

مطالعه‌ای بر ویژگی‌های آکوستیکی در تزئینات هندسی ایرانی

محمد مهدی کرباسباف*

دانش آموخته دانشکده مکانیک، دانشگاه

آزاد اسلامی، قزوین، ایران

karbasbaf@gmail.com

غزاله اذعان

دانش آموخته دانشکده ادبیات و علوم

انسانی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

gh.ezaan@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۸/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱

چکیده

تزئینات در معماری ایران به دلیل ماهیت عمدتاً بصری‌شان، بیشتر مورد توجه نظریه‌پردازان و تحلیل‌گران از طریق دیدگاه‌های زیبایی‌شناختی و فرهنگی قرار گرفته است. با ورود نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و تحلیل سازه به جامعه معماران و مهندسان، سالیان است که تحلیل جنبه سازه‌ای و دینامیکی این نوع تزئینات نیز از نظر علمی مورد مطالعه و تحلیل دقیق قرار گرفته است. در ادامه این جریان، یکی از جنبه‌های مهمی که باید در این زمینه مورد مطالعه وسیع قرار گیرد، طرح بحث و تحلیل چالش‌های پیش‌رو در وجهه آکوستیکی بناهاست. این پژوهش یک بررسی سیستماتیک را از چگونگی تأثیر سیستم‌های تزئینی معماری بر ویژگی‌های انتشار و پاسخ آکوستیکی در فضاهای معماری محصور ارائه می‌دهد. این مطالعه از طریق روش‌شناسی تجربی کنترل‌شده با استفاده از مدل‌های هندسی ساده مشتق‌شده از تزئینات مقعر ایرانی، اثرات آکوستیکی قابل اندازه‌گیری تعبیه‌شده در اصول معماری ایرانی را نشان می‌دهد. این پژوهش از عناصر نیم‌کره‌ای در محیط‌های محفظه‌ای کنترل‌شده برای تحلیل الگوهای انتشار صدا، ویژگی‌های بازتاب و تغییرات کلی پاسخ آکوستیک استفاده می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد که این سیستم‌های تزئینی به‌طور قابل توجهی رفتار آکوستیکی را از طریق سه مکانیزم اصلی تغییر می‌دهند: اثرات بی‌نظمی سطح بر انتشار صدا، رزونانس ناشی از حفره‌ها، و کنترل الگوی انعکاس هندسی. نتایج تجربی کاهش ۳۰ درصدی در حداکثر دامنه، کاهش ۵۷ درصدی در دامنه RMS ۱ و بهبود ۸۰ درصدی در زمان واپاشی را نشان می‌دهند. این پژوهش اعتبارسنجی از اصول طراحی آکوستیک که قبلاً مستند نشده بودند را ارائه داده و همسویی قابل توجهی میان شیوه‌های معماری سنتی و نتایج کاربرد آکوستیکی قابل اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. این نتایج و تحلیل‌ها سعی در ارائه مباحثی در باب تزئینات معماری ایرانی به‌عنوان راه‌حلی برای توسعه سیستم‌های بهبود آکوستیکی یکپارچه دارد.

کلمات کلیدی: آکوستیک معماری؛ تزئینات هندسی ایرانی؛ معماری ایرانی؛ طراحی آکوستیک؛ آکوستیک معماری

ایرانی

۱. مقدمه

رابطه پیچیده بین فرم و عملکرد در طراحی معماری از دیرباز محققان را مجذوب خود کرده است، اما عناصر کمی به اندازه سیستم‌های هندسی تزئینی معماری سنتی ایران، این دوگانگی را به خوبی نشان می‌دهند. در حالی که اهمیت زیبایی‌شناختی عناصری مانند کاربرندی، یزدی‌بندی و مقرنس^۲ به خوبی مستند شده است، کاربردهای بالقوه آکوستیکی آن‌ها تا حد زیادی از طریق تحقیقات تجربی ناشناخته مانده است. این پژوهش یک تحلیل ترکیبی و عمومی از چگونگی تأثیر این الگوهای هندسی بر رفتار آکوستیکی در فضاهای محصور را ارائه می‌دهد. شواهد تاریخی نشان می‌دهد که معماران بزرگ در سنت معماری ایران، با آگاهی و تعمداً این سیستم‌های تزئینی را برای دستیابی به بهبودهای آکوستیکی مدنظرشان به مثابه کاربرد فضا در بناها گنجانده‌اند [۴، ۱۰، ۱۴]. با این حال، فقدان اسناد تاریخی دقیق در مورد اصول طراحی آکوستیکی آن‌ها، همراه با اتکای سنتی به انتقال دانش شفاهی، شکاف مهمی در درک پژوهشگران از خواص آکوستیکی آن‌ها ایجاد کرده است.

این مطالعه از طریق بررسی تجربی دقیق و مدل‌سازی ریاضی اشکال هندسی ساده‌شده با الهام از نقوش تزئینی سنتی ایرانی، سعی بر طرح مباحثی برای آغاز پرکردن این شکاف را دارد. این پژوهش با استفاده از یک محیط محفظه کنترل‌شده و عناصر نیم‌کره‌ای که عناصری اساسی اشکال کاسه‌سازی را منعکس می‌کنند، بررسی می‌کند که چگونه این ویژگی‌های معماری، انتشار صدا، الگوهای بازتابش و پاسخ کلی آکوستیکی را تغییر می‌دهند. یافته‌های این پژوهش شواهدی از اثرات آکوستیکی این سیستم‌های هندسی را ارائه می‌دهد که نشان‌دهنده سازگاری قابل توجه با شیوه‌های معماری ایرانی است. از طریق این تحلیل، این پژوهش نه تنها سعی بر طرح مباحثی در اصول طراحی آکوستیک سنتی ایرانی و اعتبارسنجی آن دارد، بلکه کاربردهای بالقوه

آن‌ها را در آکوستیک معماری معاصر نیز روشن می‌کند. این مقاله سعی در تعمیق درک حکمت و خرد معماری ایرانی دارد و اهمیت پایدار نوآوری‌های معماری ایرانی را نشان می‌دهد.

۲. زمینه تاریخی طراحی آکوستیک تزئینی

تعامل بین اصول آکوستیک و تزئینات معماری، تلاقی پیچیده‌ای از زیبایی‌شناسی و عملکرد را آشکار می‌کند. گنجاندن تزئینات در طراحی معماری اغلب با تمایل به بهبود میزان انتشار و کنترل واخنش صدا امری است که در آثار بسیاری از معماران گذشته دیده می‌شود. این عملکرد آکوستیکی تزئینات، در فرهنگ‌ها و دوره‌های تاریخی متعددی، از چین و هند باستان گرفته تا تمدن‌های کلاسیک اروپایی، شناخته شده است [۱، ۲]. در زمینه آکوستیک تزئینات، اصل اساسی شامل کنترل پاسخ فضاهای بنا به امواج آکوستیکی از طریق ویژگی‌های سطح، الگوهای هندسی و میزان ناهمواری سه‌بعدی است که در نتیجه به خواص آکوستیکی مطلوب در فضاهای باز و بسته دست می‌یابد. پایه علمی این عمل بر سه پدیده اصلی صدا استوار است که عبارتند از: کنترل بازتابش صدا از طریق سطوح نامنظم، کنترل رزونانس از طریق ساختارهای حفره‌ای، و الگوهای بازتاب صدا از طریق چیدمان‌های هندسی [۳]. این اصول به‌طور یکپارچه در طراحی عناصر تزئینی معماری ایرانی به‌کار گرفته شده‌اند.

معماران و مهندسان ایرانی به‌طور ماهرانه‌ای آکوستیک سازه‌های خود را از طریق ترکیبی از آزمایش‌های عملی، مطالعات مشاهده‌ای، درک محیط‌های آکوستیک طبیعی، به همراه اصول هندسی و انتخاب دقیق مواد و مصالح توسعه دادند. در نهایت، این روش‌ها آن‌ها را قادر ساخت تا فضاهایی ایجاد کنند که به طور مؤثر از کاربردهای شنوایی مورد نظرشان پشتیبانی می‌کرد.

بررسی نمونه‌های تاریخی مربوط به این موضوع نشان می‌دهد که تمدن‌های پیشین، علیرغم نداشتن ابزارهای

اندازه‌گیری آکوستیک مدرن، نوعی آگاهی و درک تجربی را از طریق مشاهده و آزمایش پرورش داده‌اند. شواهد باستان‌شناسی نشان می‌دهد که معماران از زمان معابد و آمفی تئاترهای باستانی، رویکردی آگاهانه به طراحی

آکوستیک داشته‌اند. این راه‌حل‌های تاریخی همچنان بر طراحی آکوستیک معاصر تأثیر می‌گذارند و درک پیچیده‌ای از کنترل آکوستیک را که در تمدن‌ها تکامل یافته است، نشان می‌دهند [۴].

جدول ۱. رویکردهای تاریخی طراحی آکوستیک تزئینات در تمدن‌های مختلف

منابع	اندازه‌گیر ی شده/ مشاهده شده	نمونه‌های معرف	مکانیزم‌های آکوستیکی	ویژگی‌های معماری کلیدی	تمدن /دوره
[۵، ۶، ۷]	زمان واخنش (RT) ^۸ تقریباً ۰/۵ ثانیه در فرکانس‌های میانی؛ انتقال کارآمد صوت از صحنه به ردیف‌های بالایی	تئاتر اپیداروس ^۷	بهینه‌سازی مسیرهای بازتاب صوت، افزایش کارایی پراکندگی ، تشدید ^۵ شکاف‌های کوچک ^۶ برای جذب فرکانس پایین	دیازوما ^۳ : راهروهای افقی تقسیم‌کننده بخش‌های صندلی، کویلون ^۴ : آرایش صندلی‌های گوه‌ای شکل، صندلی‌های سنگ آهکی حکاکی شده	مدیترانه باستان (یونان)
[۹، ۸]	وضوح شنوایی بهبود یافته در گردهمایی‌ها؛ کاهش تداخل پژواک	تئاتر شمالی جرش ^{۱۳} ؛ پانتئون ^{۱۴} ؛ باسیلیکای ماکسنسیوس و کنستانتین ^{۱۵}	کنترل بازتاب رزوناتورهای هلمهولتز ^{۱۲} برای کاهش فرکانس‌های ناخواسته، اختلال موج صوتی برای به حداقل رساندن پژواک	ولا ^۹ : سایبان‌های سقفی، اکیا ^{۱۰} ظروف صوتی، سطوح دیوار مدوله شده، سقف‌های صندوق‌دار ^{۱۱}	مدیترانه باستان (روم)

اسلامی

بیزانسی - عثمانی

اروپای قرون وسطی

<p>[۱۰-۱۶]</p> <p>محیط‌های متعادل برای گفتار و موسیقی؛ بهبود پرتاب صدا در طول نماز</p>	<p>الحمراء، گرانا^{۲۰}؛ مسجد بزرگ قرطبه^{۲۱}؛ کاپلا پالاتینا، پالمو^{۲۲}؛ مساجد عثمانی</p>	<p>پخش وابسته به فرکانس از طریق پیچیدگی لایه‌ای، توزیع یکنواخت صوت، کنترل واخنش از طریق پیکربندی قوس پله‌ای، کنترل انتشار و بازتاب صوت از طریق استفاده از سطح دیفیوزر</p>	<p>مقرنس^{۱۶}: هندسه لانه زنبوری، نقوش گره^{۱۷}: ساختارهای سلولی هندسی، تزئینات سطحی اسلامی^{۱۸}، الگوهای تسلیشن^{۱۹} و معرق کاشی</p>
<p>[۱۷-۲۷]</p> <p>حفظ سطوح واخنش مطلوب؛ غنی‌سازی فضای آکوستیکی؛ تقویت فرکانس‌های خاص</p>	<p>مسجد سلیمانیه، استانبول^{۲۵} (۱۵۵۰-) ۱۵۵۷ میلادی)</p>	<p>هدایت مجدد انرژی صوتی به سمت جماعت، آرایه‌های رزوناتور هلمهولتز برای تضعیف انتخابی باند فرکانسی، افزایش انتشار و پراکندگی^{۲۴} موج صوتی، کاهش نقاط کانونی آکوستیکی ناخواسته</p>	<p>گنبد‌های متعدد و نیم‌گنبد‌ها، پندانتیوها^{۲۳}: سطوح انتقالی منحنی، گنبد‌های سوراخ‌دار با دریچه‌ها، برجستگی‌های سطحی تزئینی، سرستون‌های حکاکی شده و نقوش برجسته، ظروف رزونانس‌کننده به صورت استراتژیک قرار داده شده</p>
<p>[۲۸، ۲۹، ۳۰]</p> <p>زمان‌های واخنش طولانی؛ بهبود وضوح گفتار و آواز گروهی^{۳۱}؛ ارتباط واضح در فضاهای اجتماعی</p>	<p>نوتردام، پاریس^{۲۹}؛ کلیساهای گوتیک؛ صومعه‌ها و تالارهای فصلی^{۳۰}</p>	<p>کنترل بازتاب و انتشار صوت، پراکندگی صوت، ایجاد شکست‌های صوتی، اثرات رزونانس و تسهیل انتشار موج</p>	<p>طاق بندی دنده‌دار^{۲۶}، الگوهای پیچیده شبکه‌ای^{۲۷}، سطوح پیچیده حکاکی شده، کُنسول‌های سنگی^{۲۸}، ستون‌ها و پایه‌ها (عناصری مقعر/ستاره‌ای شکل)</p>

<p>کاهش واخشن؛ توزیع و وضوح یکنواخت صوت؛ تعادل زیبایی شناختی و انتشار صوت</p> <p>[۳۱-۳۵]</p>	<p>مجموعه کاخ امپراتوری مینگ- تانگ، داکسینگ/شیان^{۳۵} (قرن هفتم میلادی)؛ خانه‌های ایرای چینی</p>	<p>افزایش رزونانس کنترل بازتاب و انتشار صوت، الگوهای هندسی چندلایه برای تقویت صوت، سطوح نامنظم برای پراکندگی موج صوتی، جذب صوت و توزیع یکنواخت</p>	<p>محیط‌های آکوستیکی کنترل شده؛ فضاهای آرام و تأملی</p> <p>[۳۷،۳۶]</p>	<p>خانه‌ها و معابد سنتی ژاپنی</p>	<p>پرده‌های شوجی^{۳۶}: ساختار کاغذ و چوب، پانل‌های رانما^{۳۷}: پانل‌های فراز درب، الگوهای هندسی در طرح‌های سنتی ماندپاها^{۳۸}:</p>
<p>تجربیات شنیداری زنده در طول مراسم؛ وضوح در طرح‌های محصور؛ میدان صوتی طبیعی پخش کننده؛ جلوگیری از واخشن بیش از حد</p> <p>[۳۸، ۳۹، ۴۰]</p>	<p>معبد کایلاسا، الورا^{۴۱} (قرن هشتم میلادی)؛ معابد جین، راناکپور^{۴۲} (بیش از ۱۴۰۰ ستون حکاکی شده)؛ کاخ‌های هندی</p>	<p>پخش و پرتاب صوت تسهیل حرکت موج صوتی، پراش^{۴۰} و پخش لبه‌ای، تمرکز بازتاب به سمت مناطق عبادت، فیلتراسیون آکوستیکی با تهویه استراتژیک زاویه‌دار</p>	<p>نکته: اصول آکوستیکی بنیادین زیربنای این رویکردها شامل: (۱) کنترل انتشار صوت از طریق سطوح نامنظم، (۲) کنترل رزونانس از طریق ساختارهای حفره‌ای، و (۳) الگوهای بازتاب از طریق آرایش‌های هندسی می‌باشد.</p>	<p>۳. ترکیب عملکرد و زیبایی‌شناسی در معماری ایرانی</p> <p>معماری ایران نمونه‌ای از ادغام عملکرد و بیان زیبایی‌شناختی است که نمایانگر بیش از سه هزار سال</p>	

توسعه مداوم است. عناصر تزئینی آن، اصول ریاضی، مفاهیم فلسفی و الزامات کاربردی را در بر می‌گیرد که بر تمدن‌های متعدد تأثیر گذاشته است. سنت معماری که در دوره‌های ایلامی، مادها و هخامنشیان تأسیس شد، از طریق تناسبات دقیق ریاضی و الگوهای هندسی تکامل یافت. سلسله سلوکی عناصر معماری ایرانی، یونانی و هلنیستی را با هم ادغام کرد، در حالی که دوره ساسانی (۶۵۱-۲۲۴ میلادی) نوآوری‌های تکنولوژیکی پیشرفته‌ای، به ویژه در فناوری گوشه‌سازی^{۴۳} و ساخت گنبد، ارائه داد [۴۱].

معماران ساسانی مانند آپاسا (۲۶۶ میلادی) و شیدا (۴۰۰ میلادی) پیشگام نوآوری‌های سازه‌ای در گوشه‌سازی، سیستم‌های نگهدارنده گنبد و روابط ستون-طاق بودند. دوره اسلامی این اصول را از طریق مشارکت ریاضیدانان و فیلسوفانی مانند غیاث‌الدین جمشید کاشانی، ابن سینا، فارابی، عمر خیام، ابوالوفاء بوذجانی، اسماعیل جزری، بیرونی و خوارزمی، در کنار معمارانی مانند محمد بن لاده اصفهانی (۹۰۰ میلادی)، عبدالوهاب قزوینی (۱۰۵۰ میلادی) و ابوالمعالی زنجانی (۱۰۶۷ میلادی) توسعه داد [۴۲].

پس از فتح ایران توسط اعراب در سال ۶۵۱ میلادی، معماری ایرانی سنت‌های فنی ایرانی را حفظ کرد و در عین حال اصول زیبایی‌شناسی اسلامی را در خود جای داد. واژگان معماری از طرح‌های ستونی هخامنشی و گچ‌بری‌های پارتی به مقرنس‌های پیچیده، الگوهای هندسی و خوشنویسی یکپارچه تکامل یافت. فراتر از زیبایی‌شناسی، این عناصر معماری، کاربرد صوتی پیچیده‌ای را در انواع مختلف بناها نشان می‌دهند. امپراتوری ساسانی و سلسله‌های اسلامی پس از آن، کنترل آکوستیک را از طریق اشکال متمایز قوس و گنبد برای پخش صدا، الگوهای سطحی برای انتشار و تزئینات هندسی برای کنترل بازتابش توسعه دادند

۳-۱. ویژگی‌های آکوستیک عناصر تزئینی سنتی

ایرانی

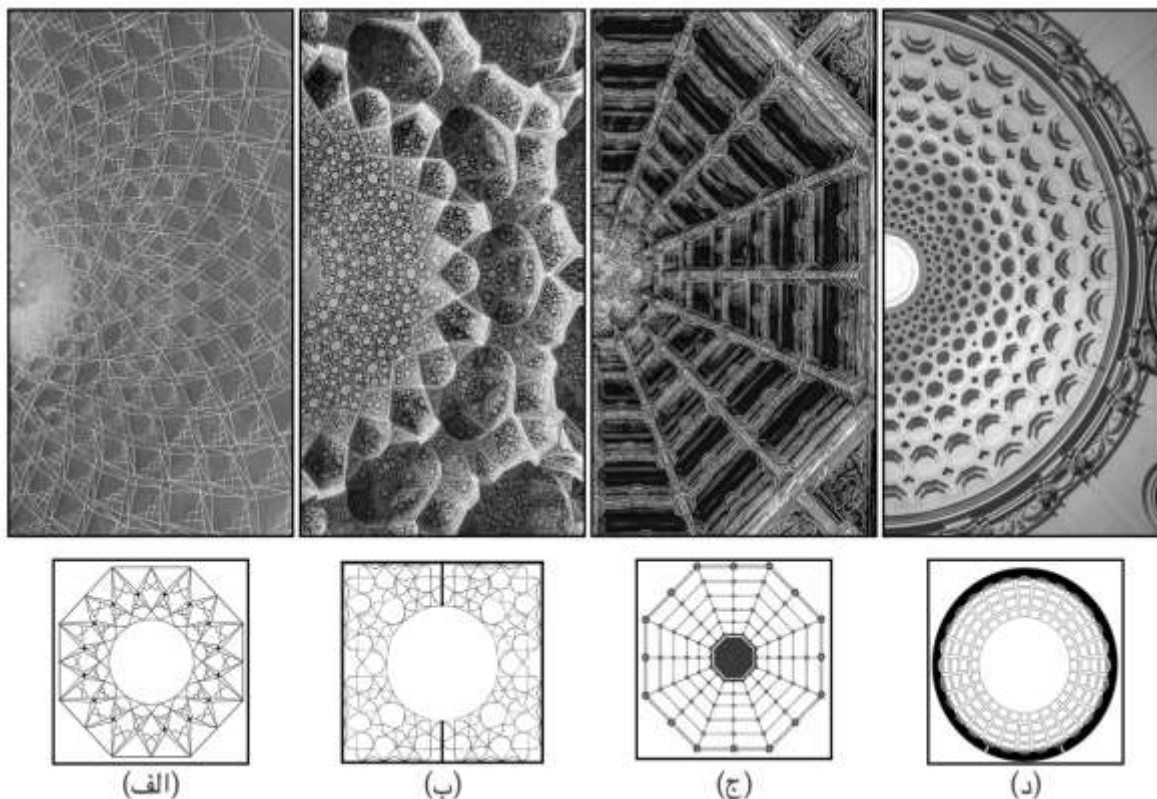
معماران ایرانی از طریق طراحی الگوهای تزئینی، دستکاری پیچیده امواج صوتی را توسعه دادند که نشان‌دهنده اصول اولیه طراحی سیستماتیک آکوستیک است. ویژگی‌های آکوستیک این عناصر معماری، کنترل صدا را از طریق الگوهای انتشار، کنترل بازتابش خواص جذب در فضاهای محصور تسهیل می‌کند. ویژگی‌های تزئینی بر روابط حجمی و مسیرهای صدا تأثیر می‌گذارند و پاسخ فرکانسی را در طیف آکوستیک بهینه می‌کنند. ترکیب مواد - از جمله گچ، آجر و کاشی‌های سنتی - ویژگی‌های جذب، بازتابش و رزونانس صدا را تعیین می‌کند که با روش‌های سنتی تولید و پرداخت‌های سطحی بهبود می‌یابد.

۳-۲. کاربردی: یک سیستم تزئینی بنیادی در

معماری ایرانی

کاربندی^{۴۴}، یک طبقه‌بندی مهم در معماری ایرانی، شامل طاق‌ها و عناصر سازه‌ای-تزئینی مرتبط است که نمونه‌ای از ادغام اصول طراحی زیبایی‌شناختی و عملکردی در شیوه‌های معماری ایرانی است [۴۳]. این سیستم، پیکربندی‌های سازه‌ای دوپوسته را، به‌ویژه در مناطق مرکزی و جنوبی ایران که با آب و هوای خشک و دمای بالا مشخص می‌شوند، پیاده‌سازی می‌کند و فضاهای میانی ایجاد می‌کند که تنظیم حرارتی و آکوستیک را بهینه می‌کند.

فنون جامعی چون کاربردی، یزدی‌بندی، مقرنس، رسمی‌بندی و کاسه‌سازی - نشان‌دهنده سیستم‌های معماری-تزئینی پیچیده‌ای است که از درک پیشرفته معماران ایرانی از اصول هندسی و ریاضی پدید آمده است. این تکنیک‌ها عمدتاً در طاق‌ها، گنبد‌ها، سقف‌ها، رواق‌ها و سازه‌های انتقالی به عنوان سیستم‌های پوششی معماری یکپارچه به کار می‌روند [۴۴].



شکل ۱. تحلیل تطبیقی تزئینات سقف مقعر در فرهنگ‌های مختلف: (الف) یزدی‌بندی در دروازه روضه، تاج محل، هند؛ (ب) مقرنس در ایوان ورودی مدرسه چهارباغ، ایران؛ (ج) سقف صندوق‌های معبد لونگ-شان، لوکانگ، تایوان؛ (د) گنبد طاق‌دار در سن برناردو آله نرزه، ایتالیا

بهبودهای آکوستیکی متمایزی را به مثابه کارکرد فضای درونی ایجاد می‌کنند.

در سازه‌های عظیم که حجم فضایی مستلزم ارتفاع زیاد است، سیستم کاربندی با معرفی یک سقف میانی که روابط متناسب مناسبی را با ارتفاع دیوارها حفظ می‌کند، راه‌حلی زیبا برای چالش مقیاس مردم‌واری ارائه می‌دهد [۴۵]. این پوشش‌های تزئینی ممکن است با مصالح مختلفی از جمله آجر، گچ، کاشی، آینه‌کاری یا ترکیبی از آنها اجرا شوند. شواهد باستان‌شناسی، از جمله قدیمی‌ترین لوح‌های گلی مقرنس، طومارهای توپکاپی^{۴۵} و میرزا اکبر^{۴۶}، و نقشه‌های معماری بخارا در قرن

روش‌شناسی ساختاری این سیستم شامل تقاطع قوس‌های مورب باریک و استفاده از نقاط اتصال آنها برای ایجاد سازه‌های پوششی است. توالی ساخت معمولاً با اجرای دو تا چهار قوس باربر اولیه آغاز می‌شود که قوس‌های فرعی اضافی متعاقباً به آنها متصل می‌شوند. دهانه‌های کاربندی از ابعاد کوچک 2×3 متری (با پلان شش‌ضلعی) تا دهانه‌های بزرگ 10×10 متری در بازارهای سنتی متغیر است که از طریق تقسیم‌بندی مقطعی حاصل می‌شود. این سیستم بارها را از حلقه فشاری به عناصر قوس پایه منتقل می‌کند، در حالی که نقاط کانونی متعدد و پیکربندی‌های گنبدی چندوجهی

شانزدهم، اصول هندسی و روش‌های اجرای این الگوهای سه‌بعدی را روشن کرده‌اند [۴۶].

۳-۳. رسمی‌بندی

یک سیستم شبکه‌ای مرکزگرا که با تقاطع قوس‌های متساوی‌الاضلاع که به سمت یک نقطه مرکزی شمسه^{۴۷} همگرا می‌شوند، تشکیل شده است. در حالی که در درجه اول برابر نیست، می‌تواند به عنوان یک سیستم برابر (کاربندی) عمل کند. اصول هندسی آن از تقسیم‌بندی دایره‌ای قطاعی و وترهای متقاطع ناشی می‌شود. رسمی‌بندی به عنوان پایه و اساس یزدی‌بندی و کاسه‌سازی عمل می‌کند و پراکندگی کنترل‌شده صدای^{۴۸} را از طریق الگوهای پخشایی^{۴۹} و بازتابش کنترل‌شده تسهیل می‌کند [۴۷].

۳-۴. مقرنس

یک سیستم پوششی لانه زنبوری سه‌بعدی از طاق‌های پلکانی افقی که در رأس شمسه به اوج خود می‌رسند. اصطلاح «شمسه»، که ریشه‌شناسی آن از کلمه فارسی «خورشید» گرفته شده است، یک جزء اساسی در واژگان هندسی معماری سنتی ایران را تشکیل می‌دهد [۴۸]. ریشه‌های پیش از اسلام به دوره مادها (دکان داوود)^{۵۰} برمی‌گردد، با اشکال تکامل‌یافته در معماری هخامنشی (کعبه زرتشت) و اشکانی (کاخ هترا)^{۵۱}. از نمونه‌های قابل توجه اسلامی می‌توان به آرامگاه سامانیان و مسجد جورجیر (۹۳۲-۱۰۶۲ میلادی) اشاره کرد [۴۹].

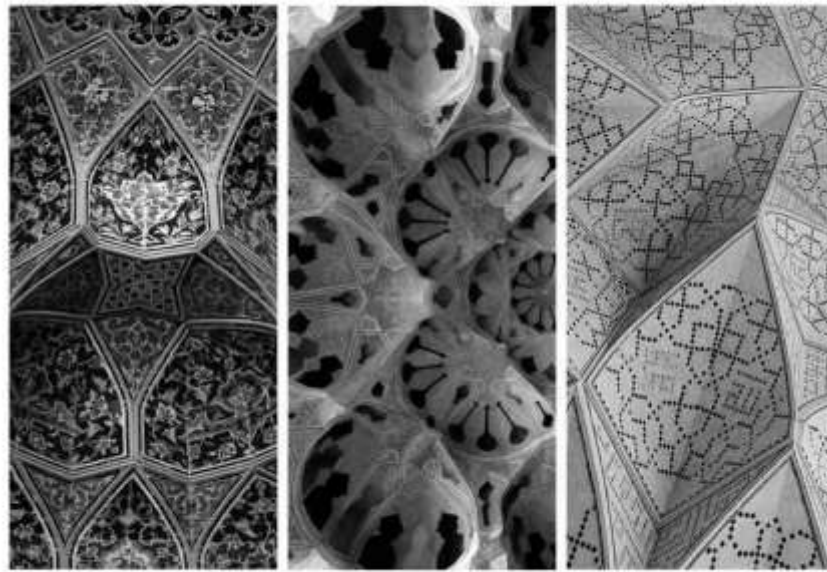
در شکل پیشرفته خود، استقرار مقرنس شامل مکان‌های زیر طاق در ورودی‌ها و ایوان‌ها، مفصل‌بندی فضایی داخلی و انتقال گوشه‌ها می‌شود. کاربردهای خاصی تا پوشش کامل طاق یا سطح داخلی گنبد امتداد می‌یابد [۵۰]. پیکربندی سازه‌ای معمولاً استقلال خود را از

سیستم‌های باربری اولیه حفظ می‌کند و به عنوان یک غشای معماری ثانویه عمل می‌کند [۴۵].

عناصر مقرنس، با عمق ۱۵ تا ۶۰ سانتی‌متر، پخش صدا، پژواک و کنترل فرکانس بم را کنترل می‌کنند. نوع تنگ‌بری از طریق مورفولوژی حفره‌دار، رزونانس فرکانسی خاص را امکان‌پذیر می‌کند، که نمونه‌ی آن در کاخ عالی قاپو اصفهان [۵۱] دیده می‌شود. گوشه‌های مقرنس، در حالی که به عنوان انتقال بار از گنبد به بشن^{۵۲}، تکیه‌گاه و کف عمل می‌کنند، به طور قابل توجهی بر ویژگی‌های آکوستیک فضاهای گنبدخانه تأثیر می‌گذارند [۵۲]. سازگاری الگوهای مقرنس، طراحان آکوستیک را قادر می‌سازد تا از طریق تغییر ساختارمند ابعاد طاقچه مقرنس، ویژگی‌های پخش و جذب پهنای باند را بهینه کنند و نیازهای آکوستیک متنوع را از سخنرانی آیینی گرفته تا اجرای موسیقی برآورده سازند.

۳-۵. یزدی‌بندی

تکاملی از دوران صفویه که اصول رسمی‌بندی و مقرنس را با هم ترکیب می‌کند و شامل ماتریس‌های هندسی به هم پیوسته‌ای است که توپوگرافی سطح را تعدیل می‌کنند. این سیستم از طریق سازماندهی ریتمیک، شبکه‌های انتشار آکوستیک ایجاد می‌کند و مسیرهای انتشار صدا و بازتابش را کنترل می‌کند. ویژگی متمایز این سیستم در پیاده‌سازی ماتریس‌های هندسی به هم پیوسته آن است که توپوگرافی سطح را تعدیل کرده و شبکه‌های انتشار آکوستیک را از طریق اصول سازماندهی ریتمیک ایجاد می‌کند [۵۳]. این عناصر از طریق ادغام فضایی، کنترل دقیقی بر مسیرهای انتشار صدا و انعکاس اعمال می‌کنند و کنترل پیچیده ویژگی‌های واخنش و پارامترهای پهنه‌بندی آکوستیک را تسهیل می‌کنند.



شکل ۲. اجزایی از تزئینات یزدی بندی (مسجد جامع، اصفهان)، تنگبری (چینی خانه کاخ عالی قاپو، اصفهان)، مقرنس (مسجد شاه، اصفهان)

۳-۶. کاسه‌سازی

کاسه‌سازی نشان‌دهنده نوآوری جدیدتری در طبقه‌بندی تزئینات است که با پیاده‌سازی الگوهای کاسه‌ای شکل مشتق شده از عناصر نیم‌کره‌ای مقعر متمایز می‌شود. این عناصر با تراکم‌های مختلف در سطوح سقف، گنبدها و پیکربندی‌های طاق انتخاب‌شده ظاهر می‌شوند و درک عمق فضایی را بهبود می‌بخشند [۵۴]. در کاربردهای سقف، کاسه‌سازی به صورت فرورفتگی‌های نیم‌کره‌ای متعدد که یادآور اشکال خورشید هستند، که در اصطلاحات معماری ایرانی به عنوان شمشه شناخته می‌شوند، خود را نشان می‌دهد. ویژگی‌های مورفولوژیکی - به ویژه هندسه مقعر و توزیع آن، کاسه‌سازی را قادر می‌سازد تا به عنوان یک سیستم یکپارچه بهبود آکوستیکی عمل کند. علاوه بر این، هنگامی که با عناصر هندسی و تزئینی مکمل ترکیب می‌شود، توزیع بار کارآمد را از سقف به سازه‌های بنیادی تسهیل می‌کند.

این سیستم از طریق پیاده‌سازی استراتژیک هندسه‌های مقعر و مفصل‌بندی سطوح منحنی، به‌عنوان یک راه‌حل یکپارچه اصلاح آکوستیکی عمل می‌کند. عناصر منفرد را می‌توان از طریق بهینه‌سازی پارامترهای ابعادی، کنترل پدیده‌های پژواک موضعی و اثرات لرزش، در محدوده‌های فرکانسی خاص تنظیم کرد.

۴. مرور ادبیات

تحقیقات در مورد اثرات آکوستیکی عناصر هندسی در معماری ایرانی محدود است و مطالعات کمی تحلیل‌ها و نتایج قابل اعتمادی ارائه می‌دهند. این کمبود مختص ایران نیست؛ شکاف‌های مشابهی در مطالعات معماری سایر کشورها نیز وجود دارد. تمرکز بر آکوستیک بناهای تاریخی بسیار مهم است، زیرا نه تنها درک ما از شیوه‌های معماری گذشته را افزایش می‌دهد و راه را برای توسعه آن‌ها هموار می‌کند، بلکه قدردانی عمومی از این میراث فرهنگی را نیز افزایش می‌دهد. افزایش آگاهی می‌تواند

منجر به تلاش‌های بیشتر برای حفظ این سازه‌های تاریخی شود.

عناصر معماری سنتی، به ویژه آن‌هایی که در معماری ایرانی و اسلامی یافت می‌شوند، مدت‌هاست که به دلیل پیچیدگی زیبایی‌شناختی خود مورد توجه بوده‌اند. آثار علمی اخیر نشان داده‌اند که این عناصر زینتی دو هدف عمده را دنبال می‌کنند و جذابیت بصری را با ویژگی‌های ساختاری و عملکردی ترکیب می‌کنند. مطالعات سازه‌های تاریخی مانند مسجد سلیمانیه و ایاصوفیه، ویژگی‌های پیچیده غیر نمایی و پاشی انرژی صوتی^{۵۳} را آشکار کرده‌اند، که روش‌های مرسوم تحلیل آکوستیک را به چالش می‌کشد و نیاز به رویکردهای تحلیلی پیچیده‌تر را مطرح می‌کند. این یافته‌ها بر مهندسی آکوستیک پیچیده ذاتی در شیوه‌های معماری پیشینیان در منطقه خاورمیانه تأکید دارند [۵۵، ۵۶].

عناصر هندسی در معماری سنتی ایران، از جمله کاربندی، مقرنس و کاسه‌سازی، تحت تحلیل ساختاری و ریاضی گسترده‌ای قرار گرفته‌اند. خیراللهی و همکاران [۵۷] نشان دادند که این سیستم‌ها، به ویژه کاربندی، از طریق توانایی خود در حذف مناطق کششی در تقاطع قوس‌ها، دارای خواص مقاومت لرزه‌ای ذاتی هستند. این کارایی ساختاری، خواص آکوستیک آن‌ها را تکمیل می‌کند و رویکردی جامع به طراحی معماری در شیوه‌های سنتی را پیشنهاد می‌دهد.

اصول ریاضی زیربنای این عناصر معماری به طور ساختارمند از طریق مطالعات مختلف مستند شده است. سیستم تحلیل و نام‌گذاری استاندارد پورا احمدی [۵۸] برای انواع کاربندی و تحلیل هندسه کاسه‌سازی صفائیان‌پور و ولی‌بیگ [۵۴] مبانی ریاضی دقیق این سیستم‌های تزئینی را نشان می‌دهد. این اصول هندسی نه تنها ترکیب بصری آن‌ها را کنترل می‌کنند، بلکه از طریق تعاملات پیچیده سطح با امواج صوتی، بر خواص آکوستیک آن‌ها نیز تأثیر می‌گذارند.

تحقیقات اخیر درک تعاملات صدا-سطح در فضاهای معماری را گسترش داده است. وبر و کاتز^{۵۴} [۳۰] نشان دادند که چگونه عناصر معماری، به ویژه ستون‌ها و ویژگی‌های هندسی آن‌ها، به طور قابل توجهی بر الگوهای پراکندگی صدا تأثیر می‌گذارند. این یافته با مطالعات عناصر معماری سنتی ایران همسو است و نشان می‌دهد که الگوهای هندسی پیچیده آن‌ها به عنوان پخش‌کننده‌های صوتی مؤثر عمل می‌کنند. رابطه بین هندسه سطح و عملکرد آکوستیک از طریق روش‌های محاسباتی و تجربی بیشتر بررسی شده است. راینهارت و همکاران^{۵۵} [۵۹] نشان دادند که چگونه می‌توان هندسه‌های میکرو را برای تغییر پاسخ‌های آکوستیک از طریق پخشایی صدا طراحی کرد، در حالی که اشتری^{۵۶} [۶۰] تفاوت‌های محسوسی را در واکنش و وسعت بین سطوح صاف و الگوهای برجسته سه‌بعدی نشان داد. این یافته‌ها اعتبار علمی را برای مزایای آکوستیک تزئینات هندسی سنتی ارائه می‌دهند.

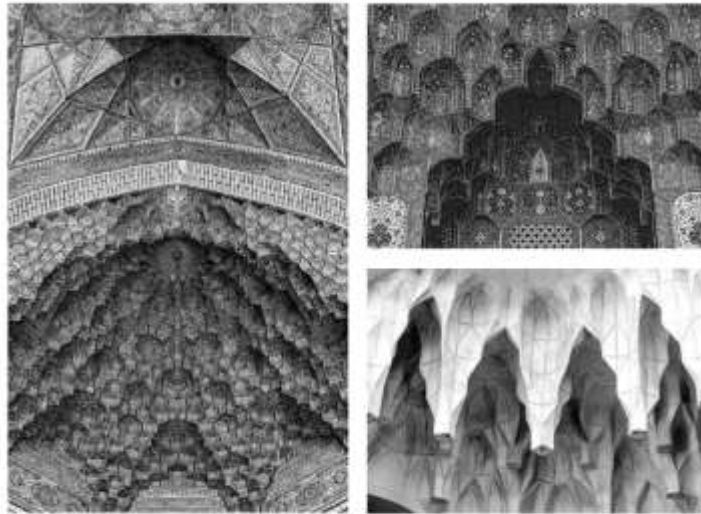
تکنیک‌های مدل‌سازی پیشرفته درک ما از این روابط را افزایش داده‌اند. تسینگوس و همکاران^{۵۷} [۶۱] روش‌هایی را برای محاسبه پراکندگی اولیه صدا از هندسه‌های معماری دقیق توسعه دادند، در حالی که وورلندر و همکاران^{۵۸} [۶۲] مفاهیم ضریب پراکندگی جهت‌دار را برای پدیده‌های پخشایی پیچیده آکوستیکی معرفی کردند. این پیشرفت‌ها توانایی ما را در آنالیز و پیش‌بینی کاربرد آکوستیک عناصر معماری سنتی بهبود بخشیده است.

۵. تحلیل تأثیر آکوستیکی عناصر هندسی

تزئینی در معماری ایرانی

۵-۱. اهداف پژوهش و چارچوب نظری

این تحقیق یک روش‌شناسی بین‌رشته‌ای نوآورانه را اتخاذ می‌کند که تحلیل آکوستیک معماری را با تکنیک‌های آکوستیک موسیقایی پیوند می‌دهد. پژوهش پیش‌رو با



شکل ۳. فرم‌های مقعر کلی و جزئی در احجام مقرنس، مسجد شاه اصفهان (بالا)، مسجد آقابرگ کاشان (پایین)، ترکیب چند الگوی تزئینی معماری ایرانی در مسجد نصیرالملک شیراز (چپ)

کردن مکانیزم‌ها و میزان تغییر پارامتر آکوستیکی قابل انتساب به این مداخلات است. بررسی آکوستیک سطح مقعر گنبد، دیدگاه‌های مهمی را در مورد اصول مهندسی آکوستیک معماری ارائه می‌دهد [۶۳]. سازگاری این سیستم‌های مورفولوژیکی با پیکربندی‌های فضایی متنوع، سیستم‌های عناصر مقعر و چند طاسه‌ای^{۵۹} را به ویژه برای تحلیل آکوستیک مرتبط می‌کند.

این نمونه‌های معماری، اثربخشی پیکربندی‌های سطوح مقعر و چند طاسه‌ای را در افزایش آکوستیک نشان می‌دهند. خواص آکوستیک ذاتی این سیستم‌ها - از جمله پخش صدای متمرکز، رفتار وابسته به فرکانس و الگوهای بازتاب کنترل‌شده - پایه نظری برای پیش‌بینی نتایج آکوستیک فراهم می‌کند و انتخاب آن‌ها را به عنوان موضوعات اصلی پژوهش توجیه می‌کند.

۵-۱-۱. استانداردها و مقررات قابل اجرا

رعایت استانداردهای اندازه‌گیری آکوستیک تعیین‌شده برای اطمینان از قابلیت اطمینان و اعتبار نتایج تجربی بسیار مهم است. این بخش، استانداردهای مربوطه را که روش‌شناسی را هدایت می‌کنند، تشریح می‌کند.

اعمال روش‌های تحلیلی که معمولاً در آکوستیک موسیقایی برای عناصر معماری استفاده می‌شوند، یک چارچوب جدید برای ارزیابی خواص آکوستیکی سیستم‌های زینتی سنتی ایجاد می‌کند. این رویکرد میان‌رشته‌ای، درک دقیق‌تری از چگونگی تعدیل صدا توسط این الگوهای هندسی در فضاهای محصور را ممکن می‌سازد و بینش‌هایی را ارائه می‌دهد که تحلیل آکوستیک معماری متعارف به تنهایی ممکن است قادر به ارائه آن‌ها نباشد.

پس از بررسی ساختارمند در مورد تزئینات هندسی به عنوان عناصر آکوستیک در معماری ایرانی، این مطالعه به بررسی تأثیر این عناصر بر ویژگی‌های پاسخ آکوستیکی فضاهای محصور می‌پردازد. در حالی که تحلیل‌ها و پژوهش‌های پیشین، طبقه‌بندی مورفولوژیکی تزئینات معماری ایرانی را به خوبی مشخص کرده و جلوه‌های مختلف خانواده تزئیناتی کاربردی را مستند کرده‌اند، یک سؤال اساسی در مورد پیامدهای آکوستیکی معرفی پوشش‌های تزئینی ثانویه در حجم‌های معماری مطرح می‌شود. به طور خاص، این پژوهش به دنبال روشن

ISO 3382-1:2009 (اندازه‌گیری پارامترهای آکوستیک اتاق):

این استاندارد دستورالعمل‌هایی را برای اندازه‌گیری پارامترهای کلیدی آکوستیک در فضاهای بسته، با تمرکز بر زمان واخنش (RT) و زمان اولیه واپاشی (EDT) ارائه می‌دهد [۶۴]. جنبه‌های کلیدی عبارتند از: شرایط اندازه‌گیری: مشخصات ابعاد اتاق، موقعیت میکروفون و نوع منبع صدا برای نتایج دقیق و قابل مقایسه ضروری هستند.

پارامترهای اندازه‌گیری شده RT: به عنوان زمان مورد نیاز برای واپاشی صدا به میزان ۶۰ دسی‌بل پس از قطع منبع صدا تعریف می‌شود، در حالی که EDT واپاشی بین ۱۰ دسی‌بل و ۳۰ دسی‌بل را اندازه‌گیری می‌کند که منعکس‌کننده پاسخ آکوستیک اتاق است [۶۵، ۶۶، ۶۷]. با پیروی از ISO 3382-1، این مطالعه با هدف دستیابی به نتایجی انجام شد که برای پیکربندی‌های آزمایش شده معتبر و قابل مقایسه با سایر تحقیقات آکوستیک معماری باشند.

ASTM E1050 (روش استاندارد آزمون برای اندازه‌گیری‌های پاسخ ضربه و جذب صدا): این استاندارد برای ارزیابی خواص جذب صدا مواد در محفظه‌های آزمایش بسیار مهم است [۶۸]. اجزای کلیدی عبارتند از: روش‌های آزمایش: روش‌های اندازه‌گیری ضرایب جذب صدا در فرکانس‌های مختلف تشریح شده‌اند که برای درک تعاملات بین عناصر زینتی و امواج صوتی ضروری است.

مشخصات مواد: توصیف دقیق مواد ضروری است، که شامل فرکانس‌های آزمایش خاص و پایبندی به ابعاد و شرایط نمونه تعریف شده است.

تفسیر داده‌ها: راهنمایی برای تفسیر نتایج ارائه شده است و چگونگی تأثیر مواد بر رفتار صوتی در زمینه‌های معماری را روشن می‌کند.

رعایت ASTM E1050 و ISO 3382-1:2009 پروتکل‌های آزمایش دقیق را تضمین کرده، با بهترین شیوه‌ها در آکوستیک معماری همسو بوده و اعتبار و کاربرد یافته‌ها را در طراحی و مرمت معماری معاصر افزایش می‌دهد.

IEC 61672-1:2013 (الکتروآکوستیک-سنجشگرهای سطح صدا-بخش ۱: مشخصات): این استاندارد الزامات کاربرد تجهیزات اندازه‌گیری صدا را تشریح می‌کند. تمام تجهیزات مورد استفاده در این مطالعه طبق این استاندارد کالیبره شدند که اعتبار داده‌ها را تضمین می‌کند [۶۹].

۵-۲. روش‌شناسی

این پژوهش اثرات آکوستیکی عناصر تزئینی هندسی را در یک فضای محصور از طریق آزمایش تجربی بررسی کرده و رفتار صدا و تضعیف آن را با و بدون اجزای تزئینی مقایسه نموده‌است.

چیدمان آزمایش

محفظه آزمایش (۴۰ × ۵۰ × ۴۰ سانتی‌متر) از پنل‌های آکوستیک آلومینیومی به ضخامت ۵ میلی‌متر ساخته شده است که دارای یک روزنه متحرک برای نصب عناصر تزئینی است. این ابعاد بر اساس معیارهای زیر انتخاب شدند:

الف) محدودیت‌های تجهیزات: فضای آزمایشگاهی موجود و امکانات اندازه‌گیری، ساخت محفظه‌ای در این مقیاس را امکان‌پذیر ساختند.

ب) کنترل متغیرها: ابعاد کوچک‌تر امکان کنترل دقیق‌تر شرایط آزمایش و حذف تداخلات خارجی را فراهم می‌کند.

ج) تمرکز بر فرکانس‌های میانی تا بالا: این مقیاس برای مطالعه رفتار آکوستیک در محدوده فرکانسی ۵۰۰ هرتز تا ۵ کیلوهرتز (مهم برای گفتار و بسیاری از کاربردهای معماری) مناسب است.

ویژگی منبع صدا و جمع آوری داده‌ها:

در این پژوهش از منبع صدای همه‌جهته Bang & Olufsen Beosound A1 نسل دوم استفاده شد که سیگنال‌های جاروب سینوسی لگاریتمی^{۶۳} با پهنای باند ۲۰۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز (نه نویز سفید یا صورتی، بلکه سیگنال تست استاندارد برای اندازه‌گیری پاسخ ضربه) تولید می‌کرد. برای ضبط صدا، آرایه میکروفونی شامل دو میکروفون Blue Snowball Studio با الگوی کاردیوئید و Sennheiser MKE 600 با الگوی سوپرکاردیوئید به کار گرفته شد. فاصله منبع صدا تا میکروفون‌ها ۲۵ سانتی‌متر تنظیم شد و برای تضمین اهمیت آماری، میانگین سه اندازه‌گیری مستقل برای هر پیکربندی محاسبه گردید.

روش اندازه‌گیری

پارامترهای کلیدی:

اندازه‌گیری‌ها با استفاده از سیگنال جاروب سینوسی لگاریتمی به مدت ۱۰ ثانیه و با نرخ نمونه‌برداری ۴۴/۱ کیلوهرتز انجام شد. دامنه متوسط جاروب ۶ dBFS (دسی‌بل نسبت به مقیاس کامل^{۶۴}) تنظیم شد و محدوده فرکانسی ۲۰۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز پوشش داده شد. شرایط محیطی در طول آزمایش‌ها کنترل شد و دمای محیط در ۲۰ درجه سانتی‌گراد با انحراف ± 2 درجه و رطوبت نسبی در ۵۰ درصد با انحراف ± 5 درصد حفظ گردید.

پارامترهای اندازه‌گیری شده و تجهیزات:

در این پژوهش، پارامترهای زمانی (حداکثر دامنه، زمان حداکثر دامنه، RMS، تعداد عبور از صفر، و مدت واپاشی) و پارامترهای فرکانسی (پاسخ فرکانسی در محدوده ۲۰۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز) اندازه‌گیری شدند. تجهیزات استفاده شده شامل:

منبع صدا، بلندگوی همه‌جهته Bang & Olufsen Beosound A1 (نسل دوم) با پاسخ فرکانسی مسطح در محدوده ۲۰۰ هرتز - ۲۰ کیلوهرتز؛

(د) امکان تکرارپذیری: اندازه کوچک‌تر، تکرار آزمایش‌ها را تسهیل و دقت آماری را افزایش می‌دهد.

پنل‌های آلومینیومی به دلیل خواص بازتابش بالا و میرایی کم انتخاب شدند تا محیطی با حداقل جذب پایه برای ارزیابی دقیق تأثیر عناصر تزئینی فراهم شود. این طراحی، بازتاب‌های ناخواسته را برای اندازه‌گیری‌های صوتی کنترل شده به حداقل می‌رساند.

عناصر چندگنبدی^{۶۱} یا چندطاسه‌ای

در این مطالعه از ۲۰۷ عنصر نیم‌کره (قطر: ۳/۵ سانتی‌متر، ضخامت دیواره: ۲ میلی‌متر) استفاده شد. این پیکربندی هندسی ساده‌شده، آنالیز ساختارمند تغییرات آکوستیکی را در عین به حداقل رساندن متغیرهای مخدوش‌کننده امکان‌پذیر ساخت. دو پیکربندی مورد آزمایش قرار گرفت: محفظه خالی (مرجع) و نیم‌کره‌های نصب‌شده روی سقف.

پیکربندی‌های آزمایش‌شده:

دو پیکربندی اصلی مورد آزمایش قرار گرفت:

حالت ۱، محفظه خالی - مرجع: محفظه آلومینیومی بدون هیچ‌گونه عنصر تزئینی یا اصلاح سطحی. این حالت به عنوان خط پایه برای مقایسه عمل می‌کند و ویژگی‌های آکوستیک محفظه ساده با سطوح بازتابنده آلومینیومی را نشان می‌دهد.

حالت ۲، محفظه با اصلاح آکوستیکی: همان محفظه با نصب ۲۰۷ عنصر نیم‌کره (HDPE^{۶۲} قطر ۳/۵ سانتی‌متر، ضخامت دیواره ۲ میلی‌متر) بر روی سطح سقف. این عناصر ۶۵٪ از سطح سقف را پوشش می‌دهند و ۱۸٪ افزایش در مساحت کل سطح محفظه ایجاد می‌کنند.

مقایسه این دو حالت، تأثیر خالص عناصر هندسی تزئینی بر پارامترهای آکوستیک را آشکار می‌سازد. کلیه اندازه‌گیری‌ها در هر دو حالت با شرایط یکسان (دما، رطوبت، موقعیت منبع صدا و میکروفون‌ها) و با سه بار تکرار برای هر پیکربندی انجام شدند.

در پژوهش حاضر، از میکروفون‌های مختلفی برای ضبط صدا استفاده شد. میکروفون Blue Snowball Studio با الگوی کاردیوئید و حساسیت 37 dB - ± 3 و میکروفون Sennheiser MKE 600 با الگوی سوپرکاردیوئید و حساسیت 40 mV/Pa به عنوان ابزارهای اصلی ضبط صدا انتخاب گردیدند. همچنین، برای رابط صوتی از دستگاه Focusrite Scarlett 2i2 بهره‌گیری شد. این دستگاه دارای نرخ نمونه‌برداری $44/1$ کیلوهرتز و عمق بیت ۲۴ بیت است که کیفیت بالایی را در پردازش صوتی ارائه می‌دهد. پردازش سیگنال‌ها با استفاده از نرم‌افزار پایتون^{۶۵} و کتابخانه‌های `scipy` و `numpy` انجام شد. سعی بر این شد که تمامی تجهیزات مطابق با استاندارد IEC ۶۱۶۷۲-۱:۲۰۱۳ تا حد امکان کالیبره شوند و قبل از هر جلسه اندازه‌گیری، عملیات کالیبراسیون به دقت بررسی شد تا از دقت و قابلیت اطمینان داده‌ها اطمینان حاصل شود. آزمایش در یک استودیوی ۸ در ۶ در ۳ متری که از نظر آکوستیک بهینه شده بود، انجام شد. تثبیت تجهیزات و نرمال‌سازی مسیر سیگنال (با دقت ۱ دسی‌بل) ثبات اندازه‌گیری را تضمین کرد. پاسخ‌های حالت ۱ (محفظه خالی) و حالت ۲ (اصلاح آکوستیکی توسط عناصر نیم‌کره‌ای مقعر) ضبط و برای تحلیل مقایسه‌ای بهینه‌سازی شدند.

معیارهای اولیه آکوستیک اندازه‌گیری شده در این مطالعه شامل پاسخ فرکانسی از ۲۰۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز است. ضبط‌های صوتی خام با استفاده از اسکریپت‌های پایتون سفارشی برای استخراج پارامترهای آکوستیک مربوطه پردازش شدند. ماژول `scipy.io.wavfile` خواندن فایل‌های صوتی `wav` را تسهیل کرد و امکان استخراج نرخ نمونه و آرایه‌های داده سیگنال را فراهم نمود. تنظیم آزمایشی انتخاب شده، اگرچه از نظر مقیاس فیزیکی محدود است، اما به طور مؤثر پدیده‌های کلیدی آکوستیک مربوط به بررسی اثرات عناصر تزئینی هندسی در معماری را ثبت می‌کند. این

مقیاس امکان کنترل دقیق بر پارامترهای تجربی را فراهم می‌کند، تأثیرات خارجی را به حداقل می‌رساند و اندازه‌گیری‌های بسیار تکرارپذیر را تضمین می‌کند. علاوه بر این، ابعاد کاهش‌یافته، ساخت یک محفظه آلومینیومی مقاوم با ویژگی‌های میرایی بهینه را تسهیل کرده و محیطی ایده‌آل برای جداسازی اثرات آکوستیکی تزئینات هندسی ایجاد می‌کند.

ابعاد محفظه محصور و هندسه نیم‌کره‌ها، یک سیستم مدل ساده اما کاربردی ایجاد می‌کنند که امکان اندازه‌گیری‌های کنترل‌شده و جداسازی متغیرهای مورد نظر را فراهم می‌کند. با وجود کاهش وسعت فضایی، اصول اساسی انتشار موج صدا، تداخل و تعامل با تزئینات سطحی همچنان پابرجاست. پارامترهای تجربی متنوع ساختارمند و آنالیز مقایسه‌ای دقیق بین دو حالت مرجع و دارای ناهمواری، نتایج معناداری را در مورد تغییرات پاسخ آکوستیکی ناشی از چنین الگوی هندسی ارائه می‌دهد. در حالی که اثرات مقیاس ممکن است بر نتایج کمی خاص تأثیر بگذارد، روندهای مشاهده‌شده، قابلیت‌های انتشار، میرایی و تنظیم را نشان می‌دهند که از نظر کیفی با نقش آکوستیکی نقوش زینتی سنتی ایرانی سازگار هستند. همچنین تحلیل ریاضی با استفاده از معادلات سایین^{۶۶}، ایرینگ^{۶۷} و میلینگتون-ست^{۶۸}، این رویکرد مقیاس‌بندی را بیشتر تأیید می‌کند، زیرا این فرمول‌ها از نظر ابعادی مستقل هستند و به طور برابر برای فضاهایی با هر اندازه‌ای می‌توانند اعمال شوند. این مقاله، دومین پژوهش در یک برنامه تحقیقاتی ساختارمند است که پروتکل‌های اندازه‌گیری آکوستیک غیرتهاجمی استاندارد را برای مطالعات باستان‌شناسی-صوتی میراث معماری ایرانی توسعه می‌دهد. اولین مقاله منتشره در این سلسله پژوهش [۷۰] این روش تجربی را از طریق تحلیل عناصر تنگ‌بری با استفاده از تشدیدگرهای حفره‌دار کروی، ایجاد و اعتبارسنجی کرد.

محدودیت‌های مقیاس‌بندی و انطباق فرکانسی: انتخاب محفظه با ابعاد کوچک (۴۰×۵۰×۴۰ سانتی‌متر) و پهنای باند فرکانسی گسترده (۲۰۰ هرتز - ۲۰ کیلوهرتز) بر اساس اهداف اکتشافی این پژوهش صورت گرفت. در این مقیاس، طول موج‌های فرکانس‌های پایین (مثلاً ۲۰۰ هرتز با طول موج تقریبی ۱/۷ متر) به‌طور قابل توجهی از ابعاد محفظه بزرگ‌تر هستند، که منجر به محدودیت‌هایی در تحلیل دقیق رفتار مودال فرکانس‌های پایین می‌شود. این عدم تطبیق کامل به دلایل زیر پذیرفته شد:

(الف) اولویت اثبات مفهوم: هدف اصلی این مطالعه، اثبات اولیه این فرضیه بود که عناصر هندسی تزئینی می‌توانند تأثیرات قابل اندازه‌گیری بر پارامترهای آکوستیک داشته باشند. این اولویت بر دقت مطلق کمی در تمام محدوده فرکانسی غلبه داشت.

(ب) محدودیت‌های عملی: ساخت محفظه‌ای با ابعاد مناسب برای تحلیل دقیق فرکانس‌های پایین (حداقل ۳-۴ متر در هر بعد) و تأمین شرایط کنترل‌شده آزمایشگاهی در این پژوهش مقدور نبود.

(ج) تمرکز بر فرکانس‌های میانی و بالا: نتایج معنادارتر در محدوده فرکانسی ۵۰۰ هرتز تا ۵ کیلوهرتز به‌دست آمد که برای گفتار و بسیاری از کاربردهای معماری اهمیت بیشتری دارد.

محدودیت‌های تعمیم نتایج: به دلیل این عدم تطبیق، نتایج کمی این پژوهش، به‌ویژه در فرکانس‌های پایین‌تر از ۵۰۰ هرتز، نباید مستقیماً به فضاهای معماری واقعی با ابعاد بزرگ تعمیم داده شوند. با این حال، روندهای کیفی مشاهده‌شده، شامل کاهش حداکثر دامنه، بهبود زمان واپاشی، و تغییرات پاسخ فرکانسی، اصول طراحی آکوستیکی را نشان می‌دهند که با مقیاس‌بندی مناسب قابل کاربرد هستند. پژوهش‌های آینده با استفاده از محفظه‌های بزرگ‌تر و پهنای باند فرکانسی متناسب با ابعاد، می‌توانند این یافته‌های اولیه را تأیید و گسترش

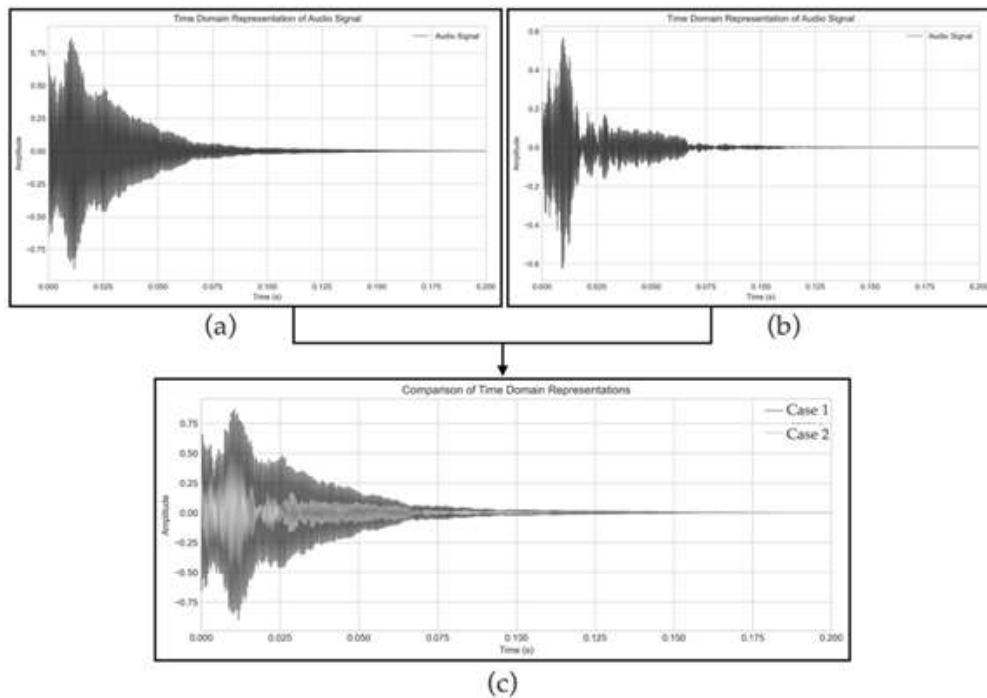
دهند. پژوهش حاضر این چارچوب را برای بررسی هندسه‌های نیم‌کره کاسه‌سازی گسترش می‌دهد و یک گونه‌شناسی تزئینی کاملاً متفاوت را بررسی می‌کند. در حالی که هر دو مطالعه لزوماً از رویکرد تجربی بنیادی یکسانی استفاده می‌کنند - که برای سازگاری روش‌شناختی و مقایسه بین مطالعات ضروری است - هر کدام به سوالات تحقیقاتی منحصر به فردی می‌پردازند: مطالعه عالی قاپو بر تشدیدگرهای آکوستیک به فرم جام و ظروف در یک سازه تاریخی خاص متمرکز بود، در حالی که این تحقیق اصول هندسی تعمیم‌یافته سیستم‌های تزئینی معماری ایرانی را از طریق عناصر مقعر نیم‌کره بررسی می‌کند. اشتراک روش‌شناختی، نشان‌دهنده توسعه آگاهانه یک پروتکل تکرارپذیر برای «بررسی فضاهای آکوستیک میراث» است که یک چارچوب استاندارد را به حوزه نوظهور باستان‌شناسی آکوستیک ارائه می‌دهد.

۶. نتایج و بحث

نتایج تجربی، تأثیر قابل توجه عناصر تزئینی نیم‌کره‌ای را بر پاسخ آکوستیکی در محیط محفظه محصور نشان می‌دهد. در معیارهای چندگانه، وجود این تزئینات هندسی (حالت ۲) تغییرات قابل اندازه‌گیری را در مقایسه با حالت مرجع بدون اصلاح و بهبود (حالت ۱) ایجاد کرد (شکل ۴). بررسی تجربی، تغییرات قابل توجهی را در رفتار آکوستیکی ناشی از عناصر تزئینی هندسی نشان داد که نشان‌دهنده تغییرات زمانی و طیفی است که کاربرد آکوستیکی الگوهای معماری سنتی ایرانی را تأیید می‌کند.

۶-۱. تحلیل حوزه زمان

تحلیل پاسخ‌های حوزه زمان (شکل ۴) تغییرات قابل توجهی را در ویژگی‌های پوشش صوتی نشان می‌دهد. پوشش مقایسه‌ای شکل ۴-۲ تفاوت‌های قابل توجهی را بین پیکربندی‌های بدون پوشش (حالت ۱) و پوشش داده شده (حالت ۲) نشان می‌دهد. پوشش چندطاسه‌ای منجر



شکل ۴. ویژگی‌های حوزه زمان. (a) شکل موج حالت ۱. (b) شکل موج حالت ۲. (c) هم‌پوشانی مقایسه‌ای حوزه‌های زمانی از حالت ۱ و حالت ۲

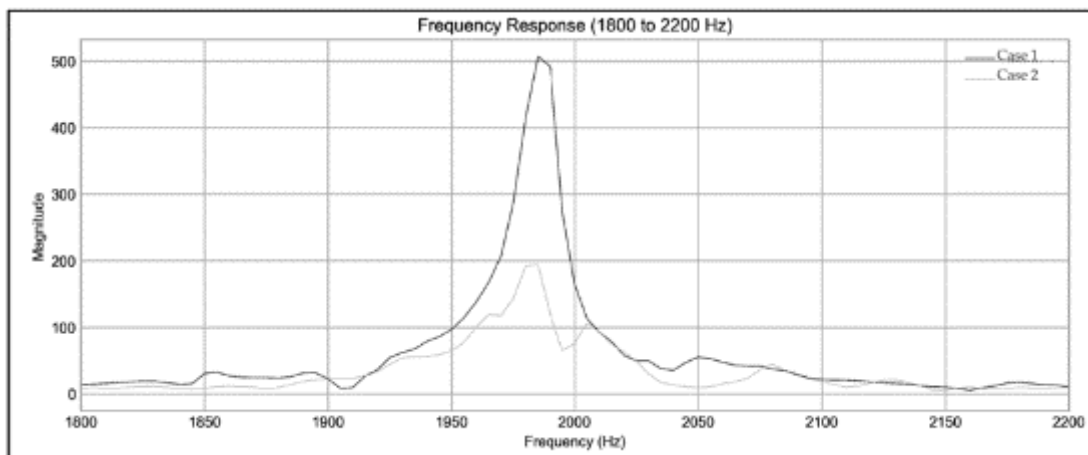
است و نشان می‌دهد که معماران سنتی ایرانی عمداً فضاها را برای پاسخ آکوستیکی بهینه مهندسی می‌کردند.

۶-۲. تحلیل دامنه فرکانس

مقایسه پاسخ فرکانسی (شکل ۵) تغییرات متمایزی را در محدوده ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ هرتز، یک باند بحرانی برای فهم گفتار، نشان می‌دهد. حالت تحت اصلاح آکوستیکی^{۶۹}، پاسخ کنترل‌شده‌تری را با کاهش پیک‌های رزونانس، به ویژه در حدود ۲۰۰۰ هرتز، که در آن حداکثر دامنه به طور قابل توجهی تضعیف می‌شود، نشان می‌دهد. این مدولاسیون فرکانس-ویژه نشان می‌دهد که الگوهای هندسی به عنوان روش‌های آکوستیکی انتخاب‌گر فرکانس عمل می‌کنند و به طور مؤثر انرژی صدا را در پهنای باند تعریف شده کنترل می‌کنند.

به کاهش ۳۰/۳۱ درصدی در حداکثر دامنه (از ۰/۹۰۳ میلی‌ولت به ۰/۶۲۹ میلی‌ولت، معادل کاهش ۳/۱ دسی‌بل) شد. علاوه بر این، کاهش قابل توجه ۵۷/۱۴ درصدی در RMS از ۰/۰۷ به ۰/۰۳، معادل کاهش ۷/۴ دسی‌بل وجود دارد، که نشان‌دهنده کاهش انرژی قابل توجه ناشی از جذب و انتشار توسط عناصر هندسی است. پارامتر مدت زمان واپاشی، با کاهش ۸۰/۰۹ درصدی از ۱/۸۱ میلی‌ثانیه به ۰/۳۶ میلی‌ثانیه (معادل ۱۳/۰ دسی‌بل بهبود در نرخ واپاشی)، چشم‌گیرترین تغییر را تجربه کرد.

مدت زمان واپاشی، مدت زمانی را که طول می‌کشد تا صدا به نامفهومی تبدیل شود، اندازه‌گیری می‌کند که نشان‌دهنده ویژگی‌های بهبود یافته‌ی کاهش صدا است. این بهبود قابل توجه در زمان کاهش با شیوه‌های معمول در معماری ایرانی برای کنترل واخند فضای بسته همسو



شکل ۵. مقایسه پاسخ‌های فرکانسی برای حالت‌های صوتی حالت ۱ (خط سیاه) و حالت ۲ (خط خاکستری روشن) در محدوده ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ هرتز

۳-۶. پارامترهای آکوستیک

تحلیل جامع پارامترها (جدول ۲) چندین یافته کلیدی را نشان می‌دهد. در زمینه ویژگی‌های زمانی، زمان حداکثر دامنه (زمانی که حداکثر سطح فشار صدا رخ می‌دهد) کاهش ۲۳/۰۸ درصدی را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده کنترل بازتاب اولیه سریع‌تر است. همچنین گذر از صفر (تعداد دفعاتی که شکل موج از خط دامنه صفر عبور می‌کند) کاهش ۲۴/۲۰ درصدی را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده انتشار موج منظم‌تر است. در حوزه معیارهای ادراکی، کاهش ۸/۹۴ درصدی تراز فشار صوتی (SPL^{70}) برحسب دسی‌بل، نشان‌دهنده کنترل مؤثر انرژی و کاهش بلندی صدای درک‌شده در محفظه تحت پوشش است. بهبود متوسط ۱/۶۶ درصدی شاخص وضوح^{۷۱} ($C80$) که نسبت انرژی صوتی اولیه به انتهایی را بر حسب دسی‌بل نشان می‌دهد، حاکی از حفظ قابلیت فهم گفتار است.

مقایسه با مطالعات مشابه:

نتایج این پژوهش با یافته‌های مطالعات پیشین در زمینه اثرات هندسی بر آکوستیک معماری همخوانی دارد. وبر

و کاتز [۳۰] نشان دادند که عناصر معماری ستونی می‌توانند الگوهای پراکندگی صدا را به‌طور قابل توجهی تغییر دهند، که با مشاهدات ما در مورد کاهش ۳۰/۳۱ درصدی حداکثر دامنه سازگار است. همچنین، اشتربی [۶۰] تفاوت‌های محسوسی در واخنش بین سطوح صاف و الگوهای برجسته سه‌بعدی گزارش کرد، که با کاهش ۸۰/۰۹ درصدی زمان واپاشی در مطالعه حاضر همسو است.

در زمینه معماری اسلامی، الخطیب و الدکدوکی [۱۵] در مطالعه مساجد ممالیک قاهره، اثرات مشابهی از سیستم‌های تزئینی بر پخش صدا و کنترل واخنش گزارش کردند. سو گول و همکاران [۵۶] در تحلیل مسجد سلیمانیه، ویژگی‌های غیرنمایی واپاشی انرژی صوتی را مستند کردند که با رفتار پیچیده مشاهده‌شده در پیکربندی چندطاسه‌ای این مطالعه مطابقت دارد. راینهارت و همکاران [۵۹] نشان دادند که می‌توان هندسه‌های میکرو را برای تغییر پاسخ‌های آکوستیک طراحی کرد، که با یافته‌های ما در مورد کاهش انتخابی فرکانس در حدود ۲۰۰۰ هرتز همراستا است. این

همگرایی بین مطالعه حاضر و تحقیقات پیشین، اعتبار رویکرد روش‌شناختی و نتایج به‌دست‌آمده را تقویت می‌کند و نشان می‌دهد که اصول آکوستیک سنتی ایرانی با مفاهیم علمی مدرن سازگاری دارند.

همچنین ثبات نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تکمیلی سیگنال رفت و برگشتی^{۷۲} ۲۰ ثانیه‌ای، اعتبار بیشتری از یافته‌های اولیه ارائه می‌دهد. این تأیید در شرایط زمانی متنوع، استحکام و قابلیت اطمینان آماری اثرات مشاهده‌شده ناشی از پوشش تزئینی چندطاسه‌ای را تقویت می‌کند. کاهش‌های اندازه‌گیری شده در پارامترهای کلیدی آکوستیک نشان می‌دهد که این عناصر معماری صرفاً تزئینی نبوده‌اند، بلکه جزئی جدایی‌ناپذیر از استراتژی طراحی آکوستیک بوده‌اند. این یافته‌ها، سعی بر ارائه مباحثی مابین شیوه‌های معماری ایرانی و اصول مهندسی آکوستیک مدرن دارد. نتایج به ویژه اثربخشی پیکربندی چندطاسه‌ای را در موارد زیر برجسته می‌کند:

- کنترل بازتاب‌های اولیه از طریق انتشار هندسی
 - کنترل رزونانس‌های فرکانسی خاص
 - حفظ پارامترهای آکوستیک متعادل مناسب برای کاربردهای مختلف

تأکید بر این نکته مهم است که هدف اصلی این مطالعه در مقیاس کوچک، نشان دادن روندهای کلی و اثرات کیفی تزئینات هندسی بر پارامترهای آکوستیک بود. در حالی که مقادیر کمی خاص به دست آمده ممکن است مستقیماً قابل انتقال به فضاهای معماری بزرگ‌تر نباشند، درصد کاهش مشاهده شده در پارامترهایی مانند حداکثر دامنه، RMS و زمان واخنش، بینش‌های ارزشمندی در مورد مزایای آکوستیک بالقوه ترکیب این عناصر طراحی ارائه می‌دهد. این یافته‌ها به عنوان پایه‌ای برای تحقیقات آینده در مقیاس‌های بزرگ‌تر و با چیدمان‌های هندسی پیچیده‌تر عمل می‌کنند.

جدول ۲. تحلیل مقایسه‌ای پارامترهای آکوستیک برای محفظه با و بدون عناصر ناهمواری (اصلاح آکوستیکی)

پارامترهای آکوستیکی	حالت ۱) (بدون اصلاح آکوستیکی)	حالت ۲) (همراه با اصلاح آکوستیکی)	تفاوت (%)
بیشینه دامنه ^{۷۳}	۰/۹۰۳۱۰۵	۰/۶۲۹۴۰۶	-۳۰/۳۱٪
بیشینه زمان دامنه ^{۷۴} (ms)	۱۱/۷۹۱۳۸۳	۹/۵۶۹۱۶۰	-۲۳/۰۸٪
RMS	۰/۰۷	۰/۰۳	-۵۷/۱۴٪
عبور از صفر ^{۷۵}	۴۶۸۲	۳۵۴۹	-۲۴/۲۰٪
زمان واپاشی یا پوسیدگی ^{۷۶} (ms)	۱/۸۱	۰/۳۶	-۸۰/۰۹٪
سطح فشار صوتی (SPL)	۷۱/۹۲ dB	۶۵/۴۵ dB	-۸/۹۴٪
وضوح (C80)	۱۵/۰۷ dB	۱۵/۳۲ dB	+۱/۶۶٪

نتیجه اثرات موضعی ناپیوستگی‌های هندسی و عملیات صوتی گسسته را در بر می‌گیرد.

با استفاده از ابعاد شناخته شدهٔ محفظه، $V = 0.08$ متر مکعب، $S = 1/12$ متر مربع، توزیع مساحت سطح (کف/دیوارها $S_1 = 0.92$ متر مربع، سقف با نیم‌کره‌ها 0.2 ، $S_2 =$ متر مربع) و ضرایب جذب (آلومینیوم $\alpha_1 = 0.03$ ، نیم‌کره‌ها $\alpha_2 = 0.35$)، زمان‌های واخنش برای هر دو محفظه خالی (حالت ۱) و پیکربندی عملیات شده با نیم‌کره‌های چندطاسه‌ای (حالت ۲) محاسبه شد. نتایج به‌دست‌آمده از سه روش، سازگاری قابل توجهی را نشان داد، به‌طوری‌که واریانس بین مقادیر RT محاسبه‌شده برای هر دو حالت کمتر از ۳٪ باقی ماند. این همگرایی در فرمولاسیون‌های مختلف، قابلیت اطمینان و اهمیت آماری یافته‌ها را تقویت می‌کند.

در محفظه خالی (حالت ۱)، میانگین RT در سه روش ۰/۳۷۳ ثانیه با انحراف معیار ۰/۰۰۹ ثانیه بود. برای پیکربندی تحت پوشش (حالت ۲)، میانگین RT به‌طور قابل توجهی کمتر و برابر با ۰/۱۵۷ ثانیه با انحراف معیار ۰/۰۰۴ ثانیه بود. این کاهش قابل توجه تقریباً ۵۸ درصدی در زمان واخنش به دلیل وجود عناصر نیم‌کره‌ای چندطاسه‌ای، مشاهدات تجربی را تأیید می‌کند و بر قابلیت‌های تهویه صوتی عملیات هندسی تأکید دارد.

واریانس کمتر در مقادیر RT برای شرایط تحت پوشش (حالت ۲) نشان‌دهنده میدان صوتی پراکنده‌تر است که نشان‌دهنده انتشار و توزیع مجدد انرژی صوتی است که توسط عناصر تزئینی تسهیل می‌شود. این با پیش‌بینی‌های نظری و اصول تاریخی تنظیم محیط‌های آکوستیک از طریق الگوسازی هندسی همسو است. قابل توجه است که فرمول میلینگتون-ست، که توزیع‌های جذب غیریکنواخت و عملیات سطحی گسسته را در نظر می‌گیرد، دقیق‌ترین نمایش را از شرایط آزمایش ارائه داد. نتایج آن ($RT = 0.368$) ثانیه برای حالت ۱،

یادداشت: تمام اندازه‌گیری‌ها بر اساس میانگین سه تکرار محاسبه شده‌اند. انحراف معیار برای تمام پارامترها کمتر از ۵ درصد بود که نشان‌دهنده تکرارپذیری بالای نتایج است. مقادیر منفی در ستون تفاوت (%) نشان‌دهنده کاهش پارامتر هستند.

۴-۶. تحلیل ریاضی

برای تأیید بیشتر یافته‌های تجربی و ایجاد درک جامع‌تر از رفتار آکوستیک محفظه، یک تحلیل ریاضی از زمان واخنش (RT) با استفاده از سه فرمول تثبیت‌شده انجام شد: معادلات سابین، ایرینگ و میلینگتون-ست. [۶۷] فرمول سابین،

$$RT_1 = 0.161 \frac{V}{\alpha S} \quad (1)$$

یک میدان صوتی کاملاً پراکنده را فرض می‌کند و یک رابطه اساسی بین حجم اتاق V ، مساحت سطح S و ضریب جذب α ارائه می‌دهد. در حالی که ساده است، به عنوان یک مدل اساسی برای درک تأثیر پارامترهای هندسی و مواد بر ویژگی‌های واخنش عمل می‌کند. فرمول ایرینگ،

$$RT_2 = 0.161 \frac{V}{-S \ln(1 - \alpha)} \quad (2)$$

توزیع‌های جذب غیریکنواخت را در نظر می‌گیرد و نمایش دقیق‌تری از سناریوهای دنیای واقعی ارائه می‌دهد که در آن‌ها عملیات سطحی ممکن است خواص جذبی متفاوتی را نشان دهند. در نهایت، فرمول میلینگتون-ست،

$$RT_3 = 0.161 \frac{V}{\sum [-S_i \ln(1 - \alpha_i)]} \quad (3)$$

با در نظر گرفتن بخش‌های سطحی گسسته با ضرایب جذب منفرد، جامع‌ترین رویکرد را ارائه می‌دهد و در

$RT = 0.154$ ثانیه برای حالت ۲) با روندهای مشاهده شده مطابقت نزدیکی داشت و بر اهمیت در نظر گرفتن اثرات موضعی و ناپیوستگی‌های هندسی در آکوستیک معماری تأکید می‌کند.

کاهش قابل توجه زمان واخنش، به معنای بهبود قابلیت فهم گفتار، کنترل بهتر رزونانس‌های مودال و میدان صوتی یکنواخت‌تر در محفظه عملیات شده است. این نتایج، اثربخشی عملیات هندسی را تأیید می‌کند و از اصول طراحی تاریخی به کار رفته در معماری ایرانی، که در آن اعتقاد بر این بود که عناصر زینتی پیچیده به اهداف آکوستیک کاربردی خدمت کرده‌اند، پشتیبانی می‌کند.

در حالی که محاسبات ارائه شده در اینجا رفتار پهنای باند را فرض می‌کنند، ضروری است که وابستگی‌های فرکانسی بالقوه و اثرات مقیاسی که ممکن است بر عملکرد آکوستیک تأثیر بگذارند، در نظر گرفته شود. رفتار فرکانس پایین، به ویژه، ممکن است به دلیل برهم‌کنش‌های مودال و اثرات پراش مختص به ابعاد محفظه و هندسه تزئینی، از روندهای پیش‌بینی‌شده منحرف شود.

محدودیت‌های فرکانس پایین و ملاحظات طول موج:

در حالی که محاسبات ارائه شده رفتار پهنای باند را فرض می‌کنند، ضروری است که محدودیت‌های فرکانس پایین را به دلیل نسبت ابعاد محفظه به طول موج در نظر بگیریم. برای فرکانس ۲۰۰ هرتز، طول موج λ برابر با $\frac{c}{f}$ یعنی تقریباً ۱/۷۲ متر است و این مقدار بیش از چهار برابر بزرگ‌ترین بعد محفظه (۰/۵۰ متر) می‌باشد. برای فرکانس ۵۰۰ هرتز، طول موج تقریباً ۰/۶۹ متر است که هنوز بزرگ‌تر از ابعاد محفظه است. برای فرکانس ۱۰۰۰ هرتز، طول موج حدود ۰/۳۴ متر است که قابل مقایسه با ابعاد محفظه می‌باشد.

در فرکانس‌های زیر ۵۰۰ هرتز، طول موج به قدری بزرگ است که امواج صوتی نمی‌توانند به‌طور مؤثر در محفظه منعکس شوند و رفتار مودال پیچیده‌ای ایجاد می‌شود که تحلیل دقیق آن را دشوار می‌سازد. بنابراین، نتایج کمی این پژوهش عمدتاً برای محدوده فرکانسی ۵۰۰ هرتز تا ۵ کیلوهرتز معتبر هستند—محدوده‌ای که برای گفتار (۳۰۰-۳۴۰۰ هرتز) و بسیاری از کاربردهای موسیقایی اهمیت حیاتی دارد. رفتار فرکانس پایین ممکن است به دلیل برهم‌کنش‌های مودال و اثرات پراش مختص به ابعاد محفظه و هندسه تزئینی، از روندهای پیش‌بینی‌شده منحرف شود. با این وجود، این تحلیل ریاضی، همراه با یافته‌های تجربی، پایه محکمی برای کاوش بیشتر در محدوده فرکانسی مناسب ارائه می‌دهد و راه را برای توسعه راه‌حل‌های آکوستیک معماری نوآورانه تسهیل می‌کند.

۵-۶. پیامدهای پژوهش و مسیرهای آینده

این مطالعه پیامدهای قابل توجهی را برای طراحی ساختمان‌های مدرن، به ویژه در ادغام راه‌حل‌های آکوستیک پایدار با عناصر معماری، برجسته می‌کند. طراحی آکوستیک معاصر: این مطالعه شواهدی از خواص تعدیل‌کننده‌ها و بهبود دهنده‌های آکوستیکی در سیستم‌های تزئینی هندسی پیچیده ارائه می‌دهد و به توسعه روش‌های نوین آکوستیک و فرامواد^{۷۷} کمک می‌کند. با استفاده از طراحی محاسباتی و تولید پیشرفته، معماران می‌توانند محیط‌های آکوستیک سفارشی ایجاد کنند. به عنوان مثال، در یک سالن اجتماعات ۵۰۰ نفره ($V = 5000 \text{ m}^3$, $S = 2000 \text{ m}^2$)، استفاده از یک روش سقفی الهام گرفته از مقرنس که مثلاً ۳۰٪ از سقف (600 m^2) را با ضریب جذب $\alpha = 0.40$ پوشش می‌دهد، می‌تواند زمان واخنش (RT) را در فرکانس‌های میانی به طور مفیدی کاهش دهد و آن را برای گفتار از طریق جذب دیوارها بهینه کند. این اصول همچنین می‌توانند در فضاهای اداری و آموزشی برای کاهش

آلودگی صوتی، بهبود حریم خصوصی گفتار و افزایش بهره‌وری اعمال شوند.

راهکارهای آکوستیک پایدار: سیستم‌های تزئینی با شیوه‌های پایدار همسو هستند و به طور بالقوه تأثیر زیست‌محیطی روش‌های سنتی آکوستیک را کاهش می‌دهند. برخلاف مواد معمولی که اغلب از الیاف مصنوعی ساخته می‌شوند، این الگوهای هندسی را می‌توان با استفاده از مواد طبیعی و محلی تولید کرد و ضایعات را به حداقل رساند. سازگاری و ادغام آن‌ها با سیستم‌های هوشمند می‌تواند بهره‌وری انرژی را افزایش داده و نیازهای نگهداری و هزینه‌های مربوطه را کاهش دهد و خواص آکوستیکی متناسبی را فراهم کند که انتقال صدای غیرضروری را به حداقل می‌رساند.

یکپارچه‌سازی معماری: یکی از مزایای کلیدی این سیستم‌ها، ادغام یکپارچه آن‌ها با طراحی معماری است. برخلاف روش‌های معمولی که می‌توانند از نظر بصری ناسازگار باشند، این الگوها به طور هماهنگ با زبان معماری ساختمان‌ها ترکیب می‌شوند و هم فرم و هم عملکرد را بهبود می‌بخشند. در یک چشم‌انداز طراحی که به مینیمالیسم بها می‌دهد، این عناصر ضمن برآورده کردن الزامات آکوستیک، پیچیدگی و عمق را نیز بهبود می‌دهند. با بهره‌گیری از قابلیت‌های سیستم‌های تزئینی هندسی در عناصر معماری، می‌توانیم محیط‌های پویا و زیبایی‌شناختی دلپذیری ایجاد کنیم که ضمن احترام به حکمت معماری سنتی، راحتی ساکنین و عملکرد کلی ساختمان را بهبود می‌بخشد.

۷. نتیجه‌گیری

این مطالعه یک تحلیل جامع از کاربرد آکوستیکی سیستم‌های تزئینی هندسی در معماری سنتی ایران را از طریق روش‌شناسی تجربی کنترل‌شده ارائه می‌دهد. از طریق بررسی‌های تجربی دقیق و مدل‌سازی ریاضی، این پژوهش نشان داده که اشکال هندسی ساده‌شده الهام‌گرفته از نقوش مشهوری مانند مقرنس، کاربندی و

رسمی‌بندی می‌توانند ویژگی‌های آکوستیک فضاهای محصور را به طور قابل توجهی تغییر دهند.

یافته‌های کمی شامل کاهش ۳۰ درصدی در حداکثر دامنه، کاهش ۵۷ درصدی در RMS، و بهبود ۸۰ درصدی در زمان واپاشی، همراه با تأیید ریاضی از طریق معادلات سابین، ایرینگ و میلینگتون-ست، شواهد قانع‌کننده‌ای ارائه می‌دهند که این الگوهای پیچیده عمداً توسط معماران ایرانی برای دست‌یابی به نتایج آکوستیکی مطلوب طراحی شده‌اند.

یافته‌های این پژوهش، حکمت تجربی معماران تاریخی ایران را که زیبایی‌شناسی و عملکرد آکوستیک را از طریق این سیستم‌های تزئینی به طور یکپارچه ادغام کرده‌اند، تأیید می‌کند. سازگاری قابل توجه بین نتایج این پژوهش و پیش‌بینی‌های نظری، درک عمیق از رفتار صوتی موجود در این سنت معماری را برجسته می‌کند. این پژوهش با سعی بر پر کردن شکاف‌هایی بین شیوه‌ها، راه‌حل‌های معمارانه و تحلیل مهندسی معاصر، هم اهمیت پایدار نوآوری معماری ایرانی و هم پتانسیل آن را برای ارائه راه‌حل‌های طراحی آکوستیک مدرن روشن می‌کند.

الگوهای تزئینی بررسی‌شده در اینجا، انتزاع‌های ساده‌شده‌ای از سیستم‌های هندسی بسیار پیچیده‌تری هستند که در شاهکارهای معماری ایرانی یافت می‌شوند. به این ترتیب، این پژوهش صرفاً سطحی از امکانات آکوستیکی ذاتی در این میراث معماری غنی را مورد مطالعه قرار می‌دهد. تحقیقات آینده باید وابستگی‌های فرکانسی، اثرات مقیاس و پیامدهای آکوستیکی نقوش سنتی به‌طور فزاینده پیچیده را بررسی کند. مدل‌سازی محاسباتی می‌تواند این هندسه‌ها را برای الزامات آکوستیکی هدفمند بهینه‌سازی کند و در عین حال جذابیت زیبایی‌شناختی آن‌ها را حفظ کند.

روش‌شناسی میان‌رشته‌ای به‌کاررفته در این مطالعه - ترکیب اصول آکوستیک معماری با تکنیک‌های تحلیل

پژوهش سعی در افتتاح راههایی برای ادغام پایدار کاربرد آکوستیک در طراحی معماری معاصر از طریق اشکال زیست تقلیدی الهام گرفته از حکمت تاریخی ایرانی دارد. این پژوهش ضمن ادای احترام به نبوغ معماران بزرگ ایرانی که اصول آکوستیک را با زیبایی شناسی به طور یکپارچه در آثار خود گنجانده اند، راهکارهایی برای پیشبرد شیوه های معماری مدرن به سمت محیط های هماهنگ تر، چندمنظوره تر و انسان محورتر ارائه می دهد. این یافته ها می توانند پایه ای برای توسعه سیستم های آکوستیک پایدار در معماری معاصر باشند که از حکمت سنتی ایرانی تاثیر می گیرند.

آکوستیک موسیقی - الگوی جدید و ارزشمندی را برای بررسی عناصر معماری سنتی ایجاد می کند. این رویکرد، خواص و کارکردهای آکوستیکی را آشکار می کند که در غیر این صورت ممکن است از طریق تحلیل های تک رشته ای مرسوم ناشناخته بمانند. با عبور از این مرزهای رشته ای، به بینش عمیق تری در مورد مهندسی آکوستیک پیچیده ی نهفته در معماری سنتی ایران دست می یابیم و بالتبع راه های جدیدی برای تحلیل های تاریخی و نوآوری در طراحی معاصر باز می شود. در نهایت، این مطالعه چارچوبی برای درک عملکرد دوگانه ی زیبایی شناختی-صوتی تزئینات معماری ایجاد می کند. با سنجش تأثیر آکوستیکی این عناصر، این

۸. منابع

- [1] Ding, Z., & Aletta, F. (2024). Acoustical Traditions and Cultural Identity: Exploring Kunqu's Contribution to Collective Memory. *Acoustics*, 6(4), 1115-1139.
- [2] Sü Gül, Z. (2019). Acoustical Impact of Architectonics and Material Features in the Lifespan of Two Monumental Sacred Structures. *Acoustics*, 1(3), 493-516.
- [3] Ballou, G. (2012). *Handbook for Sound Engineers*. Taylor & Francis. p. 178.
- [4] Jahn, R. G., Devereux, P., & Ibison, M. (1996). Acoustical resonances of assorted ancient structures. *J. Acoust. Soc. Am.*, 99(2), 649-658.
- [5] Barkas, N. (2019). The Contribution of the Stage Design to the Acoustics of Ancient Greek Theatres. *Acoustics*, 1(1), 337-353.
- [6] Frederiksen, R., & Vikatou, O. (2023). *The Ancient Theatre at Kalydon in Aitolia*. Aarhus University Press.
- [7] Declercq, N. F., & Dekeyser, C. S. A. (2007). Acoustic diffraction effects at the Hellenistic amphitheater of Epidauros: Seat rows responsible for the marvelous acoustics. *J. Acoust. Soc. Am.*, 121(4), 2011-2022.
- [8] Sear, F. (2006). *Roman Theatres: An Architectural Study*. OUP Oxford. pp. 1-10.
- [9] Rowland, I., & Bell, S. (2024). *Brill's Companion to the Reception of Vitruvius*. Brill. p. 591.
- [10] Bloom, J. M. (2017). *Early Islamic Art and Architecture*. Taylor & Francis. p. 86.
- [11] Nasr, S. H. (1987). *Islamic Art and Spirituality*. State University of New York Press. p. 50.
- [12] Burckhardt, T. (2009). *Art of Islam: Language and Meaning*. World Wisdom. p. 75.
- [13] Crane, H. (2024). *Risāle-i Mi'māriyye: An Early-Seventeenth-Century Ottoman Treatise on Architecture*. Brill. pp. 76-77.

- [14] Pitici, M. (2017). *The Best Writing on Mathematics 2017*. Princeton University Press. p. 68.
- [15] Elkhateeb, A., & Eldakdoky, S. (2021). The acoustics of Mamluk masjids: A case study of Iwan-type masjids in Cairo. *Applied Acoustics*, 107988.
- [16] O'Kane, B. (2019). *Iconography of Islamic Art: Studies in Honour of Robert Hillenbrand*. Edinburgh University Press. p. 75.
- [17] Freely, J. (2011). *A History of Ottoman Architecture*. WIT Press. p. 63.
- [18] Magrini, A., & Ricciardi, P. (2003). Surface materials and urban acoustics in the historical town centres: Experimental data from stone and brick paving. *Building Acoustics*, 10(4), 243-263.
- [19] Matracchi, P., Giorgi, L., Iannace, G., Lombardi, I., Parente, R., & Trematerra, A. (2021). Byzantine Churches in Albania: How Geometry and Architectural Composition Influence the Acoustics. *Buildings*, 12(3), 280.
- [20] Rossler, D. (2007). *Developments in Ceramic Materials Research*. Nova Science Publishers. p. 170.
- [21] Carvalho, A. P. O., & Monteiro, C. G. (2009). Comparison of the acoustics of mosques and Catholic churches. *International Congress on Sound and Vibration*, Kraków, Poland.
- [22] Timagenis, I., Timagenis, T., & Timagenis, A. (2022). Resolving the acoustics of contemporary Byzantine churches: The new orthodox cathedral of Tirana in Albania as the first scientific paradigm. *Applied Acoustics*, 198, 108990.
- [23] Schwartz, E. C. (2021). *The Oxford Handbook of Byzantine Art and Architecture*. Oxford University Press. pp. 451-454.
- [24] Sukaj, S., Bevilacqua, A., Iannace, G., Lombardi, I., Parente, R., & Trematerra, A. (2022). Byzantine churches in Albania: How geometry and architectural composition influence the acoustics. *Buildings*, 12(3), 280.
- [25] Mijić, M., & Šumarac-Pavlović, D. (2004). Analysis of contribution of acoustic resonators found in Serbian Orthodox churches. *Building Acoustics*, 11(3), 197-212.
- [26] Kanev, N. (2020). Resonant vessels in Russian churches and their study in a concert hall. *Acoustics*, 2(2), 399-415.
- [27] Sü Gül, Z., & Caliskan, M. (2014). A discussion on the acoustics of Süleymaniye Mosque for its original state. *9th International Congress on the Conservation of Monuments in Mediterranean Basin*.
- [28] Maconie, R. (2002). *The second sense: Language, music, and hearing*. Scarecrow Press.
- [29] Katz, B. F. G., & Weber, A. (2020). An acoustic survey of the Cathédrale Notre-Dame de Paris before and after the fire of 2019. *Acoustics*, 2(4), 791-802.
- [30] Weber, A., & Katz, B. F. G. (2022). Sound scattering by Gothic piers and columns of the Cathédrale Notre-Dame de Paris. *Acoustics*, 4(3), 679-703.
- [31] Zhang, D., Kong, C., Zhang, M., & Meng, Q. (2020). Courtyard sound field characteristics by bell sounds in Han Chinese Buddhist temples. *Applied Sciences*, 10(4), 1279.
- [32] Zhang, D., Feng, Y., Zhang, M., & Kang, J. (2022). Sound field of a traditional Chinese palace courtyard theatre. *Building and Environment*, 109741.

- [33] He, J., & Kang, J. (2010). Architectural and acoustic features of the caisson ceiling in traditional Chinese theatres. *Proceedings of ISRA 2010*, Melbourne, Australia.
- [34] Hua, Y., Chun, Q., & Jia, X. (2022). Simplified calculation model for typical Dou-Gong exposed to vertical loads. *Buildings*, 12(5), 689.
- [35] Chen, Z., Zhu, E., Lam, F., & Pan, J. (2014). Structural performance of Dou-Gong brackets of Yingxian Wood Pagoda under vertical load—An experimental study. *Engineering Structures*, 80, 274-288.
- [36] Soeta, Y., Shimokura, R., Kim, Y. H., Ohsawa, T., & Ito, K. (2013). Measurement of acoustic characteristics of Japanese Buddhist temples in relation to sound source location and direction. *Journal of the Acoustical Society of America*, 133, 2699-2710.
- [37] Lee, K. J. (1988). Shoji and related architectural elements: Their structure, applications, and adaptations. *Journal of Interior Design Education and Research*, 14(2), 27-36.
- [38] Gupta, A. (2024). Evaluating the functional design of temple enclosures for communal practices. *Building Acoustics*, 31(4), 399-416.
- [39] Manohare, M., Dongre, A., & Wahurwagh, A. (2017). Acoustic characterization of the Buddhist temple of Deekshabhoomi in Nagpur, India. *Building Acoustics*, 24, 193-215.
- [40] Michell, G. (1988). *The Hindu temple: An introduction to its meaning and forms*. University of Chicago Press.
- [41] Roca, P., Lourenço, P. B., & Gaetani, A. (2019). *Historic construction and conservation: Materials, systems and damage*. CRC Press.
- [۴۲] بزرگ‌نیا، ز. (۱۳۸۳). (معماران ایران از آغاز دوره اسلامی تا پایان دوره قاجار. سازمان میراث فرهنگی کشور .
- [43] Mohammadi, A. A., Asefi, M., & Ebrahimi, A. N. (2018). The geometrical regularization for covering irregular bases with Karbandi. *Nexus Network Journal*, 20, 331-352.
- [44] Mohamadian, S., & Faramarzi, S. (2011). Typology and the formulating geometric structure of Karbandi in Iran's architecture. *Journal of Fine Arts: Architecture and Urban Planning*, 3(4), 81-96.
- [45] پیرنیا، محمدکریم، بزرگمهری، زهره. (۱۳۸۵). (هندسه در معماری. سازمان میراث فرهنگی کشور، سبحان نور .
- [46] Necipoğlu, G., & Al-Asad, M. (1995). *The Topkapı scroll: Geometry and ornament in Islamic architecture*. Getty Center for the History of Art and the Humanities.
- [47] Farshchi, H., Danaie Nia, A., & Ashrafi, A. (2016). The geometric system of single impost Rasmi-bandi, derived from peripheral circle. *MMI*, 6(12), 127-138.
- [48] Petersen, A. (2002). *Dictionary of Islamic architecture*. Taylor & Francis.
- [49] Blair, S. (2024). *The monumental inscriptions from early Islamic Iran and Transoxiana*. Brill.
- [50] Bloom, J. M. (2020). *Architecture of the Islamic West: North Africa and the Iberian Peninsula, 700-1800*. Yale University Press.
- [51] Azad, Hassan. (2008). ALI QAPU: Persian historical music room. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 30(3).

- [52] Bonner, J., & Kaplan, C. (2017). *Islamic geometric patterns: Their historical development and traditional methods of construction*. Springer New York.
- [53] Nazari, S., & Hashemi Nik, R. (2019). Documentation of the Yazdi-Bandi vault at the Plaza of Sadre-A'zam, Tehran. *International Journal of Architectural Heritage*, 14(4), 541-567.
- [54] Safaeianpour, A., & Valibeig, N. (2024). From scrolls to screens: A novel perspective on simulation and decoding of the Kaseh-Sazi drawings of Mirza Akbar's architectural decorations scroll. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*.
- [55] Abel, J., Woszczyk, W., Ko, D., Levine, S., Hong, J., & Skare, T. (2013). Recreation of the acoustics of Hagia Sophia in Stanford's Bing Concert Hall. *International Symposium on Room Acoustics*, Stanford University.
- [56] Sü Gül, Z., Çalışkan, M., Tavukçuoğlu, A., et al. (2018). Assessment of acoustical indicators in multi-domed historic structures by non-exponential energy decay analysis. *Acoustics Australia*, 46, 181-192.
- [57] Kheirollahi, M., Mohammadi, A. A., Chenaghlou, M., & Nejad Ebrahimi, A. (2023). Structural morphology and seismic evaluation of intersecting masonry space structure (Karbandi system). *Structures*, 56, 104876.
- [58] Pour Ahmadi, M. (2014). A basic method for naming Persian Karbandis using a set of numbers. *Nexus Network Journal*, 16, 313-343.
- [59] Reinhardt, D., Cabrera, D., Jung, A., & Watt, R. (2016). Towards a micro design of acoustic surfaces. *Advances in Architectural Geometry*, 136-149.
- [60] Shtrepi, L. (2019). Investigation on the diffusive surface modeling detail in geometrical acoustics-based simulations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 145(3), EL215.
- [61] Tsingos, N., Lefebvre, S., Dachsbacher, C., & Dellepiane, M. (2007). Extending geometrical acoustics to highly detailed architectural environments. *19th International Congress on Acoustics*, Madrid.
- [62] Vorlaender, M., Heimes, A., Pan, L., Kempin, J., Tokac, I., & Brell-Çokcan, S. (2023). Sound scattering at building façades. *The Journal of the Acoustical Society of America*.
- [63] Heller, E. J. (2013). *Why you hear what you hear: An experiential approach to sound, music, and psychoacoustics*. Princeton University Press.
- [64] ISO 3382-1:2009. *Acoustics—Measurement of room acoustic parameters—Part 1: Performance spaces*. International Organization for Standardization.
- [65] Martellotta, F. (2009). Identifying acoustical coupling by measurements and prediction models for St. Peter's Basilica in Rome. *J. Acoust. Soc. Am.*, 126(3), 1175-1186.
- [66] Xiang, N., & Blauert, J. (1993). Binaural scale modelling for auralisation and prediction of acoustics in auditoria. *Applied Acoustics*, 38(2-4), 267-290.
- [67] Barron, M. (2009). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. Taylor & Francis. pp 60-64.
- [68] ASTM E1050. *Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System*. ASTM International.

[69] IEC 61672-1:2013. *Electroacoustics—Sound level meters—Part 1: Specifications*. International Electrotechnical Commission.

[۷۰] کرباسیاف, محمد مهدی و اذغان, غزاله. (۱۴۰۴). مطالعه عملکرد آکوستیکی تزئینات تنگ‌بری در میراث معماری ایرانی. *مجله علمی صوت و ارتعاش*. ۱۲۵-۹۹, ۱۴(۲۷), ۱۴۰۴.

پیوست ۱

جدول پ ۱. طبقه‌بندی جامع سیستم‌های تزئینی معماری سنتی ایران و کاربردهای چندعملکردی آن‌ها

نمونه‌های شاخص	مصالح ساختمانی	کارکردهای اضافی	عملکرد لرزه‌ای	روشنایی طبیعی و خواص نوری	کنترل حرارتی و اقلیمی	آکوستیکی خواص	کاربردهای سازه‌ای	ویژگی‌های هندسی	دوره تاریخی و منشأ	سیستم تزئینی
مسجد جامع نائین (۳۴۹ ه.ق/۹۷۱ م)؛ مسجد جامع اردستان؛ شبستان‌های مسجد جامع اصفهان؛ تیمچه حاج‌محمدقلی (بازار تبریز)	آجر (رایج‌ترین)؛ همچنین گچ، کاشی، آینه‌کاری یا ترکیبی از آن‌ها؛ متغیر بسته به رویه‌های منطقه‌ای	ترکیب زیبایی شناختی - سازه‌ای : همبستگی ی بین کارکردها ی معماری و سازه‌ای فضاهای معنادر می‌آفریند	مقاومت لرزه‌ای بالا: نقاط تقاطع طاق‌ها مناطق کششی را حذف می‌کنند؛ مناسب برای تحمل بارهای لرزه‌ای؛ فروریزی در شدت‌های تنش بالاتر آغاز می‌شود	کارکرد اولیه نیست؛ ممکن است الگوهای نوری از طریق بازشوها و دهانه‌های هندسی ایجاد کند	بهبود ازی حرارتی : شاخصه دو نوس یا دو نوسه آن حجم‌های فضایی میانی برای تنظیم حرارت در اقلیم‌های خشک ایجاد می‌کند؛ تناسبات انسانی و مردم‌واری را در سازه‌های بلند و مرتفع حفظ می‌کند	پراکندگی پهن‌بند : دهانه‌های کوچک (۲- ۳ متر) بر فرکانس‌های میانی تا بالا (>500) هرتز) تأثیر می‌گذارند؛ دهانه‌های بزرگ (۸- ۱۰ متر) بر فرکانس‌های پایین (۵۰- ۲۰۰ هرتز) تأثیرگذارند؛ نقاط کانونی آکوستیک متعدد از طریق پیکربندی و جهی سطح گنبدی ایجاد می‌کند	باربر اصولی : پایه مربع را به سطح گنبدی دایره‌وار تبدیل می‌کند؛ بارهای سازه‌ای را از حلقه فشاری به طاق‌ها ی پایه منتقل می‌کند؛ سه دسته: (۱) سقف سازه‌ای، (۲) آجرکار ی گنبد دوپوس ته، (۳) عناصر انتقالی در ایوان‌ها و محرابه	سیستم طاق‌نمای دندان‌دار با طاق‌های مورب و باریکه طاق متقاطع که هندسه ستاره‌شکل تشکیل می‌دهند؛	قرن دهم میلادی (سلسله صفاریان)؛ اولین نمونه: مسجد جامع شیراز (۲۶۲ ه.ق/۸۷۶ م)	کاربندی عمومی

مساجد تاریخی و بازارهای سراسر ایران؛ پایه‌گذار سیستم‌های پیچیده‌تر	عمدتاً آجر؛ همچنین روکش گچ و کاشی	پایه هندسی: به‌عنوان مبنای یزدی‌بند ی و کاسه‌ساز ی عمل می‌کند؛ دقت ریاضی در تقسیمات دایره‌ای	یکپارچگی سازه‌ای بهبود یافته هنگام ادغام با سیستم‌ها ی برابر	الگوسازی نوری از طریق بازشوهای هندسی؛ اثرات ریتمیک روشنایی- سایه ایجاد می‌کند	از طریق مفصل‌بند ی سطح به ذخیره یا جرم حرارتی کمک می‌کند	پراکندگی صوتی کنترل شده: پراکنش و الگوهای بازتاب کنترل شده را از طریق تکرار هندسی تسهیل می‌کند	عمدتاً غیربار بر؛ می‌تواند در کاربردها ی خاص به‌عنوان کاربندی باربر عمل کند	سیستم شبکه مرکزی تشکیل شده از کمان‌های هم‌بعد مقاطع که به سمت نقطه شمسه مرکزی همگرا می‌شوند؛ بر اساس تقسیم بخشی دایره‌ای و وترهای مقاطع	پس از قرن دهم (تکامل یافته با سنت کاربندی)	رسمی‌بندی

منشأ پیش از اسلام: دوره ماد (دکان داوود)؛ اشکال تکامل یافته در همخانمش (کعبه زرتشت) و اشکانی (کاخ هترا)؛ نمونه‌های اسلامی: آرامگاه سامانیان و مسجد جورجیر (۸۹۲- ۹۴۳ م)	سیستم سه‌بعدی لانه‌زنبوری از طاق‌های پله‌ای افقی که در راس شمسه به اوج می‌رسند؛ عمق‌های مشخصه: ۱۵-۶۰ سانتی‌متر که ناپیوستگی های امپدانس سطحی ایجاد می‌کنند	معمولاً غیربار بر : به‌عنوان پوسته یا پوشش ثانویه عمل می‌کند؛ اعمال شده در مکان‌ها ی زیر طاق، ورودی‌ه ، ایوان‌ها، مفصل بندی داخلی و انتقالات گوشه. می‌تواند کل داخل طاق یا گنبد را بپوشاند	پراکندگی وابسته به فرکانس: عمق ۱۵ سانتی‌متر بر فرکانس‌های ۵۷۰>هرتز تأثیر می‌گذارد؛ عمق ۶۰ سانتی‌متر بر فرکانس‌های ۱۴۰>هرتز تأثیر‌گذار است؛ پراکندگی پهن‌بند در طیف گفتار (۳۰۰- ۳۴۰۰ هرتز) و موسیقی (۵۰- ۱۵۰۰۰ هرتز) را امکان‌پذیر می‌کند؛ معیار ربع‌طول‌موج: $f \approx c/4d$ ؛ حفره‌های مقعر هوا را محصور می‌کنند و به‌عنوان تشدیدکننده های پیچیده عمل می‌کنند	کارکرد دوگانه در پیکربندی های دوپوسته؛ حفره‌های هوا بافر حرارتی فراهم می‌کنند	پراکنده ساز روشنایی طبیعی : نور را منعکس و شکسته می‌کند و اثرات روشنایی متنوع ایجاد می‌کند؛ به‌عنوان پراکنده‌ساز روشنایی روز در طبقه‌بند ی نورپردازی ایرانی دسته‌بند ی می‌شود؛	پیکربندی پله‌ای تنش‌ها را توزیع می‌کند؛ سازگار با حرکات لرزه‌ای هنگام یکپارچه‌ساز از مناسب	انتقال فضایی : پایه مستطیل را به گنبد دایره‌ای پیوند می‌دهد؛ تکامل از گوشه‌ساز ی و پتکانه؛ تنوعات منطقه‌ای در فرم (اسپانیای ی، مراکشی، مصری، عثمانی)	ایران/عراق: آجر پوشیده با گچ یا سرامیک؛ سوریه/مصر/ ترکیه: سنگ؛ شمال آفریقا: گچ یا چوب؛ دوره صفویه: کاشی‌کاری حشتمی. معرق؛ قرن ۱۸: آینه
--	---	--	--	--	---	---	--	---

عمرات عالی‌قاپو (اصفهان)؛ مسجد شاه و شیخ لطف‌الله (اصفهان)؛ مدرسه خرگرد در خواف/ مدرسه خان در شیراز

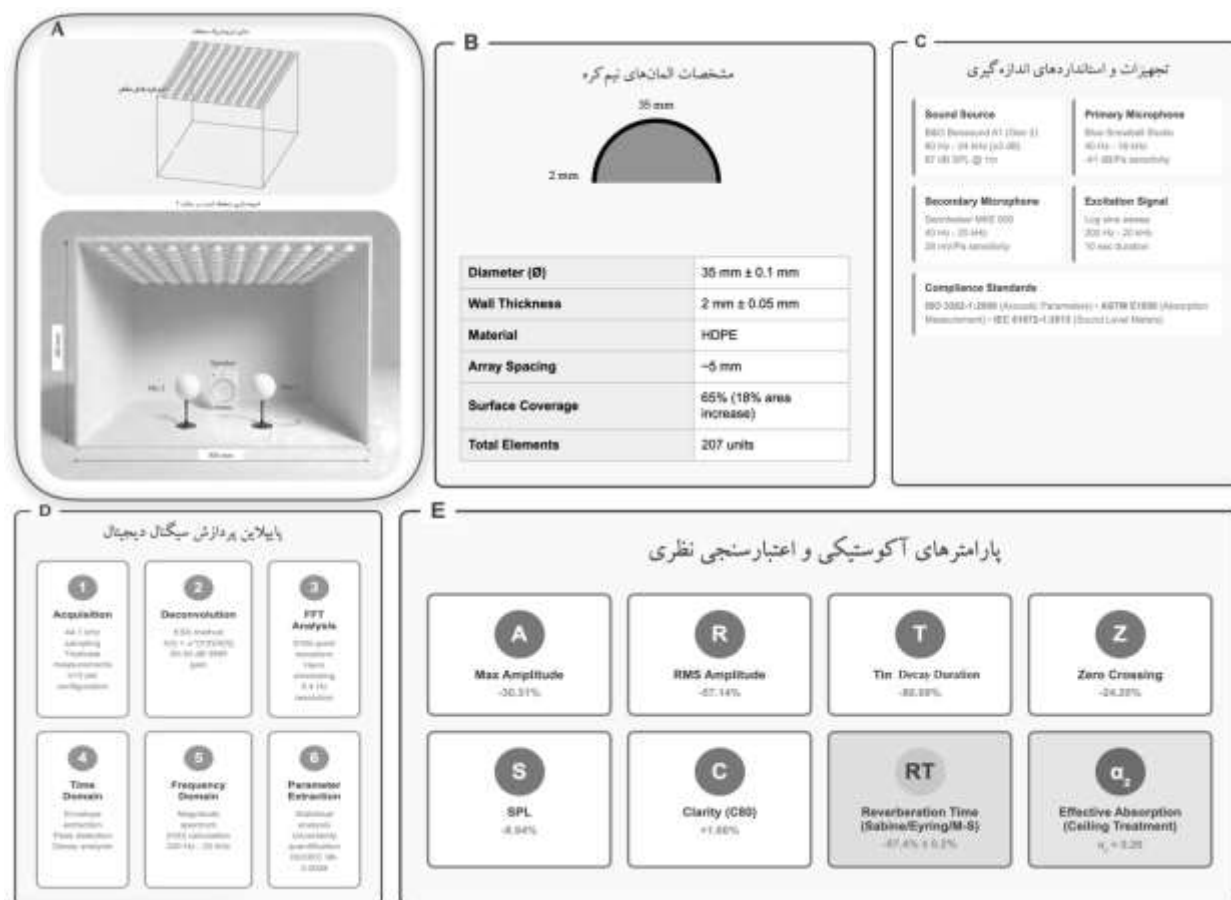
بناهای کلیدی اصفهان؛ همچنین در بزد، کرمان و نطنز؛ مساجد، مدارس و بازارهای دوره سلجوقی (قرن ۱۱) تا قاجار (قرن ۱۹)	دوره صفویه (قرن ۱۶-۱۸)؛ تکامل از اصول رسمی‌بندی و مقرنس	ترکیب رسمی‌بندی و مقرنس با ماتریس‌های هندسی به‌هم‌پیوسته با «سینه فخری» به‌عنوان واحد بنیادی؛ توپوگرافی سطح را از طریق سازمان‌دهی ریتمیک تعدیل می‌کند؛ دو کلاس: (۱) غیربرابر شبیه رسمی، (۲) ویژگی‌های سازه‌ای مشابه مقرنس	ظرفیت باربری متغیر: کلاس اول فاقد ظرفیت باربری است؛ کلاس دوم ویژگی‌های سازه‌ای مشابه مقرنس دارد؛ رابطه معکوس بین ارتفاع و اندازه شمشه	شبکه‌های پراکندگی آکوستیکی: مسیرهای انتشار و بازتاب صوت را از طریق یکپارچگی فضایی کنترل می‌کند؛ پارامترهای پژواک و منطقه‌بندی آکوستیکی را کنترل می‌کند	عملکرد حرارتی تقویت‌شد ه از طریق هندسه سطحی پیچیده و ایجاد پاکت‌های هوا	الگوهای نوری پیچیده ایجاد می‌کند؛ شکست‌های هندسی، انتشار نور را تقویت می‌کند	کلاس سازه‌ای مقاومت لرزه‌ای را از طریق گره‌خوردگی هندسی فراهم می‌کند	پیچیدگی منطقی منطقی: تکه‌تکه‌ش‌دن هندسی منجر به خواص سازه‌ای منحصر ب‌فرد می‌شود؛ نشان‌دهنده تکامل و توسعه در معماری ایرانی است	ساخت آجری (رایج‌ترین)؛ اغلب پوشیده با روکش‌های تزئینی
--	---	---	---	--	---	--	--	--	---

جدیدتری ن نوآوری در طبقه‌بند ی تزئینی (احتمالاً توسعه پس از صفویه)	الگوهای کاسه‌شکل مشتمل شده از هندسه‌های نیم‌کروی مقعر؛ مقعرهای گنبدی و نیم‌کروی متعدد (اشکال شمسه) در تراکم‌های مختلف؛ توسعه‌یافته از اصول کاربندی	کارکرد دوگانه: توزیع بار کارآمد از سقف به سازه‌ها ی بنیادی را هنگام ترکیب با عناصر هندسی تسهیل می‌کند؛ می‌تواند سازه‌ای یا صرفاً تزئینی باشد	اصلاح آکوستیکی یکپارچه: هندسه مقعر و مفصل‌بندی سطح منحنی؛ عناصر فردی بر روی محدوده‌های فرکانسی خاص از طریق بهینه‌سازی ابعادی تنظیم می‌شوند؛ پدیده‌های پژواک موضعی و اثرات فلاتر ^{۷۸} را کنترل می‌کند؛ رفتار شبیه تشدیدکننده هلمهولتز	فرم‌های مقعر گردش هوا را به دام می‌اندازند و کنترل می‌کنند؛ به آسایش حرارتی در اقلیم‌های گرم کمک می‌کند	درک عمق فضایی تقویت‌شد ه؛ الگوهای دراماتیک روشنایی و سایه ایجاد می‌کند؛ نور را از طریق سطوح مقعر منعکس می‌کند	توزیع هندسی انعطاف‌پذیر ی سازه‌ای فراهم می‌کند؛ مزایای توزیع بار در عملکرد لرزه‌ای می‌کند؛ سازه‌ای را ساده می‌کردند؛ تحت تأثیر پلان و تخصص هندسی	پیچیدگی ریاضی: ارتباطات هندسی و ریاضی پیچیده؛ گاهی معماران با چنین فرم‌هایی پیچیدگی سازه‌ای را ساده می‌کردند؛ تحت تأثیر پلان و تخصص هندسی	مصلح مختلف سازگار با کارکرد؛ می‌تواند شامل روکش‌های تزئینی باشد	مسجد جامع فزوین؛ سازه‌های مختلف دوره قاجار و پهلوی؛ مستندشده در طومار میرزا اکبر، شاخص در آثار حسین ارزاده
--	---	--	---	--	---	---	--	--	--

نکات پیوست ۱:

۱. حکمت طراحی یکپارچه: سیستم‌های تزئینی سنتی ایرانی رویکرد طراحی جامعی را نشان می‌دهند که در آن کارکردهای زیبایی‌شناختی، سازه‌ای، آکوستیکی، حرارتی و نمادین به‌طور یکپارچه ادغام می‌شوند نه به‌عنوان ملاحظات جداگانه.
۲. تنوعات منطقه‌ای: تمام سیستم‌ها تنوعات منطقه‌ای را بر اساس اقلیم محلی، مصالح موجود، سنت‌های ساخت و ترجیحات فرهنگی نشان می‌دهند. نمونه‌های ایران مرکزی (اصفهان، یزد، کاشان) اغلب با نمونه‌های اقلیم‌های شمالی یا جنوبی متفاوت هستند.
۳. مبانی ریاضی: تمام سیستم‌ها بر اساس اصول هندسی و ریاضی دقیق هستند که اغلب در طومارهای معماری تاریخی (طومار توپکاپی، طومار میرزا اکبر، نقشه‌های بخارا) مستند شده‌اند.

۴. ارتباط معاصر: این سیستم‌های سنتی بینش‌های ارزشمندی برای معماری پایدار مدرن ارائه می‌دهند، به‌ویژه در کنترل اقلیمی غیرفعال، طراحی آکوستیک بدون سیستم‌های مکانیکی، و یکپارچگی زیبایی‌شناختی با الزامات کارکردی.
۵. محدوده‌های فرکانس آکوستیکی: معیار ربع‌طول موج $f \approx c/4d$ ، که در آن $c \approx 343$ متر بر ثانیه در ۲۰ درجه سانتی‌گراد) رفتار وابسته به فرکانس سیستم‌های مبتنی بر فرم مقعر یا حفره مانند مقرنس و کاسه‌سازی را کنترل می‌کند.
۶. ماهیت بین رشته‌ای: اجرای موفق ابنیه به‌ویژه در دوران طلایی اسلام، نیازمند اشتراک سازنده بین علوم و فنون جامعی چون معماری، ریاضی و گاهی حکمت و فلسفه بود.
۷. سازگاری اقلیمی: سیستم‌ها عمدتاً برای اقلیم گرم-خشک فلات ایران (به‌ویژه مناطق مرکزی: یزد، کرمان، اصفهان، کاشان) با پاسخ‌های خاص به تابش شدید خورشیدی، تغییرات شدید دمای شبانه‌روزی و فعالیت لرزه‌ای توسعه یافته‌اند.
۸. جدول پیشینه زمانی معماری: شواهد از دوره ماد پیش از اسلام تا معماری سنتی معاصر را در بر می‌گیرد، با پیشرفت‌های عمده در دوره‌های ساسانی (۲۲۴-۶۵۱ م)، اوایل اسلامی (۶۵۱-۱۰۰۰ م)، سلجوقی (قرن‌های ۱۱-۱۳)، ایلخانی (قرن‌های ۱۳-۱۴)، صفوی (۱۵۰۱-۱۷۳۶)، و قاجار (۱۷۸۹-۱۹۲۵).



شکل پ ۲. روش‌شناسی تجربی برای تحلیل آکوستیک سیستم‌های تزئینی معماری ایرانی. (A) محفظه آزمایش کنترل شده (ساختار آلومینیومی ۴۰×۵۰×۴۰ سانتی‌متر) که ۲۰۷ عنصر HDPE نیم‌کره را روی سطح سقف نشان می‌دهد، با منبع صدای همه‌جهته و پیکربندی اندازه‌گیری دو میکروفون در فاصله ثابت ۲۵۰ میلی‌متر. (B) مشخصات دقیق عناصر نیم‌کره منفرد (قطر ۳۵ میلی‌متر، ضخامت دیواره ۲ میلی‌متر) که ۶۵٪ پوشش سطحی و ۱۸٪ افزایش مساحت نسبت به کل سطح محفظه را فراهم می‌کند. (C) مشخصات تجهیزات اندازه‌گیری و انطباق با استانداردهای بین‌المللی (ASTM, ISO 3382-1:2009, IEC 61672-1:2013, E1050)، شامل تحریک پهنای باند (جابجایی سینوسی لگاریتمی ۲۰۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز) و مبدل‌های دقیق. (D) پایپلاین پردازش سیگنال دیجیتال شش مرحله‌ای با استفاده از دکانولوشن سینوسی نمایی (ESS) ۹، تحلیل FFT ۸۱۹۲ نقطه‌ای با پنجره‌سازی هان، و استخراج پارامتر طبق پروتکل‌های تعیین مقدار عدم قطعیت ISO/IEC Guide 98-3:2008. (E) پارامترهای صوتی استخراج‌شده که تغییرات قابل توجهی در ویژگی‌های زمانی و طیفی نشان می‌دهند: کاهش حداکثر دامنه ۳۱/۳۰٪، کاهش RMS ۵۷/۱۴٪، بهبود زمان تا سکوت ۸۰/۰۹٪، با اعتبارسنجی نظری همگرا از طریق سه فرمول‌بندی زمان طنین (Millington-Sette, Eyring, Sabine) که منجر به کاهش ۵۷/۴ ± ۰/۲٪ و ضریب جذب سقف مؤثر $\alpha_2 = 0/26$ می‌شود. تمام اندازه‌گیری‌ها در سه تکرار ($n=3$) انجام شد و معناداری آماری از طریق آزمون‌های t زوجی تأیید شد ($p < 0/01$).

^۱ RMS Amplitude، ریشه متوسط دامنه، و نشان دهنده سطح انرژی مؤثر یا متوسط سیگنال صوتی در طول مدت زمان اندازه‌گیری است و در واحدهای خطی نرمال شده (بدون بعد) بیان شده است.

^۲ سیستم معماری سه‌بعدی لانه‌زنبوری شکل از طاق‌های پلکانی افقی که معمولاً در گوشه‌ها، زیر گنبدها و ایوان‌ها استفاده می‌شود.

^۳ Diazoma

^۴ Koilon

^۵ Resonance

^۶ micro-texture

^۷ Theater of Epidaurus

^۸ RT = زمان واخنش (Reverberation Time).

^۹ Vela

^{۱۰} Echeia

^{۱۱} Coffered ceilings

^{۱۲} Helmholtz resonator، تشدیدگر هلمهولتز دستگاهی است که از یک حفره (مانند یک ظرف یا محفظه) با یک گردن یا دهانه تشکیل شده است که

برای تشدید در فرکانس خاصی طراحی شده است. این دستگاه بر اساس اصل تشدید آکوستیک عمل می‌کند، جایی که امواج صوتی وارد حفره می‌شوند و

باعث لرزش هوای داخل می‌شوند. تشدیدگر، صدا را در فرکانس طبیعی آن تقویت می‌کند، که توسط حجم حفره و ابعاد دهانه یا گردن آن تعیین می‌شود.

این اصل معمولاً در کاربردهای مختلفی از جمله سازهای موسیقی، آکوستیک معماری و کنترل نویز استفاده می‌شود.

^{۱۳} North Theatre of Jerash

^{۱۴} Pantheon

^{۱۵} Basilica of Maxentius and Constantine

^{۱۶} Muqarnas

^{۱۷} Garih motifs

^{۱۸} Arabesque

^{۱۹} Tessellation

^{۲۰} Alhambra, Granada

^{۲۱} Great Mosque of Córdoba

^{۲۲} Cappella Palatina, Palermo

^{۲۳} Pendentives

^{۲۴} Acoustic dispersion

^{۲۵} Süleymaniye Mosque, Istanbul

^{۲۶} Ribbed vaulting

^{۲۷} Tracery patterns

^{۲۸} Stone corbels

^{۲۹} Notre Dame, Paris

^{۳۰} Monastery cloisters and chapter houses

^{۳۱} choral singing

^{۳۲} Lattice patterns

^{۳۳} Caisson ceiling system - Zaojing

^{۳۴} Dougong

^{۳۵} Ming-Tang Empire palace complex, Daxing/Xi'an

^{۳۶} Shoji screens

^{۳۷} Ranma

^{۳۸} Mandapas

^{۳۹} Jali screens - latticework

^{۴۰} Diffraction

^{۴۱} Kailasa Temple, Ellora

^{۴۲} Jain temples, Ranakpur

^{۴۳} فن معماری برای انتقال از پلان مربع یا چندضلعی به پایه دایره‌ای گنبد، که معمولاً با استفاده از طاق‌های مثلثی یا مقرنس انجام می‌شود.

- ۴۴ سیستم پوششی-تزیینی سنتی ایرانی مبتنی بر تقاطع قوس‌های مورب باریک که برای پوشش فضاهای مربع یا مستطیلی به کار می‌رود.
- ۴۵ مجموعه نقشه‌های معماری تاریخی که در کاخ توپکاپی استانبول نگهداری می‌شود و شامل طرح‌های هندسی پیچیده معماری اسلامی است.
- ۴۶ مجموعه‌ای از نقشه‌های معماری تاریخی ایرانی که شامل طرح‌های دقیق عناصر تزیینی مانند کاسه‌سازی و مقرنس است.
- ۴۷ عنصر مرکزی در طرح‌های هندسی معماری ایرانی که معمولاً به شکل دایره یا ستاره است و نقطه همگرایی خطوط و قوس‌ها را نشان می‌دهد.

48 controlled sound dispersion
49 scattering

- ۵۰ بنایی باستانی از دوره مادها در کرمانشاه که نمونه‌ای اولیه از معماری تزیینی ایران پیش از اسلام است.
- ۵۱ کاخ باستانی از دوره اشکانی در عراق کنونی که نمونه‌هایی از معماری تزیینی پیشرفته را نشان می‌دهد.
- ۵۲ عنصر معماری سازه‌ای که به عنوان تکیه‌گاه یا پایه برای انتقال بار از گنبد به دیوارها عمل می‌کند.

53 non-exponential sound energy decay characteristics
54 Weber and Katz
55 Reinhardt et al.
56 Shtrepi
57 Tsingos et al.
58 Vorlaender et al

۵۹ طاسه: عنصر معماری مقعر نیم‌کروی شکل که در سقف‌ها و گنبدها برای تزئین و کنترل آکوستیک استفاده می‌شود.

60 Early Decay Time
61 Multi-Dome
62 High-density Polyethylene
63 Logarithmic sine sweep
64 Decibels relative to Full Scale
65 Python
66 Sabine
67 Eyring
68 Millington-sette

۶۹ Acoustic treatment، شامل استفاده از مواد مختلف مانند پنل‌های جاذب صدا و پخش‌کننده‌ها برای کنترل خواص آکوستیک یک اتاق است. وقتی این مواد را به طور استراتژیک در اطراف فضای خود قرار می‌دهید، می‌توانید امواج صوتی را جذب یا پخش کنید و بازتاب‌های ناخواسته را کاهش دهید.

70 Sound Pressure Level (SPL): که بر حسب دسی‌بل (dB) اندازه‌گیری می‌شود، کنترل انرژی مؤثر و بلندی صدای درک شده در یک محفظه را نشان می‌دهد.

۷۱ Clarity Index (C80): نسبت انرژی صدای اولیه به انرژی انتهای، که بر حسب دسی‌بل اندازه‌گیری می‌شود، که نشان‌دهنده قابلیت فهم گفتار است.

۷۲ sweep signal

۷۳ Maximum Amplitude (mV): بالاترین سطح ولتاژی که سیگنال صوتی به آن می‌رسد، نشان‌دهنده اوج فشار صدای لحظه‌ای و نشانگر حداکثر بلندی صدا است.

۷۴ Maximum Amplitude Time (ms): زمانی که حداکثر سطح فشار صدا رخ می‌دهد، نشان‌دهنده سرعت کنترل بازتاب اولیه و ایجاد اولین جبهه موج است.

۷۵ Zero Crossing: تعداد دفعاتی که شکل موج از خط دامنه صفر عبور می‌کند، نشان‌دهنده توزیع مجدد انرژی طیفی، به ویژه افزایش اتلاف انرژی در باندهای فرکانسی بالاتر است.

۷۶ Decay Duration (ms): مدت زمان واپاشی (میلی ثانیه): مدت زمانی را که طول می‌کشد تا صدا به نامفهومگی کاهش یابد، اندازه‌گیری می‌کند، که به طور خاص در این مطالعه به عنوان زمانی که طول می‌کشد تا صدا به -60 dBFS (آستانه کف نویز) کاهش یابد، تعریف می‌شود و نشان‌دهنده ویژگی‌های افزایش یافته واپاشی صدا است.

77 Metamaterials
78 flutter
79 Exponential Sine Sweep