Journal of Acoustical Society of Iran, Vol. 13, No. 1, 2025

(Research Article)
A Scientific Guide to Structure-Borne Sound Evaluation: Tools, Methods, and Practical Techniques

Mahya Pzeshgi Modarres, Abbas ghaffari*
Faculty of Architecture and Urban Planning, Tabriz University of Islamic Arts
Received: 2025/02/13, Accepted: 2025/05/18

Abstract

The study of acoustics is a fundamental pillar in enhancing the quality of living environments and ensuring the tranquility and psychological security of inhabitants. The present research aims to provide a comprehensive approach to understanding sound, classifying its various types, analyzing propagation methods, and evaluating measurement techniques. This study primarily focuses on structure-borne sound, which is recognized as one of the most significant acoustic challenges in building environments. In this context, sound measurement tools and indices, particularly the parameters influencing structure-borne sound assessment, have been meticulously examined and analyzed. Ultimately, field measurements utilizing the standard tapping machine, recognized as the most advanced scientific method and tool for evaluating structure-borne sound, have been introduced. The quantification of sound pressure level has been identified as a key parameter for assessing this type of noise. Furthermore, to complement the training, the practical application of this device in real-world scenarios has been described. The use of this device, by providing precise and reliable data, represents a significant step toward controlling and optimizing the acoustic conditions of the environment. Additionally, identifying the sources of structure-borne sound and measuring its transmission through ceilings can substantially contribute to improving acoustic design and enhancing living standards in building environments.

Keywords: Sound, Ways of sound propagation, Structure-borne sound, Sources of structure-borne sound, Measurement of structure-borne sound.

pp. 86-96 (In Persian)

* Corresponding author E-mail:Ghaffari@tabriziau.ac.ir

[Downloaded from joasi.ir on 2026-09-06]

مقاله مروری

مجله انجمن علوم صوتی ایران

سال: ۱۴۰۴، دوره: ۱۳، شماره ۱، صفحات: ۸۶-۹۶

راهنمای علمی ارزیابی صدای کوبه‌ای: ابزارها، روش‌ها و فن‌های کاربردی

محیا پزشگی مدرس، عباس غفاری*

دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۸

چکیده

مطالعه علم صوتیّات از ارکان اساسی در بهبود کیفیت محیط‌های زیستی و تأمین آرامش و امنیت روانی ساکنان به شمار می‌رود. پژوهش حاضر با هدف ارائه رویکردی جامع در شناخت صدا، طبقه‌بندی انواع آن و تحلیل روش‌های انتشار و فن‌های اندازه‌گیری آن، به بررسی ابعاد مختلف این مورد، پرداخته‌است. تمرکز اصلی مطالعه پیش‌رو بر صدای کوبه‌ای، به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های صدایی در محیط‌های ساختمانی، قرار دارد. در این راستا، ابزارها و شاخص‌های سنجش صدا، به ویژه شبه‌سنج‌های موثر در اندازه‌گیری صدای کوبه‌ای، به طور دقیق بررسی و تحلیل شده‌است. در نهایت، سنجش میدانی با استفاده از دستگاه ضربه‌زن استاندارد به عنوان پیشرفته‌ترین روش و ابزار علمی برای ارزیابی صدای کوبه‌ای و کمیت تراز فشار صدا، به عنوان شبه‌سنج موثر سنجش این نوع صدا معرفی گردیده است. هم‌چنین، جهت آموزش تکمیلی، نحوه به‌کارگیری دستگاه مذکور در نمونه واقعی نیز شرح داده‌شده‌است. استفاده از این دستگاه، با ارائه داده‌های دقیق و قابل اعتماد، گامی موثر در کنترل و بهینه‌سازی شرایط صدایی محیط به‌شمار می‌آید و هم‌چنین، شناخت منابع این نوع صدا و سنجش میزان عبور آن از سقف‌ها، می‌تواند به بهبود طراحی صوتین و ارتقای استانداردهای زیستی در محیط‌های ساختمانی کمک شایانی کند.

کلیدواژه‌ها: صدا، راه‌های انتشار صدا، صدای کوبه‌ای، منابع صدای کوبه‌ای، اندازه‌گیری صدای کوبه‌ای.

۱. مقدمه

صدا از روش‌های برقراری ارتباط می‌باشد، ارتباط انسان‌ها با طبیعت، ارتباط با اشیاء ساخته‌شده توسط خود انسان و ارتباط با یکدیگر است [۱].

نقطه آغاز مطالعه علمی صدا به یونان باستان بازمی‌گردد. تا قرن هجدهم، مباحث صدا تنها در زمینه موسیقی مورد بررسی قرار می‌گرفت. تا سال‌های پیش از آغاز قرن بیستم، میان صدا و معماری رابطه مدوّنی وجود نداشت و اغلب به تجربیات علمی معماران محدود بوده است.

از جمله مکتوبات مرتبط با صدا در فرهنگ ایرانی و غربی، فصل پنجم کتاب شفای ابن‌سینا درباره شنوایی، با توضیح مختصری از رفتار صدا در فضای بسته، و هم‌چنین کتاب معماری ویتروویوس[1] درباره لوله‌های صدا در معماری است که پیش از قرن بیستم نگاشته شده‌اند.

مطالعه جدّی درباره رابطه صدا و معماری در علم فیزیک با پژوهش‌های سابین[2]، از اساتید دانشگاه هاروارد، پیرامون برطرف کردن مشکل صدا در تالار سخنرانی مدرسه فوگ آغاز شد [۲].

در اوایل دهه ۱۹۸۰، اولین نسخه صدا و ارتعاش ساختاری به تحریر درآمد. از آن زمان تاکنون، روش‌ها و رویه‌های محاسباتی قدرتمندی برای تحلیل عددی ارتعاشات‌سازه، میدان‌های صدا و اندرکنش‌های صدای بین سازه‌ها و سیالات ایجاد شده‌اند و اکنون به‌طور جهانی توسط محققان، مشاوران و سازمان‌های صنعتی

* نویسنده پاسخگو: Ghaffari@tabriziau.ac.ir

مقاله حاضر مستخرج از پایان نامه کارشناسی‌ارشد نویسنده اول، با عنوان: بررسی تطبیقی رفتار سقف بناهای منتخب دانشگاه هنر اسلامی تبریز در مقابل صدای کوبه‌ای و به راهنمایی آقای دکتر عباس غفاری می‌باشد.

[1] Vitruvius

[2] Wallace Clement Sabine

[Downloaded from joasi.ir on 2026-09-06]

استفاده می‌گردد. توسعه ابزارهای عملی، پیشرفت‌ها در سیستم‌ها و الگوریتم‌های پردازش علامت[1]، در مبدل‌ها و مواد سازه‌ای و اشکال ساخت‌وساز، اعمال سیستم‌های کنترل فعال و تطبیقی برای سازه‌ها به‌منظور کاهش یا اصلاح ارتعاشات سازه و تشعشعات صدای مرتبط، تسهیل‌کننده این فرآیندها بوده است و انتقال در این نسخه بسیار توسعه‌یافته و به‌طور گسترده اصلاح گردید[۳].

فقدان آسایش صوتین کافی، سبب بروز برخی اثرات روانی و فیزیولوژیکی بر انسان گشته و در صورتی که اگر صدای ناهنجار در محیط بیش از حد مجاز باشد، منجر به خستگی در انسان شده و کاهش بازدهی کاری را در پی دارد [۴]. بنابراین، باید میزان صداهای مزاحم و ناخواسته هر فضایی متناسب با کاربری آن، سنجیده و کیفیت مکان از منظر صدا مشخص و تأمین گردد.

آلودگی نوفه[2]ای از طریق هوا و گفتار انتقال می‌یابد و گاهی چند ضربه به دیوار نیز آزاردهنده بوده و آلودگی محسوب می‌شود. از آن‌جایی که ضربه و صدای کوبه‌ای از موانع آسایش بوده و صدای ناهنجار تلقی می‌گردد، بنابراین شناخت صدای کوبه‌ای و منابع مولد آن و روش‌های اندازه‌گیری این نوع صدا در تمامی کاربری‌ها لازم و ضروری است، چراکه صدای ناهنجار ناشی از کوبش، آزاردهنده بوده و موجب سلب آسایش افراد می‌شود و رعایت نکاتی شرایط را بهبود می‌بخشد.

به‌منظور پیش‌بینی و اندازه‌گیری صدای کوبه‌ای (صدای انتقال‌یافته از پیکره ساختمان‌ها)، روش‌ها و فن[3]هایی ایجاد شده است. در پژوهش حاضر، پس از بررسی مطالعات دیگر محققان در این زمینه، با دیدگاهی متفاوت و دقیق‌تر به شناخت و تبیین لغوی و معنای کاربردی صدای کوبه‌ای و منابع مولد آن پرداخته شده‌است.

هم‌چنین، بر برترین و کاربردی‌ترین ابزار و روش اندازه‌گیری آن تمرکز شده و پس از معرفی این ابزار، مراحل انجام سنجش‌ها با استفاده از ابزار برتر، به‌طور دقیق مطابق با استانداردهای بین‌المللی گردآوری شده‌است تا بتوان در موارد مشابه، از آن به‌عنوان الگویی آموزشی جهت انجام آزمون‌ها بهره گرفت.

۲. مواد و روش

تحقیق پیش‌رو با چشم‌اندازی ترویجی، بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای نگاشته شده‌است. پس از ارائه تعاریف مرتبط با این حوزه و مرور روش‌های به‌کاررفته در موضوع، مشخص شد که روش‌های متعددی برای سنجش‌های صدا تعریف شده‌اند. در این میان، اندازه‌گیری میدانی در شرایط واقعی قانع‌کننده‌ترین روش محسوب می‌شود، زیرا نتایجی نزدیک به واقعیت ارائه می‌دهد.

بنابراین، پس از مطالعه و مرور مقالات، تحقیقات و استانداردهای مرتبط، می‌توان دریافت که انجام آزمون میدانی توسط دستگاه‌های B&K، شامل دستگاه ضربه‌زن استاندارد به‌عنوان منبع تولید صدای کوبه‌ای و دستگاه B&K۲۲۶۰ به‌عنوان سنجشگر[4] تراز فشار صدا، معتبرترین ابزار و روش می‌باشد؛ بنابراین این مقاله، با معرفی شیوه آزمون صدای کوبه‌ای باهدف شناخت منابع مولد و میزان عبورصدای ناهنجار، به ترویج آموزش روش اندازه‌گیری صدای کوبه‌ای با دستگاه ضربه‌زن خواهد پرداخت.

۲-۱. صدا چیست؟

مطابق دانشنامه بریتانیکا[5]، صدا موج مکانیکی است که جهت انتشار نیاز به ماده کشسان دارد. هم‌چنین در تحلیل فلسفی صدا، مطابق دایره‌المعارف فلسفه استنفورد[6]، اهمیت این تحلیل را صرفاً از منظر یک احساس ادراکی نمی‌داند، بلکه صدا را به جهت آشکار شدن زمانی و مکانی در ذهن، جوانب متافیزیکی و معرفت‌شناختی قابل توجهی ارائه می‌دهد [۵].

در مبحث هجده مقررات ملّی ایران، صدا موج مکانیکی تعریف شده‌است که در گازها، جامدات و مایعات انتشار می‌یابد [۶]. به تعبیر ساده‌تر، صدا را می‌توان به‌صورت حرکات موجی در یک فراگیر کشسان یا به‌عنوان محرک

[1] Signal
[2] Noise pollution
[3] Technique
[4] SLM; Sound Level Meter
[5] Encyclopædia britannica
[6] Stanford encyclopedia of philosophy

[Downloaded from joasi.ir on 2026-09-06]

حس شنوایی تعریف کرد. هم‌چنین به‌تعریفی دیگر، صدا نوعی انرژی مکانیکی است که توسط یک جسم مرتعش تولید می‌شود [۷].

صدا در الگوهای متفاوتی مطالعه می‌شود که در شکل ۱، انواع الگوی مطالعه در رویکردهای مختلف مطالعهٔ صدا و مکان نمایش داده می‌شود.

شکل ۱ الگوی مطالعه در رویکردهای مختلف مطالعهٔ صدا و مکان [۸]

۲-۲. انواع صدا

صدایی که به گوش می‌رسد و شنیده می‌شود، یکی از موارد نغمه ناب، نغمه یا نوفه دسته‌بندی خواهد شد [۹]:

۲-۲-۱. نغمه ناب[1]

منبع صدا که موج تک‌بسامدی تولید نماید، مانند صدای یک دیاپازون[2]، را نغمه ناب گویند. نوسان‌نگار[3] آن نوسان ساده سینوسی بوده و به ندرت در کارهای پژوهشی و بررسی‌های فنی و فیزیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شنیدن نغمه ناب آزاردهنده می‌باشد.

۲-۲-۲. نغمه

صداهایی که از یک تواتر اصلی و مضرب‌های صحیح تواتر اصلی (هماهنگ[4]های آن) تشکیل شده باشد، نغمه گویند. منحنی نمایش آن‌ها برحسب زمان تکراری ولی غیر سینوسی است. شنیدن نغمه معمولاً خوشایند است و صدای سازهای مختلف، که همه دارای نغمه بنیادی یکسان هستند، به گوش انسان اثرات متفاوتی دارند. این تفاوت‌ها ناشی از هماهنگی و ترکیب نغمه‌های هم‌ساز است که به شکل ویژه‌ای به گوش می‌رسد.

۲-۲-۳. نوفه

چنانچه در یک صدا رابطه‌ای میان نغمه‌های آن نباشد و در نوسان‌نگار صدای آن، نوار ناموزونی نمایش داده شود؛ بنابراین هر صدای ناخواسته‌ای که شنوا، آن صدا را گوش‌خراش می‌شنود می‌توان نوفه نامید.

۲-۳. راه‌های انتشار صدا

در اثر ارتعاشات، صدا ایجاد می‌گردد که از طریق یک رسانه منتقل‌شده و به گوش یا هر شکل دیگری از دستگاه تشخیص می‌رسد. صدا بر حسب بلندی (دسی‌بل)[5] و بسامد (هرتز)[6] اندازه‌گیری‌شده و در محیط ساخته‌شده از هوا یا سازه انتشار می‌یابد؛ انتشار صدا به دو صورت هوابرد وکوبه‌ای اتفاق می‌افتد.

۲-۳-۱. تراگسیل صدای هوابرد

هرگاه جداکننده‌ای به وسیله امواج صدای هوابرد به ارتعاش درآید، نحوه انتقال صدای اولیه به فضای مورد نظر را انتشار صدای هوابرد از طریق آن جداکننده می‌گویند. همان‌طور که از نام آن برمی‌آید، این نوع انتشار صدا نیازی به ماده جامد نداشته و در هوا انتقال می‌یابد، مانند صدای آموزگار که از یک کلاس درس به کلاس مجاور منتقل می‌شود [۶].

۲-۳-۲. تراگسیل صدای کوبه‌ای

هرگاه جداکننده‌ای در اثر کوبش به ارتعاش درآید، نحوه انتقال صدای اولیه به فضای مورد نظر را انتشار صدای کوبه‌ای از طریق آن جداکننده می‌گویند. بنا بر توضیحات داده‌شده، انتقال صدا به‌صورت کوبه‌ای به محیط جامد نیازمند است، مانند صدای راه‌رفتن بر روی کف که به طبقه پایین منتقل می‌شود [۶].

۲-۴. ماهیت صدای کوبه‌ای

معنای کوبه در لغت، مطابق فرهنگ فارسی عمید، از بن‌کوب به معنای کوفت، آسیب، آسیبی که از سنگ، چوب یا چیز دیگری به بدنه وارد شود، است. در این باب واژه‌هایی چون کوبه به معنای آلت کوبیدن، کوبن به معنای چکش، چکش در خانه، تفاسیر و معانی در حیطه واژگان همسو با کوبه می‌باشد [۱۰].

[1] Pure tone
[2] Tuning fork
[3] Oscillogram
[4] Harmonic
[5] Decibel (dB)
[6] Hertz (Hz)

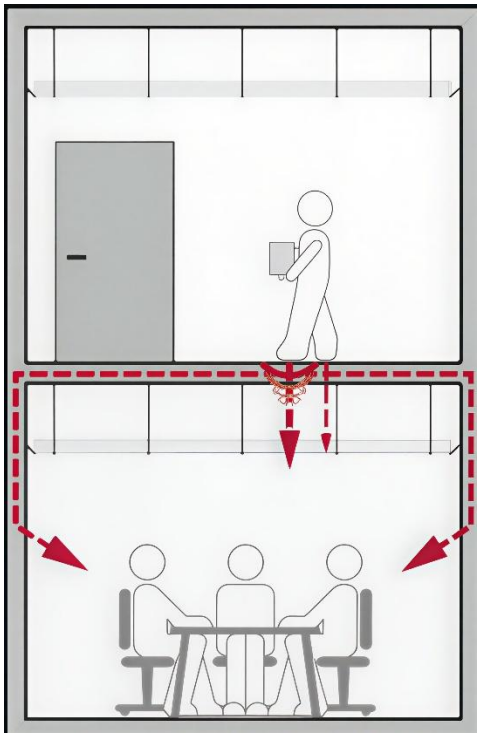
[Downloaded from joasi.ir on 2026-09-06]

در واژه‌نامه‌های انگلیسی صدای کوبه‌ای با اصطلاح انگلیسی مترادف آن جمع‌آوری شده‌است که در واژه‌نامه جامع معماری و ساختمان، آن را صدای سازه-بُرد[1]، صدایی که به نقطه‌ای در یک ساختمان از طریق انتقال صدا از سازه می‌رسد، معنا شده‌است [۱۱].

در صوتین ساختمان، صدای کوبه‌ای به آن دسته از صداهایی گفته می‌شود که در اثر ضربه به سازه ساختمان ایجاد شده است؛ نوفه‌ی ناشی از راه‌رفتن شخصی با کفش‌های پاشنه‌بلند، بسته‌شدن ناگهانی در، افتادن اشیا، برخورد چکش به دیوار، بستن درها، حرکت‌دادن و جابه‌جاکردن مبلمان، و ارتعاشات مکانیکی برخی از وسایل منزل مانند ماشین لباس‌شویی، از منابع روزمره تولید چنین نوفه‌ای در داخل ساختمان محسوب می‌شوند. هم‌چنین، ارتعاشات ناشی از ماشین‌آلات صنعتی که به سازه منتقل می‌شود، می‌تواند نمونه دیگری از نوفه ضربه‌ای باشد. در تمام این موارد، جسمی بر ساختار ساختمان تأثیر می‌گذارد که باعث ایجاد نوفه در فضای داخلی آن می‌شود. امروزه، گسترش استفاده از کف‌پوش‌های سخت نظیر چوب، سرامیک و هم‌چنین گرایش به استفاده از مصالح سبک‌وزن در صنعت ساختمان‌سازی، اهمیت نوفه ضربه‌ای را نسبت به گذشته محسوس‌تر کرده است. صداهای ضربه‌ای ناشی از حرکات انسان بر کف ساختمان به دو دسته تقسیم می‌شوند [۱۲]:

- ضربات سنگین و نرم مانند صدای ناشی از دویدن و پریدن کودکان، تمرینات ورزشی و صدای راه‌رفتن با پای برهنه.
- ضربات سبک و سخت مانند صدای ناشی از راه‌رفتن با کفش‌های پاشنه‌دار.

نوفه ضربه‌ای[2] هم از نظر فناوری برای کاهش آن و هم از نظر درک آن در داخل ساختمان، به یک موضوع مهم تبدیل شده‌است. در واقع، تراز بالای نوفه به‌وضوح بر راحتی داخلی و قابلیت زندگی در فضاهای محدود تأثیرگذار است. در سال‌های اخیر نیز، اهمیت سطوح نوفه ضربه‌ای در طراحی سازه به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است.



شکل ۲ نمونه نوفه ضربه‌ای و انتقال آن [۱۲].

مردم به‌طور فزاینده‌ای نسبت به نوفه حساس می‌شوند. به‌عنوان مثال، در آوریل ۲۰۰۹ مقررات ساختمانی اسپانیا[3] به‌روز شد و نوفه واقعی درک‌شده بین خانه‌ها براساس استاندارد اساسی ساختمان[4] از میزان قدیمی آن یعنی ۸۸ دسی‌بل به ۶۵ دسی‌بل کاهش یافت. روند محدود مقررات باعث می‌شود برخی از کشورها در اجرای آن‌ها با مشکل مواجه شوند. مقررات برخی از تنظیمات قابل‌قبول سازه را به‌منظور به حداقل رساندن نوفه ضربه‌ای پیشنهاد می‌کند. هم‌چنین، یک ارزیابی آماری نیز بر نوفه‌هایی که در طول شبانه‌روز در ساختمان‌های مسکونی شنیده می‌شود انجام گرفته‌است و این نتیجه حاصل شد که مهم‌ترین عامل آلودگی نوفه‌ای فضای داخل ساختمان در روز نوفه ضربه‌ای و در شب نوفه هوابُرد است [۱۳].

[1] Structure-borne sound / percussion sound
[2] Impact noise
[3] CTE; Código Técnico de la Edificación
[4] NBE-CA-88: Norma Básica de la Edificación

[Downloaded from joasi.ir on 2026-09-06]

۲-۵. منابع صدای کوبه‌ای (سازه-بُرد)

منابع ارتعاشی که به نوعی به سازه ساختمان متصل هستند، در دسته‌بندی منابع صدای کوبه‌ای قرار می‌گیرند. در ساختمان‌های سبک‌وزن مدرن، حرکات مکانیکی تجهیزات متصل به سازه ساختمان از منابع مهم آزاردهنده‌ای است که منجر به تشعشعات صدا می‌شود. پیش‌بینی تراز فشار صدای کوبه‌ای به دلیل پیچیدگی در اتصال بین ساختار منبع و گیرنده بسیار مشکل است. صدای کوبه‌ای ناشی از تجهیزات ساختمانی، از جمله ماشین لباسشویی در منازل، هم در حیطه این مطالعات آورده شده است [۱۴].

از دسته تجهیزات ساختمانی و تأسیساتی، وان و مخزن آب [۱۵] و هم‌چنین هواساز، پمپ‌ها، آبگرمکن و غیره از منابع صدای کوبه‌ای شناخته شده‌اند [۱۴].

میچل ویلوت نیز در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸، به تجهیزات ساختمانی در سازه‌های سنگین‌وزن به عنوان مولد این نوع صدا اشاره کرده است [۱۶].

سجاد پاکزاد و همکاران، کمپرسور[1] را از منابع تولید صدای کوبه‌ای شمرد [۱۷].

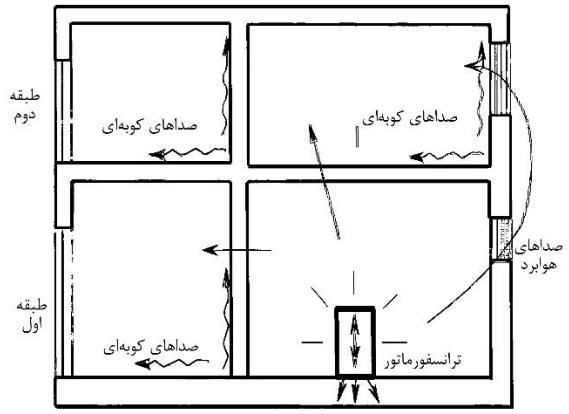
مورهاوس طی انجام تحقیقی، توربین‌های بادی نصب‌شده در ساختمان را از منابع صدای کوبه‌ای معرفی نمود [۱۸].

انتشار صدای ناشی از عبور قطار و مترو نیز صدای کوبه‌ای یا نوفه انتقال‌یافته از سازه محسوب می‌گردد [۱۹].

ترانسفورماتورها[2]، ارتعاش و نوفه‌ی با بسامد پایین ۵۰-۲۵۰ هرتز تولید می‌کنند که توزیع آن از طریق تیرها، آجرها، دیوارها و سایر سازه‌های ساختمانی به اتاق‌ها گسترش می‌یابد. به این ترتیب می‌توان این دستگاه را مولد صدای کوبه‌ای در نظر گرفت [۲۰].

انجام فعالیت‌های ورزشی و استفاده از دستگاه‌های مرتبط در سالن‌های ورزشی نیز به عنوان مولد صدای کوبه‌ای نام برده می‌شوند [۲۱].

از طرفی، ارتعاشات محیطی در شهرها به ساختمان‌ها منتقل گردیده و از طریق مسیرهای پیچیده‌ای که از عناصر سازه‌ای در ساختمان تشکیل شده است، مانند دال‌های بتنی، تیرها و ستون‌ها در ساختمان‌ها منتشر می‌شود و از دسته انتشار صدای کوبه‌ای است [۲۲].



شکل ۳ ترانسفور ماتور منبع تولید صدای کوبه‌ای [۲۰].

۲-۶. کمیت‌های صدا

جهت اندازه‌گیری‌های صدا و مباحث مربوط به آن، کمیت‌های صدا از جمله بسامد، طول موج، تراز فشار صدا، زمان واکنش و غیره به کار گرفته می‌شود. در جدول ۱ که در صفحه بعد آمده‌است، کاربردی‌ترین کمیت‌های صدا، برگرفته از کتاب[3] اگان نمایش داده می‌شود [۲].

مطابق با مطالعات انجام‌گرفته، از مهم‌ترین کمیت‌هایی که در اندازه‌گیری‌های صدا به کار می‌رود و دستگاه‌های سنجش صدا بر اساس آن تنظیم می‌گردد، تراز فشار صدا می‌باشد. اصولاً تراز به‌معنای کمیت اندازه‌گیری‌شده نسبت به واحد مبنا بوده که آستانه درک را تعریف می‌کند. با افزایش فشار صدا، همهمه شنیده‌شده بیش‌تر، آسایش صوتین کاهش می‌یابد و صداها نیز به صورت واضح درک نمی‌شوند [۲۳].

اندازه‌ی لگاریتمی (رابطه ۱) فشار صدا مؤثر از یک صدا نسبت به مقدار مرجع، تراز فشار صدا بوده و با واحد دسی‌بل بالاتر از میزان مرجع استاندارد اندازه‌گیری می‌شود:

$$L_p = ۲۰\log\left(\frac{P}{P_{ref}}\right) \text{ دسی‌بل} \qquad (۱)$$

[1] Compressor
[2] Transformer
[3] Architectural acoustics

[Downloaded from joasi.ir on 2026-09-06]

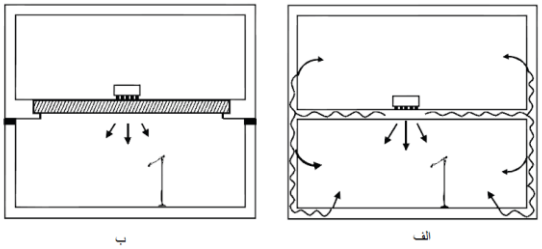
جدول ۱ کمیت‌های صدا [۲].

معادل	واحد	علامت اختصاری
بسامد[۱]	هرتز	F
طول موج[۲]	متر	λ
شدت/فشار[۳]	دسی‌بل	P/I
سرعت صدا[۴]	متربرثانیه	C
زمان واخنش[۵]	ثانیه	RT یا T۶۰
تراز فشار صدا[۶]	دسی‌بل	SPL
شاخص عبور مستقیم صدا[۷]	۰-۱	STI
درصد اشتباهات شنیداری[۸]	۰-۱۰۰	ALcons
شفافیت[۹]	دسی‌بل	C۵۰,C۸۰,C۳۰,C۵
تراز صدای معادل[۱۰]	دسی‌بل	L_{eq}
...	...	...
بلندی[۱۱]	سون یا فون	-

۲-۷. فن‌ها و روش‌های رایج اندازه‌گیری صدا

اندازه‌گیری‌های میدانی[۱۲] و آزمایشگاهی[۱۳] از روش‌های اندازه‌گیری صدا می‌باشند. روش اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی با هدف به دست آوردن اطلاعات موردنیاز از الگو در مرحله طراحی در اتاق‌های مخصوص، همچون اتاق‌های پژواک[۱۴] و ضد اکو[۱۵]، انجام می‌گیرد. در مقابل، اندازه‌گیری‌های میدانی در شرایط واقعی بناها، اغلب با دو هدف عمده، حل‌کردن مشکلات صوتین در بنای موجود و ساخته‌شده و هم‌چنین نشان‌دادن میزان سازگاری یک بنای مشخص با مقررات عایق‌سازی صدا، انجام می‌گیرد. اندازه‌گیری‌های میدانی به علت بروز پدیده انتقال از جوانب، نیازمند ملاحظات بیش‌تری نسبت به روش آزمایشگاهی خواهند بود [۱۲].

در شکل ۴، اندازه‌گیری تراز فشار صدای ایجاد شده توسط دستگاه ضربه‌زن استاندارد[۱۶] با دو روش میدانی و آزمایشگاهی نمایش داده شده است.



شکل ۴ (الف) اندازه‌گیری میدانی (ب) اندازه‌گیری آزمایشگاهی [۱۲].

مطابق با شکل ۴، در اندازه‌گیری آزمایشگاهی تمام توان دستگاه، از کف مورد آزمون، به طور مستقیم به اتاق پایین منتقل گردیده است؛ اما در روش میدانی، بخشی از توان دستگاه ضربه‌زن، از طریق اتصالات فیزیکی مرزهای کف به دیوارها و فضاهای مجاور انتقال می‌یابد [۱۲].

۲-۸. مروری بر فن‌های اندازه‌گیری صدای کوبه‌ای

روش میدانی[۱۷] از جمله روش‌های اندازه‌گیری صدا می‌باشد که توسط ابزارهای مختلفی سنجیده می‌گردد. ابزارهایی که به‌عنوان منبع تولید صدای کوبه‌ای اغلب در آزمون‌ها به کار گرفته می‌شوند، شامل استفاده از روش ژاپنی، توپ لاستیکی[۱۸] و هم‌چنین استفاده از دستگاه ضربه‌زن استاندارد می‌باشد.

در کره و ژاپن، توپ لاستیکی به‌عنوان منبع ضربه‌ی استاندارد برای تولید صدای کوبه‌ای استفاده می‌گردد. در مؤسسه تحقیقات ساختمان ژاپن، بسامد پایین نیز توسط توپ لاستیکی به‌عنوان منبع تولیدکننده صدای کوبه‌ای اندازه‌گیری شده است [۲۴].

عایق صدای ضربه‌ای در سازه‌های کف سبک، در دو آزمایش مختلف، از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۴ در آزمایشگاه بررسی گردید. هم‌چنین تعدادی از اندازه‌گیری‌های میدانی از سال ۱۹۹۷ انجام گرفته که توسط دستگاه ضربه‌زن استاندارد و توپ لاستیکی، با هدف مستندسازی ویژگی‌های عایق صدا در ساختمان‌ها برای

[1] Frequency
[2] Wavelength
[3] Intensity/pressure
[4] Sound speed
[5] Reverberration time
[6] Sound pressure level
[7] Sound transmission index
[8] Articulation loss of consonants
[9] Clarity
[10] Equivalent sound level
[11] Loudness
[12] Field measurements
[13] Laboratory measurements
[14] Unechoic room
[15] Reverberation room
[16] Standard tapping machine
[17] Field method
[18] Rubber ball

[Downloaded from joasi.ir on 2026-09-06]

خانه‌های مسکونی بوده‌است. این آزمون‌ها منجر به تأیید استفاده از دستگاه ضربه‌زن استاندارد گشت [۲۵].

هم‌چنین در بریتانیا، جهت بررسی ساختمانی مسکونی برای تغییر کاربری به سالن ورزشی در مقابل صدای عمده‌ی ضربه‌ای، آزمون میدانی با ابزار موجود یعنی تست سقوط جسمی از بالا (مانند توپ لاستیکی) انجام گرفت، اما به دلیل یکسان نبودن شرایط آزمون و ابزار نامعتبر، نتیجه‌ی مطلوبی حاصل نشد [۲۱].

ارزیابی تراز توان صدای کوبه‌ای توسط دستگاه ضربه‌زن استاندارد به‌عنوان منبع صدای کوبه‌ای نیز توسط گرتسن[1] انجام پذیرفت [۷].

هم‌چنین، جهت بررسی تأثیر استفاده از مواد الاستیک پلیمری[2] بر میزان انتشار صدای کوبه‌ای با روش میدانی، آزمونی توسط دستگاه ضربه‌زن استاندارد انجام گرفت و نتایج قابل قبولی حاصل گردید [۲۶].

یکی از روش‌های آزمون نوفه ضربه‌ای، انجام تست اندازه‌گیری نوفه روی سقف، توسط چکشی بوده که به دلیل عدم انطباق داده‌های آزمون با استنباط‌های ذهنی افراد، پذیرفته نشد و برای این نوع آزمون، استفاده از دستگاه چکش اصلاح‌شده با روکش‌های فولاد و لاستیک پیشنهاد گردید که بسامد ضربه‌ای آن مشابه بسامد ضربه‌های واقعی بوده است [۲۷].

استفاده از دستگاه ضربه‌زن استاندارد به‌عنوان منبع صدای کوبه‌ای، از روش‌های مهندسی پیشنهادی برای شناسایی مسیرهای انتقال صدای کوبه‌ای بوده و سطوح شتاب ارتعاش در سطح عناصر ساختمانی توسط یک شتاب‌سنج و تحلیل‌گر شش‌کاناله اندازه‌گیری شد [۲۸].

این دستگاه برای اندازه‌گیری میزان کاهش صدای ضربه‌ای در مورد پوشش‌های نرم قراردادهشده بر کف‌های سنگین وزن، استفاده گردید که با توجه به نیاز کم‌تر به امکانات اندازه‌گیری در مقایسه با استانداردها، روش مهندسی مذکور می‌تواند ابزار مفیدی در فرآیند طراحی و بهبود محصولاتی مانند کفپوش‌های نرم باشد [۲۹].

دستگاه ضربه‌زن به‌عنوان منبع ضربه استاندارد، کارآمدترین دستگاه برای پیش‌بینی صدای کوبه‌ای جهت بررسی آسایش صوتین خانه‌ها از طریق بررسی ارتباط داده‌های صدا و پاسخ‌های ذهنی توسط تست‌های آزمایشگاهی معرفی گشته و هم‌چنین روش ضربه با توپ لاستیکی جهت شبیه‌سازی صداهای ضربه معمولی یا راه رفتن انسان در خانه‌ها اشاره می‌شود [۳۰].

در تحقیقی دیگر نیز جهت پیش‌بینی نوفه ضربه‌ای از دستگاه ضربه‌زن استاندارد، به‌عنوان مولد صدای کوبه‌ای استفاده شده است [۳۱].

صدای کوبه‌ای تولیدشده توسط دستگاه ضربه‌زن استاندارد طی انجام آزمون میدانی بر سقف چوبی، اندازه‌گیری شده‌است [۳۲].

در یک دفتر با پلان باز نیز طی بررسی‌های میدانی نوفه بسامد پایین، زمان‌های طنین با صداسنج دقیق B&K۲۲۳۱ و پردازشگر طنین BZ۷۱۰۴ و منبع صدای B&K۴۲۲۴ اندازه‌گیری شد [۳۳].

هم‌چنین در تحقیقی دیگر برای اندازه‌گیری تراز صدای کوبه‌ای کمپرسور، از ترازسنج صدا B&K۲۲۶۰ جهت اندازه‌گیری تراز فشار صدا استفاده شده است [۱۷].

از نظر نسبت علامت به نوفه[3] (یک شبه‌سنج[4] اندازه‌گیری مورد استفاده در زمینه‌های مهندسی و علمی است که علامت (سیگنال) مورد نظر را با تراز نوفه پس‌زمینه بر حسب دسی‌بل مقایسه می‌کند. در بسامدهای پایین نیز چکش ضربه‌ای بهتر است و می‌توان نتیجه گرفت که برای اندازه‌گیری صداهای حاصل از ضربه به علت تکرارپذیری آزمون، یک چکش ضربه‌ای خودکار در برخی از تنظیمات کارآمدتر است [۱۴].

در طول فرآیند ساخت و ساز یا بازسازی فضاهای بسته در نظر گرفته شده برای گفتار و رویدادهای موسیقی بین معماران و صوت‌شناسان[5] استفاده از فن‌های مختلف شبیه‌سازی به‌منظور به‌دست‌آوردن یک دید کلی از ویژگی‌های صوتین اتاق مورد نظر، رواج یافته‌است.

[1] Gertsen
[2] Polymeric elastic materials
[3] Signal to Noise
[4] Parameter
[5] Acoustician

[Downloaded from joasi.ir on 2026-09-06]

هر یک از این فن‌های شبیه‌سازی مزایا و محدودیت‌های خود را خواهند داشت. اندازه‌گیری‌های درجا یا اندازه‌گیری‌های میدانی به دلیل دشواری محاسبات مختلف و در نظر گرفتن جنبه‌های واقعی مانند جذب هوا، جذب مواد و ضرایب انتشار ذاتی، قابل اطمینان‌ترین اندازه‌گیری‌ها به شمار می‌روند [۳۴].

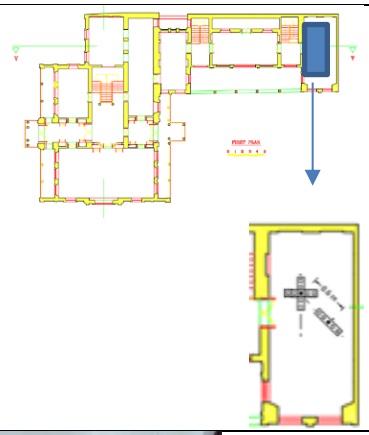
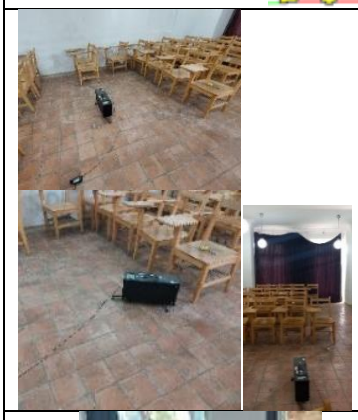
۲-۹. روش اندازه‌گیری صدای کوبه‌ای

با استناد به اغلب پژوهش‌های این زمینه و انجام آزمون میدانی توسط نویسندگان مقاله حاضر طی پژوهشی بر دو سقف تیر چوبی متعلق به بنای گنجه‌ای‌زاده و طاقی متعلق به بنای قدکی از بناهای تاریخی دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه هنر اسلامی تبریز و حصول نتایجی مثبت در این راستا، دستگاه ضربه‌زن استاندارد از تجهیزات معتبر شرکت بی‌آندکا به‌عنوان معتبرترین منبع مولد صدای کوبه‌ای و سنجشگر صدا B&K۲۲۶۰ جهت برداشت تراز فشار صدا، با توجه به مزایای استفاده از این تجهیزات پیرو آزمون انجام‌گرفته، به‌عنوان ابزار مناسب جهت اندازه‌گیری میزان صدای کوبه‌ای در انواع سقف‌ها معرفی می‌گردد [۳۶].

به دلیل همسان بودن شرایط پژوهش، تصاویر انجام مرحله‌به‌مرحله آزمون توسط تجهیزات فوق بر یکی از بناهای دانشگاه هنر اسلامی تبریز، به ترتیب در جدول ۲ گردآوری شده است. می‌توان از این منبع و مراحل، به‌عنوان یک الگوی آموزشی جهت انجام آزمون‌های دیگر در این زمینه بهره‌مند گشت.

در خصوص سنجش میدانی که مورد تأکید این تحقیق است، شرایط قرارگیری و چیدمان تجهیزات و مراحل سنجش تراز فشار صدای کوبه‌ای در تمامی برداشت‌های صدای کوبه‌ای، به‌قرار زیر برای همه سقف‌ها قابل استفاده خواهد بود. پس از انتخاب سقف و محل آزمون (که باید در دو طبقه و منطبق برهم با شرایط همسان باشد)، دستگاه ضربه‌زن در طبقه فوقانی مطابق با استاندارد ایی۱۰۰۷-۲۱ [۳۵]، تقریبا در وسط فضای مورد آزمون و در چهار حالت مطابق با شکل ۶ بر سقف مورد نظر قرار می‌گیرد.

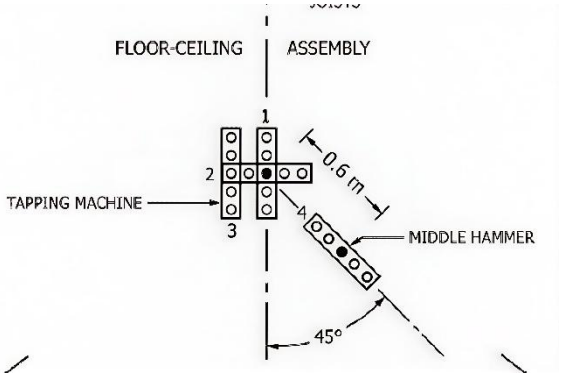
جدول ۲ مراحل برداشت صدای سقف تیر چوبی (بنای گنجه‌ای‌زاده)[۳۶].

عنوان	تصاویر برداشت‌های صدا
پلان طبقه اول ساختمان گنجه‌ای‌زاده، نشانه‌گذاری محل قرارگیری دستگاه ضربه‌زن استاندارد در طبقه اول	
جای‌گذاری دستگاه در اتاق منبع. (اتاق طبقه فوقانی)	
قرار دادن دستگاه سنجشگر صدا B&K۲۲۶۰ در طبقه زیرین و واسنجیدن[۲] آن	
برداشت SPL توسط تراز سنج صدا B&K۲۲۶۰	

[1] E1007-21

[2] Calibrate

[Downloaded from joasi.ir on 2026-09-06]



شکل۶ استاندارد قرارگیری دستگاه ماشین ضربه‌زن[1].

پس از جایگذاری دستگاه، در طبقه زیرین محدوده آزمون، سنجشگر صدا B&K۲۲۶۰، جهت برداشت تراز فشار صدای کوبه‌ای تولیدشده، قرار داده می‌شود و سنجشگر، توسط واسنج[2]، بررسی می‌گردد.

دستگاه ضربه‌زن استاندارد، شامل پنج چکش در محور طولی دستگاه است که با روشن کردن دستگاه، چکش‌ها با ضربه زدن بر کف، صدای کوبه‌ای ایجاد کرده و در این حین، تراز فشارصدای کوبه‌ای تولیدشده در طبقه زیرین توسط سنجشگر B&K۲۲۶۰، برداشت می‌گردد.

داده‌های آزمون‌های مذکور می‌توانند با استانداردهای مربوطه مقایسه شده و برای کنترل و کاهش میزان عبور صدا، راهکار ارائه دهد.

۳. نتایج

از مرور مطالعات، مقالات و آزمون‌های انجام‌گرفته در این حیطه برمی‌آید که سنجش میدانی توسط دستگاه ضربه‌زن استاندارد، جهت اندازه‌گیری صدای کوبه‌ای از کاربردی‌ترین روش‌ها بوده است. ضمناً امکان به‌دست‌آوردن نتایج قابل تکرار، از مزیت‌های استفاده از این دستگاه به‌عنوان منبع مولد صدای ضربه‌ای می‌باشد؛ چراکه این روش امکان جداسازی صداهای کوبه‌ای و هوابُرد را فراهم آورده و حتی در صورت وجود اتصالات ضعیف یا عناصر با عایق صدا پایین، فرآیند اندازه‌گیری را قطع نمی‌کند.

از طرفی، به‌دلیل استفاده از دستگاه مذکور، صداهای تولیدشده پایدار هستند و در طول زمان تغییر نمی‌کنند و اندازه‌گیری تراز فشار صدا، به‌نوبه خود امکان ارزیابی سطوح صدای کوبه‌ای را فراهم می‌آورد.

۴. بحث

در این تحقیق، علم صوتیّات[3] و انواع آن و راه‌های انتشار صدا مورد مطالعه قرار گرفته است. همان‌طور که اشاره گردید، صدا به دو طریق کوبه‌ای از پیکره ساختمان، و هوابُرد از طریق هوا انتشار می‌یابد.

مبحث انتشار صدای کوبه‌ای، یکی از روش‌های انتشار صدا و شناخت دقیق‌تر صدای کوبه‌ای، چه در لغت و چه در معنا، نیز در این پژوهش شرح داده‌شد. از طرفی، منابع مولد این نوع صدا به‌تفکیک مطالعات انجام‌گرفته در این حیطه گردآوری شد. هم‌چنین، روش‌ها و ابزار سنجش صدا، کمیّت‌های صدای مورد استفاده پژوهشگران و روش اندازه‌گیری با دستگاه ضربه‌زن استاندارد تبیین گشت.

با توجه به مطالعات و پژوهش‌های دیگر محققان و قیاس نتایج آن‌ها با آزمون انجام‌گرفته توسط نویسندگان مقاله حاضر در تحقیقی دیگر مرتبط با این موضوع، بر دو سقف از بناهای تاریخی [۳۶]، پر واضح است که صدای کوبه‌ای از جمله صداهای روزمره و آزاردهنده در کاربری‌های گوناگون شناخته‌شده و منابع بی‌شماری را شامل می‌شود.

شناسایی مسیر عبور صدا و سنجش میزان صدای انتقال‌یافته از انواع مصالح، سقف و غیره، جهت ارائه راهکار و کنترل آن برای فراهم‌آوردن آسایش در محیط، ضروری می‌باشد؛ بنابراین، با توجه به قیاس نتایج تحقیقات، انجام سنجش میدانی توسط دستگاه ضربه‌زن استاندارد به‌عنوان مولد صدای کوبه‌ای و سنجشگر صدا B&K۲۲۶۰، جهت اندازه‌گیری تراز فشار صدای تولیدی، به‌عنوان برترین روش و ابزار جهت اندازه‌گیری صدای کوبه‌ای، تایید شده و معرفی می‌گردد.

کسب داده‌های حاصل از آزمون‌ها، مشروط بر استاندارد بودن یا نبودن تراز فشار صدای تولیدشده، می‌تواند در

[1] Tapping machine
[2] Calibrator
[3] Acoustics

[Downloaded from joasi.ir on 2026-09-06]

راستای معرفی و طراحی عایق صدا ارتعاشی کارآمد، مفید واقع شود.

۵. نتیجه‌گیری

انجام آزمون میدانی توسط دستگاه ضربه‌زن استاندارد به عنوان مولد صدای کوبه‌ای و تراز سنج صدا B&K۲۲۶۰ برای برداشت تراز فشار صدای تولید شده از روش‌ها و تجهیزات معتبر جهت اندازه‌گیری صدای کوبه‌ای می‌باشد. آزمون‌های میدانی بر سقف‌ها و مصالح متعدد، توسط تجهیزات مذکور پیشنهاد می‌گردد.

تقدیر وتشکر

نویسندگان از دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه هنر اسلامی تبریز برای فراهم نمودن شرایط آموزش و آزمایش حیطه صوتیّات و مباحث پیرو آن، کمال تشکر را دارند.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله حاضر اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافعی در مورد مطالب این مقاله وجود ندارد.

مراجع

[1] R. Shishoo, “Textile advances in the automotive industry,” Woodhead Publishing, vol. 1, no. 1, pp. 10–25, 2008.
[2] M. Egan, “Architectural acoustics,” McGraw-Hill, vol. 2, no. 3, pp. 50–65, 2007.
[3] F. Fahy, P. Gardonio, “Sound and structural vibration: radiation, transmission and response,” Academic Press, vol. 2, no. 1, pp. 100–115, 2007.
[4] A. Gramez, D. Ouis, F. Belhamel, “In-situ investigation of the acoustical performance in collective social dwellings,” Applied Acoustics, vol. 180, pp. 108124, 2021.
[5] M. Levy, “Encyclopedia Britannica,” available at https://www. britannica.com (Accessed April 12, 2025).
[6] Ministry of Roads and Urban Development, “National Building Regulations, Part 18: Acoustics,” Tehran: Office for Compilation and Promotion of National Building Regulations, pp. 1–50, 2017.
[7] E. Gerretsen, “Modelling structure-borne sound from equipment in buildings: Current developments in EN 12354-5,” Proceedings of the International Congress on Acoustics, Kyoto, Japan, pp. 1234–1239, 2004.
[8] A. Sabati, Z. Tafazoli, “Analysis of theoretical foundations of sound and place studies from architectural acoustics to auditory space,” Bagh-e Nazar Scientific Journal, vol. 19, no. 1, pp. 45–56, 2022.
[9] P. Nasiri, “Fundamentals of acoustics in buildings,” Khajeh Nasir University Press, pp. 45–60, 1999.
[10] H. Amid, “Amid Persian Dictionary,” Amir Kabir Publications, pp. 100–105, 1996.
[11] C. Harris, “Dictionary of Architecture & Construction, 4th edition,” New York: McGraw-Hill, pp. 250–255, 2006.
[12] A. Kashkooli, “Evaluation of the acoustic performance of building floors under impact loading due to walking,” M. Sc. thesis, Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Iran, Isfahan, pp. 30–45, 2016.
[13] J. Jeon, “Subjective evaluation of floor impact noise based on the model of ACF/IACF,” Journal of Sound and Vibration, vol. 241, no. 1, pp. 147–155, 2001.
[14] M. Lievens, “Structure-borne sound sources in buildings,” Logos Verlag Berlin GmbH, vol. 15, pp. 60–75, 2013.
[15] M. Späh, B. Gibbs, “Reception plate method for characterisation of structure-borne sound sources in buildings: Assumptions and application,” Applied Acoustics, vol. 70, no. 2, pp. 361–368, 2009.
[16] M. Villot, “Predicting sound levels generated on site by structure-borne sound sources in buildings,” Proceedings of Euronoise, Crete, Greece, pp. 789–794, 2018.
[17] S. Pakzad, A. Shah Hoseini, G. Shadman, “Investigation of form influence in design and manufacturing of sound control chambers of compressor,” Journal of Acoustical Engineering Society of Iran, vol. 8, no. 1, pp. 61–67, 2020.
[18] A. Moorhouse, A. Elliott, G. Eastwick, T. Evans, A. Ryan, S. von Hunerbein, D. Waddington, “Structure-borne sound and vibration from building-mounted wind turbines,” Environmental Research Letters, vol. 6, no. 3, pp. 035102, 2011.
[19] M. Sanayei, J. Moore, C. Brett, “Measurement and prediction of train-induced vibrations in a full-scale building,” Engineering Structures, vol. 77, pp. 119–128, 2014.
[20] J. Wang, Y. Xu, K. Liang, Q. Liu, J. Li, K. Liu, “Modeling analysis on propagation of structure-borne vibration caused by an indoor distribution transformer in a building and its control method,” Applied Sciences, vol. 7, no. 4, pp. 405, 2017.
[21] J. Smith, P. Jones, C. Brown, S. Davis, “Standardising structure-borne noise,” Journal of Building Acoustics, vol. 25, no. 3, pp. 201–210, 2018.
[22] T. Asakura, M. Toyoda, T. Miyajima, “Numerical and experimental investigation on structure-borne sound transmission in multilayered concrete structures,” Journal of Sound and Vibration, vol. 413, pp. 1–25, 2018.
[23] B. Trinite, A. Astolfi, “The impact of sound field amplification systems on speech perception of pupils with and without language disorders in natural conditions,” Applied Acoustics, vol. 175, pp. 107824, 2021.
[24] S. Hirakawa, C. Hopkins, “Assessing the low-frequency measurement procedure for the measurement of impact sound insulation using the rubber ball,” Journal of Building Acoustics, vol. 28, no. 4, pp. 234–245, 2023.
[25] A. Homb, “Experiences with spectrum adaptation term and extended frequency range from field and laboratory

[Downloaded from joasi.ir on 2026-09-06]

measurements," Proceedings of Forum Acusticum, pp. 112–117, 2005.

[26] M. Hedayati, A. Reisiann, "Investigation of the effect of polymeric materials in floating floor systems to improve impact sound insulation," Journal of Architectural Acoustics, vol. 10, no. 2, pp. 142–148, 2015.

[27] T. Schultz, "Alternative test method for evaluating impact noise," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 60, no. 3, pp. 645–655, 1976.

[28] K. Baruch, A. Majchrzak, T. Kamisiński, A. Szeląg, "An engineering method to measure structure-borne sounds transmitted through the building partitions," Technical Transactions, vol. 23, pp. 60–75, 2019.

[29] K. Baruch, A. Szeląg, J. Rubacha, K. Hałoń, "An engineering method to measure the impact sound reduction due to soft coverings on heavyweight floors," Applied Acoustics, vol. 142, pp. 18–28, 2018.

[30] N. Vardaxis, D. Bard, "Review of acoustic comfort evaluation in dwellings: Part II—impact sound data associated with subjective responses in laboratory tests," Building Acoustics, vol. 25, no. 2, pp. 171–192, 2018.

[31] S. Ziaei-Rad, M. Ghiyour, K. Darabi , "Prediction of impact noise in different floors of a building," Journal of Acoustical Engineering Society of Iran, vol. 5, pp. 99–104, 2011.

[32] M. Caniato, F. Bettarello, P. Fausti, A. Ferluga, L. Marsich, C. Schmid, "Impact sound of timber floors in sustainable buildings," Building and Environment, vol. 120, pp. 110–122, 2017.

[33] J. Lai, "Application of the sound intensity technique to noise source identification: A case study," Applied Acoustics, vol. 34, no. 2, pp. 89–100, 1991.

[34] N. Ortiz, S. Barré, B. Vonrhein, "The Acoustic Camera as a valid tool to gain additional information over traditional methods in architectural acoustics," Energy Procedia, vol. 78, pp. 122–127, 2015.

[35] Astm, "Standard Test Method for Field Measurement of Tapping Machine Impact Sound Transmission Through Floor-Ceiling Assemblies and Associated Support Structures," ASTM International, vol. E1007, 2021.

[36] M. Pezeshgi-Modarres, A. Ghafari, "Compar-ative evaluation of wooden beam and vaulted ceilings with emphasis on impact noise (case study: Kadki building and Ganjehizadeh faculty of architecture and urban planning)," 3rd International Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Planning, Environment, and Islamic Art Horizons in the Second Step of the Revolution, 2023. (in Persian).

[Downloaded from joasi.ir on 2026-09-06]