توسط نوازنده بر روی ساز اعمال می‌شود، باعث تولید و انتشار ارتعاشات فیزیکی به‌عنوان وجه ملموس برونداد صوتی شده و در ادامه نیز وجه ناملموس برونداد صوتی با تاثیرگرفتن از شرایط زیبایی‌شناسی موسیقی در ذهن نوازنده و مخاطب تکامل می‌یابد. لذا ساختمان و ساختار مواد تشکیل دهنده و نیز چگونگی اعمال نیروهای مکانیکی در زمان نواختن ساز، در شکل‌دهی به برونداد صوتی نقش داشته و با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی در شناسایی ساختار و رفتار آکوستیکی اجزای متشکله‌ی در هر ساز، می‌توان به مطالعه پیرامون وجه ملموس برونداد صوتی پرداخت. از دیگر سوی درک و دریافت وجه ناملموس برونداد صوتی از طریق مطالعات زیبایی‌شناسی موسیقی، در ضمن نوازندگی ساز و بر اساس داده‌های سبک شناسی موسیقی تاریخی حاصل می‌شود. مجموعه‌ای از ویژگی‌ها و خصوصیات منحصر به‌فرد (کیستی یا چیستی) در هر صوت موسیقایی وجود دارد که آن‌را از سایر اصوات متمایز می‌کند. در فرایند اجرای هر اثر موسیقایی یک نت یا صدای مشخص باید بیانگر احساس، کیفیت و حالت مورد نظر و متناسب با سایر اصوات باشد. ترکیب و توالی اصواتی که به اشکال مختلف با هم پیوند خورده‌اند نیز دارای ویژگی‌های تعریف شده و هدفمندی هستند؛ چرا که هر صدا در ساختاری که به آن وابسته است تعریف و تعبیر می‌یابد. اصوات منفرد، به تنهایی فاقد معنا بوده و در کنار هم معنادار می‌شوند (Benveniste, 1969, p.131). در بازآفرینی موسیقی تاریخی، باید به این موضوع نیز توجه داشت که ساخت هر اثر موسیقی در دوره‌ی خود بر اساس نوع اصوات و شرایط سازهای همان دوره برنامه‌ریزی شده است و روحِ اصلی یک اثر موسیقی تاریخی، شاید به وسیله‌ی پیشرفت در مهارت‌های ارائه‌ی اثر تحت شعاع قرار گیرد(Lawson & Stowell, 2004,p.15) .

۴. آزمایش‌های مرتبط با بررسی ساختاری سازهای تاریخی

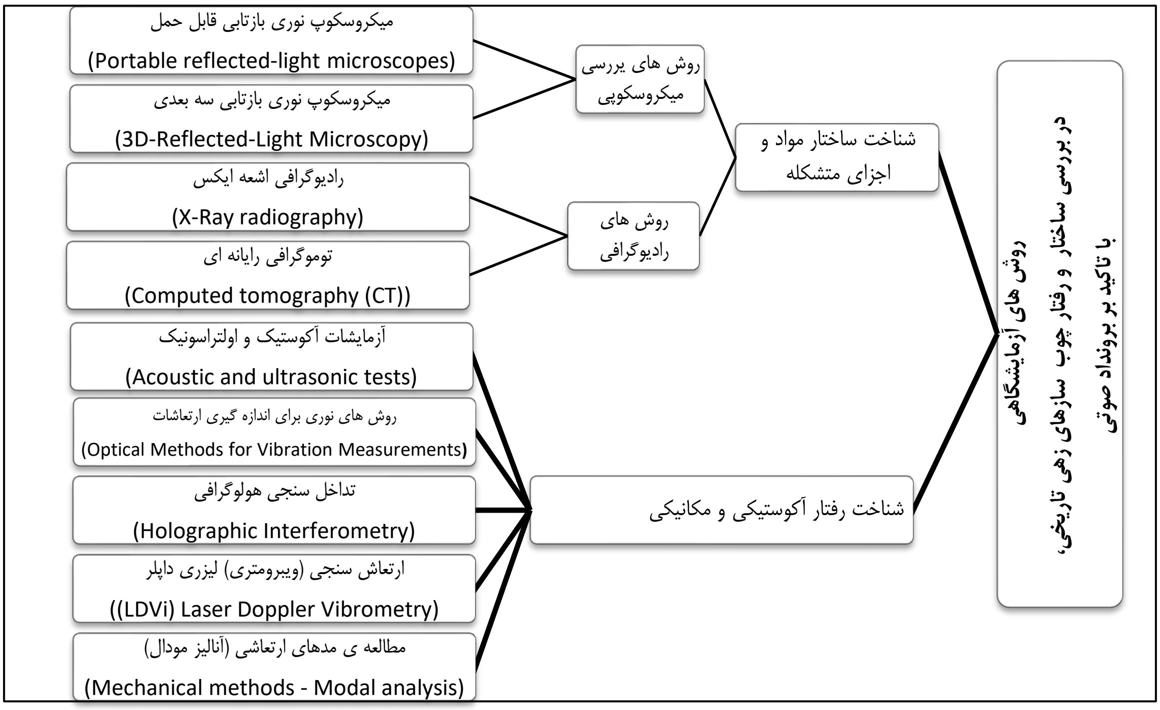
نتایج حاصل از مطالعات ساختار و نحوه‌ی عملکرد مواد و اجزای به‌کار رفته در سازهای تاریخی، در سه محور مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ الف- سازهای موسیقی جزو دسته‌ی وسیعی از اشیاء تاریخی فرهنگی به شمار می‌روند که عمدتاً در ساخت آنها از چند ماده‌ی مختلف بهره گرفته شده و آگاهی از مواد، فنون ساخت، آسیب‌ها و فرسایش در طول زمان (فن‌شناسی و آسیب‌شناسی) این آثار ترکیبی، موجب ارتقاء کیفی مبانی نظری و کنترل بهتر مداخلات حفاظت و مرمت ضمن بهره‌مندی از کیفیت برونداد صوتی خواهد شد. ب-انجام آزمایشات در جهت شناسایی بهتر مواد و نیز رفتار آکوستیکی اجزای تشکیل‌دهنده‌ی سازهای تاریخی مرجع با تاکید بر متغیرهای برونداد صوتی، باعث پیشبرد اهداف مطالعاتی در زمینه‌ی اصالت سنجی و ارزیابی سازهای مجهول خواهد شد. ج- سازندگان سازهای معاصر برای نزدیک‌شدن به اصالت فیزیکی در مواد، جهت دستیابی به برونداد صوتی همخوان با نمونه‌ی تاریخی،

[DOI: 10.61882/jra.10.2.398]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 14:54 +0330 on Saturday December 13th 2025

تمایل زیادی به آگاهی از نحوه‌ی انتخاب و استفاده از انواع مصالح توسط سازندگان قدیمی ساز دارند. لذا داده‌های به‌دست آمده از نمونه‌های مرجع تاریخی، کمک شایانی به ساخت مجدد سازها در جهت انجام مطالعات سبک‌شناسی و یا اجرای موسیقی تاریخی می‌نماید. انجام آزمایشات، با هدف بررسی و مطالعه‌ی هر دو جنبه‌ی شناخت ساختار و رفتار ارتعاشی در بدنه‌ی سازهای زهی تاریخی انجام می‌گیرد. از جمله مهمترین این آزمایشات در جهت شناخت ساختار مواد و اجزای متشکله: میکروسکوپ نوری بازتابی قابل حمل، میکروسکوپ نوری بازتابی سه بعدی، رادیوگرافی اشعه‌ی ایکس و توموگرافی رایانه‌ای و جهت شناخت رفتار آکوستیکی و مکانیکی: آزمایشات آکوستیک و اولتراسونیک، روش‌های نوری برای اندازه گیری ارتعاشات، تداخل‌سنجی هولوگرافی، ارتعاش‌سنجی لیزری داپلر (ویبرومتری لیزری داپلر) و آنالیز مودال (مدهای ارتعاشی) در سازهای تاریخی هستند (شکل۱). عمده‌ی این روش‌ها به‌صورت غیرمخرب هستند، به‌طوری که تماس با ساز تاریخی به حداقل رسیده و در ضمن انجام آزمایش هیچ گونه مداخله یا آسیبی به ساختار فیزیکی ساز وارد نخواهد شد.

۴-۱. روش‌های بررسی میکروسکوپی

گونه‌های چوب به‌کار رفته در سازهای تاریخی، در ارتباط با فشار سیم‌ها، تنش و نیروی اعمال شده توسط انگشتان نوازنده بر ساز، تغییرات در دما و رطوبت، عکس‌العمل‌های فیزیکی و مکانیکی متفاوتی را از خود بروز می‌دهند. باید در نظر داشت که هر یک از چوب‌های به‌کار رفته در ساز، صرف‌نظر از وظیفه شکل‌دهی به ساختار و تحمل نیروهای وارده از داخل و خارج ساز، نقش مهمی در تبدیل نیروهای مکانیکی به ارتعاشات صوتی و تشکیل رنگ‌ها و تشدید دینامیک صوتی دارند؛ که همان وجه ملموس برونداد صوتی است. آرایش سلولی، میزان تراکم و بافت هر چوب در تقویت و تضعیف هر یک از اجزای ملموس برونداد صوتی تاثیرگذار است. شناخت ساختار و تجزیه و تحلیل دندروکرونولوژیکی منجر به تعیین گونه‌های گیاهی برای آگاهی از شرایط انتخاب چوب در یک ساز تاریخی به‌کار رفته به‌وسیله‌ی یک سازنده و یا دوره‌ی زمانی و یا جغرافیای خاص می‌شود. هر سازنده‌ی ساز در گذشته ترجیحات خاص خود را در مورد مواد و فنون تولید داشته است. همچنین این شناخت، امکان شناسایی مداخلات مرمتی گذشته را که با چوب‌های مختلف و یا با نمونه‌های اصلی انجام شده است را نیز فراهم می‌سازد (Vandervellen, 2017, p. 102). ارزیابی ماکروسکوپیک ویژگی‌های ساختاری چوب به‌عنوان روشی استاندارد در سازهای موسیقی محسوب می‌شود، البته تاکید بر این نکته نیز لازم است که امکانات شناسایی ماکروسکوپی بسیار محدودتر از مطالعه‌ی میکروسکوپی است.



شکل۱. نمودار معرفی اجمالی روش‌های آزمایشگاهی در بررسی ساختار و رفتار چوب سازهای زهی تاریخی

Figure 1. Overview diagram of laboratory methods used to investigate the structure and behavior of wood in historic string instruments.

[DOI: 10.61882/jra.10.2.398] Downloaded from jra-tabriziau.ir at 14:54 +0330 on Saturday December 13th 2025

۴-۱-۱. میکروسکوب نوری بازتابی قابل حمل (Portable reflected-light microscopes)

روش‌های ماکروسکوپی شرایط مختلف رشد درختان (به‌عنوان نمونه تشکیل حلقه‌های رشد) یا قرار گرفتن در معرض اکسیژن و تاثیر اشعه‌ی ماوراء بنفش (به‌عنوان یکی از عوامل تغییرات رنگ چوب) را تا حد زیادی مشخص می‌سازند. با این حال، برای شناسایی گونه های چوبی مورد استفاده در سازهای تاریخی، معاینه‌ی میکروسکوپی کارایی بیشتری دارد. ویژگی‌های میکروسکوپی بافت سلولی، شرایط آوندها، نوع فیبرها و پرتوها و همچنین پارانشیم محوری را توصیف می‌کند. اجزاء متشکله از مواد معدنی در ساختمان میکروسکوپی به‌عنوان نوعی اثر انگشت منحصر به فرد در هر چوب خاص شناخته می‌شود(Anatomical Fingerprint) . این شناسایی، در محل قرارگیری ساز تاریخی با میکروسکوپ های دیجیتالی قابل حمل با بزرگنمایی بالا و همچنین استفاده از فیلترهای بازتابی و پولاریزه انجام شده و نهایتاً این نتایج با ویژگی‌های آناتومیکی رمزگذاری شده توسط انجمن بین المللی آناتومیست‌های چوب[۳] (IAWA) مطابقت داده خواهد شد. در بزرگنمایی‌های زیاد (بزرگنمایی 50X-200X) مرزهای حلقه‌ی رشد، عرض تقریبی حلقه‌ها و ترتیب و گروه‌بندی رگه‌ها، توزیع و آرایش پارانشیم محوری، پرتوهای تجمعی، تایلوزها یا رسوبات در مجرای رگه‌ها؛ و علاوه بر آن در چوب‌های تیره‌تر، کریستال‌های منشوری در سلول‌های پارانشیم مشخص می‌شوند. فیلتر نور پلاریزه و سطوح بزرگ‌نمایی (400X) امکان تشخیص ویژگی‌های مهم دیگری مانند کانال‌های رزین محوری، ضخیم شدن‌های مارپیچی، حفره‌های تراکئیدی حاشیه‌دار، ساختار و نوع پرتوهای شعاعی، نوع حفره‌های بین‌رگ‌ها را مهیا می‌سازد.

به‌عنوان نمونه، در مورد شناسایی سازهای مجموعه‌ی موزه‌ی بروکسل در بلژیک از دو میکروسکوپ دیجیتال نوری بازتابی قابل حمل با رابط USB برای مشاهده‌ی ساختار چوب‌های یک ساز هارپسیکورد تاریخی (شکل۲) استفاده شد: ۱- Dinolite pro AD413T: با هشتLED به رنگ سفید و بزرگنمایی‌های 10X-50X-200X و ۲- Dinolite premier AM4113ZT4: با فیلتر نور پلاریزه و بزرگنمایی‌های از 400X تا 470X. این تجهیزات دارای رزولوشن ۱.۳ مگاپیکسل(MP) جهت مشاهده بر روی صفحه‌ی رایانه بوده و با استفاده از فیلترهای ویژه، مانند نور پلاریزه، مشاهده سطوحی که ویژگی‌های آناتومیکی آنها با لاک پوشانده شده را قابل مشاهده می‌سازد (Fioravanti et al, 2016, p. 68).

شکل۲. بخشی از صفحه‌ی صوتی ۶ اینچی ساز هارپسیکورد تاریخی. Quercus sp– مرزهای حلقه رشد متمایز، حلقه چوب متخلخل، آوندها در طرح دندریتیک، ارتفاع پرتو بیشتر از ۱ میلی متر. بخشی از صفحه صدای هارپسیکورد (Vandervellen, 2017, p. 103).

Figure 2. Section of a 6-inch soundboard from a historic harpsichord. Quercus sp. – distinct growth ring boundaries, ring-porous wood, vessels in a dendritic pattern, ray height exceeding 1 mm. Section of the harpsichord soundboard. (Vandervellen, 2017, p. 103)

۴-۱-۲. میکروسکوب نوری بازتابی سه بعدی (3D-Reflected-Light Microscopy)

میکروسکوپ نوری بازتابی سه‌بعدی، امکان مطالعه‌ی اجزای انفرادی در سازهای تاریخی را بدون نمونه‌برداری برای آماده سازی مقاطع میکروسکوپی فراهم می‌سازد. استفاده از این روش امکان مشاهده میکروسکوپی سطوح مسطح و ناهموار از اجزای چوبی جامد را فراهم می‌آورد. جهت تجزیه و تحلیل میکروسکوپی، تصاویر دیجیتالی و همچنین داده‌های هیستومتری مربوط به اجزای ساز مورد بررسی قرا خواهد گرفت. این تصاویر به کمک رایانه (شکل۳) با اطلاعات موجود از سیستم های شناسایی چوب (به‌عنوان نمونه داده‌های مربوط به بانک اطلاعات چوب، 4macroHOLZdata و 5CITESwoodID) مقایسه می‌شود.

[DOI: 10.61882/jra.10.2.398]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 14:54 +0330 on Saturday December 13th 2025

شکل۳. بررسی ساز گیتار تاریخی با سیستم تجزیه و تحلیل تصویر میکروسکوپ دیجیتالی (Cell^F®, Olympus and KEYENCE® VHX-5000) (Haag et al, 2017, p. 106)

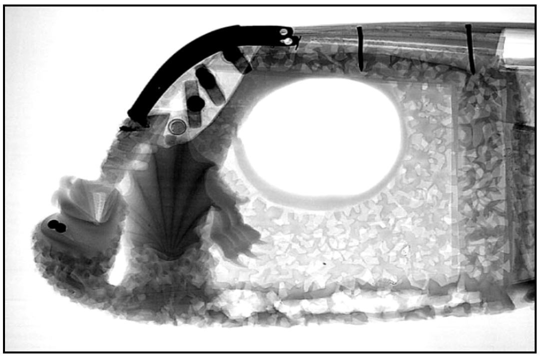
Figure 3. Examination of a historic guitar using a digital microscope image analysis system (Cell^F®, Olympus and KEYENCE® VHX-5000). (Haag et al., 2017, p. 106)

۴-۲. آزمایشات رادیوگرافی

تاریخ اولین رادیوگرافی از یک ساز موسیقی به سال ۱۹۴۹ مربوط می‌شود که اولین بار یک ساز ابوا و پس از آن از مجموعه‌های دیگر سازهای بادی رادیوگرافی انجام شد (Awouters, 1982, p. 210). در زمان برخورد با یک ساز موسیقی اغلب اجزای بیرونی توجه مخاطب یا نوازنده را به خود جلب می‌کند اما باید در نظر داشت که هریک از بخش‌های درونی ساز نیز در ایجاد و شکل‌دهی برونداد صوتی دخیل هستند. این آزمایشات روش‌های غیرمخربی هستند که باعث تعمیق دانش پژوهشگران در حوزه‌های گوناگون مطالعات سازشناسی، حفاظت و مرمت و باستان سنجی می‌شوند.

۴-۲-۱. رادیوگرافی اشعه‌ی ایکس (X-ray radiography)

توسط عکس‌های رادیوگرافی می‌توان به ساختار درونی یک ساز و نیز به چگالی مواد و ضخامت بدنه و میزان تخلخل در بافت موادآلی و آسیب‌های بیولوژیکی پی برده خواهد شد. اساساً، رادیوگرافی یک روش غیرمخرب برای ارزیابی ویژگی‌های داخلی یک ساز و در جهت اهدافی همچون تشخیص ساختار درونی یک ساز موسیقی و ضخامت نواحی مختلف (شکل۴)، تشخیص تعمیر و مرمت‌های قبلی و در برخی موارد جعلی بودن ساز، نشان دادن آسیب‌های داخلی که توسط حشرات ایجاد شده و امکان ثبت دائمی اطلاعات است. (Portillo r., 1996, p. 21)



شکل۴. رادیو گرافی اشعه‌ی ایکس از بخشی از ساز سیتول (citole)، در این تصویر تراکم بخش‌های مختلف ساز به خوبی مشخص است (Kevin et al, 2008, p. 17)

Figure 4. X-ray radiograph of a section of a citole; the image clearly reveals the varying densities of different parts of the instrument. (Kevin et al., 2008, p. 17)

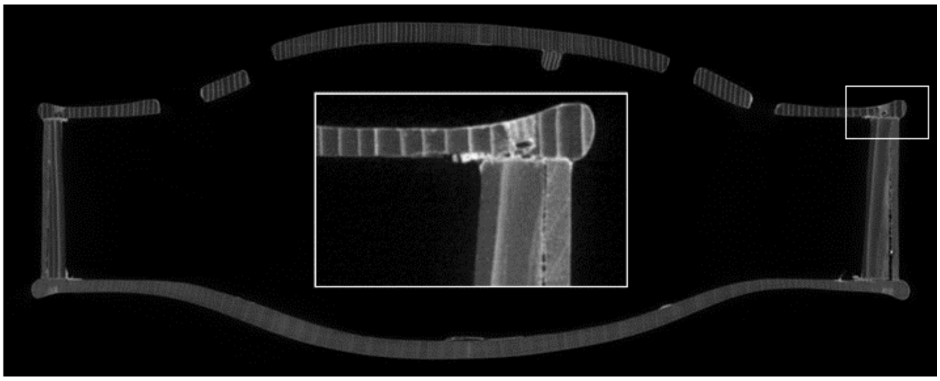
۴-۲-۲. توموگرافی رایانه‌ای (CT) (computed tomography)

در این روش امکان ارزیابی خسارت و مداخلات در مرمت‌های قبلی، آسیب‌های ناشی از حشرات و تأیید اصالت سازهای تاریخی فراهم می‌شود. از نتایج این آزمایش می‌توان برای به حداقل رساندن مداخلات مرمتی نیز استفاده کرد. در توموگرافی رایانه‌ای (CT)، اطلاعات مربوط به پارامترهای هندسی، میزان ضخامت، میزان تغییرات چگالی و تراکم چوب و میزان انحنای بخش‌های مختلف در ساختارهای خارجی و داخلی، با وضوح بالا و بدون هیچ‌گونه فشار مکانیکی بر بدنه‌ی ساز مشخص می‌شود (Vandervellen, 2017,

[DOI: 10.61882/jra.10.2.398]

Downloaded from jra-tabriziau.ir at 14:54 +0330 on Saturday December 13th 2025

pp. 74-188). چگالی پرتوی مواد در مقیاس کمی توسط واحد هانسفیلد (HU) توصیف شده است. در این مقیاس، چگالی پرتوی آب مقطر در فشار و دمای استاندارد صفر (HU) و چگالی پرتوی هوا به صورت HU-1000 تعریف می‌شود. تبدیل چگالی رادیوگرافی بیان شده در اعداد هانسفیلد به چگالی چوب بیان شده بر حسب Kgr/m3 نیاز به یک روش تبدیل با استفاده از داده‌های استاندارد متشکل از نمونه‌های چوب با چگالی مشخص دارد (Bucur, 2016, p. 135). میکروتوموگرافی فاز–کنتراست تابش سنکروترون به‌عنوان یک تکنیک ایده آل برای تجزیه و تحلیل سه‌بعدی نمونه‌های سازهای موسیقی و سایر اشیاء میراث فرهنگی در نظر گرفته می‌شود. این روش امکان تشخیص جزئیات با اندازه‌ی کمتر از ۵۰ µm میکرومتر را می دهد که معمولاً توسط سیستم های پزشکی نیز قابل دستیابی نیست. به‌عنوان نمونه، از ساز ویلن هومل (Matthias Hummel) ساخته شده در سال ۱۶۸۱، موجود در مجموعه‌ی موزه‌ی ادینبورگ، با بالاترین وضوح، توموگرافی رایانه‌ای انجام گرفت (شکل ۵). در این تصاویر تشخیص انواع مختلف چوب و بررسی دندروکرونولوژیک، شکاف‌های بین قطعات و اتصالات پر شده با چسب و نقص در بخش‌های مختلف ساز با وضوح بالا نمایان خواهد شد(Fuchs et al, 2019, p. 6) .



شکل ۵. سطح مقطع ویولن هومل که سوراخ‌های f و بلوک های گوشه را نشان می دهد. قسمت داخلی بزرگنمایی را در گوشه‌ی سمت راست بالا نشان می دهد. وکسل ها دارای طول لبه‌ی µm ۴۴ هستند و این اسکن با ولتاژ ۱۵۰ kV، زمان نوردهی ms ۵۰۰ در هر لایه و ۲۰۰۰ لایه در ۳۶۰ درجه، بزرگنمایی هندسی ۲.۹ انجام شده است. (Fuchs et al, 2019, p. 7)

Figure 5. Cross-section of the Hummel violin showing the f-holes and corner blocks. The upper right inset displays a magnified interior view. Voxels have an edge length of 44 µm. The scan was performed at 150 kV, with an exposure time of 500 ms per layer, across 2000 layers over 360 degrees, using a geometric magnification of 2.9. (Fuchs et al., 2019, p. 7)

۴-۳. آزمایشات آکوستیک و فراصوتی (Ultrasonic)

از ویژگی‌های اساسی سازها می‌توان به تفاوت در شکل و روند فرسودگی مواد و مصالح سازنده در آنها اشاره کرد که تا حدودی نقش تعیین کننده‌ای در کیفیت برونداد صوتی در هر دوره‌ی استفاده از ساز خواهد داشت. در این میان توجه به مفهوم "خزش " (تغییر شکل تدریجی اشیاء در طول زمان) به‌عنوان یکی از عوامل تغییرات درونی حائز اهمیت است. تغییرات در شکل و فرم یا ابعاد برخی از سازها، به صورتی تدریجی و دائمی است. یک جسم ممکن است در ابتدا هیچ تغییر شکلی را تحت بارهای تنش نشان ندهد، اما با گذشت زمان تغییرات قابل مشاهده خواهند بود (Bucur, 2016, p. 760). نکته‌ی مهم دیگر ویژگی ناهمگن در بافت چوب است که تا حدودی در سایر بافت‌های مواد آلی نظیر چرم، استخوان و ... نیز دیده می‌شود. پیری چوب در سازهای موسیقی یک فرآیند بسیار پیچیده است که در اثر برهم‌کنش عوامل مختلف از جمله بارگذاری طولانی مدت مکانیکی، تغییرات رطوبت محیط و اثرات مکانیکی جذبی که از طریق تورم و انقباض و در نهایت تنش، ایجاد می‌شود.

اجزای شیمیایی ساختار چوب با اجزای شیمیایی معلق در هوا، انرژی امواج فرابنفش، آلاینده‌های محیطی و تاثیرات ناشی از استفاده و تماس با دست نوازندگان، میکروارگانیسم‌ها و غیره تعامل دارند. دیواره‌ی سلولی – سلولز در درجات مختلف سازماندهی ساختاری (آلفا سلولز، هولو سلولز)، پنتوسان‌ها و لیگنین به روش‌های مختلف با عوامل پیری واکنش نشان می‌دهند. اکسیداسیون، دپلیمریزاسیون، هیدرولیز، از دست دادن آب (دِهیدراتاسیون)، کاهش و تاثیرات رادیکال‌های آزاد و سایر فرآیندهای شیمیایی با گذشت زمان، اجزای پلیمری و ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی آن را تغییر می‌دهد. بسته به شرایطی که سازهای موسیقی در آن استفاده شده و یا در مدت بسیار طولانی حفاظت می‌شده، این واکنش‌ها می‌تواند برای ساختار چوب در سازهای موسیقی متنوع باشد. تغییر رنگ چوب با پیری طبیعی عمدتاً به دلیل اکسیداسیون حرارتی رخ می‌دهد که می‌توان این عارضه را با میزان تراکم لیگنین در ارتباط مستقیم دانست(Bucur, 2016, p. 293) . افزایش کیفیت آکوستیک و برونداد صوتی، در ضمن ثبات ثانویه‌ی چوب پیر برای

[DOI: 10.61882/jra.10.2.398]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 14:54 +0330 on Saturday December 13th 2025

سازهای چوبی، دارای اهمیت فراوانی است. اگر بتوانیم اثرات مثبت پیری، با رعایت کیفیت بالا را تولید کنیم، می‌توان به چوبی با "سن مصنوعی " در محدوده‌ی زمانی کم‌تری دست یافت. البته در مواردی چوب مسن مصنوعی ممکن است برای ساخت و مرمت سازهای چوبی قدیمی نیز مفید باشد (Vandervellen, 2017, pp. 74-188). نتایج برخی از روش‌های آکوستیک و اولتراسونیک، در تعیین خصوصیات مکانیکی و ارتعاشی چوب‌ها باورتجربی بسیاری از نوازندگان و سازندگان ساز را که انعطاف و بهبود کیفیت صفحه-های صدای ساز را با افزایش عمر آن در ارتباط می‌دانستند، تقویت کرد.

با توجه به اینکه چوب یک حجم ناهمگن است، رفتار آن باید در سه جهت ارتوتروپیک L محوری، R شعاعی و T مماسی در مقابل حلقه‌های سالانه مشاهده شود. در این روش شبیه‌سازی بارگذاری طولانی‌مدت در چوب‌های مورد استفاده در سازسازی انجام می‌گیرد (Bucur, 2016, p. 96). تأثیرات پیری طبیعی بر چگالی چوب و ثابت‌های الاستیک با آزمایش‌های دینامیکی که امکان دسترسی به مدول‌های یانگ و برشی و اصطکاک داخلی و آزمایش‌های استاتیکی برای اندازه‌گیری مدول‌های یانگ و استحکام کششی نهایی، پرداخته می‌شود. ضریب یانگ یا مدول کشسانی به نسبت تنش به کرنش مواد جامد خطی در پایین‌تر از استحکام تسلیم گفته می‌شود. در مسیر انتشار و انتقال امواج فرکانسی، با توجه به جهت این امواج ساختار چوب عمل فیلترینگ را انجام می‌دهد. سازماندهی محوری تراکئیدها و الیاف به سرعت های اندازه‌گیری شده در جهت L مربوط می شود. پرتوهای مدولاری که در جهت R قرار گرفته‌اند تا حدودی دارای سرعت بالایی هستند اما در جهت T ساختار رسانایی صوتی‌ای وجود نداشته در نتیجه سرعت انتقال در این بخش در مقایسه با جهت‌های دیگر میزان کمتری دارد. در این میان عوامل داخلی در بافت چوب نیز باعث ایجاد اصطکاک در مسیر حرکت امواج می‌شوند.

در آزمایشاتی که توسط ویوچیتا بوچور (Bucur, 2016) بر روی دو نمونه از چوب صنوبر و چوب درخت افرای فرفری (که در ساختار ساز ویلن مورد استفاده قرار می‌گیرد)، نمونه‌هایی در سه گروه برای آزمایش‌های خمشی استاتیک استاندارد برای حدود دو ماه در سه جهت مذکور بارگذاری شده (بر اساس نظر نوازندگان، حدود دو ماه برای شبیه‌سازی زمان لازم برای رسیدن یک ویلن جدید به حد مطلوب در نظر گرفته شد) و بر روی این نمونه‌ها سرعت و میرایی اولتراسونیک در جهت‌های L، R، T اندازه‌گیری شد. از این شبیه‌سازی که بازتولید بسیار محدودی از تنش‌های واقعی در چوب به‌کار رفته در ساز ویلن است، می‌توان به این نکته اشاره کرد که استرس مکانیکی تأثیر مهمی بر رفتار چوب دارد و می‌توان به نفع این عقیده استدلال کرد که ویلن‌ها به نواختن برای مدت زمان معینی نیاز دارند تا به بهترین پارامترهای کیفی در عملکرد خود برسند.

۴-۴. اندازه گیری ارتعاشات با روش‌های نوری (Optical Methods for Vibration Measurements)

کلادنی ((Ernest florens Friedrich Chladni (1756 - 1824) اولین کسی بود که لرزش صفحات را با استفاده از یک روش بسیار ساده و شهودی مجسم کرد (Chladni E., 1787). از ویژگی‌های مهم این روش، مطالعه‌ی شرایط انتقال ارتعاشات در بدنه‌ی سازها برای درک پدیده‌ی تولید و انتشار برونداد صوتی، بدون تماس مستقیم است، به‌گونه‌ای که هیچ‌گونه ابزار تولید ارتعاش اتصال متفاوتی به سطح سازها ندارد؛ بنابراین سطح ساز نیز در حالت طبیعی خود می‌تواند به طرز ضعیفی لرزش کند. کاربردهای معمول این روش، مربوط به تجزیه و تحلیل مدها و بازسازی میادین صوتی است که از سازهای مختلف ساطع می‌شود. صفحه‌ی سازها را می‌توان با یک موج صوتی قدرتمند که با فرکانس حالت مورد نظر تنظیم می شود، طنین انداز کرد. این لرزش با شدت صوت قابل توجه، به صورت مکانیکی یا الکترومکانیکی، یا توسط تحریک ساز توسط مضراب یا آرشه به شکل طبیعی در همان فرکانس مورد نظر ایجاد می‌شود؛ و در نهایت طرح مدهای مختلف (با دامنه‌ی اغراق‌آمیز) به‌وسیله‌ی ارتعاش بخش‌هایی از ساز و جدایش و تجمیع ماده‌ی پودری در سطح به‌وجود می‌آید. به عنوان نمونه، در (شکل۶) تاثیرات ارتعاش صفحه‌ی ساز ویلن مربوط به سال ۱۸۷۰ در فرکانس مشخص توسط آزمایش کلادنی مشاهده می‌شود. صفحه‌ی ویلن در فرکانس‌های مختلف، حالت‌های ارتعاشی متنوعی دارد که از این میان ۶ مد ارتعاشی بیشتر مورد توجه سازندگان این ساز است و به‌همین علت در فرایند ساخت و به‌ویژه پرداخت متقارن صفحات مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرفی با آگاهی از مدهای فرکانسی ویژه‌ای که در سازهای مربوط به دوره‌ی تاریخی یا توسط سازنده‌ی خاص وجود دارد، می‌توان به صحت‌سنجی نمونه‌های مجهول پرداخت.

[DOI: 10.61882/jra.10.2.398] Downloaded from jra-tabriziau.ir at 14:54 +0330 on Saturday December 13th 2025

شکل۶. مد فرکانسی ایجاد شده بر روی صفحه‌ی ویلن ساخته شده در حدود سال ۱۸۷۰ در آلمان. روی صفحات ویلن از ماسه‌ی سیاه استفاده شده است. این آزمایشات توسط E Bossy و R Carpentier در دانشگاه سافت ولز استرالیا انجام گرفته است(Molin, N. E et al, 1988)

Figure 6. Frequency mode pattern generated on the soundboard of a violin made around 1870 in Germany. Black sand was used on the violin plates. These experiments were conducted by E. Bossy and R. Carpentier at the University of South Wales, Australia. (Molin, N. E. et al., 1988).

۴-۵. تداخل‌سنجی هولوگرافی (Holographic Interferometry)

در این آزمایش با استفاده از لیزر، تداخل یا تثبیت میزان شدت نور را در صورت تغییر فازهای نسبی دو میدان نور مشخص و تصویر یک جسم در سه بعد تولید می‌شود. تصاویر به‌دست آمده با موقعیت مشاهده‌گر تغییر می‌کند و به شکل سه‌بعدی جسم ظاهر می‌شود. هولوگرافی امکان ضبط میدان نوری را که از یک جسم پراکنده شده است، فراهم می‌کند. مطالعات پیشگام در آغاز دهه‌ی ۱۹۷۰ در مورد تداخل‌سنجی هولوگرافی برای ارتعاشات بدنه‌ی ویلن انجام شد. به این صورت که وابسته به شرایط و شدت و ضعف برونداد صوتی، میزان تغییرات ثبت می‌شد. هولوگرام‌های اولیه در صفحه‌ها یا فیلم‌های عکاسی ثبت می‌شدند. در این روش بازسازی قسمت ضبط شده به صورت نوری انجام می‌شد و بسیار وقت‌گیر بود. در دوره‌های بعد با استفاده از سیستم‌های ویدیویی به مرور این سختی برطرف شد. هولوگرافی پالس (Pulsed TV holography) تلویزیونی از یک پالس لیزر به‌جای لیزر پیوسته به عنوان منبع نور استفاده می‌کند. در دوران معاصر با پیشرفت‌های تکنولوژیکی، سه تکنیک فرعی: نوردهی دوگانه، استفاده از میانگین زمانی و تاثیر دادن تداخل سنجی هولوگرافیک در زمان واقعی توسعه یافته است. باید خاطر نشان ساخت که هولوگرافی تغییرات در جابجایی‌های ایستا و پویا را با دقت بالا مشخص کرده و در فرکانس‌های پایین نیز با حساسیت ویژه‌ای عمل می‌کند. مقایسه‌ی الگوهای مهاربندی داخلی گیتار آکوستیک نخستین بار در ۱۹۹۰ توسط روزینگ و همیلتون (Rossing and Hamilton (1990)) مورد مطالعه قرار گرفت. به‌عنوان نمونه، مطابق (شکل۷) با هولوگرافی تداخل‌سنجی زمان متوسط، ارتعاشات بدنه‌ی گیتار را می‌توان مشاهده کرد و تصاویر فوق‌العاده ای ارائه داد. این تکنیک برای نشان دادن تأثیر طراحی پل‌بندی و مهاربندی داخلی در زیر صفحه‌ی گیتار بر کیفیت برونداد صوتی گیتارها استفاده شده است (Richardson, 2010, p. 127).

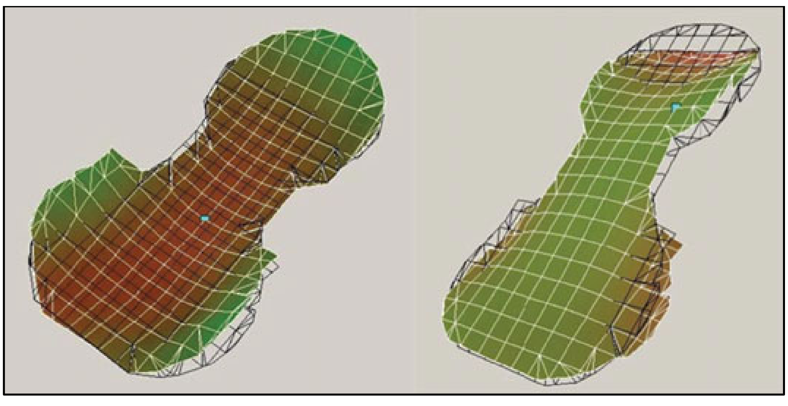
[DOI: 10.61882/jra.10.2.398]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 14:54 +0330 on Saturday December 13th 2025

شکل۷. هولوگرافی تداخل‌سنجی متوسط، لرزش تخته‌ی صوتی گیتار در فرکانس بالاتر ازHZ ۱۱۰۰ (a). این روش برای نشان دادن تأثیر طراحی مهاربندی در پشت صفحه‌ی گیتار (b) برای ارزیابی کیفیت صدای گیتارها استفاده شده است (Richardson, 2010, p. 127)

Figure 7. Medium coherence holographic interferometry showing vibration of the guitar soundboard at frequencies above 1100 Hz (a). This method was used to demonstrate the effect of bracing design on the guitar's back plate (b) for evaluating guitar sound quality. (Richardson, 2010, p. 127)

۴-۶. ارتعاش‌سنجی (ویبرومتری) لیزری داپلر (LDVi) (Laser Doppler Vibrometry)

اصل LDVi یک روش تداخل سنجی برای اندازه گیری روی سطوح لرزان است که بر اساس تبدیل سرعت لحظه‌ای v به فرکانس داپلر fD با استفاده از تداخل‌سنج هتروداین (Heterodyne Interferometer) عمل می‌کند. در این روش قابلیت‌های بررسی آزمایش تجربی با توجه به شتاب‌سنج‌های کلاسیک بسیار بهبود یافته است، غیر مخرب بودن، وضوح فضایی بالا، در ضمن کاهش زمان تست و عملکرد برتر، قابلیت تعیین سرعت ارتعاش به صورت کمی، قابلیت اندازه‌گیری اشکال حالت لرزش با نمونه‌برداری با سرعت بالا، قابلیت اندازه‌گیری ارتعاش اجسام به شکل پیچیده که به‌عنوان مثال با وضوح در جابجایی در محدوده‌ی نانومتر و در سرعت حدود (μm/s) ۰.۵ و پهنای باند تا (kHz) ۲۰۰ از مواردی است که می‌توان به آن اشاره نمود (Bucur, 2016, pp. 140-143). این روش برای تجزیه و تحلیل مد تجربی برای آن سطح جسم لرزشی اسکن شده، استفاده می‌شود. همگام‌سازی بین نقاط اسکن از طریق مقایسه با سیگنال مرجع – سیگنال نیروی ورودی – به‌دست می آید. نرم افزار ارتعاش‌سنج، اشکال حالت‌ها و فرکانس‌های مربوطه را به منظور ارتعاش تعیین می‌کند. ارتعاش‌سنج لیزری داپلر که در ارتعاشات بدنه‌ی یک ساز اعمال می‌شود، امکان اندازه‌گیری ارتعاشات دستگاه و میزان صدای مربوطه تولید شده توسط این ارتعاشات را فراهم می‌کند. بر طبق تصویر، برهم‌نهی حالت‌های ارتعاشی صفحات ویلن را که با ویبرومتری لیزر اسکن و تجزیه و تحلیل مد بدست آمده است (شکل۸)، می‌توان مشاهده نمود. ارتعاش‌سنج لیزری داپلر دارای دو قسمت اصلی: ارتعاش‌سنج لیزری تک نقطه‌ای که سرعت نقطه را با اثر داپلر اندازه گیری می‌کند و سیستم اسکنی که به پرتوی لیزر اجازه می‌دهد تا از نقاط مختلف سطح هدف حرکت کند می‌باشد.

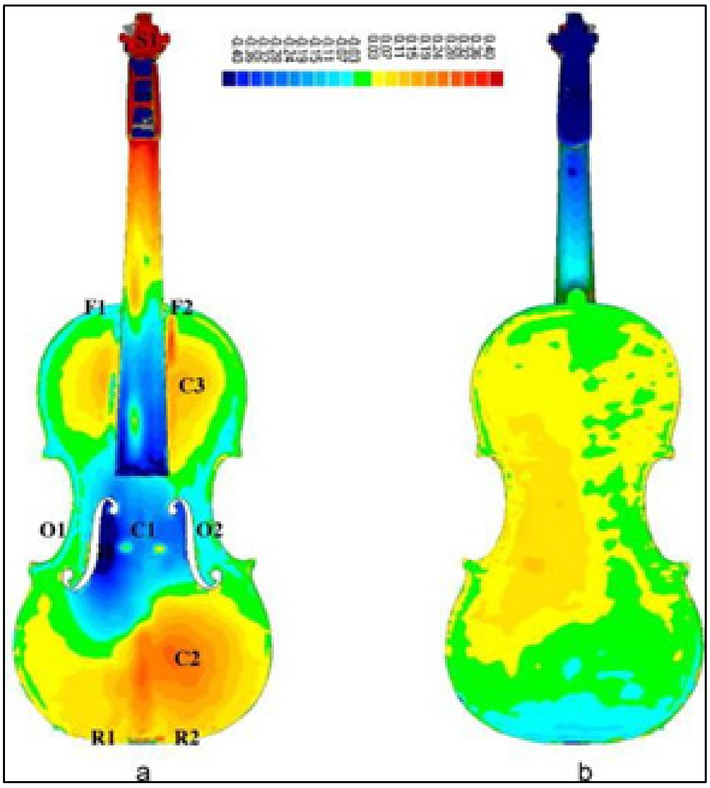


شکل۸. تلفیق حالت‌های ارتعاش صفحات ویلن به‌دست‌آمده با اسکن ویبرومتری لیزری و آنالیز مدها، عکس از کتاب ویوچیتا بوچور، به نقل از مدرسه عکاسی مهندسی و فناوری اطلاعات، دانشگاه نیو ساوت ولز، کانبرا، استرالیا (Bucur, 2016, p. 141)

Figure 8. Combination of vibration modes of violin plates obtained through laser vibrometry scanning and modal analysis. Photo from the book by Viochita Bucur, cited by the School of Engineering and Information Technology Photography, University of New South Wales, Canberra, Australia. (Bucur, 2016, p. 141)

[DOI: 10.61882/jra.10.2.398]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 14:54 +0330 on Saturday December 13th 2025

بررسی تغییر شکل الاستیک بدنه‌ی برخی از سازها با استفاده از یک اسکنر نوری سه بعدی بر اساس تصویربرداری استریو و فناوری پراش حاشیه‌ی نور در ۲۰۱۲ توسط فیوراوانتی و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفت. به‌عنوان نمونه، توسط این آزمایشات میزان تغییرات یک ویلن محاسبه شد. کشش و نیروی فشاری پل باعث ایجاد فشردگی طولی در بالای ویولن و کشش طولی در پشت می‌شود. لحظات خمشی و تنش‌های برشی نیز در صفحات و دیواره‌ها ایجاد می‌شود. همچنین در هنگام نواختن نیروهای پویایی ایجاد می‌شوند که کوچکتر از نیروهای ایستا هستند. بر طبق (شکل ۹) امکان بازسازی نمای برای روبرو و پشت ساز فراهم شده است. بخش‌های به رنگ سبز، فیروزه ای تا آبی، مربوط به تغییر شکل سطوح ساز پس از اعمال فشار سیم‌ها رو به داخل و بخش‌های به رنگ زرد، نارنجی تا قرمز، مربوط به تغییر شکل سطوح ساز پس از اعمال فشار سیم‌ها رو به بیرون ساز (در حدود ± 30μm) هستند. لذا تیرگی بیشتر رنگی در هر بخش نشان‌دهنده میزان نیروی بیشر در آن قسمت از ساز است. از جمله نقاط تمرکز نیروها در بخش‌های اصلی ساز ویلن می توان به: نیروهای ساکن بین سیم‌گیر پایان و گوشی بالایی، نیروهای ساکن بین گوشی بالایی و اسکرول، نیروی سیم‌ها در حالت کوک شده، انتقال نیرو به بدنه‌ی ویلن از طریق پل داخل ساز، جعبه‌ی گوشی‌های کوک در بالای ساز و سوراخ‌های صوتی"f" بر روی صفحه اشاره داشت. برخی از این نیروها در زمان نوازندگی تشدید یا تضعیف خواهد شد [25]. با توجه به لزوم کشیدگی سیم‌ها در روند تولید برونداد صوتی در کلیه‌ی سازهای زهی کاربرد این آزمایش در درک مقاومت فیزیکی در بخش‌های مختلف سازها بسیار اهمیت دارد.



شکل ۹. تغییر شکل روبرو و پشت ویلن پس از کوک در مقایسه با حالت ساز بدون سیم (Fioravanti et al, 2012, p. 149)

Figure 9. Front and back deformation of the violin after tuning compared to the unstringed state (Fioravanti et al, 2012, p. 149)

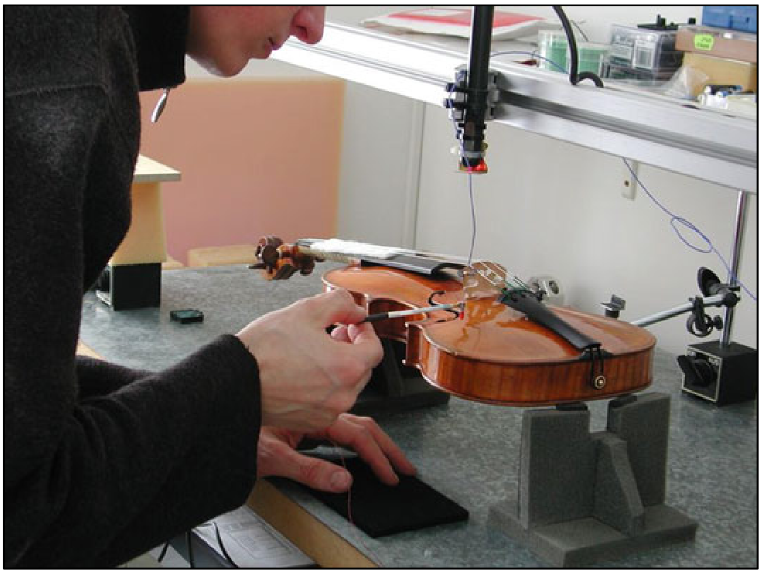
۴-۷. مطالعه‌ی مدهای ارتعاشی (آنالیز مودال) (mechanical methods - modal analysis)

تأثیر پارامترهای فیزیکی مواد (چگالی، مدول الاستیسیته) و هندسه (اندازه صفحات، توزیع ضخامت و غیره) مورد استفاده برای ساخت سازها، بر ارتعاشات آنها را می‌توان با شبیه‌سازی از طریق تحلیل مودال نشان داد. در این آزمایش‌ها پارامترهای نظری ارتعاش سازهای موسیقی با تجزیه و تحلیل مودال ارائه شده است. آزمایش مودال امکان شناسایی تجربی پارامترهای مدال سازهای موسیقی ارتعاشی (فرکانس‌های طبیعی، میرایی مودال و شکل‌های حالت) را فراهم می‌کند (Bucur, 2016).

به‌عنوان نمونه در آزمایشی که بر روی یک ساز ویلن تاریخی انجام گرفته، حالت‌های متنوع ارتعاش فرکانسی در نت‌های مختلف را می‌توان از اندازه‌گیری‌های میزان ارتعاش ورودی مشخص شده و ایجاد برونداد صوتی و انتشار آن در هر بخش از ساز اندازه‌گیری

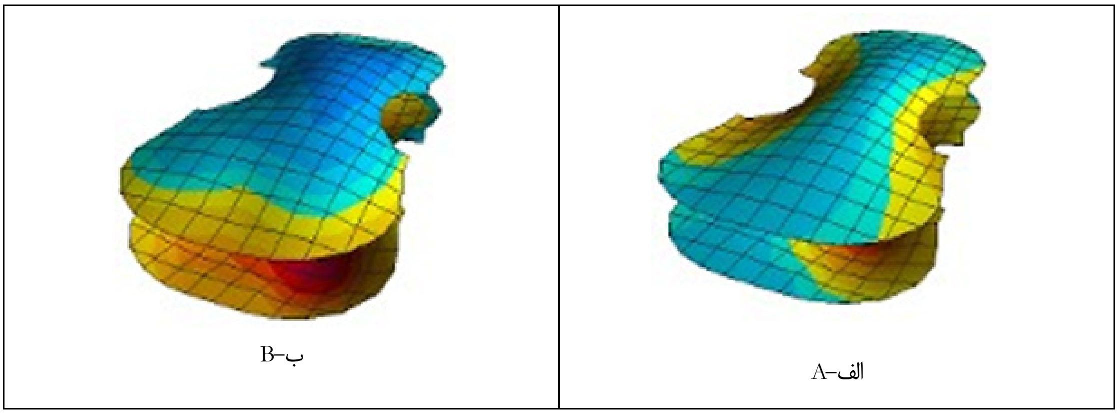
[DOI: 10.61882/jra.10.2.398]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 14:54 +0330 on Saturday December 13th 2025

کرد(Jansson, 2002, p. 47) . مطابق شکل اندازه‌گیری‌ها در پل برانگیخته شده توسط یک ضربه‌ی چکش انجام شده و توسط نرم افزار رابط مدل‌سازی می‌شود (شکل۱۰). در (شکل۱۱) تجزیه و تحلیل مودال از ارتعاش‌های طبیعی صفحه‌ی ساز در دو فرکانس مربوط به نت‌های سی و لا که بر روی یک ویلن تاریخی ساخته‌شده توسط گوارنری اعمال شده، دیده می‌شود.



شکل ۱۰. چکش و شتاب سنج الکترونیکی (۰.۵ گرمی) برای اندازه گیری تابع پاسخ فرکانسی ساز ویلن عکس از کتاب ویوچیتا بوچور، به نقل از سایت سازندگان ویلن (Martin Schleske) (Bucur, 2016, p. 331)

Figure 10. Electronic hammer and 0.5 g accelerometer used to measure the frequency response function of the violin. Photo from the book by Viochita Bucur, cited from the violin makers' website (Martin Schleske). (Bucur, 2016, p. 331)



شکل۱۱. تجزیه و تحلیل مودال ارتعاش‌های طبیعی در فرکانس‌های مشخص دربدنه‌ی ویلن ویلن ساخته‌شده توسط گوارنری. الف) ارتعاش قوی برایHZ ۵۰۹ هرتز، مد ایجاد شده توسط نت سی (B1)، ب) ارتعاش مبنای هلمهولتز برایHZ ۲۶۸، مد ایجاد شده توسط نت لا (A0). عکس از کتاب ویوچیتا بوچور، به نقل از سایت سازندگان ویلن Andrew Finnigam and Pia Klaembt (Bucur, 2016, p. 330)

Figure 11. Modal analysis of natural vibrations at specific frequencies in the body of a Guarneri violin. **A.** Strong vibration at 509 Hz, the mode generated by the B1 note. **B.** Helmholtz fundamental vibration at 268 Hz, the mode generated by the A0 note. Photo from the book by Viochita Bucur, cited from the violin makers' website (Andrew Finnigam and Pia Klaembt). (Bucur, 2016, p. 330)

[DOI: 10.61882/jra.10.2.398]

Downloaded from jra-tabriziau.ir at 14:54 +0330 on Saturday December 13th 2025

۵. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی سازهای موسیقی به‌عنوان بازمانده‌های فناورانه‌ی فرهنگی، با ابعاد متنوع‌تری در مقایسه با سایر آثار تاریخی– فرهنگی روبرو هستیم. در این آثار به‌عنوان اشیائی عملکردی، نقش هر یک از اجزای فیزیکی دارای اهمیت ویژه‌ای است. در زمان نوازندگی تاثیرات فیزیکی که در تعامل با نوازنده است، باعث ایجاد و انتشار ارتعاشات فیزیکی و امواج صوتی (به‌عنوان وجه ملموس برونداد صوتی) شده و در نهایت وجه ناملموس برونداد صوتی با تاثیرگرفتن از شرایط زیبایی‌شناسی موسیقی در ذهن نوازنده و مخاطب تکامل می‌یابد. البته باید در نظر داشت که مواد متنوع مورد استفاده در سازهای گوناگون، ضمن ایفای نقش در روند ایجاد برونداد صوتی ساز، دچار تغییرات تدریجی و آسیب‌های متفاوتی نیز می‌شوند. به‌کارگیری روش‌های آزمایشگاهی در مطالعه ساختار و مواد متشکله و تاثیرات آکوستیکی هر یک از اجزا در درک بهتر وجوه ملموس برونداد صوتی در سازهای موسیقی دارای اهمیت است. انجام هر گونه مداخله‌ی حفاظت و مرمت در سازهای موسیقی تاریخی با توجه به در نظر داشتن عامل برونداد صوتی باید ضمن آگاهی از ساختار و نحوه‌ی عملکرد هر بخش از این سازها در رابطه با ارتعاشات صوتی صورت گیرد. لذا در این پژوهش ضمن معرفی، بررسی و آگاهی از ظرفیت‌های روش‌های آزمایشگاهی مطالعه‌ی رفتار و شناسایی مواد به‌کار رفته در بدنه‌ی سازهای زهی تاریخی در جهت برونداد صوتی، به تاثیر هر یک در حوزه‌های حفاظت و مرمت، باستان سنجی و اصالت سنجی این آثار پرداخته شد. کاربرد دیگر نتایج این آزمایشات، در بازتولید سازهای تاریخی جهت استفاده در مقاصد اجرا و مطالعات سبک‌شناسی موسیقی تاریخی است. روش‌های معرفی شده در این پژوهش به دو گروه آزمایشات در جهت شناخت ساختار مواد و اجزای متشکله در بدنه‌ی ساز و جهت شناخت رفتار آکوستیکی و مکانیکی تقسیم‌بندی شدند (جدول ۱). در مقایسه‌ی بین آزمایشات گروه نخست، استفاده از میکروسکوپ نوری بازتابی سه بعدی به‌عنوان روشی غیر تخریبی در تشخیص ساختار مواد به‌کار رفته در سازهای زهی تاریخی محسوب می‌شود که در مقایسه با سایر روش‌های مشابه دارای دقت بسیار بالایی است. همچنین برای مطالعه و تشخیص اجزای درونی سازهای زهی تاریخی می‌توان استفاده از توموگرافی رایانه‌ای را پیشنهاد نمود که هر جزء را به صورت مقاطعی با ضخامت بسیار کم به نمایش می‌گذارد. از مزایای این روش می‌توان به نمایش میزان تراکم قسمت‌های مختلف، تشخیص بخش‌های فرسوده و نیازمند مرمت و همچنین تشخیص مداخلات مرمتی دوره‌های قبل اشاره نمود. در بررسی گروه دوم، مطالعه‌ی مدهای ارتعاشی، راهکاری مفید در تشخیص عکس‌العمل مواد و اجزای به‌کار رفته، در مقابل ارتعاشات فیزیکی در ضمن تولید برونداد صوتی و همچنین آزمایش ویبرومتری لیزری داپلر راهکاری مناسب برای اندازه‌گیری برایند نیروهای فشاری و کششی در ساختمان سازهای زهی محسوب می‌شوند.

جدول ۱. بررسی اجمالی کاربرد آزمایشات در جهت شناسایی مواد و بررسی رفتارآکوستیکی اجزای متشکله در سازهای زهی تاریخی

Table 1. Overview of the application of tests to identify materials and investigate the acoustic behavior of components in historical stringed instruments

ردیف	نام آزمایش	رویکرد آزمایش		شرایط آزمایش			اهداف آزمایش		
		شناخت ساختار مواد و اجزای متشکله	شناخت رفتار آکوستیکی و مکانیکی	نمونه برداری به میزان محدود	آزمایش بر روی نمونه مشابه	غیر مخرب بر نمونه تاریخی	حفاظت و مرمت سازهای تاریخی	اصالت سنجی و ارزیابی سازهای مجهول	بازتولید سازها بر اساس نمونه های تاریخی
1	میکروسکوپ نوری بازتابی قابل حمل	*		*			*	*	*
2	میکروسکوپ نوری بازتابی سه بعدی	*				*	*	*	*
3	رادیوگرافی اشعه ایکس	*				*	*	*	*
4	توموگرافی رایانه ای	*				*	*	*	*
5	آزمایشات آکوستیک و اولتراسونیک		*	*	*			*	*
6	آزمایشات نوری برای اندازه گیری ارتعاشات		*			*		*	*
7	تداخل‌سنجی هولوگرافی		*			*	*	*	*
8	ارتعاش سنجی (ویبرومتری) لیزری داپلر		*			*	*	*	*
9	مطالعه‌ی مدهای ارتعاشی (آنالیز مودال)		*			*	*	*	*

یقیناً نتایج به‌دست آمده در هر یک از این آزمایشات به‌عنوان شناخت بخشی از ویژگی‌های موجود در یک ساز تاریخی است و با تجمیع این داده‌ها، ضمن در نظر گرفتن عوامل ملموس و ذهنی دخیل در برونداد صوتی، می‌توان به نتایج جامع دست یافت. امید

[DOI: 10.61882/jra.10.2.398]
Downloaded from jra-tabriziau.ir at 14:54 +0330 on Saturday December 13th 2025

است با ادامه‌ی پژوهش‌ها در شناخت مواد و مصالح و اتخاذ روش‌های بهینه در حفاظت و مرمت سازهای تاریخی ایران، در آینده شاهد استفاده از این روش‌ها در مراکز تحقیقاتی، موزه‌ها و مجموعه‌های نگهداری از سازهای تاریخی در داخل کشور باشیم.

سپاسگزاری: این مقاله برگرفته از رساله دوره دکتری نویسنده اول با عنوان: تبیین رویکردهای حفاظت از سازهای موسیقی با تأکید بر برونداد صوتی، تحت راهنمایی نویسنده دوم و با مشاوره نویسنده سوم در دانشگاه هنر ایران است.

مشارکت نویسندگان: در مقاله حاضر کلیه نویسندگان از سهم مشارکت یکسان برخوردار هستند.

تامین مالی: این پژوهش هیچ بودجه خارجی دریافت نکرده است.

تضاد منافع: نویسندگان هیچ گونه تضاد منافع را اعلام نمی کنند.

دسترسی به داده ها و مواد: مجموعه داده در صورت درخواست از نویسندگان در دسترس است.

پی‌نوشت‌ها

[1] Comité International des Musées et Collections d'Instruments de Musique

[۲] به سیر تحول تاریخی در مطالعه موضوعی خاص کرونولوژی گفته می شود.

[3] IAWA Committee, IAWA list of microscopic features for hardwood identification. IAWA Bulletin n.s., vol. 10 (3), 1989. & IAWA Committee. IAWA List of Microscopic Features for softwood identification. IAWA Journal, vol. 25 (1), 2004.

[4] Richter, H.G., M. Oelker & G. Krämer (2002): macroHOLZdata – Computer-gestützte makroskopische Holzartenbestimmung sowie Informationen zu Eigenschaften und Verwendung von Nutzhölzern. CD-ROM, Holzfachschule Bad Wildungen, Selbstverlag.

[5] Richter, H.G., Gembruch, K. & G. Koch 2005: CITESwoodID – Innovative medium for education, information and identification of CITES protected trade timbers. CD-ROM. Federal Agency for Nature Conservation (BfN) and Federal Research Centre for Forestry and Forest Products (BFH), self-published

منابع References

Awouters, M. (1982). X-raying musical instruments: a method in organological study. Revue belge de musicologie/Belgisch tijdschrift voor muziekwetenschap, 207-215. https://doi.org/10.2307/3687163

Bader, R., & Hansen, U. (2008). Modeling of musical instruments. In *Handbook of signal processing in acoustics* (pp. 419-446). New York, NY: Springer New York. DOI: 10.1007/978-0-387-30441-0_26

Barclay, R. L. (1997). The Care of Historic Musical Instruments. *Edinburgh: CIMCIM, CCI, and MGC.* https://lccn.loc.gov/2002416619

Barclay, R. L. (2005). The preservation and use of historic musical instruments: display case and concert hall. *London: Earth scan.* https://lccn.loc.gov/2004016419

Benveniste, É. (1969). Sémiologie de la langue (1). *Semiotica*, *1*(1), 1-12.
https://doi.org/10.1515/semi.1969.1.1.1

Bucur, V. (2016). *Handbook of materials for string musical instruments*. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-32080-9

Campbell, M. (1975). Dolmetsch: the man and his work. London: Hamish Hamilton. https://lccn.loc.gov/75332413

Chladni, E. F. F. (1787). *Entdeckungen über die Theorie des Klanges*. Zentralantiquariat der DDR.

Ferrari Barassi, E., & Laini, M. Per una carta Europea del restauro: conservazione, restauro e riuso degli strumenti musicali antichi: atti del convegno internazionale (Venezia, 16-19 ottobre 1985). *(No Title).*

Fioravanti, M., Di Giulio, G., & Signorini, G. (2017). A non-invasive approach to identifying wood species in historical musical instruments. *Journal of Cultural Heritage*, *27*, S70-S77. https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.05.012

Fioravanti, M., Goli, G., & Carlson, B. (2012). Structural assessment and measurement of the elastic deformation of historical violins: the case study of the Guarneri 'del Gesù'violin (1743) known as the 'Cannone'. *Journal of cultural heritage*, *13*(2), 145-153. https://doi.org/10.1016/j.culher.2011.07.005

Fuchs, T., Wagner, R., Kretzer, C., Scholz, G., Bär, F., Kirsch, S., ... & Germanisches (2019). Nationalmuseum, G. N. M. MUSICES - Musical Instrument Computed Tomography Examination Standard: The Final Report Featuring Methods for Optimization, Results of Measurements, Recommendations, Check- lists and Meta-Data Models. *9th Conference on Industrial Computed Tomography*. Padova, Italy: Special Issue of e-Journal of Nondestructive Testing (eJNDT). https://doi.org/10.58286/23696

Gétreau, F. (2001). The conservation of acoustical specifications: a long ignorance in public collections of ancient instruments. In *17th International Congress on Acoustics Proceedings* (pp. 391-396). Brüel & Kjaer. https://shs.hal.science/halshs-00009589

Haag, V., Koch, G., Zemke, V., Kirsch, S., & Kaschuro, S. (2017). 3D-Reflected-Light Microscopy as a Tool for Wood

[DOI: 10.61882/jra.10.2.398]

Downloaded from jra-tabriziau.ir at 14:54 +0330 on Saturday December 13th 2025

Identification in Historical Instruments. *Preservation of Wooden Musical Instruments Ethics, Practice and Assessment* (pp. 106-110). Musical Instruments Museum, Brussels.

Hutchins, C. M. (1978). The Physics of music: readings from Scientific American. *San Francisco. W.H. Freeman and Company.* https://lccn.loc.gov/77028461

Jansson, E. (2002). *Acoustics for violin and guitar makers* (pp. 16-18). Kungl. Tekniska högskolan, Department of Speech. Music and Hearing. http://www.speech.kth.se/music/acviguit4/part1.pdf

Karp, C. (1985). Musical instruments in museums. *Museum Management and Curatorship*, *4*(2), 179-182. https://doi.org/10.1080/09647778509514969

Kevin, P. (2008). A musical instrument fit for a queen: the metamorphosis of a Medieval citole. *British Museum technical research bulletin*, *2*, 13-27.

Koster, J. (2016). The encyclopaedic expertise of the instrument conservator.. *Early Music*, 44(2), 345–347. https://doi.org/10.1093/em/caw033

Lawson, C., & Stowell, R. (2004). *The historical performance of music: an introduction.* Cambridge University Press. http://www.cambridge.org/0521621933

Molin, N. E., Lindgren, L. E., & Jansson, E. V. (1988). Parameters of violin plates and their influence on the plate modes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *83*(1), 281-291. https://doi.org/10.1121/1.396430

Pollens, S. (2015). *the manual of musical instrument conservation.* Cambridge University Press.
https://doi.org/10.1108/RR-12-2016-0282.

Portillo, R. (1996). Modern techniques for the nondestructive examination of musical instruments *WAAC Newsletter,*, 20-35.
https://cool.culturalheritage.org/waac/wn/wn18/wn18-1/wn18-108.html

Richardson, B. E. (2010). Guitar making-the acoustician's tale. *Proceedings of the Second Vienna Talk., Vienna, Austria*, 125-128.

Vandervellen, P. (2017). Preservation of Wooden Musical Instruments - Ethics, Practice and Assessment - 4th Annual Conference. Brussels: Fedopress. www.woodmusick.org

Watson, J. (2006). Instrument and document: balancing values in the conservation of musical instruments. In *Wooden Artifacts Group Postprints 2006* (pp. 18-25).