



بررسی موردی اثر پارامترهای فیزیکی لوله تشدید هارتمن - اسپرنجر مخروطی بر جریان داخلی و عملکرد حرارتی دستگاه

بابک افزالی¹، حسن کریمی^{2*}

1-دانشجوی دکترا، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2-دانشیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

*تهران، صندوق پستی 3381-16765، karimi@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 22 فروردین 1395

پذیرش: 03 خرداد 1395

ارائه در سایت: 30 خرداد 1395

کلید واژگان:

لوله تشدید مخروطی

جریان نوسانی

نوسانات شوک

تولید حرارت متمرکز

فرکانس تشدید

چکیده

لوله هارتمن-اسپرنجر دستگاهی است که در آن جریان جت فرومنیسط وارد لوله‌ای با انتهای بسته میشود که در فاصله مشخصی از نازل قرار گرفته است. در شرایط خاص، تولید حرارت متمرکز درون لوله قابل مشاهده است که منجر به افزایش دمای سریع درون لوله می‌شود و می‌تواند در کاربردهای مهندسی نظیر آتش‌زنه‌های آکوستیکی مورد استفاده قرار بگیرد. در پژوهش حاضر، عملکرد حرارتی دستگاه برای مجموعه‌ای از شش نمونه مختلف از لوله‌های تشدید با پارامترهای فیزیکی متفاوت مورد تحلیل قرار گرفته است. پارامترهای تغییر یافته عبارتند از جنس لوله، طول لوله، فاصله لوله از نازل و شرایط دیوار انتهای لوله که می‌تواند بصورت کاملاً بسته و یا همراه با یک سوراخ ریز برای استخراج گاز داغ باشد. در تمامی نمونه‌ها، شکل داخلی لوله بصورت مخروطی انتخاب شده است. مدل‌سازی عددی در کنار آزمایشات تجربی بر روی این نمونه‌ها انجام گرفته و نتایج برای بررسی تأثیر پارامترهای مذکور بر دمای قابل حصول در انتهای لوله و مکانیزم داخلی جریان مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که مهم‌ترین عامل افزایش دما، وجود جریان نوسانی همراه با عبور امواج شوک قوی درون لوله است. با تغییر فاصله لوله و نازل، جریان نوسانی حذف شده و اثری از افزایش دما مشاهده نمی‌شود. وجود یک سوراخ ریز در انتهای لوله همچون استفاده از لوله‌های کوتاه‌تر، باعث کاهش دمای قابل دستیابی درون لوله می‌شود. فرکانس نوسانات برای لوله‌های بلندتر نزدیک به فرکانس تشدید لوله است. همچنین استفاده از مواد با ضریب انتقال حرارت پایین، سبب افزایش دما درون لوله خواهد شد.

Case study on the effect of physical parameters on internal flow and thermal performance of a conical Hartmann-Sprenger tube

Babak Afzali, Hassan Karimi*

Department of Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

*P.O.B. 16765-3381, Tehran, Iran, karimi@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 10 April 2016

Accepted 23 May 2016

Available Online 19 June 2016

Keywords:

Conical H-S tube

Tube Geometry

Shock Wave Oscillation

Temperature Rise

Resonance Frequency

ABSTRACT

Hartmann-Sprenger tube is a device in which an under-expanded jet enters a closed-end tube which is placed in a specific distance from the nozzle. By producing an intensive heat inside the tube in some specific modes of operation, the device could be used for some important engineering applications such as acoustic igniters. In present study, thermal performances of a set of six different case studies with conical tubes and different physical specifications are investigated. The variable parameters are the pipe material, the pipe length, the gap distance and the end wall condition which could be closed or perforated. The experimental tests in conjunction with numerical analysis are performed to evaluate the effect of changes in physical parameters on temperature rise inside the tube. The oscillatory flow with strong shock waves is the major reason of temperature rise inside the tube. As the gap distance changes, no oscillatory flow and no sensible temperature rise could be observed. Existence of a tiny hole on the tube end wall reduces the temperature rise, as the shorter tube does. The frequency of oscillations is near the tube resonance frequency for longer tubes. Tubes that are made of materials with lower thermal conductivity could produce higher temperatures.

1- مقدمه

افزایش دمای متمرکز درون لوله خواهد بود. در لوله تشدید هارتمن-اسپرنجر، یک جریان جت (معمولاً از نوع فرومنیسط) با ورود به دهانه لوله‌ای با انتهای بسته که درست در مقابل نازل، هم محور با آن و در فاصله مشخصی از نازل قرار گرفته است، باعث ایجاد یک شوک متحنی شکل در دهانه لوله می‌شود. شکل 1 نمای ظاهری دستگاه لوله هارتمن-اسپرنجر را نشان می‌دهد. حضور

لوله تشدید دستگاهی است که به وسیله تشدید نوسانات تولیدی در دسته‌ای از امواج تراکمی، امواج صوتی با فرکانس بالا تولید می‌کند. لوله تشدید هارتمن-اسپرنجر دستگاهی است که در آن شرایط خاصی از لوله تشدید منجر به تولید نوسانات قوی امواج تراکمی درون یک لوله شده و نتیجه آن

Please cite this article using:

B. Afzali, H. Karimi, Case study on the effect of physical parameters on internal flow and thermal performance of a conical Hartmann-Sprenger tube, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 189-198, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.SID.ir

نسبت به رژیم جریان برون ریز از قدرت کمتری برخوردار هستند. فرکانس نوسانات رژیم اسکریچ به مراتب بالاتر از فرکانس تشدید لوله بوده و مستقل از طول لوله است.

بروشر و کاواهاشی [11] تأثیر تغییرات شکل داخلی لوله تشدید را بر عملکرد حرارتی دستگاه مورد مطالعه قرار دادند. همچنین، بروشر و آردیسون [12] اثرات استفاده از لوله‌های با مقطع کاهنده به صورت پله‌ای یا به شکل مخروطی را بررسی کرده و مزایای استفاده از این لوله‌ها را در افزایش دمای قابل حصول در دستگاه اعلام نمودند. آنها همچنین بر استفاده از گازهای با جرم مولکولی پایین برای دستیابی به دماهای بسیار بالا (بالاتر از 1000 کلوین) تأکید نمودند. پالم [13] به همراه مانسون و بایندر [14] پیشنهاداتی برای نسبت قطر لوله تشدید به قطر نازل در محدوده 1.1 تا 1.25 ارائه داده‌اند. کاستنر و سمیمی [15] به همراه رامان و همکارانش [16] به این نتیجه رسیدند که با افزایش فاصله بین نازل و لوله، حداقل فشار سکون مورد نیاز برای رسیدن به یک دمای مشخص افزایش می‌یابد.

شانگ و لی [17] رژیم کاری برون ریز را درون یک لوله‌ی تشدید هارتمن-اسپرنجر مطالعه نمودند. آن‌ها یک مدل مفهومی ساده شده از لوله‌ی هارتمن-اسپرنجر را با فرض تحریک سینوسی یک پیستون با فرکانس تعیین شده در دهانه لوله تشکیل داده و معادلات اوپلر متقارن محوری را برای این جریان به روش عددی حل نمودند. آنها تأثیر چهار پارامتر اصلی و مهم شامل فرکانس نوسانات، عدد ماخ جریان، فاصله‌ی میان منبع نوسان تا ورودی لوله و نسبت طول به قطر لوله را بر مشخصات جریان بررسی کردند. آنها نشان دادند که مهم‌ترین عوامل تأثیر گذار بر فرکانس تشدید سیستم (در رژیم برون ریز)، در درجه‌ی اول طول لوله و در درجه‌ی دوم فاصله‌ی لوله از منبع تولید نوسانات می‌باشد.

حامد و همکارانش [18,19] و نیز موروگاپان و گانمارک [20] به شبیه‌سازی جریان ناپایدار درون لوله‌ی تشدید با استفاده از روش‌های عددی و فرضیاتی نظیر جریان دو بعدی متقارن و با اعمال مدل‌های توربولانسی دو متغیره پرداختند. ژیا، لی و مرکل [21] جریان درون لوله تشدید را برای یک دستگاه لوله هارتمن-اسپرنجر خاص که درون یک مجرای غلاف مانند قرار داشت، در حضور یک میله راهنما در مرکز نازل، به روش‌های عددی بررسی کرده و نتایج تحلیل‌های خود را ارائه نمودند. آن‌ها نشان دادند که اولاً حضور غلاف به تولید جریان پالسی کمک می‌کند. ثانیاً حضور میله راهنما در مرکز نازل می‌تواند رژیم عملکردی دستگاه را متحول کند. نویسندگان مقاله حاضر نیز پیش‌تر در مقاله‌ای جداگانه [22] به تحلیل عددی جریان و مکانیزم تولید حرارت در یک لوله تشدید هارتمن-اسپرنجر پرداخته‌اند. آنها نشان دادند که عامل اصلی تولید حرارت درون لوله تشدید، عبور دوره‌ای امواج تراکمی از نقاط درون لوله و مکانیزم اصلی اتلاف حرارت، جابجایی جرم و انتقال حرارت از دیواره‌های لوله است. همچنین نمودارهای سرعت، فشار و دما در حین حرکت موج در دوره‌های مختلف فرآیند داخلی جریان در این مقاله ارائه شده است که نشان‌دهنده نحوه تعامل جریان داخلی و خارجی جریان می‌باشد.

شایان ذکر است که در توصیف تئوری رژیم جریان برون ریز، به نوسان جریان با فرکانس تشدید لوله⁴ اشاره می‌شود [8,17-19] که معادل فرکانس صدای تولید شده از تحریک صوتی یا ارتعاشاتی یک لوله توخالی است [23]. فرکانس تشدید لوله از رابطه (1) قابل محاسبه است. در این رابطه، W سرعت متوسط صوت بر حسب متر بر ثانیه و L طول لوله بر حسب متر است. C_s نیز

شوک منحنی شکل در دهانه لوله در شرایطی اتفاق می‌افتد که لوله تشدید در مناطق ناپایداری جت قرار گیرد [1]. این مناطق ناپایداری در واقع مناطقی هستند که تغییرات فشار سکون در آنها با نرخ مثبت انجام می‌شود. این شرایط منجر به تولید یک جریان نوسانی خاص درون لوله می‌شود که با عبور متناوب امواج تراکمی قوی درون لوله همراه است. نتیجه این فرآیند، افزایش متمرکز دمای گاز در بخش انتهایی لوله تشدید خواهد بود.

پدیده لوله تشدید برای اولین بار توسط هارتمن [1] کشف گردید. این در حالی است که توجه محققین به اثرات حرارتی دستگاه مدیون آزمایشات تجربی اسپرنجر [2] است. امروزه می‌توان گفت که یکی از مهم‌ترین کاربردهای عملی دستگاه در حوزه اثرات حرارتی متعلق به آتش‌زنه‌های گازدینامیکی است [3-5]. البته شایان ذکر است که در دستگاه لوله تشدید هارتمن-اسپرنجر، علاوه بر تولید حرارت متمرکز، یک جریان متناوب در اطراف لوله تشدید با فرکانس بالا (در رژیم‌های کارکردی خاص) قابل تولید است. محققان زیادی در خصوص استفاده از این جریان متناوب در عمل‌گرهای مکانیکی فرکانس بالا¹ تحقیق کرده و نتایج جالب توجهی در این خصوص بدست آورده‌اند [4,6-8]. رامان و همکارش [4] در سال 2009 میلادی مروری بر تمامی فعالیت‌های مهم انجام شده بر روی دستگاه لوله تشدید هارتمن-اسپرنجر از بدو اکتشاف تا کاربردهای مختلف این لوله در دستگاه‌های مختلف در سال‌های اخیر داشته‌اند.

ساروهیا و بک [9,10] با توجه به مشخصات لوله، فاصله‌ی بین نازل و لوله و نیز عدد ماخ جریان، سه رژیم مختلف را برای دستگاه معرفی کردند. در رژیم اول که به ناپایداری جت شهرت دارد، حرکت گردابه‌ها به سمت لوله منجر به تشکیل امواج تراکمی ضعیفی خواهد شد که توان افزایش دمای گاز را نخواهند داشت. دومین رژیم جریان برون ریز² نام دارد که در حضور جت فرومنبسط اتفاق می‌افتد. در این رژیم، جریان جت در دهانه لوله به همراه یک شوک منحنی شکل به حرکت نوسانی می‌پردازد. در طی این حرکت نوسانی، بخشی از جت گازی به طور متناوب در دهانه‌ی لوله‌ی تشدید بلعیده شده و از آن بیرون می‌ریزد. به دلیل ورود شوک به داخل لوله و حرکت نوسانی آن درون لوله، امکان افزایش دما در انتهای لوله در رژیم جریان برون ریز وجود دارد. فرکانس نوسانات و دمای قابل حصول گاز درون لوله به فاصله لوله از نازل، مشخصات جریان جت و مشخصات لوله تشدید نظیر طول لوله وابسته است. رژیم سوم عملکردی دستگاه نیز رژیم اسکریچ³ یا جیغ است که به دلیل بروز پدیده‌ی تشدید بین یک موج ضربه‌ای نوسان کننده (مستقر در دهانه‌ی لوله) و شبکه‌ای از سلول‌های موج ضربه‌ای در جریان جت خروجی از نازل است. در رژیم اسکریچ، تبادل جریان جرم درون لوله به شدت کاهش می‌یابد و این امر منجر به گرم شدن شدید گاز درون لوله می‌شود. این در حالی است که امواج گذر کننده از جریان محبوس درون لوله

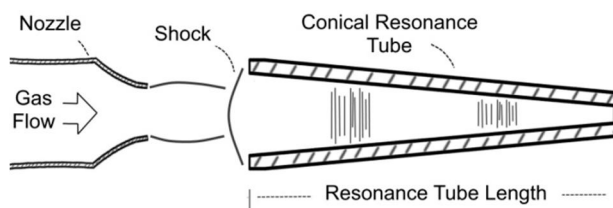


Fig. 1 Schematic view of Hartmann-Sprenger resonance tube

شکل 1 نمای ظاهری لوله تشدید هارتمن-اسپرنجر و مکانیزم جریان

¹ High Frequency Actuators

² Jet Regurgitant Mode

³ Jet Screech Mode

⁴ Tube Resonance Frequency

جدول 1 مشخصات اصلی نمونه‌های مطالعه شده

Table 1 Major properties of the studied cases

| نمونه شماره | جنس لوله | طول لوله (mm) | فاصله میان نازل قطر سوراخ انتهایی لوله و لوله (mm) | قطر سوراخ انتهایی لوله (mm) |
|-------------|--------------|---------------|--|-----------------------------|
| 1 | پلیمر نسوز | 48 | 13.5 | - |
| 2 | استیل ضد زنگ | 48 | 13.5 | - |
| 3 | پلیمر نسوز | 48 | 13.5 | 0.4 |
| 4 | پلیمر نسوز | 48 | 20.5 | - |
| 5 | پلیمر نسوز | 48 | 9 | - |
| 6 | پلیمر نسوز | 38 | 13.5 | - |

3- تشریح مدل تجربی

به منظور تحلیل تجربی اثر تغییر پارامترهای فیزیکی بر عملکرد حرارتی دستگاه، یک نمونه آزمایشگاهی از دستگاه لوله هارتمن-اسپرنجر با قابلیت تغییر پارامترهای فیزیکی ذکر شده به صورت آزمایشگاهی ساخته شده است. دستگاه ساخته شده، از دو بخش اصلی تشکیل می‌شود که بر روی پایه‌های متحرک قرار گرفته و فاصله آنها از یکدیگر قابل تنظیم است. بخش اول شامل یک نازل همگرا به همراه تجهیزات تأمین هوای فشرده است. بخش دوم نیز شامل یک لوله تشدید با قابلیت تعویض به همراه تجهیزات داده‌برداری دمایی در انتهای لوله است. برای سنجش دمای متوسط انتهای لوله از دماسنج تیپ K استفاده می‌شود. همچنین صدای تولید شده از دستگاه در حین کار توسط یک میکروفون حرفه‌ای² ضبط شده و مورد تحلیل قرار می‌گیرد. گاز عامل مورد استفاده در آزمایشات هوای فشرده در دمای 300 کلین می‌باشد. شمای دستگاه مورد اشاره در شکل 2 نشان داده شده است.

بر اساس داده‌های تجربی، بیشترین دمای انتهای لوله به میزان 731 کلین در لوله نمونه شماره 1 از جنس PTFE ثبت شده است. سایر نتایج تجربی بدست آمده متعاقباً مورد بحث و تحلیل قرار خواهد گرفت.

4- تشریح مدل حل عددی

معادلات حاکم بر جریان در روش حل عددی، معادلات حرکت ناویر-استوکس جریان دو بعدی تراکم پذیر لزج در کنار معادلات پیوستگی و انرژی است. این دسته معادلات مطابق روابط (2) تا (5) خواهند بود. همچنین به منظور بررسی اثرات اغتشاشی جریان، مدل اغتشاش دو متغیره $k-\epsilon$ تقویت شده در

جدول 2 مشخصات سایر پارامترهای استفاده شده در نمونه‌های تجربی و عددی

Table 2 Physical specification of numerical and experimental cases

| پارامتر | مقدار | واحد |
|--------------------------|-------|---------|
| قطر خروجی نازل D_n | 5 | (mm) |
| قطر ورودی لوله D | 6.3 | (mm) |
| قطر انتهای لوله d | 1.4 | (mm) |
| نسبت ورودی به خروجی نازل | 7.5 | - |
| جنس گاز | هوا | - |
| نسبت فشار نازل | 11 | - |
| دمای سکون ورودی | 300 | (K) |
| دمای محیط | 300 | (K) |
| ضریب انتقال حرارت PTFE | 0.25 | (W/m.K) |
| ضریب انتقال حرارت Steel | 16 | (W/m.K) |
| ضخامت لوله | 1 | (mm) |

ضریب شکل لوله است که برای لوله‌های استوانه‌ای با انتهای بسته برابر 4 و برای لوله‌های استوانه‌ای با انتهای باز برابر 2 خواهد بود.

$$f = \frac{W}{C_s L} \quad (1)$$

فرکانس تشدید برای لوله‌های مخروطی شکل نسبت به لوله‌های استوانه‌ای با طول مشابه بالاتر است [24]. محاسبه دقیق فرکانس تشدید برای لوله‌های مخروطی پیچیدگی زیادی دارد. به همین دلیل با اعمال کمی ساده‌سازی، می‌توان فرض نمود که فرکانس تشدید برای لوله‌هایی به شکل مخروط کامل، تقریباً مشابه لوله‌های استوانه‌ای با انتهای باز است [25].

پارامترهای مهم تأثیرگذار بر عملکرد حرارتی لوله هارتمن-اسپرنجر به طور خلاصه مشتمل بر قطر خروجی نازل، قطر داخلی لوله تشدید، طول لوله تشدید، جنس لوله تشدید، فاصله لوله از نازل، نسبت فشار نازل، جنس گاز عامل و هندسه داخلی لوله تشدید هستند. در پژوهش حاضر، مجموعه‌ای از شش نمونه مختلف از دستگاه لوله هارتمن-اسپرنجر معرفی شده و مورد تحلیل تجربی و عددی قرار خواهند گرفت. هدف از انجام این تحلیل‌ها، بررسی چگونگی اثر تغییرات هندسه، جنس و محل قرار گرفتن لوله بر مکانیزم تولید حرارت، فرآیندهای داخلی و در نهایت عملکرد حرارتی دستگاه و حداکثر دمای قابل حصول در انتهای لوله تشدید خواهد بود. نتایج تحلیل‌ها به انتخاب مناسب‌تر پارامترهای دستگاه به منظور افزایش بهره‌وری در کاربردهای حرارتی منجر خواهد شد.

2- معرفی نمونه‌های مطالعاتی

به منظور بررسی اثرات تغییر پارامترهای فیزیکی بر عملکرد حرارتی دستگاه لوله هارتمن-اسپرنجر، مجموعه‌ای از شش نمونه مطالعاتی تعریف شده است. متغیرهایی که در این نمونه‌ها تغییر می‌کنند شامل جنس لوله، طول لوله، فاصله بین نازل و لوله و نیز وضعیت دیوار انتهای لوله است که می‌تواند کاملاً بسته و یا به همراه یک سوراخ بسیار ریز جهت استخراج گاز داغ باشد. جنس لوله از استیل ضد زنگ و یا نوعی پلیمر تجاری نسوز با نام PTFE¹ ساخته می‌شود. لازم به ذکر است که مشخصات سیال عامل نظیر جنس گاز و دمای سکون آن در این پژوهش مانند مشخصات نازل نظیر نسبت فشار و قطر دهانه خروجی ثابت در نظر گرفته می‌شوند. خلاصه وضعیت پارامترهای فیزیکی متغیر در مجموعه شش نمونه مطالعاتی تعریف شده به شرح جدول 1 است.

هندسه لوله و نازل به همراه مشخصات جریان بالادست در نمونه‌های شماره 1 و 2 مشابه مشخصات پیشنهادی برای رسیدن به افزایش دما در رژیم جریان برون‌ریز انتخاب شده است [5,3]. در اینجا تفاوت این دو نمونه در جنس لوله تشدید لحاظ شده است. مابقی نمونه‌ها به گونه‌ای تعریف می‌شوند که اثر تغییرات پارامترهای فیزیکی مؤثر بر دمای بیشینه قابل حصول در انتهای لوله با توجه به مشخصات ثابت گاز و نازل مورد آزمایش قرار گیرد. وجود نشتی در جریان انتهای دیواره لوله با قرار دادن یک سوراخ بسیار ریز در نمونه شماره 3 مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نمونه‌های شماره 4 و 5، فاصله لوله از نازل به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. در نمونه شماره 6 نیز اثر استفاده از لوله کوتاه‌تر بررسی می‌شود. سایر مشخصات فیزیکی و ترمودینامیکی برای نمونه‌های شش گانه مشابه یکدیگر و مطابق اطلاعات جدول 2 است. به منظور بررسی اثر تغییر پارامترهای فیزیکی منتخب در نمونه‌های مورد مطالعه، از تحلیل‌های عددی و تجربی در کنار یکدیگر استفاده خواهد شد.

² Random incidence microphone-model: PCB-HT378C20

¹ Poly Tetra Fluoro Ethylene

که

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r}$$

و معادله انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{V}(\rho E + P)) = \nabla \cdot (Q_{cond} + Q_{diff} + Q_{diss}) \quad (5)$$

در این معادلات چگالی، ρ سرعت، V فشار و μ لزجت جریان می‌باشند. t پارامتر زمان است. x فاصله طولی از مبدأ مختصات و r نیز فاصله شعاعی از محور تقارن هستند. جهات اصلی محورهای مختصات در شکل 4 نشان داده شده‌اند. مبدأ مختصات در محل تقاطع محور تقارن و صفحه ورودی نازل قرار گرفته است. در معادله انرژی، E انرژی داخلی جریان است که از سه بخش انتالپی، انرژی پتانسیل فشاری و انرژی جنبشی سیال تشکیل می‌شود. ترم‌های سمت راست معادله انرژی نیز به ترتیب حرارت منتقل شده در اثر هدایت حرارتی، حرارت ناشی از نفوذ شار جرمی و حرارت تولید شده به دنبال اتلافات لزجی است [26].

مشخصات هندسی مدل و جریان بالادست مطابق مشخصات نمونه‌های تعریف شده و بر اساس اطلاعات جدول 1 و 2 می‌باشد. همچنین شرایط مرزی اعمال شده بر جریان مورد نظر در بیان کلی به شرح جدول 3 است. شایان ذکر است که دامنه حل تشریح شده در شکل 3، به کمک ابزارهای رایانه‌ای شبکه‌بندی می‌شود. این شبکه‌بندی به گونه‌ای انجام می‌گیرد که در درجه اول بیشترین دقت حل بخصوص در نواحی جریان داخل لوله و جریان مابین لوله و نازل بدست آید. در درجه دوم نیز سعی شده است تا حتی‌المقدور از شبکه با سلول‌های چهاروجهی مستطیلی استفاده گردد تا محاسبات ساده‌تر انجام گیرد. جدول 4 مشخصات شبکه‌بندی انجام شده را به صورت تقریبی نشان می‌دهد.

حل عددی جریان در نرم‌افزار انسیس فلونت¹ و به کمک روش‌های پردازش موازی انجام شده است. روش حل معادلات حاکم به بر مبنای چگالی جریان و گسسته‌سازی معادلات با روش آپویند مرتبه دو² انجام می‌شود. به دلیل وجود نوسانات شدید و ناگهانی پارامترهای جریان در اثر عبور امواج ضربه‌ای در مسأله مورد بحث و نیز به منظور مشاهده کامل نوسانات، گام

جدول 3 شرایط مرزی اعمال شده به مدل حل عددی

Table 3 Boundary conditions of numerical model

| مقطع مرزی | نوع شرط مرزی |
|-----------------|--------------------------------------|
| مقطع ورودی نازل | ورودی فشار ثابت و دما ثابت |
| خط مرکزی لوله | محور تقارن |
| دیواره لوله | دیوار با انتقال حرارت و شرط عدم لغزش |
| دیواره نازل | دیواره آدیاباتیک و شرط عدم لغزش |
| مرز محیطی اطراف | جریان فشار ثابت دور دست |

جدول 4 مشخصات دانه‌بندی انجام شده در میدان حل

Table 4 Mesh specifications within calculation domain

| منطقه حل | تعداد گره‌ها (تقریبی) |
|--------------------|-----------------------|
| نازل | 12000 |
| فاصله نازل تا لوله | 50000 |
| داخل لوله تشدید | 45000 |
| محیط اطراف | 20000 |

¹ANSYS FLUENT version 6.3

²Second order upwind method

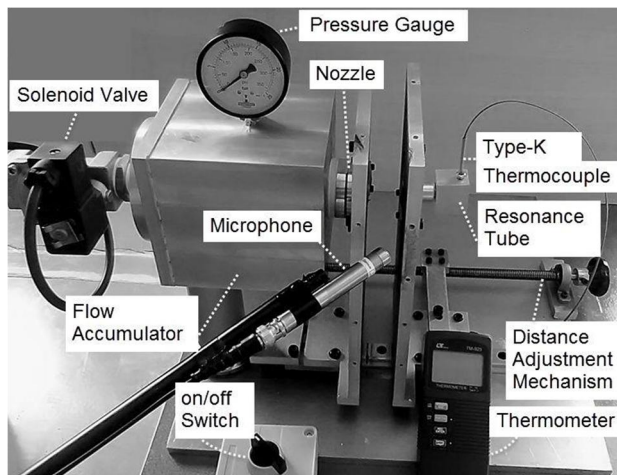


Fig. 2 Schematic view of Hartmann-Sprenger device test stand

شکل 2 شمای ظاهری میز آزمایش دستگاه لوله هارتمن - اسپرنجر

نزدیکی دیواره‌ها به معادلات حرکت اضافه شده است. دامنه حل جریان نیز مطابق شکل 3 در نظر گرفته می‌شود. در این شکل، ΔS معرف فاصله لوله از نازل، L طول لوله، D قطر ورودی لوله، d قطر دیواره انتهایی لوله، D_n قطر نازل، P_0 فشار سکون و T_0 دمای سکون جریان ورودی هستند. جهت طولی با x و جهت شعاعی نیز با r نمایش داده شده‌اند.

معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho V_r) + \frac{\rho V_r}{r} = 0 \quad (2)$$

معادله مومنتم در جهت حرکت طولی (x):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho V_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho V_x V_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho V_r V_x) \\ = -\frac{\partial P}{\partial x} \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{V}) \right) \right] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial V_x}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

معادله مومنتم در جهت حرکت شعاعی (r):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho V_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho V_x V_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho V_r V_r) \\ = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial V_r}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial r} \right) \right] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial V_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{V}) \right) \right] \\ - 2\mu \frac{V_r}{r^2} + \frac{2\mu}{3r} (\nabla \cdot \vec{V}) \end{aligned} \quad (4)$$

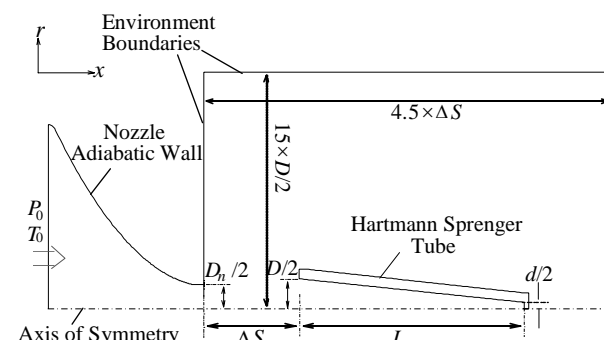


Fig. 3 Flow domain of numerical model

شکل 3 مسأله تعریف شده در نرم‌افزار حل عددی

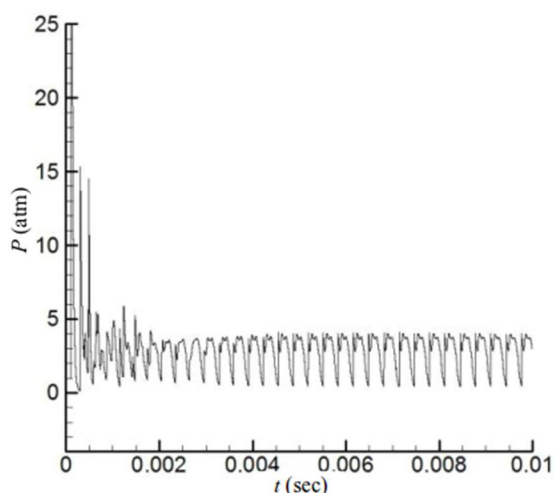


Fig. 5 Numerical results for pressure data at the point near the end wall (P_3) vs. time

شکل 5 نتایج حل عددی برای تغییرات فشار نسبت به زمان فرآیند در نزدیکی دیواره (نقطه P_3) از نمونه شماره 1

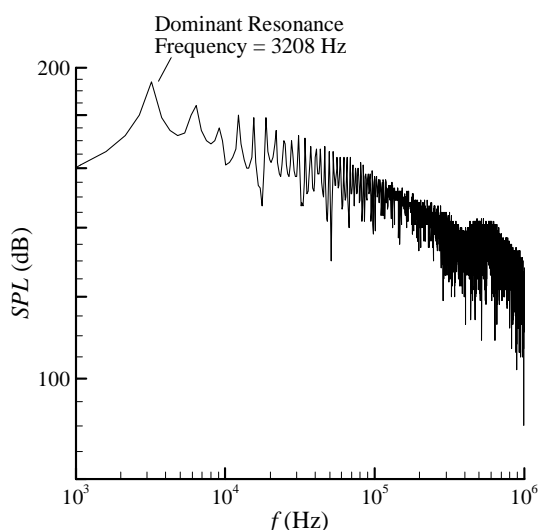


Fig. 6 FFT analysis of pressure data at the point near the end wall (P_3) in case 1

شکل 6 تحلیل FFT از داده‌های تغییرات فشار بر حسب زمان در نزدیکی دیواره (نقطه P_3) از نمونه شماره 1

تقریباً معادل 5 میلی ثانیه قابل مشاهده است. متوسط دما در بخش شبه پایدار این نمودارها تقریباً ثابت است. در این نمونه‌ها، سطح دمای متوسط در انتهای لوله نسبت به دمای گاز ورودی، به وضوح در مقدار بالاتری قرار دارد و انباشت حرارت به همراه افزایش دما در انتهای لوله قابل مشاهده است. این در حالی است که روند نوسانی دما در نمونه‌های شماره 4 و 5 قابل مشاهده نیست. در واقع شرایط هندسی نمونه‌های شماره 4 و 5 به گونه‌ای است که باعث می‌شود نوسانات جریان ماندگار نباشند. این بدان معناست که نمونه‌های شماره 4 و 5 در رژیم عملکردی جریان برون‌ریز قرار نمی‌گیرند. به همین علت نیز افزایش دمایی خاصی در خصوص این نمونه‌ها قابل مشاهده نیست. این مسأله به دلیل تغییر فاصله بین نازل و لوله تشدید اتفاق می‌افتد. در حقیقت در نمونه‌های 4 و 5، دهانه لوله تشدید در مناطق ناپایداری جریان جت قرار نگرفته است.

مقایسه شکل 7-a با شکل 7-c نشان می‌دهد که حضور سوراخ ریز در

زمانی در حل عددی نمونه‌ها از مرتبه بسیار پایین (در حدود 2×10^{-8}) انتخاب شده است. حل عددی برای تمامی نمونه‌ها با ورود جریان تحت فشار به مقطع ورودی نازل آغاز شده و با رسیدن به شرایط شبه‌دائم (پایداری نوسانات در پارامترهای جریان) به پایان می‌رسد. به منظور بررسی شرایط مختلف جریان در نقاط مختلف لوله تشدید، چهار نقطه نمونه در طول محور لوله انتخاب شده‌اند. نمای ظاهری از محل قرار گرفتن این نقاط در طول لوله در شکل 4 نشان داده شده است. در جدول 5 نیز نسبت فاصله نقاط از دهانه لوله به طول لوله نمایش داده شده است. x_p/L معرف فاصله نقاط از دهانه ورودی لوله است.

5- نتایج حل عددی

نتایج حل عددی برای تغییرات فشار بر حسب زمان در نقطه P_3 درون لوله تشدید در نمونه شماره 1 در شکل 5 نشان داده شده است. همانطور که از شکل 5 مشخص است، جریان در طول لوله یک فرآیند نوسانی را طی می‌کند. در شکل 6، تحلیل فوری سریع¹ از داده‌های نشان داده شده در شکل 5 ارائه شده است. بر اساس اطلاعات شکل 6، فرکانس غالب در نوسانات ثبت شده از تحلیل عددی برای نمونه شماره 1 معادل 3208 هرتز است. این در حالی است که بر اساس رابطه (1)، فرکانس تشدید لوله برای نمونه شماره 1 در حدود 3330 هرتز به دست می‌آید. همچنین بر اساس تحلیل داده‌های تجربی حاصل از ثبت اطلاعات صوتی توسط میکروفون محل آزمایش، فرکانس صوت منتشر شده از دستگاه در آزمایش تجربی معادل 3172 هرتز ثبت شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تطابق قابل قبولی بین سه فرکانس مذکور وجود دارد.

تغییرات دما در نزدیکی دیوار انتهای لوله در نقطه P_3 بر اساس نتایج حاصل از تحلیل عددی نمونه‌های شش‌گانه در شکل 7 نشان داده شده است. همچنین تغییرات دما در نقطه P_4 برای نمونه شماره 3 (لوله سوراخ‌دار) در شکل 8 نشان داده شده است. این در حالی است که مقدار دمای متوسط گاز مستخرج از سوراخ ریز انتهای لوله در نمونه شماره 3 بر اساس آزمایشات تجربی معادل 342 کلوین گزارش می‌شود.

همانطور که از نمودارهای شکل 7 مشخص است، دمای گاز در نزدیکی انتهای لوله در نمونه‌های شماره 1، 2، 3 و 6 در بازه زمانی جریان شبه‌پایدار ($t > 5 \text{ ms}$) دارای ماهیتی نوسانی با مقادیر تکراری متناسب با نوسانات جریان است. بخش شبه‌پایدار در چهار نمونه مذکور پس از گذشت زمانی

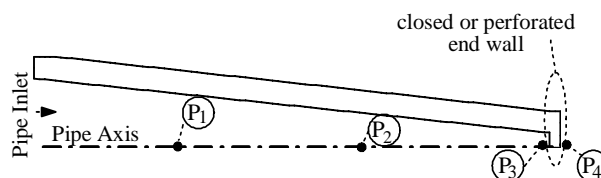


Fig. 4 Locations of selected points (P_1 to P_4) along the tube axis
شکل 4 محل قرار گرفتن نقاط تحلیلی (P_4 تا P_1) در طول لوله تشدید

جدول 5 مشخصات موقعیت x_p/L نقاط تعریف شده درون لوله

Table 5 Ratio of x_p/L for the selected points along the tube axis

| نقطه | نسبت x_p/L |
|-------|--------------|
| P_1 | 0.32 |
| P_2 | 0.65 |
| P_3 | 0.99 |
| P_4 | 1.04 |

¹ Fast Fourier Transform (FFT)

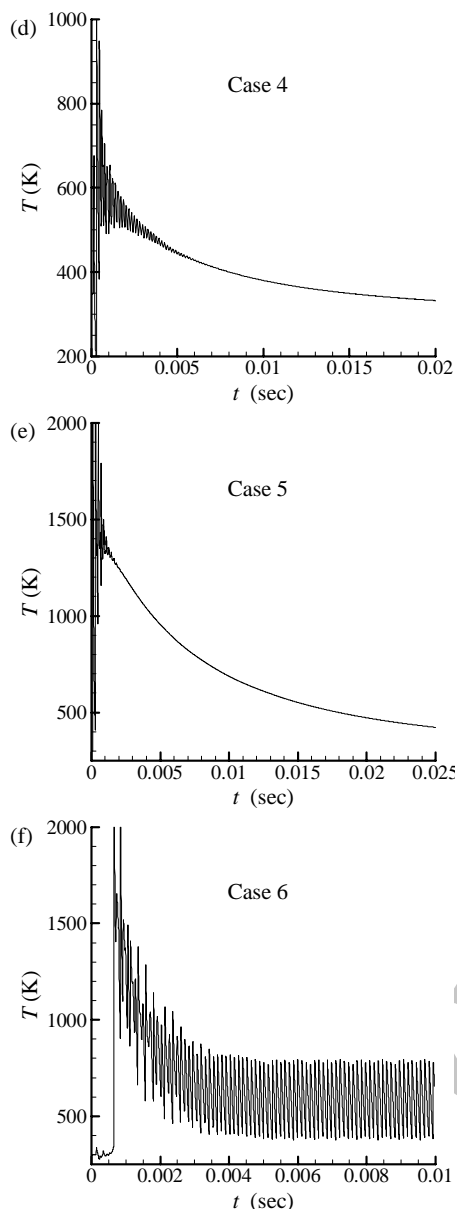


Fig. 7 Numerical results for temperature data at point P_3
 شکل 7 نتایج حل عددی برای تغییرات دما در نقطه P_3 در طول زمان فرآیند

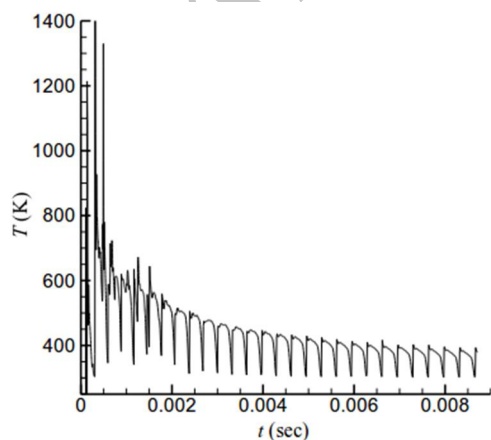
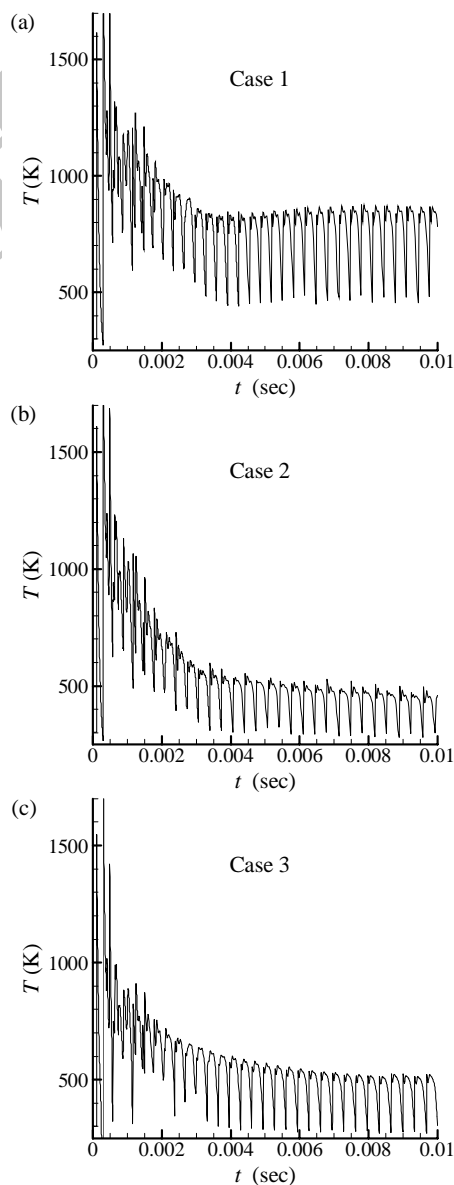


Fig. 8 Numerical results of temperature data vs. time for the extracted gas at point P_4 for case 3
 شکل 8 نتایج حل عددی برای تغییرات دمای گاز استخراج شده از سوراخ دیوار انتهای لوله (نقطه P_4) در نمونه شماره 3

دیوار انتهای لوله، به شرط ریز بودن سوراخ تغییری در ماهیت نوسانی جریان ایجاد نمی‌کند. لکن به دلیل استخراج گاز داغ محبوس در انتهای لوله، انباشت حرارتی در مقطع انتهای لوله تضعیف شده و دمای متوسط گاز در انتهای لوله کاهش می‌یابد. هرچند دمای متوسط انتهای لوله در نمونه شماره 3 نسبت به نمونه 1 افت محسوسی دارد، اما همچنان نسبت به نمونه شماره 2 که در آن از لوله با جنس استیل و ضریب انتقال حرارت بالا نسبت به پلیمر نسوز استفاده شده است بالاتر است. این مسأله نشان می‌دهد که تأثیر جنس لوله از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. متوسط دمای گاز استخراج شده از انتهای باز لوله در نمونه شماره 3 از نتایج تحلیل عددی و بر اساس نمودار شکل 8 معادل 363 کلوین در نقطه P_4 بدست آمده است. این دما نسبت به دمای ثبت شده در آزمایشات (342 کلوین) اختلاف چندانی ندارد.

مقدار دمای متوسط محاسبه شده در بخش شبه دائم از نمودارهای حل عددی در جدول 6 ارائه شده است. نتایج تجربی برای داده‌های ثبت شده از دمای انتهای لوله در نمونه‌های مورد بحث نیز در همین جدول ارائه شده است. همانطور که اشاره شد، دماهای استخراج شده از حل عددی معادل



نوسانات ریاضی نوسانات دما در بخش شبه پایدار حل (با در نظر گرفتن حداقل 10 دوره تکرار نوسانات) بوده و دماهای گزارش شده از آزمایشات تجربی معادل حداکثر دمای قابل دستیابی در انتهای لوله است. به این ترتیب دماها در حل عددی پس از گذشت حدود 5 میلی ثانیه و در آزمایشات با توجه به پاسخ زمانی دماسنج‌ها، در حدود 3 الی 5 ثانیه گزارش شده است. با توجه به اطلاعات جدول 6، حداکثر اختلاف دمای 8 درصدی میان داده‌های تجربی و عددی در این جدول قابل مشاهده است. همچنین بیشینه افزایش دمای انتهای لوله متعلق به نمونه شماره 1 است. مقدار این دمای بیشینه 770 کلوین از نتایج حل عددی و 731 کلوین از نتایج تجربی گزارش شده است. اختلاف دمایی 39 پله‌ای در مقیاس کلوین را می‌توان ناشی از عواملی چون رطوبت هوای محل آزمایش، خطای دمای ورودی، خطا در محل نصب دماسنج و ساده‌سازی‌های اعمال شده در شبیه‌سازی عددی مسأله دانست. مقادیر فرکانس محاسبه شده از تحلیل فوریه سریع نمودارهای فشار-زمان بدست آمده از حل عددی مسأله در نقطه P_3 برای نمونه‌های شماره 1، 2، 3 و 6 در جدول 7 ارائه شده است.

داده‌های تجربی برای فرکانس غالب در دامنه صوتی بدست‌آمده از تحلیل آکوستیکی امواج صوتی دستگاه در حین کار نیز برای نمونه‌های مذکور در همین جدول ارائه شده است. داده‌های جدول 7 نشان می‌دهد که فرکانس نوسانات محاسبه شده از تحلیل عددی برای نمونه‌های شماره 1، 2 و 3 با طول لوله یکسان، نزدیک به یکدیگر بوده و تطابق نسبتاً خوبی با داده‌های تجربی و نیز مقادیر بدست آمده از رابطه (1) (معادل 3330 هرتز برای لوله با طول 48 میلیمتر) با مبنای تحلیلی دارند. مشاهده می‌شود که تغییر جنس لوله تشدید تأثیری بر فرکانس تشدید لوله یا به عبارت دیگر فرکانس غالب نوسانات منتشر شده ندارد. البته ایجاد سوراخ ریز در دیواره انتهای لوله جهت استخراج بخش اندکی از گاز داغ منجر به کاهش فرکانس

6- تحلیل جریان درون لوله تشدید

در این بخش، نتایج بدست‌آمده از حل عددی جریان در نمونه‌های انتخابی مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که کلیه تحلیل‌ها در بخش شبه دائم جریان (بعد از زمان 5 میلی ثانیه) انجام شده است.

شکل 10 تغییرات بردارهای سرعت درون لوله تشدید مخروطی را برای نمونه شماره 1 در هشت بازه زمانی مختلف و در طول دوره تعویض رژیم جریان از سیکل تخلیه تا ابتدای سیکل پر شدن لوله نشان می‌دهد. چگالی بردارهای سرعت در هر منطقه، نشان‌دهنده متوسط اندازه سرعت در آن منطقه است. همچنین علامت (مثبت، منفی یا صفر) بردارهای سرعت در بخش‌های مختلف لوله در هریک از تصاویر هشت گانه شکل 10 نمایش داده شده است. همانطور که از تصاویر شکل 10 مشخص است، حرکت جریان جت به سمت دهانه ورودی لوله منجر به ورود دسته‌ای از امواج تراکمی به درون

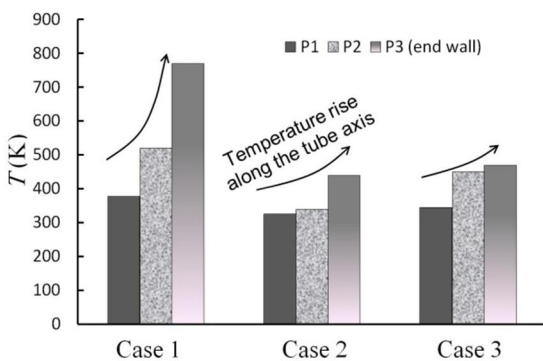


Fig. 9 Comparison of temperature rise behavior along the tube axis in case 1, 2 and 3

شکل 9 مقایسه نحوه افزایش دما در طول لوله برای نمونه‌های شماره 1، 2 و 3

داده‌های تجربی برای فرکانس غالب در دامنه صوتی بدست‌آمده از تحلیل آکوستیکی امواج صوتی دستگاه در حین کار نیز برای نمونه‌های مذکور در همین جدول ارائه شده است. داده‌های جدول 7 نشان می‌دهد که فرکانس نوسانات محاسبه شده از تحلیل عددی برای نمونه‌های شماره 1، 2 و 3 با طول لوله یکسان، نزدیک به یکدیگر بوده و تطابق نسبتاً خوبی با داده‌های تجربی و نیز مقادیر بدست آمده از رابطه (1) (معادل 3330 هرتز برای لوله با طول 48 میلیمتر) با مبنای تحلیلی دارند. مشاهده می‌شود که تغییر جنس لوله تشدید تأثیری بر فرکانس تشدید لوله یا به عبارت دیگر فرکانس غالب نوسانات منتشر شده ندارد. البته ایجاد سوراخ ریز در دیواره انتهای لوله جهت استخراج بخش اندکی از گاز داغ منجر به کاهش فرکانس

داده‌های تجربی برای فرکانس غالب در دامنه صوتی بدست‌آمده از تحلیل آکوستیکی امواج صوتی دستگاه در حین کار نیز برای نمونه‌های مذکور در همین جدول ارائه شده است. داده‌های جدول 7 نشان می‌دهد که فرکانس نوسانات محاسبه شده از تحلیل عددی برای نمونه‌های شماره 1، 2 و 3 با طول لوله یکسان، نزدیک به یکدیگر بوده و تطابق نسبتاً خوبی با داده‌های تجربی و نیز مقادیر بدست آمده از رابطه (1) (معادل 3330 هرتز برای لوله با طول 48 میلیمتر) با مبنای تحلیلی دارند. مشاهده می‌شود که تغییر جنس لوله تشدید تأثیری بر فرکانس تشدید لوله یا به عبارت دیگر فرکانس غالب نوسانات منتشر شده ندارد. البته ایجاد سوراخ ریز در دیواره انتهای لوله جهت استخراج بخش اندکی از گاز داغ منجر به کاهش فرکانس

جدول 6 مقایسه نتایج حل عددی و آزمایشگاهی برای دمای متوسط انتهای لوله

Table 6 Numerical and experimental data for gas temperature near the end wall for case 1 to 6

| نمونه شماره | دمای میانگین در نزدیکی دیواره انتهای لوله (P_3) | |
|-------------|---|------------------|
| | حل عددی | نتایج آزمایشگاهی |
| 1 | 770 | 731 |
| 2 | 440 | 412 |
| 3 | 470 | 433 |
| 4 | 330* | 318 |
| 5 | 350* | 332 |
| 6 | 590 | 556 |

*نتایج بر اساس شبیه‌سازی انجام شده تا زمان 40 میلی ثانیه

جدول 7 مقایسه فرکانس نوسانات بدست‌آمده از تحلیل FFT نتایج حل عددی با

فرکانس نوسانات صوت منتشر شده در طی آزمایش

Table 7 Numerical and experimental data for dominant frequency of the oscillatory flow in studied cases

| نمونه | فرکانس نوسانات (هرتز) | |
|-------|-----------------------|------------------|
| | حل عددی | نتایج آزمایشگاهی |
| 1 | 3208 | 3172 |
| 2 | 3208 | 3170 |
| 3 | 2960 | 2920 |
| 6 | 8192 | 7760 |

نزدیک‌تر است. این فرآیند انبساطی منجر به تغییر حالت گاز از 3' به 1 و بسته شدن سیکل خواهد شد. در ادامه سیکل ترمودینامیکی تشریح شده مجدداً تکرار می‌شود. تغییر حالت گاز در طول فرآیندهای تشریح شده، توصیف ترمودینامیکی فرآیند داخلی گاز را مشخص می‌کند.

در شکل 12-b، نمودارهای دما-انترپوی برای نمونه‌های شماره 1 و 2 رفتاری کاملاً مشابه با یکدیگر را نشان می‌دهند. با این تفاوت که سطح زیر نمودار مربوط به نمونه شماره 2 از نمونه شماره 1 کوچکتر است. این مسأله به این معنی است که استفاده از مواد با ضریب انتقال حرارت بزرگتر (استیل) در مقایسه با مواد با ضریب انتقال حرارت کوچکتر (PTFE) هر چند باعث کاهش مقدار حرارت تبادل شده در جرم گاز محبوس درون لوله می‌شود، ولی بر مکانیزم عملکردی جریان نوسانی درون لوله تأثیر چندانی ندارد.

در شکل 12-b، همچنین مقایسه نمودارهای مربوط به نمونه شماره 1 و 6 نشان می‌دهد که با کاهش طول لوله تشدید، فواصل زمانی میان فرآیندهای مختلف در یک سیکل کاهش یافته و یا با حذف این فواصل زمانی، عملاً فرآیندها تا حدودی در هم ادغام شده‌اند. برای مثال در نمونه شماره 6، فرآیندهای عبور موج پیشرو و عبور موج انعکاسی بدون فاصله و پشت سرهم اتفاق افتاده‌اند. همچنین بین حالت شماره 3* و 1* که مشابه حالت‌های 3 و 1 در نمودار نمونه شماره 1 هستند، خبری از مقطع میانی 3* (مشابه 3' در نمونه 1) نیست. در واقع پس از عبور موج تراکمی بازگشتی و افزایش دما طی آن، فرآیند انبساط آغاز می‌شود. در این فرآیند که با انتقال حرارت ناشی از خروج جریان جرم همراه است، نه انتقال حرارت هم فشار دیده می‌شود و نه انبساط آیزنتروپیک؛ بلکه یک فرآیند پلی‌تروپیک اتفاق افتاده است. حذف

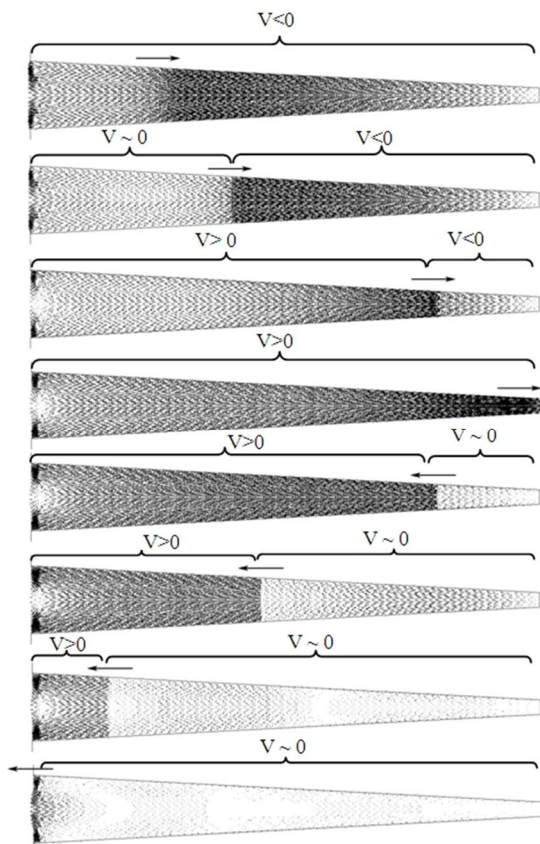


Fig. 10 Axial velocity vectors inside the tube during cycle change
 شکل 10 تغییرات بردارهای سرعت محوری درون لوله تشدید در طول دوره تعویض رژیم جریان از سیکل تخلیه تا شروع پر شدن لوله

لوله می‌شود. این امواج که به سمت انتهای بسته لوله حرکت می‌کنند، در میانه لوله با یکدیگر ترکیب شده و تشکیل یک موج تراکمی قوی را می‌دهند. موج تراکمی پیش‌رونده با برخورد به انتهای بسته لوله منعکس شده و به سمت دهانه لوله باز می‌گردد. در شکل 10، فلش‌های نشان داده شده در بالای هر تصویر، موقعیت و جهت حرکت این موج ضربه‌ای متحرک را درون لوله نشان می‌دهد. جهت بردارهای سرعت در طول بازه تعویض جریان، ابتدا از جریان کاملاً خروجی به جریان ساکن و سپس به جریان کاملاً ورودی و در نهایت مجدداً به جریان ساکن تغییر می‌کند. در انتهای سیکل نشان داده شده، جریان داخل لوله آماده تغییر جهت در راستای تخلیه لوله است.

در شکل 11، آرایش بردارهای سرعت در دهانه لوله تشدید در نمونه شماره 1 مجدداً در بازه زمانی یک دوره نوسان جریان (تغییر جریان از خروجی به ورودی و سپس به خروجی) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در ابتدای فاز ورود امواج تراکمی به داخل لوله، گردابه‌ای از جریان در دهانه لوله تشکیل می‌شود.

اندازه این گردابه که در ابتدا کوچک بوده و چسبیده به لبه‌های لوله تشکیل می‌شود، با گذشت زمان رشد کرده و در جهت خروج از لوله و به سمت محور تقارن گسترش می‌یابد. این گردابه با شروع فاز جریان خروجی، ناپدید می‌شود. مشاهده این گردابه در نتایج حل عددی با مشاهدات تجربی ساروهیا و بک [10,9] مطابقت دارد.

از دیدگاه ترمودینامیکی، جریان گاز درون سیستم در حین کار، فرآیند خاصی را طی می‌کند که این فرآیند را می‌توان با ترسیم نمودار دما-انترپوی تشریح نمود. بر اساس نمودار دما-انترپوی، مراحل مختلف فرآیند تولید حرارت از دیدگاه ترمودینامیکی قابل توصیف است. در شکل 12-a، یک تشریح کلی از نمودار دما-انترپوی در طول فرآیند یک سیکل نوسانی درون گاز محبوس در لوله بر اساس توصیف ارائه شده توسط بروشر و مرسکا [27] ارائه شده است. شکل 12-b نیز همان نمودار را بر اساس داده‌های مستخرج از حل عددی پژوهش حاضر در نقطه P₃ و برای نمونه‌های شماره 1، 2 و 6 در شرایط شبه دائم نشان می‌دهد. قابل ذکر است که به منظور مقایسه نمونه‌ها با یکدیگر، نمودارهای مربوط به نمونه‌های مذکور در شکل 12-b در طول محور آنترپوی جایجا شده‌اند. این بدان معناست که مقادیر عددی آنترپوی از نمودارهای مربوطه حذف شده‌اند.

در نمودار شکل 12-a و نمودار مربوط به نمونه شماره 1 در شکل 12-b، گاز درون لوله در ابتدا در حالت 1 قرار دارد. عبور موج ضربه‌ای پیشرو از روی گاز محبوس درون لوله منجر به تغییر حالت گاز از حالت 1 به حالت 2 در نمودار دما-انترپوی می‌شود. در ادامه عبور موج ضربه‌ای بازگشتی منجر به تغییر حالت گاز از حالت 2 به حالت 3 خواهد شد. تغییرات از حالت 1 تا 3 در اثر بازگشت ناپذیری‌های ناشی از عبور موج ضربه‌ای اتفاق می‌افتد. چنانچه حرارتی از سیستم خارج نشود، بایستی منتظر یک انبساط آدیاباتیک و تغییر حالت از 3 به 1' مشابه نمودار شکل 12-a باشیم. لکن در واقعیت این اتفاق نمی‌افتد، بلکه با خروج بخشی از حرارت در شرایطی نزدیک به شرایط فشار ثابت (مطابق نمودار 12-a و 12-b برای نمونه شماره 1) پیش از ورود به فاز انبساطی، حالت گاز از 3 به 3' تغییر خواهد یافت. تغییر حالت اخیر بنا به دلایلی که بعداً تشریح خواهد شد، در خصوص نمونه شماره 6 قابل تشخیص نیست.

مرحله بعدی تغییر حالت مربوط به فاز انبساط شبه آیزنتروپیک است. هرچه فرآیند انبساط سریع‌تر اتفاق بیافتد، فرآیند به فرآیند آیزنتروپیک

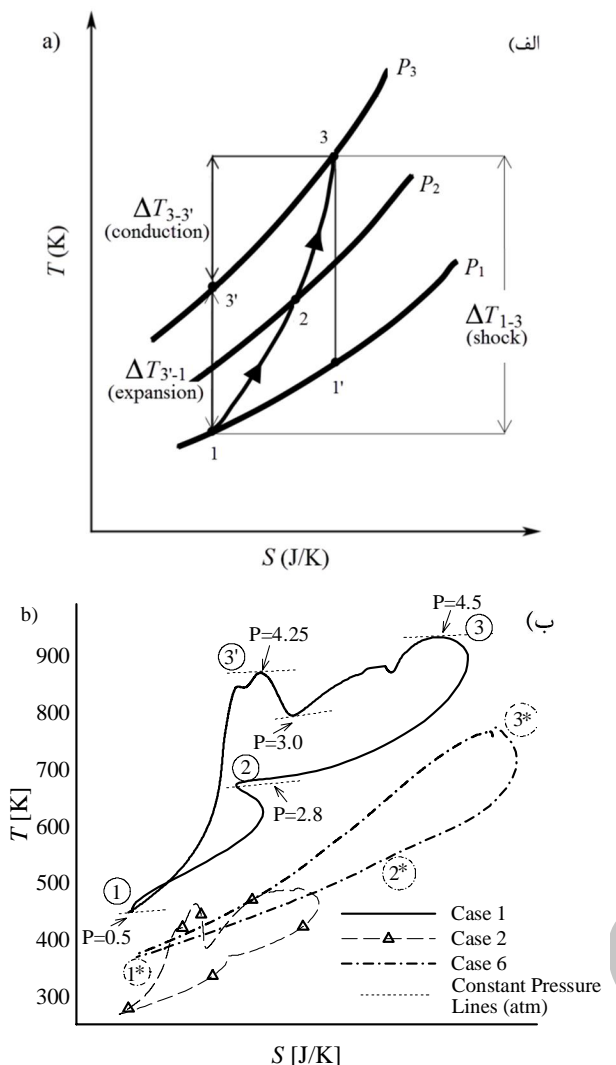


Fig. 12 Temperature-entropy diagram of the process inside the tube: (a) Theoretical explanation of Brocher and Maresca [27] (b) simulation data for case 1, 2 and 6

شکل 12 نمودار دما-آنترپویی برای فرآیند گاز درون لوله: الف) توصیف تئوری ارائه شده توسط بروشر و مرسکا [27] و ب) نتایج تحلیل عددی برای نمونه‌های 1، 2 و 6

شوگ قوی پیشرونده به سمت انتهای بسته لوله می‌شود. امواج شوگ درون جریان‌های تراکم پذیر، فرآیندهایی ذاتا بازگشت ناپذیرند. بازگشت ناپذیری‌های ناشی از عبور شوگ از گاز محبوس درون لوله باعث افزایش دمای شدید در این بخش از گاز خواهد شد. بازتاب این شوگ از دیواره انتهای لوله باعث عبور مجدد شوگ از روی جریانی می‌شود که پیش‌تر نیز دچار افزایش دما شده بود. این عبور مجدد شوگ، سبب افزایش دو چندان دمای گاز خواهد شد. با خروج شوگ از دهانه باز لوله، دسته‌ای از فن‌های انبساطی تشکیل می‌شود که منجر به تخلیه بخشی از جریان گاز فشرده از درون لوله خواهد شد.

2-7- تأثیر ضریب انتقال حرارت جنس لوله

هرچه حرارت خارج شده از دیواره‌های لوله کمتر باشد، دمای داخل لوله افزایش بیشتری خواهد داشت. بدین ترتیب با کاهش ضریب انتقال حرارت دیواره، دماهای بالاتر قابل دستیابی است. البته پارامتر مقاومت حرارتی در مقابل تغییر شکل در اثر دمای بالای گاز درون لوله نیز به عنوان یک پارامتر

زمان بین فرآیندها و افزایش سرعت سیکل در نمونه شماره 6 نسبت به نمونه شماره 1، به دلیل کاهش طول لوله اتفاق افتاده و باعث کاهش اثرات دمایی فرآیند در نقطه انتهایی لوله در نمونه شماره 6 می‌گردد.

7- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، نتایج تجربی و حل عددی برای عملکرد شش نمونه مختلف از لوله تشدید هارتمن-اسپرنجر به تفکیک ارائه گردید. نتایج تجربی نشان از اثرات متفاوت پارامترهای فیزیکی دستگاه بر عملکرد حرارتی دارد. نتایج حل عددی نیز تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی داشته است و به توصیف دلایل این اثرات کمک می‌کند. با بررسی مشاهدات تجربی و نتایج حاصل از حل عددی نمونه‌های مختلف، نتایج زیر قابل استخراج است.

1-7- افزایش متمرکز دما در انتهای لوله

وجود لوله با انتهای بسته در کنار حضور شوگ مهاجم در دهانه لوله یک مکانیزم رفت و برگشتی مبتنی بر بازخورد جریان را بوجود می‌آورد که طی آن یک جریان نوسانی درون لوله تشکیل می‌شود. بازخورد تعامل این جریان با شوگ مستقر در ورودی لوله، منجر به ورود دسته‌ای از امواج تراکمی به داخل لوله خواهد شد. ترکیب امواج درون لوله در میانه راه باعث تولید یک

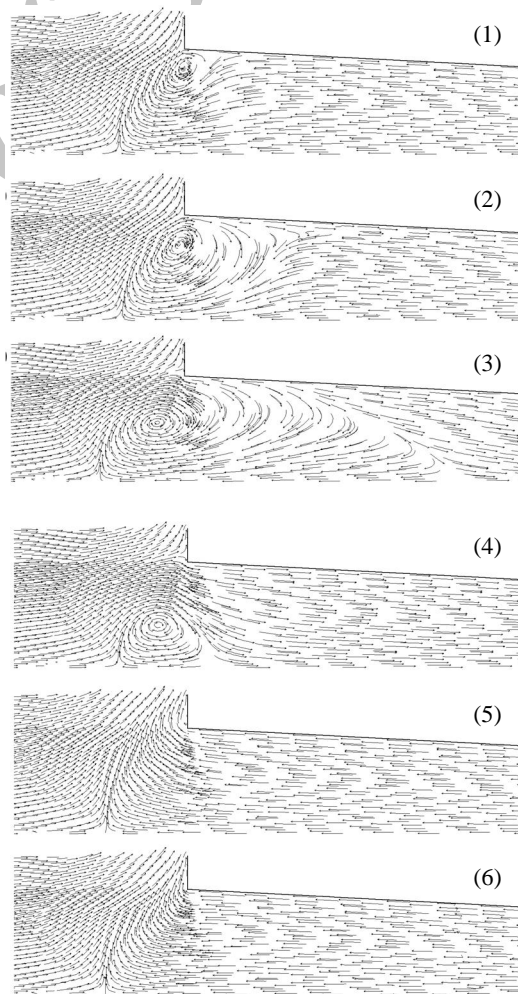


Fig. 11 Arrangement of velocity vectors at inlet section during the shock entrance to exit cycle

شکل 11 آرایش بردارهای سرعت در مقطع ورودی در طول یک سیکل ورود و خروج موج تراکمی

- Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Virginia, US, 2003.
- [4] G. Raman, K. Srinivasan, The powered resonance tube: From Hartmann's discovery to current active flow control applications, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 45, No. 4, pp. 97-123, 2009.
- [5] P. R. Phillips, A. J. Pavli, Resonance Tube Ignition of Hydrogen-Oxygen Mixtures, *NASA Technical Note*, D-6354, 1971.
- [6] K. Chaudhari, G. Raman, Ultrasonic powered resonance tube actuators for flow control applications, *Proceedings of the 5th Flow Control Conference*, Chicago, Illinois, US, 2010.
- [7] P. A. Kreth, F. S. Alavi, B. M. Reese, W. S. Oates, Control of high frequency microactuators using active structures, *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, No. 2, pp. 25-30, 2015.
- [8] P. Upadhyay, J. Gustavsson, F. S. Alvi, Development and characterization of ultra-high frequency resonance-enhanced microjet actuator, *Proceedings of the 43rd Fluid Dynamics Conference*, San Diego, California, US, 2013.
- [9] V. Sarohia, L. H. Back, E. J. Roschke, S. P. Pathasarathy, An experimental investigation of fluid flow and heating in various resonance tube modes, *NASA Technical Report*, JPL-TM-33-780, 1976.
- [10] V. Sarohia, L. H. Back, Experimental investigation of flow and heating in a resonance tube, *Fluid Mechanics*, Vol. 94, No. 4, pp. 649-672, 1979.
- [11] E. Brocher, M. Kawahashi, Wave and thermal phenomena in H-S tubes with an area constriction, *Shock waves and shock tubes; proceedings of the 15th international symposium*, Berkeley, California, US, July 28-August 2, 1985.
- [12] E. Brocher, J. P. Ardissonne, Heating characteristics of a new type of Hartmann-Sprenger tube, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 4, No. 2, pp. 97-102, 1983.
- [13] M. Palme, Contribution a l'etude de la sirene de Hartmann [Contribution to the investigation of the Hartmann siren], *Nuovo Cimento*, Vol. 7, No. 2, pp. 260-277, 1950.
- [14] H. O. Monson, R. C. Binder, Intensities produced by jet-type ultrasonic vibrators, *Journal of Acoustic Society of America*, Vol. 25, No. 5, pp. 1007-1009, 1953.
- [15] J. Kastner, M. Samimy, Development and characterization of Hartmann tube based fluidic actuators for high speed flow control, *AIAA Journal*, Vol. 40, No. 10, pp. 1926-1934, 2002.
- [16] G. Raman, A. Mills, S. Othman, V. Kibens, Development of powered resonance tube actuators for active flow control, *Proceedings of the 1st ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*, New Orleans, US, 2001.
- [17] S. M. Chang, S. Lee, On the jet regurgitant mode of a resonant tube, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 246, No. 4, pp. 567-581, 2001.
- [18] A. Hamed, K. Das, D. Basu, Numerical simulation of unsteady flow in resonance tube, *Proceedings of the 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibition*, Virginia, US, 2002.
- [19] A. Hamed, K. Das, D. Basu, Numerical simulation and parametric study of Hartmann-Sprenger tube based powered device, *Proceedings of the 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibition*, Virginia, US, 2003.
- [20] S. Murugappan, E. Gutmark, Parametric study of the Hartmann-Sprenger tube, *Experiments in Fluids*, Vol. 38, No. 6, pp. 813-823, 2005.
- [21] G. Xia, D. Li, C. L. Merkle, Effects of a needle on shrouded Hartmann-Sprenger tube flows, *AIAA Journal*, Vol. 45, No. 5, pp. 1028-1035, 2007.
- [22] H. Karimi, B. Afzali, Numerical analysis of flow and heat generation mechanism in a Hartmann-Sprenger resonance tube, *Modarres Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 227-238, 2015. (in Persian)
- [23] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, Forth Edition, pp. 290-312, New York: Wiley, 1999.
- [24] G. J. Sreejith, S. Narayanan, T. J. Jothi, K. Srinivasan, Studies on conical and cylindrical resonators, *Applied Acoustics*, Vol. 69, No. 12, pp. 1161-1175, 2008.
- [25] G. P. Scavone, *An acoustic analysis of single-reed woodwind instruments with an emphasis on design and performance issues and digital waveguide modeling techniques*, PhD Thesis, Department of Music, University of Stanford, California, 1997.
- [26] ANSYS *Fluent Theory Guide*, Accessed on 10 November 2013; <http://www.ansys.com>.
- [27] E. Brocher, C. Meresca, Etude des phenomenes thermiques dans un tube de Hartmann-Sprenger, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 16, No. 3, pp. 529-538, 1973.

محدود کننده بایستی در نظر گرفته شود. در آزمایشات انجام شده با لوله با جنس تفلون نسوز (PTFE)، بیشترین دما در انتهای لوله ثبت گردیده است.

3-7- تأثیر فاصله میان نازل و لوله

تغییر فاصله میان لوله و نازل می‌تواند مکانیزم داخلی جریان را درون لوله تشدید به شدت تحت تأثیر قرار دهد. در فواصل مشخصی از لوله و نازل، ورود جریان به رژیم تشدید و افزایش متمرکز دما درون لوله قابل مشاهده است. در فواصل میانی بیشتر یا کمتر، لوله به رژیم تشدید وارد نشده و افزایش دما دیده نمی‌شود.

4-7- تأثیر سوراخ ریز در انتهای لوله

وجود سوراخ ریز در انتهای لوله با هدف استخراج گاز داغ، عملکرد حرارتی دستگاه را مورد تأثیر قرار می‌دهد. هرچند مکانیزم نوسانی جریان و مکانیزم تولید حرارت (در صورت کوچک بودن نسبت قطر سوراخ به قطر لوله) حفظ می‌شود، لکن به دلیل خروج جریان جرم گاز داغ از انتهای لوله، کاهش دما در گاز محبوس درون لوله قابل رویت است.

5-7- تأثیر طول لوله

با کاهش طول لوله، فرکانس نوسانات جریان در فرآیند داخلی لوله‌ی تشدید افزایش می‌یابد. افزایش ایجاد شده در فرکانس نوسانات می‌تواند از افزایش بوجود آمده در مقدار تئوری فرکانس تشدید لوله بالاتر باشد. در این شرایط، ماهیت نوسانی جریان همچنان حفظ می‌شود. در اثر افزایش فرکانس نوسانات، فواصل زمانی میان فرآیندها تکرار شونده درون لوله کاهش یافته و یا حذف می‌شوند. این مسأله باعث تغییراتی در فرآیندهای داخلی لوله می‌شود که در نتیجه این تغییرات، باقی ماندن گاز در شرایط دمایی بالا محدود خواهد شد. بدین ترتیب، عملکرد حرارتی دستگاه دچار افت می‌شود.

8- تشکر و قدردانی

نویسندگان وظیفه خود می‌دانند که از زحمات، حمایت‌ها و راهنمایی‌های مدیریت و پرسنل مرکز آزمون پژوهشگاه فضایی ایران در فرآیند ساخت و راه‌اندازی میز آزمون مورد استفاده در این پژوهش کمال قدردانی و سپاس را داشته باشند.

9- مراجع

- [1] J. Hartmann, On a new method for the generation of sound waves, *Physical Review X*, Vol. 20, No. 6, pp. 719-727, 1922.
- [2] H. Sprenger, On thermal effects in resonance tubes, *Mittigation Eidgenoss Technic Aerodynamik*, No. 21, pp. 18-35, 1954.
- [3] G. J. Bouch, A. D. Cutler, Investigation of a Hartmann-Sprenger tube for passive heating of scramjet injectant gases, *Proceedings of the 41st*