

تحلیل تطبیقی و میان‌رشته‌ای ریخت‌شناسی و عملکرد آکوستیکی حفره‌های صوتی بر اساس مطالعه موردی یک نمونه ساز عود

محمد مهدی کرباسباف*

دانش‌آموخته دانشکده مکانیک،
دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران
karbasbaf@gmail.com

غزاله اذعان

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۸/۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

چکیده

این تحقیق از تحلیل ریخت‌شناسی تاریخی و آزمایش‌های آکوستیک کنترل‌شده برای ارزیابی تأثیر پیکربندی‌های حفره صوتی بر ویژگی‌های رزونانس سازهای لوت با گردن کوتاه استفاده می‌کند. از طریق مقایسه سیستماتیک طرح‌های تک‌حفره در مقابل سه‌حفره در سنت‌های سازهای متنوع جغرافیایی، تفاوت‌های قابل توجهی را در پارامترهای خروجی آکوستیک نشان می‌دهیم. اندازه‌گیری‌های تجربی نشان می‌دهد که پیکربندی سه‌حفره (حالت ۳) در مقایسه با پیکربندی کاملاً بسته (حالت ۱)، مقادیر دامنه ریشه میانگین مجذور $55/35\%$ بالاتر تولید می‌کند، در حالی که تفاوت بین پیکربندی سه‌حفره و تک‌حفره (حالت ۲) تقریباً 25% است. این یافته‌ها نشان‌دهنده افزایش چشمگیر انرژی متوسط ($55/35\%$ نسبت به حالت کاملاً بسته، و 25% نسبت به حالت تک‌حفره)، بهبود شاخص‌های بلندی مبتنی بر آر ام اس^۱ (RMS) و افزایش پایداری رزونانس ($12/14\%$) در طرح سه‌حفره نسبت به حالت کاملاً بسته است. بررسی ریخت‌شناسی، تکامل حفره صدا را در سنت‌های لوت خاورمیانه، اروپا و شرق آسیا ردیابی می‌کند و روندهای ثابتی را به سمت افزایش پیچیدگی روزانه در سازهای عملکردگرا آشکار می‌سازد. نتایج ما اعتبار تجربی را برای ترجیحات طراحی تاریخی ارائه می‌دهد و در عین حال معیارهایی را برای بهینه‌سازی سازهای معاصر ارائه می‌دهد. ویژگی‌های دامنه بهبود یافته و رزونانس گسترده پیکربندی‌های حفره، مزایای آشکاری را برای کاربردهایی که نیاز به محدوده دینامیکی وسیع و پخش‌تن پایدار دارند، نشان می‌دهد و پیامدهایی هم برای بازسازی سازهای تاریخی و هم برای اصول طراحی آکوستیک مدرن دارد.

کلمات کلیدی: آکوستیک موسیقی، تحلیل رزونانس، سازشناسی، ریخت‌شناسی حفره صوتی، دینامیک دامنه

۱. مقدمه

متنوع آن شده است که امروزه دیده می‌شود. حفره‌های صوتی نقش مهمی در شکل‌گیری خواص آکوستیکی سازهای لوت، به ویژه در لوت‌های گردن کوتاه^۲، ایفا

خانواده سازهای لوت^۲ از طریق مشارکت ملتها و فرهنگ‌های مختلف تکامل یافته و منجر به شکل‌های

می‌کنند. این مطالعه تأثیر طراحی حفره‌های صوتی را با تمرکز بر مساحت و محل قرارگیری آن‌ها بررسی می‌کند. با بررسی اهمیت تاریخی و بین فرهنگی تکامل حفره‌های صوتی، بینش‌های ارزشمندی در مورد توسعه این حفره‌ها در خانواده لوت گردن کوتاه به دست می‌آید. این کاوش مناطقی مانند خاورمیانه، اروپا و آسیای مرکزی و شرقی را در بر می‌گیرد که نقش مهمی در شکل‌گیری سنت‌های موسیقی مرتبط با این خانواده سازی داشته‌اند.

آزمایش‌های تجربی برای مقایسه خواص آکوستیکی لوت‌های گردن کوتاه با پیکربندی‌های مختلف حفره صوتی انجام شد. این مطالعه بر دو پیکربندی تمرکز دارد: چیدمان‌های تک‌حفره و سه‌حفره، و همچنین تأثیر آن‌ها را بر مسیرهای جریان هوا بررسی می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که پیکربندی سه‌حفره، پروفایل دامنه بالاتری تولید می‌کند که نشان‌دهنده انرژی متوسط بیشتر، شاخص‌های بلندی صدا^۴ مبتنی بر ریشه میانگین مجذور (RMS) بالاتر و رزونانس پایدارتر در مقایسه با چیدمان تک‌حفره‌ای است. دامنه دینامیکی ارائه شده توسط پیکربندی سه‌حفره برای سناریوهای موسیقی که نیاز به دامنه وسیع و سطوح شدت متغیر دارند، مانند اجراها و ضبط‌های صوتی، مفید است.

یافته‌های این مطالعه به گونه‌ای ارائه شده است که هم برای خوانندگان دانشگاهی و هم برای متخصصانی مانند پژوهشگران موسیقی قومی، نوازندگان و سازندگان ساز مفید باشد. راقم سطور قصد دارد بینش‌هایی ارزشمند و نوعی روش‌شناسی عملی برای آزمایش تجربی ارائه دهد که نه تنها برای جامعه دانشگاهی مفید باشد، بلکه گفتمان و روش‌های آکوستیک را در بین سازندگان ساز و نوازندگان نیز ارتقا دهد. این مطالعه به دنبال گسترش دانش، تشویق نوآوری و ترویج کاوش بیشتر در طراحی حفره‌های صوتی و تأثیر آن بر سازهای خانواده لوت گردن کوتاه است.

۲. مرور ادبیات

خانواده لوت با رزوناتور بیضوی شکل خود، ساختار آکوستیکی متمایزی را نشان می‌دهد. اجزای اساسی آن شامل صفحه صوتی، حفره‌های صوتی، گردن، صفحه انگشت‌گذاری، مهره، گوشی‌ها و خرکی است که به عنوان نقطه اتصال سیم‌ها عمل می‌کند و در نزدیکی انتهای پایینی صفحه صوتی قرار دارد. در حال حاضر، این خانواده از سازها به دو نوع متمایز طبقه‌بندی می‌شوند: دسته بلند و دسته کوتاه [۱]. دسته اول، که معمولاً به عنوان خانواده تنبور [۲] شناخته می‌شود، را می‌توان در متون کلاسیک و نقوش مرتبط ردیابی کرد، به طوری که هر دو نوع ساز از زمان‌های قدیم به طور مستقل در میان تمدن‌های مختلف وجود داشته‌اند، به ویژه به هزاره‌های قبل از میلاد [۳].

یکی از جنبه‌های جذاب خانواده لوت، توانایی آن در ماندگاری در طول تاریخ است، در حالی که بسیاری از سازهای باستانی دیگر در گمنامی محو شده‌اند. این دوام را می‌توان به ظرفیت چشمگیر خانواده لوت برای سازگاری با طیف متنوعی از تغییرات، ناشی از نیازهای در حال تحول سازندگان لوت و نوازندگان آن در مورد زیبایی‌شناسی، بیان هنری و پیشرفت‌های علمی نسبت داد.

چنین سازگاری، جایگاه برجسته‌ای به خانواده‌ی لوت در قلمرو موسیقی بخشیده و اهمیت پایدار آن را تثبیت کرده است. سازهای موسیقی به عنوان مصنوعات فرهنگی مهمی عمل می‌کنند که تجسم تعامل و تبادل ایده‌ها بین تمدن‌های متنوع هستند.

تکامل یک ساز، که یک اصل اساسی در مسیر توسعه‌ی آن است، به طور پیچیده‌ای با جریان‌های فرهنگی که از این تعاملات پدید می‌آیند، در هم تنیده شده است. خانواده‌ی لوت به عنوان گواهی بر این پدیده، دارای تاریخی غنی و گسترده است که قرن‌های متمادی را در بر می‌گیرد.

سیر تکاملی خانواده‌ی لوت وابسته به ریشه‌های باستانی آن است و منعکس کننده‌ی میراث پایدار این ساز است. تکامل آن در طول دوره‌های تاریخی مختلفی آشکار می‌شود و با عبور از ملت‌ها از مناطق شرقی تا غربی جهان، از مرزهای جغرافیایی فراتر می‌رود. از طریق این شبکه‌ی پیچیده‌ی تبادلات فرهنگی، خانواده‌ی لوت دستخوش تحولات تدریجی شده و نوآوری‌های هنری، زیبایی‌شناختی و فنی تمدن‌هایی را که در توسعه‌ی آن نقش داشته‌اند، تجسم می‌بخشد. شایان ذکر است که جنبه‌ای با اهمیت نسبتاً کمتر در این حوزه، مربوط به تأکید بر شناسایی طراحان و سازندگان اولیه لوت‌های اولیه و همچنین مناطق خاصی است که این سازها برای اولین بار در آنجا رواج یافتند. دلیل این امر آن است که هنگام بررسی اولین نقوش شبیه به خانواده لوت، مانند نقوش یافت شده در آلاچاهویوک^۵، برخی از نقوش، ساختار پیچیده‌ای را نشان می‌دهند که نشان‌دهنده یک تبار تاریخی عمیق‌تر است.

در حالی که ردیابی منشأ و پراکندگی لوت‌ها در میان جوامع مختلف می‌تواند بینش‌های ارزشمندی در مورد زمینه تاریخی آن‌ها ارائه دهد، ضروری است که روایت تاریخی گسترده‌تر و مسیر توسعه پیچیده این سازها را در نظر بگیریم. تمرکز صرف بر مشخص کردن طراحان اولیه یا مناطق جغرافیایی دقیق منشأ، ممکن است از تعامل پیچیده تأثیرات فرهنگی و تکامل تدریجی خانواده لوت در طول زمان غافل شود. بنابراین، برای دستیابی به درک جامعی از پیشینه تاریخی خانواده لوت، بررسی طیف وسیع‌تری از شواهد، از جمله نقوش و ساختارهای متنوع یافت شده در اکتشافات باستان‌شناسی، بسیار مهم است. چنین رویکردی، دیدگاه جامع‌تری را در مورد عمق و پیچیدگی تاریخی خانواده لوت و اهمیت آن در چارچوب وسیع‌تر تکامل سازهای موسیقی فراهم می‌کند.

۱-۲. بررسی حفره‌های صوتی: هدف و اهمیت

حفره‌های صوتی که به طور مؤثر روی صفحه صوتی سازهای زهی قرار می‌گیرند، تأثیر قابل توجهی بر تنظیم تابش آکوستیک آن‌ها دارند. نقش آن‌ها در ایجاد ارتباط حیاتی بین سیم‌های مرتعش و دینامیک داخلی رزوناتور به عنوان یک ویژگی محوری مطرح است [۴]. در حجم محدود رزوناتور یا جعبه صوتی، هوای محصور به صورت رفت و برگشتی نوسان می‌کند و از میان روزنه‌های حفره‌های صوتی عبور می‌کند و در نهایت منجر به تشکیل یک رزوناتور هلمهولتز^۶ می‌شود [۵]. این تعامل بین سیم‌های مرتعش و هوای محصور رزوناتور، که توسط حفره‌های صوتی تسهیل می‌شود، یک الگوی نوسان کنترل‌شده ایجاد می‌کند و در نتیجه خواص آکوستیک ساز را شکل می‌دهد و به کیفیت کلی^۷ آن کمک می‌کند [۶].

علاوه بر نقش آن در رابطه متقابل با مهاربندی صفحه صوتی^۸، عامل مهم دیگری که بر رفتار صفحه صوتی تأثیر می‌گذارد، مکانیسم پاسخ به طیف وسیعی از فرکانس‌ها است [۷]. این ویژگی، تغییرات مشاهده شده در سبک‌های مختلف در خانواده‌های مختلف سازهای زهی، مانند شکل گرد موجود در گیتار، شکل C که در لیرا^۹ برآچو^{۱۰} دیده می‌شود، و شکل F که معمولاً با ویولن‌ها مرتبط است [۸]، و موارد دیگر را توضیح می‌دهد. ویژگی‌های طراحی متمایز و الگوهای مهاربندی این سبک‌های ساز به‌طور خاص برای بهینه‌سازی پاسخ صفحه صوتی به فرکانس‌های خاص تنظیم شده‌اند و در نتیجه کیفیت‌های^{۱۱} تئال^{۱۲} منحصر به فرد ساز را شکل می‌دهند.

این تعامل پیچیده بین صفحه صوتی و سبک مهاربندی انتخاب‌شده به تنوع و غنای بیان در خانواده‌های مختلف سازهای زهی کمک می‌کند.

هدف اصلی این مطالعه بررسی مسیر تکاملی حفره‌های صوتی، یک ویژگی برجسته یافت‌شده در سازهای مختلف خانواده لوت، در طول تاریخ بود. در این زمینه، یک

مطالعه تکمیلی که توسط توکلی نیا و اعلم انجام شد، به طبقه‌بندی، توسعه و مکانیسم‌های آکوستیک حفره‌های ویولن در طول قرن‌ها پرداخت. این تحقیق بینش‌های ارزشمندی در مورد طراحی و عملکرد حفره‌های صوتی در دوره‌های زمانی مختلف ارائه داد و آن را به سهم قابل توجهی در این زمینه تبدیل کرد [۹،۱۰].

لاورگرن و گورنی وجود حفره‌های صوتی و اشکال هندسی روی چنگ‌های باستانی بین‌النهرین را بررسی کردند و بر روی چنگ‌های عمودی به تصویر کشیده شده در نقش برجسته‌های کاخ آشور تمرکز کردند. آن‌ها مستطیل‌های مقعر را که گمان می‌رود نشان‌دهنده حفره‌های صوتی هستند، شناسایی کردند و تفاوت‌های موجود در ساخت چنگ‌های کاخ شمالی آشوربانیپال را مورد بحث قرار دادند. عدم وجود علائم مشابه روی چنگ‌های مصری نیز مورد توجه قرار گرفت. این مقاله نشان می‌دهد که تحقیقات بیشتری برای تعیین اینکه آیا چنگ‌های افقی دارای ویژگی‌های مشابهی هستند یا خیر، مورد نیاز است. این یافته‌ها به درک سازهای موسیقی باستانی بین‌النهرین و اصطلاحات آن‌ها کمک می‌کند [۱۱].

پولیتزر نقش حفره‌های صوتی در سازهای موسیقی را در دانشگاه کلتک بررسی کرد و مدل رزوناتور هلمهولتز را تأیید کرد. این مطالعه تأثیر حفره‌های صوتی متعدد، رابطه بین جریان هوای حفره‌های صوتی و طراحی ساز، و هندسه حفره‌های صوتی در بانجوه‌های رزوناتور را بررسی کرد. این مقاله همچنین فرضیاتی را در محاسبات جریان سیال مورد بحث قرار داد و قیاس‌هایی را با الکترواستاتیک ترسیم کرد. در مجموع، این مطالعه بر رفتار حفره‌های صوتی و ارتباط آن با دینامیک سیالات و الکترومغناطیس تأکید کرد [۱۲]. سیلوستری و راوینا یک بررسی تجربی و ویبروآکوستیک روی دو ویولا دا گامبا، یک ویول باستانی و یک ویول مدرن انجام دادند. با وجود زیبایی‌شناسی مشابه، این سازها در راه‌حل‌های ساخت،

از جمله وجود یک بیس بار^{۱۰} و ساوند پست (پایه صوتی)^{۱۱} و شکل پشت ساز، متفاوت بودند. این مطالعه با هدف آنالیز پاسخ ساختاری و آکوستیک سازها انجام شد و مشخص شد که ویژگی‌های پشت ساز به طور قابل توجهی بر رفتار ارتعاشی تأثیر می‌گذارد، در حالی که وجود میله باس و پایه صوتی تأثیرات قابل توجهی بر دینامیک و عملکرد آکوستیک ساز دارد. این تحقیق به درک تأثیر تفاوت‌های ساختاری بر خواص ویبروآکوستیک سازهای زهی کمک می‌کند [۱۳]. ویژگی‌های ارتعاشی صفحه صوتی یک ساز موسیقی تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله جنس، شکل و ضخامت صفحه صوتی، اندازه و محل قرارگیری حفره‌های صوتی و مشخصات رزوناتورها قرار دارد. این اجزای به هم پیوسته باید به طور منطقی طراحی و انتخاب شوند تا عملکرد آکوستیک ساز بهینه شود. در طول تاریخ، تکامل آن‌ها با هدف دستیابی به ارتباط و هم‌افزایی مؤثر، با هدف دستیابی به تعالی آکوستیک و بیان موسیقایی، انجام شده است.

اگرچه سازهای چوبی، سیستم‌های پویایی با تغییرات در چگالی بافت، ناهمسانگردی و میزان رطوبت هستند، اما شرایط خاصی می‌تواند انتخاب اجزای خاص، مانند حفره‌های صوتی، را به سمت ایده‌آل‌تر و مناسب‌تر شدن هدایت کند. به عنوان مثال، هنگام بررسی تأثیر مساحت یا شکل یک حفره صوتی، می‌توان با در نظر گرفتن اثرات تجمعی همه اجزای درون رزوناتور ساز، پیش‌بینی‌ها یا نظریه‌هایی را تدوین کرد.

علاوه بر این، سازهای چوبی، به دلیل عواملی مانند چگالی بافت، ناهمسانگردی و میزان رطوبت [۱۴]، تنوع و پویایی بالایی را نشان می‌دهند [۱۵]. با این وجود، می‌توان شرایط خاصی را شناسایی کرد که تحت آن‌ها انتخاب اجزای منفرد می‌تواند به شیوه‌ای ایده‌آل‌تر و مناسب‌تر بهینه شود [۱۶]. با در نظر گرفتن دقیق این عوامل و تأثیر متقابل آن‌ها، سازندگان ساز می‌توانند برای

دستیابی به ویژگی‌های صوتی و کیفیت‌های عملکردی مطلوب در طراحی و ساخت سازهای چوبی تلاش کنند. در یک تحقیق علمی که بر بهینه‌سازی حفره‌های صوتی خانواده لوت [۱۷] متمرکز بود، یک روش جدید برای تعیین مساحت بهینه حفره صوتی بیضی شکل اولیه نسبت به شکل و مختصات صفحه صوتی ساز معرفی شد. این تحقیق یک رویکرد تحلیلی جدید به نام روش طلایی را شرح می‌دهد که با الهام از سبک لوت‌ها، به دنبال بهبود ابعاد و موقعیت حفره‌های صوتی است. هدف اصلی این رویکرد، افزایش ویژگی‌های میرایی صوتی در سازها با استفاده از اصول نسبت طلایی و هندسه ساز است. با گنجاندن این اصول طراحی، هدف، افزایش ویژگی‌های ارکسترال سازها و در نتیجه بهینه‌سازی عملکرد صوتی کلی آن‌ها است.

این مطالعات سهم چشمگیری در این زمینه دارند، زیرا در میان تعداد محدودی از انتشارات سال‌های اخیر قرار دارند که به شناخت و بهینه‌سازی حفره‌های صوتی لوت پرداخته‌اند. با این حال، باید اذعان کرد که تلاش‌های علمی بیشتری برای بررسی عمیق‌تر طراحی اجزای سازهای زهی مورد نیاز است. کاوش در مورد حفره‌های صوتی در لوت و سایر حوزه‌های مطالعاتی مرتبط، مستلزم تحقیقات و فعالیت‌های علمی مداوم برای گسترش درک ما و اصلاح رویکردهایمان در این حوزه است. چنین تلاش‌های علمی نه تنها دانش ما را پیش می‌برد، بلکه توسعه تکنیک‌ها و روش‌های نوآورانه برای بهینه‌سازی ویژگی‌های آکوستیک و عملکرد سازهای زهی را نیز تسهیل می‌کند.

۳. تاریخچه توسعه حفره‌های صوتی در خانواده

لوت

لوت‌ها به عنوان یکی از قدیمی‌ترین میراث‌های فرهنگی بشریت، از اهمیت تاریخی برجسته‌ای برخوردارند. بقایای این سازهای باستانی در اشکال مختلف، مانند مجسمه‌ها و نقاشی‌ها، بینش‌های ارزشمندی از وجود آن‌ها در

تمدن‌های باستانی ارائه می‌دهند. لوت‌های دسته کوتاه از قرن ۵ تا ۶ میلادی برجسته بوده‌اند، اما شیوع آن‌ها در بقایای باستان‌شناسی در طول تاریخ کاهش یافته است. با این حال، آنالیز آثار هنری باستانی، سوابق مهمی از دانش بشر در مورد مکانیک سازهای موسیقی را نشان می‌دهد. این اکتشافات، تمدن‌هایی مانند مصر، ایلامی‌ها، بین‌النهرین و آسیای مرکزی را در بر می‌گیرد و مستندات



شکل ۱. عود ایرانی که بر پایه یک کاسه نقره‌ای ساسانی به تصویر کشیده شده است، که به آن «چهار نوازنده» می‌گویند و اصالت آن به کلاردشت ایران، در قرن ششم میلادی برمی‌گردد.

تاریخی از رابطه پایدار بین انسان‌ها و لوت‌ها را بیش از ۴۵۰۰ سال پیش ارائه می‌دهد.

بررسی تاریخچه حفره‌های صوتی در لوت با یک نقش برجسته کشف شده در آلاچاهویوک، ترکیه آغاز می‌شود که قدمت آن به تمدن باستانی هیتی (۱۶۰۰-۱۱۷۸ پیش از میلاد) برمی‌گردد. این طرح، حفره‌های صوتی دایره‌ای شکل را نشان می‌دهد که در کناره‌های ساز، همراه با سیم‌ها قرار گرفته‌اند.

اگرچه این طرح، شواهدی از وجود حفره‌های صوتی در لوت در آن دوران ارائه می‌دهد، اما اعتقاد بر این است که تمدن‌های باستانی از قبل از مکانیسم‌های حفره صوتی و اهمیت آن‌ها در بهبود کیفیت صوتی لوت آگاه بوده‌اند. این نشان دهنده درک عمیق از اصول آکوستیک در دوران باستان است. شواهدی از وجود حفره‌های صوتی لوت را می‌توان در تمدن‌های باستانی مختلف، به ویژه در آسیای مرکزی و قرون اولیه میلادی، یافت.

تکامل طراحی حفره صوتی، از جمله شکل، اندازه و محل قرارگیری، به طور گسترده، به ویژه در خانواده سازهای لوت، بررسی شده است. این توسعه تدریجی، نقطه عطفی حیاتی در درک زیبایی‌شناسی و عملکرد حفره‌های صوتی در طول تاریخ است. بخش مربوط به شرق آسیا، بیشتر به این جنبه‌ها خواهد پرداخت.

۳-۱. تکامل حفره‌های صوتی لوت در خاورمیانه و جنوب آسیا

خاورمیانه، که به عنوان منطقه جغرافیایی شامل غرب آسیا، از ایران تا مصر، تعریف می‌شود، به دلیل اهمیت تاریخی و فرهنگی غنی خود شناخته شده است. در حالی که بخش عمده‌ای از قلمرو مصر در شمال آفریقا قرار دارد، معمولاً در طبقه‌بندی خاورمیانه گنجانده می‌شود. این منطقه باستانی به عنوان پیشگام در توسعه اجتماعی و فرهنگی، جایگاه برجسته‌ای دارد. ریشه‌های تاریخی خاورمیانه را می‌توان به هزاره چهارم قبل از میلاد، که در درجه اول با سومری‌ها مرتبط است، ردیابی کرد. با این حال، یافته‌های باستان‌شناسی در چغا میش، یک سکونتگاه مس سنگی در غرب ایران، تمدنی حتی باستانی‌تر (حدود ۶۰۰۰-۵۶۰۰ قبل از میلاد) [۱۸] را که پیش از سومری‌ها و همچنین عصر برنز و آهن پس از آن قدمت دارد، آشکار کرده است. نکته برجسته این است که برخی از قدیمی‌ترین تصاویر باقی مانده از رابطه پیچیده بین انسان‌ها و سازهای موسیقی، به ویژه خانواده لوت، از این منطقه سرچشمه می‌گیرند. خاورمیانه جایگاه ویژه‌ای در حوزه سازهای لوت دارد، جایی که خانواده لوت معمولاً با نام عود (u d) شناخته می‌شود. عود دارای ارزش فرهنگی عمیقی است که در فرهنگ‌های متنوع و نسل‌های متوالی در خاورمیانه گسترش یافته است. این ساز به عنوان میراثی گرمی، در آزمون زمان مقاومت کرده و در فراز و نشیب تمدن‌های باستانی دوام آورده و قرن‌ها تغییرات دگرگون‌کننده، رویدادهای تاریخی مهم و حتی درگیری‌های پرآشوب را تحمل کرده است.

گفتمان علمی در مورد سازهای موسیقی در خاورمیانه فراتر از بررسی ریشه‌های تاریخی آن‌ها است. این گفتمان بر تنوع چشمگیر گونه‌های سازهای زهی در منطقه تمرکز دارد. تعامل بین انسان‌ها و سازهای زهی به هزاره‌های چهارم و سوم قبل از میلاد بازمی‌گردد، با تأکید بر تمدن‌های پیش از ایلامی در شوش و چغا میش، و همچنین تمدن اوروک در جنوب بین‌النهرین و مناطق اطراف آن، که خاستگاه‌های مهم سازهای زهی محسوب می‌شوند. هزاره دوم پیش از میلاد، به ویژه حدود ۳۸۰۰ سال پیش، برای مطالعه چشم‌انداز موسیقی خاورمیانه مورد توجه است. نقش برجسته‌هایی که نوازندگان تنبور را در ایلام، سومر و اکد به تصویر می‌کشند، نشان می‌دهند که نوازندگان ایلامی در ایران در مقایسه با هم‌تایان خود در بین‌النهرین و مصر، تنوع بیشتری از سازهای زهی داشته‌اند. این امر سهم چشمگیر تمدن ایلامی در ایران را در توسعه و تکثیر سازهای زهی متنوع در آن دوره برجسته می‌کند. شناخت وسعت تنوع سازهای زهی، بینش‌های ارزشمندی در مورد تعامل فرهنگی، انتقال دانش موسیقی و تکامل سنت‌های موسیقی در خاورمیانه، به ویژه ایران باستان، ارائه می‌دهد. شکل ۱.

تنوع خانواده‌های سازهای موسیقی در سراسر ملت‌ها منجر به توسعه و تکامل سازها در پاسخ به خواسته‌های اجتماعی شده است.

پیشرفت‌ها در شکل رزوناتور یا جعبه صوتی، سوالاتی را در مورد اینکه کدام تمدن پیشرفت‌های هندسی پیشرفته‌تری ارائه داده است، مطرح کرده و توسعه سازها را به جلو سوق داده است. علاوه بر این، توسعه سونوریت^{۱۲} تحت تأثیر عواملی مانند هدف ساز، آب و هوا، پیشینه فرهنگی و تأثیرات اجتماعی و روانی قرار دارد. این تحولات در زمانی رخ می‌دهد که انسان‌ها در حال برقراری ارتباط عمیق‌تر با طبیعت هستند. حفره‌های صوتی در سازهای موسیقی هم از نظر زیبایی‌شناسی و

هم از نظر عملکردی اهمیت دارند. در طول تاریخ، انسان‌ها به طور گسترده با سازها تعامل داشته‌اند و به دنبال همسو کردن آن‌ها با خواسته‌های خود بوده‌اند. این خواسته‌های در حال تکامل، که توسط هر دوره و تمدن شکل می‌گیرند، تکامل مداوم سازهای موسیقی را هدایت می‌کنند. با گذشت زمان، عودها دستخوش یک تحول علمی و فلسفی می‌شوند و فراتر از ارتباط اولیه خود با طبقات اجتماعی یا آیین‌های مذهبی حرکت می‌کنند تا در بین عموم مردم محبوبیت پیدا کنند.

این تغییر منجر به گسترش نواها و آهنگ‌های موسیقایی شد و تبادل و انتشار فرهنگی را ترویج داد. همگرایی موسیقی خاورمیانه، به ویژه در امپراتوری‌های باستانی ایران، با فلسفه و علم موسیقی در یونان باستان منجر به پیشرفت‌های چشمگیری شد. به طرز شگفت‌آوری، حتی در دوران حکومت مسلمانان در قرن هفتم میلادی، توسعه چشمگیری رخ داد که به عنوان عصر طلایی توسعه ساز عود در خاورمیانه و جهان شناخته می‌شود. در این دوران، عودها به فرمی جامع توسعه یافته و ارائه شدند و شکل فیزیکی و جنبه‌های مکانیکی آن‌ها برای پیشبرد فرم و عملکرد موسیقی در نظر گرفته شد.

فرهنگ عمیق الهیاتی نوازندگان مسلمان با عودها ادغام عمیقی داشت و ارتباطی پایدار ایجاد کرد. امروزه آوای عود به عنوان یک زبان جهانی درک می‌شود و گواهی بر اهمیت و تأثیر پایدار این میراث باستانی موسیقی است. در این دوره، به ویژه پس از قرن ششم، نوازندگان برجسته‌ای در پادشاهی‌های مختلف ظهور کردند. در پادشاهی ساسانی ایران، موسیقی‌دانانی مانند باربد به شهرت رسیدند، در حالی که در پادشاهی عربی-اسلامی، چهره‌هایی مانند ابراهیم موصلی، پسرش اسحاق و ابوالحسن علی بن نافع، معروف به زریاب [۱۹]، سهم قابل توجهی داشتند. همزمان، فیلسوفانی مانند الکندی (حدود ۸۰۰-۸۷۰ میلادی)، که اولین حکیم مسلمان بود که بینش‌های دقیقی در مورد ساخت عود ارائه داد [۲۰]،

و همچنین ابونصر فارابی (حدود ۸۷۲-۹۵۰) و ابن سینا (حدود ۹۷۰-۱۰۳۷)، با الهام از دانش علمی یونانی از طریق جنبش ترجمه یونانی-عربی [۲۱]، شروع به تحلیل سیستم‌های موسیقی مبتنی بر سازهایی مانند عود کردند. این توسعه‌ی مترقی را می‌توان به ادغام تمدن‌ها، تعاملات و انتقال قدرت و فرهنگ بین ملت‌ها نسبت داد که توسط گسترش حکومت‌های عربی تسهیل شد. گسترش دولت اسلامی (از ۶۲۲ تا ۷۵۰ میلادی) به عنوان حلقه‌ی ارتباطی بین شرق و غرب عمل کرد و تبدلات فرهنگی بین ملت‌ها و تمدن‌ها را تقویت نمود.

این تعاملات که از قرن هفتم به بعد رخ داد، به توسعه‌ی عناصر فرهنگی، از جمله سازهای موسیقی، مطابق با نیازهای اجتماعی آن زمان کمک کرد. سازهای مشتق شده از شکل تکامل یافته‌ی عود، که در نهایت خود را به عنوان عود استاندارد تثبیت کردند [۲۲]، از جنبه‌های مختلفی تنوع نشان دادند. این تفاوت‌ها شامل تعداد سیم‌ها، ابعاد رزوناتور، ضخامت صفحه صوتی، دامنه صوتی تولید شده و همچنین تعداد و پیکربندی حفره‌های صوتی می‌شد. نکته برجسته این است که این تمایزات حتی در میان کشورهای خاورمیانه با پیشینه‌های فرهنگی مشابه نیز پابرجاست. خانواده سازهای لوت، که با نام "عود" هم شناخته می‌شوند، در کشورهای اسلامی و غیراسلامی بسیار مورد توجه هستند.

این ساز حضور قابل توجهی در مناطقی از جمله ایران، سوریه، مصر، ترکیه، یونان و ارمنستان دارد. عود جایگاه محوری در فرهنگ موسیقی کشورهای مختلف در کشورهای عربی خلیج فارس دارد و بر اهمیت آن به عنوان یک عنصر حیاتی در میراث موسیقی آن‌ها تأکید می‌کند. عود در سنت‌های موسیقی عربی و ترکی برجسته است. عودهای عربی معمولاً از خرک تا دسته ۶۱ تا ۶۲ سانتی‌متر اندازه دارند، در حالی که عودهای ترکی کمی کوچک‌تر هستند و از ۵۸ تا ۵۹ سانتی‌متر متغیرند. تفاوت

قابل توجهی در ضخامت صفحه صوتی وجود دارد، به طوری که عودهای عربی در مقایسه با عودهای ترکی صفحه صوتی نازک‌تری دارند.

همچنین تغییرات کوک وجود دارد، به طوری که عودهای ترکی معمولاً یک تُن کامل بالاتر از عودهای عربی کوک می‌شوند. در نتیجه، عودهای ترکی کیفیت صوتی روشن‌تری تولید می‌کنند که به ویژگی‌های تُنال متمایز مرتبط با هر سبک منطقه‌ای کمک می‌کند.

سبک عراقی عود عربی معاصر بسیار برجسته است و نوآوری‌های قابل توجهی توسط محمد فاضل حسین، سازنده ساز، معرفی شده است. این سبک دستخوش تحول قابل توجهی شد، از جمله اجرای طرح پل شناور که یادآور ماندولین^{۱۳} است. حفره‌های صوتی به شکل بیضی و بدون رُزت^{۱۴} تغییر یافتند. منیر بشیر، نوازنده آشوری عراقی تأثیرگذار، نقش مهمی در محبوبیت و رسمیت بخشیدن به این سبک جدید در جامعه موسیقی عرب ایفا کرد. سبک عود عراقی به طور گسترده مورد توجه قرار گرفت و همچنان توسط سازندگان ساز در سراسر جهان ساخته می‌شود. معرفی طراحی جدید خرک، وضوح و تیزی صوتی عود را بهبود بخشید و به اجراهای تک‌نوازی و بداهه‌نوازی در موسیقی سنتی عربی و خاورمیانه کمک کرد. نوازندگان برجسته عود، مانند عمر بشیر و نصیر شمه، به طور فعال با سبک عراقی درگیر می‌شوند و قابلیت‌ها و بیان هنری عود را بیش از پیش ارتقا می‌دهند. این نشان دهنده یک تلاش موفق در هنر معاصر خاورمیانه است. پیکربندی حفره‌های صوتی یک ویژگی متمایز در میان عودها است. لوت‌های اروپایی معمولاً دارای یک طراحی تک‌حفره استاندارد هستند، در حالی که عودهای عربی و خاورمیانه‌ای تنوع بیشتری را نشان می‌دهند.

تعداد و سبک حفره‌های صوتی در عودها موضوع بحث‌های مداوم است و سازندگان عود در منطقه ممکن است سبک‌های فردی را اتخاذ کنند. در عودها، حفره‌های

صوتی معمولاً روی صفحه صوتی قرار می‌گیرند و می‌توانند دو شکل اصلی داشته باشند. سبک تک‌حفره دارای یک حفره اصلی در زیر سیم‌ها است که اغلب با عناصر تزئینی مانند «شمسه» [۲۳] که در عودهای عربی یافت می‌شود، تزئین شده است.

علاوه بر سبک تک‌حفره، سبک سه‌حفره یکی دیگر از پیکربندی‌های رایج حفره‌های صوتی در عود است. این سبک شامل یک حفره اصلی و دو حفره کوچک‌تر در دو طرف سیم‌ها است. اندازه این حفره‌ها ممکن است متفاوت باشد، به طوری که حفره اصلی معمولاً تقریباً ۲/۵ برابر بزرگ‌تر از حفره‌های کوچک‌تر است. برای حفره‌های صوتی در هر دو سبک تک‌حفره و سه‌حفره، از هر دو شکل دایره‌ای و بیضی استفاده می‌شود. در برخی موارد، حفره‌های بیضی کوچک نیز در جلوی صفحه صوتی با زاویه‌ای نسبت به حفره اصلی بریده می‌شوند. این تغییرات در طراحی حفره‌های صوتی ناشی از تعامل نظرات و ترجیحات بین سازندگان ساز و نوازندگان در دوره‌های مختلف تاریخی است.

در شمال آفریقا، به ویژه در کشورهایی مانند تونس، یک سبک حفره صوتی متمایز وجود دارد که به طور سنتی رایج است. این سبک شبیه به سبک سه‌حفره مشابه سازهایی مانند تئوربو^{۱۵} در اروپا است که سه‌حفره در مرکز صفحه صوتی بریده می‌شود. به طور معمول، حفره دایره‌ای در بالا کوچک‌تر از دو حفره دیگر است.

ساز کویترا، متعلق به خانواده لوت [۲۴]، به دلیل طراحی منحصر به فرد حفره صوتی در این منطقه قابل توجه است. کویترا دارای تنوع گسترده‌ای از سبک سه‌حفره است که به شکل درختان کاج یا فنجان‌های مثلثی شکل است و با نقوش تزئینی متمایزی تزئین شده است. طرح‌های متنوع حفره صوتی که در مناطق و کشورهای مختلف یافت می‌شود، به پالت صوتی متنوع عود کمک می‌کند و نقش مهمی در شکل‌دهی به بیان تُنال آن ایفا می‌کند. این تنوعات، هویت‌های فرهنگی و هنری مناطق

مربوطه را منعکس می‌کند و طیف گسترده‌ای از امکانات تُنال را در اختیار نوازندگان قرار می‌دهد. به طور کلی، طرح‌های منحصر به فرد حفره صوتی، نقش لوت را به عنوان یک ساز همه کاره و رسا در سنت‌های مختلف موسیقی در سراسر جهان گسترش می‌دهد.

۲-۳. تکامل حفره‌های صوتی لوت در اروپا

تمدن‌های اروپایی نقش مهمی در توسعه و پیشرفت سازهای مختلف موسیقی، به ویژه در خانواده لوت، ایفا کرده‌اند. این تمدن‌ها، از جمله تمدن‌های باستانی مانند تمدن هیتی، سهم قابل توجهی در درک علمی و اصلاح سازهای موسیقی داشته‌اند. میراث موسیقی تمدن‌هایی مانند یونان، بلغارستان، ترکیه و امپراتوری روم ریشه در تمدن‌های باستانی دارد و سازهای اولیه آن‌ها مانند لیر و پاندورا نمونه‌ای از نبوغ و حساسیت‌های هنری آن‌هاست. این سازهای پیشرفته، تسلط بر طراحی و ساخت ساز را در این فرهنگ‌ها به نمایش می‌گذارند. تمدن‌های اروپایی نه تنها در توسعه ساز، بلکه در تکامل نظریه موسیقی، تکنیک‌های اجرا و بیان هنری نیز سهم قابل توجهی داشته‌اند. پیشرفت‌های علمی آن‌ها تأثیر ماندگاری بر چشم‌انداز موسیقی داشته و پایه‌های موسیقی غربی را شکل داده و الهام‌بخش نسل‌های آینده نوازندگان و سازندگان ساز بوده است.

قرون اولیه تقویم میلادی، نگاهی اجمالی به ارتباط موسیقایی بین ملت‌های اروپایی و آسیای ارائه می‌دهد، اگرچه تحلیل جامع توسعه لوت‌های دسته کوتاه در اروپا مستلزم بررسی دقیق‌تری از قرن هفتم است [۲۵]. این دوره شاهد ورود اسلام به جنوب اروپا با گسترش خلافت اموی در سراسر هیسپانیا (شبه جزیره ایبری) از ۷۱۱ تا ۷۸۸ بود. متعاقباً، حکومت مسلمانان دامنه خود را به سمت اسپانیا و به سمت شرق به هند گسترش داد و تبادلات فرهنگی و موسیقایی را در این مناطق تسهیل کرد. ورود اسلام به جنوب اروپا پیامدهای عمیقی داشت

و تبادل سنت‌ها، تکنیک‌ها و سازهای موسیقایی بین تمدن‌های شرقی و غربی را تقویت کرد.

این برخورد بین حوزه‌های فرهنگی متنوع نقش محوری در شکل‌گیری و غنی‌سازی شیوه‌های موسیقی در هر دو منطقه داشت. علاوه بر این، گسترش حکومت مسلمانان به سمت شرق به سمت هند، انتقال دانش و سازهای موسیقی را تسهیل کرد و به چشم‌انداز پویای موسیقی آن زمان کمک کرد. به طور خلاصه، ظهور اسلام در جنوب اروپا در طول قرن هفتم به بعد، تعامل فرهنگی و موسیقایی قابل توجهی را بین ملل اروپایی و آسیایی تسریع کرد و تأثیر ماندگاری بر توسعه موسیقی و سازهای موسیقی گذاشت.

تحت تأثیر امپراتوری‌هایی مانند امپراتوری‌های اموی، عباسی و عثمانی، آمیختگی فرهنگ اسلامی فرمانطقه‌ای و سنت‌های محلی، جلوه‌های متمایزی را در کشورداری، الهیات، هنر، معماری و علم ایجاد کرد. دانشمندان و تمدن‌های مسلمان سهم عمیقی داشتند و برخی آن‌ها را به خاطر توانمندسازی رنسانس اروپایی از طریق خلاقیت و دستاوردهای چندوجهی‌شان، شایسته تقدیر می‌دانند. تبادلات فکری و فرهنگی بین حوزه‌های اسلامی و اروپایی در این دوره در شکل‌گیری دانش بشری و بیان هنری نقش مهمی داشت. این میراث همچنان در مباحث دانشگاهی و تحقیقات علمی طنین‌انداز است. گسترش اعراب/مسلمانان به اروپا در دوران قرون وسطی تأثیر قابل توجهی بر تبادلات فرهنگی، از جمله انتشار لوت‌های شرقی مانند عود در سراسر سرزمین‌های اروپایی، داشت. این تأثیر که تقریباً هفت قرن به طول انجامید، نقش مهمی در تعامل، توسعه و استانداردسازی خانواده لوت در اروپا ایفا کرد. با این حال، توجه به این نکته مهم است که درک اروپاییان از سازهای موسیقی، همراه با سایر جنبه‌های فرهنگی، با درک اعراب، ایرانیان و کشورهای شرقی متفاوت بود. این دیدگاه‌های متضاد بر تفسیر، استفاده و تکامل سازهای موسیقی در سنت‌های موسیقی

اروپایی تأثیر گذاشت و منجر به ویژگی‌ها و مسیرهای متمایز در شیوه‌های موسیقی اروپایی و قراردادهای سازهای موسیقی شد. تأثیر روم و یونان باستان باعث شد اروپاییان با ذهنیتی منطقی و علمی به سازهای موسیقی شرقی نزدیک شوند و شکل و مکانیسم آن‌ها را بررسی کنند. آن‌ها با گنجاندن سازهای متعدد، خانواده لوت را گسترش دادند و در نتیجه مجموعه‌ای متنوع از لوت‌ها ایجاد شد که از شکل اصلی خاورمیانه‌ای آن فاصله گرفت. آلمان و ایتالیا در دوران رنسانس به عنوان پیشران‌های این توسعه ظهور کردند و در تکامل سبک‌های لوت نقش داشتند. تمرکز مهم، توسعه حفره‌های صوتی بود که منجر به سبک‌های مختلف در سراسر اروپا و ایجاد قوانین و اصول برای ادغام آن‌ها در شکل‌ها و اندازه‌های مختلف لوت شد.

سبک حفره‌های صوتی لوت در اروپا با توجه به دوره‌های تاریخی متفاوت بود و یک سبک خاص، شکل هلالی بود که یادآور سبک‌های باستانی موجود در سازهای زهی مختلف است. این شکل هلالی که با حفره‌های C، E یا S نشان داده می‌شود، در نقوش منحصر به فرد تمدن‌های اروپایی یا در کنار حفره اصلی به عنوان شکل پایه در لوت‌ها استفاده می‌شد.

موضوع مورد بررسی مربوط به توسعه تاریخی حفره‌های صوتی لوت در اروپا است، به ویژه با تمرکز بر وجود دهانه‌های هلالی شکل، یک ویژگی متمایز که در سازهای زهی مختلف دوران باستان مشاهده می‌شود. شکل هلالی که با نمادهای C، E یا S نشان داده می‌شود، یا به عنوان یک سبک مستقل یا همراه با حفره مرکزی اصلی در ساخت لوت‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفت. این ویژگی سبکی ریشه در بقایای فرهنگی متنوع در تمدن‌های اروپایی و همچنین در تبادل فرهنگی بین نوازندگان مسلمان و اروپایی دارد. علاوه بر این، بقایای تعاملات فرهنگی بین مسلمانان و اروپاییان را می‌توان در نقوش لوت مرتبط با چندین نوازنده مسلمان که معمولاً به

عنوان ساراسن‌ها شناخته می‌شوند، در کلیسای پالاتین (Cappella Palatina) در دربار شاه راجر دوم در پالمو در اوایل قرن دوازدهم مشاهده کرد [۲۷، ۲۸]. این سبک خاص حفره صوتی مورد بررسی، شباهت زیادی به حفره‌های صوتی مشاهده شده در بربط ایرانی دارد، همانطور که در تصویر یافت شده بر روی جام نقره‌ای ساسانی کلاردشت مربوط به قرن ششم میلادی مشهود است.

علاوه بر این، تصویر مشابهی از نوازنده عود با این طرح حفره صوتی متمایز را می‌توان در نقاشی داخل کاخ الحیر شرقی (قصر الحیر شرقی) در سوریه مربوط به قرن هفتم میلادی یافت. این آثار تاریخی شواهد ملموسی از تداوم و رواج این شکل خاص حفره صوتی در مناطق و دوره‌های زمانی مختلف در زمینه سازهای لوت ارائه می‌دهند [۲۹].

این تحلیل بر سبک تک رُزت (تک حفره) تمرکز دارد که به طور گسترده به عنوان طرح غالب حفره صوتی در اروپا و خانواده گسترده‌تر سازهای لوت شناخته می‌شود. شایان ذکر است که این سبک تقریباً در تمام تصاویر موجود از لوت‌های اروپایی مربوط به قرون وسطی و دوره‌های بعدی رواج دارد. با این وجود، حفره‌های کوچک‌تر نیز در سبک‌های مختلف در کنار حفره اصلی گنجانده شده‌اند که تنوع بیشتری را در مقایسه با هم‌تایان خاورمیانه‌ای خود نشان می‌دهند. این حفره‌های کوچک‌تر اشکال مختلفی داشتند، مانند رُزت گوتیک، که نمونه آن در نقاشی دیواری «تمثیل آوریل: پیروزی زهره» واقع در پالازو شیفانوئا، که بین سال‌های ۱۴۷۶ تا ۱۴۸۴ اجرا شده است، دیده می‌شود [۳۰].

علاوه بر این، این حفره‌های کوچک‌تر گاهی اوقات به شکل محرابی در بالای حفره اصلی قرار می‌گرفتند، همانطور که در آثاری مانند «باکره و کودک با چهار فرشته» از تقریباً سال ۱۴۸۵ مشهود است [۳۱]. یک ساختار محراب مانند مشابه را می‌توان در کلاویسی‌تریوم^{۱۶} مربوط به حدود سال ۱۴۸۰ مشاهده کرد،

که نشان دهنده قدیمی‌ترین نمونه شناخته شده باقی مانده از یک ساز کیبوردی زهی است و در حال حاضر در موزه کالج سلطنتی موسیقی در لندن نگهداری می‌شود [۳۲]. رُزْت سه‌حفره نشان دهنده یک سبک مهم در سازهای لوت اروپایی است. شواهدی مانند یک تصویر مینیاتوری از سرودهای مریم مقدس^{۱۷} که به قرن سیزدهم میلادی [۳۳] برمی‌گردد، نشان می‌دهد که این سبک حتی ریشه‌ای قدیمی‌تر دارد. ویژگی بارز این سبک، وجود سه‌حفره مجزا است که در یک طرح مثلثی در مرکز صفحه صوتی لوت قرار گرفته‌اند و در مقایسه با پیکربندی تک‌حفره، مساحت بیشتری را اشغال می‌کنند. معمولاً دو حفره واقع در پایه مثلث، هم اندازه و بزرگ‌تر از حفره بالایی هستند.

سازهای مهم در خانواده لوت، مانند تئوربو [۳۴] و کیتارون، نمونه‌ای از این طراحی سه‌حفره متمایز هستند. لازم به ذکر است که رواج این سبک حفره خاص فراتر از اروپا گسترش یافته است، همانطور که وجود حفره‌های سه‌گانه در یکی از سبک‌های سنتی لوت، یعنی عود، در شمال آفریقا نشان می‌دهد.

در این بخش، یک سبک اروپایی مشخصاً مختص لوت‌های غربی به نام رُزْت‌های پارچمنت^{۱۸} را بررسی می‌کنیم. این رُزْت‌ها در مقایسه با سبک‌های رُزْت قبلی مانند رُزْت‌های تراشیده، شکلی سه‌بعدی و عمق بیشتری در رزوناتور دارند. مفهوم گنجاندن این سبک در صفحات صوتی ممکن است ریشه‌های گوتیک^{۱۹} داشته باشد، همانطور که در رُزْت‌های دوره گوتیک و حضور آن‌ها در سازه‌هایی مانند کلیساها دیده می‌شود. در حالی که رُزْت‌های پارچمنت را می‌توان در لوت‌های قرون وسطی و دوره باروک یافت، اما در مقایسه با رُزْت‌های تراشیده کمتر مورد استفاده قرار می‌گرفتند [۳۵، ۳۶]. این امکان وجود دارد که این سبک، با اصلاح بیشتر، بتواند به طور قابل توجهی بر مکانیسم انتقال هوا و زیر و بمی طنین جعبه صوتی ساز تأثیر بگذارد. تحقیقات بیشتری برای

بررسی دقیق‌تر این جنبه‌ها مورد نیاز است. حفره‌های صوتی لوت محصول قرن‌ها هنر و نوآوری است. سازندگان اروپایی لوت با طرز فکر علمی و کاربردی به اصلاح اجزای لوت پرداختند، اما همچنین افزایش جذابیت زیبایی‌شناختی ساز را از طریق تزئینات مجلل در اولویت قرار دادند.

حفره‌های صوتی که اجزای حیاتی محسوب می‌شدند، نقش مهمی در عملکرد و جذابیت بصری لوت ایفا می‌کردند. سازهای دیگری نیز در خانواده‌ی سازهای لوت وجود دارند که هر کدام جایگاه ویژه‌ای در بین نوازندگان و ملل مختلف دارند، سازهایی مانند ماندولین که ریشه ایتالیایی دارد و دو ساز دیگر به نام‌های کوبزا^{۲۰} و بندورا^{۲۱}، هر کدام سبک خاصی را به مجموعه‌ی حفره‌های صوتی خانواده‌ی لوت در اروپا اضافه کرده‌اند. ماندولین سازی است که ریشه در سازهایی مانند گیترن^{۲۲} و مندور یا مندلا^{۲۳} در ایتالیایی قرن هفدهم دارد و این نشان می‌دهد که این ساز حاصل چندین ساز قبل از آن است که بتواند امروزه در سراسر جهان گسترش یابد. ماندولین دو نوع سبک در حفره‌های صوتی ارائه می‌دهد، حفره‌های بیضی شکل و حفره‌هایی با شکل حرف f [۳۷]. این تغییرات در طراحی حفره صوتی، نوع بیشتری را به طیف وسیعی از امکانات بیانی ارائه شده توسط ماندولین در خانواده لوت اضافه می‌کند.

وجود این دو حفره صوتی متمایز تأثیر عمیقی بر ویژگی‌های آکوستیک ساز دارد [۳۸] و منجر به بحث‌های گسترده‌ای در بین نوازندگان در مورد ترجیحات آن‌ها می‌شود. بررسی لوت‌ها در اروپای شرقی نشان می‌دهد که سبک غالب، البته با برخی تغییرات، یک حفره است. این سبک به ویژه با سازهای کوبزا و بندورا در موسیقی فولک اوکراین مرتبط است.

قدیمی‌ترین مستندات شناخته‌شده از این سازها را می‌توان در نقاشی‌های دیواری یافت‌شده در کلیسای

سنت سوفیا در کیف مربوط به قرن یازدهم میلادی یافت که سازی شبیه به لوت را نشان می‌دهد و به عنوان پیش‌ساز این لوت‌ها در نظر گرفته می‌شود. بندورا در طول قرن‌های هفدهم و هجدهم محبوبیت پیدا کرد و در نهایت جای خود را به کوپزا داد که شباهت‌های چشمگیری به ساز قبلی خود دارد [۳۹]. هر دو ساز، سبک حفره صوتی دایره‌ای تک‌حفره را حفظ کرده‌اند، البته با تغییرات منحصر به فرد و مشخص، که آن‌ها را در سبک‌های حفره صوتی خانواده لوت اروپایی قرار می‌دهد. بررسی سبک‌های مختلف حفره صوتی، نبوغ و مهارت سازندگان سازهای اروپایی را در مناطق و دوره‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد.

این تنوع‌ها نه تنها منعکس‌کننده ترجیحات فرهنگی و هنری ملل مختلف هستند، بلکه ماهیت پویای موسیقی و توسعه ساز را نیز نشان می‌دهند. از رُزت‌های تراشیده شده دوره گوتیک گرفته تا طرح‌های بیضی و f-حفره ماندولین، هر سبک حفره صوتی، کیفیت و شخصیت تئال منحصر به فردی را به ساز می‌بخشد.

۳-۳. تکامل حفره‌های صوتی لوت در آسیای مرکزی و شرقی

منطقه آسیا محل تمدن‌های باستانی متعددی با سنت‌های عمیق موسیقایی بوده است که ریشه در فرهنگ‌های مربوطه دارند. در این چشم‌انداز غنی موسیقی، سبک‌های متمایز لوت از دوران باستان تا به امروز ادامه یافته‌اند، با تأکید ویژه بر طرح‌های حفره صوتی دایره‌ای، نیم‌دایره و C شکل. کاوش در اشکال حفره صوتی در این منطقه را می‌توان به آنالیز نقوش باقی‌مانده در پادشاهی کوشان (۳۰-۳۷۵ میلادی) و منطقه گندارا نسبت داد. کشف یک لوت در مجسمه‌ای مربوط به اوایل قرن اول میلادی به تصویر کشیده شده است. این نمایش مجسمه‌سازی، نگاهی ارزشمند به توسعه تاریخی سبک‌های حفره صوتی ارائه می‌دهد، به طوری که حفره‌های مشاهده شده پیکربندی نیم‌دایره


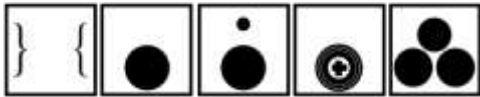
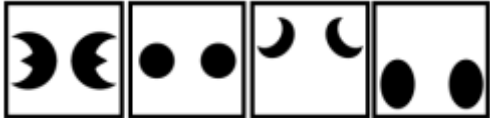
(هلال) متمایزی را نشان می‌دهند [۴۰، ۴۱]. وجود چنین شکل حفره صوتی مشخصی در مجسمه، گواهی بر ملاحظات هنری و فنی معطوف به ساخت لوت در آن دوران است.

حفره صوتی نیم‌دایره‌ای، نقشی محوری به عنوان یک ویژگی اساسی در توسعه تاریخی و حضور پایدار سازهای موسیقی ایفا می‌کند. وجود آن در سازهای خانواده لوت قبل از عصر میلادی به طور گسترده مورد اذعان است و میراث دیرینه آن را به نمایش می‌گذارد. کاوشگران برجسته، از جمله سر مارک اورل اشتاین (۱۸۶۲-۱۹۴۳)، اکتشافات قابل توجهی از مصنوعات مهم، مانند مجسمه‌های نمایانگر ساز، در امتداد جاده ابریشم در غرب چین امروزی داشته‌اند. در میان این یافته‌های ارزشمند، یک مجسمه جذاب، میمونی را نشان می‌دهد که ماهرانه سازی به شکل لوت را می‌نوازد که دارای دو حفره صوتی دایره‌ای است که در دو طرف سیم‌ها و بالای صفحه صوتی قرار گرفته‌اند [۴۲، ۴۳]. مجسمه مورد بررسی، که تخمین زده می‌شود بین قرن‌های اول و چهارم میلادی یا قرن‌های سوم تا ششم میلادی ساخته شده باشد، به عنوان یادگاری مهمی از پادشاهی ختن، قلمرو ساکا بودایی ایرانی، عمل می‌کند. هنگام بررسی اشکال لوت رایج در شرق آسیا، تنوع بیشتری پدیدار می‌شود که شامل تغییراتی در ویژگی‌های ساز می‌شود.

با این وجود، آنالیز جامع از نقوش باقی‌مانده در نقاشی‌ها و مجسمه‌ها، پذیرش گسترده سبک C شکل را در لوت‌های شرق آسیا نشان می‌دهد. این سبک به عنوان طرح غالب در اکثر سازهای خانواده لوت در منطقه، با چین به عنوان نقطه کانونی آن، مطرح شده است. سازهای برجسته در این منطقه شامل پیپا^{۲۴} و روآن به سبک باستانی در چین، بیوا^{۲۵} در ژاپن و بیپا^{۲۶} در کره هستند که همگی قرن‌ها سبک C شکل خود را حفظ کرده‌اند. با این حال، در مورد ساز لیوکین^{۲۷} از چین، سبک‌های جایگزین شامل حفره‌های بیضی با اندازه‌ها و

محل‌های قرارگیری مختلف نیز در کنار سبک رایج موجود در این مناطق مشاهده شده است (جدول ۱).

جدول ۱. طبقه‌بندی پیکربندی‌های حفره‌های صوتی ساز لوت با گردن کوتاه بر اساس منطقه جغرافیایی مورد بررسی در این مطالعه

مناطق جغرافیایی	شرح حفره‌های صوتی	سبک‌های حفره‌های صوتی
خاورمیانه و جنوب آسیا	در این منطقه، عودها معمولاً دارای تک‌حفره یا سه‌حفره هستند و حفره‌های صوتی بیضی شکل نیز رایج هستند. سازهای قابل توجه در خانواده لوت این منطقه شامل بربط (عود ایرانی)، عود عربی، عود ترکی و کویترا هستند.	
اروپا	عودهای این منطقه معمولاً دارای طراحی تک‌حفره هستند، اگرچه حفره‌های صدای اضافی را می‌توان با یک منطقه صفحه صوتی گسترش یافته ترکیب کرد. خانواده لوت این منطقه شامل سازهای قابل توجهی مانند لوت، تئوربو، آرچلوت و سیترن است که همگی ترتیب حفره‌های صوتی متمایز و مشخصی را نشان می‌دهند.	
آسیای مرکزی و شرقی	در این منطقه، حفره‌های صوتی در لوت‌ها شباهت چشمگیری به همتایان باستانی خود دارند. لوت‌های معاصر در این منطقه معمولاً دارای حفره‌های صوتی با طرح‌های C شکل، نیم‌دایره و بیضی هستند. سازهای قابل توجه در خانواده عود منطقه‌ای شامل لیکین، بیوا و پیپا هستند.	

۴. روش‌شناسی: تحلیل تطبیقی پیکربندی‌های

حفره صوتی لوت

این مطالعه پس از بررسی جامع تکامل تاریخی حفره‌های صوتی در خانواده لوت، از آزمایش‌های تجربی برای انجام تحلیل تطبیقی حالت‌های مختلف حفره‌های صوتی لوت، با تمرکز ویژه بر نقش آن‌ها در تسهیل کانال‌های حرکت هوا در جعبه صوتی، استفاده کرد. برای ثبت پاسخ لوت در هر حالت، یک نت ثابت استخراج و تا زمانی که به صفر برسد، ضبط شد. این امر امکان ارزیابی قابلیت‌های میرایی صوتی در سازها و تحلیل تطبیقی رفتار آکوستیک آن‌ها را فراهم کرد.

۱-۴. پیکربندی و ابزار دقیق تجربی

آرایه میکروفون در استودیویی به ابعاد $8 \times 6 \times 3$ متر نصب شد که از نظر آکوستیکی بهینه‌سازی شده بود. این استودیو با پنل‌های جاذب صوتی بر روی دیوارها تجهیز شده بود تا بازتاب‌های ناخواسته کاهش یابد. زمان واخنش (RT60)^{۲۸} محیط در محدوده فرکانسی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز تقریباً ۰/۳ تا ۰/۴ ثانیه بود.

دمای محیط در طول آزمایش‌ها بین ۲۰ تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی بین ۴۵ تا ۵۰ درصد حفظ شد. نویز زمینه استودیو کمتر از ۳۰ دسی‌بل SPL اندازه‌گیری شد. برای ثبت سیگنال‌های صوتی از دو میکروفون RØDE NT2 و SUPERLUX CM- با الگوی قطبی کاردیوئید^{۲۹} و پاسخ فرکانسی ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز استفاده شد. این میکروفون‌ها از طریق پیش‌تقویت‌کننده‌هایی با پاسخ فرکانسی مسطح

(± 1 دسی‌بل در محدوده ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز) به رابط صوتی Focusrite Scarlett 6i6 متصل شدند. سیگنال‌های صوتی با نرخ نمونه‌برداری ۴۸ کیلوهرتز و عمق بیتی ۲۴ بیت^{۳۰} دیجیتالی‌سازی شدند و ماژول scipy.io.wavfile خواندن فایل‌های صوتی wav را تسهیل کرد و امکان استخراج نرخ نمونه‌برداری و آرایه‌های داده سیگنال را فراهم نمود.

پیش از هر جلسه ضبط، کالیبراسیون تمام مسیرهای سیگنال با استفاده از مولد تُن آزمایشی (سیگنال سینوسی ۱ کیلوهرتز) انجام گرفت تا دقت ± 1 دسی‌بل در اندازه‌گیری‌ها تضمین شود. این رویه برای حفظ یکنواختی اندازه‌گیری‌ها در طول زمان ضروری بود.

میکروفون‌ها در آرایش استریو^{۳۱} با فاصله ثابت ۵۰/۸ سانتی‌متر (۲۰ اینچ) از رأس عود قرار گرفتند و به سمت صفحه صوتی جهت‌گیری شدند تا جمع‌آوری متوازن میدان صوتی فراهم شود. ارتفاع میکروفون‌ها با محور افقی صفحه صوتی عود هم‌تراز بود. فاصله ۵۰/۸ سانتی‌متر، به دلیل صدای نسبتاً آرام عود، برای حفظ نسبت سیگنال به نویز (SNR) مطلوب، خصوصاً در اندازه‌گیری زمان میرایی، انتخاب شد. گفته شد، استاندارد رایج‌تر در اندازه‌گیری‌های آکوستیکی، فاصله ۱ متر است، و اندازه‌گیری در فاصله ۱ متر، شامل میدان دور، به عنوان یکی از جهت‌گیری‌های تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود.

۴-۲. روش آزمایش

در ارزیابی تجربی، چهار حالت استاندارد که نشان‌دهنده پیکربندی‌های مختلف حفره صوتی عود هستند، انتخاب شدند. هدف از این مطالعه، ارائه بینش‌هایی در مورد رفتار آکوستیک عود و تأثیر آن بر مکانیسم‌های تولید صوتی بود. عود مورد استفاده، عود سه‌حفره از ساخته‌های کارگاه استاد شهیر سوری، علی خلیفه و پسران بود. چهار حالت آزمایش شده شامل بسته بودن همه حفره‌ها، باز بودن

فقط حفره اصلی، باز بودن همه حفره‌ها و بسته بودن فقط حفره اصلی بود.

یکی از محدودیات این مطالعه، عدم استفاده از یک پایه ثابت برای نگه داشتن ساز هنگام نوازندگی بود. استفاده از پایه ثابت، تعامل بدن نوازنده با رزوناتور ساز را حذف می‌کند، و این موضوع به عنوان یکی از نکات مهم جهت بهبود مطالعات آینده، شناسایی شده است. صفحه صوتی عود با چوب پنبه فوق‌العاده متراکم با ضخامت ۶ میلی‌متری برای هوابندی حفره‌های صوتی پوشانده شده بود. جنس چوب پنبه، به دلیل خصوصیت جذب صوت بسیار بالای آن، انتخاب شد. چون هدف اصلی، حذف صوت خروجی از حفره بسته، با حداقل تأثیر رزونانس اضافی بر صفحه صوتی، بود. آنالیز عددی دقیق‌تر مقایسه انواع مختلف مواد عایق هوا بند، به عنوان یکی از جهت‌گیری‌های تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود. در این آزمایش از سیم‌های Thomastik-Infeld، یک برند اتریشی، با ویژگی‌های متمایز استفاده شد. سیم اول، ساخته شده از مواد مصنوعی (قطر ۰/۴ میلی‌متر)، کیفیت‌های تُنال خاصی را ارائه می‌دهد، در حالی که سیم پنجم از جنس مس با روکش نقره (قطر ۰/۹ میلی‌متر) است که صوتی غنی و رزونانسی ارائه می‌دهد. یکی از محدودیت‌های اساسی این مطالعه، عدم کنترل دقیق و کمی نیروی اعمال‌شده بر سیم در هنگام ضربه زدن بود. این محدودیت می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر پارامترهای اندازه‌گیری‌شده داشته باشد، زیرا شدت ضربه به طور مستقیم بر دامنه RMS تأثیر می‌گذارد و ضربه قوی‌تر منجر به دامنه بالاتر می‌شود. همچنین تغییرات نیرو می‌تواند بر حداکثر و حداقل دامنه‌های اندازه‌گیری‌شده تأثیر بگذارد و زمان میرایی^{۳۲} احتمالاً تحت تأثیر انرژی اولیه اعمال‌شده به سیم قرار می‌گیرد. برای کاهش این تأثیر، رویکرد چندمرحله‌ای به کار گرفته شد. ابتدا سه نوازنده حرفه‌ای عود با حداقل ده سال تجربه اجرا انتخاب

شدند که از اهداف دقیق تحقیق بی‌اطلاع بودند تا سوگیری در تکنیک نواختن کاهش یابد.

نویسندگان، استفاده از دستگاه ضربه مکانیکی کنترل‌شده، مثل یک پاندول یا یک سیستم ضربه‌زن خودکار، با شدت ثابت و تکرارپذیر، در یک موقعیت خاص روی سیم، را به عنوان اولویت اصلی مطالعات آینده، پیشنهاد می‌کنند. این رویکرد، تغییرپذیری ناشی از تفاوت بین نوازندگان را کاملاً حذف می‌کند. همچنین لازم به ذکر است که از هر نوازنده خواسته شد که هر سیم را با شدت متوسط معمول خود بنوازد، نه بسیار ضعیف و نه بسیار قوی. هر نوازنده هر حالت را حداقل پنج بار تکرار کرد و ضبط‌های شامل ضربات دوتایی، لغزش مضراب یا سایر خطاهای آشکار حذف شدند. از بین ضبط‌های باقی‌مانده، پاسخ‌های ضربه‌ای با باریک‌ترین و بلندترین قله اولیه که نشان‌دهنده ضربه تمیز و یکنواخت بود، انتخاب شدند.

باید تصریح شود که علی‌رغم این اقدامات، تغییرپذیری باقی‌مانده در شدت ضربه می‌تواند بخشی از تفاوت‌های اندازه‌گیری‌شده بین حالت‌ها را توضیح دهد. بنابراین اختلافات کمی گزارش شده باید با این محدودیت در نظر گرفته شوند و ممکن است در صورت استفاده از دستگاه ضربه مکانیکی کاملاً کنترل‌شده، مقادیر کمی متفاوتی مشاهده شود. با این حال، روند کلی مبنی بر برتری پیکربندی سه‌حفره نسبت به تک‌حفره در تمام آزمایش‌ها و توسط هر سه نوازنده به طور مداوم مشاهده شد که نشان‌دهنده قوی بودن یافته‌های کیفی است.

در نتیجه، یافته‌های کمی این تحقیق (از جمله افزایش ۵۵/۳۵٪ در دامنه RMS حالت ۳ نسبت به حالت ۱ - کاملاً بسته، و ۱۲/۱۴٪ افزایش در زمان میرایی نسبت به حالت ۱) خاص این نمونه با ویژگی‌های فوق است. تغییرات در ضخامت صفحه صوتی، هندسه رزوناتور، حجم محفظه هوا، الگوی مهاربندی، یا جنس و چیدمان سیم‌ها می‌تواند به نتایج متفاوتی منجر شود. بنابراین،

تعمیم این یافته‌ها به سایر عودها یا سازهای خانواده لوت با احتیاط باید صورت گیرد و نیازمند مطالعات تکمیلی با نمونه‌های متنوع از سازندگان، مناطق جغرافیایی، و دوره‌های زمانی مختلف است. با این حال، روش‌شناسی آزمایشی و چارچوب تحلیلی ارائه‌شده در این مطالعه می‌تواند به‌عنوان الگویی برای تحقیقات آینده در این حوزه مورد استفاده قرار گیرد.

لازم به ذکر است که این مطالعه بر اندازه‌گیری‌های آکوستیک عینی (دامنه، RMS، زمان واپاشی) به جای ارزیابی رسمی روان‌آکوستیکی متمرکز بوده است. در حالی که RMS به عنوان یک معیار مفید برای درک بلندی صدا بر اساس اصول روان‌صوتی تثبیت‌شده عمل می‌کند، ما موفق به انجام آزمایش‌های شنوایی رسمی نشدیم یا معیارهای روان‌آکوستیکی استاندارد مانند بلندی صدا، وضوح، مرکز طیفی، زبری یا اندازه‌گیری‌های دقیق زمان حمله را محاسبه نکردیم. تحقیقات آینده که شامل مطالعات ادراکی رسمی با شنوندگان آموزش‌دیده و تجزیه و تحلیل جامع روان‌آکوستیکی باشد، بینش‌های مکمل ارزشمندی در مورد چگونگی تبدیل این تفاوت‌های آکوستیک به ترجیحات تئال ذهنی و کیفیت صدای درک شده ارائه می‌دهد. چنین مطالعاتی به ویژه برای درک ترجیحات فرهنگی و فردی در مورد پیکربندی حفره‌های صدا در زمینه‌های مختلف موسیقی ارزشمند خواهد بود.

۴-۲-۱. مشخصات فیزیکی دقیق ساز مورد آزمایش

برای اطمینان از تکرارپذیری و امکان تفسیر صحیح نتایج، مشخصات دقیق ساز آزمایشی ارائه شده است. عود مورد استفاده در طول این مطالعه یک ساز حرفه‌ای ساخت علی خلیفه و پسران بود که از روش‌های ساخت سنتی بهره می‌برد. ساز در طول آزمایش در شرایط پایدار (دما: ۲۰-۲۲ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی: ۴۵-

۵۰٪) نگهداری شد تا متغیرهای محیطی به حداقل برسد. همچنین کشش وترها قبل از هر جلسه اندازه‌گیری، استاندارد و بررسی شد.

جدول ۲. مشخصات ساز مورد آزمایش

پارامتر	مشخصات
سازنده	کارگاه علی خلیفه و پسران (دمشق، سوریه)
سال ساخت	۲۰۰۰ میلادی
صفحه صوتی	چوب صنوبر
ضخامت صفحه صوتی در مرکز	۲/۵ میلی‌متر
ضخامت در لبه‌ها	۳/۰ میلی‌متر
الگوی رگه چوب	عمود بر طول ساز ^{۳۳}
کاسه (رزوناتور)	چوب گردو، ۲۱ ترک
ضخامت کاسه	۲/۲ میلی‌متر (میانگین)
ابعاد حفره اصلی	۸/۵ سانتی‌متر (دایره‌ای)
مساحت حفره اصلی	۵۶/۷ سانتی‌متر مربع - روی محور مرکزی
ماده آب‌بندی ^{۲۴}	چوب پنبه فوق‌العاده متراکم با ضخامت ۶ میلی‌متر

۵. نتایج و تحلیل

۵-۱. ارائه نتایج

این بخش، تحلیلی جامع با هدف مقایسه و بررسی مودهای اصلی تک‌حفره و سه‌حفره (مود ۲ و مود ۳) و همچنین دو مود اضافی (مود ۱ و مود ۴) عود، عضوی برجسته از خانواده لوت با گردن کوتاه، ارائه می‌دهد. هدف اصلی این تحلیل، افزایش درک ما از تأثیر مساحت و محل حفره‌های صوتی بر صفحه صوتی لوت است، و در نتیجه، بررسی خواص آکوستیک و کاربردهای بالقوه مرتبط با هر مود را تسهیل می‌کند. برای دستیابی به این هدف، این تحلیل بر بررسی پارامترهای حیاتی مانند دامنه RMS، حداکثر دامنه و حداقل دامنه تمرکز دارد. این پارامترها نقش مهمی در تشخیص و ثبت تمایزات بین حالت‌های دو سیم مجزا دارند. ارائه این تحلیل‌ها با

دقت تنظیم شده است تا طیف متنوعی از مخاطبان را درگیر کند، با تمرکز ویژه بر سازندگان ساز و نوازندگان، و درک آن‌ها از دینامیک پیچیده صوتی، کیفیت‌های بیانی و نقش محوری حفره‌های صوتی در تولید صوتی در عود افزایش می‌دهد. همانطور که در بخش قبل مورد بحث قرار گرفت، آزمایش‌های تجربی متعددی انجام شد و نتایجی که نشان‌دهنده شدیدترین حالت بودند، برای اطمینان از یک تحلیل قوی و ایجاد اعتماد به اعتبار یافته‌ها انتخاب شدند.

شکل‌های ۲ و ۳، تحلیل مقایسه‌ای پاسخ زمانی در چهار حالت متمایز را ارائه می‌دهند:

حالت ۱ - بسته بودن همه حفره‌ها:

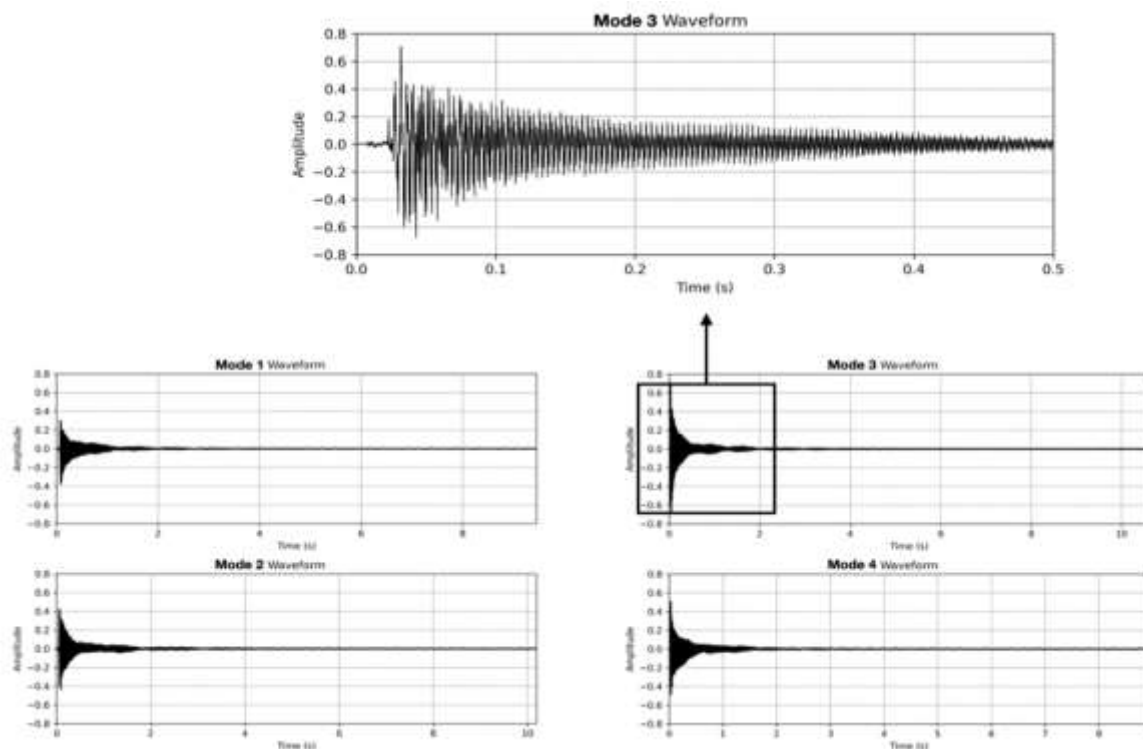
در این پیکربندی، تمام حفره‌های صوتی مسدود شده‌اند که منجر به محدودیت کامل جریان هوا می‌شود.

حالت ۲ - باز بودن تنها حفره اصلی:
تنها حفره مرکزی باز است و سایر حفره‌ها مسدود می‌باشند.

حالت ۳ - باز بودن همه حفره‌ها:
تمام حفره‌ها باز هستند که حداکثر جریان هوا را فراهم می‌کند.

حالت ۴ - بسته بودن تنها حفره اصلی:
حفره مرکزی مسدود و حفره‌های جانبی باز هستند. یافته‌های تجربی در جداول ۳ و ۴ (در بخش ضمیمه) خلاصه و ارائه شده‌اند که خلاصه‌ای مختصر از نتایج را ارائه می‌دهند. این جداول، یافته‌ها و اندازه‌گیری‌های کلیدی حاصل از آزمایش‌ها را در بر می‌گیرند و داده‌ها را به شیوه‌ای واضح و سازمان‌یافته ارائه می‌دهند. آن‌ها به عنوان منابع ارزشمندی برای محققان و خوانندگان جهت درک و تحلیل مشاهدات و اندازه‌گیری‌های به دست آمده

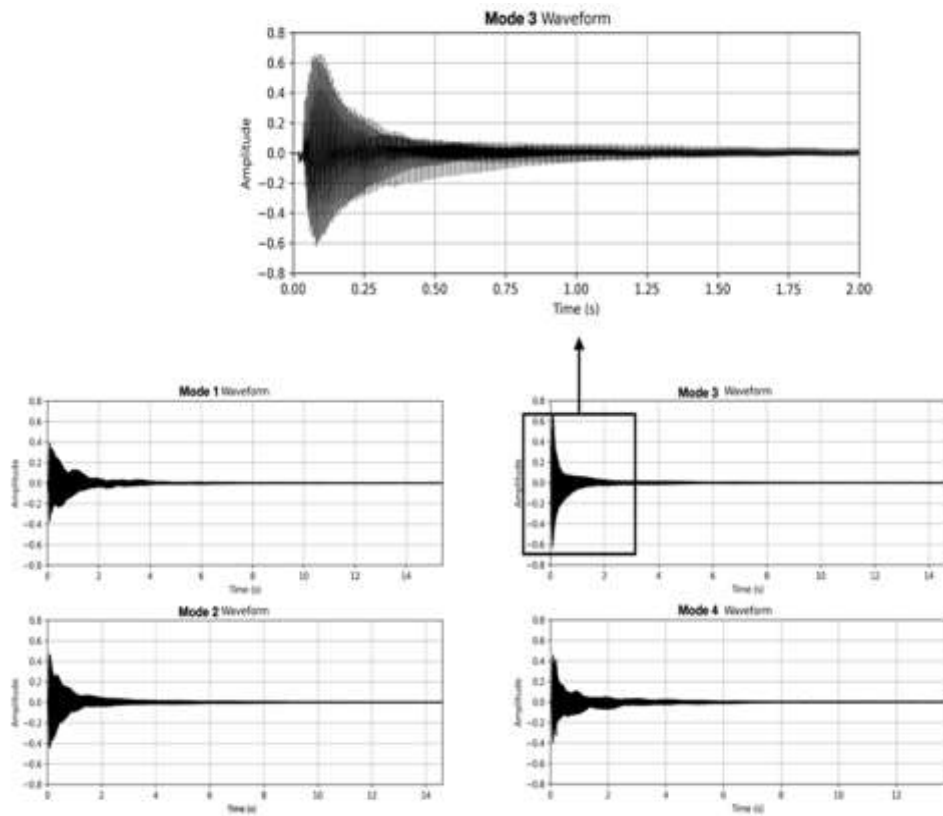
در این مطالعه عمل می‌کنند. تحلیل انجام شده بر روی شکل موج سیم پنجم، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، شباهت‌های قابل توجهی را با تحلیل انجام شده بر روی سیم اول نشان می‌دهد. این شباهت با مقایسه پارامترهای مربوطه ارائه شده در جداول ۳ و ۴ بیشتر اثبات می‌شود. شکل ۳ شکل موج (حوزه زمانی) سیم پنجم را نشان می‌دهد، در حالی که جدول ۴ داده‌ها و اطلاعات مربوط به آن را ارائه می‌دهد. با بررسی نسبت و سایر پارامترهای مربوطه در هر دو جدول، مشخص می‌شود که ویژگی‌های سیم پنجم با ویژگی‌های سیم اول بسیار همسو است، زیرا این امر درک جامعی از الگوها و روندهای کلی ارائه می‌دهد. از طریق این رویکرد، ما توانستیم پیچیدگی‌های سیم اول را بررسی کنیم و تحلیلی جامع از پارامترها و حالت‌های آن در چارچوب تحقیقات خود ارائه دهیم.



شکل ۲. ویژگی‌های حوزه زمان سیم اول که توسط نمودار شکل موج نمایش داده می‌شود. محور عمودی: دامنه نرمال شده (a.u.) (بدون واحد)؛ محور افقی: زمان (ثانیه)

جدول ۳. سیم ۱

حداقل دامنه (a.u.)	حداکثر دامنه (a.u.)	RMS (a.u.) ^۳	حالت
-۰/۳۷۴۳۱	۰/۳۰۰۹۹۱	۰/۰۱۶۶۸۴	حالت ۱
-۰/۴۳۳۸۶۳	۰/۴۲۳۳۸۱	۰/۰۲۰۷۵۵۳	حالت ۲
-۰/۶۷۸۴۶۷	۰/۷۰۷۱۰۷	۰/۰۲۵۹۳۹۸	حالت ۳
-۰/۴۸۴۷۳۶	۰/۵۰۴۱۷۱	۰/۰۲۱۸۹۱۱	حالت ۴



شکل ۳: تحلیل شکل موج سیم پنجم. محور عمودی: دامنه نرمال شده (بدون واحد)(a.u.)؛ محور افقی: زمان (ثانیه)

جدول ۴. سیم ۵

حداقل دامنه (a.u.)	حداکثر دامنه (a.u.)	RMS (a.u.)	حالت
-۰/۳۷۶۱۰۷	۰/۳۸۸۱۴۱	۰/۰۳۱۳۶۶۷	حالت ۱
-۰/۴۴۱۵۸۵	۰/۴۶۴۳۸۲	۰/۰۳۲۴۰۸	حالت ۲
-۰/۶۲۶۸۴۴	۰/۶۵۵۹۸۲	۰/۰۳۶۱۰۲۶	حالت ۳
-۰/۳۹۳۷۵۹	۰/۴۴۹۷۹۵	۰/۰۲۸۳۷۹۶	حالت ۴

۵-۲. تحلیل و بحث

تحلیل شاخص‌های دامنه، درک جامعی از ویژگی‌های دینامیکی، شدت‌های اوج و الگوهای سکوت در حالت‌های صوتی مورد بررسی ارائه می‌دهد. حالت ۳ در مقایسه با سایر حالت‌ها، دامنه RMS بالاتری دارد که نشان‌دهنده انرژی متوسط قوی‌تر است.

بر اساس اصول روان‌آکوستیکی شناخته شده، این افزایش - RMS به‌ویژه در ناحیه میانی که حساسیت شنوایی انسان در آن بیشینه است - ممکن است به افزایش قابل توجه در «بلندی درک شده» منجر شود. گفته شد، باید صراحت داشته باشد که این یک استنتاج نظری صرف، نه نتیجه آزمایش ادراکی واقعی، است.

هیچ آزمایش شنیداری رسمی با شرکت‌کنندگان انسانی در این مطالعه انجام نشد، و مطالعات روان‌آکوستیکی رسمی، شامل آزمایش‌های مقایسه زوجی، به عنوان یکی از جهت‌گیری‌های تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود. دامنه RMS حالت ۳ نسبت به حالت ۱ (کاملاً بسته) تقریباً $55/35\%$ بیشتر، و نسبت به حالت ۲ (تک‌حفره) تقریباً 25% بیشتر است. این نشان می‌دهد که حالت ۳ در طول زمان، دامنه متوسط بالاتری نسبت به هر دو حالت ۱ و ۲ نشان می‌دهد.

حالت ۳ طولانی‌ترین زمان میرایی را در بین تمام حالت‌های ارزیابی شده دارد، تقریباً $12/14\%$ طولانی‌تر از حالت ۱ و $4/06\%$ طولانی‌تر از حالت ۲. این زمان میرایی طولانی منجر به کاهش تدریجی انرژی و رزونانس پایدار در حالت ۳ می‌شود. این امر به حضور صوتی طولانی‌تر و برجسته‌تر کمک می‌کند و به صوتی وسعت و عمق می‌بخشد. این توانایی در حفظ رزونانس در برخی زمینه‌های موسیقی و هنگام ایجاد مناظر صوتی اتمسفریک یا محیطی ارزشمند است.

در میان حالت‌های ارائه شده، حالت ۳ بالاترین حداکثر دامنه $0/707107$ را دارد که نشان‌دهنده بیشترین دامنه اوج لحظه‌ای است. این نشان‌دهنده شدت اوج بالاتر و تجربیات شنیداری بالقوه قدرتمند در مقایسه با حالت ۱ است. قله‌های قوی‌تر و برجسته‌تر حالت ۳، از نظر پارامتر فیزیکی، دامنه اوج بالاتری نشان می‌دهند، گفته شد، ارتباط مستقیم آن‌ها با «شدت پویای درک شده» نیاز به تأیید از طریق آزمایش‌های شنوایی رسمی دارد. تفاوت‌های درصد قابل توجه ($67/03\%$ و $135/03\%$) برتری حالت ۳ را در حداکثر دامنه نسبت به سایر حالت‌ها، به ویژه حالت ۲ و حالت ۱، برجسته می‌کند.

حالت ۳ منفی‌ترین حداقل دامنه ($-0/678467$) را دارد که نشان‌دهنده تمایل شدید به سکوت یا شدت‌های پایین‌تر در طول فواصل سکوت است. در مقایسه با حالت ۱، حالت ۳ تقریباً $81/36\%$ در حداقل دامنه پایین‌تر است که درجه بالاتر شدت پیک منفی یا سکوت آشکار آن را تقویت می‌کند. حداقل دامنه به طور قابل توجهی پایین‌تر، دوره‌های طولانی‌تر سکوت یا سیگنال‌های صوتی با شدت کمتر را در حالت ۳ نشان می‌دهد. این امر به دره‌های عمیق‌تر در شکل موج کمک می‌کند و تضاد قابل توجهی بین دامنه‌های بالا و پایین ایجاد می‌کند. آنالیز شاخص‌های دامنه، بینش‌های ارزشمندی در مورد ویژگی‌های دینامیکی، شدت‌های پیک و الگوهای سکوت حالت‌های صوتی ارائه می‌دهد. حالت ۳ با دامنه RMS بالاتر و زمان میرایی طولانی‌تر، که نشان‌دهنده انرژی متوسط قوی‌تر، بلندی صوتی درک شده قوی‌تر و رزونانس پایدار است، متمایز می‌شود. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که حالت ۳ ممکن است انتخابی سودمند برای کاربردهایی باشد که به رزونانس پایدار و سطوح انرژی صوتی بالاتر نیاز دارند، اگرچه برای تأیید ترجیحات ادراکی در زمینه‌های هنری و خلاقانه، به آزمایش‌های شنیداری رسمی نیاز است.

دامنه دینامیکی بزرگ‌تر حالت ۳، با دامنه‌های حداکثر بالاتر و حداقل پایین‌تر، بر تضاد بین دامنه‌های بالا و پایین در صوتی تأکید می‌کند. این امر عمق، رسایی و تأثیر عاطفی را افزایش می‌دهد. محدوده دینامیکی برجسته برای سناریوهایی که به طیف وسیعی از دامنه‌ها نیاز دارند، مانند اجراهای موسیقی یا ضبط‌های صوتی با سطوح شدت متغیر، مفید است. لازم به ذکر است که نتایج آکوستیک ارائه شده در این مطالعه مختص هندسه و پارامترهای ساختاری خاص ساز است که پیشتر شرح داده شده است. متغیرهایی مانند ضخامت صفحه صدا در ساز آزمایشی ما، الگوی مهار صفحه، حجم رزوناتور و ابعاد و موقعیت‌های خاص حفره‌های صوتی، همگی در رفتار آکوستیکی مشاهده شده نقش دارند. در حالی که طراحی تجربی ما با استفاده از همان ساز با پیکربندی‌های مختلف حفره (ترکیب‌های بسته/باز) این متغیرها را کنترل کرد، مزایای نسبی پیکربندی سه‌حفره مشاهده شده در اینجا ممکن است تحت تأثیر تعامل بین پیکربندی حفره و این پارامترهای ساختاری دیگر باشد (شکل ۴). پژوهش‌های بیشتر در مورد بررسی پیکربندی‌های حفره صوتی در سازهایی با پارامترهای ساختاری متفاوت، به تعمیم‌پذیری این یافته‌ها کمک خواهد کرد.



شکل ۴. آرایش میکروفن‌ها

ترکیب حداقل دامنه، دامنه RMS و حداکثر دامنه در حالت ۳، تجربه صوتی قوی‌تر و شدیدتری را نشان می‌دهد که قدرت، انرژی و تأثیر را تداعی می‌کند. حداکثر

دامنه بالاتر، دامنه‌های اوج قوی‌تر را نشان می‌دهد که منجر به گذراهای تیزتر و حملات برجسته‌تر در سیگنال صوتی می‌شود. آنالیز نشان می‌دهد که حالت ۳ عود زمان زوال طولانی‌تری دارد و صوتی طولانی و گسترده مناسب برای ژانرهایی که به تن‌های پایدار یا طنین نیاز دارند، ایجاد می‌کند [۴۴، ۴۵]. ترجیحات شخصی، ژانر و ویژگی‌های ارکستر بر تمایل به بلندی صوتی بالاتر تأثیر می‌گذارد. در ضبط و میکس اجراهای ارکستر، حالت ۳ وفاداری به ساز را افزایش می‌دهد و طیف کامل صوتی را ضبط می‌کند. در تقویت صوتی در حالت زنده، حالت ۳ فضایی قدرتمند و فراگیر، به ویژه برای ژانرهای پرانرژی، ایجاد می‌کند. عوامل فرهنگی به شدت بر ترجیحات بلندی صوتی تأثیر می‌گذارند، به طوری که فرهنگ‌ها یا مناطق مختلف به هنجارها و انتظارات زیبایی‌شناختی متمایزی پایبند هستند. برخی فرهنگ‌ها صوتی تقویت‌شده را نشانه‌ای از قدرت، انرژی یا هیجان می‌دانند، در حالی که برخی دیگر ابزارهای آرام‌تر یا مهارشده‌تر را ترجیح می‌دهند. درک این تأثیرات فرهنگی برای متناسب‌سازی تجربیات صوتی با مخاطبان خاص و اطمینان از همسویی آن‌ها با انتظارات و هنجارهای فرهنگی ضروری است.

۶. نتیجه‌گیری

این مطالعه، مبانی تجربی را برای درک رابطه بین مورفولوژی حفره صدا و عملکرد آکوستیک در سازهای خانواده لوت گردن کوتاه از طریق روش‌های تاریخی و تجربی یکپارچه ایجاد می‌کند. آنالیز ما نشان می‌دهد که پیکربندی سه‌حفره، به طور مداوم، از پیکربندی تک‌حفره در پارامترهای مختلف آکوستیک بهتر عمل می‌کند. پیکربندی سه‌حفره (حالت ۳) نسبت به حالت کاملاً بسته (حالت ۱)، ۵۵/۳۵٪ و نسبت به حالت تک‌حفره (حالت ۲)، تقریباً ۲۵٪ RMS بالاتری نشان می‌دهد، و گسترش دامنه دینامیکی و پایداری رزونانس (۱۲/۱۴٪ زمان

و پاشی طولانی‌تر نسبت به حالت (۱) را نیز دارد. این اندازه‌گیری‌ها، اعتبارسنجی عینی را برای تکامل تاریخی به سمت الگوهای پیچیده حفره صوتی که در سنت‌های فرهنگی متنوع مشاهده شده است، ارائه می‌دهند.

بررسی مورفولوژیکی، تکامل طراحی همگرا را در سنت‌های عود با فاصله جغرافیایی نشان می‌دهد و نشان می‌دهد که اصول بهینه‌سازی آکوستیک از مرزهای فرهنگی در توسعه ساز فراتر می‌رود. ترجیح مداوم برای پیکربندی‌های چندحفره صوتی در زمینه‌های اجرا نشان می‌دهد که سازندگان تاریخی به طور تجربی مزایای آکوستیکی را که اکنون از طریق آزمایش‌های کنترل‌شده کمی‌سازی کرده‌ایم، تشخیص داده‌اند.

از دیدگاه عملی، این یافته‌ها - که خاص نمونه عود مورد آزمایش با مشخصات فیزیکی معین است - پارامترهای طراحی اولیه‌ای را برای سازندگان معاصر لوت ارائه می‌دهند.

با این حال، سازندگان باید این نتایج را به‌عنوان نقطه شروع در نظر بگیرند و برای هر ساز با توجه به ویژگی‌های خاص آن (ضخامت صفحه صوتی، هندسه رزوناتور، الگوی مهاربندی، و جنس مواد) آزمایش‌های اختصاصی انجام دهند.

با توجه به محدودیت نمونه‌گیری این مطالعه (یک نمونه واحد)، تحقیقات آینده باید شامل موارد زیر باشد: (۱) آزمایش چندین نمونه عود از سازندگان و مناطق جغرافیایی مختلف، (۲) بررسی تأثیر تغییرات ضخامت صفحه صوتی، الگوی مهاربندی، و حجم رزوناتور بر نتایج آکوستیک، (۳) مقایسه سیستماتیک عودهای تاریخی و معاصر برای ارزیابی تداوم یا تغییرات در اصول طراحی، و (۴) توسعه مدل‌های آماری که قادر به پیش‌بینی عملکرد آکوستیک بر اساس پارامترهای فیزیکی متنوع باشند. علاوه بر این، جهت‌گیری‌های تحقیقاتی آینده شامل بررسی نسبت‌های اندازه حفره صوتی، بهینه‌سازی هندسه قرارگیری و تعامل بین پیکربندی حفره صدا و تغییرات

ضخامت صفحه صوتی است. مطالعات آینده باید از دستگاه‌های مکانیکی استاندارد برای ضربه زدن به سیم‌ها^{۳۶} استفاده کنند تا نیروی اعمالی به طور دقیق کنترل و تکرارپذیر باشد. این امر امکان جداسازی کامل تأثیر پیکربندی حفره صوتی از تغییرات ناشی از شدت ضربه را فراهم خواهد کرد.

علاوه بر این، مطالعات روان‌آکوستیکی که درک شنونده از تفاوت‌های دامنه اندازه‌گیری‌شده را بررسی می‌کنند، اهمیت حیاتی دارند. چنین مطالعاتی باید شامل آزمایش‌های مقایسه زوجی باشند که در آن‌ها شرکت‌کنندگان به نمونه‌های صوتی از پیکربندی‌های مختلف گوش می‌دهند و ترجیحات خود را بیان می‌کنند. همچنین سنجش معیارهای روان‌آکوستیکی از جمله بلندی درک‌شده^{۳۷} بر اساس استاندارد ISO 532، تیزی^{۳۸} که به محتوای فرکانس بالا مربوط می‌شود، مرکز طیفی^{۳۹} که روشنی صدا را نشان می‌دهد، خشونت^{۴۰} که به نوسانات دامنه مربوط می‌شود و زمان حمله^{۴۱} که سرعت رسیدن به اوج را اندازه می‌گیرد، ضروری است. همچنین، مطالعات آینده می‌توانند از روش‌های مدل‌سازی عددی مانند تحلیل اجزای محدود^{۴۲} و شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسبات^{۴۳} برای پیش‌بینی رفتار آکوستیک پیکربندی‌های مختلف حفره صوتی پیش از ساخت فیزیکی ساز استفاده کنند. ارزیابی کیفیت تُنال با استفاده از مقیاس‌های رتبه‌بندی معنایی نظیر گرم-سرد، پر-خالی و روشن-تیره برای توصیف کیفیت صوت نیز می‌تواند بینش‌های ارزشمندی فراهم کند. این مطالعات روان‌آکوستیکی، ارتباط حیاتی بین اندازه‌گیری‌های فیزیکی کمی که در مطالعه حاضر ارائه شده و تجربه شنیداری واقعی نوازندگان و شنوندگان را برقرار خواهند کرد و در نتیجه کاربرد عملی یافته‌ها را تقویت می‌کنند. چارچوب روش‌شناختی ایجاد شده در اینجا، پایه‌ای برای ارزیابی سیستماتیک سایر متغیرهای

مورفولوژیکی در طراحی سازهای سنتی فراهم می‌کند و به حوزه وسیع‌تر آکوستیک موسیقی کمک می‌کند.

۷. منابع

- [1] Sachs, Curt. *The history of musical instruments*. Courier Corporation, 2012.
- [2] Shiloah, A. "Music in the world of Islam: A socio-cultural study." Wayne State University Press, 2001.
- [3] Peck, William H. *The material world of ancient Egypt*. Cambridge University Press, 2013.
- [4] Weinreich, Gabriel. "Cremona Violins: A Physicist's Quest for the Secrets of Stradivari." (2010): 54-55.
- [5] Johnston, Ian. *Measured tones: The interplay of physics and music*. CRC Press, 2009.
- [6] Rossing, Thomas D., ed. *The science of string instruments*. New York: Springer, 2010.
- [7] Cuzzucoli, Giuseppe, and Mario Garrone. *Classical guitar design*. Springer, 2020.
- [8] Arcadelt, J., Jones, S. S., Marini, B., Della Viola, A., & Cara, M. (1995). *The lira da braccio*. Indiana University Press.
- [9] Tavakoli Nia, Hadi. "Acoustic function of sound hole design in musical instruments." PhD diss., Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [10] Nia, Hadi T., Ankita D. Jain, Yuming Liu, Mohammad-Reza Alam, Roman Barnas, and Nicholas C. Makris. "The evolution of air resonance power efficiency in the violin and its ancestors." *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 471, no. 2175 (2015).
- [11] Lawergren, Bo, and Oliver R. Gurney. "Sound holes and geometrical figures. clues to the terminology of ancient mesopotamian harps." *Iraq* 49 (1987): 37-52.
- [12] Politzer, David. "Sound Hole Sound." *arXiv preprint arXiv:1505.04787* (2015).
- [13] Silvestri, Paolo, and Enrico Ravina. "On the vibro-acoustic characterization of two similar violas da gamba." *Applied Acoustics* 177 (2021): 107963.
- [14] Bucur, Voichita. *Handbook of materials for string musical instruments*. Springer, 2016.
- [15] Bucur, Voichita. *The acoustics of wood (1995)*. CRC press, 2017.
- [16] Spycher, Melanie, Francis WMR Schwarze, and René Steiger. "Assessment of resonance wood quality by comparing its physical and histological properties." *Wood Science and Technology* 42, no. 4 (2008): 325-342.
- [17] Jafari, Soheil, and Mohammad Mahdi Karbasbaf. "A Geometrical method for sound-hole size and location enhancement in lute family musical instruments: the golden method." In *Arts*, vol. 6, no. 4, p. 20. MDPI, 2017.

- [18] Burney, C. *The Ancient Near East*. Cornell University Press, 1977, p. 41
- [19] Meri, Josef. *Routledge revivals: Medieval islamic civilization (2006): An encyclopedia-volume I*. Routledge, 2018.
- [20] Farmer, Henry George. "The influence of music: From Arabic sources." *Proceedings of the Musical Association* 52 (1925): 89-124.
- [21] Brentjes, S., & Morrison, R. *The Sciences in Islamic Societies*. In R. Irwin (Ed.), *The New Cambridge History of Islam, Volume 4: Islamic Cultures and Societies to the End of the Eighteenth Century* (pp. 564–569). Cambridge University Press, 2010.
- [22] Sawa, George Dimitri. *Musical and Socio-Cultural Anecdotes from Kitāb al-Aghānī al-Kabīr: Annotated Translations and Commentaries*. Vol. 159. Brill, 2019.
- [23] Toshich, M. *Basics of Oud*. USA: Mel Bay, 2008, p. 5.
- [24] Broughton, S., & Ellingham, M. (Eds.). *The Rough Guide to World Music: Africa & Middle East*. Rough Guides, 2006.
- [25] Spring, Matthew. *The lute in Britain: a history of the instrument and its music*. Oxford University Press, 2001.
- [26] Bouterse, Curtis. "Reconstructing the Medieval Arabic Lute: A Reconsideration of Farmer's' Structure of the Arabic and Persian Lute'." *The Galpin Society Journal* (1979): 2-9.
- [27] Smith, D. A., *A History of the Lute from Antiquity to the Renaissance*. Lute Society of America, 2002.
- [28] Tronzo, William. *The cultures of his kingdom: Roger II and the Cappella Palatina in Palermo*. Princeton University Press, 1997.
- [29] Brend, Barbara. *Islamic art*. Harvard University Press, 1991.
- [30] Mac Carthy, Ita. "The Grace of the Italian Renaissance." (2020): 1-272.
- [31] Gossaert, Jan, Stijn Alsteens, Nadine Orenstein, and Lorne Campbell. *Man, myth, and sensual pleasures: Jan Gossart's Renaissance: the complete works*. Metropolitan Museum of Art, 2010.
- [32] Wright, David CH. *The Royal College of Music and its contexts: an artistic and social history*. Cambridge University Press, 2020.
- [33] Ciabattoni, Francesco. *Dante's journey to polyphony*. University of Toronto Press, 2015.
- [34] Montagu, Jeremy. *Origins and development of musical instruments*. Bloomsbury Publishing PLC, 2007.
- [35] Fleming, Michael Jonathan, Michael Fleming, and Christopher Page, eds. *Music and instruments of the Elizabethan age: the Eglantine Table*. Boydell & Brewer, 2021.
- [36] Moore, J. Kenneth, Jayson Kerr Dobney, and E. Bradley Strachen-Scherer. *Musical instruments: Highlights of the metropolitan museum of art*. Metropolitan Museum of Art, 2015.

- [37] Sparks, P. (2005). *The Classical Mandolin*. United Kingdom: Oxford University Press.
- [38] Weinreich, Gabriel. "Sound hole sum rule and the dipole moment of the violin." *The Journal of the Acoustical Society of America* 77, no. 2 (1985): 710-718.
- [39] Kubijovyc, Volodymyr, ed. *Encyclopedia of Ukraine: Volume I: AF Plus Map and Gazetteer*. University of Toronto Press, 1984.
- [40] Sturman, Janet, ed. *The SAGE international encyclopedia of music and culture*. Sage publications, 2019.
- [41] LEE, Sherman. "The year in review for 1980." *Bulletin of the Cleveland Museum of Art. Cleveland, Ohio* (1981): 162-219.
- [42] Mierse, William E. "Artifacts from the Ancient Silk Road." (2022): 1-462.
- [43] Levin, Theodore, Saida Daukeyeva, and Elmira Köchümkulova, eds. *The Music of Central Asia*. Indiana University Press, 2016.
- [۴۴] حسینی، هیرید. (۱۳۹۸). اصلاحات آکوستیکی سالن های کنسرت و استودیو های موسیقی، با استفاده از پنل های تشدیدگر. مجله علمی صوت و ارتعاش، ۸(۱۵)، ۴۴-۵۱.
- [۴۵] بنوشی، ایوب. (۱۳۹۶). نواک و ارتباط آن با فواصل موسیقایی. مجله علمی صوت و ارتعاش، ۶(۱۲)، ۵۷-۶۵.

پی نوشت

¹ Root mean square (RMS)

² Lute

³ Short-Necked Lute

⁴ Loudness Indicators:

شاخص های روان آکوستیکی، که بر اساس RMS و منحنی های فلچر-مانسون، بلندی درک شده را تخمین می زنند.

⁵ Alacahöyük

⁶ Helmholtz Resonator: سیستم رزونانس آکوستیکی متشکل از حجم هوای محصور با یک یا چند روزنه که در فرکانس خاصی نوسان می کند

⁷ Tonal

⁸ Bracing: شبکه ای از تیرک های چوبی در زیر صفحه صوتی که استحکام ساختاری و کنترل ارتعاشات را فراهم می کند

⁹ Lira da braccio

¹⁰ Bass Bar

¹¹ Sound Post

¹² Sonority

¹³ Mandolin

¹⁴ Rosette

¹⁵ Teorbo: نوعی لوت بلند اروپایی با گردن اضافی برای سیم های باس که در دوران باروک رایج بود

¹⁶ Clavicytherium: قدیمی ترین هارپسیکورد عمودی شناخته شده، ترکیبی از سازهای کیبوردی و زهی

¹⁷ Cantigas de Santa Maria

¹⁸ Parchment Roses: ساخته شده از پوست یا چوب که در حفره های صوتی لوت های اروپایی قرار می گرفتند

¹⁹ Gothic origins

²⁰ Kobza

²¹ Bandura

²² Gittern

-
- 23 Mendor or Mendela
24 Pipa
25 Biwa
26 Bipa
27 Liuquin
28 RT60 (Reverberation Time): زمان لازم برای کاهش ۶۰ دسی‌بلی شدت صوت پس از قطع منبع صدا، معیار استاندارد آکوستیک فضا.
29 Cardioid Pattern: الگوی برداشت صدا به شکل قلب که حساسیت بیشتری در جلو و کم‌تر در پشت میکروفون دارد.
30 Bit Depth: دقت دیجیتالی سیگنال صوتی؛ ۲۴ بیت معادل دامنه دینامیکی نظری ۱۴۴ دسی‌بل است.
31 Stereo
32 Decay Time: مدت زمانی که طول می‌کشد تا دامنه صوت به سطح معینی (معمولاً ۶۰ دسی‌بل) کاهش یابد.
33 Quarter-sawn
34 Sealing material
35 Normalized values, OR, arbitrary units
36 Mechanical plucking devices
37 Loudness
38 Sharpness
39 Spectral Centroid
40 Roughness
41 Attack Time
42 Finite element analysis (FEA)
43 Computational fluid dynamic (CFD)