

محاسبه و تحلیل داده‌های آکوستیکی تالار چند منظوره

نمونه موردی؛ خانه موسیقی گرگان

علی احمدی*

مدرس

دانشگاه غیرانتفاعی لامعی گرگان

invtw@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۷

چکیده

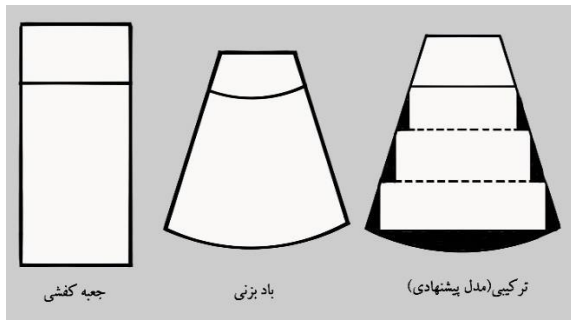
کیفیت صوتی سالن‌های اجتماعات از ویژگی‌های کلیدی نتایج طراحی معماری آنها است که تا پیش از ظهور نرم‌افزارهای شبیه‌ساز، کنترل پیش از ساخت آن با سختی روبه‌رو بود. روش‌های نرم‌افزاری که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرد به‌طور نسبتاً دقیقی شرایط آکوستیکی پس از ساخت را کنترل می‌کنند. سالن چند منظوره‌ای که در این پژوهش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است بخشی از پروژه طراحی خانه موسیقی گرگان بوده که در منطقه مرکزی شهر گرگان طراحی شده است. هدف از ایجاد سالن چند منظوره، به‌وجود آوردن فضایی است که هم‌زمان برای موسیقی و سخنرانی مناسب باشد. با توجه به تضاد ذاتی آکوستیکی موجود در شرایط اجرای موسیقی و سخنرانی، استفاده از سه راهکار کلی پیشنهاد شده است. براساس سوابق پژوهش زمان واخنش به‌عنوان کلیدی‌ترین رکن طراحی سالن‌های موسیقی و سخنرانی انتخاب شد که این مقدار به‌طور متوسط برای سخنرانی ۱/۰ و موسیقی ۲/۰ ثانیه در نظر گرفته شد. با داشتن حجم سالن و سطوح تأثیرگذار جاذب و پخشگر، ضرائب جذب صدای قسمت‌های مختلف سالن به‌دست آمد. با توجه به داده‌های مفروض طرح مقادیر C_{50} ، C_{80} ، AL_{cons} ، CD ، SPL و نسبت D/R هم برای سخنرانی و هم برای موسیقی در دو طرح متفاوت ارائه گردید. از این میان برخی از مقادیر به‌دست آمده مناسب و برخی دیگر با توجه به معیارهای قابل قبول، نسبتاً مناسب بودند، بنابراین برای تحقق بهترین شرایط راهکارهایی ارائه گردید.

واژگان کلیدی: آکوستیک معماری، شبیه‌سازی آکوستیک، تجزیه و تحلیل آکوستیک، سالن چند منظوره

۱. مقدمه

از دغدغه‌های معماران بوده که عموماً با سعی و خطا انجام می‌شده است. لذا در کنار تمام مقوله‌های آسایش، امنیت، منظره مناسب و محیط مطلوب، انتخاب فرم مناسب که در بردارنده بهترین نتایج آکوستیکی باشد همیشه مورد نظر

از قرن نوزدهم که طراحی و ساخت سالن‌های موسیقی در کشورهای در حال توسعه متداول گردید، افزایش کیفیت آکوستیکی این مجموعه‌ها برای جلب رضایت بازدیدکنندگان



شکل ۱. فرم پیشنهادی سالن [۴]

۲. پیشینه تحقیق

بعد از به ثمر رسیدن پیشرفت‌های مدل‌سازی ماکتی، محاسبات دستی و پیش‌بینی‌های تجربی^{۱۳} در دهه ۷۰ و ۸۰ قرن بیستم [۳-۱۲] و با تغییرات فناورانه در زمینه رایانه، بحث مدل‌سازی و شبیه‌سازی رایانه‌ای از اواخر دهه ۸۰ میلادی [۱۳] به‌طور جدی مورد نظر قرار گرفت.

ونکلاسن^{۱۴} (۱۹۷۰) در مقاله‌ای با عنوان "روش‌های مدل‌سازی در آکوستیک معماری"^{۱۵} که جزء اولین تلاش‌ها در زمینه مدل‌سازی است با معرفی اصول پایه مدل‌سازی در روش‌های مختلف به بررسی آنها و شیوه کاربست هر یک می‌پردازد [۱۲]. شرودر^{۱۶} (۱۹۷۳) در پژوهشی پیرامون آکوستیک سالن‌های کنسرت - که جزء اولین مقالات در خصوص کاربرد رایانه در محاسبات آکوستیکی سالن‌های کنسرت است - امیدوار بود به کمک رایانه و اظهار نظرهای تجربی در خصوص کیفیت آکوستیکی فضای سالن کنسرت بتوان به بهترین پیش‌بینی‌ها قبل از ساخت دست یابد [۱۴].

هوپانیمی و همکاران^{۱۷} (۱۹۹۷) در تحقیق خود به معرفی روشی در شبیه‌سازی پخشایش صدا در فضا با استفاده از رویکرد فرایند سیگنالی می‌پردازند. در این مقاله از روش FDTD^{۱۸} و منبع تصویر زمان واقعی^{۱۹} براساس شبیه‌سازی

بصری استفاده می‌شود [۱۵].

طراحان مجموعه‌های مرتبط با موسیقی و سخنرانی بوده است [۱]. طبق شواهد و تجربیات گذشتگان، فرم بادبزی^۱ برای تالارهای سخنرانی و فرم جعبه کفشی^۲ برای سالن‌های کنسرت بسیار مطلوب است [۲-۳] و ترکیب این دو فرم برای تحصیل بیشترین بازدهی آکوستیکی، مد نظر قرار گرفته است [۴]. شکل ۱ در طراحی آکوستیکی، پارامترهای مختلفی نظیر زمان واخنش^۳، C₈₀^۴، AL_{cons}^۵، CD^۶، SPL^۷ و نسبت D/R^۸ و ... مد نظر طراحان است، که در این بین زمان واخنش به‌عنوان مهم‌ترین متغیر در طراحی شناخته می‌شود [۵]. معیارهای قابل قبول برای این پارامترها نیز گاهی تجربی [۶] در مطالعات مختلف بیان شده است [۱-۳-۷-۸]. از بین روش‌های مختلف محاسباتی، نظیر محاسبات دستی، مدل‌سازی ماکتی^۹ و شبیه‌سازی رایانه‌ای^{۱۰}، روش اخیر با توجه به بازدهی زمانی مناسب در این مقاله انتخاب شده است، بنابراین روش علمی پژوهش حاضر از نظر گروت و وانگ^{۱۱} [۹] در شاخه مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. نکته اساسی در طراحی فضاهای چند منظوره با توجه به اینکه زمان واخنش برای سالن‌های موسیقی بیشتر از زمان واخنش در سالن‌های سخنرانی، انتخاب فضایی است که توأمان برای موسیقی و سخنرانی مناسب باشد، از این‌رو در این تحقیق با توجه به روش‌های مختلف [۱۰-۱۱] از جاذب‌های متغیر^{۱۲} [۱۱] در جداره‌های جانبی سالن برای این منظور استفاده شده است. بدین ترتیب که فضای طراحی شده در ۲ مدل، هر کدام با جاذب‌های صوتی مخصوص به خود مورد طراحی و محاسبه واقع شده‌اند. نتایج به‌دست آمده این مدل‌ها نیز در بخش تجزیه و تحلیل مورد واکاوی قرار گرفته است.

در پژوهش دیگری برخات و همکاران^{۲۰} (۱۹۹۹) با اشاره به برخی نارسایی‌های شیوه‌های متداول محاسبات آکوستیکی مثل ردیابی اشعه^{۲۱} و منبع تصویر به معرفی شیوه جدیدی در مدل‌سازی و شبیه‌سازی آکوستیکی می‌پردازند و روش خود را با ارائه ماتریس‌ها و نمودارهای مختلف به اثبات می‌رسانند [۱۶]. ریندل (۲۰۰۰) از محققان تأثیرگذار در روش‌های شبیه‌سازی رایانه‌ای و یکی از مؤسسان برنامه کاربردی ادئون^{۲۲} در این زمینه در نخستین مقاله خود با موضوع استفاده از مدل‌سازی رایانه‌ای در آکوستیک فضا به روش دوگانه ترکیب ردیابی اشعه و منبع تصویر در دهه‌های اخیر اشاره می‌کند و این ترکیب را در کاهش زمان محاسبه آکوستیکی مؤثر می‌داند. وی به برتری‌های روش مدل‌سازی رایانه‌ای نسبت به مدل‌سازی ماکتی اشاره می‌کند [۱۳]. دراتلف و ژو^{۲۳} (۲۰۰۱) در مقاله‌ای با موضوع طراحی آکوستیکی سالن‌های چند منظوره به ملزومات آکوستیکی این فضاها اشاره می‌کنند که در این میان برخی عوامل مهم آکوستیکی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند [۱۷]. فانخوسر و همکاران^{۲۴} (۲۰۰۲) در پژوهشی در خصوص مدل‌سازی انعکاس و انکسار صدا در محیط‌های معماری با استفاده از ردیابی باریکه اشعه^{۲۵} ابتدا به توصیف و تجزیه و تحلیل روش ردیابی باریکه اشعه پرداخته و در نهایت به نتایج پرکاربرد این روش در تحلیل آکوستیکی فضای معماری می‌پردازند [۱۸]. ریندل^{۲۶} (۲۰۰۲) در دومین مقاله خود به روش‌های مختلف شبیه‌سازی و مدل‌سازی آکوستیک یک تالار در طول قرن بیستم می‌پردازد و به دو روش سنتی مخزن موجی^{۲۷} و مدل‌سازی ماکتی اشاره می‌کند و طبق بررسی‌های مختلف روش شبیه‌سازی آکوستیکی رایانه‌ای که محصول آخرین دهه قرن بیستم است را قابل اعتماد می‌داند [۱۹]. فانخوسر و همکاران (۲۰۰۴) در مقاله دیگری به ارائه روش نوین «ردیابی باریکه اشعه» در شبیه‌سازی و محاسبات آکوستیکی فضاهای معماری می‌پردازند و با اشاره به نقصان‌های شیوه‌های منبع-تصویر، ردیابی اشعه و دیگر

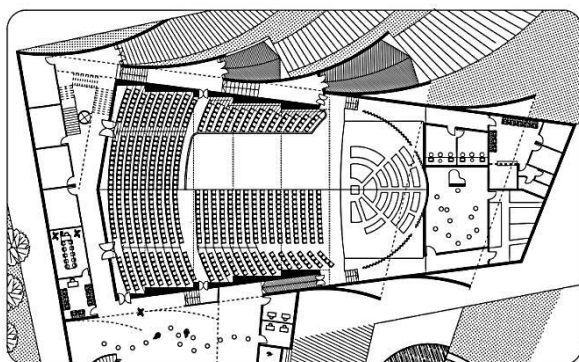
روش‌ها، این روش را کامل‌تر و جایگزینی مناسب در محاسبات آکوستیکی فضاهای معماری می‌دانند [۲۰]. پیکات و همکاران^{۲۸} (۲۰۰۶) با پیشنهاد رویکردی عددی برای مدل‌سازی زمینه صوتی واخشن در فضا با استفاده از معادله پخشایش به بررسی پدیده‌های مختلف آکوستیکی فضا از جمله بازتابش‌های جانبی، جذب صدای بالا و پایین توسط دیوارها و افت‌های اتمسفری مختلف می‌پردازند [۲۱]. نویتزترینگ و همکاران^{۲۹} (۲۰۰۸) در پژوهش خود با ابداع «چهارچوبی برای مدل‌سازی شنیداری^{۳۰} هم‌زمان» به روشی در تبدیل فرم‌های موجی صدا به تصاویر گرافیکی و ارائه نمودارها و نیز تصاویر گرافیکی رفتار آکوستیکی فضا براساس ساختار ردیابی اشعه دست یافته‌اند. این تحقیق در واقع معرف ریشه و فرایند به‌کار رفته در بسیاری از نرم‌افزارهای مدل‌سازی آکوستیکی است [۲۲]. آزاد (۲۰۰۸) در مقاله خود، پس از بررسی کوتاه فضای کاخ عالی قاپوی اصفهان با مدل‌سازی و شبیه‌سازی این اثر تاریخی به بررسی شاخص‌های با اهمیت آکوستیکی پرداخته و پس از تجزیه و تحلیل این نتایج شرایط صوتی این بنا را مثبت ارزیابی می‌کند [۲۳]. ریندل (۲۰۱۰) در مقاله سوم خود به بررسی و شبیه‌سازی دو فضای بسیار بزرگ و کوچک و کمبودهای آکوستیکی موجود در این فضاها می‌پردازد و بر روی تراگیسل^{۳۱} میان فضاها تأکید ویژه‌ای می‌کند [۲۴]. وب و بیلباثو^{۳۲} (۲۰۱۱) در تحقیق خود به محاسبه آکوستیکی فضا با ساختار کودا^{۳۳} CUDA و طرح FDTD سه بعدی با کاهش ویسکوزیته مرزی پرداخته و با معرفی پلتفرم کودا و طرح بازه زمانی تفاضل محدود که افت‌ها در محدوده‌ی مرزی را با توجه به ویسکوزیته هوا ادغام می‌کند سعی بر مدل‌سازی پراکنش امواج صوتی می‌کند. این تحقیق جزء آخرین تلاش‌های نمایش گرافیکی امواج صوتی به‌وسیله رایانه است [۲۵]. قیابکلو با الهام از پوسته صدف دریایی به طراحی آکوستیکی سالن همایش چند منظوره پرداخته و شبیه‌سازی سالن چند منظوره موسیقی را توسط نرم‌افزارهای

رینو^{۳۴} و EASE انجام داده و این فرم (صدف دریایی) را برای ساخت این قبیل سالن‌ها مناسب دانسته است [۲۶]. کتاب "شبیه‌سازی محاسباتی در آکوستیک معماری و محیطی" اثر ساکوما و همکاران^{۳۵} (۲۰۱۴) یکی از آثار مهم در زمینه شبیه‌سازی محسوب می‌شود. در این کتاب با اشاره به پیشرفت‌های نو در شبیه‌سازی رایانه‌ای در دهه‌های اخیر نگاهی به روش‌های مختلف محاسباتی نظیر روش FDTD و اجزای محدود^{۳۶} و لایه‌های مرزی^{۳۷} در این زمینه داشته است [۲۷]. ورنلندر^{۳۸} (۲۰۱۳) در پژوهش علمی منتشر شده خود با تکیه بر اهمیت طراحی شاکله اصلی سالن مانند فرم اصلی، شکل پخشگرها و جاذب‌ها و دیگر عوامل و اجزای آکوستیکی فضاها، استفاده از مدل‌سازی رایانه‌ای را راهی جدید و مطمئن در پیش‌بینی مقادیر تأثیرگذار آکوستیکی می‌داند و بر اهمیت و صحت داده‌های ورودی با آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد تأکید می‌کند [۲۸]. پلزر و همکاران^{۳۹} (۲۰۱۴) با ادغام شبیه‌سازی آکوستیکی هم‌زمان با نرم‌افزار طراحی به کمک رایانه به اهمیت فرایند مدل‌سازی آکوستیکی در کنار مدل‌سازی گرافیکی جهت بهبود فرایند طراحی معماری اشاره می‌کنند و ارائه جزئیات آکوستیکی را بخشی مهم از فرایند طراحی معماری می‌دانند. در این تحقیق برنامه کمکی مناسبی که بر روی نرم‌افزار شبیه‌سازی رایانه‌ای نصب و معرفی می‌گردد [۲۹]. مجیدی و همکاران (۲۰۱۸) در

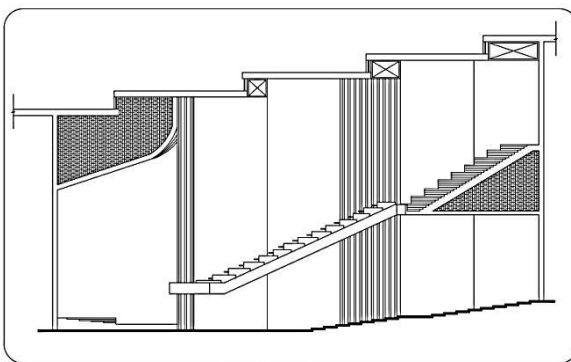
پژوهش خود در خصوص یکپارچه‌سازی طراحی پارامتریک و مهندسی آکوستیک سالن کنسرت، به همکاری هم‌زمان مهندس آکوستیک و معماری در تحصیل فرم نهایی سالن‌های کنسرت می‌کرده و در این مسیر برخی متغیرهای تأثیرگذار را معرفی و پیشنهاد می‌کنند [۳۰].

۳. معرفی مختصر پروژه و ابزار پژوهش

سالن نمونه که برای این تحقیق در نظر گرفته شده طرح پایلوت سالن چند منظوره موسیقی گرگان بخشی از پروژه طراحی خانه موسیقی گرگان است که در مساحتی بالغ بر یک هکتار و زیربنای ۵۰۰۰ مترمربع در منطقه مرکزی شهر گرگان ارائه و طراحی شده است. مساحت سالن اصلی ۱۰۰۰ مترمربع و حجم سالن ۱۳۸۹۸ مترمکعب و سطوح تأثیرگذار در جذب صدا معادل ۴۶۰۳ متر مربع است، ظرفیت سالن نیز ۱۲۵۰ نفر است. اقلیم غالب، معتدل و مرطوب بوده که مشخصات اقلیمی و محیطی آن دمای متوسط سالانه ۲۰ درجه و رطوبت نسبی ۶۰ درصد است [۴]. (این متغیرها بایستی به دلیل تأثیر مستقیم در نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار وارد شوند). نوفه زمینه^{۴۰} براساس استانداردهای موجود در طراحی ساختمان‌های فرهنگی ۳۵ دسی‌بل در نظر گرفته شده است [۳۱]. پلان سالن طراحی شده و برش طولی آن مطابق شکل ۲ است.



پلان سالن اصلی



مقطع طولی سالن اصلی

شکل ۲. پلان و مقطع طولی سالن اصلی مجموعه منبع: (احمدی، ۱۳۹۲)

با وجود توسعه فناوری و علوم رایانه در رشته‌های مختلف حرفه‌ای از جمله معماری و آکوستیک، متأسفانه تعداد نرم‌افزارهای تخصصی در این زمینه و در دسترس عموم انگشت شمارند. برنامه کاربردی EASE یکی از نرم‌افزارهای قدرتمند در این زمینه است که از طریق دیداری^{۴۱} به این امر می‌پردازد. نحوه محاسبات آکوستیکی و ارائه نمودارهای تصویری آن به اصطلاح از طریق ردیابی اشعه^{۴۲} و منبع تصویری است و چنانچه از راهنمای آن برمی‌آید شبیه‌سازی در این نرم‌افزار از دو طریق ورودی^{۴۳} از سایر نرم‌افزارهای شبیه‌ساز سه بعدی و سیستم ترسیم داخلی بوده که هر جداره از حجم یک فضا را به صورت یک صفحه شناسایی کرده و امکان اختصاص مصالح با ضریب‌های جذب معرفی شده را به آنها می‌دهد. پایه‌های اصلی نرم‌افزار براساس فضاهای باز و بسته شکل گرفته است که پس از تعریف مشخصات ذکر شده در نرم‌افزار محاسبه آکوستیکی، نمودارها و جداول قابل استخراج است [۳۲]. تاکنون پروژه‌های اجرایی متعددی با استفاده از این نرم‌افزار مورد بررسی قرار گرفته‌اند، به‌عنوان نمونه، چندین شرکت مشاور روسی در حوزه آکوستیک از این نرم‌افزار جهت شبیه‌سازی پروژه‌های خود بهره گرفته‌اند [۳۳].

۴. مبانی نظری:

۴-۱. زمان واخنش

طبق تعریف ساین عبارت است از مدت زمانی که پس از قطع منبع صدا، تراز فشار صدا ۶۰dB افت کند [۱] که در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق فرمول ساین:

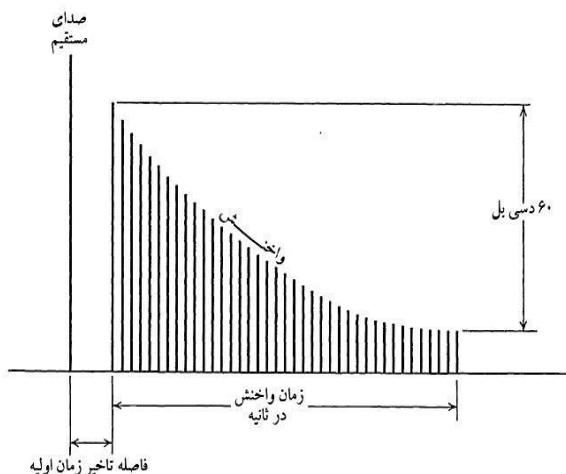
$$RT = \frac{0.161 V}{\sum_{i=1}^n \alpha A_i} \quad (1)$$

و در نگاه جزئی‌تر براساس فرمول ایرینگ:

$$RT = \frac{0.161 V}{-S_T \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (2)$$

که در آن V حجم سالن، A سطوح تأثیرگذار، S_T سطح کل و α ضریب جذب صدا و $\bar{\alpha}$ مقدار میانگین این ضریب است [۳].

مقدار بهینه برای این پارامتر برای سخنرانی ۰/۸ الی ۱ ثانیه و برای موسیقی در سبک‌های مختلف ایرانی و کلاسیک ۱/۵، سمفونی ۱/۸ و رمانتیک و آیینی ۲/۵ ثانیه است [۶].



شکل ۳. نمودار زمان واخنش [۶]

۴-۲. کنترل زمان واخنش در سالن

برای این منظور تا کنون ۳ روش استفاده شده است: نخستین روش به‌کارگیری یک زمان واخنش کلی برای سخنرانی و اجرای موسیقی است که حداکثر زمان مورد قبول برای سخنرانی و حداقل زمان مطلوب جهت موسیقی است [۶].

روش دوم به‌کارگیری جاذب‌های متغیر [۱۱] در جداره‌های جانبی سالن مطابق با شکل ۴ است.

و روش سوم استفاده از میدان واخنش افقی است که در نزدیکی سقف به‌وجود می‌آید [۱۰]. از آنجا که روش اول دربردارنده نتایج ایده‌آل نبوده و روش سوم از لحاظ تئوریک ارائه گردیده است و تاکنون راه حل عملی برای آن ارائه نشده است در این مطالعه از روش دوم استفاده شده است.

۳-۴. وضوح صدا^{۴۴} و گفتار

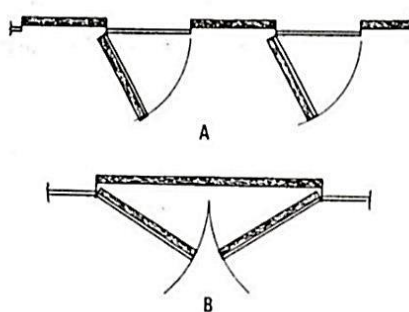
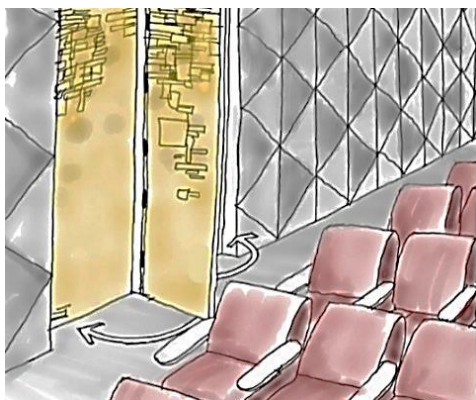
وضوح و آشکاری صدا مربوط به شنیدن اجزای یک صدا به راحتی و وضوح از میان اصوات جاری موجود است [۱]. وضوح گفتار میزان درجه‌ای که شنونده قادر به درک یک نت یا یک نغمه ناب از اجرای موسیقی باشد [۶]. شاخص وضوح صدا [و گفتار] براساس نسبت تراز صوت در n میلی‌ثانیه اول به الباقی تراز کلی صوت است که بر مبنای دسی‌بل سنجیده می‌شود [۷]. مسئله آشکاری (C₅₀)، بیشتر به حوزه سخن‌گویی برگشته و عبارت است از نسبت خطی بین انرژی صوتی در ۵۰ میلی‌ثانیه اول و مجموع کل انرژی دریافت شده.

$$C_{50} = 10 \log \left[\frac{1 + (r_l/r)^2 - e^{-0.69/T_{60}}}{e^{-0.69/T_{60}}} \right] \quad (3)$$

که در آن r_l برابر با فاصله زمینه پخشایش و r فاصله منبع - شنونده و T_{60} برابر با زمان واخنش است [۳۴]. منظور از وضوح (C₈₀)، بیشتر به حوزه موسیقی مربوط بوده و بر طبق معادله ۴ یک نسبت لگاریتمی است بین مقدار انرژی که در ۸۰ میلی‌ثانیه اولیه اندازه‌گیری شده در برابر انرژی که بعدا دریافت می‌شود [۱].

$$C_{80} = 10 \log[(e_d + e_e)/e_l] \quad (4)$$

که در آن e_d برابر با انرژی مستقیم صدا، e_e برابر با انرژی بازتابش اولیه و e_l برابر با انرژی بازتابش نهایی است [۳]. مقدار بهینه برای پارامتر C₈₀ برابر با -۱ الی -۴ و برای C₅₀ بزرگتر از ۳ است [۳].



شکل ۴. نمای افقی و نمای سه‌بعدی جاذب‌های صوتی متغیر لولایی، استفاده شده در طرح سالن چند منظوره، A و B به طرق مختلف به استفاده از این جاذب‌ها اشاره دارد [۱۱].

۴-۴. AL_{cons} یا افت گفتار هماهنگ

به‌عنوان یک درصد معرفی می‌شود که راه دیگری برای مشخص نمودن وضوح یک سخنرانی یا اجرا است [۳]. معادله ی AL_{cons} برابر است با:

$$AL_{cons} = \frac{200r^2T_{60}^2}{V} \quad (5)$$

که در آن T_{60} برابر با زمان واخنش، V برابر با حجم سالن و r فاصله گوینده تا شنونده است [۳]. این پارامتر بیشتر

جهت بهبود شرایط آکوستیکی یک سخنرانی مورد استفاده قرار می‌گیرد و مقدار بهینه آن برابر با ۳ الی ۷ درصد است [۳].

۴-۵. فاصله بحرانی :

فاصله بحرانی فاصله‌ای است که در آن صدای مستقیم از منبع دقیقا با همان تراز فشار صوت در زمینه طنین دار برابر است. این فاصله در تعدادی از مفاهیم [مربوط به] وضوح

گفتار محسوب می‌شود [۴]. معادله ۸ معرف نسبت D/R است.

$$D/R = 10 \log \left(\frac{\sum \omega |H_D(\omega)|^2}{\sum \omega |H_R(\omega)|^2} \right) \quad (۸)$$

که در آن $H_D(\omega)$ برابر با تراز صدای مستقیم و $H_R(\omega)$ برابر با تراز صدای واخش است [۳۵]. این پارامتر نیز بیشتر برای سخنرانی مورد استفاده قرار می‌گیرد و مقدار بهینه آن برابر با ۷- است [۳].

۸-۴. برنامه‌ی اجرا و آرایش تقویت‌کننده‌های

صوتی

طراحی‌های معماری با یک برنامه و لیستی از استفاده‌های پیش‌بینی شده برای یک فضا و درصد پخش هر کدام شروع می‌شود. تعیین برنامه به معمار و مهندس آکوستیک این اجازه را می‌دهد تا برنامه (اجرا) را در جهت شکل سخنرانی و یا شکل موسیقی هدایت کند [۳]. از آنجا که برخی از موسیقی‌های سنتی و آیینی باید به صورت زنده و بدون تقویت‌کننده‌های صوتی اجرا شود لذا برنامه در نظر گرفته شده برای موسیقی در شبیه‌سازی آکوستیکی شامل یک بلندگوی ۹۰ دسی بلی^{۴۶} است. بلندگوهای تقویت صوتی در این پژوهش تنها برای اجرای سخنرانی در نظر گرفته شده است و فرض بر این اصل نهاده شده است که چنانچه سالن برای اجرای زنده موسیقی مناسب باشد برای اجرای موسیقی زنده تقویت شده کاملاً قابل کنترل است. شکل ۵ نمایش‌دهنده آرایش بلندگوهای تقویت‌کننده صوتی در سالن در صورت لزوم است.

گفتار با اهمیت است [۳-۸] در فاصله بحرانی صدای مستقیم و بازتاب آن برابری فاصله بحرانی ممکن است به‌عنوان توضیح یک تصویر خنثی از آکوستیک داده شود [۷].

$$r_c = \sqrt{\frac{QR}{16\pi}} \quad (۶)$$

که در آن r_c برابر با فاصله بحرانی، Q جهت‌مندی منبع در راستای دریافت کننده و R برابر با ثابت فضا است [۳]. مقدار بهینه این پارامتر برای اجرای موسیقی برابر با ۷ متر [۳] و برای سخنرانی ۳ متر است [۸].

۶-۴. تراز فشار صوت کلی^{۴۵}

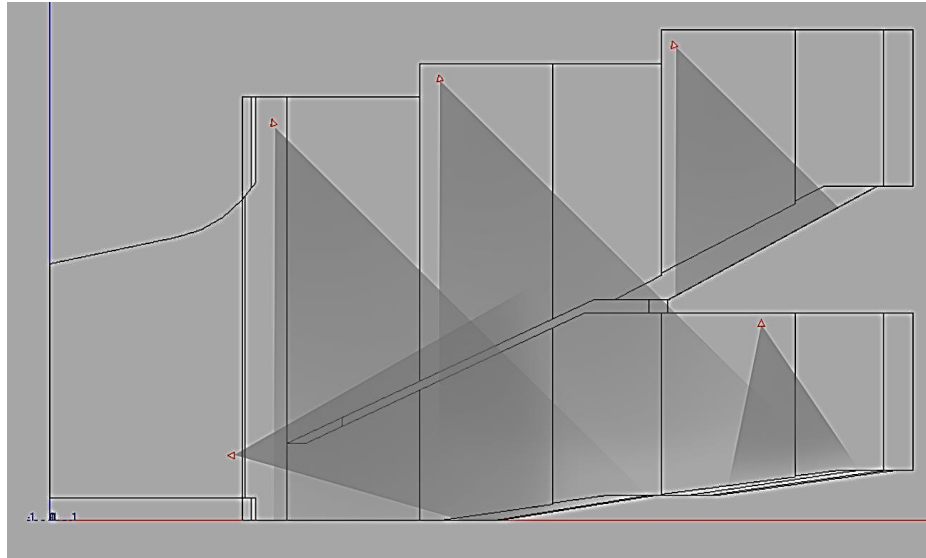
مطابق با معادله ۷ شامل کلیه ترازهای فشار صوت مستقیم و بازتاب شده است که در مقیاس دسی‌بل سنجیده می‌شود؛ این شاخص در سالن‌های موسیقی که بازتابنده‌ها نقش اساسی را ایفا می‌کنند بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴].

$$L_{Total} = L_i + 10 \log n \quad (۷)$$

که در آن L_i برابر با تراز فشار تولید شده توسط یک منبع و n برابر با تعداد کل منابع مشابه است [۳]. مقدار بهینه برای این پارامتر برای موسیقی ۶۰ الی ۷۰ دسی‌بل [۷] و برای سخنرانی ۵۷ دسی‌بل است [۱].

۴-۷. نسبت D/R

نسبت تراز انرژی صدای مستقیم به صدای انعکاس یافته است که از مشخصه‌های اساسی درک قابل فهم بودن



شکل ۵. نحوه آرایش بلندگوهای تقویت کننده صدا در مقطع جانبی سالن؛ استفاده از این تقویت کننده ها پیشنهادی است. منبع: نتایج تحقیق حاضر

۵. روش و نتایج تحقیق

اگر چه پارامترهای یاد شده در قسمت قبلی هر کدام از اهمیت ویژه ای برخوردارند، لیکن شروع طراحی باید براساس مهم ترین پارامتر شکل گیرد. طبق اسناد و شواهد زمان واخشی مهم ترین پارامتر در دستیابی به خصوصیات آکوستیکی قابل قبول برای سخنرانی و اجرای موسیقی به شمار می آید. در این تحقیق دو مدل شبیه سازی شده از سالن اصلی یکی مناسب برای سخنرانی و دیگری مناسب برای اجرای موسیقی شبیه سازی شد و طبق مبانی نظری پژوهش ابتدا براساس زمان واخشی مطبوع، طراحی آکوستیک آغاز شده و با کنترل اعداد مورد نظر جهت زمان واخشی توسط نرم افزار و حصول نتیجه مطلوب محاسبات، جدول ۱ برای مصالح کاربردی به دست آمد. در این جدول سطوح تأثیرگذار در سالن چند منظوره شامل ۵ سطح اصلی است.

- ۱- دیواره های جانبی (به عنوان جاذب های متغیر که در دو بخش موسیقی و سخنرانی ارائه شده اند)،
- ۲- سطوح جلوی سن که اغلب با توجه به نزدیکی به منبع صدا به صورت پخشگر در نظر گرفته می شوند،

۳- مبلمان به عنوان قسمت اصلی جاذب صوت که ثابت و

نماینده تماشاگران هستند،

۴- کف سالن، و

۵- سقف مجموعه و بالکن ها

نکته قابل ذکر در جدول ۱ نوآوری استفاده از دیوارپوش از جنس پوشال برنج است که توسط یانگ و همکاران^{۴۷} (۲۰۰۳) مورد تحقیق قرار گرفته است. انتخاب این مصالح با توجه به محل قرارگیری پروژه در منطقه شمال کشور و فور مصالح مورد اشاره که در صنعت کشاورزی جزء مواد دورریز محسوب می شود و می توان از آن به عنوان مصالح بازیافتی و مصالحی با کیفیت آکوستیکی بالا در بخش های مختلف صنعت آکوستیک استفاده نمود، مناسب به نظر می رسد. سپس محاسبات برای پارامترهای دیگر ادامه یافت که نتایج گرافیکی آن در شکل ۶ و عددی در جدول ۲ به نمایش درآمده است.

در این جدول نتایج به دست آمده پارامترهای تأثیرگذار در ۲ مدل اصلی به صورت جداگانه (مدل شبیه سازی شده برای اجرای موسیقی و مدل شبیه سازی شده برای سخنرانی و تئاتر زنده) ارائه شده است.

این امر در خصوص زمان واخشن با توجه به فرمول‌های سایبین و ایرینگ (معادلات ۱ و ۲) ارائه گردیده است.

جدول ۱. ضریب جذب مصالح پیشنهادی در فرکانس‌های مختلف (منبع: نگارنده * [۳۶])

ردیف	محل استفاده مصالح	جنس مصالح	ضریب جذب مصالح در فرکانس‌های مختلف (Hz)							
			۱۲۵	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۸۰۰۰	۱۰۰۰۰
۱	دیوارهای جانبی (موسیقی)	چوب کامپوزیت با پرداخت صیقلی	۰/۲	۰/۱۲	۰/۱	۰/۱	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۷
۲	دیوارهای جانبی (سخنرانی)	ترکیب چوب بهمراه روکشی از پوشال برنج*	۰/۸۲	۰/۸۵	۰/۸	۰/۸	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۸
۳	پخشگرهای جلوی سن	ورق چوبی چندلا و فشرده	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۱	۰/۰۹	۰/۱۲	۰/۱
۴	مبلمان	روکش پارچه‌ای از جنس شانل	۰/۴۴	۰/۵۴	۰/۶	۰/۶۲	۰/۵۸	۰/۵	۰/۴۵	۰/۴۵
۵	کفسازی و راهروها	پارکت پرداخت شده	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
۶	سقف بالکن‌ها	صفحات آکوستیک گچی	۰/۲	۰/۱۵	۰/۱	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۱۵

جدول ۲. نتایج عددی به دست آمده شاخص‌های با اهمیت در نقطه میانی سالن اصلی تماشاگران. (منبع: نگارنده)

شاخص	نوع اجرا	معیار	مقادیر محاسبه شده در فرکانس‌های اصلی (Hz)						
			۱۲۵	۲۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰۰	۸۰۰۰
زمان واخشن	موسیقی	سایبین	۲/۴۸	۲/۵۷	۲/۵۶	۲/۵۴	۲/۵۸	۲/۳۹	۱/۳۶
		ایرینگ	۲/۲۳	۲/۳۱	۲/۳	۲/۲۹	۲/۳۶	۲/۲۵	۱/۳۲
	سخنرانی	سایبین	۱/۱۹	۱/۰۷	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۳	۰/۷۲
		ایرینگ	۰/۹۲	۰/۸	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۵۹
وضوح گفتار C	موسیقی	C ₈₀	-۱/۴۸	-۱/۷۱	-۱/۶۹	-۱/۶۷	-۱/۸۴	-۱/۶۵	۱/۳۶
	سخنرانی	C ₅₀	-۰/۹۷	-۰/۰۱	-۰/۸۴	-۰/۸۵	-۰/۷۴	۰/۵۳	۱/۱۸
افت گفتار هماهنگ ALcons	موسیقی	-	غیر ضروری	غیر ضروری	۱۵/۲۴	۱۵/۲۴	۱۵/۲۴	غیر ضروری	غیر ضروری
	سخنرانی	-	غیر ضروری	غیر ضروری	۳/۸۱	۳/۸۱	۳/۸۱	غیر ضروری	غیر ضروری
فاصله بحرانی CD	موسیقی	-	۴/۴۹	۴/۶۱	۴/۶۲	۴/۶۴	۴/۸	۵	۴/۶۴
	سخنرانی	-	۲/۱۶	۱/۹۳	۱/۷۵	۱/۷۶	۱/۸	۱/۹	۲/۰۲
تراز فشار کلی صوت Total SPL	موسیقی	-	۷۶/۲۸	۷۶/۴۷	۷۶/۴۵	۷۶/۴۳	۷۶/۶۱	۷۶/۵۳	۷۴/۳۶
	سخنرانی	-	۷۶/۴۷	۷۵/۶۹	۷۵/۰۳	۷۵	۷۵/۰۵	۷۵/۱۱	۷۴/۲۷
نسبت D/R	موسیقی	-	-۱۲/۴۵	-۱۲/۶۷	-۱۲/۶۹	-۱۲/۷۲	-۱۳/۰۱	-۱۳/۳۱	-۱۲/۴۹
	سخنرانی	-	-۶/۵۲	-۵/۵۶	-۴/۷۲	-۴/۷۴	-۴/۹۳	-۵/۴۲	-۵/۸۹

۶. تجزیه و تحلیل نتایج

۶-۱. زمان واخشن

بر اساس تحقیقات گذشته می‌توان برای هر سبک موسیقی، زمان واخشن مشخصی را مجاز دانست [۱]. به این معنی که زمان واخشن در تالارهای بزرگ از

۲۰۰۰ الی ۱۴۰۰۰ مترمکعب، تابع حجم تالار نبوده و بلکه تابع نوع موسیقی است. به‌عنوان مثال، برای موسیقی کلاسیک و مدرن زمان واخشن ۱/۵ ثانیه و برای موسیقی رمانتیک ۲/۱ ثانیه و اگر تالار برای انواع مختلف موسیقی ساخته شود، زمان واخشن ۱/۷ ثانیه

مناسب است. با توجه به برنامه‌های زنده و بدون تقویت‌کننده، طراحی و پیشنهاد مصالح جاذب و پخشگر براساس زمان واخنش حداکثر یعنی ۲ تا ۲/۵ ثانیه صورت گرفته است، چرا که حصول زمان واخنش پایین‌تر از آن در طراحی سالن برای اجرای سخنرانی (طراحی جاذب‌های متغیر) لحاظ شده است. بنابراین طبق مندرجات به‌دست آمده در جدول ۲ در قسمت برنامه اجرای سخنرانی زمان واخنش کمتر از ۱ ثانیه است که بسیار مطلوب است و تنها در برنامه اجرای موسیقی و برای موسیقی‌های کلاسیک که زمان واخنش کمتر از ۲ ثانیه مطلوب است، استفاده از ترکیب جاذب‌های صوتی متغیر با ضریب جذب بالا جهت حصول زمان واخنش فوق‌الذکر الزامی است.

۶-۲. وضوح صدا و گفتار

در این سنجش مقدار مثبت نشان‌دهنده وضوح کامل و مقدار منفی معرف پوشش طنین‌انداز با زمان واخنش بالاست. با توجه به محاسبات و تحلیل رایانه‌ای صورت گرفته در تصویر ۶، در قسمت مرکزی اجرای سخنرانی سالن از وضوح ۳ دسی‌بلی برخوردار است که با توجه به معادله ۳ و ۴ در قسمت‌های انتهایی و ابتدایی سالن خصوصا طبقه همکف نیاز به تعبیه بلندگوهای تقویت صدا است (مطابق شکل ۵) و نیز در برنامه اجرای موسیقی شکل ۶، با توجه به اجرای زنده و عدم استفاده از تقویت‌کننده‌های صوتی، سالن تا قسمت‌های میانه از وضوح مناسبی برخوردار است به این معنی که اجرای زنده برای نیمی از حضار سالن در حالت پر از جمعیت مناسب است و بحث وضوح برای اجرای موسیقی‌های تقویت شده کاملا قابل کنترل است.

۶-۳. ALcons یا افت گفتار هماهنگ

این شاخص اکثرا برای طراحی سالن‌های سخنرانی و شاخص وضوح گفتار^{۴۸} کنترل می‌شود و در منابع علمی مقدار بهینه‌ای جهت اجرای موسیقی برای آن در نظر گرفته نشده است. با توجه به نتایج تحقیق، با افزایش درصد این شاخص وضوح گفتار کاهش می‌یابد. با مشاهده تحلیل صورت گرفته و شکل ۶ و همچنین مقایسه مقادیر با مقدار بهینه در جدول ۲، در سالن مخصوص اجرای سخنرانی مقدار افت گفتار هماهنگ مناسب و وضوح قابل قبول است که این مقدار برابر با ۳/۸۱ درصد است. همین مقدار در بخش اجرای موسیقی مناسب یک اجرای پر طنین بوده و با توجه به معادله ۵ برای اجرای موسیقی‌های کلاسیک و کم طنین باید از ترکیب تقویت‌کننده‌های صوتی و قسمتی از جاذب‌های صوتی با ضریب جذب بالا استفاده نمود.

۶-۴. فاصله بحرانی

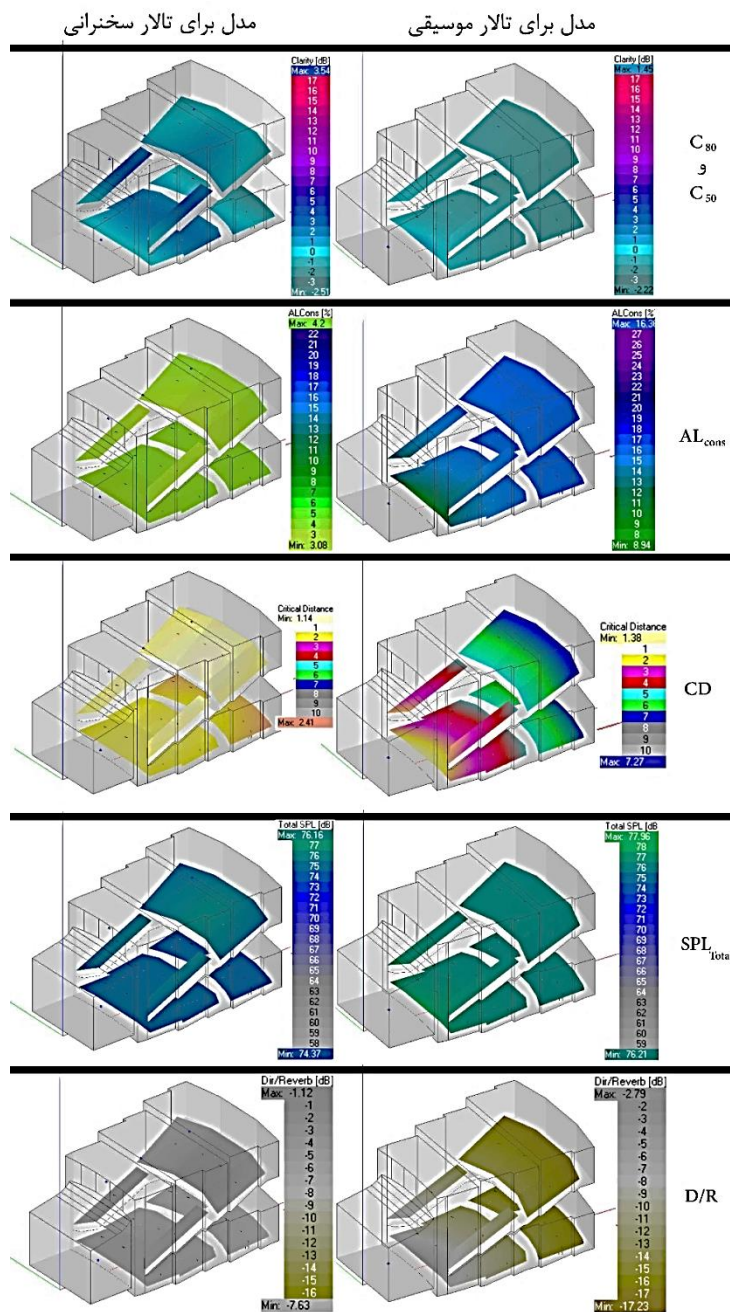
با توجه به نتایج محاسبات این مقدار برای سالن مخصوص اجرای سخنرانی با مقدار متوسط ۲ متر از وضوح نسبتا مناسبی برخوردار است و بازتاب صدا تأکید کننده صدای مستقیم صوت است و در سالن مخصوص اجرای موسیقی زنده این مقدار به متوسط ۴/۵ متر می‌رسد که برای اجرای موسیقی‌های سنتی و دینی می‌تواند تا ۱۵ متر افزایش یابد. این مقدار برای اجرای موسیقی‌های راک و پاپ کاملا مناسب بوده و برای اجرای موسیقی سنتی ایرانی قابل افزایش است.

۶-۵. تراز فشار صوت کلی

همان‌طور که بیان شد مقدار بلندای صدای قابل قبول برای گوش انسان سالم بین ۵۰ تا ۹۰ دسی‌بل است، (این مقدار برای یک صدای رسا و مشخص ۵۷ دسی‌بل می‌باشد) که با توجه به عدم دریافت بازتابش‌ها در این مقادیر در سالن

مناسب از پخشگرها در دیوارهای جانبی سالن مخصوص اجرای موسیقی است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت اجرای موسیقی زنده از نظر بلندا و تراز فشار صوت در کل سالن مناسب است.

سخنرانی با عنایت به معادله ۷ و آرایش تقویت‌کننده‌های صوتی این مقادیر کاملا مناسب و درخور توجه است به نحوی که کمینه و بیشینه آن ۷۴/۲۷ و ۷۶/۴۷ دسی‌بل است. این مقادیر برای سالن مخصوص موسیقی نیز تقریبا همین مقدار بوده که نسبتا مناسب است و دلیل آن استفاده



شکل ۶. نمایش گرافیکی نتایج به دست آمده؛ در سمت راست هر یک از تصاویر مقادیر عددی رنگدانه‌ها ارائه گردیده است. تمامی تحلیل‌ها براساس یک منبع ۹۰ دسی‌بلی بر روی سن مورد سنجش قرار گرفته‌اند. منبع: نتایج تحقیق حاضر

۶-۶. نسبت D/R

این شاخص نیز اکثرا جهت فهم گفتار با اهمیت است و این نسبت با توجه به محاسبات و نتایج رایانه‌ای و جدول شماره ۲، در قسمت سالن مخصوص اجرای سخنرانی به‌طور متوسط بین ۶/۵۲- و ۴/۷۲- دسی‌بل است که این مقدار و قابلیت فهم کلمات از نظر مارشال لانگ^{۴۹} (۲۰۰۵)، بسیار خوب است و در سالن مخصوص اجرای موسیقی بین ۱۸- و ۲- است که نشان می‌دهد با توجه به معادله ۸ برای اجرای زنده در قسمت‌های انتهایی سالن باید از گزینه جاذب‌های صوتی با ضریب بالا استفاده نمود تا این مقدار به ۱۲- صعود کند و اصطلاحا موسیقی پرتین نباشد. البته در قسمت‌های جلویی سالن برای اجرای موسیقی معنوی و دینی، استفاده از تقویت‌کننده‌های صوتی جهت بالا بردن زمان واخنش توصیه می‌شود.

۷. نتیجه گیری

در طراحی فضاهایی که اختصاصا مرتبط با موسیقی و یا سخنرانی است روال طراحی براساس زمان واخشی مشخص شکل می‌گیرد ولی در طراحی سالن‌های چند منظوره که هم‌زمان برای موسیقی و سخنرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند با توجه به اینکه زمان‌های واخنش مناسب برای این دو منظور کاملا متفاوت است مهندس آکوستیک را با یک دوگانگی مواجه می‌کند. هدف از شکل‌گیری این مقاله معرفی روشی برای تحلیل این مقوله است.

در طراحی این قبیل سالن‌ها لزوم پیش‌بینی‌های آکوستیکی در خصوص رعایت زمان واخنش مناسب را بیش از هر مسئله دیگری مورد توجه قرار می‌دهند. می‌توان این پیش‌بینی‌ها را با بهره‌گیری از مدل‌سازی رایانه‌ای مورد ارزیابی و تحلیل قرار داد. حاصل تحلیل‌های صورت گرفته در جدول شماره ۳ آمده است. با توجه به نتایج تحلیل و با نگاهی به معادلات ۱ الی ۸، نسبت پارامترهای تأثیرگذار آکوستیکی و مؤثرترین عوامل مشخص می‌شوند؛ در این

جدول، A نمایان‌گر تغییرات با بیشترین اثر و B نمایان‌گر تغییرات با کمترین یا بدون تأثیر است. عوامل L و r با تعبیه سیستم تقویت‌کننده صوتی تغییر می‌کنند و تغییر در سیستم جاذب‌های متغیر باعث تغییرات در عامل T₆₀ می‌شوند.

جدول ۳. نسبت پارامترها و مؤثرین عوامل تأثیرگذار. منبع: نتایج

تحقیق نگارنده

عوامل تأثیرگذار			پارامتر
r (m) فاصله شنونده تا منبع	T ₆₀ (s) زمان واخنش	L (dB) تراز فشار صدا	
A	A	A	C ₅₀
A	A	A	C ₈₀
A	A	B	AL _{cons}
A	B	B	CD
B	B	A	SPL _{Total}
B	A	A	D/R

طبق نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، در سالن طراحی شده مقادیر زمان واخنش (RT)، افت گفتار هماهنگ (AL_{cons}) و فاصله بحرانی (CD) کاملا مناسب و مقادیر وضوح گفتار (C₅₀ و C₈₀)، تراز فشار کلی صوت (Total SPL) و نسبت D/R، نسبتا مناسب هستند که در مجموع می‌توان گفت که طراحی صورت گرفته و پیش‌بینی‌های لحاظ شده مناسب بوده‌اند. لیکن از آنجا که در این پژوهش نتایج عددی به‌دست آمده در جدول ۲ تنها برای یک نقطه مفروض در میانه سالن تماشاچیان و برای یک منبع صوتی ارائه شده است.

برای تحقق بهترین نتایج بایستی در پژوهش‌های آتی حداقل ۳ نقطه در سالن اصلی و ۲ نقطه در قسمت بالکن‌ها و نیز منابع تقویت‌کننده صوتی در قسمت‌های مختلف سالن، مطابق شکل ۵، مورد ارزیابی کامل قرار گیرند و تغییرات پیشنهادی در بخش تجزیه و تحلیل اعمال و مورد سنجش واقع گردند و نیز بهتر است که نتایج در نرم‌افزار

دیگری مورد مطالعه و نهایتاً با تلفیق شرایط به دست آمده، طراحی برای اجرا تضمین گردد.

نرم افزار EASE کمک شایانی در به ثمر رسیدن این پژوهش نمودند و نیز اساتید محترم جناب آقای دکتر بهنام قلیچ خانی و جناب دکتر محمد فرخ زاد که با راهنمایی‌ها و بازنگری‌های ارزشمندشان موجب تحقق صحیح این اثر شدند.

۸. تشکر و قدردانی

با تشکر و سپاس از تیلو شوترز مدیر محترم وقت شرکت AFMG که با در اختیار گذاشتن نسخه کامل و اصلی

۹. مأخذ

- [۱] قیابکلو، ز.، "مبانی فیزیک ساختمان (اکوستیک)"، ویرایش هشتم، انتشارات جهاد دانشگاهی، ۱۳۹۳.
- [2] Krokstad, A., and S. Strøm, "Acoustical design of the multi-purpose 'hertnes' hall in sandefjord", *Applied Acoustics*, 1979, Vol.12, no.1, pp.45-63.
- [3] Long, Marshall, "Architectural acoustics", Elsevier, 2005.
- [۴] احمدی، ع.، "طراحی سالن موسیقی گرگان با هدف ارتقاء ارتباط فضاهای موسیقی و معماری نور"، پایان نامه کارشناسی ارشد (چاپ نشده)، ۱۳۹۲.
- [5] Beranek, Leo, "The sound strength parameter G and its importance in evaluating and planning the acoustics of halls for music", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, Vol.129, no.5, pp.3020-3026.
- [6] Beranek, Leo, "Concert halls and opera houses: music, acoustics, and architecture", Springer Science & Business Media, 2012.
- [7] Everest, F. Alton, "Master handbook of acoustics" McGraw-Hill Education, 2001.
- [8] Ballou, Glen, "Handbook for sound engineers", Taylor & Francis, 2013.
- [۹] گروت، ل. ن، وانگ، د. ع. عینی فر، مترجم، "روش تحقیق در معماری"، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۹۳.
- [10] Barron, Mike, and Sven Kissner, "A possible acoustic design approach for multi-purpose auditoria suitable for both speech and music", *Applied Acoustics*, 2017, Vol.115, pp.42-49.
- [۱۱] اورست، آ.، غ لیاقتی، مترجم، "اکوستیک در طراحی استودیوها"، مرکز تحقیقات مسکن، ۱۳۸۵، شماره ۲۰۳.
- [12] Veneklasen, Paul S., "Model techniques in architectural acoustics", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1970, Vol.47, no.2A, pp.419-423.
- [13] Rindel, Jens Holger, "The use of computer modeling in room acoustics", *Journal of vibroengineering*, 2000, Vol.3, no.4, pp.219-224.
- [14] Schroeder, Manfred R., "Computer models for concert hall acoustics", *American Journal of Physics*, 1973, Vol.41, no.4, pp.461-471.
- [15] Huopaniemi, Jyri, Lauri Savioja, and Matti Karjalainen, "Modeling of reflections and air absorption in acoustical spaces a digital filter design approach", In *Proceedings of 1997 Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, pp.4-pp. IEEE, 1997.
- [16] Berkhout, A. J., D. De Vries, J. Baan, and B. W. Van den Oetelaar, "A wave field extrapolation approach to acoustical modeling in enclosed spaces", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1999, Vol.105, no.3, pp.1725-1733.
- [17] Drotleff, H., and X. Zhou, "Attractive room acoustic design for multi-purpose halls", *Acta Acustica united with Acustica*, 2001, Vol.87, no.4, pp.500-504.
- [18] Funkhouser, Thomas, Nicolas Tsingos, Ingrid Carlbom, Gary Elko, Mohan Sondhi, and James West, "Modeling sound reflection and diffraction in architectural environments with beam tracing", In *Forum Acusticum*, 2002, p.8.
- [19] Rindel, Jens Holger, "Modelling in auditorium acoustics. From ripple tank and scale models to computer simulations", *Revista de Acústica*, 2002, Vol.33, no.3-4, pp.31-35.
- [20] Funkhouser, Thomas, Nicolas Tsingos, Ingrid Carlbom, Gary Elko, Mohan Sondhi, James E. West, Gopal Pingali, Patrick Min, and Addy Ngan, "A beam tracing method for interactive

architectural acoustics", *The Journal of the acoustical society of America*, 2004, Vol.115, no.2, pp.739-756.

[21] Picaut, Judicaël, Vincent Valeau, Alexis Billon, and Anas Sakout, "Sound field modeling in architectural acoustics using a diffusion equation", 2006.

[22] Noisternig, Markus, Brian FG Katz, Samuel Siltanen, and Lauri Savioja, "Framework for real-time auralization in architectural acoustics", *Acta Acustica United with Acustica*, 2008, Vol.94, no.6, pp.1000-1015.

[23] Azad, H., Ali Qapu, "Persian Historical Music Room", *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 2008, Vol.30, no.3, pp.1-6.

[24] Rindel, J. H., "Room acoustic prediction modelling", *XXIII Encontro Da Sociedade Brasileira Deacústica Salvador-Ba*, 2010, Vol.18, no.A21, pp.1-12.

[25] Webb, Craig J., and Stefan Bilbao, "Computing room acoustics with CUDA-3D FDTD schemes with boundary losses and viscosity", In *2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, IEEE, 2011, pp.317-320.

[۲۶] قیابکلو، ز.، "طراحی آکوستیکی سالن همایش چند منظوره با الهام از صدف دریایی"، *مجله هنرهای زیبا*، ۱۳۹۲، شماره ۳ قسمت ۱۸، صفحه ۱۷-۲۴.

[27] Sakuma, T., Sakamoto, S., & Otsuru, T., "Computational simulation in architectural and environmental acoustics", Springer, 2014.

[28] Vorländer, Michael, "Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, Vol.133, no.3, pp.1203-1213.

[29] Pelzer, Sönke, Lukas Aspöck, Dirk Schröder, and Michael Vorländer, "Integrating real-time room acoustics simulation into a cad modeling software to enhance the architectural design process", *Buildings*, 2014, Vol.4, no.2, pp.113-138.

[۳۰] مجیدی، هب فرشچی، ح و غفاری، ا، "یکپارچه سازی طراحی پارامتریک و مهندسی آکوستیک (برای شکل دادن به سالن کنسرت)" نشریه انجمن آکوستیک و ارتعاشات، دوره ۷، شماره ۱۴، ۱۳۹۷، ص ۴۰-۵۶

[۳۱] گروه مؤلفین، "مقررات ملی ساختمان (مبحث ۱۸) آکوستیک"، نشر توسعه ایران، ۱۳۹۰.

[32] Renkus-Heinz, *User's guide and tutorial*. Retrieved from <http://ease.afmg.eu/> Visited Date: 2018

[33] Ottobre, Roberto Daniel, Marcelo Ottobre, Agustín Arias, María Pérez Maraviglia, and Oscar Cañadas, "Multiplex cinema halls: Design and construction of six halls in the city of Mar del Plata", In *Proceedings of Meetings on Acoustics 22ICA*, vol.28, no.1, p. 015025. Acoustical Society of America, 2016.

[34] Hoffmeier, J. "Untersuchungen zum Einfluß von Raumklang-färbungen auf die Deutlichkeit von Sprache [Investigations on the influence of room timbres on speech definition] Thesis for a degree at the TU Dresden", *Technical University of Denmark*, 1996.

[35] Hioka, Yusuke, Kenta Niwa, Sumitaka Sakauchi, Ken'ichi Furuya, and Yoichi Haneda, "Estimating direct-to-reverberant energy ratio based on spatial correlation model segregating direct sound and reverberation", In *2010 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pp.149-152., IEEE, 2010.

[36] Yang, Han-Seung, Dae-Jun Kim, and Hyun-Joong Kim, "Rice straw-wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials", *Bioresource technology*, 2003, Vol.86, no.2, pp.117-121.

1. Fan Shape
2. Shoebox (Long, 2005, p. 26) اصطلاح جعبه کفشی به سالن‌های مستطیلی راست گوشه اشاره دارد.
3. Reverberation Time
4. Clarity
5. Articulation Loss of Consonant
6. Critical Distance
7. Sound Pressure Level
8. Direct to Reverberant Ratio
9. Scaled Modelling
10. Computer Simulation
11. Groat, & Wang
12. Movable Absorber
13. Subjective Predictions
14. Veneklasen
15. Model Techniques in Architectural Acoustics
16. Schroeder
17. Huopaniemi & et al.
18. Finite-difference time-domain بازه زمانی تفاضل محدود
19. Image-Source Real-Time
20. Berkhout & et al.
21. Ray Tracing
22. Odeon
23. Drotleff & Zhou
24. Funkhouser & et al.
25. Beam Tracing
26. Rindel
27. Ripple Tank
28. Picaut
29. Noisternig & et al.
30. Auralization
31. Transition
32. Webb & Bilbao
33. بر روی کارت‌های گرافیکی رایانه Nvidia پلتفرم جدید کودا ارائه شده توسط شرکت
34. Rhino Software
35. Sakuma
36. Finite Element
37. Boundary Element
38. Vorländer
39. Pelzer
40. Environmental noise
41. Visual
42. Ray Tracing
43. Import
44. Clarity
45. Total Sound Pressure Level (Total SPL)
 ۴۶. رویستر و همکاران در بررسی خود در مقاله پژوهشی "آستانه شنوایی و نمودار صدا برای نوازندگان ارکستر سمفونی" میزان بلندای یک ارکستر در مقیاس forte را ۹۰ دسی بل اعلام نمودند. (Royster, Royster, & Killion, 1991)
47. Yang
۴۸. Intelligibility
49. Marshall Long