مقاله پژوهشی

# مطالعه عملکرد آکوستیکی تزئینات تنگ‌بری در میراث معماری ایرانی

**محمدمهدی کرباسباف***
دانش‌آموختهٔ دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
karbasbaf@gmail.com

**غزاله اذعان**
دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
gh.ezaan@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰

## چکیده

این پژوهش به بررسی خواص آکوستیکی تزئینات تنگ‌بری در معماری ایرانی، به ویژه بررسی چینی‌خانه کاخ عالی‌قاپو می‌پردازد. این اثر با استفاده از رویکردی میان‌رشته‌ای مستندات تاریخی را با تحلیل آکوستیک تجربی ادغام می‌کند و دیدگاه‌های سنتی در مورد عناصر تزئینی ایرانی را با نشان دادن اهمیت آکوستیک عملکردی آن‌ها، بازتعریف می‌کند. این روش شامل پروتکل‌های اندازه‌گیری آکوستیک دقیق طراحی‌شده برای عملکرد در چارچوب پارامترهای حفاظت از میراث است و بررسی می‌کند که چگونه چیدمان هندسی این ویژگی‌های تزئینی بر آکوستیک فضایی در محیط‌های داخلی تأثیر می‌گذارد. تحلیل مقایسه‌ای نشان می‌دهد که فضاهای معمارانه دارای این تزئینات، پیشرفت‌های آکوستیکی قابل اندازه‌گیری، از جمله مدولاسیون دامنه بهینه، ویژگی‌های واخنش تنظیم‌شده و توزیع صدای بهبود یافته نسبت به سطوح ساده را نشان می‌دهند. طرح آزمایشی از مدل‌های معماری مقیاس‌بندی‌شده استفاده کرد که پیکربندی‌های مختلف سقف را بر اساس مقرنس‌ها و گچ‌بری‌های برجسته چینی‌خانه تکرار می‌کردند و امکان ارزیابی کمی‌دقیق را فراهم می‌کردند و در عین حال محدودیت‌های حفاظتی را که مانع آزمایش مستقیم در محل می‌شد، رعایت می‌کردند. نتایج نشان‌دهنده مهندسی آکوستیک تجربی ارزشمند در شیوه معماری صفوی است که بهینه‌سازی آکوستیک عامدانه را از طریق الگوی هندسی محاسبه‌شده و لایه‌بندی مصالح نشان می‌دهد. این اثر، جای خالی قابل توجهی را در پژوهش‌های باستان‌شناسی- آکوستیک مربوط به میراث معماری ایران پر می‌کند و در عین حال، چارچوب‌های روش‌شناختی را برای بررسی محیط‌های آکوستیک تاریخی در چارچوب محدودیت‌های حفاظتی ایجاد می‌کند. یافته‌ها فراتر از ثبت سوابق باستان‌شناسی، دیدگاه‌های معناداری را برای شیوه‌های حفاظت از میراث و مهندسی آکوستیک معاصر ارائه می‌دهند و در عین حال، دانش فنی پیشرفته معماران ایرانی را نیز اثبات می‌کنند.

**واژگان کلیدی:** باستان‌شناسی آکوستیک؛ معماری ایرانی؛ تنگ‌بری؛ آکوستیک معماری، میراث فرهنگی

* نویسنده مسئول

## ۱. مقدمه

تقابل آکوستیک معماری و باستان‌شناسی، مرزی را در درک چگونگی توسعه راه‌حل‌های پیچیده برای بهینه‌سازی آکوستیک توسط تمدن‌های تاریخی نشان می‌دهد. این مطالعه، تحقیقات پیشگامانه‌ای را در مورد عملکرد آکوستیکی تنگ‌بری، یک تکنیک گچ‌بری تزئیناتی در معماری ایرانی، با استفاده از روش‌های نوآورانه‌ای که پژوهش‌های باستان‌شناسی را با مهندسی آکوستیک پیوند می‌دهد، ارائه می‌دهد. در حالی که تحقیقات گسترده‌ای در مورد معماری آکوستیک تاریخی غرب وجود دارد، خواص آکوستیکی عناصر معماری ایرانی تا حد زیادی ناشناخته مانده است و این پژوهش از طریق بررسی سیستماتیک چینی‌خانه کاخ عالی قاپو در اصفهان، به عنوان یکی از شاهکارهای معماری ایرانی به این مهم می‌پردازد.

اهمیت این تحقیق در سه نوآوری کلیدی نهفته است: اول، یک چارچوب تحلیلی جامع و غیرمخرب برای بررسی فضاهای آکوستیک تاریخی که آزمایش مستقیم در آنها محدود است، معرفی می‌کنیم. با ترکیب روش‌های پیشرفته اندازه‌گیری آکوستیک، این رویکرد یک مدل قابل تکرار برای مطالعه مکان‌های تاریخی حفاظت‌شده در سراسر جهان ارائه می‌دهد. دوم، این تحقیق برای اولین بار خواص آکوستیک تنگ‌بری را به صورت کمی‌تحلیل می‌کند و عملکرد آن را به عنوان یک پخش‌کننده صوتی آشکار می‌سازد. این مطالعه نشان می‌دهد که این طاقچه‌های به شکل ظرف، که قبلاً صرفاً تزئینی در نظر گرفته می‌شدند، پیشرفت‌های قابل اندازه‌گیری در مدولاسیون دامنه، کنترل واخنش و انتشار صدا ایجاد می‌کنند. سوم، این پژوهش درک علمی و مبتنی بر طراحی آکوستیک عامدانه در معماری ایرانی را ایجاد می‌کند و تفاسیر سنتی را که عناصر تزئیناتی را صرفاً به عنوان ویژگی‌های زیبایی‌شناختی یا ساختاری می‌بینند، به چالش می‌کشد. از طریق رویه‌های آزمونی دقیق و تحلیل پارامترهای آکوستیک، نشان می‌دهیم که چگونه پیکربندی‌های هندسی در معماری ایرانی به محیط‌های آکوستیک بهینه کمک می‌کنند.

علیرغم چالش‌های روش‌شناختی قابل توجه، از جمله محدودیت‌های آزمایش فیزیکی و تکامل پیچیده سازه در طول قرن‌ها، این تحقیق سعی بر ارائه مباحثی در مورد فناوری معماری ایرانی دارد. اخیراً، تلاش‌های قابل توجهی برای مرمت چینی‌خانه کاخ عالی‌قاپو توسط دولت آغاز شده است. این تحقیق به مرمتگران در درک خواص آکوستیک ویژگی‌های تزئینی تالار و مصالح به کار رفته در ساخت آن کمک خواهد کرد. چنین درکی برای انجام مرمت‌ها و بازسازی‌های دقیق ضروری است و از این طریق از اثرات نامطلوب بر یکپارچگی آکوستیک چینی‌خانه (تالار موسیقی) به دلیل تفسیر نادرست این عناصر جلوگیری می‌کند.

این مطالعه نشان دهنده حرکتی نو در روش‌شناسی علوم باستان‌شناسی آکوستیک در ایران است و چارچوب جدیدی برای بررسی فضاهای آکوستیک تاریخی ارائه می‌دهد و در عین حال به درک گسترده‌تر میراث معماری کمک می‌کند و خود پایه‌ای برای مطالعات آینده در باستان‌شناسی آکوستیک و حفاظت از ابنیه تاریخی ایجاد می‌کند.

## ۲. بررسی ادبیات: تنگ‌بری به عنوان عنصر تزئینی چند منظوره

فرم‌های تزئیناتی، نقشی محوری در بیان معماری، به ویژه در فضاهای داخلی، که در آن به طور قابل توجهی بر عملکرد تأثیر می‌گذارند، ایفا می‌کنند [۱] . معماری ایرانی، به عنوان یکی از کهن‌ترین سنت‌های هنری جهان، به‌طور منحصربه‌فردی عناصر زینتی را با هم ترکیب می‌کند که علاوه بر جذابیت زیبایی‌شناختی، کارکردهای عملی را نیز برعهده بگیرند [۲]. این سنت نمونه‌ای از شاخصه چند کارکردی عناصر معمارانه است، جایی که تزئینات به عنوان سازه‌های باربر، سیستم‌های عایق، و اصلاح‌گر آکوستیکی عمل می‌کنند. این امر موجب می‌شود که نقش این عناصر از تزیین صرف به اجزای اساسی دیگری در طراحی معمارانه ارتقا یابد. از نظر تاریخی، معماران ایرانی تزئینات را عناصری پویا می‌دانستند که امکان انطباق در نقش‌های مختلف در معماری را فراهم می‌کرد [۳].
تنگ‌بری یک روش تزئینی است که در طول قرن‌ها توسعه و تکامل یافته است و شامل ایجاد طاقچه‌های متعدد به فرم ظرف در سطوح گچی است که باعث ایجاد فرم‌هایی توخالی در سطوح سقف، دیوارها و طاق‌ها می‌شود. این فرآیند منجر به ایجاد یک پوشش گچی ثانویه در سطوح داخلی فضاهای بسته در کاخ‌ها، خانه‌ها و برخی کاربری‌های خاص می‌شود. این پوشش ثانویه به شکل پیچیده‌ای به اشکال مختلف ظرف‌ها بریده شده است که برخی از آن‌ها برای قرار دادن اشیاء چینی تزئینی طراحی شده‌اند و به طور مؤثر طراحی معماری را با نمایش تزئینی ادغام می‌کنند.
در حالی که تنگ‌بری‌ها در ابتدا برای اهداف تزئینی استفاده می‌شد، مطالعات و گمانه‌زنی‌های معاصر نقش آکوستیکی مهم آن را روشن کرده است. با توجه به شکل ۱، این عنصر معمارانه معمولاً در دو کاربرد اصلی ظاهر می‌شود: به عنوان عنصر زیبایی شناختی و عنصر عملکردی. کاربرد تزئینی آن به ویژه در بناهایی مانند خانه‌های ارامنه جلفا در اصفهان مشاهده می‌شود، در حالی که اجرای عملکردی آن مانند محلی برای قرارگیری ظروف است که نمونه‌ای از آن در چینی‌خانه آرامگاه شیخ صفی‌الدین اردبیلی در اردبیل قابل مشاهده است و همچنین به عنوان راه حلی برای اصلاح

شکل ۱ . نمای داخلی تالار چینی‌خانه واقع در طبقه فوقانی کاخ (الف، ج) و نمای بیرونی کاخ عالی قاپو (ب). این شکل، فرم و تناسبات تزئینات تنگ‌بری و همچنین چیدمان متراکم آن‌ها در فضای داخلی چینی‌خانه را نشان می‌دهد.

آکوستیکی[1] یک فضای بسته در چینی‌خانه کاخ عالی‌قاپو در اصفهان به کار می‌رود.

با توجه به پروتکل‌های حفاظتی که آزمایش مستقیم سایت را محدود می‌کنند، این مطالعه با محدودیت‌های خاصی در جمع‌آوری داده‌های جامع معماری و آکوستیکی مواجه بود. در حالی که بررسی‌های دقیق معماری توسط گالدیری [۴] ابعاد و پیکربندی‌های کلی عناصر تنگ‌بری را ارائه می‌دهد، اندازه‌گیری‌های خاص در مورد تغییرات ضخامت سطوح، چگالی مواد به‌کار رفته و پیکربندی‌های هندسی دقیق به طور کامل در دسترس نبودند.

طبق گزارش‌های فنی، در چینی‌خانه اردبیل فرم‌های توخالی مشخصاً ضخامت دیواره‌ای از ۱/۵ تا ۲/۵ سانتی‌متر را نشان می‌دهند، با تغییراتی که با دقت به موقعیت ساختاری و الزامات عملکردی آنها کالیبره شده است. فرورفتگی‌های درون این مصنوعات تنوع عمق قابل‌توجهی را نشان می‌دهند که از ۱۵ تا ۷۰ سانتی‌متر را شامل می‌شود [۵].

مطالعات ترکیب مواد، یک تکنیک لایه‌بندی را نشان می‌دهد که با کاربردهای متعدد گچ مشخص می‌شود که سطوحی با ویژگی‌های جذب صوتی ایجاد می‌کند. در طول تاریخ سازه، این ترکیبات گچی در چندین مرحله بازسازی، دستخوش دگرگونی‌های قابل توجهی شدند. سطوح داخلی و بیرونی این تزئینات با آذین‌هایی همچون لایه‌چینی، و رنگ‌آمیزی، پوشیده شده‌اند.

ویژگی‌های آکوستیکی تزئینات تنگ‌بری نشان‌دهنده مهم‌ترین شاخصه آن است، همانطور که در چینی‌خانه کاخ عالی قاپو نشان داده شده است. اگرچه مطالعاتی چند، این ویژگی‌های اصلاح آکوستیکی را مستند کرده‌اند، اما تحلیل جامع آکوستیک معماری و الگوهای انتشار صدا در چینی‌خانه عالی قاپو ضروری است. چنین تحلیلی باید اصول آکوستیک معماری را در کنار شواهد تجربی از پژوهش‌ها و بررسی‌های انجام شده، با در نظر گرفتن پارامترهای فنی که بر آکوستیک فضاهای بسته تأثیر می‌گذارد، در برگیرد.

### ۲-۱. منابع دست اول از مشاهدات چینی‌خانه کاخ علی قاپو

این بخش به بررسی منابع اولیه از جمله سفرنامه‌های دوره صفویه در توصیف کاخ علی قاپو و تزئینات آن بر اساس مشاهدات دست اول می‌پردازد. مسافران اروپایی که در قرون ۱۶ و ۱۷ از امپراتوری صفوی بازدید کردند، زمان قابل توجهی را در اصفهان، پایتخت این سلسله، سپری کردند.

با بررسی گسترده میان گزارش‌های باقی مانده از دوره صفویه به بعد که از میان آن‌ها می‌توان به اسناد باقی‌مانده از گزارش‌های برادران شرلی (۱۵۹۸)، گارسیا د سیلوا فیگوئروآ (۱۶۱۴)، پیترو دلا واله (۱۶۱۷)، رابرت استودارت (۱۶۲۶)، ژان باپتیست تاورنیه (۱۶۳۲)، آدام اولئاریوس (۱۶۳۶)، سر ژان شاردن(۱۶۶۴) ، نیکولاس سانسون (۱۶۸۳)، انگلبرت کامپفر (۱۶۸۳) و کروسینکی (۱۷۰۷) اشاره کرد که بخش زیادی از این سفرنامه‌ها و گزارش‌ها توضیحات و توصیفاتی در مورد کاخ‌های سلطنتی و تزئینات معمارانه آن ارائه کردند.

توصیفات و گزارش‌های ژان شاردن به دلیل اقامت طولانی مدت او در ایران و تسلط نسبی فرهنگی وی به آن، مسلماً یکی از جامع‌ترین و معتبرترین گزارش مورد استفاده در طی مطالعات اسناد دست اول در پژوهش‌های مربوط به دوره صفوی است. مشاهدات

شاردن هنگام توصیف تنگ‌بری تالار چینی‌خانه در میدان سلطنتی یا میدان شاه اصفهان، عمدتاً بر کاربرد زیبایی شناسانه این تزئینات متمرکز بود. او بر منظره تماشایی ظروف رنگارنگ، جام‌ها و صراحی‌ها در کنار هم به‌گونه‌ای که دیوارها و سقف‌ها به‌طور دقیق به فرم این ظروف بریده شده و این جام‌ها گویی در حال سقوط هستند، تأکید کرد [۷،۶]. به طور مشابه، سانسون [۸] سقف این تالار را بسیار زیبا و مطلا توصیف کرد.

فردریک چارلز ریچاردز، مسافر و نقاش انگلیسی که در سال ۱۹۳۰ از مجموعه کاخ بازدید کرد، توصیفی ارزشمند و حائز اهمیت ارائه کرد: "در طبقه فوقانی، اتاقی اسرارآمیز وجود دارد که هیچ کس نمی‌تواند اطلاعات قانع کننده‌ای در مورد استفاده از آن ارائه دهد، اما طرح‌های تزئینی آن مرموز است. دیوارها و سقف این اتاق شبیه سازهای مختلف موسیقی یا مانند بخش‌هایی از یک مجموعه پازل هستند، اما دانستن اینکه آنها در ابتدا برای چه هدفی در نظر گرفته شده بودند، خود مانند یک راز است [۹] .

جالب اینجاست که علیرغم اینکه سیاحانی مانند سر جان شاردن و انگلبرت کامپفر [۱۰] سال‌ها در اصفهان زندگی می‌کردند و بخش‌هایی از گزارش‌های خود را به موسیقی و سازشناسی دوره صفوی اختصاص می‌دادند، سفرنامه‌ها و متون تاریخی آنها تقریباً هیچ اطلاعاتی در مورد ویژگی‌های صوتی این تالار و اختصاص دادن آن به اجراهای موسیقیایی ارائه نمی‌داد. اما فیگوئروآ به نکته جالبی اشاره کرده که شاه عباس اول با همسران خود در این تالار اوقات می‌گذراند؛ با این حال، او هیچ گونه استفاده موسیقیایی از فضا را ذکر نکرده است [۱۱]. به همین ترتیب، در منابع اصلی موسیقی صفوی، مانند رساله‌های علم موسیقی «میرصدرالدین محمد قزوینی» و «رساله موسیقی امیرخان گرجی» [۱۲،۱۳]، اثری از وجود جایگاه ویژه‌ای برای اجرای موسیقی در کاخ‌های سلطنتی صفوی وجود ندارد.

تحقیقات نشان می‌دهد که کاخ عالی قاپو از یک مرحله ساخت و ساز منفرد بیرون نیامده است. شواهدی از روند توسعه و ساختار ناپیوسته آن در بخش‌های مختلف ساختمان قابل مشاهده است. پژوهش‌های باقر آیت الله زاده شیرازی و اوجنیو گالدیری از سال ۱۹۶۴ به بعد نشانه‌های دیگری از این تحول را شناسایی کرده است. بخش‌هایی از کاخ عالی قاپو، از جمله الحاقات ساختاری و تزئینات آن، پس از مرگ شاه عباس اول تکمیل شد و بیش از یک قرن از سلطنت صفویه امتداد یافت. به عنوان مثال، کتیبه‌ای به خط خوشنویسی مربوط به دوران شاه سلطان حسین (۱۶۹۴-۱۷۲۲) نشان می‌دهد که تزئینات طبقه سوم در زمان سلطنت او اضافه شده یا بازسازی شده است.

نقش مؤثر مقاماتی مانند ساروتقی اعتمادالدوله (۱۵۷۹-۱۶۴۵) محب علی بیگ در توسعه و تکامل سبک‌ها و روش‌های معماری صفوی بسیار مهم بود. نقش میرزا محمدتقی، وزیر اعظم مقتدر صفوی معروف به ساروتقی، پس از نقش پادشاهان صفوی، جایگاهی رفیع در حمایت و توسعه طرح‌های بزرگ معماری صفوی ایفا کرد [۱۴]. ساروتقی در طراحی و ساخت دو کاخ مهم نقش داشت: عمارت تالار طویله و عمارت آینه‌خانه در اصفهان صفوی.

شایان ذکر است، نه کتیبه‌های معماری تاریخی و نه اسناد تاریخی، نام معمار و مهندس طراحی و توسعه کاخ عالی قاپو را فاش نمی‌کند. با توجه به اهمیت این کاخ، احتمالاً معمار اصلی دربار در ایجاد آن نقش داشته است. معماران برجسته صفوی مانند بدیع الزمان تونی،

محمدرضا پسر استاد حسین اصفهانی، علی اکبر اصفهانی به عنوان افراد کلیدی یا مؤثر در طراحی و توسعه کاخ عالی قاپو یا چینی‌خانه آرامگاه شیخ صفی شناخته می‌شوند. بعدها، در دوران سلطنت شاه عباس دوم، نقش ساروتقی در مرمت و توسعه تالارهای کاخ عالی قاپو، جایگاه او را به عنوان یکی از معماران دخیل در طراحی و بهسازی آن پررنگ کرد [۱۵]. بازسازی‌های ساروتقی، کاخ عالی قاپو را که به فضای تشریفاتی ناکارآمدی تبدیل شده بود، احیا کرد.

### ۲-۲. دیدگاه‌های علمی

مینیاتورها و نگاره‌های ایرانی در دوره‌های مختلف به عنوان منابع ثانویه ارزشمندی برای درک تاریخ‌نگاری تزئینات تنگ‌بری و کاربردهای آن عمل می‌کنند. برنارد اوکین در کتاب معماری تیموری در خراسان دو مینیاتور قرن پانزدهمی تیموری را توصیف می‌کند که اتاق‌های بالایی را که با طاقچه‌هایی حاوی جام‌های چیده شده تزئین شده‌اند، نشان می‌دهد[۱۶]. همچنین کری بر مبنای نگاره‌های تیموری و صفوی [۱۷] و سیمز بر مبنای مینیاتوری مربوط به تزئینات شاه‌نشین باغ سلطان حسین بایقرا، به توصیف چینی‌خانه می‌پردازند [۱۹،۱۸].

مینیاتورهای مربوطه عبارتند از: نگاره سلطان حسین بایقرا اثر کمال‌الدین بهزاد (۱۴۹۷) و زادروز شاهزاده (۱۴۹۴) و همچنین نگاره دیدار شاه با عاشق (۱۴۹۵) اثر میرک نقاش. این نگاره‌ها نشان دهنده عناصر تزئینات معمارانه‌ای در بناهای منقوش هستند که می‌توان آن تزئینات را به عنوان اسناد موجود برای بررسی اسلاف تنگ‌بری‌ها دانست که به طرز چشمگیری شبیه به گچ‌بری‌های تیموری بکار رفته در شربتخانه افوشته نطنز، مقبره ستی فاطمه در یزد، خانقاه شیخ علی بنیمانی در بیدآخوید، و برخی ارایه‌های صفوی در چینی‌خانه شیخ صفی‌الدین اردبیل است [۲۰، ۲۱].

ظروف و طاقچه‌های گچی در این مینیاتورها نشان می‌دهد که این تزئینات عمدتاً برای حفظ و نمایش ظروف چینی نفیس وارد شده از امپراتوری چین بوده است. روایات تیموری از نگهداری ظروف چینی با ارزش در مکان‌های مناسبی مانند چینی‌خانه الغ بیگ [۲۲] یاد می‌کند و با این اوصاف می‌توان نتیجه گرفت که اگر اولین نمونه‌های تنگ‌بری را در تزئینات بناهای دوره عباسیان در سامرا یا حتی پیش از آن دوره در نظر بگیریم، روش‌های طاقچه‌بری، محراب‌بری، تنگ‌بری یا چینی‌خانه از نظر زیبایی شناختی و عملکردی در طول نسل‌ها سیر تکاملی بی‌وقفه‌ای را تا دوره صفوی طی کرده‌اند.

این سیر تکاملی در معماری دوره صفوی همچون بسیاری از تزئینات معمارانه به فراز خود رسید؛ طبق سندی مربوط به این دوره، اسکندر بیگ ترکمان (۹۶۸ -پس از ۱۰۴۳ ق) منشی دربار صفوی در کتاب عالم آرای عباسی نقل می‌کند که چگونه شاه عباس کبیر از تالار چینی‌خانه سلطنتی‌اش، ظروفی را برای تأسیس تالار چینی‌خانه‌ای جدید در آرامگاه جدش شیخ صفی‌الدین اسحاق در اردبیل هدیه کرد[۲۳].

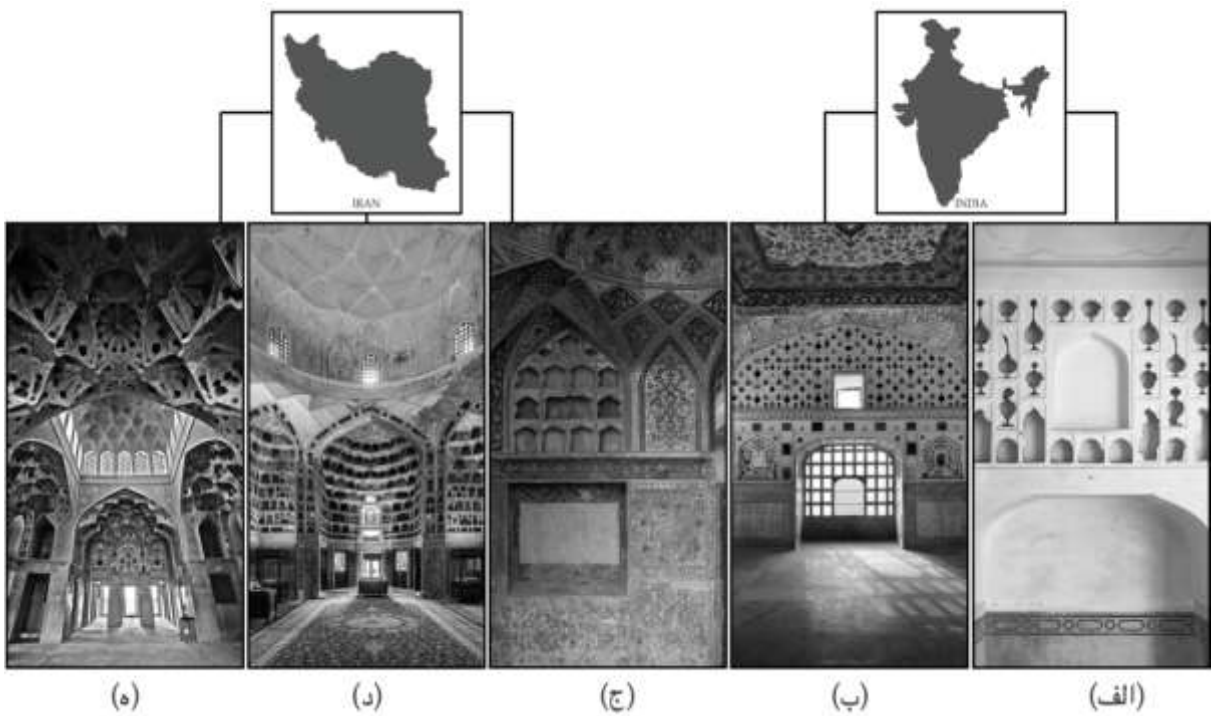
محققان معاصر بر مبنای مشاهدات میدانی یا فرهنگ شفاهی مردم، نظریه‌های مختلفی در مورد ویژگی‌های آکوستیکی و استفاده از تزئینات تنگ‌بری در چینی‌خانه یا تالار موسیقی عالی قاپو ارائه کرده‌اند؛ همانند اوجنیو گالدیری معمار ایتالیایی که مرمت بناهای مهمی‌در ایران مانند کاخ‌های صفوی عالی قاپو، هشت بهشت و چهلستون و همچنین مسجد جامع اصفهان را رهبری کرد، بر طبق تجربیات معمارانه‌اش مبنی بر روش‌های اصلاح آکوستیکی، بر این عقیده بود

که این مجموعه متعدد نیم طاق‌های کوچک، استالاکتیت‌ها[۲] و تزئینات ناهموار سقف و دیوارها در چینی‌خانه عالی قاپو می‌تواند به عنوان فضای بسته‌ای عمل کند که عملکردهای آکوستیکی مطلوبی را ارائه می‌دهد [۴]. آندره گدار از آن به عنوان "تالار چینی" یاد می‌کرد و مانند هیلن‌براند معتقد بود که سطوح گچی برش‌خورده، محلی برای قرار گرفتن جام‌ها و ظروف چینی بوده است [۲۴]. همچنین بابایی و کنبی معتقدند که آکوستیک مطلوب چینی‌خانه کاخ عالی قاپو مربوط به همین اشکال برش‌خورده بر سطوح گچی سقف‌ها، طاق‌ها و دیواره‌ها است [۱۴، ۲۵].

به طور خلاصه، در حالی که نظریه‌های علمی متفاوتی در مورد ماهیت این تالارها و تزئینات داخلی آن‌ها وجود دارد، شواهد نشان می‌دهد، کاربرد روش تنگ‌بری‌های متراکم در فضای داخلی همانطور که در شکل ۲ قابل مشاهده است، از سنت نمایش ظروف و جام‌های چینی سرچشمه می‌گیرد، بعداً به دلیل ماهیت و فرم خاصش، توانسته در فضای بسته ویژگی‌های آکوستیکی مناسبی نشان دهد.

## ۲-۳. رویکردهای میان رشته‌ای برای درک تنگ‌بری

مرور پژوهش‌های مرتبط با تزئینات تنگ‌بری در این مقاله، از تحلیل تطبیقی رزوی که سیر تکامل




شکل ۲. تصاویری از تالار چینی‌خانه و فضای داخلی مزین به تزئینات تنگ‌بری، که تبادلات فرهنگی غنی بین ایران و هند را به نمایش می‌گذارد. (الف) قلعه عامر، راجستان، هند؛ (ب) شیش محل (کاخ آینه)، جیپور، هند؛ (ج) کوشک هشت بهشت، اصفهان، ایران؛ (د) آرامگاه شیخ صفی‌الدین، اردبیل، ایران؛ (ه) کاخ عالی قاپو، اصفهان، ایران.

چینی‌خانه را از ریشه تیموری‌اش از طریق پذیرش آن در معماری صفوی و گورکانی بررسی می‌کند، آغاز می‌شود. این پژوهش نشان می‌دهد که چگونه این فرم تزئینی به طور مشخص در زمینه‌های متفاوت فرهنگی تکامل یافته و در عین حال ویژگی‌های اساسی خود را حفظ کرده است [۲۶]. این یافته بیشتر توسط سلطانی و همکاران، که تنگ‌بری را در سه کاربرد اصلی طبقه‌بندی کردند، حمایت می‌شود که هر کدام منعکس‌کننده سازگاری‌های فرهنگی و نوآوری‌های فنی در زمینه خاص خود هستند [۲۷].

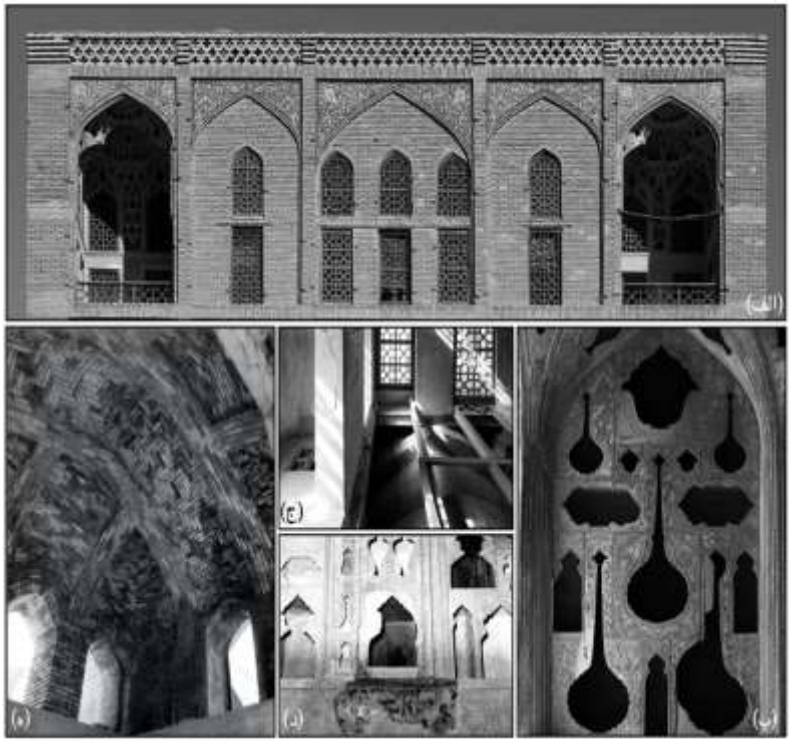
در مورد تزئینات معمارانه ایرانی و نقش دوگانه این تزئینات که فراتر از عملکرد زیبایی شناسانه‌اش می‌باشد و نوعی عملکرد ساختاری در بناها ایفا می‌کند، پژوهش‌های ارزشمندی انجام گرفته است. به عنوان مثال صارمی نائینی در مقاله‌ای این مسئله را اثبات کرده است که عناصر تزئینی کاربندی در معماری ایرانی نه تنها کاربرد زیبایی شناسانه دارد، بلکه به عنوان عناصر ساختاری باربر نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۸].

اخیراً تحقیقاتی برای روشن کردن کاربرد آکوستیکی عناصر تزئیناتی در معماری ایرانی انجام شده است. مطالعه سعادتی[۲۹] در مورد فضاهای عبادی نشان داد که ویژگی‌های تزئینی خاص، به ویژه مقرنس و یزدی‌بندی، از طریق کنترل واخنش[۳]، به طور قابل توجهی بر قابلیت فهم گفتار[۴] تأثیر می‌گذارند. مطالعه بمانیان و همکاران [۳۰] از فضاهای مشابه نشان داد که ویژگی‌های تزئینی خاص، به‌ویژه مقرنس و یزدی‌بندی، با یکنواخت‌سازی توزیع فشارصدا وایجاد میدان پخشا و از طریق کنترل واخنش به طور قابل‌توجهی بر پارامترهای آکوستیکی در مساجد با فرم‌های مختلف تأثیر می‌گذارند. بمانیان و صافی این رابطه را بیشتر مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که انتخاب دقیق مواد در طراحی مقرنس می‌تواند عملکرد آکوستیک را بهینه کند، به ویژه در سازه‌های گنبدی که مدیریت صدا در آن‌ها بسیار مهم است[۳۰، ۳۱]. پژوهش افشین مهر، غفاری و زمانی [۳۲] به ارزیابی کیفیت آکوستیک در گنبدخانه نظام‌الملک در جامع اصفهان به صورت کمی و با کمک شبیه‌سازی و محاسبات عددی پرداخته و پژوهشگران به این نتیجه رسیده‌اند که برخی پارامترهای آکوستیکی مانند زمان واخنش[۵] در این فضای محصور، نیاز به بهینه‌سازی دارند.

اما پس از بررسی برخی پژوهش‌های مهم در باب آکوستیک تزئینات معماری ایرانی و مطالعه کاربردهای آنان در فضای بسته، به بررسی پژوهش‌هایی می‌پردازیم که مستقیماً به مطالعه چینی‌خانه عالی قاپو پرداخته است که توسط آزاد، از نوعی مدل‌سازی آکوستیکی برای تحلیل تالار چینی‌خانه کاخ عالی‌قاپو استفاده کرده است. این پژوهش نشان داد که گچبری‌های برش خورده تنگ‌بری به طور مؤثر زمان واخنش را کاهش می‌دهند و شرایط آکوستیکی مناسبی را برای اجراهای موسیقیایی و سخنرانی‌های محدود برخلاف رویدادهای ارکسترال در مقیاس بزرگ ایجاد می‌کنند [۳۳]. کار اخیر اسدی و شکوهی [۳۴] اثرات آکوستیک تزئینات معماری ایرانی را بررسی کرده و ارتباط بین تزئینات سنتی و قابلیت فهم گفتار و موسیقی را در چینی‌خانه یا همان تالار موسیقی کاخ عالی‌قاپو برقرار کرده است. یافته‌های مذکور مکمل مطالعات بین‌المللی تطبیقی بناهای تاریخی اروپایی، مانند مطالعه کراوس و همکاران [۳۵] از مرکز اپرای مارگراویال در بایرویت و تحلیل فراتونی و همکاران [۳۶] از فضاهای اجرای

موسیقیایی دوره رنسانس است که نشان می‌دهد چگونه طراحی معماری از طریق پیکربندی‌های هندسی دقیق، عملکرد آکوستیکی را بهینه کرده است. علاوه بر این، چیابورو و همکاران [۳۷] از طریق مقایسه علمی خود با اودئون‌های رومی، بینش‌های ارزشمندی ارائه دادند و نشان دادند که چگونه فرم سقف و حجم فضای معمارانه از انواع خاصی از اجراهای موسیقیایی در سازه‌های باستانی پشتیبانی می‌کنند. علیرغم مشارکت‌های قابل توجه در این زمینه، چندین شکاف مهم در مطالعه آکوستیک تنگ‌بری باقی مانده است. اول، تحلیل کمی جامع با استفاده از پروتکل‌های اندازه‌گیری استاندارد در دوره‌های مختلف معماری وجود ندارد [۳۸، ۳۹]. دوم، مستندات فنی در زمینه‌های روش‌های ساخت و خواص مواد به‌کار رفته کافی نیست و درک محدودی از چگونگی تأثیر مرمت بر عملکرد آکوستیک وجود دارد. سوم، چارچوب‌های نظری به ویژه در مورد رابطه بین فرم و عملکرد آکوستیک به اندازه کافی یکپارچه نیستند. این مطالعه تلاش می‌کند تا با رویکردی میان‌رشته‌ای، ضمن اذعان به محدودیت‌های تحلیل معاصر در مورد فضاهای تاریخی اصلاح شده، به این شکاف‌ها بپردازد.

یک چالش روش‌شناختی قابل توجه، از وضعیت فعلی اتاق ناشی می‌شود که به دلیل قرن‌ها تغییرات، مرمت‌ها و اصلاحات متعدد، ساختار و سطوح مؤثر این تالار امروزه تفاوت قابل توجهی با وضعیت تاریخی و اصیل آن در دوره صفوی دارد. به دلیل پیروی کامل عملکرد



شکل ۳. این تصاویر بخشی از مرمت معاصر تالارهای کاخ عالی قاپو با تاکید بر عناصر طاقی و تزئینات تنگ‌بری به عنوان پوشش‌های اولیه و ثانویه را نشان می‌دهند. تصویر (الف) نمای بیرونی تالار چینی‌خانه را از جهت غربی نشان می‌دهد، در حالی که تصاویر (ه) و (ج) مرمت ساختاری تالارها را نشان می‌دهند. تصاویر (د) و (ب) بر تزئینات تنگ‌بری در طول فرآیند مرمت تمرکز دارند.

آکوستیکی یک فضای داخلی از ویژگی‌های مادی فضا، عواملی چون تغییرات در کلیات یا جزئیات تزئینات و مواد مختلف به کار رفته، از طریق چرخه‌های متعدد نوسازی و مرمت، به طور قابل توجهی بر خواص آکوستیکی فضای چینی‌خانه عالی قاپو تأثیر گذاشته است که تصاویری از مرمت‌های ساختاری و پوششی در شکل۳ قابل مشاهده است. بنابراین، شبیه‌سازی‌های آکوستیک معاصر ممکن است به طور دقیق ویژگی‌های صوتی اصلی تالار و اتاق‌ها را نشان ندهند. در حالی که سابقاً مطالعات میدانی آکوستیکی توسط خسرو مولانا [۴۰] و محمدی بینش‌های ارزشمندی را بر اساس شرایط فعلی ارائه می‌دهند[۴۱]، یافته‌های آن‌ها باید در این زمینه از روند تکاملی معماری بنا تفسیر شود.

### ۲-۴. ادغام تحقیقات آکوستیک در میراث فرهنگی

اهمیت باستان‌شناسی این پژوهش فراتر از تحلیل معماری سنتی است و یکی از اولین مطالعات جامع خواص آکوستیک در معماری تاریخی ایران با استفاده از رویکردهای روش‌شناختی مدرن را نشان می‌دهد. علیرغم محدودیت‌های اعمال شده بر آزمایش فیزیکی در اماکن تاریخی ایران، این مطالعه با توسعه مبحثی در باب عملکرد آکوستیکی فضای محصور به ناهمواری‌های مجوف در مقیاس محدود، چارچوبی پیشگامانه برای درک روابط معماری-آکوستیک در بناهای تاریخی ایران ایجاد می‌کند.

پژوهش در مسئله آکوستیک چینی‌خانه کاخ عالی‌قاپو به عنوان یک مطالعه موردی ارزشمند در باستان‌شناسی آکوستیک، حوزه‌ای نسبتاً جدید که باستان‌شناسی و علم آکوستیک را به هم پیوند می‌دهد، عمل می‌کند. این تحقیق نشان می‌دهد که چگونه معماران تاریخی ایرانی به طور بالقوه ملاحظات آکوستیکی را در طرح‌های معماری خود ادغام کرده‌اند و این دیدگاه مرسوم را که عناصر تزئیناتی صرفاً اهداف زینتی دارند، به چالش می‌کشند. یافته‌های این مطالعه به طور قابل توجهی به رشد روزافزون تحقیقات باستان‌شناسی آکوستیک کمک می‌کند و نشان می‌دهد که معماران در پهنه وسیع معماری ایرانی درک پیچیده‌ای از اصول بهینه‌سازی صوتی در فضای معمارانه داشتند، حتی اگر این دانش تجربی باشد نه نظری.

ارزش باستان‌شناسی این تحقیق به ویژه در سه جنبه کلیدی قابل توجه است. اول، این مطالعه مستندات دقیقی از ویژگی‌های آکوستیک در معماری تاریخی ایران ارائه می‌دهد که به حفظ میراث فرهنگی ناملموس مرتبط با آکوستیک معماری کمک می‌کند. دوم، این مطالعه یک چارچوب روش‌شناختی جدید برای بررسی فضاهای آکوستیک تاریخی در زمینه‌هایی که آزمایش مستقیم محدود است، معرفی می‌کند و مدلی برای تحقیقات آینده در شرایط مشابه ارائه می‌دهد. سوم، این تحقیق درک ما از پیچیدگی تکنولوژیکی معماری تاریخی ایران را افزایش می‌دهد و بینش‌هایی در مورد ماهیت چندمنظوره عناصر معماری که قبلاً صرفاً تزئینی در نظر گرفته می‌شدند، ارائه می‌دهد (شکل ۳). این تحقیق بر نیاز فوری به توجه بیشتر به مطالعات باستان‌شناسی-آکوستیک در میراث معماری ایران تأکید می‌کند. رویکرد روش‌شناختی توسعه‌یافته در اینجا باید به سایر اماکن تاریخی گسترش یابد و به طور بالقوه الگوهایی را در طراحی آکوستیک در دوره‌ها و مناطق مختلف معماری ایران آشکار کند. یافته‌ها نشان

می‌دهد که درک ویژگی‌های آکوستیک فضاهای تاریخی هم برای تلاش‌های حفاظتی و هم برای کاربردهای معماری معاصر بسیار مهم است.

جهت‌گیری‌های تحقیقاتی آینده باید بر گسترش روش‌شناسی به سایر اماکن تاریخی ایران [۴۲]، توسعه روش‌های آزمایش غیرمخرب سازگار با الزامات حفاظت، ایجاد یک پایگاه داده جامع از ویژگی‌های آکوستیک در معماری تاریخی ایران و ادغام ملاحظات باستان‌شناسی-آکوستیک در پروژه‌های حفاظت و مرمت متمرکز شود. این مطالعه به شیوه‌های معماری مدرن نیز گسترش می‌یابد و نشان می‌دهد که چگونه راه‌حل‌های آکوستیک تاریخی می‌توانند بر طراحی معمارانه امروز تأثیر بگذارند؛ ازین‌رو باید در بین معماران، باستان‌شناسان و مهندسان آکوستیک توسعه یابد تا بتواند اندکی از شکاف بین حفاظت از بناهای تاریخی و نوآوری در معماری مدرن را پر کند. همچنین این پژوهش، علیرغم محدودیت‌های نظارتی در آزمایش فیزیکی، پایه‌ای برای مطالعات باستان‌شناسی-آکوستیک آینده در ایران و زمینه‌های مشابه ایجاد می‌کند و ارزش رویکردهای میان‌رشته‌ای را در درک و حفظ میراث معماری نشان می‌دهد و به موازات آن بینش‌هایی عملی برای راه‌حل‌های طراحی آکوستیک معاصر ارائه می‌دهد.

## ۳. از تزئینات تا کارکرد: تکامل تنگ‌بری

این فصل به بررسی تحولات پیچیده و توسعه تزئینات تنگ‌بری می‌پردازد و اهمیت آن را در بناهای برجسته‌ای مانند کاخ‌های صفوی عالی قاپو و هشت بهشت برجسته می‌کند و نقش آن را در پیوند دادن بیان هنری با عملکرد صوتی و سازه‌ای بررسی می‌کند.

### ۳-۱. تنگ‌بری در معماری صفوی

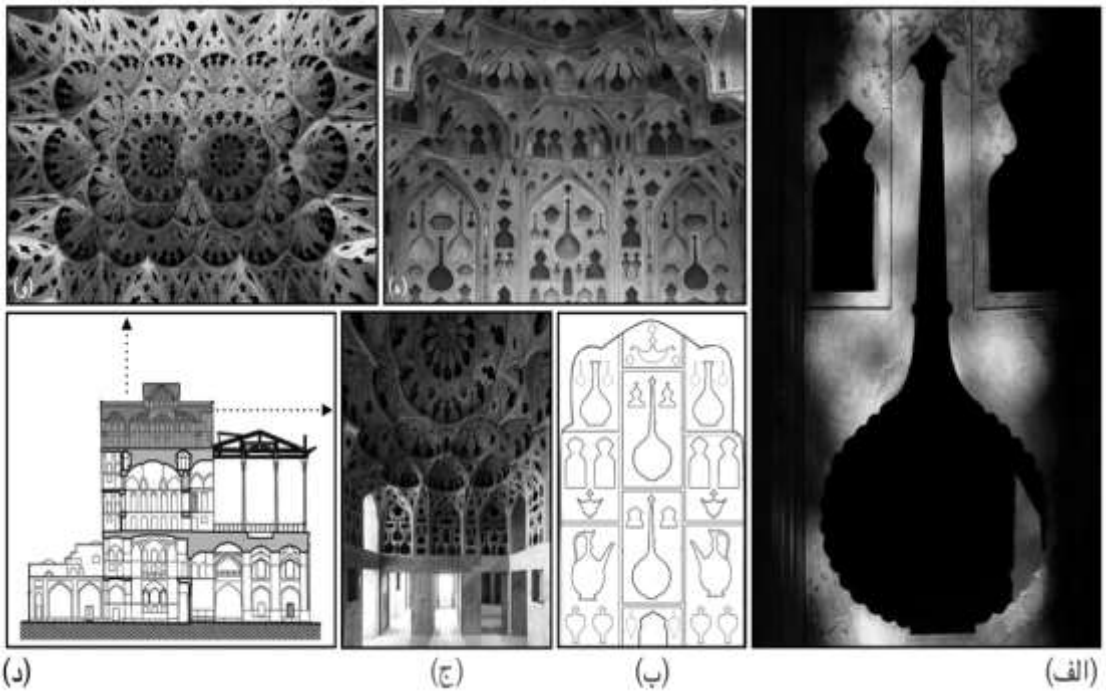
**کاخ عالی قاپو**: کاخ عالی قاپو به عنوان یک شاهکار معماری در اصفهان، قرن‌هاست که در شکوهی بی‌مانند در حاشیه غربی میدان نقش جهان پابرجاست که در ابتدا به عنوان ورودی مجموعه کاخ سلطنتی و دولتخانه صفوی عمل می‌کرده و از طریق توسعه و اصلاحات متوالی در طول یک قرن، به یک برج شش طبقه با پیچیدگی معمارانه قابل توجهی تبدیل شده است [۴۳]. با توجه به شکل ۴، طبقه بالایی کاخ یا چینی‌خانه آن ( که معاصراً به تالار موسیقی هم مشهور گشته) دارای یک تالار مرکزی صلیبی شکل است که از طریق درگاه‌های متعدد با اتاق‌های جانبی مرتبط است. طاق‌های تالار، مقرنس‌های بسیار پیچیده و منحصر بفردی را به نمایش می‌گذارند که با الگوهای تزئینی رسمی‌بندی که سطوح مقعر آن‌ها را زینت می‌دهند، تکمیل می‌شوند. تالار مرکزی توسط یک طاق مرتفع با روزنه‌های مشبک بین ستون‌های نگهدارنده‌اش به نوعی تاج‌گذاری شده است[۱۵]. ویژگی متمایز تالار، تزئینات گچبری برش‌خورده آن است که شامل فرورفتگی‌های توخالی است که در وهله اول برای قرارگیری و نمایش ظروف شراب و صراحی‌ها بکار می‌رود و البته با فرم‌های تزئینی منقوش شده است. اگرچه عملکردهای آکوستیکی این تزئینات هنوز ناشناخته مانده است، هندسه‌های توخالی این تزئینات و البته تراکم بالای تنگ‌بری‌ها در چینی‌خانه عالی‌قاپو، ذاتاً پتانسیلی برای کاربردهای چند منظوره را نشان می‌دهد.

**کوشک هشت بهشت**: هشت بهشت نمایانگر یک دستاورد برجسته در معماری کاخ‌های صفوی است. این کاخ که در دوران سلطنت شاه عباس دوم آغاز و در

سال ۱۶۶۹ در زمان شاه سلیمان صفوی تکمیل شد، تحسین ناظران معاصر اروپایی، از جمله ژان شاردن را برانگیخت که آن را برتر از معماری کاخ‌های معاصر اروپایی می‌دانستند [۶]. این سازه هشت ضلعی شامل دو طبقه است که طبقه بالا با ترکیبی پیچیده از راهروها، اتاق‌ها، طاق‌ها و پنجره‌ها متمایز می‌شود.

تزئینات تنگ‌بری طبقه دوم شباهت‌های چشمگیری با تزئینات چینی‌خانه یا تالار موسیقی عالی قاپو دارد که نمونه‌ای از تکامل ظریف این تکنیک تزئینی است. با این حال، اصلاحات بعدی در دوران قاجار، به ویژه در دوران فتحعلی‌شاه (۱۸۳۴-۱۷۹۷)، در حالی که به منظور بهبود انجام گرفته بودند، مسلماً از یکپارچگی ممکن است از آنچه امروز باقی مانده است، بیشتر باشد و متاسفانه تغییرات قابل توجهی در طول مداخلات قاجاری رخ داده است. تنگ‌بری‌هایی با کاربردهای تزئینی مشابهی نیز در کاخ چهلستون اصفهان دیده می‌شود، اگرچه در درجه اول به جای اهداف کاربردی، از ویژگی‌های زیبایی‌شناختی آن پیروی می‌کنند [۴۳].

**آرامگاه شیخ صفی‌الدین اردبیلی**: مجموعه خانقاه و آرامگاه شیخ صفی‌الدین در اردبیل، دستاورد معماری قابل توجهی از دوران صفویه را نشان می‌دهد. چینی‌خانه این مجموعه، مجموعه‌ای استثنایی از ظروف چینی امپراتوری چین [۴۴] را در خود جای داده بود که بسیاری از قطعات آن دارای کتیبه‌های تقدیمی‌به




شکل ۴. بخش شرقی-غربی کاخ عالی‌قاپو، که محل چینی‌خانه (د، ج، و، ه) را مشخص می‌کند و نمایی از فضای داخلی تالار را ارائه می‌دهد. این شکل همچنین نقوش عناصر تزئینی تنگ‌بری صفوی را نمایش می‌دهد که دارای فرم و مقیاس متمایزی هستند. ( الف و ب)

تزئینی اصلی ساختار فضا کاستند. شواهد تاریخی نشان می‌دهد که تراکم اولیه تزئینات تنگ‌بری در طبقه دوم مقبره شیخ صفی‌الدین بودند. فضای داخلی دارای یک طرح تزئینی پیچیده است که کاشی‌کاری تا ارتفاع دو

متر را با تزئینات تنگ‌بری که تا سقف امتداد یافته‌اند و منقش به طرح‌ها و رنگ‌های دوره صفوی هستند، ترکیب می‌کند (شکل‌های ۲-د و ۵-د).

**خانه‌های ارمنی جلفا**: محله ارمنی نشین اصفهان، کاربردهای مسکونی متمایزی از تنگ‌بری را ارائه می‌دهد. نمونه‌های قابل توجه، از جمله خانه‌های مارتا پیترز و خواجه پطروس (که به دوران صفویه برمی‌گردند)، اجرای عمدتاً زیبایی‌شناختی این عناصر معماری را نشان می‌دهند که با سایر ویژگی‌های تزئینی مانند لایه‌چینی، آینه‌کاری، طلاچسبانی و نقاشی‌های دیواری [۴۵] ادغام شده‌اند. در بعضی از این آثار صفوی، نمونه‌هایی از تنگ‌بری دیده می‌شوند که با لایه‌ای از سطح گچی سوراخ‌دار پوشیده شده‌اند که عملاً در تضاد با پیاده‌سازی‌های عملکردی مشاهده شده در سازه‌هایی مانند چینی‌خانه‌های آرامگاه شیخ صفی‌الدین و کاخ عالی قاپو است.

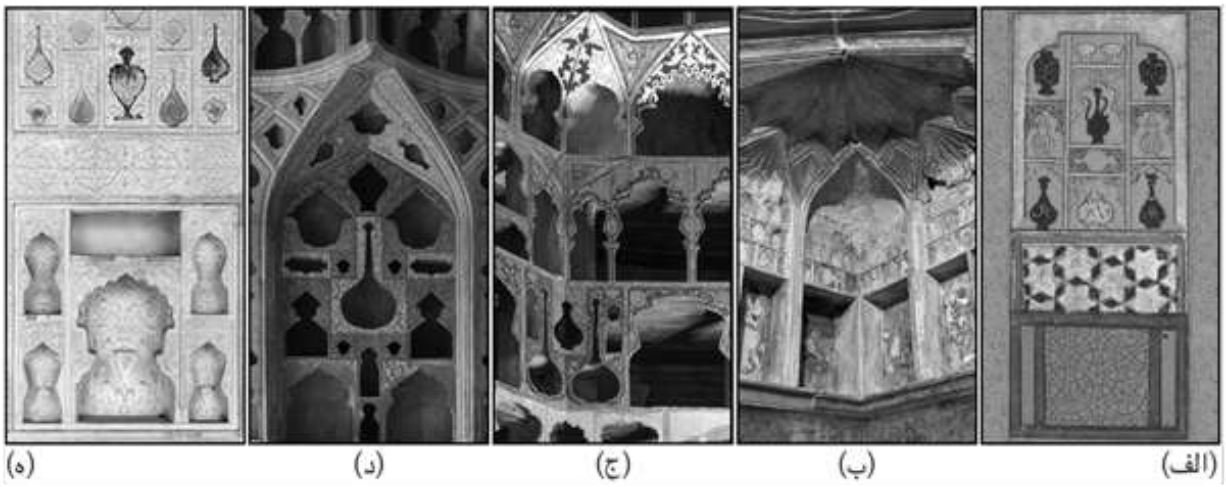
### ۳-۲ .تنگ‌بری در معماری گورکانی

با توجه به شکل ۵ شواهد تاریخی نشان می‌دهد که تبار معمارانه تنگ‌بری به پیش از سلسله مظفریان (۱۳۱۴-۱۳۹۳) [۴۶] و دوران تیموریان در ایران برمی‌گردد. در دوران صفویه، این روش تزئینی دستخوش اصلاحات و تکامل قابل توجهی شد و به دلیل تبادلات فرهنگی قوی بین ایران و شبه قاره هند به معماری گورکانی راه پیدا کرد؛ البته لازم به ذکر است که در این دوره تبادلات هنری و فرهنگی قابل توجهی بین این دو سنت معماری کهن بوجود آمد که تکنیک تنگ‌بری بخش کوچکی از آن به شمار می‌رود [۴۷].

در معماری گورکانی، با وجود بدعت‌هایی در فرم و ساختار تکنیک تنگ‌بری ایرانی، نام آن هم عمدتاً به عنوان سبک "چینی‌خانه" در معماری گورکانی و بین معماران آن سرزمین تجلی یافت و در طیف متنوعی از سازه‌های یادبودی و معماری کاخ‌ها به کار رفت. پیاده‌سازی‌های قابل توجهی از این تکنیک را می‌توان در چندین اثر معماری مهم در شبه قاره هند مشاهده کرد، از جمله جهانگیر محل (ارگ جهانگیر) در اورچها، مجموعه‌های دیوان عام و شاه برج در قلعه آگرا، لعل قلعه (قلعه سرخ) در دهلی، سوخ نیواس در قلعه امبر و مقبره بی‌بی کا در اورنگ آباد.

## ۴. روش‌شناسی

پس از بررسی جامع تکامل تاریخی و توسعه کاربردهای عناصر تزئینی تنگ‌بری، این مطالعه از آزمایش‌های تجربی برای انجام یک تحلیل مقایسه‌ای استفاده می‌کند که تأثیر این عناصر را در یک فضای بسته با تمرکز ویژه بر نقش آن‌ها در تسهیل انتشار در یک محفظه بسته مقیاس‌بندی‌شده بررسی می‌کند.




شکل ۵. سیر تکامل عناصر تزئینی چندمنظوره تنگ بری در بسترهای تاریخی و جغرافیایی بر مبنای آثار موجود: نگاره مربوط به دوره تیموری(۱۴۸۶ میلادی) (الف)، آرامگاه ستی فاطمه خاتون در یزد (ب)، مجموعه شیخ صفی الدین اردبیلی در اردبیل (ج)، کاخ عالی قاپو در اصفهان (د)، سوخ نیواس در راجستان هند(ه)

این امر امکان ارزیابی قابلیت‌های تضعیف صدا در محفظه بسته را در دو حالت مختلف، که در زیر توضیح داده خواهد شد، و همچنین یک تحلیل مقایسه‌ای از رفتار آکوستیکی آن‌ها ارائه می‌دهد.

### ۴-۱. پیکربندی و ابزار دقیق تجربی

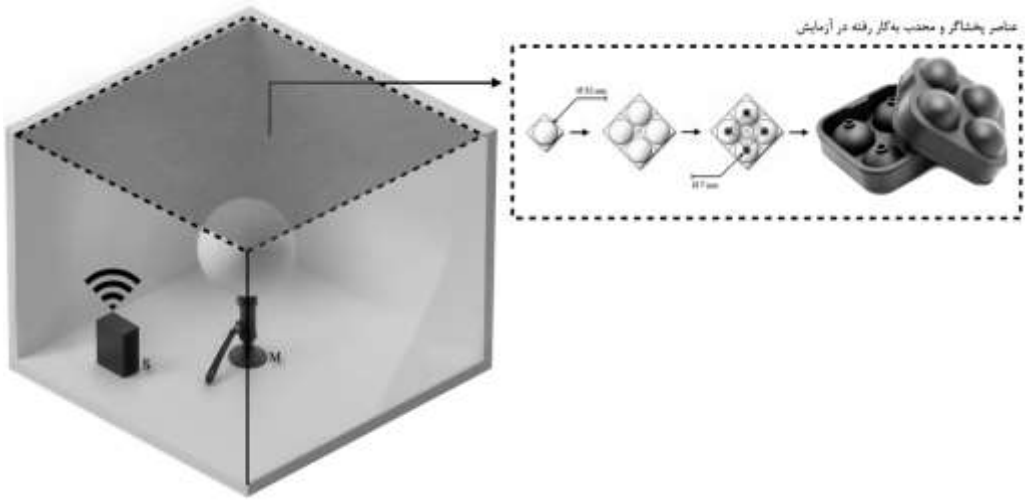
شکل ۶ شماتیکی از چیدمان آرایه میکروفون مورد استفاده برای ثبت ویژگی‌های آکوستیکی محفظه را نشان می‌دهد. این مرحله یک چارچوب تجربی با کنترل دقیق را اجرا می‌کند که برای تعیین کمیت خواص آکوستیکی عناصر تنگ‌بری طراحی شده است. یک محفظه مکعبی اختصاصی با ابعاد ۴۰ × ۵۰ × ۴۰ سانتی‌متر ساخته شد که از پنل‌های آلومینیومی با ضخامت ۵ سانتی‌متر که با مواد آکوستیکی پوشش داده شده بودند، استفاده می‌کرد. این طرح شامل یک روزنه متحرک برای اتصال و انفصال عناصر آکوستیک بود، با کنترل‌های محیطی که دمای پایدار ۲۰ درجه سانتیگراد (±۱ درجه سانتیگراد) و رطوبت نسبی ۴۵٪ (±۵٪) را حفظ می‌کردند.

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، عملیات تست آکوستیک شامل آرایه‌ای از ۲۰۰ تشدیدگر کروی می‌باشد که هر کدام با دقت مهندسی شده و دارای مشخصات قطر کره ۳۵ میلی‌متر ± ۰/۱ میلی‌متر، ضخامت دیواره ۲ میلی‌متر ± ۰/۰۵ میلی‌متر، قطر روزنه ۷ میلی‌متر ± ۰/۰۵ میلی‌متر و از جنس پلی‌اتیلن با چگالی بالا[۶] (HDPE) بودند. تشدیدگرها در پیکربندی مربعی فشرده چیده شده بودند تا پوشش سطحی را به حداکثر برسانند و در عین حال فاصله بین عناصر ثابت را حفظ کنند و امکان بررسی رفتار تشدیدگرهای منفرد و اثرات آرایه جمعی را فراهم کنند. اندازه‌گیری‌های آکوستیک با استفاده از یک بلندگوی کالیبره شده‌ی همه‌جهته B&O Beosound A1-2nd Genبه عنوان منبع صدا انجام شد که یک موج سینوسی لگاریتمی از ۲۰۰ هرتز

تا ۲۰ کیلوهرتز را به مدت ۱۰ ثانیه با دامنه‌ی میانگین ۶ دسی‌بل منتشر می‌کرد. ضبط صدا با استفاده از یک میکروفون دلوار[۷] Blue Snowball Studio به عنوان سیستم اصلی و یک میکروفون سوپرکاردیوئیدی MKE 600 Sennheiser به عنوان گزینه‌ی ثانویه، که هر دو در فاصله‌ی ۲۵ سانتی‌متری از منبع صدا در یک پیکربندی سه‌گانه قرار داشتند، تسهیل شد. کالیبراسیون، نرمال‌سازی مسیر سیگنال را با واریانس ۱ دسی‌بل تضمین می‌کرد.

پروتکل جمع‌آوری داده‌ها شامل سه تکرار اندازه‌گیری در هر پیکربندی بود که هر جلسه ضبط شامل یک موج صوتی ۱۰ ثانیه‌ای و به دنبال آن یک ضبط تضعیف ۱۰ ثانیه‌ای با نرخ نمونه‌برداری ۴۴/۱ کیلوهرتز بود. نظارت مداوم بر شرایط محیطی، از جمله دما و رطوبت، در کنار کالیبراسیون منظم تجهیزات برای کنترل کیفیت انجام شد. لازم به ذکر است که روش سینوسی لگاریتمی به کار رفته در این آزمایش (۲۰۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز) یک روش آزمایش آکوستیک معاصر را نشان می‌دهد که اگرچه جامع است، اما ممکن است دقیقاً منعکس‌کننده ویژگی‌های تُنال سازهای تاریخی ایرانی از دوران صفویه نباشد. تحقیقات موسیقی‌شناسی قومی(اتنوموزیکولوژی)[۸] و آکوستیک نشان می‌دهد که سازهای زهی سنتی ایرانی مانند تار، سه‌تار، سنتور و کمانچه که با سیم‌های روده‌ای یا ابریشمی‌ساخته شده‌اند، مانند سازهای مورد استفاده در دوره صفویه، معمولاً فرکانس‌های پایه [۴۸] را با یک پوشش طیفی تولید می‌کنند که با افت اولیه (واپاشی) سریع‌تر در مقایسه با همتایان مدرن زهی فلزی‌شان مشخص می‌شود.

در حالی که تجزیه و تحلیل‌های جامع آکوستیک از سازهای حفظ شده دوران صفویه محدود است، مطالعات تطبیقی سازهای تاریخی زهی اروپایی نشان می‌دهد که عموماً اوتار قدیمی انرژی کم‌تری نسبت به معادل‌های مدرن زهی فلزی خود تولید می‌کنند [۴۹]. علیرغم این محدودیت روش‌شناختی، مطالعه حاضر از یک رویکرد استاندارد اندازه‌گیری آکوستیک استفاده




شکل ۶. شماتیک محفظه تست و محل قرارگیری عناصر پخش‌کننده محدب حفره‌دار در سقف محفظه به همراه ویژگی‌های ساختاری عناصر؛ همچنین در سمت چپ تصویر، موقعیت‌های میکروفون (M) و منبع صدا(S) درون محفظه بسته مشخص شده است.

می‌کند که امکان ارزیابی سیستماتیک آکوستیک معماری را فراهم می‌کند، با هدف اصلی بررسی چگونگی تأثیر تزئینات هندسی حفره‌دار بر ویژگی‌های میدان صدا در فضاهای محصور. تحقیقات آینده که شامل بازسازی‌های معتبر سازهایی با سیم‌هایی با ویژگی‌های ساختاری کهن باشد، داده‌های مکمل ارزشمندی را برای اصلاح بیشتر درک ما از منظر صوتی تاریخی فراهم می‌کند.

**۴-۲. استانداردها و مقررات قابل اجرا**

رعایت استانداردهای اندازه‌گیری آکوستیک برای قابلیت اطمینان و اعتبار نتایج آزمایش امری حیاتی است. در ادامه استانداردهای مربوطه که روش ما را هدایت می‌کنند، ذکر می شوند.

• ISO 3382-1:2009 (Acoustics - Measurement of Room Acoustic Parameters)

•ASTM E1050 (Standard Test Method for Impulse Response and Sound Absorption Measurements)

• IEC 61672-1:2013 (Electroacoustics - Sound Level Meters - Part 1: Specifications)

**۴-۲-۱. کالیبراسیون و اعتبارسنجی تجهیزات**

یک پروتکل کالیبراسیون و اعتبارسنجی دقیق برای اطمینان از قابلیت اطمینان و دقت اندازه‌گیری‌های صوتی اجرا شد. مراحل کالیبراسیون شامل واسنجی میکروفون بود که در آن هر میکروفون با یک کالیبراتور سطح صدای نوع ۱ تا ۹۴ دسی‌بل در ۱ کیلوهرتز کالیبره شد و خوانش‌های دقیقی را در سراسر محدوده فرکانس تضمین کرد. کالیبراسیون منبع صدا نیز انجام شد، به طوری که منبع صدای همه‌جهته (Bang & Olufsen Beosound A1-2nd Gen) برای خروجی ثابت کالیبره شد و یک میکروفون مرجع برای حفظ سطوح در محدوده ±۰/۵ دسی‌بل قرار داده شد. علاوه بر این، کالیبراسیون سیستم اندازه‌گیری بر روی کل سیستم، شامل آرایه میکروفون و سیستم جمع‌آوری داده، برای جلوگیری از اعوجاج مسیر سیگنال انجام شد و پاسخ فرکانسی تا ۲۰ کیلوهرتز تأیید شد.

روش‌های تأیید شامل مقایسه بین تجهیزات بود، که در آن چندین میکروفون در یک مکان برای مقایسه خروجی‌ها قرار گرفتند و قابلیت اطمینان را از طریق خوانش‌های ثابت تأیید کردند. اعتبارسنجی متقابل نیز اجرا شد و نتایج حاصل از تنظیمات آزمایشی با یک سیستم اندازه‌گیری مستقل اعتبارسنجی متقابل شد تا از دقت پارامترهای صوتی اطمینان حاصل شود.

**۴-۳. روش و متدولوژی آزمایش**

نتایج حاصل از تحلیل آکوستیک، تأثیر قابل توجه پیکربندی‌های هندسی، به ویژه از طریق گنجاندن عناصر کروی حفره‌دار محدب، بر رفتار آکوستیک محفظه‌های آلومینیومی‌را برجسته می‌کند (شکل ۶). پارامترهای آکوستیک اولیه مورد تجزیه و تحلیل در این مطالعه - حداکثر زمان دامنه[۹]، حداکثر دامنه [۱۰،۱۱] ، دامنه RMS، عبور از صفر[۱۲] و زمان سکوت[۱۳] - تفاوت‌های قابل توجهی را بین دو پیکربندی آزمایش شده نشان می‌دهند: پیکربندی مرجع بدون عناصر اصلاح آکوستیکی، که از این پس به عنوان حالت ۱ نامیده می‌شود، و یک پیکربندی اصلاح آکوستیکی که شامل تشدیدگرهای مجوف و کروی و دارای حفره است، که از این پس به عنوان حالت۲ نامیده می‌شود.

معیارهای آکوستیک اولیه اندازه‌گیری شده در این مطالعه شامل پاسخ فرکانسی از ۲۰۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز، نسبت به پارامترهای آکوستیکی مذکور می‌باشد. ضبط‌های صوتی خام با استفاده از اسکریپت‌های پایتون اختصاصی برای استخراج پارامترهای آکوستیک مربوطه پردازش شدند. ماژول scipy.io.wavfileخواندن فایل‌های صوتی wav. را تسهیل کرد و امکان استخراج نرخ نمونه و آرایه‌های داده‌های سیگنال را فراهم نمود.

این مطالعه چندین پیشرفت روش‌شناختی، از جمله توسعه پروتکل‌های آزمایش آکوستیک غیرمخرب سازگار با الزامات حفاظت از میراث تاریخی، ایجاد رویه‌های استاندارد برای بحث در مورد آکوستیک تاریخی و پیاده‌سازی چارچوب‌های تجربی قابل تکرار برای مطالعات آکوستیک معماری را معرفی می‌کند. این ساده‌سازی‌ها به دلیل محدودیت‌های عملی، الزامات نگهداری و ماهیت اکتشافی این تحقیق ضروری بودند. اگرچه آنها برون‌یابی مستقیم را به رفتار آکوستیک دقیق فضای تاریخی محدود می‌کنند، با این وجود بینش‌های ارزشمندی در مورد اصول آکوستیک در حال کار ارائه می‌دهند و پایه‌ای برای تحقیقات آینده با رویکردهای مدل‌سازی پیچیده‌تر ایجاد می‌کنند.

## ۵. یافته‌های پژوهش و بحث

### ۵-۱. ارائه یافته‌ها

تحلیل آکوستیک مقایسه‌ای بین دو پیکربندی محفظه (حالت ۱: بدون اصلاح آکوستیک، حالت ۲: با اصلاح آکوستیکی عناصر کروی مجوف) تفاوت‌های قابل توجهی را در پارامترهای مختلف آکوستیک نشان می‌دهد (جدول ۲). این تفاوت‌ها تأثیر عمیق پیکربندی‌های هندسی بر رفتار آکوستیک در محفظه‌های آلومینیومی، به ویژه هنگام ترکیب عناصر پخش‌کننده با طراحی استراتژیک، را برجسته می‌کند.

جدول ۱. تحلیل مقایسه‌ای پارامترهای آکوستیک برای محفظه‌های آلومینیومیبا و بدون عملیات آکوستیک .

| پارامتر آکوستیکی | حالت ۱ (بدون اصلاح آکوستیکی) | حالت ۲ (با اصلاح آکوستیکی) | تفاوت (%) |
|---|---|---|---|
| حداکثر دامنه (mV) | ۰/۹ | ۰/۶۳ | -۳۰/۰۰ |
| حداکثر زمان دامنه (ms) | ۱۱/۷۹ | ۹/۵۷ | -۱۸/۸۳ |
| RMSدامنه | ۰/۰۰۸ | ۰/۰۴ | -۵۰/۰۰ |
| گذر از صفر | ۴۶۸۲ | ۳۵۴۹ | -۲۴/۲۱ |
| زمان سکوت (ms) | ۱/۸۱ | ۰/۳۶ | -۷۹/۹۳ |

حداکثر دامنه و دامنه RMS: کاهش قابل توجه در حداکثر دامنه (۳۰٪) و دامنه[۱۴] RMS 50 ٪ مشاهده شده در حالت ۲ را می‌توان به اثرات انتشار و پراکندگی ناشی از عناصر کروی مجوف و محدب نسبت داد. این

ویژگی‌های هندسی، انتشار مستقیم امواج صوتی را مختل می‌کنند و منجر به توزیع یکنواخت‌تر انرژی آکوستیک در سراسر فضای محصور می‌شوند [۵۰]. در نتیجه، این تضعیف دامنه، یک محیط آکوستیک بهبود یافته را نشان می‌دهد که وضوح صدا را بهبود می‌بخشد و رزونانس‌های نامطلوب را کاهش می‌دهد، که به ویژه در محیط‌های موسیقی که غنای تُن و ظرافت مورد نظر است، مفید است. حداکثر زمان دامنه: کاهش ۱۸/۸۳ درصدی در حداکثر زمان دامنه، از ۱۱/۷۹ میلی‌ثانیه در حالت ۱ به ۹/۵۷ میلی‌ثانیه در حالت ۲، نشان می‌دهد که امواج صوتی در پیکربندی دوم، تعامل مؤثرتری با اصلاح آکوستیکی دارند. این زمان رسیدن زودتر حداکثر دامنه نشان می‌دهد که عناصر کروی مجوف حفره‌دار، زمان پاسخ سریع‌تری را تسهیل می‌کنند و به طور بالقوه تجربه شنیداری سریع‌تر و بهتری را برای شنوندگان فراهم می‌کنند که عاملی حیاتی در اجراهای موسیقی است.

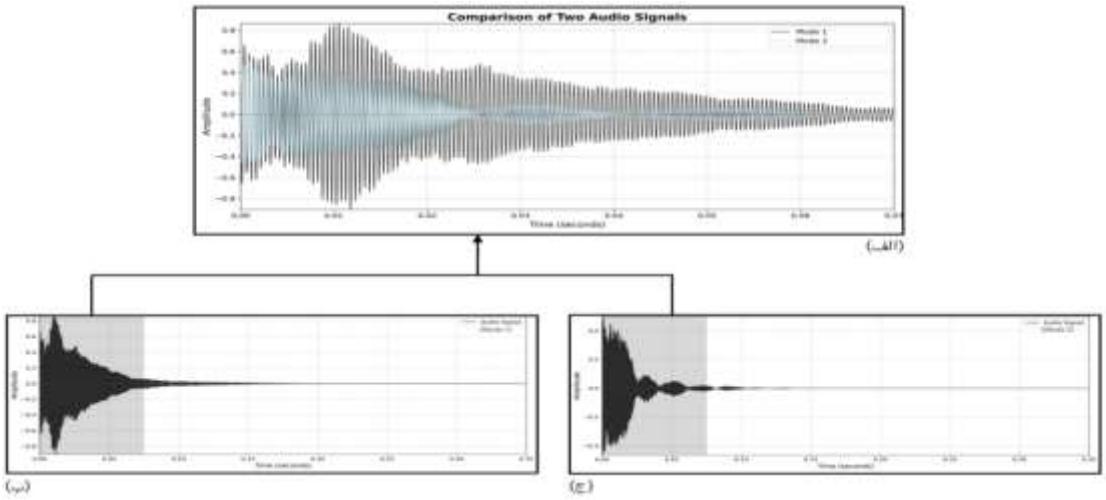
گذر از صفر[۱۵]: کاهش تعداد گذر از صفر از ۴۶۸۲ در حالت ۱ به ۳۵۴۹ در حالت ۲، نشان‌دهنده تغییر در ویژگی‌های شکل موج است و نشان می‌دهد که اصلاح آکوستیکی، محتوای فرکانسی امواج صوتی را تغییر می‌دهد. چنین تغییری در طیف فرکانسی ممکن است به صدایی هماهنگ‌تر و متعادل‌تر منجر شود که با اصول طراحی آکوستیک با هدف دستیابی به یک تجربه شنیداری مطلوب در زمینه‌های موسیقی مطابقت دارد.

زمان سکوت[۱۶]: کاهش ۷۹/۹۳ درصدی در زمان سکوت، از ۱/۸۱ میلی‌ثانیه در حالت ۱ به ۰/۳۶ میلی‌ثانیه در حالت ۲، نشان‌دهنده‌ی کاهش سریع‌تر انرژی صوتی در محفظه‌ی تحت اصلاح است. این زمان کاهش سریع‌تر می‌تواند مستقیماً به ویژگی‌های انتشار عناصر کره‌ی حفره‌دار مرتبط باشد و اغلب در محیط‌های موسیقی مطلوب است زیرا از واخنش طولانی مدت که می‌تواند کیفیت صدا را مختل کند، جلوگیری می‌کند و وضوح و کیفیت بهتری را فراهم می‌کند.

### ۵-۲. تحلیل و بحث

مقایسه‌ی نمایش دامنه‌ی زمانی شکل ۷-الف، پاسخ دامنه را در طول زمان برای دو پیکربندی آزمایشی مقایسه می‌کند: حالت ۱ (بدون اصلاح آکوستیک) و حالت ۲ (با اصلاح آکوستیکی عناصر کروی مجوف حفره‌دار). منحنی حالت ۱ دامنه‌ی اوج بالاتر[۱۷] و زمان افت اولیه طولانی‌تر[۱۸] را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده‌ی محیط آکوستیک پایدارتر[۱۹] و واخناتر [۲۰] است. منحنی حالت ۲ دامنه‌ی اوج پایین‌تر و سرعت کاهش سریع‌تر را نشان می‌دهد که بیانگر آن است که عناصر کره‌ی حفره‌دار به طور مؤثر انرژی آکوستیک را جذب[۲۱] و پخش[۲۲] می‌کنند و منجر به زمان واخنش کوتاه‌تر می‌شوند.

شکل موج سیگنال صوتی (شکل‌های ۷- ب و ۷ -ج): این نمودارها، شکل موج‌های سیگنال‌های صوتی ضبط شده برای هر حالت را نشان می‌دهند. گذرای اولیه با دامنه بالا، سیگنال تحریک (جابجایی سینوسی لگاریتمی) اعمال شده به محفظه را نشان می‌دهد. نوسانات میرا شده بعدی مربوط به پاسخ صوتی محفظه است که دامنه‌ها با گذشت زمان کاهش می‌یابند. حداکثر دامنه بالاتر در حالت اول (حالت ۱) با پیک بالاتر مشاهده شده در مقایسه نمایش حوزه زمان همسو است که نشان دهنده تحریک صوتی شدیدتر در غیاب اصلاح صوتی است. سرعت کاهش سریع‌تر در مورد دوم (حالت ۲) با زمان واخنش کوتاه‌تر مشاهده شده در نمایش حوزه زمان سازگار است که به اثرات انتشار عناصر کروی حفره‌دار نسبت داده می‌شود.




شکل ۷. مقایسه پاسخ‌های حوزه زمان بین پیکربندی مرجع بدون پوشش (حالت ۱- ب) و پیکربندی با عناصر پوشش صوتی کروی حفره‌دار محدب (حالت ۲، ۱-ج) در محفظه محصور. پنل الف مقایسه نمایش حوزه زمان در هر دو حالت را نشان می‌دهد، در حالی که پنل‌های (ب) و (ج) نمودارهای شکل موج را برای هر پیکربندی نشان می‌دهند که به صورت بصری ویژگی حوزه زمان متمایز آن‌ها را نشان می‌دهند.

تفاوت‌های مشاهده شده در پارامترهای صوتی، مانند حداکثر دامنه، دامنه RMS، زمان حداکثر دامنه، تعداد عبور از صفر و زمان تا خاموش شدن، می‌تواند مستقیماً با رفتارهای صوتی متضاد دو پیکربندی مرتبط باشد. حالت ۱ (بدون اصلاح) دامنه‌های بالاتر، زمان‌های افت اولیه طولانی‌تر و پاسخ آکوستیک پایدارتری را نشان می‌دهد که ممکن است در برخی زمینه‌های موسیقی مطلوب باشد، اما می‌تواند منجر به رزونانس‌های نامطلوب و کیفیت صدای نامطلوب نیز شود. حالت ۲ (اصلاح با عناصر کره‌ای مجوف) دامنه‌های پایین‌تر، نرخ افت اولیه سریع‌تر و محیط آکوستیک کنترل‌شده‌تری را نشان می‌دهد که به طور بالقوه وضوح و کیفیت صدا را افزایش می‌دهد، در حالی که واخنش طولانی مدت را که می‌تواند بر غنای تُن و ظرافت در اجراهای موسیقیایی تأثیر بگذارد، کاهش می‌دهد [۵۱].

### ۵-۲-۱. ادغام اصول طراحی سنتی و معاصر

کاهش‌های مشاهده‌شده در پارامترهای آکوستیک در ابتدا نشان‌دهنده‌ی تضعیف کلی صدا است؛ با این حال، ایجاد پیچیدگی هندسی از طریق عناصر محدب و ناهموار ممکن است به بافت آکوستیک پیچیده‌تری کمک کند. الگوهای پیچیده‌ی انعکاس[۲۳] و پراکندگی[۲۴] ایجاد شده توسط این عناصر معماری، تعامل موج صوتی پیچیده‌ای ایجاد می‌کنند که به طور بالقوه بیان موسیقیایی و ظرافت شنیداری را افزایش می‌دهد [۵۲]. این تنوع آکوستیکی، به جای اینکه یک محدودیت باشد، ممکن است با ایجاد عمق و پیچیدگی در محیط صوتی، تجربه‌ی شنیداری کلی را غنی‌تر کند [۵۳].

اخیراً مطالعات متعددی پدیده‌های آکوستیک مشابهی را بررسی کرده‌اند. چابورو و همکاران [۳۷] نشان داده‌اند که چگونه اودئون‌های روم باستان از عناصر معمارانه برای بهبود انتشار صدا استفاده می‌کرد، مانند استفاده از تخته‌های مرمر، گچبری‌ها و سازه‌های ستون‌دار چند سطحی برای ایجاد سطوح پخش‌کننده‌ی صدا. به طور مشابه، آزاد و همکاران [۵۴] اثرات پخش‌کننده‌های هرمی‌و محدب را در اتاق‌های کوچک بررسی کردند و تأیید کردند که چنین

پیکربندی‌های هندسی می‌توانند با تغییر مسیر انرژی صدا، پارامترهای آکوستیک را به طور قابل توجهی تغییر دهند.

وانگ و همکاران [۵۵] در مورد پیچیدگی‌های انتشار صدا، به ویژه در فرکانس‌های پایین‌تر، بیشتر توضیح داد و تأکید کرد که اثربخشی سطوح پخش‌کننده به ویژگی‌های هندسی دقیق و قرارگیری استراتژیک بستگی دارد. این درک دقیق به ویژه برای بررسی ما در مورد آکوستیک معماری ایرانی مرتبط است.

این دیدگاه با کار اخیر اشترپی و همکاران [۵۶] همسو است که تأکید می‌کند سطوح پخش‌کننده با موقعیت استراتژیک، انعطاف‌پذیری خلاقانه‌ای را در عین حفظ عملکرد آکوستیک برای طراحان فراهم می‌کنند. به طور مشابه، مطالعه ما نشان می‌دهد که طرح‌های معماری سنتی ایرانی از طریق راه‌حل‌های متناسب با بافت و از نظر زیبایی‌شناسی یکپارچه، به بهینه‌سازی آکوستیک منجر می‌شود.

### ۵-۲-۲. ارتباط با معماری تاریخی ایرانی

یافته‌های این مطالعه با ماهیت چندمنظوره عناصر تزئینی در معماری تاریخی ایرانی همخوانی دارد. در این زمینه، ویژگی‌های تزئینی اغلب اهداف دوگانه‌ای فراتر از زیبایی‌شناسی صرف، مانند سازه‌های باربر، عایق سازی یا کمک به کنترل واکنش آکوستیک محیط‌های داخلی، را دنبال می‌کردند. در حالی که منطق خاص استفاده گسترده از «تنگ‌بری» (عناصر تزئینی مجوف برش خورده) در چینی‌خانه (تالار موسیقی) کاخ عالی‌قاپو همچنان مبهم است، اثرات آکوستیک مشاهده شده با پیچیدگی تکنولوژیکی و دانش تجربی اصول آکوستیک که توسط معماران تاریخی ایرانی نشان داده شده است، همسو است (شکل۸).

با بررسی برخی سالن‌های کنسرت و اپرای مشهور، مانند «Großer Musikvereinssaal» در وین، «Salle Pléyel» در پاریس و «Beethovenhalle» در بن، تأثیر بالقوه عناصر

شکل ۸. نوازندگانی که در فضاهایی مزین به تزئینات تنگ‌بری، موسیقی شرقی اجرا می‌کنند. (الف) نوازندگان قوالی در پاکستان به خواندن سرودهای مذهبی صوفیانه اسلامی‌مشغولند. (ب) یک هنرور تارنوازی در چینی‌خانه عالی قاپو، موسیقی سنتی ایرانی می‌نوازد. این شکل بر اهمیت تزئینات تنگ‌بری و تأثیر آن‌ها بر آکوستیک محیط‌های داخلی تأکید می‌کند و تجربه اجرای موسیقی را بهبود می‌بخشد. همچنین در بخشی از شکل، خلاصه‌ای به طور مؤثر اهمیت این تزئینات را بیان می‌کند و یافته‌های کلیدی پژوهش را برجسته می‌کند و بر تأثیر بالقوه آن‌ها بر معماری، آکوستیک و حفاظت از میراث فرهنگی تأکید دارد.

تزئینی بر انتشار و جذب آکوستیک مشخص می‌شود. «تالار بتهوون» به ویژه به خاطر نسبت بالای سطوح پخشاگر و پراکنده‌کننده‌اش شناخته شده است، که این تصور را تقویت می‌کند که برتری آکوستیک مکان‌های کلاسیک ممکن است مربوط به سطوح بسیار تزئین‌شده رایج در تالارهای قرن نوزدهم باشد [۵۷]. پیاده‌سازی استراتژیک ویژگی‌های هندسی، مانند شبکه لوزی هرمی و پخشاگرهای محدب و مجوف آکوستیکی در «تالار بتهوون»، شباهت‌هایی با اثرات انتشار مشاهده شده در چینی‌خانه عالی‌قاپو دارد، که نشان‌دهنده یک اصل اساسی مشترک در ادغام طراحی معماری و ملاحظات آکوستیک است [۵۸]. علاوه بر این، استفاده از گچ به عنوان ماده اصلی برای پوشش سقف و دیوارها در تالارهای معروف مختلف، اغلب در ترکیب با سایر مواد، با روش‌های ساخت مشاهده شده در تالار موسیقی عالی‌قاپو همسو است. کاربرد چندلایه گچ با چگالی‌ها و سطوح فشرده‌سازی متفاوت، همراه با فرآیندهای نقاشی و طلاکاری، ممکن است بر ضریب جذب سطوح تأثیر بگذارد [۵۹، ۶۰]. این امر تأثیر بالقوه علم مواد بر عملکرد آکوستیک را برجسته می‌کند و ماهیت میان‌رشته‌ای این حوزه را برجسته تر می‌کند.

## ۶ .نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی ویژگی‌های آکوستیکی تزئینات معماری ایرانی، با تمرکز ویژه بر عناصر تنگ‌بری در چینی‌خانه (تالار موسیقی) کاخ عالی‌قاپو، می‌پردازد. یافته‌های ما مهندسی آکوستیک پیچیده‌ای را که در تزئینات سنتی ایرانی تعبیه شده است، برجسته می‌کند و نشان می‌دهد که این عناصر فراتر از ارزش زیبایی‌شناختی خود، اهداف عملکردی نیز داشته‌اند. پیکربندی هندسی عناصر تنگ‌بری، بهبودهای قابل اندازه‌گیری در انتشار صدا و کنترل واخنش را فراهم می‌کند. به طور خاص، عناصر کروی حفره‌دار مجوف و محدب، که از تزئینات ایرانی الهام گرفته شده‌اند، افزایش قابل توجهی در مدولاسیون دامنه نشان می‌دهند. علاوه بر این، کاربرد لایه‌ای مواد، به ویژه تراکم‌های متنوع گچ، به شرایط آکوستیک بهینه در فضا کمک می‌کند. این یافته‌ها بر لزوم ادغام درک جامع از این ویژگی‌های معماری و پیامدهای آکوستیکی آن‌ها در روش‌های باستان‌شناسی آکوستیک در ایران تأکید می‌کند.

رویکرد تحقیقاتی ما، تحلیل تاریخی را با روش‌های مدرن اندازه‌گیری آکوستیک ترکیب می‌کند و پروتکل‌های آزمایش غیرمخرب سازگار با الزامات حفاظت از میراث فرهنگی را توسعه می‌دهد. این نوآوری روش‌شناختی، یک چارچوب تجربی قابل تکرار برای مطالعه فضاهای آکوستیک تاریخی با رعایت پروتکل‌های حفاظت ایجاد می‌کند. علیرغم محدودیت‌های آزمایش فیزیکی در اماکن تاریخی، رویکرد نوآورانه ما داده‌های علمی ارزشمندی را به همراه داشت که اولین مستندسازی از خواص آکوستیک در تزئینات معماری ایرانی را تشکیل می‌دهد.

تحلیل تطبیقی با نمونه‌های معماری آکوستیکی معاصر، مانند تالار بتهوون و تالار کنسرت باربیکن، مشابهت‌هایی را بین راه‌حل‌های آکوستیک تاریخی ایرانی و رویکردهای مهندسی مدرن نشان می‌دهد. این تحلیل نشان می‌دهد که معماران ایرانی درک تجربی از اصول آکوستیک را توسعه داده‌اند که با دانش علمی معاصر همسو است و شواهدی از مهندسی آکوستیک

در معماری دوران صفویه ارائه می‌دهد.

پیامدهای این مطالعه در حوزه‌های مختلف گسترش می‌یابد. در علوم باستان‌شناسی، تحقیقات ما چارچوب‌های روش‌شناختی جدیدی را برای بررسی فضاهای آکوستیک تاریخی معرفی می‌کند و پارامترهای قابل اندازه‌گیری را برای ارزیابی طراحی آکوستیک تاریخی تعیین می‌کند. برای حفاظت از میراث فرهنگی، یافته‌های ما استراتژی‌هایی را برای حفظ محیط‌های آکوستیک تاریخی روشن می‌کند. تلاش‌های اخیر دولت ایران برای مرمت چینی‌خانه عالی‌قاپو از تحقیقات ما سود خواهد برد، زیرا به مرمت‌گران کمک می‌کند تا خواص آکوستیک ویژگی‌های زینتی تالار، ساختار و مصالح سطحی آن را درک کنند. این درک برای مرمت‌های دقیقی که یکپارچگی آکوستیک چینی‌خانه را حفظ می‌کنند، ضروری است.

در معماری معاصر، مطالعه ما راه‌حل‌های تاریخی معتبری را ارائه می‌دهد که برای چالش‌های طراحی آکوستیک مدرن قابل اجرا هستند. این تحقیق پشتیبانی تجربی از رویکردهای معماری بایومیمتیک[۲۵] ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که چگونه عناصر معماری سنتی می‌توانند برای برآوردن نیازهای معاصر و در عین حال حفظ خواص آکوستیک خود، تطبیق داده شوند. تحقیقات آینده باید این روش‌شناسی را به سایر مکان‌های تاریخی در سراسر ایران و حوزه فرهنگی گسترده‌تر این سرزمین گسترش دهد. توسعه مدل‌های محاسباتی بیشتر برای تحلیل آکوستیک تاریخی، بینش عمیق‌تری از پدیده‌های آکوستیک به دست خواهد داد. بررسی بیشتر در مورد رابطه بین الگوهای تزئینی مختلف و پارامترهای آکوستیک خاص، درک ما از اصول طراحی را غنی‌تر می‌کند. علاوه بر این، ایجاد مستندات جامع از خواص آکوستیک در میراث معماری ایرانی برای حفظ این دانش ضروری است.

این تحقیق پایه‌ای برای درک ادغام آکوستیک در معماری تاریخی ایرانی ایجاد می‌کند و در عین حال نوآوری‌های روش‌شناختی ارزشمندی را به علم باستان‌شناسی ارائه می‌دهد. یافته‌های ما نشان می‌دهد که چگونه معماران از طریق دستکاری دقیق هندسه و مواد به ابداعات و نتایج آکوستیک قابل توجهی دست یافتند و درس‌هایی را برای حفاظت از میراث فرهنگی و طراحی معاصر ارائه می‌دهند. موفقیت رویکرد ما در غلبه بر چالش‌های روش‌شناختی ضمن تولید نتایج علمی دقیق، پتانسیل تحقیقات آینده در این زمینه را نشان می‌دهد و چارچوبی حیاتی برای درک و حفظ این جنبه مهم از میراث فرهنگی و در عین حال آگاهی‌بخشی به نوآوری‌های معماری آینده ارائه می‌دهد.

## منابع


[1] Hillenbrand, Robert. *Islamic architecture: form, function, and meaning*. Columbia University Press, 1994.

[2] Pope, A. O. "Persian architecture: The triumph of form and color. (K. Afsar, Trans.)." *Tehran: Farhangsara (Yasavoli)* (1965).

[3] Safaeianpour, Ali, and Nima Valibeig. "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* 32 (2024): e00310.

[4] Galdieri, Eugenio. *Esfahan,'Ali Qapu: An Architectural Survey*. IsMEO, 1979.

[۵] ولی بیگ، ن.، و سعادتی، ر. (۱۳۹۰). تزئینات معماری آرامگاه شیخ صفی‌الدین اردبیلی با تاکید بر آرایه‌های تنگ‌بری چینی‌خانه. مطالعات هنر اسلامی، ۷(۱۴)، ۱۱۹-۱۲۷. https://sid.ir/paper/136805/fa

[6] Chardin, John. *Sir John Chardin's Travels in Persia*. Cosimo, Inc., 2010

[۷] شاردن، ژ. (۱۳۴۶). سیاحت‌نامه شاردن، ج۸ (م. عباسی، مترجم). امیرکبیر.

[۸] سانسون، ن. (۱۳۴۶). سفرنامه سانسون (ت. تفضلی، مترجم). ابن سینا.

[9] Richards, Fred. *A Persian Journey: Being an Etcher's Impressions of the Middle East, with Forty-eight Drawings*. J. Cape, 1931.

[10] Kaempfer, Engelbert. *Amoenitatum exoticarum politico-physico-medicarum fasciculi V*. typis Henrici Wilhelmi Meyeri, 1712.

[11] Figueroa, García de Silva. *L'Ambassade de D. Garcias de Silva Figueroa en Perse*. Louis Billaine, 1667.

[12] Wright, Owen. *Music Theory in the Safavid Era: The taqsīm al-naġamāt*. Routledge, 2018.

[۱۳] بنی‌اردلان، ا.، هدایت‌زاده، ن.، و اسعدی، ه. (۱۴۰۰). نقد و بررسی رسالهٔ در معرفت موسیقی منسوب به دورهٔ صفوی: تحلیل تطبیقی در مکاتب علم موسیقی. پژوهشنامه تاریخ تمدن اسلامی، ۵۴(۲)، ۵۲۵-۵۴۵. https://doi.org/10.22059/jhic.2021.321493.654232

[14] Babayan, Kathryn, and Sussan Babaie. *Slaves of the Shah: New Elites of Safavid Iran*. IB Tauris, 2003

[15] Babaie, Sussan. *Isfahan and its Palaces: Statecraft, Shiism and the Architecture of Conviviality in Early Modern Iran*. Edinburgh University Press, 2008.

[16] O'Kane, Bernard. *Studies in Persian Architecture*. Edinburgh University Press, 2021, p.37.

[17] Carey, Moya. "The Complete Illustrated Guide to Islamic Art and Architecture." *Hermes* (2010), p. 180.

[۱۸] نوری شادمهانی، ر. (۱۳۹۸). محراب بری در نگاره‌های تیموری. https://civilica.com/doc/993087

[19] Sims, Vice-President Eleanor G. *Peerless Images: Persian Painting and Its Sources*. Yale University Press, (2002), p. 118

[20] Pope, John Alexander. "Chinese porcelains from the Ardebil shrine." Creative Media Partners, LLC. (2023).

[21] Carvalho, Pedro Moura. "Porcelains for the Shah: Ardabil and the Chinese Ceramics Trade in the Persian Gulf." *Transactions of the Oriental Ceramic Society* 66 (2002): 47.

[22] Golombek, Lisa, Robert B. Mason, and Gauvin A. Bailey. "Tamerlane's tableware: a new approach to chinoiserie ceramics of fifteenth-and sixteenth-century Iran." Mazda in association with Royal Ontario Museum, Costa Mesa, California, 1996

[۲۳] اسکندربیگ ترکمان، تاریخ عالم آرای عباسی (دوره دو جلدی)، ۱۳۹۰، نگاه.

[24] Godard, A. *The art of Iran*. Frederick A. Praeger, 1965.

[25] Canby, Sheila R. "Princes, poets & paladins: Islamic and Indian paintings from the collection of Prince and Princess Sadruddin Aga Khan." Trustees of the British Museum Press. (1998).

[26] Chida-Razvi, Mehreen. "From Function to Form: Chini-khana in Safavid and Mughal Architecture." *South Asian Studies* 35, no. 1 (2019): 82-106.

[۲۷] سلطانی، م.، سامانیان، ص.، و سلطانی، م. (۱۴۰۰). بررسی ویژگی‌ها و شیوه‌های به‌کارگیری تزئین تنگ‌بری در آثار معماری ایران صفوی و هند گورکانی. باغ نظر، ۱۸(۱۰۴)، ۱۷-۲۸.
https://doi.org/10.22034/bagh.2021.225467.4507

[28] Saremi Naeeni, Davoud, Hamid Aibaghi Esfahani, and Iman Mirshojaeian Hosseini. "Recognising Karbandi in Iran's architecture and a review of its decorative-structural role." *Iran* 56, no. 2 (2018): 173-183

[۲۹] سعادتی، س. ن. (۱۳۹۱). بررسی تأثیر اشکال مختلف سیستم‌های تزیینی ایرانی (مقرنس، شمسه، کاربندی و یزدبندی) بر وضوح گفتار بناهای مذهبی [پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده صدا و سیما.

[۳۰] سعادتی، س. ن.، بمانیان، م. ر.، و سرودلیر، ع. ر. (۱۳۹۳). بررسی تاثیر مقرنس بر آکوستیک فضای عمومی‌مسجد. در اولین کنگره بین المللی افق‌های جدید در معماری و شهرسازی، تهران. https://civilica.com/doc/380761

[31] Safi, Samira, Abbas Ghaffari, and Nariman Farahza. "The effects of muqarnas and mortar joints on the acoustic quality of the Jaame mosque of Yazd." *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics* 6, no. 1 (2020): 119-132.

[۳۲] افشین مهر وحید، غفاری عباس، زمانی ریحانه). ۱۴۰۰ .(ارزیابی کیفیت آکوستیک در گنبدخانه نظام‌الملک مسجد جامع اصفهان پژوهش‌های معماری اسلامی ۹ (۲) :۱۲۳-۱۴۰ ۹.۲.۱۲۳/jria.۱۰,۵۲۵۴۷

[33] Azad, Hassan. "Ali Qapu: Persian historical music room." *Proceedings of the Institute of Acoustics* 30, no. Pt 3 (2008).

[34] Asadi, S., and A. Shokoohi. "Acoustic investigation of architectural spaces with an emphasis on traditional architectural decorations (the case study of the sound room of Ali-Qapu Palace)." *J His Arch & Anthropol Sci* 8, no. 2 (2023): 59-67

[35] Krauss, Sebastian, Simeon Völkel, Christoph Dobner, Alexandra Völkel, and Kai Huang. "Acoustics of Margravial Opera House Bayreuth." *arXiv preprint arXiv:1905.13578* (2019).

[36] Fratoni, Giulia, Dario D'Orazio, Michele Ducceschi, and Massimo Garai. "Acoustic analysis of a well-preserved Renaissance music space: The Odeo Cornaro in Padua." *Acta Acustica* 8 (2024): 25.

[37] Ciaburro, Giuseppe, Gino Iannace, Ilaria Lombardi, and Amelia Trematerra. "Acoustic design of ancient buildings: The odea of Pompeii and Posillipo." *Buildings* 10, no. 12 (2020): 224.

[38] Abel, Jonathan S., Wieslaw Woszczyk, Doyuen Ko, Scott Levine, Jonathan Hong, Travis Skare, Michael J. Wilson, Sean Coffin, and Fernando Lopez-Lezcano. "Recreation of the acoustics of Hagia Sophia in Stanford's Bing Concert Hall for the concert performance and recording of Cappella Romana." In *International Symposium on Room Acoustics*, pp. 1-13. 2013.

[39] Pentcheva, Bissera V., and Jonathan S. Abel. "Icons of sound: auralizing the lost voice of Hagia Sophia." *Speculum* 92, no. S1 (2017): S336-S360.

[۴۰] بوبان، ب. (۱۳۸۷). مصاحبه با خسرو مولانا. مجله فرهنگ و آهنگ، امرداد و شهریور ۱۳۸۷.

[۴۱] محمدی صادق آبادی، م. (۱۳۹۴). تحلیل اندازه‌گیری زمان واخنش و نوفهٔ زمینه در اتاق موسیقی عمارت عالی‌قاپـوی اصفهان. مجله علمی‌صوت و ارتعاش، ۴(۷)، ۳۲-۳۷.

[۴۲] قلیزاده, فرزانه, غفاری, عباس و کی‌نژاد, محمدعلی . (۱۴۰۰). واکاوی شرایط آکوستیکی مساجد تاریخی تبریز از منظر گونه بندی حجمی و فرمی. مجله علمی صوت و ارتعاش ۱۰(۲۰), ۸۴-۱۰۵.

[43] Galdieri, E. (1977). Restoration of Ali Qapu, Chehel Sutun and Hasht Behesht. IsMEO - Istituto Italiano per il Medio ed Estremo Oriente, edited by Renata Holod and Darl Rastorfer, The Aga Khan Award for Architecture.

[44] Pope, J. A. (1956). Plates to Chinese porcelains from the Ardebil shrine. Washington, DC: Smithsonian Institution. Republished as Chinese porcelains from the Ardebil shrine. London/Totowa, NJ: Sotheby Parke Bernet.

[45] Ghougassian, V. S. (1998). The emergence of the Armenian Diocese of New Julfa in the seventeenth century. Scholars Press.

[46] Album, S. (1974). Power and legitimacy: The coinage of Mubāriz al-Dīn Muḥammad ibn al-Muẓaffar at Yazd and Kirmān. In Le Monde Iranien et l'Islam: Societies et Cultures II (pp. 157-171). Geneva and Paris.

[47] Rizvi, K. (2017). Affect, Emotion, and Subjectivity in Early Modern Muslim Empires: New Studies in Ottoman, Safavid, and Mughal Art and Culture. Brill.

[48] Mansour, Hossein. (2015). Modal Analysis of the Setar: A Numerical-Experimental Comparison. *Journal of Vibration and Acoustics*. 137. 10.1115/1.4030863.

[49] Fletcher, N.H., Rossing, T.D. (1998). Materials for Musical Instruments. In: The Physics of Musical Instruments. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-0-387-21603-4_22.

[50] Kuttruff, H. (2017). Room acoustics (6th ed.). CRC Press.

[۵۱] مجیدی, هانیه , فرشچی, حمیدرضا و غفاری, عباس . (۱۳۹۷). یکپارچه‌سازی طراحی پارامتریک و مهندسی آکوستیک (برای شکل دادن به سالن کنسرت). مجله علمی صوت و ارتعاش, ۷(۱۴), ۴۰-۵۶.

[۵۲] احمدی, علی . (۱۳۹۸). پارامترقدرت صدای G و اهمیت آن درطراحی و ارزیابی سالن های موسیقی. مجله علمی صوت و ارتعاش, ۸(۱۶), ۵۷-۷۱.

[53] Heller, E. J. (2013). Why You Hear What You Hear: An Experiential Approach to Sound, Music, and Psychoacoustics. Princeton University Press. pp 560-3

[54] Azad, H., Meyer, J., Siebein, G., & Lokki, T. (2019). The Effects of Adding Pyramidal and Convex Diffusers on Room Acoustic Parameters in a Small Non-Diffuse Room. Acoustics, 1(3), 618-643. https://doi.org/10.3390/acoustics1030037.

[55] Wang, S., Zhong, J., Qiu, X., & Burnett, I.S. (2020). A note on using panel diffusers to improve sound field diffusivity in reverberation rooms below 100 Hz. Applied Acoustics, 169, 107471. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107471

[56] Shtrepi, L., Di Blasio, S., & Astolfi, A. (2020). Listeners Sensitivity to Different Locations of Diffusive Surfaces in Performance Spaces: The Case of a Shoebox Concert Hall. Applied Sciences, 10(12), 4370. https://doi.org/10.3390/app10124370

[57] Barron, M. (2019). Developments in concert hall acoustics in the 1960s: Theory and practice. Acoustics, 1(3), 541. https://doi.org/10.3390/acoustics1030030

[58] Beranek, L. (2002). Concert halls and opera houses: Music, acoustics, and architecture. Springer. pp 301-4.

[59] Egan, D. (2007). Architectural acoustics. Classics (J. Ross), J. Ross Publishing classics. p 6.

[60] Long, M., & Levy, M. (2006). Application of modern acoustics. Elsevier Academic Press

## پی‌نوشت

[1] Acoustic treatment
[2] Stalactite
[3] Reverberation control
[4] Speech intelligibility
[5] Reverberation time
[6] High-density polyethylene (HDPE)
[7] Cardioid
[8] Ethnomusicology
[9] Maximum Amplitude Time
[10] Maximum Amplitude
[11] این پارامتر برابر مقدار پیکی (بالاترین نقطه) است که موج صدا به آن می‌رسد، چه مثبت و چه منفی. این مقدار نشان‌دهنده بیشترین جابجایی از موقعیت خط پایه/تعادل در طول کل مدت زمان صوت است.

[12] Zero Crossing
[13] Time to Silence
[14] RMSریشه میانگین مربعات دامنه، در آکوستیک یک روش ریاضی برای اندازه‌گیری دامنه مؤثر یا متوسط یک موج صوتی در طول زمان است. این مفهوم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا به خوبی با نحوه درک ما از بلندی صدا مرتبط است و نشان‌دهنده محتوای قدرت واقعی صدا می‌باشد.
[15] این پارامتر نشان دهنده نقاطی است که موج صدا از خط صفر (خط پایه) عبور می‌کند - انتقال از دامنه مثبت به منفی یا برعکس. عبور از صفر پارامتری قابل اهمیت است زیرا نشان دهنده تغییرات قطبیت در شکل موج هست. نرخ عبور از صفر (تعداد دفعات وقوع این پدیده) می‌تواند برای تحلیل محتوای فرکانسی صداها استفاده شود و به ویژه در پردازش گفتار و الگوریتم‌های تحلیل صدا مفید است.
[16] این پارامتر مدت زمانی را که طول می‌کشد تا یک صدا پس از شروع یا پس از رسیدن به اوج خود به هیچ (زیر یک آستانه مشخص) تقلیل یابد، اندازه‌گیری می‌کند. این پارامتر برای درک ویژگی‌های زوال صداها بسیار مهم است - به عنوان مثال، یک زنگ ممکن است به دلیل زنگ زدن مداوم، مدت زمان زیادی برای ساکت شدن داشته باشد، در حالی که ایجاد یک تک ضربه با به‌هم زدن دست، زمان بسیار کوتاهی برای ساکت شدن دارد. این مربوط به زمان واخنش است و در طراحی آکوستیک و پردازش صدا اهمیت دارد.

[17] Peak amplitude
[18] Decay time
[19] Sustain
[20] Reverberant
[21] Absorb
[22] Diffuse
[23] Reflection
[24] Scattering
[25] Biomimetics