میراث جنوب غرب آسیا
HERITAGE OF SOUTHWEST ASIA

تحلیل روایت کاربرد صدا در یافتن رخنهٔ دیوار در هفت پیکر نظامی از منظر تاریخ فناوری[۱]

یاسر حمزوی[۱]* نیایش خاکسار باغان[۲]

۱- دانشیار پژوهشکدهٔ میراث معماری و شهری، پژوهشگاه میراث فرهنگی و گردشگری، تهران، ایران
y.hamzavi@richt.ir
0000-0002-3504-0534

۲- دانشجوی دورهٔ دکتری تخصصی، رشتهٔ مرمت اشیاء تاریخی و فرهنگی، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران
0009-0006-2959-6874

چکیده

در طول تاریخ، انسان همواره از ویژگی‌های فیزیکی صوت برای شناخت محیط پیرامون خود بهره برده است. در ادبیات کلاسیک فارسی عناصری همچون «صدا»، «پژواک» و «بازگشت ندا» در شمار قابل توجهی از متون، به ویژه در توصیف فضاهایی همانند کوه‌ها و غارها حضوری پررنگ داشته و در اغلب مواقع کاربردی استعاری، حماسی و یا عرفانی میابند. در یکی از روایت‌های *هفت‌پیکر*، نظامی صحنه‌ای را توصیف می‌کند که در آن قهرمان، با ایجاد صدا در پیرامون باروی یک دژ و بررسی تغییر طنین آن، محل رخنه یا فضای خالی را تشخیص می‌دهد. این توصیف، برخلاف کاربردهای استعاری رایج پژواک در شعر فارسی، زنجیره‌ای منطقی شامل تولید صدا، تحلیل بازتاب آن و استنتاج وجود فضای پنهان را ارائه می‌دهد و از این منظر، شباهت قابل توجهی با اصول آزمون‌های آکوستیکی مورد استفاده در ارزیابی غیرمخرب سازه‌ها دارد. این پژوهش از نوع بنیادی و با رویکردی میان‌رشته‌ای، به روش توصیفی-تحلیلی و مبتنی بر مطالعات کتابخانه‌ای انجام شده است. واحد اصلی تحلیل در این پژوهش، ابیاتی از هفت‌پیکر نظامی است که در آن تولید صدا، جست و جوی صوتی در پیرامون بارو و آشکار شدن رخنه در ارتباط مستقیم روایی با یکدیگر قرار گرفته‌اند. بررسی برخی متون شناخته شده نشان می‌دهد که کاربرد عملی صدا برای شناخت فضای پنهان در ادبیات فارسی بسیار نادر است. همچنین، مطالعات انجام‌شده درباره *هفت‌پیکر* عمدتاً بر جنبه‌های ادبی، ساختار روایی، نمادپردازی، رنگ‌شناسی، نجوم و اندیشه‌های فلسفی و عرفانی اثر متمرکز بوده و این بخش از منظومه از منظر تاریخ فناوری، دانش تجربی معماری و کاربرد روش‌های آکوستیکی در شناخت سازه‌ها به‌طور مستقل بررسی نشده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که روایت نظامی را می‌توان، بر پایه متون بررسی‌شده، یکی از شاهدین شناخته‌شده در ادبیات فارسی درباره کاربرد عملی صدا برای شناسایی رخنه یا فضای پنهان در دیوار دانست و این روایت می‌تواند افق تازه‌ای برای مطالعات میان‌رشته‌ای در حوزه ادبیات فارسی، تاریخ فناوری، باستان‌آواشناسی و حفاظت میراث فرهنگی بگشاید.

واژگان کلیدی

باستان‌آواشناسی، آزمون‌های آکوستیک، حفاظت و مرمت، هفت‌پیکر، نظامی گنجوی

---

[۱] نسخه انگلیسی این مقاله با عنوان زیر در همین شماره نشریه به منتشر شده است

Analyzing the Narrative Use of Sound to Detect a Breach in the Wall in Nizami's *Haft Paykar*: From the Perspective of the History of Technology

پذیرفته شده آماده انتشار

۱.مقدمه

در طول تاریخ، انسان همواره از ویژگی‌های فیزیکی صوت برای شناخت محیط پیرامون خود بهره برده است. تغییر در طنین، شدت و بازتاب امواج صوتی می‌تواند اطلاعات ارزشمندی درباره وجود فضاهای توخالی، حفره‌ها، شکاف‌ها و ناپیوستگی‌های درون یک سازه فراهم کند؛ اصلی که امروزه مبنای بسیاری از روش‌های آزمون‌های غیرمخرب (Non-Destructive Testing; NDT) در حفاظت آثار تاریخی، مهندسی عمران و ارزیابی سلامت سازه‌ها به شمار می‌رود (Bungey & Grantham, 2006; ASTM E1002-23). اگرچه این فناوری‌ها در قالب دانش مهندسی نوین صورت‌بندی شده‌اند، شواهد تاریخی نشان می‌دهد که شناخت تجربی رفتار صوت در برخورد با مصالح و سازه‌ها، پیشینه‌ای بسیار کهن دارد و استادکاران، معماران و صنعتگران در تمدن‌های مختلف از تغییر طنین صدا برای ارزیابی کیفیت مصالح، تشخیص فضاهای توخالی و بررسی وضعیت سازه‌ها استفاده می‌کرده‌اند (Valière & Palazzo-Bertholon, 2019).

در دهه‌های اخیر، توسعه حوزهٔ باستان‌آواشناسی (Archaeoacoustics) نیز نشان داده است که ویژگی‌های آکوستیکی فضاهای تاریخی تنها جنبه‌ای تصادفی از معماری نبوده، بلکه در بسیاری از موارد بخشی از دانش تجربی سازندگان و کاربران بناها را تشکیل می‌داده است (Till, 2017). باستان‌آواشناسی شاخه‌ای میان رشته‌ای است که به مطالعهٔ ویژگی‌ها و تجربه‌های صوتی مرتبط با فضاها، بناها و محوطه‌های تاریخی و باستانی می‌پردازد و از این طریق، رابطهٔ میان صوت، معماری و کارکردهای انسانی را بررسی می‌نماید(Navas-Reascos et al., 2023; Díaz-Andreu, 2025). لازم به ذکر است که پژوهش پیش رو، باستان‌آواشناسی را نه به عنوان روش مستقیم سنجش رخنه، بلکه به عنوان یکی از چارچوب‌های میان‌رشته‌ای به جهت بررسی ارتباط میان صوت، فضا و معماری تاریخی مورد استفاده قرار داده است.

در ادبیات کلاسیک فارسی «صدا»، «پژواک» و «بازگشت ندا» در شمار قابل توجهی از متون، به ویژه در توصیف فضاهایی همانند کوه‌ها و غارها نقشی پررنگ داشته و در اغلب مواقع کاربردی استعاری، حماسی و یا عرفانی میابند. شاعران بزرگی همچون فردوسی، سنایی، عطار، مولوی، سعدی و حافظ بارها از انعکاس صدا در کوه، غار یا دشت برای آفرینش مضامین حماسی، عرفانی و اخلاقی بهره گرفته‌اند. با این حال، در این آثار، بازتاب صوت عمدتاً کارکردی استعاری و زیبایی‌شناختی دارد و ابزاری برای شناخت ویژگی‌های فیزیکی محیط نیست. ازاین‌رو، میان کاربرد ادبی پژواک و کاربرد عملی آن در تشخیص ساختارهای معماری باید تمایز قائل شد. بررسی مقدماتی منابع و نمونه‌های در دسترس همچون شاهنامهٔ فردوسی، بوستان و گلستان سعدی و... نمایانگر آنند که کاربرد صدا به‌منظور شناسایی یک فضای پنهان یا رخنه در سازهٔ معماری(دست‌کم در نمونه‌های بررسی شده) بسیار کم‌سابقه است. به همین دلیل روایت هفت‌پیکر نظامی یکی از نمونه‌های قابل توجه و ارزشمند در این زمینه محسوب می‌شود. در یکی از روایت‌های هفت‌پیکر، نظامی صحنه‌ای را توصیف می‌کند که در آن قهرمان، با ایجاد صدا در پیرامون باروی یک دژ و جست‌و جوی پاسخ صوتی در امتداد بارو، محل تقریبی رخنه‌ای پنهان را شناسایی می‌نماید؛ تفسیری که می‌توان ان را از منظر و زاویهٔ دید برخی اصول آزمون‌های آکوستیکی معاصر، دارای شباهت‌های مفهومی دانست. این امر، برخلاف کاربردهای رایج پژواک در شعر فارسی، نه یک استعاره، بلکه روایتی از یک فرایندی است که در آن صدا در روند شناسایی رخنه نقشی کاربردی ایفا می‌نماید و می‌توان آن را نوعی شناسایی(تشخیص) غیرمستقیم دانست. از دیدگاه تاریخ فناوری، این روایت با اصول شناخته‌شده آزمون‌های ضربه‌ای و آکوستیکی برای شناسایی فضاهای توخالی همخوانی مفهومی دارد؛ روشی که امروزه نیز در ارزیابی غیرمخرب بناهای تاریخی و تشخیص جداشدگی لایه‌ها و حفره‌های داخلی به کار می‌رود (ASTM E1002-23; Bungey & Grantham, 2006).

با وجود اهمیت این روایت، مطالعات انجام‌شده درباره *هفت‌پیکر* عمدتاً بر جنبه‌های ادبی، ساختار روایی، نمادپردازی، رنگ‌شناسی، نجوم، اندیشه‌های فلسفی و عرفانی اثر متمرکز بوده‌اند (Meisami, 1987; de Blois, 2002). همچنین پژوهش‌های مربوط به نظامی، هرچند دانش او در زمینه‌های نجوم، معماری، پزشکی و حکمت را مورد توجه قرار داده‌اند، این بخش از منظومه را از منظر تاریخ فناوری صوت، مهندسی معماری یا کاربرد روش‌های تجربی تشخیص فضاهای پنهان بررسی نکرده‌اند. در مقابل، پژوهش‌های حوزهٔ باستان‌آواشناسی نیز عمدتاً بر ویژگی‌های صوتی فضاهای آیینی، غارها، آمفی‌تئاترها و بناهای تاریخی متمرکز بوده و ارتباط میان این حوزه و شواهد موجود در ادبیات کلاسیک فارسی کمتر مورد توجه قرار گرفته است (McMurray, 2021; Till, 2017). ازاین‌رو، مطالعه این ابیات می‌تواند خلأیی مهم در پژوهش‌های میان‌رشته‌ای میان ادبیات فارسی، تاریخ مهندسی، باستان‌آواشناسی و حفاظت میراث فرهنگی را پر کند و نشان دهد که ادبیات کلاسیک فارسی، افزون بر ارزش‌های ادبی، دربردارنده بازتاب‌هایی از دانش فنی و تجربی نیز بوده است؛ دانشی که در این مورد

خاص، استفاده از تغییر طنین صدا برای شناسایی فضای پنهان در یک سازه دفاعی را به تصویر می‌کشد و از این منظر، شایسته بررسی دقیق‌تر در چارچوب تاریخ فناوری و معماری ایران است.

بررسی و تحلیل روایت شناسایی رخنهٔ در باروی دژ در هفت‌پیکر نظامی و تبیین جایگاه صدا در این روایت از نقطه نظر ادبی، تاریخی و تاریخ فناوری است. پژوهش پیش رو می‌کوشد به این پرسش پاسخ دهد که نظامی در این بخش از منظومهٔ خود صدا را چگونه در فرایند شناسایی رخنه به کار می‌گیرد و این روایت از چه جهاتی می‌تواند با برخی اصول کلی روش‌های آکوستیکی تشخیص ناپیوستگی‌ها و فضاهای پنهان در سازه‌ها شباهت مفهومی داشته باشد؟ پرسش دیگر آن است که تا چه اندازه می‌توان از این روایت برای طرح فرضی دربارهٔ وجود نوعی دانش تجربی مرتبط با رفتار صوت در سنت معماری و دژسازی دورهٔ میانه ایران استفاده کرد، بدون آنکه مفاهیم و فناوری‌های آکوستیکی معاصر به متن تاریخی تحمیل شود. بر این اساس، فرض اصلی پژوهش آن است که روایت مورد بررسی، دست‌کم در سطح متن ادبی، صدا را به عنوان عنصری کارکردی در فرایند شناسایی رخنه به کار می‌گیرد. با این وجود، نسبت دادن آن به یک روش فنی مشخص یا یک فناوری آکوستیکی به معنای امروزی نیازمند شواهد تاریخی مستقل و مستدل است.

۲.پیشینهٔ پژوهش

رابطه میان صوت، معماری و شناخت ویژگی‌های پنهان سازه‌ها در سال‌های اخیر به یکی از موضوعات میان‌رشته‌ای در حوزه‌های باستان‌شناسی، تاریخ معماری، حفاظت میراث فرهنگی و آکوستیک تبدیل شده است. پژوهش‌های مرتبط با «باستان‌آواشناسی» (Archaeoacoustics) نشان داده‌اند که فضاهای معماری تاریخی تنها محیط‌هایی بصری نبوده‌اند، بلکه ویژگی‌های آکوستیکی آن‌ها نیز بخشی از طراحی، کارکرد و تجربه انسانی از بنا را شکل می‌داده است. در این پژوهش یک لپ‌تاپ برای تولید سیگنال صوتی استفاده شده است؛ نرم‌افزار Apple Logic Pro – Impulse Response Utility یک سیگنال سینوسی جاروب‌شونده از 20 Hz تا ۲۰ kHz تولید می‌کرد. سیگنال از طریق یک بلندگوی قابل‌حمل B&O Beolit پخش می‌شد. برای دریافت صدا از دو میکروفون همه‌جهته DPA 4006 استفاده شده است. موقعیت بلندگو و میکروفون در نقاط مختلف فضای باستانی تغییر داده شده و سپس داده‌ها با نرم‌افزارهای Odeon، Sonic Visualiser و Audacity تحلیل شده‌اند (Till, 2017)(شکل ۱).

اورتگا و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی با تمرکز بر کاربرد توموگرافی صوتی در دیوارهای بنایی تاریخی، قابلیت این روش را برای ارزیابی وضعیت درونی و مکانیکی دیوار بررسی کردند. آنان با اعمال بارگذاری کنترل‌شده بر نمونه‌های دیوار سنگی و ثبت سرعت انتشار امواج صوتی در مسیرهای متعدد، تصاویر توموگرافیک از ساختار داخلی دیوار به دست آوردند. نتایج نشان داد که تغییرات سرعت انتشار امواج نه‌تنها با میزان آسیب و ناپیوستگی‌های داخلی، بلکه با وضعیت تنش و تغییرات مکانیکی دیوار نیز ارتباط دارد. این پژوهش نشان می‌دهد که امواج صوتی می‌توانند، فراتر از تجربه شنیداری، به ابزاری غیرمخرب برای آشکارسازی و پایش ویژگی‌های پنهان سازه‌های تاریخی تبدیل شوند (Ortega et al., 2024)(شکل ۲).

در همین راستا، مفهوم «معماری شنیداری» یا «آواشناسی معماری» (Architectural Acoustics) و به‌ویژه نظریهٔ Teichoacoustics (McMurray, 2021) نیز در این زمینه از آن جهت برای پژوهش حاضر اهمیت دارد که بر نقش دیوار و عناصر معماری در شکل‌دهی به رفتار صوتی تاکید می‌نماید. با این وجود، این مفهوم در پژوهش حاضر به عنوان چارچوبی برای تبیین رفتار واقعی دیوار دژ به کار نمی‌رود، بلکه صرفاً به منظور نشان دادن اهمیت متقابل صوت و عنصر معماری در مطالعات میان‌رشته‌ای مورد توجه است. از سوی دیگر، در حوزه حفاظت و ارزیابی بناهای تاریخی، روش‌های غیرمخرب مبتنی بر صوت و ارتعاش، از جمله آزمون‌های آکوستیکی و ضربه‌ای، امروزه برای شناسایی فضاهای خالی، جداشدگی لایه‌ها، ترک‌های داخلی و ناپیوستگی‌های مصالح به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند و مبنای علمی آن‌ها بر تغییر ویژگی‌های انتشار و بازتاب امواج صوتی در مجاورت فضاهای توخالی است (Valière & Palazzo-Bertholon, 2019). با وجود این پیشینه علمی، پژوهش‌های انجام شده در بررسی متون کلاسیک فارسی نشان می‌دهد که کاربرد عملی صدا برای شناخت فضای پنهان در آثار ادبی بسیار

پذیرفته شده آماده انتشار

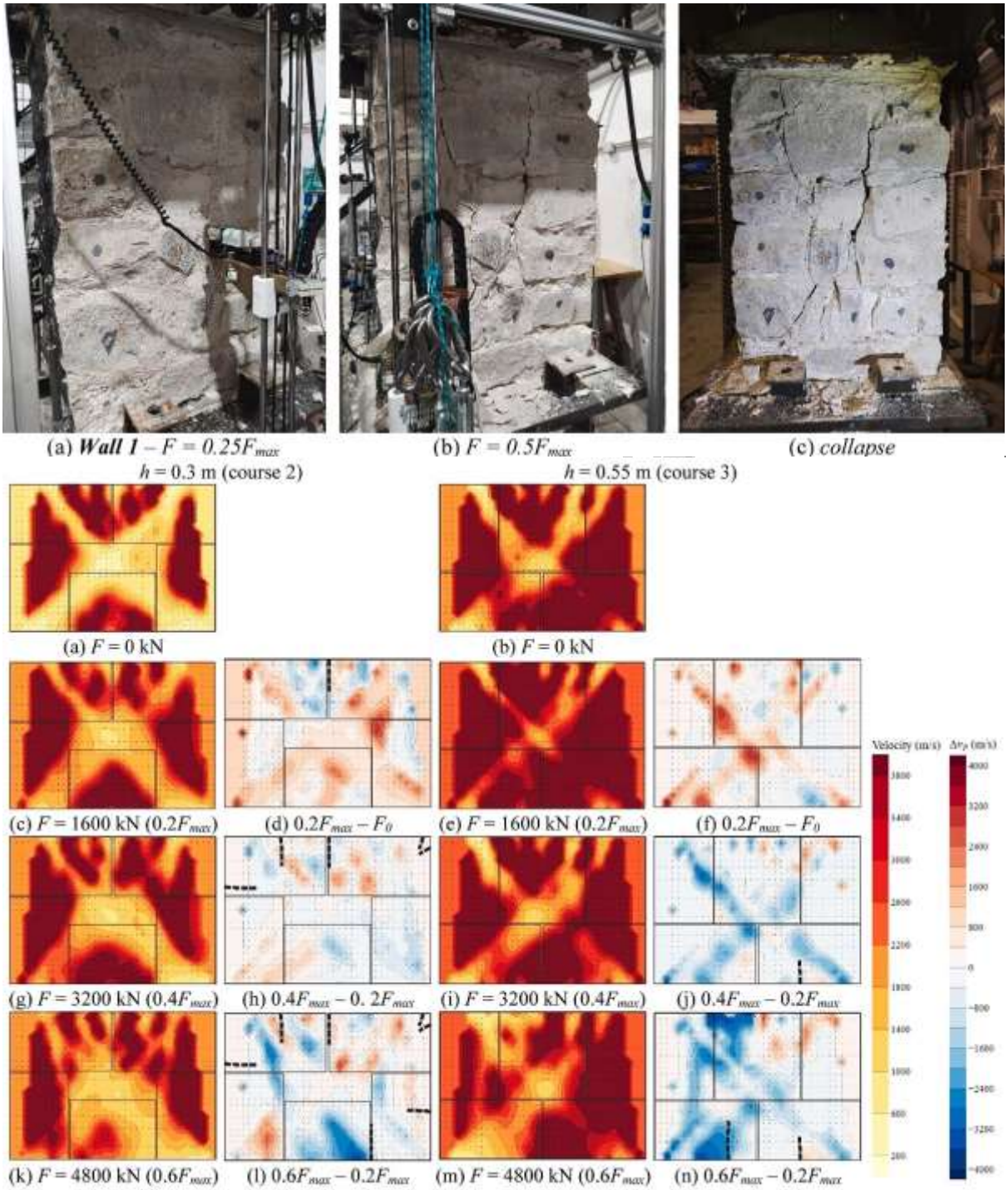
نادر است و برخی شاعران از پژواک و بازگشت صدا در کوه و غار عمدتاً به‌شکل استعاری بهره برده‌اند و نه به‌عنوان روشی برای تشخیص ویژگی‌های فیزیکی سازه‌ها. در میان متون شناخته‌شده، منظومۀ هفت‌پیکر نظامی گنجوی جایگاهی منحصربه‌فرد دارد؛ زیرا در یکی از روایت‌های آن، قهرمان با ایجاد صدا و بررسی تغییر طنین در پیرامون باروی یک دژ، محل رخنه یا فضای خالی را شناسایی می‌کند:



شکل ۱. مطالعه فنی معماری صخره‌ای به کمک صوت. این فضای معماری چگونه صدا را تولید، تقویت، تشدید، منتشر و بازتاب می‌کند؟(Till, 2017)

در همین راستا، مفهوم «معماری شنیداری» یا «آواشناسی معماری» (Architectural Acoustics) و به‌ویژه نظریۀ Teichoacoustics (McMurray, 2021) نیز در این زمینه از آن جهت برای پژوهش حاضر اهمیت دارد که بر نقش دیوار و عناصر معماری در شکل‌دهی به رفتار صوتی تاکید می‌نماید. با این وجود، این مفهوم در پژوهش حاضر به عنوان چارچوبی برای تبیین رفتار واقعی دیوار دژ به کار نمی‌رود، بلکه صرفاً به منظور نشان دادن اهمیت متقابل صوت و عنصر معماری در مطالعات میان‌رشته‌ای مورد توجه است. از سوی دیگر، در حوزه حفاظت و ارزیابی بناهای تاریخی، روش‌های غیرمخرب مبتنی بر صوت و ارتعاش، از جمله آزمون‌های آکوستیکی و ضربه‌ای، امروزه برای شناسایی فضاهای خالی، جداشدگی لایه‌ها، ترک‌های داخلی و ناپیوستگی‌های مصالح به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند و مبنای علمی آن‌ها بر تغییر ویژگی‌های انتشار و بازتاب امواج صوتی در مجاورت فضاهای توخالی است (Valière & Palazzo-Bertholon, 2019). با وجود این پیشینه علمی، پژوهش‌های انجام شده در بررسی متون کلاسیک فارسی نشان می‌دهد که کاربرد عملی صدا برای شناخت فضای پنهان در آثار ادبی بسیار نادر است و برخی شاعران از پژواک و بازگشت صدا در کوه و غار عمدتاً به‌شکل استعاری بهره برده‌اند و نه به‌عنوان روشی برای تشخیص ویژگی‌های فیزیکی سازه‌ها. در میان متون شناخته‌شده، منظومۀ هفت‌پیکر نظامی گنجوی جایگاهی منحصربه‌فرد دارد؛

زیرا در یکی از روایت‌های آن، قهرمان با ایجاد صدا و بررسی تغییر طنین در پیرامون باروی یک دژ، محل رخنه یا فضای خالی را شناسایی می‌کند:



شکل ۲. شبیه‌سازی دیوارهای تاریخی، بررسی فنی به کمک صوت؛ وارد کردن فشار و ثبت تغییرات در جزئیات به کمک تکنولوژی صوت(Ortega et al., 2024)

«وان صدا را به گرد بارو جست / چون صدا رخنه را کلید آمد، از سر رخنه در پدید آمد» (نظامی، هفت‌پیکر، تصحیح وحید دستگردی).

این روایت، برخلاف کاربردهای رایج، زنجیره‌ای منطقی شامل تولید صدا، تحلیل بازتاب آن و استنتاج وجود فضای پنهان را ارائه می‌دهد و از این منظر، شباهت قابل توجهی با اصول آزمون‌های آکوستیکی مورد استفاده در ارزیابی غیرمخرب سازه‌ها دارد. با وجود اهمیت این توصیف، بررسی منابع نظامی‌پژوهی نشان می‌دهد که مطالعات انجام‌شده درباره هفت‌پیکر نظامی عمدتاً بر جنبه‌های ادبی، ساختار روایی، نمادشناسی، رنگ‌شناسی و مضامین عرفانی اثر متمرکز بوده‌اند و این بخش از منظومه از منظر تاریخ فناوری، دانش تجربی معماری یا تاریخ کاربرد روش‌های آکوستیکی در شناخت سازه‌ها به‌طور مستقل بررسی نشده است (de Blois, 2002).

۳.روش‌شناسی

این پژوهش از نوع بنیادی و با رویکردی میان‌رشته‌ای، به روش توصیفی–تحلیلی و مبتنی بر مطالعات کتابخانه‌ای انجام شده است. واحد اصلی تحلیل در این پژوهش، ابیاتی از هفت‌پیکر نظامی است که در آن تولید صدا، جست و جوی صوتی در پیرامون بارو و آشکار شدن رخنه در ارتباط مستقیم روایی با یکدیگر قرار گرفته‌اند. انتخاب ابیات بر اساس سه معیار انجام شده است؛ ۱. حضور صریح عنصر صوت و یا ابزار تولید صوت ۲. ارتباط مستقیم صدا با جست و جوی رخنه یا گشودن مسیر ۳. وجود توالی روایی میان تولید صدا، جست و جو و آشکار شدن رخنه. در مرحلهٔ اول به بررسی واژگان «صدا»، «جست»، «رخنه»، «کلید» و توالی رویدادها پرداخته شده است. در ادامه به منظور انجام تحلیل تاریخی به بررسی اینکه آیا منابع مستقل تاریخی و یا فنی، شواهدی از استفاده تجربی از ضربه برای تشخیص وضعیت مصالح و سازه‌ها ارائه داده‌اند یا خیر پرداخته شده است. در نهایت مقایسه محدود و غیر همسان‌گونه میان منطق روایت و اصل کلی تشخیص غیرمستقیم ناپیوستگی‌ها از طریق پاسخ صوتی، بدون ادعای اینکه روش جدید در دورهٔ نظامی وجود داشته است ارائه شده است.

۴.نتایج و بحث

نگاهی بر کاربرد صدا در آسیب‌شناسی سازهٔ معماری و آرایه‌های معماری

بناهای تاریخی اغلب دارای الگوهای آسیبی همچون ترک‌خوردگی گسترده و پراکنده‌ای هستند که ناشی از عوامل گوناگونی همچون کاربری اولیه بنا، روش ساخت و تاریخچه بارگذاری آن‌ها است. روش‌های آزمون غیرمخرب که به‌عنوان سیستم‌های پایش در مکان (In Situ Monitoring) به کار گرفته می‌شوند، امکان ارزیابی دقیق و قابل‌اعتماد وضعیت سلامت و میزان ماندگاری این سازه‌ها و همچنین بررسی روند تغییرات آن در بازه‌های زمانی را فراهم می‌کنند (Lacidogna et al., 2015). تکنیک‌های آکوستیک یکی از رایج‌ترین روش‌های مورد استفاده در چند دههٔ اخیر هستند که اطلاعات مهمی دربارهٔ کیفیت و وضعیت حفاظتی عناصر مورد مطالعه در اختیار متخصصان قرار می‌دهند. مصالح و سازه‌های مختلف و همچنین آسیب‌هایی همچون ترک‌ها و حفره‌های داخلی، در برابر انتشار امواج آکوستیک رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. درنتیجه، از همین تفاوت رفتار می‌توان برای ارزیابی کیفیت ساختمان‌ها و مصالح، شناسایی ناهمگنی‌های موجود، آسیب‌ها به‌ویژه ترک‌ها، جداشدگی اندودها در دیوارها و کنترل اثربخشی اقدامات درمانی استفاده کرد. این آزمون‌ها، مبتنی بر انتشار امواج صوتی و فراصوتی درون مادهٔ مورد مطالعه و سپس اندازه‌گیری سرعت انتقال امواج است. انواع روش‌های اجرای تکنیک‌های سنجش آکوستیک شامل؛ انتقال صوتی، برش‌نگاری صوتی، انعکاس صوتی و انعکاس فراصوتی می‌شوند (موذن و همکاران، ۱۴۰۱). یکی دیگر از این روش‌ها «انتشار آکوستیک» است که با هدف آشکارسازی و تحلیل امواج الاستیک ناشی از تشکیل و رشد ریز ترک‌ها به کار برده می‌شود (Manuello et al., 2024). پژوهش‌های انجام گرفته در این حوزه شامل مطالعات انتشار آکوستیک(AE) بر یکی از ستون‌های سنگی بخش باربر معبد آتنا در شهر سیراکوز واقع در جزیره سیسیل ایتالیا (Lacidogna et al., 2015)، ثبت و تحلیل شاخص‌های کیفی رفتاری سازه‌ای مجموعهٔ تاریخی سانتا ماریا دله گراتزی (Di Gennaro et al., 2025)، تحلیل رابطهٔ میان میزان رطوبت و نوع و مقدار نمک‌های تبلور یافته در اسکلت‌های چوبی با ویژگی‌های سیگنال‌های انتشار آکوستیکی (Bertolin et al., 2020)، پایش و بررسی استقامت طبقه فوقانی یک بنای قرن هفدهم به دلیل تغییر کاربری (Carpinteri et al., 2007)، و بررسی و پایش طولانی مدت دیوارهای شهر دیاربکر در ترکیه با استفاده از تکنیک‌های فراصوت (Işık et al., 2020) از جمله این مواردند. همانطور که در شناسایی آسیب‌های سازه‌ای و مصالح ساختمانی، استفاده از روش‌های غیر تخریبی امواج صوتی رواج دارد، می‌توان آن‌ها را جهت

مطالعه و بررسی آسیب‌های پنهان در لایه‌های پسین آرایه‌های معماری نیز به کار بست. نظر به اینکه آرایه‌های معماری‌ای همچون دیوارنگاره‌ها، آرایه‌های گچی، آجر و کاشی که قالباً با استفاده از مصالح معماری خلق می‌شوند ساختاری لایه لایه داشته و تنها امکان رویت لایه بیرونی برای بیننده امکان‌پذیر است، بهره‌گیری از این آزمون‌ها با هدف شناسایی و مطالعه آسیب‌های بوقوع پیوسته در لایه‌های زیرین، بسیار در ارائهٔ اقدامات حفاظتی مفید فایده خواهند بود. از جملهٔ این موارد مربوط به آگاهی به موقع از شکل‌گیری آسیب و ترسیم الگوهای پیش‌رونده بویژه در ترک‌های پنهان است که می‌تواند منجر به پیش‌بینی تمهیدات حفاظتی و انجام اقدامات مرمتی در زمان لازم شود.

مرور این روش‌ها نمایانگر آنند که در کاربردهای معاصر، اطلاعات مربوط به وضعیت درونی یا لایه‌ای سازه می‌تواند از طریق پاسخ آن به تحریک صوتی یا ارتعاشی و با تفسیر تفاوت‌های مشاهده شده به دست آید. این اصل کلی، زمینه‌ای برای مقایسه محتاطانه با روایت هفت‌پیکر نظامی فراهم می‌نماید. با این تاکید که روایت نظامی فاقد جزئیات مربوط به اندازه‌گیری، ثبت سیگنال و تحلیل کمی است و بنابراین نمی‌توان آن را معادل یک روش آزمون غیر مخرب مدرن دانست.

۵.تحلیل روایت نظامی از کاربرد صدا در شناسایی رخنهٔ دیوار

بخش مورد بررسی از داستان «نشستن بهرام روز سه‌شنبه در گنبد سرخ و افسانه گفتن دختر پادشاه اقلیم چهارم» در *هفت‌پیکر* نظامی، از منظر تاریخ فناوری و دانش تجربی، یکی از نمونه‌های قابل توجه در ادبیات کلاسیک فارسی به‌منظور بررسی رابطهٔ میان صدا و شناخت یک ویژگی پنهان در سازه به شمار می‌آید. نظامی در این روایت، برخلاف بسیاری از کاربردهای استعاری «صدا» و «پژواک» در شعر فارسی، از صوت به‌عنوان ابزاری عملی برای حل یک مسئله مهندسی بهره می‌گیرد. ساختار منطقی روایت نشان می‌دهد که شاعر نه صرفاً در پی آفرینش تصویری ادبی، بلکه در حال بازنمایی یک روش تجربی شناخته‌شده است. بخشی از ابیات شعر که مستقیماً مربوط به این پژوهش است، در این قسمت ارائه می‌شود (نظامی، هفت‌پیکر، تصحیح وحید دستگردی):

پس ره آن حصار پیش گرفت — پی تدبیر کار خویش گرفت
چون به نزدیک آن طلسم رسید — رخنه‌ای کرد و رقیه‌ای بدمید
همه نیرنگ آن طلسم بکند — برگشاد آن طلسم را پیوند
هر طلسمی که دید بر سر راه — همه را چنبر او فکند به چاه
چون ز کوه آن طلسم‌ها برداشت — تیغ‌ها را به تیغ کوه گذاشت
بر در آن حصار شد در حال — دُهُلی را کشید زیر دوال
وآن صدا را به گرد بارو جُست — کَند چون جای کنده بود درست
چون صدا رخنه را کلید آمد — از سر رخنه، دَر پدید آمد
زین حکایت چو یافت آگاهی — کس فرستاد ماه خرگاهی
گفت کای رخنه‌بند راه‌گشای — دولتت بر مراد راهنمای
چون گشادی طلسم را ز نخست — درِ گنجینه یافتی به درست

توالی رویدادها در این بخش از داستان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. قهرمان پس از رسیدن به باروی دژ، نه با نیروی نظامی، حفاری یا جست‌وجوی چشمی، بلکه با ایجاد یک محرک صوتی، به بررسی محیط می‌پردازد. در روایت، «دهل» ابزار ایجاد صدا است و انتخاب آن در سطح متن، مقدمه‌ای به‌منظور جست‌و جوی رخنه در پیرامون بارو فراهم می‌نماید. با این وجود، از متن نمی‌توان مشخصات فیزیکی صدای تولید شده، از جمله شدت، فرکانس، و یا میزان نفوذ آن در مصالح را تعیین کرد. از این رو، هرگونه تفسیر فیزیکی درباره ویژگی‌های صوت دهل فراتر از شواهد مستقیم متن خواهد بود. اما انتخاب چنین ابزاری با اصول شناخته‌شده انتشار امواج صوتی در مصالح ساختمانی سازگار است.

مرحله بعدی روایت، مهم‌ترین بخش آن است: ***وآن صدا را به گرد بارو جست / کَند چون جای کنده بود درست***

در این دو مصراع، فعل «جستن» به «صدا» تعلق گرفته است، نه به «رخنه». این نکته از نظر معناشناسی اهمیت اساسی دارد. از ساختار این مصراع می‌توان چنین استنباط کرد که موضوع جست‌وجو، محدود به رخنه نمی‌شود. بلکه صدا و پژواک آن در امتداد بارو موضوع محوری است. بنابراین صدا در روایت نقش واسطه‌ای برای دستیابی به اطلاعاتی درباره وضعیت بارو را دارد. به بیان دیگر، «صدا» به ابزار تشخیص تبدیل می‌شود. عبارت «کند چون جای کنده بود درست» در سطح روایت نشان می‌دهد که در نقطه‌ای از پیرامون بارو، وضعیت متفاوتی وجود داشته که با رخنهٔ مورد نظر ارتباط پیدا می‌کند. با این این وجود، متن مشخص نمی‌کند که این تفاوت دقیقاً ناشی از فضای خالی، ضعف مصالح، گسست لایه‌ها و یا نوع دیگری از ناپیوستگی بوده است. در واقع، شاعر فرایندی سه‌مرحله‌ای را توصیف می‌کند: تولید صوت، مقایسه پاسخ آکوستیکی نقاط مختلف بارو و استنتاج محل ناپیوستگی سازه. این برداشت در بیت بعدی به صراحت تأیید می‌شود. تعبیر «صدا رخنه را کلید آمد» یکی از توصیف‌های مناسب کارکرد تشخیصی صوت در متون کلاسیک فارسی است. نظامی نمی‌گوید صدا رخنه را آشکار کرد، بلکه آن را «کلید» رخنه می‌نامد؛ یعنی صدا وسیله دستیابی به اطلاعاتی است که با مشاهده مستقیم قابل حصول نیست. از منظر مفهومی، می‌توان میان این روایت و منطق کلی برخی روش‌های تشخیص غیر مخرب شباهتی مشاهده نمود. چراکه در هر دو مورد مسئله، قابل مشاهده مستقیم نیست و از طریق پاسخ ناشی از تحریک، به صورت غیرمستقیم دربارهٔ آن استنباط می‌شود. با این وجود این شباهت نمی‌بایست به معنای وجود یا شناخت یک روش آزمون غیر مخرب به معنای امروزی در دورهٔ نظامی تلقی شود. در آزمون‌های ضربه‌ای و آکوستیکی معاصر نیز اصل بر همین مبنا استوار بوده و اختلاف در طنین، زمان بازگشت یا ویژگی‌های طیفی امواج، وجود حفره، جداشدگی یا فضای خالی را مشخص می‌نماید (Qian et al., 2024).

نکته قابل توجه دیگر، واقع‌گرایی روایت است. تفاوت این روایت با نمونه‌هایی که صدا در آن‌ها صرفاً با هدف ایجاد تصویر یا مضمون ادبی به کار می‌رود، در پیوند مستقیم میان تولید صدا، جست‌وجوی پیرامون بارو و آشکار شدن رخنه دیده می‌شود. با اینحال شاید این ویژگی به تنهایی برای اثبات منشأ تجربی یا فنی روایت کافی نباشد. هرچند در منابع تاریخی شواهدی وجود دارد که صنعتگران با ضربه زدن به دیوارها، ستون‌ها و مصالح، بخش‌های پوک یا توخالی را تشخیص می‌دادند؛ روشی که امروزه نیز در حفاظت و مرمت بناهای تاریخی به‌صورت تجربی و دستگاهی به کار می‌رود (Martinho & Dionísio, 2014; Ortega et al., 2023).

از منظر ادبی نیز جایگاه این ابیات استثنایی است. بررسی آثار برجسته شعر کلاسیک فارسی نشان می‌دهد که اگرچه مفاهیمی چون «ندا»، «پژواک» و «پاسخ کوه» در آثار شاعران بزرگ و سرشناس به‌وفور مشاهده می‌شوند، اما این کاربردها عمدتاً در خدمت بیان مفاهیم انتزاعی قرار دارند و نه تشریح یک روش عملی برای شناخت ویژگی‌های فیزیکی محیط. در مقابل، نظامی در این روایت، صدا را از سطح یک آرایه ادبی فراتر برده و آن را به ابزاری برای حل یک مسئله مهندسی تبدیل کرده است. همین ویژگی، این بخش از *هفت‌پیکر نظامی* در میان نمونه‌های بررسی شده، روایت قابل تاملی از کاربرد کارکردی صدا در ارتباط با یک سازهٔ معماری است. بر این اساس، می‌توان این روایت را نه صرفاً یک توصیف شاعرانه، بلکه بازنمایی ادبی یک دانش تجربی دانست؛ دانشی که بر شناخت رابطه میان رفتار صوت و ساختار فیزیکی سازه استوار است (جدول ۱). اگرچه نسبت دادن این روایت به یک فناوری مهندسی به معنای امروزی نیازمند احتیاط روش‌شناختی است، اما هم‌خوانی آن با اصول شناخته‌شده آزمون‌های آکوستیکی و روش‌های تشخیص غیرمخرب، این احتمال را تقویت می‌کند که نظامی در این بخش از *هفت‌پیکر*، تجربه‌ای واقعی و شناخته‌شده در سنت معماری و دژسازی ایران را در قالب روایت ادبی بازتاب داده باشد. از این منظر، این ابیات را می‌توان یکی از مهم‌ترین شواهد موجود در ادبیات فارسی درباره کاربرد عملی صوت در شناخت ویژگی‌های پنهان سازه‌ها و نقطه تلاقی ادبیات، تاریخ فناوری و دانش معماری در ایران قرون میانه دانست.

جدول ۱. کاربرد صدا در شناسایی رختهٔ بارو در «هفت‌پیکر» نظامی و ارتباط آن با آکوستیک مدرن

ابیات	معنای ابیات	شباهت با اصول اکوستیک مدرن
بر در آن حصار شد در حال **دُهُلی را کشید زیر دوال**	فوراً به کنار دروازهٔ حصار رفت و دهل خود را زیر دوال آماده کرد و به صدا درآورد	نمایان شدن عنصر مهم آکوستیکی در قالب تولید یک محرک صوتی. در روش‌های تشخیصی آکوستیک مدرن نیز به‌منظور شناخت وضعیت سازه، یک تحریک به سازه وارد آورده و پاسخ آن بررسی می‌شود

وآن صدا را به گرد بارو جُست کَند چون جای کنده بود درست	صدا را در اطراف بارو دنبال و بررسی کرد و در نقطه‌ای که محل رخنه یا گسست وجود داشت، تفاوتی آشکار شد	مهم‌ترین شباهت با آکوستیک مدرن در این بیت به چشم می‌خورد. ایجاد صدا، حرکت در امتداد سازه و مقایسه پاسخ صوتی(در قالب پژواک) نقاط مختلف. در آزمون‌های ضربه‌ای، تفاوت طنین یا پژواک می‌تواند نشانه وجود ناپیوستگی، فضای خالی یا جداشدگی باشد
چون صدا رخنه را کلید آمد از سر رخنه، دَر پدید آمد	هنگامی که صدا مسیر رخنه را مشخص کرد، همان رخنه به وسیله‌ای برای یافتن درگاه تبدیل شد و درِ پنهان شده آشکار گردید	صدا در بخش به‌عنوان ابزار تشخیص غیرمستقیم به‌کار برده شده است. به این صورت که ویژگی پنهان سازه مستقیماً دیده نمی‌شود، بلکه از طریق پاسخ صوتی دربارهٔ آن نتیجه‌گیری می‌شود. این منطق با اصل کلی آزمون‌های غیرمخرب آکوستیکی شباهت دارد.

۶. نتیجه گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که روایت مورد بررسی در هفت‌پیکر نظامی گنجوی را نمی‌توان صرفاً توصیفی شاعرانه از پدیده پژواک یا بازتاب صدا دانست، بلکه این روایت بیانگر کاربردی عملی از صوت در شناسایی یک ویژگی پنهان معماری است. تحلیل ابیات نشان داد که روایت شامل تولید صدا، جست‌وجوی صدا در پیرامون بارو و پیوند میان یافتن صدا و آشکار شدن رخنه است. بر اساس این توالی می‌توان تفسیری ارائه نمود که در آن صدا واسطه‌ای جهت دستیابی غیرمستقیم به اطلاعاتی دربارهٔ وضعیت سازه است. با این وجود جزئیات مربوط به نحوه سنجش، مقایسه یا اندازه‌گیری پاسخ صوتی در متن تصریح نشده است. فرایندی که از نظر مفهومی با اصول شناخته‌شده آزمون‌های آکوستیکی و روش‌های غیرمخرب ارزیابی سازه‌ها همخوانی دارد. هرچند نمی‌توان این روایت را به منزله توصیف یک فناوری مهندسی به مفهوم امروزی آن تلقی کرد، اما شواهد موجود نشان می‌دهد که نظامی بازتابی از یک دانش تجربی را به تصویر کشیده است که احتمالاً در سنت معماری، دژسازی یا فنون محاصره در ایران قرون میانه شناخته شده بوده است.

بررسی تطبیقی متون شاخص ادبیات کلاسیک فارسی نیز نشان داد که اگرچه مفاهیمی همچون صدا، پژواک و بازگشت ندا در آثار بسیاری از شاعران فارسی‌زبان حضور دارند، اما فاقد کاربرد فنی هستند. در مقابل، روایت هفت‌پیکر نظامی در زمرهٔ نمونه‌هایی است که در آن به نکات فنی و قوانین آکوستیک پرداخته است. این روایت را می‌توان یکی از نمونه‌های قابل توجه در ادبیات فارسی جهت مطالعه کاربردی صدا در شناسایی یک ویژگی پنهان معماری دانست. اما تعیین تقدم تاریخی آن در میان متون فارسی نیازمند بررسی نظام‌مند و جامع منابع منظوم و منثور است. هرچند تأیید قطعی این ادعا مستلزم بررسی نظام‌مند تمامی متون منظوم و منثور فارسی و نیز مقایسه آن با منابع هم‌دوره در دیگر سنت‌های ادبی و فنی است.

از منظر تاریخ علم و فناوری، این روایت نشان می‌دهد که شناخت تجربی رفتار صوت و ارتباط آن با ویژگی‌های فیزیکی مصالح و سازه‌ها، قرن‌ها پیش از صورت‌بندی علمی مباحث آکوستیک، در میان جوامع انسانی وجود داشته است. اهمیت این موضوع نه در انتساب فناوری‌های نوین به گذشتگان، بلکه در نشان دادن آن است که بسیاری از فناوری‌های امروز، ریشه در تجربه‌های انباشته، مشاهده‌های دقیق و شناخت عملی انسان از طبیعت دارند؛ تجربه‌هایی که بعدها در قالب نظریه‌های علمی و ابزارهای مهندسی توسعه یافته‌اند. از سوی دیگر، نتایج این پژوهش بر ظرفیت قابل توجه متون ادبی کلاسیک به‌عنوان منابعی برای مطالعه تاریخ دانش، فناوری و معماری تأکید می‌کند. آثار ادبی، افزون بر ارزش‌های زبانی، هنری و فرهنگی، می‌توانند بازتاب‌دهنده بخشی از دانش فنی و تجربی دوران خود نیز باشند. ازاین‌رو، مطالعه میان‌رشته‌ای ادبیات کلاسیک با بهره‌گیری از رویکردهای تاریخ فناوری، تاریخ علم، باستان‌آواشناسی و حفاظت میراث فرهنگی، می‌تواند ابعاد کمتر شناخته‌شده‌ای از دانش و فناوری در ایران تاریخی را آشکار سازد. همچنین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، سایر منظومه‌های کلاسیک فارسی و متون تاریخی و فنی نیز با همین رویکرد بررسی شوند تا جایگاه این روایت در سیر تحول دانش تجربی مرتبط با رفتار صوت و شناخت سازه‌ها با دقت بیشتری تبیین شود.

حمایت مالی و معنوی: این پژوهش بدون دریافت حمایت مالی یا معنوی انجام شده است.

مشارکت نویسندگان: نویسنده اول و دوم، مسئولیت مفهوم‌پردازی، روش‌شناسی، نگارش، تحلیل رسمی، اعتبارسنجی، بازبینی و ویرایش را بر عهده داشته‌اند.

تضاد منافع: نویسندگان هیچ‌گونه تضاد منافعی را گزارش نمی‌کنند.

دسترسی به داده‌ها: داده‌های خام نزد نویسندگان موجود است و با مکاتبه قابل دسترسی خواهد بود.

فهرست منابع

موذن، سجاد؛ بنایی، سپیده؛ ولی، هلیا. (۱۴۰۱). آشنایی با مفهوم و کاربرد سنجش آکوستیک به‌عنوان یک روش غیرمخرب در مطالعه و شناخت میراث معماری. *پژوهۀ باستان‌سنجی ۸* (۲): ۱۹۳–۲۰۸. doi:10.52547/jra.8.2.193

نظامی گنجوی. (۱۳۷۲). *هفت پیکر*. تصحیح حسن وحید دستگردی، تهران: انتشارات اقبال.

ASTM International. (2023). *ASTM E1002-23: Standard Practice for Leaking Hollow Metal Doors and Panels by Ultrasonics*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

Bertolin, C., De Ferri, L., Grottesi, G., & Strojecki, M. (2020). Study on the conservation state of wooden historical structures by means of acoustic attenuation and vacuum microbalance. Wood Science and technology, 54(1), 203-226. https://doi.org/10.1007/s00226-019-01150-8

Bungey, John H., and Michael G. Grantham. (2006). *Testing of Concrete in Structures*. 4th ed. London: Taylor & Francis.

Carpinteri, A., Invernizzi, S., & Lacidogna, G. (2007). Structural assessment of a 17th-century masonry vault with acoustic emissions and numerical techniques. International Journal of Architectural Heritage, 1(2), 214-226. https://doi.org/10.1080/15583050701287649

de Blois, François. (2002). "Haft Peykar." In *Encyclopaedia Iranica*, Vol. XI, Fasc. 5, pp. 522–524. New York: Encyclopaedia Iranica Foundation. https://doi.org/10.1163/2330-4804_EIRO_COM_2631

Díaz-Andreu, M. (2025). Archaeoacoustics: Research on Past Musics and Sounds. *Annual Review of Anthropology*, *54*(1), 113-130. DOI: 10.1146/annurev-anthro-071323-113540

Di Gennaro, L., Loreto, G., Frunzio, G., Rizzano, G., & Guarnaccia, C. (2025). Acoustic Emission for Structural Monitoring of Historical Masonry: An In-Field Application. Applied Sciences, 15(13), 7111. https://doi.org/10.3390/app15137111

Işık, N., Halifeoğlu, F. M., & Ipek, S. (2020). Nondestructive testing techniques to evaluate the structural damage of historical city walls. Construction and Building Materials, 253, 119228. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119228

Lacidogna, G., Manuello, A., Niccolini, G., & Carpinteri, A. (2015). Acoustic emission monitoring of Italian historical buildings and the case study of the Athena temple in Syracuse. Architectural Science Review, 58(4), 290-299. https://doi.org/10.1080/00038628.2012.720246

Manuello, A., Marmo, F., & Melchiorre, J. (2024). Investigating and monitoring central nave vaults of the Turin Cathedral with Acoustic Emissions and Thrust Network Analysis. Developments in the Built Environment, 18, 100434. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100434

Martinho, E., and A. Dionísio. (2014). "Main Geophysical Techniques Used for Non-Destructive Evaluation in Cultural Built Heritage: A Review." *Journal of Geophysics and Engineering* 11(5): 053001. https://doi.org/10.1088/1742-2132/11/5/053001

Meisami, J. S. (1987). Medieval Persian Court Poetry. Princeton University Press. http://www.jstor.org/stable/j.ctt7ztwg9.

McMurray, P. (2021). Teichoacoustics, or the Wall as Sonic Medium in Antiquity. In L. Curtis & N. Weiss (Eds.), *Music and Memory in the Ancient Greek and Roman Worlds* (pp. 148–172). chapter, Cambridge: Cambridge University Press https://doi.org/10.1017/9781108917858.007

Navas-Reascos, G., Alonso-Valerdi, L. M., & Ibarra-Zarate, D. I. (2023). Archaeoacoustics around the world: A literature review (2016–2022). *Applied Sciences*, *13*(4), 2361. https://doi.org/10.3390/app13042361

Ortega, J., et al. (2024). *Influence of stress level and damage on sonic tomography imaging and on the estimation of deformability properties of historic stone masonry*. Construction and Building Materials, 417, 135285.

Qian, Wei, Xujun Zhu, Tao Zhang, Ning Li, and Zhaoyang Zhu. (2024). "Improving Non-Destructive Testing Methods for Detecting Cavity Damage and Internal Defects in Stone Cultural Relics: A

Focus on Ultrasonic Testing and Acoustic Tapping Technology." *Journal of Cultural Heritage* 67: 479–487. https://doi.org/ 10.1016/j.culher.2024.04.014

Ortega, J., Meersman, M. F., Aparicio, S., Liébana, J. C., Martín, R., Anaya, J. J., & González, M. (2023). An automated sonic tomography system for the inspection of historical masonry walls. Open Research Europe, 3, 60. https://doi.org/10.12688/openreseurope.15769.1

Till, Rupert. (2017). "An Archaeoacoustic Study of the Hal Saflieni Hypogeum on Malta." *Antiquity 91* (355): 74–89. DOI: https://doi.org/10.15184/aqy.2016.258

Valière, J. C., & Palazzo-Bertholon, B. (2019). Towards a history of architectural acoustics using archaeological evidence: Recent research contributions to understanding the use of acoustic pots in the quest for sound quality in 11th-to 17th-century churches in France. Worship Sound Spaces, 31-43.y. DOI: 10.4324/9780429279782-3

پذیرفته شده آماده نشر