

# بررسی تجربی اثر استفاده از دیواره‌های جاذب صوتی در کاهش نوفه زمینه تونل باد

عباس افشاری<sup>۱\*</sup>، علیرضا موحدی<sup>۲</sup>، علی اکبر دهقان<sup>۳</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۳- دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۹)

## چکیده

در مطالعه حاضر اثر استفاده از دیواره‌های جاذب صوتی در کاهش نوفه زمینه یک تونل باد آیرودینامیکی نمونه از نوع مدار باز با اتاق آزمون بسته به صورت تجربی بررسی شده است. هدف از این مطالعه بررسی کارایی دیواره‌های جاذب صوتی و همچنین اثر پارامترهای مختلف آن از جمله ضخامت مواد جاذب روی میزان کاهش نوفه زمینه تونل باد است. نتایج نشان داد که وجود دیواره‌های صلب در مقطع آزمون تونل باد منجر به ایجاد امواج ایستاده در عرض اتاق آزمون و در نتیجه افزایش قابل توجه سطح نوفه زمینه تونل باد در فرکانس‌های بالاتر از حدود ۷۵۰ Hz شده است. استفاده از دیواره‌های جاذب صوتی در بالادست اتاق آزمون باعث کاهش نوفه زمینه و بهبود عملکرد آکوستیکی تونل در فرکانس‌های متوسط و بالا می‌گردد. با این وجود این کار تا حدودی باعث افزایش نوفه زمینه در فرکانس‌های پایین شده است. همچنین با افزایش ضخامت جاذب صوتی، عملکرد آکوستیکی تونل در فرکانس‌های میانی ۴۰۰-۱۵۰ Hz بهبود می‌یابد. قرار دادن فاصله هوایی در پشت مواد جاذب صوتی نیز منجر به بهبود اندک عملکرد آیروآکوستیکی تونل در فرکانس‌های کمتر از ۳۰۰ Hz شده است. در نهایت نتایج نشان داد که حذف کامل مواد جاذب صوتی و جایگزینی دیواره‌های صلب تونل با پارچه کشیده شده کولار منجر به کاهش قابل توجه نوفه زمینه تونل باد در تمام محدوده فرکانسی شده است.

واژه‌های کلیدی: تونل باد، نوفه آیروآکوستیکی، سطح فشار صوتی کلی، میکروفون، مواد جاذب صوتی

## Experimental investigation of the effect of using sound absorbing walls in reducing wind tunnel background noise

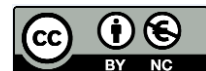
### Abstract

In the present study the aeroacoustic characteristics of an aerodynamic open circuit wind tunnel is experimentally investigated by furnishing its test section by noise absorbing panels. The objective is to evaluate the effectiveness of sound absorbing walls in reducing the wind tunnel background noise and to investigate the effect of its various parameters such as the thickness of sound absorbing materials on the background noise levels. The results showed that the presence of standing waves across the test section considerably increases the background noise levels for the frequencies higher than about 750 Hz. Using sound absorbing panels at the upstream of the test section improves the acoustic performance of the wind tunnel at mid to high-frequencies while increases the background noise at low-frequencies. The acoustic performance of the wind tunnel is improved at middle frequency range of 150-400 Hz by increasing the sound absorbing materials thickness. The existence of the air gap behind the sound absorbing materials results in a slight improvement in the wind tunnel's aeroacoustic performance at frequencies lower than 300 Hz. Finally, the results showed that using Kevlar stretched fabric instead of sound absorbing materials results in a significant reduction of the background noise at all frequency range.

**Key words:** Wind tunnel, aeroacoustic noise, overall sound pressure level, microphone, sound absorbing material

\* نویسنده پاسخگو: عباس افشاری، تلفن: ۰۹۱۳۳۶۹۳۱۸۸، پست الکترونیک: afshari@ssau.ac.ir

این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس از آدرس <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



## مقدمه

در سال‌های اخیر، بنا به دلایل نظامی، زیست محیطی و ... توجه به موضوع نوفه آیرودینامیکی در دنیا بسیار افزایش یافته است. از سوی دیگر با وجود امکان استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی برای مطالعات آیرودینامیکی، هنوز استفاده از تونل‌های باد برای بررسی این موضوع اجتناب ناپذیر است. در سال‌های اخیر علاقه به انجام اندازه‌گیری‌های هم‌زمان آیرودینامیکی و آیرودینامیکی در تونل‌های باد با دیواره‌های صلب افزایش یافته است. یک تونل باد آکوستیکی مناسب، باید علاوه بر دارا بودن مشخصات آیرودینامیکی مناسب مانند یکنواختی خوب جریان، شدت آشفتگی کم و ... دارای نوفه زمینه پایینی باشد. نوفه زمینه بایستی حداقل  $10 \text{ dB}$  کم‌تر از سطوح نوفه قابل انتظار برای هندسه‌های مورد بررسی باشد تا اندازه‌گیری‌های آکوستیکی با کیفیت مناسب صورت گیرند [۱]. برای کاهش نوفه زمینه تونل باد روش‌های مختلفی از جمله استفاده از صداخفه‌کن [۲]، حذف دیواره‌های اتاق آزمون تونل باد و ساخت یک اتاق بدون پژواک در اطراف خروجی نازل [۳]، جایگزین کردن دیواره‌های اتاق آزمون با فوم‌های جاذب صدا [۴، ۵] و ... پیشنهاد شده است. در مطالعه [۲] استفاده از صدا خفه‌کن در برابر فن تونل باد دانشگاه اشتوتگارت منجر به کاهش نوفه زمینه به اندازه حدود  $10-12 \text{ dB}$  در محدوده فرکانسی  $100-4000 \text{ Hz}$  گردید. با این وجود فرآیند طراحی نسبتاً پیچیده و هزینه‌های بالای این روش استفاده از آن را محدود نموده است. ساده‌ترین راه برای کاهش سطح نوفه جریان، حذف دیواره‌های اتاق آزمون تونل باد است. این راه حل از نظر آیرودینامیکی مشکلاتی از قبیل پدیده تداخل لیفت و ... ایجاد نموده و بنابراین راه حل چندان مناسبی نیست [۳]. از سوی دیگر با حذف دیواره‌های اتاق آزمون نیاز به ساخت یک اتاق بدون پژواک در اطراف خروجی نازل بوده که هزینه زیادی به همراه دارد. جایگزین کردن دیواره‌های اتاق آزمون با فوم‌های جاذب صدا اگرچه کارایی اتاق آزمون بدون پژواک را ندارد ولی از لحاظ هزینه به مراتب مناسب‌تر است.

لارسن و دونپورت [۶] به بررسی عملکرد آکوستیکی تونل باد ویرجینیا پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که دیواره‌های صلب، دیواره‌های نیمه شیاردار و دیواره‌های کاملاً شیاردار برای اتاق آزمون، به ترتیب کمترین تا بیشترین صدا را تولید می‌کنند. ولی در هر یک از این پیکربندی‌ها، پایین دست

اتاق آزمون با وجود فاصله گرفتن از فن تونل پرفشارتر از بالادست است. در بخشی از مطالعه مرجع [۵] برای بررسی جریان حول یک یا چند ایرفویل، اصلاحات آکوستیکی روی تونل مورد استفاده انجام شده است. این اصلاحات شامل به کارگیری یک سری جعبه‌های جاذب آکوستیکی بودند که جایگزین دیواره‌های صلب اتاق آزمون تونل باد شدند. نتایج نشان داد که استفاده از مواد جاذب صوتی باعث کاهش نوفه زمینه تونل شده است. کارمارگو و همکاران [۷] با استفاده از پارچه کولار<sup>۱</sup> یک طرح جدید برای اتاق آزمون بدون پژواک تونل باد ویرجینیا پیاده‌سازی نمودند. خاصیت چنین پارچه‌هایی این است که صدا را از خود عبور می‌دهند؛ ولی هم‌زمان تقریباً جریانی را از خود عبور نمی‌دهند. نتایج آنها نشان داد که پارچه کولار کشیده شده صدا را با کمترین تضعیف تا فرکانس  $25 \text{ kHz}$  از خود عبور داده و لذا می‌تواند به عنوان یک دیواره عبوردهنده صدا مورد استفاده قرار گیرد. همچنین بهینه‌سازی آکوستیکی صورت گرفته روی اتاق آزمون، نوفه زمینه تونل را بین  $10 \text{ dB}$  تا  $16 \text{ dB}$  در فرکانس‌های مختلف کاهش می‌دهد. سانتانا و همکاران [۴] فرآیند به روز رسانی یک تونل باد آیرودینامیکی را برای اندازه‌گیری‌های آکوستیکی و آیرودینامیکی ارائه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از مواد جاذب آکوستیکی در نقاط مهم تونل باد می‌تواند نوفه زمینه را تا حد زیادی کاهش دهد. همچنین این اصلاحات میزان آشفتگی جریان داخل تونل را نیز کاهش داد. ایتو و همکاران [۸] مراحل طراحی و ساخت یک تونل باد با اتاق آزمون بسته‌ای را ارائه نمودند که در یک محفظه بدون پژواک قرار گرفته است. در این طراحی بخشی از دیواره‌های اتاق آزمون با پارچه کولار جایگزین شد. عملکرد آیرودینامیکی و آیرودینامیکی تونل با قرار دادن یک مدل داخل اتاق آزمون و بررسی آن تایید و اعتبار سنجی شد.

سوکی و همکاران [۹] با هدف یافتن پارچه مناسب خواص آکوستیک پارچه‌های متخلخل را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. در کل تعداد هشت پارچه متخلخل شامل پارچه الیاف شیشه، پارچه کولار با بافت ساده و پارچه کولار اصلاح شده که منافذ آن به طور نامنظم مسدود شده بود، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که منافذ پارچه به عنوان دروازه‌ای با مقاومت کم برای عبور صدا عمل می‌کنند و از این رو TL (تلفات انتقال) پایین را ممکن می‌سازند.

به طول ۱۲۰ cm) است. شکل ۱ نمایی از تونل باد مذکور را نشان می‌دهد.



شکل ۱ - نمایی از تونل باد آیرودینامیکی دانشگاه یزد

در مطالعه حاضر، از تجهیزات مختلفی مثل لوله پیتوت استاتیکی متصل به یک مبدل فشار برای اندازه گیری سرعت جریان بالادست و میکروفون‌های G.R.A.S مدل 40BP و سایر تجهیزات مربوطه برای اندازه‌گیری نوفه جریان داخل تونل استفاده گردید. این میکروفون‌ها از نوع پولاریزاسیون خارجی بوده و بنابراین جهت راه اندازی نیازمند یک منبع تغذیه خارجی هستند. میکروفون‌های مذکور روی پیش تقویت کننده‌های یک چهارم اینچ مدل 26AC نصب شده و به منبع تغذیه G.R.A.S مدل 12AR وصل گردیدند. این میکروفون‌ها از نوع منفذدار بوده که محدوده دینامیکی برابر با  $31-174 \text{ dB(A)}$  و حساسیتی معادل  $1/6 \text{ mV/Pa}$  دارند. منحنی کالیبراسیون پاسخ فرکانسی میکروفون در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲ مشخص است که این میکروفون‌ها دارای پاسخ فرکانسی همواری روی محدوده فرکانسی بین  $100 \text{ Hz}$  تا  $70 \text{ kHz}$  هستند.

معمولاً اندازه‌گیری‌های آکوستیکی در تونل‌های باد به دلیل نوفه القایی آیرودینامیکی اطراف میکروفون دشوار است. وقتی میکروفون در معرض باد با سرعت بالا در یک جهت مشخص قرار می‌گیرد اثر نامطلوب مذکور را می‌توان با قرار دادن یک دماغه مخروطی شکل کاهش داد. دماغه مخروطی یک شکل خط جریانی و سطحی بسیار صیقلی دارد که کم‌ترین نوفه القایی آیرودینامیکی را به دست می‌دهد [۱۰]. بدین منظور در مطالعه حاضر از یک دماغه مخروطی استاندارد روی میکروفون استفاده شده است. در نهایت، سیگنال‌های تقویت شده میکروفون‌ها، با استفاده از پردازش گر سیگنال دو کاناله مدل DT9847-2-2 ذخیره و پردازش گردیدند. فرکانس داده

همچنین مشخص شد که چگالی نخ عامل اصلی در تعیین محدوده فرکانس نویز تولیدی پارچه‌های متخلخل است. در نهایت نتیجه گرفته شد که پارچه‌هایی با توزیع منافذ نامنظم، رفتار آیروآکوستیک برتری در مقایسه با پارچه‌های معمولی کولار دارند.

همان گونه که از مطالعات پیشین مشخص است، استفاده از مواد جاذب صوتی در عین مقرون به صرفه بودن، دارای کارایی نسبتاً مناسبی است. از طرفی کارایی این روش در فرکانس‌های مختلف وابسته به پارامترهای مختلفی از جمله ضخامت مواد جاذب است. با این وجود اثر پارامترهای مذکور در محدوده‌های فرکانسی مختلف کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از این مطالعه، تعیین مشخصات آیروآکوستیکی یک نمونه تونل باد مدار باز، بررسی کارایی دیواره‌های جاذب صوتی در کاهش نوفه زمینه تونل باد و نهایتاً بررسی اثر پارامترهای مختلف روی میزان و محدوده فرکانسی کاهش نوفه زمینه تونل باد است. به علاوه، با توجه به عدم وجود تونل باد آیروآکوستیکی در کشور، اصلاح تونل‌های باد آیرودینامیکی موجود می‌تواند ضمن صرفه‌جویی اقتصادی به عنوان یک گام اولیه در مسیر بررسی تجربی پدیده‌های آیروآکوستیکی مختلف قلمداد گردیده و به ایجاد بستری مناسب برای شروع مطالعات آیروآکوستیکی کمک کند.

## تجهیزات آزمایش

در این بخش تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده در مطالعه حاضر معرفی می‌گردند. تونل باد مادون صوت دانشگاه یزد از نوع مدار باز و دمنده بوده و اتاق آزمون آن از نوع بسته است. قسمت‌های اصلی این تونل باد شامل یک فن سانتریفیوژ یک طرفه، دیفیوزر زاویه باز، اتاق آرامش، نازل و اتاق آزمون است. بیشینه سرعت باد در اتاق آزمون، حدوداً برابر با  $25 \text{ m/s}$  است. بیشینه سرعت چرخش موتور، برابر با  $1800 \text{ rpm}$  و تعداد پره‌های فن برابر با ۶۰ عدد است. پره‌های فن دارای شیب رو به جلو بوده که نوفه پهن باند پایین تا متوسطی را ایجاد می‌نماید. جریان داخل اتاق آزمون تقریباً یکنواخت بوده و شدت آشفتگی برای تونل خالی در حدود  $0/3\%$  برای سرعت‌های کمتر از  $20 \text{ m/s}$  است. سطح مقطع آزمون تونل  $46 \text{ cm} \times 46 \text{ cm}$  و طول آن  $240 \text{ cm}$  (شامل دو اتاق آزمون

## نتایج و بحث

در این بخش نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر در دو بخش ارائه شده است. در بخش اول، عملکرد آکوستیکی تونل باد موجود (پیش از انجام اصلاحات آکوستیکی) در سرعت‌های مختلف جریان بالادست و محدوده‌های فرکانسی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش دوم کارایی دیواره‌های جاذب صوتی در کاهش نوفه زمینه تونل باد در فرکانس‌های مختلف و همچنین اثر پارامترهای مختلفی مثل ضخامت مواد جاذب، فاصله هوایی ایجاد شده در پشت مواد جاذب و ... روی میزان و محدوده فرکانسی کاهش نوفه زمینه تونل باد ارزیابی شده است.

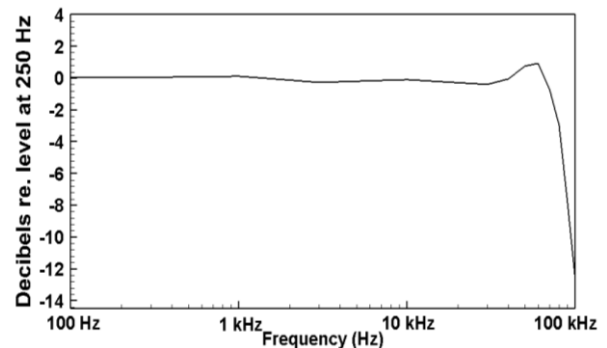
### بررسی عملکرد آکوستیکی تونل باد موجود

هدف از این بخش، بررسی عملکرد آکوستیکی تونل باد آیرودینامیکی دانشگاه یزد است. به همین منظور، نوفه زمینه در حالات مختلف اندازه‌گیری و بررسی می‌شود. منظور از نوفه زمینه، نوفه‌هایی به جز نوفه ناشی از حضور مدل در تونل باد است که می‌تواند شامل نوفه‌های محیطی، نوفه‌های ناشی از فن تونل باد، ارتعاشات سازه‌ای تونل باد، نوفه ناشی از جریان عبوری از اجزای مختلف تونل و ... باشد.

در اولین بخش از مطالعه حاضر، میکروفون در مرکز اتاق آزمون اول (به فاصله تقریبی ۶۰ cm از خروجی نازل و ۲۳ cm از دیواره‌های اتاق آزمون) قرار گرفت. در این حالت سیگنال میکروفون برای سرعت‌های مختلف جریان هوا و نیز حالتی که فن تونل باد خاموش است ثبت گردید.

در ابتدا تکرارپذیری آزمایش‌ها بررسی شده است. در شکل ۴ چگالی طیفی توانی سیگنال‌های فشار ثبت شده برای بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها رسم شده است. مشاهده می‌شود که با وجود این که آزمایش‌ها در روزهای مختلف ولی در شرایط بهره‌برداری یکسان انجام گرفته است اختلاف ناچیزی بین نتایج به دست آمده از دو آزمایش وجود دارد. این اختلاف ناچیز برای حالت فن خاموش به مراتب بیشتر است که دلیل این امر نیز می‌تواند ماهیت تصادفی نوفه‌های محیطی باشد که در چنین شرایطی نمود بیشتری دارد.

برداری برابر با ۴۰ کیلوهرتز بوده و در مجموع تعداد ۱ میلیون و ۲۰۰ هزار داده در مدت زمان ۳۰ ثانیه ذخیره شده است. لازم به ذکر است که میکروفون‌ها قبل از بهره برداری با استفاده از کالیبراتور G.R.A.S مدل 42AB کالیبره شدند.



شکل ۲ - منحنی کالیبراسیون پاسخ فرکانسی میکروفون G.R.A.S مدل 40BP

برای قرار دادن میکروفون داخل تونل باد، از مکانیزی مطابق شکل ۳ استفاده گردید. میکروفون شماره ۱ (دارای دماغه مخروطی استاندارد) از طریق یک نگه‌دارنده به مکانیزم انتقال دهنده وصل می‌شود و در مرکز اتاق آزمون نگه داشته می‌شود. این مکانیزم توانایی جابجایی در راستای سه محور مختصات را با دقت ۰/۰۱ mm دارد. میکروفون شماره ۲ نیز برای بررسی‌های بیشتر روی بدنه اتاق آزمون (به صورت هم سطح با دیواره) و در موقعیت طولی تقریباً یکسان با میکروفون ۱ نصب گردید که در ادامه در این ارتباط توضیحات بیشتری ارائه خواهد شد.



شکل ۳ - نمایی از میکروفون‌های نصب شده داخل اتاق آزمون به همراه مکانیزم انتقال دهنده

قله‌های واضح دیگر برای همه حالاتی که فن روشن است، در فرکانس ثابت ۳۰۰ Hz و هارمونیک‌های آن رخ می‌دهند. این قله‌ها نوفه آیرودینامیکی نبوده و مربوط به نوفه منتشر شده از موتور متصل به فن تونل باد هستند که به محض روشن شدن موتور در سیگنال‌ها نمود پیدا می‌کنند.

افزایش ناگهانی نوفه در تمامی سرعت‌های جریان در فرکانس حدود ۷۵۰ Hz مربوط به صدای طنین‌دار ناشی از یک موج ایستاده در عرض اتاق آزمون است. فرکانس مربوط به این موج‌ها با استفاده از ارتفاع اتاق آزمون،  $H$  و سرعت صوت،  $c$ ، در دمای آزمایشگاه با رابطه ۱ مشخص می‌شود:

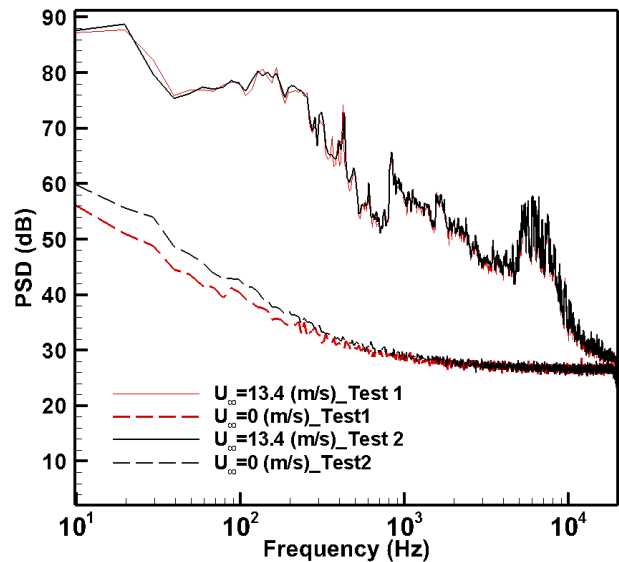
$$f_{standing\ wave} = c/H \quad (1)$$

قله‌های پهن باند مشاهده شده در شکل ۵ در محدوده فرکانسی ۸۰۰-۳۰۰۰ Hz و به‌ویژه در سرعت‌های بالاتر نیز می‌توانند نمود آکوستیکی ارتعاشاتی باشند که در سرعت مربوطه رخ می‌دهند. ارتعاش دیواره‌ها موج‌های صوتی ایجاد می‌کند که توسط میکروفون ثبت می‌شوند. با توجه به شکل ۵ نوفه ناشی از ارتعاشات ماهیتی پهن باند دارد. همچنین با افزایش سرعت، این ارتعاشات سریع‌تر اتفاق افتاده و بنابراین قله‌ها به سمت محدوده فرکانسی بالاتری منتقل می‌شوند.

در مطالعات گذشته نشان داده شده است که یکی از منابع اصلی نوفه زمینه تونل باد در محدوده فرکانس‌های پایین و میانی، نوفه فرکانس عبور پره<sup>۲</sup> فن تونل باد است که فرکانس آن با رابطه ۲ مشخص می‌شود [۱]:

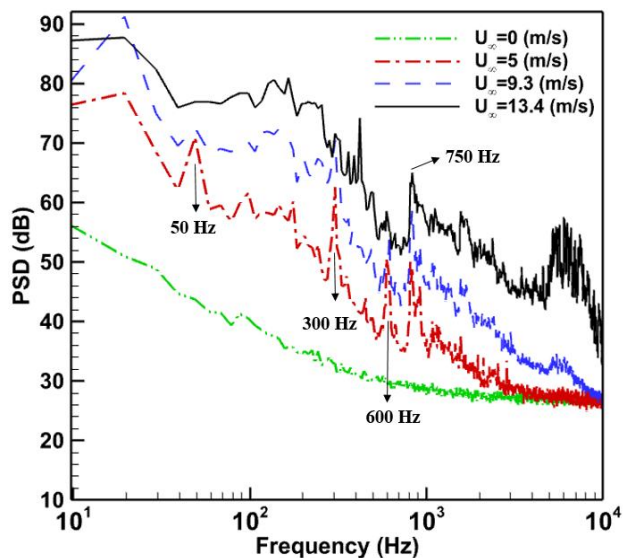
$$BFP(Hz) = N \times \omega / 60 \quad (2)$$

که  $N$  تعداد پره‌های فن تونل باد بوده و  $\omega$  بیانگر سرعت دورانی فن بر حسب rpm است. تعداد پره‌های فن تونل باد مطالعه حاضر برابر ۶۰ عدد بوده و لذا فرکانس گذر پره را برای هر درصدی از دور فن می‌توان تعیین نمود. با این وجود در شکل ۵ چنین قله‌هایی به وضوح مشخص نیستند. دلیل این امر نوع فن تونل باد است. فن‌های سانتریفیوژ با پره‌های دارای انحنا روبه جلو کمترین نوفه فرکانس عبور پره را دارا هستند. نکته قابل توجه دیگر در مورد طیف نوسانات فشار ارائه شده در شکل ۵ این است که در فرکانس‌های خیلی پایین (کمتر از ۳۰ Hz) به ویژه در سرعت‌های بالاتر، سطح صدا نسبتاً بالاست. این موضوع را می‌توان به سطح نوفه بالای فرکانس پایین منتشر شده از فن دستگاه تونل باد نسبت داد که البته ماهیتی متفاوت

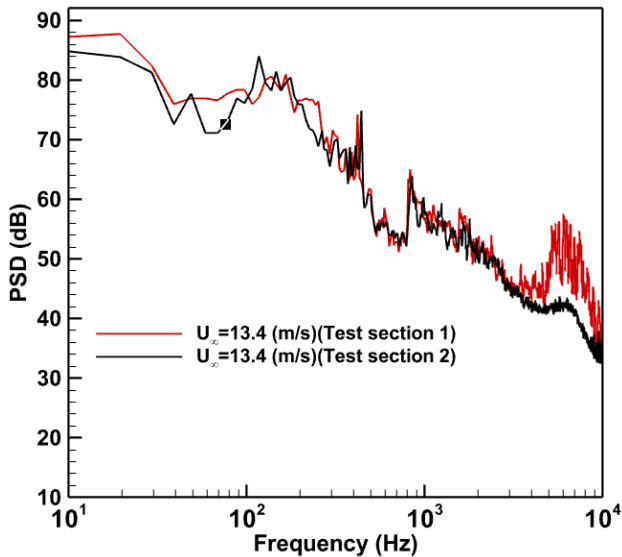


شکل ۴ - بررسی تکرارپذیری آزمایش اندازه‌گیری شدت صوت

شکل ۵ طیف فشار آکوستیکی را برای اتاق آزمون اول تونل باد و برای سرعت‌های جریان هوای بالادست مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل اولین قله‌های واضح در فرکانس ثابت ۵۰ Hz و برای سرعت‌های بالادست ۵ و ۹/۳ متر بر ثانیه رخ داده است. با توجه به عدم حضور این قله‌ها برای حالتی که تونل خاموش است و همچنین بر پایه بررسی‌های انجام گرفته، می‌توان آن را ناشی از نویز الکتریکی ۵۰ Hz برق شهر دانست.



شکل ۵ - طیف فشار آکوستیکی در مرکز اتاق آزمون اول در سرعت‌های مختلف جریان

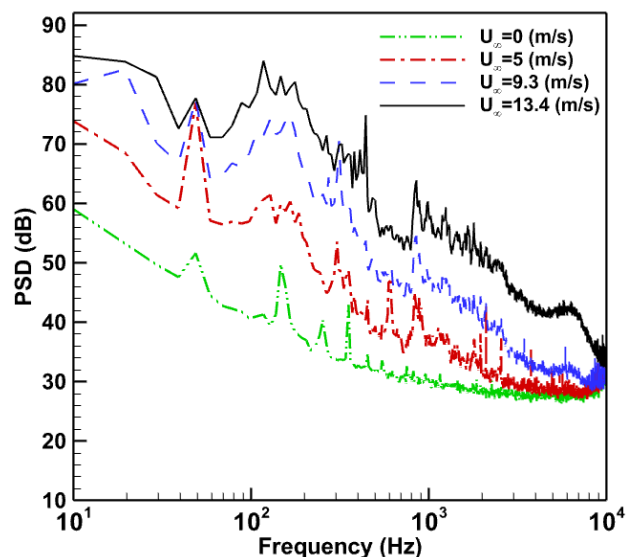


شکل ۷ - مقایسه طیف فشار آکوستیکی برای دو اتاق آزمون

همان گونه که در شکل ۷ مشخص است، میزان سطح نوفه زمینه در بازه فرکانسی بین حدود ۳۰۰-۳۰۰۰ هرتز تابعی از مکان قرارگیری میکروفون در راستای جریان نیست. با این وجود نتایج نشان می‌دهد که در محدوده فرکانس‌های پایین (مخصوصاً کمتر از ۱۰۰ Hz) و فرکانس‌های بین ۸۰۰۰-۳۰۰۰ هرتز نوفه زمینه تونل باد در اتاق آزمون دوم به مراتب کم‌تر است. به طور کلی برای جریان‌های با سرعت پایین، منابع اصلی نوفه زمینه تونل باد عبارتند از: فن تونل و تشکیل لایه مرزی آشفته روی دیواره‌های تونل [۴]. با توجه به شکل ۷ سیگنال ثبت شده در اتاق آزمون دوم در فرکانس‌های پایین تا ۵ dB ضعیف‌تر است. علت این امر می‌تواند فاصله بیشتر میکروفون تا منبع اصلی نوفه، یعنی فن تونل باد باشد. همچنین قله‌های پهن باند مربوط به ارتعاشات که در محدوده فرکانسی ۸۰۰۰-۳۰۰۰ هرتز رخ می‌دهند در اتاق آزمون دوم به میزان قابل توجهی (بیش از ۱۰ dB) ضعیف‌تر شده‌اند. دلیل این موضوع نیز می‌تواند فاصله گرفتن از فن تونل باد به عنوان منبع اصلی تولید ارتعاش در دستگاه باشد. شایان ذکر است، افزایش ناگهانی نوفه مربوط به موج‌های ایستاده در فرکانس تقریبی ۷۵۰ Hz برای هر دو اتاق آزمون به چشم می‌خورد. زیرا چنین موج‌هایی در هر دو اتاق آزمون وجود داشته و با توجه به هندسه یکسان دو اتاق آزمون فرکانس رخداد آنها نیز یکسان است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در تونل باد حاضر با توجه به کم بودن طول اتاق آزمون و در نتیجه

از نوفه مرتبط با فرکانس عبور پره دارد. اندازه این نوفه‌ها (در محدوده ۳۰-۱۰ Hz) با افزایش سرعت جریان، بیشتر می‌شود. در ادامه به منظور بررسی میزان وابستگی سطح نوفه به محل قرارگیری میکروفون در اتاق آزمون، میکروفون در مرکز اتاق آزمون دوم (به فاصله ۱۸۰ cm از خروجی نازل تونل باد) قرار گرفت و آزمایش‌های قبلی تکرار شدند. نتایج نشان داد که شکل کلی طیف چگالی توانی برای سیگنال‌های ثبت شده در دو اتاق آزمون تقریباً مشابه یکدیگر هستند به طوری که نویز ۵۰ Hz (مربوط به برق شهر)، نویز فرکانس ثابت ۳۰۰ Hz و هارمونیک‌های آن، افزایش ناگهانی نوفه در تمامی سرعت‌های جریان در فرکانس حدود ۷۵۰ Hz (مربوط به امواج ایستاده در عرض اتاق آزمون) و قله‌های پهن باند در محدوده فرکانسی ۸۰۰۰-۳۰۰۰ هرتز (ناشی از ارتعاش دیواره‌ها)، در اتاق آزمون دوم نیز به وضوح وجود دارد، شکل ۶.

برای بررسی و مقایسه دقیق‌تر سیگنال‌های ثبت شده در دو اتاق آزمون تونل باد، سیگنال‌های مربوطه در کنار یکدیگر در شکل ۷ رسم شده‌اند. با توجه به روند مشابه برای سرعت‌های بالادست مختلف جهت رعایت اختصار، نمودار تنها برای سرعت بالادست  $U_{\infty} = ۱۳/۴$  m/s رسم شده است.



شکل ۶ - طیف فشار آکوستیکی در مرکز اتاق آزمون دوم در سرعت‌های مختلف

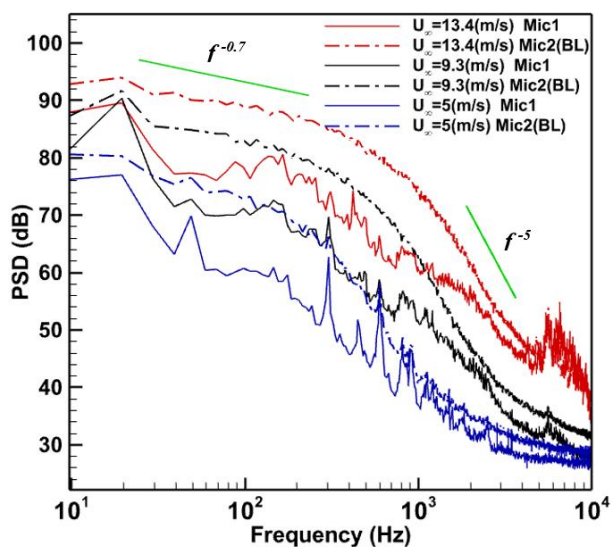


افزایش نوسانات سرعت و فشار در لایه مرزی منجر به افزایش طیف فشار سطح و انتقال آن به فرکانسهای بالاتر شده است. همچنین نرخ کاهش طیف فشار سطح به ازای تمامی سرعتها در فرکانسهای میانی متناسب با  $f^{-0.7}$  و در فرکانسهای بالا متناسب با  $f^{-5}$  بوده و همخوانی مناسب روند تغییرات با نتایج مطالعات گذشته [۱۴-۱۲] بیانگر صحت اندازه گیریهای انجام شده در مطالعه حاضر است. همچنین بالا بودن نوفه لایه مرزی منجر به محو شدن قلههای مربوط به نویز ۵۰ Hz برق شهر، نویز فرکانس ثابت ۳۰۰ Hz و هارمونیکهای آن و امواج ایستاده در فرکانس حدود ۷۵۰ Hz شده است.

در نهایت، مقدار سطح فشار صوتی کلی (OSPL) با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شده است.

$$OSPL = 20 \log_{10} \left( p'_{rms} / p_{ref} \right) \quad (3)$$

که  $p'_{rms}$  جذر متوسط مربعات نوسانات فشار بوده و فشار مرجع  $p_{ref}$  برابر با  $20 \mu Pa$  در نظر گرفته شده است [۱۵]. همان گونه که در شکل ۹ مشخص است در محدوده سرعتهای مورد بررسی، سطح فشار صوتی کلی بین ۶۰/۵ dB (در حالت فن خاموش) و ۹۱ dB (در سرعت ۱۳/۴ m/s) تغییر نموده است. ملاحظه می گردد که با افزایش سرعت مطابق انتظار سطح فشار صوتی کلی نیز افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان می دهد که سطح فشار صوتی کلی تقریباً متناسب با  $U_{\infty}^5$  تغییر می کند که این موضوع تطابق مناسبی با مطالعات پیشین از جمله مرجع [۱۶] دارد.



ضخامت کم لایه مرزی آشفته، منبع اصلی نوفه زمینه در مرکز اتاق آزمون، فن تونل باد است. این در حالی است که نتایج مراجع [۵، ۷] روی تونل باد ویرجینیا نشان داد که با فاصله گرفتن از فن تونل، نوفه زمینه قدری افزایش می یابد. دلیل این موضوع طول زیاد اتاق آزمون و در نتیجه غالب بودن نوفه لایه مرزی آشفته است. در نهایت با توجه به بررسیهای انجام شده می توان نتیجه گرفت که اتاق آزمون دوم برای انجام مطالعات آیروداکوستیکی مناسب تر است. ضمناً با انجام اصلاحاتی همچون جایگزینی دیواره صلب اتاق آزمون اول با دیواره دارای مواد جاذب صوت می توان نوفه زمینه در مرکز اتاق آزمون دوم را به میزان بیشتری نیز کاهش داد که این موضوع در بخشهای بعدی مطالعه حاضر بررسی می شود.

در قسمت قبل میزان نوفه زمینه در مرکز اتاق آزمون بررسی شد. از طرفی در برخی از مطالعات لازم است تا یک میکروفون یا آرایه ای از میکروفونها به صورت هم سطح با دیواره های اتاق آزمون نصب گردند. در این موارد، نوفه حس شده توسط میکروفونهای نصب شده روی دیوار به میزان قابل توجهی بالاتر از نوفه حس شده در مرکز اتاق آزمون گزارش شده است [۸، ۱۱]. دلیل این امر بالا بودن شدت نوسانات فشار جریان غیر دائم در لایه مرزی آشفته روی دیواره های تونل باد است. این موضوع نسبت سیگنال به نویز آرایه های میکروفونهای مورد استفاده در اندازه گیریهای آکوستیکی را کاهش می دهد.

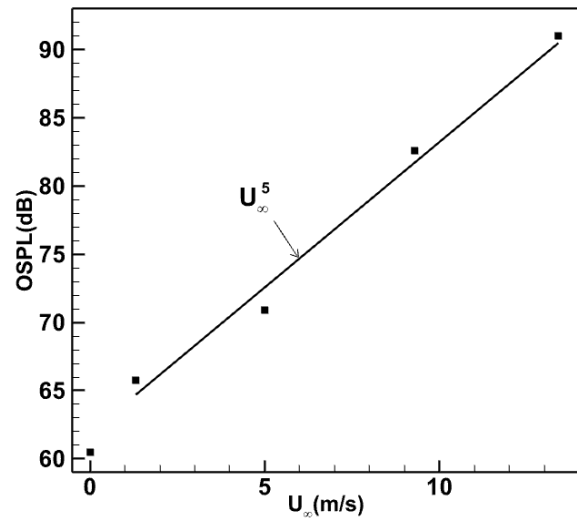
در ادامه این مطالعه، با نصب میکروفون به صورت هم سطح با دیواره های اتاق آزمون، میزان نوفه زمینه در روی دیواره های تونل باد حاضر بررسی گردید. در این آزمایش، یکی از میکروفونها (میکروفون شماره ۱) در مرکز اتاق آزمون اول قرار گرفته و میکروفون دیگر (میکروفون شماره ۲) روی دیواره اتاق آزمون به صورت هم سطح با دیواره نصب گردیدند (شکل ۳). محل قرارگیری هر دو میکروفون از نظر طولی یکسان در نظر گرفته شد. نتیجه کلی این آزمایش در شکل ۸ و برای سرعتهای بالادست مختلف نشان داده شده است. در این شکل، نتایج به دست آمده از میکروفون ۱ واقع در مرکز اتاق آزمون اول به صورت خط پیوسته و نتایج میکروفون ۲ واقع در لایه مرزی تونل به صورت خط نقطه نمایش داده شده اند. مطابق انتظار، میکروفون واقع در لایه مرزی، صدای بیشتری را ثبت می کند. همچنین افزایش سرعت جریان و در نتیجه

### بررسی کارآیی دیواره‌های جاذب صوتی

برای بهبود عملکرد آیروآکوستیکی تونل باد حاضر، طراحی جدیدی برای اتاق آزمون اول تونل باد در نظر گرفته شد که در آن بخش قابل توجهی از دیواره‌های اتاق آزمون اول تونل باد با یک سری جعبه جاذب آکوستیکی جایگزین شدند. جدار داخلی این جعبه‌ها که در تماس با جریان هوای داخل تونل هستند با پارچه کولار (Kevlar 120 (7.9 gram/cm<sup>2</sup>)) که کاملاً کشیده شده و محکم شده‌اند پوشانده شد. همان گونه که در بخش مقدمه اشاره شد خاصیت چنین پارچه‌هایی این است که صدا را از خود عبور داده و تقریباً جریانی را از خود عبور نمی‌دهند. هدف از این کار فراهم آوردن امکان خروج صدای تولید شده در تونل از اتاق آزمون و جذب آن توسط مواد جاذب صوتی و در نتیجه کاهش نوفه زمینه تونل باد است. یک ماده جاذب صوتی متخلخل جسم جامدی است که شامل حفره‌ها یا کانال‌هایی است که امواج صوتی می‌توانند به داخل آنها نفوذ کنند. در نهایت، انرژی امواج صوتی در اثر حرکت داخل کانال‌های مذکور به واسطه اصطکاک به گرما تبدیل می‌شود. لذا استفاده از مواد متخلخل در ساختار بدنه اتاق آزمون تونل باد باعث جذب بخشی از صدا و کاهش انعکاس امواج صوتی به داخل اتاق آزمون می‌شود. این موضوع باعث کاهش نوفه زمینه تونل باد خواهد شد.

نمایی از اتاق آزمون جدید تونل باد به همراه جعبه‌های جاذب آکوستیکی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. طول، عرض و عمق جعبه‌های ساخته شده به ترتیب ۵۰ cm، ۴۰ cm و ۲۵ cm انتخاب شد. سطح مقطع عرضی و جزئیات ساختاری یکی از جعبه‌های جاذب در شکل ۱۰ ب نشان داده شده است. هر یک از جعبه‌ها از جنس چوب ساخته شده و داخل آنها جاذب صوتی پشم سنگ قرار گرفته است.

شکل ۸ - مقایسه طیف فشار آکوستیکی برای دو میکروفون نصب شده در مرکز مقطع آزمون (Mic1) و روی دیواره تونل (Mic2) در سرعت‌های مختلف



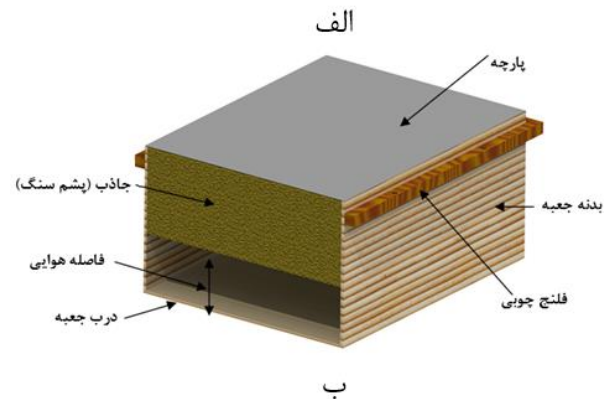
شکل ۹ - سطح فشار صوتی کلی در اتاق آزمون دوم

لازم به ذکر است که حضور میکروفون و تجهیزات نگهدارنده مربوط به آن در اتاق آزمون تونل باد، خود نیز تا حدی تولید نوفه می‌کند که امکان تعیین دقیق آن وجود ندارد. لذا بایستی در تمامی تحلیل‌های این مطالعه به این نکته توجه داشت که نوفه‌های مورد بررسی اندکی بالاتر از میزان نوفه واقعی تونل باد هستند.

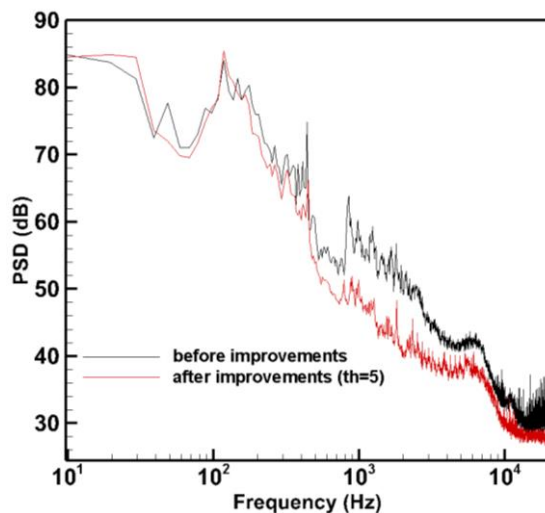
با توجه به نتایج ارائه شده و مطالعات قبلی صورت گرفته روی نوفه منتشر شده از اجسام با هندسه‌های مختلف، می‌توان چنین نتیجه گرفت که تونل باد آیرودینامیکی مورد مطالعه در پژوهش حاضر، چندان برای مطالعات آیروآکوستیکی مناسب نیست. چراکه نوفه زمینه تونل موجود تا حد زیادی بالا بوده و این موضوع، کار را برای مشاهده مشخصات آیروآکوستیکی جریان حول هندسه‌های مختلف و بررسی اثر عوامل مختلف روی آن دشوار می‌کند. در ادامه در راستای بهینه‌سازی عملکرد آیروآکوستیکی تونل باد حاضر، اثر حضور دیواره‌های جاذب صوتی در بالادست اتاق آزمون روی کاهش نوفه زمینه تونل باد بررسی شده است.



محدوده فرکانسی مورد بررسی، نوفه زمینه تونل را به میزان قابل قبولی کاهش داده است. همچنین ملاحظه می شود که بهبود عملکرد آکوستیکی تونل باد در فرکانس های بالاتر از فرکانس موج های ایستاده عرضی (فرکانس نزدیک به ۷۵۰ Hz) بیشتر است. دلیل این امر این است که استفاده از پارچه و مواد جاذب صوتی در دیواره اتاق آزمون باعث شده تا بخش اعظم امواج صوتی وارد ناحیه متخلخل (مواد جاذب صوتی) شده و انرژی آن ها به صورت گرما اتلاف گردد. این امر منجر به عدم تشکیل امواج ایستاده در اتاق آزمون تونل باد شده و لذا اثر حضور این امواج در طیف فشار ثبت شده بسیار کمتر دیده می شود. از طرف دیگر، نتایج نشان می دهد که نوفه ناشی از ارتعاشات دیواره (در محدوده فرکانسی ۸۰۰۰-۳۰۰۰ Hz) به واسطه حضور مواد جاذب کاهش قابل توجهی یافته است. لازم به ذکر است که روند تغییرات برای سایر سرعت های جریان بالادست مشابه طیف مربوط به سرعت  $13/4 \text{ m/s}$  بوده که جهت رعایت اختصار از ارائه آن خودداری شده است.



شکل ۱۰- الف: اصلاحات آکوستیکی صورت گرفته روی تونل باد؛  
ب: جزئیات ساختاری جعبه های جاذب آکوستیکی

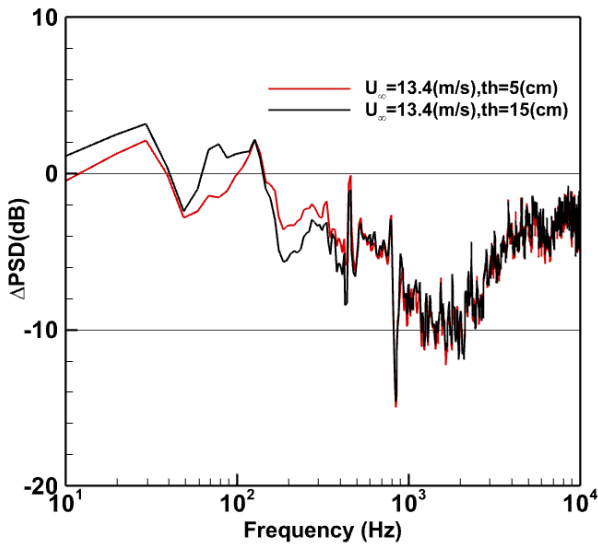


شکل ۱۱- اثر اصلاحات آکوستیکی صورت گرفته روی تونل باد در سرعت بالادست  $13/4 \text{ m/s}$  (ضخامت جاذب درون جعبه ها ۵ cm)

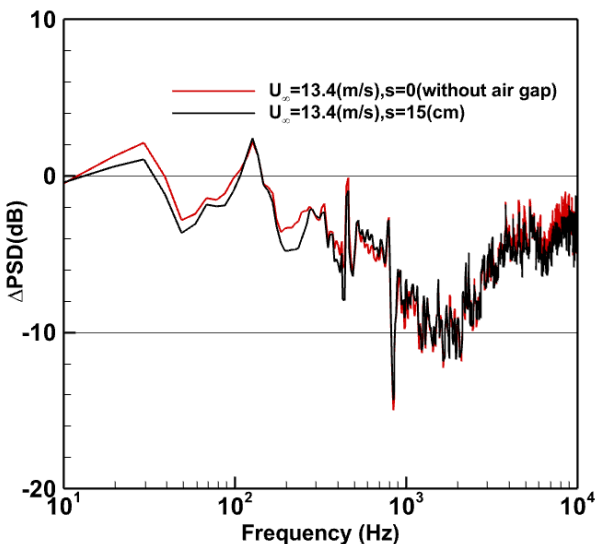
در شکل های ۱۲ تا ۱۴ به جای ارائه نوفه زمینه تونل باد، جهت مشاهده بهتر میزان تغییرات، اختلاف بین نوفه زمینه تونل باد اصلاح شده و تونل باد اولیه (پیش از انجام اصلاحات آکوستیکی) برای سرعت بالادست  $U_{\infty} = 13/4 \text{ m/s}$  ارائه شده است. بنابراین در این شکل ها، مقادیر مثبت نشان دهنده افزایش نوفه زمینه تونل باد و مقادیر منفی نشانگر کاهش آن در اثر اصلاحات آکوستیکی صورت گرفته است. اثر افزایش

در ادامه داده های مربوط به نوفه تونل باد اصلاح شده ارائه می شود. جنس و چگالی ماده جاذب صوتی مورد استفاده در جعبه ها و ضخامت این ماده روی مقدار و بازه فرکانسی کاهش نوفه زمینه اثرگذار است [5]. در این مطالعه، کارایی دیواره های جاذب صوتی در کاهش نوفه زمینه تونل باد و اثر پارامترهایی هم چون ضخامت جاذب صوتی (پشم سنگ) و وجود فاصله هوایی بین پشم سنگ و درب جعبه ها روی میزان و محدوده فرکانسی کاهش نوفه زمینه تونل باد بررسی شده است.

در شکل ۱۱ نوفه زمینه تونل باد در مرکز اتاق آزمون دوم برای سرعت بالادست  $U_{\infty} = 13/4 \text{ m/s}$  قبل و بعد از انجام اصلاحات آکوستیکی مقایسه شده است. ضخامت جاذب صوتی در این حالت برابر ۵ cm بوده و درب جعبه های جاذب بسته هستند. بسته بودن درب جعبه ها از این جهت حائز اهمیت است که مانع از انتقال نوفه های محیطی به داخل اتاق آزمون می شود. لازم به ذکر است در این قسمت درب های چوبی مذکور دقیقاً روی جاذب صوتی قرار گرفته اند و فاصله هوایی بین جاذب و درب چوبی وجود ندارد. مشاهده می شود که انجام اصلاحات آکوستیکی به جز در فرکانس های پایین، در تمامی



شکل ۱۲ - مقایسه تغییرات طیف فشار آکوستیکی با افزایش ضخامت عایق صوتی داخل جعبه‌های جاذب



شکل ۱۳ - مقایسه تغییرات طیف فشار آکوستیکی ناشی از ایجاد فاصله هوایی بین جاذب و درب جعبه‌های جاذب

با این حال پدیده غالب در مورد اجسام جریان‌بند، پدیده ریزش گردابه است. با توجه به مطالعات قبلی صورت گرفته [۱۸]، فرکانس ریزش گردابه در بسیاری از موارد بسته به سرعت جریان بالادست و ابعاد مدل در بازه فرکانسی کمتر از ۱۰۰ Hz قرار می‌گیرد. لذا تونل باد موجود هنوز برای مطالعه آیروداکوستیکی چنین هندسه‌هایی مناسب نیست. از طرفی با توجه به این که امواج صوتی با فرکانس پایین دارای طول موج بزرگی هستند، انعکاس این امواج پس از برخورد با مواد

ضخامت جاذب برای حالتی که فاصله هوایی وجود ندارد در شکل ۱۲ نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که افزایش ضخامت مواد متخلخل برای این حالت باعث کاهش بیشتر نوفه زمینه تا حدود ۲ dB در بازه فرکانسی تقریبی ۱۵۰-۴۰۰ Hz می‌شود. با این وجود برای فرکانس‌های زیر حدود ۱۲۰ Hz افزایش ضخامت مواد متخلخل نتیجه معکوس داشته و منجر به کاهش کارایی مواد متخلخل شده است. همچنین افزایش ضخامت مواد متخلخل اثر معناداری روی کاهش سطح نوفه زمینه تونل باد در فرکانس‌های بالاتر از ۴۰۰ Hz ندارد.

اثر ایجاد فاصله هوایی بین جاذب صوتی و درب پوشش دهنده جعبه‌ها در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این آزمایش، ضخامت جاذب برابر با ۵ cm بوده و فاصله هوایی بین جاذب و درب جعبه‌ها تا ۱۵ cm در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۳ بین حالتی که فاصله هوایی وجود ندارد ( $s=0$ ) و حالتی که فاصله هوایی ۱۵ cm است مقایسه صورت گرفته است. همان گونه که از شکل ۱۳ مشخص است، ایجاد فاصله هوایی بین جاذب صوتی و درب جعبه‌ها در فرکانس‌های کمتر از ۳۰۰ Hz باعث کاهش نوفه زمینه تونل باد در حدود ۱/۵ dB - می‌شود. ولی برای فرکانس‌های بالاتر از ۳۰۰ Hz این اثر خیلی محسوس نیست. همچنین بر خلاف اثر ضخامت جاذب صوتی، افزایش فاصله هوایی، نوفه زمینه را در فرکانس‌های خیلی پایین نیز کاهش داده است.

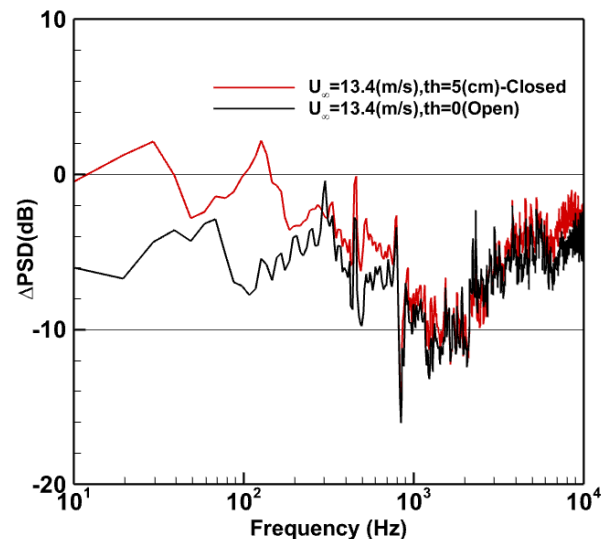
نتایج ارائه شده بیانگر این است که استفاده از مواد متخلخل، عملکرد آکوستیکی تونل باد را تا حد زیادی بهبود داده است. با این وجود کارایی این روش تقریباً محدود به فرکانس‌های متوسط و بالا بوده و مشکل نوفه بالای زمینه در فرکانس‌های پایین حل نشده باقی مانده است. لذا کاهش نوفه صورت گرفته بواسطه استفاده از مواد متخلخل، کارایی تونل باد حاضر را برای انجام مطالعات آیروداکوستیکی روی هندسه‌هایی همچون صفحه تخت، ایرفویل‌ها و ... که پدیده‌های غالب عمدتاً در فرکانس‌های بالا رخ می‌دهند بهبود داده است. افشاری و همکاران [۱۷] طیف فشار سطح لایه مرزی آشغته روی صفحه تخت را با استفاده از میکروفون به صورت تجربی در تونل باد اصلاح شده مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان دهنده کارایی اصلاحات آکوستیکی صورت گرفته روی تونل باد حاضر برای مطالعات آیروداکوستیکی روی هندسه‌هایی همچون صفحه تخت است.

در مجموع نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که برای آزمایش هندسه‌هایی مثل اجسام جریان‌بند که پدیده غالب در فرکانس‌های پایین رخ می‌دهد بهتر است درب جعبه‌ها و جاذب‌های صوتی داخل جعبه‌ها برداشته شده و سپس آزمایش‌ها انجام شوند. یعنی در این حالت، عملاً فقط دیواره‌های صلب اتاق آزمون با پارچه‌های کاملاً کشیده شده جایگزین شده‌اند. این کار کمک می‌کند سطح نوفه زمینه در فرکانس‌های پایین تا حد قابل توجهی کاهش یابد. موحدی و همکاران [۱۹] در مطالعه‌ای فرآیند تولید نوفه آیرودینامیکی از یک سیلندر مربعی متصل به دیواره را در تونل مذکور (با دیواره پارچه‌ای و بدون حضور جاذب صوتی) بررسی نمودند. مطالعه مذکور مناسب بودن تونل باد اصلاح شده برای مطالعه آیرودینامیکی جریان حول اجسام جریان‌بند را تایید نمود.

علاوه بر رفتار آکوستیکی تونل، رفتار آیرودینامیکی تونل باد اصلاح شده شامل یکنواختی میدان سرعت و شدت آشفتگی جریان در مقطع دوم تونل باد در سرعت‌های مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد که با توجه به کشیده شدن مناسب پارچه‌ها و عدم عبور جریان از پارچه‌ها، حتی در بیشترین سرعت مورد بررسی، تغییر قابل توجهی در یکنواختی میدان سرعت و شدت آشفتگی جریان رخ نداده و حتی به میزان کمی شرایط بهتر شده است. به عنوان نمونه شدت آشفتگی جریان در مرکز مقطع آزمون دوم برای سرعت بالادست  $U_{\infty} = 13/4$  m/s از مقدار حدود ۰/۲۷٪ در تونل باد با دیواره صلب به مقدار تقریبی ۰/۲۶٪ در تونل باد اصلاح شده کاهش یافته است. دلیل این امر احتمالاً اصلاح جزیی دیواره‌های تونل در فرآیند بازسازی است. لازم به ذکر است در مطالعه حاضر از ارائه نتایج کامل بررسی آیرودینامیکی تونل باد (قبل و بعد از انجام اصلاحات) به جهت رعایت اختصار خودداری شده است.

در نهایت، نتایج یک اندازه‌گیری تنها زمانی کامل است که همراه با عدم قطعیت پارامترهای اندازه‌گیری شده ارائه شوند. عدم قطعیت چگالی طیفی نوسانات فشار میکروفون‌ها عمدتاً ناشی از عدم قطعیت همگرایی آماری بوده و با توجه به روابط بندات و پیرسول [۲۰] به صورت  $\varepsilon = 1/\sqrt{N_r}$  محاسبه می‌گردد که  $N_r$  برابر با تعداد ثبت داده‌ها است. در مطالعه حاضر جهت کاهش عدم قطعیت همگرایی آماری، کل زمان داده برداری به ۳۰۰ قسمت مجزا تقسیم شده ( $N_r = 300$ ) که با توجه به تعداد کل داده‌ها (۱,۲۰۰,۰۰۰)، هر قسمت

متخلخل و به ویژه درب جعبه‌های جاذب و بازگشت آنها به داخل اتاق آزمون دلیل احتمالی عدم بهبود عملکرد آکوستیکی تونل در فرکانس‌های پایین تشخیص داده شد. لذا در مرحله بعد، آزمایش‌های قبلی با باز بودن درب جعبه‌ها و عدم حضور مواد متخلخل تکرار شد. در این حالت صرفاً پارچه‌ها به عنوان دیواره تونل به کار برده می‌شوند و تمامی مواد متخلخل از جعبه‌ها خارج می‌شوند. این موضوع باعث می‌شود تا امواج فرکانس پایین به راحتی به داخل محیط آزمایشگاه راه یافته و انعکاس کمتری به اتاق آزمون داشته باشند. البته باز بودن درب جعبه‌ها و عدم حضور جاذب صوتی از طرفی باعث می‌شود تا نوفه محیطی بیشتری از اطراف تونل به داخل اتاق آزمون راه یابد. لذا برای حالتی که درب جعبه‌ها باز است، بایستی محیط آزمایشگاه کاملاً ساکت باشد تا نتیجه بهتری از آزمایش‌ها به دست آید. نتیجه این کار در شکل ۱۴ ارائه شده است.



شکل ۱۴ - مقایسه تغییرات طیف فشار آکوستیکی ناشی از حذف جاذب صوتی و باز گذاشتن درب جعبه‌ها

با توجه به شکل ۱۴، مشاهده می‌گردد که عدم حضور مواد متخلخل و درب جعبه‌ها، منجر به کاهش قابل توجه سطح نوفه زمینه تونل باد تا حدود ۸ dB در فرکانس‌های پایین شده است. دلیل این امر نیز همان گونه که پیش‌تر گفته شد، حذف موانع خروج امواج با فرکانس پایین (یا به عبارتی طول موج بیشتر) است. با این حال نوفه مربوط به موتور فن در فرکانس ۳۰۰ Hz به دلیل باز بودن درب جعبه‌ها و امکان ورود نوفه‌های محیطی افزایش یافته است.

می‌شود. وجود فاصله هوایی نیز تا ۱/۵ dB نوفه پس زمینه تونل باد را کاهش می‌دهد. برای بهبود عملکرد آبروآکوستیکی تونل باد در فرکانس‌های پایین، که برای مطالعه انتشار نوفه از اجسام جریان بند مهم هستند، از سطوح عبور دهنده صدا به جای مواد جاذب صوتی استفاده شد. برای این منظور، جعبه‌ها از جاذب صوتی خالی شده و درب جعبه‌ها نیز باز گذاشته شد. این کار نوفه زمینه تونل باد را در فرکانس‌های پایین به میزان قابل توجهی کاهش داد.

#### پی‌نوشت‌ها

- ۱ Kevlar
- ۲ Blade Pass Frequency noise (BPF)

دارای ۴۰۰۰ داده است. طیف فشار با میانگین‌گیری از طیف فشار حاصل از تمامی قسمت‌ها بدست آمده و بنابراین با توجه به رابطه ذکر شده، عدم قطعیت همگرایی آماری چگالی طیفی نوسانات فشار برابر با  $\frac{5}{8}\%$  است.

#### نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، مشخصات آبروآکوستیکی تونل باد دانشگاه یزد بررسی شده است. اندازه‌گیری‌ها در اتاق آزمون خالی و با استفاده از میکروفون‌های یک‌چهارم اینچ G.R.A.S برای سرعت‌های جریان مختلف انجام شدند. طیف فرکانسی و سطح فشار صوتی کلی مورد بررسی قرار گرفتند. در طیف فرکانسی به دست آمده، اثر مشارکت عوامل مختلف در تولید نوفه زمینه تونل باد مشاهده گردید. برخی از مهم‌ترین عوامل مذکور عبارتند از: نویز الکترونیکی ۵۰ هرتز مربوط به برق شهری، موج‌های ایستاده در عرض مقطع اتاق آزمون و ارتعاش دیواره‌های تونل. مطابق انتظار، با افزایش سرعت جریان داخل اتاق آزمون، نوفه زمینه نیز افزایش یافت. اثر تغییر مکان میکروفون در راستای جریان نیز بررسی گردید. مشخص گردید با افزایش فاصله از ورودی اتاق آزمون، شدت صدا و نوفه ثبت شده در برخی محدوده‌های فرکانسی تا حدی کاهش می‌یابد. دلیل این امر نیز به فاصله گرفتن از منبع اصلی نوفه تونل یعنی فن ارتباط داده شد. نهایتاً تشخیص داده شد که تونل باد آبرودینامیکی مذکور با شرایط فعلی برای مطالعات آبروآکوستیکی مختلف مناسب نیست و اصلاحاتی روی آن صورت گرفت. این اصلاحات شامل تعویض اتاق آزمون اول تونل و تعبیه جعبه‌های جاذب صوتی روی دیواره‌های اتاق آزمون جدید است. جدار داخلی این جعبه‌ها که در تماس با جریان هوای داخل تونل هستند با پارچه‌هایی که کاملاً کشیده شده و محکم شده‌اند پوشانده شد. بخشی از فضای داخلی این جعبه‌ها با پشم سنگ به عنوان جاذب صوتی با ضخامت‌های مختلف پر شده است. کشیده شدن مناسب پارچه‌ها باعث گردید که حتی در بیشترین سرعت مورد بررسی، تغییر قابل توجهی در یکنواختی میدان سرعت و شدت آشفتگی جریان داخل تونل نسبت به تونل باد اصلاح نشده ایجاد نگردد. اثر ضخامت پشم سنگ و وجود فاصله هوایی بین این مواد و سطح بیرونی جعبه‌ها بررسی شد. مشخص شد افزایش ضخامت پشم سنگ باعث بهبود عملکرد آکوستیکی تونل در فرکانس‌های بالا

## منابع و مراجع

- [12] A. Afshari, A.A. Dehghan, M. Farmani, "Experimental investigation of trailing edge noise by measuring unsteady surface pressures," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol 51(6), pp. 61-70, 2017 (in Persian).
- [13] A. Afshari, M. Azarpeyvand, A.A. Dehghan, M. Szöke, R. Maryami, "Trailing-edge flow manipulation using streamwise finlets," *Journal of Fluid Mechanics*, vol 870, pp. 617-650, 2019.
- [14] A. Afshari, A.A. Dehghan, M. Azarpeyvand, "Novel three-dimensional surface treatments for trailing-edge noise reduction," *AIAA Journal*, vol 57(10), 4527-4535, 2019.
- [15] S.W. Rienstra, A. Hirschberg, "An Introduction to Acoustics," PhD thesis, Eindhoven University of Technology, 2013.
- [16] T. Chong, P. Joseph, P. Davies, "Design and performance of an open jet wind tunnel for aero-acoustic measurement," *Applied acoustics*, vol 70(4), pp. 605-614, 2009.
- [17] A. Afshari, A.A. Dehghan, V. Kalantar, M. Farmani, "Experimental investigation of surface pressure spectra beneath turbulent boundary layer over a flat plate with microphone," *Modares Mechanical Engineering*, vol 17(1), pp. 263-272 (in Persian).
- [18] A. Movahedi, A. Sohankar, M. Dehghan Manshadi, "Experimental investigation of turbulent flow around a 3D square cylinder with wall effect," *Sharif journal of mechanical engineering*, vol 3-30(1), pp. 65-77, 2013 (in Persian).
- [19] A. Movahedi, A.A. Dehghan, M.D. Manshadi, "Experimental Investigation of aero acoustic noise generation process from a wall mounted square cylinder at incidence," *Modares Mechanical Engineering*, vol 17(9), pp. 327-338, 2017 (in Persian).
- [20] J. Bendat, A. Piersol, "Random Data Analysis and Measurement Procedures," JOHN WILEY & SONS, 2010.
- [1] J. Mathew, "Design, fabrication, and characterization of an anechoic wind tunnel facility," In 11th AIAA/CEAS aeroacoustics conference, p. 3052. 2005.
- [2] B. Plogmann, "Background Noise Measurements in the Laminar Wind Tunnel," Tech. rep., University of Stuttgart, Institute of Aerodynamics and Gas Dynamics, 2010.
- [3] M.C. Remillieux, E.D. Crede, H.E. Camargo, R.A. Burdisso, W.J. Devenport, M. Rasnick, P. Van Seeters, A. Chou, "Calibration and demonstration of the new Virginia Tech anechoic wind tunnel," 14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (29th AIAA Aeroacoustics Conference), 2008.
- [4] L.D. Santana, M. Carmo, F.M. Catalano, M.A. Medeiros, "The update of an aerodynamic wind-tunnel for aeroacoustics testing," *Journal of Aerospace Technology and Management*, vol 6(2), pp. 111-118, 2014.
- [5] P.F. Mish, "An experimental investigation of unsteady surface pressure on single and multiple airfoils," phd thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- [6] J.V. Larssen, W.J. Devenport, "Acoustic properties of the Virginia tech stability wind tunnel," Rept. VPI-AOE-263, AOE Dept., Virginia Tech., 1999.
- [7] H. Carmargo, B. Smith, W. Devenport, R. Burdisso, "Evaluation and Calibration of a Prototype Acoustic Test Section for the Virginia Tech Stability Wind Tunnel," Report VPI= OAE-294, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [8] T. Ito, H. Ura, K. Nakakita, Y. Yokokawa, W. Ng, R. Burdisso, A. Iwasaki, T. Fujita, N. Ando, N. Shimada, "Aerodynamic/aeroacoustic testing in anechoic closed test sections of low-speed wind tunnels," AIAA2010-3750, 2010.
- [9] M. Szöke, W.J. Devenport, A. Borgoltz, W.N. Alexander, N. Hari, S.A. Glegg, A. Li, R. Vallabh, A.-F.M.J.A.J. Seyam, "Investigating the Aeroacoustic Properties of Porous Fabrics," *AIAA Journal*, vol 60(6), pp. 3651-3660, 2022.
- [10] Microphone Handbook - Brüel & Kjær, 1996
- [11] V. Fleury, L. Coste, R. Davy, A. Mignosi, C. Cariou, J.M. Prosper, "Optimization of Microphone Array Wall Mountings in Closed-Section Wind Tunnels," *AIAA Journal*, vol 50(11), pp. 2325-2335, 2012.