

# Acoustic Study of Different Models of Sound-Absorbing Plates for Noise Reduction in The Passenger Terminal of Ahwaz International Airport

## ABSTRACT

**Background and Aim:** The interior of airport lounges is often exposed to a lot of noise, which can increase the risk to human health. Due to the dangers of high noise pollution for airport users, the present study was conducted to reduce noise pollution in the transit lounges of Ahwaz International Airport.

**Materials and Methods:** This is an interdisciplinary, applied study that used a combination of experimental, simulation, and case study methods. First, the acoustic status of Ahwaz International Airport was determined experimentally by measuring the amount of noise pollution during the test period (8 AM to 2 PM) by the Brüel & Kjær sound level meter (model 2260 B&K) in 12 places. Then, the sound-absorbing plates were tested with different geometric models. After proving the validity and reliability of the research, the experiments were performed by simulation using EASE 4.4 software.

**Results:** In this study, the noise level of the airport lounge was considered a dependent variable and four sound indices including Reverberation Time (RT; the main index), Indirect Sound Index (STI), total Sound Pressure Level (SPL), and auditory error coefficient (ALCONSE ) were evaluated according to the international standards ISO3382 and ISO 3382-1.

**Conclusion:** After the simulation, it was found that the use of raster pattern sound-absorbing plates (Model A in research) in walls and ceilings with different frequencies had the lowest sound pressure and the above-mentioned indices were at desirable levels. As a result, Model A had the greatest effect on reducing noise in the tested space.

**Keywords:** Acoustics, Flight lunge, Noise, Sound-absorbing plates, Reverberation time.

### Maryam Nikpour

MSc., Student of Islamic Architectural Engineering, Ahwaz Islamic Art University, Ahwaz, Iran.

### Omid Ragaee

\* Assistant professor, Department of Architecture, School of Architecture and Urban Design, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

(Corresponding Author):

Email: o.rahaei@sru.ac.ir

Received: 2020/10/21

Accepted: 2021/01/14

**Document Type:** Research article

► **Citation:** Nikpour M, Ragaee O. Acoustic Study of Different Models of Sound-Absorbing Plates for Noise Reduction in The Passenger Terminal of Ahwaz International Airport. *Iranian Journal of Research in Environmental Health*. Winter 2021; 6(4): 312-323.

## بررسی آکوستیکی مدل‌های مختلف صفحات جاذب صدا در ترمینال مسافری فرودگاه بین‌المللی اهواز

مریم نیک‌پور

کارشناس ارشد معماری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علوم و تحقیقات خوزستان، اهواز، ایران.

امید رهاهی

\* استادیار، گروه معماری، دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران.

(نویسنده مسئول):

پست الکترونیک:

Email: o.rahaei@sru.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۶

نوع مقاله: مقاله اصیل پژوهشی

### چکیده

**زمینه و هدف:** فضای داخلی سالن‌های فرودگاهی معمولاً با نوفه بسیار فراوانی روبه‌رو هستند که منجر به افزایش خطر برای سلامتی انسان می‌شود. با توجه به خطرات ناشی از آلودگی صوتی فراوان برای کاربران فرودگاه، مطالعه حاضر با هدف کاهش آلودگی صوتی در سالن ترانزیت فرودگاه بین‌المللی اهواز انجام شد.

**مواد و روش‌ها:** این مطالعه پژوهشی بین‌رشته‌ای و کاربردی تلقی می‌شود و روش انجام آن نیز ترکیبی از روش‌های تجربی، شبیه‌سازی و پژوهش موردی می‌باشد. بدین ترتیب که ابتدا با روشی تجربی، وضعیت آکوستیکی فرودگاه بین‌المللی اهواز با اندازه‌گیری میزان نوفه و آلودگی‌های صوتی در دوره آزمون توسط دستگاه صداسنج Brüel & Kjær مدل B&K ۲۲۶۰ در ۱۲ مکان به دست آمد. سپس صفحات جاذب صدا با مدل‌های مختلف هندسی مورد آزمون قرار گرفتند. آزمایشات پس از اثبات روایی و پایایی تحقیق، از طریق شبیه‌سازی و با استفاده از نرم‌افزار ایز EASE، نسخه ۴/۴ انجام شدند.

**یافته‌ها:** در این تحقیق میزان نوفه سالن فرودگاه به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد و چهار شاخص صوتی زمان واخنش (RT) (شاخص اصلی)، شاخص غیرمستقیم صدا (STI)، تراز فشار صدای کل (SPL) و ضریب خطای شنیداری (I) بر اساس استانداردهای بین‌المللی ISO 3382-1 و ISO 3382-2 بررسی شدند. **نتیجه‌گیری:** پس از شبیه‌سازی، مشخص شد که استفاده از صفحات جذب صوت الگوی شطرنجی (مدل A در تحقیق) در دیوارها و سقف‌ها با فرکانس‌های مختلف، کمترین فشار صدا را دارد و شاخص‌های بررسی شده فوق در سطح مطلوبی قرار دارند. در نتیجه، مدل A بیشترین تأثیر را در کاهش نوفه فضای آزمون دارد.

**کلید واژه‌ها:** آکوستیک، آلودگی صوتی، زمان واخنش، سالن پرواز، صفحات جاذب صدا، نوفه.

◀ **استناد:** نیک‌پور م، رهاهی الف. بررسی آکوستیکی مدل‌های مختلف صفحات جاذب صدا در کاهش نوفه در ترمینال مسافری فرودگاه بین‌المللی اهواز. *فصلنامه پژوهش در بهداشت محیط*. زمستان ۱۳۹۹؛ ۶: (۴). ۳۲۳-۳۱۲.

## مقدمه

گسترش فرودگاه‌ها و افزایش تعداد پروازهای داخلی و خارجی در اکثر کشورها، محققان و مهندسان را به دنبال راهی برای بهبود آرامش و آسایش استفاده‌کنندگان از آن واداشته است (۱). در این میان آلودگی صوتی یک مشکل زیست‌محیطی رو به رشد و یک تهدید جدی برای سلامتی می‌باشد (۲).

مطالعات نشان می‌دهد که سروصدای هواپیما اثرات نامطلوبی بر سلامتی عمومی انسان دارد (۱). هیوم و همکاران در مطالعه آماری در یک فرودگاه بزرگ انگلستان (۳) دریافتند که نوفه موضوعی است که نسبتاً نادیده گرفته شده است. جاب نشان داد که بین سطح صدا و شکایات رابطه مثبت و واضحی وجود دارد؛ مانند همه عوامل استرس‌زا بالقوه، تفاوت‌های فردی زیادی در پاسخ به نویز وجود دارد و آستانه شخصی هر فرد از شناسایی سروصداهای فرودگاه به‌عنوان عامل اذیت‌کننده، بسیار متفاوت خواهد بود (۴). در مطالعات دیگر تأثیر هزینه‌های اقتصادی سروصدا بررسی شده است. به‌عنوان مثال تامکینز و همکاران تأثیر نویز فرودگاه‌ها بر اقتصادهای محلی را ارزیابی و معایب فراوانی از نوفه بر این اقتصاد را بیان نمودند (۵).

در یک تحقیق اندازه‌گیری‌های صوتی برای ارزیابی تأثیر قرار دادن مواد متخلخل جاذب صدا در یک کلاس معمولی انجام شد. نتایج نشان داد که کارآمدترین موقعیت جذب مواد در صورت انتشار کم‌صدا در اتاق، در قسمت بالای دیواره‌های پشت و سمت دیوار است؛ بنابراین کارایی مواد متخلخل برای پراکندگی انرژی صدا به نفوذ صدا و پخش‌کننده‌های آویزان به سقف بستگی دارد. قرار دادن جاذب‌های متخلخل صوتی در مرزهای دیواره‌ها ممکن است منجر به استفاده از مقدار بیشتری ماده جاذب صدا برای دستیابی به زمان خاص طنین شود (۶). کمپبل و همکاران به‌طور آزمایشی تأثیر رفتارهای مختلف صوتی را در یک اتاق چندمنظوره که برای فعالیت‌های گفتاری استفاده می‌شود، مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که قرار دادن سقف جاذب معلق با زمینه با فرش یا بدون فرش، یک محیط صوتی غیرپراکنده ایجاد می‌کند که زمینه

صدا را تقویت می‌کند و موجب زمان‌های واخنش طولانی در محیط با فرکانس بالا می‌شود. یک روش کارآمد برای کاهش اثر میدان صوتی، افزودن صفحات دیواری جاذب صدا است (۷).

یک نتیجه مهم که در تمام مطالعات ارجاع شده مشترک است، این است که در صورت غفلت از سطوح انتشار، جاذب‌های صدا منجر به افزایش بیش از حد می‌شوند. ولی با استفاده از جاذب‌های صوتی، در واقع بازتاب‌های ناخواسته به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای سرکوب می‌شوند (۸، ۹). راسو و روژیرو از طریق شبیه‌سازی دو سناریوی مختلف جذب صدا را در یک کلاس با اندازه متوسط مقایسه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که قسمت فوقانی دیوار جلوی میز معلم (دیوار عقب) و تا حدی قسمت فوقانی دیوارهای جانبی (یک منطقه منعکس‌کننده مرکزی) را نیز پردازش کنند و مواد جاذب صدا را بر روی سقف (با توزیع شطرنجی صفحات) اضافه کنند و یک قسمت اصلی سقف را منعکس‌کننده صوت بگذارند (۱۰).

تغییر در میزان جذب‌کنندگی صوت، تغییرات قابل‌توجهی را در میزان زمان واخنش (RT) <sup>۱</sup> و تراز فشار صوت (SPL) <sup>۲</sup> به‌وجود می‌آورد که این تغییر در RT محسوس‌تر است (۱۱).

نحوه تقسیم‌بندی و چیدمان صفحات جذب‌کننده بر روی دیوارها در پژوهش‌های متعدد مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شده است که تخمین وضعیت کاهش تراز شدت صوت در فضا وابسته به ضریب جذب صفحات، ابعاد و محل نصب آن‌ها می‌باشد (۱۲). چیدمان شبکه‌ای و یک‌درمیان خطی صفحات جذب‌کننده بر روی دیوار، راهکارهای دیگری هستند که بر میزان جذب انرژی‌های صوتی مؤثر بوده و جذب صوت را افزایش می‌دهند (۱۳). چو و توی در پژوهشی دیگر، وضعیت قرارگیری صفحات جذب‌کننده در دیوار به نسبت موقعیت منبع صدا و زمان واکنش را به‌صورت تجربی مقایسه کردند و نتیجه گرفتند آنچه قابل توجه است عدم امکان تخمین وضعیت مشخصی برای موقعیت نصب صفحات جذب‌کننده بر روی دیوار به‌صورت صفحات کوچک

1. Reverberation Time  
2. Sound Pressure Level

می‌دهد (۲۰). بر اساس ادبیات مذکور، توجه به هندسه صفحات جذب صدا، بسیار ضرورت داشته و در بسیاری از پژوهش‌های مرتبط، از جمله غفاری (۲۱)، چو و همکاران (۱۴) و چو و همکاران (۱۳)، روش شبیه‌سازی با کمک نرم‌افزار EASE انجام شده است. لذا با توجه به نو بودن موضوع و ضرورت تحقیق، در این پژوهش به مقایسه رفتارهای مختلف صفحات جذب صدا در الگوهای هندسی (۲۲) متفاوت پرداخته شده است و سقف‌ها و دیوارهای آکوستیک چوبی به‌عنوان یکی از عناصر تأثیرگذار بر کاهش نوفه (مطابق ادبیات موضوع) مورد مطالعه قرار گرفته است. در ضمن شبیه‌سازی‌های این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار EASE انجام شد.

در این میان آلودگی صوتی سالن پرواز فرودگاه اهواز مورد توجه این مقاله است. بررسی نمودارهای شاخص زمان واخنش، در این فرودگاه نشان می‌دهد، عدم استفاده درست از صفحات جاذب صدا و استفاده از مصالح و فرم‌های غیراستاندارد و نامناسب، آلودگی صوتی قابل توجهی را در سالن داخلی فرودگاه منجر می‌شود؛ بر این اساس پژوهش حاضر با هدف اصلی کاهش نوفه سالن فرودگاه با استفاده از صفحات آکوستیکی بهینه شده (از لحاظ الگوهای هندسی) انجام شد که به‌صورت منفعل به جذب انرژی‌های صوتی بپردازد.

### روش کار

روش تحقیق در این پژوهش، با توجه به ماهیت بین‌رشته‌ای آن یک روش ترکیبی است که روش‌های تحقیق تجربی، شبیه‌سازی و پژوهش موردی را درگیر می‌نماید. در مرحله اول با استفاده از یک راهبرد تجربی، پس از بررسی نمونه موردی آزمون، متغیرهای مستقل تأثیرگذار، شناسایی و مدل‌های تحقیق بررسی شدند. در این پژوهش چهار شاخص صوتی<sup>۱</sup>، زمان واخنش (شاخص اصلی)، شاخص غیرمستقیم صدا (STI)<sup>۲</sup>، تراز فشار صوت (SPL) و ضریب خطای شنیداری (ALCONSE)<sup>۴</sup> به‌عنوان مورد متغیر بررسی شدند.

پراکنده، پانل‌ها و حتی صفحاتی با ارتفاع کل فضا است (۱۴). کیروز و همکاران در تحقیق خود در مورد سالن کلیسا اثبات کردند که RT پایین منجر به بیان بیشتر گفتار می‌شود (۱۵). عثمان و همکاران در تحقیقی به‌منظور سنجش میزان قابل درک بودن گفتار در چند نمونه سالن مسجد با تنظیمات مختلف و شیوه‌های طراحی، عملکرد آکوستیکی فضاهای مذکور را بررسی کردند. آنها با استفاده از شبیه‌سازی در نرم‌افزار ایز<sup>۱</sup> اثبات کردند که نسبت سالن‌های نماز در سطح فهم گفتار یعنی میزان RT فضا تأثیر می‌گذارد (۱۶). لکیز و همکاران در تحقیقات خود درباره تخمین سریع شاخص انتقال گفتار با استفاده از زمان طنین برای اتاق‌های آموزشی در اندازه‌های مختلف از پارامترهای زمان طنین و شاخص انتقال گفتار برای تعیین کیفیت صدای اتاق‌ها با توجه به کاربرد مورد نظر آنها استفاده کردند. آنها مقادیر زمان طنین و شاخص انتقال گفتار را با اندازه‌گیری از ۱۱ اتاق با اندازه‌های مختلف در دانشکده مهندسی دانشگاه پیزا آزمایش کردند و از نتایج تحلیل معادله‌ای که بهترین دقت را در پیش‌بینی داده‌های تجربی نشان داد، دو معادله جدید برای تخمین سریع شاخص انتقال گفتار ارائه دادند (۱۷). آیر و همکاران در پژوهش خود تأکید کردند که رفتار در اتاق‌های کوچک با فرکانس پایین، همیشه یک مسئله مهم است. آنها اندازه‌گیری‌های آزمایشی را ابتدا در محفظه استاندارد طنین‌انداز انجام دادند تا نتایج دقیق در محدوده زیر ۱۰۰ هرتز را ارائه دهند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که با وجود برخی نادرستی‌های کوچک، نتایج پیش‌بینی شده با نتایج اندازه‌گیری شده از نظر طیف و هم از نظر توزیع فضایی سطح فشار صوت، مطابقت دارند (۱۸).

مارشال و همکاران نشان دادند که تغییرات قابل توجهی در شاخص کاهش صدا، حتی در اتاق‌های بزرگ‌تر از ۱۰۰ متر مکعب، در فرکانس‌های کمتر از ۱۰۰ هرتز وجود دارد که بسته به روش آزمون مورد استفاده ظاهر می‌شود (۱۹). همچنین تعداد و موقعیت منابع و گیرنده‌ها نیز به میزان جزئی نتایج را تحت تأثیر قرار

2. Index Transmission Sound

3. Straits Times Index

4. Articulation Loss Of Consonants

1. EASE 4.4

صدا پس از قطع ناگهانی منبع صدا، ۶۰ دسی بل کاهش می‌یابد؛ بنابراین RT مخفف معمول استفاده از زمان واکنش است. استاندارد DIN 18041 مقادیر بهینه T را با توجه به فعالیت‌های مختلف در یک اتاق تعریف می‌کند.

طبق قانون Eq، زمان واژگونی با قانون ساین تخمین زده می‌شود که بر اساس آن، رابطه معکوس بین زمان واکنش و جذب صدا در سطح وجود دارد که به صورت زیر است:

$$T = 0.161 \frac{V}{A} \quad (1)$$

که در آن V حجم اتاق در مترمکعب و A میزان جذب صدا در کل اتاق و ضریب ۰/۱۶۱ با توجه به دمای ۵۵/۳ درجه سیلیسوس (در جایی که C = سرعت صدا است).

(۲)

$$A = (A_1 \cdot \alpha_1 + A_2 \cdot \alpha_2 + A_3 \cdot \alpha_3 + \dots + A_n \cdot \alpha_n)$$

در این رابطه منطقه‌ای است از یک سطح اتاق و ضریب جذب متریال صدا است.

RT متوسط از طریق محاسبات با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

(۳)

$$RT_{SPEECH} = \frac{RT150 + RT500 + RT1000 + RT2000 + RT4000}{5}$$

با توجه به تغییر در میزان جذب‌کنندگی صوت تغییرات قابل توجهی را در میزان RT (زمان واکنش) و SPL (تراز فشار صوت) به وجود می‌آورد که این تغییر در RT محسوس‌تر است (۱۱).

گوش انسان به دامنه بسیار وسیع انرژی صوتی یعنی از ۰/۰۰۰۲ میکروبار (۰/۰۰۰۰۲ پاسکال یا نیوتن بر مترمربع) تا ۲۰۰۰ میکروبار (۲۰۰ پاسکال یا نیوتن بر مترمربع) حساس است. بنابراین یک اشل لگاریتمی برای نمایش شدت صدا در نظر گرفته شده است. در این اشل الزام است که یک تراز مبنا به‌عنوان تراز فشار صوت در نظر گرفته شود. این تراز مبنا را ضعیف‌ترین صوتی انتخاب کرده‌اند که یک مرد جوان سالم می‌تواند بشنود. این تراز منطبق است بر تغییر فشاری مساوی ۰/۰۰۰۲ میکروبار (۰/۰۰۰۰۲ پاسکال یا نیوتن بر مترمربع) بر پرده گوش. یک بار مساوی است با فشار یک جو استاندارد (فشار جو در سطح دریا

ساختار کالبدی صفحات جذب صدا در سالن پرواز فرودگاه و الگوهای آن به‌عنوان متغیر مستقل و میزان نوفه در سالن پرواز تحت تأثیر عملکرد آکوستیکی مذکور به‌عنوان متغیر وابسته مورد مطالعه قرار گرفتند. به‌منظور بررسی نوسانات نوفه، از دستگاه صداسنج Brüel & Kjær مدل 2260 B&K استفاده شد. در این پژوهش سالن پرواز فرودگاه اهواز به‌عنوان نمونه موردی در نظر گرفته شد. فضاهای داخلی فرودگاه اهواز با استفاده از دیوارهای سبک و پارتیشن طراحی و اجرا شده است. در این فرودگاه به‌منظور کاهش آلودگی صوتی داخلی از تایل‌های آکوستیکی ناکارآمد و مصالح نامناسب مانند کامپوزیت و سنگ که نه‌تنها موجب کاهش آلودگی صوتی نشده است، بلکه باعث رفت‌وبرگشت بیشتر صدا نیز می‌شود، استفاده شده است. بنابراین نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق، در جامعه آماری سالن‌های پروازی فرودگاه‌های ایران قابل تعمیم است. در مرحله بعد به‌منظور تحلیل داده‌ها و نیز مداخله در معماری، از روش شبیه‌سازی استفاده شد. شبیه‌سازی‌ها با نرم‌افزار EASE، نسخه ۴/۴ صورت گرفتند. مدل‌های مختلف پانل‌ها به‌عنوان صفحات جذب، طبق دستورالعمل‌های توصیف شده در ادبیات تحقیق، بر روی سقف و دیوارهای سالن فرودگاه اعمال شد. به‌منظور بررسی شرایط صوتی بهینه، از زمان واکنش، وضوح و شاخص انتقال گفتار به‌عنوان پارامترهای معیار استفاده شد.

همان‌گونه که عنوان شد، از نرم‌افزار EASE برای شبیه‌سازی و محاسبه میزان جذب صوت در نمونه موردی استفاده گردید و پارامترهای زمان واکنش (RT)، شاخص غیرمستقیم صدا (STI<sup>1</sup>)، تراز فشار صوت SPL، ضریب خطای شنیداری (ALCONSE<sup>2</sup>) با توجه به روابط و فرمول‌های زیر مورد ارزیابی قرار گرفتند.

متناسب با استاندارد ISO 3382-1، زمان واکنش به‌عنوان شاخص غالب کیفیت صوتی یک اتاق برای موسیقی یا گفتار در نظر گرفته می‌شود. زمان واکنش زمانی است که سطح فشار

1. Speech Transmission Index
2. Sound Pressure Level
3. Articulation Loss of Consonants

## جدول ۱. تراز فشار صوت

SPL	محدوده شنوایی
SPL < 65	محدوده ایمن
65 < SPL ≤ 85	محدوده احتیاط
SPL > 85	محدوده خطر

## جدول ۲. شاخص غیرمستقیم صدا

شاخص غیر مستقیم صدا (STI) بر اساس استاندارد IEC ۶۰۲۶۸-۱۶	
STI value	کیفیت صدا
۰/۷۵-۱/۰۰	عالی
۰/۶۰-۰/۷۵	خوب
۰/۴۵-۰/۶۰	متوسط
۰/۳۰-۰/۴۵	ضعیف
۰/۰۰-۰/۳۰	بسیار ضعیف

STI برای ارزیابی قابل درک بودن گفتار استفاده می‌شود و یک عامل مشترک است. بر طبق استاندارد ضریب انتشار صوتی جدول ۲، STI بیش از ۰/۴۵ حد متوسط و اعداد بزرگ‌تر از ۰/۷۵ حد عالی این ضریب محسوب می‌گردد (۲۳).

خطای شنیداری به‌عنوان قابلیت فهم گفتار توسط شنونده توصیف می‌شود. اندازه‌گیری مطلق وضوح یک علم بسیار پیچیده است که مرتبط با علم آکوستیک روانی است. برای تخمین آن از فرمول زیر استفاده نموده و نتایج آن با توجه به جدول شماره ۳ مقایسه می‌شود:

$$\%AL_{\text{consg}} = (170/5405)^{(-5/419 \cdot STI)} \quad (۶)$$

$$STI = 1 - 0/46 \log(AL_{\text{consg}}) \quad (۷)$$

با توجه به جدول ۳، ضریب خطای شنیداری (ALCONSE) در بازه صفر تا ۱۷٪، وضعیت ایده‌آل خطای شنیداری را تعریف می‌کند (۲۳).

## جدول ۳. رابطه بین وضوح گفتار

value	(برداشت ذهنی شنونده)
۳-۰٪	عالی
۷-۳٪	خوب
۱۵-۷٪	متوسط
۳۳-۱۵٪	ضعیف
۱۰۰-۳۳٪	بسیار ضعیف

و دمای صفر درجه سانتی‌گراد که تقریباً معادل ۷۶ سانتی‌متر جیوه است). طبق تعریف این فشار معادل با صفر دسی‌بل است.

در تعیین تراز نشر صوتی و ارزیابی محیطی از SPL (تراز فشار صوت) استفاده می‌شود (جدول ۱). علت این امر در ماهیت فشار و نحوه انتشار صوت و بالأخص نحوه وارد شدن فشار بر پرده صماخ گوش می‌باشد. SPL تراز فشار صدای کل از فرمول زیر قابل محاسبه است:

سطح صدا فشار (SPL) و یا سطح فشار صوتی اندازه‌گیری لگاریتمی از فشار مؤثر صدا نسبت به یک مقدار مرجع است. سطح فشار صدا، که با  $L_p$  مشخص شده و واحد آن دسی‌بل است.

(۴)

$$L_p = 20 \log_{10} \left( \frac{p}{p_0} \right) \text{ dB}$$

1 Np is the neper.

$$1 \text{ B} = \left( \frac{1}{2} \ln 10 \right) \text{ Np is the bel.}$$

$$1 \text{ dB} = \left( \frac{1}{2} \ln 10 \right) \text{ Np is the decibel.}$$

$P_0$  فشار صوتی مرجع است که معمولاً برای سنجش فشار صدا در هوا استفاده می‌شود، است

(۵)

در این رابطه SPL برابر با تراز فشار صوت برحسب دسی‌بل، P به معنای مقدار فشار مؤثر اندازه‌گیری شده مورد نظر برحسب میکروبار یا پاسکال و  $P_0$  فشار مبنا که برابر ۰/۰۰۰۲ میکروبار یا ۰/۰۰۰۰۲ پاسکال انتخاب می‌شود. همان‌طوری که در فرمول ملاحظه می‌شود، یک فشار مبنا انتخاب شده است. فشار مبنا را ضعیف‌ترین صوتی انتخاب کرده‌اند که یک مرد جوان سالم می‌تواند بشنود. این فشار منطبق با تغییر فشاری مساوی ۰/۰۰۰۲ میکروبار در پرده گوش است. طبق تعریف، این فشار معادل صفر دسی‌بل است. در این اصل، دسی‌بل طوری تعریف شده است که هر ۲۰ دسی‌بل افزایش در فشار، معادل با یک است. برابر شدن تغییر فشار در پرده گوش به عبارتی اگر فشار صوت ۱۰ برابر شود، تراز فشار صوت به اندازه ۲۰ دسی‌بل افزایش خواهد یافت.

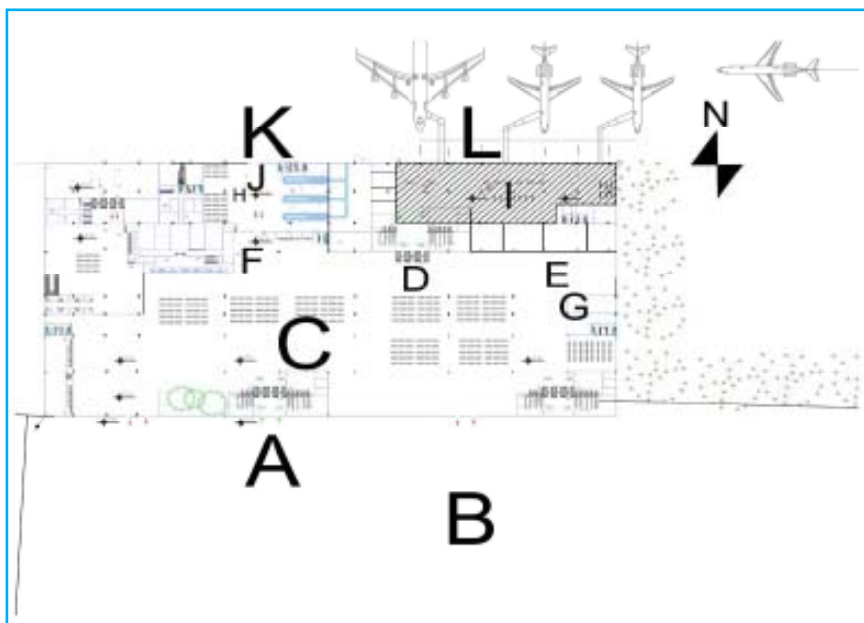
## یافته‌ها

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج، شبیه‌سازی‌ها در سالن پرواز نمونه موردی فرودگاه مورد آزمون تجربی انجام شد (شکل ۱). نتایج حاصل از برداشت‌های میدانی در جدول ۴ قابل مشاهده است. اندازه‌گیری‌ها در ۱۳ مکان در بحرانی‌ترین وضعیت آکوستیکی در یک بازه زمانی ساعت ۸ صبح تا ۱۴ ظهر در فرودگاه بین‌المللی

اهواز اندازه‌گیری شد؛ بنابراین طبق اعتبارسنجی به‌دست آمده، صحت نتایج شبیه‌سازی تأیید می‌شود. بر اساس نتایج داده‌ها، فرودگاه اهواز در وضعیت مناسب آکوستیکی برخوردار نیست؛ بنابراین طبق اعتبارسنجی به‌دست آمده، صحت نتایج شبیه‌سازی تأیید می‌شود.

جدول ۴. داده‌های برداشت تجربی فرودگاه بین‌المللی اهواز




ردیف	مکان اندازه‌گیری	حداقل Leq	حداکثر	فرکانس								
				dB ۱۰۰۰	dB ۱۲۵	dB ۲۵۰	dB ۵۰۰	dB ۱۰۰۰	dB ۲۰۰۰	dB ۴۰۰۰	dB ۸۰۰۰	dB ۱۰۰۰۰
۱	A	۸۶/۵	۸۴/۳	۵۱/۴	۵۹/۶	۶۶/۵	۷۰/۳	۷۰/۳	۷۰/۳	۶۸/۹	۶۷	۸۱/۸
۲	B	۸۲/۷	۸۱	۵۰/۸	۵۹/۸	۶۶/۶	۷۰/۱	۷۰/۵	۶۸/۹	۶۷/۴	۶۶/۲	
۳	C	۸۲/۸	۸۱/۲	۵۱/۲	۵۹/۷	۶۶/۷	۷۰/۳	۷۰/۳	۷۰/۹	۶۷/۶	۶۶/۳	
۴	D	۸۲/۹	۸۱/۴	۵۱/۲	۵۹/۸	۶۶/۷	۷۰/۵	۷۰/۴	۶۸/۹	۶۷/۱	۶۵/۹	
۵	E	۸۳/۱	۸۱/۴	۵۱/۲	۶۰	۶۶/۶	۷۰/۱	۷۰/۴	۶۸/۹	۷۳/۵	۶۶	
۶	F	۸۳/۱	۸۱/۵	۵۱/۲	۵۹/۷	۶۶/۵	۷۰/۴	۷۰/۳	۶۹	۷۳/۹	۶۶/۳	
۷	G	۸۳/۳	۸۱/۶	۵۱/۲	۶۰/۱	۶۶/۶	۷۰/۲	۷۰/۳	۶۸/۸	۷۴/۳	۶۷/۴	
۸	H	۸۳/۵	۸۱/۸	۵۱/۲	۵۹/۵	۶۶/۶	۷۰/۶	۷۰/۴	۶۸/۹	۷۴/۴	۶۹/۵	
۹	I	۸۳/۵	۸۱/۶	۵۱/۲	۵۹/۸	۶۶/۴	۷۰/۲	۷۰/۳	۶۸/۹	۶۹/۳	۷۴/۲	
۱۰	J	۸۳/۸	۸۱/۷	۵۱/۲	۶۰	۸۶۶	۷۰/۲	۷۰/۳	۶۸/۸	۶۸/۷	۷۴/۳	
۱۱	K	۸۳/۱	۸۱/۳	۵۱/۲	۶۰/۱	۶۶/۸	۷۰	۷۰/۳	۶۹/۹	۶۶/۹	۶۵	
۱۲	M	۸۲/۶	۸۰/۹	۵۱/۲	۵۹/۸	۶۶/۷	۷۰	۷۰/۳	۶۸/۷	۶۷	۶۶	

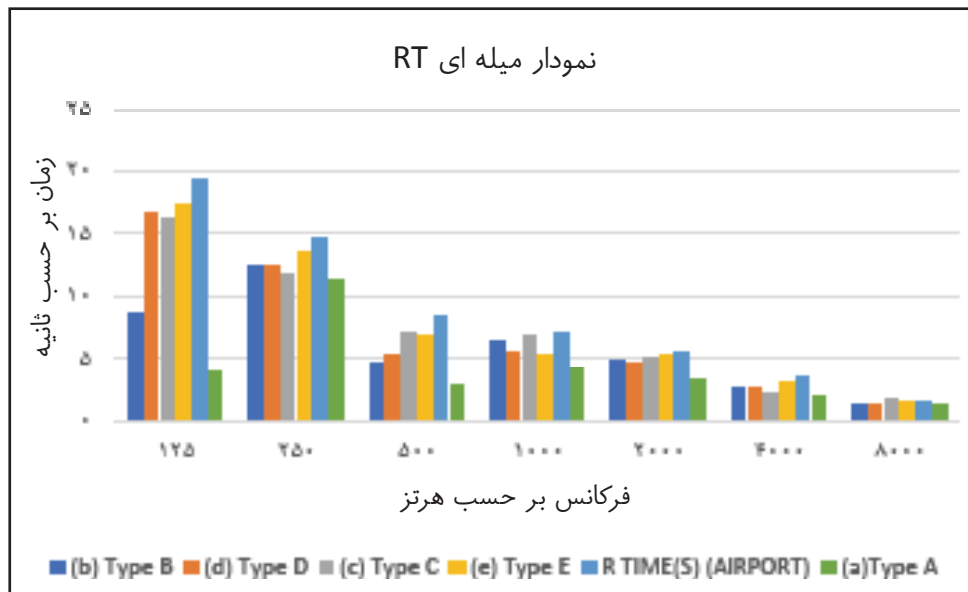


شکل ۱. فرودگاه بین‌المللی اهواز جانمایی فضاهای موجود در جدول

در این پژوهش از صفحات جذب صوت از خرده چوب بازیافتی که هم از نظر اقتصادی به صرفه باشد و هم با هندسه مربع زیبایی بصری ایجاد کند، استفاده شد. پی از انتخاب صفحات جذب به آزمون ۵ طرح مختلف پیکربندی‌ها از صفحات جذب بر روی دیوارها با الگو مربع (جدول ۵) پرداخته شده است. در این روش پیشنهادی از چندین مدل چیدمان مختلف صفحات جذب صوت بر روی دیوار با شرایط یکسان و (ابعاد صفحه جذب کننده مربع تک به ابعاد ۰٫۱۰۰ متر در ۰٫۱۰۰ متر) استفاده شده الگو صفحات جذب به این شرح می‌باشد: (جدول ۵) الگو A مدلی است با چیدمان شطرنجی صفحات جذب، الگو B مدلی با چیدمان عمودی بافاصله، الگو C مدل افقی بافاصله‌دار، الگو D مدل عمودی فشرده و الگو E مدل افقی فشرده صفحات جذب است پس از شبیه‌سازی الگوها در نرم‌افزار EASE داده‌ها در نمودار ۱ زمان واختمش در الگو ارائه شده و نیز وضعیت موجود فرودگاه که بارنگ سبز نشان داده شده جهت مقایسه در فرکانس‌ها ۱۲۵ هرتز تا ۴۰۰۰ هرتز در یک نمودار آورده شده است.

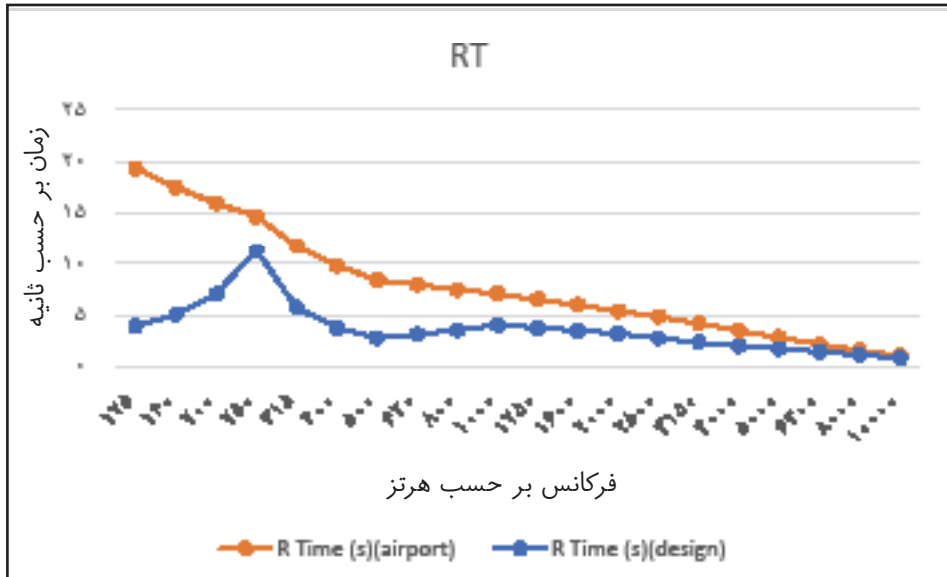
جدول ۵. معرفی مدل‌ها و تصاویر آن‌ها (اعداد بر حسب مترمربع)

					شکل
مدل شطرنجی (a)	مدل عمودی بافاصله (b)	مدل افقی بافاصله (c)	مدل عمودی فشرده (d)	مدل افقی فشرده (e)	مدل
A	B	C	D	E	الگو

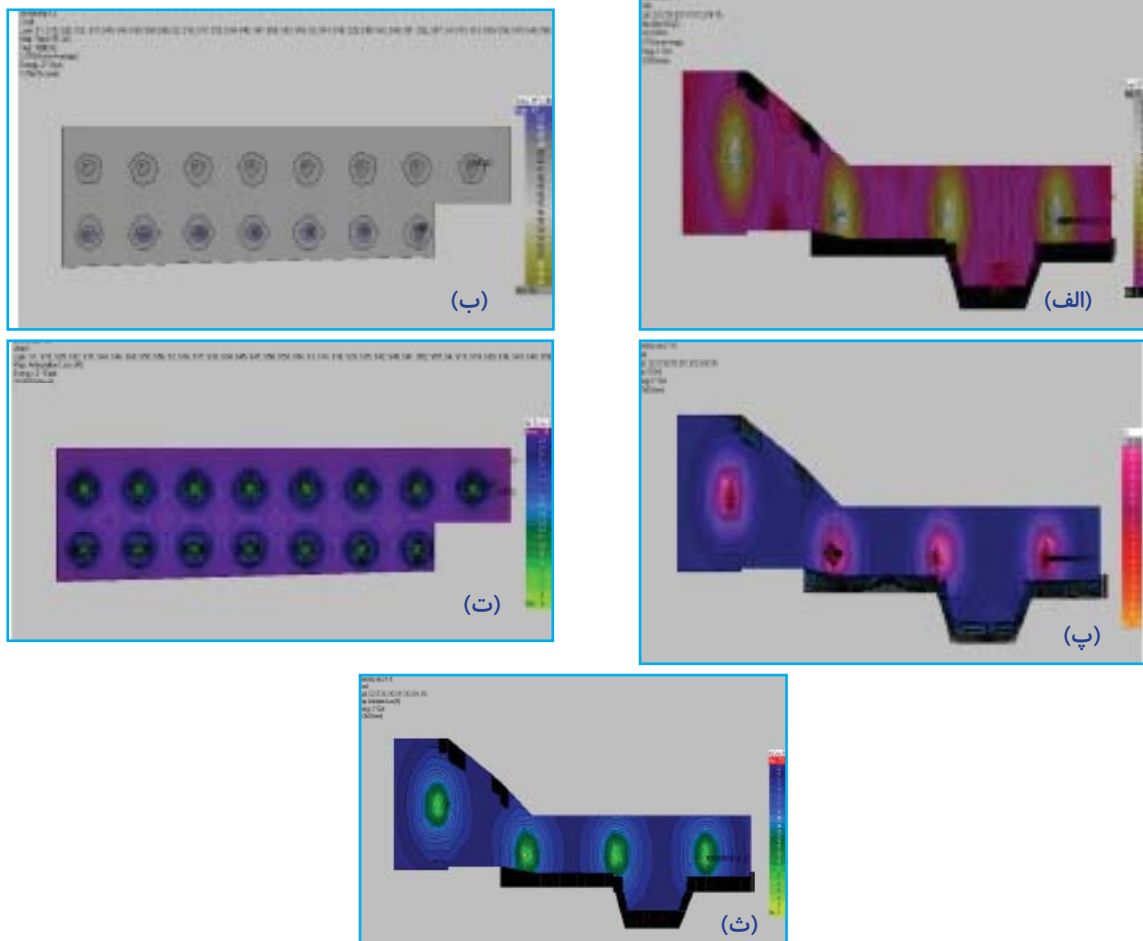


نمودار ۱. نمودار میله‌ای زمان واختمش در تایپ‌های مختلف در فرکانس‌های ۱۲۵-۴۰۰۰





نمودار ۲. مقایسه نمودار RT سالن وضع موجود و سالن طراحی شده



شکل ۲. (الف) SPL سالن طراحی شده (ب) SPL سالن وضع موجود فرودگاه (پ) سالن طراحی شده (ت) سالن وضع موجود (ث) سالن طراحی شده

## بحث

فضا می‌باشد. با این وجود نمودارها بر اساس فرکانس‌های ۳۰۰ هرتز تا ۴۰۰۰ هرتز بررسی می‌شود که نمودار زمان واخنتش با توجه به رابطه بین زمان طنین و فرکانس با توجه به حجم فضل در فرکانس‌های مورد نظر، نمودار مطلوبی را نشان می‌دهد. شکل شکل ۲-الف وضعیت زمان واخنتش وضع موجود فرودگاه اهواز و شکل ۲-ب زمان واخنتش پس از نصب صفحات جذب را نمایش می‌دهد.

در نمودار میله‌ای ۱، زمان واخنتش صفحات جاذب صدا الگو A (مدل شطرنجی)، در فرکانس ۳۰۰ دسی‌بل تا ۴۰۰۰ دسی‌بل، دارای عملکرد بهتری است در مقایسه با دیوارهای مدل E. D. C. B و AIRPORT (وضع موجود) زیرا کمترین میزان رفت و برگشت صدا را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار ۲ ملاحظه می‌کنید نمودار RT وضع موجود فرودگاه که بارنگ قرمز مشخص شده است نسبت به نمودار آبی که طرح پیشنهادی با صفحات الگو A (شطرنجی) است، مشخص شده میزان RT که اصلی‌ترین پارامتر پژوهش است از میزان موجود ماکسیمم ۱۹/۳۷ به ماکسیمم ۳/۹۸ کاهش یافته است و سیر نزولی زمان واخنتش در فرکانس‌های پایین به بالا این نمودار منطبق با آسایش صوتی است. RT متوسط سالن فرودگاه از طریق محاسبات با فرمول زیر به میزان ۴/۷۳ می‌باشد که برای سالن فرودگاه با حجم زیاد میزان معقولی را نشان می‌دهد:

(۸)

$$RT_{SPCNE} = \frac{RT500+RT500+RT1000+RT2000+RT4000}{5} = 4.73$$

میزان تراز فشار صدای کل (SPL) زیر ۶۵ دسی‌بل در محدوده ایمن قرار دارد (جدول ۱). همان‌طور که در شکل ۲-ب ملاحظه می‌شود، در نرم‌افزار شبیه‌سازی مقدار حداقل میزان تراز فشار صدای کل در سالن فرودگاه وضع موجود ۴۸ دسی‌بل و مقدار حداکثر میزان تراز فشار صدای کل به میزان ۶۷ دسی‌بل می‌باشد که در مقایسه با طرح سالن ارائه شده در شکل ۲-ب با صفحات جذب الگو A (شطرنجی) مقدار حداقل به دست آمده در طرح ارائه شده ۴۱ دسی‌بل و میزان حداکثر آن ۵۲ دسی‌بل می‌باشد که در محدوده SPL کمتر از ۶۵ دسی‌بل قرار گرفته است به میزان ۲۲٪ بهبود یافت.

در این پژوهش به منظور ارزیابی دقیق داده‌های تجربی حاصل از اندازه‌گیری‌ها و تغییرات در حوزه معماری داخلی، شبیه‌سازی بر روی نمونه موردی صورت گرفت. شبیه‌سازی این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار EASE انجام شد. هدف از شبیه‌سازی در این پژوهش، تأیید و تحلیل نتایج تجربی و یافتن بهترین فرم هندسی برای صفحات جاذب صدا با استفاده از شبیه‌سازی است. محدوده انتخاب شده جهت شبیه‌سازی سالن پرواز است که در شکل ۱ با هاشور مشخص شده است. در مطالعه حاضر میزان تراز صدا در تمامی ۱۲ مکان مورد نظر (در بازه زمانی ساعت ۸ صبح تا ۱۴ بعدازظهر) در مقایسه با استاندارد زیست‌محیطی بیش از حد استاندارد است. در این مطالعه بیشترین مقدار تراز معادل مواجهه صوت  $Leq^1$  اندازه‌گیری شده ۸۶/۵ دسی‌بل، بیشترین مقدار LA به میزان ۸۴/۳ دسی‌بل، کمترین میزان  $Leq$  برابر ۸۲/۶ دسی‌بل و کمترین میزان LA برابر ۸۰/۹ دسی‌بل بود. یافته‌های این مطالعه نشان داد که تراز فشار صوت معادل در تمامی ایستگاه‌های اندازه‌گیری و در تمامی بازه‌های زمانی چه در روز و چه در شب از حدود مجاز صدا بیشتر است.

در مرحله بعد، مدل‌سازی هندسی و شبکه‌بندی صفحات جاذب صدا طبق جدول ۵ مشخص تعیین گردید و پس از آن ۵ مدل هندسی صفحات جاذب صدا جهت شبیه‌سازی‌های مربوط به آکوستیک با استفاده از نرم‌افزار EASE بررسی گردید و داده‌های به دست آمده از آزمون‌های تجربی در جدول ۴ تحلیل شدند. از نظر تأثیر انواع مدل‌های پیکربندی بر نمودار RT در نمودار ۱، با توجه به اینکه نرم‌افزار EASE بیش از ۳۵۰۰۰ سطح را برای تحلیل نمی‌پذیرد، مدل انجام شده در اتوکد (Autocad) به صورت مدل ساده‌تری کشیده شده است و همچنین عدم وجود موانعی مانند ستون‌ها و دیوارهای کوتاه مانند پارتیشن‌بندی‌ها شانس بیشتری را برای رفت و برگشت صدا در فضای سالن ایجاد می‌کند که موجب بالا بودن میزان زمان واخنتش RT در فرکانس‌های پایین به دلیل اکو در

1. Level Sound Equivalent

طبق شبیه‌سازی‌های انجام شده، میزان شاخص غیرمستقیم صدا STI در سالن شبیه‌سازی شده با صفحات الگو A (شطرنجی) در بازه ۰/۶۳ تا ۰/۸۲ واحد متغیر است. بر طبق استاندارد IEC-6026816 که در جدول ۲ آمده است، STI بیش از ۰/۴۵ حد متوسط و اعداد بزرگ‌تر از ۰/۷۵، حد عالی این ضریب محسوب می‌گردد. بنابراین همان‌طور که در شکل ۴ سالن پرواز شبیه‌سازی با استفاده از صفحات الگو A (شطرنجی) از نظر انتشار صوت در وضعیت خوب و عالی قرار گرفته است، در شکل ۲-ث که وضع موجود فرودگاه اهواز است، شاخص اندازه‌گیری شده در بازه ۰/۳۴ تا ۰/۳۴ می‌باشد. در شکل ۶ که طرح پیشنهاد شده با سقف و دیوار الگو A است، در بازه ۰/۳ تا ۰/۲۲ قرار گرفته است. بازه صفر تا ۰/۱۷، وضعیت ایده‌آل خطای شنیداری را تعریف می‌کند (۲۳). نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نمودار میله‌ای ۱ نشان می‌دهد شرایط وضع موجود با نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی اندازه‌گیری صدا در محل منطبق بوده است و مشخص می‌شود شبیه‌سازی این پژوهش از اعتبار لازم برخوردار است.

### نتیجه‌گیری

هدف کل این مطالعه، به‌دست آوردن یک رویکرد سیستماتیک برای طراحی صوتی و کاربرد آگاهانه کاهش آلودگی صوتی در سالن‌های فرودگاه‌ها است. بخش اول شامل بازبینی گسترده‌ای از ادبیات بود که هدف آن، جمع‌آوری رهنمودهای مفیدی در مورد نحوه قرارگیری مطلوب صفحات صوتی در فضا و قسمت دوم شامل روش‌ها و نتایج مربوط به بررسی صوتی در فرودگاه بین‌المللی اهواز انجام شد. پس از آن شبیه‌سازی ۵ مدل پیکربندی‌های مختلف صفحات جاذب با هندسه مربع با یک نرم‌افزار ۴/۴ EASE انجام شد. طبق بررسی‌ها در نمودار ۱ مشخص شد که الگو A (مدل شطرنجی) بهترین عملکرد را برای چهار شاخص صوتی دارد. زمان واخنش (RT) (شاخص اصلی) از میزان ماکسیمم ۱۹/۳۷ به مقدار ماکسیمم ۳/۹۸ کاهش یافت که میزان درصد پیشرفت در کاهش RT برابر ۷۹٪ می‌باشد. شاخص غیرمستقیم صدا میزان حداکثر ضریب انتشار صوتی STI

۰/۸۵ است که در محدوده عالی طبق استاندارد IEC-6026816 در جدول ۲ قرار دارد. (STI)، تراز فشار صدای کل (SPL) کاهش قابل توجهی پیدا کرد و از میزان حداکثر تراز فشار صدای کل SPL به میزان ۲۲٪ بهبود یافت و زیر ۶۵ دسی‌بل و در محدوده ایمن قرار گرفت (جدول ۱)؛ و ضریب خطای شنیداری (I) میزان کاهش ۱۲٪ را نشان داد (جدول ۳). همان‌طور که گفته شد، چنانچه ۳ شاخص تعریف شده در یک محیط آکوستیکی در بازه استاندارد قرار بگیرند، میزان تراز نوفه و وضوح گفتار در حد آسایش انسانی خواهند بود. بر اساس آنچه در نتایج آمده است، مشخص شد هندسه صفحات جاذب می‌تواند تأثیرات بسیاری بر عملکرد صوتی و پخش صوت در داخل سالن فرودگاه ایجاد نماید. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی در سالن فرودگاه، استفاده از مواد جاذب در سقف و دیوار توصیه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که شرایط طراحی شده با استفاده از روش پیشنهادی می‌تواند با موفقیت، قدرت انتقال نویز را کاهش دهد. با این حال علاوه بر در نظر گرفتن راهکار اجرایی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت، می‌توان با مطالعه دقیق‌تر بر روی دیگر عناصر کالبدی شکل‌دهنده فضاها و توجه به ابعاد و جانمایی آن‌ها در طراحی، شرایط کیفیت صدا را در سالن داخلی فرودگاه به‌صورت قابل توجهی ارتقاء داد.

### ملاحظات اخلاقی

نویسندگان کلیه نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. همچنین هرگونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می‌کنند

### تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد بوده که با همکاری فرودگاه بین‌المللی اهواز انجام شد. بدینوسیله از کسانی که در انجام این مطالعه همکاری داشتند، تشکر و قدردانی می‌شود.

## References

1. Farshidian Far A, Oliazadeh P. Noise pollution from flying and its effects. *Mechanical Engineering*. 2012;20(76):16-22.
2. Rehan RM. The phonic identity of the city urban soundscape for sustainable spaces. *HBRC Journal*. 2016;12(3):337-49.
3. Hulme K, et al. A Pilot Study into Complaints Caused by Aircraft Operations: Noise level and time of day. 1st International Conference Environmental Capacity at Airports; Manchester Metropolitan University 2001.
4. Job RFS. The influence of subjective reactions to noise on health effects of the noise. *Environment International*. 1996;22(1):93-104.
5. Tomkins J, Topham N, Twomey J, Ward R. Noise Versus Access: The Impact of an Airport in an Urban Property Market. *Urban Studies*. 1998;35:243-58.
6. Cucharero Moya J, Hänninen T, Lokki T. Influence of Sound-Absorbing Material Placement on Room Acoustical Parameters. *Acoustics*. 2019;1:644-60.
7. Campbell C, Sallenhag H, Nilsson E, Arvidsson E. Optimising the Acoustic Design for Multi-purpose Rooms Used for a Variety of Speech Communication Activities: *Universitätsbibliothek der RWTH Aachen*; 2019.
8. Choi Y-J. Effects of periodic type diffusers on classroom acoustics. *Applied Acoustics*. 2013;74(5):694-707.
9. Nijs L, Rychtarikova M. Calculating the Optimum Reverberation Time and Absorption Coefficient for Good Speech Intelligibility in Classroom Design Using U50. *Acta Acustica united with Acustica*. 2011;97:93-102.
10. Russo D, Ruggiero A. Choice of the optimal acoustic design of a school classroom and experimental verification. *Applied Acoustics*. 2019;146:280-7.
11. Chourmouziadou K, Kang J. Acoustic evolution of ancient Greek and Roman theatres. *Applied Acoustics*. 2008;69(6):514-29.
12. Dragonetti R, Opdam R, Napolitano M, Romano R, Vorlaender M. Effects of the Wave Front on the Acoustic Reflection coefficient. *Acta Acustica united with Acustica*. 2016;102:675-87.
13. Cho WH, Ih J-G, Katsumata T, Toi T. Best practice for positioning sound absorbers at room surface. *Applied Acoustics*. 2018;129:306-15.
14. Cho W-H, Ih J-G, Toi T. Positioning actuators in efficient locations for rendering the desired sound field using inverse approach. *Journal of Sound and Vibration*. 2015;358:1-19.
15. Sant'Ana D, Zannin P. Acoustic evaluation of a baroque church through measurements, simulation, and statistical analysis. *Canadian Acoustics - Acoustique Canadienne*. 2014;42:3-21.
16. Othman AR, Harith CM, Ibrahim N, Ahmad SS. The Importance of Acoustic Design in the Mosques towards the Worshipers' Comfort. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2016;234:45-54.
17. Leccese F, Rocca M, Salvadori G. Fast estimation of Speech Transmission Index using the Reverberation Time: Comparison between predictive equations for educational rooms of different sizes. *Applied Acoustics*. 2018;140:143-9.
18. Ayr U, Martellotta F, Rospi G. A method for the low frequency qualification of reverberation test rooms using a validated finite element model. *Applied Acoustics*. 2017;116:33-42.
19. Marshall S, Lee D, Cabrera D. Comparison of low frequency sound insulation field measurement methods. *Proceed of acoustics; Christchurch, New Zealand 2006*. p. 179-85.
20. Dijkmans A, Vermeir G. Numerical Investigation of the Repeatability and Reproducibility of Laboratory Sound Insulation Measurements. *Acta Acustica united with Acustica*. 2013;99:421-32.
21. Ghaffari A. Improving the acoustic conditions in mosques with an analytical attitude of speech clarity in mosques of Qajar period in Tabriz with the approach of the effect of bricks and brick decorations on the Reverberation Time. *Tehran: Iran University of Science and Technology*; 2014.
22. 11th International Conference Interdisciplinarity in Engineering. *INTER-ENG 2017; Tirgu Mures, Romania*.
23. Crocker MJ. *Encyclopedia of Acoustics*. 1. New York Wiley; 1997.