

تاثیر فرم هندسی سقف بر پارامترهای آکوستیک سالن موسیقی*

مهندس سپیده مصطفائی^{**}، دکتر وحدانه فولادی^{***}، دکتر مه‌تیم شهبازی^{****}

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۰۴ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷

چکیده

از زمان اولین تمدن‌ها، موسیقی یک قسمت جدایی‌ناپذیر از زندگی انسان‌ها بوده و به عنوان یک نوع ارتباط میان آنان و حیات محسوب می‌شده. در این مقاله به طراحی و آنالیز آکوستیک معماری در سالن موسیقی با استفاده از نرم‌افزار Odeon شده است. در طراحی داخلی این سالن ۲ طرح معماری صورت گرفته؛ طرح اول سقف سالن به صورت قوس‌دار و طرح دوم، سقف به صورت شکست‌هایی منظم با احتساب فرکانس‌های صدایی طراحی شده است. پس از طراحی سالن و خروجی گرفتن از نرم‌افزارهای آکوستیکی پارامترها به ترتیب در سقف قوس‌دار و سقف شکست‌دار به قرار زیر است. زمان واخنش ۱/۶۵ و ۱/۳، انتقال وضوح گفتار ۰/۶۶ و ۰/۸۴، پارامتر EDT ۱/۱۵ و ۱/۲، از بین رفتن حروف صدا دار ۳/۱٪ و ۱/۸۶٪، تراز فشار صوتی ۱۰۷/۵ دسیبل و ۱۰۵/۷ دسیبل بوده است. نتیجه گیری می‌توان کرد که سقف دارای شکست در شرایط آکوستیکی بهتر از سقف قوس‌دار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی

طراحی آکوستیکی، نرم افزار ODEON، آکوستیک معماری، سالن موسیقی.

* این مقاله برگرفته از رساله دکتری سپیده مصطفائی با عنوان: «بهینه‌سازی قابلیت فهم صدا در فضاهای شنیداری در سالن‌های موسیقی» است که با راهنمایی دکتر وحدانه فولادی و مشاوره دکتر مه‌تیم شهبازی در دانشگاه آزاد اسلامی واحد بین‌الملل قشم در حال انجام است.

** دانشجوی دکتری تخصصی، گروه معماری، واحد بین‌الملل قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران.

Email: Sepideh.Mostafaie1985@gmail.com

*** استادیار، گروه معماری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران (مسئول مکاتبات).

Email: V.Fooladi@ymail.com

**** استادیار، گروه معماری، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

Email: M-Shahbazi@srbiau.sc.ir

مقاله:

هویت شهر

شماره پنجاه و نهم / سال هجدهم / پاییز ۱۴۰۳

ISSN 17359562

مقدمه

صوت در فضایی که به خوبی طراحی شده است، ضمن تقویت عملکرد فضای مذکور، موجب رضایت ساکنان آن نیز می‌گردد. یک محیط آکوستیکی که بد و ضعیف طراحی شده باشد، موانعی را در برابر کارکرد خود به وجود می‌آورد و موجب بی‌علاقگی افراد برای حضور در آنجا شده و حتماً به سلامت آنان نیز آسیب می‌رساند. علم آکوستیکی یکی از شاخه‌های علم فیزیک است که به تولید، کنترل و نظارت، انتقال، دریافت و اثرات صوت می‌پردازد. طرح آکوستیکی عبارت است از برنامه‌ریزی، شکل دهی و آراستن فضاهای بسته که به منظور استقرار یک محیط‌زیست آکوستیکی انجام می‌شود. البته این محیط آکوستیکی باید صداهای ناشی از گفتگو و یا اصوات ناشی از آلات موسیقی را از یکدیگر متمایز نماید. فهم این مطلب که ما چگونه صوت را می‌شنویم و این که چگونه صوت با محیطی که آن را ساخته‌ایم تعامل می‌کند، می‌تواند به ما کمک کند تا فضاهایی را طراحی کنیم که همان اندازه که از نظر آکوستیکی خوشایند هستند از لحاظ بصری نیز آن غنای لازم را داشته باشند. پژوهش حاضر که در راستای آکوستیک-معماری صورت گرفته وضوح صدا را به عنوان مهم‌ترین پارامتر آکوستیکی در یک سالن موسیقی قرار داده است. در کشور ایران در سال‌های گذشته سالن‌های زیادی تجهیز و بهره‌برداری شده است که متأسفانه بیشتر این سالن‌ها از لحاظ آکوستیکی ضعف‌های زیادی دارند. از طرفی سالن‌هایی که تلاش برای بهبود شرایط آکوستیکی در آنها شده است به دلایل ضعف در مسائل زیباشناختی متریال‌های آکوستیک، از جلوه خاص و معماری داخلی مناسبی برخوردار نیستند. به همین دلیل در این پژوهش سعی بر طراحی و آنالیز یک سالن موسیقی شده است که با استفاده از فرم‌های هندسی مناسب با فرکانس‌های آکوستیکی در سطوح مختلف سالن شرایط آکوستیکی و شنیداری صدای سالن بهبود پیدا کند.

پیشینه پژوهش

به طور کلی تاریخ شکل‌گیری و طراحی آکوستیک در معماری را می‌توان به ساخت تئاترهای یونان باستان و سپس رُم باستان نسبت داد. از ابتدای قرن ۱۹ روی آوری به آکوستیک به عنوان یک علم به وجود آمد و در پی آن مقالات، کتاب‌ها و مجلات متنوعی در مورد تکنیک‌های آکوستیک منتشر شد. در اواخر قرن ۱۹ و اوایل قرن ۲۰، معماری آکوستیک به عنوان یک رشته علمی توسط فیزیک‌دان و استاد جوانی از هاروارد به نام ویلیام سابین پایه‌گذاری گردید. وی توانست اولین تئوری جذب صدا در مواد، رابطه آن با میرایی صوت در فضا و فرمولی برای میرایی یا همان زمان واخنش ابداع کند (Rossing, 2010).

در واقع طراحی معماری می‌تواند بر مطلوبیت صوتی فضا تاثیر بسزایی داشته باشد و تنها به تاثیر آکوستیک منتهی نشود. استفاده از اشکال مقرر برای آکوستیک هندسی صدا بر کیفیت فضایی، و طراحی آکوستیکی بر تاثیر فضا بر احساس مخاطب موثر است. یعنی می‌توان به این موضوع دست یافت که طراحی فرم بر گسترش صدا همراه با آکوستیک در محیط تأثیرگذار است (قیابکلو، ۱۳۹۱).

برای دستیابی به فضایی با آکوستیک ایده‌آل تلاش‌های بسیاری شده است. فرم‌های بسیاری مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به فرم‌های معماری تالارهایی که در قرن ۱۹ بنا گردید، اشاره داشت. فرم این تالارها عموماً مستطیل شکل، با دیوارهای متوازی، سقف مسطح و افقی بوده‌اند و کمتر دیده شده است که از فرم مدور برای طراحی استفاده شود، چرا که یک سالن آکوستیک دارای تعداد معینی از انعکاست طبیعی با شدت مساوی می‌باشد که در تمام جهات پخش می‌گردند. بدین منظور، تحقیقات و مطالعات گسترده‌ای جهت شناخت و تعیین پارامترهای موثر بر چگونگی آکوستیک سالن‌های کنسرت از نظر ذهنی و عینی صورت گرفته و یا در حال تحقیق می‌باشد. ایجاد وضوح صوتی در فضاها از اهمیت بالایی برخوردار است، به گونه‌ای که ارتباط مستقیمی با تراز نوفه زمینه^۱ و زمان واخنش^۲ آن وجود دارد. علاوه بر این نه تنها نوفه (واخنش) قابلیت فهم گفتار را کاهش می‌دهد، بلکه عموماً همه سیگنال‌های خارجی با تغییرات سیگنالی که در مسیر منبع صوتی تا دریافت‌کننده اتفاق می‌افتد، نیز می‌تواند باعث کاهش قابلیت فهم صوت شوند (قیابکلو، ۱۳۹۳).

سرخندان و همکاران (۱۳۹۷) تاثیر مواد جاذب و فرم‌های معماری در یک مرکز آموزشگاهی هنرستانی را مورد بررسی قرار دادند. آنها سقف را تاثیرگذارترین بخش ساختمان در پارامترهای آکوستیکی اتاق ذکر کردند. همچنین تاثیر مکان جاذب‌های صوتی را با استفاده از نرم‌افزار آکوستیکی مورد مطالعه قرار دادند که بیشترین میزان جذب در سقف و کمترین آن در کف بوده است.

میرزآبالبو و همکاران (۱۴۰۲) مطالعات میدانی در زمینه شرایط آکوستیکی در کتابخانه شهر تبریز داشته‌اند. آنها دریافتند که المان‌های معماری مانند کاواک و حفره باعث افزایش جذب صدا در فضا شده و میزان استفاده از مواد جاذب صدا را پایین خواهد آورد.

فیضی و همکاران (۱۳۹۶) عوامل مختلف بر روی شرایط آکوستیکی کتابخانه را بررسی کردند که استفاده از فرم هندسی مربع در فضا را جهت تمرکز بیشتر حواس و داشتن آرامش و سکوت در کتابخانه پیشنهاد دادند.

کایرولی (۲۰۲۱) تأثیر پارامترهای هندسی را روی سالن‌های همایش با پلان گرد مورد بررسی قرار داد. به این نتیجه رسید که به علت شرایط سخت آکوستیک و مشکلات زیاد صدا بر روی سالن‌های گرد، بهترین گزینه ایجاد دیفیوزرهای به موازات شعاع دایره از سمت مرکز سالن به سمت دیوارها می‌باشد. همچنین به این نتیجه رسید که ایجاد فضای خالی به صورت هندسه مثلث عملکرد بهتری دارد (Cairolì, 2021).

بلاسزاک و همکاران (۲۰۲۱) نحوه توزیع میدان صدا بر روی معابد را بررسی کرد. او به این نتیجه رسید که حتی با وجود متربالی غیر جاذب صدا مانند سنگ با استفاده از ایجاد یک هندسه مناسب می‌توان تا حدودی کیفیت و وضوح صدا را بهتر کرد. همچنین با استفاده از تحقیقات میدانی متوجه شدند که با ایجاد کنده‌کاری‌های ریز بر روی سنگ‌ها می‌توان از رفلکت مستقیم صدا جلوگیری کرد (Błaszczak et al., 2021).

مبانی نظری

به منظور طراحی آکوستیکی انواع سالن‌های موسیقی، پارامترهایی وجود دارد که باید طبق استانداردهای بین‌المللی باشد. مهم‌ترین پارامترهای آکوستیکی در طراحی و تحلیل آکوستیکی سالن، نوفه زمینه (BN)، زمان واخنش (RT)، قابلیت فهم کلام (STI) و تراز فشار صوتی (SPL) می‌باشد.

نوفه زمینه

نوفه عبارت است از هرگونه انرژی ناخواسته، نامطلوب و مزاحمی که در نقاط مختلف مسیر انتقال صوت قرار گرفته باشد. حداکثر تراز نوفه زمینه در سالن‌های موسیقی با توجه به آیین‌نامه مقررات ملی مبحث هجدهم باید ۳۵ دسیبل باشد. به جهت رسیدن به این مقدار از صدای نوفه باید بحث عایق‌بندی جدارها به صورت استاندارد اجرا شود.

زمان واخنش

با توجه به آیین‌نامه مقررات ملی مبحث هجدهم وزارت ساختمان و مسکن و استانداردهای بین‌المللی در این زمینه، زمان واخشی (Reverberation Time) سالن‌های موسیقی باید بین ۰/۸ تا ۲/۳ ثانیه باشد. اختلاف این اعداد بسته به حجم سالن می‌باشد که با توجه به حجم سالن طراحی شده در این مقاله، این معیار باید تقریباً ۱/۷ ثانیه باشد. البته این مقدار متوسط در تمامی فرکانس‌های صوتی بوده و باید توجه کرد که این مقدار در فرکانس‌های زیر ۴۰۰۰ هرتز نیز کنترل شود (شکل ۱).

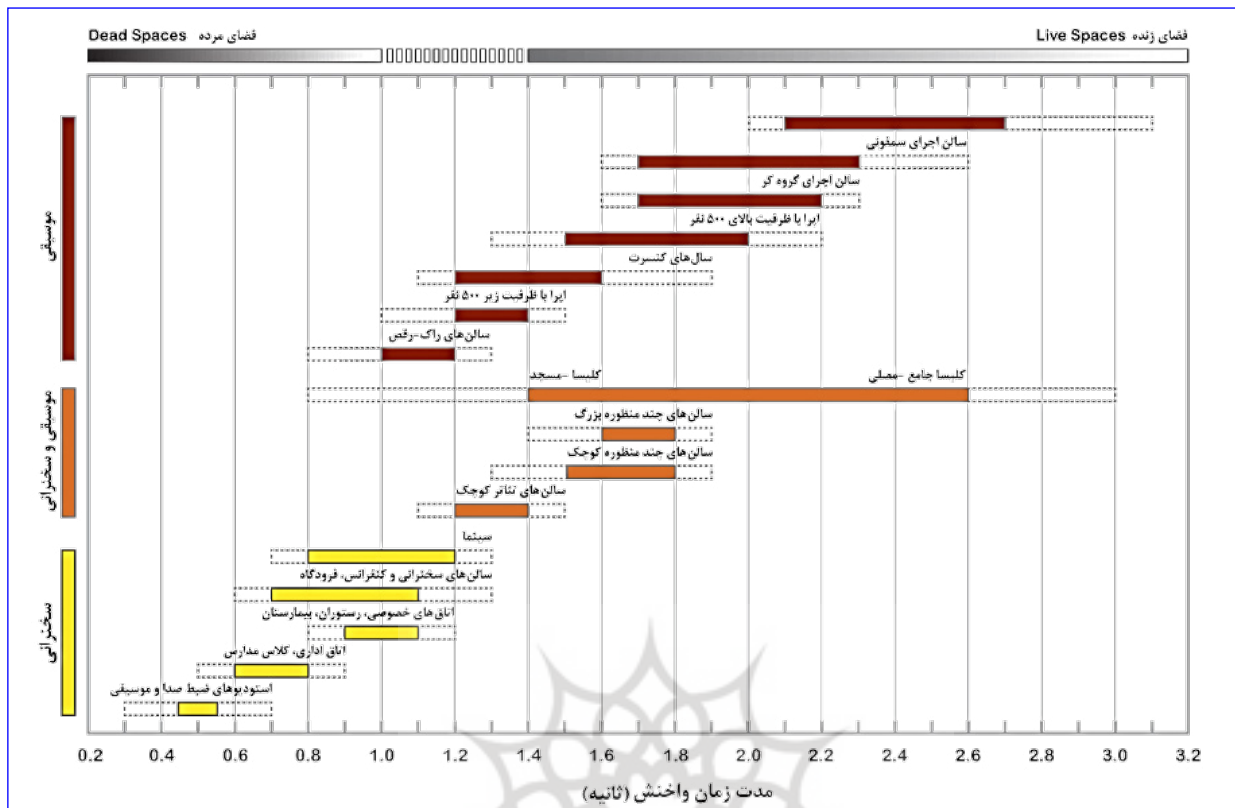
قلی‌زاده و همکاران (۱۴۰۰) دریافتند که نمونه عناصر ساختاری مشترک همچون قوس‌ها، جداره‌های برآمده، گوشه‌سازی‌ها، تزئیناتی همچون کاربندی، سطح ستون‌ها با پخش و پراکنش صدا سبب ایجاد بازخوردهای آکوستیکی مناسب می‌شوند. همچنین آنها دریافتند که وجود خاک در آجر به دلیل جاذب صوت بودن باعث کاهش زمان واخنش و افزایش کیفیت صدا می‌شوند.

غفاری (۱۳۹۲) به این نتیجه رسید که ایجاد هندسه‌های متفاوت با استفاده از آجر تأثیر زیادی در کاهش زمان واخنش و بالارفتن وضوح گفتار در یک فضا می‌شود.

بروتی و همکاران (۲۰۲۲) تأثیر متربالی‌های جاذب حفره‌دار را بر سقف سالن چند منظوره در پروجاً^۲ در ایتالیا محاسبه کردند و متوجه شدند که بیشتر از نوع جاذب بودن متربالی در سقف یک سالن، هندسه سقف در معماری داخلی تأثیر بسزایی در پارامترهای آکوستیکی به ویژه مدت زمان واخنش صدا دارد (Buratti et al., 2022).

پیژنگ ژو و همکاران (۲۰۲۰) شاخص انتقال وضوح صدا^۴ در سالن‌های چند منظوره چند ضلعی را مورد بررسی قرار دادند که به اهمیت زیاد هندسه معماری سالن در پارامتر شاخص انتقال وضوح صدا (STI) در سالن رسیدند، همچنین آنها به تأثیر متناسب بودن ابعاد المان‌های معماری با فرکانس‌های آکوستیکی سالن شدند (Zhu et al., 2020). در یک اتاق ثابت سطوح مختلف هندسی را بر روی دیوارهای اتاق جانمایی کردند و برای هر یک از انواع هندسه سطوح اندازه‌گیری زمان واخنش را انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که سطوح مختلف در شرایط آکوستیکی اتاق نقش زیادی داشته و با استفاده از سطوح مناسب و طراحی شده می‌توان شرایط آکوستیکی اتاق را بهبود داد. همچنین آنها نتیجه گرفتند که متربالی‌های جاذب صدا نیز در شرایط چیدمان معماری داخلی متفاوت عملکردهای متفاوتی دارند (Shtrepi et al., 2019).

مرلی و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از المان‌های معماری پرتابل در سقف و دیوارهای یک سالن کلیسا توانستند از لحاظ آکوستیکی شرایط را برای برگزاری مراسم موسیقی فراهم کنند. آنها به این نتیجه رسیدند که حتی در فضاهایی که از متربالی‌های آکوستیک زیادی استفاده نشده است می‌توان با استفاده از اشکال هندسی متناسب در معماری شرایط پخش فرکانس‌های صوتی را به گونه‌ای تغییر داد که شرایط شنیداری حضار مطلوب گردد (Merli & Bevilacqua, 2020). از بهترین نمونه تالارهای قرن ۱۹ می‌توان به تالار موزیک فراین سن آندریوزها، اشتارت کازینوگه و اندهائوس اشاره کرد. همچنین با توجه به مشخصات تالارهای معروف جهان می‌توان دستورالعمل‌هایی را جهت طراحی تالارهای کنسرت در نظر گرفت که تأثیر مستقیمی نیز بر روی اکوستیک دارند (Reinten et al., 2017).



شکل ۱. شماتیک استاندارد مدت زمان واخ‌ش در فضاهای مختلف
Figure 1. Standard schematic of reverberation Time in different spaces

قابلیت فهم کلام

قابلیت فهم کلام (Speech Transmission Index) که به اختصار STI نامیده می‌شود. این شاخص رابطه مستقیمی با زمان واخ‌ش (RT) در سالن دارد. این شاخص از ۰ تا ۱ سنجیده می‌شود که میزان ۰ غیر قابل قبول بوده و میزان ۱ عالی می‌باشد. این شاخص در جدول ۱ آورده شده است.

در تحلیل‌های آکوستیک، پارامتری وجود دارد به نام قابلیت فهم گفتار شناخته می‌شود. در این پارامتر آکوستیکی شاخصی وجود دارد به نام شاخص انتقال وضوح گفتار

جدول ۱. شاخص SIT
Table 1. SIT Index

کیفیت صدا	شاخص STI
عالی	۰/۷۵ - ۱
خوب	۰/۷۵ - ۰/۶۰
ضعیف	۰/۶۰ - ۰/۴۵
بد	۰/۴۵ - ۰/۳۰
غیر قابل قبول	۰/۳۰ - ۰

میزان تقریبی SPL در یک سالن موسیقی چند منظوره با ظرفیت ۱۰۰۰ نفر باید بین ۱۰۰ تا ۱۱۰ دسیبل باشد.

نرم افزار اودئون (Odeon)

در زمینه آکوستیک که یکی از شاخه‌های علم فیزیک محسوب می‌شود، تعداد کمی نرم‌افزار به طراحان و تحلیل‌گران این امکان را می‌دهد که با ضریب اطمینان بالا محاسبات آکوستیکی را انجام داده و با تکیه بر تحلیل‌های این نرم‌افزار کارهای اجرایی را انجام بدهند. به جرات می‌توان

تراز فشار صوتی

با افزایش حجم یک سالن، برای انتقال صدا به استفاده از سیستم‌های الکترونیکی (بلندگو) نیاز پیدا خواهیم کرد. تراز فشار صوتی یک فضا، میزان بلندی صدا را بیان می‌کند. این شاخص با SPL یا (Sound Pressure Level) شناخته می‌شود. یکنواخت بودن میزان SPL در کل سالن یکی از مسائل مهم در طراحی سالن‌های موسیقی می‌باشد. این شاخص با واحد دسیبل dB اندازه‌گیری می‌شود که با افزایش ۱۰ دسیبل صدا میزان صدا به میزان گوش شنونده دو برابر خواهد شد.

- گفت که یکی از قدرتمندترین نرم‌افزارهای حوزه آکوستیک نرم‌افزار Odeon می‌باشد. این نرم‌افزار محصول شرکت Odeon-DK از کشور دانمارک است و بزرگ‌ترین دانشمندان حوزه آکوستیک در سراسر دنیا به عنوان مشاور در طراحی این نرم‌افزار نقش داشته‌اند. به طور کلی این نرم‌افزار تنها نرم‌افزار در زمینه آکوستیک معماری به شمار می‌رود.
- از بین رفتن حروف صدادار - Articulation Loss of Consonants (Alcones)
- فشار صوتی - Sound Pressure Level (SPL)
- پهنای شنود منبع صدا - Apparent Source Width (ASW)
- ترکیب انتقال صدای بیرونی و درونی فضا - Transmission Mixed with Room Acoustic
- درصد صدای بازتابی - Reflector Coverage
- پاسخ فرکانسی - Frequency Response

ورودی و خروجی نرم‌افزار

برای تمامی نرم‌افزارهای صوتی وارد کردن هندسه مکان و فضا از اهمیت زیادی برخوردار است. در این نرم‌افزار امکان وارد کردن هندسه از نرم‌افزارهایی مانند Revit، Rhino، AutoCAD وجود دارد. این قابلیت در فرمت‌های مختلف فعال است. همچنین در این نرم‌افزار کاربر این امکان را دارد که پس از اعمال تغییراتی چون وارد کردن بلندگو، تعیین مترتال و دیگر تغییرات، خروجی سه بعدی برای نرم‌افزارهای مرتبط را بگیرد.

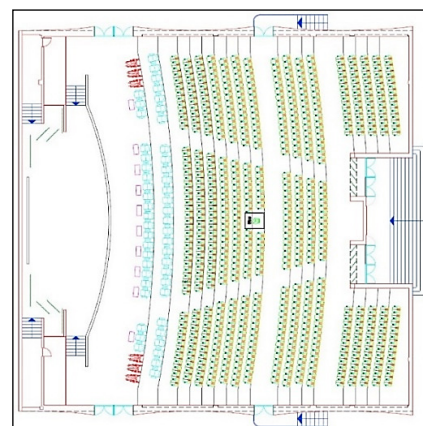
مترتال

وجود بیش از یک میلیون مترتال یکی از علل قدرتمند بودن این نرم‌افزار می‌باشد. در هر مترتال تمام مشخصات آکوستیکی آن مانند ضریب جذب، ضریب پراکندگی، ضریب اسکدر و دیگر مشخصات وجود داشته و با اعمال کردن مترتال بر هر سطح مورد نظر، کاربر امکان مشاهده تأثیر مترتال بر آکوستیک فضا را خواهد داشت. یکی دیگر از ویژگی‌های این نرم‌افزار امکان اضافه کردن مترتال جدید با مشخصات آکوستیکی مورد نظر کاربر می‌باشد.

سایر محاسبات آکوستیکی

پارامترهای آکوستیکی که توسط نرم‌افزار Odeon قابل محاسبه می‌باشد شامل:

- زمان واخنش - Reverberation Time (RT)
- شاخص انتقال وضوح گفتار - Speech Transmission Index (STI)



شکل ۲. نمای بالای پلان طبقه اول سالن

Figure 2. Top view of the first-floor plan of the hall

روند انجام پژوهش
این پژوهش با طراحی فاز یک سالن ۱۰۰۰ نفره در نظر گرفته شده است و پارامترهای EDT، RT، STI و SPL و ALCONES^۵ مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. دلیل انتخاب این ظرفیت صندلی به این دلیل است که با توجه به مطالعات میدانی بیشتر سالن‌های موسیقی به خصوص در کشور ایران دارای میانگین ۱۰۰۰ صندلی می‌باشد. تحلیل‌های مورد نظر توسط نرم‌افزار Odeon صورت گرفته است. در طراحی داخلی این سالن ۲ طرح صورت گرفته؛ در طرح اول سقف سالن به صورت قوس دار^۶ و در طرح دوم، سقف به صورت شکست‌هایی منظم^۷ با احتساب فرکانس‌های صدایی طراحی شده است. پس از بررسی داده‌ها، مشاهده شده که تقریباً تمامی پارامترهای آکوستیک در طرح دوم بسیار بهتر از طرح اول بوده و سالن در شرایط آکوستیکی بسیار مناسبی قرار خواهد گرفت.

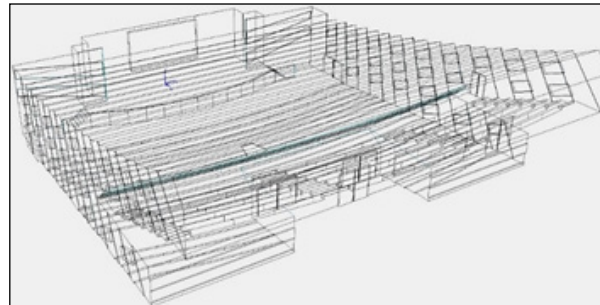
ترسیم دو بعدی سالن چند منظوره

طراحی اولیه این سالن به صورت دو بعدی توسط نرم‌افزار AutoCAD انجام شده است. این سالن به صورت دو طبقه طراحی شده است که طبقه دوم به صورت بالکن در سالن دیده می‌شود. تمامی مقررات ملی ساختمان در این طراحی در نظر گرفته شده که شامل راهروها، درب‌های ورود و خروج، درب‌های خروج اضطراری و سایر موارد می‌باشند. در شکل ۲ زیر، پلان طبقه اول سالن طراحی شده را مشاهده می‌کنید.

ترسیم سه بعدی سالن در نرم‌افزار

مدل صحیح سالن یکی از قسمت‌های مهم در آنالیز آکوستیک می‌باشد. به همین علت خود نرم‌افزار ODEON در این مرحله فضای ترسیم شده را چک کرده و اگر مشکلی باشد از ادامه روند آنالیز جلوگیری خواهد کرد (شکل ۳).

پس از طراحی‌های اولیه سالن، فضای داخلی سالن در قسمت Extrusion Modeler ترسیم شده و سپس در نرم‌افزار ODEON وارد می‌شود.

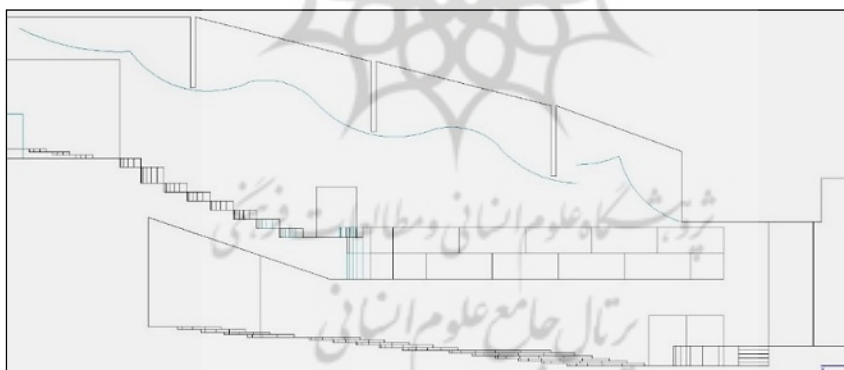


شکل ۳. طراحی سه بعدی سالن
Figure 3. 3D design of the hall

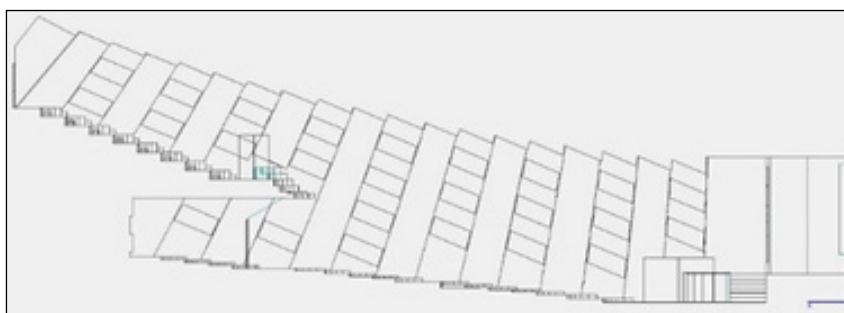
طراحی متفاوت هندسه سقف

بالای چوب سالن‌های استاندارد از متریال چوب برای پوشش‌های دیوار و سقف در آنها استفاده شده است. به دلیل محدودیت در کارکرد با چوب به خصوص در پروژه‌های اجرایی از شکل‌های هندسی مشخصی استفاده می‌شود. به صورت کلی این شکل‌های هندسی یا به صورت قوس‌دار و یا به صورت چند ضلعی استاندارد می‌باشند. به همین امر از سقف قوس‌دار و سقف دارای شکست در این پژوهش استفاده شده است. در شکل ۴ و ۵ تفاوت دو طرح در نرم‌افزار را مشاهده می‌کنید.

برای نشان دادن تاثیر هندسه سقف در پارامترهای آکوستیکی سالن، ۲ نوع سقف در این سالن طراحی شده است. یک طرح سقف سالن به صورت قوس‌هایی در طول سالن و یک طرح دیگر سقف به صورت باکس‌هایی با هندسه متفاوت بر روی سقف طراحی شده است. در بیشتر سالن‌های دنیا به خصوص در زمینه سالن‌های موسیقی، چوب بیشترین حجم استفاده در این فضاها را دارد. به دلیل خواص صوتی مناسب چوب و خاصیت طنین



شکل ۳. طراحی سه بعدی سالن
Figure 3. 3D design of the hall



شکل ۳. طراحی سه بعدی سالن
Figure 3. 3D design of the hall

اضافه کردن متریال

مورد استفاده قرار می گیرد. در شکل ۶ نمونه جدول مشخصات آکوستیکی متریال موکت در نرم افزار ODEON را به عنوان نمونه مشاهده می کنید. با توجه به استفاده متریال های متفاوت در سالن، به تمامی سطوح، متریال مورد نظر اعمال خواهد شد. به همین منظور سطوح و متریال ها در جدول ۲ تعریف شده است.

پس از طراحی دو سقف متفاوت، باید برای تمامی سطوح داخل سالن متریال انتخاب شود. متریال های مورد استفاده در سالن نقش مهمی در تعیین پارامترهای آکوستیکی دارند. هر متریال یک مشخصات فیزیکی - آکوستیکی دارد که این مشخصات در نرم افزارهای تحلیل آکوستیکی

Number	Specification
6100	(Example 6100-6199) Single microsorber - 0.1 mm perforated polyester cloth 30 mm from reflecting surface (href= "http://www.microsorber.com/rw")
6200	(Example 6200-6299) Flex Acoustics, AgFlex portable fire retardant plastic tubes for large concert events total dept 700mm (href= "http://www.flexacoustics.com")
7000	Needle felt 5mm stuck to concrete (Kristensen, 1984)
7001	6mm pile carpet bonded to closed-cell foam underlay (Parkin, Humphreys, & Cowell, 1979)
7002	6 mm pile carpet bonded to open-cell foam underlay (Parkin, Humphreys, & Cowell, 1979)
7003	9 mm tufted pile carpet on felt underlay (Parkin, Humphreys, & Cowell, 1979)
7004	Carpet heavy, on concrete (Harris, 1991)
7005	Carpet heavy, on hairfelt or foam rubber (Harris, 1991)
7006	Carpet heavy, with impermeable latex backing on hairfelt or foam rubber (Harris, 1991)
7007	10 mm soft carpet on concrete (Ref. Dalenback, CATT)
8005	Cotton curtains (0.5 kg/m2) draped to 3/4 area approx. 130 mm from wall (Petersen, 1983)
8006	Curtains (0.2 kg/m2) hung 90 mm from wall (Ingwerslev & Petersen, 1953)
8007	Curtains of close-woven glass mat hung 50 mm from wall (Kristensen, 1984)
8008	Drapes, light velour, hung straight, in contact with wall (Harris, 1991)
8009	Drapes, medium velour, draped to half area (Harris, 1991)
8010	Drapes, heavy velour (Harris, 1991)

شکل ۶. مشخصات موکت مورد استفاده در نرم افزار ODEON
Figure 6. Carpet specifications used in ODEON software

جدول ۲. مشخصات متریال ها
Table 2. Material specifications

ردیف	محل استفاده متریال در سالن	جنس متریال	مساحت استفاده شده (مترمربع)	۸۰۰۰	۴۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۲۵۰	۱۲۵	۶۳
۱	سقف سالن	کد ۰۱	۱۷۶۰	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۱۲	۰/۱۸	۰/۱۸
۲	دیواره های سن	کد ۰۲	۲۴۶	۰/۸۲	۰/۸۲	۰/۸۳	۰/۸۸	۰/۷۹	۰/۶۱	۰/۳۶	۰/۱۲
۳	دیواره های انتهای سالن	کد ۰۳	۷۷۰	۰/۸۳	۰/۸	۰/۸۴	۰/۹۴	۰/۸۵	۰/۷۲	۰/۳۲	۰/۲۱
۴	دیواره های کناری سالن	کد ۰۴	۴۰۰	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۱۲	۰/۱۸	۰/۱۸
۵	کف سالن	کد ۰۵	۱۶۹۷	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۱	۰/۶۹	۰/۵۷	۰/۲۴	۰/۰۸	۰/۰۸
۶	درب های سالن	کد ۰۶	۵۰	۰/۱	۰/۱	۰/۱	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۱	۰/۱۴	۰/۱۴
۷	صندلی های سالن	کد ۰۷	۱۱۵۰	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۴	۰/۸۸	۰/۸	۰/۷۲	۰/۶۲	۰/۶۲

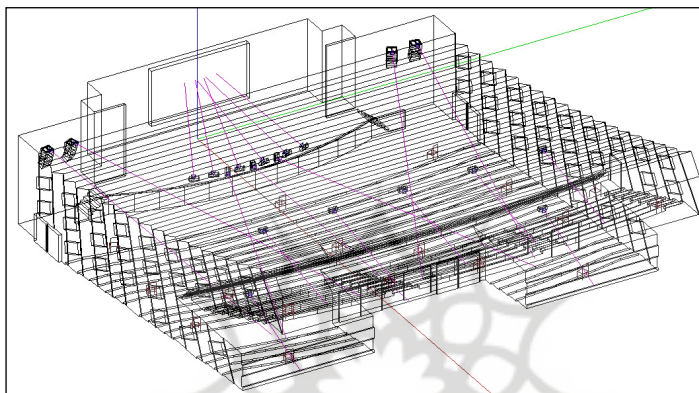
متریال ها

- کد ۰۱: ام دی اف ملامینه با ضخامت ۱۶ میلی متر، لایه هوایی به ضخامت ۲ سانتی متر و پشم سنگ با دانسیته ۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب به ضخامت ۵ سانتی متر.
- کد ۰۲: ام دی اف ملامینه با ضخامت ۱۶ میلی متر به صورت پانچ ۶۰ درصد با مته ۸ میلی متر، لایه هوایی به ضخامت ۲ سانتی متر و پشم سنگ با دانسیته ۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب به ضخامت ۵ سانتی متر.
- کد ۰۳: ام دی اف ملامینه با ضخامت ۱۶ میلی متر به صورت پانچ ۸۰ درصد با مته ۱۰ میلی متر، لایه هوایی به ضخامت ۲ سانتی متر و پشم سنگ با دانسیته ۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب به ضخامت ۵ سانتی متر.
- کد ۰۴: ام دی اف ملامینه با ضخامت ۱۶ میلی متر، لایه هوایی به ضخامت ۲ سانتی متر و پشم سنگ با دانسیته ۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب به ضخامت ۵ سانتی متر.
- کد ۰۵: کف سالن از جنس موکت به ضخامت ۹ میلی متر بر روی بتن مسلح.
- کد ۰۶: درب نیمه آکوستیک تمام چوب از جنس نراد به ضخامت ۵ سانتی متر و وسط درب پشم شیشه و چرم به صورت روکوب.
- کد ۰۷: صندلی های سالن با استاندارد سالن همایش از جنس آلومینیوم، فوم سرد تزریقی و کفی آکوستیک به صورت پانچ.

جانمایی بلندگوها و میکروفون‌ها

پس از نسبت دادن متریا‌ل‌های متفاوت در سطوح مختلف سالن، باید منبع صوتی و گیرنده صدا در سالن قرار گیرد. با توجه به حجم بالای این سالن باید از سیستم صوتی مخصوص استفاده کرد. در این سالن بلندگوهای Array در دو قسمت کناری سن در نظر گرفته شده است. ۱۴ عدد میکروفون نیز در قسمت‌های مختلف سالن قرار گرفته‌اند تا میانگین پارامترهای صوتی در سالن مشخص شود. محل قرارگیری بلندگوهای سالن و میکروفون‌های آن در شکل ۷ قابل مشاهده است. در چیدمان میکروفون‌ها در آنالیز آکوستیکی

فضاها از دو روش استفاده می‌شود. روش اول روش پراکنده بوده که میکروفون‌ها به صورت پراکنده در تمامی فضای سالن جانمایی می‌شوند. البته نباید فاصله هر میکروفون با میکروفون بعدی بیشتر از ۸ متر باشد. چیدمان بعدی چیدمان هدفدار بوده که برای آنالیز قسمت مشخصی از فضا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این چیدمان میکروفون به سمت مخالف پرتاب صدا گذاشته شده تا اندازه‌گیری مدت زمان واخ‌نش به درستی حساب شود. در این پژوهش به علت قرینه بودن تمامی قسمت‌های دکوراتیو در سالن از چیدمان پراکنده میکروفون‌ها استفاده شده است.



شکل ۷. محل قرارگیری بلندگوهای سالن و میکروفون‌ها
Figure 7. Location of hall speakers and microphones

تجزیه و تحلیل نتایج

حالت رن‌در قرار داده و پس از دقایقی نرم‌افزار تحلیل‌های مورد نیاز را به دست خواهد آورد (جدول ۳).

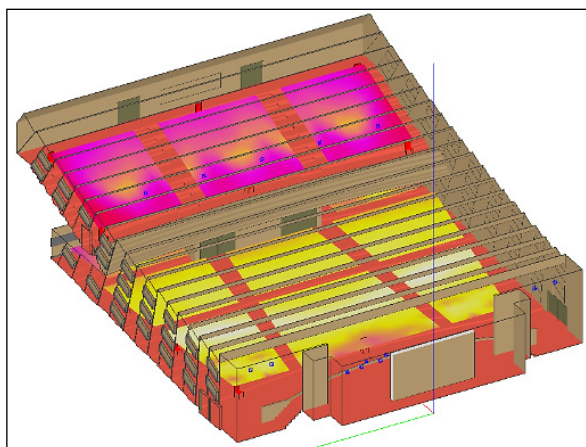
جدول ۳. تجزیه و تحلیل نتایج آکوستیکی
Table 3. Analysis of acoustic results

سقف شماره ۲ (طرح شکست)			سقف شماره ۱ (طرح قوس‌دار)			پارامتر آکوستیکی
میانگین	کمترین	بیشترین	میانگین	کمترین	بیشترین	
۱/۳	۰/۷	۱/۹	۱/۶۵	۰/۸	۲/۵۱	RT
۰/۸۴	۰/۶۹	۰/۹۸	۰/۶۶	۰/۵۲	۰/۸۱	STI
۱/۲	۰/۷	۱/۷	۱/۱۵	۰/۸	۱/۶	EDT
۱/۸۶٪	۱/۱٪	۳/۹٪	۳/۱٪	۱/۹۱٪	۴/۴٪	ALCONES
۱۰۵/۷	۱۰۲	۱۰۹/۵	۱۰۷/۵	۱۰۴	۱۱۱	SPL

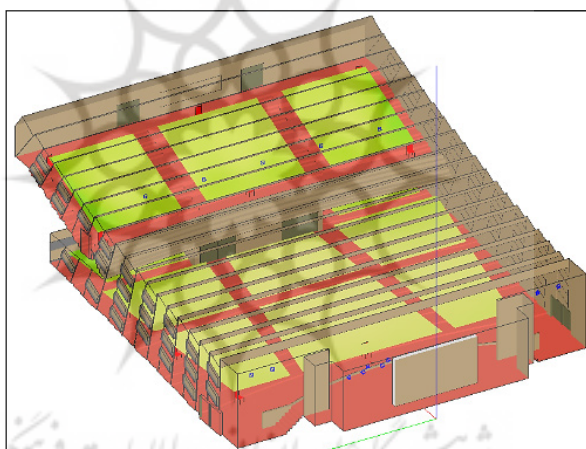
توزیع پارامترها در نرم افزار

قسمت انجام می گیرد. قسمت حضار در شکل ۸ و ۹ زیر مشخص شده است که پس از رندر در نرم افزار گرفته شده است.

در نرم افزارهای آکوستیکی قسمتی وجود دارد که محاسبات در این



شکل ۸. پراکنش STI
Figure 8. STI distribution

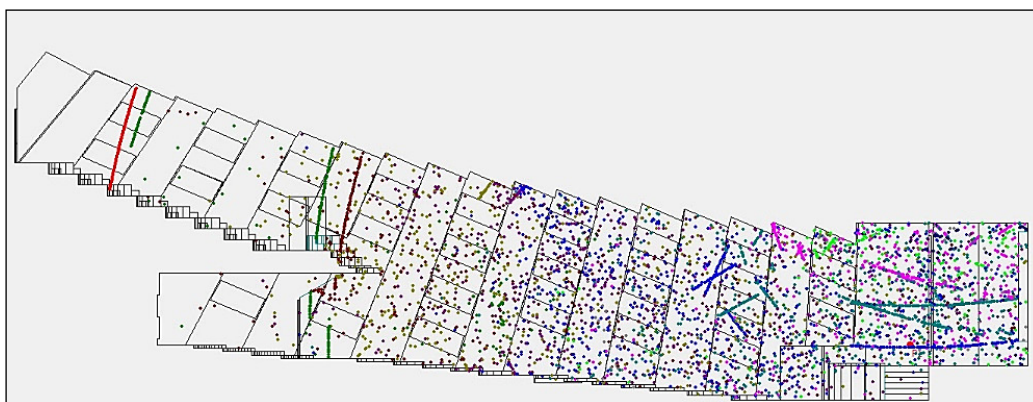


شکل ۹. پراکنش ALcones
Figure 9. Distribution of ALcones

نتیجه گیری

در پارامترهای EDT و ALcones نیز به همین ترتیب بوده و تمامی پارامترهای آکوستیکی در سقف دارای المان معماری با زاویه های بالا بهتر می باشد. البته لازم به ذکر است که پارامتر ALcones در آکوستیک رابطه مستقیم با مدت زمان واخنش صدا دارد. در پارامتر فشار صوتی یا SPL بلعکس بوده است. به این معنا که میانگین تراز صدا در سقف قوس دار بهتر از سقف دارای شکست بوده است. این امر در سالن های موسیقی که صدای بسیار بلند مورد نیاز می باشد مانند سالن های کنسرت راک هائز اهمیت می باشد. همچنین با استفاده از قابلیت Ray Trace در نرم افزار Odeon می توان کنترل سرعت صدای خروجی از بلندگوهای داخل سالن را توسط المان های معماری سقف مشاهده نمود. در این فایل تصویری (شکل ۱۰) مشاهده می شود که حرکت فرکانس های صوتی در سالن به چه صورت می باشد.

با توجه به آنالیز نرم افزاری و اعداد خروجی نرم افزار مشاهده می شود که RT یا مدت زمان ماندگاری صدا در مرحله اول به نوع متریال و در مرحله دوم به نوع هندسه معماری داخلی بستگی دارد. مشاهده شده است که میانگین زمان واخنش در سالن با سقف قوس دار $1/65$ می باشد در حالی که در سقف دارای شکست این عدد به $1/3$ رسیده است. این مسئله در فرکانس های پایین (Base) بیشتر بوده که تأثیر بیشتر فرم هندسی در فرکانس های پایین صدایی را نشان می دهد. در پارامتر STI نیز که مربوط به وضوح صدا می باشد میانگین آن در سقف قوس دار $0/66$ و در سقف دارای شکست $0/84$ بوده است. به این معنا که با استفاده از فرم هندسی داخلی متناسب با پارامترهای آکوستیک می توان شاخص انتقال وضوح صدا در سالن را به مقدار قابل توجهی افزایش داد.



شکل ۱۰. تحلیل رفتار امواج صوتی توسط نرم‌افزار Odeon در سقف دارای شکست

Figure 10. Analysis of sound wave behavior using Odeon software in a broken ceiling

با بررسی و نتایج و مطالعات و کمک در تجزیه و تحلیل داده‌ها و ویرایش محتوایی و ساختار مقاله در انجام پژوهش یاری نموده‌اند.

تقدیر و تشکر

این پژوهش منتج از رساله دکتری با عنوان بهینه‌سازی قابلیت فهم صدا در فضاهای شنیداری در سالن‌های موسیقی و با حمایت دانشکده هنر و معماری دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بین‌الملل قشم انجام گرفته است. از اساتید خود خانم دکتر فولادی و شهبازی کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تعارض و منافع نویسندگان

نویسندگان به‌طور کامل از اخلاق نشر تبعیت کرده و از هرگونه سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافع تجاری در این راستا وجود ندارد و نویسندگان در قبال ارائه اثر خود وجهی دریافت ننموده‌اند.

فهرست مراجع

۱. رحمت آبادی، سید سجاده؛ چالیش، بهار؛ و رحمت آبادی، طاهره. (۱۳۹۲). موانست پارادایم‌ها در ساختار و آرایه‌های معماری نمونه موردی اتاق موسیقی عالی قاپوخانه شیخ‌صافی‌الدین. نشریه سیویلیکا. رضایی، محمد مهدی؛ و رهایی، امید. (۱۳۹۳). بررسی ضوابط آکوستیکی در طراحی جداره سالن‌های نمایش. نشریه سیویلیکا. سخندان، زهرا؛ نصرالهی، فرشاده؛ و غفاری، عباس. (۱۳۹۷). بهینه‌سازی عملکرد آکوستیکی جذب‌کننده‌های صوتی با تاکید بر تناسب و ارتفاع فضا. هویت شهر، ۱۳(۳۷): ۵-۱۸.
۲. غفاری، عباس. (۱۳۹۲). بهبود شرایط آکوستیک در مساجد با نگرش تحلیلی و وضوح گفتار در مساجد دوره قاجار تبریز با رویکرد تاثیر آجر و تزئینات آجری بر زمان واخشی. پایان‌نامه دکتری، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

با استفاده از این روش می‌توان تاثیر کوچک‌ترین تغییرات هندسی را بر روی رفتار آکوستیکی سالن تشخیص داد. مشاهده شده است که در قوس‌دار صدا بسیار راحت‌تر به انتهای سالن انتقال پیدا می‌کند و به همین منظور زمان واخشی بیشتر می‌شود ولی در سقف دارای شکست انتقال صدا به انتهای سالن سخت‌تر بوده و به همین منظور زمان واخشی و دیگر پارامترهای آکوستیکی در شرایط بهتری قرار می‌گیرند. به همین منظور با استفاده از این نرم‌افزار می‌توانیم فرم هندسی متناسب با شرایط آکوستیکی را در سالن طراحی کنیم تا به یک سالن موسیقی با معماری زیبا و شرایط آکوستیکی مناسب و استاندارد برسیم. در مراحل تحقیق، طراحی و آنالیز به تاثیر زیاد نوع و نحوه اجرای کف سالن‌های موسیقی بر شرایط آکوستیکی رسیدیم. پیشنهاد می‌شود که در تحقیق‌های آینده در این زمینه مطالعه شود تا در تحقیقات معماری-آکوستیک در زمینه سالن‌های موسیقی کامل‌تر شده تا شاهد ساخت و بهره‌برداری مناسب از تمامی سالن‌ها باشیم.

پی‌نوشت

1. Noise Level
2. Reverberation Time
3. Perugia
4. Sound Transmission Index
5. Articulation Loss of Consonants
6. Curve
7. Regular Breaks
8. Airgap

نقش نویسندگان

ادبیات موضوع، مطالعات، طراحی و تجزیه و تحلیل داده‌ها توسط سپیده مصطفائی انجام گرفته است. واحدانه فولادی و مه‌تیام شهبازی

16. Cairoli, M. (2020). Ancient shapes for modern architectural and acoustic design: Large interiors formed by curved surfaces. *Appl Acoustic*. 170:107497.
17. Cairoli, M. (2021). The architectural acoustic design for a multipurpose auditorium: Le Serre hall in the Villa Erba Convention Center. *Appl Acoustic*. 173:107695.
18. Chiles, S. (2004). Sound behavior in proportionate spaces and auditoria Ph.D. University of Bath.
19. D'Orazio, D., Fratoni, G., & Garai, M. (2017). Acoustics of a chamber music hall inside a former church by means of sound energy distribution. *Can Acoustic*, 45(4):7-17.
20. Fuchs, H., & Lamprecht, J. (2013). Covered broadband absorbers improving functional acoustics in communication rooms. *Applied Acoustics*, 74(1), 18-27.
21. Kissner, S., Barron, M., & Blau, M. (2010). Limits of intelligible speech in medium sized multi purpose spaces. *Fortschritte der Akustik – DAGA*. 951-2.
22. Marbjerg, G., Brunskog, J., & Jeong, C.H. (2018). The difficulties of simulating the acoustics of an empty rectangular room with an absorbing ceiling. *Applied Acoustics*, 141, 35-45.
23. Merli, F., & Bevilacqua, A. (2020). Using a church as a temporary auditorium. *Acoustical design of S. Domenico of Imola. J Physics: Conf Series*, 1655:012146.
24. Peisheng, Zhu., Wanqi, Tao., Fangshuo, Mo., Fei, Guo., Xiaodong, Lu., & Xidong, Liu. (2020). Experimental comparison of speech transmission index measurement in natural sound rooms and auditoria. *Appl acoustic*. 165:107326
۵. فیضی، محسن؛ حسینی، سیدباقر؛ مجیدی، وحید؛ و احمدی، جواد. (۱۳۹۶). ارزیابی مولفه‌های موثر بر ارتقا کیفیت فضای معماری در کتابخانه‌های عمومی. *هویت شهر*، ۱۱ (۳۱): ۴۳-۵۴.
۶. قلی‌زاده، فرزانه؛ غفاری، عباس؛ و کی‌نژاد، محمدعلی. (۱۴۰۰). واکاوی شرایط آکوستیکی مساجد تاریخی تبریز از منظر گونه‌بندی حجمی و فرمی، پایگاه مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی، ۱۰ (۲۰): ۸۴-۱۰۵.
۷. قیابکلو، زهرا. (۱۳۹۱). طراحی آکوستیک سالن همایش چند منظوره با الهام از پوسته صدف دریایی. *دانشکده‌های هنرهای زیبا*.
۸. قیابکلو، زهرا. (۱۳۹۳). مبانی فیزیک ساختمان (آکوستیک)، (ویرایش هشتم). انتشارات جهاد دانشگاهی.
۹. میرزابابالو، مریم؛ حسینی، بهشید؛ غفاری، عباس؛ و ایروانی، هوتن. (۱۴۰۲). ارتقاء حس مکان در کتابخانه مرکزی شهر تبریز با بررسی متغیرهای آکوستیک در معماری. *فصلنامه مطالعات فضا و مکان*، ۲ (۱): ۵-۱۴.
10. Barron, M. (2010). Auditorium acoustics and architectural design. 2nd ed. London: Spon Press.
11. Barron, M., & Kissner, S. (2021). A possible acoustic design approach for multi-purpose auditoria suitable for both speech and music. *Arch Acoustic*. 46:121-33.
12. Beranek, L. (2012). Concert halls and opera houses: music, acoustics, and architecture.
13. Berati, C., Belloni, E., Merli, F., Ambrosi, M., Shtrepi, L., & Astolfi, A. (2022). From Worship Space To Auditorium: "Acoustic Design And Experimental Analysis Of Sound Absorption Systems For The New Auditorium Of San Francesco Al Prato In Perugia (Italy); 45 :121-33.
14. Blaszcak, P., Berdowska, S., & Berdowski, J. (2021). Analysis of sound field distribution in architecturally diverse temple. *Arch Acoustic*, 46:121-33.
15. BlZeng, X., Christensen, C.L., & Rindel, J.H. (2006). Practical methods to define scattering coefficients in a room acoustics computer model. *Appl Acoust*, 67 (8):771_86.

25. Reinten, J., Braat-Eggen, PE., Hornikx, M., Kort, HSM., & Kohlrausch, A. (2017). The indoor sound environment and human task performance: A literature review on the role of room acoustics. *Build Environ.* 123:315–32.
26. Rossing, T. (2010). *Springe Hand book of Acoustic.*
27. Shtrepi, L. (2019). Investigation on the diffusive surfacemodelingdetailingeometricalacousticsbased simulations. *J Acoustic Soc Am*, 145(3):EL215–21.
28. Shtrepi, L., Astolfi, A., Puglisi, G.E., & Masoero, M.C. (2017). Effects of the distance from a diffusive surface on the objective and perceptual evaluation of the sound field in a small simulated variable-acoustics hall. *Appl Sci*, 7(3):224.



© 2024 by author(s); Published by Science and Research Branch Islamic Azad University, This work for open access publication is under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

