Journal of Acoustical Society of Iran, Vol. 13, No. 1, 2025

(Research Article)
Acoustic Assessment of Large-Scale Spaces with Emphasis on Geodetic Geometry

Abbas Ghaffari*, Yaser Shahbazi, Neda Ilmakchi
Faculty of Architecture and Urbanism, Tabriz Islamic Art University
Received: 2024/10/26, Accepted: 2025/06/20

Abstract:

Due to the stability inherent in their spherical geometry, geodesic domes are among the few structures capable of spanning approximately 200 meters without auxiliary supports. However, issues with speech intelligibility within these spaces have hindered their adoption as the primary structural system for large-scale venues intended for acoustic purposes. This study's statistical population comprised all constructed geodesic domes with diameters exceeding 100 meters. From these, three domes representing low, medium, and high volume ranges were selected. Subsequently, by adjusting the radius-to-height (R/H) ratio of the domes to minimize the influence of other acoustic variables, the number of test samples was increased to nine. These samples were then evaluated based on key acoustic parameters: Reverberation Time (RT), Sound Pressure Level (SPL), Clarity (C50, C80), Definition (D50), Speech Transmission Index (STI), and Percentage of Articulation Loss of Consonants (Alcons)**.** The results indicate that the sector form of the dome (i.e., the R/H ratio) significantly affects the investigated acoustic parameters. Furthermore, through an index-based analysis, it was concluded that the acoustic parameters related to Reverberation Time (RT) in the 250 and 500 Hz octave bands deviate from standard ranges. This finding can be influential in developing targeted solutions to improve acoustic conditions in such structures.

Keywords: Dome acoustic, Speech intelligibility, Sphere geometry, Geodesic.

pp. 45-52 (In Persian)

* Corresponding author E-mail: Ghaffari@tabriziau.ac.ir

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]

مقاله پژوهشی

مجله انجمن علوم صوتی ایران

سال: ۱۴۰۴، دوره: ۱۳، شماره ۱، صفحات: ۴۵-۵۲

ارزیابی صوتین فضاهای کلان مقیاس با تاکید بر هندسه ژئودزیکی

عباس غفاری*، یاسر شهبازی، ندا ایلمکچی

دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۳۰

چکیده

گنبدهای ژئودزیک به دلیل پایداری شکل هندسی کره جز معدود سازه‌هایی هستند که می‌توانند حدود ۲۰۰ متر دهانه را بدون نیاز به هیچ سازه کمکی پوشش دهند. اما مشکل عدم وضوح گفتار در این فضاها مانع استفاده از این سازه‌ها به عنوان سازه غالب فضاهای کلان مقیاس برای استفاده صوتین شده‌است. جامعه آماری ما در این پژوهش شامل تمام گنبدهای ژئودزیک ساخته‌شده با قطر بالای ۱۰۰ متر است. از میان این گنبدها، سه گنبد با حجم‌های کم، متوسط و زیاد نسبت به بازه حجم گنبدها انتخاب شدند. در مرحله بعد، با متناسب‌سازی نسبت شعاع و ارتفاع گنبدها برای کاهش تاثیر دیگر شبه‌سنج‌ها بر روی نتایج آزمون، نمونه‌های مورد آزمایش به نه گنبد افزایش یافت. سپس نمونه‌ها برحسب شبه‌سنج‌های زمان واخنش (RT)، تراز فشار صدا (SPL)، شفافیت (C۵۰،C۸۰)، وضوح (D۵۰)، شاخص عبور مستقیم صدا (STI) و درصد خطای شنیداری (Alcons) مورد آزمون قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که فرم قطاع گنبد یعنی نسبت شعاع و ارتفاع بر روی شبه‌سنج‌های صوتین مورد بررسی تاثیرگذار بوده‌است. هم‌چنین با شاخص‌سازی گنبدها می‌توان به این نتیجه رسید که شبه‌سنج‌های صوتین مرتبط با زمان واخنش در بازه اوکتاو ۲۵۰ و ۵۰۰ هرتز از حالت استاندارد خارج می‌شود. این نتیجه می‌تواند در ارائه راه‌حل مناسب برای بهبود شرایط صوتین تاثیرگذار باشد.

کلیدواژه‌ها: صوتین گنبد، وضوح گفتار، هندسه کروی، ژئودزیک.

۱. مقدمه

یونانی‌ها، کُره را خالص‌ترین بیان شکل می‌دانستند که از همه لحاظ برابر است و آن را در اوج ریاضیّات خود قرار می‌دادند. در اواخر دهه ۱۹۴۰، باکمینستر فولر، معمار، ریاضیدان و مهندس مشهور آمریکایی شروع به آزمایش هندسه ژئودزیکی کرد [۱].

از مزایای گنبدهای ژئودزیکی می‌توان به کم‌مصرف‌بودن آن به‌دلیل توزیع یکنواخت گرما، نور و صدا و هم‌چنین مقاوم بودن در برابر بلایای طبیعی مثل بادهای شدید یا زلزله‌های ویرانگر اشاره کرد. امروزه گنبدهای ژئودزیکی به عنوان کارآمدترین سیستم ساختمانی شناخته می‌شوند و نسبت سطح به حجم آن کوچک است. هم‌چنین امکان ساخت این گنبدها با قطعات پیش‌ساخته، حمل‌ونقل و مونتاژ قطعات بدون نیاز به دانش قبلی از مزایای استفاده از این گنبدها است [۳،۲].

گنبدهای ژئودزیک، باتوجه به توانایی در پوشش دهانه‌های بزرگ، کاربرد زیادی در طراحی فضاهای کلان مقیاس مانند آمفی‌تئاترها و غیره دارند. اما مشکلی که وجود دارد از لحاظ صوتین[1] کاربرانی که در تراز کانون گنبد قرار می‌گیرند درک دوسویه[2] یا درک معنای موسیقی پخش‌شده برایشان دشوار است. به بیان ساده‌تر فضای زیر این گنبد علی‌الخصوص در تراز کانون گنبد از وضوح گفتار مناسبی برخوردار نیست [۴].

طبقه‌بندی گنبد ژئودزیک بر اساس چند-وجهی اصلی، بر اساس تعداد و نوع تقسیمات فرعی، عرض جغرافیایی که در آن کره ژئودزیک برای به‌دست‌آوردن گنبد بریده می‌شود، انجام می‌شود. با توجه به نوع مثلث چند وجهی

* نویسنده پاسخگو: Ghaffari@tabriziau.ac.ir

[1] Acoustic
[2] Stereophonic

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]

اصلی، گنبدهای ژئودزیکی به طبقات زیر تقسیم می‌شوند [۵]:

- کلاس I تقسیم موازی سطح.
- کلاس II تقسیم عمود بر سطح.
- کلاس III هر نوع دیگری از مثلث‌بندی ممکن.

در مورد پژوهش‌های صورت گرفته در مورد ارزیابی صوتین ساختارهای ژئودزیکی که به طور دقیق با موضوع پروژه در ارتباط است، پژوهش‌هایی هم در زمینه صوتین اتاق و هم در زمینه صدای محصول برای نوفه[۲]گیرها صورت گرفته است.

زانگ و همکارانش در مقاله مدل‌سازی میدان صوتی و کاهش نوفه برای محفظه برق لیفتراک بر اساس لایه‌های کاملاً منطبق و طراحی بسته‌بندی صوتی با استفاده از مدل صوتین با بهره‌گیری از هندسه ژئودزیکی که در نرم‌افزار کامسول[۳] شبیه‌سازی شده‌است. به این نتیجه دست یافتند که این نوع ساختار موجب کاهش نوفه و بهبود صدا محیطی محصول می‌شود [۶].

نتیجه مشابه این تحقیق را در تحقیقات گولاس و همکارانش که در سال ۲۰۰۹ صورت گرفته است. آن‌ها با ارزیابی یک نمونه واقعی سالن خانه تئاتر گنبدی گروتسکا[۴] در کراکوف و شبیه‌سازی آن در محیط نرم‌افزاری و گرفتن تحلیل[۵] صوتین آن در نرم‌افزار ری‌نویز[۶] به این نتیجه دست یافتند که گنبد ژئودزیکی سازه مناسبی برای قسمت سن سالن می‌باشد اما بهتر است برای خود سالن از دیگر هندسه‌ها بهره گرفته شود [۷].

هم‌چنین راینهارت و همکارانش به شبیه‌سازی در نرم‌افزار راینو و تحلیل صوتین آن در نرم‌افزار ادئون[۷] با شبه‌سنج[۸]سازی چند گنبد ژئودزیک و جابه‌جایی آن‌ها تا دستیابی به بهینه‌ترین حالت ممکن به حل مشکل صوتین ترکیب چند گنبد صوتین پرداختند [۸].

در ارزیابی که در این مقاله صورت‌گرفته‌است، ردیف‌های اول سالن از سطح صوتین خوبی برخوردارند در حالی که در ردیف‌های آخر که هم سطح با کانون گنبد هستند سطح صوتین ضعیف است. در این مقاله با اینکه مشکل مورد ارزیابی قرارگرفته‌است، اما راه‌حلی برای این مشکل مطرح نشده‌است و توصیه‌شده که از دیگر هندسه‌ها بهره‌گیری شود.

ما در این پژوهش بر حل مشکل صوتین تک گنبدهای ژئودزیکی که به عنوان ساختمان‌های بزرگ[۹]، سالن‌های سخنرانی و فضاهای کلان مقیاس دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌پردازیم.

باتوجه به تنوع تقسیم‌بندی‌های کروی و ارائه روش‌های جدید برای تقسیمات هندسی گنبدهای ژئودزیک شاید بتوان با اصلاح فرمی در جهت رفع مشکل صوتین برآمد و این گنبدها را به چرخه استفاده در فضاهای بزرگ مقیاس برگرداند. سازه ژئودزیک با پوشش دهانه‌های بزرگ بدون نیاز به ستون، این فضای کلان مقیاس با ظرفیت بالا را به وجود می‌آورد، اما آن‌چه مانع استفاده از این سازه‌ها می‌شود مشکلات صوتین موجود در این نوع سازه‌هاست؛ که ما در این پژوهش تلاش می‌کنیم تا تاثیر تناسبات هندسی گنبدها بر رفتار صوتین فضاها را مورد مطالعه قرار دهیم.

نیاز مردم به فضاهای کلان مقیاس که در آن معمولا تفریحات و اتفاقات جمعی اتفاق می‌افتد، امری غیرقابل اجتناب است. سازه ژئودزیک با پوشش دهانه‌های بزرگ بدون نیاز به ستون این فضای کلان مقیاس با ظرفیت بالا را به وجود می‌آورد، اما آن‌چه مانع استفاده از این سازه‌ها می‌شود، مشکلات صوتین موجود در این نوع سازه‌هاست؛ که ما در این پژوهش تلاش می‌کنیم تا رفتار صوتین این فضاها را طبق شبه‌سنج‌های وضوح گفتار مورد بررسی قرار دهیم.

۲. مواد و روش‌ها

مطالعه ابتدا به گنبدهای ژئودزیک می‌پردازد و در نهایت به انتخاب نمونه‌های موردی و متناسب‌سازی آن‌ها صورت می‌گیرد. در بخش دوم به بررسی تاثیر شبه‌سنج‌های شعاع و ارتفاع بر روی شبه‌سنج‌های

[۲] Noise
[۳] Comsol
[۴] Dome home theater Groteska
[۵] Analysis
[۶] Raynoise
[۷] Odeon
[۸] Parameter
[۹] Atrium

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]

صوتین وضوح گفتار شامل زمان واخنش[1]، تراز فشار صدا، شفافیت، وضوح گفتار، شاخص عبور مستقیم صدا، درصد خطا شنیداری در نمونه موردی‌های انتخابی از این نوع سازه‌ها پرداخته‌شده‌است.

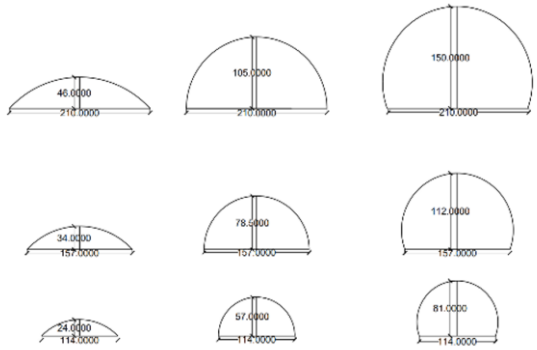
جامعه آماری این تحقیق شامل تمام گنبدهای ژئودزیک ساخته‌شده با دهانه بالای ۱۰۰ متر است. در سال ۲۰۱۰ گزارشی از بزرگ‌ترین گنبدهای ژئودزیکی ساخته‌شده در جهان از نظر قطر ارائه شده است که پایه اطلاعات جدول ۱ از این سایت و بروزرسانی اطلاعات منتشرشده در تارگاه ویکی‌پدیا بدست آمده‌است [۹].

پس از بررسی و محاسبه حجم و سطح نمونه‌های موردی برحسب حجم سه گنبد با حجم‌های کوچک متوسط و بزرگ انتخاب شدند.

جدول ۱ بزرگ‌ترین گنبدهای ژئودزیکی جهان [۹].

ردیف	سطح کف	سطح خارجی	حجم	شعاع واقعی کره	ارتفاع	قطر کف
۱	۳۶۷۵۰	۴۱۲۸۴	۷۲۷۳۴۵	۱۷۳	۳۸	۲۱۶/۵
۲	۳۴۳۷۶	۴۱۰۲۰	۸۴۲۰۳۰	۱۴۲	۴۶	۲۱۰
۳	۲۷۴۱۳	۴۱۴۶۷	۱۰۷۴۲۲۵	۹۸/۷	۶۷	۱۸۷
۴	۲۰۸۳۴	۲۶۹۱۳	۵۰۳۱۹۴	۹۷/۴	۴۴	۱۶۳
۵	۲۰۴۴۷	۲۶۵۲۶	۴۹۴۶۷۹	۹۶	۴۴	۱۶۱/۵
۶	۱۹۳۴۹	۵۸۷۳۰	۱۸۱۹۳۴۲	۸۳/۵۱	۱۱۲	۱۵۷
۷	۱۸۳۴۹	۲۴۰۲۱	۴۳۰۳۱۶	۹۰/۱	۴۲/۵	۱۵۳
۸	۱۶۰۳۶	۲۰۵۷۰	۳۳۳۵۸۱	۸۶/۲	۳۸	۱۴۳
۹	۱۴۰۶۷	۱۹۰۹۱	۳۱۴۹۹۷	۷۶	۴۰	۱۳۴
۱۰	۱۲۴۴۷	۱۶۱۸۴	۲۳۶۳۲۲	۷۴/۷	۳۴/۵	۱۲۶
۱۱	۱۰۶۹۸	۱۵۳۵۳	۲۳۵۹۳۵	۶۳/۵	۳۸/۵	۱۱۷
۱۲	۹۹۴۷	۱۷۱۸۲	۲۹۶۷۶۷	۵۷	۴۸	۱۱۴

در مرحله بعد برای کاهش تاثیر دیگر متغیرها، این سه گنبد متناسب‌سازی شدند و تعداد نمونه‌ها به نه عدد رسید (شکل ۱).



شکل ۱ دیاگرام ترسیمی گنبدهای نمونه انتخابی.

برای مدلسازی گنبدها از سیستم مدلسازی نرم‌افزار ادئون که با کدنویسی، استفاده شده و تحلیل‌های صوتین نیز در همین نرم‌افزار صورت گرفته‌است.

ژئودزیک و شبه‌سنج‌های موثر آن: از لحاظ هندسی، کره شکلی بسیار ساده و در عین حال با ساختار پیچیده، متناقض‌نما است. کره یک سطح است و به راحتی با ساده‌ترین معادلات تعریف می‌شود، اما مدیریت این سطح دشوار است. کره یک سطح بسته است که هر مکان روی سطح آن از یک نقطه مرکزی بی‌نهایت کوچک فاصله دارد. هم‌چنین کره توسعه‌ناپذیر است؛ منظور ما از توسعه‌ناپذیر این است که نمی‌توانید آن را بدون کشش، پاره‌کردن، فشردن یا تغییر شکل آن روی یک صفحه دو-بعدی صاف کنید. اختراع گنبد ژئودزیکی توسط باکمینستر فولر بزرگ‌ترین محرک برای تحقیق و توسعه تقسیمات کروی بود [۵].

یک کره با هندسه ژئودزیکی با شبه‌سنج‌های زیر تعریف می‌شود [۹]:

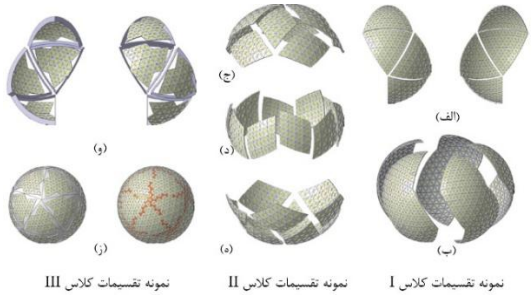
شعاع کره: فاصله تمام نقاط سطح از مرکز کره، شعاع کره نام دارد و با حرف r نمایش داده می‌شود.

قطر کره: بلندترین فاصله از دو سوی کره (که از درون کره عبور کند) قطر کره نام دارد.

کلاس بندی: هندسه تقسیمات کروی در ۳ کلاس تعریف می‌شوند (شکل ۲) [۵].

[1] RT; Reverberation Time

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]



شکل۲ نمونه تقسیمات با کلاس‌بندی [۵].

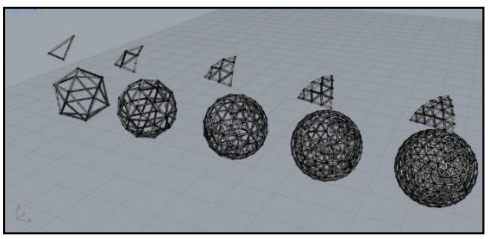
کلاس I: طرح‌واره‌های کلاس I جزو اولین روش‌های تقسیم‌بندی توسعه‌یافته بودند. آن‌ها به هر دلتاهدری اعمال می‌شوند. به‌جز کمان‌های میانی که محدود به بسامدهایی با توان ۲ است، هر بسامد[1] زوج یا فرد ممکن است و بسته به فاکتورهای اول، زیرشبکه‌هایی در بسامدهای هم‌ساز[2] داشته باشد.

کلاس II: روش تقسیم‌بندی کلاس II (تریاکون) منجر به شبکه‌هایی می‌شود که عمود بر لبه‌های صورت‌های چند وجهی کروی و متقارن با میانه‌های صورت هستند.

کلاس III: انحراف کلاس III برای دلتاهدرهای کروی چهار وجهی، هشت وجهی و بیست وجهی اعمال می‌شود. شبکه‌های تسلیتی موازی یا عمود بر لبه‌های چند وجهی کروی نیستند، بلکه در زوایای مایل متقاطع هستند.

شبکه هندسی: ژئودزیک‌ها در ۲ نوع شبکه، شامل شبکه مثلثی و شبکه پنج ضلعی و شش ضلعی ارائه می‌شوند.

بسامد: به تعداد تقسیمات یال‌شکل پایه، که موجب ایجاد شکل جدید با تعداد وجه‌های بیش‌تر می‌شود را بسامد می‌گویند (شکل ۳).



شکل ۳ نمونه تقسیمات کروی با بسامدهای متفاوت.

[1] Frequency
[2] Harmonic

وضوح گفتار[3] و تعریف شبه‌سنج‌های صوتین موثر بر آن:

زمان واخنش: زمان واخنش مرتبط‌ترین توصیف‌کننده صوتین اتاق در نظر گرفته می‌شود. تعریف ایزو۳۳۸۲[4] از این شبه‌سنج صوتین بدین‌صورت است که زمان واخنش مدت زمانی است که یک صدا بعد از قطع منبع برای کاهش به میزان ۶۰ دسی‌بل نیاز دارد.

طبق همین استاندارد، اگر T از زمانی مشتق شود که منحنی فروپاشی برای اولین بار به ۵ دسی‌بل و ۲۵ دسی‌بل زیر سطح اولیه می‌رسد، آن را با $T_{۲۰}$ نشان می‌دهیم. اگر از مقادیر واپاشی ۵ دسی‌بل تا ۳۵ دسی‌بل زیر سطح اولیه استفاده شود، آن را با $T_{۳۰}$ نشان می‌دهند [۱۰].

تراز فشار صدا[5]: تراز فشار صدا رابطه‌ای لگاریتمی بین فشار صدای مبنا و فشار اندازه‌گیری شده است.

$$SPL=۲۰\log\left(\frac{P}{P_{.}}\right) \qquad (۱)$$

شفافیت[6]: به نسبت انرژی صدا در بازه زمانی مشخص به انرژی آن پس از زمان مد نظر، شفافیت گفته می‌شود [۱۱].

وضوح گفتار[7]: تعریف یا وضوح گفتار به نسبت انرژی صوتی برگشتی زودهنگام به کل انرژی صوتی است. انرژی برگشتی زودهنگام، انرژی ابتدای پاسخ ضربه تا زمانی معین است. زمان تعیین‌شده می‌تواند برای مثال ۵۰ میلی‌ثانیه باشد.

شاخص عبور مستقیم صدا[8]: این متغیر نشان می‌دهد چه میزان از صدا می‌توان به طور مستقیم به گوش برسد و حاصل بازتاب‌های جداره‌ای نیست. این شبه‌سنج واحدی ندارد و با عددی بین ۰-۱ سنجیده می‌شود.

درصد خطا شنیداری[9]: هرچه صدا در یک محیط واضح و درست شنیده‌شود، اشتباهات شنیداری کاهش می‌یابد. شبه‌سنج نشان‌دهنده این سنجش خطا، شنیداری است که با عددی بین ۰-۱۰۰ نمایش داده می‌شود [۱۲].

[3] SI; Speech Intelligibility
[4] ISO 3382
[5] SPL: Sound Pressure Level
[6] C; Clarity
[7] D; Difination
[8] STI; Speech Transmission Index
[9] Alcons

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]

۳. نتایج

نمونه‌های مشخص شده با استفاده از نرم‌افزار اسکچاپ[1] و اُدئون ادیت[2] به صورت کلی مدل‌سازی شد و در نهایت وارد نرم‌افزار ادئون شدند. نمونه‌ها از لحاظ صوتین ارزیابی شدند و نمودار نتایج و تحلیل آن‌ها در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده‌است.

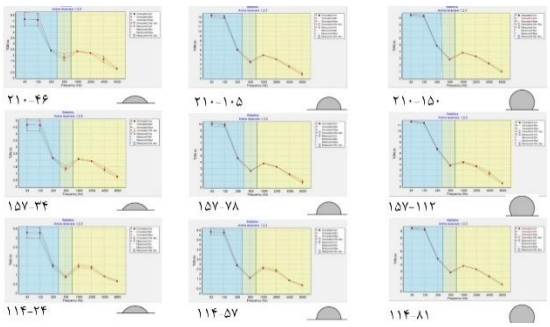
زمان واخنش به عنوان اصلی‌ترین شبه‌سنج تاثیرگذار در کیفیت صوتین در شکل ۴ نشان داده شده‌است. بازه استاندارد برای زمان واخنش بهینه ۰٫۴ میلی‌ثانیه است؛ بدین منظور زمان واخنش بهینه برای نه گنبد مطابق با رابطه ۲ محاسبه شد.

$$RT_{optimum}=R\left(۰٫۰۱۲۵\sqrt[۳]{V}+۰٫۱۰۷\right)\ ;\ R=۴ \qquad (۲)$$

R بر مبنای کاربری فضا، متغیر بوده و برای گفتار ۴ و برای ارکستر ۵ و برای موسیقی کر ۶ در نظر گرفته می‌شود.

در مقایسه نمودار گنبدهای نمونه به صورت کلی در هر ۹ مورد، از بسامد ۶۳–۱۲۵ هرتز، نسبتا ثابت (نزولی با شیب خیلی کم)، از ۱۲۵-۵۰۰ هرتز نزولی با شیب تند و از ۱۰۰۰-۸۰۰۰ هرتز نزولی با شیب کم است.

طبق مقالاتی که اندازه‌گیری صوتین در آن‌ها صورت گرفته و به نظر کاربران فضا دارای کیفیت صدای مطلوبی‌است؛ زمان واخنش در بسامد پایین، بالا و در بسامد بالا، پایین‌تر است. اگر نمودار این فضاها را مناسب در نظر بگیریم، متوجه می‌شویم نمودار شاخص زمان واخنش گنبدها در بسامدهای ۱۲۵ تا ۱۰۰۰ هرتز بیش‌تر از حد مطلوب جذب می‌شود.



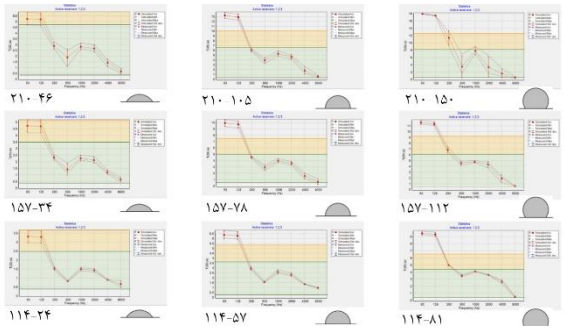
شکل ۴ نمودار مقایسه‌ای زمان واخنش در بازه $T_{optimum}$-۰٫۴.

طبق نتایج تحقیقات می‌توان به این نتیجه رسید که صدای آقایان که در این بازه قرار دارد، در این فضا به درستی شنیده نمی‌شود [۱۲-۱۴].

در ۹ گنبد که مورد آزمون قرار گرفتند؛ گنبدهای قطاع کره که کوچک‌تر از نیم‌کره هستند، از لحاظ بازه مجاز زمان واخنش در بازه مجاز هستند و فرم مناسبی برای فضاهای با کاربری موسیقیایی هستند.

از طرف دیگر با ارزیابی کلی نمودار زمان واخنش در می‌یابیم تفاوت زیادی در زمان واخنش اوکتاوبندی ۲۵۰ و ۵۰۰ هرتز وجود دارد؛ که این موضوع در ارائه طراحی پیشنهادی برای بهبود صوتین بسیار حائز اهمیت است.

همانطور که در مطالعات متعدد اشاره شده است، الیاف و پوسته و کاواک به عنوان راهکارهایی برای جذب بسامدهای مختلف مطرح می‌شود [۱۳,۱۲]. الیاف برای جذب بالاتر از ۷۵۰ هرتز، پوسته برای ۳۵۰-۷۵۰ هرتز و کاواک برای بسامدهای زیر ۳۵۰ هرتز می‌باشد. البته در منابع مختلف اختلافاتی در مورد این بازه‌ها وجود دارد. با توجه به تحلیل نمودارهای شکل ۵ ملاحظه می‌شود که استفاده از پراکنده‌کننده[3] برای تقویت بسامدهای ۱۲۵ تا ۱۰۰۰ هرتز ضروری به نظر می‌رسد.



شکل ۵ مقایسه نمودارهای زمان واخنش برحسب استفاده از کاواک، پوسته و الیاف.

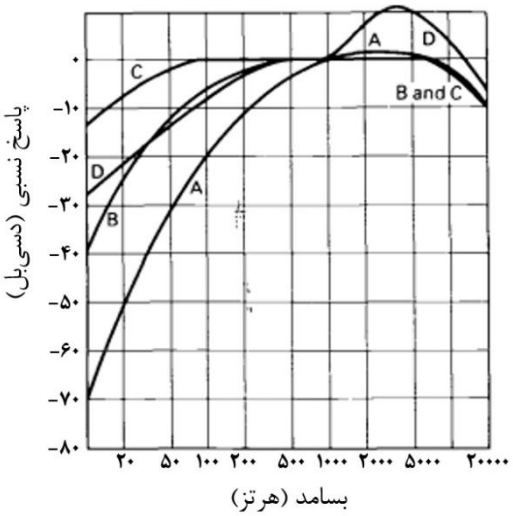
۴. بحث

مقایسه نمودارهای تراز فشار صدا: همانطور که در نمودارهای تراز فشار صدا مشاهده می‌شود، نمودارها در این فرم خطی هستند. طبق انواع نمودارهای تراز فشار

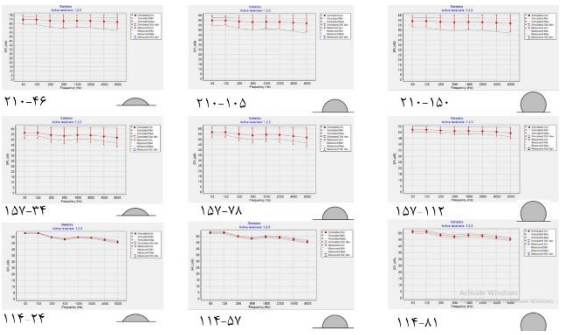
[1] Sketch up
[2] Odeon edit
[3] Diffuser

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]

صدا که در شکل ۶ آورده شده‌است [۱۳]؛ فضاهایی که نمودارهای تراز فشار صدا آن‌ها خطی باشند، از لحاظ روان‌صوتیّات[1] گیج‌کننده‌ترین فضاها هستند (شکل ۷).



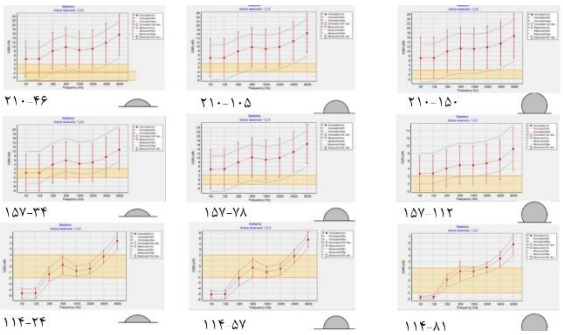
شکل ۶ نمودارهای SPL شاخص [۱۳].



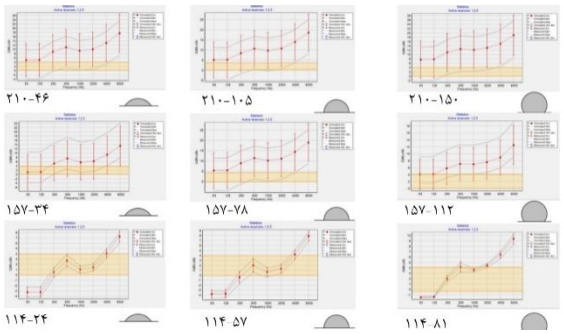
شکل ۷ مقایسه نمودارهای SPL نمونه‌های مورد مطالعه.

مقایسه نمودارهای شفافیت: طبق کتاب کوتروف[2] بازه مناسب برای سخنرانی ۲- تا ۲+ دسی‌بل و برای فضاهای موسیقیایی ۴- تا ۰ دسی‌بل است [۱۲].

طبق تعریف، شفافیت نسبت انرژی صدا در بازه زمانی مشخص به انرژی آن پس از زمان مد نظر است. زمانی که فاصله منبع تا سطح زیاد باشد، اتلاف انرژی اولیه و پس از آن شامل اتلاف محیطی است. لذا بیش‌ترین افت انرژی پس از برخورد با سطح و بازتاب[3] اتفاق می‌افتد. بدین ترتیب در حجم‌های بزرگ با فاصله زیاد سطح از منبع، محاسبه C_7 امکان‌پذیر نیست (شکل‌های ۸ و ۹).

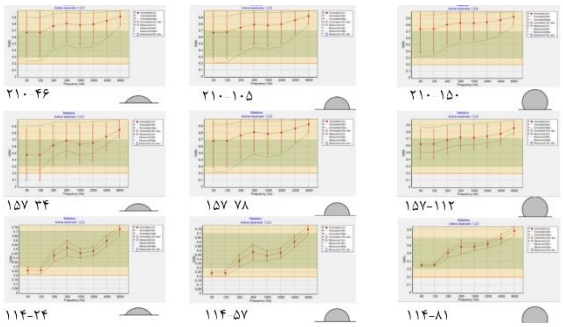


شکل ۸ مقایسه نمودارهای C۵۰ در بازه مطلوب.



شکل ۹ مقایسه نمودارهای C۸۰ در بازه مطلوب.

مقایسه نمودارهای وضوح گفتار ۵۰ میلی‌ثانیه: طبق کتاب کوتروف، وضوح گفتار در بازه بزرگ‌تر از ۰٫۲ قابل قبول است و در بازه ۰٫۷ تا ۰٫۳ خوب است. در مورد وضوح گفتار نیز مانند شبه‌سنج شفافیت، از آن‌جایی‌که بیش‌ترین اتلاف انرژی پس از برخورد با سطوح رخ می‌دهد و در این گنبدها فاصله سطوح از یکدیگر زیاد است و به نظر میرسد که قابل ارزیابی نیست. اما در گنبد با قطر ۱۱۴ متر، با فرم‌های متفاوت، وضوح گفتار در بازه مطلوب قرار دارد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰ مقایسه نمودارهای D۵۰ در بازه مطلوب و عالی.

[1] Psychoacoustics
[2] Room acoustics
[3] Reflection

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]

مقایسه نمودارهای شاخص عبور مستقیم صدا و درصد خطای شنیداری: شاخص عبور مستقیم صدا در گنبدهای با قطر بالاتر (جدول ۲) وضعیت بهتری نسبت به قطرهای پایین‌تر دارد. در مورد درصد خطای شنیداری (جدول ۳) نیز این شرایط صادق است.

جدول ۲ مقایسه مقادیر شاخص عبور مستقیم صدا (STI) نسبت به کیفیت‌های مطرح شده.

۰/۷۹ ۲۱۰-۴۶	۰/۷۹ ۲۱۰-۱۰۵	۰/۸۰ ۲۱۰-۱۵۰
۰/۶۷ ۱۵۷-۳۴	۰/۶۵ ۱۵۷-۷۸	۰/۶۹ ۱۵۷-۱۱۲
۰/۵۰ ۱۱۴-۲۴	۰/۴۸ ۱۱۴-۵۷	۰/۵۳ ۱۱۴-۸۱

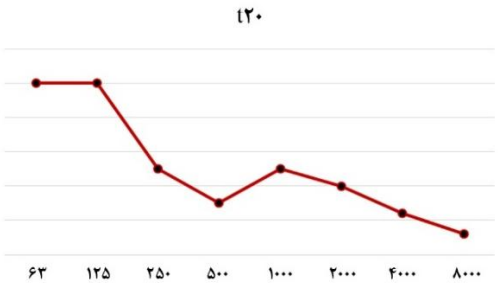
جدول ۳ مقایسه مقادیر درصد خطای شنیداری (Alcons) نسبت به کیفیت‌های مطرح شده.

۴/۸۹ ۲۱۰-۴۶	۵/۴۵ ۲۱۰-۱۰۵	۴/۷۴ ۲۱۰-۱۵۰
۷/۴۴ ۱۵۷-۳۴	۸/۹۴ ۱۵۷-۷۸	۵/۳۷ ۱۵۷-۱۱۲
۱۲/۰۱ ۱۱۴-۲۴	۱۳/۵۵ ۱۱۴-۵۷	۱۰/۳۶ ۱۱۴-۸۱

۵. نتیجه‌گیری

نتیجه‌گیری می‌شود:

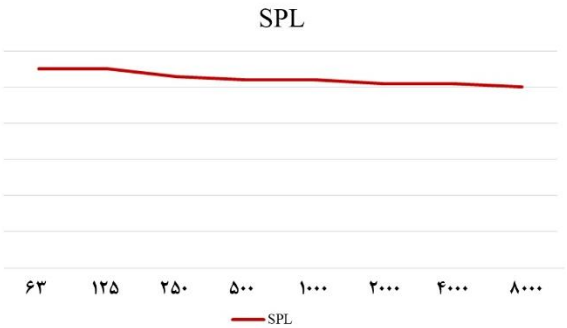
- نمودار شاخص زمان واخنش در گنبدهای ژئودزیک بدون در نظر گرفتن مقدار در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود:



شکل ۱۱ نمودار شاخص زمان واخنش در گنبدهای ژئودزیک.

با مقایسه نمودار زمان واخنش شاخص با بازه زمان واخنش بهینه، می‌توان نتیجه گرفت گنبدها با فرم انقطاع کوچک‌تر از نیم‌کره، فضاهای بهتری برای گفتگو دارند. ضمناً با مقایسه نمودار شاخص زمان واخنش و میزان جذب صدا در بازه ۱۲۵-۱۰۰۰ هرتز بیش از حد مطلوب است.

- نمودار شاخص سطح فشار صدا[1] در گنبدهای ژئودزیک بدون در نظر گرفتن مقدار در شکل ۱۲ آمده است:



شکل ۱۲ نمودار شاخص تراز فشار صدا در گنبدهای ژئودزیک.

نمودار تراز فشار صدا در گنبدها خطی است که از لحاظ روان‌صوتیّات باعث گیج کننده‌بودن فضا می‌شود.

- مولفه‌های شفافیت و وضوح گفتار با توجه به فرمول محاسباتی که دارند، زمانی که در فضا سطوح از یکدیگر فاصله زیادی دارند، قابل محاسبه نخواهدبود.

- شاخص عبور مستقیم صدا و درصد خطای شنیداری در گنبدهای با قطر بالاتر، وضعیت بهتری نسبت به قطرهای پایین‌تر دارد.

- به صورت کلی می‌توان از نمودارهای بالا نتیجه گرفت که شاخص صوتین بستگی به فرم دارد.

- هم‌چنین می‌توان نتیجه گرفت زمانی که فاصله بین سطوح بیش از حد مشخصی (حدود ۱۲۰ متر) باشد، دیگر از شرایط و قوانین کتاب کوتروف پیروی نمی‌کند.

تقدیر و تشکر

این مقاله از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد فناوری معماری گرایش دیجیتال با عنوان «ارزیابی آکوستیکی (صوتین)

[1] SPL; Sound Pressure Level

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]

فضاهای کلان مقیاس با تاکید بر هندسه ژئودزیکی» استخراج شده که به وسیله نویسنده سوم و با راهنمایی نویسنده اول و نویسنده دوم در دانشگاه هنر اسلامی تبریز دفاع شده است؛ بدین منظور از تمام کسانی که در طی این پژوهش کمک کردند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تضاد منافع

فاقد هرگونه تضاد منافع است.

منابع

[1] Á. González-Avilés, C. Pérez-Carramiñana, A. Galiano-Garrigós, M. Perez-Millan, "Energy benefits of tourist accommodation using geodesic domes," Buildings, vol. 14, no. 2, pp. 505, 2024.
[2] Ç. Takva, F. Takva, Y. Takva, "Geometric design in architecture: examination of tessellation configurations in structural systems," Periodica Polytechnica Architecture, vol. 54, no. 3, pp. 167-176, 2023.
[3] A. Kolpakov, O. Dolgov, V. Korolskiy S. Popov, V. Anchutin, V. Zykov, "Analysis of structural layouts of geodesic dome structures with bar filler considering air transportation," Buildings, vol. 12, no. 2, pp. 242, 2022.
[4] T. Kamisiński, "Correction of acoustics in historic opera theatres with the use of Schroeder diffuser," Archives of Acoustics, vol. 37, no. 3, pp. 349–354, 2012.
[5] E. Popko, C. Kitrick, "Divided Spheres, 2nd Edition" A K Peters/CRC Press, 2021.
[6] E. Zhang, Z. Liu, J. Zhang, J. Lin, "Sound field modelling and noise reduction for a forklift power compartment based on perfectly matched layer and acoustic packaging design," Archives of Acoustics, vol. 46, no. 3, pp. 491–498, 2021.
[7] A. Gołaś, K. Suder-Dębska, "Analysis of dome home hall theatre acoustic field," Archives of Acoustics, vol. 34, no. 3, pp. 273–293, 2009.
[8] W. Martens, D. Reinhardt, "The raw and the cooked in architectural acoustics," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 133, no. 5, pp. 3307, 2013.
[9] E. Borowsky, J. Borwein, "Collins Dictionary of Mathematics," Collins, Great Britain, 1989.
[10] L. Alvarez-Morales, M. Díaz-Andreu, "Acoustics, soundscapes and sounds as intangible heritage," Acoustics, vol. 6, no. 2, pp. 408-412, 2024.
[11] ISO 3382, "Acoustics–Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to Other Acoustical Parameters," International Standards Organization, 1997.
[12] H. Kuttruff, "Room Acoustics," CRC Press, 2016.
[13] R. Peters, "Acoustics and Noise Control," Routledge, 2013.
[14] P. Sedó Mota, "Estudi electroacústic d'una sala de concerts," Universitat Politècnica de Catalunya, 2024.

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]

مجله انجمن علوم صوتی ایران / دوره ۱۳ / شماره ۱ / بهار و تابستان ۱۴۰۴

[Downloaded from joasi.ir on 2026-11-29]