



# Investigating the Fluctuating Nature of Flow in the Hartmann-Sprenger Tube

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Younesi M.<sup>1</sup>,  
Ghassemi H.<sup>1\*</sup>

### How to cite this article

Younesi M, Ghassemi H, Investigating the Fluctuating Nature of Flow in the Hartmann-Sprenger Tube. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(06):341-349.

<sup>1</sup> School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

### \*Correspondence

Address: School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

h\_ghassemi@iust.ac.ir

### Article History

Received: April 29, 2024  
Accepted: August 12, 2024  
ePublished: August 31, 2024

## ABSTRACT

At the outlet of a converging nozzle connected to a high-pressure gas source, based on its input pressure, an under-expanded and ultrasonic flow is created, accompanied by a shock wave. A simple design of the Hartmann-Sprenger resonance tube device is made by placing a closed-end tube in front of this converging nozzle. The impact of the shock wave and nozzle outflow jet on the tube causes intense heating in the trapped gas inside the tube. This research investigated the functional cycle of the resonance tube and the fluctuating nature of the flow inside it. The main parameters of the problem in the form of the inlet pressure to the nozzle and the distance between the tube and the nozzle, the determination and the effect of changing their value on the fluctuating performance of the flow inside the tube, and the fluctuations of the pressure at the end of the tube were shown. The dominant frequencies of these oscillations were determined and shown that in the range of input pressure from one to ten bar, the range of dominant frequencies is between 600 and 933 Hz, which are slightly different from the resonant frequency of the tube. The intensification of oscillations and dominant frequencies can only be seen in a certain number of values of the main parameters, and the intended heating is created only in these conditions.

**Keywords** Convergent Nozzle, Gas Dynamic Heating, Resonance Tube, Hartmann Sprenger, Resonance Frequency

## CITATION LINKS

1- On a new method for the generation ... 2- A fluidic sounding rocket motor ignition system. 3- Thermal effects in resonance tubes. 4- On the heating effect in a resonance tube. 5- Resonance Tubes ... 6- Periodic shock waves in resonating gas columns. 7- A resonance igniter for hydrogen-oxygen combustors. 8- Thermoacoustic effects in a resonance tube. 9- Experimental investigation of flow and heating in a resonance tube. 10- On the jet regurgitant mode of a resonant tube. 11- Studies on conical and cylindrical resonators. 12- Experimental ... 13- Investigation of Stabilization ... 14- Numerical investigation on thermoacoustic effects ... 15- Mechanics of the influx phase in the jet ... 16- Numerical investigation for performance prediction ... 17- Shock waves and dissipation in a resonance tube. 18- Experimental investigation of energy dissipation in ... 19- The powered resonance tube: From Hartmann's ... 20- Numerical Analysis ... 21- Resonance tubes in a subsonic flowfield.

# بررسی ماهیت نوسانی جریان در لوله هارتمن اسپرنگر

محمد یونس<sup>۱</sup>، حجت قاسمی<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

## چکیده

در خروجی یک نازل همگرا که به یک منبع گاز پر فشار متصل است، بر اساس مقدار فشار ورودی آن، یک جریان فرومنبسٹ و فرا صوت که با موج شوک همراه می باشد ایجاد می گردد. با قرار دادن یک لوله ته بسته در مقابل این نازل همگرا، طرح ساده از دستگاه لوله تشدید هارتمن اسپرنگر شکل می گیرد. تأثیر شوک که همراه جریان خروجی نازل بر لوله، گرمایش شدیدی در گاز محبوس در داخل لوله ایجاد می کند. در این پژوهش سیکل عملکردی لوله تشدید و ماهیت نوسانی جریان داخل آن بررسی گردید. پارامترهای اصلی مساله به صورت فشار ورودی به نازل و فاصله بین لوله و نازل، تعیین و تأثیر تغییر مقدار آن ها در عملکرد نوسانی جریان داخل لوله و نوسانات فشار انتهایی لوله نشان داده شد. فرکانس های غالب این نوسانات تعیین و بیان شد که در محدوده فشار ورودی یک تا ده بار، محدوده فرکانس های غالب بین ۶۰۰ تا ۹۳۳ هرتز به دست می آید که با فرکانس آکوستیکی طبیعی لوله اختلاف دارند. تشدید نوسانات و فرکانس های غالب تنها در تعداد مشخصی از مقادیر پارامترهای اصلی قابل مشاهده است و گرمایش مورد نظر صرفاً در این شرایط ایجاد می گردد.

**کلیدواژه ها:** نازل همگرا، گرمایش دینامیک گازی، لوله تشدید، هارتمن اسپرنگر، فرکانس تشدید

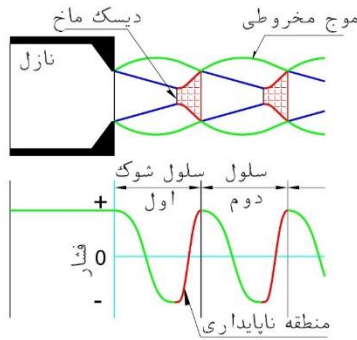
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۲

\* نویسنده مسئول: h\_ghassemi@iust.ac.ir

## ۱- مقدمه

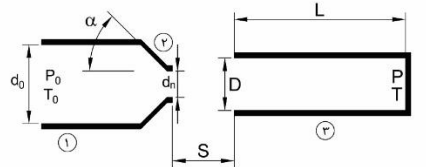
در سال ۱۹۲۲ هارتمن<sup>[۱]</sup> هنگام انجام یک سری آزمایش های تجربی بر روی جت جریان آزاد فرومنبسٹ خروجی از یک نازل صوتی، در مورد پدیده ی نوسان کننده ی جت هوا کشف کرد که می توان نوسانات فشار قوی را درون یک لوله در فواصل مشخصی از نازل ایجاد نمود. این سازوکار بعداً برای سامانه های تولید صدا با قدرت بالا مورد استفاده قرار گرفت و به سوت هارتمن معروف شد. او از یک لوله ی پیتوت جهت اندازه گیری فشار نقاط مختلف جریان جت خروجی از نازل استفاده می کرد. با خروج جریان از نازل، سرعت آن به سرعت فراصوت رسیده و سپس با تراکم از طریق موج ضربه، مجدداً به سرعت زیر صوت تنظیم می شود. این فرآیند مجموعه ای از سلول های الماسی شکل را با جریان متناوب مافوق صوت و فرو صوت ایجاد می کند. نمودار توزیع فشار استاتیک در امتداد محور جت در شکل ۱ نشان داده شده است. فشار در مقابل مخروط های الماسی شکل افزایش یافته و در قسمت های واگرا در تقاطع ها به حداقل می رسد. بخش هایی از ساختار جت که منجر به ایجاد این نوسانات می شود با الگوی هاشور در شکل ۱، مشخص شده است.



شکل ۱) توزیع فشار استاتیک در امتداد محور جت [2]

هارتمن [2] دریافت که با قرارگرفتن دهانه ی لوله ی ته بسته، در منطقه ی ناپایداری جت، که تغییرات فشار سکون در آن با نرخ مثبت است، لوله شروع به تشدید نوسان می کند. این شرایط یک جریان نوسانی خاص درون لوله ایجاد کرده که با عبور متناوب امواج تراکمی قوی درون لوله همراه است. نتیجه این فرآیند، افزایش متمرکز دمای گاز در بخش انتهایی لوله خواهد بود.

عمده ی تحقیقات مرتبط بعدی بر روی گرمایش شدید انتهایی لوله و نوسانات دامنه جریان، متمرکز گردید. در سال ۱۹۵۴ اسپرنگر [3] نشان داد که نوسانات به وجود آمده درون لوله و انعکاس پی در پی امواج ضربه ای از انتهای بسته ی لوله به دلیل وجود اتلافات بازگشت ناپذیر، می تواند منجر به تولید اثرات گرمایی و افزایش دمای متمرکز در انتهای لوله شود. مطابق شکل ۲، دستگاه لوله تشدید هارتمن اسپرنگر به بیان ساده، از یک نازل و یک لوله ته بسته که دهانه ی باز آن در مقابل خروجی نازل قرار گرفته، تشکیل شده است. با اتصال نازل به یک منبع گاز پر فشار، جریان سیال در نازل و فضای بعد از آن برقرار می شود. با توجه به نسبت فشار ورودی نازل به فشار محیط یا فشار خروجی نازل، یک جریان جت فرومنبسٹ با سرعت فراصوت ایجاد می گردد. امواج تراکمی بعد از نازل تشکیل شده و تأثیر شوک که همراه جریان خروجی نازل بر لوله، منجر به وقوع پدیده ای خاص در لوله می گردد که نتیجه ی آن گرمایش شدید در گاز محبوس در داخل لوله خواهد بود.



شکل ۲) طرحواره لوله تشدید هارتمن اسپرنگر

① مسیر ورود گاز  
 ② نازل همگرا  
 ③ لوله تشدید  
 $P_0$  فشار گاز ورودی به نازل  
 $T_0$  دمای گاز ورودی به نازل  
 $T$  دمای انتهایی لوله  
 $S$  فاصله بین خروجی نازل و ورودی لوله  
 $d_0$  قطر ورودی نازل  
 $d_n$  قطر خروجی نازل  
 $\alpha$  زاویه همگرایی نازل  
 $D$  قطر داخلی لوله  
 $L$  طول لوله

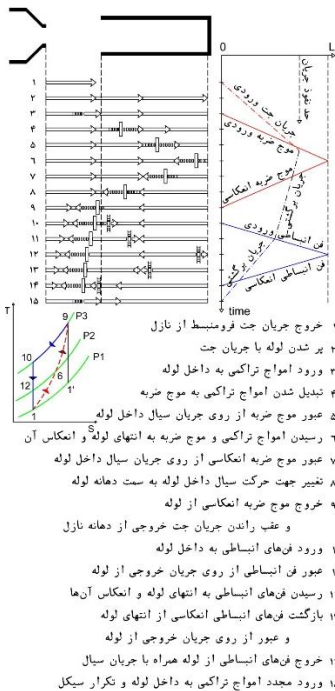
لوله) و شبکه‌ای از سلول‌های موج ضربه‌ای در جریان جت خروجی از نازل، تداخل امواج ضربه‌ای متحرک در طول لوله، بر گاز حبس شده درون لوله اثر گذاشته و منجر به گرم شدن شدید گاز درون لوله می‌شوند. چانگ و لی<sup>[10]</sup>، نشان دادند که مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر فرکانس تشدید (در مد بازگشت جت)، طول لوله و فاصله‌ی لوله از منبع تولید نوسانات می‌باشد؛ هرچه فاصله‌ی لوله با مولد نوسانات کمتر باشد، تاثیر آن بزرگ‌تر خواهد بود. سرجیت و همکارانش<sup>[11]</sup>، تاثیر لوله استوانه‌ای و مخروطی را بر عملکرد فرکانسی دستگاه بررسی کردند و با تغییر فاصله نازل و لوله، نسبت فشار نازل و زاویه مخروط نشان دادند که فرکانس تشدید لوله مخروطی نسبت به لوله استوانه‌ای با همان طول، بالاتر است. پارسا و همکاران<sup>[12]</sup>، وجود جریان نوسانی همراه با عبور امواج شوک قوی را مهمترین عامل افزایش دما، اعلام کردند. بائور و همکاران<sup>[13]</sup>، به صورت تجربی نشان دادند که با استفاده از چرخش دادن به جریان نازل، دامنه نوسانات جریان به‌طور قابل توجهی، افزایش پیدا می‌کند. افضلی و کریمی<sup>[14]</sup>، اثرات گرمایی-صوتی و خصوصیات جریان را در لوله‌ی نیمه مخروطی به صورت عددی بررسی کردند. تتی و همکاران<sup>[15]</sup>، نشان دادند که در ماخ‌های  $3/2$  تا  $4$ ، با توجه به فاصله‌ی بین نازل و دهانه لوله، می‌توان نوساناتی با فرکانس‌های بالا و پایین ایجاد نمود که منجر به رسیدن به بیشترین گرمای ایجاد شده در این دستگاه خواهد شد. کنته و همکاران<sup>[16]</sup>، دستگاه را با هدف پیش‌بینی عملکرد آن از نظر دمای لوله و طیف سر و صدا، به صورت عددی بررسی کرده و نشان دادند که تأثیر شرایط مرزی آنقدر قوی است که می‌تواند ترتیب بزرگی دمای انتهای لوله را تغییر دهد و از این نتایج می‌توان برای طراحی یک پوشش عایق بر روی لوله یا در ناحیه انتهای لوله استفاده نمود.

پدیده‌ی گرمایش لوله یک فرآیند سیالاتی است که طی آن انرژی جنبشی جریان جت گاز بدون کمک یا دخالت هیچ دستگاه مکانیکی متحرک به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود. شاپیرو<sup>[17]</sup> و اکثر پژوهشگران مانند سیبولکین<sup>[18]</sup> بیان می‌کنند که گرم شدن لوله عمدتاً 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. رویدادهایی که در طول یک چرخه عملکرد لوله رخ می‌دهد، در شکل ۳ نشان داده شده است. جت فرومنبسط به سمت لوله جریان پیدا می‌کند و وارد لوله می‌شود. سپس امواج تراکمی وارد لوله شده و تشکیل یک موج ضربه‌ای می‌دهند. در ادامه یک سری از شوک‌ها به پایین‌دست لوله منتقل می‌شوند، و به‌طور برگشت‌ناپذیر، کسری از حجم گاز داخل

از جمله کاربردهای مهم این دستگاه می‌توان به استفاده به عنوان منبع تولید گرما، منبع تولید صوت، منبع تولید جریان پالسی، آتش‌زنه موتورهای راکت، عملگرهای فرکانس بالا و کنترل‌کننده-های فعال جریان، اشاره کرد. هارتمن روابطی برای طول لوله و قطر نازل و ارتباط آن‌ها با فرکانس نوسان هوا به‌دست آورد و بر اساس سرعت صوت، جت خروجی از نازل و جریان خروجی از لوله را تصویربرداری کرد. هال و بری<sup>[4]</sup>، نشان دادند هنگام قرار گرفتن دهانه لوله در یکی از مناطق تراکمی جت، ستون هوا در داخل لوله دچار نوسان شده و یک صدای شدید با طول موج تقریباً چهار برابر طول لوله شنیده می‌شود. در این حالت دما در انتهای بسته‌ی لوله حدود  $140$  درجه سلسیوس بود درحالی‌که دمای جت حدود  $20$  درجه سلسیوس می‌باشد. تامپسون<sup>[5]</sup>، با استفاده از لوله‌ی ساده تحت اثر جت فرا صوت و جت پریودیک، دمای تولید شده در لوله، فاکتورهای مرتبط با هندسه، آزمایش-های تجربی، مخاطرات صوتی و ملاحظات عمومی، را بررسی کرد. ساننگر و هودسون<sup>[6]</sup>، پدیده تشدید گاز را داخل یک مجموعه سیلندر پیستون با امواج شوک پریودیک مطالعه نموده و نشان دادند که در شرط حالت پایدار، فرکانس تشدید گاز متناسب با فرکانس آکوستیک اصلی لوله است و وابسته به قدرت شوک، دما و فشار میانگین در دامنه حرکت پیستون، طول لوله، لزجت گاز و انتقال گرما از دیواره لوله، می‌باشد. فیلیپس و پاولی<sup>[7]</sup>، با بررسی مکانیسم‌های مختلف انتقال گرمای تولیدشده از لوله بیان نمودند که مهمترین سازوکار، نوسان درون لوله است. مرکلی و تومن<sup>[8]</sup>، اثرات ترموآکوستیک در لوله را مطالعه کردند. آن‌ها در ابتدا معادله حرکت محوری گاز داخل لوله، معادله مومنوم شعاعی، معادله پیوستگی، معادله انرژی و معادله حالت سامانه را مشخص و با وارد نمودن معادله ترموآکوستیک در مساله، معادلات را با روش اغتشاش اندک (پرتوییشن) حل کردند. ساروهیا و بک<sup>[9]</sup>، سه مد مختلف جریان با عنوان مد ناپایداری جت، بازگشت جت، و جیغ‌زدن جت را شناسایی و معرفی کرده و نشان دادند که مد ناپایداری جت تنها در جت‌های زیرصوت، زمانی که نسبت فشار نازل کمتر از  $1/9$  می‌باشد، اتفاق می‌افتد و توان لازم جهت افزایش دمای گاز وجود ندارد. مد بازگشت جت در حضور جت فرومنبسط اتفاق می‌افتد و 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 لوله وارد شده و از آن خارج می‌شود. در مد بازگشت جت، امکان افزایش دما در انتهای بسته‌ی لوله وجود دارد. فرکانس نوسانات و دمای قابل حصول گاز درون لوله علاوه بر فاصله لوله از نازل و مشخصات جریان جت، به طول لوله نیز وابسته است. در مد جیغ‌زدن جت، نوسان موج ضربه‌ای در مقابل ورودی لوله منجر به حرکت امواج ضربه‌ای جدا از هم و قوی در طول لوله خواهد شد. به دلیل بروز پدیده‌ی تشدید بین یک موج ضربه‌ای خمیده (مستقر در دهانه‌ی

فرکانس ارتعاشات گاز در لوله از ۱۰۰ هرتز تا ۲۵ کیلوهرتز متغیر است و دامنه آن‌ها از ۱۵۰ دسی بل فراتر می‌رود [19]. نتایج محققین نشان می‌دهد که افزایش دمای داخل لوله در بازه زمانی ۱۵۰ میلی ثانیه رخ می‌دهد [20].

در این مقاله ابتدا سازوکار لوله تشدید شرح داده شده و طرحی از چنین لوله‌ای به همراه تجهیزات آزمایشگاهی مربوطه ارائه گردیده است. طبق بررسی‌های صورت گرفته بر روی نتایج کار محققین مختلف مشخص شد که بررسی نوسانات فشار و تعیین فرکانس‌های غالب نوسانات در اثر تغییر دو پارامتر فشار ورودی به نازل و فاصله بین لوله و نازل در یک هندسه ثابت انجام نشده و در این بخش می‌توان مطالعات و نتایجی ارائه نمود. بنابراین طی یک بررسی تجربی، با مطالعه تغییرات زمانی فشار در انتهای لوله، ماهیت نوسانی و همچنین وابستگی آن به دو پارامتر قابل تغییر در طرح تعیین گردید. به منظور شناسایی ماهیت و نحوه رفتار امواج داخل لوله، فشار ورودی به نازل و فشار انتهای لوله اندازه‌گیری شد. برای درک کیفی و کمی گرمایش گاز و بررسی عملکرد گرمایشی مورد انتظار از لوله، لازم است از وضعیت امواج داخل لوله آگاهی و شناخت داشت. بنابراین با تغییر دو پارامتر فشار ورودی به نازل و فاصله بین لوله و نازل، حالت‌های مختلف مورد آزمون قرار گرفت. میانگین فشار انتهای لوله در هر حالت تعیین گردید و نشان داده شد که فرکانس غالب نوسانات فشار انتهای لوله چگونه است. تغییرات فشار انتهای لوله برحسب فشار ورودی و فاصله ترسیم گردید. بررسی و تحلیل فشار ورودی، فشار انتهای لوله و نوسانات آن، فرکانس و دامنه‌ی این نوسانات، تحلیل گرمایی لوله را ارائه خواهد داد.



شکل ۳) رویدادهای چرخه تشدید در لوله

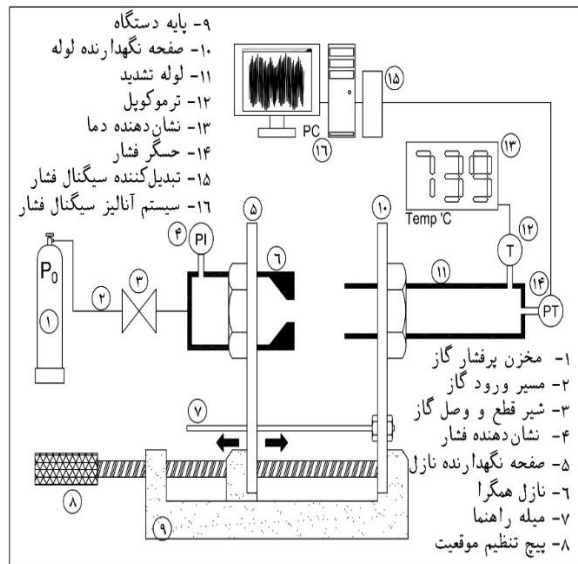
لوله را فشرده می‌کنند. با رسیدن موج ضربه به انتهای لوله و انعکاس آن، موج ضربه انعکاسی از روی جریان گاز داخل لوله عبور کرده و باعث تغییر جهت جریان داخل لوله به سمت خارج از لوله می‌شود. این تغییر جهت جریان از ورودی به خروجی، به دلیل بازتاب امواج فشرده‌سازی، در کسری بسیار کوتاه از دوره‌ی چرخه تشدید رخ می‌دهد. یک موج ضربه از لوله خارج شده و به داخل جت خروجی از نازل پیش می‌رود. از آنجا که لوله‌ی انتها بسته فقط حاوی یک جرم ثابت از گاز است، مرحله خروجی جریان با کاهش فشار در لوله همراه بوده، لذا به جت اجازه می‌دهد تا به موقعیت اصلی خود (داخل لوله) برگردد. فرآیندهای داخل لوله به صورت یک چرخه از نوسانات در یک فاصله زمانی نشان داده می‌شود. این چرخه از یک موج ضربه‌ای ورودی، یک موج ضربه‌ای انعکاسی، یک فن انبساطی ورودی، و یک فن انبساطی انعکاسی تشکیل شده است. در چرخه نوسانی لوله، جریان جت تا بخش مشخصی (حد نفوذ جریان) به داخل لوله نفوذ خواهد کرد. موج ضربه‌ای برخوردی با عبور از سیال داخل لوله به انتهای بسته لوله رسیده و منعکس می‌شود. موج ضربه‌ای انعکاسی یافته نیز از سیال داخل لوله عبور می‌کند. در فاز تخلیه با برگشت جریان جت به سمت بیرون از لوله، امواج انبساطی از سیال در حال خروج عبور نموده و پس از رسیدن به انتهای بسته لوله منعکس می‌شوند. پایان فاز تخلیه با خروج جریان جت و امواج انبساطی انعکاس یافته از لوله به اتمام می‌رسد.

شکل ۳ عملکرد لوله را در نمودار دما آنتروپی نشان می‌دهد. گاز درون لوله ابتدا در حالت ۱ قرار دارد. عبور موج ضربه‌ای ورودی از روی گاز محبوس درون لوله منجر به تغییر حالت گاز از حالت ۱ به حالت ۶ می‌شود. در ادامه عبور موج ضربه‌ای انعکاسی منجر به تغییر حالت گاز از حالت ۶ به حالت ۹ خواهد شد. تغییرات از حالت ۱ تا ۹ به دلیل عبور امواج ضربه‌ای از روی سیال، بازگشت-ناپذیر خواهد بود. اگر گرما از سیستم خارج نشود، یک انبساط آدیاباتیک و تغییر حالت از ۹ به ۱۰ ایجاد خواهد شد اما در واقعیت این اتفاق نمی‌افتد چرا که با خروج بخشی از گرما در شرایطی نزدیک به شرایط فشار ثابت قبل از فاز انبساط، حالت گاز از ۹ به ۱۰ تغییر خواهد یافت. مرحله بعدی تغییر حالت مربوط به فاز انبساط شبه آیزنتروپیک است. هرچه فرآیند انبساط سریع‌تر اتفاق بیافتد، فرآیند به فرآیند آیزنتروپیک نزدیک‌تر است. فرآیند انبساطی گاز را از حالت ۱۰ به ۱ تغییر داده و به این شکل چرخه بسته خواهد شد. چرخه ترمودینامیکی تشریح شده مجدداً تکرار می‌گردد.

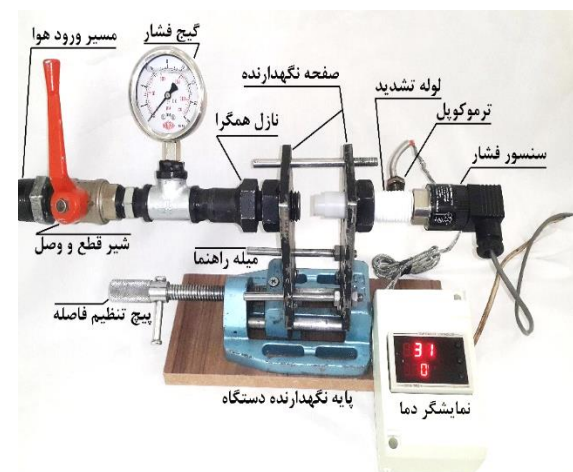
در لوله تشدید هارتمن اسپرنگر، با قرار گرفتن یک لوله توخالی در مقابل یک جت فرمونبسط، تعامل جت با لوله می‌تواند در یک مد نوسانی با انتشار امواج صوتی به محیط انجام شود (اثر هارتمن). در حالت‌های خاصی، دمای گاز داخل لوله می‌تواند چندین برابر بیشتر از دمای اولیه جریان گاز (اثر اسپرنگر) باشد.

مدل PTCHC001BCIA و با دقت ۰/۵٪ فول اسکیل است. ترموکوپل به کار برده شده از نوع k به بوده و قطر نقطه اتصال آن در حدود ۱/۷ میلی‌متر است. زمان پاسخ چنین ترموکوپلی از مرتبه ۱۰ ثانیه است. این ترموکوپل یک نمایشگر دما متصل می‌شود. پاسخ زمانی ترموکوپل برای اندازه‌گیری دما اهمیت ویژه‌ای دارد. در پژوهش حاضر، به علت فقدان ترموکوپل با پاسخ زمانی مناسب، امکان تعیین دقیق دما و به ویژه سرعت افزایش آن وجود نداشته است. اما حداکثر دمای ثبت شده در این پژوهش ۷۳۹ °C بوده که این مقدار متناظر با نسبت دمای بیشینه به دمای بالادست ۳/۴ است.

سیگنال مبدل فشار از طریق یک کارت آنالوگ به دیجیتال (A/D)، با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز در کامپیوتر ذخیره می‌شود. این کارت محصول Advantech و مدل PCI 1712-12 bit است. شکل ۵ عکسی از مجموعه آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۴) طرح‌واره نمونه آزمایشگاهی جهت آزمون تجربی



شکل ۵) تصویر میز آزمایش

## ۲- تجهیزات و روش آزمون

مجموعه آزمایش شامل مخزن گاز فشرده به همراه تنظیم کننده فشار، شیر قطع و وصل جریان، یک نازل همگرا، لوله تشدید، و بستری که لوله آزمایش و نازل روی آن نصب می‌شوند، در شکل ۴ نشان داده شده است. مجموعه به نحوی ساخته شده که بتوان نازل و لوله تشدید را تعویض کرد؛ طوری که امکان استفاده از آن‌ها با ابعاد مختلف وجود داشته و امکان تنظیم فاصله بین آن‌ها بر روی بستر فراهم باشد. پارامترهای اصلی در این مطالعه، فاصله بین دهانه خروجی نازل و دهانه ورودی لوله تشدید،  $S$ ، و فشار بالادست نازل،  $P_0$ ، است و سایر پارامترهای هندسی و موادی ثابت نگه‌داشته شدند. در یک فاصله مشخص برای مقادیر مختلف فشار بالادست، آزمایش‌ها انجام و نتایج ثبت می‌شوند. با تغییر فاصله بین نازل و لوله تشدید، آزمون با فشارهای ورودی نازل مجدداً انجام می‌گردد. در هر آزمایش فشار انتهای لوله تشدید و فشار نازل ثبت می‌شوند. لازم است تاکید شود که اندازه‌گیری توانان دما و فشار، این مجموعه آزمایشگاهی مقدور نبوده است زیرا تاخیر زمانی در پاسخ ترموکوپل باعث می‌شود تا برای خوانش دقیق دما، زمانی طولانی نیاز باشد اما به محض برقراری شرایط، دمای گاز در انتهای لوله، به سرعت افزایش می‌یابد و تداوم آن موجب آسیب مبدل فشار می‌شود. برای جلوگیری از این آسیب، مدت زمان آزمایش کوتاه و محدود به یک ثانیه می‌باشد که در این مدت کوتاه، عملاً ترموکوپل قادر به نشان دادن دمای گازها نیست. از این رو، اندازه‌گیری دما بدون همراهی با اندازه‌گیری فشار انجام شده است. جنس لوله تشدید برای تامین شرایط بی‌دررو، تفلون نسوز است. نازل همگرا از جنس فولاد و با زاویه همگرایی ۴۵ درجه به کار گرفته شد. قطر ورودی نازل ( $d_0$ )، ۱۵ میلی‌متر و قطر خروجی ( $d_n$ ) آن ۵ میلی‌متر است. لوله تشدید با مقطع داخلی استوانه و طول ۸۰ میلی‌متر ( $16d_n$ ) و قطر داخلی ۱۰ میلی‌متر ( $2d_n$ ) استفاده و بر روی صفحه نگهدارنده لوله تشدید، نصب گردید. فاصله ( $S$ ) بین دهانه خروجی نازل و ورودی لوله با استفاده از سازوکار بیج پایه دستگاه، بر اساس مضاربی از قطر دهانه خروجی نازل ( $1d_n, 2d_n, \dots, 6d_n$ ) تنظیم شد. در هر مرحله از آزمون مسیر هوا باز شده و به مدت یک تا دو ثانیه نمونه‌برداری فشار انتهای لوله تشدید انجام و داده‌ها توسط کامپیوتر ثبت گردید. این آزمون با ۱۰ حالت فشار ورودی به نازل ( $P_0$ ) در مقادیر ۱ بار، ۲ بار، ... تا ۱۰ بار و برای ۶ عدد فاصله بین لوله و نازل ( $S$ ) (در مجموع تعداد ۶۰ مرحله داده-برداری) انجام شد.

یک فشارسنج بوردن روغنی با دقت ۱/۶٪ فول اسکیل و محدوده فشار ۰ تا ۱۶ بار در بالادست نازل برای خوانش فشار ورودی نصب شده است. یک مبدل فشار و یک ترموکوپل نیز در انتهای لوله آزمایش نصب شده تا تغییرات فشار و دما در انتهای لوله، ثبت شود. مبدل فشار از نوع استرین گیج و مارک سنسیس (Sensys)

### ۳- نتایج آزمون

طول فاصله بین خروجی نازل و ورودی لوله، S در شکل ۲، و همچنین فشار سکون بالادست نازل،  $P_0$ ، دو پارامتر اصلی در مطالعه حاضر می‌باشند که S یکی از پارامترهای طرح و  $P_0$  یک پارامتر عملکردی است. با توجه به انتخاب شش مقدار مختلف برای فاصله بین نازل و لوله و ده مقدار برای فشار بالا دست، ترکیب شصت آزمون اجرا شده و با تکرار برخی آزمون‌ها، تکرارپذیری کامل نتایج محرز گردید. تکرار آزمون‌ها به ویژه برای مواردی که منجر به افزایش قابل توجه دما بوده، بسیار مهم و حیاتی است. در هر آزمون، به کمک فشارسنج نصب شده در ورودی نازل، فشار عملکردی قرائت و به کمک مبدل فشار، فشار انتهایی لوله، در مدت کوتاهی ثبت شده است. همچنین در آزمون‌های جداگانه، دمای گاز در انتهای لوله نیز ثبت گردید.

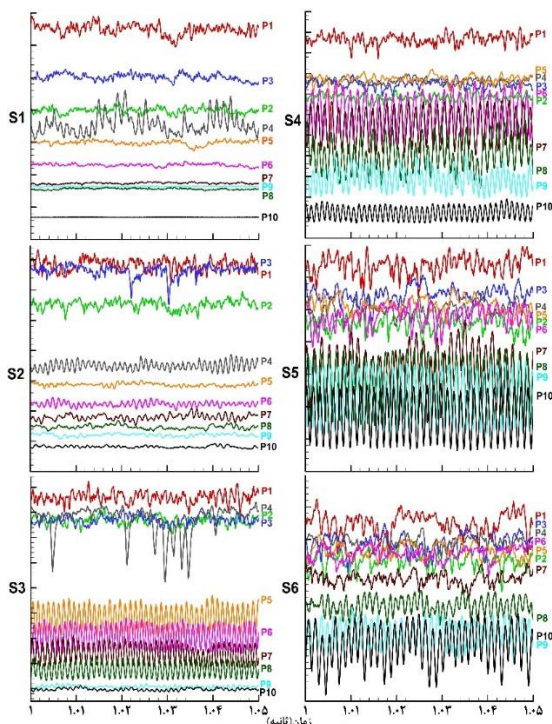
#### ۳-۱- فشار انتهایی لوله

به منظور وضوح بهتر و مقایسه نمودارها، از نسبت فشار انتهایی لوله به فشار ورودی به نازل استفاده شد. مقادیر این نسبت فشار در بازه زمانی ۱ تا ۱/۰۵ ثانیه و برای فشارهای ورودی به نازل ( $P_0$ ) به ازاء فواصل مختلف (S) در شکل ۶ رسم گردید. با توجه به ماهیت زمانی سیگنال‌های فشار، امکان نصب شاخص عدم دقت در این شکل وجود ندارد. اما با توجه به سنسور و دقت نامی آن، عدم دقت مقادیر فشار برابر ۰/۰۵ بار است. تغییرات فشار انتهایی لوله و نوسانی بودن آن به ویژه در برخی حالت‌ها قابل مشاهده می‌باشد. بایستی توجه داشت که برای فشارهای ورودی (سکون) کمتر از ۱/۹ بار، نازل در وضعیت فرومنبسط کار نخواهد کرد و فشار خروجی آن برابر با فشار محیط خواهد بود. از این رو برای این شرایط، نوسانات هارمونیک در انتهای لوله شکل نگرفته است. همچنین این شکل نشان می‌دهد که وقتی فاصله S کمتر از یک برابر قطر خروجی نازل است (حالت S1)، نوسان قابل توجهی تحت هیچ یک از مقادیر فشار بالادست روی نمی‌دهد. نوسانات هارمونیک برای فاصله بیش از S2 شکل می‌گیرند. تحت این فاصله نیز، برای فشارهای بالادستی که منجر به فرومنبسط شدن نازل نشود، چنین نوساناتی شکل نخواهد گرفت. برای شرایط S3 دیده می‌شود چنانچه فشار بالادست زیاد باشد (در این جا بیش از ۸)، این نوسانات شکل نخواهند گرفت. این در حالی است که این فشارها، در فواصل بزرگ‌تر (برای نمونه بزرگ‌تر از S3)، منجر به نوسان جدی می‌شود. علاوه بر این، نوسانات فشار در فشار بالادست ۴ بار، کمی متفاوت از فشارهای دیگر است. علت این امر را می‌توان به تغییر الگوی جریان نازل فرومنبسط در این شرایط نسبت داد. همچنین شایان توجه است که بیشترین دامنه نوسانات، برای شرایط S5 است و با بیشتر شدن فاصله، نوسانات کم‌دامنه‌تر می‌شوند. می‌توان نتیجه گرفت که استقرار لوله در بازه مشخصی از فاصله با خروجی نازل، منجر به

نوسانات هارمونیک فشار یا تشدید می‌شود. با افزایش فشار بالادست، این فاصله نیز افزایش می‌یابد.

#### ۳-۲- فرکانس نوسانات فشار انتهایی لوله

همان طور که اشاره شد، نوسانات جریان در داخل لوله عامل مهم در عملکرد گرمایشی این مساله می‌باشد. بنابراین لازم است وضعیت فرکانس نوسانات رخ داده داخل لوله، بررسی شود. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش فشار ورودی به نازل در برخی مقادیر فشار و فاصله، مانند فشار ۴ و ۶ بار فاصله (S2)، فشار ۵ بار فاصله (S3)، فشار ۶ بار فاصله‌های (S3) و (S4)، فشار ۷ بار فاصله‌های (S3)، (S4) و (S5)، در فشار ۸ بار فاصله‌های (S3) تا (S6)، و در فشارهای ۹ و ۱۰ بار فاصله‌های (S4) تا (S6)، نوسانات هارمونیک وجود دارد. با استفاده از اطلاعات نمودار نوسان، می‌توان مشخصات حالتی از فشار ورودی به نازل و فاصله بین نازل و لوله که منجر به نوسان در لوله می‌شوند را به دست آورد. به همین منظور با استفاده از تبدیل فوری، فرکانس‌های غالب نوسان استخراج و برای چهار مقدار فشار ورودی بین ۷ تا ۱۰ بار و برای فاصله S5، در شکل ۷ ارائه شده است. عدم دقت در تعیین فرکانس‌های نوسانات، با توجه به فرکانس نمونه برداری،  $\pm 0.05$  هرتز است. فرکانس نوسانات حوالی ۶۵۰ هرتز است و این مقدار مستقل از فشار بالادست می‌باشد. همچنین این شکل نشان می‌دهد که هماهنگ‌های دوم و سوم نیز در این نوسانات، متناظر با فرکانس‌ها ۱۳۰۰ هرتز و ۱۹۵۰ هرتز، با دامنه بسیار کوچک حضور دارند.



شکل ۶) تغییرات نسبت فشار انتهایی لوله در فاصله‌های مختلف بین نازل و لوله

در مورد فرکانس طبیعی نوسانات در لوله‌های با مقطع دایره می‌توان از رابطه زیر استفاده نمود:

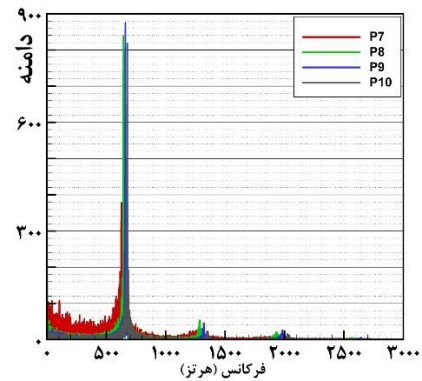
$$f = \frac{c}{4L} \quad (1)$$

که در آن  $c$  سرعت صوت در لوله بر حسب متر بر ثانیه و  $L$  طول لوله بر حسب متر (در اینجا  $۰/۰۸$  متر) است. بر اساس این رابطه، فرکانس نوسانات در لوله مورد آزمون با اختیار سرعت صوت در شرایط سکون بالادست،  $۱۰۶۲$  هرتز خواهد بود. اما طبق نتایج به دست آمده از نمودارها بیشترین فرکانس نوسانات مشاهده شده در پارامتر فشار انتهایی لوله،  $۹۳۳$  هرتز است. به علت افزایش دما در گاز داخل لوله، سرعت صوت رو به افزایش است و انتظار می‌رود طبق معادله (۱)، فرکانس طبیعی نیز افزایش یابد. پژوهش حاضر نشان می‌دهد که فرکانس نوسان جریان داخل لوله مخصوصاً مقدار فشار انتهایی لوله الزاماً با فرکانس طبیعی لوله برابر نیست. این بدان معنا است که نوسانات فشار در انتهای لوله متأثر از حرکت امواج متحرک است. با این وجود، بروچر و دوپورت (۱۹۸۸) [21] با اضافه نمودن ضریب تصحیح طول به معادله (۱)، درصد توجیه اختلاف بین این فرکانس‌ها برآمدند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش که با رویکرد تجربی انجام گردید ضمن اثبات ماهیت نوسانی جریان در لوله، موارد زیر نتیجه گرفته شد:

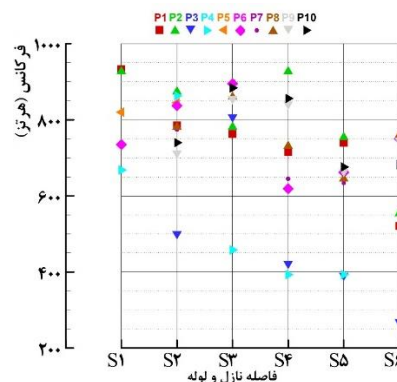
- ۱- با توجه هم راستا بودن لوله و نازل در برقراری صحیح جریان نوسانی داخل لوله اهمیت بسیاری دارد.
- ۲- سازوکار تنظیم فاصله بین لوله و نازل و همچنین قابلیت تعویض نازل و لوله در مجموعه‌ی ساخته شده به همراه اصلاحاتی جزئی می‌تواند قابلیت آن را برای اجرای حالت‌های مختلف آزمون ایجاد نماید.
- ۳- ماهیت نوسانی فشار در نقاط داخلی لوله اثبات می‌شود.
- ۴- فرکانس‌های متعددی در هنگام عملکرد دستگاه وجود داشته و مشاهده می‌گردد، اما صرفاً در برخی مقادیر از پارامترهای اصلی مساله (فشار ورودی نازل و فاصله بین لوله و نازل) موضوع تشدید و فرکانس غالب آن، حائز اهمیت است.
- ۵- فرکانس‌های غالب نوسانات در محدوده  $۶۰۰$  تا  $۹۵۰$  به دست آمد که با مقدار فرکانس طبیعی لوله مقداری اختلاف دارد.
- ۶- در بسیاری از حالت‌های آزمون، افزایش دما در لوله ایجاد می‌شود اما مقدار دما و سرعت افزایش دما در آزمون‌ها متفاوت است. این موضوع کاملاً وابسته به پارامترهای اصلی تعریف شده در پژوهش می‌باشد.



شکل ۷) نمودار تبدیل فوریه فاصله S5 فشارهای ۰.۸، ۰.۷، ۰.۸ و ۱۰ بار

وجود هارمونیک‌ها نشان از تشکیل امواج ایستا در لوله صوتی دارد. این بدان معنا است که تحریکات آکوستیکی لوله به واسطه جریان گازها و امواج ضربه‌ای و انبساطی رونده، منجر به تشدید، در قالب شکل‌گیری امواج ایستا شده است. با این وجود عدم تطابق این فرکانس‌ها با فرکانس نوسانات امواج ایستا، این برداشت را مخدوش می‌کند.

تحلیل فرکانسی کلیه آزمون‌ها انجام و نتایج آن در شکل ۸ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که فرکانس نوسانات، عموماً بین  $۶۵۰$  هرتز تا  $۹۳۳$  هرتز قرار گرفته است. فرکانس نوسان فشار در فشار ورودی به نازل  $۴$  بار، با مقادیر فرکانس در فشارهای دیگر و فاصله‌های دیگر متفاوت است. همان طور که پیش‌تر اشاره شد، علت این را تفاوت را می‌توان به تغییر رژیم جریان فرومنبسط نسبت داد. با افزایش فاصله (S) و رسیدن به (S5) و (S6)، مقدار فرکانس به کمتر از  $۸۰۰$  هرتز می‌رسد. در فاصله (S3) فرکانس نوسانات در هر فشار در محدوده  $۷۵۰$  تا  $۹۰۰$  قرار گرفته است. با افزایش فشار ورودی به نازل تعداد بیشتری الگوهای نوسانی در نمودارها مشاهده می‌گردد. همچنین در شکل ۶ مشاهده می‌شود که در برخی مقادیر فشار و فاصله، نوسانات زیادی در فشار انتهایی لوله ایجاد نشده است؛ مانند فاصله (S1) فشارهای  $۰.۶$ ،  $۰.۷$ ،  $۰.۸$  و  $۱.۰$  بار، فاصله (S2) فشارهای  $۰.۵$  و  $۰.۹$  و  $۱.۰$  بار، فاصله (S3) فشارهای  $۰.۹$  و  $۱.۰$  بار، که در آن‌ها نوسانات بسیار جزئی هستند.



شکل ۸) فرکانس نوسانات فشار انتهایی لوله (P) بر حسب فاصله بین نازل و لوله (S) بر اساس فشار ورودی به نازل (P0)

**تاییدیه اخلاقی:** محتویات علمی حاصل فعالیت‌های پژوهشی نویسندگان بوده و صحت نتایج آن نیز بر عهده نویسندگان مقاله است. همچنین تایید می‌شود که این مقاله در نشریه دیگری چاپ نشده و یا در دست بررسی برای چاپ نمی‌باشد.

**تعارض منافع:** در فرآیند انجام و گزارش، بی‌طرفی رعایت شده و تعارض منافی وجود نداشته است.

**منابع مالی:** منابع مالی توسط نویسندگان تامین شده است.

### منابع

- 1- Hartmann J. On a new method for the generation of sound-waves. *Physical Review*. 1922 Dec 1;20(6):719.
- 2- Marchese VP, Rakowsky EL, Bement LJ. A fluidic sounding rocket motor ignition system. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1973 Nov;10(11):731-4.
- 3- Sprenger H. Thermal effects in resonance tubes. 1. *Atomic Energy Research Establishment*; 1956.
- 4- Hall IM, Berry CJ. On the heating effect in a resonance tube. *Journal of the Aerospace Sciences*. 1959 Apr;26(4):253-.
- 5- P. A. Thompson, "Resonance Tubes, Ph. D. Thesis," Massachusetts Institute of Technology, 1960.
- 6- Saenger RA, Hudson GE. Periodic shock waves in resonating gas columns. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1960 Aug 1;32(8):961-70.
- 7- Phillips B, Pavli AJ, Conrad EW. A resonance igniter for hydrogen-oxygen combustors. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 1970 May;7(5):620-2.
- 8- Merkli P, Thomann H. Thermoacoustic effects in a resonance tube. *Journal of fluid mechanics*. 1975 Jul;70(1):161-77.
- 9- Sarohia V, Back LH. Experimental investigation of flow and heating in a resonance tube. *Journal of Fluid Mechanics*. 1979 Oct;94(4):649-72.
- 10- Chang SM, Lee S. On the jet regurgitant mode of a resonant tube. *Journal of Sound and Vibration*. 2001 Sep 27;246(4):567-81.
- 11- Sreejith GJ, Narayanan S, Jothi TJ, Srinivasan K. Studies on conical and cylindrical resonators. *Applied Acoustics*. 2008 Dec 1;69(12):1161-75.
- ۱۲- پارسا المیرا، افضلی بابک، کریمی حسن. بررسی تجربی عومل موثر بر عملکرد حرارتی دستگاه هارتمن-اسپرینجر، سیزدهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران. اسفند ۱۳۹۲.
- 13- Bauer Christian, Hauser Martin and Haidn Oskar J. "Investigation of Stabilization Effects in Hartmann-Sprenger Tubes." Institute for Flight Propulsion, Technische Universität München, Germany, 2015.
- 14- Afzali B, Karimi H. Numerical investigation on thermo-acoustic effects and flow characteristics in semi-conical Hartmann-Sprenger resonance tube. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2017 Dec;231(14):2706-22.
- 15- Thethy B, Tairy D, Edgington-Mitchell D. Mechanics of the influx phase in the jet regurgitant

۷- مقدار دما و نرخ افزایش آن در برخی موارد آنقدر بالا و شدید است که در صورت قطع نکردن جریان هوا، به تجهیزات اندازه‌گیری فشار آسیب وارد می‌گردد.

۸- عملکرد ترموکوپل و پاسخ زمانی آن جهت اندازه‌گیری دما اهمیت ویژه‌ای دارد. به علت نبودن ترموکوپل با پاسخ زمانی مناسب دقیقاً نمی‌توان مشخص نمود که مدت زمان رسیدن به دماهای بالا چقدر است و نرخ افزایش دما در انتهای لوله را تعیین کرد.

۹- در برخی از مقادیر فشار ورودی به نازل و یا فاصله‌های بین لوله و نازل، مقدار افزایش دما در لوله اندک و ناچیز می‌باشد. با تغییر مقدار پارامترهای اصلی مساله، وضعیت عملکردی دستگاه تغییر پیدا خواهد. با شروع آزمون و افزایش دمای انتهای لوله به محض تغییر مقدار فشار ورودی به نازل و یا فاصله نازل و لوله، مقدار دمای ایجاد شده در لوله کم و یا زیاد خواهد شد.

۱۰- عایق گرمایی بودن لوله تشدید و جلوگیری از اتلاف حرارت از آن نقش موثری در دستیابی به دماهای بالا در لوله دارد.

### فهرست علائم

علائم لاتین

C	میانگین سرعت صوت در لوله (m/s)
$d_0$	قطر دهانه ورودی نازل (mm)
$D_n$	قطر دهانه خروجی نازل (mm)
$f$	فرکانس (Hz)
D	قطر دهانه لوله تشدید (mm)
L	طول لوله تشدید (mm)
$P_0$	فشار ورودی به نازل (bar)
P	فشار انتهای لوله (bar)
S	فاصله نازل و لوله (mm)
$T_0$	دمای گاز ورودی به نازل (K)
T	دمای نقطه داخلی و انتهای لوله (K)
C	میانگین سرعت صوت در لوله (m/s)
$d_0$	قطر دهانه ورودی نازل (mm)
$D_n$	قطر دهانه خروجی نازل (mm)
$f$	فرکانس (Hz)
D	قطر دهانه لوله تشدید (mm)
L	طول لوله تشدید (mm)
$P_0$	فشار ورودی به نازل (bar)

علائم یونانی

$\alpha$	زاویه همگرایی نازل (درجه)
----------	---------------------------



- mode of a powered resonance tube. *International Journal of Aeroacoustics*. 2019 Apr;18(2-3):279-98.
- 16- Conte A, Ferrero A, Pastrone D. Numerical investigation for performance prediction of gas dynamic resonant igniters. *Advances in aircraft and spacecraft science*. 2020;7(5):425-40.
- 17- Shapiro AH. Shock waves and dissipation in a resonance tube. *Journal of the Aerospace Sciences*. 1959 Oct;26(10):684-5.
- 18- Sibulkin M. Experimental investigation of energy dissipation in a resonance tube. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik*. 1963 Nov;14:695-703.
- 19- Raman G, Srinivasan K. The powered resonance tube: From Hartmann's discovery to current active flow control applications. *Progress in Aerospace Sciences*. 2009 May 1;45(4-5):97-123.
- 20- Vorozheeva O.A. and Arefyev K.Y. «Numerical Analysis of the Thermal State of the Resonator in a Gas-Dynamic Ignition System with Two-Phase Fuel Composition. *journal of Higher Educational Institutions Engineering*, 2016: 91-100
- 21- Brocher E, Duport E. Resonance tubes in a subsonic flowfield. *AIAA journal*. 1988 May;26(5):548-52.