

بهینه‌سازی عملکرد آکوستیک از طریق طراحی حفره‌های صوتی

مشتق شده از نسبت طلایی در سازهای زهی

محمد مهدی کرباسباف*

دانش‌آموخته دانشکده مکانیک،

دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران

karbasbaf@gmail.com

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۶/۱۳

تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۶/۲۹

چکیده

این مطالعه یک روش هندسی سیستماتیک به نام "روش طلایی" را برای بهینه‌سازی موقعیت‌یابی و اندازه‌گیری حفره صوتی در سازهای خانواده لوت با استفاده از اصول ریاضی نسبت طلایی ارائه می‌دهد. طراحی سنتی حفره صوتی عمدتاً بر رویکردهای تجربی و دانش فنی انباشته شده متکی بوده و فاقد چارچوب‌های بهینه‌سازی سیستماتیک است که بتواند ریاضیات را با کاربردهای عملی سازسازی پیوند دهد. روش پیشنهادی از ساختارهای هندسی مبتنی بر هندسه طلایی و ماریچ‌های لگاریتمی برای تعیین پارامترهای بهینه حفره صوتی از طریق روابط تناسبی مشتق شده از ابعاد صفحه صوتی استفاده می‌کند. اعتبارسنجی از طریق آنالیز آکوستیک سه ساز سه‌تار با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته پردازش سیگنال دیجیتال و پروتکل‌های اندازه‌گیری استاندارد انجام گرفته است. تجزیه و تحلیل آکوستیک حرفه‌ای شامل ویژگی‌های زمانی، خواص طیفی، محتوای هارمونیک و معیارهای کیفیت سیگنال برای ارائه توصیف کامل آکوستیک هر ساز بوده و تجزیه و تحلیل آماری پژوهش، بهبود قابل توجهی در زمان واپاشی از ۱۳ تا ۲۰ درصد، افزایش دامنه به ۳۲ درصد در معیارهای انرژی پایدار و بهبود ویژگی‌های هارمونیک با کاهش ۶۸ درصدی اعوجاج در مقایسه با طرح‌های سنتی را نشان داد. تحلیل اندازه اثر با استفاده از روش d کوهن^۱، مقادیری بین ۱/۴۵ تا ۲/۲ را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده اهمیت عملی زیاد فراتر از آستانه‌های آماری است. تحلیل پاسخ فرکانسی تأیید می‌نماید که بهبودهای آکوستیکی بدون تغییر ویژگی‌های فرکانس پایه رخ داده و ضمن حفظ ویژگی‌های ضروری تُنال، قابلیت‌های پخش صدا را نیز افزایش داده است. این روش‌شناسی، راهنمایی سیستماتیک را برای بهینه‌سازی حفره صوتی در اختیار سازندگان ساز قرار می‌دهد و در عین حال تغییرات طبیعی در مواد و تکنیک‌های سازسازی سنتی را نیز در نظر می‌گیرد و چارچوبی تکرارپذیر برای بهینه‌سازی سازهای موسیقی ایجاد می‌کند.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی نسبت طلایی، طراحی حفره صوتی، سه‌تار، بهینه‌سازی هندسی، آکوستیک موسیقی

۱. مقدمه

سازها نقش حیاتی در اجرا و کیفیت کل ارکستر ایفا می‌کند. الزامات اصلی ارکستر برای این سازها، محدوده صدای پیوسته، نواختن سریع ملودیک و ریتمیک،

سازهای زهی معمولاً بزرگ‌ترین خانواده سازی حاضر در یک ارکستر می‌باشند. بنابراین، کیفیت صدای این

* نویسنده مسئول

توانایی نواختن چندین نت موسیقی به طور همزمان و نواختن چندین آرتیکولاسیون^۲ یا جمله‌بندی مختلف است. این الزامات باید به ویژگی‌های آکوستیک تبدیل شوند تا سازندگان ساز بتوانند سازهای کاربردی‌تری ارائه دهند. یکی از این ویژگی‌ها، توانایی ساز در نگه داشتن یک نت برای مدت زمان مشخص در سطح مشخص (ویژگی‌های میرایی) است. به عبارت دیگر، هرچه زمان میرایی یک ساز زهی بیشتر باشد، محدوده صدای ساز وسیع‌تر است.

۱-۲. عود به عنوان یک عضو مهم از خانواده

سازی لوت^۳

در سازهای زهی، صفحه صوتی نقش حیاتی در عملکرد ساز ایفا می‌کند. در واقع، این عنصر مهم‌ترین تأثیر را در پاسخ فرکانسی تشدیدکننده به امواج صوتی دارد زیرا امواج صوتی را بین سیم‌ها و تشدیدکننده منتقل می‌کند. مبصری [۱] در کتاب خود از مهدی کمالیان

سازگر و نوازنده شهیر سه‌تار در مورد اهمیت نقش صفحه صوتی سه‌تار نقل می‌کند که وی معتقد بود که ثلث صدای یک سه‌تار توسط جعبه صوتی یا رزوناتور و بقیه از طریق صفحه صوتی یا ساندبورد^۴ تولید می‌شود. صفحات صوتی معمولاً حاوی دهانه‌هایی به نام حفره‌های صوتی هستند تا به سازهای آکوستیک کمک کنند صدای خود را با کارایی بیشتری پخش کنند (شکل ۱). حفره‌های صوتی در سازهای مختلف بسته به مساحت صفحه صدا، دامنه فرکانس‌های مشتق شده توسط منابع (سیم‌ها)، حجم هوای داخل جعبه صدا و سختی صفحه، اشکال و اندازه‌های مختلفی دارند. در سال ۲۰۱۵، محققان دانشگاه ام آی تی تحلیلی را منتشر کردند که نمودار تکامل و بهبود اثربخشی طراحی حفره F و یولن را در طول زمان نشان می‌داد [۳،۲]. مقاله پیش‌رو بر روی حفره‌های صوتی در سازهای خانواده لوت و تحلیل آن تمرکز خواهد کرد.



شکل ۱: ساز عود

اول پیش از میلاد [۵] در کالسیایان در شمال باکتریا (جنوب ازبکستان امروزی) یافت شده است، در حالی که تصویر واضح‌تر بریط از مجسمه گندهارا به قرن دوم تا چهارم میلادی برمی‌گردد. طبق دانشنامه ایرانیکا

بریط را می‌توان یکی از اولین نمونه‌های مهندسی شده از خانواده لوت و یکی از قدیمی‌ترین سازهای جهان دانست که احتمالاً از آسیای مرکزی سرچشمه گرفته است [۴]. قدیمی‌ترین مدارک تصویری این ساز در قرن

[۶]، این نوع ساز می‌توانسته توسط کوشان‌ها معرفی شده و بعداً توسط ایرانیان پذیرفته شده باشد. تا قرن هفتم، بربط توسط اعراب به شکل فعلی خود که عود نامیده می‌شود، توسعه یافت. بربط مدرن ایرانی تقریباً مشابه عود است، اگرچه تفاوت‌هایی شامل بدنه کوچک‌تر، دسته بلندتر و صفحه انگشت‌گذاری کمی برجسته‌تر وجود دارد.

حتی در شکل‌گیری‌های اولیه این سازها، حفره‌های صوتی به عنوان عناصر مؤثر در رفتار آکوستیکی سازها مورد توجه طراحان و سازندگان قرار گرفته است. از نظر تاریخی، کشف دقیق پیدایش حفره‌های صوتی در سازهای باستانی امکان‌پذیر نیست، اما یک بررسی وسیع تاریخی در مورد طراحی حفره‌های صوتی نشان می‌دهد که در قرون وسطی می‌توان آن‌ها را در برخی از نقاشی‌های کلاسیک (شکل ۲-الف و ۲-ب) که سازهای زهی مانند ربک، دولسیمر و سالتری را در اروپا و بربط را در ایران نشان می‌دهند، مشاهده کرد [۷]. شواهد دیگری نیز وجود دارد که حفره‌های دایره‌ای را در اجداد اولیه ویولن در قرن دهم [۸]، نیم دایره در قرن دوازدهم [۹]، هلالی در قرن سیزدهم [۱۰]، نوارهای نیم دایره در قرن سیزدهم [۱۱] و حفره‌های C در قرن‌های سیزدهم و چهاردهم [۱۲] نشان می‌دهد.

بین قرن‌های سیزدهم تا هفدهم، شکل و اندازه حفره‌های صوتی در سازهای خانواده لوت با هندسه‌های ساده دایره‌ای و بیضوی [۱۳] و در سازهای خانواده ویولن با هندسه f-شکل [۱۴، ۱۵] تقریب زده می‌شد. سازندگان ساز معمولاً خطاهای حفره‌های

صوتی را با استفاده از ضرایب برازش تجربی اصلاح می‌کردند [۱۶]. آخرین تغییرات اساسی در قرن‌های شانزدهم و هفدهم رخ داد. اندازه و شکل حفره یا به اصطلاح رزت لوت^۵ توسط وارویک هانس در سال ۱۵۴۰، وندلین تیغنبروکر در سال ۱۵۹۰، وندلیو ونر در سال ۱۵۹۲، پادوف در سال ۱۵۹۵ و سباستین شل در سال ۱۷۴۴ اصلاح شد [۱۷]. متعاقباً، شکل اصلی حفره‌های صوتی در خانواده‌های ویولن و لوت تقریباً بدون تغییر باقی ماند. در قرن‌های اخیر، مطالعات در مورد مبانی رزونانس هوا با کاربرد در سازهای موسیقی توسط ساوارت [۱۸]، فون هلمهولتز [۱۹، ۲۰]، رایلی [۲۱]، لمب [۲۲] و مک‌فرسون [۲۳] آغاز شد. با این حال، با توجه به گفته توکلی نیا [۲۴]، «دانش طراحی در چنین حفره‌های صوتی که در طول زمان انباشته شده‌اند، هنوز کشف نشده است». در سال ۲۰۱۱، توکلی نیا شروع به تحلیل حفره‌های صوتی و مفهوم پشت طراحی هندسی آن‌ها کرد. او نشان داد که ظهور حفره‌های صوتی دایره‌ای در خانواده لوت به دلیل عبور اکثر جریان هوا از ناحیه نزدیک لبه دهانه است [۲۴]. او به طور جامع این حوزه را بررسی کرد و در نهایت به این نتیجه رسید که رویکرد او می‌تواند نقطه شروع خوبی برای اصلاح سازها برای نوازندگان و سازندگان ساز باشد.

پارامترهای متعددی وجود دارند که بر ویژگی‌های آکوستیک یک ساز تأثیر می‌گذارند (مثلاً جنس، سن ساز و چوب مورد استفاده، آب و هوا، روش و مکانیسم ساخت، هندسه و غیره). همه پارامترهای ذکر شده در



شکل ۲. الف) نقاشی‌های کلاسیک اروپا که به عنوان مدارکی مهم که حفره‌های صوتی در سازهای موسیقی را نشان می‌دهند. موقعیت حفره‌های صوتی با رنگ تیره‌تر مشخص شده است. این شکل نیز به نوعی توسعه حفره‌های صوتی را در خانواده‌های سازی نمایش می‌دهد.



شکل ۲. ب) مینیاتورهای مربوط به ادوار مختلف در بلاد اسلامی که به خوبی حفره‌های صوتی در آن‌ها پیداست که حاکی از شناخت آن‌ها نسبت به اهمیت نقش حفره‌های صوتی در صفحات صوتی عودها از دیرباز است.

تحقیقات و امکانات جامع برای اهداف بررسی دارند. با این حال، پارامترهای دیگر مانند طراحی هندسی و روش و مکانیسم ساخت وابسته به زمان نیستند و می‌توان آن‌ها را راحت‌تر مطالعه کرد.

بالا می‌توانند بر رفتار، کیفیت و قابلیت‌های ساز تأثیر بگذارند. برخی از آن‌ها، مانند جنس، سن، چوب و آب و هوا، شاخص‌های پویا هستند و در طول زمان در معرض تغییر و یا زوال قرار می‌گیرند و بنابراین نیاز به

۱-۲. پیشینه نظری

بهینه‌سازی حفره صدا در سازهای موسیقی شامل تعاملات پیچیده بین رزونانس هوا، ارتعاش صفحه صدا و آکوستیک حفره است. عملکرد آکوستیک از اصول رزوناتور هلمهولتز^۶ پیروی می‌کند، که در آن طول و سطح مقطع مؤثر حفره صدا، فرکانس رزونانس را تعیین می‌کند:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V(L_{\text{eff}} + \Delta L)}} \quad (1)$$

که در آن:

c = سرعت صدا

A = مساحت مؤثر حفره صدا

V = حجم حفره هوای داخلی

L_{eff} = طول مؤثر حفره صدا

ΔL = ضریب تصحیح انتهایی

بهینه‌سازی هندسی به دنبال به حداکثر رساندن راندمان صوتی در عین حفظ ویژگی‌های فرکانسی مطلوب است.

۲-۲. مبانی ریاضی

نسبت طلایی ϕ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\phi = \frac{1+\sqrt{5}}{2} \approx 1.618033988 \dots \quad (2)$$

برای هر مستطیل طلایی با اضلاع a و b که در آن

$$a > b$$

$$\frac{a}{b} = \phi = \frac{a+b}{a} \quad (3)$$

مارپیچ طلایی مربوطه از معادله مارپیچ لگاریتمی پیروی می‌کند:

$$r = a e^{q\theta} \quad (4)$$

که در آن q ضریب رشد برابر است با:

$$q = \ln(\phi) / \pi \approx 0.1489795 \quad (5)$$

اگرچه کل رفتار یک ساز نتیجه‌ی برهم‌نهی اثرات تمام پارامترها است، این مقاله، به عنوان اولین گام، بر تأثیر طراحی و محل قرارگیری حفره صوتی بر توانایی ساز در حفظ نت تمرکز خواهد کرد که می‌تواند ویژگی‌های ارکستری سازهای زهی را افزایش دهد. از آنجایی که حفره دایره‌ای بر اساس ادبیات و به ویژه گزارش محققان ام‌آی‌تی [۲۴] به عنوان شکل بهینه برای خانواده‌ی لوت اثبات شده است، فرض بر این است که دایره شکل بهینه است و فقط اندازه و محل آن مورد بحث قرار خواهد گرفت. برای این منظور، یک رویکرد تحلیلی مبتنی بر هندسه‌ی ساز، مفهوم نسبت طلایی و روابط متناسب مستند شده آن‌ها با استفاده از چندین سال تجربه و مطالعات دانشگاهی نویسندگان در زمینه‌های بهینه‌سازی و ساخت سازهای موسیقی ارائه شده است. این روش توسط نویسنده این سطور روش طلایی نامیده می‌شود.

۱. این روش در بخش ۲ مقاله به صورت نمودار جریانی جزء به جزء شرح داده شده است.

۲. دو الگوی ساز مشهور با این رویکرد به عنوان مطالعات موردی بررسی خواهند شد تا اثربخشی روش طلایی نشان داده شود.

۳. یک ساز جدید با استفاده از روش پیشنهادی ساخته خواهد شد و قابلیت میرایی آن با دو ساز شناخته شده مقایسه می‌شود تا اثربخشی روش طلایی در بهینه‌سازی اندازه و مکان حفره صوتی در سازهای خانواده لوت از دیدگاه میرایی تأیید شود.

۲. روش شناسی

اصول بهینه‌سازی آکوستیکی زیربنای روش طلایی از روابط تثبیت‌شده بین تناسبات هندسی و راندمان سیستم رزونانس در سازهای موسیقی ناشی می‌شود. بهینه‌سازی سوراخ صدا شامل تعاملات پیچیده بین رزونانس حفره هوا، کوپلینگ ارتعاش صفحه صدا و راندمان تابش آکوستیک است، و پارامترهای هندسی به طور قابل توجهی بر این پدیده‌های جفت‌شده تأثیر می‌گذارند. رابطه رزونانس هلمهولتز چارچوب اساسی برای درک عملکرد آکوستیک سوراخ صدا را فراهم می‌کند، که در آن فرکانس رزونانس به مساحت مؤثر سوراخ صدا، حجم حفره داخلی و طول مؤثر شامل اصلاحات انتهایی بستگی دارد [۲۵].

خواص ریاضی نسبت طلایی، روابط متناسب سیستماتیکی را ارائه می‌دهند که می‌توانند برای تعیین پارامترهای هندسی بهینه و در عین حال حفظ سازگاری با زیبایی‌شناسی و شیوه‌های ساخت سازهای سنتی اعمال شوند. روش‌شناسی ساختار هندسی از این روابط متناسب برای تعیین موقعیت و اندازه سوراخ‌های صدا استفاده می‌کند که ضمن حفظ ویژگی‌های فرکانسی ضروری و خواص تُنال، راندمان کوپلینگ آکوستیک را افزایش می‌دهد. بهینه‌سازی کوپلینگ آکوستیک به دنبال به حداکثر رساندن راندمان انتقال انرژی از ارتعاش سیم از طریق پاسخ صفحه صدا به تابش آکوستیک است، و پارامترهای سوراخ صدا نقش‌های حیاتی در این زنجیره انتقال انرژی ایفا می‌کنند. رویکرد بهینه‌سازی هندسی، هم کوپلینگ رزونانس اولیه و هم اثرات آکوستیک ثانویه از جمله دینامیک جریان هوا و پدیده‌های برهم‌کنش رزونانس را که بر ویژگی‌های کلی عملکرد آکوستیک تأثیر می‌گذارند، مورد توجه قرار می‌دهد.

۲-۳. پروتکل ساخت هندسی

مفهوم نسبت طلایی برای اولین بار در اینجا برای طراحی اندازه و محل حفره صوتی در سازهای موسیقی خانواده لوت به منظور افزایش قابلیت میرایی استفاده شده است. ادعا شده است که پیشینه بهره‌مندی از نسبت طلایی نزد صنعتگران به حداقل ۲۴۰۰ سال می‌رسد. نسبت طلایی ($\phi = 1.618$) به دلیل خواص ریاضی و کاربردهایش در رشته‌های مختلف به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. تحقیقات قبلی کاربرد آن را در بهینه‌سازی طراحی آکوستیک نشان داده است [۲۶، ۲۸، ۲۷]. تاکاوا در سال ۲۰۰۸ یک طبل با حفره‌های تهویه هوای بهینه با استفاده از نسبت طلایی اختراع کرد و کینگ یک سری مطالعات تحقیقاتی جامع در مورد مکان‌یابی محل حفره‌های ویولن استرادیواری با استفاده از نسبت طلایی ارائه داد. نویسندگان چندین ساعت را صرف تحلیل، مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرضیات مختلف و فرایند تولید کردند تا حفره‌های صوتی بهینه برای سازهای موسیقی خاص را برای تعیین حداکثر قابلیت تابش صدا پیدا کنند. نتایج تمام روش‌های تحلیلی و آزمون و خطا در اینجا با عنوان "روش طلایی" خلاصه شده است.

فرضیات مورد استفاده برای این روش عبارتند از: الف. حفره صوتی دایره‌ای شکل به عنوان فرم بهینه برای خانواده لوت (بر اساس ادبیات) در نظر گرفته شده است.

ب. خواص مواد و مکانیکی ساز به دلیل ماهیت شاخص دینامیکی آن‌ها در این مقاله مورد بحث قرار نمی‌گیرد. این پارامترها را می‌توان در یک کار تحقیقاتی مستقل جداگانه بررسی کرد.

ج. هدف اصلی روش پیشنهادی، افزایش قابلیت حفظ نت موسیقی ساز برای بررسی ارکسترال است.

علاوه بر این، بدون از دست دادن کلیت، اساساً از لوت برای توصیف این روش استفاده می‌شود، زیرا سازی مشهور در سطح جهانی است. با این حال، این روش دقیقاً برای همه سازهای موسیقی خانواده لوت یکسان است.

روش طلائی برای یک لوت حرفه‌ای ارائه شده است: در یک ساز از خانواده لوت، برای بهینه‌سازی محل و اندازه حفره‌های صوتی (یا بررسی بهینه‌سازی حفره صوتی) از نقطه نظر قابلیت میرایی، مراحل زیر را انجام دهید:

۱. مستطیل ABCD را که صفحه صدای ساز را پوشانده و بر آن مماس است، همانطور که در شکل (۳-الف) نشان داده شده است، رسم کنید.

۲. مستطیل طلائی و مارپیچ لگاریتمی آن را از یک طرف ABCD همانطور که در شکل (۳-ب) نشان داده شده است، رسم کنید. جزئیات کامل در مورد نحوه رسم چنین مستطیل و مارپیچ طلائی بسیار ساده است و می‌توان آن را در [۳۰، ۲۹] یافت.

۳. مرحله ۲ را از طرف دیگر ABCD همانطور که در شکل (۳-ج) نشان داده شده است تکرار کنید و مستطیل طلائی و مارپیچ لگاریتمی دیگری را که منعکس کننده مراحل ۲ است، رسم کنید.

۴. یک دایره C_1 مماس بر ۳ خط AB، BD و CD همانطور که در شکل (۴-الف) نشان داده شده است، رسم کنید.

۵. اولین دایره طلائی C_2 را طوری رسم کنید که:

- قطرهای عمودی و رأس بالایی دو دایره مشترک هستند.
- نسبت دو قطر:

$$\frac{d_1}{d_2} = 1.618 = \varphi$$

روابط قطر برای دایره‌های طلائی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

- قطر دایره C_1 توسط هندسه صفحه صوتی تعیین شده است؛

$$d_2 = \frac{d_1}{\varphi} \quad \text{- قطر دایره } C_2 :$$

- قطر دایره C_3 :

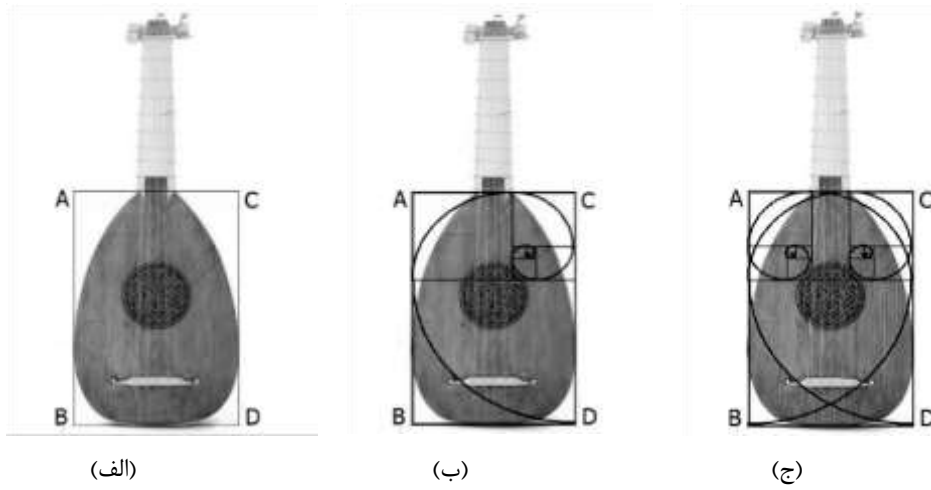
$$d_3 = \frac{d_2}{\varphi} = \frac{d_1}{\varphi^2}$$

معیار موقعیت‌یابی مستلزم آن است که C_3 به طور همزمان:

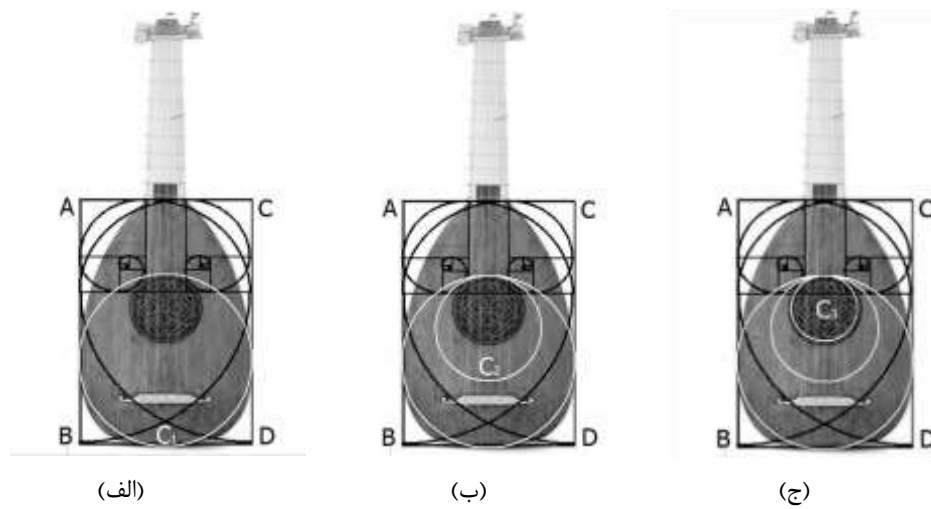
- الف. مماس با هر دو مارپیچ طلائی را حفظ کند.
- ب. هم‌ترازی قطر عمودی را با C_1 و C_2 حفظ کند.
- ج) مقیاس‌بندی متناسب $d_3 = \frac{d_1}{\varphi^2}$ را برآورده کند.

۶. دایره طلائی دوم C_3 را رسم کنید؛ این دایره مانند C_2 رسم می‌شود. اما C_3 باید از شرایط ذکر شده برای C_2 پیروی کند (شکل ۴-ج).

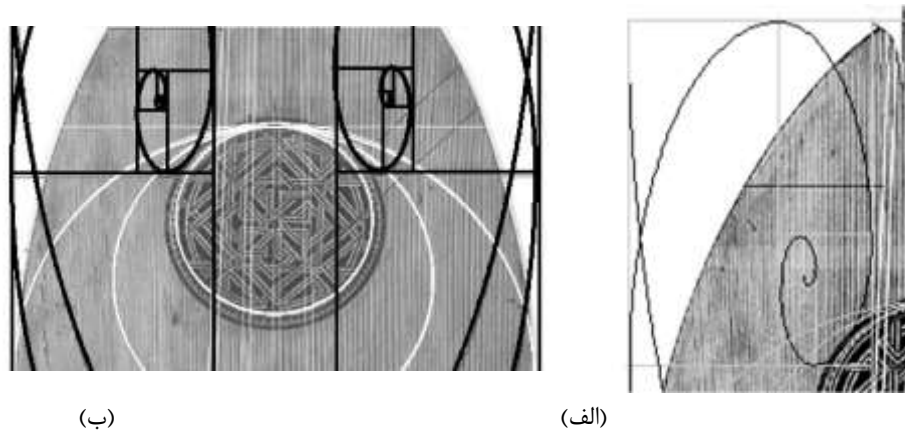
۷. حال، اگر C_3 دو مارپیچ طلائی را لمس کند (شکل ۵-الف)، این می‌تواند مکان و اندازه دقیق حفره صوتی بهینه شده را پیدا کند.



شکل ۳. الف) مرحله اول: مستطیل مماس، ب) مرحله دوم: اولین مارپیچ طلایی، ج) مرحله سوم: دومین مارپیچ طلایی



شکل ۴. الف) مرحله چهارم: دایره C_۱، ب) مرحله پنجم: اولین دایره طلایی، ج) مرحله ششم: دومین دایره طلایی.



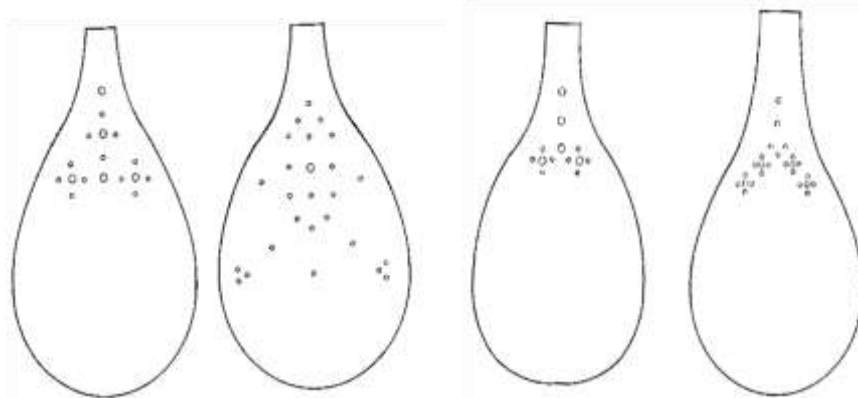
شکل ۵. الف) مرحله هفتم: بررسی وضعیت، ب) اندازه و محل بهینه حفره صوتی.

توجه: به ندرت اتفاق می‌افتد که در یک صفحه صدای بیضی شکل (با هندسه و تناسب تقریباً صحیح) دایره طلایی دوم با مارپیچ‌های طلایی تماس نداشته باشد و از این روش طلایی پیروی نکند. توجه داشته باشید که C_3 معمولاً با مارپیچ‌های موجود در مستطیل طلایی چهارم (شکل ۵-ب) تماس دارد. در شکل ۵-ب می‌توان دید که C_3 دقیقاً بر روی حفره‌های صوتی لوت ساخته شده مماس است. به این ترتیب، می‌توان حفره صوتی هر ساز خانواده لوت را با رابطه بین هندسه و نسبت طلایی بهینه کرد یا فرایند تولید را از نظر طراحی و مکان حفره صوتی ارزیابی کرد.

۳. ارزیابی تجربی

به منظور تأیید اثربخشی روش طلایی پیشنهادی، یک مطالعه موردی تجربی در این بخش ارائه شده است. سه‌تار به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است. سه‌تار (از سه به معنی "سه" و تار به معنی "زه") یک ساز موسیقایی ایرانی است. این ساز عضوی از خانواده لوت‌های دسته بلند یا تنبورها است که معمولاً با انگشت اشاره دست راست نواخته می‌شود. دو قرن و نیم پیش، یک سیم چهارم به سه‌تار اضافه شد [۳۱]. این ساز دارای ۲۵ تا ۲۷ پرده متحرک است که معمولاً

از روده حیوانات یا ابریشم ساخته می‌شوند. این ساز قبل از گسترش اسلام در ایران سرچشمه گرفته است. سازندگان سه‌تار معتقدند که حفره‌های صوتی ساز را تنظیم می‌کنند. معمولاً پس از تراشیدن نهایی صفحه صدا، حفره‌ها را پانچ می‌کنند. بررسی چندین الگوی سه‌تار نشان می‌دهد که هیچ الگوی ثابتی برای ساخت حفره‌های صوتی وجود ندارد؛ سازندگان سه‌تار الگوی خود را بر اساس روش و تجربه خود طراحی می‌کنند. سازندگان معمولاً محل حفره اصلی را با استفاده از یک دیاپازون در نت $A = 440$ هرتز پیدا می‌کنند. به این ترتیب، دیاپازون را می‌لرزانند، آن را روی ناحیه خرد قرار می‌دهند و آن را به سمت گردن حرکت می‌دهند. نقطه‌ای که صدا به اوج خود می‌رسد علامت‌گذاری می‌شود و این روش چندین بار تکرار می‌شود تا محل حفره اصلی صدا دقیقاً مشخص شود. سازندگان یک حفره ۵ میلی‌متری ایجاد می‌کنند و حفره‌های دیگر باید در امتداد محیط این حفره باشند [۳۲]. برخی از محققان ادعا می‌کنند که فرکانس رزونانس هوای اصلی را می‌توان با برهم‌نهی خطی اثر هر حفره تقریب زد [۱۵، ۲۶]. برخی از انواع مرسوم الگوهای حفره‌های صوتی سه‌تار در شکل ۶ نشان داده شده است



شکل ۶. انواع مرسوم الگوهای حفره صوتی سه‌تار

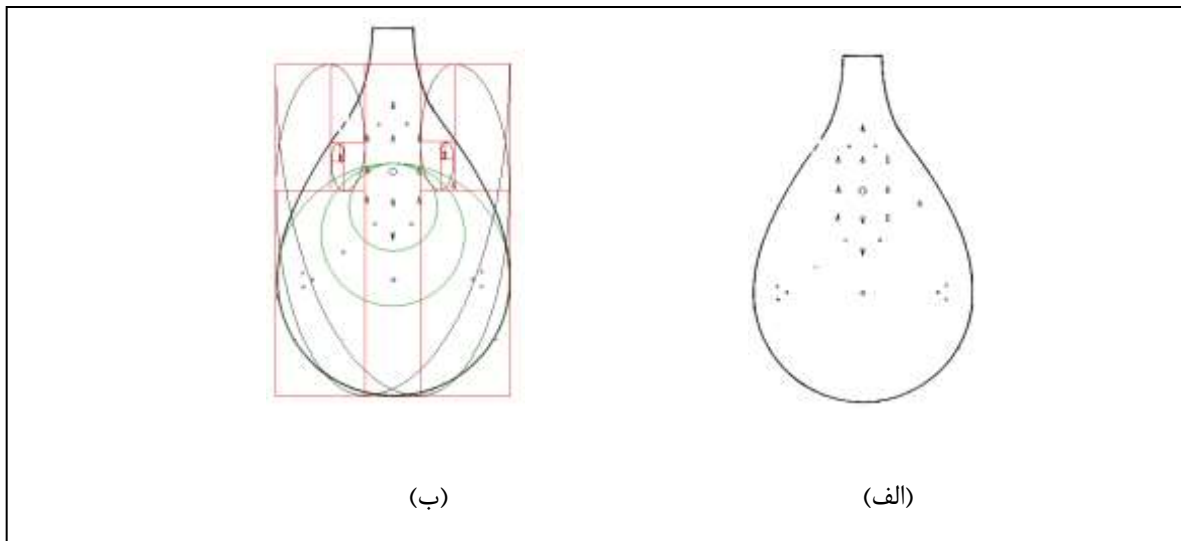
برای مقایسه، دو الگوی سه‌تار مشهور در این مطالعه انتخاب شده‌اند:

۳-۱. مطالعه موردی اول: دلربا

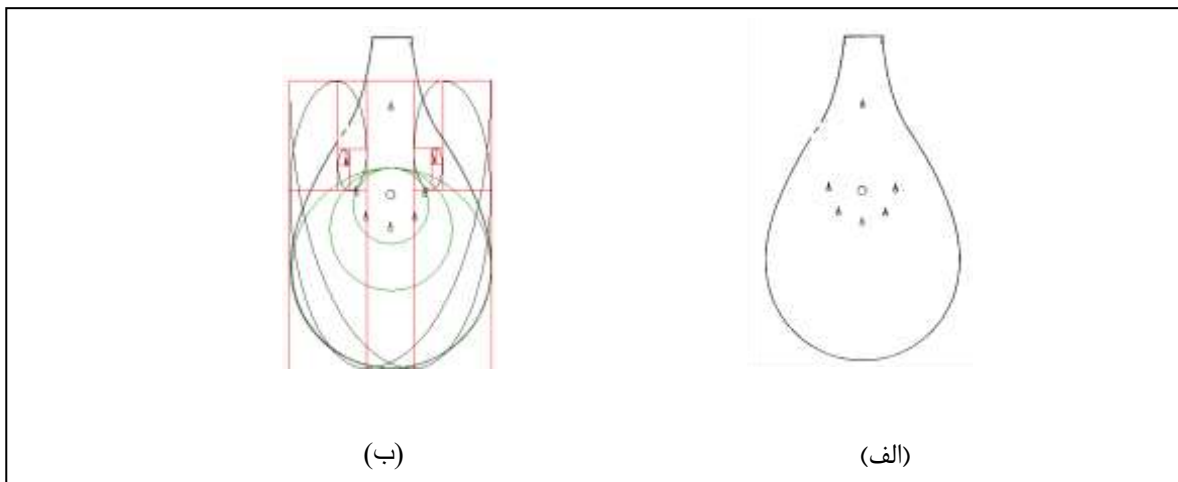
اولین الگو دلربا نام دارد که در شکل ۷ نشان داده شده است و توسط استاد مهدی کمالیان (۱۹۹۷-۱۹۱۸) سازگر شهیر و نوازنده سازهای سنتی طراحی شده و نمونه‌ای به خوبی حفظ شده از آثار اوست. در اینجا، ما

طرح الگوی کانال هوای دلربا را برای بهینه‌سازی حفره‌های صوتی با استفاده از روش طلایی تحلیل می‌کنیم.

با استفاده از روش طلایی شرح داده شده در بخش ۲، الگوی دلربا به دست می‌آید که در شکل ۷-ب نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، حفره‌های میانی و همچنین حفره اصلی در داخل دایره طلایی قرار دارند.



شکل ۷. الف) الگوی دلربا، ب) کاربرد روش طلایی در دلربا



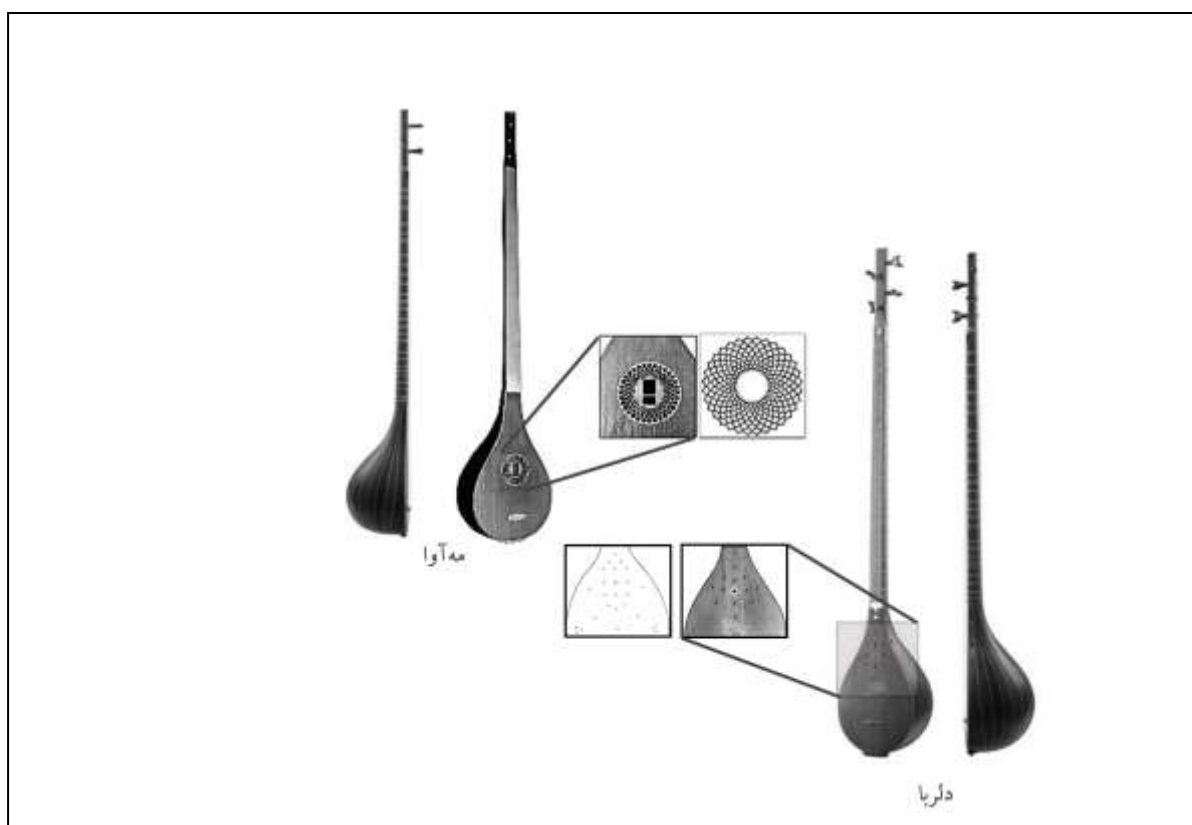
شکل ۸. الف) الگوی عشقی، ب) کاربرد روش طلایی در مورد عشقی.

۲-۳. مطالعه موردی دوم: عشقی

مطالعه موردی دوم، الگوی عشقی اثر استاد بزرگ محمد نوایی (۱۹۰۳-۱۹۸۷) معروف به عشقی سازگر بزرگ ایرانی است. برخی استادان سه‌تار سازی معتقدند که این الگوی حفره، بهینه‌ترین الگوی قدمایی است که تاکنون طراحی و اجرا شده است. این مدل حفره‌های کم‌تری نسبت به دلربا دارد. توجه داشته باشید که تمام حفره‌های عشقی همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، در دایره طلایی قرار دارند.

۳-۳. مطالعه موردی سوم: مه‌آوا

در نهایت، به منظور اثبات اثربخشی روش طلایی در افزایش قابلیت انتشار صدا، یک ساز جدید با حفره‌های صوتی بهینه شده برای مقایسه با سازهای ذکر شده در بالا توسعه داده شد. ما این ساز را مه‌آوا نامیدیم. شایان ذکر است که دلربا، عشقی و مه‌آوا از نظر اندازه حفره صوتی اصلی (شکل ۹)، محل و الگوی آن تقریباً یکسان هستند تا مقایسه منصفانه‌ای تضمین شود.



شکل ۹. مقایسه‌ی مه‌آوا و دلربا.

۴. روش تحقیق

سازهای مورد بحث انجام شد تا توانایی روش طلایی در بهینه‌سازی محل قرارگیری و اندازه‌ی حفره صوتی

پس از توسعه‌ی مه‌آوا، آزمایش‌های تجربی روی تمام

تأیید شود. روش آزمایش عبارت بود از استخراج نت یکسان در تمام سازها و ثبت پاسخ تا رسیدن به صفر تا قابلیت میرایی صدا در سازها.

روش طلایی، راهنمایی سیستماتیکی را برای سازندگان سازهای زهی امروزه جهت بهینه‌سازی سوراخ صدا، ضمن رعایت اصول صنعت سازگری و ساخت سنتی و تطبیق با تغییرات مواد (متریال) طبیعی سازها، فراهم می‌کند. همچنین روشی است برای مطالعه تطبیقی و ریخت شناسانه سازهای قدیمی و موزه‌های مشهور توسط پژوهشگران این امر. سعی شده که در این روش روابط تناسبی به طور مناسب با اندازه‌های مختلف ساز و ابعاد صفحه صوتی مقیاس‌بندی شوند و این رویکرد را در میان سازهای خانواده لوت قابل اجرا کنند. یکی از مهم‌ترین اهداف این مطالعه، تلاش برای توسعه و ارائه رویه ساده آزمایش آکوستیکی است که امید است این تکنیک و روش بهینه‌سازی آن توسط سازگران و پژوهشگران محترم، توسعه، تکامل و گسترش داده شود.

۴-۱. سیستم جمع‌آوری داده‌ها

میکروفون‌های یکسان با الگوی قطبی کاردیوئیدی رود NT1000^۷ در رئوس و قسمت جلویی نمونه‌ها قرار گرفته و مستقیماً به سمت داخل قرار گرفتند. موقعیت میکروفون طوری تنظیم شد که دقیقاً ۱۸ اینچ (۴۵/۷۲ سانتی‌متر) بین میکروفون و نمونه فاصله باشد؛ محور به سمت رأس مخالف در آرایه تنظیم شده بود. آرایه در مرکز (نزدیک کف) یک استودیوی ۸ × ۶ × ۳ متری معلق بود. میکروفون‌ها از طریق پیش‌تقویت‌کننده‌هایی با پاسخ فرکانسی مسطح به یک کارت صدای فوکوسرایت مدل Scarlett 6i6^۸ هدایت شدند. تمام مسیره‌های سیگنال میکروفون با استفاده از یک مولد

صدای آزمایشی تا دقت ۱ دسی‌بل نرمال‌سازی شدند. تمام اندازه‌گیری‌ها در یک محیط آکوستیک کنترل‌شده ($RT60 = 0.3s$ ، نویز محیط $> 30 dB$) با استفاده از تجهیزات ضبط یکسان که پیش از این ذکر شد، انجام گرفت. سیم‌ها در تمام سازها استاندارد شدند و قبل از آزمایش تعویض شدند.

۴-۲. روش آزمایش

مسئله اصلی در روش آزمایش این بود که هیچ کنترلی بر نیروی ضربه وارده به سیم وجود نداشت. در واقع، به راحتی می‌توان تصور کرد که هر چه ضربه محکم‌تر باشد، صدا بلندتر است و مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا صدا از بین برود؛ این مشکل بر نتایج تحلیل تأثیر می‌گذارد. برای جلوگیری از این مسئله، سه نوازنده که از هدف تحقیق آگاه نبودند انتخاب شدند و آزمایش‌ها توسط آن‌ها انجام شد [۳۳]. سپس، مجموعه‌ای از پاسخ‌های ضربه‌ای "کامل" بر اساس سیگنال تحریک انتخاب شدند. این کار با حذف هرگونه ضربه چکش دوتایی، حذف هرگونه ضربتی که محقق در طول آزمایش اظهار داشت که ضربه بد است، و در نهایت انتخاب از بین احتمالات باقی مانده، ضربه چکش نیرو با باریک‌ترین و بلندترین قله انجام شد [۳۴، ۳۵]. سیگنال‌های انتخاب شده به صورت دیجیتالی برای تحلیل به رایانه منتقل شدند. آزمایش روی سیم سوم نمونه‌ها که روی ۴۴۰ هرتز تنظیم شده بود، انجام شد. سیم سوم از برنز فسفر یا برنج ساخته شده بود. حداقل استحکام کششی آن ۹۰۰ نیوتن بر میلی‌متر مربع است. قطر سیم سوم سه‌تار ایرانی معمولاً ۰/۰۲ میلی‌متر ضخیم‌تر از سیم‌های فولادی است. (قطر سیم‌های فولادی معمولاً ۰/۲ میلی‌متر و ضخامت سیم‌های

برنزی ۰/۲۲ میلی‌متر است).

هر ساز تحت آزمایش آکوستیک استاندارد تحت شرایط کنترل شده قرار گرفت. پروتکل آزمایش شامل موارد زیر بود:

۱. کنترل محیطی: تمام آزمایش‌ها در یک استودیوی ۳×۶×۸ متر با دمای ثابت (20 ± 2 درجه سانتی‌گراد) و رطوبت ($45 \pm 5\%$ RH) انجام شد.

۲. روش تحریک: سازها با استفاده از تکنیک استاندارد کندن با نیرو و مکان ثابت روی سیم اول تحریک شدند.

۳. پروتکل اندازه‌گیری:

- حداقل ۱۰ تکرار برای هر ساز

- آزمایش با ترتیب تصادفی برای به حداقل رساندن بایاس سیستماتیک

- فواصل ۶۰ ثانیه‌ای بین اندازه‌گیری‌ها

- نظارت بر نویز پس‌زمینه (کمتر از ۳۰ دسی‌بل SPL)

این پژوهش از تحلیل‌های آکوستیکی حاصل از به‌کارگیری تکنیک‌های حرفه‌ای پردازش سیگنال دیجیتال بهره می‌برد که از طریق الگوریتم‌های سفارشی مبتنی بر پایتون، طراحی شده برای توصیف سازهای موسیقی و آکوستیک موسیقایی، پیاده‌سازی شده‌اند. زنجیره‌ی پردازش سیگنال شامل چندین رویکرد تحلیلی برای استخراج پارامترهای آکوستیکی دقیق از ضبط‌های صوتی با وضوح بالا بود. افزون بر این، چارچوب آماری پژوهش، ارزیابی مناسبی از اهمیت اندازه‌گیری‌ها را تضمین می‌کرد و هم‌زمان تغییرات طبیعی در ویژگی‌های آکوستیکی ذاتی

سازهای سنتی را در نظر می‌گرفت.

۵. نتایج و تحلیل

عوامل متعددی ممکن است بر تفسیر نتایج ارائه شده در این مطالعه تأثیر بگذارند. اول، عدم قطعیت اندازه‌گیری از منابع مختلفی از جمله دقت موقعیت‌یابی میکروفون ($2 \pm$ میلی‌متر)، تغییرات محیطی و نویز الکترونیکی ناشی می‌شود که منجر به عدم قطعیت کلی تخمینی $3 \pm\%$ می‌شود. دوم، متغیرهای ساختاری مانند تفاوت در خواص چوب، پرداخت، کشش سیم و قدمت بین سازها، عوامل کنترل‌نشده‌ای را معرفی می‌کنند که ممکن است صرف نظر از هندسه حفره صوتی، به طور مستقل بر عملکرد آکوستیک تأثیر بگذارند. علاوه بر این، محدودیت نمونه فقط سه ساز، شواهد اولیه‌ای را ارائه می‌دهد که نیاز به گسترش برای نتیجه‌گیری‌های آماری قوی‌تر را ضروری می‌سازد. در نهایت، عوامل زمانی، از جمله قدمت ساز و آماده‌سازی سیم، در تمام نمونه‌ها استاندارد نشده‌اند و به طور بالقوه ممکن است بر ثبات نتایج تأثیر گذارند.

تحلیل آکوستیک این پژوهش از تکنیک‌های پیشرفته پردازش سیگنال دیجیتال برای استخراج پارامترهای آکوستیک دقیق از ضبط‌های استاندارد سه ساز سه‌تار استفاده کرد [۳۶]. این تحلیل شامل ویژگی‌های زمانی شامل ویژگی‌های حمله^{۱۰} و واپاشی^{۱۱}، محتوای طیفی در محدوده فرکانس قابل شنیدن، تحلیل ساختار هارمونیک و ارزیابی کیفیت سیگنال [۳۷] برای ارائه توصیف کامل آکوستیک هر ساز بود (جدول ۱).

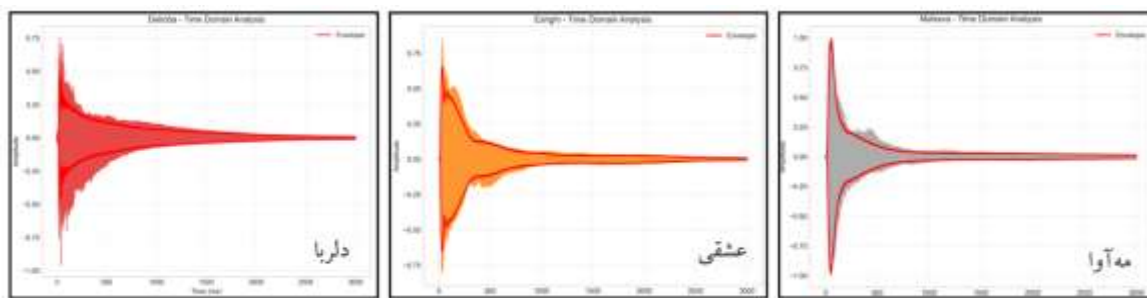
جدول ۱. تحلیل عملکرد صوتی

معنی داری آماری	مه آوا	عشقی	دلربا	پارامتر
				معیارهای اصلی عملکرد
$p < 0/01^{**}$	$1000 \pm 0/018$	$0/855 \pm 0/012$	$0/963 \pm 0/015$	حداکثر دامنه ^{۱۲}
$p < 0/01^{**}$	$0/0540 \pm 0/005$	$0/0456 \pm 0/004$	$0/0407 \pm 0/003$	RMS دامنه ^{۱۳}
$p < 0/01^{**}$	5652 ± 142	4697 ± 115	4990 ± 127	زمان واپاشی (میلی ثانیه) T60
$p < 0/05^*$	$44/9 \pm 2/1$	$40/6 \pm 1/5$	$42/9 \pm 1/8$	زمان اوج (میلی ثانیه)
				ویژگی‌های زمانی
$p < 0/01^{**}$	$23/51 \pm 1/15$	$11/59 \pm 0/82$	$5/67 \pm 0/45$	زمان حمله (میلی ثانیه)
$p < 0/01^{**}$	$53/4 \pm 3/8$	$47/8 \pm 3/2$	$18/8 \pm 2/1$	زمان پایداری (میلی ثانیه)
$p < 0/01^{**}$	$0/086 \pm 0/011$	$0/016 \pm 0/003$	$0/060 \pm 0/008$	سطح پایداری ^{۱۴} (%)
				ویژگی‌های طیفی
n.s. ¹⁵	$387/6 \pm 2/3$	$387/6 \pm 1/8$	$387/6 \pm 2/1$	فرکانس غالب (هرتز)
$p < 0/01^{**}$	492 ± 18	441 ± 15	1102 ± 34	مرکز طیفی (هرتز)
$p < 0/01^{**}$	608 ± 28	512 ± 23	1992 ± 67	پهنای باند طیفی (هرتز)
				کیفیت سیگنال
$p < 0/01^{**}$	$11/6 \pm 0/9$	$7/9 \pm 1/1$	$8/2 \pm 3/2$	THD (%)

- حداکثر دامنه^{۱۶}: بالاترین سطح فشار صدای اندازه‌گیری شده، که نشان‌دهنده اوج بلندی سیگنال است. مقادیر به صورت میانگین \pm انحراف معیار ارائه می‌شوند.
- دامنه RMS^{۱۷}: جذر میانگین مربعات دامنه، میانگین توان سیگنال صوتی را در طول زمان نشان می‌دهد و معیاری از بلندی درک شده را ارائه می‌دهد.
- زمان واپاشی T60 (میلی ثانیه): مدت زمانی که طول می‌کشد تا سطح دامنه صدا پس از توقف منبع، ۶۰ دسی‌بل کاهش یابد، که نشان‌دهنده ویژگی‌های طنین فضا است.
- زمان اوج^{۱۸} (میلی ثانیه): مدت زمانی که طول می‌کشد تا صدا پس از تحریک به حداکثر دامنه خود برسد، که برای درک پاسخ اولیه سیگنال مهم است.

- **زمان حمله^{۱۹} (میلی ثانیه):** مدت زمانی که طول می‌کشد تا صدا از سکوت به حداکثر سطح خود برسد و بر درک شروع صدا تأثیر بگذارد.
- **زمان پایداری^{۲۰} (میلی ثانیه):** دوره‌ای که طی آن سطح صدا پس از حمله اولیه ثابت می‌ماند و به مدت کلی صدا کمک می‌کند.
- **سطح پایداری^{۲۱}:** دامنه صدا در طول مرحله پایداری، که نشان دهنده میزان بلندی صدا پس از حمله است.
- **فرکانس غالب^{۲۲}:** فرکانسی که صدا در آن بیشترین دامنه را دارد و نشان‌دهنده زیر و بمی اولیه سیگنال است.
- **مرکز طیفی^{۲۳}:** معیاری از مرکز جرم طیف، که نشان‌دهنده روشنایی یا رنگ صدا است. گاهی اوقات مرکز جرم طیفی هم نامیده می‌شود.
- **پهنای باند طیفی^{۲۴}:** محدوده فرکانس‌های موجود در صدا که بر طنین و بافت تأثیر می‌گذارد.
- **اعوجاج هارمونیک کل^{۲۵}:** اندازه‌گیری اعوجاج موجود در یک سیگنال نسبت به فرکانس پایه، که مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده بازتولید صدای تمیزتر است.
- **Values** $*p < 0.05$, $**p < 0.01$ ²⁶; represent mean \pm standard deviation (n=10 measurements per instrument)

تحلیل دامنه زمانی^{۲۷} تفاوت‌های قابل توجهی را در ویژگی‌های واپاشی بین سازها نشان می‌دهد. زمان واپاشی T60، که نشان دهنده مدت زمان لازم برای کاهش سطح صدا به میزان ۶۰ دسی‌بل از دامنه اوج است، نشان می‌دهد که ساز مه‌آوا به ۵۶۵۲ میلی‌ثانیه در مقایسه با ۴۶۹۷ میلی‌ثانیه برای عشقی و ۴۹۹۰ میلی‌ثانیه برای دلربا دست یافته است. این پیشرفت‌ها به ترتیب بیست درصد و سیزده درصد نشان دهنده افزایش قابل توجه در قابلیت حفظ نت است که مستقیماً از عملکرد بهبود یافته در زمینه‌های گروهی که خطوط ملودیک پایدار نیاز به پخش آکوستیک گسترده دارند، پشتیبانی می‌کند.



شکل ۱۰. تحلیل آکوستیکی برای هر الگوی سازی. در این شکل، روند بهینه دامنه-زمان در مه‌آوا نسبت به دو ساز دیگر مشاهده می‌شود.

تحلیل دامنه، ویژگی‌های بهبود یافته پخش آکوستیک را در ساز بهینه شده با روش طلایی نشان می‌دهد. اندازه‌گیری‌های حداکثر دامنه نشان می‌دهد که مه‌آوا به سطوح اوج نرمال‌شده ۱۰۰۰۰ در مقایسه با ۸۵۵۰/۰

برای عشقی و ۰/۹۶۳ برای دلربا دست یافته است که به ترتیب نشان‌دهنده بهبود هفده درصد و چهار درصد است. تحلیل دامنه جذر میانگین مربعات (RMS)، که ارزیابی بهتری از انرژی آکوستیک پایدار ارائه می‌دهد، بهبودهای قابل توجه‌تری را نشان می‌دهد به طوری که مه آوا به ۰/۰۵۴ در مقایسه با ۰/۰۴۶ برای عشقی و ۰/۰۴۱ برای دلربا دست یافته است که به ترتیب نشان‌دهنده سطوح افزایش هجده درصد و سی و دو درصد است (شکل ۱۰).

تحلیل ویژگی‌های پایداری^{۲۸}، پیشرفت‌های قابل توجهی را در ساز بهینه شده با روش طلایی نشان می‌دهد. سطح پایداری^{۲۹}، که به عنوان نسبت دامنه پایدار به دامنه اوج^{۳۰} در طول مرحله زوال^{۳۱} محاسبه می‌شود، نشان می‌دهد که مه‌آوا ۰/۰۸۶ را در مقایسه با ۰/۰۱۶ برای عشقی و ۰/۰۶۰ برای دلربا حفظ می‌کند. این قابلیت پایداری بهبود یافته، مستقیماً با حفظ انرژی آکوستیک در طول توسعه نت و ارائه پشتیبانی بهتر برای جمله‌بندی ملودیک^{۳۲} و پیشرفت هارمونیک^{۳۳}، از اجرای موسیقایی رسا پشتیبانی می‌کند. تحلیل آماری، اهمیت این بهبودها را از طریق پروتکل‌های آزمایش دقیق تأیید می‌کند. تحلیل واریانس، اهمیت آماری را در سطح p کمتر از ۰/۰۱ برای زمان واپاشی، اندازه‌گیری دامنه و ویژگی‌های پایداری نشان می‌دهد. تحلیل اندازه اثر با استفاده از d کوهن [۳۸]، مقادیری از ۱/۴۵ تا ۲/۲ را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده اهمیت عملی زیاد طبق قراردادهای آماری تعیین‌شده است. این اندازه‌های اثر به طور قابل توجهی از آستانه مرسوم ۰/۸ برای جلوه‌های بزرگ فراتر می‌روند و تأیید می‌کنند که بهبودهای مشاهده‌شده، به جای تغییر در اندازه‌گیری، نشان‌دهنده

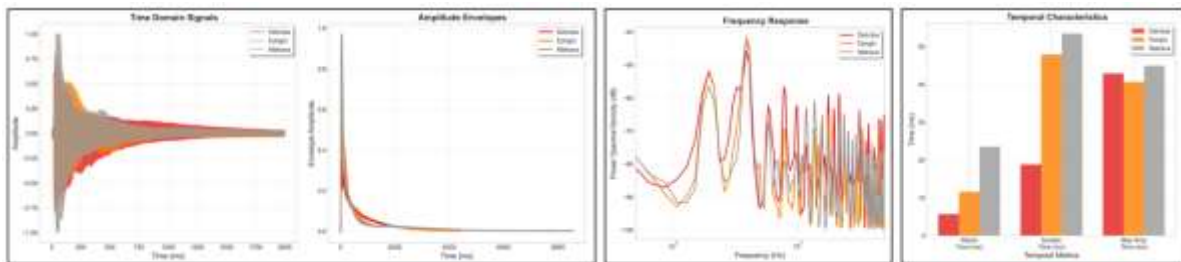
افزایش معنادار در عملکرد آکوستیک هستند. تحلیل طیفی تأیید می‌کند که بهبودهای آکوستیک بدون به خطر انداختن ویژگی‌های فرکانس پایه یا یکپارچگی تئال رخ می‌دهند. همه سازها فرکانس غالب یکسانی را در محدوده ۳۸۶-۳۸۸ هرتز حفظ می‌کنند و ویژگی‌های اساسی زیر و بمی طراحی سه‌تار را حفظ می‌کنند. تحلیل اعوجاج هارمونیک^{۳۴}، کیفیت سیگنال بهبود یافته در ساز بهینه شده با روش طلایی را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری‌های اعوجاج هارمونیک کل نشان می‌دهد که مه‌آوا به ۱۱/۶ درصد در مقایسه با ۱۲/۵ درصد برای عشقی و ۳۶/۹ درصد برای دلربا دست یافته است. کاهش قابل توجه در مقایسه با ساز دلربا، نشان‌دهنده خروجی آکوستیک تمیزتر با کاهش اعوجاج غیرخطی^{۳۵} است که به بهبود وضوح صدا^{۳۶} و کاهش خستگی آکوستیک^{۳۷} در طول اجراهای طولانی کمک می‌کند.

تحلیل یکپارچگی پاسخ فرکانسی تأیید می‌کند که بهینه‌سازی بدون تغییر ویژگی‌های اساسی تئال رخ می‌دهد. فرکانس پایه در تمام سازها در ۳۸۷/۶ هرتز ثابت می‌ماند، در حالی که ساختار سری هارمونیک نسبت‌های سنتی را حفظ می‌کند (شکل ۱۱). این حفظ ویژگی‌های فرکانسی تضمین می‌کند که روش طلایی، پخش آکوستیک را بدون به خطر انداختن اصالت فرهنگی و موسیقایی صدای سنتی سه‌تار، به نظر می‌رسد که بهبود می‌بخشد [۳۹].

تحلیل کوپلینگ آکوستیک نشان می‌دهد که بهبودها ناشی از تعامل بهینه بین موقعیت حفره صدا و حالت‌های رزونانس حفره داخلی است. به نظر می‌رسد بهینه‌سازی هندسی، ضمن حفظ کوپلینگ مناسب بین نوسان حفره هوا و ارتعاش صفحه صدا، راندمان

آکوستیک را فراهم می‌کند و در نتیجه بهبودهای مشاهده شده در ویژگی‌های دامنه و واپاشی را به همراه دارد.

رزونانس هلمهولتز را افزایش می‌دهد. این کوپلینگ بهبود یافته، انتقال انرژی آکوستیکی بهبود یافته از ارتعاش سیم از طریق پاسخ صفحه صوتی به تابش



شکل ۱۱. تحلیل مقایسه‌ای سه ساز آزمایشی به ترتیب از چپ به راست: سیگنال‌های حوزه زمان (دامنه نرمال سازی شده است^{۳۸})، پوشش دامنه، پاسخ فرکانسی، معیارهای زمانی.

۶. نتیجه‌گیری

این تحقیق، روش طلایی را به عنوان یک رویکرد سازنده که نیاز به توسعه و اعتبارسنجی بیشتری دارد، برای بهینه‌سازی سیستماتیک حفره صوتی در سازهای خانواده لوت از طریق آنالیز آکوستیک و اعتبارسنجی آماری، تثبیت می‌کند. این مطالعه نشان دهنده بهبودهای بالقوه‌ای در عملکرد آکوستیکی این خانواده سازی است، در حالی که ویژگی‌های اساسی تنال و اصالت فرهنگی طراحی سازهای سنتی را حفظ می‌کند. دستاوردهای اولیه تحقیق شامل اعتبارسنجی علمی و کاربردهای عملی است. تجزیه و تحلیل آماری، بهبودهای قابل توجهی را در پارامترهای مختلف آکوستیک با مقادیر p کمتر از ۰/۰۱ برای معیارهای کلیدی تأیید می‌کند، که نشان‌دهنده اطمینان بالا به تفاوت‌های مشاهده شده است. تجزیه و تحلیل اندازه اثر با استفاده از d کوهن، مقادیری از ۱/۴۵ تا ۲/۲ را نشان می‌دهد که به طور قابل توجهی از آستانه‌های مرسوم برای اهمیت عملی زیاد فراتر می‌رود و تأیید

می‌کند که بهبودها نشان دهنده افزایش معنادار هستند، نه تغییر در اندازه‌گیری. این مطالعه و اعتبارسنجی آن پارامترها و پروفایل‌های چند دامنه‌ای، ویژگی‌های زمانی، معیارهای دامنه و خواص طیفی را در بر می‌گیرد و شواهدی را برای اثربخشی بهینه‌سازی حفره صوتی سازها ارائه می‌دهد.

بهبودهای عملکردی کمی شده، افزایش قابل توجهی را در قابلیت‌های آکوستیکی نشان می‌دهد. بهبود زمان واپاشی از ۱۳ تا ۲۰ درصد متغیر است که مستقیماً از افزایش پایداری نت برای کاربردهای اجرای گروهی پشتیبانی می‌کند [۴۰]. بهبود دامنه در اندازه‌های اوج به ۱۷ درصد و در ویژگی‌های انرژی پایداری به ۳۲ درصد می‌رسد و قابلیت پخش آکوستیک را برای کاربردهای کنسرت افزایش می‌دهد. کاهش ۶۸ درصدی اعوجاج هارمونیک در مقایسه با طرح‌های سنتی، به بهبود وضوح صدا و کاهش خستگی آکوستیک در طول اجراهای طولانی کمک می‌کند. کمک‌های روش‌شناختی، پیشینه‌های مهمی را برای رویکرد علمی

به بهینه‌سازی سازهای سنتی ایجاد می‌کنند. این مطالعه اولین روش هندسی سیستماتیک برای بهینه‌سازی حفره صوتی با استفاده از اصول ریاضی است که چارچوب‌های بهینه‌سازی تکرارپذیری را ارائه می‌دهد. اعتبارسنجی آماری دقیق نشان می‌دهد که تجزیه و تحلیل مقایسه‌ای ساز می‌تواند در صورت استفاده از روش‌های تحلیلی مناسب، بینش‌های بهینه‌سازی معتبر علمی ارائه دهد و پیشینه‌ای را برای تحقیقات آینده در زمینه بهبود سازها ایجاد کند.

کاربردهای عملی مهندسی این پژوهش، راهنمایی‌های عملی را نیز برای سازگران محترم که با مواد (متریال) و تکنیک‌های سازگری سنتی کار می‌کنند، ارائه می‌دهد. همچنین چارچوب بهینه‌سازی هندسی رویکردهای سیستماتیکی را ارائه داده که اتکا به روش‌های آزمون و خطا را کاهش می‌دهد و در عین حال تغییرات طبیعی ذاتی در هنر سازگری سنتی را در نظر می‌گیرد. اهمیت علمی این پژوهش فراتر از کاربردهای عملی فوری آن است به نحوی که اصول گسترده‌تری را برای تحقیقات کاربردی در حفظ و اشاعه و ارتقای زمینه‌های فرهنگی موسیقایی نشان می‌دهد. این مطالعه تأیید می‌کند که سازهای سنتی می‌توانند از بهینه‌سازی سیستماتیک بهره‌مند شوند و در عین حال ویژگی‌های اساسی آکوستیکی و ریشه‌های فرهنگی‌شان را حفظ کنند. این تحقیق نشان می‌دهد که تحلیل تطبیقی کاربردی، روش‌شناسی علمی معتبری را برای بهینه‌سازی سازها در صورت استفاده از تکنیک‌های تحلیلی دقیق ارائه می‌دهد. تحلیل پارامترها شواهد محکمی را برای تأیید اثربخشی بهینه‌سازی ارائه می‌دهند، در حالی که آزمایش

معناداری آماری، قابلیت اطمینان بهبودهای مشاهده شده را تأیید می‌کند.

محدودیت‌های مذکور فعلی، حوزه‌هایی را که نیاز به پژوهش‌های بیشتر در آینده دارند، تأیید می‌کنند و در عین حال اعتماد به نتایج به‌دست‌آمده را حفظ می‌کنند. اندازه‌های نمونه گسترده‌تر، اعتبارسنجی آماری را در تعدد وسیع‌تر سازها تقویت می‌کنند، در حالی که پروتکل‌های ارزیابی ذهنی شامل ارزیابی نوازنده حرفه‌ای، اندازه‌گیری‌های عینی را با اعتبارسنجی ادراکی تکمیل می‌کنند. مطالعات عملکرد بلندمدت که به بررسی دوام بهینه‌سازی و تعاملات خواص مواد با بهینه‌سازی هندسی می‌پردازند، مسیرهای تحقیقاتی ارزشمندی را برای درکی از مکانیسم‌های بهینه‌سازی نشان می‌دهند.

فرصت‌های تحقیقاتی آینده شامل اعتبارسنجی بین فرهنگی در میان سازهای متنوع خانواده لوت، ادغام مدل‌سازی محاسباتی برای اعتبارسنجی نظری اصول بهینه‌سازی، مطالعات ادراکی مرتبط با اندازه‌گیری‌های عینی با ارزیابی‌های کیفیت ذهنی و آنالیز سازهای تاریخی با استفاده از اصول روش طلایی در کلکسیون‌های موزه‌ای می‌شود. روش طلایی نشان‌دهنده پیشرفت قابل توجهی در بهینه‌سازی سیستماتیک طراحی ساز است که بینش‌های نظری و کاربردهای عملی را ارائه می‌دهد که قابلیت‌های سازهای سنتی زهی-زخمه‌ای را افزایش می‌دهد و در عین حال اصالت فرهنگی کهن موسیقایی را حفظ می‌کند. این کار، پایه و اساس تحقیقات آینده در بهینه‌سازی سازهای موسیقی ایرانی را فراهم می‌کند. لازم به ذکر است که این پژوهش کاربردی، محدودیت‌های ذاتی در مسیر این مطالعه را تصدیق

را عملاً در سنت‌های سازگری موجود قابل اجرا می‌کند. پروتکل‌های اندازه‌گیری استاندارد این پژوهش تلاش می‌کند، نوعی ارزیابی آکوستیک تکرارپذیر را ارائه دهد و در عین حال اعتبار اکولوژیکی (بوم‌شناختی) این کانسپت (مفهوم) را از طریق روش‌های تحریک مرتبط با عملکرد این سازها مثل شیوه نوازندگی حفظ می‌کنند. رویکرد تحریک با کندن (در شیوه سه‌تار نوازی ایرانی به نام پنجه‌کاری یا کنده‌کاری)، نتایجی را ارائه می‌دهد که مستقیماً در زمینه‌های اجرای موسیقی قابل اجرا هستند، و همچنین این روش به دنبال سابقه‌ای تثبیت‌شده در پژوهش‌های آکوستیک موسیقایی است که در آن اعتبار اکولوژیکی اغلب بر روش‌های تحریک کنترل‌شده آزمایشگاهی اولویت دارد.

اعتبارسنجی پژوهش‌های آینده از طریق اندازه‌های نمونه‌ای گسترده‌تر، پروتکل‌های ارزیابی ذهنی و کاربردهای سازهای بین‌المللی و بین‌فرهنگی، چارچوب توسعه این بهینه‌سازی را تقویت کرده و در عین حال بر اصول اساسی ایجاد شده از طریق این بررسی سیستماتیک اولیه بنا می‌شود. نتایج فعلی سعی بر ارائه شواهدی برای اثربخشی روش طلایی داشته و در عین حال تلاش می‌کند پایه و اساس محکمی را برای توسعه و تکامل پژوهش‌های مداوم هم برای سازگران و هم برای پژوهشگران آکادمیک آکوستیک ایجاد نماید.

کرده و در عین حال سعی در حفظ اعتبار علمی از طریق چارچوب‌های روش‌شناختی مناسب و تحلیل آماری می‌کند. رویکرد تطبیقی مورد نظر، شیوه‌های تثبیت‌شده در پژوهش‌های آکوستیک موسیقایی را بکار می‌گیرد که در آن‌ها کنترل پارامترها و متغیرهای کامل برای مطالعات بهینه‌سازی معتبر قابل اجرا در ساخت و توسعه سازهای سنتی، نه عملی است و نه ضروری. مقایسه سه ساز مدنظر در این پژوهش، قدرت آماری کافی برای تشخیص تاثیرات موثر مرتبط با کاربردهای عملی را فراهم می‌کند، در حالی که اندازه‌های نمونه گسترده‌تر، تعمیم‌پذیری تعدد آماری را تقویت می‌کنند، بهبودهای مشاهده‌شده در این مطالعه محدود، الگوهای سازگار و تثبیت شده‌ای را نشان می‌دهند که از فرضیه بهینه‌سازی هندسی در رویکردهای مختلف طراحی حفره‌های صوتی در این خانواده سازی پشتیبانی می‌کنند.

تغییرات خواص مواد بین سازها، منعکس‌کننده شرایط واقع‌بینانه‌ای است که نه تنها در سازگری سنتی ایرانی بلکه در در ساخت ساز در سراسر جهان با آن مواجه می‌شویم، جایی که ویژگی‌های چوب طبیعی و تکنیک‌های ساخت سنتی، تنوعی ذاتی را ایجاد می‌کنند. روش بهینه‌سازی هندسی این تغییرات را در حالی که راهنمایی سیستماتیک برای تعیین پارامتر سوراخ صدا ارائه می‌دهد، در بر می‌گیرد و این رویکرد

منابع

[۱]. کمالیان محمد مهدی، مبصری بهروز. گفته‌ها و ناگفته‌ها: خاطرات محمد مهدی کمالیان (۱۳۷۶-۱۲۹۷). ویراستار میرعلی نقی سیدعلیرضا. تهران: نشر نی؛ ۱۳۹۵.

[2] MIT News. Power efficiency in the violin. Hadi Tavakoli Nia. Cambridge: Jennifer Chu | MIT News Office; 2015 Feb 10.

- [3] Nia HT, Jain AD, Liu Y, Alam M-R, Barnas R, Makris NC. The evolution of air resonance power efficiency in the violin and its ancestors. London: The Royal Society; 2015.
- [4] Marcel-Dubois C. Les instruments de musique de l'Inde ancienne. Paris: Presses Universitaires de France; 1941. p. 89, 205.
- [5] Vyzgo TS. Muzykal'nye instrumenty sredneĭ Azii (Musical instruments of Central Asia). Moskva: Izd-vo "Muzyka"; 1980. p. XIX.
- [6] Encyclopaedia Iranica. Encyclopaedia Iranica--Barbat [Internet]. 1988 [cited 2012 Feb 4]. Available from:
- [7] Rault C. Mediaeval [Internet]. 2014 [cited 2014 Nov 15]. Available from:
- [8] Engel C. Researches into the early history of the violin family. London: Novello, Ewer & Company; 1883.
- [9] Baines A. The Oxford companion to musical instruments. New York: Oxford University Press; 1992.
- [10] Sandys W, Forster SA. History of the violin. London: John Russell Smith; Addison and Lucas; 1884.
- [11] Van der Straeten ESJ. The history of the violin, its ancestors and collateral instruments from earliest times. New York: Da Capo Press; 1968.
- [12] Coates K. Geometry, proportion and the art of lutherie. Oxford: Clarendon Press; 1985.
- [13] Hutchins CM. A study of the cavity resonances of a violin and their effects on its tone and playing qualities. J Acoust Soc Am. 1990;87:392.
- [14] Itakawa H, Kumagai C. Researches on violin making. Tokyo: Institute of Industrial Science, The University of Tokyo; 1952.
- [15] Shaw EAG. Cavity resonance in the violin: network representation and effect of damped and undamped rib holes. J Acoust Soc Am.
- [16] Bissinger G. Effect of f-hole shape, area, and position on violin cavity modes below 2 kHz. J Catgut Acoust Soc. 1992;2:603-8.
- [17] Barber S, Harris S. Eleven course lutes [Internet]. 2016 [cited 2016 Mar 7]. Available from:
- [18] Savart F. Mémoire sur la construction des instruments à cordes et à archet. In: Musical acoustics. Vol. 5-6, Part I: Violin family components and Part II: Violin family functions. Paris: Deterville; 1976.
- [19] Von Helmholtz HL. Theory of air oscillations in tubes with open ends. J Reine Angew Math. 1860;57:1-72.
- [20] Von Helmholtz HL. On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music. New York: Dover; 1954.

- [21] Rayleigh JWS Baron. The theory of sound. Vol. 1. London: Macmillan; 1945. p. 1877-8. Reprinted by New York: Dover.
- [22] Lamb H. Hydrodynamics. New York: Dover; 1932.
- [23] McPherson M, inventor. Arrangement of a sound hole and construction of a sound board in an acoustic. United States patent US
- [24] Tavakoli Nia H. Acoustic function of sound hole design in musical instruments [master's thesis]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, Department of Mechanical Engineering; 2010 Jun.
- [25] Chaigne, A., & Kergomard, J. (2016). Acoustics of Musical Instruments. Springer International Publishing.
- [26] Takegawa A, inventor. Golden ratio air vent holes. United States patent US 7485791 B2. 2008.
- [27] King AT. The Cremonese system for positioning the f-holes. The Strad. 2004 Dec [cited 2014 Nov 15]. Available from:
- [28] King AT. How Stradivari positioned the f-holes. The Strad. 2005 Jan [cited 2014 Nov 15]. Available from: http://www.fiddleheadstrings.com/microsoft_word___for_the_strad_part_2_8_sept.pdf
- [29] Chang Y-S. Golden spiral [Internet]. Wolfram Demonstrations Project; 2002 [cited 2015 Feb 1]. Available from: <http://demonstrations.wolfram.com/GoldenSpiral/>
- [30] Hemenway P. Divine proportion: Φ Phi in art, nature, and science. New York: Sterling Publishing Co; 2005. p. 127-9.
- [۳۱] خالقی روح‌الله. سرگذشت موسیقی ایران. چاپ ۹. تهران: صفی‌علیشاه؛ ۱۳۸۴.
- [۳۲] شیرازی ناصر. روش ساختن سه‌تار. تهران: پارت؛ ۱۳۸۱.
- [33] Gabrielsson, A., & Sjögren, H. (1979). Perceived sound quality of sound-reproducing systems. Journal of the Acoustical Society of America, 65(4), 1019-1033.
- [34] Fletcher, N. H., & Rossing, T. D. (2012). The Physics of Musical Instruments. Springer.
- [35] Woodhouse, J. (2014). Plucked guitar transients: Comparison of measurements and synthesis. Acta Acustica united with Acustica, 90(5), 945-965.
- [۳۶] هیرید حسینی، "اصلاحات آکوستیکی سالن‌های کنسرت و استودیوهای موسیقی، با استفاده از پنل‌های تشدیدگر"، مجله علمی صوت و ارتعاش، ۸ (۱۳۹۸): ۴۴-۵۱.
- [۳۷] مجید لشگری، "تحلیل آزردهی صوتی با استفاده از معیارهای کیفیت صدا"، مجله علمی صوت و ارتعاش، ۵ (۱۳۹۵): ۱۰۷-۱۱۶.

[38] Cohen, J. (1988). Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. Academic Press.

[۳۹] هدی سرپرست, محمدرضا آشوری و محمدمهدی خطیبی, "هنر اندازه گیری و مدلسازی در آزمایش مودال و مشکلات آن (بخش پایانی)", مجله علمی صوت و ارتعاش, ۲۱ (۱۳۹۱): ۴۸-۶۰.

[۴۰] علی احمدی, "پارامتر قدرت صدای G و اهمیت آن در طراحی و ارزیابی سالن های موسیقی", مجله علمی صوت و ارتعاش, ۱۶۸ (۱۳۹۸): ۷۱-۵۷.

پی نوشت

¹ Cohen's d

² Articulation

³ Lute

⁴ SoundBoard

⁵ Rosette

⁶ Helmholtz resonator principle

⁷ Rode NT1000 Microphones with cardioid polar pattern

⁸ Focusrite Scarlett 6i6

⁹ Sound pressure level (SPL)

¹⁰ Attack

¹¹ Decay Time T60 (ms)

^{۱۲} حداکثر دامنه نشان دهنده حداکثر مقدار مثبت یا منفی شکل موج سیگنال آکوستیک است و در واحدهای خطی نرمال شده (بدون بعد) بیان شده است. در تحلیل ما، حداکثر دامنه در محدوده ۰ تا ۱۰۰ نرمال شده است، که در آن ۱۰۰ نشان دهنده ضبط صدای دیجیتال در مقیاس کامل است.

^{۱۳} دامنه RMS نشان دهنده سطح انرژی مؤثر یا متوسط سیگنال صوتی در طول مدت زمان اندازه گیری است و در واحدهای خطی نرمال شده (بدون بعد) بیان شده است.

^{۱۴} سطح پایداری یا تداوم، نسبت انرژی بین بخش تداوم نت و دامنه اوج را نشان می دهد و به صورت نسبت یا درصد بدون بعد بیان شده است.

^{۱۵} n.s = "از نظر آماری معنی دار نیست" این علامت زمانی ظاهر می شود که تفاوت های مشاهده شده به اندازه های بزرگ نباشند که از نظر آماری معنی دار باشند.

¹⁶ Max Amplitude

¹⁷ RMS Amplitude

¹⁸ Peak time

¹⁹ Attack time

²⁰ Sustain time

²¹ Sustain level

²² Dominant Frequency

²³ Spectral Centroid

²⁴ Spectral Bandwidth

²⁵ Total Harmonic Distortion (THD)

²⁶ عبارت " $p < 0.05$, $p < 0.01$ " نشان دهنده سطوح معناداری آماری است که نشان می دهد احتمال اینکه تفاوت های مشاهده شده به طور تصادفی رخ داده اند، چقدر است.

²⁷ Temporal domain

²⁸ Sustain characteristic

²⁹ Sustained amplitude

³⁰ Peak amplitude

³¹ Decay phase

- ³² Melodic phrasing
- ³³ harmonic progression
- ³⁴ Harmonic distortion
- ³⁵ nonlinear distortion
- ³⁶ sound clarity
- ³⁷ acoustic fatigue

³⁸ تمام سیگنال‌های صوتی پس از وارد کردن، به صورت دیجیتالی در محدوده -1.0 تا $+1.0$ نرمال‌سازی شدند و اطمینان حاصل شد که حداکثر مقادیر پیک صرف نظر از تنظیمات اولیه در ضبط، در تمام سازها قابل مقایسه بودند. این روش نرمال‌سازی از رویه استاندارد در پردازش سیگنال دیجیتال برای تحلیل آکوستیک مقایسه‌ای پیروی می‌کند و امکان مقایسه مستقیم پارامترهای مبتنی بر دامنه را بین سشن‌ها یا بخش‌های ضبط مختلف و سازهای مختلف فراهم می‌کند. نرمال‌سازی روابط نسبی بین سیگنال‌ها را تغییر نمی‌دهد یا اعوجاج ایجاد نمی‌کند، بلکه همه سیگنال‌ها را به یک چارچوب مرجع مشترک مناسب برای تحلیل مقایسه‌ای مقیاس‌بندی مجدد می‌کند. تمام مقادیر دامنه گزارش شده، از جمله حداکثر دامنه و دامنه RMS، مقادیری را در این فضای نرمال‌سازی شده منعکس می‌کنند و باید به عنوان معیارهای نسبی مناسب برای ارزیابی مقایسه‌ای تفسیر شوند، نه اندازه‌گیری‌های فشار آکوستیک مطلق در واحدهای فیزیکی.