



## Analysis of the Effect of Geometric Components of Domes on the Acoustic Quality of Lecture Spaces

Fereshteh Kamrani <sup>1</sup>, Mansour Yeganeh <sup>\*2</sup>, Mohammad Reza Bemanian <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Architecture, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran. kamranifereshteh@gmail.com

<sup>\*2</sup> (Corresponding author) Associate Professor at the Faculty of Art AT Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. yeganeh@modares.ac.ir

<sup>3</sup> Department of Architectural Engineering, Faculty of Art and Architecture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. bemanian@modares.ac.ir

### Article Info

Research Article

Issue 54

Volume 21

Page 454 to 477

Submission Date: 2023/11/02

Review Date: 2023/12/22

Acceptance Date: 2024/03/03

Publication Date: 2024/06/21

### Keywords

Dome geometry,  
acoustics,  
domed roofs,  
lecture spaces,  
sound quality.

### Cite this article

Kamrani, F., Yeganeh, M. and Bemanian, M. R. (2024). Analysis of the Effect of Geometric Components of Domes on the Acoustic Quality of Lecture Spaces. *Islamic Art Studies*, 21(54), 454-477.

 [dorl.net/dor/20.1001.1.\\*\\*\\*\\*\\* \\*\\*\\*/](https://doi.org/10.22034/IAS.2024.391762.2282)

 [dx.doi.org/10.22034/IAS.2024.391762.2282](https://doi.org/10.22034/IAS.2024.391762.2282)

### ABSTRACT

The geometry of roof forms has been a primary design consideration for architects throughout history. This study examines dome geometries from various perspectives to identify acoustically optimal configurations for lecture halls. Data were collected from library resources and simulated dome models, employing a hybrid methodology combining simulation and descriptive analysis. The research process involved precise algorithmic modeling of dome samples in Grasshopper software using traditional craftsmen's techniques, followed by curve-fitting calculations using matrix methods in SPSS 22. Acoustic simulations were then conducted using Odeon software. Descriptive analysis of arches utilized scatter plots, while Spearman correlation analysis in SPSS 22 examined relationships between architectural and acoustic variables. Results demonstrate that dome forms with comparable volume, surface area, height-to-span ratio, and arc length—but with gentler curve slopes—exhibit superior acoustic performance in terms of reverberation time, speech transmission index, and speech clarity.

### Research Objectives

1. Investigate reverberation time components in various dome types based on geometric (mathematical and physical) characteristics
2. Examine speech transmission index and speech clarity in lecture spaces across different dome geometries

### Research Questions

1. How do geometric and mathematical parameters of domes affect acoustic quality components in lecture halls?
2. How do geometric parameters influence speech transmission and clarity in lecture spaces?

This article is taken from the doctoral thesis/dissertation of "Fereshteh Kamrani" entitled "Algorithmic Explanation of the Relationship between Hybrid Parametric Forms and the Sound Quality of Large-Scale Halls (Case Study of Lecture Hall)", which was presented at the Islamic Azad University, Shahrekord Branch, in 2019, under the guidance of Dr. Mansour Yeganeh and the advice of Dr. Mohammad Reza Bamanian.

## Introduction

Architecture distinguishes itself from other arts through its simultaneous consideration of aesthetics, structural stability, and functionality (Song et al., 2016, p. 166). Determining a building's form constitutes the most crucial task in architectural design (Peña et al., 2021, p. 1), as the initial building shape significantly impacts performance, construction costs, daylight utilization, energy consumption, shading performance, acoustics, functional accessibility, solar benefits, and other characteristics (Agirbas, 2019, p. 142).

Form-finding has become a key stage in conceptual design, as its outcomes inform subsequent design phases, construction processes, and the building's lifecycle (Peña et al., 2021, p. 1). Recently, acoustic considerations have gained attention in non-musical professional spaces such as libraries, offices, multipurpose areas, and lecture halls (Cairolì, 2018, p. 167; Kaarlela-Tuomaala et al., 2009, p. 1423; Xiao & Aletta, 2016, p. 265).

The roof, as a fundamental architectural element with distinct geometric characteristics, profoundly influences a building's sound quality (Vathiq & Shiri, 2020, p. 211) [In Persian]. When speech signals propagate through space, sound waves interact with the spatial geometry, causing measurable changes in acoustic quality components such as speech transmission index, reverberation time, and speech clarity - ultimately affecting overall acoustic performance (Munteanu et al., 2018, p. 331; Gramez & Boubenider, 2017, p. 39; Robinson et al., 2014, p. 55; Tervo & Tossavainen, 2012, p. 2).

The enduring stability of curved (domed) roofs in Iranian architecture makes them ideal specimens for acoustic quality investigation. Understanding the relationship between architectural components and acoustic performance is essential for effectively applying dome roof patterns in contemporary architecture from an acoustic efficiency perspective. Some researchers employ form simulations while controlling other influential variables like materials (Abdou, 2003, p. 39; Ismail, 2013, p. 30; Oldham & Elkhateeb, 2008, p. 200).

This study examines the acoustic components of lecture spaces across various dome geometries. Architectural parameters (surface area, volume, height, height-to-span ratio) and curve-fitting equations (curve slope and length) significantly impact reverberation time, speech transmission index, and speech clarity. The research primarily investigates: How do geometric and mathematical parameters of domes affect acoustic quality components in lecture halls?

To address this question, the study establishes that dome parameters - including surface area, volume, height, height-to-span ratio, curve slope, and curve length - significantly

influence speech transmission index, speech clarity, and reverberation time components. The research methodology is illustrated in Figure 1. Numerous studies in architecture have addressed the topic of sound quality in domed spaces. These studies can be divided into several categories based on their variables and research objectives. A review of existing research shows that few studies have simultaneously examined both the geometric and mathematical aspects of domed roofs from an acoustic perspective.

Some researchers have focused on geometric characteristics (Farshad, 1977, p. 85; Huerta, 2007, p. 211), mathematical properties (Capilla Tamborero et al., 2021, p. 3), or combined geometric-mathematical approaches to determine optimal arch equations using matrix-based curve fitting methods (Izadpanah, 2018, p. 41) [In Persian], as well as proportional studies (Capilla Tamborero et al., 2021, p. 3; Feizolahbeigi et al., 2021, p. 2).

Other research has examined geometry and proportions with an emphasis on acoustic analysis (Ismail & Eldaly, 2018, p. 56; Inoue et al., 2009, p. 221). Regarding curved roofs and acoustics, Sü and Yilmazer (2008, p. 21) simulated the domed roof of Ankara's Kocatepe Mosque using Odeon software in 2008, analyzing its acoustic characteristics. Mohd Arif (2013, p. 1) investigated the acoustic performance of different roof shapes including domed, pyramidal, and flat forms. Kassim et al. (2014, p. 1127) examined pyramidal dome geometry with acute angles in 2014. Eldakdoky and Elkhateeb (2017, p. 8) studied the effect of dome shape and location on mosque acoustics using computer simulations, finding that dome shape affects reverberation time and speech clarity, with increased volume leading to reduced reverberation time.

While these studies have examined height-to-span ratios, curve steepness, dome types and their placement in relation to acoustic quality, they have not simultaneously addressed the mathematical aspects of arches (such as curve length and slope) along with the physical characteristics of domes. This paper aims to examine the acoustic quality of lecture spaces under various commonly used dome arches, based on curve-fitting equations derived from traditional arch-drawing methods used by master craftsmen in Persian architecture.

## Conclusion

The roof is one of the key factors affecting acoustic quality in buildings. Domed roofs offer advantages in structural stability and thermal performance. Given their superior structural performance, it is necessary to improve their other functional aspects, including acoustic performance. Reverberation time (T30), speech clarity (C80), and

speech transmission index (STI) are the main factors determining sound quality from an architectural perspective in large lecture halls. Increasing volume, surface area, height-to-span ratio, arc length, and curve slope leads to increased reverberation time and decreased speech transmission index and speech clarity. This indicates that as these parameters increase, sound quality decreases. These findings are consistent with previous acoustic research by Kassim, Yilmaz and Arif, and Eldakdoky and Elkhateeb. Domed forms with similar volume, surface area, height-to-span ratio and arc length - but with gentler curve slopes - demonstrate superior acoustic performance in terms of reverberation time, speech transmission index, and speech clarity.

### References

- Abdou, A. (2003). Comparison of the acoustical performance of mosque geometry using computer model studies. Eighth International IBPSA Conference.
- Abdou, A. A. (2003). "The effects of roof shapes on wind-induced air motion inside buildings." *Building and Environment*, 38(1), 39-51.
- Agirbas, A. (2019). Façade form-finding with swarm intelligence. *Automation in Construction*, 99, 140-151.
- Ansari, M., Akhavat, H. S., & Taghavaei, A. (2011). "A historical study of proportional systems in architecture with emphasis on functional and aesthetic considerations." *Book Month (Art)*, 151, 46-57. [In Persian].
- Avicenna, H. (1986). *Nine Treatises on Philosophy and Natural Sciences*. Beirut: Dar Qabas.
- Ballou, G. (2013). *Handbook for sound engineers*. Taylor & Francis.
- Barnett, P., & Acoustics, A. (1999). Overview of speech intelligibility. *Proceedings-Institute of Acoustics*, 21(5), 1-16.
- Blauert, J. (2019). Assessing the "Quality-of-the-Acoustics" at Large. *Journal of the Audio Engineering Society*, 67(1/2), 5-12.
- Cairolì, M. (2018). Architectural customized design for variable acoustics in a multipurpose auditorium. *Applied acoustics*, 140, 167-177.
- Capilla Tamborero, E., Calvo Roselló, V., & Gómez-Collado, M. C. (2021). Geometrical Analysis of Oval Domes through Architectural and Mathematical Methods. The Case of the Dome of the Camarín of the Virgin of El Puig (Valencia, Spain). *International Journal of Architectural Heritage*, 1-15.

- Cowan, H., & Smith, P. (2004). Dictionary of architectural and building technology. Routledge.
- Crocker, Malcolm J. (2007). Handbook of noise and vibration control. John Wiley & Sons.
- Davies, Nikolas, Jokiniemi, E. (2008). Dictionary of architecture and building construction. Routledge.
- Eldakdoky, S., & Elkhateeb, A. (2017). Acoustic improvement on two lecture auditoria: Simulation and experiment. *Frontiers of Architectural Research*, 6(1), 1-16.
- Elkhateeb, A., Adas, A., Attia, M., & Balila, Y. (2016). Absorption characteristics of masjid carpets. *Applied acoustics*, 105, 143-155.
- Everest, F., & Alton, Pohlmann, Ken C. (2015). Master handbook of acoustics. McGraw-Hill Education.
- Farshad, M. (1977). On the shape of momentless tensionless masonry domes. *Building and Environment*, 12(2), 81-85.
- Feizolahbeigi, A., Lourenço, P. B., Golabchi, M., Ortega, J., & Rezazadeh, M. (2021). Discussion of the role of geometry, proportion and construction techniques in the seismic behavior of 16th to 18th century bulbous discontinuous double shell domes in central Iran. *Journal of Building Engineering*, 33, 101575.
- Forou, W. (1928). *Acoustics in Architecture*. (Translated by Gholamhossein Liaqati). Tehran: National University of Iran. [In Persian].
- GOŁAŚ, A., & SUDER-DEBSKA, K. (2009). Analysis of Dome Home Hall theatre acoustic field. *Archives of Acoustics*, 34(3), 273-293.
- Gramez, A., & Boubenider, F. (2017). Acoustic comfort evaluation for a conference room: A case study. *Applied acoustics*, 118, 39-49.
- Hossam Eldien, H. F., Yasser. (2013). The Effect of Domes Shape on the Acoustics of Mosques.
- Huerta, S. (2007). Oval domes: History, geometry and mechanics. *Nexus Network Journal*, 9(2), 211-248.
- Inoue, S., Sugino, K., Katou, M., & Imaizumi, H. (2009). Speech transmission performance and the effect of acoustical remedies in a dome. *Applied acoustics*, 70(1), 221-230.
- Ismail, M. R. (2013). A parametric investigation of the acoustical performance of contemporary mosques. *Frontiers of Architectural Research*, 2(1), 30-41.

Ismail, M. R., & Eldaly, H. (2018). Acoustic of monolithic dome structures. *Frontiers of Architectural Research*, 7(1), 56-66.

Izadpanah, F. (2018). "Application of curve fitting and least squares method in analyzing Persian arches." *Journal of Mathematics and Society*, 3(1), 41-53. [In Persian].

Kaarlela-Tuomaala, A., Helenius, R., Keskinen, E., & Hongisto, V. (2009). Effects of acoustic environment on work in private office rooms and open-plan offices-longitudinal study during relocation. *Ergonomics*, 52(11), 1423-1444.

Kassim, D. H., Putra, A., Nor, M., & Muhammad, N. (2014). Effect of pyramidal dome geometry on the acoustical characteristics in a mosque. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 7, 1127-1133.

Kuttruff, H., & Mommertz, E. (2013). *Handbook of engineering acoustics*. Springer.

Lindsay, RB. (1945). *Historical development of acoustics to the time of Rayleigh The Theory of Sound ed JWS Rayleigh*.

Mihai, T., & Iordache, V. (2016). Determining the indoor environment quality for an educational building. *Energy Procedia*, 85, 566-574.

Mohd Arif, Z. (2013). Acoustic of mosque: the effect of roof shape on it's acoustic performance.

Mommertz, E. (2013). *Handbook of engineering acoustics*. Springer.

Munteanu, C., Bogdan, D., Mihaela, M. L., Cobîrzan, N., Tămaş-Gavrea, D. R., & Babota, F. (2018). The acoustic properties of the lecture hall of the Faculty of Building Services in Cluj-Napoca. *Procedia Manufacturing*, 22, 331-338.

Naylor, G. M. (1993). ODEON—Another hybrid room acoustical model. *Applied acoustics*, 38(2-4), 131-143.

Noqrekar, A. (2013). *The Wisdom of Islamic Art and Architecture*. Tehran: University of Science and Technology. [In Persian].

Oldham, D., & Elkhateeb, A. (2008). The Architectural Development of the Historic Masjids in Cairo and its Acoustical Impact. *Building Acoustics*, 15(3), 197-229.

Othman, A. R., & Mohamed, M. R. (2012). Influence of Proportion towards Speech Intelligibility in mosque's praying hall. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 35, 321-329.

- Pena, M. L. C., Carballal, A., Rodríguez-Fernández, N., Santos, I., & Romero, J. (2021). Artificial intelligence applied to conceptual design. A review of its use in architecture. *Automation in Construction*, 124, 103550.
- Qotb al-Din Shirazi, M. (2008). *Treatise on Music from Durrat al-Taj*. Tehran: Academy of Arts. [In Persian].
- Qiyabaklou, Z. (2013). *Fundamentals of Building Physics 1: Acoustics*. Tehran: Amir Kabir University of Technology. [In Persian].
- Rahimi, G. (2012). "The phenomenon of sound propagation in natural philosophy." *Hekmat Sinaee (Mashkhat al-Noor)*, 16, 47. [In Persian].
- Rayleigh, JWSB. (1894). *The Theory of Sound*, Volume 1.
- Rezazadeh Ardabili, M., Seyyedi Saravi, M., & Taheri Amiri, S. (2018). "Comparative study of the plan and dome of Ardabil Jame Mosque with similar plans and domes to examine the correct drawing of the dome curve." *Architecture and Urban Planning (Fine Arts)*, 23, 2. [In Persian].
- Robinson, P. W., Siltanen, S., Lokki, T., & Savioja, L. (2014). Concert hall geometry optimization with parametric modeling tools and wave-based acoustic simulations. *Building Acoustics*, 21(1), 55-63.
- Safaeipour, H., & Pourmand, H. (2012). "The meaning of covering in Safavid era architecture." *Journal of Fine Arts - Architecture and Urban Planning*, 17(1), 39-48. [In Persian].
- Song, H., Ghaboussi, J., & Kwon, T.-H. (2016). Architectural design of apartment buildings using the implicit redundant representation genetic algorithm. *Automation in Construction*, 72, 166-173.
- Sü, Z., & Yilmazer, S. (2008). The acoustical characteristics of the Kocatepe Mosque in Ankara, Turkey. *Architectural Science Review*, 51(1), 21-30.
- Tehrani, F., Mahdizadeh, F., Hejazi, M., & Valibeig, N. (2012). "Geometric and mathematical characteristics of the five-seven pointed arch in Iranian barrel vaults." *Scientific Journal of Iranian Restoration and Architecture*, 1(3), 39-50. [In Persian].
- Terminology, A. (2006). American national standard. ANSI S1, 1-1994.
- Tervo, S., & Tossavainen, T. (2012). 3D room geometry estimation from measured impulse responses. 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP).

Vathiq, B., & Shiri, T. (2020). "Climate compatibility of dome structures based on solar radiation (Study of domes in: Isfahan Imam Mosque, Sheikh Lotfollah Mosque, Qazvin Masjid al-Nabi, and Urmia Jame Mosque)." *Armanshahr Architecture & Urban Planning*, 13(33), 211-225. [In Persian].

Xiao, J., & Aletta, F. (2016). A soundscape approach to exploring design strategies for acoustic comfort in modern public libraries: A case study of the Library of Birmingham. *Noise Mapping*, 3(1).

Zhao, S., Qiu, X., Cheng, E., Burnett, I., Williams, N., Burry, J., & Burry, M. (2015). Sound quality inside small meeting rooms with different room shape and fine structures. *Applied acoustics*, 93, 65-74.



## تحلیل اثر مؤلفه‌های هندسی گنبد بر کیفیت آکوستیکی فضای سخنرانی\*\*

فرشته کامرانی<sup>۱</sup>، منصور یگانه<sup>۲</sup>، محمدرضا بمانیان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه معماری، واحد شهرکرد، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرکرد، ایران، kamranifereshteh@gmail.com  
<sup>۲</sup> (نویسنده مسئول) دانشیار گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، yeganeh@modares.ac.ir  
<sup>۳</sup> استاد گروه معماری، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، bemanian@modares.ac.ir

### چکیده

مهم‌ترین دغدغه‌های طراحی مورد توجه معماران از گذشتگان تا به امروز، هندسه فرم سقف‌ها است. این مسئله تاکنون از دیدگاه گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است تا به کمک تحلیل و بررسی هندسه انواع گنبد بتوان به گنبد مناسب از لحاظ آکوستیکی سالن‌های سخنرانی پی برد. جمع‌آوری داده‌ها بر پایه داده‌های کتابخانه‌ای و گنبد‌های شبیه‌سازی شده است. این پژوهش با استفاده از شیوه ترکیبی (شبیه‌سازی، تحلیل توصیفی) در دسته‌بندی مقالات کاربردی جای می‌گیرد. روش تحقیق بدین گونه که پس از ترسیم دقیق نمونه‌ها به روش استادکاران به صورت الگوریتمی در نرم‌افزار Grasshoper و سپس به محاسبه برازش منحنی با روش ماتریسی با نرم‌افزار SPSS ۲۲ پرداخته شد. بعد از آن شبیه‌سازی آکوستیکی با استفاده از نرم‌افزار odeon انجام گرفته است. تحلیل توصیفی قوس‌ها با نمودار اسکاتر و تحلیل همبستگی گنبد‌ها میان متغیرهای معماری و آکوستیکی با روش اسپیرمن با نرم‌افزار SPSS ۲۲ پرداخته شد. فرم‌های گنبدی دارای حجم، مساحت، نسبت ارتفاع به دهانه گنبد و طول قوس تقریباً برابر دارند، اما دارای شیب منحنی قوس کم‌تر هستند، از لحاظ مؤلفه‌های آکوستیکی همچون زمان واخنش، شاخص انتقال گفتار و وضوح گفتار کیفیت بالاتری دارند.

### اهداف پژوهش:

۱. بررسی مؤلفه‌های زمان واخنش در انواع گنبد براساس ویژگی‌های هندسی (ریاضی و کالبد) فرم.
۲. بررسی شاخص انتقال گفتار و وضوح گفتار فضای سخنرانی در انواع گنبد براساس ویژگی‌های هندسی (ریاضی و کالبد) فرم.

### سؤالات پژوهش:

۱. تأثیر پارامترهای هندسی و ریاضی انواع گنبد بر مؤلفه‌های کیفیت صوتی سالن‌های سخنرانی چیست؟
۲. تأثیر پارامترهای هندسی بر انتقال گفتار و وضوح گفتار فضای سخنرانی چگونه است؟

\*\* این مقاله برگرفته از رساله دکتری / پایان‌نامه "فرشته کامرانی" با عنوان "تبیین الگوریتمیک نسبت فرم‌های پارامتریک هیبریدی و کیفیت صوتی سالن‌های بزرگ مقیاس (مطالعه موردی سالن سخنرانی)" است که به راهنمایی دکتر "منصور یگانه" و مشاوره دکتر "محمدرضا بمانیان" در سال ۱۳۹۸ در دانشگاه "آزاد اسلامی" واحد "واحد شهرکرد" ارائه شده است.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

شماره ۵۴

دوره ۲۱

صفحه ۴۵۴ الی ۴۷۷

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۲

تاریخ داوری: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲

تاریخ صدور پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱

### کلمات کلیدی

هندسه گنبد، آکوستیک، سقف‌های گنبدی، فضای سخنرانی، کیفیت صوتی.

### ارجاع به این مقاله

کامرانی، فرشته، یگانه، منصور، & بمانیان، محمدرضا. (۱۴۰۳). تحلیل اثر مؤلفه های هندسی گنبد بر کیفیت آکوستیکی فضای سخنرانی. مطالعات هنر اسلامی، ۲۱(۵۴)، ۴۵۴-۴۷۷.



[dori.net/dor/20.1001.1.\\*  
\\*\\*\\*\\*\\* \\*\\*\\*/](https://doi.org/10.22034/IAS.2024.391762.2282)



[dx.doi.org/10.22034/IAS  
.2024.391762.2282](https://dx.doi.org/10.22034/IAS.2024.391762.2282)



## مقدمه

تفاوت معماری با هنرهای دیگر در تولید هم‌زمان از نظر زیبایی‌شناسی، ساختار پایداری و کاربردی آن است (Song et al, ۲۰۱۶:۱۶۶). تعیین شکل ساختمان، مهم‌ترین کار در فرایند طراحی معماری است (۱: ۲۰۲۱, Pena et al). شکل اولیه ساختمان بر عملکرد و هزینه ساخت، استفاده از نور روز، مصرف انرژی، عملکرد سایه، آکوستیک، قابلیت دسترسی عملکردی و بهره‌خوردگی و دیگر ویژگی‌ها تأثیر می‌گذارد (Agirbas, ۲۰۱۹:۱۴۲). جست‌وجوی اشکال به یکی از مراحل کلیدی در مرحله طراحی مفهومی تبدیل می‌شود، زیرا نتایج آن ورودی‌هایی برای مراحل بعد فرایند طراحی، مرحله ساخت‌وساز و در طول چرخه عمر ساختمان است (۱: ۲۰۲۱, Pena et al). اخیراً آکوستیک در مکان‌های غیرحرفه‌ای موسیقی همانند کتابخانه‌ها، اداری، فضاهای چندمنظوره، سالن‌های سخنرانی و غیره مورد توجه قرار گرفته است (Cairolì, ۲۰۱۸:۱۶۷; Kaarlela-Tuomaala et al., ۲۰۰۹:۱۴۲۳; Xiao & Aletta, ۲۰۱۶:۲۶۵). سقف یکی از بخش‌های مهم اصلی ساختمان، ساختار هندسه است که تأثیرات عمده‌ای بر کیفیت صوتی ساختمان دارد (وثیق و شیری، ۱۳۹۹: ۲۱۱). در هنگام پخش صدای سخنران در فضا، امواج صدا در مسیر انتقال تحت تأثیر کالبد و هندسه فرم فضا قرار می‌گیرد و سنجه‌های مؤلفه کیفیت صوتی همچون شاخص انتقال گفتار، زمان واخنش و وضوح گفتار فرکانس تغییر می‌کند و بر میزان کیفیت صوتی فضا تأثیر می‌گذارد (Munteanu et al., ۲۰۱۸:۳۳۱; al., ۲۰۱۷:۳۹; Gramez & Boubenider, ۲۰۱۴:۵۵; Robinson et al., ۲۰۱۲:۲). با توجه به پایداری سقف‌های با شکل منحنی یا همان گنبدی در معماری ایران یکی از بهترین نمونه‌ها برای بررسی در کیفیت آکوستیکی هستند. شناخت روابط مؤلفه‌های معماری با مؤلفه‌های آکوستیکی برای کاربرد الگو سقف‌های گنبدی در معماری امروزه از دیدگاه کارایی آکوستیکی امری ضروری است که بتوان با شناخت تأثیر هندسه فرم‌ها در ابعاد مختلف معماری حال حاضر کاربردی شوند. برخی پژوهشگران برای بررسی و مطالعه تغییرات شکل در عین حال حفظ سایر متغیرهای تأثیرگذار همچون مصالح شبیه‌سازی فرم را به کار می‌گیرند (۲۰۰۸:۲۰۰, Oldham & Elkhateeb, ۲۰۱۳:۳۰; Ismail, ۲۰۰۳:۳۹; Abdou, ۲۰۰۸:۲۰۰). در پژوهش حاضر به بررسی مؤلفه‌های آکوستیکی فضای سخنرانی در انواع گنبد براساس هندسه فرم پرداخته می‌شود. پارامترهای معماری (سطح، حجم، ارتفاع و خیز (نسبت ارتفاع به دهانه) و معادله برازش منحنی (شیب منحنی و طول منحنی) انواع فرم گنبد به صورت معنی‌داری بر مؤلفه‌های زمان واخنش، شاخص انتقال گفتار، وضوح گفتار تأثیر می‌گذارد. این پژوهش تلاش دارد برای تحلیل و پاسخ به این سؤال اصلی بپردازد:

تأثیر پارامترهای هندسی و ریاضی انواع گنبد بر مؤلفه‌های کیفیت صوتی سالن‌های سخنرانی چیست؟ برای پاسخ به سؤالات فوق روند پژوهش به این شکل تعریف شده است. پارامترهای سطح، حجم، ارتفاع، نسبت ارتفاع به دهانه، شیب منحنی و طول منحنی انواع گنبد به صورت معنی‌داری بر شاخص انتقال گفتار و مؤلفه وضوح گفتار و مؤلفه‌های زمان واخنش تأثیر می‌گذارد. نمودار روند انجام این پژوهش در تصویر ۱ بیان شده است.



تصویر ۱. نمودار مراحل انجام پژوهش. (مأخذ: نگارندگان)

پژوهش بسیاری در معماری موضوع کیفیت صوتی و گنبد پرداخته شده است. پژوهش‌ها به چند دسته براساس متغیر و هدف مطالعات تقسیم و بررسی گردید. با بررسی پژوهش‌های انجام‌شده کم‌تر پژوهشی در خصوص هندسه و ریاضی سقف‌های گنبدی به‌طور هم‌زمان در جنبه آکوستیکی صورت‌گرفته است. گروهی از پژوهشگران با تمرکز بر ویژگی‌های هندسی (Farshad, ۱۹۷۷:۸۵؛ Huerta, ۲۰۰۷:۲۱۱؛ ریاضی (۳:۲۰۲۱, Capilla Tamborero et al.) و ریاضی و هندسی (برای تعیین بهترین روش معادله قوس، آن را با برازش خم به روش ماتریسی به‌کار گرفته و بهترین را بیان نموده است (ایزدپناه، ۱۳۹۷: ۴۱) و تناسبات (۳:۲۰۲۱, Capilla Tamborero et al., ؛ Feizolahbeigi et al., ۲۰۲۱:۲) پرداخته‌اند. برخی پژوهش‌های دیگر هندسه و تناسبات را با تأکید بر تحلیل آکوستیکی (Ismail & Eldaly, ۲۰۱۸:۵۶, Inoue et al., ۲۰۰۹:۲۲۱) ارائه نموده‌اند. برای سقف‌های منحنی و آکوستیک، یالماذر و سیو (Sü & Yilmazer, ۲۰۰۸:۲۱) در سال ۲۰۰۸ روی شبیه‌سازی سقف گنبدی مسجد کوکتب در آنکارا با نرم‌افزار ادئون پرداخته‌اند و ویژگی‌های صوتی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. مهاده عارف در سال ۲۰۱۳ (Mohd Arif, ۲۰۱۳:۱) به بررسی تأثیر اشکال مختلف سقف که شامل گنبدی، هرمی و اشکال مسطح را بر عملکرد صوتی آکوستیک مسجد پرداخته‌اند. کاظم و همکاران (Kassim et al., ۲۰۱۴:۱۱۲۷) در سال ۲۰۱۴ هندسه گنبد هرمی با زاویه تند بررسی کردند. دین و انور در سال ۲۰۱۹ (Eldakdoky & Elkhateeb, ۲۰۱۷:۸) بر روی تأثیر شکل و مکان گنبد بر عملکرد صوتی مسجد با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری در مسجد پرداخته و به اینکه شکل گنبد روی زمان واخشن و وضوع گفتار تأثیر می‌گذارد و با افزایش حجم زمان واخشن کاهش می‌یابد. پژوهش‌های بیان شده به بررسی نسبت ارتفاع به دهانه، کندی و تندی، نوع فرم گنبد و محل قرارگیری آن در کیفیت آکوستیکی گنبد پرداخته که جنبه‌های ریاضی قوس‌ها همچون مؤلفه‌های طول منحنی، شیب منحنی قوس به‌طور هم‌زمان با کالبد گنبد پرداخته

نشده است. این مقاله تلاش دارد کیفیت صوتی فضای سخنرانی در فرم گنبدی در انواع قوس پر کاربرد باتوجه به معادله برازش منحنی قوس‌ها به دست آمده بر مبنای ترسیم سنتی قوس توسط استادکاران معماری ایران را مورد بررسی قرار دهد.

این پژوهش به بررسی مؤلفه‌های کیفیت صوتی جهت تبیین گنبد مطلوب برای فضاهای سخنرانی می‌پردازد. روش جمع‌آوری داده‌ها بر پایه داده‌های کتابخانه‌ای با ابزار جمع‌آوری داده (کتاب و مقالات) و از سوی دیگر بر شبیه‌سازی قوس‌های انتخاب شده توسط خبرگان با ابزار جمع‌آوری داده شبیه‌سازی (نرم‌افزار Odeon، grasshoper)، و ابزار تحلیل داده‌ها (نرم‌افزار SPSS ۲۲) است. این پژوهش با استفاده از شیوه ترکیبی (شبیه‌سازی، تحلیل توصیفی) در دسته‌بندی مقالات کاربردی باشد که در این روش تحقیق پژوهش با استفاده از روش استادکاران هریک از نمونه‌ها در نرم‌افزار گرس‌هاپر ترسیم شدند. برازش منحنی هریک از نمونه‌ها با روش ماتریسی و بررسی میزان خطا با روش حداقل مربعات در نرم‌افزار SPSS پرداخته شد. سپس بعد از آن با نرم‌افزار ادئون شبیه‌سازی آکوستیکی انجام شد. در ادامه به بیان تحلیل توصیفی پارامترهای هندسی و ریاضی انواع گنبد بر مؤلفه‌های کیفیت صوتی پرداخته شد. در آخر مولفه‌های معماری و آکوستیکی را با روش اسپیرمن مورد تحلیل همبستگی در نرم‌افزار SPSS قرار گرفته است. تفکیک متغیرها و سنجه‌های مورد بررسی در جدول شماره ۱ انجام گرفت که متغیر کیفیت صوتی دارای سنجه‌های زمان واخنش، وضوح گفتار و شاخص انتقال گفتار است و متغیر فرم معماری (متغیر مستقل) دارای سنجه‌های طول قوس، شیب منحنی و عرض از مبدأ و کالبدی شامل حجم، سطح، ارتفاع گنبدها است.

جدول ۱. متغیرهای مورد بررسی در این پژوهش. (مأخذ: نگارندگان)

کیفیت صوتی	فرم معماری (متغیر مستقل)		
آسایش صوتی	هندسه فرم سقف - گنبد	سازه مفهومی	سنجه‌ها
کیفیت صوتی	محاسباتی و شکلی قوس	متغیر	
کیفیت صوتی	محاسباتی: طول قوس، شیب منحنی و عرض از مبدأ کالبدی: حجم، سطح، ارتفاع به دهانه، کندی و تندی	سنجه‌ها	

<sup>۱</sup> reverberation time

<sup>۲</sup> the clarity

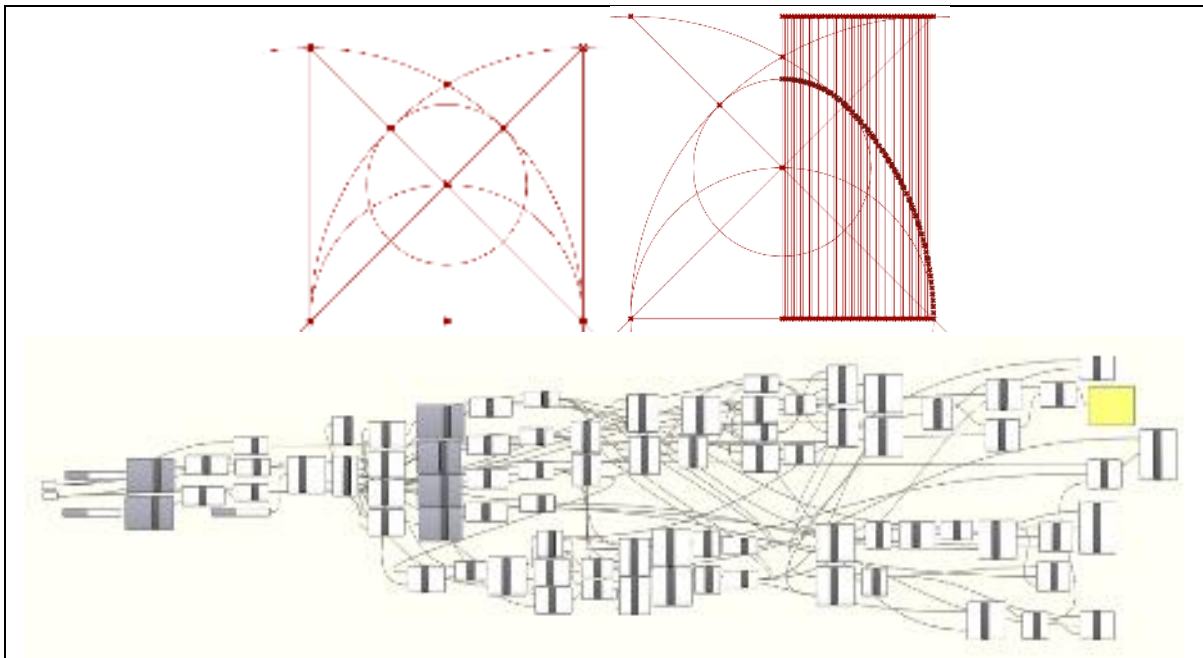
<sup>۳</sup> speech transmission index

در این پژوهش نوع قوس نمونه‌ها با توجه به هدف تحقیق به صورت هدفمند با نظر خبرگان انتخاب گردید. جدول شماره ۲ توصیف نمونه‌های انتخابی براساس ویژگی‌های کالبدی هر نمونه بیان شده است. همچنین از دید خبرگان نمونه‌های انتخابی قوس گنبدهای انتخابی دارای ارزش تاریخی و امروزه نیز در بناها کاربرد داشته گنبد باشند.

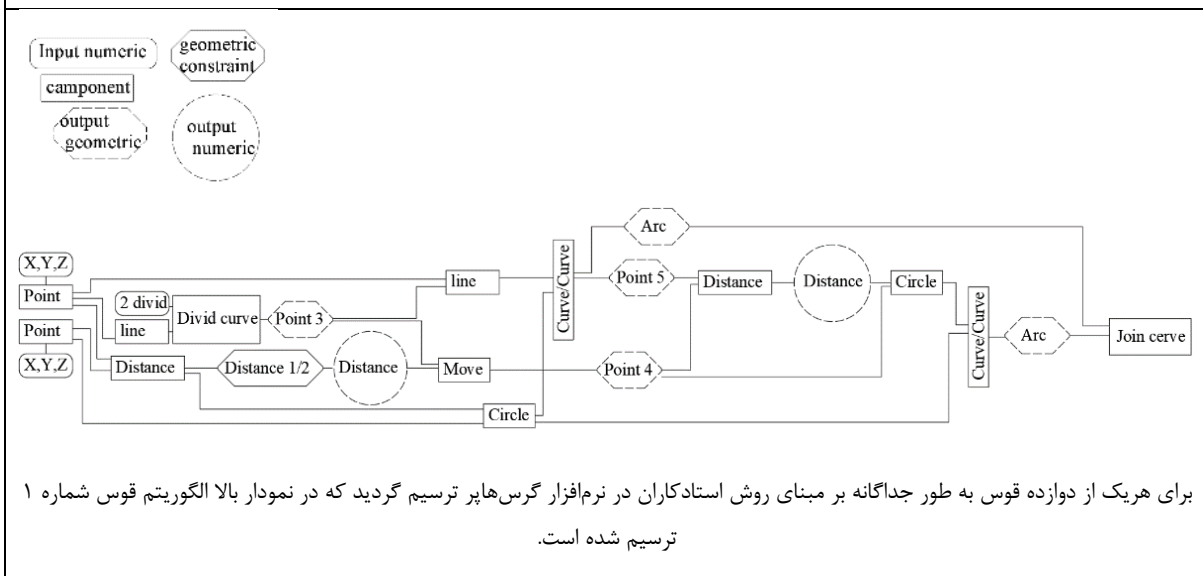
جدول ۲. توصیف نمونه‌های انتخابی براساس ویژگی‌های کالبدی هر نمونه قوس تند آبی و قوس‌های کند قرمز. (مأخذ: نگارندگان)

ارتفاع	دهانه	مساحت m <sup>۲</sup>	حجم m <sup>۳</sup>	
۱۱.۸۹	۱۵	۴۷۸.۵۷	۱۳۲۸.۲۳	۱
۵.۷۴	۱۵	۲۶۷.۰۲	۵۵۰.۳۱	۲
۷.۲۸	۱۵	۳۰۴.۸۴	۶۹۸.۰۹	۳
۵.۶۲	۱۵	۲۸۷.۹۴	۶۲۹.۶۷	۴
۶.۵۳	۱۵	۳۰۴.۱۱	۶۹۶.۵۴	۵
۴.۸۱	۱۵	۲۴۹.۳۹	۴۷۳.۷۶	۶
۸.۹۸	۱۵	۳۶۰.۳۹	۹۱۰.۵۴	۷
۸.۲۲	۱۵	۳۵۴.۰۲	۸۸۹.۰۸	۸
۹.۹۸	۱۵	۳۷۷.۳۱	۹۶۵.۵۸	۹
۸.۷۳	۱۵	۳۸۵.۶۲	۹۰۵.۸	۱۰
۹.۷۷	۱۵	۳۷۴.۶۱	۹۵۸.۶۴	۱۱
۸.۰۳	۱۵	۳۵۳.۳۷	۸۸۷.۸۳	۱۲

برای اجتناب از خطای ترسیم قوس‌ها از دیدگاه هوراتا (با بررسی چشمی هرکسی آن خمی که دوست دارد در قوس را می‌بیند) (Huerta, ۲۰۰۷, ۲۱۱) که برای تقریب یک قوس خم‌های بسیاری را می‌توان ترسیم کرد و با دقت بر چند خم ترسیم شده روی قوس موردنظر نزدیک‌ترین قوس به آن انتخاب می‌شود (ایزدپناه، ۱۳۹۷: ۴۱)، در این پژوهش ابتدا با استفاده از روش استادکاران (ترسیم کمان‌های دایره‌ای با ریسمان و میخ) هریک از نمونه‌ها را با دهانه یکسان در نرم‌افزار گرس‌هاپر ترسیم گردید. با توجه به اینکه ضروری است برای اتصالات منحنی جهت تجزیه و تحلیل، نقاط مناسب بروی قوس‌ها انتخاب شود. از سوی دیگر، انتخاب این نقاط روی قوس‌ها بر مبنای گفته کارشناسان در همه کمان‌ها به‌طور همگن انتخاب شوند (ایزدپناه، ۱۳۹۷: ۴۱). در پژوهش حاضر ۱۰۰ فاصله برابر روی محور افقی از نقطه شروع پایه قوس تا محور عمود بر روی قوس موردنظر انتخاب گردید. بعد از آن برازش منحنی و بیان نوع قوس‌ها از روش ماتریسی و برای بررسی میزان خطای برازش از کارل فردریش گاوس استفاده شد. تصویر شماره ۲ مدل ترسیم قوس به روش استادکاران در پلاگین گرس‌هاپر و تبیین معادله درجه سه قوس است.



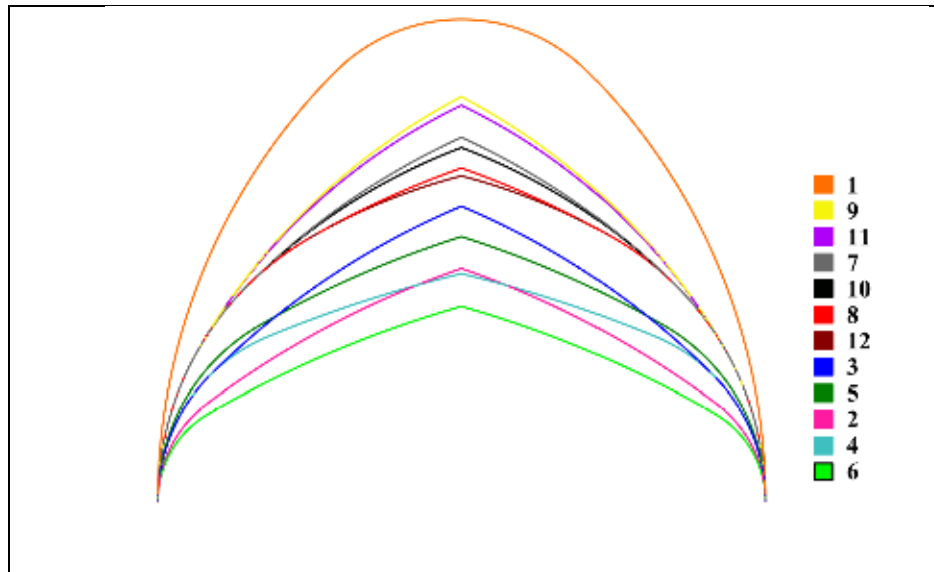
تصویر الگوریتم ترسیم شده قوس شماره ۱ در نرم افزار گرس هاپر



برای هر یک از دوازده قوس به طور جداگانه بر مبنای روش استادکاران در نرم افزار گرس هاپر ترسیم گردید که در نمودار بالا الگوریتم قوس شماره ۱ ترسیم شده است.


**تصویر ۲.** مدل ترسیم قوس به روش استادکاران در پلاگین گرس هاپر و تبیین معادله درجه سه قوس. (مأخذ: نگارندگان)

جدول شماره ۳ توصیف نمونه‌های انتخابی براساس ویژگی‌های ریاضی و تصویر ۳ ترسیم کمان‌های قوس هر نمونه بیان شده است.



تصویر ۳. ترسیم کمان‌های قوس انتخاب شده توسط خبرگان. (مأخذ: نگارندگان)

جدول ۳. معادله برازش منحنی قوس‌های انتخابی (مأخذ: نگارندگان)

قوس	Curve Fitting 				
	$X_3$	$X_2$	$X_1$	b	R
۱۲	۰.۰۲۷	-۰.۴۳۲۲	۲.۶۴۵۱	۱.۳۲۰۱	۰.۹۸۷۲۲۳
۱۱	۰.۰۱۹۱	-۰.۳۳۳	۲.۵۶۷۹	۱.۳۱۵۶	۰.۹۸۹۲۹
۱۰	۰.۲۳۵	-۰.۳۷۸۴	۲.۵۲۴۹	۱.۳۶۶۴	۰.۹۹۰۸۹۲
۹	۰.۰۱۸۷	-۰.۳۲۴۶	۲.۵۶۰۱	۱.۳۱۶	۰.۹۷۲۳۴۷
۸	۰.۰۲۸۲	-۰.۴۳۹۲	۲.۶۵۴۷	۱.۳۱۷۸	۰.۹۸۱۵۲۶
۷	۰.۰۲۳۵	-۰.۳۷۱۴	۲.۵۰۵۰	۱.۳۷۴۹	۰.۹۸۶۶۵۶
۶	۰.۰۱	-۰.۱۵۵۷	۱.۱۴۱۲	۰.۸۵۱۶	۰.۹۸۸۸۴۳
۵	۰.۰۲۲۲	-۰.۳۳۳۵	۱.۹۹۴۶	۱.۱۴۱۲	۰.۹۸۲۷۳۵
۴	۰.۰۲۲۹	-۰.۳۳۸۴	۱.۸۸۰۳	۱.۰۶۵۲	۰.۹۹۳۲۵۲
۳	۰.۰۱۳۴	-۰.۲۲۲۱	۱.۷۵۸۳	۱.۰۷۰۹	۰.۹۸۸۲۹۴
۲	۰.۰۱۰۳	-۰.۱۶۸۲	۱.۳۳۸۶	۰.۹۰۷۳	۰.۹۹۳۱۱۱
۱	۰.۰۲۴۶	-۰.۴۹۴۵	۳.۶۸۴	۱.۸۹۵۵	۰.۹۸۱۴۹۴

مطالعات اولیه در خصوص طبیعت صوت را به فیثاغورث ۵۰۰-۵۸۰ قبل میلاد منسوب می‌کنند (John & Baron, ۱۹۴۵)؛ زیرا وی بود که موفق شد یک تک‌ساز اختراع کند که متشکل از یک چهارچوب صوتی با پل متحرک و یک ساز یا زه کشیده شده روی آن بود. با استفاده از این وسیله فیثاغورث دریافت که دو سازه کشیده، با نسبت طول یک‌به‌دو، نتی را تولید می‌کنند که با یک اکتاو جدا شدند. ساز بلندتر نت کوتاه‌تری را تولید می‌کند (John & Baron, ۱۹۴۵). با این حال، اهمیت فیثاغورث در خصوص ارتباط صنعت با اعداد تا سده‌ها پس از آن مشخص نشد. در دوره تمدن اسلامی نیز مطالبی در خصوص پدیده صوت نگاشته شده است؛ به‌عنوان مثال، در رساله اخوان الصفا اشاراتی به این موضوع شده است. ابن‌سینا در دانشنامه طبیعیات نیز مطالبی در خصوص صوت دارد که در ادامه به آن اشاره خواهیم کرد. حکیم ابونصر فارابی نیز در رساله موسیقی خود به ماهیت صوت اشاره می‌کند و قطب‌الدین شیرازی هم باز با ذکر قول فارابی و ایرادهایی که ارموی به آن وارد کرده است، ضمن ایرادها نظر خود را درباره ایجاد انتشار صوت بیان می‌کند (قطب‌الدین شیرازی، ۱۳۸۷). نیوتن (۱۷۲۷-۱۶۴۲ م) را نخستین دانشمند که به طریق علمی، طبیعت موجودی صوت را توضیح داده است. کار وی را دانشمندانی مانند رابرت بویل (۱۹۶۱-۱۶۲۷)، رابرت هوک (۱۷۰۳-۱۶۳۵) و جوزف ساویر (۱۷۱۶-۱۶۵۳) هلموتز (۱۸۹۴-۱۸۲۱) و به‌ویژه ریلی (۱۹۱۹-۱۶۲۷) که در کتاب خود به نام نظریه صوت به مطالعه انتشار امواج صوتی در جامدات و به‌خصوص در فصول اول ششم و هفتم و هشتم آن به ارتباط دقیق صوت و ارتعاش در اجسام توجه کرد و به صورت‌بندی ریاضی آن دو حکمت گماشت (رحیمی، ۱۳۹۱: ۴۷) ادامه دادند؛ آنچه را که امروز دانش‌آموزان و دانشجویان در کتب فیزیکی و امواج صوتی یا مطالب تخصصی‌تر مکانیک برخورد می‌خوانند پایه‌ریزی کردند (همان). پژوهشگران از دیدگاه مختلف صوت را تعریف کرده‌اند که در زیر بیان شده است. تصویر ۴ نمودار نکات برجسته در راه رسیدن به یک طراحی علمی محاسبه شده را بیان می‌کند (Ballou, ۲۰۱۳, --).

دانش مبتنی بر تجربه و اولین گزارش‌های آزمایش‌وخطا - به‌عنوان‌مثال، توسط معمار رومی ویتروویوس، ۱۵ قبل از میلاد.	زمان روم / یونان، زمان قرون‌وسطی
تحقیقات نظری - به‌عنوان‌مثال، کلادنی، ۱۸۱۰، یا در سال ۱۸۷۵، لرد رایلی، پروفیسور هلمهولتز.	از اواخر قرن ۱۸
مبانی آکوستیک اتاق، پروفیسور سابین/ایالات متحده ۱۹۲۳؛ تابش صدا، اچ استنزل / آلمان ۱۹۳۰ و اچ.اف. اولسون / ایالات متحده ۱۹۴۷.	از سال ۱۹۰۰
اندازه‌گیری در مدل‌ها و «شنیدار» در مدل‌های فیزیکی، پروفیسور اسپاندوک مونیخ، پروفیسور ریچارد، درسدن/آلمان.	تا سال ۱۹۳۵
تحقیقات مدل کامپیوتری، پروفیسور کروکستاد، در ترون‌هایم/نروژ، پس از آن بسیاری از کارهای مشابه انجام شده است.	از سال ۱۹۶۵
شنیدار با استفاده از مدل‌های کامپیوتری معرفی شده است.	از سال ۱۹۹۵

نکات برجسته

تصویر ۴. نمودار نکات برجسته در راه رسیدن به یک طراحی علمی محاسبه شده آکوستیک (Ballou, ۲۰۱۳, --)

از دیدگاه‌های مختلف در جدول شماره ۴ تعریف آکوستیک بیان شده است.

جدول ۴. تعریف آکوستیک. (مأخذ: نگارندگان)

نام	تعریف
قیابکلو، ۱۳۹۲	ارتباط انسان‌ها با یکدیگر و با طبیعت بوده است و علم تولید، انتشار و دریافت صدا آکوستیک است. (قیابکلو، ۱۳۹۲)
نصیری ۱۳۸۵	صدا و صوت عبارت است از امواج طولی که از ارتعاش سریع اجسام اعم از جامد مایع و گاز تولید می‌شود.
ویلی فور	هر جسم مرتعشی که در یک ملائی قرار گرفته باشد، به ذرات ملاً که در مجاورت آن قرار گرفته باشند ضربه‌ای وارد می‌آورد که باعث برهم‌خوردن نظم در کلیه جهات ملاً با سرعت صوت مربوطه به آن ملا منتشر می‌گردد. (فورو، ۱۳۰۷: ۹)

دیویز و جاکونمی ۲۰۰۸	آکوستیک، شنیداری؛ برخورد با صدا و یا بر اساس آن یا رفتار صدا. آکوستیک مطالعه صدا شنوایی یا خواص یک اتاق مربوط به صدا یا رفتار صوتی را گویند. (Davies & Jokiniemi, ۲۰۰۸)
کاون و اسمیت ۲۰۰۴	آکوستیک علمی از صدا است (Cowan & Smith, ۲۰۰۴, --).
جنز بلارت ۲۰۱۹	آکوستیک (از نظر فیزیک) علم ارتعاش و امواج در محیط‌های ارتجاعی است (Blauert, ۲۰۰۶, ۲۵; Terminology, ۲۰۱۹, ۵). این منجر به این می‌شود که رویدادهای شنیداری را از روی نتایج اندازه‌گیری‌های فیزیکی و محاسبات مبنی بر نظریه پیش‌بینی کرد. روش‌های اندازه‌گیری فیزیکی برای ارائه نتایج بادقت بالایی از عینیت طراحی شده‌اند، یعنی مستقل از آزمایشگاه‌های خاص و یا آزمایشگران خاص هستند. علاوه بر این، نظریه‌های فیزیکی مبتنی بر پایه‌های کاملاً منطقی، به‌طور تجربی تأیید شده‌اند؛ بنابراین طبق تعریف "عینی" است. (Blauert, ۲۰۱۹, ۵; Terminology, ۲۰۰۶, ۲۵).
جاکوب سن ۲۰۱۱	آکوستیک را می‌توان فن طراحی فضاها و بناها و سیستم‌های مکانیکی مطابق با نیازهای شنوایی دانست که با طراحی صحیح بتوان صدای مطلوب را شنید و نوفه (صداها یا ناخواسته) را تا حد قابل‌قبول کاهش داد. صدا را می‌توان به سه حالت نغمه ناب، نغمه و نوفه دسته‌بندی کرد. در معماری، هدف کنترل نوفه است.

پیش‌بینی ویژگی‌های آکوستیکی سالن‌های سخنرانی با توجه به جهات مختلف همچون معماری، آکوستیک و هزینه‌های غیرقابل جبران ساخت پیش از شروع ساخت بنا دارای اهمیت بسیاری است. در جدول ۵ تاریخچه‌ای از استفاده از مدل‌های فیزیکی یا کامپیوتری برای طراحی سیستم صوتی و آکوستیکی بیان شده است.

**جدول ۵.** استفاده از مدل‌های فیزیکی یا کامپیوتری برای طراحی سیستم صوتی و آکوستیکی (Ballou, ۲۰۱۳, --)

مدل‌های فیزیکی از دهه ۱۹۳۰ و بعد از جنگ جهانی دوم عمدتاً موارد انتخابی را در مراکز تحقیقاتی با استفاده از کامپیوترهای بزرگ	قبل از سال ۱۹۶۵
کامپیوتر جیبی قابل برنامه‌ریزی اولین الگوریتم‌های آکوستیک را ارائه کرد. ۱۹۸۰-۱۹۸۵ از سال ۱۹۸۱. PC و PC-XT در دسترس بوده‌اند	از سال ۱۹۷۰
زمان واخنش و محاسبات وضوح برای اتاق‌های ساده: TEF-۱۰۰-CADP / JBL Analyzer. اولین نقشه‌های پوشش به واقعیت تبدیل شد	۱۹۸۴
برنامه PHD. توسط پرهوس هریس ۴ در بهار: اولین نسخه برای TEF Analyzer: ۱. محاسبات آکوستیک اتاق مانند زمان‌های مختلف واخنش. ۲. طراحی خوشه بلندگو. ۳. محاسبه توان تابش بوق و محرک‌های مربوطه. ۴. محاسبات Alcons توسط پیتوز ۵	۱۹۸۵

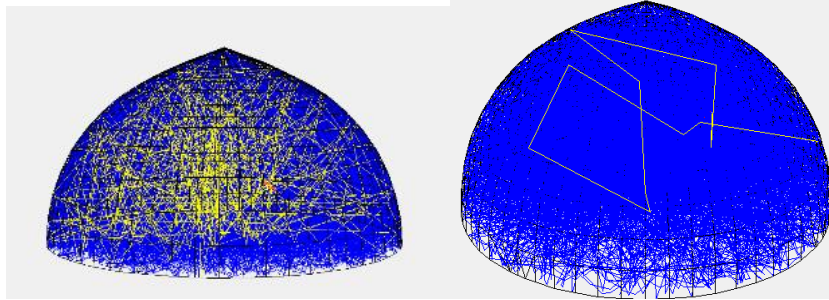
‡ Prohs/Harris

° Peutz

BOSE-Modeler. اولین برنامه کامل گرافیکی مبتنی بر مکینتاش CAD، نسخه ۱، ۱۹۸۶، توسط K. Jacob, T. Birkle/Bose/United States.	۱۹۸۶
Acousta-CADD. اولین برنامه کامل گرافیکی مبتنی بر CAD MSDOS، نسخه ۱، توسط A. Muchimaru, Altec Lansing/ایالات متحده.	۱۹۸۷
EASE. برنامه کامل گرافیکی مبتنی بر CAD MS-DOS با منوهای بازشو، نسخه ۱، ۱۹۹۰، توسط ADA، آلمان	۱۹۹۰
CADP۲. برنامه کامل گرافیکی مبتنی بر ویندوز ۳.۱، توسط JBL/ایالات متحده	۱۹۹۱
ULYSSES. توسط IFB/آلمان (P Hallstein).	۱۹۹۶
CADP۲. توسعه بیشتر متوقف شد.	۱۹۹۷
EASE برای ویندوز. توسط گروه رسانه‌ای Ahnert Feistel.	۱۹۹۹-۲۰۰۱

باتوجه به اینکه نرم‌افزار ادئون در حوزه عینی و ذهنی اتاق آکوستیک مبنایی برای محققین و ابزاری مفید برای شرکت‌های مشاوران است، در این پژوهش برای شبیه‌سازی بکار گرفته شده است (Ballou, ۲۰۱۳). امواج صوتی از منبع داخل اتاق فرستاده می‌شوند، با انعکاس در اتاق دنبال شده و داده‌های تولیدی برای استفاده بعد در تعیین بازتاب‌های دریافت شده در یک نقطه ذخیره می‌گردد (Naylor, ۱۹۹۳:۱۳۱). ارائه مدل سه‌بعدی در ادئون این امکان را می‌دهد که آکوستیک تولید، تشریح و با آن شنیده شود. در این پژوهش همه مدل‌های اتاق با استفاده از نرم‌افزار سه‌بعدی گرس‌هاپر ایجاد شده و بعد از آن به نرم‌افزار ODEON Room Acoustic ۹٫۰ وارد شده‌اند. باتوجه به ابعاد نمونه فضاهای مورد نظر مشابه در معماری ایران که در پیشینه پژوهش بیان شد (Naylor, ۱۹۹۳:۱۳۱؛ رضازاده اردبیلی و همکاران، ۱۳۹۷: ۶۹) و گنبدها به ابعاد ۱۵ متر در نظر گرفته شده است؛ برای یکسان بودن تمامی مدل‌ها، که این امر برای جلوگیری از تأثیر تغییر حجم بر پارامترهای صوتی و اطمینان از تجزیه و تحلیل براساس ویژگی‌های گنبد است (Hossam Eldien, ۲۰۱۳:۲). راستی آزمایی شامل آزمایش تنگی آب برای تعیین این مسئله که مدل اتاق به‌منظور اطمینان از صحت شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت و تمامی فرم‌ها کاملاً بسته بودند که در تصویر ۵ به‌عنوان نمونه دو مدل ارائه شدند. اولین پارامتری که باید تعیین و تنظیم گردد، میزان نویز پس‌زمینه در سالن‌های سخنرانی است. در سالن‌های سخنرانی معیار نویز توصیه شده برای سیستم HVAC، ۳۵ NC تعریف شده است (Kassim et al., ۲۰۱۴:۱۱۲۷). از اهداف انجام این شبیه‌سازی برای شناسایی اثربخشی فرم، نوع قوس و برازش منحنی مناسب است، که به همین علت، مصالح کاربردی اختصاص داده شده به هر مدل مشابه در سایر مدل‌های دیگر استفاده شده است. منبع صدا در فرم‌ها از نوع نقطه‌ای که صدا را در محیط پخش می‌کند. منبع صدا در هر شکل ۱ متر از لبه دیوار فاصله دارد و از کف ۱.۸ متر ارتفاع دارد. در جدول ۴ مقادیر وارد شده در تنظیم نرم‌افزار ادئون و

ضریب جذب ( $\alpha$ ) برای سطح اتاق‌ها و کف آن و در قسمت پایین جدول قدرت صدا بلندگو مورد استفاده هر مدل در جدول ۶ بیان شده است. در مدل گنبد‌ها مصالح، دهانه گنبد، و فضای زیر گنبد به‌طور یکسان در نظر گرفته شد تا تنها متغیر اصلی، فرم گنبد مورد بررسی قرار گیرد.

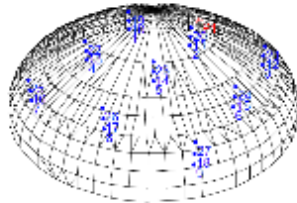


تصویر ۵. بررسی چند نمونه فرم بسته شده در نرم‌افزار ادئون. (مأخذ: نگارندگان).

جدول ۶. قسمت اول داده‌های آماری وارد شده در نرم‌افزار و قسمت دوم ضرایب جذب ( $\alpha$ ) برای سطح اتاق‌ها و قسمت سوم قدرت صدا بلندگو. مأخذ: نگارندگان.

داده‌های پایه Statistical Data							
گیرنده	منبع صدا		تعداد امواج مورد استفاده		C. درجه حرارت محیطی		رطوبت محیط RH%
۲۷	۱.۸), ۷.۵,(۱.۷		۹۰۰۰۰۰		۲۰		۵۰.۰۰
The absorption Coefficients ( $\alpha$ ) for rooms' surfaces							
Octave band centre frequency (Hz)							Material مصالح
NRCC	۴۰۰۰H	۲۰۰۰H	۱۰۰۰H	۵۰۰H	۲۵۰H	۱۲۵H	
Floor کف							
۰.۲۹	۰.۶۵	۰.۶۰	۰.۳۷	۰.۱۴	۰.۰۶	۰.۰۲	Carpet, heavy, on concrete
Ceilings دیوارها و سقف							
۰.۰۰۵	۰.۰۷	۰.۰۵	۰.۰۴	۰.۰۳	۰.۰۳	۰.۰۳	Brick, unglazed
Sound power of omni-directional speaker used in both experiments (Omni.S0A).							
۲۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	۲۵۰	Frequency (Hz)			
۶۳.۸	۷۱.۸	۷۴.۸	۶۹.۶	Sound power (dB)			

در تمامی مدل‌ها محل قرارگیری گیرنده و بلندگو ثابت است برای نمونه مدل فرم ۶ در تصویر ۶ قرار گرفته است.



تصویر ۶. محل قرارگیری فرستنده و گیرنده مدل ۶ برای نمونه از فرم‌ها. (مأخذ: نگارندگان).

### ۱. هندسه فرم سقف

هندسه از دیرباز بن‌مایه معماران برای آفرینش آثار معماری به‌ویژه در ایران است (Crocker, ۲۰۰۷). هندسه در معماری ایرانی چه پیش از اسلام و چه پس از اسلام جایگاه ویژه‌ای داشته است. پس از اسلام دیدگاه خوارزمی واژه معرب انداز، هندسه است (فیض‌الله بیگی، ۱۳۹۸: ۳۵). این دانش به روابط و ویژگی شکل، اندازه‌ها می‌پردازد (آرین، ۱۳۸۵). زمینه دانش هندسه، دو مفهوم وابسته به هم عدد و شکل می‌باشد که بستگی تام به دانش ریاضی دارد و گاه یکی در نظر گرفته می‌شود (نقره‌کار، ۱۳۹۲). هندسه از دیدگاه ابن‌سینا علم شناخت وضع خطوط، اشکال، سطوح و نسبت‌هاست (همان). دو جزء گسست‌ناپذیر معماری، هندسه و تناسبات می‌باشد به این دلیل که ساختن حرکت در چارچوب یک سیستم هندسی منظم ضروری است (سینا، ۱۹۸۶). معماری گذشته ایران نظام هندسی نسبی که اساساً اندازه‌ها با ضرایب مشخص‌شده‌ای نسبت به هم و با تقسیم و ترسیم اشکال هندسی به‌دست آمده است. مجموعه نسبت‌های مشخص بین اجزا و نیز جزء و کل را سیستم تناسبات گویند (فیض‌الله بیگی، ۱۳۹۸: ۳۵). رابطه تنگاتنگی بین هندسه و نیارش در تمامی مراحل تکوین اثر معماری دیده می‌شود (مجتبی و همکاران، ۱۳۹۰: ۴۶). در شکل‌یابی بنا پیش‌اندیشه‌ترین عامل مؤثر پوشش بنا می‌باشد (فیض‌الله بیگی، ۱۳۹۸: ۳۵). پوشش سقف در معماری ایران از اولویت و اهمیت زیادی نسبت به دیگر اندام‌ها برخوردار است. این معماری در قیاس با معماری جهان در اعصار مختلف از نظر تنوع و غنای پوشش‌ها خیره‌کننده است که گویی انگار دغدغه‌ای به جز آن ندارد (معماریان و صفایی‌پور، ۱۳۹۷). از گذشته تا به امروز برای ساخت پوشش‌های تاق آهنگ و گنبدی ایرانی از قوس‌های گوناگون به‌کارگرفته که آمیزه‌های از چند کمان، بخشی از شکل هندسی مشخص همانند قسمتی از دایره، هذلولی یا هر منحنی شناخته‌شده هندسی می‌باشد (صفایی‌پور و پورمند، ۱۳۹۱: ۳۹). پژوهشگران از دیدگاه‌های مختلفی همچون تیزهای، خیز و ریخت‌شناسی انواع قوس‌ها را دسته‌بندی نموده‌اند (پیرنیا، ۱۳۹۵: ۵).

### ۲. کاربرد هندسه فرم سقف همساز با آکوستیک

شاخص سطح آسایش کیفیت محیط داخلی انحصاراً شرایط حرارتی نیست، بلکه شامل آسایش حرارتی، آسایش صوتی، کیفیت هوای داخلی و آسایش بصری است (تهرانی و همکاران، ۱۳۹۱: ۳۹). بسیاری از محققان به بررسی کیفیت

صوت در داخل اتاق پرداخته‌اند؛ همچنین پارامترهای عینی صوت برای بیان کیفیت صدا داخل اتاق، تحلیل عوامل تأثیرگذار بر کیفیت صوتی و راه‌حل‌های ممکن برای کیفیت صدای داخل اتاق می‌باشد (Mihai & Iordache, ۲۰۱۶:۵۵۶). در مجموع، طراحی آکوستیکی سالن‌های بزرگ برای دو هدف سخنرانی (که تأکید بر درک گفتار) و فضاهایی که برای موسیقی (صداگذاری برای موسیقی) می‌باشد. حتی بزرگ‌ترین سالن نیز از برخی جهات آکوستیکی، تفاوتی چندان با اتاق کوچک‌تر ندارد. به عبارت کلی، معیارهای مهم و اصلی آکوستیک برابر هستند. سالن‌های بزرگ باید کم‌ترین سر صدای محیط با منابع داخلی و خارجی را داشته باشند. لازم به ذکر است که باید تمامی نیازهای آکوستیکی همراه با نیازهای معماری زیباشناختی و کاربردی هماهنگ باشد (Zhao et al., ۲۰۱۵:۶۵). محاسبه مؤلفه‌های زیادی برای طراحی صوتی مدرن نیاز است که یکی از اصلی‌ترین پارامترهای آکوستیک برای طراحان زمان واخنش می‌باشد (Everest & Pohlmann, ۲۰۱۵:۱۶۵) واخنش به معنی ماندگاری صدا در محیط بسته است تا هنگامی که خروج صدا متوقف گردد.

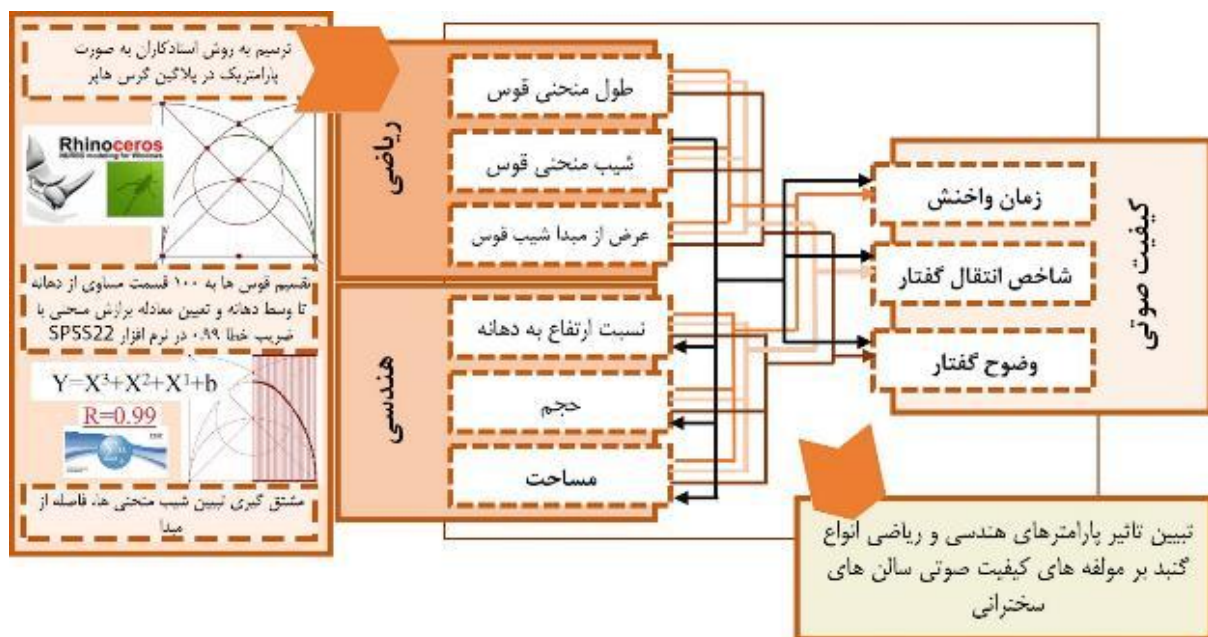
یک سری بازتاب یا پژواک با گذشت زمان موجب کاهش قدرت آن توسط جذب حدی و تلفات هوا می‌گردد. واخنش را مولان (۱۹۸۳) به‌عنوان حضور مداوم از صدا و قابل شنیدن پس از قطع منبع صدا بیان کرده است. از نظر فنی زمان موردنیاز برای کاهش ۶۰ دسی بل صدا را «زمان واخنش» گویند. کسری از ثانیه تا پنج ثانیه و بیشتر در اتاق‌های کوچک تا محوطه‌های بسیار بزرگ همانند نمازخانه در مساجد متغیر می‌باشد. انواع مختلف اتاق‌ها و فعالیت‌ها به زمان واخنش متفاوت برای کیفیت صوتی قابل قبول نیاز دارند. به‌طور کلی، بهترین زمان واخنش برای گفتار کم‌تر از ۱ ثانیه و برای موسیقی بیشتر از ۱ ثانیه است. زمان‌های واخنش کوتاه برای وضوح گفتار ضروری است. در غیر این صورت، وجود مداوم صدای طنین‌انداز صدای زیر را پوشانده و باعث تارشدن گفتار می‌شود. به‌نظر می‌رسد اتاق‌های بزرگ‌تر به زمان واخنش طولانی‌تری نیاز دارند، همان‌طور که در مورد فرکانس‌های پایین‌تر صدا نیز صدق می‌کند. به گفته برگ و استورک (۱۹۹۵)، بهترین زمان واخنش برای یک سخنرانی باید کم‌تر از ۱ ثانیه در محدوده فرکانسی ۵۰۰ هرتز و کمتر باشد. زمان واخنش یک اتاق باید متناسب با عملکرد و حجم اتاق باشد (Elkhateeb et al., ۲۰۱۶:۱۴۳).

درک گفتار بالاترین اولویت طراحی برای هر سالنی است که برای کلمات گفتاری در نظر گرفته شده است. این امر در بسیاری از اماکن عبادی، تالارها و تئاترهای نمایشی صادق است. سیستم‌های صوتی اغلب برای غلبه بر محدودیت‌های آکوستیکی و برای وضوح بیشتر در فضاهای بسیار بزرگ استفاده می‌شوند (Othman & Mohamed, ۲۰۱۲:۳۲۱) منظور از درک گفتار درصدی از کلمه یا کلماتی است که به‌درستی توسط شنوندگان شنیده می‌شود. این یک عنصر حیاتی ارتباطات انسانی است. بدون درک قابل توجه گفتار، ارتباط با مشکل مواجه می‌شود. درک خوب تحت تأثیر زمان واخنش (RT)، سروصدای پس‌زمینه و فاصله شنونده از بلندگو است. از سه عنصر، زمان واخنش (RT) صدای پس‌زمینه تحت تأثیر معماری اتاق قرار می‌گیرند؛ بنابراین، در مرحله طراحی باید به آن‌ها توجه بیشتری شود (Everest & Pohlmann, ۲۰۱۵:۱۶۵). نیکسون (۲۰۰۲) تأکید کرد که در نسخه پیش‌نویس استاندارد ISO ۹۹۲۱ در «ارزیابی ارتباطات گفتاری»، درک گفتار به‌عنوان «اندازه‌گیری اثربخشی درک گفتار» تعریف شده است. اندازه‌گیری

معمولاً به‌عنوان درصدی از پیام که به‌درستی درک شده بیان می‌شود. درک گفتار به‌معنای کیفیت گفتار نیست. قابلیت درک گفتار به میزان مواردی که به‌درستی تشخیص داده می‌شوند، مربوط می‌شود؛ درحالی‌که کیفیت گفتار به کیفیت بازتولید سیگنال گفتار با توجه به میزان اعوجاج شنیدنی مربوط می‌شود. بنابراین، پیامی که فاقد کیفیت است ممکن هنوز قابل‌درک باشد (Othman & Mohamed, ۲۰۱۲:۳۲۱). شاخص انتقال گفتار (STI)، این یک معیار عینی است که انتقال گفتار را مشخص می‌کند (Othman & Mohamed, ۲۰۱۲:۳۲۱). از دست دادن انتقال سیگنال گفتاری در اثر بازتاب، تداخل و سر و صدای پس زمینه ایجاد می‌شود (Hossam Eldien, ۲۰۱۳:۲). «برای اطمینان از درک خوب گفتار، باید سیگنال را حفظ کرد، که به باندهای فرکانسی مختلف کمک می‌کند تا در کیفیت گفتار کمک کنند» (GOŁAŚ & SUDER-DEBSKA, ۲۰۰۹:۲۷۳). طبق نظر بارنت (۱۹۹۹)، مقدار مرجع STI از ۰ = بد تا ۱ = عالی متغیر است. در این مقیاس، STI حداقل ۰.۵ برای اکثر کاربردها مطلوب است (Kuttruff & Mommertz, ۲۰۱۳, ۲۳۹) (تصویر ۷).

0	STI	0.3	0.45	0.6	0.75	1.0
		BAD	POOR	FAIR	GOOD	EXCELLENT
0	CIS	0.48	0.65	0.78	0.88	1.0

تصویر ۷. مقیاس شاخص انتقال گفتار. مأخذ: (Barnett & Acoustics, ۱۹۹۹, ۲)



تصویر ۸. مدل تحقیق تبیین روابط پارامترهای هندسی و ریاضی انواع گنبد با پارامتر آکوستیک. (مأخذ: نگارندگان).

### ۳. یافته‌ها

در این بخش به بررسی هریک از اهداف پژوهش، تحلیل توصیفی مؤلفه‌های کیفیت صوتی براساس پارامتر کالبد معماری و شیب منحنی برگرفته از مشتق دوم برازش منحنی انواع قوس پرداخته می‌شود. فرم‌های شبیه‌سازی شده در

نرم افزار گرس هاپر، به داخل نرم افزار ادئون ۹ وارد شدند و میزان مؤلفه های زمان واخنش، وضوح صدا و شاخص انتقال گفتار هریک از فرم گنبدها به دست آمد. جدول ۷ داده های حاصل از شبیه سازی با نرم افزار ادئون می باشد.

**جدول ۷.** میزان زمان واخنش، وضوح گفتار و شاخص انتقال گفتار حاصله از شبیه سازی مدل ها. (مأخذ: نگارندگان).

شماره فرمها Number of form	زمان واخنش Reverberation Time	وضوح گفتار Clarity (C <sub>50</sub> )	شاخص انتقال گفتار Index Transmission Sound
۱۱	۳.۶۴	-۳.۱۰	۰.۵۳
۱۱	۳.۷۴	-۳.۴۸	۰.۵۲
۱۰	۳.۶۲	-۲.۱۱	۰.۵۵
۹	۳.۷۵	-۳.۴۵	۰.۵۲
۸	۳.۶۲	-۳.۳۵	۰.۵۳
۷	۳.۶۱	-۲.۱۰	۰.۵۵
۶	۲.۲۹	-۰.۷۶	۰.۶۲
۵	۳.۰۹	-۲.۵۶	۰.۵۶
۴	۲.۹۳	-۱.۹۳	۰.۵۷
۳	۳.۱۰	-۲.۱۷	۰.۵۷
۲	۲.۲۹	-۰.۵۵	۰.۶۱
۱	۳.۶۳	-۳.۳۶	۰.۵۳

زمان واخنش در فضای سخنرانی مهم ترین مؤلفه کیفیت آکوستیکی است. زمان کاهش انرژی صوتی تا ۶۰ دسی بل پس از خاموش شدن منبع صدا را زمان واخنش تعریف می شود. زمان واخنش حداکثر تا ۱.۲ برای فضای سخنرانی حداکثر تا ۱.۲ در نظر گرفته شده است. دیگر مؤلفه های مورد توجه شاخص انتقال گفتار که به عنوان یک معیار عینی و فیزیکی برای تعیین کیفیت گفتار به کار می رود. شاخص انتقال گفتار بازه بین صفر تا یک است که بهترین حالت ۱ و بدترین حالت ۰ می باشد.

مؤلفه دیگر وضوح گفتار که از نظر فنی نسبت انرژی اولیه صوتی به انرژی صوتی دیر هنگام است که باید مابین عدد ۵- و ۵+ قرار گیرد. با توجه به جدول ۵ فرم شمار ۶ با ارتفاع ۴.۸۱، مساحت ۲۴۹.۳۹، حجم ۴۷۳.۷۱ و شیب ۰.۰۶ با زمان واخنش ۲.۲۹، شاخص انتقال ۰.۶۲ و وضوح گفتار -۰.۷۶، فرم شمار ۲ با ارتفاع ۵.۷۴، مساحت ۲۶۷.۰۲، حجم ۵۶۲.۳۷ و شیب ۰.۰۶ با زمان واخنش ۲.۲۹ و شاخص انتقال گفتار ۰.۶۱ و وضوح گفتار -۰.۵۵، بعد از آن ها فرم شمار ۴ با ارتفاع ۵.۶۲، مساحت ۲۸۷.۹۴، حجم ۶۲۹.۶۷ و شیب ۰.۱۳ با زمان واخنش ۲.۹۳ و شاخص انتقال گفتار

۰.۶۱ و وضوح گفتار ۱.۹۳-، به ترتیب کم‌ترین میزان واخنش، وضوح گفتار و بیشترین میزان شاخص انتقال گفتار را دارند. همان‌طور که در جدول شماره ۵ مشاهده شد، فرم شمار ۱ با ارتفاع ۱۱.۸۹، مساحت ۴۷۸.۵۷، حجم ۱۳۰۶.۰۸ و شیب ۰.۱۴ زمان واخنش ۳.۶۲، شاخص انتقال ۰.۵۲ و وضوح گفتار ۳.۳۶-، فرم شمار ۱۱ با ارتفاع ۹.۷۷، مساحت ۳۷۴.۶۱، حجم ۹۳۸.۱۹ و شیب ۰.۱۱ با زمان واخنش ۳.۷۴ و شاخص انتقال گفتار ۰.۵۲ و وضوح گفتار ۳.۴۸-، بعد از آنها فرم شمار ۹ با ارتفاع ۹.۹۸، مساحت ۳۷۷.۳۱، حجم ۹۴۴.۸۹ و شیب ۰.۱۴ با زمان واخنش ۳.۷۵ و شاخص انتقال گفتار ۰.۵۲ و وضوح گفتار ۳.۴۵- و در آخر فرم شمار ۱۲ با ارتفاع ۸.۰۶، مساحت ۳۵۳.۳۷، حجم ۸۸۰.۸۰ و شیب ۰.۱۶ با زمان واخنش ۳.۷۵ و شاخص انتقال گفتار ۰.۵۳ و وضوح گفتار ۳.۴۰-، به ترتیب بیشترین میزان زمان واخنش، وضوح گفتار و کم‌ترین میزان شاخص انتقال گفتار را دارند. داده‌های حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از نمودار ماتریس اسکاتر در تصویر ۸ تحلیل شده است.

			حجم گنبد
			ارتفاع به دهانه گنبد
			شیب منحنی
			عرض از مبدأ
زمان واخنش	وضوح گفتار	شاخص انتقال گفتار	

تصویر ۹. نمودار ماتریس اسکاتر تأثیر مؤلفه‌های حجم، مساحت، نسبت ارتفاع به دهانه گنبد، طول قوس و شیب منحنی قوس بر مؤلفه‌های آکوستیکی. (مأخذ: نگارندگان)

باتوجه به تصویر ۹ نمودار ماتریس اسکاتر، تأثیر مؤلفه‌های معماری بر کیفیت صوتی با افزایش حجم، مساحت، نسبت ارتفاع به دهانه گنبد، طول قوس و شیب منحنی قوس موجب افزایش میزان زمان واخنش و کاهش شاخص انتقال گفتار کاهش و وضوح گفتار می‌شود. این نمودار بیانگر این است که با افزایش میزان مؤلفه‌های حجم، مساحت، نسبت ارتفاع به دهانه گنبد، طول قوس و شیب منحنی قوس کیفیت صوتی کاهش می‌یابد. فرم ۲ در تصویر ۹ دارای زمان

واخنش کم‌تر، وضوح گفتار بیشتر و شاخص انتقال بیشتر از فرم ۴ می‌باشد که تقریباً هر دو دارای مساحت، حجم و نسبت ارتفاع به دهانه برابر؛ اما فرم ۲ دارای شیب منحنی کم‌تر نسبت به فرم ۴ است. این موضوع بیانگر این است که نوع شکل منحنی و کاهش شیب منحنی قوس موجب افزایش میزان مؤلفه‌های کیفیت صوتی گنبد می‌شود.

#### ۴. همبستگی بین مؤلفه‌های آکوستیک با مؤلفه‌های معماری

ضریب همبستگی پیرسون برای آزمون رابطه بین متغیرهای آکوستیک، معماری استفاده شد. تصویر ۱۰ نمودار همبستگی کیفیت صوتی برای مؤلفه‌های زمان واخنش، وضوح گفتار با فرکانس ۵۰۰ و شاخص انتقال گفتار با مؤلفه‌های معماری از طریق آزمون همبستگی اسپیرمن نشان داده شده است.

	c80500	d50500	edf500	t30500	ts500	stf
ارتفاع	-0.76	-0.68	0.85	0.85	0.84	-0.83
ارتفاع به دهانه	-0.76	-0.68	0.85	0.85	0.84	-0.83
طول قوس	-0.76	-0.68	0.82	0.82	0.82	-0.81
حجم	-0.61	-0.54	0.66	0.66	0.67	-0.65
مساحت گنبد	-0.53	-0.46	0.59	0.60	0.59	-0.58
X	-0.73	-0.68	0.76	0.77	0.75	-0.74
b	0.80	0.73	-0.81	-0.82	-0.82	0.80

تصویر ۱۰. نمودار حرارتی همبستگی مؤلفه‌های حجم، مساحت، نسبت ارتفاع به دهانه گنبد، طول قوس و شیب منحنی قوس با مؤلفه‌های آکوستیک. (مأخذ: نگارندگان)

نمودار حرارتی همبستگی مؤلفه‌های معماری، مؤلفه‌های آکوستیک قرار گرفته است که در آن مؤلفه‌های ارتفاع به دهانه، ارتفاع، حجم، مساحت گنبد، شیب منحنی، طول قوس با میزان بالای ۰.۵۳. رابطه مستقیم با میزان زمان واخنش دارند و دیگر اینکه با مؤلفه‌های وضوح گفتار و شاخص انتقال گفتار یا میزان همبستگی بیشتر از ۰.۵ رابطه معکوس دارند. به این معنا که با افزایش میزان مؤلفه‌های ارتفاع به دهانه، ارتفاع، حجم، مساحت گنبد، شیب منحنی، طول قوس موجب افزایش میزان زمان واخنش و کاهش میزان شاخص انتقال گفتار می‌شود که در نتیجه کاهش کیفیت صوتی محیط سخنرانی می‌گردد.

## نتیجه‌گیری

سقف یکی از عوامل تأثیرگذار بر کیفیت آکوستیکی در بناها است. سقف‌های گنبدی باتوجه به کاربرد دارای برتری در پایداری سازه و حرارتی دارند. باتوجه به عملکرد سازه‌ای بالای آن لازم است ارتقا کارایی آن در جنبه‌های دیگر از جمله عملکرد آکوستیکی نیز صورت گیرد. زمان واخنش (T<sub>30</sub>)، وضوح گفتار (C<sub>80</sub>)، شاخص انتقال گفتار (STI) عوامل اصلی کیفیت صوتی از دیدگاه معماران در سالن‌های سخنرانی بزرگ‌مقیاس است. افزایش حجم، مساحت، نسبت ارتفاع به دهانه گنبد، طول قوس و شیب منحنی قوس گنبد موجب افزایش میزان زمان واخنش و کاهش شاخص انتقال گفتار کاهش و وضوح گفتار می‌شود. بیانگر این است که با افزایش میزان مؤلفه‌های حجم، مساحت، نسبت ارتفاع به دهانه گنبد، طول قوس و شیب منحنی قوس گنبد کیفیت صوتی کاهش می‌یابد. این نتایج مطابق با پژوهش انجام‌شده در آکوستیک همچون کاظیم، یالماز و عارف، دین و انور است. فرم‌های گنبدی دارای حجم، مساحت، نسبت ارتفاع به دهانه گنبد و طول قوس تقریباً برابر دارند، البته دارای شیب منحنی قوس کم‌تر یا همان‌کند هستند، از لحاظ مؤلفه‌های آکوستیکی همچون زمان واخنش، شاخص انتقال گفتار و وضوح گفتار کیفیت بالاتری دارند.

## فهرست منابع و مآخذ

## کتاب‌ها:

- آرین، منوچهر. (۱۳۸۵). نگاهی دیگر به برج‌ها، ۱. تهران: سازمان میراث فرهنگی کشور.
- ابن‌سینا، حسین. (۱۹۸۶). *تسع الرسائل فی الحکمه و الطبيعيات*، بیروت: دارقباس.
- فورو، ویلی. (۱۳۰۷). *آکوستیک در معماری*. (غلامحسین، لیاقتی). تهران: دانشگاه ملی ایران.
- قطب‌الدین شیرازی، محمودبن‌مسعود. (۱۳۸۷). رساله موسیقی از دره التاج: لغره الدباج (جلد ۱)، تهران: فرهنگستان هنر.
- قیابکلو، زهرا. (۱۳۹۲). مبانی فیزیک ساختمان ۱ آکوستیک. تهران: جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر.
- معماریان، غلامحسین و صفایی‌پور، هادی. (۱۳۹۷). معماری ایرانی نیارش. تهران: گلجام.
- نقره‌کار، عبدالحمید. (۱۳۹۲). حکمت هنر و معماری اسلامی، تهران: دانشگاه علم و صنعت.

## مقالات:

- انصاری، مجتبی؛ اخوت، هانیه سادات و علی‌اکبر، تقوایی. (۱۳۹۰). «تحقیقی پیرامون سیر تاریخی سیستم‌های تنظیم تناسبات در معماری با تأکید بر ملاحظات کاربردی و زیبایی‌شناسی». کتاب ماه (هنر)، ۱۵۱، ۴۶-۵۷.
- ایزدینپناه، فرزین. (۱۳۹۷). «کاربرد برآزش خم و روش حداقل مربعات برای بررسی هندسه قوس‌های ایرانی». نشریه ریاضی و جامعه، ۳(۱)، ۴۱-۵۳.
- تهرانی، فرهاد؛ مهدی‌زاده، فاطمه؛ حجازی، مهرداد و ولی‌بیگ، نیما. (۱۳۹۱). «ویژگی‌های هندسی و ریاضی در ساختار چفد پنج او هفت تند در پوشش تاق آهنگ ایرانی». نشریه علمی مرمت و معماری ایران، ۱(۳)، ۳۹-۵۰.
- فیض‌الله بیگی، پیرنیا، محمدکریم. (۱۳۹۵). «چفدها و طاق‌ها-چفدها». اثر، ۱۵(۲۴)، ۴۵-۵.
- رضازاده اردبیلی، مجتبی؛ سیدی ساروی، مجید و طاهری امیری، سارا. (۱۳۹۷). «مطالعه تطبیقی پلان و گنبد جمعه مسجد اردبیل با پلان‌ها و گنبد‌های مشابه به جهت بررسی ترسیم صحیح منحنی گنبد». معماری و شهرسازی (هنرهای زیبا)، ۲۳، ۲.
- رحیمی، غلامحسین. (۱۳۹۱). «پدیده انتشار صوت در قراضه طبیعیات». حکمت سینوی (مشکوه النور)، ۱۶، ۴۷.
- صفایی‌پور، هادی؛ پورمند، حسنعلی. (۱۳۹۱-۲۰۱۲). «معنای پوشش در معماری عصر صفوی». نشریه هنرهای زیبا-معماری و شهرسازی، ۱۷(۱)، ۳۹-۴۸.

فیض‌الله بیگی، آرزو؛ گلابچی، محمود و رضازاده اردبیلی، مجتبی. (۱۳۹۸). «تحلیل هندسه نظری و عملی و تناسبات گنبد دو پوسته گسسته مسجد جامع عباسی اصفهان». نشریه هنرهای زیبا-معماری و شهرسازی، ۲۴(۴)، ۳۵-۴۸.

وثیق، بهزاد و شیر، توحید. (۱۳۹۹). «تطابق اقلیمی کالبد گنبد براساس میزان دریافت تابش (بررسی گنبدهای مساجد: امام اصفهان، شیخ لطف‌الله، مسجد النبی قزوین و جامع ارومیه). معماری و شهرسازی آرمان شهر، ۱۳(۳۳)، ۲۱۱-۲۲۵.

## منابع انگلیسی:

## کتاب‌ها:

- Ballou, G. (۲۰۱۳). Handbook for sound engineers, Taylor & Francis.
- Cowan, H, & Smith, P. (۲۰۰۴). Dictionary of architectural and building technology, Routledge.
- Crocker, Malcolm J. (۲۰۰۷). Handbook of noise and vibration control, John Wiley & Sons.
- Davies, Nikolas, Jokiniemi, E. (۲۰۰۸). Dictionary of architecture and building construction, Routledge.
- Kuttruff, H., & Mommertz, E. (۲۰۱۳). Handbook of engineering acoustics, Springer. ۲۳۹-۲۶۷. Springer.
- Lindsay, RB. (۱۹۴۵). Historical development of acoustics to the time of Rayleigh The Theory of Sound ed JWS Rayleigh.
- Rayleigh, JWSB. (۱۸۹۴). The Theory of Sound, Volume ۱.
- Everest, F., & Alton, Pohlmann, Ken C. (۲۰۱۵). Master handbook of acoustics, McGraw-Hill Education.

## مقالات:

- Abdou, A. A. (۲۰۰۳). Comparison of the acoustical performance of mosque geometry using computer model studies. Eighth International IBPSA Conference.
- Agirbas, A. (۲۰۱۹). Façade form-finding with swarm intelligence. Automation in Construction, ۹۹, ۱۴۰-۱۵۱.
- Barnett, P., & Acoustics, A. (۱۹۹۹). Overview of speech intelligibility. Proceedings-Institute of Acoustics, ۲۱(۵), ۱-۱۶.
- Blauert, J. (۲۰۱۹). Assessing the “Quality-of-the-Acoustics” at Large. Journal of the Audio Engineering Society, ۶۷(۱/۲), ۵-۱۲.
- Cairolì, M. (۲۰۱۸). Architectural customized design for variable acoustics in a multipurpose auditorium. Applied acoustics, ۱۴۰, ۱۶۷-۱۷۷.

- Capilla Tamborero, E., Calvo Roselló, V., & Gómez-Collado, M. C. (۲۰۲۱). Geometrical Analysis of Oval Domes through Architectural and Mathematical Methods. The Case of the Dome of the Camarín of the Virgin of El Puig (Valencia, Spain). *International Journal of Architectural Heritage*, ۱-۱۵.
- Eldakdoky, S., & Elkhateeb, A. (۲۰۱۷). Acoustic improvement on two lecture auditoria: Simulation and experiment. *Frontiers of Architectural Research*, ۶(۱), ۱-۱۶.
- Elkhateeb, A., Adas, A., Attia, M., & Balila, Y. (۲۰۱۶). Absorption characteristics of masjid carpets. *Applied acoustics*, ۱۰۵, ۱۴۳-۱۵۵.
- Farshad, M. (۱۹۷۷). On the shape of momentless tensionless masonry domes. *Building and Environment*, ۱۲(۲), ۸۱-۸۵.
- Feizolahbeigi, A., Lourenço, P. B., Golabchi, M., Ortega, J., & Rezazadeh, M. (۲۰۲۱). Discussion of the role of geometry, proportion and construction techniques in the seismic behavior of ۱۱th to ۱۸th century bulbous discontinuous double shell domes in central Iran. *Journal of Building Engineering*, ۳۳, ۱۰۱۵۷۵.
- GOŁAŚ, A., & SUDER-DEBSKA, K. (۲۰۰۹). Analysis of Dome Home Hall theatre acoustic field. *Archives of Acoustics*, ۳۴(۳), ۲۷۳-۲۹۳.
- Gramez, A., & Boubenider, F. (۲۰۱۷). Acoustic comfort evaluation for a conference room: A case study. *Applied acoustics*, ۱۱۸, ۳۹-۴۹. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.11.014>
- Hossam Eldien, H. F., Yasser. (۲۰۱۳). The Effect of Domes Shape on the Acoustics of Mosques.
- Huerta, S. (۲۰۰۷). Oval domes: History, geometry and mechanics. *Nexus Network Journal*, ۹(۲), ۲۱۱-۲۴۸.
- Inoue, S., Sugino, K., Katou, M., & Imaizumi, H. (۲۰۰۹). Speech transmission performance and the effect of acoustical remedies in a dome. *Applied acoustics*, ۷۰(۱), ۲۲۱-۲۳۰.
- Ismail, M. R. (۲۰۱۳). A parametric investigation of the acoustical performance of contemporary mosques. *Frontiers of Architectural Research*, ۲(۱), ۳۰-۴۱.
- Ismail, M. R., & Eldaly, H. (۲۰۱۸). Acoustic of monolithic dome structures. *Frontiers of Architectural Research*, ۷(۱), ۵۶-۶۶.
- Kaarlela-Tuomaala, A., Helenius, R., Keskinen, E., & Hongisto, V. (۲۰۰۹). Effects of acoustic environment on work in private office rooms and open-plan offices—longitudinal study during relocation. *Ergonomics*, ۵۲(۱۱), ۱۴۲۳-۱۴۴۴.
- Kassim, D. H., Putra, A., Nor, M., & Muhammad, N. (۲۰۱۴). Effect of pyramidal dome geometry on the acoustical characteristics in a mosque. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, ۷, ۱۱۲۷-۱۱۳۳.

- Mihai, T., & Iordache, V. (۲۰۱۶). Determining the indoor environment quality for an educational building. *Energy Procedia*, ۸۵, ۵۶۶-۵۷۴.
- Mohd Arif, Z. (۲۰۱۳). Acoustic of mosque: the effect of roof shape on it's acoustic performance.
- Munteanu, C., Bogdan, D., Mihaela, M. L., Cobîrzan, N., Tămaş-Gavrea, D. R., & Babota, F. (۲۰۱۸). The acoustic properties of the lecture hall of the Faculty of Building Services in Cluj-Napoca. *Procedia Manufacturing*, ۲۲, ۳۳۱-۳۳۸.
- Naylor, G. M. (۱۹۹۳). ODEON—Another hybrid room acoustical model. *Applied acoustics*, ۳۸(۲-۴), ۱۳۱-۱۴۳.
- Oldham, D., & Elkhateeb, A. (۲۰۰۸). The Architectural Development of the Historic Masjids in Cairo and its Acoustical Impact. *Building Acoustics*, ۱۵(۳), ۱۹۷-۲۲۹.
- Othman, A. R., & Mohamed, M. R. (۲۰۱۲). Influence of Proportion towards Speech Intelligibility in mosque's praying hall. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, ۳۵, ۳۲۱-۳۲۹.
- Pena, M. L. C., Carballal, A., Rodríguez-Fernández, N., Santos, I., & Romero, J. (۲۰۲۱). Artificial intelligence applied to conceptual design. A review of its use in architecture. *Automation in Construction*, ۱۲۴, ۱۰۳۵۵۰.
- Robinson, P. W., Siltanen, S., Lokki, T., & Savioja, L. (۲۰۱۴). Concert hall geometry optimization with parametric modeling tools and wave-based acoustic simulations. *Building Acoustics*, ۲۱(۱), ۵۵-۶۳.
- Song, H., Ghaboussi, J., & Kwon, T.-H. (۲۰۱۶). Architectural design of apartment buildings using the implicit redundant representation genetic algorithm. *Automation in Construction*, ۷۲, ۱۶۶-۱۷۳.
- Sü, Z., & Yilmazer, S. (۲۰۰۸). The acoustical characteristics of the Kocatepe Mosque in Ankara, Turkey. *Architectural Science Review*, ۵۱(۱), ۲۱-۳۰.
- Terminology, A. (۲۰۰۶). American national standard. ANSI S۱, ۱-۱۹۹۴.
- Tervo, S., & Tossavainen, T. (۲۰۱۲). ۳D room geometry estimation from measured impulse responses. ۲۰۱۲ IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP),
- Xiao, J., & Aletta, F. (۲۰۱۶). A soundscape approach to exploring design strategies for acoustic comfort in modern public libraries: A case study of the Library of Birmingham. *Noise Mapping*, ۳(۱).
- Zhao, S., Qiu, X., Cheng, E., Burnett, I., Williams, N., Burry, J., & Burry, M. (۲۰۱۵). Sound quality inside small meeting rooms with different room shape and fine structures. *Applied acoustics*, ۹۳, ۶۵-۷۴.