ماهنامه علمى پژوهشى



مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

 *2 دارک افضلی¹، جسن کر دمی

1-دانشجوی دکترا، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران 2-دانشيار، مهندسي هوافضا، دانشگاه صنعتي خواجه نصيرالدين طوسي، تهران "تهران، صندوق پستى 16765-karimi @kntu.ac.ir

چکیدہ	اطلاعات مقاله
لوله هارتمن-اسپرنجر دستگاهی است که در آن جریان جت فرومنبسط وارد لولهای با انتهای بسته میشود که در فاصله مشخصی از نازل قرار	مقاله پژوهشی کامل
گرفته است در شرایط خاص، تولید چرارت متمرکز درون لوله قابل مشاهده است که منحر به افزاش دمای سریم درون لوله مرشود و مرتواند	دریافت: 22 فروردین 1395
در کاربردهای مهندسی نظیر آتش زندهای آکوستیکی مورد استفاده قرار بگیرد. در پژوهش حاضر، عملکرد حرارتی دستگاه برای مجموعهای از	پذیرش: 03 خرداد 1395 ارائه در سایت: 30 خرداد 1395
تشش تمونه محتلف از لولههای تشدید با پارامترهای فیزیکی متفاوت مورد تحلیل فرار گرفته است. پارامترهای تغییر یافته عبارتند از جنس لوله،	<i>کلید واژگان:</i>
طول لوله، فاصله لوله از نازل و شرایط دیوار انتهای لوله که میتواند بصورت کاملا بسته و یا همراه با یک سوراخ ریز برای استخراج گاز داغ	لوله تشدید مخروطی
باشد. در تمامی نمونهها، شکل داخلی لوله بصورت مخروطی انتخاب شده است، مدلسازی عددی در کنار آزمایشات تجربی بر روی این نمونهها	جریان نوسانی
انحام گرفته و نتایج برای بررسی تأثیر بارامترهای مذکور بر دمای قابل حصول در انتهای لوله و مکانیزم داخلی حریان مورد تحلیل قرار گرفته	نوسانات شوک
است. نتایج نشان میدهد که مهمترین عامل افزایش دما، وجود جریان نوسانی همراه با عبور امواج شوک قوی درون لوله است. با تغییر فاصله	تولید حرارت متمرکز
ایاب زانا به مادید با بی نفر فرد با ثبر از افزارش دما، وجود جریان نوسانی همراه با عبور امواج شوک قوی درون لوله ا	فرکانس تشدید
تونه و تارل جرین توسلی خدی شده و آثری از افزایش ده مساهده می سود. وجود یک سورج زیر در اسهای تونه ممچون استاده از توسفای کوتاهتر، باعث کاهش دمای قابل دستیابی درون لوله می شود. فرکانس نوسانات برای لوله های بلندتر نزدیک به فرکانس تشدید لوله است. محمد برا بتاید از ساید از سایت از سایت از محمد از محمد از محمد از می از از شدند.	

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

ABSTRACT

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

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 -اسیرنجر، یک جریان جت (معمولا از نوع فرومنبسط) 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 منحنی شکل در دهانه لوله می شود. 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 توليد نوسانات قوى امواج تراكمي درون يك لوله شده و نتيجه 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)

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 می شود که با عبور متناوب امواج تراكمي قوى درون لوله همراه است. نتيجه اين فرآيند، افزایش متمرکز دمای گاز در بخش انتهایی لوله تشدید خواهد بود.

يديده لوله تشديد براي اولين بار توسط هارتمن [1] كشف گرديد. اين 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 توليد حرارت متمركز، يک جريان 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 عمل گرهای مکانیکی فرکانس بالا^۱ تحقیق کرده و نتایج جالب توجهی در این خصوص بدست آوردهاند [6,4-8]. رامان و همكارش [4] در سال 2009 میلادی مروری بر تمامی فعالیتهای مهم انجام شده برروی دستگاه لوله تشدید هارتمن- اسپرنجر از بدو اکتشاف تا کاربردهای مختلف این لوله در دستگاههای مختلف در سالهای اخیر داشتهاند.

ساروهيا و بک [10,9] با توجه به مشخصات لوله، فاصلهی بين 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 برونریز²نام 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 می پردازد. 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 برونریز 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 می شود. 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

بروشر و كاواهاشي [11] تأثير تغييرات شكل داخلي لوله تشديد 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 كلوين) تأكيد نمودند. يالم [13] به همراه مانسون و بايندر [14] ييشنهاداتي 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 نتيجه رسيدند كه با افزايش فاصله بين نازل و لوله، حداقل فشار سكون مورد نیاز برای رسیدن به یک دمای مشخص افزایش مییابد.

شانگ و لی [17] رژیم کاری برونریز 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 اویلر متقارن محوری را برای این جریان به روش عددی حل نمودند. آنها تأثیر چهار پارامتر اصلی و مهم شامل فركانس نوسانات، عدد ماخ جريان، فاصلهي ميان منبع نوسان تا ورودي 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 برونریز)، در درجهی اول طول لوله و در درجهی دوم فاصلهی لوله از منبع تولید نوسانات مي باشد.

حامد و همکارانش [19,18] و نیز موروگاپان و گاتمارک [20] به شبیهسازی جریان ناپایدار درون لولهی تشدید با استفاده از روشهای عددی و فرضیاتی نظیر جریان دو بعدی متقارن و با اعمال مدل های 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 اولا حضور غلاف به تولید جریان پالسی کمک میکند. ثانیا حضور میله راهنما در مرکز نازل می تواند 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 - اسیرنجر پرداختهاند. آنها نشان دادند که عامل اصلی تولید حرارت درون لوله تشدید، عبور دورهای امواج تراکمی از نقاط درون لوله و مكانيزم اصلى اتلاف حرارت، جابجايي 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 برونریز، به نوسان جريان با فركانس تشديد لوله 4 اشاره مىشود [17,8] كه معادل فركانس 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

¹ High Frequency Actuators

² Jet Regurgitant Mode ³ Jet Screech Mode

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

⁴Tube Resonance Frequency

مهندسی مکانیک مدرس، شهریور 1395، دوره 16،شماره 6

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

$$f = \frac{W}{C_s L} \tag{1}$$

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، تقریبا 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 بهرموری 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 کاملا 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 ¹PTFE 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 میشوندکه 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 می گیرد. 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 می شود. 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.

نمونههای مطالعه شده	1 مشخصات اصلی	جدول
---------------------	---------------	------

Table 1 Major properties of the studied cases					
قطر سوراخ انتهاى لوله	فاصله ميان نازل	طول لوله		نمونه	
(mm)	و لوله (mm)	(mm)	جىس ئونە	شماره	
-	13.5	48	پليمر نسوز	1	
-	13.5	48	استیل ضد زنگ	2	
0.4	13.5	48	پليمر نسوز	3	
-	20.5	48	پليمر نسوز	4	
-	9	48	پليمر نسوز	5	
-	13.5	38	پليمر نسوز	6	

3- تشريح مدل تجربي

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 کلوین میباشد. شمای دستگاه مورد اشاره در شکل 2 نشان داده شده است.

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

4- تشريح مدل حل عددى

معادلات حاکم بر جریان در روش حل عدی، 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 *۶-۴* تقویت شده در

جدول 2 مشخصات سایر پارامترهای استفاده شده در نمونههای تجربی و عددی Table 2 Physical specification of numerical and experimental cases

ible 2 Thysical specification of numerical and experimental cases				
واحد	مقدار	پارامتر		
(mm)	5	قطر خروجی نازل D _n		
(mm)	6.3	قطر ورودی لوله D		
(mm)	1.4	قطر انتهای لوله <i>d</i>		
-	7.5	نسبت ورودی به خروجی نازل		
-	هوا	جنس گاز		
-	11	نسبت فشار نازل		
(к)	300	دمای سکون ورودی		
(к)	300	دمای محیط		
(W/m.K)	0.25	ضريب انتقال حرارت PTFE		
(W/m.K)	16	ضريب انتقال حرارت Steel		
(mm)	1	ضخامت لوله		

² Random incidence microphone-model: PCB-HT378C20

¹Poly Tetra Fluoro Ethylene



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 می شود. در این شکل، ΔS معرف فاصله لوله از نازل، L طول لوله، D قطر ورودی لوله، B قطر دیواره انتهای 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 شده اند.

معادله بقای جرم:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho V_{x}) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho V_{r}) + \frac{\rho V_{r}}{r} = \mathbf{0} \qquad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho V_{x}) + \frac{\mathbf{1}}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho V_{x} V_{x}) + \frac{\mathbf{1}}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho V_{r} V_{x})$$

$$= -\frac{\partial P}{\partial x}$$

$$+ \frac{\mathbf{1}}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\mathbf{2} \frac{\partial V_{x}}{\partial x} - \frac{\mathbf{2}}{\mathbf{3}} (\nabla \cdot \vec{V}) \right) \right]$$

$$+ \frac{\mathbf{1}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial V_{x}}{\partial r} + \frac{\partial V_{r}}{\partial x} \right) \right]$$

$$(3)$$

$$= -\frac{\partial P}{\partial x}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V_{r}) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho V_{x}V_{r}) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho V_{r}V_{r}) \\
= -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\left(\frac{\partial V_{r}}{\partial x} + \frac{\partial V_{x}}{\partial r}\right)\right] \\
+ \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu\left(2\frac{\partial V_{r}}{\partial r} - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \vec{V})\right)\right] \\
- 2\mu\frac{V_{r}}{r^{2}} + \frac{2}{3}\frac{\mu}{r}(\nabla \cdot \vec{V}) \qquad (4)$$



www.S192.ir

(5)

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{\partial V_{\rm x}}{\partial x} + \frac{\partial V_{\rm r}}{\partial r} + \frac{V_{\rm r}}{r}$$

و معادله انرژي:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{V} (\rho E + P))$$

= $\nabla \cdot (Q_{\text{cond}} + Q_{\text{diff}} + Q_{\text{diss}})$

در این معادلات ρ چگالی، V سرعت، P 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 می شود. 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 لزجتی است [26].

مشخصات هندسی مدل و جریان بالادست مطابق مشخصات نمونههای تعریف شده و بر اساس اطلاعات جداول 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 می گیرد 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 شدهاست 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 فلوئنت^۱ و به کمک روشهای پردازش موازی انجام شده است. روش حل معادلات حاکم به بر مبنای چگالی جریان و گسسته سازی 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				
نوع شرط مرزی	مقطع مرزى			
ورودی فشار ثابت و دما ثابت	مقطع ورودي نازل			
محور تقارن	خط مرکزی لوله			
دیوار با انتقال حرارت و شرط عدم لغزش	ديواره لوله			
ديواره آدياباتيک و شرط عدم لغزش	ديواره نازل			
جريان فشار ثابت دوردست	مرز محيطي اطراف			

جدول 4 مشخصات دانهبندی انجام شده در میدان حل

able 4 Mesh specifications within calculation domain			
تعداد گرەھا (تقريبى)	منطقه حل		
12000	نازل		
50000	فاصله نازل تا لوله		
45000	داخل لوله تشديد		
20000	محيط اطراف		

ANSYS FLUENT version 6.3

²Second order upwind method



Fig. 5 Numerical results for pressure data at the point near the end wall $\left(P_{3}\right)$ vs. time

شکل 5 نتایج حل عددی برای تغییرات فشار نسبت به زمان فرآیند در نزدیکی دیواره (نقطه P3) از نمونه شماره 1



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

شکل6 تحلیل FFT ازدادههای تغییرات فشار بر حسب زمان در نزدیکی دیواره (نقطه P3) از نمونه شماره 1

تقریبا معادل 5 میلی ثانیه قابل مشاهده است. متوسط دما در بخش شبه پایدار این نمودارها تقریبا ثابت است. در این نمونه ها، 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 نمونه های شماره 4 و 5 قابل مشاهده نیست. در واقع شرایط هندسی نمونه های شماره 4 و 5 به گونه ای است که باعث می شود نوسانات جریان ماندگار نباشند. این بدان معناست که نمونه های شماره 4 و 5 در رژیم عملکردی جریان برون ریز قرار نمی گیرند. به همین علت نیز افزایش دمایی خاصی در خصوص این نمونه ها قابل مشاهده نیست. این مسأله به دلیل تغییر فاصله بین نازل و لوله تشدید اتفاق می افتد. در حقیقت در نمونه های 4 و 5، دهانه لوله تشدید در مناطق ناپایداری جریان جت قرار نگرفته است.

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

زمانی در حل عددی نمونهها از مرتبه بسیار پایین (در حدود 8 -20×2) 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 می سد. 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 انتخاب شری به طول لوله نمایش داده شده است. x_p معرف فاصله نقاط از دهانه لوله به طول لوله انت.

5- نتایج حل عددی

نتایج حل عددی برای تغییرات فشار بر حسب زمان در نقطه P₃ 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 فوریه 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 2172 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 P₃ بر اساس نتایج حاصل از تحلیل عددی نمونههای ششگانه در شکل 7 نشان داده شده است. همچنین تغییرات دما در نقطه P₄ 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 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 (P1 to P4) along the tube axis شکل 4 محل قرار گرفتن نقاط تحلیلی (P1 تا P1) در طول لوله تشدید

جدول 5 مشخصات موقعيت x_p/L نقاط تعريف شده درون لوله

Table 5 Ratio of x _p /L	for the selected p	oints along the	tube axis
	x_p/L نسبت	نقطه	
	0.32	P ₁	
	0.65	P_2	
	0.99	P_3	
	1.04	P.	

¹ Fast Fourier Transform (FFT)

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 3 نسبت به نمونه 1 افت محسوسی دارد، اما همچنان نسبت به نمونه شماره 4 که در آن از لوله با جنس استیل و ضریب انتقال حرارت بالا نسبت به پلیمر 5 که در آن از لوله با جنس استیل و ضریب انتقال حرارت بالا نسبت به پلیمر 4 لوله از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. متوسط دمای گاز استخراج شده از 9 انتهای باز لوله در نمونه شماره 3 از نتایج تحلیل عددی و بر اساس نمودار 1 شکل 8 معادل 363 کلوین در نقطه P₄ بدست آمده است. این دما نسبت به دمای ثبت شده در آزمایشات (342 کلوین) اختلاف چندان زیادی 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





Fig. 8 Numerical results of temperature data vs. time for the extracted gas at point P_4 for case 3

شکل ${f 8}$ نتایج حل عددی برای تغییرات دمای گاز استخراج شده از سوراخ دیوار انتهای لوله (نقطه ${f P}_4$) در نمونه شماره ${f 8}$

میانگین 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 توجه به اطلاعات جدول 6، حداکثر اختلاف دمای 8 درصدی میان دادههای تعربی و عددی در این جدول قابل مشاهده است. همچنین بیشینه افزایش دمای انتهای لوله متعلق به نمونه شماره 1 است. مقدار این دمای بیشینه است. اختلاف دمایی 39 پلهای در مقیاس کلوین از نتایج تجربی گزارش شده است. اختلاف دمایی 99 پلهای در مقیاس کلوین را میتوان ناشی از عواملی جون رطوبت هوای محل آزمایش، خطای دمای ورودی، خطا در محل نصب مقادیر فرکانس محاسبه شده از تحلیل فوریه سریع نمودارهای فشار -زمان بدست آمده از حل عددی مسأله در نقطه F برای نمونههای شماره 1، 2، 3 و مقادیر فرکانس محاسبه شده از تحلیل فوریه سریع نمودارهای فشار -زمان

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 می دهد 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 نسبتا خوبی با دادههای تجربی و نیز مقادیر بدست آمده از رابطه (1) (معادل 3300 هرتز برای لوله با طول 48 میلیمتر) با مبنای تحلیلی دارند. مشاهده می شود 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 $\mathbf{6}$ 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

دمای میانگین در نزدیکی دیواره انتهای لوله (P ₃)			نيينه شيا م
خطا (%)	نتايج آزمايشگاهی	حل عددی	لموت شماره -
5.2	731	770	1
6.4	412	440	2
7.9	433	470	3
3.6	318	330*	4
5.1	332	350^{*}	5
5.8	556	590	6

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

فرکانس نوسانات (هرتز)			414.1	
	خطا (%)	نتایج آزمایشگاهی	حل عددی	لموته
	1.12	3172	3208	1
	1.18	3170	3208	2
	1.35	2920	2960	3
	5.3	7760	8192	6

نوسانات شده است. در خصوص نمونه شماره 6، فرکانس غالب برای نوسانات فشاری در انتهای لوله کمتر از فرکانس ثبت شده از امواج صوتی منتشر شده در اطراف لوله از دادههای تجربی است. اما همچنان دادههای تجربی و عددی به هم نزدیکند. این در حالی است که فرکانس تشدید محاسبه شده بر اساس رابطه (1) بر مبنای تئوری در نمونه شماره 6 (معادل 4210 هرتز برای لوله با طول 38 میلیمتر)، اختلاف قابل ملاحظهای با هر دو فرکانس ثبت شده و تحلیل شده از شبیه سازی عددی دارد. این مسأله نشان دهنده عدم توانایی تخمین فرکانس تشدید برای لوله های کوتاه تر توسط رابطه تئوری (1) است. لازم به ذکر است که در مورد نمونه های شماره 4 و 5، جریان ماهیت نوسانی ندارد.

در شكل 9، دماى محاسبه شده از تحليل عددى براى نقاط $P_1 \ P_2 \ e$ $P_2 \ e$ $P_1 \ h$ $P_2 \ e$ $P_2 \ e$

6- تحليل جريان درون لوله تشديد

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.

شكل 10 تغييرات بردازهای سرعت درون لوله تشديد مخروطی را برای نمونه شماره 1 در هشت بازه زمانی مختلف و در طول دوره تعويض رژیم جریان از سیكل تخلیه تا ابتدای سیكل پر شدن لوله نشان میدهد. چگلی 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 شكل 10 نمایش داده شده است. همانطور كه از تصاویر شكل 10 مشخص است، حركت جریان جت به سمت دهانه ورودی لوله منجر به ورود دستهای از امواج تراكمی 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

لوله می شود. این امواج که به سمت انتهای بسته لوله حرکت می کنند، در میانه لوله با یکدیگر ترکیب شده و تشکیل یک موج تراکمی قوی را می دهند. موج تراکمی پیش رونده با برخورد به انتهای بسته لوله منعکس شده و به سمت دهانه لوله باز می گردد. در شکل 10، فلش های نشان داده شده در بالای هر تصویر، موقعیت و جهت حرکت این موج ضربه ای متحرک را درون لوله نشان می دهد. جهت بردارهای سرعت در طول بازه تعویض جریان، ابتدا از جریان کاملا خروجی به جریان ساکن و سپس به جریان کاملا ورودی و در نهایت مجددا به جریان ساکن تغییر می کند. 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 مجددا در بازه زمانی یک دوره نوسان جریان (تغییر جریان از خروجی به ورودی و سپس به خروجی) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، در ابتدای فاز ورود امواج تراکمی به داخل لوله، گردابهای از جریان در دهانه لوله تشکیل می شود.

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 انتروپی تشریح نمود. بر اساس نمودار دما-انتروپی، مراحل مختلف فرآیند تولید حرارت از دیدگاه ترمودینامیکی قابل توصیف است. در شکل a-12، یک تشریح کلی از نمودار دما-انتروپی در طول فرآیند یک سیکل نوسانی درون گاز محبوس در لوله بر اساس توصیف ارائه شده توسط بروشر و مرسکا [27] 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 شرایط شبه دائم نشان میدهد. قابل ذکر است که به منظور مقایسه نمونهها با یکدیگر، نمودارهای مربوط به نمونههای مذکور در شکل d-12 در طول نمودارهای مربوط دان بدان معناست که مقادیر عددی آنتروپی از نمودارهای مربوطه حذف شدهاند.

در نمودار شکل a-21 و نمودار مربوط به نمونه شماره 1 در شکل d-21، 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-انتروپی 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 a-12 باشیم. لکن در واقعیت این اتفاق نمی افتد. بلکه با خروج بخشی از حرارت در شرایطی نزدیک به شرایط فشار ثابت (مطابق نمودار a-12 و d-12 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 بعدا تشریح خواهد شد، در خصوص نمونه شماره 6 قابل تشخیص دلایلی که بعدا تشریح خواهد شد، در خصوص نمونه شماره 6 قابل تشخیص

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

نزدیک تر 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، مجددا تکرار می شود. تغییر حالت گاز در طول فرآیندهای تشریح شده، توصیف ترمودینامیکی فرآیند داخلی گاز را مشخص می کند.

در شکل b-16، نمودارهای دما-انتروپی برای نمونههای شماره 1 و 2 رفتاری کاملا 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 b-12، همچنین مقایسه نمودارهای مربوط به نمونه شماره 1 و b نشان می دهد که با کاهش طول لوله تشدید، فواصل زمانی میان فرآیندهای مختلف در یک سیکل کاهش یافته و یا با حذف این فواصل زمانی، عملا 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 نمونه (مابه '3 (مشابه '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 نحروج جریان جرم همراه است، نه انتقال حرارت هم فشار دیده میشود و نه انبساط آیزنتروپیک؛ بلکه یک فرآیند پلی تروپیک 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

a) الف) ΔT_{3-3} (conduction $\Gamma(\mathbf{K})$ ΔT_{1-3} (shock) $\Delta T_{3'-1}$ (expansion) S (J/K) b) 3 P=4.25 (3') 900 800 P=3.0 700 × 600 500 Case 1 400 Case 2 ----- Case 6 Constant Pressure 300 Lines (atm)

S [J/K]

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-آنتروپی 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

شوک قوی پیشرونده به سمت انتهای بسته لوله میشود.

امواج شوک درون جریانهای تراکم پذیر، فرآیندهایی ذاتا بازگشت ناپذیرند. بازگشت ناپذیریهای ناشی از عبور شوک از گاز محبوس درون لوله باعث افزایش دمای شدید در این بخش از گاز خواهد شد. بازتاب این شوک از دیواره انتهای لوله باعث عبور مجدد شوک از روی جریانی میشود که پیش تر نیز دچار افزایش دما شده بود. این عبور مجدد شوک، سبب افزایش دو چندان دمای گاز خواهد شد. با خروج شوک 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- تأثير ضريب 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

7- جمع بندی و نتیجه گیری

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 شوک 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 شوک 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 actuatorsfor 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. Ardissone, 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 نفار سی)
- [23] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, J. V. Sanders, Fundamentals of Acoustics, Forth Edittion, 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 digitalwaveguide 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.

7-3- تأثير فاصله ميان نازل و لوله

تغییر فاصله میان لوله و نازل می تواند 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 نمی شود.

7-4- تأثير سوراخ ريز در انتهاى 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- تأثير 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- تشكر و قدردانى

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*