مقاله کاربردی

بررسی و اجرای اصلاحات آکوستیکی رواق امام خمینی(ره) در حرم مطهر امام رضا (ع)

ابوالفضل رضائی ازغندی
کارشناسی ارشد
دانشگاه بین‌المللی امام رضا (ع)
Abolfazl.rezaei@gmail.com

مجتبی دلیری*
استادیار
دانشگاه بین‌المللی امام رضا (ع)
m.daliri@imamreza.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۲/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۶/۲

چکیده

کیفیت آکوستیک سالن‌های اجتماعات از ویژگی‌های کلیدی در طراحی معماری اینگونه اماکن است. این چالش از گذشته مورد توجه معماران اماکن مذهبی بوده است. با توجه به پوشش ویژه رواق‌های حرم مطهر امام رضا (ع) با آینه، طراحی یک سیستم صوتی برای برگزاری مراسم مذهبی در آن با چالش‌های جدی روبه‌رو می‌باشد و از پیچیدگی بالایی برخوردار است. رواق امام خمینی (ره) در حرم مطهر امام رضا (ع) به لحاظ آکوستیکی یک محیط بسیار پیچیده است و با توجه به جایگاه ویژه این رواق در اجرای برنامه‌های حرم مطهر، انجام یک پژوهش علمی در مورد شرایط آکوستیکی این رواق از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش سعی شده است در ابتدا شرایط آکوستیکی رواق امام خمینی (ره) شرح داده شده، سپس جهت بهبود شرایط موجود، مبتنی بر نتایج شبیه‌سازی، اصلاحات آکوستیکی پیشنهاد گردد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی و بررسی‌های میدانی، پیشنهادهایی همچون نصب جاذب‌های صدا در دیواره‌های کناری و پشت جایگاه مراسم و همچنین ایجاد راهروهای کناری با استفاده از دیواره‌های دکوراتیو و جاذب صدا ارائه و برخی از آن‌ها اجرا گردید که منجر به بهبود شاخص انتقال کلام[1]، از کمتر از ۰/۴ به حدود ۰/۶ و مدت زمان بازآوایی[2] از حدود ۱۰ ثانیه در بسامدهای کمتر از ۵۰۰ هرتز تا کمتر از ۲/۵ ثانیه گردید که برای سالنی با حجم تقریبی بیش از ۶۰۰۰۰ متر مکعب و با پوششی تمام آینه مطلوب می‌باشد.

واژگان کلیدی: اُدئون، شاخص انتقال کلام، زمان بازآوایی، آکوستیک، رواق امام خمینی (ره)

* نویسنده مسئول

۱. مقدمه

آکوستیک علم مطالعه‌ی تولید و عبور صدا از محیط‌های مادی و تمامی پدیده‌های مربوط به آن می‌باشد. امروزه مهندسی آکوستیک شاخه‌های مختلفی مانند طراحی و اجرای آکوستیک سالن‌های سخنرانی و موسیقی، استودیوها، آکوستیک سازهای موسیقی و ... را دارا می‌باشد [۱].

به طور کلی فرآیند انتقال اطلاعات از طریق صوت از مرحله‌ی تولید تا شنونده شامل سه قسمت منبع، محیط مادی و گیرنده است. منبع می‌تواند حنجره‌ی یک انسان یا هر منبع تولید صدا باشد. صدای تولیدی برای رسیدن به مقصد از محیط مادی می‌گذرد. گوش شنوندگان و یا میکروفون ضبط صدا یا میکروفون اندازه‌گیری، گیرنده است. برای بهسازی کیفیت صدای شنیده شده در یک محیط، یا باید ویژگی‌های منبع را تغییر داد، یا باید گیرنده را به لحاظ ادراکی تغییر داد، و یا محیط انتشار صدا را بهبود بخشید.

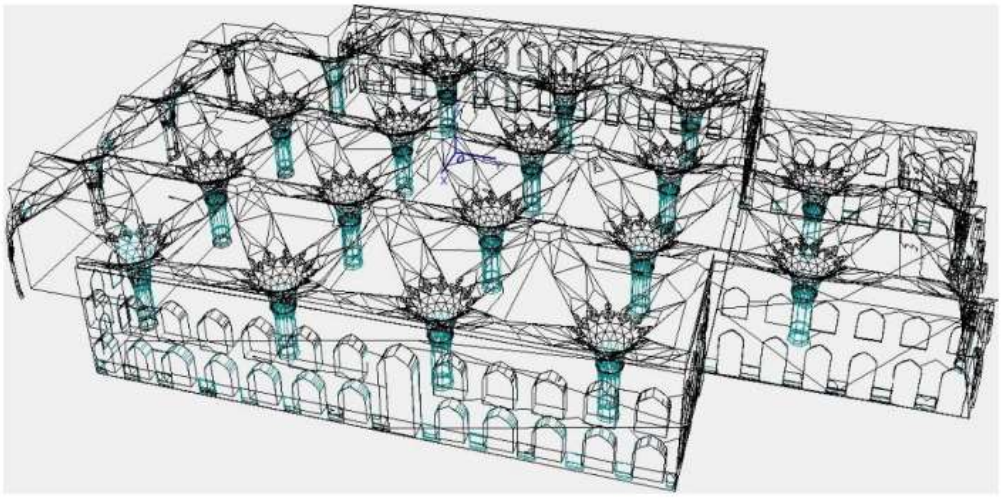
در تحقیقاتی که پیش از این روی آکوستیک رواق امام خمینی(ره) انجام شده یکی از مفروضات این بوده که به علت عدم امکان اعمال تغییرات ساختاری در بلندگوهای نصب شده، رفتار بسامدی آن‌ها تا حد زیادی قابل کنترل نیست بنابراین تغییر منبع مقدور نبود. از طرفی فرض بر این است که بهسازی آکوستیک رواق باید به گونه‌ای باشد که افراد مختلف، به ویژه افرادی با محدودیت‌های شنوایی که به نوفه زمینه حساس‌تر از دیگران هستند نیز بتوانند از محیط آکوستیکی مناسبی بهره‌مند شوند. بنابراین، ضرورت بررسی و تحلیل محیط انتشار صدا در این فضا بیش از پیش مشخص شد [۱].

دیگر اینکه در آن مطالعات همواره ایجاد تغییرات در معماری غیرممکن فرض شده و از این‌رو به موضوع استفاده از جاذب‌های صوتی پرداخته نشده است و تنها در یک مورد جاذب‌های شفاف قابل اعمال بر روی آینه‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند که کارآیی لازم را نداشته است [۲].

رواق امام خمینی (ره) به عنوان اصلی‌ترین فضای داخلی برگزاری مراسم در حرم مطهر امام رضا (ع) همواره مورد توجه بوده است. انتقال صدای واضح و با کیفیت مطلوب به گوش حاضرین در این رواق کار دشواری است و اگر هم با استفاده از تجارب گذشته، میزان زمان بازآوایی کم شده به قیمت از دست رفتن بخشی از صدا بوده است. این رواق با مساحتی در حدود ۹۸۰۰ متر مربع و حجم بیش از ۶۰۰۰۰ متر مکعب و سطوحی صیقلی با مشکلات متعددی مانند ماندگاری طولانی‌مدت انرژی آکوستیکی، وضوح کم صدا، نوفه محیطی بالا در حین اجرای مراسم، عدم امکان ایجاد تغییرات ساختاری قابل توجه در معماری، ابعاد بسیار بزرگ و نبود مکان مناسب جهت نصب بلندگوها، مواجه است.

در این مقاله ابتدا سعی خواهد شد شناخت دقیقی از وضعیت آکوستیکی و شاخص‌های مهم آن در رواق امام خمینی (ره) ارائه گردد و سپس در راستای اصلاح آن‌ها پیشنهاداتی متناسب با تمامی محدودیت‌ها و در چهارچوب مقررات آستان قدس رضوی ارائه گردد و گزارش نتایج این اقدامات بیان شود.

در شکل ۱ نمای سه‌بعدی رواق امام خمینی نشان داده شده است. از مدل سه‌بعدی این فضا در نرم افزار ادئون[۳] استفاده شده است.



شکل ۱. نمای سه‌بعدی رواق امام خمینی در حرم مطهر امام رضا (ع)

یافتن نقاط چالش‌برانگیز و ارائه راه‌حل‌های اجرایی مناسب برای حذف اثرات مخرب این نقاط بر صدای محیط از اهداف دیگر این پژوهش بوده است.

کاربری‌های مختلف این رواق (سخنرانی، نمازهای جمعه و جماعت و مداحی‌های پرشور و...)، جمعیت‌های مختلف و غیریکنواخت، برنامه‌های متنوع متوالی، تنوع مداحان و سخنرانان، وجود راهروهای محل تردد زائران در محل مراسم و استفاده از مصالح بازتاب‌دهنده، چالش‌های مهمی هستند که باید در راهکارهای پیشنهادی، مورد توجه قرار گیرند.

در بخش دوم مبانی نظری مورد نیاز این پژوهش جهت مرور ارائه خواهد گردید. در بخش سوم پژوهش‌های مشابهی که در مورد مساجد و اماکن مذهبی تاکنون انجام شده است مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. چالش‌ها و راه‌حل‌های آکوستیک رواق امام خمینی (ره) به ترتیب در بخش‌های ۴ و ۵ مورد بررسی قرار خواهند گرفت. بر اساس پیشنهادات بیان شده در بخش ۵، نتایج شبیه‌سازی‌های مرتبط در بخش ۶ نشان داده شده است. مراحل اجرایی این پیشنهادات نیز به تفصیل در این بخش نشان داده شده است. در نهایت در بخش‌های ۷ و ۸ نیز نتیجه‌گیری و منابع ارائه شده است.

۲ . مبانی نظری

پارامترهای مورد نیاز برای بررسی آکوستیکی محیط مورد مطالعه در این مقاله عبارتند از:

۲-۱. تراز فشار صدا[۴]

تراز فشار صدا (SPL) برابراست با ۱۰ برابر لگاریتم (برپایه ۱۰) مربع فشار صدا به مربع فشار مبنا (آستانه شنوایی انسان) بر حسب دسی‌بل[۵] [۸]. هراندازه که مقدار این شاخص در طول رواق بازه کوچک‌تری داشته باشد نشان دهنده یکنواختی بیشتر صدای محیط است.

۲-۲. زمان بازآوایی یا واخنش

زمان بازآوایی (RT) مدت زمانی است که طول می‌کشد تا انرژی صدا، بعد از خاموش شدن منبع صوتی، ۶۰ دسی‌بل (dB) افت کند [۸]. در فضاهایی با کاربری سخنرانی، بازآوایی کمتر، مطلوب‌تر است.

والاس کلمنت سابین[۶] کشف کرد که نرخ تضعیف صدا در یک اتاق، مستقل از تعداد منابع صدا، یکسان است.

یعنی چنانچه صدای در حال پخشی در یک محیط، به طور ناگهان قطع شود، انرژی صدا در فواصل زمانی مشابه، به مقدار مشابهی افت می‌کند و مقدار افت انرژی صدا همیشه درصد ثابتی از انرژی اولیه است [۲].

به منظور اندازه‌گیری RT60، نیاز به صدایی حداقل ۶۰ دسی‌بل بلندتر از صدای پس زمینه می‌باشد که در عمل اندازه‌گیری آن بسیار دشوار است، لذا عموماً یکی از مقادیر RT30 ، RT20 و EDT[7] اندازه‌گیری شده که معادل افت تراز فشار صدا به میزان ۳۰، ۲۰ یا ۱۰ دسی‌بل است و سپس در مضرب مناسب (به ترتیب ۲، ۳، ۶) ضرب می‌گردد. مقدار زمان بازآوایی قابل قبول برای یک سالن سخنرانی بین ۰/۴ تا ۱/۲ ثانیه است [۲].

زمان بازآوایی بهینه در رواق امام بر اساس حجم رواق و طبق فرمول سابین ۳/۰۲ ثانیه می‌باشد. این عدد با توجه به اینکه فضای موجود بسیار بزرگ است، طبق فرمول نوریس آیرینگ[8] که برای این فضاها واقعی‌تر است، برابر با ۱/۹۸ ثانیه است و این نشان دهنده فاصله زیاد شرایط موجود با شرایط بهینه است.

۲-۳. معیار نوفه[9]

در سیستم‌های صوتی هر صدایی غیر از صدای اصلی نوفه محسوب می‌شود. استانداردهای نوفه پس‌زمینه سنجه‌های مختلفی را استفاده می‌کنند، که یکی از آن‌ها معیار نوفه (NC) است. این معیار منحنی‌هایی هستند که تراز فشار مجاز صدا را برای بسامدهای مختلف به صورت یک منحنی نشان می‌دهند. نوفه اتاق در بندهای هنگامی اندازه‌گیری شده و بر روی یک گراف با منحنی‌های NC کشیده می‌شود. به عنوان مرجع NC-25 نشان‌دهنده اتاق مناسب برای صدابرداری و NC-60 نشان دهندهٔ یک اتاق پرنوفه است [۲].

۲-۴. نوفه و فهم‌پذیری گفتار[10]

چنانچه صدایی که به گوش شنوندگان می رسد ۱۵ دسی‌بل قوی‌تر از نوفه محیط باشد، آن‌ها می‌توانند کلام را به خوبی درک کنند. اما وضوح کلام با کم شدن این اختلاف افت می‌کند. نوفه سیستم‌های مکانیکی نظیر تأسیسات تهویه مطبوع، مهم‌ترین منبع نوفه هستند که باعث کاهش فهم‌پذیری گفتار می‌شوند.

درک کلام در یک فضا با یکی از سه‌معیار شاخص فهم‌پذیری کلام[11] (SII) شاخص انتقال کلام (STI)، یا شاخص انتقال کلام سریع [12] (RASTI) یا یک معیار قدیمی‌تر به نام شاخص شمردگی[13] (AI) که به ندرت استفاده می‌شود، سنجیده می‌شود [۲].

۲-۵. شاخص انتقال کلام

این شاخص یکی از معیارهای مهم آکوستیکی در حوزه‌ی ادراک گفتار است و مقدار آن بین صفر و یک می‌باشد. با توجه به پیشرفت تجهیزات اندازه‌گیری، کمیتی برای اندازه‌گیری قابلیت درک کلام در سیستم‌های پخش صوت عمومی[14](PA) به نام STIPA[15] در نظر گرفته شده است که تقریبی از STI می‌باشد.

بر اساس مقدار STI، فضاها به پنج دسته، طبق جدول ۱ تقسیم‌بندی می‌شوند [۳]. برای اماکن عمومی بزرگ و پرنوفه مقادیر ۰/۴۵ الی۰/۶ مقداری نزدیک به واقعیت در رواق امام است [۴].

جدول ۱. درجه‌بندی مقادیر مختلف STI [۳]

نرخ قابلیت فهم	شاخص انتقال کلام	امتیاز فهم کلمات بر حسب درصد
عالی	>۰/۷۵	>۹۸

خوب	۰/۶۰ تا ۰/۷۰	۹۳ تا ۹۸
نسبتاً خوب	۰/۴۵ تا ۰/۶۰	۸۰ تا ۹۲
ضعیف	۰/۳۰ تا ۰/۴۵	۶۰تا ۷۹
بد	<۰/۳۰	<۶۰

۲-۶. شفافیت C50 [۱۶]

شفافیت یکی از پارامترهای اصلی ارزیابی کیفیت آکوستیکی فضاهای بسته است. که بر مبنای پارامتر C50 تعریف می‌شود. این پارامتر به‌صورت نسبت لگاریتمی انرژی صوتی دریافت‌شده در بازه ۵۰ میلی‌ثانیه نخست پس از رسیدن صدای مستقیم (شامل صدای مستقیم و نخستین انعکاس‌ها) به انرژی دریافت‌شده پس از این بازه (دنباله بازآوایی) بیان می‌شود. اگر بازآوایی ترکیب هجاها و نت‌های موسیقی باشد، شفافیت در مقابل آن و به معنی تمایز هر هجا و نت است. شفافیت و بازآوایی معکوس هم هستند[۲].

۲-۷. تعریف D50 [۱۷]

نرخ انرژی صوتی دریافت شده در کمتر از 50ms بعد از رسیدن صدای اصلی نسبت به کل انرژی بر حسب درصد را D50 گویند. این شاخص در مواردی که نویز محیطی زیادی نداشته باشیم کاربرد دارد لذا در این پژوهش به علت وجود نویز پس زمینهٔ زیاد این شاخص مورد ارزیابی قرار نخواهد گرفت[۲].

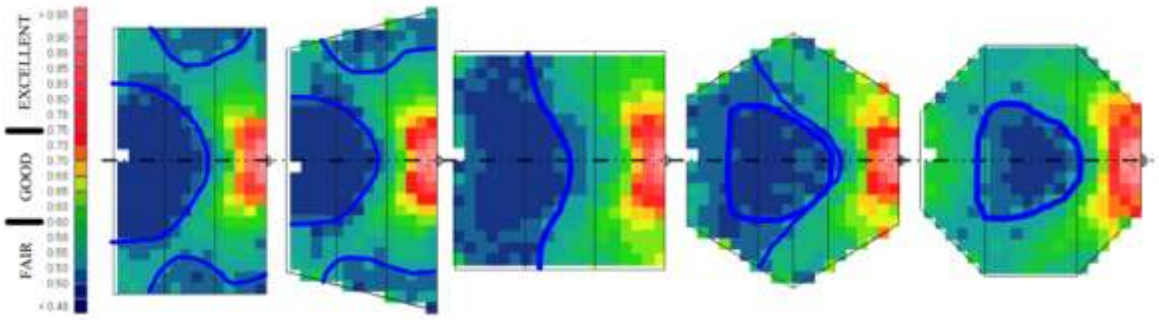
۳. پیشینه تحقیق

با توجه به نوع کاربری رواق امام خمینی (ره)، مقالاتی که رفتار آکوستیکی مکان‌های مذهبی و مساجد را مورد بررسی قرار داده‌اند در اولویت بررسی قرار گرفتند. در این بخش نتایج این مقالات به صورت خلاصه ارائه خواهد گردید تا چالش‌ها و محدودیت‌های این قبیل مکان‌های مذهبی تبیین گردد.

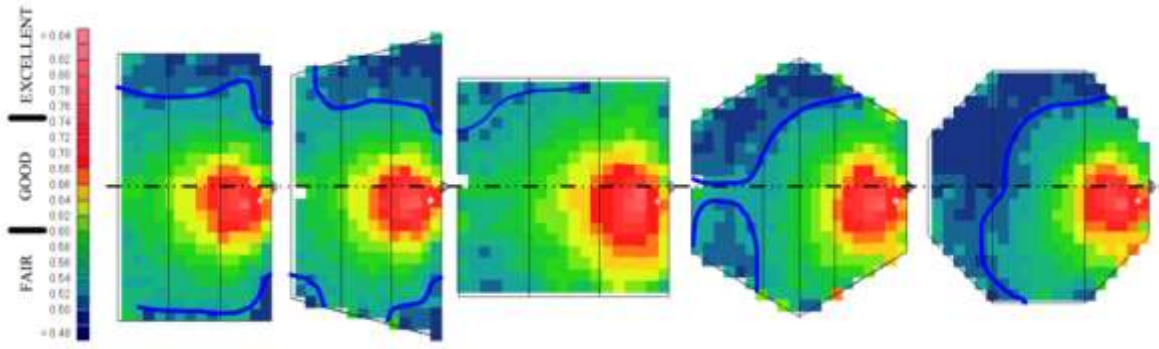
یکی از مکان‌های مورد بررسی مسجد ایاصوفیا[۱۸] در استانبول است [۵]. در این پژوهش، به منظور ارزیابی تأثیر جمعیت بر مقادیر STI، شبیه‌سازی‌ها در دو حالت جمعیت عادی و پر ازدحام در چندین هندسهٔ متفاوت مسجد، شامل مربع، شش ضلعی، هشت ضلعی، مستطیل و ذوزنقه با توجه به دیواره‌ی اصلی محل محراب، انجام شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی (شکل۲)، بهترین STI مربوط به مسیر مستقیم می‌باشد زیرا با صداهای بازتاب‌یافته تداخل پیدا نمی‌کند و فهم‌پذیری کلام کاهش نمی‌یابد. در سایر نقاط به خصوص در گوشه‌ها که شکستگی و منحنی در دیوار وجود دارد و بازتاب صدا بیشتر است، فهم‌پذیری به شدت کاهش یافته است. از دیگر نتایج این تحقیق این است که با افزایش جمعیت شاخص STI بهبود می‌یابد.

در شکل هندسی مربع، به علت توزیع یکنواخت، مقدار STI تفاوت عمده‌ای در حالت نمازهای روزانه و نماز جمعه ندارد. در حالی که در هندسه هشت ضلعی به دلیل تأثیر امواج بازتاب‌یافته در مرکز، وضعیت STI بسیار نامطلوب است.

در مرجع [۵] ، علاوه بر وضعیت STI میزان RT نیز در سه حالت خالی از جمعیت، با یک سوم جمعیت و کاملا پر برای هندسه‌های مختلف بررسی شده است. هر چه حضور افراد کمتر باشد مقدار زمان بازآوایی در باندهای میانی افزایش می‌یابد. مقدار RT در هنگام برگزاری نمازهای روزانه در پنج حالت هندسی متفاوت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده است، که به وضوح نشان می‌دهد حضور افراد حتی به میزان محدود و پراکنده می‌تواند به میزان قابل توجهی صداهای بازتاب‌یافته را جذب کرده و RT را کاهش دهد [۵].



(الف)



(ب)

شکل۲. نمودار STI در هندسه‌های متفاوت در دو حالت نمازگزاران مسجد **ایاصوفیا**، (الف) نماز جماعت روزانه، (ب) نماز جمعه [۵].

مسجد کُجاتِپه[۱۹] واقع در آنکارا مکان دیگری است که مورد مطالعه قرار گرفته است [۶]. در این تحقیق جهت بررسی ویژگی‌های آکوستیکی این مسجد، دو وضعیت (نشسته با ارتفاع ۰/۸ متر و ایستاده) برای نمازگزاران در نظر گرفته شده است. از لحاظ جمعیتی نیز سه وضعیت خالی، با جمعیت معادل یک سوم ظرفیت و پر، مورد بررسی قرارگرفته است. مهم‌ترین پارامتر گزارش شده نیز RT می‌باشد. پارامترهای دیگری مانند زمان افت اولیه (EDT)، ضریب شفافیت[۲۰] هشتاد میلی‌ثانیه (C80)، پارامتر میزان انرژی جانبی[۲۱] (LF)، و شاخص انتقال گفتار (STI) نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است [۶]. در ضمن به منظور انجام محاسبات، دو حالت متفاوت سخنران که یکی در محراب و دیگری در محل مکبّر است نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در پایان بررسی‌ها مشخص شده است که این مسجد محل بسیار مناسبی برای قرائت قرآن کریم است، اما برای نماز و سخنرانی، وضوح گفتار نامطلوبی دارد که علت آن زمان بازآوایی برابر با ۶/۲ ثانیه در باند یک سوم اکتاو برای بیش از ۹۰٪ شنوندگان است [۶].

این مسجد از شاخص انتقال گفتار ضعیفی برخوردار است. این شاخص برای بخش اعظم قسمت‌های جلویی مقادیری بین ۰/۲۵ تا ۰/۳ است. نتایج به دست آمده همچنین نشان می‌دهد که پارامترهای EDT، C50 و D50 در قسمت‌های عقبی مقادیر بهتری دارند [۶].

یکی دیگر از پژوهش‌های کاربردی در حوزهٔ اماکن مذهبی، شبیه‌سازی آکوستیکی مسجد جامع یزد در نرم افزار ایز[۲۲] می‌باشد [۷]. در فضاهای مختلف مسجد، توزیع مناسب تراز فشار صدا وجود دارد و زمان بازآوایی

فضا از فرکانس‌های پایین به فرکانس‌های بالا نزولی است. زمان‌های بازآوایی اندازه‌گیری شده در مسجد در نقاط مختلف تغییر محسوسی را نشان می‌دهند. این مقادیر نشان‌دهندهٔ امکان تأثیرگذاری گنبد، سطوح قوس‌دار، فرش‌ها، ابعاد، شکل دیواره‌ها و ... در شاخص‌های آکوستیک است [۷].

بالابودن RT در بسامدهای پایین به دلیل بازتاب‌های گنبد بوده و همچنین عدم وجود موانعی مثل ستون و دیواره‌های کوتاه (مکان‌هایی که زنان در آن قسمت به عبادت می‌پردازند) امکان بیشتری را برای شکل‌گیری بازتاب‌ها در فضای مسجد ایجاد می‌کند [۷].

مطالعه‌ی دیگری که بر روی ۸ مسجد در آناتولی توسط سرت و کارمان (۲۰۲۱) انجام شده تأثیر مصالح و معماری را بر آکوستیک محیط بررسی کرده است. این پژوهش تأثیر بسیار زیاد فرم سقف‌ها و مصالح در شرایط آکوستیک مساجد را نشان داده است.[۸]

در الجزایر نیز سه مسجد توسط بن فرحات و همکاران (۲۰۲۲) مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر بسیار زیاد وجود جمعیت بر روی شاخص‌های زمان بازآوایی و انتقال کلام اثبات شده است. در دو مسجد زمان بازآوایی در حدود ۳ ثانیه بوده بنابراین وضوح کلام در سطح نسبتاً خوب و در بخش‌هایی ضعیف قرار داشته اما در مسجد سوم که جمعیت بیشتری حضور داشتند، زمان بازآوایی در حدود ۱ ثانیه بوده، وضوح کلام بهتر و شاخص انتقال کلام در حدود ۰/۶ بوده است[۹].

مطالعات بر روی دو مسجد در ماکاسار اندونزی توسط کاسنو و همکاران (۲۰۲۵) تأثیرات رطوبت نسبی، نوفه محیطی و پوشش‌های سطحی را بر شاخص‌های آکوستیکی بررسی کرده که بیانگر اثر قابل توجه رطوبت نسبی بر زمان بازآوایی است. ضمن اینکه آنچه بهترین عملکرد را در بهبود شرایط آکوستیکی ایجاد کرده است استفاده از جاذب‌های صوتی بر روی دیواره‌ها و سقف است.[۱۰]

رواق امام خمینی (ره) فضایی بسیار بزرگ و متفاوت با بسیاری از مساجد دیگر دارد. ابعاد بزرگ‌تر و اشکال خاص معماری و پوشش تمام آینه و کاشی آن، می‌تواند بر انتشار صوت و شکل‌گیری بازتاب‌ها تأثیر بسزایی بگذارد.

رواق امام خمینی (ره) به عنوان یکی از نقاط کلیدی حرم مطهر امام رضا(ع) و یک مسیر اصلی ارتباطی از نیمه جنوبی حرم مطهر به سمت روضه منوره همواره مورد توجه زائران و محل تردد ایشان است. این جمعیت می‌تواند باعث ایجاد نوفه و اختلال در انتشار صدا شود و البته در حین مراسم به عنوان جاذب بسیار خوبی نیز عمل کند. در ادامه، چالش‌های مخصوص رواق امام خمینی (ره) تشریح خواهد شد.

۴. چالش‌های تحلیل آکوستیکی رواق امام خمینی (ره)

رواق امام‌خمینی(ره) که در سال ۱۳۸۱ عملیات ساخت آن آغاز شد، بزرگ‌ترین رواق حرم مطهر است. رواقی با ۹۸۰۰ مترمربع مساحت (کمتر از یک هکتار) که با ۲۴ ستون عظیم، با فاصله تقریبی ۱۸ متر از یکدیگر و سقف‌های معلق بین آن‌ها، در زمره عظیم‌ترین سازه‌های مذهبی کشور قرار می‌گیرد. در مرکز سقف، میان هر چهار ستون، یک نورگیر هشت ضلعی تعبیه شده و ارتفاع آن از کف رواق، ۱۶ متر است (شکل۱).

یکی از مهم‌ترین دلایل انجام این پژوهش، نشان دادن میزان اهمیت ملاحظات آکوستیک در طراحی فضاها در نزد مسئولان، تصمیم‌گیران و طراحان فضاها در آستان

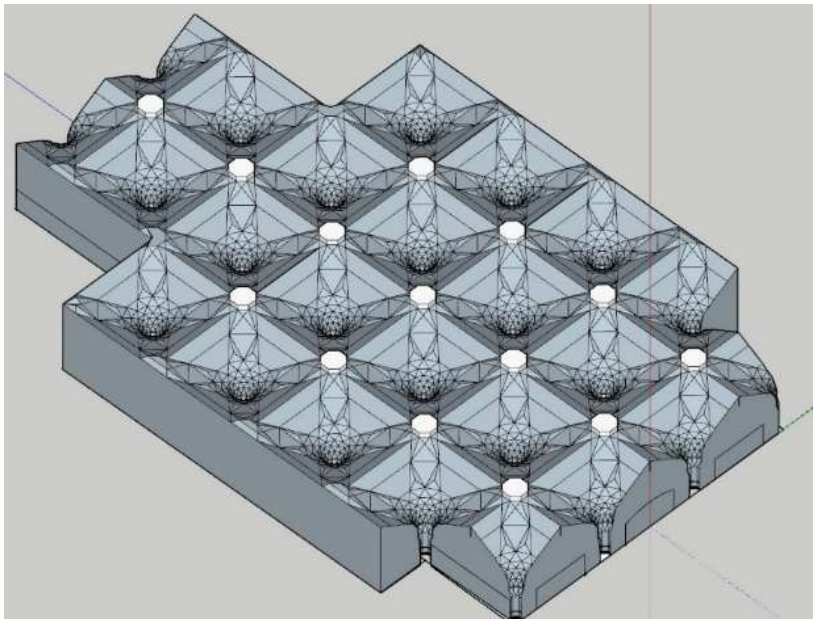
قدس رضوی و دیگر اماکن مذهبی می‌باشد. چرا که بسیاری از مشکلاتی که امروز در این فضاها وجود دارند، در طراحی‌ها قابل پیش‌بینی و پیش‌گیری بوده است و همان‌طور که در رواق امام نیز شاهد آن هستیم امکان ایجاد کوچک‌ترین تغییرات و یا اصلاحات آکوستیکی به دلیل امکان آسیب به معماری و جلوه‌های بصری وجود ندارد.

شناخت دقیق هندسه و تزئینات رواق، جهت شناخت رفتار آکوستیک رواق و ایجاد صدایی با کیفیت بالاتر بسیار مهم است. از این رو در گام اول برنامه‌ریزی گردید تا مدل سه‌بعدی دقیق رواق جهت انجام شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار ادئون تهیه گردد. لذا پروژه‌ای در این زمینه تعریف گردید. انجام این پروژه با توجه به پوشش تمام آینه و کاشی رواق دارای چالش‌های زیادی بود که با همت تیم فنی حرم مطهر تا حد امکان با بالاترین کیفیت انجام گردید.

بزرگ‌ترین چالش در تحلیل رفتار آکوستیکی رواق امام خمینی (ره) توسط نرم‌افزار ادئون وارد کردن نقشهٔ سه‌بعدی در نرم‌افزار بود.

نقشهٔ سه‌بعدی رواق در ابتدا متشکل از یک میلیون صفحهٔ مجزا بود که طی چندین مرحله ساده‌سازی به حدود ۲۱ هزار عدد کاهش یافت و نقشه‌ها با موفقیت تبدیل و اولین تحلیل‌ها اجرا گردید (شکل ۳).

امکان ساخت جاذب‌های صوتی آراسته و همخوان با معماری، ارائه راهکارهایی جهت رسیدن به عددی بین ۰/۴۵ تا ۰/۶۰ در شاخص انتقال کلام و کاهش زمان بازآوایی به عددی کمتر از ۳ ثانیه از اهداف انجام این پژوهش تعریف گردید.



شکل ۳. نقشهٔ ساده‌سازی شدهٔ رواق امام خمینی (ره) به منظور کاهش مدت زمان تحلیل‌ها

شناخت دقیق تر نسبت به محیط رواق و ماهیت انعکاس‌ها و سعی بر کنترل آن‌ها و استفاده از جاذب‌های صوتی موجود و ساخت جاذب‌های نوآورانه‌ای که با معماری هم‌خوانی داشته باشند از جنبه‌های نوآورانه‌ی این پژوهش است.

این پژوهش کاملاً عملیاتی و برخواسته از نیازهای شناسایی شده از تجربیات کاربری در طول ده سال می‌باشد. در این پژوهش تلاش شده است تا کلیهٔ قوانین آستان قدس رضوی و مدیریت حرم مطهر در مورد عدم لطمه به شکل برگزاری مراسم روزانه و معماری رواق امام خمینی (ره) نیز لحاظ شود.

۵. راه‌حل‌های آکوستیکی پیشنهادی در رواق امام خمینی (ره)

اصلی‌ترین مشکل در فرآیند صدارسانی در رواق امام خمینی (ره) و به صورت کلی معماری حرم مطهر رضوی، سطوح بازتاب‌دهنده است که اغلب با آینه و کاشی پوشانده شده‌اند وبیش از ۹۰٪ انرژی آکوستیکی را بازتاب می‌دهند

از سوی دیگر زیبایی بی نظیر این نوع پوشش نباید تغییر یابد. از این رو ایجاد یک محیط آکوستیکی با کیفیت بالا، چالشی بسیار بزرگ و پیچیده می‌باشد.

جهت بهبود شرایط آکوستیکی رواق، پیشنهادهای متنوعی می‌توان مطرح نمود اما مواردی که بیشتر قابلیت اجرایی شدن داشته باشند و به معماری سالن صدمه وارد نکنند و امکان اخذ مجوز برای آن‌ها وجود داشته باشد در اولویت قرار دارند. با این دیدگاه پیشنهادات زیر مطرح و مورد تحلیل قرار گرفت .

- نصب پرده‌هایی با ضریب جذب حداقل ۰/۵ در دیواره‌های کناری
- اجرای دیواره‌های جانبی با ضریب جذب ۱ در راهروهای دو طرف رواق
- نصب پرده‌های شفاف با ضریب جذب ۱ در شیارهای سقف

بررسی نتایج تحلیل‌های اولیه بدون اعمال تغییراتی در رواق امام خمینی (ره) در نرم‌افزار ادئون نشان می‌دهد امواجی که با محور انتشار افقی در طول و عرض رواق حرکت می‌کنند بسیار دیرتر از امواجی که به سمت زمین یا سقف حرکت می‌کنند میرا می‌شوند و این به دو علت است. اول اینکه این امواج به تعداد کم‌تری از موانع و سطوح برخورد می‌کنند و جذب، پخشایی[۲۳]، و پراکندگی[۲۴] کم‌تری را تجربه می‌کنند، و دوم اینکه امواجی که به سمت سقف حرکت می‌کنند پس از یک یا چند برخورد در مدت زمان کم‌تری به سمت زمین بازتاب می‌یابند، و به علت وجود جمعیت و فرش‌ها که تنها جاذب‌های موجود در محیط هستند زودتر میرا می‌گردند. لذا امواج افقی و سطوحی که صدا را در امتداد محورهای افقی در محیط منتشر می‌کنند، نقش مهم‌تری در کاهش کیفیت و وضوح صدا در رواق دارند. نمونه هایی از این امواج در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.

از سوی دیگر ساختار بلندگوهای موجود که زاویهٔ پرتاب عمودی آن‌ها ۱۰۰ درجه می‌باشد، امواج زیادی را به سمت دیواره‌ها ارسال کرده و مشکل امواج افقی را تقویت می‌کنند. مجموع عوامل فوق بیانگر اهمیت بسیار بالای کنترل امواجی است که به صورت افقی منتشر می‌شوند.

از سوی دیگر نوفه محیطی در حدود 50 الی 60 دسی‌بل ناشی از سیستم‌های هواساز و همهمه‌ی جمعیت در محیط رواق امام خمینی (ره) که اثر منفی قابل توجهی بر روی شاخص‌های آکوستیکی دارد، از دیگر عواملی است که در تحلیل‌ها در نظر گرفته شده است.

۶. شبیه‌سازی آکوستیکی رواق امام خمینی(ره)

در این بخش چهار سناریو جهت شبیه‌سازی طراحی گردید و در نقشه پیاده‌سازی شد. در ادامه نتایج هر

یک را به طور مجزا مورد بررسی قرار خواهیم داد تا در نهایت راه‌حل نهایی ارائه گردد. در تمامی این تحلیل‌ها ضریب بازتاب تمامی شیشه‌ها و آینه‌ها و سنگ‌های مرمر ۱ در نظر گرفته شده است. تعداد گیرنده‌ها ۷ عدد و در مکان‌های ثابت و در ارتفاع ۸۰ سانتی‌متری از سطح زمین در نظر گرفته شده‌اند که در شکل ۵ نشان داده شده است. منابع صوتی به صورت ۲۴ عدد بلندگوی همه‌جهته[۲۵] تعریف گردیده‌اند، که به صورت ثابت و روی ستون‌های سالن مستقر شده‌اند. میزان نوفه محیطی در تمامی حالات ۵۵ دسی‌بل در نظر گرفته شده است که شامل صوت ناشی از ازدحام مردم و سیستم هواساز می‌باشد.

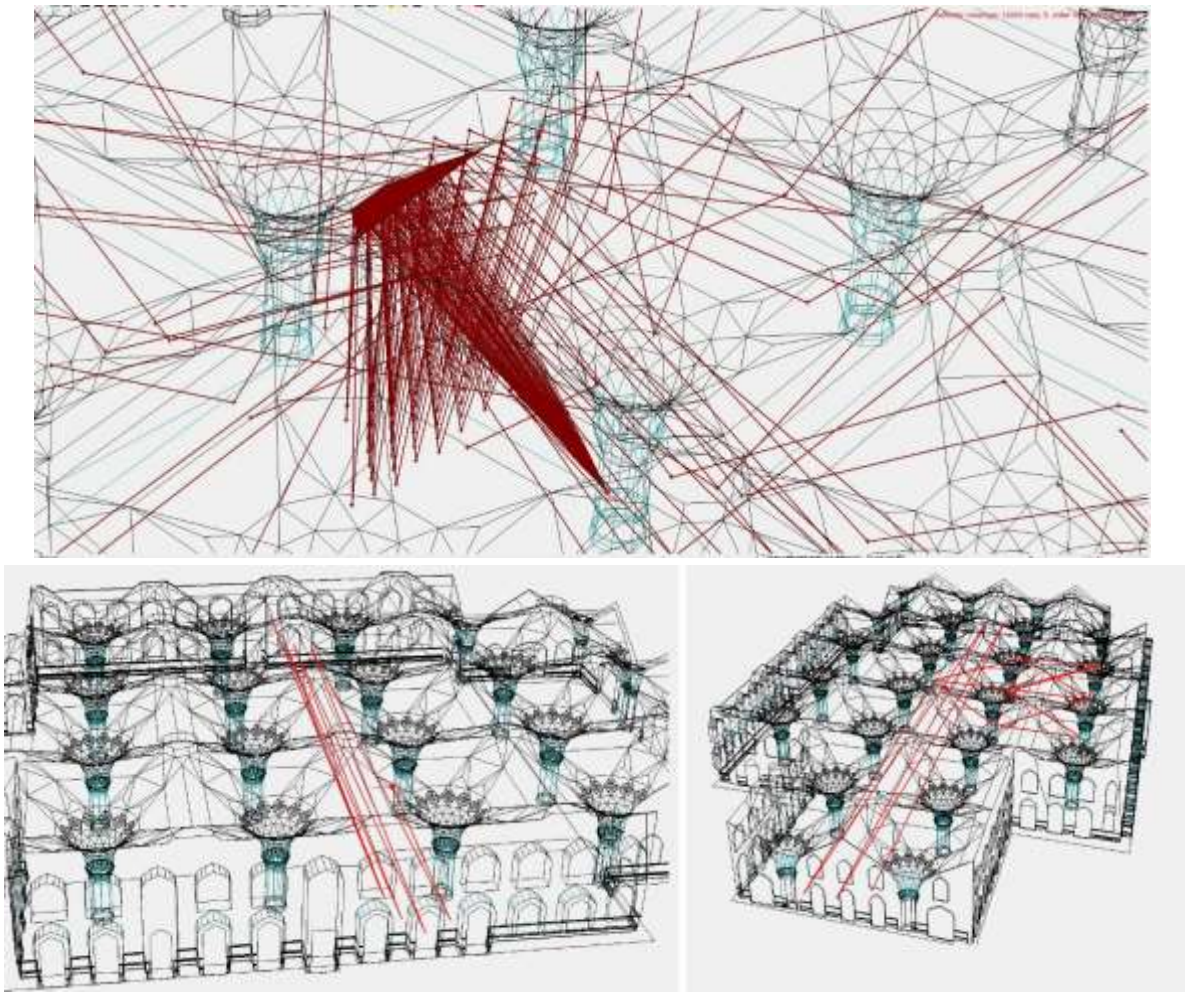
در اولین پیشنهاد (شکل۶)، اثر نصب پرده‌هایی با ضریب جذب حداقل ۰/۵ در دیواره‌های کناری به همراه پرده‌های شفافی که در سقف و محل اتصال نیلوفری‌های ستون‌ها می‌باشد مورد ارزیابی قرار گرفت. در بررسی نتایج تحلیل پیشنهاد اول همان‌طور که در شکل ۷ مشهود است، مقدار شاخص انتقال کلام در سه نقطه‌ی R2,R3,R4 نامناسب (کمتر از ۰/۵) است و شاخص فهم‌پذیری گفتار در این نقاط مورد قبول نیست. زمان بازآوایی نیز در بسامدهای کمتر از ۲۵۰ هرتز بالا است. مجموع داده‌های فوق در سه شاخص اصلی صدا، نشان‌دهنده عدم وضوح کلام در این نقاط است. اما میزان توزیع تراز فشار صوت (SPL) نسبتاً یکنواختی (از ۸۶/۴ تا ۸۷/۸ دسی‌بل) در طول رواق وجود دارد. با توجه به نتایج به دست آمده، این پیشنهاد به تنهایی کافی نخواهد بود و عملکرد مطلوب به دست نیامده است.

دومین پیشنهاد اجرای دیواره‌های جانبی با ضریب جذب ۱ در راهروهای دو طرف رواق است که با پیاده‌سازی صفحاتی مشابه شکل ۷، تحلیل آن در نرم‌افزار اجرا گردید.

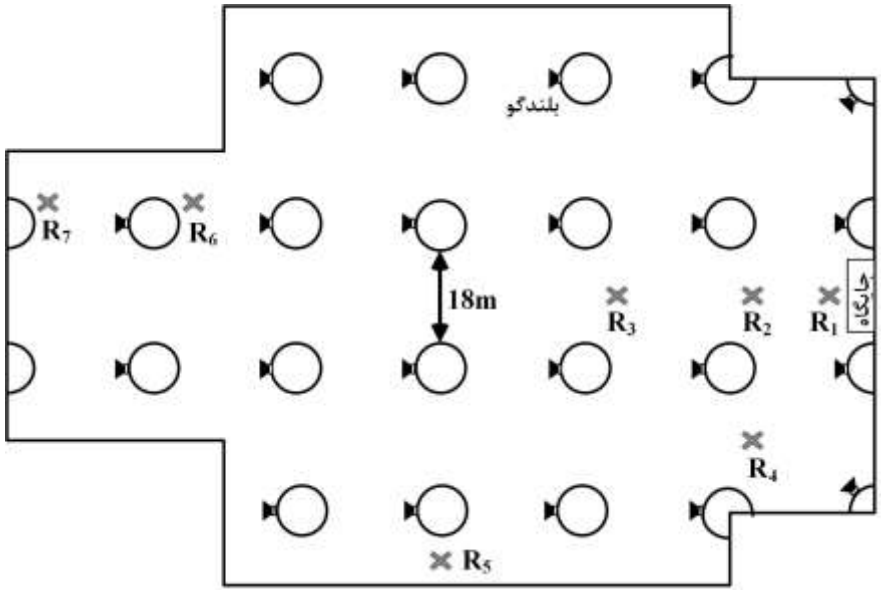
نتایج شبیه‌سازی این پیشنهاد نشان می‌دهد که میزان فشار صوتی به ویژه در بسامدهای میانی در سرتاسر رواق (فشار صوتی ۹۰/۱ تا ۹۰/۶دسی‌بل) به صورت یکنواخت توزیع شده است و همچنین کاهش زمان بازآوایی به کمتر از ۵/۵ ثانیه به خصوص در بسامدهای کمتر از هزار هرتز، از نتایج این پیشنهاد است. اما در جلوی جایگاه وضعیت شاخص انتقال کلام علیرغم اینکه میانگین آن در کل رواق ۰/۵۰ است همچنان مناسب نیست (از ۰/۳۷ تا ۰/۵) و میزان افت وضوح کلام زیاد است (از ۱۲ تا ۲۳ درصد) و نیاز به اصلاح طرح دارد.

به عنوان سومین تحلیل مجموع دو پیشنهاد قبل را اجرا کرده و پرده‌هایی شفاف با ضریب جذب ۱ در شیارهای سقف و جاذب‌هایی با ضریب ۰/۵ بر روی دیواره‌های کناری به همراه دیواره‌های با ضریب جذب ۱ در راهروهای دوطرف نصب گردیدند و تحلیل سوم اجرا گردید که نتایج آن در ادامه آمده است.

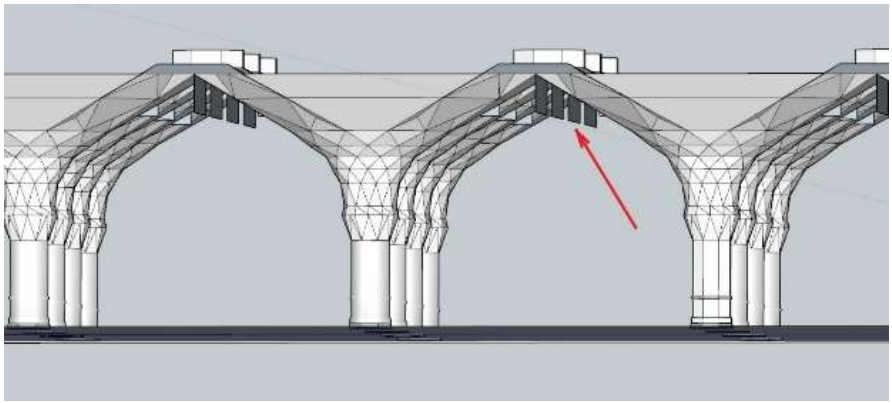
کاهش چشم‌گیر زمان بازآوایی به مقادیری کمتر از ۲/۸۶ ثانیه، کاهش درصد افت وضوح کلام به کمتر از ۱۷ درصد و افزایش محسوس مقدار میانگین STI از ۰/۴۵ به ۰/۵۱ از دستاوردهای مهم این ایده است. اما همچنان مقادیر آن نسبت به هدف تعیین شده که رسیدن به STI بالاتر از ۰/۵۵ در تمام نقاط بود، به خصوص در مقابل جایگاه نامطلوب است.



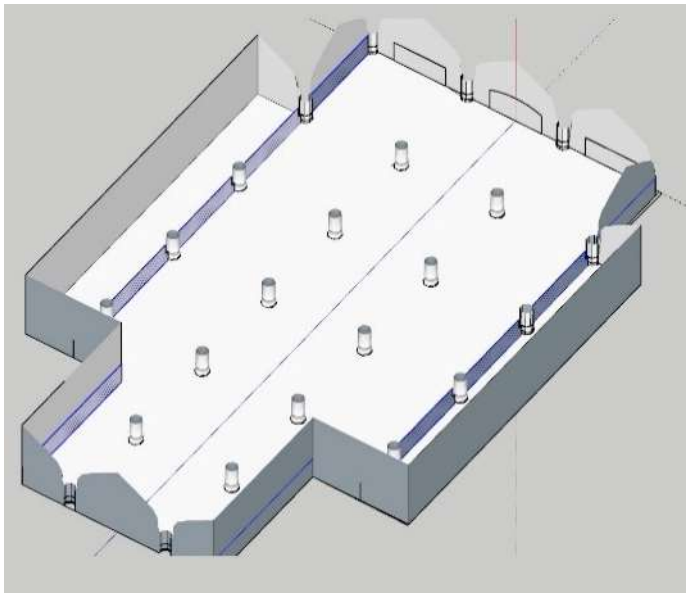
شکل ۴. مقایسهٔ بازتاب‌های عمودی و افقی امواج صوتی در نرم افزار ادئون



شکل ۵. محل استقرار منابع صوتی (بلندگوها) و گیرنده‌ها (ضربدرها)



شکل ۶. نمونه جاذب‌های شفاف پیشنهادی جهت نصب در شیارهای سقف رواق



شکل ۷. طرح پیشنهادی دیواره‌های جانبی با ضریب جذب ۱ در طول رواق

جدول ۲. مقادیر میزان STI در گیرنده‌های مختلف

گیرنده	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
STI	۰/۶	۰/۴۵	۰/۴۸	۰/۴۷	۰/۵۶	۰/۵۵	۰/۵۵

با محرز شدن اثربخشی پیشنهادات قبلی و البته وجود ضعف در دو نقطهٔ اصلی مقابل جایگاه (STI کمتر از ۰/۵) ، این بار علاوه بر اقدامات قبلی با امتداد دادن دیواره‌های جاذب راهروها تا ابتدای ورودی رواق، نصب جاذب های با ضریب جذب ۱ در داخل سازه‌های پشت جایگاه و استفاده از فرش‌های با ضریب جذب ۱ در محدودهٔ جلوی جایگاه، تحلیل دیگری در نرم‌افزار اجرا و نتایج آن مورد ارزیابی قرار گرفت تا انطباق آن با نتایج

واقعی حاصل شده در صحنه مقایسه گردد. بر طبق پروتکل‌های مدیریتی رواق امام خمینی (ره)، در مراسم مختلف همواره محدودهٔ جلوی جایگاه مفروش است. از سوی دیگر جمعیت متراکم جلوی جایگاه در نزدیک شدن ضریب جذب در این نقاط به عدد یک، اثر چشم‌گیری دارد و همان‌طور که مایکل اِرمان در مبحث اثر چگالی صندلی‌ها در کتاب خود نشان داده است، می‌توان با وجود تراکم جمعیتی در حدود ۳ الی ۴ نفر در هر متر مربع که به صورت نشسته در این فضا قرار می‌گیرند و از سوی دیگر استفاده از فرش‌های دستباف قطور، در تحلیل‌ها با تقریب بسیار خوبی ضریب جذب این قسمت را ۱ در نظر گرفت [۱].

بر اساس نتایج شبیه‌سازی با اعمال تغییرات فوق، شاخص انتقال کلام طبق جدول ۳ بین ۰/۵۲تا ۰/۷ (به طور میانگین ۰/۵۹) محاسبه گردید که مطلوب است و میانگین زمان بازآوایی به ۱/۳۸ ثانیه کاهش پیدا کرده است.

افت وضوح کلام نیز در سطح رواق به کمتر از ۱۱ درصد (۴/۲ تا ۱۰/۹۲درصد) رسیده که نشان‌دهنده دریافت حدود ۹۰ درصد مفاهیم برای شنونده است.

بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها و شبیه‌سازی و کسب مجوز از مدیریت حرم، پیشنهاد چهارم با کمی تغییرات به صورت عملی در رواق امام خمینی (ره) اجرا گردید.

در شکل ۸، پیاده‌سازی طراحی ارائه شده نشان داده شده است. نتایج عملی به دست آمده بسیار اثرگذار ارزیابی گردید و طبق بررسی‌های میدانی میزان رضایت زائرین به صورت چشمگیری افزایش یافته است.

همان‌طور که از نتایج تحلیل‌ها پیداست اجرای دو دیوارهٔ جاذب صدا و ایجاد دو راهرو در دو طرف رواق بسیار کاربردی و مؤثر عمل کرده است. این راهروها علاوه بر جذب صدای بلندگوها و جلوگیری از پیچیدن صدا، می‌توانند جاذب صدای همهمهٔ ناشی از تردد مردم در حین مراسم نیز باشند. موضوعی که یکی از عوامل اصلی بالا رفتن پارامتر NC تا مقدار ۵۵ دسی‌بل در رواق شده است. به همین دلیل اثر این دو دیوار در واقعیت قطعاً بیشتر از آنچه در نرم‌افزار به دست آمده خواهد بود .

تحلیل آکوستیکی محیط‌های حرم مطهر امام رضا (ع) خود یک گام مثبت در بهره‌برداری از امکان مذهبی است چرا که این موضوع همواره در کشور ما مغفول مانده و کسب موفقیت در این پروژه می‌تواند به عنوان یک حرکت نو در بهبود آکوستیک این اماکن و استفاده‌ی بهینه از سیستم های صوتی در آن‌ها باشد. کردن پارامترهای آکوستیکی در مرحله‌ی طراحی معماری جزء دستور کار قرار بگیرد.

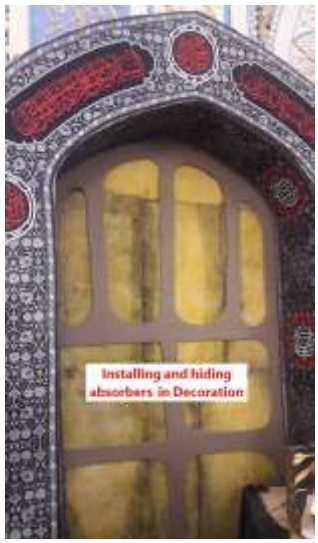
۷. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بهبود کیفیت آکوستیک رواق امام خمینی (ره) با حجم بیش از ۶۰۰۰۰ مترمکعب و پوشش تمام‌آینه و سنگ، انجام شد. با تکیه بر تجربیات

با تلاش‌هایی که صورت گرفته هم‌اکنون پروژه‌های معماری آستان مقدس حضرت علی ابن موسی الرضا علیه السلام منوط به اجرای مقدمات و تحقیقات آکوستیکی گردید و تلاش شده تا از ابتدای برنامه‌ریزی برای طرح‌ها این مباحث مورد توجه قرار گیرند و لحاظ

(الف)

(ب)



(ج)

شکل۸. جاذب‌های نصب شده در رواق امام خمینی (ره) بر اساس پیشنهادات ارائه شده، (الف) جاذب‌های نصب شده در دو سمت راهروهای رواق امام خمینی (ره) مطابق با شکل ۷، (ب) فضای مقابل جایگاه که همیشه در اجرای برنامه‌ها پر از جمعیت است، (ج) جاذب‌های پنهان شده در پشت جایگاه

جدول ۳. مقادیر شبیه‌سازی STI پس از اعمال اصلاحات در رواق امام خمینی (ره)

گیرنده	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
STI	۰/۷	۰/۵۲	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۶۵	۰/۶	۰/۵۷

عملی و تحلیل‌های نرم‌افزاری مشخص گردید مهم‌ترین عامل در وجود زمان بازآوایی بالا در این رواق و پایین بودن شاخص انتقال گفتار دیواره‌های کناری هستند و چنانچه بتوان از برخورد امواج با آن‌ها و بارتاب صدا جلوگیری نمود نتایج قابل توجهی در کیفیت آکوستیک به دست خواهد آمد.

استفاده از پرده‌های جاذب بر روی دیواره‌های کناری و همچنین نصب یک لایهٔ جاذب در راهروهای دو طرف، راهکارهای عملیاتی هستند که می‌توان با استفاده از آن‌ها کیفیت صدارسانی را بهبود بخشید. در تحلیل راه حل پیشنهادی بهینه، تغییر در مقدار STI از کمتر از ۰/۴ به حدود ۰/۶ و همچنین تغییر در زمان بازآوایی از

مقادیری بیش از ۱۰ ثانیه در بسامدهای پایین به حدود ۲/۵ ثانیه به عنوان مهم‌ترین بهبودهای اتفاق افتاده در این پژوهش هستند. در این پژوهش ایده‌ها با استفاده از شبیه‌سازی بررسی گردید و میزان اثر آن‌ها مورد ارزیابی دقیق قرار گرفته است. در نهایت این اقدامات به صورت عملی پیاده‌سازی و اثر آن‌ها مورد سنجش میدانی قرار گرفت که به تفصیل در این پژوهش اثر آن ارائه گردید.

اتفاقات مهمی که در این پژوهش افتاده است شناسایی امواج افقی به عنوان عامل اصلی افت کیفیت است. این موضوع بر خلاف تصور اولیه می‌باشد که سقف و گنبد را عامل اصلی بازتاب‌های مزاحم می‌دانستیم. این پژوهش نشان داد امواجی که به‌صورت افقی در طول و عرض رواق منتشر می‌شوند، به دلیل مسافت طولانی‌تر و تعداد بازتاب بیشتر، تأثیر بسیار بیشتری در کاهش وضوح کلام دارند.

همچنین طراحی و اجرای جاذب‌های هدفمند در راهروهای دو طرف و فرش‌های ضخیم جلوی جایگاه و البته حضور موثر جمعیت به عنوان یک تله آکوستیکی برای کنترل امواج بازتابی عمل کردند.

از دیگر موفقیت‌های این پژوهش طراحی جاذب‌های صوتی هماهنگ با معماری رواق، بدون آن‌که لطمه‌ای به جلوه‌های بصری وارد شود بوده است.

از دیگر دستاوردهای مهم این پژوهش این مساله است که اگر در مراحل طراحی یک فضا از ابتدا به شرایط آکوستیکی پرداخته شود بخش عمده‌ای از مشکلات آینه پیش‌بینی و پیش‌گیری خواهد شد.

اقدامات انجام شده در این پژوهش به عنوان الگویی برای سایر رواق های حرم مطهر و اماکن مذهبی بزرگ کشور قابل تعمیم است.

دستاورد اصلی این پژوهش، فراتر از بهبود عددی شاخص‌ها، ایجاد امکان ادراک کامل مفاهیم مذهبی برای زائران و افزایش رضایت آنان از مراسم مذهبی است. این موفقیت، گامی مؤثر در جهت ارتقای کیفیت خدمات صوت‌رسانی در اماکن متبرکه کشور محسوب می‌شود و چشم‌اندازی روشن برای به‌کارگیری روش‌های مشابه در سایر فضاهای مذهبی و فرهنگی ایران ترسیم می‌نماید.

۸. منابع

[1] Ermann, Michael. *Architectural acoustics illustrated*. John Wiley & Sons, 2015.

[۲] سبزیکاران،صدیقه "*اصلاح پیشنهادی به سیستم صوت رواق امام خمینی*"، ۱۳۹۹،پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه امام رضا(ع)

[3] ISO 9921:2003 Ergonomics – Assessment of speech communication. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland (2003).

[4] IEC 60268-16:2011 Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland (2009).

[5] Abdou, Adel A. "Comparison of the acoustical performance of mosque geometry using computer model studies." In *Eighth International IBPSA Conference*, vol. 11. Netherlands: Eindhoven, 2003.

[6] Sü, Zühre, and Semiha Yilmazer. "The acoustical characteristics of the Kocatepe Mosque in Ankara, Turkey." *Architectural Science Review* 51, no. 1 (2008): 21-30.

[7] A. G. N. F. Samira Safi, "Acoustic Quality Evaluation of Yazd Mosque." in *the 2nd International Conference on Acoustics and Vibration*, Iran: Tehran, 2012.

[8] Sert, Fatma Yelkenci, and Özgül Yılmaz Karaman. "An investigation on the effects of architectural features on acoustical environment of historical mosques." In *Acoustics*, vol. 3, no. 3, pp. 559-580. MDPI, 2021.

[9] Benferhat, Mohamed Ladaoui, Samira Debache Benzagouta, Abdelouahab Bouttout, and Francesco Martellotta. "Acoustical characterization of three Ottoman masjids built in Algeria." *Building Acoustics* 29, no. 4 (2022): 481-501.

[10] Kusno, Asniawaty, DR NAZLI CHE DIN, Abdul Wafi Razali, Baharuddin Hamzah, Nurul Jamala, Rosady Mulyadi, Edward Syarif, and Kusno Kamil. "Investigating the Impact of Environmental Noise, Humidity and Surface Treatment on Mosque Acoustic Performance in Makassar, Indonesia." *Journal of Design and Built Environment* 25, no. 2 (2025): 40-56.

پی‌نوشت

[1] Sound Transmission Index, STI
[2] Reverberation Time, RT
[3] Odeon
[4] Sound Pressure Level, SPL
[5] Decibel, dB
[6] Wallace Clement Sabine
[7] Early Decay Time, EDT
[8] Norris–Eyring formula
[9] Noise Criteria, NC
[10] Speech Intelligibility and Noise
[11] Speech Intelligibility Index, SII
[12] Rapid STI
[13] Articulation Index
[14] Public Address
[15] Speech Transmission Index for Public Address Systems
[16] Clarity
[17] Definition
[18] Hagia Sofia
[19] Kocatepe
[20] Clarity factor
[21] Lateral Energy Fraction
[22] Ease
[23] Diffusion
[24] Scattering
[25] Omni Directional