

### بررسی تجربی صدای ناشی از جت نازل دالبر (Chevron Nozzle)

پژمان سرمست<sup>۱</sup>، رضا ابراهیمی<sup>۲</sup>

ایران، تهران، بزرگراه شهید زین الدین شرق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی هوافضا، آزمایشگاه پژوهشی پیشرانس و احتراق، کدپستی ۱۶۵۶۹۸۳۹۱۱، کارشناس ارشد<sup>۱</sup>

ایران، تهران، بزرگراه شهید زین الدین شرق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی هوافضا، آزمایشگاه پژوهشی پیشرانس و احتراق، کدپستی ۱۶۵۶۹۸۳۹۱۱، عضو هیات علمی<sup>۲</sup>

pzhsmt@gmail.com

#### چکیده

به منظور کاهش صدای جت خروجی از نازلها، از دالبر (شورون) کردن لبه انتهایی نازل استفاده می‌شود. به منظور ارزیابی اثر تعداد مختلف برشهای دالبری انجام شده در لبه خروجی نازل بر روی مشخصات صوتی جت خروجی از آن، یک اتاق آکوستیک با امکانات ویژه طراحی و ساخته شده است. از جمله امکانات این اتاق، اندازه‌گیری شدت صدای تولیدی نازل در هر محل مورد دلخواه در محیط اطراف آن که به طور خودکار موقعیت آن از پیش تنظیم شده، می‌باشد. در این اتاق، عملکرد صوتی نازل پایه (بدون برش دالبر) و دو نازل دالبر ساخته شده، مورد مطالعه تجربی قرار گرفته است. برای هر یک از نازل‌های پیشگفته، پارامترهایی همچون طیف‌های فشاری صوت، سطوح فشاری، سطح فشار کل و شاخص قدرت آکوستیک، در چهار موقعیت و در زوایای مختلف، در نسبت فشار مشخص نازل، اندازه‌گیری شده است. پارامترهای اندازه‌گیری شده، تحلیل و با گزارش‌های معتبر، اعتبار سنجی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات در شکل هندسی نازل‌ها به عنوان نازل شورون با شرایط خاص اولیه جت، دارای عملکرد آکوستیکی بهتر در فرکانس‌های پایین می‌باشند. همچنین انتقال فشار صوت در پهنای باند فرکانسی از فرکانس‌های پایین به بالا توسط نازل‌های شورون، قابل توجه می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** نازل شورون؛ اتاق آکوستیک؛ فشار صوت.

#### ۱- مقدمه

صدای تولید شده آیرودینامیکی، موضوعی است که بویژه در صنعت هوایی منجر به نگرانی‌های عمومی و زیستی شده است. در نتیجه، تلاش‌های زیادی برای کاهش کلی صدای هواپیماها، تحت حمایت اتحادیه اروپا و سازمان بهداشت جهانی شده است. قرار گرفتن در معرض شدید صدا می‌تواند به حلزون گوش و گوش داخلی آسیب برساند و این باعث تأثیرات منفی در کل مسیر شنوایی مرکزی می‌گردد. گوش انسان از سه ناحیه داخلی، مرکزی و بیرونی تشکیل شده است که هر کدام وظیفه درک طیف فرکانس‌های مختلف، توسط سلول‌های مژه‌دار را به عهده دارند. قرارگیری در معرض بیش از حد نویز می‌تواند باعث از دست دادن شنوایی موقتی<sup>۱</sup> یا گاهی دائمی<sup>۲</sup> شود. فشار صوتی بالاتر از ۱۰۰ دسی بل می‌تواند باعث ایجاد آسیب دائمی در حلزون

<sup>1</sup> Temporary Threshold Shift (TTS)

<sup>2</sup> Permanent Threshold Shift (PTS)

گوش شود. قرار گرفتن در معرض نویز، همچنین با تغییرات سلولی در سیستم شنوایی مرتبط است که از جمله اینها، افزایش تولید رادیکال‌های آزاد و تغییر در پروتئین‌های اتصال‌دهنده کلسیم است. در تحقیقات انجام شده ترنر و همکاران [۱] گزارش شده است که چگونه نویز می‌تواند منجر به تحریک سیستم‌های عصبی و ترشح هورمون مرتبط با استرس شود. علاوه بر افزایش سن، قوی‌ترین عامل تعیین‌کننده کاهش شنوایی، آسیب به سلول‌های حسی داخل حلزون گوش است که در اثر قرار گرفتن در معرض صدا ایجاد می‌گردد. عملکرد نادرست این ساختارهای محیطی منجر به کاهش انتقال اطلاعات شنوایی به مراکز پردازش بالاتر می‌شود. در نتیجه توانایی شنوایی را مختل می‌کند و منجر به ناهنجاری‌های ادراکی مانند وزوز گوش و هایپراکوزیس یا کم شنوایی می‌شود.

سهم عمده در ایجاد صدای هواپیماهای مجهز به توربوفن در هنگام برخاستن، خروج گاز پرسرعت از فن نازل می‌باشد که بخش قابل توجه نیروی رانش لازم هواپیما را تولید می‌کند. در دهه‌های گذشته تلاش‌هایی در جهت کاهش نویز جت با افزایش نسبت بای‌پس موتورهای توربو فن صورت گرفته است. با این حال، این روند از نظر فنی محدود است و افزایش بیشتر نسبت بای‌پس منجر به کاهش راندمان سوخت خواهد شد [۲]. یکی از نگرانی‌های زیستی، آلاینده‌های صوتی هواپیماها در هنگام برخاستن و نشستن می‌باشد که سهم تولیدی جت در هنگام برخاستن، عمده می‌باشد. کاهش صدای جت، معمولاً با کاهش سرعت جریان خروجی همراه است. مطلوب است که این کاهش بدون تغییر در عملکرد موتور صورت پذیرد. جریان جتی که از نازل خارج می‌شود، دارای ناپایداری ذاتی لایه برشی است و به همین سبب، باعث بوجود آمدن گردابه‌هایی می‌شود که به داخل ناحیه اغتشاشی فرو می‌ریزند و منجر به تولید نویز می‌شوند. مکانیزمی که به صورت پایه‌ای مشخص کند که پارامترهای هندسی شورون‌ها دقیقاً چه تأثیری بر تولید صوت دارند، به صورت دقیق مشخص نیست. به همین دلیل پارامترهای هندسی همانند تعداد شورون‌ها، طول قطاع‌ها، زاویه نفوذ و هندسه آنها به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین مشخص می‌گردد که انجام روش‌های تجربی برای صحنه‌گذاری در روش‌های محاسباتی، امری ضروری بشمار می‌آید. کاهش سطح تراز فشار صوتی همواره حالتی بهینه از کاهش صدای فرکانس پایین در محدوده فرکانس شنیداری انسانها و انتقال این سطح فشاری در سطوح فرکانسی بالاتر و حتی خارج از این محدوده در ناحیه فراصوتی با افزایش آشفستگی و اختلاط در مقیاس کوچک می‌باشد.

## ۲- روش تجربی اندازه گیری

با انجام آزمایشات آیروداکوستیکی خروجی نازل، ایجاد ساختاری مناسب و قابل قبول در حد آزمایشات، امری ضروری بشمار می‌آید. پیش‌بینی آیروداکوستیک تا به حدی به فرضیات و ساده‌سازی در مورد فیزیک منابع صوتی و جزئیات مدل‌سازی آنها، بستگی دارد. آزمایشات تجربی مستقیم‌ترین راه برای مشاهده منابع، استنتاج فیزیک مربوطه و نتایج کمی که روش‌های پیش‌بینی را می‌توان بر اساس آن اعتبارسنجی کرد را فراهم می‌آورد. برای انجام چنین آزمایشاتی، ایجاد شرایط فیزیکی آزمایش با دقت بالا مورد نیاز است. کیفیت اتاق آکوستیک مناسب جهت داده‌برداری نیز می‌بایست تعریف قابل قبولی در مسئله داشته باشد. به همین جهت در این پژوهش یک اتاق آکوستیک با شرایط مناسب و بهینه با کمترین بازگشت صوت و عملکرد صوتی بالا جهت داده‌برداری صوتی نازل‌های پایه و شورون جت مادون صوت طراحی و ساخته شد.

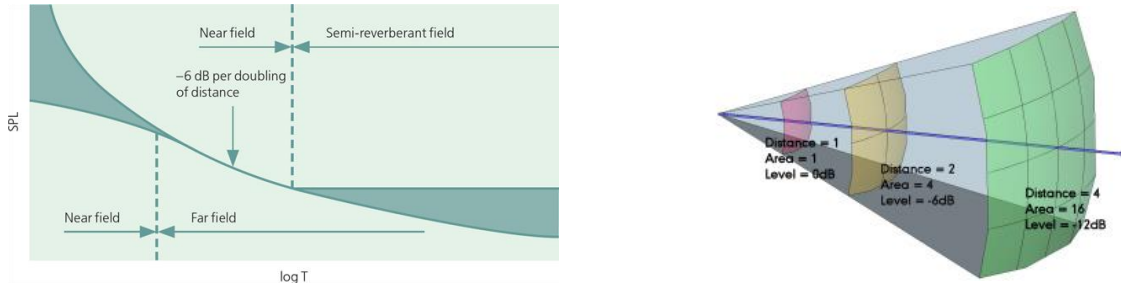
## ۲-۱- طراحی و ساخت اتاق آکوستیک

ابعاد اتاق آکوستیک را شرایط آزمایش و قطر خروجی نازل، تعیین می‌نماید. تمرکز در طراحی اتاق آکوستیک بر روی مشخصات منبع می‌باشد و می‌بایست حداقل برگشت که همان محیط آزاد است را داشت. تعیین فاصله گیرنده از منبع، باید به گونه‌ای باشد که گیرنده به دلیل تغییر فشار صوت با فاصله در میدان صوتی نزدیک، به صورت غیرخطی است، قرار نگیرد. به

دلیل فشار بالا در ناحیه نزدیک، سرعت هنوز با فشار هم فاز نشده است و می‌بایست گیرنده در فاصله دور دست منبع قرار گیرد.

میدان صوتی نزدیک برای یک منبع صوتی، به اندازه یک طول موج از منبع در هر فرکانس منبع با رابطه  $\lambda = \frac{c_0}{f}$  می‌باشد.

میدان صوتی دور دست، از فاصله‌ای به اندازه دو طول موج از منبع صوتی شروع و تا به نهایت ادامه می‌یابد [۴] شکل (۲).

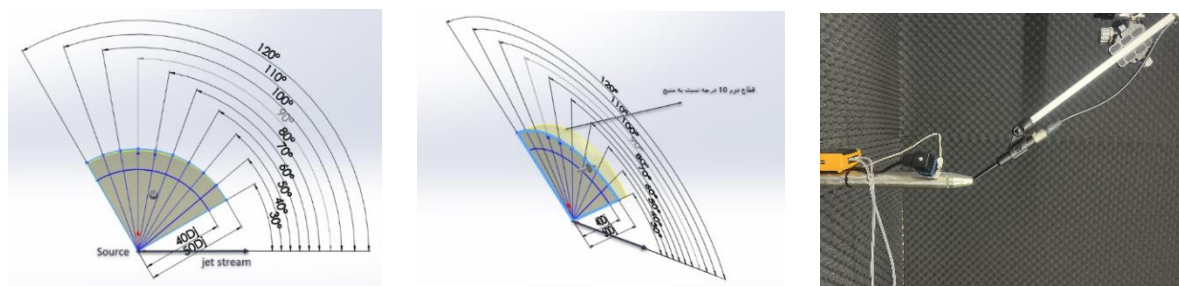


شکل ۲. شکل سمت راست قانون عکس مجذور فاصله - شکل سمت چپ تغییرات تراز فشار صوتی با لگاریتم فاصله از منبع صوت [۳]

در محیط انتشار صوت، قانون عکس مجذور فاصله برقرار است. طبق این قانون، شدت صوت به ازای دور شدن از منبع، به نسبت عکس مجذور فاصله همانند شکل (۲)، کاهش می‌یابد.

در این آزمایش، قطر خروجی نازل ۱۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است که با توجه به این قطر و با توجه به اینکه نازل در این مسئله به عنوان منبع شناخته می‌شود، فاصله گیرنده تا دهانه خروجی نازل به صورت یک آراییه قوسی شکل، به طوری که یک میکروفون با حرکت توسط سه محور  $X, Y, Z$  که می‌تواند مختصات خود را بر روی یک نیمکره توسط نرم افزار با دقت  $0.2^\circ$  میلی‌متر پیدا کند، تعیین می‌گردد. برای اطمینان از قرارگیری میکروفون در دور دست، فاصله قرارگیری در  $50 D_j$  و  $40 D_j$  (قطر نازل است)، تعیین می‌گردد. همین فاصله ایجاد می‌کند که با در نظر گرفتن اندازه فک‌های نگاه دارنده‌ی میکروفون و همچنین بازه حرکتی محورها، ابعاد اتاق آکوستیک با طول و عرض و ارتفاع به ترتیب،  $320 \times 208 \times 208$  سانتیمتر تعیین گردد (شکل ۳).

بازه مورد آزمایش به صورت دو قطاع از دو نیم کره در فضای اتاق آکوستیک در شکل ۳، آورده شده است.



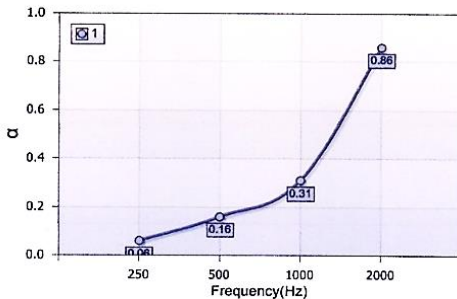
شکل ۳. محل قرارگیری میکروفون در قطاع‌های  $50 D_j$  و  $40 D_j$  از منبع و  $10^\circ$  درجه اختلاف از قطاع اول

## ۲-۱-۱- انتخاب پانل آکوستیک بر اساس آزمایش لوله امیدانس

جهت انتخاب نوع پانل آکوستیک، آزمایش لوله امیدانس در آزمایشگاه آکوستیک پژوهشگاه رنگ، جهت بدست آوردن ضریب جذب  $\alpha$ ، انجام شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، بالاترین ضریب جذب و حداقل بازگشت صوت، پنل فوم پلی

اورتان مورد استفاده در دیواره‌های اتاق آکوستیک انتخاب گردید. نتایج این آزمایش در جدول شماره ۱ و نمودار ضریب جذب در بازه فرکانسی ۲۵۰ تا ۲۰۰۰ هرتز در شکل ۴ آمده است.

جدول ۱. مشخصات آکوستیکی فوم پلی اورتان دیواره های اتاق آکوستیک

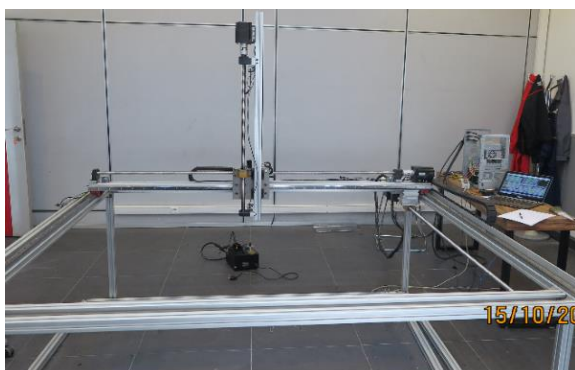


ضریب جذب	مینیمم	ماکزیمم	فرکانس (Hz)	رطوبت محیط (%)	دمای محیط (سانتی گراد)
۰/۰۶	۷۱	۹۲/۱	۲۵۰	۱۰	۲۵/۵
۰/۱۶	۷۰/۹	۹۲/۲	۵۰۰	۱۰	۲۵/۵
۰/۳۱	۷۶/۶	۹۱/۱	۱۰۰۰	۱۰	۲۵/۵
۰/۸۶	۸۴/۷	۹۰/۹	۲۰۰۰	۱۰	۲۵/۵
۰/۳۵	NRC				

شکل ۴. ضریب جذب فوم پلی اورتان با آزمایش لوله امیدانس

## ۲-۱-۲- واحد کنترل محورها

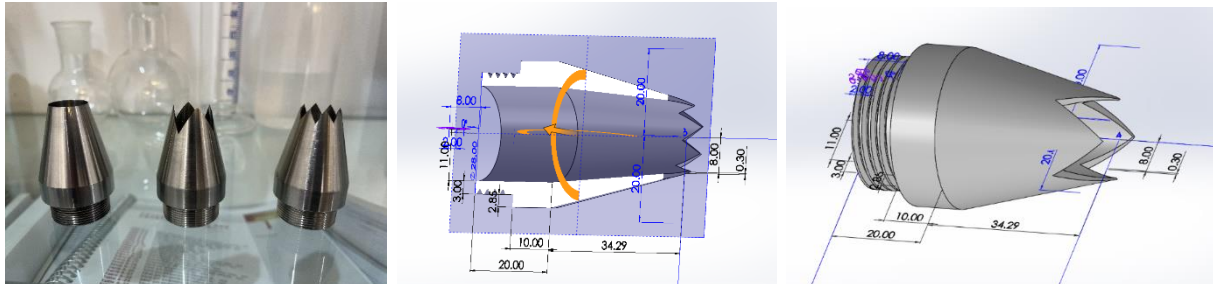
تنظیمات قرارگیری میکروفون بر روی محیط کروی توسط سه محور  $X, Y, Z$  انجام می‌گردد. این سه محور، هر کدام توسط یک استپر موتور، قابلیت حرکت بر روی محور خود توسط نرم افزار *mach3* را دارند.



شکل ۵. اتاق آکوستیک و تجهیزات کنترلی محورها.

## ۲-۲- طراحی و ساخت نازل های مادون صوت

جهت انجام این آزمایش از سه نازل مادون صوت استفاده شده است. قطر داخلی ورودی نازل ها ۲۱٫۷ میلی‌متر و قطر خروجی ۱۶ میلی‌متر می‌باشد. از سه نازل، یک نازل پایه baseline-SMC000 و دو نازل شورون SMC004 و SMC008 به ترتیب با تعداد دالبرهای ۴ و ۸، می‌باشند (شکل ۶). مشخصات هندسی نازل‌ها در جدول ۲ آمده است.



شکل ۶. سمت راست نازل مادون صوت شورون ۴ دالبر، وسط ۸ دالبر و سمت چپ نازل پایه، ۴ و ۸ دالبر

جدول ۲. مشخصات نازل‌های مادون صوت پایه و شورون

نوع	قطر ورودی (mm)	قطر خروجی (mm)	جنس	تعداد دالبر	زاویه همگرایی (درجه)	ارتفاع دالبر (mm)	طول نازل (mm)
SMC000	۲۱٫۷	۱۶	استیل ۳۰۴	-	۵	-	۵۴٫۲۹
SMC004	۲۱٫۷	۱۶	استیل ۳۰۴	۴	۵	۱۱٫۲۹	۵۴٫۲۹
SMC008	۲۱٫۷	۱۶	استیل ۳۰۴	۸	۵	مه-۶۵	۵۴٫۲۹

## ۳- روش اندازه گیری

نقاط داده‌برداری (مختصات قرارگیری سر میکروفون)، در ۴ موقعیت تعریف شده است. موقعیت ۱ شامل کمان با شعاع ۸۰ سانتیمتر به مرکز خروجی نازل و زاویه شروع ۳۰ درجه سر میکروفون نسبت به نازل در صفحه‌ای در راستای جریان و عمود بر جریان است. موقعیت ۲ همانند موقعیت ۱، با این تفاوت که شعاع کمان ۶۴ سانتیمتر است. موقعیت ۳ بر روی کمان دایره‌ای عمود بر جریان و در راستای مرکز دایره به مرکز خروجی نازل در فاصله ۸۰ سانتیمتری مرکز خروجی نازل، در ۳ ناحیه می‌باشد. موقعیت ۴ همانند موقعیت ۳ در راستای مرکز دایره به مرکز خروجی نازل در فاصله ۶۴ سانتیمتری مرکز خروجی نازل واقع شده است. پس از دریافت سیگنال‌های صوتی منبع با فرمت WAV<sup>۱</sup>، می‌توانیم از طریق نرم افزار مخصوص تحلیل و آنالیز آکوستیک، رفتار آکوستیکی منبع را بررسی نمود. یکی از این نرم افزارها، NI<sup>۲</sup> می‌باشد. این نرم افزار قابلیت خواندن سیگنال‌های صوتی در فرمت مورد نظر در واحد زمان را دارد. با استفاده از فرم انتقال FFT<sup>۳</sup>، می‌توانیم پیک‌های فشاری صوت در فرکانس‌های مختلف را داشته باشیم. همانطور که می‌دانیم، یک صوت دارای فشارهای صوتی متفاوت در فرکانس‌های مختلف می‌باشد. دانستن رفتار فشار آکوستیک در بازه فرکانس دامنه شنیداری، حائز اهمیت است. از این رو، تأثیر شکل‌های مختلف نازل‌های پایه و شورون، بر روی حرکت دادن این فشار در دامنه فرکانس تولیدی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین با انتقال خروجی سیگنال‌ها از نرم افزار به صورت پیک‌های فشاری در نرم افزار اکسل، تحلیل‌های تراز فشار صوتی و تراز فشار صوتی کل، ارائه می‌گردد.

<sup>۱</sup> Waveform Audio File Format

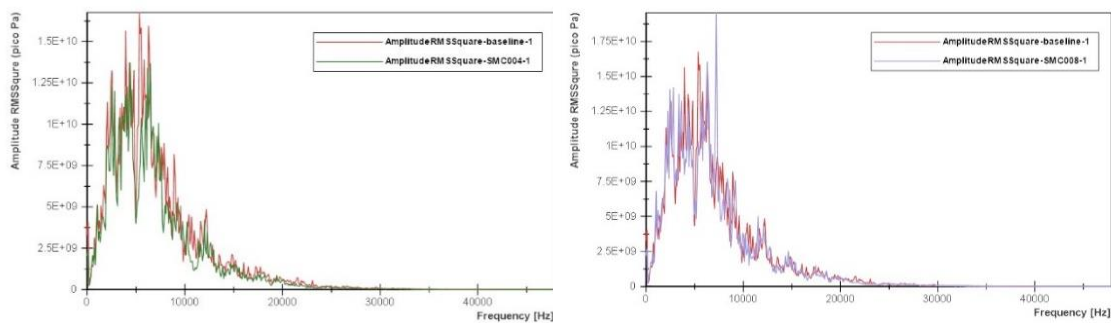
<sup>۲</sup> National Instrument

<sup>۳</sup> Fast Fourier Transmission

#### ۴- نتایج

#### ۴-۱- تغییرات Amplitude Peak RMSSquar

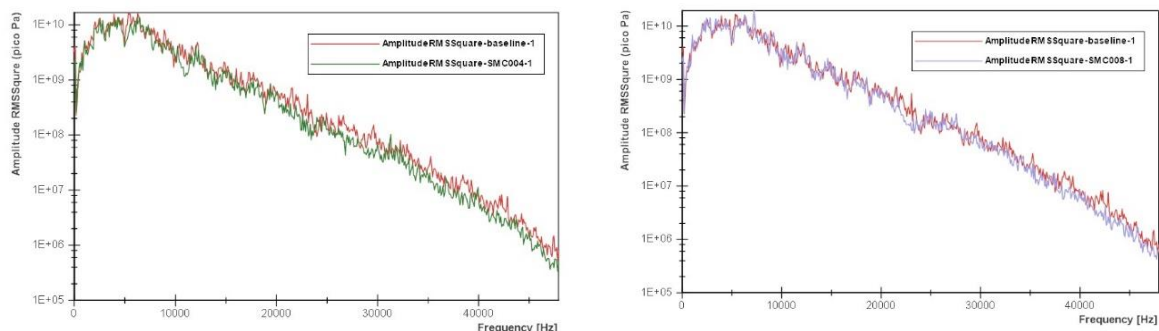
داده‌های Amplitude Peak RMSSquar برای یک به مجذور عدد ۲ مربع پیک قله‌های سیگنال‌های صوتی منبع می‌باشد. جهت تحلیل و مطالعه صوت به دلیل تغییرات زیاد در دامنه فشار صوت و به دلیل اینکه تحلیل کلیه این تغییرات لحظه‌ای عملاً ممکن نیست، می‌توان با استفاده از انتگرال زمانی تغییرات فشار، ریشه میانگین زمانی مجموع مربعات فشار صوت را محاسبه کرد که به آن  $P_{rms}$  می‌گویند. مقایسه تغییرات فشاری بر اساس  $P_{rms}$  که به آن Power spectrum (طیف توان) نیز می‌گویند، در دامنه فرکانسی ۴۸۰۰۰ هرتز برای نازل‌های پایه و شورون در موقعیت ۱ که شامل فاصله  $50 Dj$  و زاویه ۳۰ درجه نسبت به نازل می‌باشد، همانطور که در جدول ۳-۲ ارائه شده، در شکل‌های ۷ آمده است.



شکل ۷. مقایسه طیف توان پیک فشاری برای دو نازل SMC004 , baseline در زاویه ۳۰ درجه نسبت به نازل

همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، نازل SMC004، فشار ناشی از صوت منبع را مخصوصاً در محدوده فرکانسی پاسخ‌گیری شنیداری در زاویه ۳۰ درجه نسبت به نازل، کاهش می‌دهد. کاهش نویز یا کاهش فشار صوتی در نازل SMC008 نسبت به نازل SMC004، دارای روند کمتری می‌باشد.

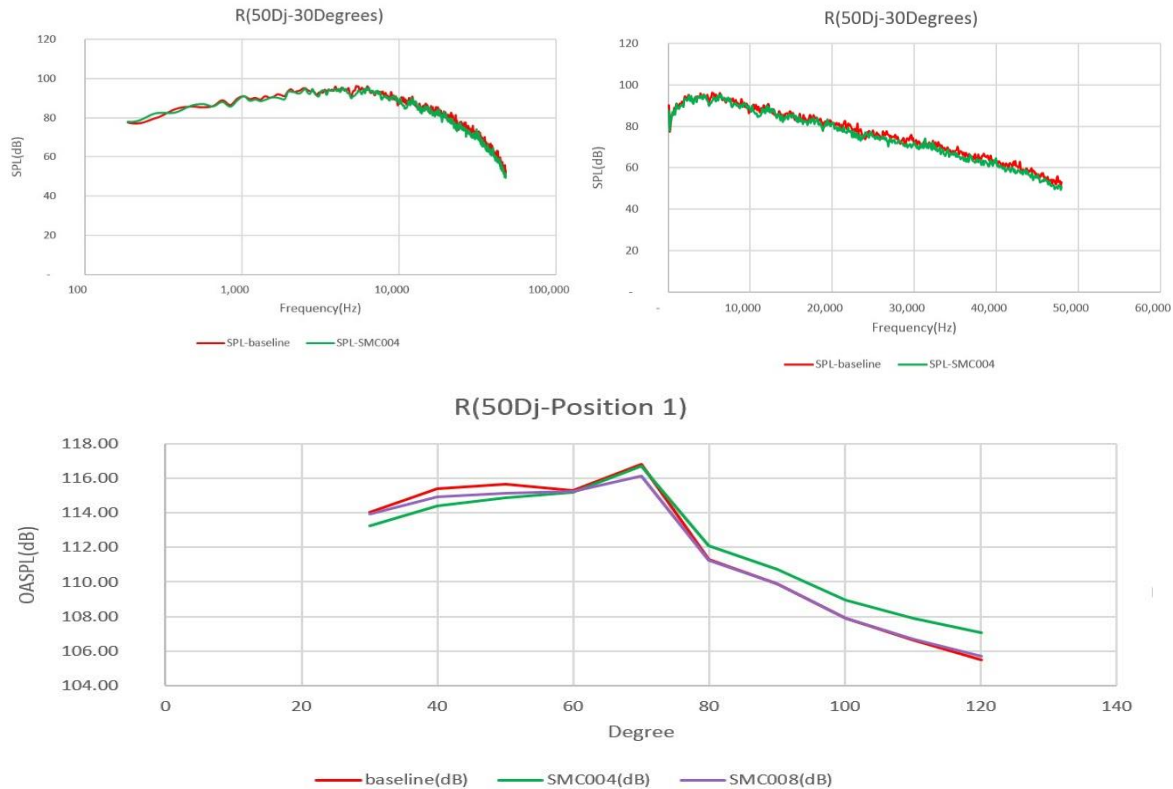
ساختار شنوایی، تغییرات فشاری را به صورت لگاریتمی درک می‌کند. به همین دلیل تغییرات استفاده از نازل‌های شورون نسبت به نازل‌های پایه را در پیک‌های فشاری به صورت نمودار لگاریتمی در زاویه ۳۰ درجه و در فاصله  $50 Dj$  نسبت به نازل در شکل ۸ را می‌توان نشان داد.



شکل ۸. مقایسه لگاریتمی طیف توان برای نازل SMC004- SMC008 نسبت به نازل پایه در زاویه ۳۰ درجه نسبت به نازل

## ۲-۴- تغییرات SPL و OASPL در زوایای مختلف

مقادیر بدست آمده از آزمایش و انتقال داده‌های مربوط به پیک‌های فشاری طیف توان، با استفاده از تراز فشار صوت (SPL) برای پیک‌های فشاری در هر فرکانس، مربوط به موقعیت ۱ به فاصله 50 Dj و زاویه ۳۰ درجه در نمودارهای شکل ۹ آمده است.



شکل ۹. طیف فرکانس داده‌ها در موقعیت ۱ برای نازل‌ها

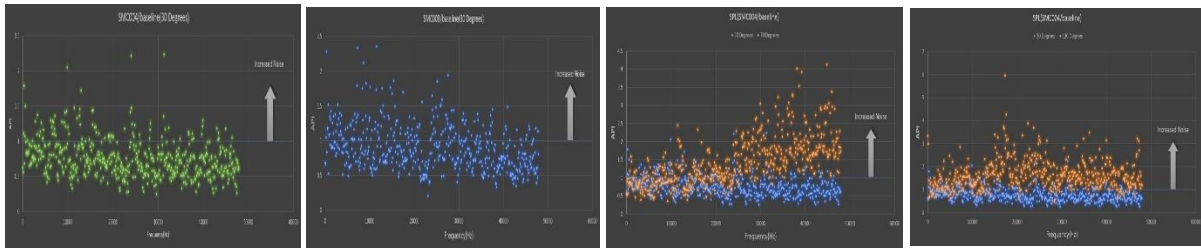
کاهش صدای فرکانس پایین در محدوده فرکانس شنیداری و انتقال این سطح فشاری به سطوح فرکانسی بالاتر و حتی خارج از این محدوده در ناحیه فراصوتی با افزایش آشفستگی و اختلاط در مقیاس کوچک می‌باشد. این رفتار فشار صوت در پنهان باند فرکانسی نازل SMC004 و baseline در موقعیت ۱ را می‌توان به وضوح در نمودار چپ شکل ۱۰ مشاهده کرد. همچنین اختلاف تراز فشار صوت در همین موقعیت و نازل‌های اشاره شده، در نمودار راست شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، انتقال فشاری صوتی از فرکانس‌های پایین به بالا در فرکانس‌های بالای ۱۰۰۰۰ هرتز مشهود است.



شکل ۱۰. سمت چپ انتقال فشار صوت از فرکانس‌های پایین به فرکانس‌های بالا SMC004, baseline، سمت راست اختلاف SPL در نازل‌های SMC004, baseline

### ۳-۴- مقایسه شاخص توان آکوستیک (API) در نازل‌ها

چگونگی توزیع رفتاری در ترازهای فشاری صوت در نازل‌ها را می‌توان با شاخص نیروی آکوستیکی (API) بیان کرد. این شاخص را می‌توان از نسبت پیک‌های فشاری سیگنال‌های نازل‌ها نسبت به نازل پایه، بدست آورد. مقادیر این شاخص‌ها در نمودارهای شکل ۱۱ قابل مشاهده است. مقادیر بالای ۱، افزایش نویز را نشان می‌دهد.



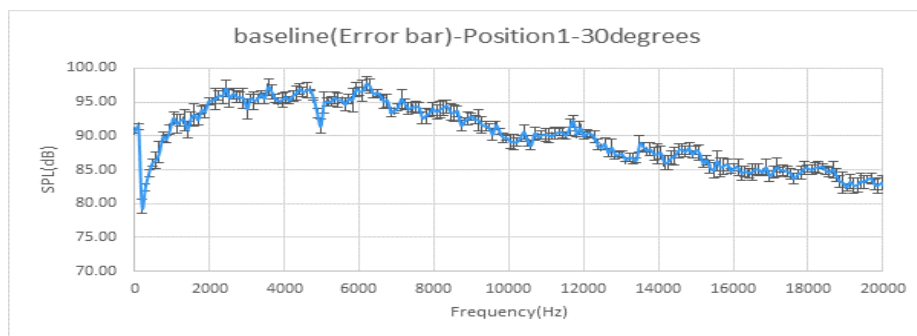
شکل ۱۱. شاخص API نازل‌ها نسبت به یکدیگر و در زوایای ۷۰ و ۱۲۰ درجه

### ۴-۴- تکرار پذیری آزمایشات و عدم قطعیت

جهت تعیین میزان خطا در انجام آزمایش اتاق آکوستیک، نازل پایه<sup>۲</sup> را در موقعیت ۱ و زاویه ۳۰ درجه، به تعداد ۵ بار در فشار ۱۰۵/۵ کیلو پاسکال و دمای ۳۰۳ کلوین، مورد آزمایش قرار می‌گیرد. مقادیر SPL هر بار آزمایش و میزان میانگین و انحراف معیار، در جدول ۳ آمده است. نمودار Error bar داده‌های مذکور در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

جدول ۳. مقادیر میانگین و انحراف معیار نازل baseline در موقعیت ۱ و زاویه ۳۰ درجه

نازل baseline(SMC000) در موقعیت ۱ و زاویه ۳۰ درجه					
آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵
SPL(dB)	۱۱۶/۰۶	۱۱۵/۷۱	۱۱۵/۷۵	۱۱۵/۴۳	۱۱۵/۳۹
میانگین (dB)	۱۱۵/۶۷				
انحراف معیار (/)	۰/۲٪				



شکل ۱۲. میزان خطا در داده‌برداری نمودار Error bar

### ۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

در نتایج بدست آمده در موقعیت ۱ و ۲ با افزایش زاویه گیرنده، تغییرات به سمت افت کاهش فشار صوتی برای هر دو نازل شورون نسبت به نازل پایه، پیش می‌رود. روند تغییرات فشار صوت برای هر دو نازل شورون تا زاویه ۷۰ درجه در موقعیت ۱ و تا زاویه ۴۰ درجه برای نازل SMC004 و ۵۰ درجه برای نازل SMC008، کاهش می‌یابد. نازل SMC004 نسبت به نازل

<sup>۱</sup> Acoustic Power Index

<sup>۲</sup> baseline



SMC008 عملکرد بهتری در کاهش فشار صوت تا این زوایا داشته است. از این زوایا به بعد شاهد افزایش فشار صوت در نازل SMC004 نسبت به نازل‌های SMC008 و baseline بوده و روند تغییرات فشاری نازل‌های SMC008 و baseline تقریباً شبیه به یکدیگر می‌باشد. کاهش فشار صوت تولید شده توسط نازل با ایجاد تغییراتی در شکل هندسی و ساخت نازل‌های شورون، در موقعیت ۲ در زوایای کمتر گیرنده (میکروفون) نسبت به نازل، برای نازل SMC004،  $1/28$  دسی بل و برای نازل SMC008،  $0/47$  دسی بل در زاویه ۳۰ درجه گزارش می‌شود. با توجه به  $NPR=1.232$  برای نازل SMC004، کاهش نویز در موقعیت ۱ تا زاویه ۵۰ درجه در حدود ۱ دسی بل می‌باشد که این نسبت برای نازل SMC008 در حدود  $0/5$  دسی بل می‌باشد. پیش‌بینی‌های عددی که بر اساس یک سری فرضیات اولیه می‌بایست صورت پذیرد، می‌بایست محدودیت‌هایی را ایجاد کرد. جهت صحت سنجی این پیش‌بینی‌ها، می‌توان رفتار صوت را از طریق آزمایشات تجربی به صورت دقیق‌تری مورد بررسی قرار داد. با توجه به نیاز به حمل و نقل سریع‌تر هوایی و همچنین طراحی‌های فراصوتی تجاری جدید، آزمایش بر روی انواع نازل‌های شورون مافوق صوت، نیز پیشنهاد می‌گردد. به نظر می‌رسد، کاهش فشار صوت و حتی جذب شوک‌های ناشی از جت توسط نازل‌های شورون، برقراری تعادل بین فرکانس‌های پایین و بالا است. بنابراین روشی که بتوان فشار صوت را در پدیده‌های دیگری همچون انتقال این انرژی از طریق گرما، جایگزین کرد، پیشنهاد می‌گردد.

هدف از بکارگیری طراحی‌های اینچینی مانند نازل‌های شورون، کم کردن صدای‌های پرفشار در فرکانس‌های پایین محدوده شنوایی است. به این دلیل که همانطور پیشتر گفته شد، بیشترین آدارک شنوایی در محدوده ۱۰۰۰ هرتز و فرکانس‌های پایین می‌باشد. متوجه شدیم که حاصل این کاهش، افزایش فشار صوت در فرکانس‌های بالاتر است که می‌تواند در خارج از محدوده فرکانسی شنیداری باشد. حل این مشکل به منزله اتمام مسئله نمی‌تواند باشد، زیرا وابستگی‌ای که سایر جانداران به محدوده فراصوتی برای رشد، تولید مثل و ارتباط‌گیری با هم دارند و با توجه به اینکه هر کدام از این جانداران نقشی در اکوسیستم کره زمین ایفا می‌کنند را نمی‌توان نادیده گرفت. به نظر می‌رسد که تغییرات اینچینی در طراحی، حل یک مشکل در یکجا و ایجاد مشکل در جای دیگر است. اثرات غیر شنیداری (فراصوتی) در حیوانات می‌تواند باعث افزایش فشار خون، ضربان قلب، انقباض عروق، نرخ تنفس، کورتیزول، کلاسترول، کورتیکوسترون پلازما، مرگ و میر جنینی، تحلیل نوزادان، تشنج شنوایی و غیره گردد. این اثرات فشاری برای انسانها باعث افزایش فشار خون، نرخ ضربان قلب، تصلب شرایین، آدرنالین، کورتیزول، کمبود وزن هنگام تولد، تأخیر در رشد داخل رحمی، سقط‌های خود به خودی، کاهش عملکرد حافظه، افزایش تحریک‌پذیری و غیره، حتی در فرکانس‌های بالا که انسان قادر به شنیدن آنها نمی‌باشد، می‌گردد [۱]. دیدن تمامی جوانب زیستی در طراحی به لحاظ وابستگی انسان به اکوسیستم طبیعت می‌بایست مورد توجه قرار گیرد.

## مراجع

- [1] Jeremy G. Turner, Jennifer L. Parrish Larry F. Hughes Linda A. Toth, and Donald M. Caspary, "Hearing in Laboratory Animals: Strain Differences and Nonauditory Effects of Noise", American Association for Laboratory Animal Science, 2005. Stefan Bühler, Numerical simulation of laminar and Turbulent Nozzle-Jet flows and their sound, Universität Karlsruhe, 1981.
- [2] Stewart Glegg, William Devenport, "Aeroacoustics of low mach number flows". Elsevier Science.
- [3] Rostam Golmohamadi, "Noise & Vibration engineering in industries & environment" 2009. Daneshjoo publications Hamedan.