تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۲ | تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۰۹/۱۲
نوع مقاله: پژوهشی
شماره صفحه ۹۵-۱۱۰

تاثیر هندسه شکلی و ساختاری مساجد بر کیفیت آکوستیک معماری
بررسی موردی: مساجد تاریخی تبریز*

فرزانه قلیزاده
دکترای معماری اسلامی، گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران
E-mail: F.gholizadeh@tabriziau.ac.ir

عباس غفاری
دانشیار گروه فناوری معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران
(نویسندهٔ مسئول مکاتبات)
E-mail: ghaffari@tabriziau.ac.ir

محمدعلی کی‌نژاد
استاد گروه معماری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تبریز، ایران
E-mail: ma_kaynejad@tabriziau.ac.ir

چکیده

شنیدار مطلوب در مساجد از ضروریات طراحی این فضا بوده و مستلزم مجانست صحیح مولفه‌های معماری است. شکل پلان و ساختار فرمی از مهمترین آن‌ها و مورد مطالعه پژوهشگران است، لیکن در مطالعات میدانی، امکان وجود هندسه ساختاری با مصالح ثابت فراهم نیست و این مساله، چالش اصلی این مطالعه است. هندسه شکلی پلان یکی از عوامل تعیین‌کننده نحوه پخشایی صدا در فضای معماری است و این در حالیست که هندسه ساختاری نیز در این میان تاثیرگذار است. هدف این پژوهش، تحلیل تاثیر هندسه شکلی بر کیفیت آکوستیکی در ساختار فرمی ستوندار مساجد است که در رده‌بندی‌های متنوع حجمی قابل ارزیابی است. پژوهش حاضر ۱۲ نمونه مختلف از مساجد تاریخی شهر تبریز با هندسه ساختاری ثابت را در چهار رده حجمی و در سه دسته‌بندی شکلی مستطیلی طولی، مستطیلی عرضی و مربعی مورد تحلیل قرار داده است. مطالعه حاضر با سنجش میدانی پیش رفته و استناد سنجش ISO3382 است. نویز زمینه، زمان واخنش و تراز فشار صدا متغیرهای آکوستیکی مورد مطالعه است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد علی‌رغم اینکه هندسه طولی، عملکرد متفاوت‌تری نسبت به دیگر نمونه‌های سنجش ارائه می‌دهد، اما در حالت کلی هندسه ساختاری ارجح‌تر از هندسه شکلی است و با استناد به برداشت‌های دوربین صوتی، ثبوت آن منجر به همسانی رفتار آکوستیکی در نمونه‌ها می‌شود.

کلیدواژه‌ها: آکوستیک معماری، هندسه پلان، هندسه ساختاری، مسجد

* این مقاله برگرفته از رساله دکتری فرزانه قلیزاده با عنوان «مولفه‌های فرم آوا در معماری مساجد (مطالعه موردی: مساجد تاریخی شهر تبریز)» است که با راهنمایی دکتر عباس غفاری و دکتر محمدعلی کی‌نژاد در دانشگاه هنر اسلامی تبریز انجام شده است.

مقدمه

موج مکانیکی صدا در ماهیت خود تمایل به انتشار آزادانه در فضا دارد. در محیط آزاد با گذشت زمان به دلیل واگرایی هندسی و تلفات محیطی از انرژی صدا کاسته می‌شود، اما در محیط بسته که با معماری تعریف می‌شود، محدوده‌های فضا رخداد دیگری بر صدای تولیدی خلق می‌کنند و ویژگی‌های آن را متفاوت‌تر جلوه می‌دهند. شکل محدوده مذکور بر کیفیت صدا موثر است و فضای معماری در شش بُعد خود به عنوان محدوده‌ای تعریف می‌شود که صدا در برخورد با آن کیفیات مختلفی به خود می‌گیرد. وجه زمین در صورت هموار و یکدست بودن صرفا با نوع کفپوش، اکوستیک فضا را تبیین می‌نماید. چهار جداره پیرامون با فرم قرارگیری در کنار هم و به عبارتی با شکل پلان، همچنین با مصالح و ساختار اجرایی آن‌ها و جداره سقف با فرم خود، تعیین‌کننده کیفیت آکوستیک فضای معماری هستند. در این مطالعه، منظور از هندسه شکلی، شکل پلان بوده و هندسه ساختاری، همان ساختار داخلی ستون‌دار و سقف مدولار گنبدی است که در نمونه‌های انتخابی با مصالح ثابت نیز در نظر گرفته شده است. اگر بتوان با ثابت نمودن برخی پارامترها در وجوه ساخت معماری، صرفا بخشی از متغیرها را مطالعه نمود، می‌توان ادعا کرد تاثیر فاکتور انتخابی بر کیفیت آکوستیکی واکاوی شده است. پژوهشگران برای مطالعه تغییرات شکلی و حفظ سایر متغیرها همچون مصالح، از شبیه‌سازی استفاده می‌نمایند (Abdou, 2003; Ismail, 2008; Oldham & Elkhateeb, 2008)، در حالیکه طراحی و ساخت مساجد تاریخی در تبریز به نحوی است که امکان مطالعه میدانی را با در نظر گرفتن شرایط مذکور فراهم می‌آورد. مبرهن است که نتایج حاصل از شبیه‌سازی به دلیل عدم توانایی در تخمین مشابهت‌های واقعی دارای دستاوردهای اعتباری است. لیکن سنجش میدانی از اعتبار بالاتری برخوردار بوده و نتایج واقعی‌تری ارائه می‌دهد. پژوهش حاضر از امکان موجود در ساخت بافت مساجد تاریخی تبریز در یکسان‌سازی نمونه‌ها بهره برده و بستر مطالعه را به صورت میدانی در نظر گرفته است. به همین منظور دوازده نمونه با ساختار آجری، ستون‌دار و فرم سقفی مدولار بصورت گنبدچه‌های آجری، با کفپوش فرش و موکت از بین مساجد تاریخی تبریز انتخاب شده‌اند تا بتوان تنوع ساختاری را به حداقل رساند و با ثبات آن به عنوان متغیر مداخله‌گر، تا حد امکان بر تفاوت‌های شکلی در پلان تاکید نمود. اما از آنجاکه تاثیر حجم بر کیفیت آکوستیکی فضا امری حتمی است و نمی‌توان در بستر میدانی، اندازه حجمی یکسان داشت، تنوع حجمی بصورت آگاهانه در روند مطالعه مدنظر بوده است و نمونه‌ها در چهار گروه بزرگ (۸۰۰۰-۵۰۰۰ مترمکعب)، میانه (۵۰۰۰-۲۵۰۰ مترمکعب)، متوسط (۲۵۰۰-۱۲۰۰ مترمکعب) و کوچک (کمتر از ۱۲۰۰ مترمکعب) دسته‌بندی شده‌اند. این در حالی است که سایر متغیرهای موثر، تا حد امکان ثابت بوده‌اند. فرم سقف در تمام نمونه‌ها گنبدهای مدولار آجری است. کفپوش همه نمونه‌ها فرش و صرفا یک نمونه موکت است که تاثیر آن در انتهای پژوهش با تحلیل آماری استخراج شده است. محدوده ارتفاعی در تمام نمونه‌ها بین ۵ تا ۶ متر است. جداره‌ها و شاکله کلی ساختار داخلی نیز در تمام نمونه‌ها مشابه هم هستند. مطالعه با تبیین شرایط مذکور، سعی در واکاوی تاثیر شکل پلان بر بازخوردهای آکوستیکی داشته و مهمترین فاکتور موثر را شکل پلان انتخاب کرده است.

پیشینه تحقیق

تنوع‌های شکلی در پلان همواره یکی از مطرح‌ترین مباحث آکوستیک بوده است، چراکه کیفیت شنیده شدن را در شبکه توزیعی سطح خود تعریف و تعیین می‌نماید. پژوهشگرانِ آکوستیک مساجد هم در کنار دیگر عوامل موثر در کیفیت پخشایی صدا، با رویکرد شکل پلان نیز مدل انتشار صدا در مساجد را بررسی نموده‌اند. از بین مطالعات چند دهه اخیر، نخستین پژوهش این حوزه به سال ۲۰۰۳ مربوط می‌شود که محقق در آن

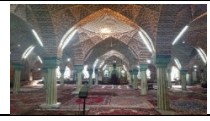
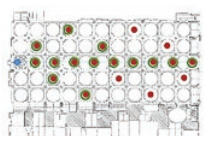
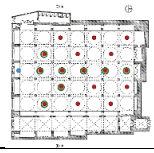
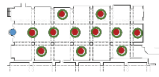
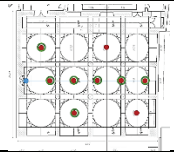
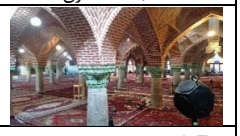
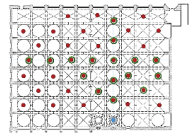
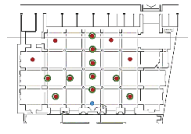
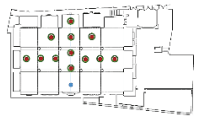
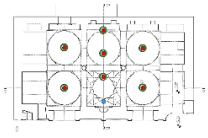
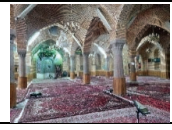
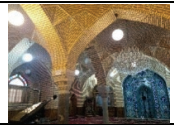
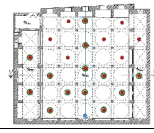
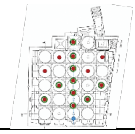
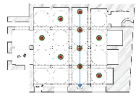
برای نمونه‌ای فرضی ۵ شکل پلان مستطیلی، ذوزنقه، مربعی، ۶ و ۸ ضلعی در نظر گرفته و با ابزار شبیه‌سازی به ارزیابی شاخص عبور مستقیم صدا (STI) و زمان واخنش (RT)، در دو حالت نماز یومیه و خطبه‌خوانی نماز جمعه پرداخته است. نتایج این پژوهش حاکی از زمان واخنش بالاتر برای نمونه ۸ ضلعی است و کمترین میزان بسته به فرکانس‌های مختلف مابین فرم‌های ذوزنقه، مستطیلی و مربعی در نوسان نشان داده شده است (Abdou, 2003). هم در مطالعات کیفی و هم در مطالعات کمی که با شبیه‌سازی و یا سنجش میدانی انجام می‌شود، شکل پلان، اندازه‌ها، موقعیت منابع صوتی نسبت به آن، ساختار هندسی کلی نمونه و یا هندسه حاکم بر سقف آن در کنار سایر عوامل محیطی و معماری، فاکتوری موثر در تحلیل به شمار می‌آید (Oluy-ombo, 2007; Ismail, 2013; Alomari *et al*., 2019). اساسا هندسه ساختاری و هندسه شکلی پلان به طور مشخص به عنوان فاکتورهای مطالعه صدا در مساجد معرفی می‌شوند و ستون یا گنبد داشتن در تعریف مدل ساختار، عناصر اساسی تلقی می‌گردد (Orfali, 2009). در مطالعات پیرامون الگوهای تغییر در معماری تاریخی، موثرترین عامل، هندسه ساختاری تعریف می‌شود؛ چرا که تفاوت‌های فرم معماری در گذر زمان همواره منبعث از هندسه فرمی و ساختاری بوده است و پژوهش‌های آکوستیکی این عرصه در کنار عواملی چون حجم، مصالح و مساحت، شکل پلان، فرم کلی، مدل سقف و تناسبات را نیز مورد توجه قرار داده‌اند (Oldham & Elkhateeb, 2008). تناسبات فضای اصلی مسجد، عنصری مهم در قبال وضوح گفتار است که بخشی از آن توسط شکل پلان تعریف می‌شود. در مطالعات این حوزه وضوح گفتار مبتنی بر تناسبات فضایی مدنظر بوده است، سایر متغیرها همچون مصالح در حد امکان ثابت در نظر گرفته می‌شود و شکل، اندازه و تناسبات متغیرهای اصلی خواهند بود (Othman & Mohamed, 2012). هندسه شکلی پلان قادر است پارامترهای متنوعی به حوزه متغیرهای آکوستیک و وضوح گفتار اضافه نماید که از آن جمله می‌توان به فاکتور شکل[1] و فاکتور فرم[2] اشاره نمود. میزان تاثیر شکل پلان در نتایج آکوستیکی فضا به عنوان ضریبی در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند در روابط موجود وارد شود (Elkhateeb, 2012). به طور کل بایستی اذعان داشت مطالعه آکوستیک مساجد، بر اساس ویژگی‌های معماری پیش می‌رود و رفتار آکوستیکی، قابل قیاس با حجم و شکل نمونه است. این امر با سطح و شکل پلان و سایر سطوح تبیین می‌شود و با ایجاد تفاوت در هر متغیر معماری از جمله حجم و شکل، نتایج حاصله متفاوت خواهد بود (Ismail, 2013). طراحی آکوستیکی و کارایی آن منوط به حجم، تناسبات، هندسه، شکل پلان و مصالح تبیین می‌شود و چه با ابزار شبیه‌سازی و چه به روش سنجش میدانی، طراحی آکوستیکی مطلوب، مستلزم ایجاد روابط صحیح مابین عوامل معماری خواهد بود که هندسه ساختاری و هندسه شکلی از جمله آن‌هاست (Gul & Caliskan, 2013; Che Din *et al*., 2013). مطالعات نمونه موردی که بر روی نمونه‌های مشخصی همچون مسجد سلیمانیه ترکیه و یا مسجد جامع یوگیاکارتای اندونزی که نمونه‌ای پرستون با سقف کوتاه است، انجام شده است نیز فاکتورهای مذکور را مورد توجه قرار داده‌اند (Sü Gül *et al*., 2014; Syamsiyah *et al*., 2018a; 2018b). ظرفیت و میزان کاربر حاضر در نمونه به جهت نقش آن در تعیین ضرایب جذب همواره مورد توجه بوده که در ارتباط کامل با شکل و اندازه پلان است. از این منظر نیز هندسه شکلی و تناسبات پلان، اهمیت خود را نشان داده است و لزوم توجه به فاکتور مذکور را با رویکردی دیگر به اثبات می‌رساند (Abdullah & Zulkefli, 2014; Azizah Adnan *et al*., 2018). در کنار پژوهش‌هایی که هندسه و پلان را به عنوان یکی از فاکتورهای موثر در کنار دیگر فاکتورها مورد پژوهش قرار می‌دهند، مطالعه‌ای در عربستان، هندسه مسجد را به عنوان مهمترین عامل موثر در کارایی آکوستیکی تلقی نموده است و با در نظر گرفتن حجم و سطح ثابت، تفاوت نمونه‌های انتخابی را صرفا از منظر هندسی مورد پژوهش قرار می‌دهد. این مطالعه که در عربستان انجام یافته است، با پژوهش پیرامون نمونه‌های معاصر بدون گنبد در

چهار هندسه مختلف و با تاکید بر سه مدل شنوایی در مسجد، آکوستیک مناسب را حاصل تناسبات یک به دو در ساختار مستطیلی و کروی می‌داند (Hossam Eldien, 2014).
به طور کل می‌توان گفت هندسه ساختاری و شکلی از موثرترین عوامل در تعریف کیفیت آکوستیکی به شمار می‌آیند و هرچه بتوان تاثیر دیگر عوامل را کمرنگ‌تر نمود، میزان دخالت هندسه معماری در شرایط آکوستیکی قابل استنادتر خواهد بود. مطالعات اثبات کرده‌اند که آکوستیک مطلوب با مدنظر قرار دادن عوامل معمارانه حجم‌دهنده به فضا همچون اندازه و تناسبات، شکل پلان و ساختار کلی میسر است و پژوهش حاضر نیز با تکیه بر مطالعات سایر پژوهشگران، هندسه شکلی پلان و هندسه ساختاری را در اولویت ارزیابی‌های خود قرار داده است. در راستای تدقیق هدف مطالعه که تحلیل تاثیر شکل پلان بر آکوستیک تعریف شده است، هندسه ساختاری، ثابت در نظر گرفته شده است و تمام نمونه‌ها، با فرم ستون‌دار و گنبدهای مدولار انتخاب شده‌اند تا بتوان در بستر میدانی و با ابزار اندازه‌گیری، متغیرهای مداخله‌گر را کاهش داده و نتایج دقیق‌تری از شرایط عینی موجود اتخاذ نمود.

روش شناسی تحقیق

استناد مطالعه حاضر ISO3382 است که به منظور اندازه‌گیری میدانی سه سطح مطالعه متصور است و این پژوهش سطح اول را انتخاب کرده است (ISO3382, 2009). لذا قرارگیری منبع در یک موقعیت و نقطه سنجش در دو موقعیت کافی خواهد بود. به همین منظور در تمام نمونه‌ها منبع در محراب که منبع اصلی انتشار صدا در مساجد است، تعبیه شده است. سنجشگر در سطح نمونه بسته به اندازه آن در شبکه‌ای منتظم توزیع گردیده است اما اندازه‌گیری محور محراب در تمام نمونه‌ها حتمی بوده و در نمونه‌های بزرگ‌تر با مدول ۶ متری، در مساجد متوسط با مدول ۳ متری و در نمونه‌های کوچک با مدول ۲ متری سنجش شده است (جدول ۱). باند فرکانس انتخابی با استناد به استاندارد، ۳/۱ اوکتاوی بوده و طبق پیشنهاد ISO3382 از ۱۰۰ هرتز تا ۵۰۰۰ هرتز مورد سنجش است. با تکیه بر استاندارد مذکور حالت سنجش، استودیویی در نظر گرفته شده است که در آن صرفا پژوهشگران در داخل نمونه حضور دارند. تحلیل میدانی نمونه‌ها در دو مرحله پیش رفته است که در مرحله نخست اندازه زمان واخنش، سروصدای زمینه و تراز فشار صدا به کمک سنجشگر ۲۲۶۰ B&K و بلندگوی چندجهته B&K ارزیابی شده است. مرحله دوم به تصویربرداری صوتی از نمونه‌ها اختصاص دارد که با دوربین صوتی برند SINUS انجام گرفته است. مدل سنجش بر اساس حالات نماز بوده و لذا در دو ارتفاع ایستاده و نشسته به ترتیب برابر با ۱٫۷۰ و ۰٫۸۰ متری صورت یافته است. اندازه‌گیری در هر نقطه به طور عام یک بار بوده، ولیکن در صورت بروز اختلال تا پنج بار تکرار داشته است. در تصویربرداری صوتی در تمام نمونه‌ها، منبع، صدای مرجع[۳] بوده و در محراب تعبیه شده است. دوربین نیز در موقعیت میانه مسجد و انتهای آن در تمام جهات پخشایی صدا را ثبت نموده است.
نمونه‌های مورد مطالعه از بین ۵۶ مسجد ثبت شده توسط سازمان میراث فرهنگی و گردشگری در تبریز انتخاب شده‌اند. روند گزینش در ابتدا منوط به نمونه‌های ستونی با ساختار مدولار گنبددار و سپس تفکیک نمونه‌ها به سه هندسه شکلی کشیدگی طولی (محراب در عرض نمونه)، کشیدگی عرضی (محراب در طول نمونه) و مربعی (طول و عرض برابر) بوده است. مساجد انتخابی به چهار گروه حجمی بزرگ (۸۰۰۰-۵۰۰۰ مترمکعب)، میانه (۵۰۰۰-۲۵۰۰ مترمکعب)، متوسط (۲۵۰۰-۱۲۰۰ مترمکعب) و کوچک (کمتر از ۱۲۰۰ مترمکعب) تقسیم شده است و از بین آن‌ها نمونه‌های با درصد مشابهت بیشتر از منظر فضاسازی گزینش شده‌اند. لذا مساجد مورد مطالعه برای هر تقسیم‌بندی یک نمونه و در مجموع هندسه‌های شکلی و گروه‌های حجمی ۱۲ نمونه است (جدول ۱).

جدول ۱. نمونه‌های مورد مطالعه و چینش نقاط سنجش با سنجشگر ۲۲۶۰

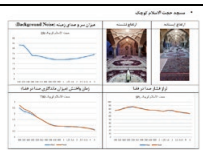
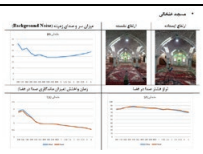
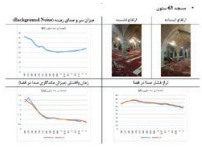
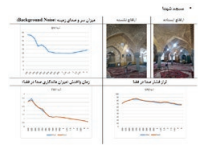
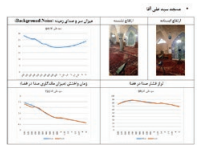
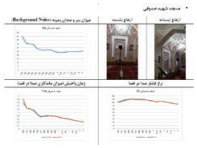
بررسی موردی مطالعه				
	دسته حجمی بزرگ	دسته حجمی میانه	دسته حجمی متوسط	دسته حجمی کوچک
هندسه ستون‌دار طولی	مسجد حجت‌الاسلام	مسجد شهیدی	مسجد حجت‌الاسلام کوچک	مسجد خلخالی
				
				
هندسه ستون‌دار عرضی	مسجد ۶۳ستون	مسجد شهدا	مسجد سیدعلی‌آقا	مسجد شهید صدوقی
				
				
هندسه ستون‌دار مربعی	مسجد امام جمعه	مسجد قیزیللی	مسجد میرزاتقی	مسجد حاج غفار
				
				

منبع: ● گیرنده در ارتفاع انسان ایستاده: ● گیرنده در ارتفاع انسان نشسته: ○

یافته‌های تحقیق

میزان بدست آمده در هر نقطه سنجش منجر به اندازه RT، BN و SPL جداگانه‌ای شده است که به تعداد نقاط سنجش در هر نمونه متنوع است. تکرار اندازه‌گیری در ارتفاع نشسته نیز سبب ایجاد دسته‌ای دیگر از اعداد گردیده است که در نمونه‌های بزرگ‌تر تا حدود ۵۵ سنجش است. تعداد نقاط سنجش در ارتفاع ایستاده به صورت منتظم و شبکه‌ای در سطح پلان توزیع شده است، لیکن اندازه‌گیری‌های ارتفاع نشسته با استناد به میزان استفاده از نمونه تعیین گردیده است. نمونه‌ها در بیشترین مراجعه به آن‌ها و در هنگام برگزاری نمازهای یومیه تا سطح محدودی مورد استفاده قرار می‌گیرند که همین امر استناد اندازه‌گیری‌های ارتفاع نشسته در نظر گرفته شده است. پس از سنجش تمام نقاط در مساجد و در راستای نیل به عدد واحدی برای هر نمونه در متغیرهای مورد مطالعه، میانگین‌گیری نقاط سنجش انجام شده و رفتار کلی نمونه بدست آمده است (جدول ۲).

جدول ۲. تعداد نقاط سنجش و میانگین‌گیری از آن‌ها در نمونه‌ها

	دسته حجمی بزرگ	دسته حجمی میانه	دسته حجمی متوسط	دسته حجمی کوچک
تعداد نقاط سنجش ایستاده	۱۹	۱۷	۱۱	۹
تعداد نقاط سنجش نشسته	۱۴	۸	۱۱	۷
هندسه طولی				
تعداد نقاط سنجش ایستاده	۳۷	۱۴	۱۲	۷
تعداد نقاط سنجش نشسته	۱۶	۱۰	۱۲	۷
هندسه عرضی				
تعداد نقاط سنجش ایستاده	۲۰	۱۴	۹	۸
تعداد نقاط سنجش نشسته	۱۳	۱۰	۹	۸
هندسه مربعی				

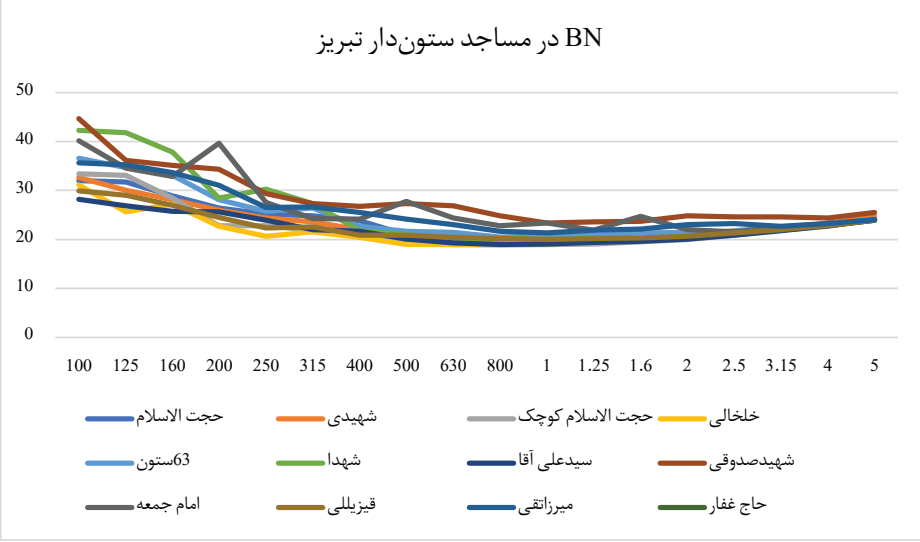
برداشت‌های دوربین صوتی که حاصل مجموع ۶۰ ثانیه‌ای برداشت در موقعیت‌های مختلف سنجش است، در تحلیل فیلم‌های ارائه شده، واکاوی گردیده است. اما به منظور درک بصری از داده‌های آن، ثانیه ۲۰ام در سنجش نقطه انتهایی رو به محراب در هر نمونه، تصویر گرفته شده است. فرکانس‌های انتخابی برای تحلیل دوربین صوتی، فرکانس‌های حوزه گفتار در باند ½ اوکتاوی، ۲۵۰ تا ۴۰۰۰ هرتز است. استاندارد انتخابی مطالعه، برای تحلیل فضاهای معماری، باند ½ و یا ۱/۳ اوکتاوی را پیشنهاد می‌دهد و در باند ½ تحلیل از ۱۲۵ تا ۴۰۰۰ هرتز را کافی می‌داند. لیکن از آنجا که دوربین صوتی در هر ۵۰ هرتز یک‌بار توقف دارد، قادر به سنجش ۱۲۵ هرتز نیست و لذا برداشت‌ها در این مطالعه از ۲۵۰ هرتز آغاز می‌شود. شدت صدا در تمام نمونه‌ها در بازه -۱۰ تا ۴۵ دسی‌بل در نظر گرفته شده است تا بتوان از مقدار طیف‌های رنگی تصاویر، برداشت‌های یکسان اتخاذ نمود (جدول ۳).

جدول ۳. تحلیل بصری برداشت دوربین صوتی در نمونه‌ها

هندسه	فرکانس	دسته حجمی بزرگ	دسته حجمی میانه	دسته حجمی متوسط	دسته حجمی کوچک
هندسه ستون‌دار طولی	250 Hz				
	500 Hz				
	1000 Hz				
	2000 Hz				
	4000 Hz				
هندسه ستون‌دار عرضی	250 Hz				
	500 Hz				
	1000 Hz				
	2000 Hz				
	4000 Hz				
هندسه ستون‌دار مربعی	250 Hz				
	500 Hz				
	1000 Hz				
	2000 Hz				
	4000 Hz				

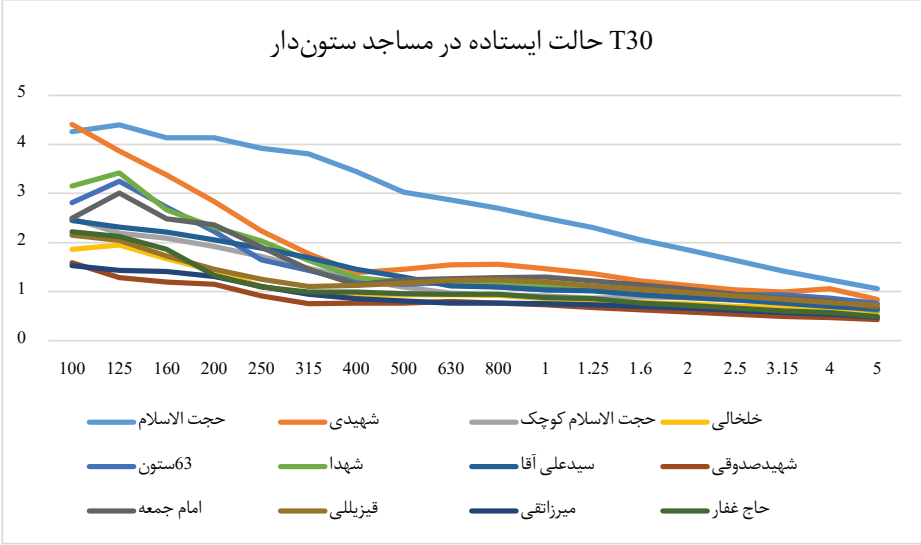
تحلیل یافته‌ها

مجموع اندازه‌گیری‌های حاصل از سنجشگر ۲۲۶۰ در تمام نمونه‌ها نشان می‌دهد بیشترین تفاوت‌های BN در فرکانس‌های پایین بروز می‌کند و با افزایش فرکانس، نمونه‌ها سروصدای یکسان‌تری نشان می‌دهند. بیشترین میزان سروصدا در غالب فرکانس‌ها مربوط به نمونه کوچک مقیاس هندسه عرضی است که در مجاورت کوچه‌ای پرتردد واقع است. در بین نمونه‌ها، مسجد خلخالی، نمونه کوچک مقیاس هندسه طولی نیز در فرکانس‌های پایین دارای کمترین میزان BN به نظر می‌رسد. در این میان بیشترین نوفه ثبت شده در ۱۰۰ هرتز در حدود ۴۵ دسی‌بل و مربوط به کوچک‌ترین نمونه عرضی، مسجد شهید صدوقی است. بزرگ‌ترین نمونه مربعی، مسجد امام جمعه، علی‌رغم دارا بودن نوسان بالا در طیف فرکانسی، با افزایش ناگهانی سروصدا تا ۳۹٫۷ دسی بل در ۲۰۰ هرتز تفاوت محسوسی در میزان BN نشان می‌دهد (شکل ۱).



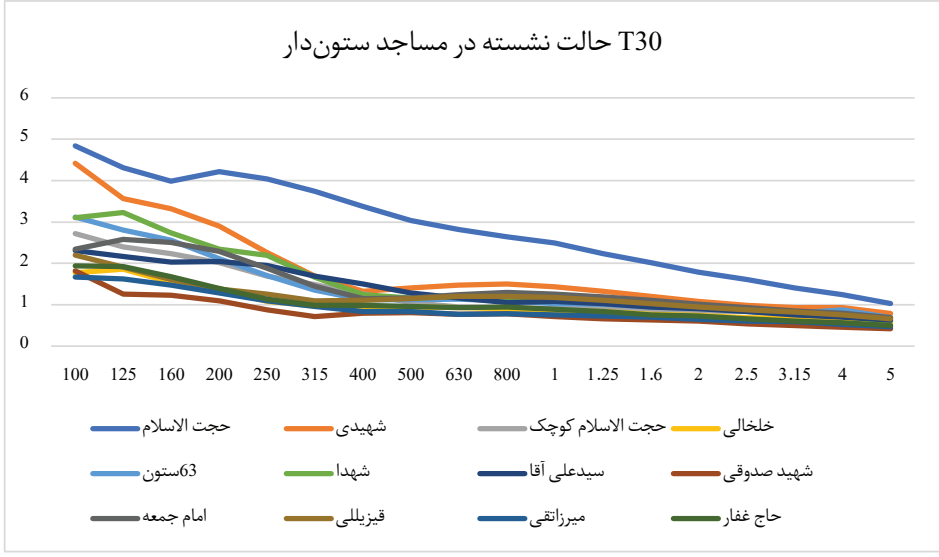
شکل ۱. تجمیع نویز زمینه در نمونه‌های سنجش

بالاترین میزان زمان واخنش ارتفاع ایستاده در نمونه بزرگ هندسه طولی، مسجد حجت الاسلام، ثبت شده است. این تفاوت در غالب فرکانس‌ها رخ می‌دهد که بنظر بدلیل نوع کفپوش نمونه است. کمترین مقادیر زمان واخنش نیز در کوچک‌ترین نمونه عرضی، مسجد شهید صدوقی روی می‌دهد. برخی نمونه‌ها در فرکانس‌های ابتدایی با افزایش ناگهانی زمان واخنش و سپس با کاهش آن مواجه می‌شوند. بیشترین تفاوت‌ها در مقادیر RT نیز همچون میزان BN مربوط به فرکانس‌های بم بوده که با افزایش فرکانس، تفاوت‌ها کاهش و روند تغییرات منتظم‌تر می‌شود. پس از ۵۰۰ هرتز رفتار منتظم مذکور مشهود است و صرفا بزرگ‌ترین نمونه طولی تفاوت فاحشی در ماندگاری صدا با دیگر نمونه‌ها نشان داده است (شکل ۲).



شکل ۲. تجمیع زمان واخنش در نمونه‌های سنجش در ارتفاع ایستاده

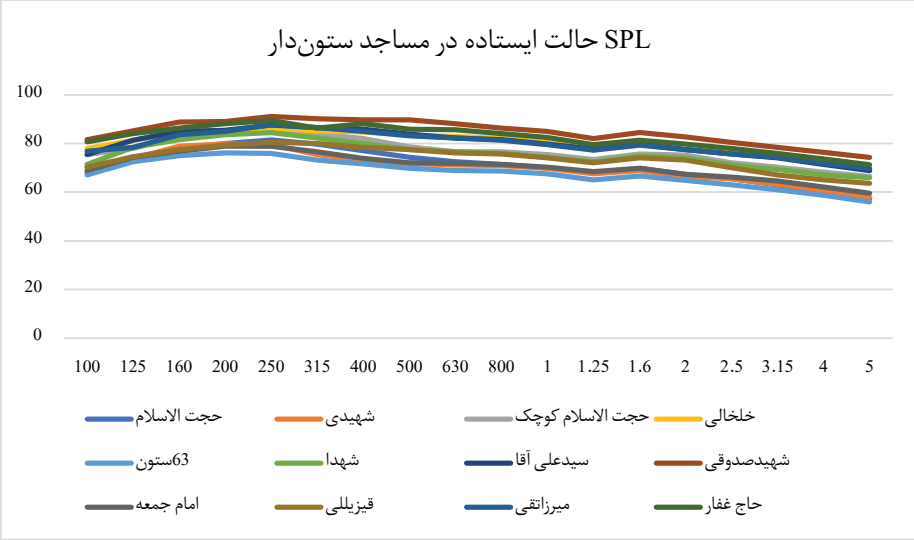
با قرارگیری در ارتفاع نشسته نمونه‌هایی که دارای بالاترین زمان واخنش هستند، همچنان بیشینه زمان واخنش را به خود اختصاص می‌دهند، ولیکن مقادیر آن کاهش می‌یابد. به عبارتی دیگر وضعیت نمونه‌ها در مقادیر RT مشابه حالت ایستاده باقی می‌ماند و مساجدی که زمان واخنش بالاتر یا کمتر دارند، همچنان RT بیشتر و یا کمتر ثبت نموده‌اند، لیکن مقدار آن کاهش دارد. لذا مشابه ارتفاع ایستاده مسجد حجت الاسلام همچنان بیشترین زمان واخنش را در غالب فرکانس‌ها از آن خود نموده و در مقابل، مسجد شهید صدوقی کمترین مقادیر را داراست (شکل ۳).



شکل ۳. تجمیع زمان واخنش در نمونه‌های سنجش در ارتفاع نشسته

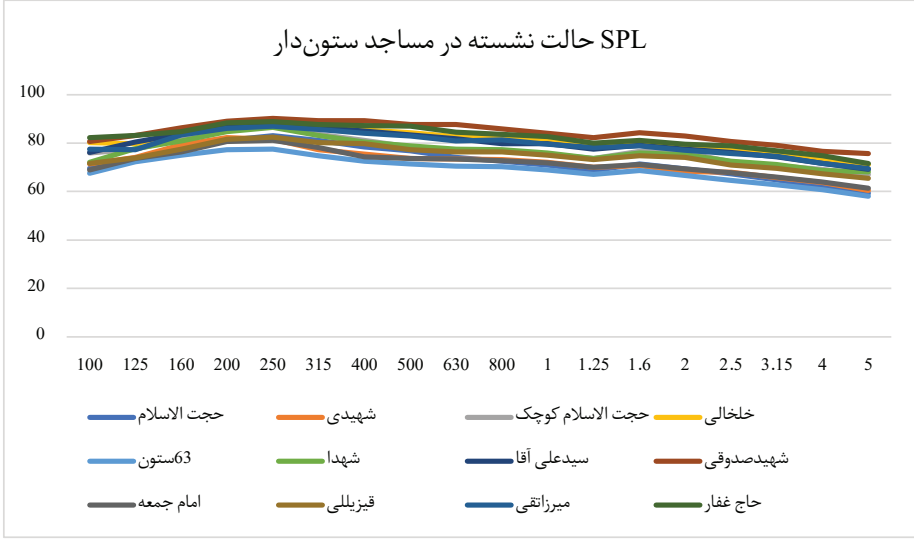
تمام نمونه‌های سنجش درخصوص مقادیر تراز فشار صدا در ارتفاع ایستاده رفتار مشابهی دارند و مقادیر بیشینه و کمینه در تمام نمونه‌ها در فرکانس‌های مشابهی رخ می‌دهد. ۲۵۰ هرتز در تمام نمونه‌ها بیشترین

SPL را ارائه داده و ۵۰۰۰ هرتز کمترین مقادیر را در تمام نمونه‌ها ثبت کرده است. کوچک‌ترین نمونه عرضی، مسجد شهید صدوقی، بالاترین SPL را داراست و بزرگ‌ترین نمونه عرضی، مسجد ۶۳ ستون، کمترین مقادیر تراز فشار صدا را از آن خود کرده است. بالاترین میزان SPL ۹۱/۱۴ دسی‌بل و کمترین میزان آن ۵۶/۰۲ دسی‌بل ثبت شده است (شکل ۴).



شکل ۴. تجمیع تراز فشار صدا در نمونه‌های سنجش در ارتفاع ایستاده

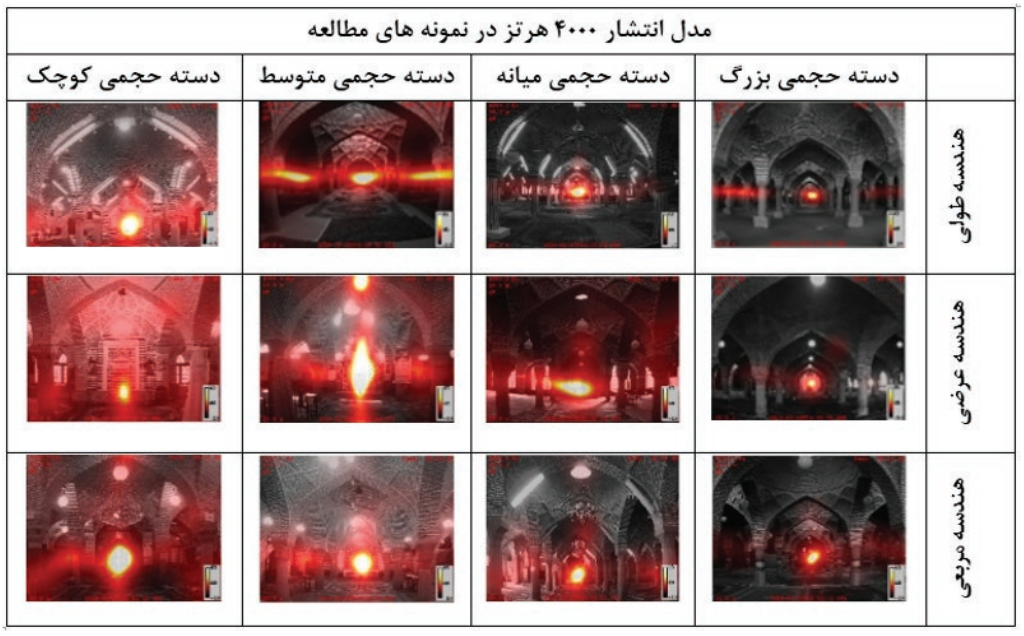
کم شدن ارتفاع و شبیه‌سازی حالت نشسته نماز، نوسان مقادیر SPL را در طیف فرکانسی افزایش می‌دهد و حالت خطی نمودارها، دارای تنش‌های جزیی به نظر می‌رسند. مشابه حالت ایستاده، کوچک‌ترین نمونه عرضی و بزرگ‌ترین نمونه عرضی به ترتیب بیشترین و کمترین میزان SPL را نشان می‌دهند. تفاوت بیشترین و کمترین مقدار ثبت شده در نمونه‌ها، در ارتفاع نشسته کمتر از ارتفاع ایستاده است و لذا تغییرات فرمی و حجمی در ارتفاع ایستاده با ایجاد تغییرات بیشتر در تراز فشار صدا، محسوس‌تر خواهد بود (شکل ۵).



شکل ۵. تجمیع تراز فشار صدا در نمونه‌های سنجش در ارتفاع نشسته

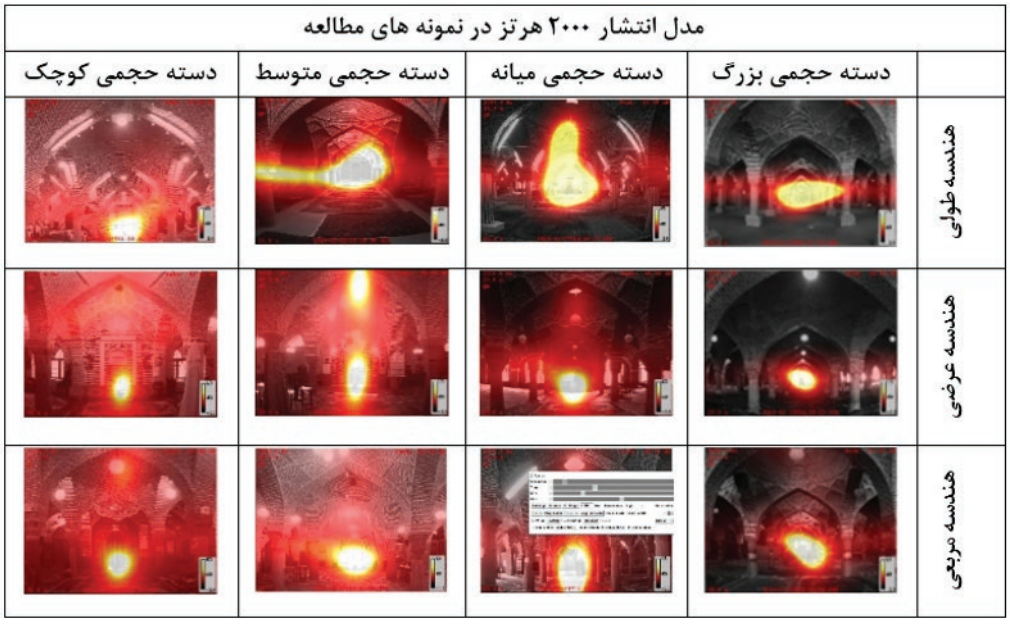
تحلیل آماری تاثیر کفپوش بر نتایج بدست آمده که با آزمون آنووا[۴] در نرم افزار SPSS انجام یافته است، نشان می‌دهد نوع کفپوش بر مقادیر زمان واخنش موثر ولیکن در میزان تراز فشار صدا تاثیری ندارد. این مساله که به وضوح در نمونه فاقد فرش، قابل حس است، با تحلیل آماری، میزان ارتباط را با سطح معناداری ۰/۱ برای SPL برابر با ۰/۴۹۵ و درمورد T30 برابر با ۰/۰۶۶ تبیین می‌کند.

برداشت‌های دوربین صوتی حاکی از آن است که نمونه‌ها در ۴۰۰۰ هرتز پخش صدای تقریبا مشابهی دارند و مدل انتشار، ارتباط چندانی به هندسه شکلی پلان نشان نمی‌دهد. پخش صدا با کوچک‌تر شدن نمونه فراگیرتر می‌شود و شدت شنیده شدن در نمونه‌های کوچک‌تر بیشتر است (شکل ۶).



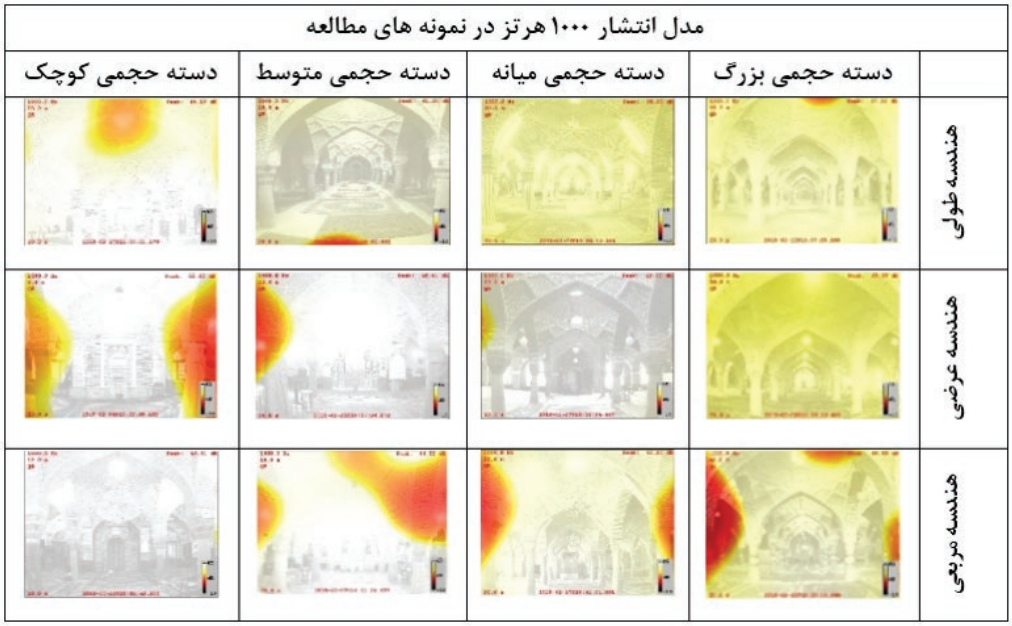
شکل ۶. مدل انتشار ۴۰۰۰ هرتز در نمونه‌های مطالعه

فرکانس ۲۰۰۰ هرتز در نمونه‌های بزرگ‌تر محدوده پرشدت وسیع‌تری ایجاد می‌نماید؛ درحالیکه با کوچک شدن نمونه، محدوده پرشدت، کوچک‌تر لیکن پخش آن در سراسر نمونه وسیع‌تر می‌گردد. هندسه طولی، شدت ۲۰۰۰ هرتز را با کششی محوری به راستای افقی یا عمودی سوق می‌دهد، اما هندسه عرضی و مربعی، تمرکز شدت صدا را در منبع حفظ می‌نمایند (شکل ۷).



شکل ۷. مدل انتشار ۲۰۰۰ هرتز در نمونه‌های مطالعه

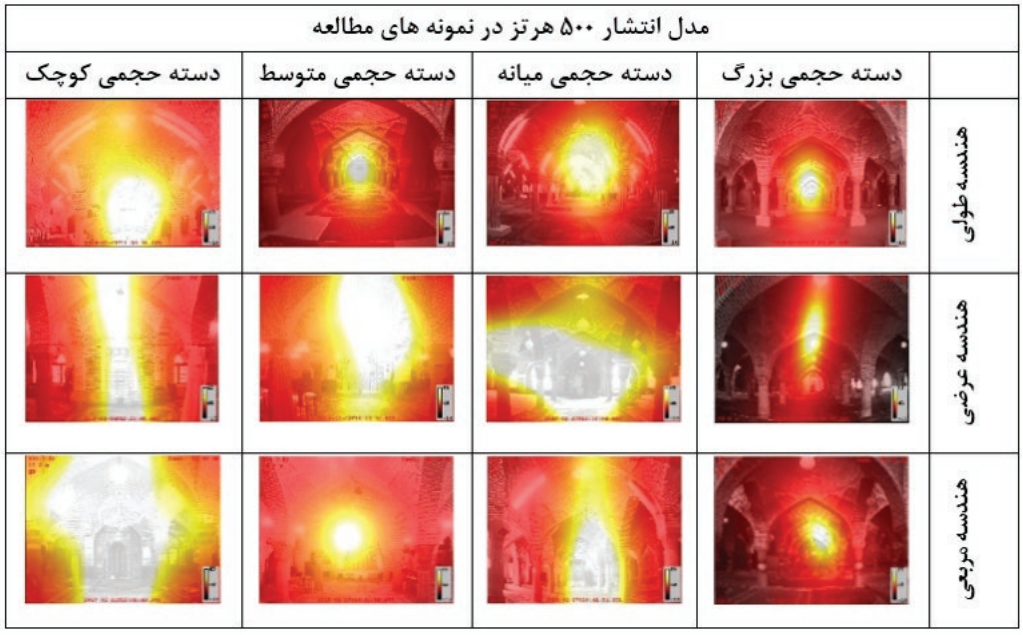
۱۰۰۰ هرتز در سراسر همه نمونه‌ها با شدت بالایی شنیده می‌شود و تمام مساجد فارغ از حجم، اندازه و هندسه شکلی حاکم بر آن‌ها پراکنش ۱۰۰۰ هرتز را به طور گسترده در خود تامین می‌نمایند (شکل۸).



شکل ۸. مدل انتشار ۱۰۰۰ هرتز در نمونه‌های مطالعه

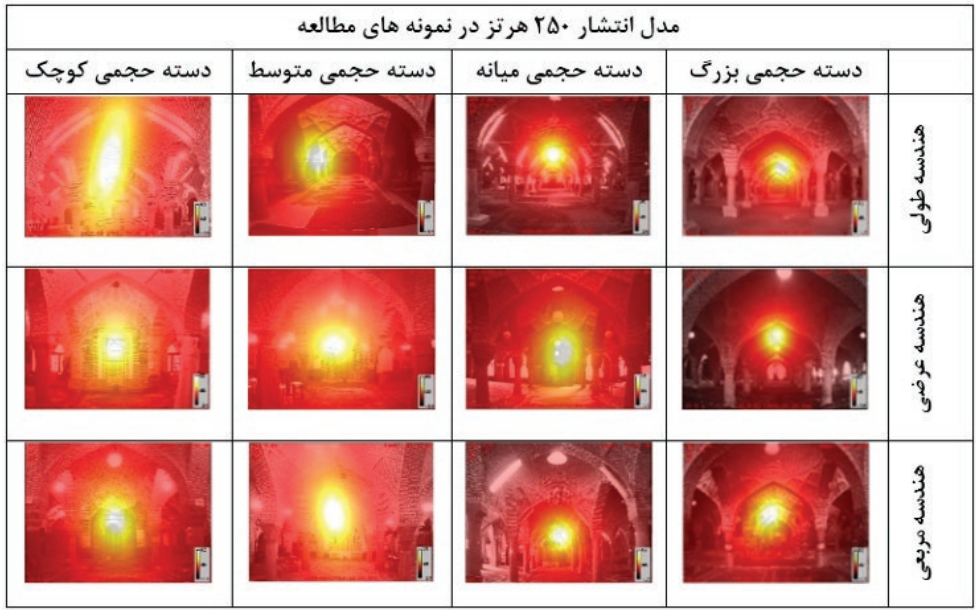
در فرکانس ۵۰۰ هرتز پخشایی صدا در حال بازگشت به مدل انتشار فرکانس‌های بالاتر از ۱۰۰۰ هرتز است. شدت بالای صدا مجددا به محدوده منبع اصلی متمایل است و تمام نمونه‌ها بیشترین مقدار ۵۰۰ هرتز را در مرکز فضا که عبور مستقیم صدا در آن اتفاق می‌افتد، تجربه می‌نمایند.

لیکن هندسه طولی در تمام گروه‌های حجمی رفتار منظم‌تر و گستره شدت محدودتری نشان می‌دهد (شکل ۹).



شکل ۹. مدل انتشار ۵۰۰ هرتز در نمونه‌های مطالعه

انتشار صدای ۲۵۰ هرتز، وابستگی به هندسه و حجم نمونه نشان نمی‌دهد و پخش این فرکانس به طور کل به عهده عناصر فرمی سقف است. در تمام نمونه‌ها، مدل انتشار صدا حاکی از آن است که ۲۵۰ هرتز از منبع اصلی شنیده نمی‌شود و پراکنش آن از بازتاب‌های سقفی منبعث می‌گردد. این امر توسط مولفه‌های منحنی سقفی همچون گوشه‌سازی گنبدها و کاربندی محقق می‌شود و هرچه نمونه بزرگ‌تر می‌شود، مولفه مذکور در نزدیکی منبع اصلی ایفای نقش نموده و با کوچک بودن نمونه به عناصر انتهایی مسجد منتقل می‌شود (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. مدل انتشار ۲۵۰ هرتز در نمونه‌های مطالعه

نتیجه‌گیری

سنجش نویز زمینه، زمان واخنش و تراز فشار صدا که با رعایت ضوابط ISO3382 و در دو ارتفاع ایستاده و نشسته به منظور شبیه‌سازی حالات نماز انجام گرفته است، نشان می‌دهد نمونه‌ها تفاوت‌های رفتاری بارزی به نسبت هندسه شکلی ارائه نمی‌دهند. میزان سروصدای زمینه تا حد زیادی به مکان قرارگیری نمونه مربوط است، لیکن تفاوت‌های آن بر اساس افزایش و کاهش فرکانس، تابع رفتار مشخصی است که در فرکانس‌های بالاتر کاملا یکسان می‌گردد. زمان واخنش به حجم نمونه وابسته‌تر به نظر می‌رسد و هرچه نمونه بزرگ‌تر می‌شود ماندگاری صدا در آن فارغ از هندسه پلان بیشتر خواهد بود. لیکن فرکانس و نوع کفپوش در این امر نقشی اساسی دارد و در فرکانس‌های مختلف تفاوت زمان واخنش در نمونه‌ها متغیر است. در این میان، هندسه طولی و کشیدگی در راستای قبله در نمونه‌های بزرگ، بیشترین میزان زمان واخنش را داراست و این امر در حالت نشسته نیز وجود دارد که دلیل آن در نمونه بزرگ و با استناد به تحلیل‌های آماری، منبعث از نوع کفپوش است[۵] و لذا می توان با تغییر نوع کفپوش و مفروش نمودن نمونه، مقادیر بدست آمده را بهبود بخشید. در نمونه میان حجم، با اضافه نمودن میزان سطح فضا شرایط بهتری بدست خواهد آمد. این امر با استناد به رابطه سابین[۶] که از روابط پایه در مطالعات آکوستیکی است، بدیهی است که افزایش سطح را سبب کاهش زمان واخنش نشان می‌دهد. کم شدن ارتفاع که منجر به نزدیک شدن به سطح جاذب فرش در مساجد می‌گردد، در تمام نمونه‌ها منجر به کاهش زمان واخنش می‌شود و در نمونه‌های پر پس‌آوا، نشسته بودن، صدا را مطلوب‌تر جلوه خواهد داد. تراز فشار صدا کاملا تابع حجم است و نمونه‌ها با الگوی مشخصی صرفا میزان SPL را متفاوت نشان می‌دهند. ضبط تصویرهای صوتی از مدل انتشار صدا در نمونه‌ها حاکی از آن است که رفتار پخشایی در نمونه‌های ستون‌دار طولی به ویژه در نمونه‌های بزرگ‌تر این گروه اندکی متفاوت از باقی نمونه‌هاست و در باقی مساجد، عملکرد آکوستیکی، مشابه خواهد بود. نحوه پراکنش که در فیلم‌برداری‌های صوتی قابل مشاهده است، نشان می‌دهد انتشار صدا در نمونه‌ها از عناصر معمارانه‌ای منبعث می‌شود که در تمام آن‌ها ثابت بوده و به عنوان هندسه ساختاری در این پژوهش، یکسان در نظر گرفته شده است. صدا بسته به فرکانس آن بازتاب‌های ستونی و سقفی مشخصی ارائه می‌دهد که برگرفته از فرم‌های منحنی سقفی همچون قوس طاق، گوشه‌سازی گنبد، کاربندی‌ها و عناصر مشابه است. همین امر ثابت می‌کند که هندسه ساختاری بر نتایج پژوهش غالب بوده و ثبوت آن منجر به مشابهت دستاوردهای کمی و کیفی آکوستیکی گردیده است. به عبارتی بهتر می‌توان گفت در آکوستیک مساجد، هندسه ساختاری بر هندسه شکلی ارجح‌تر بوده و تعیین‌کننده کیفیت آکوستیک فضاست. چنانچه نمونه‌های دیگری با هندسه ساختاری مشابه طرح گردد، بدون توجه به هندسه پلان در آن‌ها، رفتارهای مشابه آکوستیکی دور از انتظار نخواهد بود. لیکن وجود تفاوت‌های اندک هندسه طولی که هم در نتایج کمی و هم در دستاوردهای کیفی حاصل از دوربین صوتی به چشم می‌خورد، نشان‌دهنده لزوم توجه به کشیدگی فضا در راستای قبله و نیز اهمیت نوع کفپوش است.

پی‌نوشت‌ها

1. Shape factor : Shf
2. Form factor : Ff
3. Reference Sound source (RSS)
4. Anova

۵. مطالعات نشان می‌دهد کفپوش و نوع آن با تغییر در ضریب جذب کلی بر رفتار آکوستیکی فضا و بخصوص زمان واکنش

موثر است (Elkhateeb *et al*., 2016). آزمایشات انجام گرفته برای تعیین ضریب جذب مواد، فرش را در فرکانس‌های بم با حداقل ۰٫۰۲ دسی‌بل جاذب تعریف می‌کند و این مقدار در فرکانس‌های زیر تا ۰٫۷۳ افزایش می‌یابد (Crocker, 1997; Long, 2006

6. $$T_{60} = k\frac{v}{\sum \alpha \times s}$$ K=0.161

فهرست منابع

- Abdou AA. (2003). Comparison of the acoustical performance of mosque geometry using computer model studies. *Eighth International IBPSA Conference.* 39-46.
- Abdullah, A. H., & Zulkefli, Z. A. (2014). A study of the acoustics and speech intelligibility quality of mosques in Malaysia. *Applied Mechanics and Materials,* 564, 129-134.https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.564.129.
- Alomari .O. M, Gandah . F, Khraisat. D. (2019). The Impact of Geometrical Structure of Domes on the Acoustic Performance within Mosques. *Journal of Civil Engineering and Architecture,* 13(4). 244-250. https://doi.org/10.17265/1934-7359/2019.04.003.
- Azizah Adnan, N., Raja Shahminan, R. N., Khair Ibrahim, F., Tami, H., Yusuff, M. R. M., Murniwaty Samsudin, E., & Ismail, I. (2018). Acoustic Quality Levels of Mosques in Batu Pahat. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 140(1) .1-8. https://doi.org/10.1088/1755-1315/140/1/012009.
- Che Din, N., Anura, N., Jalil, A., Yahaya Ahmad, Othman, R., & Otsuru, T. (2013). Noise Control for Quality of Life Measurement of the acoustical performance of traditional vernacular mosques in Malaysia. *Inter Noise Conference,* Austria, 15-18.
- Crocker. M. (1997). *Encyclopedia of Acoustics.* U.S.A : John Wiley.
- Elkhateeb, A. A. (2012). Effects of Non-Traditional Forms on Masjids Acoustics. *Building Acoustics,* 19(2), 119-138. https://doi.org/10.1260/1351-010X.19.2.119.
- Elkhateeb, A., Adnan, A., Maged .A., Yasser, B. (2016). Absorption Characteristics of Masjid Carpets. *Applied Acoustics,* 105, 143-55. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.12.005.
- Gul, Z. S., & Caliskan, M. (2013). Acoustical design of Turkish Religious Affairs Mosque. *Proceedings of Meetings on Acoustics,* 19, 1-9. https://doi.org/10.1121/1.4800903.
- Hossam Eldien, H. (2014). Impact of mosque geometry on its acoustical performance. *Conference Paper ٭ December 2014.* Https://doi.org/10.13140/2.1.4977.3601.
- Ismail, M. R. (2013). A parametric investigation of the acoustical performance of contemporary mosques. *Frontiers of Architectural Research,* 2(1), 30-41. https://doi.org/10.1016/j.foar.2012.11.002.
- ISO 3382-1:2009(E). International Organization for Standardization Provided by IHS under license with ISO. Switzerland.
- ISO 3382-2:2009(E). International Organization for Standardization Provided by IHS under license with ISO. Switzerland.
- Long, M. (2006). *Architectural Acoustics.* U.S.A : Elsevier.
- Oldham, D. J., & Elkhateeb, A. (2008). The Architectural Development of the Historic Masjids in Cairo and its Acoustical Impact. *Building Acoustics,* 15(3), 197-229. https://doi.org/10.1260/135101008786348672.

- Oluyombo A. O., Olorunfemi T. A., Adefila B.C. (2007). The assesment of acoustic situations in a mosque in akure. The department of architecture federal University of technology Akure, course lecturer.
- Orfali, W. A. (2009). Sound parameters in mosques. *Proceedings of Meetings on Acoustics,* 1, 035001. 1-21. https://doi.org/10.1121/1.2829306.
- Othman, A. R., & Mohamed, M. R. (2012). Influence of Proportion towards Speech Intelligibility in Mosque's Praying Hall. *Procedia - Social and Behavioral Sciences,* 35, 321-329. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.02.094.
- Sü Gül, Z., Çalışkan, M., & Tavukçuoğlu, A. (2014). On The Acoustics of Sü leymaniye Mosque: From Past to Present. *MEGARON / Y ld z Technical University, Faculty of Architecture E-Journal,* 9(3), 201-216. https://doi.org/10.5505/megaron.2014.96168.
- Syamsiyah, N. R, Dharoko, A., Utami, S. S. (2018b). The Role of Geometric Shape of Javanese Traditional Mosque in Forming the Characteristic of Room Acoustics. *Advanced Science Letters,* 24(12), 9209-9213(5).
- Syamsiyah, N. R., Dharoko, A., & Utami, S. S. (2018a). Sound preservation at the Grand Mosque of Yogyakarta in Indonesia: The acoustic performance of the traditional architecture. *AIP Conference Proceedings,* 1977. https://doi.org/10.1063/1.5043002.

Vol. 14 • No. 35 • Summer 2022

Received: 12 June, 2021 | Accepted: 03 December, 2021

Document Type: Research Paper

The Effect of Plan and Formal Geometry of Mosques on the Acoustic Quality of Architecture Case Study: Historical Mosques of Tabriz

Farzaneh Gholizadeh
PhD in Islamic Architecture, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran

Abbas Ghaffari
Associate Professor, Department of Technology in Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran (Corresponding Author)

Mohammad Ali Keynejad
Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran

Abstract

The mechanical sound wave tends to propagate freely in space. In the open environment, sound energy decreases over time due to geometric divergence and environmental losses, but in the closed environment, which is defined by architecture; The boundaries of the space create another event on the produced sound and make its features more different. The shape of the mentioned range affects the sound quality and the architectural space in its 6 dimensions is defined as a range in which the sound acquires different qualities in dealing with it. The desired acoustic quality in the construction of mosques is one of the requirements for the design of this space, because the audience interacts with their sense of hearing in the presence and benefit of this place of worship. The desired listener in the architectural space requires the correct knowledge of the architectural components, the shape of the plan and the formal structure are among the most important. The geometric shape of the plan is one of the factors determining how sound is distributed in the architectural space, while the structural geometry and form of the space are also influential. If it is possible to study only some of the variables by proving some parameters in architectural aspects; It can be argued that the effect of the selected factor on the acoustic quality has been investigated. The purpose of this study is to analyze the effect of plan shape geometry on acoustic quality in the columnar form model of mosques, which can be evaluated in various volumetric classifications. The present study has selected the geometry of the plan as a study variable among the various components of architecture and the elements that form the form such as columns, domes, materials, etc. that is called formal geometry. In order to achieve its goal, 12 different examples of historical mosques in Tabriz that have fixed structure geometry; It has been analyzed in 4 volumetric categories and in three formal categories. The study tool is field measurement and is based on ISO3382 measurement. Background noise, Reverberation time and sound pressure level are the acoustic variables studied. The research results prove that formal geometry dominates the research results and its proof has led to the similarity of quantitative and qualitative acoustic achievements. In other words, it can be said that in the acoustics of mosques, formal geometry is preferable to plan geometry, which determines the acoustic quality of the space. If other examples are designed with similar formal geometry, regardless of the plan geometry in them, similar acoustic behaviors will not be unexpected. However, there are slight differences in the longitudinal geometry of both the quantitative results and the qualitative achievements of the sound camera; Indicates the need to pay attention to the elongation of space in the direction of the Qqibla. Therefore, in general, it can be said that the research achievement states that despite the fact that longitudinal geometry offers a different function, in a more comprehensive view, formal geometry in same material is preferable to plan geometry and its stability has led to homogeneity of acoustical behavior in samples.

Keywords: Architectural acoustics, plan geometry, formal geometry, mosque