

## محاسبه افت تراز فشار صدا و تحلیل بسامدی اتاق آزمون موتورهای هوافضایی

بهروز شهریار \*

مجتمع دانشگاهی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر  
دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۶، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۳

## چکیده

آزمون موتورهای هوافضایی منبع آلودگی صوتی است و تعیین مشخصات صوتی بسامد پایین اتاق آزمون، جهت کنترل بهینه میدان صوتی و کاهش تراز فشار صدا و آلودگی نقش بسزایی دارد. در مطالعه حاضر افت تراز فشار صدای متوسط به واسطه ساخت اتاق آزمون طبق استاندارد ایزو ۱۴۰ به طور عددی پیش‌بینی می‌شود. برای حل معادلات انتشار صوتی، الگوسازی تماس بین سازه و سیال، کوپلینگ دینامیکی سازه و سیال انجام شده و برای محاسبه توزیع انرژی صوتی در سیال و سازه، از نرم‌افزار عنصر متناهی آباکوس استفاده می‌گردد. اتاق‌هایی با ابعاد و عایق‌های مختلف و شرایط تکیه‌گاهی ساده و گیردار الگوسازی و افت تراز فشار صدای متوسط هر الگو محاسبه و مقایسه می‌شوند. ابعاد بهینه اتاق تعیین شده، سپس استقلال از مش بررسی و نتایج با استفاده از داده‌های تجربی صحت‌سنجی می‌گردد. مقادیر افت تراز فشار صدای اندازه‌گیری شده برای اکتاو باند یک چهارم گزارش شده است. برای اطمینان از عدم بازآوایش (تشدید) در اثر نیروی صوتی، تحلیل بسامدی سازه انجام و مشخص گردید که اتاق آزمون طراحی شده آلودگی صوتی را از بین می‌برد. بهینه‌سازی اندازه اتاق نشان می‌دهد که بهترین شعاع اتاق آزمون برای محدوده بسامدی ۹۰ تا ۱۵۰ هرتز شعاع ۲/۲۵ متر است.

**کلیدواژه‌ها:** صوتیات، افت فشار صدا، تحلیل بسامدی، عایق صوتی، اتاق آزمون موتورهای هوافضایی.

## ۱. مقدمه

صوت‌شناسی علم بسیار قدیمی است. فیثاغورث<sup>۱</sup> (۵۰۰ ق.م.) رابطه کیفی بین طول یک تار با زیربوم شدن صدای تولیدی آن را می‌دانست. در ۱۶۴۳، توریسلی<sup>۲</sup> به روش تجربی خلأ را اثبات کرد و نشان داد امواج صوتی در خلأ منتشر نمی‌شود [۱]. حدود سال ۱۹۶۵ بود که رایانه‌ها راه خود را از طریق تولید و پردازش امواج مؤثر در تومورشناسی صوتی<sup>۳</sup>، فن‌آوری مکالمه و زبان‌شناسی، صداهای اطراف، فن‌آوری دوگوشی، نمایش صوتی، تلفن همراه، و موارد دیگر در صوت‌شناسی باز کردند [۱]. در سال ۱۹۸۴ اوکریگ و همکاران صدای اتاق آزمون کنترل

را ضبط کردند [۲]. در سال ۱۹۸۹ جان استوریک از فن‌آوری پخش امواج صوتی در بسیاری از طرح‌هایش استفاده نمود [۲]. در سال ۱۹۹۰ تالارک در ادامه تحقیقات ابتدایی خود سامانه آرپی‌جی را اختراع نمود. این تحقیقات نشان دادند می‌توان از فن‌آوری پخش صوتی در دیواره داخلی دیوارهای چندلایه استفاده نمود. یکی از استفاده‌های این سامانه در کلیسای مسیحیان لوپس‌ویل<sup>۴</sup> با ۹۰۰۰ نفر ظرفیت است [۲]. هیگینز در سال ۲۰۱۲ عبور جریان هوا و انتقال صدا از مجراهای ویژه تهویه مطبوع ساختمان‌ها را مورد مطالعه قرار داد [۳]. پلنت پوینگ و همکاران در سال ۲۰۱۲ انتقال صدا از روزنه‌ها و پنجره‌های تعبیه شده بین دو اتاق را به کمک تحلیل مودال پیش‌بینی نمودند [۴]. آن‌ها توزیع فشار در هر دو

\* نویسنده پاسخگو: Shahriari@mut-es.ac.ir

<sup>1</sup> Pythagoras<sup>2</sup> Torricelli<sup>3</sup> Acoustical tomography<sup>4</sup> Louisville

سال ۲۰۱۶ محفظه‌ای برای انجام آزمون صوتی جهت استخراج مشخصات صوتی اتاق‌ها و سالن‌های بزرگ طراحی کردند [۱۱]. قبل از آن انجام آزمون صوتی برای محفظه‌های بزرگ نیازمند ساخت آزمایشگاه‌های بزرگ بود. آن‌ها به منظور سهولت مونتاژ، ديمونتاژ و جابجایی، محفظه مذکور را از جنس چوب و تخته‌های چندلایه ساختند. حجم این محفظه حدود ۱ متر مکعب است. ایلبارا در سال ۲۰۱۶ ائتلاف انرژی صوتی موتور اتومبیل به واسطه کاپوت جلوی ماشین را مشخصه‌یابی و ارزیابی نمود [۱۲]. او هم‌چنین روش تجربی برای این اندازه‌گیری ارائه کرد. در این روش او با سامانه برقا صوتی<sup>۲</sup> و روش صافی (فیلتر) معکوس صدا، ائتلاف انرژی صوتی موتور را اندازه‌گیری کرد. روزن و همکاران در سال ۲۰۱۶ افت تراز فشار صدا را در بسامدهای کمتر از ۵۰ هرتز به روش ویبرومتر لیزری دوپلر با توجه به استاندارد ایزو ۱۴۰ اندازه‌گیری نمودند [۱۳]. آن‌ها برای استخراج توزیع تراز شدت صدا در شرایط تکیه‌گاهی مختلف، اتاق آزمون صوتی را با این روش شبیه‌سازی عددی نمودند. کیم در سال ۲۰۱۶ نسبت انتشار امواج صوتی و انتقال صدا از میان تیرهایی با هندسه پیچیده را با استفاده از دامنه امواج صوتی به روش عنصر متناهی و مسائل شرایط مرزی مورد مطالعه قرار داد [۱۴]. استفاده از روش دامنه امواج موجب سهولت و کاهش زمان حل معادلات ارتعاشی-صوتی می‌شود. ویقنچس و همکاران در سال ۲۰۱۶ افت تراز فشار صدا در پنل‌های بالگرد را اندازه‌گیری نمودند [۱۵]. آن‌ها اندازه‌گیری‌های خود را برای پنل با شرایط تکیه‌گاهی ساده و درگیر انجام دادند. سپس پنل مورد نظر را بین دو اتاق نصب و افت تراز فشار صدا متوسط دو طرف آن را اندازه‌گیری کردند. هدف آن‌ها از چنین آزمایش‌هایی ارائه روش مدونی برای اندازه‌گیری افت تراز فشار صدا به واسطه پنل‌های بالگرد بود.

محاسبه تراز فشار صدا و تحلیل‌های مربوطه در کیفیت ساخت قطعات صنعتی و هم‌چنین راحتی محیط و افزایش عملکرد انسان‌ها نیز کاربرد دارد. کاتالین در سال ۲۰۱۸ برخی از جنبه‌های مربوط به ویژگی‌های صدا، چگونگی

اتاق را با روش دیریکلت-نیومن محاسبه کردند. آندره پراتو و همکاران طی مطالعات صورت گرفته در سال ۲۰۱۳، مسائل مختلف و راه‌حل‌های موجود برای آزمایشگاه‌های کوچک با حجمی نزدیک به ۵۰ تا ۸۰ متر مکعب در محدوده بسامدهای پایین را مرور کردند [۵]. آن‌ها روش‌های موجود در تحلیل‌های مودال سامانه‌های اتاق و پارتیشن اتاق را نیز مورد مطالعه قرار دادند. ناوان گارگ در سال ۲۰۱۳ افت انرژی صوتی به واسطه انتقال از یک محیط به محیط دیگر که توسط پارتیشن‌هایی از یکدیگر جداسازی شده‌اند را با روش تک عددی اندازه‌گیری نمود [۶]. او در محدوده بسامدی ۵۰ هرتز تا ۵ کیلو هرتز افت تراز فشار صدای (تی‌ال)<sup>۱</sup> متوسط برای جاذب و عایق‌های گوناگون اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه نمود. میشل اولاندر در سال ۲۰۱۳ روش‌ها و مواد مورد استفاده در معماری ساختمان‌ها برای پیش‌بینی مشخصات صوتی ساختمان را شرح داد [۷]. در سال ۲۰۱۵ مصطفی اسدی و همکاران اثرات تغییر خواص غیرصوتی فوم‌های پلی‌اتیلن روی ضریب جذب صدای آن‌ها را بررسی نمودند [۸]. معادلات بایوت و روش انتقال ماتریس‌ها برای تعیین ضریب جذب صدای فوم‌ها بکار گرفته شدند. چالش اصلی مطالعات صورت گرفته وابستگی خواص مختلف غیرصوتی به یکدیگر و دشواری اندازه‌گیری اثر هر خاصیت بر میزان جذب صدا به صورت جداگانه بود. میگ مک در سال ۲۰۱۵ مروری بر روش‌های مورد استفاده در الگوسازی صوتی ساختمان‌ها انجام داد [۹]. این روش‌ها شامل الگوسازی‌های عددی، الگوسازی‌های تحلیلی و الگوسازی‌های تجربی می‌شوند. این مطالعات نشان دادند الگوهای عددی و تجربی در صحت‌سنجی الگوهای تحلیلی بکار می‌روند. در بیش‌تر مطالعات انجام‌شده انتقال صدا در فضا، در مواد جامد و در جاذب‌ها بررسی می‌شود. اوا سالا در سال ۲۰۱۶ کلاس را به عنوان میدان صوتی در نظر گرفته و اثرات صوتی میدان صوتی را بر شنوندگان بررسی نموده است [۱۰]. او امواج صوتی کلاس درس هنگام فعالیت‌های گوناگون را اندازه‌گیری و با مقادیر استاندارد مقایسه نمود. السا پایولت و همکاران در

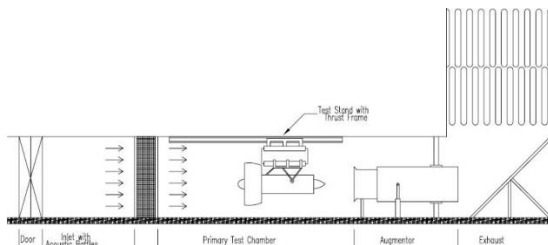
<sup>2</sup> Electroacoustic<sup>1</sup> TL

می‌شود.

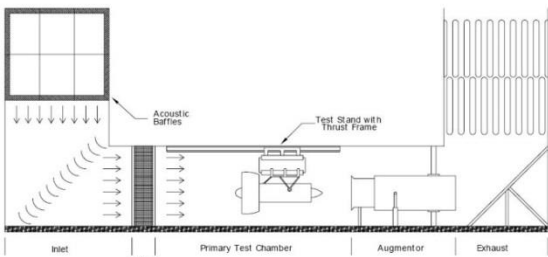
- میدان فشار استاتیک اطراف موتور تا اندازه زیادی با شرایط جریان آزاد حالت واقعی مطابقت داشته باشد. پیش‌رانش (تراست) خوانده شده باید برای این اثر تصحیح شود. هر چه این اثر کم‌تر باشد دامنه خطا موجود کم‌تر است.

- توزیع فشار استاتیک روی سطح خروجی نازل اجازه تعیین دقیق مقدار متوسط آن را می‌دهد. در غیر این صورت اندازه‌گیری پیش‌رانش با خطا همراه خواهد بود و ممکن است عملکرد موتور تحت تاثیر قرار بگیرد.

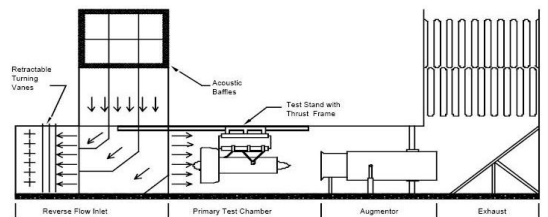
- آلودگی صوتی و محیطی باید مطابق استانداردهای اتاق آزمون باشند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱ پیکربندی‌های مختلف اتاق آزمون، (الف) نوع L؛ (ب) نوع U؛ (ج) نوع ورودی جمع‌شونده [۱۹].

در این تحقیق اتاق آزمونی برای آزمون موتورهای هوافضایی طراحی شد. این اتاق دارای الزامات آزمون موتور جت می‌باشد که یکی از این الزامات نیاز به ایجاد

بسیار سطح فشار صدا و نحوه استفاده از تجزیه و تحلیل صدا برای تشخیص عیب در قطعات را مورد بررسی قرار داد [۱۶]. ژانگ و همکاران براساس یک مطالعه تجربی به شناسایی تأثیر صداهای پس زمینه، ارزیابی صدا و تأثیر آن بر عملکرد کودکان در مدرسه پرداختند [۱۷]. یوتینگ و همکاران برای مطالعه ارتباط بین نوفه و لرزش در طی خشک کردن آلیاژ آلومینیوم، یک سامانه جذب هم‌زمان نوفه و لرزش ایجاد نمودند. آن‌ها براساس داده‌های تجربی، تأثیر سه مؤلفه فرکانسی را روی نوفه و ارتعاش فرز مورد تحلیل قرار دادند [۱۸].

عایق‌کاری صوتی بسامد پایین کاربردهای مهندسی فراوانی دارد. امروزه به علت گسترش وجود منابع آلودگی صوتی بسامد پایین، اهمیت بررسی و مطالعه این منابع آشکارتر شده است. صدای ناشی از ترافیک، موسیقی، وسایل صنعتی و غیره از جمله این منابع هستند. استاندارد ایزو شرایط اندازه‌گیری و شبیه‌سازی افت تراکسیل اتاق‌ها در بسامدهای پایین را مشخص کرده است.

آزمون موتورهای هوافضایی امری ضروری در روند طراحی و تولید، تعمیر و نگهداری و بهینه‌سازی آن‌ها است. نوفه ناشی از استارت و کار این موتورها امری نامطلوب بوده و محققان همواره به دنبال کاهش آن هستند. یک راه‌کار ایجاد اتاق آزمون و سعی در عایق کردن دیواره‌ها در کنار تامین الزامات آزمون موتورها می‌باشد. اتاق آزمون سطح زمین با توجه به نحوه ورود جریان (افقی یا عمودی) دارای سه پیکربندی مختلف اتاق آزمون نوع L، اتاق آزمون نوع U، اتاق آزمون نوع جمع‌شونده می‌باشند. شکل ۱- الف، ب و ج، به ترتیب این نوع اتاق آزمون‌ها را نشان می‌دهند.

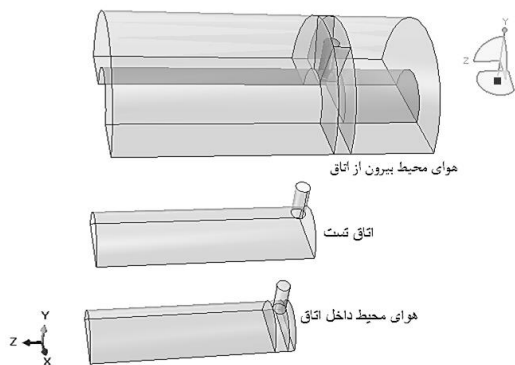
الزامات طراحی اتاق آزمون عبارتند از [۱۹]:

- جریان ورودی موتور باید یکنواخت باشد. وجود هر نوع آشفتگی روی عملکرد موتور اثر می‌گذارد که باعث بروز خطا در اندازه‌گیری دبی جرمی می‌شود.

- هیچ مکش مجددی از گاز گرم خروجی وجود نداشته باشد. اگر این عمل اتفاق بیفتد نه تنها سبب اثر نیم‌رخ (پروپیل) دمای ورودی آشفته حاصله بر عملکرد موتور می‌شود بلکه اندازه‌گیری دقیق دمای ورودی که در مورد عملکرد موتور مورد آزمون ضروری است، غیر ممکن

بسامدی ۹۰ تا ۱۵۰ هرتز پاسخ‌های نزدیک به واقعیت می‌دهد [۲۱، ۲۵].

سازه اتاق آزمون با عناصر پوسته‌ای، مرتبه اول، همسانگرد، خطی و چهار گرهی در نرم‌افزار آباکوس الگوسازی شده است. نیروی صوتی اعمال شده معادل تراز فشار صدا بین ۱۱۰ تا ۱۳۰ دسی‌بل ایجاد می‌کند. با اعمال این نیرو در سازه فولادی و عایق صوتی پشم‌شیشه فقط تنش‌های الاستیک ایجاد می‌شود. به منظور ایجاد جریان و انتقال انرژی صوتی و انرژی ارتعاشی بین سازه و سیال (فایس‌آی)<sup>۱</sup>، تمامی عناصر سطح سازه و هوا (سیال) با استفاده از قید تی‌آی‌آی<sup>۲</sup> به یکدیگر متصل شده‌اند. منبع صدا با قدرت تولید ۱۲۰ دسی‌بل صدا در جلوی اتاق آزمون الگوسازی شده است.



شکل ۱. هندسه و الگوی عنصر متناهی مورد استفاده در شبیه‌سازی صورت گرفته.

مشخصات مکانیکی مواد مورد استفاده در الگوسازی‌های صورت گرفته در جدول ۱ بیان شده‌اند. ضریب جذب فولاد در نرم‌افزار آباکوس با مفهوم مقاومت ظاهری مختلط بیان می‌شود. شرایط تکیه‌گاهی مورد استفاده در این مسئله از چالش‌های اصلی به شمار می‌رود. در این مقاله برای هر جنس عایق از دو شرط تکیه‌گاهی ساده و شرط تکیه‌گاهی گیردار استفاده شده است. با این شرایط تکیه‌گاهی می‌توان کم‌ترین و بیش‌ترین افت تراز فشار صدا متوسط، برای هر عایق و هر ضریب جذب صدا را بدست آورد [۲۶]. در مقاله حاضر تحلیل دینامیکی حالت پایدار با استفاده از حل گر مستقیم آباکوس برای محاسبه پاسخ خطی سامانه

گشودگی‌های مناسب جهت خروج محصولات پرسرعت احتراق در کنار کاهش نوفه است. از طرف دیگر حضور دیواره‌های اتاق آزمون و سطوح آن‌ها و گشودگی‌ها نباید اثری بر عملکرد موتور جت داشته باشد. تامین این الزامات و لحاظ آن‌ها در شبیه‌سازی، از جنبه‌های نوآوری این تحلیل است.

در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار حل عددی آباکوس اندازه افت تراز فشار صدا به واسطه دیواره‌های اتاق آزمون به صورت عددی محاسبه شده و صحت‌سنجی شبیه‌سازی صورت گرفته با استفاده از مطالعات پاپادوپولوس انجام شد [۲۰-۲۱]. مطالعات اخیر نشان دادند می‌توان تراز فشار صدای متوسط محیط اطراف محل آزمون موتورهای هوافضایی را به اندازه‌های توصیه شده در استاندارد رساند.

## ۲. مواد و روش‌ها

برای محاسبه عددی افت تراز فشار صدای متوسط، شبیه‌سازی عنصر متناهی آزمایش‌ها مطابق با استاندارد ایزو انجام شد [۲۲]. با توجه با استاندارد ایزو برای شبیه‌سازی اتاق آزمون موتورهای هوافضایی باید هوای داخل اتاق، هوای خارج از اتاق و بدنه اتاق و هم‌چنین ضرایب جذب سطوح مختلف شبیه‌سازی شوند. به منظور داشتن پاسخ‌های دقیق‌تر در محدوده بسامدی پایین، میدان صوتی درون و خارج از اتاق‌ها، از نوع میدان صوتی پخش در نظر گرفته شدند. شکل شماره ۱ اجزای مختلف الگوی مورد استفاده را نشان می‌دهد. الگوسازی به نحوی انجام شده است که در محدوده بسامدی ۹۰ تا ۱۵۰ هرتز، ۱۰ بسامد مربوط به اکتاو باند در نظر گرفته شوند. هوای داخل و خارج با استفاده از عنصرهای صوتی، مرتبه اول، سه‌بعدی، هشت نقطه‌ای، مکعبی و با طول مشخصه ۰/۳ متر شبیه‌سازی شدند. برای طول مشخصه در نظر گرفته شده حداقل هشت گره عنصر متناهی در هر طول موج، برای محدوده بسامدی ۹۰ تا ۱۵۰ موجود است [۲۳-۲۴]. چگالی و مدول بالک صوتی هوا به ترتیب ۱/۲ کیلوگرم بر مترمکعب و ۱۴۰,۰۰۰ نیوتن بر متر مربع در نظر گرفته شد. با احتساب مقادیر اخیر، سرعت صدا در هوا برابر ۳۴۱/۵ متر بر ثانیه می‌شود. الگوی ساخته شده در محدوده

<sup>1</sup> FSI

<sup>2</sup> Tie

صوتی مرسوم در عوض استفاده مستقیم از فشار صوتی، از تراز فشار صدا استفاده می‌شود. واحد اندازه‌گیری تراز فشار صدا دسی‌بل بوده و از طریق رابطه ۱ قابل اندازه‌گیری است [۲۱].

$$SPL = 20 \log \frac{P}{P_0} \quad (1)$$

در رابطه اخیر  $P$  فشار مرجع و برابر  $0.0002$  پاسکال یا  $20$  میکروپاسکال در نظر گرفته شده است. رابطه اخیر یکی از رایج‌ترین روابط مورد استفاده در مراجع گوناگون به شمار می‌رود. به منظور محاسبه متوسط تراز فشار صدای موجود در داخل و بیرون از اتاق آزمون، از روابط موجود در استاندارد ایزو استفاده شده است. متوسط‌گیری تراز فشار صدا به کمک رابطه شماره ۲ انجام می‌شود [۲۱]. در این رابطه  $f_i$  و  $f_{i+1}$  به ترتیب برابر بسامد کم‌تر و بیش‌تر یک بازه مشخص برای متوسط‌گیری هستند،  $SPL(f)$  تابع تراز فشار صدا در بسامد  $f$  بوده و  $SPL_{(f_i-f_{i+1})}$  برابر تراز فشار صدا متوسط محدوده بسامدی  $(f_i + f_{i+1})$  است. طبق استاندارد ایزو ۱۴۰ رابطه ۲ برای محاسبه تراز فشار صدای متوسط در یک اتاق آزمون به‌کار می‌رود [۲۱].

$$PL_{(f_i-f_{i+1})} = 10 \log \left[ \frac{\int_{f_i}^{f_{i+1}} 10^{\frac{SPL(f)}{10}} df}{f_{i+1} - f_i} \right] \quad (2)$$

پس از متوسط‌گیری تراز فشار صدای هر اتاق، می‌توان با محاسبه افت تراز فشار متوسط دو طرف یک جاذب قرار گرفته بین دو اتاق، قدرت جذب یا عایق بودن ماده مذکور را محاسبه و با دیگر جاذب‌ها و عایق‌ها مقایسه شده و برای مکان‌های مختلف جاذب یا عایق صدای مناسب را انتخاب نمود. هم‌چنین با اندازه‌گیری تراز فشار صدای متوسط هنگام نبود جاذب میزان افت (تی‌ال) مورد نظر را اندازه‌گیری و متناسب با آن عایق مناسب را انتخاب نمود. با توجه به کتاب صوتیات اتاق‌ها، میزان تی‌ال هر عایق برابر است با مقدار افت فشار  $R$  و از رابطه شماره ۳ قابل محاسبه است [۲۷].

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad (3)$$

در رابطه اخیر  $L_1$  و  $L_2$  متوسط تراز فشار صدای اتاق منبع و اتاق دوم بوده و بر حسب دسی‌بل محاسبه می‌شود.

الگوسازی شده به تحریک هماهنگ (هارمونیک) استفاده شده است. دامنه و زاویه فاز پاسخ حالت پایدار سامانه به تحریک هماهنگ محاسبه شده است. تحلیل صورت گرفته با اعمال نیروی صوتی در ۱۰ بسامد مختلف (با توزیع لگاریتمی) در محدوده بسامدی ۹۰ تا ۵۰ هرتز و ثبت نتایج بدست آمده است.

در این تحلیل از هفت اتاق آزمون با طول ۱۵ متر و شعاع‌های ۰٫۷۵، ۱، ۱٫۵، ۲، ۲٫۵، ۳ و ۳٫۵ متر استفاده شده است. به منظور محاسبه تراز فشار صدا در هر طرف دیوار اتاق از پنج میکروفون استفاده شده است، سپس تراز فشار صدا متوسط هر محیط اندازه‌گیری و به عنوان تراز فشار صدا هر محیط در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱ مشخصات مکانیکی مواد مورد استفاده [۲۷].

ماده	هوا	فولاد
چگالی	۱٫۲ کیلوگرم بر مترمکعب	۷۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب
E	---	۲۱۰ گیگاپاسکال
$\nu$	---	۰٫۳
مدول بالک	۱۴۲۴۰۰ نیوتن بر مترمربع	---

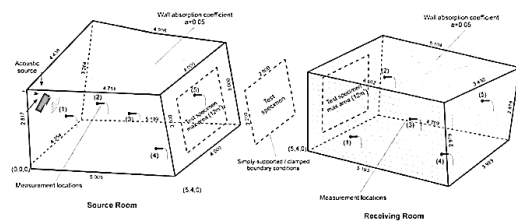
طبق استاندارد ایزو ۱۴۰ به منظور کاهش اثرات دیوار یا منبع صوتی بر نتایج ثبت شده، توصیه می‌شود هر میکروفون حداقل یک متر از هر دیوار و حداقل سه متر یا بیش‌تر از بلندگوها جای‌گذاری شوند. هم‌چنین به منظور کاهش اثرات جذب و انعکاس صوتی هر میکروفون بر میکروفون دیگر، توصیه می‌شود هر میکروفون حداقل ۱٫۵ متر از میکروفون‌های دیگر فاصله داشته باشد. هم‌چنین به علت وجود فشار مختلف در نقاط مختلف یک اتاق توصیه می‌شود از تراز فشار صوتی متوسط اتاق به جای تراز فشار صوتی یک نقطه استفاده شود. در ادامه نحوه محاسبه افت تراز فشار صدا شرح داده می‌شود. سپس نتایج به‌دست آمده ارائه می‌شوند.

### ۳. نتایج و بحث

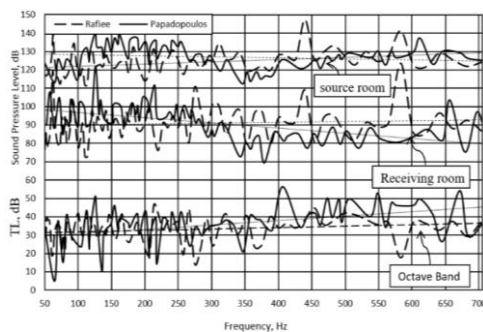
#### ۳-۱. محاسبه افت تراز فشار صدا

به علت گستره وسیع محدوده‌های بسامدی و فشار صوتی موجود در نتایج شبیه‌سازی‌های مختلف، در تحلیل‌های

به تغییرات شیب منحنی‌ها و مقایسه نتایج حل مسئله با نتایج استخراج شده از مقاله مذکور، مشاهده می‌شود که منحنی حاصل از حل در محدوده بسامدی پایین (بسامدهای کم‌تر از ۲۷۵ هرتز) در حال نزدیک شدن به منحنی مقاله بوده و پس از آن در حال فاصله گرفتن از آن است. در محدوده بسامدی پایین، نتایج حل تقریباً با نتایج مقاله یکسان هستند حال آنکه در قسمت دوم این نمودار نتایج تحلیل پروژه اندکی از نتایج استخراج شده از مقاله فاصله گرفته است. با تغییر اندازه مقاومت ظاهری‌های مختلط فولاد و دیوارها می‌توان این اختلاف را کم‌تر کرد. بیش‌ترین اختلاف تی‌ال در محدوده بسامدی ۳۱/۵ تا ۷۰۴ نزدیک به ۵ دسی‌بل است که با توجه به اندازه تی‌ال هر مسئله و اندازه ترازهای فشار متوسط صدا قابل قبول است.



شکل ۲ الگوی عنصر منتهای استفاده شده در مطالعات پادوپولوس [۲۵].



شکل ۳ مقایسه نمودارهای استخراج شده از شبیه‌سازی مطالعات حاضر و مقاله پادوپولوس.

در ادامه نتایج به دست آمده از تحلیل‌های عددی ارائه می‌شوند به گونه‌ای که ابتدا تحلیل بسامدی سازه اتاق آزمون موتورهای هوافضایی ارائه شده است؛ سپس استقلال از مش الگوسازی انجام شده بررسی می‌شود و در نهایت نتایج حل‌های مختلف و بهینه‌سازی اندازه اتاق آزمون ارائه می‌شود.

همچنین  $S$  سطح مقطع جاذب صدا بر حسب متر مربع و  $A$  مقدار کل جذب صدای اتاق بر اساس رابطه سابینز<sup>۱</sup> است. توصیه‌های موجود در استانداردهای ملی و بین‌المللی نکات مورد استفاده برای الگوسازی، ساخت و نحوه اندازه‌گیری کمیتهای مورد نیاز را به طور مفصل و دقیق شرح داده‌اند [۲۸-۲۹].

امروزه تحقیقات گسترده‌ای برای پیش‌بینی عددی و تجربی تی‌ال امواج صوتی در مکان‌های مختلف انجام شده است. در اکثر مواقع از صفحاتی با هندسه ساده یا پیچیده به عنوان جاذب یا عایق صوتی استفاده می‌شود. این تحقیقات به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند، محاسبات تحلیلی هلمهولتز [۲۱، ۲۳-۲۴]، در این نوع محاسبات انتشار صوتی و تماس بین عنصرهای صوتی و ساختاری به کمک معادله موج بررسی می‌شوند و مناسب بررسی محدوده‌های وسیع‌تر بسامدی است. گروه بعدی شامل محاسبات عددی [۲۱، ۲۶] به کمک نرم‌افزارهای عنصر منتهای است. این نوع تحلیل‌ها شامل دو اتاق مکعبی ساده بوده که اختلاف تراز فشار صدای متوسط آن‌ها محاسبه می‌شود. معمولاً به علت ساده‌سازی‌های صورت گرفته در الگوسازی و تحلیل‌های عددی، داده‌های تحلیلی با داده‌های تجربی اختلاف دارند.

### ۳-۲. صحت‌سنجی نتایج

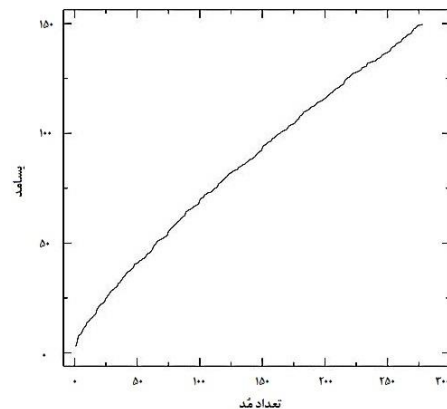
نمودار شکل ۳ متوسط تراز فشار صدای اتاق‌های الگوشده را برای محدوده بسامدی ۰ تا ۷۰۴ هرتز نشان می‌دهد. محور افقی مربوط به بسامدهای مورد مطالعه پادوپولوس است [۲۰-۲۱]. محور عمودی تراز فشار صدا بر حسب دسی‌بل را بیان می‌کند. قسمت بالای محور عمودی مربوط به متوسط تراز فشار صدای محاسبه شده برای هر اتاق است، قسمت زیرین نمودار مربوط به تی‌ال عایق فولاد با ضخامت ۴/۶ میلی‌متر است. خط‌چین‌ها مربوط به نتایج الگوی استفاده شده در مقاله حاضر و خطوط ممتد مربوط به نتایج مطالعات پادوپولوس است. برای محاسبه نقاط این منحنی از رابطه ۲ استفاده می‌شود. خطوط نقطه‌چین مقدار متوسط خطی هر منحنی را نشان می‌دهند. با توجه

<sup>۱</sup> Sabins



## ۳-۳. تحلیل بسامدی

ابتدا برای تعیین تمامی بسامدهای ویژه در محدوده بسامدی ۰ تا ۱۵۰ هرتز از تحلیل بسامدی استفاده شد. طی این تحلیل مشخص شد بسامدهای ویژه در محدوده ۹۰ تا ۱۵۰ هرتز برای مدهای شماره ۱۵۰ تا ۲۹۸ هستند. نمودار شکل ۴ بسامد تحریک هر مُد را نشان می‌دهد. در این نمودار محور افقی شماره مُد و محور عمودی بسامد تحریک هستند. همان‌طور که از شکل ۴ بر می‌آید؛ بسامد تحریک ۹۰ هرتز مربوط به مُد ارتعاشی شماره ۱۵۰ است، به عبارت بهتر برای بازآوایش بدنه در بسامد ۹۰ هرتز صد و پنجاهمین مُد بسامدی اتفاق می‌افتد. بنابراین سازه الگوشده با همان ضخامت ۴/۸ میلی‌متر در محدوده بسامدی ۹۰ تا ۱۵۰ هرتز در ۱۵۸ بسامد ابتدایی بازآوایش نخواهد داشت.



شکل ۴ تعداد ۲۷۸ مُد ارتعاشی اول در محدوده بسامدی ۰ تا ۱۵۰ هرتز.

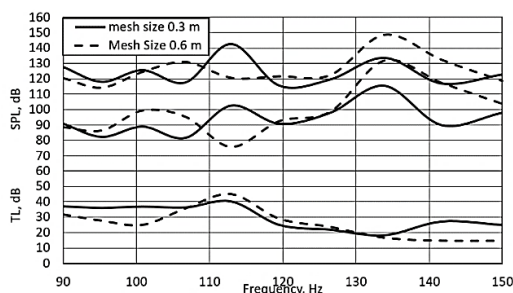
## ۳-۴. بررسی استقلال از اندازه مش

به منظور بررسی استقلال از مش الگوی ساخته‌شده، نتایج اثرات اندازه مش‌ها بر نتایج حاصله برای مسئله‌ای با اتاق به شعاع ۲ متر و طول اتاق ۱۵ متر بررسی و نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه اندازه مش، طول موج و بسامد کاری؛ موتور تپ‌جت (پالس‌جت) تعیین شده است. موتور تپ‌جت نوعی از موتورهای جت به شمار می‌آید که احتراق در آن‌ها به صورت تپ رخ می‌دهد. موتور تپ‌جت بدون کمپرسور با جریانی ناپایدار است. شکل ۶ یک موتور تپ‌جت را نشان می‌دهد. تپ‌جت به استفاده‌های گوناگونی دارد، بیش‌ترین کاربرد تپ‌جت به عنوان موتور پیش‌ران در ماشین‌های مسابقه و قایق‌های

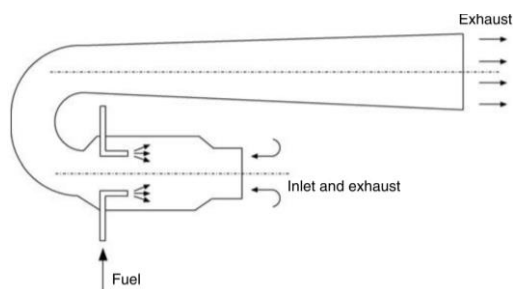
کوچ تندرو، موشک‌ها و یا به عنوان موتور پیش‌ران پهپاد است. نمونه‌های کوچک تپ‌جت در سامانه‌های گرمایشی نیز کاربرد دارند. یکی دیگر از کاربردهای تپ‌جت در صنعت، استفاده از آن در خشک‌کن‌ها و غبارگیرها است. در غبارگیرهای صنعتی از تپ‌جت به منظور ایجاد انفجار هوا برای پاکسازی کیسه‌های صافی (فیلتر) استفاده می‌شود. به منظور داشتن پاسخ‌های معتبر باید حداقل چهار طول موج در طول هر عنصر واقع شود. بدین منظور برای بسامد ۱۲۰ هرتز و سرعت صوتی در محیط سیال ۳۴۱/۵ متر بر ثانیه طبق رابطه ۴ می‌توان نوشت:

$$c = f \times \lambda \rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{341.5}{120} = 2.84 \text{ m} \rightarrow l = \frac{\lambda}{4} = 0.71 \text{ m} \quad (4)$$

که در آن  $c$  سرعت صوتی،  $f$  بسامد،  $\lambda$  طول موج و  $l$  کم‌ترین طول مشخصه عنصرهای الگو برای داشتن حداقل چهار گره عنصر منتهای در هر طول موج است. بنابراین بزرگ‌ترین طول مشخصه عنصرها باید ۷۱ سانتی‌متر باشد تا در هر طول موج چهار مرتبه محاسبات برای هر نقطه انجام شود. در مطالعات انجام‌شده مرتبه اول اندازه مش ۰/۳ متر و مرتبه دوم اندازه مش ۰/۶ مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۵). با توجه به منحنی‌های به‌دست‌آمده نتایج هر دو حل بسیار نزدیک به یکدیگر و یا به عبارت بهتر الگوسازی انجام‌شده استقلال از مش دارد.



شکل ۵ اثر تغییر اندازه مش بر نتایج حاصل از حل، اندازه مش‌های مورد بررسی ۰/۳ و ۰/۶ متر.



شکل ۶ طرح‌واره یک موتور تپ‌جت بدون دریچه [۳۰].

بخش دوم شامل بسامدهای ۱۱۶ تا ۱۵۰ هرتز است. در بسامدهای پایین شعاع ۲ متر و در بسامدهای بالا شعاع ۲/۵ متر کمترین تراز فشار صدای متوسط محیط را نتیجه می‌دهند. با ساختن اتاق آزمونی با شعاع ۲/۲۵ متر می‌توان کیفیت صوتی محیط در تمامی بسامدها را کمینه کرد. در این صورت طبق استاندارد در صورتی که تراز فشار صدای رسیده به گوش انسان برابر ۹۶ دسی‌بل باشد برای ۸ ساعت کار روزانه و ۴۰ ساعت کار هفتگی مناسب است [۲۵].

تحلیل‌های اخیر نشان دادند تنها با استفاده از سازه فولادی به ضخامت حدود ۰/۵ سانتی‌متر می‌توان مشکل تراز فشار صدای بسیار بالای محیط اطراف محل آزمون موتور تپ‌جت را برطرف نمود. به کمک عایق با ضخامت بیش‌تر نیز می‌توان کیفیت صوتی محیط را باز هم بهبود بخشید.

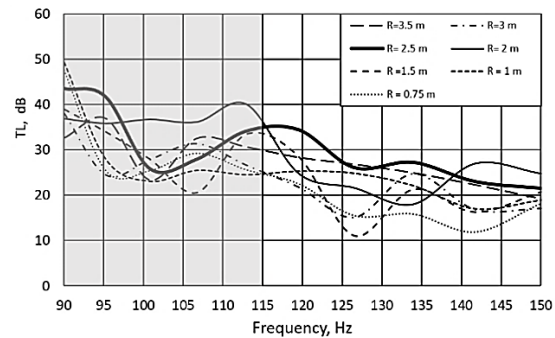
### ۳-۶. بررسی اثرات ضریب جذب عایق بر تی‌ال

شکل‌های ۹ و ۱۰، تی‌ال محاسبه شده برای اتاق آزمونی با دهانه ۲ متر را نشان می‌دهند. محور افقی این نمودار بیانگر بسامد و محور عمودی بیانگر تی‌ال هستند. تی‌ال برای ضرایب جذب ۰/۲۵، ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ضریب جذب نزدیک به عدد ۱ محاسبه و نتایج به‌دست آمده برای پنج بسامد در بازه ۹۰ تا ۱۵۰ هرتز با یکدیگر مقایسه شده است. در این تحلیل‌ها به ترتیب شرایط تکیه‌گاهی ساده و شرایط تکیه‌گاهی گیردار برقرار هستند. ضخامت عایق نیز ۱۰ سانتی‌متر است. با بررسی منحنی مذکور مشاهده می‌شود بیش‌ترین تی‌ال برای عایق با ضریب جذب ۰/۲۵ بوده و عایق با ضریب جذب‌های بیش‌تر تی‌ال کمتری را نتیجه می‌دهند. بنابراین در مسئله با شرایط مرزی ساده بیش‌ترین مقدار تی‌ال متوسط برای عایق با ضریب جذب ۰/۲۵ بوده و مقدار بیشینه تی‌ال برابر ۳۰ دسی‌بل است.

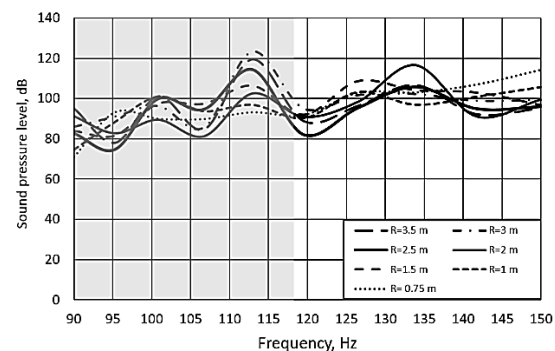
هم‌چنین با مقایسه منحنی شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود که اختلاف تی‌ال محاسبه شده در صورت استفاده از شرایط تکیه‌گاهی ساده بیش‌تر از شرایط تکیه‌گاهی گیردار است به عبارت بهتر فاصله منحنی‌های مربوط به شرایط تکیه‌گاهی ساده از یکدیگر نسبت به شرایط تکیه‌گاهی گیردار بیش‌تر است. یعنی در صورت داشتن

### ۳-۵. محاسبه شعاع بهینه اتاق آزمون

منحنی شکل‌های ۷ و ۸ بیان‌کننده تراز فشار صدای متوسط نواحی خارج از اتاق آزمون، به ترتیب برای اتاق فولادی بدون عایق پشم‌سنگ و اتاق فولادی پوشیده شده با لایه‌ای از پشم‌سنگ معتبر هستند.



شکل ۷ مقایسه تی‌ال اتاق تست فولادی برای شعاع‌های مختلف.

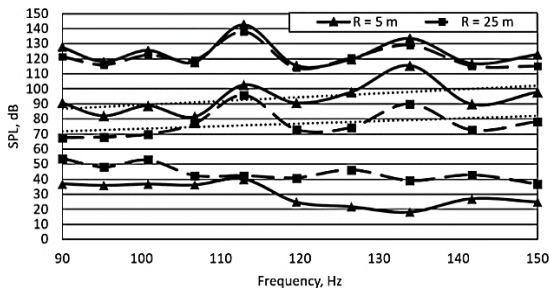


شکل ۸ متوسط تراز فشار صوتی محیط بیرون از اتاق تست با شعاع‌های مختلف و جاذب پشم‌سنگ.

این نمودارها تراز فشار صدای شعاع‌های مختلف در محدوده بسامدی ۹۰ تا ۱۵۰ دسی‌بل را با یکدیگر مقایسه کرده‌اند. با توجه به شکل‌های مذکور مشخص است که در شعاع ۲/۵ متر متوسط تراز فشار صدا در بیرون از اتاق آزمون در بسامد ۱۲۰ هرتز در محدوده استاندارد قرار می‌گیرد. بنابراین بهترین اتاق آزمون دارای دهانه‌ای برابر با ۲/۵ متر و طول ۱۵ متر است که جاذب درون آن پشم‌سنگ باشد. برای اتاق آزمون با دهانه ۲/۵ متر، متوسط تراز فشار صدای بیرون از اتاق آزمون در نواحی نزدیک به اتاق آزمون در محدوده ۷۰ تا ۱۱۵ دسی‌بل قرار دارد. این نمودارها را نیز می‌توان به دو بخش مجزا تقسیم نمود. بخش اول شامل بسامدهای ۹۰ تا ۱۱۶ هرتز و



است. اندازه مش الگوی بزرگتر برابر ۰٫۷۱ متر و الگوی کوچکتر برابر ۰٫۳ متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۱ مقایسه تراز فشار صدای متوسط هوای اطراف در فاصله ۵ متری از منبع و فاصله ۲۵ متری از منبع.

#### ۴. نتیجه‌گیری

پس از صحت‌سنجی الگوسازی و تحلیل صورت گرفته و بررسی استقلال از مش تحلیل، اثرات جاذب‌هایی با ضرایب جذب گوناگون و هم‌چنین اثر وجود و عدم وجود جاذب بررسی شد. نتایج نشان دادند ضریب جذب کم‌تر (انعکاس صوتی بیشتر به درون اتاق آزمون) موجب افت تراز بیش‌تری می‌شود. در عین حال نتایج تحلیل بسامدی نشان دادند سازه طراحی شده بازآوایش نخواهد داشت. نتایج حاصل از بهینه‌سازی اندازه اتاق نشان دادند که بهترین شعاع اتاق آزمون طراحی شده برای محدوده بسامدی ۹۰ تا ۱۵۰ هرتز شعاع ۲٫۲۵ متر است که این شعاع بیش‌ترین افت تراز فشار صدای متوسط را در پی خواهد داشت.

#### ۵. تقدیر و تشکر

نویسندگان از آقای سید حمید سهرابی برای راهنمایی ارزنده ایشان در انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری تشکر می‌نمایند.

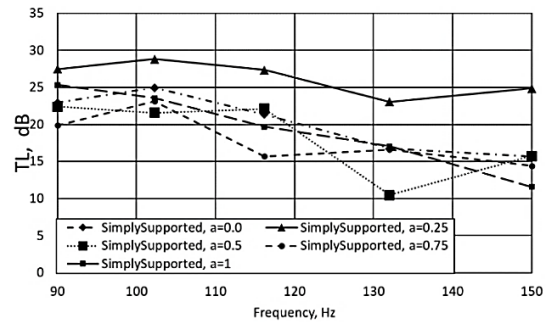
#### ۶. تضاد منافع

نویسندگان هیچ منافع مالی یا روابطی که بتواند بر انتشار این مقاله تأثیرگذار باشد ندارند.

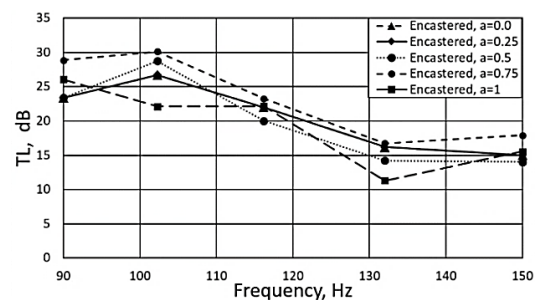
#### فهرست منابع

- [1] A.D. Pierce, "Acoustics: An introduction Toits Physical Principels and Applications," New York, McGraw-Hill, vol. 20, pp. 324-

شرایط تکیه‌گاهی گیردار تفاوت زیادی بین عایق با ضرایب جذب مختلف وجود ندارد. هم‌چنین با بررسی هر دو شکل مذکور مشاهده می‌شود با هر نوع شرایط تکیه‌گاهی و با ثابت نگه داشتن ضریب جذب، با افزایش بسامد، کاهش ضریب جذب رخ خواهد داد.



شکل ۹ تی‌ال پشم‌سنگ با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر و شرایط تکیه‌گاهی ساده.



شکل ۱۰ تی‌ال پشم‌سنگ با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر و شرایط تکیه‌گاهی گیردار.

#### ۳-۷. بررسی اثر فاصله بر متوسط تراز فشار صدای محیط اطراف

در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که برای الگوی ساخته‌شده با شعاع بهینه ۲٫۵ متر، تراز فشار صدای داخل محفظه تقریباً یکسان است. حال آن‌که تراز فشار صدای متوسط در فاصله ۲۵ متری موتور تپ‌جت حدود ۱۰ تا ۲۰ دسی‌بل کم‌تر از تراز فشار صدای متوسط در فاصله ۵ متری موتور تپ‌جت که با خطوط سیاه رنگ مشخص شده‌اند، قرار دارد. از آن‌جا که نزدیک‌ترین محل به اتاق آزمون موتورهای هوافضایی در فاصله ۲۰۰ تا ۲۵۰ متری محل آزمون واقع شده است پیش‌بینی می‌شود تراز فشار صدا در محیط‌های مذکور بسیار کاهش یابد. در هر دو نمودار محاسبات برای ۱۰ بسامد مختلف با توزیع لگاریتمی از یکدیگر و برای فشار صوتی مختلط انجام شده

- scanning laser Doppler vibrometry,” In Proceedings of Internoise 2013, Innsbruck, Austria. 2013.
- [14] K. Hyungjun, J. Ryue, D.J. Thompson, A.D. Müller, “Prediction of radiation ratio and sound transmission of complex extruded panel using wavenumber domain unite element and boundary element methods,” In Journal of Physics: Conference Series, vol. 744, no. 1, pp. 1-13, 2016.
- [15] W. Rik, F. Simon, T. Haase, O. Unruh, E. Tijs, “Benchmark for experimentation of acoustic transmission loss applied to helicopter trim panels,” In ERF 2016 42nd European Rotocraft Forum, 2016.
- [16] A. Katalin, “Studying noise measurement and analysis,” *Procedia Manufacturing*, vol. 22, pp. 533-538, 2017.
- [17] D. Zhang, M.Tenpierik, P.M. Bluysen, “Interaction effect of background sound type and sound pressure level on children of primary schools in the Netherlands,” *Applied Acoustics*, vol. 154, pp. 161-169, 2019
- [18] Y. Hu, S. Li, X. Deng, S. Vadim, “Correlation analysis of noise sound pressure and vibration in aluminum alloy milling, *Journal of Vibration and Control*,” doi.org/10.1177/1077546320975977, 2020.
- [19] P. Walsh, P. Fletcher, “Gas Turbine Performance,” Second Edition, Blackwell, 2004.
- [20] C.I. Papadopoulos, “Development of an optimised, standard-compliant procedure to calculate sound transmission loss: numerical measurements,” *Applied Acoustics*, vol. 64, no.11, pp. 1069-1085, 2003
- [21] C.I. Papadopoulos, “Development of an optimised, standard-compliant procedure to calculate sound transmission loss: Design of transmission rooms,” *Applied Acoustics*, vol. 63, no. 9, pp. 1003-1029, 2002.
- [22] ISO 140-1, III, “Acoustics-Measurement of sound insulation in buildings and of building elements,” ISO, 1995.
- [23] Abaqus, Abaqus Standard Reference Manual, MSC/ABAQUS Corp., 1997.
- [24] Abaqus, Abaqus Standard Theory Manual, MSC/ABAQUS Corp., 1997
- [25] C.I. Papadopoulos, “Development of an Optimised, Standard Compliant Procedure, Based on a Finite Element Simulated Experiment to Estimate Sound Transmission Loss,” PhD Thesis, National Technical University of Athens GREECE, 2001.
- [26] M.C. Gomperts, “Radiation from rigid baffled, rectangular plates with general boundary conditions,” *Acustica*, vol. 30, pp. 321-326, 1974.
- 326, 1981.
- [2] T.J. Cox, D.A. Peter, “Acoustic Absorbers and Diffusers Theory, Design and Application,” Crc Press, pp. 221-223, 2009.
- [3] J. Higgins, V. Shankar, M. Hodgson, “Investigation of airflow and sound transmission through vented-acoustical panels for natural ventilation,” *Canadian Acoustics*, vol. 44, no. 3, pp. 62-76, 2016.
- [4] J. Poblet-Puig, A. Rodríguez-Ferran, “Modal-based prediction of sound transmission through slits and openings between rooms,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 332, no. 5, pp. 1265-1287, 2013.
- [5] A. Prato, A. Schiavi, “Problems and possible solutions in the evaluation of laboratory airborne sound insulation at low frequencies,” In Proceeding Inter-Noise, pp. 145-146, 2013.
- [6] G. Naveen, A. Kumar, S. Maji, “Technical notes: Practical concerns associated with single-number ratings in measuring sound transmission loss properties of partition panels,” *Archives of Acoustics*, vol. 38, no. 1, pp. 115-124, 2013
- [7] M. Vorländer, D. Schröder, S. Pelzer, F. Wefers, “Virtual reality for architectural acoustics,” *Journal of Building Performance Simulation*, vol. 8, no. 1, pp.15-25, 2015.
- [8] M. Asadi, A. Ohadi, R. Keshavarz, “Effect of non-acoustic properties on the sound absorption of polyurethane foams,” *Journal of Theoretical and Applied Vibration and Acoustics*, vol. 1, no. 2, pp. 122-132, 2015
- [9] M. Cheuk Ming, Z. Wang, “Recent advances in building acoustics: An overview of prediction methods and their applications,” *Building and Environment*, vol. 91, pp. 118-126, 2015.
- [10] S. Eeva, L. Rantala, “Acoustics and activity noise in school classrooms in Finland”, *Applied Acoustics*, vol. 114, pp. 252-259, 2016.
- [11] P. Elsa, S. Laroche, M.A. Bianki, A. Ross, “A mobile reverberation cabin for acoustic measurements in an existing anechoic room,” 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Internoise 2016), pp. 1031-1042, 2016.
- [12] D. Ibarra, “Characterization of the noise resduction of engine hood: Experimental method,” *International Journal of Innovative Research in Technology and Science (IJIRTS)*, vol. 4, no. 5, pp. 24-29, 2016.
- [13] B. Roozen, L. Labelle, D.P. Garcia, M. Rychtarikova, C. Glorieux, Q. Leclere, “Determination of the sound power radiated into the receiving room of a transmission-loss facility at low frequencies by means of

- [27] H. Kuttruff, "Room Acoustics," Crc Press, pp. 281-283, 2009
- [28] F.A. Everest, "The Master Handbook of Acoustics," McGraw-Hill, pp.124-125, 1994.
- [29] C.I. Papadopoulos, "Abaqus Custom pre/post processor," LME Internal Report, NTUA 2001.
- [30] A.F. El-Sayed, "Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines," CRC Press, 2008.

(Research Article)  
**Calculation of the drop in sound pressure level and frequency analysis of  
aerospace engine test cell**

**B. Shahriari\***

Faculty of Mechanics, Malek Ashtar University of Technology

Received: 2021/04/26, Accepted: 2021/10/05

**Abstract**

Aerospace engines testing is a source of noise pollution and determining the low frequency acoustic characteristics of the test cell, plays an important role in optimally control of the sound field and reducing the level of sound pressure and pollution. In this study, the drop in average sound pressure level is numerically predicted by constructing a test cell according to ISO 140 standard. To solve the sound propagation equations, modeling the contact between the structure and the fluid, dynamic coupling of the structure and the fluid is performed and to calculate the acoustic energy distribution in the fluid and the structure, Abaqus finite element software is used. Cells with different dimensions and insulation and simply support conditions are modeled and the average sound pressure level drop of each model is calculated and compared. The optimal dimensions of the cell are determined, then the independence of the mesh is checked and the results are verified using experimental data. The measured sound pressure drop values are reported for the quarter band. To ensure that it is not resonated by acoustic force, the frequency analysis of the structure was performed and it was determined that the designed test cell eliminates noise pollution. Cell size optimization shows that the best test cell radius for the 90 to 150 Hz frequency range is 2.25 m.

**Keywords:** Acoustics, Sound pressure drop, Frequency analysis, Sound insulation, Aerospace engine test cell.

pp. 30-40 (In Persian)

---

\* Corresponding author E-mail: shahriari@mut-es.ac.ir