

به کارگیری خفه‌کن‌های عکس‌العملی برای کاهش نوفه ایستگاه تقلیل فشار گاز طبیعی

منبع تولید نوفه جریانی در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز رگلاتور است و در این پژوهش با به کارگیری صدا خفه‌کن در پایین دست منبع تولید نوفه تلاش می‌شود این نوفه کاهش داده شود. صدا خفه‌کن عکس‌العملی با هندسه‌ها و شکل‌های مختلفی ساخته شده است. خفه‌کن‌ها دو نوع لوله‌های سوراخدار هم مرکز و صفحه سوراخدار می‌باشند که در نوع لوله‌های سوراخدار هم مرکز اثر قطر لوله‌ها و سوراخ‌ها همچنین پوشش سطح بیرونی خفه‌کن با ماده جاذب صدا مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مطالعه تجربی دو کمیت آکوستیکی تراز فشار و تراز شدت صوت اندازه‌گیری می‌شود. مهمترین نتیجه‌ای که از این پژوهش بدست آمده این است که با ترکیب خفه‌کن‌های لوله‌های سوراخدار هم مرکز با پوشش عایق صوتی و صفحه سوراخدار می‌توان نوفه جریانی را بیشتر از خفه‌کن‌های ساده کاهش داد.

علی فائزیان^۱

استادیار

محمد رضا مدرس رضوی^۲

استاد

امیر امیدوار^۳

دانشجوی دکترا

واژه‌های راهنما: روشهای تجربی، نوفه جریانی، ایستگاه تقلیل فشار گاز طبیعی، خفه‌کن

۱- مقدمه

کاهش فشار گاز در ایستگاه‌های تقلیل فشار کاهش چگالی و افزایش سرعت جریان را به همراه دارد و عبور گاز از مسیرهای مختلف سبب ایجاد صدا می‌شود. این صدا از مسیر بدنه خط لوله و تجهیزات نصب شده در آن به فضای داخل ایستگاه و سپس دیواره ساختمان ایستگاه و پس از آن محیط اطراف و دیوار ساختمان مسکونی مجاور و پس از عبور از فضای داخل ساختمان به گوش فرد ساکن در آن می‌رسد. ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز رایج دو نوع سطح^۴ و کابینتی^۵ هستند که همه آنها شامل لوله ورودی، فیلتر، لوله پایدار کننده، شیر قطع اضطراری^۶، لوله و رابط کاهش قطر، رگلاتور، رابط افزایش قطر، شیرهای اطمینان، هدر و لوله خروجی می‌باشد. این ایستگاه‌ها با ظرفیتهای مختلف نیاز گاز یک منطقه مسکونی و یا مجتمع صنعتی را تامین می‌کند. در ایستگاه‌های تقلیل فشار، گاز از خط انتقال اصلی شبکه گاز شهری در

^۱ نویسنده مسئول، استادیار، پژوهشکده علوم و صنایع غذایی، مشهد A.faezian@rifst.ac.ir

^۲ استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، M_razavi@um.ac.ir

^۳ دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد Arr.sata.82@gmail.com

^۴ Flat

^۵ Cabinet

^۶ Shout off Valve

فشار ۲۵۰ psig دریافت شده و فشار آن در ایستگاه به ۶۰ psig کاهش داده می‌شود. لوله انتقال گاز قبل از ایستگاه در عمق زمین قرار دارد.

تحقیقات جدی در زمینه‌ی نوفه‌ی آیرودینامیکی^۱ در اوایل دهه (۱۹۵۰) در پی ظهور موتورهای جت تجاری شروع شد. در آن زمان احساس شد برای کنترل نوفه باید مکانیزم تولید صوت را بهتر درک کرد [۱]. در دهه‌های اخیر مطالعات متعددی روی صدای جریان گاز انجام شده است. دیویس و همکارش [۲] صدای جریان در دو تشدید کننده انبساطی و تشدید کننده‌های هم مرکز را بر اساس داده‌های تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آرینا و همکارانش [۳] به بررسی عددی و آزمایشگاهی نوفه‌ی تولیدی به وسیله‌ی عبور جریان گاز از درون یک اوریفیس پرداخته‌اند. همچنین آنها ارتباط بین نیروی درگ جریان نوفه‌دار با نیروی درگ جریان متوسط را بررسی کردند. مانگیو و فرانکل [۴] تولید صدا در جت مغشوش را که با یک اریفیس در داخل کانال مربعی ایجاد می‌شود به روش تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند توان صوتی صدای منتشر شده از این جت جریان را می‌توان بر حسب اعداد بی بعدی که تابع طول مشخصه، فرکانس و سرعت جریان هستند بیان نمود.

مور [۵] و همکارانش به اندازه‌گیری و مدل‌سازی نوفه‌ی جریانی از یک جت در شرایط کنترل شده در اعداد ماخ و رینولدز ویژه‌ای پرداخته‌اند. دیویس [۶] به بررسی تجربی دو مکانیزم ایجاد صدا در سطوح ناپیوسته‌ی کانال‌های جریان گاز پرداخته است. او ابتدا به بررسی اثر ورتیسیتته ناشی از لایه مرزی در تولید نوفه پرداخته و در ادامه به بررسی اثر تشدید میزان صوت بالادست با حرکت گردابه‌ها پرداخته است.

منابعی که معرفی شد به بررسی یک مسئله یا هندسه و یا یک جزء خاص از یک سامانه پرداخته‌اند. در حالی که ایستگاه تقلیل فشار که یک سامانه چند جزئی شامل لوله ورودی، فیلتر، لوله پایدار کننده، شیر قطع اضطراری، لوله و رابط کاهش قطر، رگلاتور، رابط افزایش قطر، شیرهای اطمینان، هدر و لوله خروجی می‌باشد. البته عامل اصلی و غالب ایجاد نوفه در ایستگاه تقلیل فشار گاز رگلاتور است.

نزدیک‌ترین پژوهش به موضوع پژوهش حاضر که برای کاهش نوفه جریانی جریان گاز در خروجی رگلاتور در دسترس می‌باشد صداخفه‌کنی است که به عنوان اختراع [۷] به ثبت رسیده است. صدا خفه‌کن پیشنهاد شده در این اختراع با صدا خفه‌کن‌هایی که در این پژوهش بکار برده شده شباهت زیادی دارد. هندسه‌هایی که در ساخت صداخفه‌کن‌های این پژوهش بکار برده شده مشابه هندسه‌هایی است که برخی سازندگان صدا خفه‌کن صنعتی از آن استفاده کرده‌اند اما در این پژوهش این هندسه‌ها به طور مستقل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. انتشار نوفه در پایین دست منبع بیشتر از بالادست آن رخ می‌دهد. با توجه به تجربه‌ای که از پژوهش‌های قبلی بدست آمده است [۸] در راهکار تجربی این پژوهش صدا خفه‌کن عکس‌العملی^۲ به شکل‌های مختلفی ساخته شده و در پایین دست رگلاتور مورد آزمایش قرار گرفته است.

¹ Aerodynamic Noise

² Reactive

۲- تعاریف و تئوری نوفه

۲-۱- پارامترهای نوفه

صوت همان تغییر فشار محیط نسبت به زمان است. برای سادگی از مقدار میانگین موثر آن استفاده می‌شود. مقدار میانگین موثر از روش رایج مجذور میانگین مربع فشار آکوستیکی به شکل زیر بدست می‌آید:

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (1)$$

از آنجایی که مقادیر فشار صوت بازه‌ی بسیار بزرگی را شامل می‌شوند بسیار مناسب است که مقادیر در مقیاس لگاریتمی بیان شود [۹].

تراز فشار صوت از رابطه (۲) بدست می‌آید.

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{rms}}{P_{ref}} \right)^2 \quad (2)$$

برای موج صفحه‌ای آزاد میانگین شدت صوت برابر میانگین زمانی حاصل ضرب فشار در سرعت ذره اندازه‌گیری شده در جهت مورد نظر است.

$$I = \overline{pU} = \frac{p_{rms}^2}{\rho c} [W/m^2] \quad (3)$$

۲-۲- مدلسازی نوفه جریانی

صدایی که در اثر جریان گاز به وجود می‌آید با سه نوع منبع^۱ صوتی یا ترکیب آنها مدل سازی می‌شود. این سه نوع منبع تک قطبی‌ها^۲، دو قطبی‌ها^۳ و چهار قطبی‌ها^۴ نامیده می‌شوند. صدای تولید شده وابستگی شدیدی به سرعت و نوسانات فشاری در ناحیه‌ی مغشوش دارد. توان صوتی منتشر شده از این سه نوع منبع مطابق رابطه تناسبی (۴) با نرخ جریان جرم، سرعت صوت و سرعت جریان گاز ارتباط دارد [۱۰ و ۱۱].

$$Q_0 \propto mc^{-1}v^3, Q_2 \propto mc^{-3}v^5, Q_4 \propto mc^{-5}v^7 \quad (4)$$

مکانیزم‌های پایه‌ی تولید نوفه در شیرها و رگولاتورها شامل ترکیبی از منابع تک قطبی، دو قطبی و چهار قطبی است. اگر شدت جریان جرمی بر حسب سرعت بیان شود انرژی آکوستیکی منتشر شده از تک، دو یا چهار قطبی‌ها به ترتیب با v^4 ، v^6 و v^8 متناسب خواهد بود. بنابراین زمانی که سرعت ذره‌ای (در مقایسه با سرعت صوت) بالا باشد، ترتیب انرژی آکوستیکی تولیدی به وسیله هر منبع برعکس حالت ذکر شده در بالا می‌باشد. البته این مورد در نمونه‌های عملی به ندرت اتفاق می‌افتد.

¹ Source

² MonoPoles

³ DiPoles

⁴ QuadraPoles

گردابه‌های بزرگ بیشترین نقش را در انتقال تکانه^۱ و اغتشاش^۲ دارد. اندازه گردابه‌های^۳ بزرگ از مرتبه طول مشخصه مقطع جریان می‌باشد. در مقیاس‌های طولی بسیار کوچک، ویسکوزیته در هموار کردن نوسانات سرعت خروجی می‌تواند مؤثر باشد. گردابه‌های با مقیاس‌های به اندازه‌ی کافی کوچک تحت تأثیر ویسکوزیته هستند. گردابه‌های مقیاس‌های بزرگ در گذر از جریان آرام به جریان آشفته و تولید انرژی جنبشی آشفته نقش اصلی را به عهده دارند. گردابه‌های بزرگ حاوی ۸۰ تا ۹۰ درصد کل انرژی جنبشی اغتشاشات جریان می‌باشند. گردابه‌های مقیاس‌های کوچک در استهلاک لزجی انرژی آشفته نقش مهمی دارند. انرژی جنبشی گردابه‌های کوچک درصد کمی از انرژی کل را شامل می‌شود. حرکت گردابه‌های مقیاس کوچک با انرژی حرکت گردابه‌های مقیاس بزرگ و ویسکوزیته‌ی دینامیکی تأمین می‌شود [۱۲].

می‌توان نرخ اتلاف انرژی اغتشاشی ϵ را به مقیاس‌های طول و سرعت اغتشاشی مقیاس بزرگ نسبت داد. گردابه‌های بزرگ انرژی گردابه‌های کوچک را متناسب با عکس مقیاس زمانی گردابه‌های بزرگ تأمین می‌کنند که نرخ اتلاف نیز متناسب با آن است. در اغتشاشی‌های مقیاس بزرگ مقدار انرژی جنبشی در واحد جرم با u^2 و نرخ انتقال انرژی با u/l متناسب است. بنابراین نرخ تأمین انرژی گردابه‌های مقیاس کوچک از مرتبه‌ی $u^3/l = u^2 \cdot u/l$ خواهد بود. این گردابه‌های کوچک در مسیر جریان مستهلک شده و از بین می‌روند. بنابراین این انرژی اغتشاشی با نرخ ϵ مطابق رابطه تناسبی (۵) تلف می‌شود. یعنی با افزایش سرعت و کاهش قطر نرخ اتلاف انرژی اغتشاشی افزایش می‌یابد.

$$\epsilon \approx u^3/l \quad (5)$$

۳- روش اندازه‌گیری تجربی

استاندارد تجهیزات، روش‌ها و مراحل تست آزمایشگاهی و اندازه‌گیری صدایی که توسط جریان گاز عبوری از شیرکنترل و خط لوله انتقال تولید و منتشر می‌شود توسط انجمن ادوات امریکا با شماره ISA-S75.07-1997 تعریف شده است. اگر چه این استاندارد برای اندازه‌گیری نوفه منتشر شده در پایین دست شیر طراحی شده است، اما امکان استفاده از آن حتی در عایق‌کاری و لوله‌کشی غیر استاندارد نیز وجود دارد [۱۳].

مجموعه ابزار اندازه‌گیری و نرم‌افزارهای تخصصی ساخت شرکت B&K دانمارک می‌باشد. دستگاه اندازه‌گیر تراز سنج صوتی^۴ مدل Investigator 2260 است. روی این دستگاه پراپ اندازه‌گیری شدت صوت^۵ نیز نصب می‌شود. برای تحلیل داده‌ها از نرم افزار Pulse Labshop استفاده می‌شود. جهت ذخیره‌کردن، نمایش و انجام پردازش‌های ثانویه بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده نرم افزار Noise Explorer مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای اطمینان از صحت اندازه‌گیری میکروفون‌ها از کالیبراتور و صحت کار سخت افزار انتقال و پردازش داده‌ها از روش درستی سنجی نرم افزاری استفاده می‌شود.

¹ Momentum

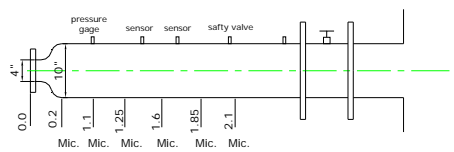
² Turbulency

³ Eddy

⁴ Sound Level Meter (SLM)

⁵ Sound Intensity Prop

در تمامی اندازه‌گیری‌ها، اندازه‌گیری شدت صوت در گام‌های ده سانتیمتری در طول لوله و در فاصله‌ی ده سانتیمتر از سطح لوله و فاصله‌ی ثابت از محور لوله در تمام طول لوله مطابق شکل (۱) انجام می‌گیرد. اندازه‌گیری تراز شدت صوت در امتداد مسیر پس از رگولاتور و همچنین در طول هدر انجام می‌شود. پراب شدت صوت قادر است تنها نوفه رسیده از یک جهت را اندازه‌گیری نموده و تراز شدت صوت را به صورت تک جهتی مشخص کند. این ابزار ما را قادر می‌سازد تا نوفه را تنها در یک جهت فارغ از نوفه‌های رسیده از سایر بخش‌ها اندازه‌گیری کرده و با جاروب کردن یک ناحیه، نوفه‌ی تولیدی در هر بخش را بدست آوریم.



(ب)



(الف)

شکل ۱- محل آزمون اندازه‌گیری تراز شدت صوت (الف) حسگر و موقعیت آن نسبت به لوله (ب) مسیر لوله

بستر آزمون داخل یک ایستگاه تقلیل فشار گاز صنعتی قرار دارد و آزمونها در شرایط کاربری صنعتی انجام می‌شود. شکل (۲) محل آزمایش را نشان می‌دهد که یک ایستگاه تقلیل فشار با رگلاتور ۳ اینچی با ظرفیت هر خط ۱۰۰۰۰ متر مکعب بر ساعت گاز طبیعی می‌باشد. در این ایستگاه، گاز از خط انتقال اصلی شبکه گاز شهری در فشار ۲۵۰ psig دریافت شده و فشار آن در ایستگاه به ۶۰ psig کاهش یافته و وارد شبکه محلی توزیع فشار می‌شود. همان طور که در این شکل دیده می‌شود بستر آزمون مقطعی قابل برداشتن از خط لوله در پایین دست رگلاتور است. این مقطع حدود یک متر طول دارد و از دو طرف با فلنچ در مسیر خط لوله انتقال گاز قرار می‌گیرد و با جرثقیل دستی قابل جابجا شدن است. برای قرار دادن خفه‌کن در مسیر پایین دست رگلاتور در خط (۱) اتصالات فلنچی بستر آزمون باز شده و پس از قرار دادن خفه‌کن داخل آن دوباره در مسیر خط جریان گاز قرار می‌گیرد.



شکل ۲- بستر آزمون: خط ۱ ایستگاه تقلیل فشار گاز

به منظور بررسی دقیق تر نوفه ایجاد شده در لوله برای هر اندازه‌گیری تنها یکی از سه خط ایستگاه فعال بوده و سایر خطوط بسته بوده‌اند. همچنین سعی بر آن بوده که تمامی اندازه‌گیری‌ها در شرایط پایدار خط انجام گیرد.

۴- راهکار تجربی بکارگیری خفه‌کن

برای کنترل و کاهش میزان نوفه منتشر شده در محیط سه روش منبع، مسیر و دریافت کننده وجود دارد. در روش منبع از تولید یا افزایش نوفه در منبع تولید صدا جلوگیری شده، در روش مسیر انتشار نوفه در محیط انتقال صدا کنترل شده و در روش دریافت کننده از ابزار کنترل صدا در (شخص) دریافت کننده صدا استفاده می‌شود. یک قانون خاص برای انتخاب یکی از روش‌ها وجود ندارد. هزینه، میزان تاثیرگذاری و مقبول بودن در انتخاب هر یک از سه روش یا ترکیب آنها نقش دارد. به طور کلی چنانچه نوفه ۱۰۰ دسی‌بل باشد هر دو انتخاب ممکن است راهگشا باشند [۱۴ و ۱۵]. راه‌های مختلفی برای تدبیر مسیر نوفه از جمله استفاده از لوله‌های با دیواره‌های ضخیم، نصب دیفیوز و صداخفه‌کن، عایق‌کننده‌های صوتی وجود دارد. روش‌های کاهش نوفه در مسیر معمولاً اقتصادی‌تر و قابلیت اجرای ساده‌تری از روش‌های کاهش نوفه در منبع می‌باشند.

در این راهکار تجربی اثر هندسه و نوع خفه‌کن بر نوفه جریانی مطالعه می‌شود. خفه‌کن‌ها دو نوع لوله‌های سوراخدار هم مرکز و صفحه سوراخدار می‌باشند که در نوع لوله‌های سوراخدار هم مرکز اثر قطر لوله‌های سوراخدار و قطر سوراخ‌ها بر نوفه جریانی مورد بررسی قرار می‌گیرد. اثر پوشش لوله سوراخدار بیرونی خفه‌کن با ماده جاذب صدا نیز بر نوفه جریانی مطالعه می‌شود.

دو ویژگی لوله یا صفحه سوراخدار ضخامت و درصد تخلخل^۱ آن است. درصد تخلخل نسبت مساحت سطح سوراخ‌ها به کل مساحت پیرامونی لوله یا صفحه می‌باشد. در نمونه خفه‌کن‌های مورد مطالعه درصد تخلخل و ضخامت ثابت است.

نمونه‌هایی از خفه‌کن‌های بررسی شده در شکل (۳) نشان داده شده است. در شکل ۳-الف صدا خفه‌کن با سه لوله هم مرکز سوراخدار CPS-P3، در شکل (۳-ب) صدا خفه‌کن با سه لوله هم مرکز سوراخدار پوشیده شده با ماده جاذب صدا CPS_A-P3 و در شکل (۳-پ) صدا خفه‌کن صفحه سوراخدار PPS نشان داده شده است. جداره بیرونی خفه‌کن با ماده جاذب صدا با توری محافظ پوشیده شده است خفه‌کن‌های با صفحه سوراخدار با ترکیب دو یا سه صفحه سوراخدار با فاصله‌های مختلف و بالاخره خفه‌کن‌های ترکیبی لوله‌های هم مرکز سوراخدار با صفحه سوراخدار انتخاب‌های دیگری هستند که در کاهش صدا در ایستگاه تقلیل فشار گاز تاثیر دارند.

۵- نتایج و بحث

نتایجی که با بکارگیری خفه‌کن عکس‌العملی بدست آمده با نتایج حالت اولیه (بدون خفه‌کن) مقایسه و دلایل تفاوت آنها بیان می‌شود.

^۱ Porosity



(پ)

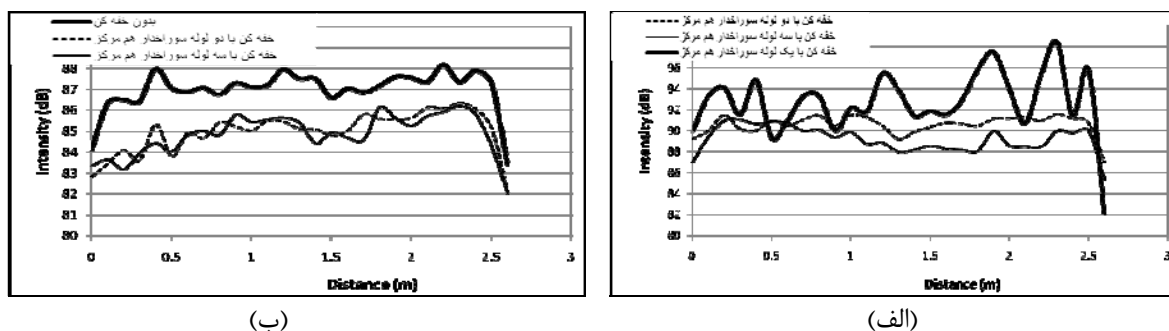
(ب)

(الف)

شکل ۳- نمونه‌هایی از خفه‌کن‌های بررسی شده (الف) نوع CPS-P3 (ب) نوع CPS_A-P3 (پ) نوع PPS

۵-۱- خفه‌کن‌های با لوله‌های سوراخدار هم مرکز

اگر صدای زمینه بیش از ۱۰ دسی‌بل از صدای منبع مورد مطالعه باشد اثر آن بر نتایج اندازه‌گیری شده ناچیز است و مقدار ثبت شده همان صدای منبع خواهد بود. در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش صدای محیط که عمدتاً متأثر از صدای رفت و آمد خودروها در خیابان‌های مجاور است کمتر از ۷۰ دسی‌بل ثبت شده است. در حالی که صدای خط انتقال گاز در پایین دست رگلاتور همراه با صداخفه‌کن بیش از ۸۰ دسی‌بل و بدون صداخفه‌کن بیش از ۹۰ دسی‌بل است. بنابراین صدای زمینه در نتایج اندازه‌گیری تأثیر ندارد. در نمودار شکل (۴-الف) مقایسه‌ای میان تراز شدت صوت اندازه‌گیری شده در خط شماره ۱ در شرایط استفاده از هر یک از خفه‌کن‌های با یک CPS-P1، دو CPS-P2 و سه CPS-P3 لوله سوراخدار هم مرکز نشان شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد لوله‌های سوراخدار هم مرکز کنترل جریان و تولید نوفه بهتر انجام شده است که می‌توان نتیجه گرفت با افزایش تعداد این لوله‌ها در خفه‌کن اثر لزجت (اصطکاک میان گاز و دیوار) زیاد شده و این امر در نهایت موجب کاهش شدت آشفتگی‌های جریانی و اندازه‌ی گردابه‌ها و در نتیجه موجب کنترل بهتر نوفه جریانی شده است. براساس تئوری‌های جریانی‌های اغتشاشی اندازه گردابه‌ها هم مرتبه با طول مشخصه جریان اصلی یعنی قطر سوراخها می‌باشد. بنابراین لوله‌های سوراخدار اندازه گردابه‌ها را کوچک و نرخ استهلاک آنها را افزایش می‌دهد. همچنین فرکانس نوفه را به مقادیر بالاتر جابجا می‌کند. البته خود نیز یک منبع تولید نوفه است که نسبت تولید نوفه به استهلاک آن در خفه‌کن یک لایه قابل توجه است اما در خفه‌کن دو لایه و چند لایه این نسبت کاهش می‌یابد. نتایج شکل (۴-ب) مربوط به آزمایش بدون و با خفه‌کن در یک ایستگاه دیگر می‌باشد. نتایج شکل (۴-ب) نشان می‌دهد که خفه‌کن‌های لوله‌های سوراخدار هم مرکز CPS-Pn حدود ۲ دسی‌بل صدا را کاهش می‌دهد. البته افزایش تعداد لوله‌های سوراخدار به بیش از دو لوله اثر قابل توجهی بر کاهش نوفه ندارد.



(ب)

(الف)

شکل ۴- مقایسه‌ای تراز شدت صوت کلی اندازه‌گیری شده

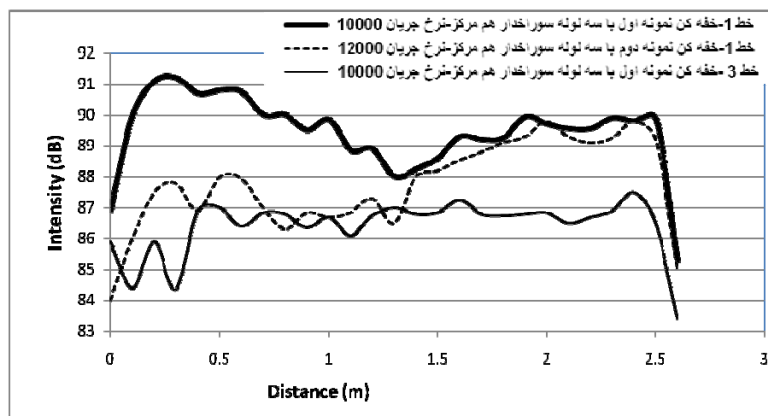
(الف) خفه‌کن با یک، دو و سه لوله سوراخدار هم مرکز (ب) با و بدون خفه‌کن

۵-۱-۱- اثر قطر لوله‌های سوراخدار

در شکل (۵) نتایج عملکرد دو نمونه خفه‌کن با سه لوله سوراخدار هم مرکز CPS-p3 با قطر سوراخهای یکسان ۵ میلی‌متر و قطر لوله‌های مختلف مقایسه شده است. تفاوت این دو نمونه در اندازه قطر لوله‌های هم مرکز یا به عبارت دیگر طول مشخصه خفه‌کن‌ها است. قطر لوله‌های نمونه اول ۱۵، ۳۵ و ۵۰ میلی‌متر و قطر لوله‌های نمونه دوم ۴۰، ۵۵ و ۷۰ میلی‌متر می‌باشد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود نمونه‌ی اول جواب بهتری داشته است. می‌توان دلیل آن را در طول مشخصه خفه‌کن جستجو کرد. در نمونه‌ی اول سرعت جریان اصلی داخل لوله‌ها افزایش و طول مشخصه آن کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به تناسب (۵) نرخ استهلاک انرژی اغتشاشی افزایش می‌یابد. همان طور که انتظار می‌رود نتایج عملکرد خفه‌کن نمونه اول در دو نرخ جریان متفاوت نشان می‌دهد که افزایش نرخ جریان سبب افزایش تولید نوفه می‌شود.

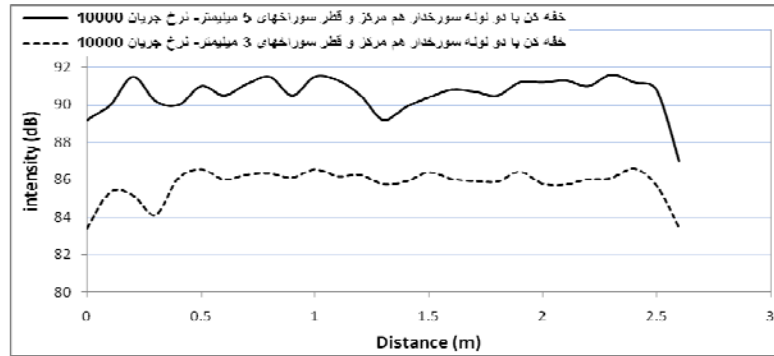
۵-۱-۲- اثر قطر سوراخ‌ها

در شکل (۶) اثر قطر سوراخ‌های خفه‌کن‌های با دو لوله سوراخدار هم مرکز CPS-p2 مقایسه شده است. در این آزمایش‌ها نتایج عملکرد دو عدد خفه‌کن به ترتیب با قطر سوراخ ۳ و ۵ میلی‌متر در نرخ جریان ۱۰۰۰۰ متر مکعب بر ساعت بررسی شده است. همان طور که در این شکل دیده می‌شود خفه‌کن با قطر سوراخ بزرگ‌تر عملکرد بهتری دارد.



شکل ۵- مقایسه نتایج دو نمونه خفه‌کن نوع CPS-p3 با قطر سوراخهای یکسان ۵ میلی‌متر و قطر لوله‌های:

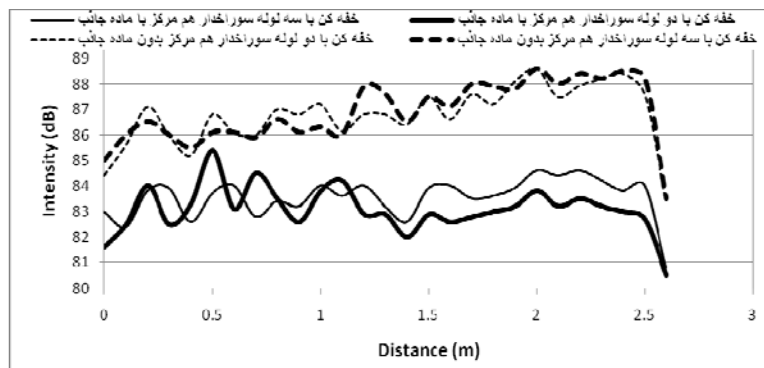
نمونه اول ۱۵، ۳۵ و ۵۰ و نمونه دوم ۴۰، ۵۵ و ۷۰ میلی‌متر



شکل ۶- مقایسه نتایج دو نمونه خفه‌کن نوع CPS-p2 با قطر سوراخهای ۳ و ۵ میلی‌متر و قطر لوله‌های یکسان

۵-۱-۳- اثر پوشش خفه‌کن با ماده جاذب صدا

برای اینکه اثر ماده جاذب صدا بر عملکرد خفه‌کن بررسی شود نتایج دو خفه‌کن CPS-p2 و CPS-p3 با دو خفه‌کن مشابه که جداره بیرونی آنها با مواد جاذب صدا پوشیده شده CPS_A-P3 و CPS_A-P3 در شکل (۷) مقایسه شده‌اند. تمامی آزمایش‌ها در نرخ جریان ۱۰۰۰۰ متر مکعب بر ساعت انجام گرفته است. این نتایج نشان می‌دهد خفه‌کنهای با پوشش ماده جاذب صدا حدود ۵ دسی‌بل نسبت به نمونه‌های بدون پوشش تراز شدت صوت را کاهش داده‌اند. در مقایسه‌ی دو نمونه خفه‌کن دو و سه لوله سوراخدار هم مرکز در این شکل مشاهده می‌شود که هر دو خفه‌کن روند آکوستیکی یکسانی دارند.



شکل ۷- مقایسه‌ی نتایج دو خفه‌کن CPS-p2 و CPS-p3 با دو خفه‌کن مشابه CPS_A-P3 و CPS_A-P3

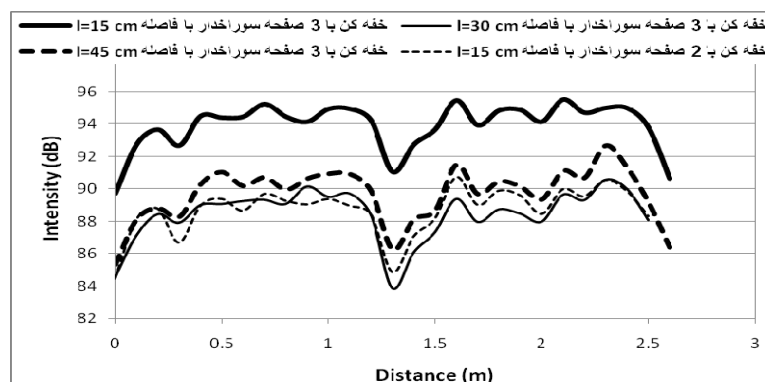
که جداره بیرونی آنها با مواد جاذب صدا پوشیده شده

با انجام آزمایش‌های دیگر اثر پوشش ماده جاذب فوم فلکسی، الیاف سرامیک و الیاف آهنی بر نوفه جریانی مشاهده شد که فوم فلکسی مانند الیاف سرامیک دچار سایش شده و طول عمر الیاف آهنی از بقیه بیشتر است.

۵-۲- خفه‌کن‌های با صفحه سوراخدار

از صفحه سوراخدار PPS مطابق شکل (۳-پ) استفاده می‌شود تا با ایجاد مانع در مسیر جریان موجب شکسته شدن نوسانات و اغتشاشات جریانی شوند. این خفه‌کن‌ها ترکیبی از دو یا سه صفحه سوراخدار بوده

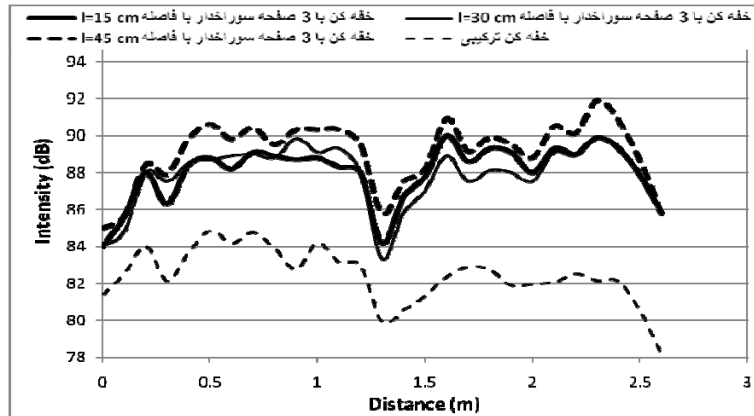
که در مقابل جریان قرار گرفته و جریان از درون سوراخ‌های آن عبور می‌کند. تعداد و فاصله صفحه‌های سوراخدار در خفه‌کن بر عملکرد آنها تاثیر دارد. نتایج تراز شدت صوت خفه‌کن با دو و سه صفحه سوراخدار و فاصله‌های مختلف بین صفحه‌ها در شکل (۸) مقایسه شده است. در این شکل مشاهده می‌شود تعداد صفحه سوراخدار کمتر از موقعیت صفحه‌ها نسبت به یکدیگر بر کاهش نوفه جریانی تاثیر می‌گذارد. با مقایسه اثر موقعیت‌های مختلف قرارگیری صفحه سوم در فاصله‌های ۳۰، ۱۵ و ۴۵cm از صفحه دوم می‌توان نتیجه گرفت که موقعیت قرارگیری صفحه سوم دارای حالت بهینه‌ای می‌باشد که باید با استفاده از آزمایش‌های بیشتر این نقطه را بدست آورد. در همه موارد فاصله صفحه دوم با صفحه اول ۱۵cm بوده است. در اندازه‌گیری‌ها مشاهده شده است که نوفه تولید شده در بازه فرکانسی ۱۰۰۰ تا ۸۰۰۰Hz بیشترین تراز فشار در فرکانس ۱۲۵۰Hz قرار دارد که به قطر سوراخ‌ها و ضخامت صفحه‌های سوراخدار مربوط می‌شود. در صفحه سوراخدار اول قطر سوراخ‌ها ۱۰ میلی‌متر و تعداد آنها ۵۵ عدد و در صفحه‌های سوراخدار دوم و سوم قطر سوراخ‌ها ۱۰ میلی‌متر و تعداد آنها ۱۶۰ عدد می‌باشد. می‌توان با انجام آزمایش‌های بیشتر تعداد و قطر بهینه سوراخ‌های صفحه‌های سوراخدار را بدست آورد. لازم به ذکر است که کاهش تراز شدت صوت در فاصله ۱/۳ متری از رگلاتور به دلیل قرارگیری فلنچ در این نقطه بوده که مانع انتشار نویز درون لوله به بیرون شده و دارای علت جریانی نمی‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد اگر صفحه اولیه که درست پس از رگولاتور نصب شده وجود نداشته باشد این خفه‌کن صوت را تشدید می‌کند.



شکل ۸- نتایج تراز شدت صوت خفه‌کن‌های با دو و سه صفحه سوراخدار با فاصله مختلف صفحه‌ها

۵-۳- خفه‌کن‌های ترکیبی لوله‌های هم مرکز سوراخدار با صفحه سوراخدار

با توجه به اینکه هریک از انواع خفه‌کن‌های لوله‌های هم مرکز سوراخدار CPS-Pn و CPS_A-Pn و صفحه سوراخدار PPS نوفه جریانی را کم کاهش می‌دهند از ترکیب آنها استفاده شده است. در این ترکیب ابتدا یک صفحه سوراخدار سپس لوله‌های هم مرکز سوراخدار و بعد از آن دو صفحه سوراخدار قرار می‌گیرد. عملکرد خفه‌کن ترکیبی در شکل (۹) با خفه‌کن با صفحه سوراخدار مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود خفه‌کن ترکیبی حدود ۶ دسی‌بل نسبت به خفه‌کن با صفحه سوراخدار تراز شدت صوت را بیشتر کاهش داده است. بنابراین ترکیب خفه‌کن‌های حلقوی و صفحه‌ای روش موثری در کاهش نوفه می‌باشد.



شکل ۹- مقایسه نتایج تراز شدت صوت خفه‌کن ترکیبی با خفه‌کن با صفحه سوراخدار

۶- نتیجه‌گیری

مهمترین نتایجی که از این پژوهش بدست آمده به شرح زیر می‌باشد:

- در خفه‌کن‌های لوله‌های سوراخدار هم مرکز CPS-Pn یک لوله اثری بر کاهش نوفه ندارد اما دو لوله هم مرکز نوفه را بهتر کنترل می‌کند. افزایش تعداد لوله‌های سوراخدار به بیش از دو لوله اثر قابل توجهی بر کاهش نوفه ندارد.
- در خفه‌کن‌های لوله‌های سوراخدار هم مرکز سه لوله‌ای نمونه با قطرهای ۱۵، ۳۵ و ۵۰ میلیمتر نسبت به نمونه با قطر لوله‌های ۴۰، ۵۵ و ۷۰ میلیمتر بهتر صدا را کاهش می‌دهد.
- قطر سوراخ‌های لوله‌های هم مرکز سوراخدار بر میزان کاهش نوفه اثر می‌گذارد. خفه‌کن با قطر سوراخ ۵ میلیمتر عملکرد بهتری از خفه‌کن با قطر سوراخ ۳ میلیمتر دارد.
- در خفه‌کن‌های لوله‌های سوراخدار هم مرکز سه لوله‌ای خفه‌کن‌های با پوشش ماده جاذب صدا حدود ۵ دسی‌بل نسبت به نمونه‌های بدون پوشش تراز شدت صوت را کاهش داده است.
- در خفه‌کن با صفحه‌های سوراخدار با دو و سه صفحه سوراخدار موقعیت صفحه‌ها نسبت به یکدیگر بر کاهش نوفه جریانی تاثیر می‌گذارد.
- ترکیب خفه‌کن‌های حلقوی (لوله‌های هم مرکز سوراخدار) با پوشش عایق صوتی و صفحه‌ای (صفحه سوراخدار) روش موثری در کاهش نوفه می‌باشد.

سپاسگزاری

از شرکت گاز خراسان رضوی به ویژه واحد پژوهش آن که حمایت مالی این پژوهش را به عهده داشته و به همراه ناحیه ۴ شرکت گاز مشهد که شرایط انجام آزمایشها را فراهم کرده است قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Lighthill, M.J., "On Sound Generated Arodynamically: 1. General Theory", Proc. Roy. Soc., Vol. 211, No. 1107, pp 564-587, (1952).
- [2] Mukker, E. A. (Editor), "*Mechanics of Sound Generation in Flow*", Sound Generation by Flow-acoustic Coupling (Ramakrishnan & Davies)", Springer-Verlag, pp. 62-68, (1979).
- [3] Arina, R. et al, "Numerical and Experimental Analysis of Sound Generated by an Orifice", 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (28th AIAA Aeroacoustics Conference), Roma (Italy), 21-23 May, (2007).
- [4] Mongeau, Z. Z. L., and Frankel, S. H., " Broadband Sound Generation by Confined Turbulent Jets", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 112, No. 2, pp. 677-689, (2002).
- [5] Moore, P., Slot, H., and Boersma, B. J., "Simulation and Measurement of Flow Generated", Journal of Computational Physics, Vol. 224, Issue. 1, pp. 449-463, (2007).
- [6] Davies, P. O. A. L. "Flow-acoustic Coupling in Ducts", Journal of Sound and Vibration, Vol. 77, No. 2, pp. 191-209, (1981).
- [7] United States Patent, "Eccentrically Nested Tube Gas Line Silencer", Vol. 4, pp. 402,485, September 6, (1983).
- [۸] فائزبان، ع.، مدرس رضوی، م. ر. و انوراتی، آ.، " بررسی عوامل موثر بر عملکرد خفه‌کن‌ها در موتورهای احتراق داخلی"، نشریه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک انجمن مهندسان مکانیک ایران، سال ششم- شماره اول- شماره پیاپی ۷، (۱۳۸۳).
- [9] Hassall, J. R., and Zaveri, K., "*Acoustic Noise Measurements*", Bruel & Kjaer, Printed in Denmark: K. Larsen & Son A/S, (1988).
- [10] Michael Vorländer, "*Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*", First edition, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, (2008).
- [11] Crocker, M. J., (Edited), "*Handbook of Noise and Vibration Control*", John Wiley & Sons, Inc, New York, (2007).
- [12] Wagner, C., Hu" TTL, T., and Sagaut, P., "*Large Eddy Simulation for Acoustic*", Cambridge University Press, London, (2007).
- [13] ISA Standard Laboratory, "Measurement of Aerodynamic Noise Generated by Control Valves", ISA-S75.07-1997, Approved August 31, (1997).
- [14] Bies, D. A., and Hansen, C. H., "Engineering Noise Control Theory and Practice Spon Press", Fourth edition, (2009).

[15] Baumann, H. D., et al, "Valves: Noise Calculation, Prediction, and Reduction", Chapter n. 6-14 in, "*Instrument Enginners' Handbook*", Process Control and Optimization, Vol. II, by B. G. Liptak, Fourth Ed., Taylor & Francis Group, (2006).

فهرست نمادهای انگلیسی

C : سرعت صوت بر حسب متر بر ثانیه
 CPS-Pn : نشانه‌ی اختصاری خفه کن لوله‌های هم مرکز سوراخدار^۱ که n معرف تعداد لوله‌ی سوراخدار است
 CPS_A-Pn : نشانه‌ی اختصاری خفه کن لوله‌های سوراخدار با پوشش ماده جاذب صدا
 I : شدت صوت^۲ بر حسب وات بر متر مربع
 I : اندازه‌ی بزرگ‌ترین گردابه‌ها یا پهنا‌ی جریان بر حسب متر
 L_{Aeq} : تراز فشار موثر وزنی بر حسب دسی‌بل
 L_p : تراز فشار صوت^۳ بر حسب دسی‌بل
 m : شدت جریان جرمی بر حسب کیلو گرم بر ثانیه
 PPS : نشانه‌ی اختصاری خفه کن صفحه سوراخدار^۴
 P_{rms} : میانگین مربع فشار سیگنال بر حسب پاسکال
 P_{ref} : فشار آستانه شنوایی بر حسب پاسکال
 Q_0, Q_2 و Q_4 : به ترتیب توان تابش صوت از منبع تک‌قطبی، دوقطبی و چهارقطبی بر حسب وات
 T : دوره‌ی تکرار بر حسب ثانیه
 t : زمان بر حسب ثانیه
 u یا v : سرعت جریان بر حسب متر بر ثانیه

نمادهای یونانی

ε : نرخ اتلاف انرژی اغتشاشی بر حسب وات
 ρ : چگالی بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب

¹ Concentric Perforate Silencer (CPS)

² Sound intensity

³ Sound Pressure Level (SPL)

⁴ Perforated Plated Silencer (PPS)

Abstract

The main source of flow noise in the gas pressure regulation station is the regulator. In this research we use the reactive silencer to reduce the flow noise. The silencer is made in several configurations. This tool is tested in the downstream pipe of regulator. The concentric perforated pipe (CPPS) and the perforated plate (PPS) are two types of silencer which are used here. In this experimental study the effects of the pipes and holes diameter and the absorptive material cover are investigated. The two acoustical parameters, sound pressure and intensity levels, are measured here. Results show that the complex silencer is more effective than simple one in the way of reducing noise. The complex silencer is the combination of CPPS and PPS silencers.