

Experimental study of the effect of Hartmann-Sprenger resonance tube end flow on tube heating performance

M. Younesi¹H. Ghassemi^{2*}

Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

(Received: 2024/07/22, Revised: 2024/09/24, Accepted: 2024/11/05, Published: 2024/12/01)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1403.13.2.1.9>

ABSTRACT

In the Hartmann-Sprenger tube, consisting of a converging nozzle and a closed-end tube, by establishing the under-expanded flow through the converging nozzle and entering it in the tube, during a fluid process, significant heating is created and the gas temperature at the end of the tube strongly goes up. In the current research, the effect of leakage at the end of the tube on its heating performance was investigated by constructing an experimental test set and selecting specific parameters. The effect of three independent parameters in this tube, including the gas pressure upstream of the nozzle, the distance between the nozzle and the tube, and the diameter of the hole at the end of the tube have been studied. For a specific value of the tube diameter, two intervals of 3 and 5 times for the nozzle diameter, three pressure values of 5, 6, and 8 bar, and seven different values for the hole diameter were selected as the range of independent variables. The results show that a hole at the end of the tube will reduce the maximum temperature that can be achieved. In addition, as the pressure increases, the temperature will increase in the case of resonance conditions. It has also been shown that a hole at the end of the tube does not affect the characteristics of the diffused sound. This phenomenon can use in natural gas pressure reduction stations.

Keywords: Resonance Tube, Hartmann-Sprenger, Gas Dynamic Heating, Natural Gas Transmission, Gas Pressure Reduction Station

بررسی تجربی اثر جریان انتهایی لوله تشدید هارتمن-اسپرنگر بر عملکرد گرمایشی لوله

حجت قاسمی^{۲*}محمد یونسی^۱

دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۱، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۵، انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱)

چکیده

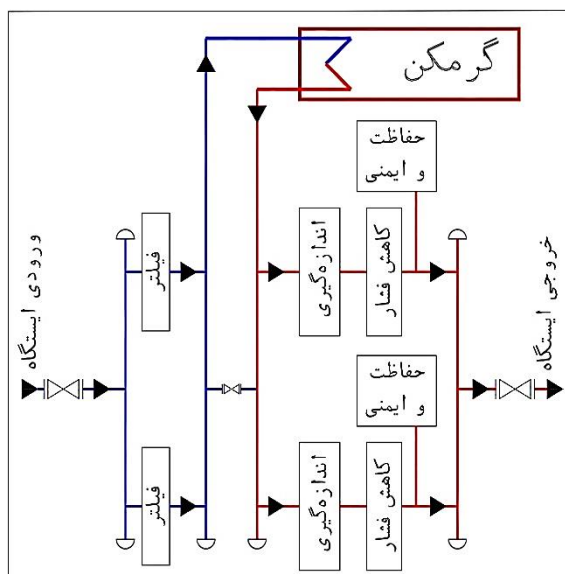
در لوله هارتمن - اسپرنگر، متشکل از یک نازل همگرا و یک لوله با انتهایی بسته، با برقراری جریان فرومنبسط توسط نازل همگرا و ورود آن در لوله، طی یک فرآیند سیالاتی، گرمایش قابل توجهی ایجاد شده و دمای گاز در بخش انتهایی لوله به شدت بالا می‌رود. در پژوهش حاضر، با ساخت یک مجموعه آزمون تجربی و با انتخاب پارامترهای مشخص، تأثیر وجود نشتی در انتهایی لوله بر عملکرد گرمایشی آن بررسی شد. اثر سه پارامتر مستقل در این لوله، شامل فشار گاز در بالادست نازل، فاصله بین نازل و لوله، و قطر سوراخ انتهایی لوله، مطالعه شده است. برای یک مقدار مشخص قطر لوله، دو فاصله ۳ و ۵ برابری قطر نازل، سه مقدار فشار ۵، ۶ و ۸ bar و هفت مقدار مختلف برای قطر سوراخ انتهایی لوله، به عنوان دامنه متغیرهای مستقل انتخاب شدند. نتایج نشان می‌دهند که وجود سوراخ در بخش انتهایی لوله، موجب کاهش دمای بیشینه قابل حصول خواهد شد. علاوه بر این، با افزایش فشار، در حالتی که شرایط تشدید روی دهد، دما افزایش خواهد یافت. همچنین نشان داده شده که وجود سوراخ در انتهایی لوله بر مشخصات صوت منتشره، تأثیری نداشته است. از این پدیده می‌توان در ایستگاه‌های کاهش فشار گاز طبیعی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: لوله تشدید، هارتمن - اسپرنگر، گرمایش دینامیک گازی، انتقال گاز طبیعی، ایستگاه تقلیل فشار گاز

۱- دانشجوی دکتری (نویسنده پاسخگو): younesi_m@cmps2.iust.ac.ir

۲- دانشیار: h_ghassemi@iust.ac.ir

می‌شود تا طبق شرایط استاندارد، دمای گاز را در حدود $^{\circ}\text{C}$ ۱۵ [1] نگه دارد. طرح‌واره تجهیزات یک ایستگاه تقلیل فشار گاز طبیعی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): طرح‌واره ایستگاه تقلیل فشار گاز طبیعی

در یک ایستگاه تقلیل فشار منطقه‌ای با استفاده از یک منبع انرژی خارجی، اغلب با سوزاندن بخشی از گاز طبیعی منتقل شده، گرمایش گاز انجام می‌شود. طبق اطلاعات آماری موجود حدود $0/3$ درصد از مقدار گاز منتقل شده سوزانده می‌شود و $99/7$ درصد از گاز، به دست مصرف‌کننده می‌رسد، [۱]. بنابراین برای انتقال گاز دو گونه انرژی مصرف می‌شود: انرژی مصرف شده در واحدهای افزایش فشار اولیه و واحدهای بین مسیر، جهت بالابردن فشار و سهولت در برقراری جریان که اجتناب ناپذیر است [۲] و همچنین انرژی مصرف شده در واحدهای تقلیل فشار برای بازگرداندن دمای گاز به شرایط نرمال که در این مقاله برای کاهش این انرژی مصرفی، پیشنهادی ارائه شده است. لذا بیان می‌شود که به جای گرمایش ناحیه‌ای و استفاده از گرم‌کن‌های گاز در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز، می‌توان از گرمایش خود جریان گاز با روش گرمایش دینامیک گازی، استفاده نمود.

در این مقاله مروری بر ادبیات موضوع شده و در ادامه به عوامل محدودکننده گرمایش لوله، اشاره می‌گردد که یک عامل مهم، وجود سوراخ در انتهای لوله و نشت سیال از انتهای لوله می‌باشد. در اینجا سؤالاتی مطرح می‌شود که آیا سیال خارج شده از انتهای لوله در دمایی بالاتر از دمای سکون جریان سیال ورودی به دستگاه قرار دارد یا خیر و در صورت مثبت بودن پاسخ، آیا از سیال نشت‌یافته دما بالا

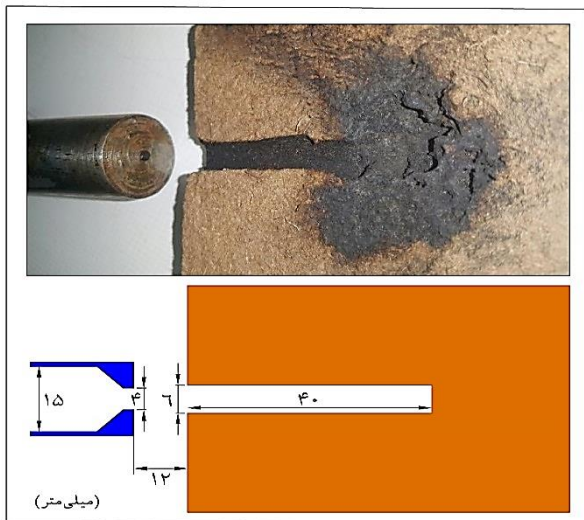
فهرست علائم و اختصارات

d0	قطر دهانه ورودی نازل (mm)
de	قطر سوراخ خروجی نازل (mm)
dn	قطر دهانه خروجی نازل (mm)
D	قطر دهانه لوله تشدید (mm)
L	طول لوله تشدید (mm)
P0	فشار ورودی به نازل (bar)
P	فشار انتهای لوله (bar)
S	فاصله نازل و لوله (mm)
T0	دمای گاز ورودی به نازل (K)
T	دمای نقطه داخلی و انتهای لوله (K)
علائم یونانی	
α	زاویه همگرایی نازل (درجه)

۱- مقدمه

به منظور انتقال سریع و مطمئن گاز طبیعی از محل استخراج تا نقاط مصرف خانگی و صنعتی، فشار آن افزایش داده می‌شود چرا که به دلیل افزایش تلفات هیدرولیکی و کاهش جرم محصول پمپ شده، انتقال گاز طبیعی در فشار کم، غیرعملی است. بنابراین پس از انجام عملیات انتقال و قبل از تحویل گاز طبیعی به مصرف‌کننده‌ها، متناسب با نوع مصرف، باید فشار آن کاهش پیدا کند. فشار گاز طبیعی مصرفی بر اساس مشخصات مصرف‌کننده‌ها، دارای مقادیر متفاوت و متنوع ($0/25$ ، 2 ، 5 ، 15 ، 30 ، 60 ، 250 ، 1000 Psi) می‌باشد. در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز، فرآیند تنظیم میزان فشار و دبی گاز مصرفی انجام می‌شود و معمولاً عملیات تصفیه و پالایش گاز از ناخالصی‌ها و همچنین اندازه‌گیری، در آن‌ها انجام می‌گردد. پارامترهای فشار و دمای گاز ورودی، فشار و دمای گاز خروجی، فشار طراحی و تست، حداکثر سرعت مجاز و مقدار جریان حجمی گاز، اهمیت زیادی در طراحی ایستگاه تقلیل فشار گاز دارند. در فرآیند تقلیل فشار، به دلیل وجود اثر ژول-تامسون، دمای گاز نیز کاهش می‌یابد. هنگامی که دمای گاز به نقطه شبنم نزدیک شود، بخار میعان‌ات همراه گاز (آب و هیدروکربن‌های سنگین‌تر شامل اتان، پروپان و ...) تبدیل به مایع شده که می‌تواند در اتصالات خط لوله، یخ‌زدگی ایجاد نموده و همچنین منجر به رسوب هیدرات‌های گاز در تاسیسات داخل ایستگاه و بعد از آن شود. به منظور حفظ دمای گاز طبیعی در دمای بالاتر از نقطه شبنم و جلوگیری از بروز این پدیده‌های منفی، از گرم‌کن‌های گاز استفاده

بالادست گاز، شکل هندسی لوله، و جنس گاز اشاره داشت. تامیسون [۵]، با انجام یکی از مهم‌ترین و کامل‌ترین مطالعات تجربی بر روی دمای ایجاد شده در لوله، تاثیر پارامترهای هندسی را گزارش کرد. فیلیپس و پاولی [۶]، تاثیر تغییر مشخصات و پارامترهای مختلف هندسه بر عملکرد گرمایشی لوله را مورد مطالعه قرار داده و بیان کردند که مهمترین مکانیزم، تبادل جرم بین گاز جت (گاز سرد) و گاز درون لوله (گاز داغ) است. این تبادل جرم از طریق ضخامت لایه مرزی در جبهه تماس جدا کننده دو گاز صورت می‌گیرد. دیواره لوله در معرض گازهای گرم و سرد قرار دارد و همانند یک مبدل حرارتی، انتقال حرارت با همرفت اجباری در لوله اتفاق می‌افتد. این دما برای گازهای تک اتمی به طور قابل توجهی بالاتر از گازهای دو اتمی است. کاپتسوو و همکارانش [7]، نشان دادند که در اعداد ماخ $3/2$ تا ۴، با توجه به فاصله‌ی بین نازل و دهانه لوله، می‌توان نوساناتی با فرکانس‌های بالا و پایین ایجاد نمود و بالاترین دمای ایجاد شده در اثر نوسانات می‌تواند به 1600K برسد.



شکل (۲): اثر گرمایشی هارتمن-اسپرنگر بر حفره داخل چوب دستگاه لوله تشدید هارتمن-اسپرنگر که به صورت ساده از یک لوله ته بسته و یک نازل همگرا تشکیل می‌گردد، بدون استفاده از تجهیزات متحرک مکانیکی و الکتریکی، و صرفاً بر اساس دینامیک گاز مساله، می‌تواند منجر به افزایش دما در لوله و سیال (گاز طبیعی) داخل آن شود. [۸]. اجزاء این دستگاه در شکل (۳) نشان داده شده است. ساروهیا و بک [۹]، با توجه به مشخصات هندسی لوله، فاصله‌ی بین نازل و دهانه لوله و نیز عدد ماخ جریان جت

می‌توان برای گرمایش جریان سیال اصلی استفاده کرد یا خیر؟ آیا این مطالعه منجر به ارائه طرح پیشنهادی برای گرم کردن جریان خطوط انتقال گاز طبیعی، از سازوکار نشت گاز از لوله تشدید خواهد شد؟

۲- تشریح فیزیک مسئله

این بخش به منظور معرفی ادبیات لازم برای بحث، ضروری به نظر می‌رسد. در این قسمت، در ابتدا به معرفی لوله تشدید هارتمن - اسپرنگر پرداخته شده است. در ادامه، فرایندها و عملکرد لوله بر اساس شکل‌گیری و حرکت امواج تراکمی متحرک و انبساطی بررسی شده، سپس اثر خروج گاز داغ از انتهای لوله مورد بحث قرار گرفته است.

۲-۱- معرفی لوله تشدید هارتمن-اسپرنگر

در سال ۱۹۲۲ هارتمن [۳] و در ادامه در سال ۱۹۵۴ اسپرنگر [۴] نشان دادند که چنانچه در مقابل یک جریان فرومنبسط گاز، لوله ته بسته‌ای را قرار دهند، صوتی قوی در محیط منتشر می‌شود که با افزایش دمای شدید در انتهای لوله همراه است. به بیان ساده، همراه با جریان گاز، یک موج تراکمی به سمت انتهای بسته لوله به راه می‌افتد که با عبور خود، دمای گاز را افزایش می‌دهد. انعکاس این موج تراکمی از انتهای بسته لوله، موجب افزایش بیشتر دما می‌شود. خروج این موج از لوله همراه با انتشار یک موج انبساطی به درون لوله است که رفت و برگشت آن موجب کاهش اندک دما خواهد شد. تکرار این اتفاق ماهیت نوسانی به دما، فشار، و دیگر خواص گاز درون لوله می‌دهد. این نوسانات منجر به تولید صوت قوی می‌شود. فرکانس این امواج منطبق بر فرکانس طبیعی لوله نیست. اسپرنگر [۴] نشان داد که انتشار نوسانات به وجود آمده درون لوله و انعکاس پی‌درپی امواج ضربه‌ای از انتهای بسته‌ی لوله به دلیل وجود اتلافات بازگشت‌ناپذیر، می‌تواند منجر به تولید اثرات حرارتی و افزایش دمای متمرکز در انتهای دیواره لوله‌ی تشدید شود. او با قرار دادن حفره داخل یک قطعه چوب در مقابل جریان جت فرومنبسط خروجی از نازل همگرا، نشان داد که اثر گرمایشی هارتمن منجر به سوختن چوب می‌شود. نمونه‌ای از نتیجه چنین آزمایشی که توسط نویسندگان انجام شده، در شکل (۲) ارائه شده است.

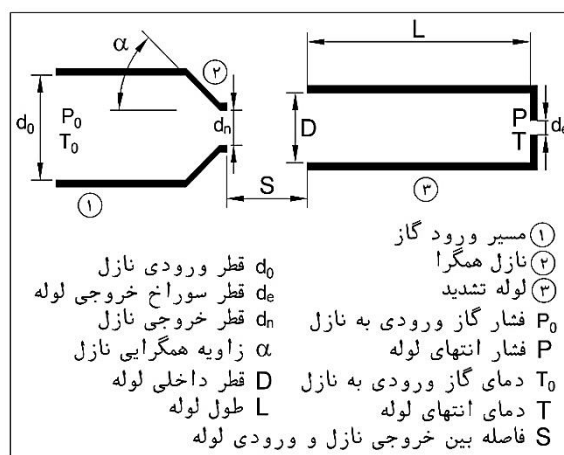
در رخداد این پدیده، عوامل متعددی دخالت دارند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به پیکربندی مجموعه، فشار

شبهه‌سازی نشان دادند سرعت جریان محوری در عرض جبهه موج تراکمی کاهش می‌یابد تا انرژی جنبشی جریان به انرژی گرمایی تبدیل شود. افضلی و کریمی [۱۳]، نشان دادند که وجود یک سوراخ کوچک روی دیواره‌ی انتهایی لوله، همانند لوله با طول کوتاه‌تر، درجه حرارت داخل لوله را کاهش می‌دهد. شبهه‌سازی‌های انجام شده توسط بایوئر [۱۴] مبادله جرم قابل توجهی را از طریق سوراخ بدنه رزوناتور نشان می‌دهد، که به نوبه خود باعث افزایش شار گرمای همرفتی از تشدید کننده به خارج از دیواره می‌شود. دستگاه لوله هارتمن-اسپرنگر می‌تواند به عنوان منبع تولید حرارت، منبع تولید صوت، منبع تولید جریان پالسی، آتش‌زنه موتورهای راکت، عملگرهای فرکانس بالا و کنترل‌کننده‌های فعال جریان، استفاده شود. بوچ و کاتلر [۱۵]، به کارگیری لوله تشدید هارتمن-اسپرنگر را به منظور پیش گرم کردن گازهای تزریقی به اسکرم‌جت مورد مطالعه قرار دادند. چپاچف و دیمتریوا [۱۶] به مقایسه روش‌های گرم کردن جریان گاز پرداخته و به صورت عددی نشان دادند که لوله هارتمن-اسپرنگر قابلیت استفاده در این زمینه را دارد. آن‌ها از جریان گرم خروجی از دهانه باز لوله، برای افزایش گرمای جریان گاز کمک گرفتند. بلوسوف و همکاران [۱۷] با در نظر گرفتن طرح دو لوله تشدید همراه با دو عدد نازل به صورت عددی اثر گرمایشی ایجاد شده را برای افزایش دمای گاز عبوری مورد بررسی قرار دادند.

۲-۲- بررسی فرآیندها و عملکرد لوله

گرمایش ایجاد شده در لوله، نتیجه‌ی یک فرآیند سیالاتی است که طی آن انرژی جنبشی جریان جت گاز خروجی از نازل همگرا بدون کمک یا دخالت هیچ دستگاه مکانیکی متحرک، به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود. شاپیرو [۱۸] و [۱۹] و پژوهشگران دیگر [۲۰] و [۲۱] بیان می‌کنند که گرم شدن لوله به دلیل اتلاف بخشی از انرژی مکانیکی جت از طریق برگشت‌ناپذیری امواج ضربه‌ای موجود در جریان و تبدیل آن به انرژی گرمایی و انباشت متناوب این انرژی در یک جرم محبوس از گاز می‌باشد. برگشت‌ناپذیری‌های مربوط به تشکیل شوک‌های پی‌درپی داخل جریان که به صورت دوره‌ای تکرار می‌شوند و اصطکاک بین لوله و جریان، دو سازوکار اتلاف انرژی مکانیکی و عامل افزایش دمای لوله هستند. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده

سه مد جریان با عنوان ناپایداری جت، بازگشت جت و جت سوت‌کشنده را معرفی کردند. مد ناپایداری جت تنها در جت‌های فروصوت اتفاق می‌افتد، زمانی که نسبت فشار نازل کمتر از ۱/۹ می‌باشد. در این حالت امواج تراکمی که درون لوله تشکیل می‌شوند به اندازه‌ای ضعیف هستند که توان لازم جهت افزایش دمای گاز را نخواهند داشت. مد بازگشت جت در حضور جت فرومنسبسط اتفاق می‌افتد، جریان جت در دهانه لوله به همراه یک شوک تراکمی به حرکت نوسانی می‌پردازد که در طی آن بخشی از جت گازی به‌طور متناوب در دهانه لوله‌ی تشدید وارد شده و از آن خارج می‌شود. مد جت سوت‌کشنده به دلیل بروز پدیده‌ی تشدید بین یک موج ضربه‌ای منحنی‌شکل (مستقر در دهانه‌ی لوله) و شبکه‌ای از سلول‌های موج ضربه‌ای در جریان جت خروجی از نازل است. در این مد، نوسان موج ضربه‌ای در مقابل ورودی لوله منجر به حرکت امواج ضربه‌ای جدا از هم و قوی در طول لوله خواهد شد. تداخل امواج ضربه‌ی متحرک در طول لوله، بر گاز حبس شده درون لوله اثر گذاشته و منجر به گرم شدن شدید گاز درون لوله می‌شود.



شکل (۳): اجزاء دستگاه لوله تشدید هارتمن-اسپرنگر

پارسا و همکاران [۱۰]، اثر پارامترهای فیزیکی لوله مخروطی را بر جریان داخلی و عملکرد حرارتی بررسی کردند. آن‌ها در مطالعه خود تاثیر شرایط دیوار انتهایی لوله را به صورت کاملاً بسته و یا همراه با یک سوراخ ریز برای استخراج گاز داغ گزارش دادند. وجود سوراخ در انتهای لوله منجر به کاهش ماکزیمم دمای قابل دستیابی خواهد شد. تتی و همکاران [۱۱]، لوله تشدید را در مد جریان بازگشت جت مطالعه کرده و موقعیت و سرعت شوک را به عنوان توابع زمان و مکان، با استفاده از روش تصویربرداری بسیار سریع شلیرن، اندازه‌گیری کردند. لی و همکاران [۱۲]، با

اطراف لوله به محیط منتقل می‌گردد. ویلسون و رسلر [۲۳] نشان دادند که طول لوله که محل تشکیل امواج ضربه‌ای است، نقش مهمی در افزایش دمای گاز دارد و اگر قطار موج‌های تراکمی، فرصت لازم برای ایجاد شوک در داخل لوله نداشته باشند، افزایش دما محدود می‌گردد. شاپیرو [۱۹] مساله‌ی ایجاد شوک در گاز حاوی گرادیان دما را مطرح کرد. بروچر [۲۴] تبادل جرم نسبتاً زیاد بین گاز جت و گاز در حال نوسان در لوله را عامل محدودیت افزایش گرما اعلام نموده و بیان کرد که تبادل جرم حتی می‌تواند مکانیزم مهمی برای حذف گرما باشد. همچنین می‌توان انتظار داشت که عملکرد دستگاه نسبت به ترکیب و نوع گاز ورودی به نازل متفاوت باشد. در شرایط یکسان، فرکانس نوسانات لوله با گاز هیدروژن، حداقل سه تا چهار برابر بزرگتر از گاز نیتروژن است. علت این مساله، اثر تغییرات وزن مولکولی بر سرعت صوت است. اگر انرژی ورودی در واحد جرم در هر چرخه برای دو گاز مساوی باشد، مقدار آن برای سیستم هیدروژن سه تا چهار برابر بیشتر است، [۲۵] و [۲۶].

۳-۲- مطالعه اثر خروج گاز داغ از انتهای لوله

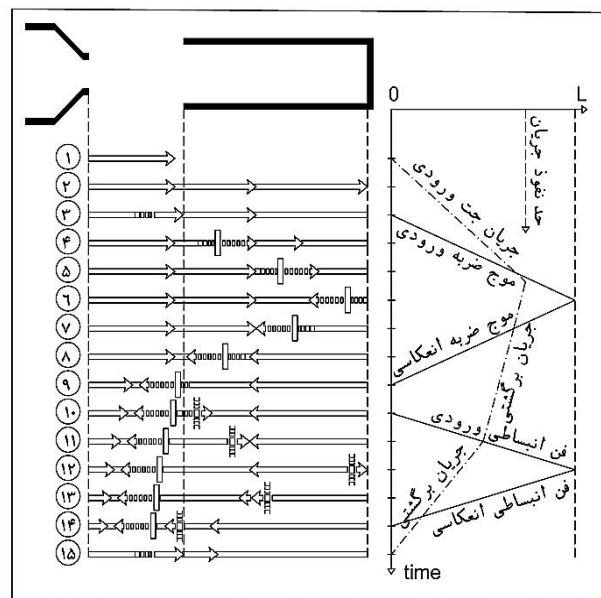
در بخش قبل مطرح شد که یکی از عوامل کاهش دمای لوله وجود نشتی گاز از بخش انتهایی لوله می‌باشد. همچنین همواره مقداری از گاز محبوس در انتهای لوله با دمای بالا با مقداری از گاز جت خروجی از نازل با دمای پایین جایگزین می‌گردد. این جایگزینی منجر به محدودیت افزایش دمای لوله خواهد شد. طبق بررسی‌های تجربی، مشاهده شد که گاز خروجی از دهانه لوله داغ است و تعدادی از محققین نیز در پژوهش‌های خود، به موضوع گاز داغ آزاد شده از ناحیه گرمایش اشاره کرده‌اند، [۲۷] و [۲۸]. به همین منظور یک مجموعه آزمون تجربی، تعریف و انجام گردید تا شرایط دمایی گاز خروجی از سوراخ انتهایی لوله، مطالعه و بررسی شود.

۳- تجهیزات و روش آزمون

مجموعه‌ی آزمون تجربی که برای بررسی شرایط گاز نشت‌یافته از انتهای لوله استفاده شد، شامل این اجزاء و قسمت‌ها می‌باشد: مخزن هوای فشرده به همراه تنظیم‌کننده فشار در دمای محیط (28°C)، شیر قطع و وصل جریان، یک

شده است به طور خلاصه می‌توان فرآیند یک سیکل لوله تشدید را به شرح زیر تقسیم‌بندی و بیان کرد:

- ۱- خروج جریان جت فرومنبسط از نازل
- ۲- پر شدن لوله با جریان جت
- ۳- ورود امواج تراکمی به داخل لوله
- ۴- تبدیل شدن امواج تراکمی به موج ضربه
- ۵- عبور موج ضربه از روی جریان سیال داخل لوله
- ۶- رسیدن امواج تراکمی و موج ضربه به انتهای لوله و انعکاس آن
- ۷- عبور موج ضربه انعکاسی از روی جریان سیال داخل لوله
- ۸- تغییر جهت حرکت سیال داخل لوله به سمت دهانه لوله
- ۹- خروج موج ضربه انعکاسی از لوله و عقب راندن جریان جت خروجی از دهانه نازل
- ۱۰- ورود فن‌های انبساطی به داخل لوله
- ۱۱- عبور فن انبساطی از روی جریان خروجی از لوله
- ۱۲- رسیدن فن‌های انبساطی به انتهای لوله و انعکاس آن‌ها
- ۱۳- بازگشت فن‌های انبساطی انعکاسی از انتهای لوله و عبور از روی جریان خروجی از لوله
- ۱۴- خروج فن‌های انبساطی از لوله همراه با جریان سیال
- ۱۵- ورود مجدد امواج تراکمی به داخل لوله و تکرار سیکل



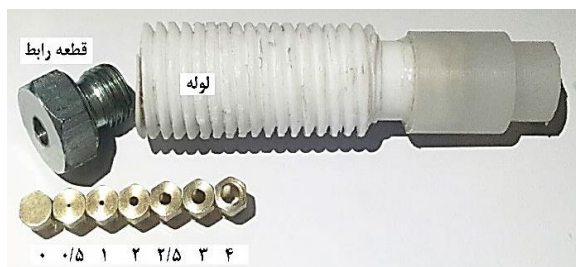
شکل (۴): فرآیند سیکل تشدید لوله هارتمن-اسپرنگر

از پرسش‌های مهم در مورد عملکرد لوله این است که چه سازوکارهایی افزایش دما را محدود می‌کنند. طبق نظر برخی نویسندگان [۲۲]، بخشی از گرمای ایجاد شده در سیال داخل لوله، توسط جابجایی اجباری به دیواره‌های لوله منتقل و سپس این گرما توسط تابش و جابجایی آزاد در



شکل (۶): تصویر مجموعه آزمون تجربی

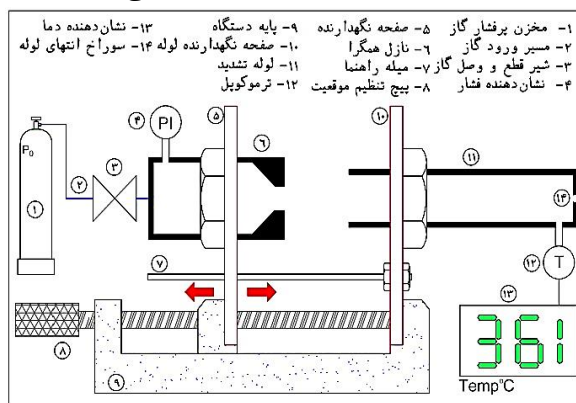
در انتهای لوله قسمتی ایجاد شد تا بتوان سوراخی با قطر صفر (مسدود)، ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ mm در نظر گرفت. قطعه‌ی حاوی سوراخ انتهایی لوله در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل (۷): لوله، قطعه رابط و قطعات دارای سوراخ انتهایی

لوله با قطر مشخص (واحد بر حسب mm) پس از تنظیم فاصله S و فشار بالادست P0، دمای انتهایی لوله خوانده شده است. سپس با نصب صفحات انتهایی با سوراخ با قطرهای مختلف، آزمایش‌ها تکرار شد و دما در هر مورد ثبت شد. برای عبور از شرایط گذرا ترموکوپل و اطمینان از حالت پایدار، جمع‌آوری داده‌ها در هر آزمون پس از ۱۲۰ ثانیه از باز شدن ورودی هوا انجام شد. پس از تکمیل اندازه‌گیری‌ها در هر آزمون، تکرارپذیری آزمون بررسی شده است. همان‌طور که از ماهیت عملکردی لوله انتظار می‌رود، تنها در برخی موارد دما به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، در حالی که در موارد دیگر، عملکرد گرمایش لوله قابل توجه نخواهد بود. به عبارت دیگر در زوج خاصی از S و P0 گرمایش قابل قبولی وجود دارد و تنها در این موارد تاثیر وجود سوراخ در انتهای لوله بررسی شده است. ثبت فشار در انتهای لوله در یک تلاش جداگانه انجام شد. فشار نوسانی در منطقه آسیب‌زا است. بنابراین دقت ویژه‌ای برای خواندن و ثبت فشار به کار گرفته شده است. برای این منظور ترموکوپل با فشارسنج جایگزین و فشار استاتیک انتهایی لوله در هر زوج فاصله و فشار ثبت شد. از یک مبدل فشار برای ثبت فشار استفاده شده است. این مبدل با نام تجاری Sensys و مدل PTCHC001BCIA

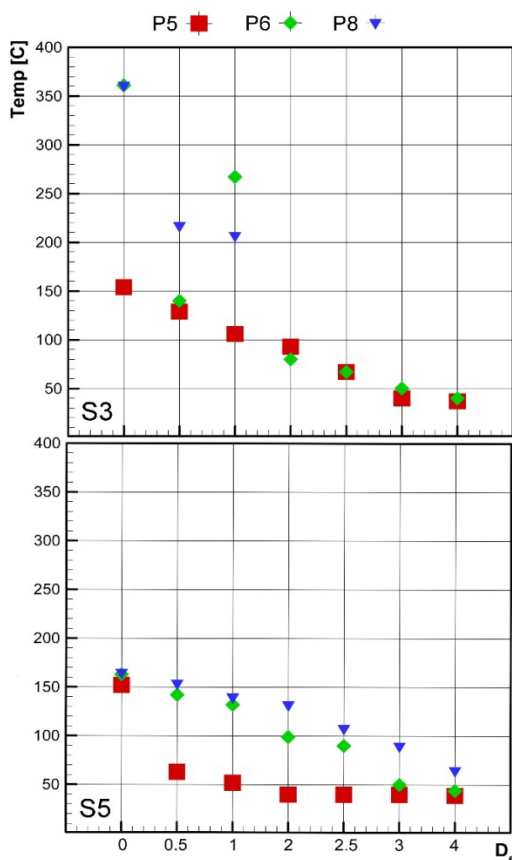
نازل همگرا، لوله تشدید با حفره استوانه‌ای و بستری که لوله آزمایش و نازل روی آن نصب می‌شوند و طرح‌واره آن، در شکل (۵) نشان داده شده است. پارامترهای اصلی در این مطالعه، فاصله بین دهانه خروجی نازل و دهانه ورودی لوله تشدید (S) و فشار بالادست نازل (P0) است و سایر پارامترهای هندسی و موادی ثابت نگه‌داشته شدند. جنس لوله تشدید برای تامین شرایط بی‌دررو، تفلون نسوز است. نازل همگرا از جنس فولاد و با زاویه همگرایی ۴۵° به کار گرفته شد. قطر ورودی نازل (d0)، ۱۵mm و قطر خروجی (dn) آن ۵mm است. لوله تشدید با مقطع داخلی استوانه و طول ۸۰mm (16*dn) و قطر داخلی ۱۰mm (2*dn) استفاده و بر روی صفحه نگهدارنده لوله تشدید، نصب گردید. فاصله (S) بین دهانه خروجی نازل و ورودی لوله با استفاده از سازوکار پیچ پایه دستگاه، بر اساس مضاربی از قطر دهانه خروجی نازل در بخش اول آزمون به میزان سه برابر قطر خروجی نازل، ۱۵mm (S3=3dn) و در بخش دوم آزمون به مقدار پنج برابر قطر خروجی نازل، ۲۵mm (S5=5dn)، تنظیم شد. یک فشارسنج در بالادست نازل، برای خوانش فشار ورودی به نازل نصب شده است. یک ترموکوپل نیز در انتهای لوله آزمایش نصب شده تا تغییرات دما در انتهای لوله، ثبت شود. ترموکوپل به کار برده شده از نوع k بوده که به نمایشگر دما متصل می‌شود. مسیر هوای ورودی به نازل با استفاده از شیر قطع و وصل باز شده و فشار مورد نظر در ورودی نازل تنظیم می‌گردد. شکل (۶) عکسی از مجموعه آزمایش را به همراه مجموعه سخت‌افزاری نمایش دما، نشان می‌دهد.



شکل (۵): طرح‌واره مجموعه آزمون تجربی

۴-۱- دمای انتهای لوله

مقدار دمای انتهای لوله که در هر آزمون توسط ترموکوپل قرائت گردید در شکل (۹۹) نشان داده شده است. ماکزیمم دما در لوله با انتهای بسته در حالت S3 برابر ۳۶۱°C و در حالت S5 برابر ۱۶۵°C ثبت گردید. نمودار نشان می‌دهد که با ایجاد نشتی در لوله ماکزیمم دمای کسب شده کاهش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش قطر سوراخ که به معنی خروج بیشتر گاز از انتهای لوله است، افزایش دما محدود شده و عملکرد گرمایشی لوله ضعیف می‌گردد. نکته مهم در این آزمایش آن است که دمای گاز خروجی با دمای گاز داخل لوله یکسان می‌باشد. با انتخاب سوراخ با قطر ۴mm علیرغم کاهش شدید دمای انتهای لوله اما همچنان بالابودن دمای گاز خروجی از انتهای لوله نسبت به دمای سکون جریان ورودی به نازل، محسوس می‌باشد. با افزایش قطر سوراخ به مقادیر بالاتر از ۱mm، دما در انتهای لوله به مقدار زیادی افت می‌کند. تاثیر فاصله بین لوله و نازل در گرمایش انتهای لوله قابل مشاهده است. همچنین تاثیر فشار بالادست نازل بر عملکرد گرمایشی لوله نشان داده شده است.



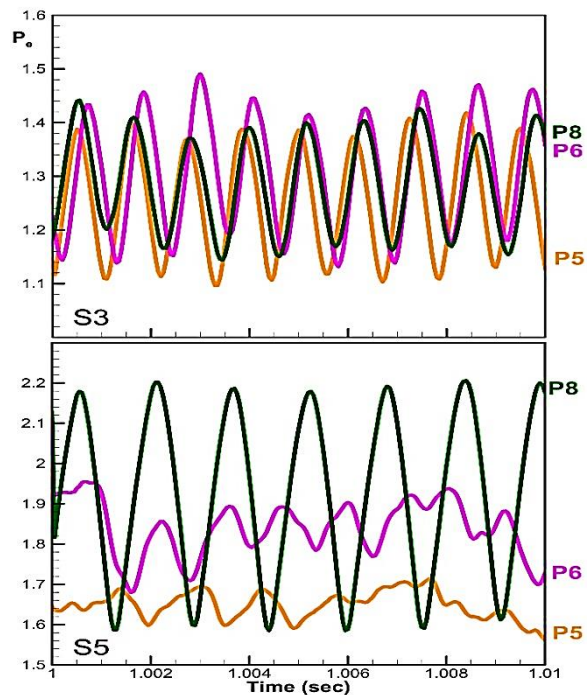
شکل (۹): مقادیر دمای انتهای لوله بر حسب فشار

بالادست نازل در حالت‌های مختلف سوراخ انتهای لوله

است که برای نوسانات فشار فرکانس پایین مناسب‌تر است. برای محافظت از مبدل در برابر دمای بالا، آزمایش‌ها برای مدت کوتاهی انجام شد. چند عکس از ثبت فشار در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، فشار نوسانی است. بنابراین، مقدار میانگین فشار به عنوان فشار متوسط حاصل در انتهای لوله گزارش شده است. در مجموعه دیگری از آزمایش‌ها، صدای صادر شده از لوله تشدید توسط اپلیکیشن Advanced Spectrum Analyzer اندازه‌گیری شد تا آنالیز آکوستیک برای تعیین فرکانس‌های غالب نوسانات انجام شود.

۴-۲ نتایج آزمون و بحث

آزمون تجربی در پنج بخش انجام شد. فاصله بین خروجی نازل و ورودی لوله (S)، در دو مقدار سه برابر و پنج برابر قطر دهانه خروجی نازل، انتخاب و به اختصار S3 و S5 نام‌گذاری گردید. سه مقدار فشار ۵، ۶ و ۸ bar، برای فشار بالادست نازل (P)، تعیین و به اختصار P5، P6 و P8 نامیده شد. همچنین هفت حالت برای سوراخ انتهایی لوله، در نظر گرفته شد. با توجه به انتخاب این مقادیر، ترکیب چهل و دو آزمون مجزا برای ثبت دما و ثبت فشار اجرا شده و با تکرار برخی آزمون‌ها، تکرارپذیری کامل اتفاقات محرز گردید. همچنین در آزمون‌های جداگانه، فرکانس نوسانات جریان لوله نیز مورد سنجش قرار گرفت.

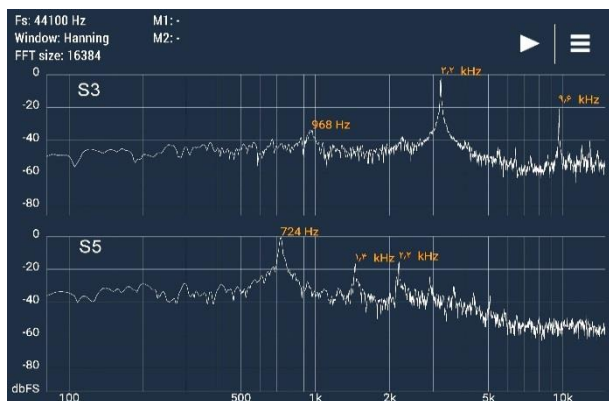


شکل (۸): نمونه فشارهای ثبت شده در آزمون تجربی

فاصله بین دهانه لوله و خروجی نازل نقش مهمی در میانگین فشار انتهایی لوله دارد و با افزایش این فاصله، میانگین فشار هم‌افزایش می‌یابد [۲۹]. با افزایش قطر سوراخ در فاصله S3 تغییراتی در مقدار فشار داخل لوله ایجاد می‌شود. فشار داخل لوله به دلیل شرایط جریان فرومنبسط کاملاً وابسته به فاصله S می‌باشد. با افزایش قطر سوراخ به مقادیر بالاتر از ۳mm اندکی از فشار داخل لوله کاهش می‌یابد که بیان‌گر افزایش تاثیر مقدار نشتی در داخل لوله است. همچنین با توجه به اینکه سوراخ انتهایی لوله مانند یک اوریفیس عمل می‌کند می‌توان دبی گاز نشتی را محاسبه نمود.

۴-۳- فرکانس غالب نوسانات فشار لوله

در فرآیند لوله هارتمن-اسپرنگر، بر اساس پارامترهای هندسی و فیزیکی لوله، تغییرات دما و نوسانات فشار در داخل لوله وجود دارد که فرکانس غالب این نوسانات قابل اندازه‌گیری می‌باشد. روش‌های متعددی برای این کار وجود دارد که در این آزمون تجربی، اندازه‌گیری و نمایش فرکانس غالب با میکروفون انجام شد. با استفاده از اپلیکیشن Advanced Spectrum Analyzer، آنالیز صوت صورت گرفت. نتیجه این آنالیز در شکل ۱۱ ارائه شده است.



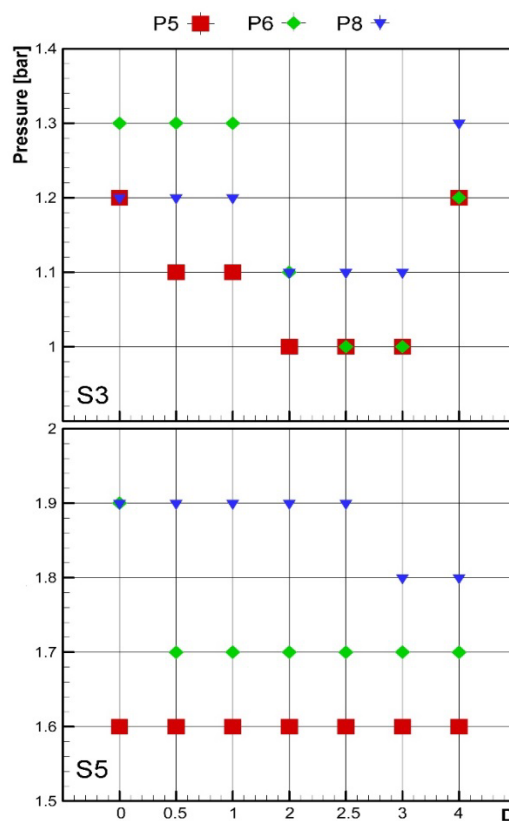
شکل (۱۱): فرکانس غالب نوسانات

لازم به ذکر است میکروفون و اپلیکیشن مذکور با فرکانس مشخص کالیبره شده و عملکرد آن صحت‌سنجی گردید. گرمایش لوله نتیجه‌ی تشدید نوسانات هارمونیک و غیر هارمونیک در لوله است. طبق نتایج ارائه شده توسط محققین [۳۰]، نمودار فرکانس نوسانات دارای بخش‌های (۱) تن سوت کشنده^۱، (۲) نویز شوک پهن باند^۲ و (۳) نویز

مقایسه دو نمودار بیان‌کننده این مطلب است که در هر فاصله S یک مقدار فشار P0 تاثیرگذار است و در برخی موارد از فاصله و فشار، لوله فاقد عملکرد گرمایشی مورد توجه خواهد بود. اگر در یک فاصله، یک مقدار فشار ایجاد گرمایش می‌کند، در فاصله‌ی دیگر آن فشار تاثیری نخواهد داشت یا تاثیر آن کمتر می‌گردد. مانند P8 در S3 که در S5 همان تاثیر را نشان نمی‌دهد. و برخلاف P5 که در S3 تاثیر زیادی بر گرمایش لوله دارد مشاهده می‌شود که همین فشار در فاصله S5 تاثیر کمتری دارد. تناسب افزایش دما با مقدار فاصله‌ی بین نازل و لوله و همچنین مقدار فشار بالادست نازل در مراجع [۲۴] و [۹]، مطرح شده و کاهش دما در صورت وجود نشتی در مرجع [13]، پیش‌بینی شده است.

۴-۲- فشار انتهایی لوله

همانطور که در مراجع مختلف مانند [۹] و [۵] گفته شده، فشار انتهایی لوله نوسانی است اما با توجه به نوع گیج فشار مورد استفاده در آزمون تجربی و محدودیت‌های عملکردی آن، نوسانات فشار با دقت بالا قابل مشاهده نبوده و لذا فشار به صورت میانگین نوسانات ثبت گردید که در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): مقادیر میانگین فشار انتهایی لوله بر حسب فشار بالادست نازل در حالت‌های مختلف سوراخ انتهایی لوله

¹ Screech tone

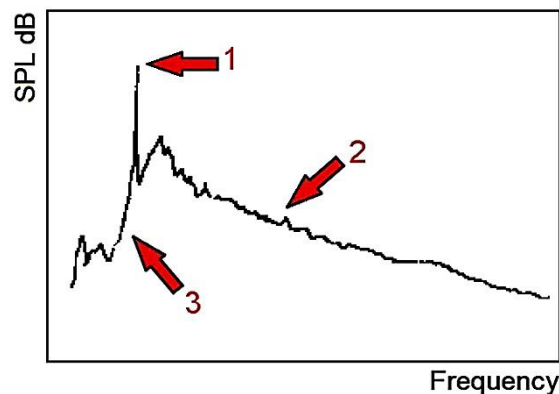
² Broadband shock noise

- با افزایش فاصله بین خروجی نازل و ورودی لوله، برای یک فشار ثابت بالادست، دمای بخش گرم گاز، کاهش می‌یابد.
- بیشترین مقدار افزایش دما در ترکیب خاصی از فشار بالادست و فاصله بین نازل و لوله به دست می‌آید.
- فرکانس نوسانات با فرکانس اصلی آکوستیک لوله مغایرت دارد که به دلایل مختلف از جمله عدم امکان تبیین دقیق دمای گاز داخل لوله و تغییرات سرعت صوت مربوط است.
- باتوجه به نسبت فشارهای موجود در ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز طبیعی، شرایط نصب و بهره‌برداری از لوله تشدید هارتمن - اسپرنگر فراهم بوده و می‌توان قابلیت گرمایشی آن را ایجاد و استفاده نمود.
- از آنجایی که آزمون تجربی با سیال هوا انجام شد و باتوجه به وابستگی شدید عملکرد گرمایشی لوله تشدید، به پارامترهای هندسی و عملکردی، لازم است برای سیال گاز طبیعی، پارامترهای هندسی و عملکردی، تغییر داده شده و به اصطلاح دستگاه تنظیم شود.
- نتایج به دست آمده در این مقاله بیانگر آن است که وجود سوراخ در انتهای لوله، در شرایط عملکرد گرمایشی لوله باعث نشت سیال داغ از انتهای لوله می‌شود. دمای سیال نشتی از دمای سکون سیال ورودی بالاتر بوده و می‌توان انتظار داشت که در صورت اختلاط جریان اصلی با جریان نشتی، گرمایش جریان سیال اصلی انجام گردد؛ بنابراین به کارگیری این سازوکار در جریان خطوط انتقال گاز طبیعی، قابل استفاده می‌باشد.

۶- مراجع

1. Iranian Gas Standard, IGS-m-PM-106(2), NIGC, 2021.
2. Mahmoodi M, Gorji M. An experimental study on gas line break detection system in quarter turn actuators. The Scientific Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics. 2017;5(1). (In Persian) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1395.5.1.6.6>
3. Hartmann J. On a new method for the generation of sound waves. Physical Review. 1922;20.
4. Sprenger H. On thermal effects in resonance tubes. Mitt. Eidgenoss. Tech. Hoch. hst. Aerodynamik. 1954;21.
5. Thompson P A. Resonance tubes. PhD Thesis. Massachusetts Institute of Technology. 1960.
6. Phillips R, Pauli A J. Resonance tube ignition of hydrogen-oxygen mixtures. Lewis Research Center. 1971.
7. Kuptsov V M, Ostroukhova S I, Filippov K N, Pressure fluctuations and heating of a gas by the

مخلوط آشفته^۱ می‌باشد که الگوی آن در شکل (۱۲) نشان داده شده است، از این رو می‌توان آن را با شکل (۱۱) مقایسه نمود. در فاصله S3 به ترتیب فرکانس‌های ۹۶۸، ۳۲۰۰ و ۹۶۰۰ Hz و در فاصله S5 به ترتیب فرکانس‌های ۷۲۴، ۱۴۰۰ و ۲۲۰۰ Hz به دست می‌آید. ذکر این نکته ضروری است که مقادیر فرکانس غالب در شرایطی ثبت گردید که دمای انتهای لوله در بالاترین مقدار خود قرار داشت. فرکانس نوسانات در شرایط قطر سوراخ ۰،۰ mm و ۰/۵ و یکسان به دست می‌آید و با افزایش قطر سوراخ و تغییر شرایط عملکرد لوله و در نتیجه کاهش گرمایش، الگوی نمودار فرکانس نیز تغییر می‌کند.



شکل (۱۲): اجزاء نمودار فرکانس نوسان

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تجربی که باهدف بررسی تأثیر نشت سیال از انتهای لوله هارتمن - اسپرنگر بر عملکرد گرمایشی لوله صورت گرفت، نشان داده شد که:

- فشار بالادست نازل، فاصله بین خروجی نازل، و وضعیت انتهایی لوله تأثیر زیادی بر بیشینه دمای گاز دارند.
- باوجود سوراخ در انتهای لوله، نوسانات فشار شکل گرفته و تا زمانی که مقادیر نسبت قطر سوراخ به قطر لوله کمتر از ۰/۴ باشد، افزایش دما در انتهای لوله وجود دارد.
- با افزایش قطر سوراخ خروجی، از میزان افزایش دما کاسته می‌شود؛ طوری که بیشترین دما در لوله کاملاً بسته به دست می‌آید.
- با افزایش فشار جریان گاز در بالادست، میزان افزایش دما مطلوب‌تر می‌شود.

¹ Turbulent mixing noise

22. Vrebalovich T. Resonance tubes in a supersonic flow field. Report No. 32.378. Jet Propulsion Lab California Inst. of Tech. 1962.
23. Wilson J, Resler E L. A mechanism of resonance tubes. *Journal of the Aerospace Science*. 1959;7.
24. Brocher M C. Study of thermal phenomena in a Hartmann-Sprenger tube. NASA Technical Note. No: TTF-14796. 1974.
25. Fouladi N, Mohammadi A, Rezaei H. Numerical investigation of pre-evacuation influences of second throat exhaust diffuser. *The Scientific Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics*. 2017;5(2). (In Persian) <https://dorl.net/dor/1001.1.23223278.1395.5.2.5.7>
26. Farnia M A, Ebrahimi R, Mehrzad S. Presenting a multi-block numerical code to study the flow inside hyper expanded nozzles in operational conditions. *The Scientific Journal of Aerospace Mechanics*. 2007;3(2). (In Persian)
27. Bogdanov V. Contemporary achievements in the field of acoustic ignition systems. *International Conference on Industrial Engineering*. 2015. DOI1016/j.proeng.2015.12.040
28. Elvander E, Fisher C. Gaseous oxygen resonance igniter. F23Q13/00 Patent US6966769B2, 2005.
29. Younesi M, Ghassemi H. Investigating the fluctuating nature of flow in the Hartmann-Sprenger tube. *Modares Mechanical Engineering* 2024;24(6). URL <http://mme.modares.ac.ir/article-15-74867-fa.html>
30. Christopher W, Tam K. Supersonic jet noise. *Annu. Rev. fluid mech*. 1995;27
- inflow of a supersonic jet into a cylindrical cavity. *Mekhanika Zhidkostii Gaza*. 1977;5.
8. Pishevar I A, Ahmadi Kia H. Interaction of the exiting plume from fixed and moving nozzles with a rigid wall. *The Scientific Journal of Aerospace Mechanics*. 2007;3(1). (In Persian)
9. Sarohia V, Back L H. Experimental investigation of flow and heating in resonance tube. *Journal of Fluid Mechanics*. 1979;94.
10. Parsa E, Afzali B, Karimi H. Experimental investigation of the effective parameters on the performance of Hartmann-Sprenger tube. 13th Conference of Iranian Association of Aerospace. 2014. (In Persian)
11. Thethy B, Tairyeh D, Edgington M D. Mechanics of the influx phase in the jet regurgitant mode of a powered resonance tube. *International Journal of Aeroacoustics*. 2019;18(2-3). DOI 10.1177/1475472X19840001
12. Lee J, Lim D, Seo S, Kang S H. Numerical analysis of the thermal characteristics of a gas-dynamic ignition system. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018;32(5). DOI 1007/s12206-018-0450-z
13. Afzali B, Karimi H. Effect of pipe geometry and material properties on flow characteristics and thermal performance of a conical Hartmann-Sprenger tube. *The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2017. DOI 10.1007/s40430-017-0843-4
14. Bauer C, Lungu P, Haidn O J. Numerical investigation of a resonance ignition system. 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences. 2019. DOI 10.13009/EUCASS2019-360
15. Bouch D J, Cutler A D. Investigation of a Hartmann-Sprenger tube for passive heating of scramjet injectant Gases. 41st AIAA Aerospace Sciences Meeting. 2003.
16. Dimitrieva A S, Schipachev A M. Application of the resonant energy separation effect at natural gas reduction points in order to improve the energy efficiency of the gas distribution system. *Journal of Mining Institute*. 2021;248. DOI 10.31897/PMI.2021.2.9
17. Belousov A, Lushpeev V, Sokolov A, Sultanbekov R, Tyan Y, Ovchinnikov E, Shvets A, Bushuev V, Islamov S. Hartmann-Sprenger energy separation effect for the quasi-isothermal pressure reduction of natural gas: feasibility analysis and numerical simulation. *Energies*. 2024;17.
18. Shapiro A H. Shock waves and dissipation in a resonance tube. *J Aerospace Sci*. 1959;26(10).
19. Shapiro A H. On the maximum attainable temperature in resonance tubes. *J Aerospace Sci*. 1960;27(1).
20. Khodkameh M, Dolati M, Amanifard F, Abdollahzadehsangroudi N. Numerical investigation of heat and fluid features on a flat plate affected by a self-oscillator impingement jet. *The Scientific Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics*. 2024;12(2). (In Persian) <https://dorl.net/dor/1001.1.23223278.1402.12.2.8.9>
21. Hojaji M, Soltani M R, Taebii-Rahni M. Investigation of supersonic jet into compressible subsonic cross flow on the surfaces around the jet. *The Scientific Journal of Fluid Mechanics and Aerodynamics*. 2012;3(3). (In Persian)