

بررسی میدانی عملکرد پوشش آکوستیکی پتویی به منظور کاهش صدای خطوط لوله متصل به توربو راکسپندر

هاشم احمدی تیغ‌چی^ا، علی فائزین^{ب*}، علیرضا شیخی دارانی^پ، احسان گشتاسبی^ت، یوسف رشیدی^ث

^ا ایران، مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، ۹۱۷۷۹۴۸۹۴۴، استادیار

^ب ایران، مشهد، پارک علم و فناوری خراسان، شرکت دانش بنیان صنعت پروژه توس، ۹۱۸۵۱۷۶۹۳۵، پژوهشگر

^پ ایران، تهران، طرشت، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه تبدیل انرژی، ۱۴۵۸۸۸۹۶۹۴، دانشجو

^ت ایران، عسلویه، مجتمع پارس جنوبی، پالایشگاه پنجم، واحد بهداشت صنعتی، ۷۵۱۱۸۳۹۹۴۹، مسئول واحد

^ث ایران، عسلویه، مجتمع پارس جنوبی، پالایشگاه پنجم، واحد بهداشت صنعتی، ۷۵۱۱۸۳۹۹۴۹، کارشناس بهداشت حرفه‌ای.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a.faezian@rifst.ac.ir

چکیده

توربو اکسپندرها از اجزای کلیدی در صنایع گاز، پتروشیمی و تولید انرژی هستند که با استفاده از انبساط گازهای پرفشار، همزمان انرژی مکانیکی تولید کرده و موجب کاهش دما برای فرآیندهای جداسازی می‌شوند. با این حال، عبور جریان‌های پرفشار و سرعت بالا از لوله‌های متصل به توربو اکسپندر، به‌ویژه در ناحیه ورودی و خروجی، منجر به تولید نویز آیرودینامیکی قابل توجهی می‌شود. این نویز علاوه بر ایجاد آلودگی صوتی در محیط کار، می‌تواند به خستگی مکانیکی اجزاء، افزایش تلفات انرژی و نارضایتی زیست‌محیطی منجر گردد. بنابراین کنترل و کاهش صدا در این تجهیزات از جنبه‌های ایمنی، عملیاتی و زیست‌محیطی اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از روش‌های مؤثر و صنعتی برای کنترل نویز در خطوط گاز، استفاده از پوشش‌های آکوستیکی پتویی است. این پوشش‌ها بدون نیاز به تغییر هندسه یا شرایط جریان، به‌وسیله‌ی جذب و میرایی امواج صوتی، موجب کاهش صدا در محدوده‌ی فرکانس‌های مختلف می‌شوند. مزیت مهم این روش نسبت به صداخفه‌کن‌های در مسیر، عدم تأثیر بر مشخصات جریان سیال و سهولت نصب و نگهداری در محیط‌های صنعتی است. در این مقاله، عملکرد پوشش آکوستیکی پتویی در کاهش صدای خطوط لوله و بدنه‌ی توربو اکسپندر به‌صورت تجربی و در شرایط عملیاتی واقعی مورد ارزیابی قرار گرفته است. اندازه‌گیری‌های میدانی سطح فشار صوتی در چند نقطه‌ی کلیدی پیش و پس از نصب پوشش انجام شد و داده‌ها با تحلیل طیف فرکانسی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که استفاده از پوشش پتویی موجب کاهش قابل‌ملاحظه سطح فشار صوتی تا حدود ۱۵ تا ۲۵ دسی‌بل در بازه‌های فرکانسی غالب گردید. این نتایج اثبات می‌کند که پوشش‌های آکوستیکی پتویی، به‌عنوان یک راهکار ساده، کم‌هزینه و قابل نصب در محل، می‌تواند در کاهش آلودگی صوتی خطوط گاز متصل به توربو اکسپندر بسیار مؤثر باشند بدون آنکه بر عملکرد هیدرودینامیکی سیستم اثر نامطلوبی بگذارند.

کلمات کلیدی: پوشش پتویی؛ کاهش صدا؛ توربو اکسپندر؛ بررسی میدانی.

۱- مقدمه

توربوآکسپندرها نقش مهمی در فرایندهای پالایش و صنایع گاز طبیعی دارند؛ این ماشین‌ها برای بازیابی انرژی از گازهای تحت فشار و همچنین برای سرمایش و فرآیندهای جداسازی استفاده می‌شوند. تولید امواج صوتی و نوسانات فشاری از خطوط لوله منتهی به ورودی توربوآکسپندر می‌تواند علاوه بر ایجاد آلودگی صوتی، موجب افزایش تنش‌های مکانیکی، کاهش کارایی و حتی آسیب به یاتاقان و اجزای حساس دستگاه شود؛ بنابراین کنترل نویز در مسیرهای تغذیه‌ای توربوآکسپندر اهمیت صنعتی و ایمنی بالایی دارد. شناسایی و کاهش منابع صوتی در خطوط جریان گاز، به‌ویژه در شرایط افت فشار سریع، جریان‌های آشفته و در حضور تجهیزاتی مانند شیرهای کنترل یا انبساط ناگهانی، موضوعی است که در پژوهش‌های بنیادین و کاربردهای مهندسی مورد توجه قرار گرفته است [۱-۳].

مطالعات تجربی و نظری نشان داده‌اند که شدت نویز وابستگی قوی به پارامترهایی مانند سرعت جریان، نسبت افت فشار و مشخصات آشفتگی جریان دارد [۴]. در مهندسی کنترل آلودگی صوتی در کانال‌ها و لوله‌ها، دو رویکرد عمومی وجود دارد: (۱) کاهش منبع صدا با تغییر هندسه یا افزودن المان‌های کاهش‌دهنده صدا در مسیر جریان (همانند صداخفه‌کن^۱، پنل‌های جاذب و پخش‌کننده‌ها) و (۲) طراحی و نصب تجهیزات کاهنده صدا در مسیر انتقال صدا به‌منظور افزایش تلفات انتقال صوت^۲ در فرکانس‌های هدف. مطالعات متعدد روش‌های تحلیلی و عددی برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی عملکرد انواع تجهیزات صوتی را گزارش کرده‌اند و نشان داده‌اند که طراحی مناسب می‌تواند کاهش چشمگیر صدا شود [۵،۶].

در زمینه کاربردی ماشین‌های دورانی (نظیر کمپرسورها و آکسپندرها)، کارهای مروری و پژوهشی اخیر بر پیش‌بینی نویز توربوماشین‌ها و تعامل بین میدان جریان و میدان آکوستیک تأکید داشته‌اند. مرورهای جامع نویز توربوماشینی، روش‌های پیش‌بینی تنش‌های آیرودینامیکی تولیدکننده صدا و روش‌های کاهش صدای درون مجرا را جمع‌بندی کرده‌اند که برای مطالعه ورودی‌های توربوآکسپندر کاربرد دارد [۷،۸]. همچنین مطالعات گذشته در این حوزه نکات طراحی، فرمول‌بندی‌های تحلیلی و نتایج آزمایشی ارائه کرده‌اند که می‌تواند به طراحی سایلنسرهای مسیر ورودی توربوآکسپندر کمک کند [۹]. اما با توجه به اینکه روش‌های نصب تجهیزات کاهنده صدا با مشکلاتی همچون هزینه بالا و اثرگذاری بر فرآیند جریان گاز مواجه هستند، روش‌هایی همچون نصب پوشش آکوستیکی بر روی خطوط لوله و منابع آلودگی صوتی مورد توجه بیشتر بهره‌برداران هستند.

با توجه به مبانی مطرح‌شده، پژوهش حاضر به‌طور ویژه بر بررسی تجربی عملکرد پوشش‌های آکوستیکی پتویی برای کاهش صدای خطوط لوله‌های متصل به توربوآکسپندر تمرکز دارد. هدف اصلی این مطالعه، اندازه‌گیری میدانی سطح صدا در شرایط کاری واقعی پیش و پس از نصب یک نوع پوشش آکوستیکی پتویی است تا میزان کارایی این روش در کاهش میزان صدا دریافت‌کننده ارزیابی شود. برای ارزیابی بهتر این مقایسه با پوشش آکوستیکی فلزی نیز صورت می‌گیرد. بدین منظور، اندازه‌گیری‌ها در چند نقطه کلیدی از مسیر لوله (در نزدیکی ورودی و خروجی توربوآکسپندر و در فواصل مختلف از منبع صدا) انجام شده و نتایج حاصل با مقادیر مبنا مقایسه گردیده‌اند. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در شناخت عملکرد واقعی پوشش‌های آکوستیکی پتویی مؤثر باشد.

۲- صدای توربوآکسپندر

در صنعت دستگاه‌هایی وجود دارند که آلودگی صوتی^۳ زیادی داشته و صدای آزاردهنده از خود تولید می‌کنند. به منظور کنترل آلودگی صوتی، یکی از روش‌ها استفاده از پوشش آکوستیک^۴ می‌باشد. پوشش آکوستیک معمولاً برای خطوط پایپینگ، اتصالات، انشعابات، تجهیزات با صدای بالا همچون توربوآکسپندر استفاده می‌شود.

در این موارد که معمولاً به دلیل مشکلات فنی، هزینه‌ای و یا اجرایی امکان کنترل نویز در منبع و یا در مسیر جریان سیال وجود ندارد از پوشش آکوستیک استفاده می‌شود. این پوشش آکوستیکی روی دستگاه و یا تجهیز قرار می‌گیرد. پوشش آکوستیکی دو

^۱ Silencer

^۲ Transmission Loss

^۳ Acoustic pollution

^۴ Acoustic Closure

نوع فلزی و پتویی دارد. برای دو واحد توربواکسپندر پالایشگاه پنجم پارس جنوبی در پروژه جداگانه از نوع پوشش فلزی (اولی) و پتویی (دومی) استفاده شده است. پوشش پتویی انعطاف پذیر می‌باشد و در حین هزینه کمتر، نصب راحت‌تری نیز دارد. طراحی پوشش آکوستیکی پتویی به گونه‌ای است که در صورت لزوم در مواقع تعمیرات و یا بازرسی به راحتی باز شود و روی عملکرد دستگاه نیز اختلالی ایجاد نمی‌کند.

۳- مشخصات پوشش پتویی و نحوه نصب

اجزاء پوشش آکوستیکی پتویی در شکل (۱) و پوشش آکوستیکی پتویی در خط لوله منتهی به توربواکسپندر در شکل (۲) نشان داده شده است. پوشش پتویی از ساختار زیر تشکیل شده است.

- لایه‌های پوشش: پارچه، پشم‌سنگ، پارچه
 - اتصالات: دوخت لبه‌ها و نقاط میانی با نخ غیر قابل اشتعال، تسمه و سگک
- قابل ذکر است که برای دوام بهتر پوشش آکوستیکی در شرایط محیطی پارچه از سه لایه ضد آب پلی‌استر و بافت الیاف پلی‌مری تشکیل شده است.



شکل ۱. پوشش آکوستیکی پتویی؛ (راست) نمونه ساخته و نصب شده، (چپ) برش مقطع پوشش.



شکل ۲. پوشش آکوستیکی پتویی در خطوط لوله متصل به توربواکسپندر.

اتلاف الحاقی^۵ نشان دهنده عملکرد پوشش آکوستیکی می‌باشد. اتلاف الحاقی از اختلاف تراز فشار صوت^۶ صوت قبل و بعد از نصب پوشش در مسیر انتقال صدا از منبع صوت تا دریافت کننده به صورت زیر بدست می‌آید:

^۵ Insertion Loss

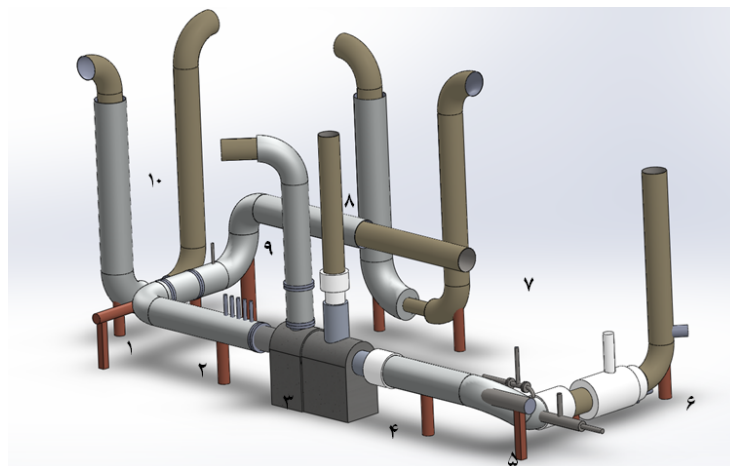
$$IL = SPL_{without\ Blanket} - SPL_{with\ Blanket} \quad (۱)$$

مراحل تولید و نصب پوشش پتویی بر روی خطوط لوله منتهی به توربوآکسپندر به شرح زیر می‌باشد:

۱. ابعاد برداری از خطوط پایپینگ، انشعابات و تجهیزات
۲. تهیه نقشه‌های مربوط به پوشش پتویی
۳. آماده سازی الگوی‌های برش پارچه با استفاده از نقشه‌ها
۴. برش‌های پارچه مطابق الگوها
۵. دوخت‌های اولیه پارچه‌ها برای آماده سازی پتو
۶. قرار دادن پشم سنگ به عنوان جاذب صوت
۷. دوخت نهایی لبه‌های باز پتو
۸. دوخت تسمه و سگک‌های پتوها
۹. قرار دادن پتو روی محل مورد نظر
۱۰. بستن تسمه و سگک‌ها

۴- روش اندازه‌گیری

برای بررسی عملکرد پوشش آکوستیکی نتایج اندازه‌گیری صدا قبل و بعد از نصب پوشش مقایسه شده است. ده نقطه اطراف توربوآکسپندر که بیشترین صدا را داشته‌اند در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. برای اندازه‌گیری صوت باید نکات مربوط به تضمین صحت نتایج و کاهش عوامل خطا رعایت شود. به عنوان مثال ارتفاع میکروفون باید بین ۱/۲ تا ۱/۵ متر بالاتر از سطح زمین باشد، برای اندازه‌گیری تراز توان صوت فاصله از منبع صوت حدود ۱ متر باشد، ابزار اندازه‌گیری باید کالیبره باشد و تمام اندازه‌گیری‌ها باید در ظرفیت یکسان انجام شود. لازم به ذکر است در صورتی که اختلاف نویز فشار و پس زمینه کمتر از ۱۰ دسیبل باشد مطابق استاندارد BS ۴۱۴۲:۱۹۹۷ اصلاحات نویز زمینه باید در محاسبات در نظر گرفته شود. همچنین در هنگام اندازه‌گیری، در فاصله ۱ متری پشت نقطه دریافت نباید هیچ سطح یا جسم منعکس کننده صدا وجود نداشته باشد.



شکل ۳. موقعیت مکانی ده نقطه اطراف توربوآکسپندر برای اندازه‌گیری صدا.

۶ Sound Pressure Level

برای اطمینان از تکرار پذیر بودن نتایج اندازه‌گیری زمان اندازه‌گیری به اندازه کافی طولانی باشد. این اطمینان وقتی حاصل می‌شود که مقدار تراز فشار اندازه‌گیری شده LA_{eq} تغییراتی کمتر از ۱ دسیبل در مدت ثبت داده‌ها داشته باشد. اندازه‌گیری‌های تراز فشار صوت در محدوده شنوایی ۶۳ هرتز تا ۸ کیلو هرتز در پهنای فرکانسی هشتایی با مرکز فرکانس ۶۳، ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰، ۵۰۰۰، ۶۳۰۰ و ۸۰۰۰ یا یک سوم هشتایی (اکتاو) انجام می‌شود. دستگاه اندازه‌گیری صدا ساخت شرکت B&K دانمارک با نام PULSE Lite Basic 2-channel CPB Analyzer Type 3560 L-L06 است. اندازه‌گیری‌ها توسط میکروفون با مشخصات 1/4 Microphone 50Hz-5KHz Type 4935 انجام شد و با نرم افزار lite pulse که بر روی دستگاه نصب است تحلیل فرکانسی صورت پذیرفت.

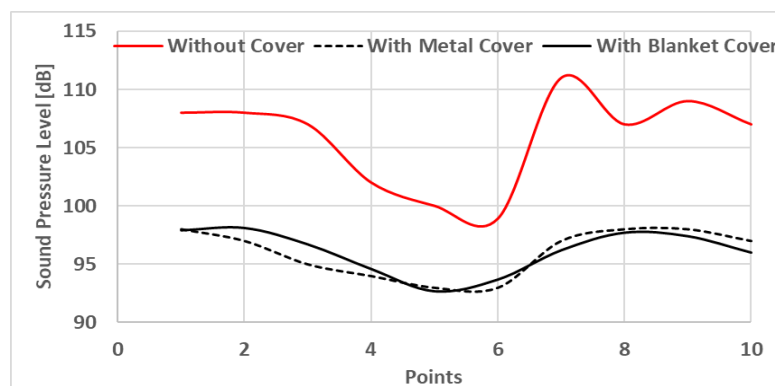
۵- نتایج و بحث

نتایج اندازه‌گیری در جدول (۱) و شکل (۴) نشان داده شده است. در این جدول و شکل‌ها نتایج اندازه‌گیری صدا در سه حالت بدون پوشش آکوستیکی (قبل از اجرای پوشش)، با پوشش آکوستیکی فلزی که در گذشته نصب شده است و با پوشش آکوستیکی پتویی (ارائه شده در پژوهش حاضر) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود قبل از اجرای پوشش آکوستیکی بیشترین صدا مربوط به نقطه ۷ است که ۱۱۱ دسیبل می‌باشد. پس از نصب پوشش بیشترین صدا در اطراف توربوآکسپندر ۹۸ دسیبل می‌باشد. بنابراین راهکار پوشش آکوستیکی توانسته حداقل ۱۳ دسیبل صدا را کاهش دهد. کاهش بیشتر صدا در نقاطی که صدای بیشتری وجود دارد نشان دهنده عملکرد مناسب پوشش آکوستیکی پتویی است.

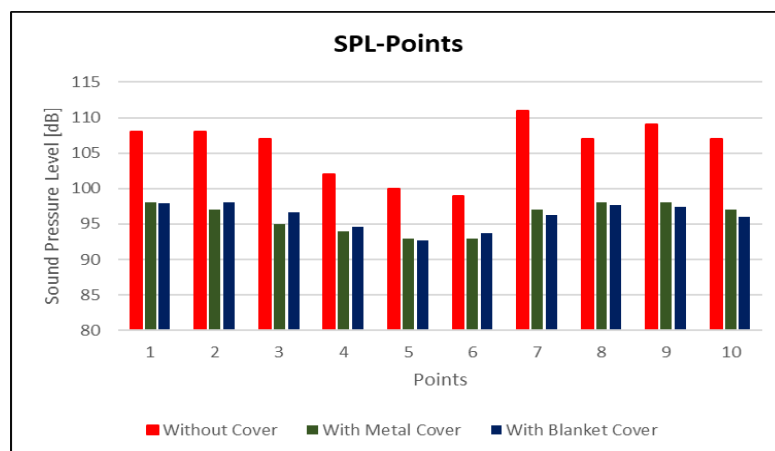
با اجرای این راهکار زمان مجاز مواجه یک فرد بدون تجهیزات حفاظت فردی از حدود ۱ دقیقه به حدود ۳۰ دقیقه افزایش یافته است. اجرای این راهکار هیچ گونه تاثیر منفی بر فرایند اصلی توربوآکسپندر و پالایشگاه نداشته است. پوشش را می‌توان بدون هیچ آسیبی باز و بسته کرد و به راحتی اقدام به تعمیر واحد توربوآکسپندر نمود. لازم به ذکر است پوشش پتویی هزینه اولیه و نصب بسیار کمتری دارد و ضمناً تعمیر و نگهداری تجهیزات با این پوشش‌ها بسیار راحت‌تر است. بنابراین در مقایسه با پوشش‌های فلزی این نوع پوشش مزایای بسیار بالاتری در حین عملکرد مشابه دارند.

جدول ۱. نتایج اندازه‌گیری تراز فشار صوت معادل در نقاط مختلف توربوآکسپندر

شماره نقطه	بدون پوشش آکوستیکی	با پوشش فلزی	با پوشش پتویی
۱	۱۰۸	۹۸	۹۷.۹
۲	۱۰۸	۹۷	۹۸.۱
۳	۱۰۷	۹۵	۹۶.۷
۴	۱۰۲	۹۴	۹۴.۶
۵	۱۰۰	۹۳	۹۲.۷
۶	۹۸.۹	۹۳	۹۳.۷
۷	۱۱۱	۹۷	۹۶.۲
۸	۱۰۷	۹۸	۹۷.۷
۹	۱۰۹	۹۸	۹۷.۴
۱۰	۱۰۷	۹۷	۹۶



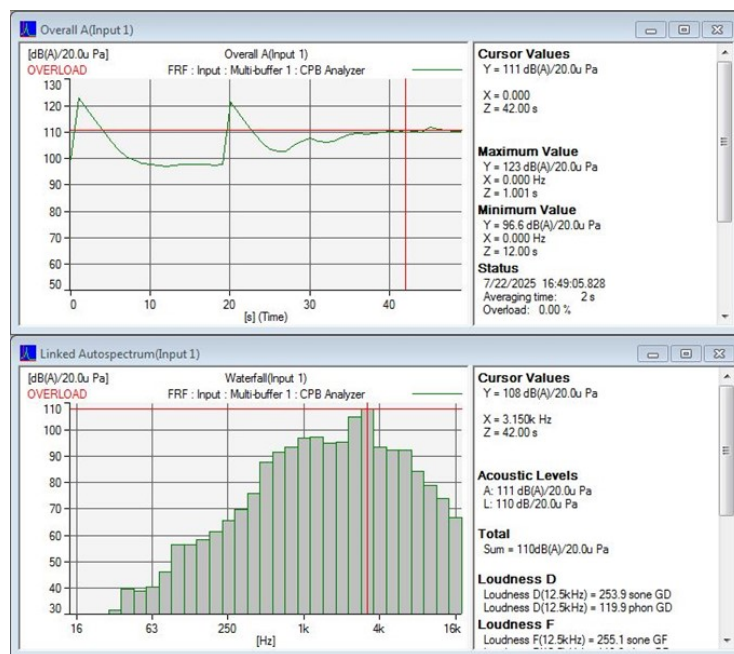
الف



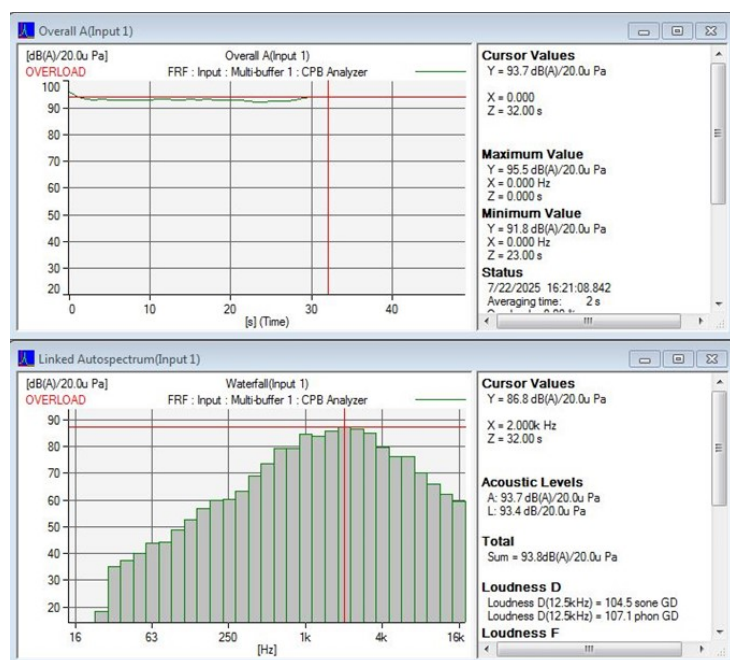
ب

شکل ۴. نتایج اندازه‌گیری تراز فشار صوت معادل در نقاط مختلف توربوواکسپندر در سه حالت بدون پوشش آکوستیکی، با پوشش آکوستیکی فلزی و با پوشش آکوستیکی پتویی (الف) منحنی ب) نمودار میله‌ای.

شکل‌های (۵) و (۶) به عنوان نمونه نتایج اندازه‌گیری تراز فشار صوت در نقطه ۷ برای حالت بدون پوشش و نقطه ۶ حالت با پوشش پتویی را در شرایط میدانی نشان می‌دهد. این نقاط با توجه به اینکه در نزدیکی هم قرار دارند و شرایط حائز اهمیتی دارند به عنوان نمونه برای تفسیر نتایج انتخاب شده‌اند. علت اینکه نتایج عملکرد پوشش در شرایط میدانی بسیار قابل قبول است و کاهش چشمگیری ملاحظه می‌شود این است که پوشش پتویی این پروژه سه لایه می‌باشد. در این شکل مشاهده می‌شود که در حالت بدون پوشش پتویی در بازه فرکانسی ۵۰۰ تا ۸۰۰۰ هرتز صدا بیشتر از ۹۰ دسیبل است. در نزدیکی فرکانس ۴۰۰۰ هرتز بیشترین صدا به میزان ۱۰۸ دسیبل ایجاد شده است. در حالیکه پوشش پتویی در این بازه فرکانسی توانسته است صدا را به کمتر از ۹۰ دسیبل کاهش دهد. در فرکانس ۴۰۰۰ کاهش چشمگیری مشاهده شد و صدا به حدود ۸۰ دسیبل تقلیل یافت. در حالت نصب پوشش پتویی حداکثر صدا برای فرکانس ۲۰۰۰ با مقدار ۸۶ دسیبل است. در مجموع ملاحظه می‌شود پوشش پتویی توانسته صدا را به حدود ۹۳ دسیبل کاهش دهد که زمان مواجهه مجاز را افزایش می‌دهد.



شکل ۵. نتایج اندازه‌گیری تراز فشار صوت در نقطه ۷ حالت بدون پوشش در شرایط میدانی.



شکل ۶. نتایج اندازه‌گیری تراز فشار صوت در نقطه ۶ حالت با پوشش پتویی در شرایط میدانی.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد پوشش آکوستیکی پتویی در کاهش صدای خطوط لوله متصل به توربو اکسپندر به صورت میدانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان داد که استفاده از این پوشش‌ها می‌تواند حداکثر صدای معادل را از ۱۱۱ به ۹۸ دسی‌بل کاهش دهد، بدون آنکه اثری محسوس بر جریان سیال یا عملکرد توربو اکسپندر ایجاد کند. تحلیل طیف فرکانسی نیز بیانگر تضعیف یا

حذف فرکانس‌های غالب ناشی از آشفته‌گی جریان و ارتعاشات ساختاری پس از نصب پوشش بود. در مجموع، پوشش‌های آکوستیکی پتویی به‌عنوان روشی ساده، کم‌هزینه و قابل نصب در محل، می‌توانند راهکاری مؤثر برای کنترل آلودگی صوتی در سامانه‌های لوله‌کشی فشار بالا و تجهیزات دوار نظیر توربو اکسپندرها محسوب شوند.

مراجع

1. Davies, P. O. A. L. "Practical flow duct acoustics." *Journal of Sound and Vibration* 124, no. 1, 91-115 (1988).
2. Stadnik, Dmitry, Victor Sverbilov, Vladimir Ilyukhin, Alexander Igolkin, Maxim Balyaba, and Evgeniy Shakhmatov. "Study on stability of gas pressure regulator with a built-in silencer." *Energies* 16, no. 1, 372:384, (2022).
3. Liu, Enbin, Shikui Yan, Shanbi Peng, Liyu Huang, and Yong Jiang. "Noise silencing technology for manifold flow noise based on ANSYS fluent." *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 29, 322-328 (2016).
4. Su, Zhongya, Enbin Liu, Yawen Xu, Ping Xie, Chen Shang, and Qiyong Zhu. "Flow field and noise characteristics of manifold in natural gas transportation station." *Oil & Gas Science and Technology—Revue d'IFP Energies nouvelles* 74, 70-86 (2019).
5. Yang, Haesang, and Woojae Seong. "Acoustic Transmission Loss of a Cylindrical Silencer Filled with Multilayer Poroelastic Materials Based on Mode-Matching Method." *Journal of Marine Science & Engineering* 12, no. 11, 1-13 (2024).
6. Venegas, Rodolfo, Jorge P. Arenas, and Claude Boutin. "Analytical modeling of dissipative silencers." *The Journal of the Acoustical Society of America* 144, no. 5, 2998-3009 (2018).
7. Moreau, Stéphane, and Michel Roger. "Turbomachinery noise review." *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power* 9, no. 1, 1-11 (2024).
8. Moreau, Stéphane. "Turbomachinery noise predictions: present and future." In *Acoustics*, vol. 1, no. 1, 92-116 (2019).
9. Liu, Chen, Yipeng Cao, Yang Liu, Wenping Zhang, Pingjian Ming, and Sihui Ding. "Numerical and experimental analyses of intake silencer and its effects on turbocharger compressor performance." *Advances in Mechanical Engineering* 11, no. 3, 1-15 (2019).