

طراحی و ساخت بستر آزمایش نوفه جریان به منظور بررسی عملکرد اجزاء صداخفه‌کن

هاشم احمدی تیغ‌چی

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی
مشهد، مشهد، ایران
hashemahmadi@um.ac.ir

علی فائزین

دانشیار، گروه طراحی ماشین آلات صنایع غذایی، موسسه پژوهشی
علوم و صنایع غذایی، مشهد، ایران
پژوهشگر، شرکت دانش بنیان صنعت پروژه توس، پارک علم و فناوری
خراسان رضوی، مشهد، ایران
a.faezian@rifst.ac.ir

چکیده

صدای تولید شده از اغتشاشات جریان سیال یکی از عوامل آلودگی صوتی در مناطق مسکونی و صنعتی است. یکی از راهکارهای کاهش منابع نوفه جریانی استفاده از صداخفه‌کن‌ها است که با بهره‌مندی از اجزاء آکوستیکی صدای تولیدی را کاهش می‌دهد. اجزاء کاهنده صدا با هدف کاهش آشفستگی جریان یا جذب امواج صوتی به کار گرفته می‌شوند اما معمولاً افت فشار جریان سیال را نیز به همراه دارند که باید مورد سنجش قرار گیرد. در این پژوهش بستر آزمایش نوفه جریانی طراحی و ساخته شد که با استفاده از آن می‌توان به بررسی عملکرد هیدرودینامیکی و آکوستیکی صداخفه‌کن طراحی شده پرداخت. پس از ساخت بستر آزمایش، عملکرد یک سایلنسر در مسیر که ترکیبی از اجزاء کاهنده صدا به روش‌های واکنشی و جذبی بود از دیدگاه افت فشار و کاهش صدا به صورت تجربی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. در این بررسی اثر سه جزء آکوستیکی سایلنسر یعنی دیفیوزر، کارتریج و کاندیشنر (صفحه سوراخدار) به طور مجزا بر عملکرد آن ارزیابی گردید. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها نشان داد که ۷۵٪ افت فشار سایلنسر مربوط به دیفیوزر، ۲۰٪ مربوط به کارتریج و ۵٪ مربوط به کاندیشنر است. در مجموع نیز اثر ترکیبی دیفیوزر، کارتریج و کاندیشنر سبب شد تا سایلنسر در فرکانس پیک بتواند صدا را در حد انتظار کاهش دهد. نتایج حاصل از این بستر آزمایش و بررسی عملکرد اجزاء آکوستیکی می‌تواند در طراحی بهینه سایلنسرهای برای شرایط مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: نوفه جریانی، افت فشار، آکوستیک، هیدرودینامیک، سایلنسر (صداخفه‌کن).

۱- مقدمه

جریان سیال در خطوط لوله هنگام عبور از اتصالات، موانع یا تجهیزات فرآیندی همچون شیرهای کنترلی یا رگولاتورهای با آشفستگی شدید همراه می‌شود [۱]. این اغتشاشات جریانی سبب تولید نوفه جریانی^۱ می‌شود که آلودگی صوتی در مناطق مسکونی و صنعتی ایجاد می‌کند [۲]. جهت ایجاد آسایش در مناطق مسکونی و رعایت استانداردهای ایمنی محیط شغلی باید صدا ایجاد شده از این منابع را به حد مجاز کاهش داد. از مهمترین منابع آلودگی صوتی در پهنه مسکونی و واحدهای صنعتی ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز هستند که با استفاده از رگولاتورها فشار گاز انتقالی از پالایشگاه‌ها کاهش می‌یابد تا در نقطه مصرف مورد استفاده قرار گیرد. عامل اصلی تولید صدا در این ایستگاه‌ها افت فشار ناگهانی گاز طبیعی در تجهیز رگولاتور است که با اغتشاشات شدید جریانی سبب نوفه بسیار زیادی می‌شود. این منبع آلودگی صوتی با نارضایتی مجاورین و بهره‌برداران همراه بوده است، بنابراین تاکنون برای کنترل آن راهکاری در نظر گرفته شده است. یکی از راهکارهای کارآمد کاهش صدا در ایستگاه تقلیل فشار گاز شهری استفاده از صداخفه‌کن (سایلنسر) در مسیر^۲ می‌باشد [۳] که دقیقاً در پایین دست رگولاتور قرار می‌گیرد (شکل ۱).

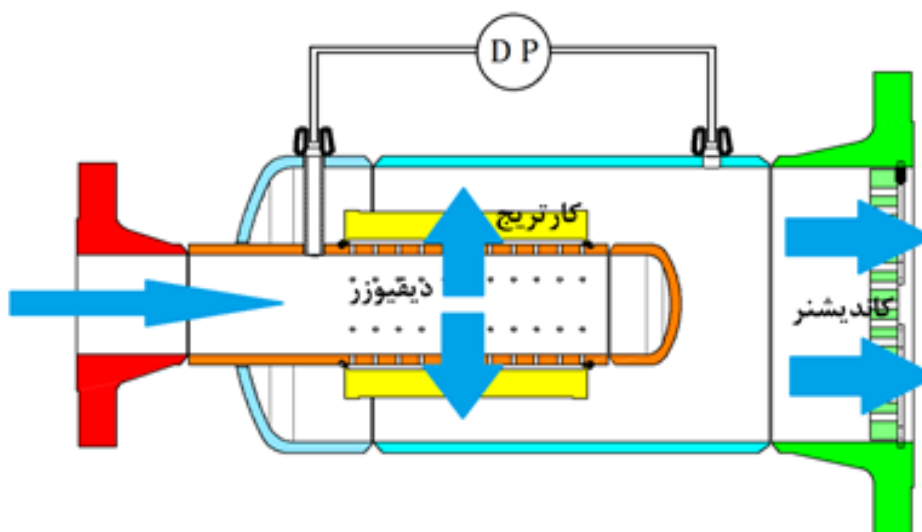
^۱ . Noise flow

^۲ . Inline Silencer



شکل ۱: صداخفه‌کن (سایلنسر) در مسیر نصب شده در پایین دست رگولاتور [۲]

در شکل ۲ قسمت‌های اصلی سایلنسر در مسیر شامل بدنه اصلی، دیفیوزر (لوله سوراخدار)، کارتریج (محیط جاذب متخلخل) و کاندیشنر (صفحه سوراخدار) نشان داده شده است. در این شکل مسیر عبور گاز با پیکان‌های آبی رنگ مشخص شده است. در این سایلنسر گاز بلافاصله پس از رگولاتور وارد دیفیوزر می‌شود. گاز درون دیفیوزر با چرخش ۹۰ درجه‌ای و عبور از سوراخ‌های دیفیوزر وارد کارتریج (محیط متخلخل جاذب صدا) شده و سپس وارد کاندیشنر (پکناخت کننده جریان) می‌شود در انتها نیز وارد ادامه‌ی خط لوله می‌گردد.



شکل ۲: اجزاء اصلی سایلنسر در مسیر شامل دیفیوزر، کارتریج و کاندیشنر

برای اینکه یک صداخفه‌کن (سایلنسر) در سطح استانداردهای معتبر تولید شود لازم است دارای "تاییدیه فنی و تست عملکرد" باشد. در بستر آزمایشی که در شرکت دانش بنیان صنعت پروژه توس (توس آکوستیک) طراحی و ساخته شده عملکرد آکوستیکی و هیدرودینامیکی صداخفه‌کن‌های تخلیه، در مسیر و پوشش آکوستیکی اندازه‌گیری و ارزیابی می‌شود. اجزاء کاهنده صدا به کار گرفته شده در سایلنسر در مسیر همراه با افت فشار جریان سیال است. عامل اصلی افت فشار عبور جریان سیال در سایلنسر، مربوط به دیفیوزر است. دیفیوزر از تعداد زیادی سوراخ دایره‌ای تشکیل شده که هر سوراخ دایره‌ای را می‌توان یک اوریفیس در نظر گرفت [۴]. با مدل سازی سوراخ‌ها با ارفیس‌هایی که توسط کانال‌های شش وجهی به هم پیوسته محاط شده‌اند می‌توان ضریب تخلیه لوله و صفحه سوراخدار را بدست آورد [۵]. همچنین کارتریج نیز که محیط متخلخل

محسوب می‌شود نیز سبب افت فشار می‌شود و در انتها نیز آرام کننده جریان نیز خود تلفات فشار به همراه دارد [۶]. بنابراین لازم است که عملکرد این اجزای کاهنده صدا از دیدگاه آکوستیکی و هیدرودینامیکی به طور تفکیک شده مورد ارزیابی قرار گیرد و همچنین عملکرد نهایی سایلنسر نیز به عنوان محصول نهایی آزمایش شود. در این پژوهش ضمن معرفی بستر آزمایشی تست عملکردی تجهیزات کاهنده نوفه جریانی، به ارائه نتایج حاصل برای یک نمونه سایلنسر در مسیر طراحی و ساخته شده برای ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز پرداخته می‌شود.

۲- روش انجام پژوهش

در این بخش به معرفی بستر آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده برای انجام تست‌های عملکردی انواع سایلنسرها از دیدگاه هیدرودینامیکی و آکوستیکی پرداخته می‌شود. برای این منظور پس از ارائه مشخصات اجزا تشکیل دهنده بستر آزمایش، روش انجام آزمایش نیز گفته می‌شود تا جزئیات فرایند کاری این بستر مشخص گردد.

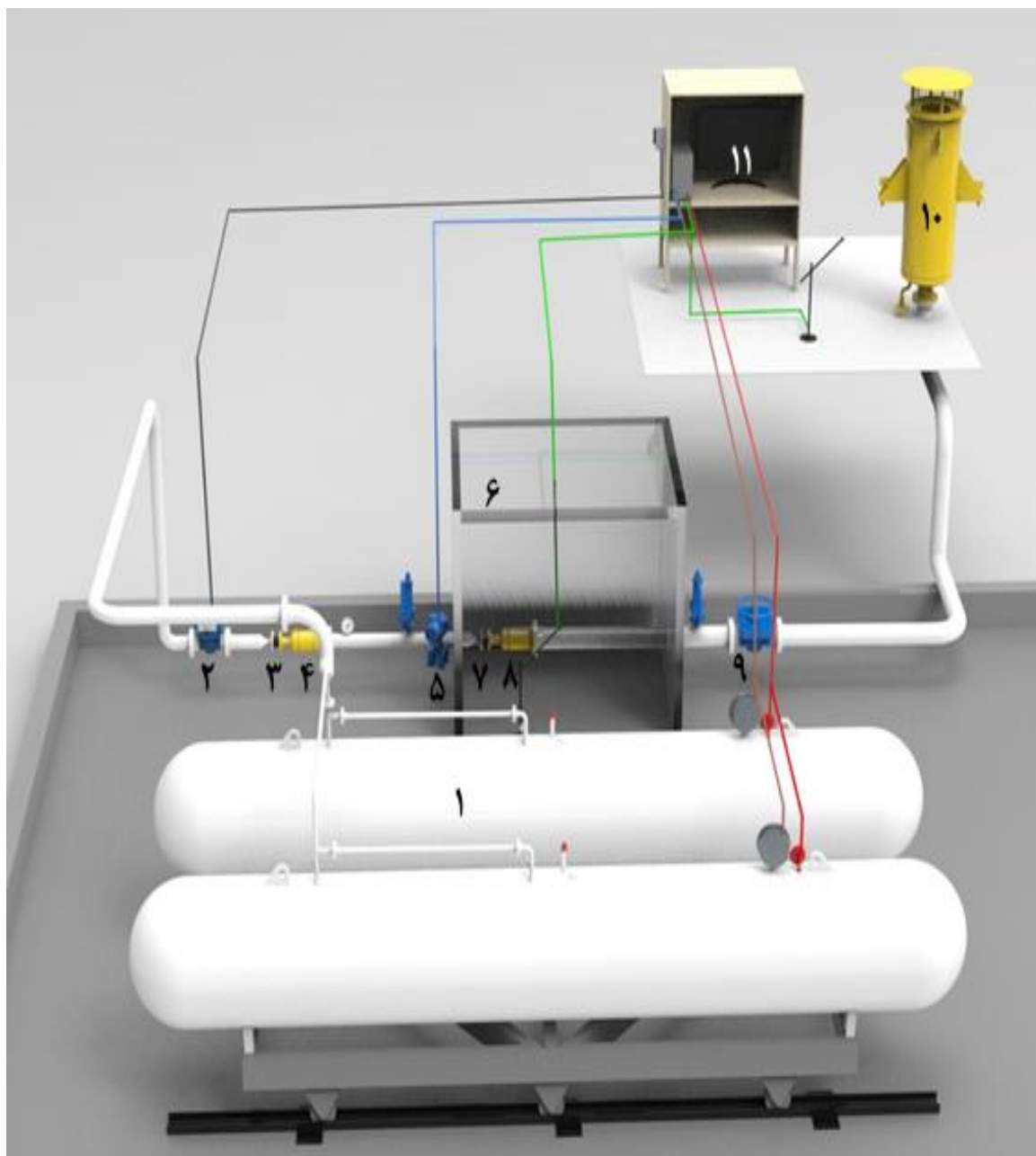
۲-۱- معرفی بستر آزمایش

جریان سیال در این بستر به دلیل خطرات و هزینه کمتر با استفاده از گازهای هوا یا نیتروژن ایجاد می‌شود. برای ایجاد جریان هوا یا نیتروژن در مسیر بستر تست دو مخزن ۴۰۰۰ لیتری مورد استفاده قرار می‌گیرد. مخازن با استفاده از کمپرسور و یا کپسول‌های نیتروژن پر فشار پر می‌شوند. ساخت بستر آزمایش بر اساس استاندارد ISA-S75.07-1997 انجام شده است. لوله‌کشی هر طرف قسمت آزمون لوله فولادی ASTM A105 Gr. B می‌باشد. برای ساخت مخازن از استاندارد بین المللی ASME SEC VIII Div. 1 استفاده شده است و برای لوله‌کشی و اتصالات استاندارد ASME B31.3 رعایت شده است. جایگاه ابزار اندازه‌گیری کمیت نیز از استاندارد ANSI/ISA-S75.02-1996, Control Valve Capacity Test Procedures, 3.6 تبعیت می‌کند. اجزای اصلی بستر آزمایش در جدول ۱ با ذکر مشخصات ارائه شده است.

جدول ۱: اجزای اصلی بستر آزمایش

۱. دو عدد مخزن	۴۰۰۰ لیتری
۲. شیر ورودی (از نوع سماوری)	۴ اینچ کلاس ۶۰۰ با عملگر بادی باز و بسته می‌شود
۳. رگولاتور فشار بالا	۲ اینچ کلاس ۶۰۰
۴. سایلنسر اینلاین CGS	سایز ۲ به ۴
۵. جریان سنج (اوریفیس)-اختلاف فشار سنج زیمنس	طراحی و ساخت مطابق استاندارد EN ISO 5167-2
۶. اتاقک آکوستیک	طراحی و ساخت مطابق استاندارد ISA-S75.07-1997
۷. رگولاتور فشار پایین (داخل اتاقک)	۲ اینچ کلاس ۳۰۰
۸. سایلنسر مورد آزمایش (داخل اتاقک)	سایز ۲ به ۶
۹. شیر خروجی (از نوع سماوری)	۶ اینچ کلاس ۱۵۰
۱۰. سایلنسر ونت در خروجی ایستگاه	ورودی ۶ اینچ
۱۱. سامانه ثبت و نمایش داده ها و فرمان	کامپیوتر و داده پرداز (دیتالاگر) و نمایشگر و کلید فرمان

در شکل‌های ۳ و ۴ اجزای اصلی بستر نشان داده شده است. کمیت‌هایی که در این آزمایش اندازه‌گیری می‌شوند در شکل ۳ با خطوط قرمز (دما)، قهوه‌ای (فشار)، آبی (نرخ جریان یا دبی) و سبز (صدا) نشان داده شده‌اند. خط مشکی در این شکل مربوط به فرمان عملگر بادی شیر سماوری می‌باشد. شماره‌های مشخص شده در این شکل‌ها مربوط به اجزا معرفی شده در جدول ۱ هستند که مشخص می‌کند هر کدام از اجزا در کدام موقعیت قرار گرفته است. در این بستر به طور کلی هنگام باز کردن شیر جریان پرفشار گاز از مخازن تخلیه شده و در مسیر لوله کشی جریان می‌یابد. با عبور جریان از اجزا کنترلی و کاهنده فشار نوفه تولید می‌شود که می‌توان با طراحی سایلنسر آن را کنترل نمود [۷،۸]. تجهیزات اندازه‌گیری به تناسب هر نیاز در موقعیت خود نصب شده‌اند. در انتها نیز گاز به محیط اتمسفر تخلیه می‌شود بنابراین فرآیند جریان یک سیکل باز تخلیه به اتمسفر می‌باشد.



شکل ۳: شماتیک آزمایشگاه نوفه جریانی با شماره اجزاء و خطوط اندازه‌گیری کمیت‌های ترموفیزیکی و خط فرمان عملگر بادی شیر سماوری کنترل جریان



شکل ۴: اجزاء اصلی آزمایشگاه نوفه جریانی

داده‌هایی که برای بررسی عملکرد آکوستیکی و هیدرودینامیکی لازم است ثبت شود عبارتند از: (۱) فشار بالا دست، (۲) افت فشار یا فشار پایین دست، (۳) دمای سیال در بالا دست و (۴) نرخ جریان تجهیزات اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی، جریانی و آکوستیکی در آزمایشگاه نوفه جریانی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: تجهیزات اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی، جریانی و آکوستیکی آزمایشگاه نوفه جریانی

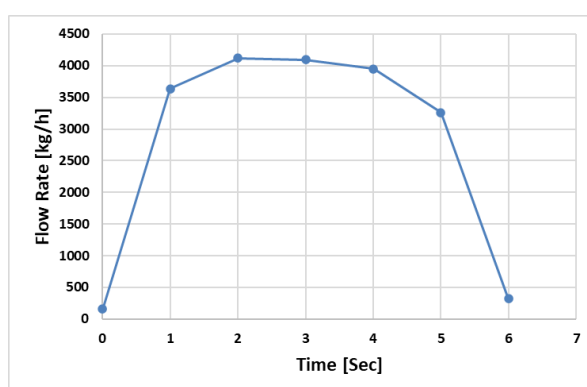
ردیف	نام تجهیز	سازنده
۱	PULSE Lite Basic 2-channel CPB Analyzer Type 3560 L-L06	شرکت B&K دانمارک
۲	¼" Microphone 50Hz-5KHz Type 4935	شرکت B&K دانمارک
۳	نرم افزار pulse lite	شرکت B&K دانمارک
۴	فشار سنجهای عقربه‌ای و ترنسدیوسر	
۵	حسگر فشار و اختلاف فشار مدل 7MF4433 (Transmitter for diff. pressure) همراه با Instrument Manifold همراه با اریفیس، فلنچها و اتصالات برای ایجاد اختلاف فشار برای اندازه گیری نرخ جریان گاز یا مایع	Siemens آلمان
۶	دما سنجهای عقربه‌ای و ترنسدیوسر	

۲-۲- روش انجام آزمایش

مراحل انجام هر آزمایش عبارت است از: ۱- باز کردن شیر سماوری، ۲- اندازه‌گیری و ثبت داده‌ها و ۳- بستن شیر سماوری. نرخ جریان گاز با استفاده از یک اوریفیس و طبق استاندارد EN ISO 5167-2 محاسبه می‌شود. برای محاسبه نرخ جریان سیال باید فشار و دمای بالادست اوریفیس، افت فشار اوریفیس و فشار پایین دست سایلنسر مورد آزمایش اندازه‌گیری شود. برای محاسبه نرخ جریان گاز یک برنامه محاسباتی نوشته شده که مبنای تئوری آن در مرجع [۹] آورده شده است.

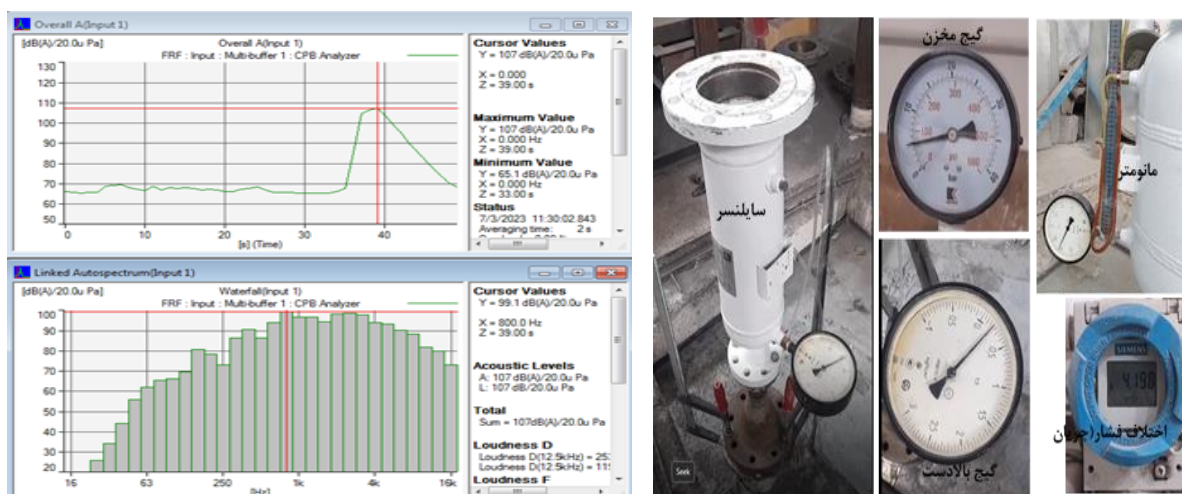
۳- نتایج و بحث

اندازه‌گیری‌ها برای چهار حالت ۱- بدون سایلنسر، ۲- با سایلنسر با دیفیوزر و بدون کارتریج و بدون کاندیشنر ۳- با سایلنسر با دیفیوزر و بدون کارتریج و با کاندیشنر ۴- با سایلنسر با دیفیوزر و کارتریج و کاندیشنر (با اجزاء داخلی کامل) انجام شده است. برای اینکه نتایج با یکدیگر قابل مقایسه باشد تمام آزمایش‌ها در نرخ جریان ثابت (با خطای حداکثر ۵٪) انجام شده است. در هر آزمایش شیر سماوری در بازه زمانی چند ثانیه باز و بسته می‌شود. بنابراین نرخ جریان مطابق شکل ۵ از صفر تا یک مقدار بیشینه افزایش و دوباره تا صفر کاهش می‌یابد. نتایج ارائه شده در این آزمایش‌ها مربوط به نرخ جریان بیشینه می‌باشد.



شکل ۵: نرخ جریان هوا در یک فرایند باز شدن تا بسته شدن شیر برای تست سایلنسر

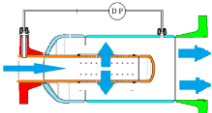
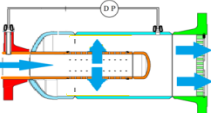
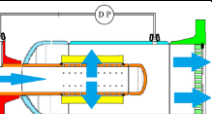
تصویر گیج‌ها، مانومتر و جریان سنج‌ها و تراز فشار صوت در یکی از حالت‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل سمت چپ دو نمودار دارد. نمودار بالا تراز فشار صوت معادل لحظه‌ای در مدت ۵۰ ثانیه را نشان می‌دهد. در این نمودار دیده می‌شود با باز شدن شیر صدا از ۶۷ دسی بل صدای زمینه به ۱۰۷ دسی بل صدای تخلیه هوا از دهانه خروجی سایلنسر می‌رسد. در نمودار پایین شکل سمت چپ توزیع طیفی صدا در ثانیه ۳۰ که شیر کاملاً باز شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۶: (راست) گیج‌ها، مانومتر و جریان سنج‌ها و (چپ) تراز فشار صوت معادل لحظه ای در مدت ۵۰ ثانیه و طیفی در ثانیه ۳۰

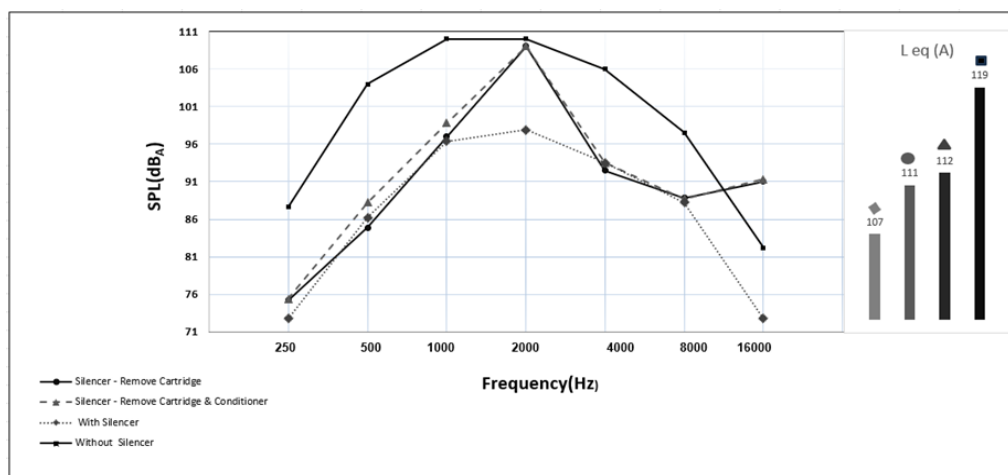
نتایج افت فشار حالت‌های مختلف در جدول ۳ و تراز فشار صوت در این حالت‌ها در شکل ۷ آورده شده است. نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد ۷۵٪ افت فشار مربوط به دیفیوزر، ۲۰٪ مربوط به کارتریج و ۵٪ مربوط به کاندیشنر است. دیفیوزر به دلیل تغییر مسیر و عبور جریان از دسته سوراخ‌ها بیشترین افت را دارد. اجزاء آکوستیکی سایلنسر‌ها یا با استفاده از مکانیزم تداخل امواج صوتی یا با جذب و تبدیل آن به گرما و یا از ترکیب این دو مکانیزم صدا را کاهش می‌دهند. اجزائی که از مکانیزم تداخل امواج صوتی استفاده می‌کنند عکس‌العملی^۳ و اجزائی که از مکانیزم جذب امواج صوتی استفاده می‌کنند جذبی^۴ می‌نامند. اجزاء عکس‌العملی در فرکانس‌های پایین و اجزاء جذبی در فرکانس‌های بالا عملکرد آکوستیکی خوبی دارند. صفحه و لوله سوراخدار اجازه عبور صدای با طول موج بزرگتر (فرکانس متناظر کوچکتر) از قطر سوراخ را نمی‌دهند. بنابراین این اجزاء یک فیلتر صدا در فرکانس‌های پایین می‌باشند. نتایج شکل ۷ نیز نشان می‌دهد در فرکانس پیک ۲۰۰۰ هرتز دیفیوزر و کاندیشنر نقشی در کاهش صدا نداشته‌اند. اما براساس پژوهش‌های دیگر نشان داده شده که کارتریج یا محیط جاذب در این فرکانس و فرکانس‌های ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ هرتز توانایی کاهش صدا را به تنهایی ندارد. بنابراین اثر ترکیبی دیفیوزر، کارتریج و کاندیشنر سبب شده تا در فرکانس ۲۰۰۰ هرتز و بقیه فرکانس‌ها صدا حدود ۱۰ دسی‌بل و تراز معادل آن ۱۲ دسی‌بل صدا کاهش یابد.

جدول ۳: تجهیزات اندازه‌گیری خواص ترموفیزیکی، جریانی و آکوستیکی آزمایشگاه نوفه جریانی

حالت	نرخ جریان [kg/h]	افت فشار [bar]	
بدون سایلنسر	۲۲۶۸	۰	
سایلنسر با دیفیوزر و بدون کارتریج و بدون کاندیشنر	۲۲۶۲.۴	۰.۱۵	
سایلنسر با دیفیوزر و بدون کارتریج و با کاندیشنر	۲۲۵۷.۳	۰.۱۶	
سایلنسر (کامل) با دیفیوزر و کارتریج و کاندیشنر	۲۲۵۶.۵	۰.۲	

^۳ . Reactive

^۴ . Absorptive



شکل ۷: توزیع طیفی صدا در چهار حالت

۴- نتیجه گیری

بستر آزمایش ساخته شده می‌تواند رفتار آکوستیکی و هیدرودینامیکی یک سایلنسر را ارزیابی نماید و امکان توسعه کاربردهای آن وجود دارد. با استفاده از بستر ساخته شده عملکرد یک نمونه سایلنسر بررسی گردید. عامل اصلی افت فشار عبور جریان سیال در سایلنسر مربوط به دیفیوزر است. ۷۵٪ افت فشار سایلنسر مربوط به دیفیوزر، ۲۰٪ مربوط به کارتریج و ۵٪ مربوط به کاندیشنر است. اثر ترکیبی دیفیوزر، کارتریج و کاندیشنر سبب شده تا سایلنسر در فرکانس پیک بتواند صدا را در حد انتظار کاهش دهد. برای اینکه نتایج با یکدیگر قابل مقایسه باشد تمام آزمایش‌ها در نرخ جریان ثابت (با خطای ۵٪) انجام شد.

مراجع

- [1] Munson B., Young D. F., Okiishi T. H. and Huebsch W. W., 2009, Fundamentals of Fluid Mechanics, 6th edition, John Wiley & Sons.
- [2] R.F. Barron, 2003, Industrial Noise Control and Acoustics, Florida, CRC Press, Boca Raton.
- [۳] علی فائزین، محمدرضا مدرس رضوی و امیر امیدوار، ۱۳۹۲، به کارگیری خفه‌کن عکس‌العملی برای کاهش نوفه ایستگاه تقلیل فشار گاز طبیعی، نشریه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک، انجمن مهندسان مکانیک ایران، سال پانزدهم، شماره دوم.
- [4] Neihguk, D., Munjal M.L. and Prasad A., 2015, Pressure drop characteristics of perforated pipes with particular application to the concentric tube resonator, SAE Technical Paper, No. 01-2309, pp 1-8.
- [5] Faezian A. and Ahmadi Tighchi H., 2024, Modeling and designing for acoustic and pressure drop of perforated tube in the path of unsteady compressible flow, Khwarizmi International Conference on Science and Technology, Iran.
- [6] Zhong, Wei., Li, X., Liu, F., Tao, G., Lu, B. & Kagawa, T., 2014, Measurement and correlation of pressure drop characteristics for air flow through sintered metal porous media, Transport in Porous Media, vol. 101, pp 53-67.
- [۷] علی فائزین و هاشم احمدی تیغ‌چی، ۱۴۰۳، منابع آلودگی صوتی در سامانه‌های تهویه مطبوع و راهکارهای کاهش آن، دومین کنفرانس بین‌المللی و پنجمین کنفرانس ملی تهویه مطبوع و تاسیسات حرارتی و برودتی، تهران، پژوهشگاه نیرو.
- [۸] Crocker M. J., 1998, Handbook of acoustics, New York, John Wiley & Sons.
- [۹] علی فائزین، حمید نیازمند، راضیه عابدینی و زهرا علوی، ۱۳۹۱، استخراج رابطه‌ی تجربی برای به دست آوردن دبی مستقل از عدد رینولدز، چهاردهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، بیرجند، دانشگاه بیرجند.