



معرفی لوله گردبادی دوجداره و مقایسه تجربی عملکرد آن با لوله گردبادی معمولی

میثم سعدی¹، محمود فرزانه گرد^{2*}

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، سمنان

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شاهرود، سمنان

* شاهرود، صندوق پستی 316، mgord@shahroodut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 28 بهمن 1392
پذیرش: 29 فروردین 1393
ارائه در سایت: 08 مهر 1393

کلید واژگان:

لوله گردبادی دو جداره
ژنراتور
بازده سرمایشی
ضریب عملکرد گرمایی
کسر جرمی بهینه سرد

چکیده

لوله گردبادی دوجداره لوله گردبادی معمولی است که اجازه عبور دوباره جریان از روی لوله گرم را می‌دهد و برای اولین بار در این مقاله معرفی می‌شود. جریان در این طرح جدید، پس از عبور از شیر مخروطی اجازه پیدا نمی‌کند تا از خروجی گرم خارج شود، بلکه مجدداً از روی لوله گرم می‌گذرد و اتلاف حرارتی لوله گرم را افزایش می‌دهد. برای بررسی میزان جدایش دمایی که به وسیله لوله گردبادی دو جداره اتفاق می‌افتد، عملکرد این لوله گردبادی به صورت تجربی آزمایش و با عملکرد لوله گردبادی معمولی مقایسه شده است. آزمایش برای فشار ثابت 4 بار، با گاز طبیعی انجام می‌شود. نسبت طول لوله به قطر لوله گرم در هر دو نمونه لوله گردبادی 10 می‌باشد. قطر اریفیس سرد هر دو ژنراتور 6/4 میلی‌متر است. مشاهده شد عبور مجدد جریان از روی لوله گرم در لوله گردبادی دو جداره، بازده سرمایشی لوله گردبادی معمولی را 24٪ در نقطه بیشینه اختلاف دمای سرد بهبود بخشیده است. کسر جرمی سرد که در آن کمینه دمای سرد در لوله گردبادی دو جداره اتفاق می‌افتد کمتر از مقدار مربوط به لوله گردبادی معمولی می‌باشد.

Introducing Annular vortex tube and Experimental Comparison of its performance with Vortex Tube

Meisam Sadi¹, Mahmood Farzaneh-Gord^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Shahrood University, Semnan, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Shahrood University, Semnan, Iran.

* P.O.B. 316 Shahrood, Iran, mgord@shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 February 2014
Accepted 18 April 2014
Available Online 30 September 2014

Keywords:

Annular vortex tube
Generator
cooling efficiency
heating coefficient of performance
optimum cold mass fraction

ABSTRACT

Annular vortex tube is a vortex tube which allows the hot flow pass again over the hot tube. It is introduced for first time in this work. Hot Flow is not allowed to exit after passing conic valve in annular vortex tube, but it is redirected over hot tube. This back flow absorbs heat from outer wall of hot tube. To study temperature separation which occurs in an annular vortex tube; the performance of this type of vortex tube has been experimentally tested and compared with the performance of a typical vortex tube. Inlet test pressure is 4 bars and natural gas is being used as working fluid. For both type of vortex tubes, ratio of length to diameter of tube is 10. Cold orifice diameter of vortex generator is set to 6.4 mm. It was observed that redirecting hot flow over the hot tube in annular vortex tube improves cooling efficiency up to 24% respect to a typical vortex tube at the maximum temperature difference. The results show that cold mass fraction in which the coldest temperature occurs is lower for annular vortex tube comparing with a typical vortex tube.

1- مقدمه

شرکت‌های مطرحی در دنیا ساخت لوله گردبادی معمولی را انجام می‌دهند که از آن جمله می‌توان به سه شرکت آریزونا ورتکس، نیو من تولز و آگرایر اشاره نمود. لوله گردبادی شرکت نیو من تولز جریان هوای ورودی فیلتر شده با فشار 6/9 بار و دمای 21 درجه سلسیوس را به دو جریان با دمای 40- و 58 درجه سلسیوس تبدیل می‌سازد [1]. آیمسا و پرومونگ [2] محدوده‌های دمایی سرد و گرم را که در کارهای تجربی گذشته گزارش شده بود، گردآوری کردند. این محدوده با توجه به شرایط آزمایش متفاوت، از جمله سیال عامل، فشار و لوله‌های گردبادی معمولی با ابعاد و طراحی‌های متنوع، متغیر می‌باشد. تولید کنندگان نام برده شده، کاربردهای زیادی را برای لوله

لوله گردبادی معمولی وسیله‌ای است که یک جریان گاز پر فشار را به دو جریان گرم‌تر و سردتر تبدیل می‌سازد، جریان گاز به صورت مماسی وارد لوله گردبادی معمولی می‌شود و با سرعت چرخشی بالا به حرکت خود در سمت لوله گرم ادامه می‌دهد و بخشی از جریان از این سمت خارج می‌شود. بخش دیگری از جریان برگشته و از سمت مخالف با دمای پایین‌تر خارج می‌شود. علاوه بر عملکرد سرمایشی و گرمایشی، لوله گردبادی معمولی ساده، ارزان و مطمئن بوده و نیاز به تعمیرات ندارد. این ویژگی‌ها باعث شده است که در صنعت جایگزین مناسبی برای تجهیزات خنک‌کاری و گرمایش نقطه‌ای باشد.

پارامترهایی مانند فشار ورودی، دبی جرمی جریان سرد و گرم، نوع سیال عامل و میزان رطوبت نیز بررسی شده است. سینگ و همکاران [5] روی سطح مقطع ورودی نازل که موثر در تشکیل گردباد است، بررسی‌هایی تجربی انجام دادند. آیمسا و پرومونتگ [4] عدد $0/33$ را برای نسبت قطر نازل به قطر لوله گردبادی گزارش نمودند.

تعداد کانال‌های جریانی که بر روی ژنراتور قرار گرفته‌اند نیز از پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد لوله گردبادی است و به همین دلیل موضوع بسیاری از تحقیقات عملی و نظری شده است. کرماچی [6] به صورت آزمایشگاهی برای تعداد متغیر نازل، تحلیل انرژی را انجام داده و جدایش انرژی را بررسی کرد. شمس الدینی و حسینی‌نژاد [7] نیز اثر تعداد نازل‌ها را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که هر چه تعداد نازل‌ها در مدل سه بعدی افزایش یابد، عملکرد لوله گردبادی به مدل دو بعدی تقارن محوری نزدیک‌تر می‌شود. شکل کانال ورودی مارپیچی با تعداد نازل بین 1 تا 4، توسط آیمسا [8] مورد بررسی تجربی قرار گرفت. آیمسا نشان داد که لوله گردبادی با نازل مارپیچی در مقایسه با لوله گردبادی با نازل مماسی معمولی برای یک فشار ورودی معین و در یک کسر جرمی سرد خاص، عملکرد بهتری در کاهش دمای جریان سرد دارد. پورمحمود و همکاران [9] نیز در مطالعه‌ای عددی اثر ورودی حلزونی را با ورودی نازل معمولی بررسی کرده‌اند. آن‌ها به صورت عددی اثر نازل مارپیچی را بر روی توان سرمایشی لوله گردبادی مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که این نازل باعث افزایش سرمایش می‌شود.

سعدی و ولی‌پور [10] پارامترهای فیزیکی چون قطر لوله، قطر اریفیس سرد و شکل نازل را به صورت تجربی بررسی نمودند. آن‌ها همچنین اثر پارامترهای ترموفیزیکی چون رطوبت جریان، فشار ورودی و کسر جرمی سرد را بررسی نمودند. با توجه به بررسی مطالعات انجام شده درباره‌ی لوله گردبادی مشخص می‌شود که تابع جریان، تکنیک گالرکین، اختلاف محدود و حجم محدود برای حل معادلات استفاده شده است. فلونت و سی اف ایکس از جمله نرم‌افزارهایی می‌باشند که توسط برخی از پژوهشگران برای تحلیل میدان جریان لوله گردبادی استفاده شده‌اند. همچنین در مدل کردن جریان آشفته بیشتر از روش $k-\epsilon$ (استاندارد و RNG) استفاده شده است.

تحقیقات گذشته درباره‌ی لوله گرم عمدتاً متمرکز بر زاویه، طول و شکل لوله گرم بوده است. همچنین زاویه شیر مخروطی در انتهای لوله گرم از جمله مواردی بوده که مورد مطالعه قرار گرفته است. ایده واگرا کردن لوله گرم اولین بار توسط تاکاهاما و همکاران [11] بیان شد. آن‌ها با واگرا کردن لوله گرم، امکان کوتاه‌تر کردن لوله گردبادی معمولی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که واگرا کردن لوله گرم با یک زاویه کوچک حدود 2 تا 3 درجه باعث بهبود عملکرد وسیله می‌شود. چانگ و همکاران [12] نیز اثر تغییر در زاویه لوله گرم را مورد مطالعه قرار داده و بیان نمودند که لوله گرم با زاویه 4° بیشترین اختلاف دما را بین جریان سرد و گرم در مقایسه با دیگر زوایا ایجاد می‌کند. کار چانگ نشان داد که اختلاف دما بین جریان سرد و

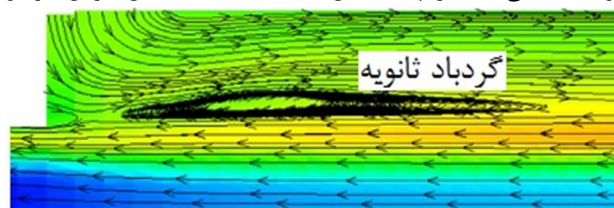
گردبادی پیشنهاد داده‌اند که می‌توان به خنک‌کاری در عملیات ماشین‌کاری، خنک‌کاری مدار الکترونیکی، سرد کاری قالب تزریق پلاستیک، خشک کردن جوهر روی برچسب‌ها و بطری‌ها، تست حرارتی سنسورها، رطوبت‌گیری از گازها و سرد کردن پرها اشاره کرد [2].

طرح‌واره‌ای از عملکرد لوله گردبادی معمولی در جدایش دمایی در شکل 1 نشان داده شده است. جریان ورودی به لوله گردبادی معمولی با فشار بالا از طریق نازل مماسی وارد لوله اصلی شده و به وسیله این نازل‌ها یک جریان گردابی تولید می‌شود. به واسطه اصطکاک بین لایه‌های بیرونی و درونی، اختلاف فشاری بین جریان در ناحیه دیواره و جریان مرکزی به وجود می‌آید. این گرادیان فشار شعاعی یکی از عوامل جدایش دمایی بین دو جریان است. به واسطه اصطکاک دیواره، سرعت جریان در اطراف دیواره کمتر از سرعت جریان در ناحیه مرکزی است. در نتیجه انرژی از جریان مرکزی به جریان کناری منتقل می‌شود. گاز علاوه بر حرکت چرخشی ذکر شده، در امتداد محور لوله نیز حرکت کرده و به سمت خروجی جریان می‌یابد. شیر انتهایی گرم اجازه نمی‌دهد که همه جریان از انتهای گرم خارج شود و از خروج جریان مرکزی جلوگیری می‌کند. در سمت سرد لوله گردبادی معمولی، اریفیس سرد قرار دارد که بخشی از جریان مرکزی از طریق آن خارج می‌شود. با آزمایش، آلبرون و گردون [3] متوجه شدند که بخشی از جریان درون لوله گردبادی معمولی سیرکوله می‌شود. در شکل 2 به وجود آمدن جریان گردباد ثانویه در حل عددی مشاهده می‌شود. محل تشکیل این گردابه درون لوله گرم بوده و با افزایش فشار جریان ورودی می‌تواند کشیده‌تر شود. آلبرون و همکاران گردباد ثانویه را به عنوان یک سیکل ترمودینامیک کلاسیک در نظر گرفتند که حرارت را بین دو جریان بیرونی و مرکزی منتقل می‌سازد.

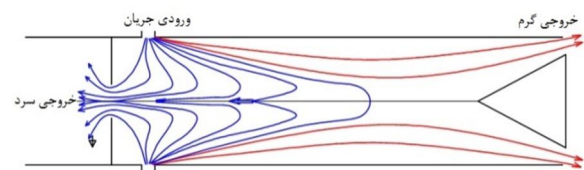
رانکیو در آزمایشاتی که در مورد جداکننده‌های سیکلونی انجام می‌داد به طور کاملاً تصادفی متوجه گرادیان دما شد و لوله گردبادی معمولی توسط وی اختراع و در سال 1934 به نام او ثبت شد. تا سال 1946 که هیلش اقدام به انتشار اطلاعات خود از یک بررسی عددی در زمینه کارکرد گرمایی لوله گردبادی معمولی کرد علاقه‌مندی زیادی به این موضوع وجود نداشت [4].

بعضی از جزئیات ساختمانی اولیه به همراه یک تئوری برای توصیف علت این پدیده در مقاله ارائه شد. لوله گردبادی رانکیو-هیلش، لوله گردبادی رانکیو و لوله گردبادی هیلش برخی از نام‌های مورد استفاده برای این وسیله هستند. در دهه‌های اخیر تحقیقات بیشتری درباره‌ی لوله گردبادی معمولی برای بهبود عملکرد و بیان علت جدایش دمایی ادامه پیدا کرده است. همچنین ابتکارات زیادی روی آن انجام شده است. به طور کلی تحقیقات این حوزه را می‌توان به دو بخش عددی و تجربی تقسیم نمود که هدف از آن‌ها بالا بردن کارایی وسیله و بیان علت جدایش یا بیان تئوری لوله گردبادی می‌باشد.

در تحقیقات تجربی و عددی روی بخش‌های مختلف لوله گردبادی چون قطر و زاویه اریفیس سرد، سطح مقطع ورودی و تعداد نازل، شکل کانال نازل، زاویه شیر مخروطی و زاویه واگرایی لوله گردبادی آزمایش‌های فراوانی انجام شده است تا عملکرد وسیله ارتقا یابد. به موازات این پژوهش‌ها، اثر



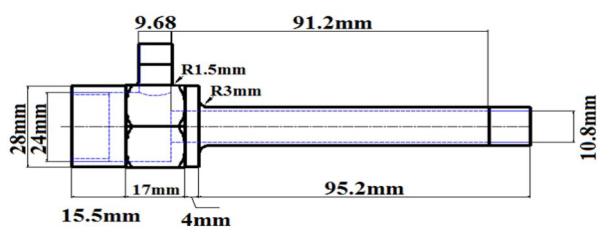
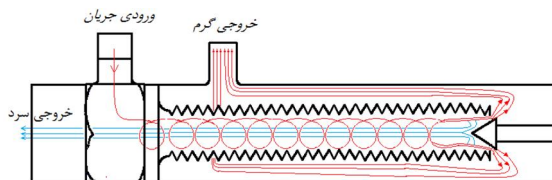
شکل 2 گردباد ثانویه ایجاد شده در حل عددی ارائه شده توسط آلبرون [1]



شکل 3 مسیر جریان از ورودی به خروجی گرم و سرد در لوله گردبادی معمولی

به کار گرفته شود، به‌ویژه در جاهایی که جریان پر فشار می‌بایست به جریان با فشار پایین تبدیل شود، مشکل اساسی لوله گردبادی معمولی بازده حرارتی پایین آن است.

لوله گردبادی دو جداره دارای بازده حرارتی بالاتری در مقایسه با نمونه معمولی آن است که این امر به‌واسطه عبور مجدد جریان گرم از روی لوله گرم می‌باشد. برای افزایش تماس بین لوله گرم و جریان عبوری از روی لوله بیرونی، سطح بیرونی لوله داخلی آج‌دار شده است. در شکل 3 طرح‌واره‌ای از لوله گردبادی دو جداره ارائه شده است. در این شکل مسیر حرکت جریان گرم پس از عبور از شیر مخروطی نمایش داده شده است. در شکل 4 لوله گردبادی معمولی مورد استفاده در آزمایش و ابعاد آن ارائه شده است. ابعاد بخش‌های مشترک لوله گردبادی دوجداره و لوله گردبادی معمولی یکی می‌باشند. ژنراتور گردبادی در شکل 5 نشان داده شده است. ژنراتور گردبادی با عبور جریان ورودی از درون نازل‌هایش، آن را به‌صورت چرخشی در می‌آورد. برای بررسی بیشتر و نیز مقایسه، از دو ژنراتور گردبادی با مساحت ورودی متفاوت در این آزمایش استفاده شده است. سطح نازل سطح ورودی به درون محفظه گردبادی است که به جریان اجازه می‌دهد تا وارد لوله گردبادی شود. مجرای وسط ژنراتور گردبادی اریفیس سرد است که برای هر دو نمونه ژنراتور گردبادی یکی در نظر گرفته شده است. تنها اختلاف دو ژنراتور آ و ب در مساحت نازل ورودی می‌باشد. سطح بزرگتر اجازه ورود جرم بیشتری از جریان را به لوله گردبادی می‌دهد. تنها بخشی از جریان با عبور از لوله گرم اجازه عبور از شیر مخروطی را پیدا می‌کند. جریانی که اجازه عبور از شیر مخروطی انتهای گرم را پیدا نمی‌کند، بازگشته و از سمت سرد خارج می‌شود. این جریان با تبادل حرارتی که با جریان گرم پیش‌رونده انجام می‌دهد سرد شده، انرژی خود را به جریان پیش‌رونده داده و آن را گرم می‌کند. تصویر لوله گردبادی دو جداره مورد استفاده در آزمایش در شکل 6 نشان داده شده است.



شکل 5 ژنراتور گردبادی

گرم 11/7% در مقایسه با لوله گرم سیلندری شکل بهبود یافته است. فرزانه‌گرد و کارگران [13] اثر طول لوله را بر جدایش جریان به‌صورت تجربی بررسی کرده و مشاهده نمودند که افزایش طول باعث بهتر شدن عملکرد جدایشی لوله گردبادی می‌شود. ولی‌پور و نیازی [14] آزمایش‌هایی را روی چند لوله گردبادی که در مسیر لوله گرم دارای خمیدگی محوری بود، انجام دادند. این آزمایش‌ها در فشارهای متفاوت انجام شد و برای بررسی تاثیر انحنای و میزان آن از لوله‌هایی با زوایای انحنای متفاوت استفاده شد تا روند بهبود یا تخریب فرایند جدایش انرژی با تغییر انحنای محوری تعیین شود. مارکال و همکاران [15] با چهار مقدار متفاوت برای زاویه شیر مخروطی، عملکرد لوله گردبادی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان نمودند که کاهش زاویه شیر مخروطی باعث افزایش جدایش انرژی می‌شود و افزایش آن به معنای تغییر ناگهانی در مسیر جریان بوده، ناپایداری در جریان بیشتر و عملکرد وسیله کاهش می‌یابد.

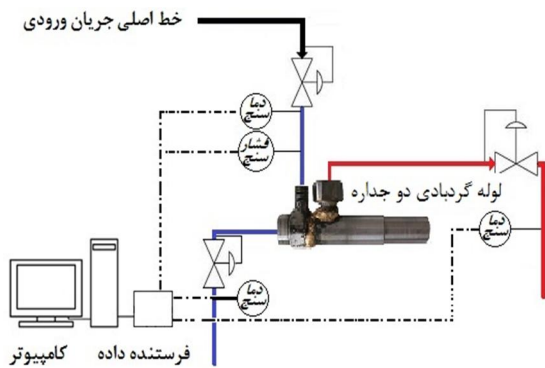
در استفاده از گرمای ایجاد شده توسط لوله گردبادی می‌توان به هیت‌ر گازی گردبادی شرکت ورتکس یونیورسال اشاره کرد که با استفاده از تکنولوژی لوله گردبادی، گرمایش گاز طبیعی در ایستگاه‌های تقطیل فشار را انجام می‌دهند. این شرکت با راه اندازی سیستم خود در بیش از 700 واحد مختلف در دنیا توانسته است در کاهش مصرف سوخت ایستگاه‌های تقطیل فشار گاز طبیعی قدم‌های مثبتی برداشته و در نمونه نصب شده در ترکیه حدود 60 درصد هزینه مصرف سوخت را پایین بیاورد [16].

در طرح پیشنهادی توسط شرکت ورتکس یونیورسال، از جریان گرم خروجی از لوله گردبادی برای گرم کردن شیر اختناق استفاده می‌شود. در این طرح هدف، جلوگیری از یخ‌زدگی در شیر اختناق است. این طرح می‌تواند در تمام ایستگاه‌های تقطیل فشار گاز مورد استفاده قرار گیرد و باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی مورد نیاز برای پیش‌گرم کردن گاز طبیعی شود. استفاده از توربو اکسپندرها روشی دیگر برای کاهش مصرف انرژی در این ایستگاه‌ها است که البته تنها در ایستگاه‌های با دبی بالا اقتصادی می‌باشد.

در این مقاله نمونه جدیدی از لوله گردبادی معرفی شده که لوله گردبادی دو جداره نامگذاری شده است. جریان گرم پس از عبور از شیر مخروطی از روی لوله گرم عبور می‌کند. در اثر حرکت جریان خروجی گرم روی لوله گرم، اتلاف حرارتی بیشتری از لوله گرم صورت می‌گیرد و کارایی لوله گردبادی دو جداره در جدایش دمایی در مقایسه با نمونه معمول بالا می‌رود. در هر دو نمونه لوله گردبادی نسبت طول لوله به قطر لوله 10 می‌باشد. هدف بررسی میزان بهبود جدایش انرژی توسط لوله گردبادی دو جداره در مقایسه با نمونه معمول آن است. برای بررسی بیشتر از دو عدد ژنراتور گردبادی با مساحت نازل متفاوت استفاده شده است. نسبت مساحت نازل ژنراتورهای گردبادی به مساحت لوله گرم برای این دو ژنراتور گردبادی 0/18 و 0/15 می‌باشد و آن‌ها به‌ترتیب ژنراتور آ و ب نامگذاری شده اند. قطر اریفیس سرد هر دو ژنراتور 6/4 میلیمتر است. در این طرح جریان گرم درون لوله گردبادی معمولی از دو مجرا عبور می‌کند و به‌واسطه تغییرات میدان جریان که در آن اتفاق می‌افتد، کارایی در مقایسه با نمونه معمول افزایش می‌یابد.

2- معرفی لوله گردبادی دو جداره

لوله گردبادی دو جداره می‌تواند مشابه با لوله گردبادی معمولی در ایجاد دو جریان سرد و گرم از یک جریان پر فشار مورد استفاده قرار گیرد. این وسیله بدون قطعه متحرک بوده و می‌تواند در ایجاد سرمایش و گرمایش موضعی



شکل 7 لوله گردبادی دو جداره و معمولی مورد استفاده در پروژه و تجهیزات

$$\mu_c = \frac{T_h - T_{in}}{T_h - T_c} \quad (3)$$

در محاسبه‌ی بازده حرارتی که در واقع بازده سرمایی است، برای گاز طبیعی از قانون انبساط آدیباتیک گاز ایده‌آل استفاده می‌شود. بازده حرارتی عبارت است از اختلاف انتالپی ورودی و خروجی سرد تقسیم بر اختلاف انتالپی ورودی به خروجی سرد طی یک فرآیند آیزنتروپیک. هنگامی که گاز در لوله جریان دارد فرض بر این است که فرایند به‌صورت انبساط آیزنتروپیک انجام می‌شود، لذا می‌توان رابطه (4) را نوشت:

$$\mu_c = \frac{T_{in} - T_c}{T_{in} \left(1 - \left(\frac{p_a}{p_{in}} \right)^\gamma \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (4)$$

که در آن P_{in} و P_a به‌ترتیب فشار هوای ورودی و فشار اتمسفر و γ نسبت حرارت مخصوص است. برای دمای ورودی ثابت و نیز نسبت فشار ثابت، بازده سرمایی تنها متناسب با اختلاف دمای سرد می‌باشد.

لوله گردبادی (دو جداره یا معمولی) اگر به‌عنوان یک پمپ حرارتی فرض شود ضریب عملکرد آن به‌صورت نسبت توان حرارتی (معادله 5) به‌کار مورد نیاز برای تراکم جریان (معادله 6) تعریف می‌شود. برای هر دو نمونه لوله گردبادی توان حرارتی همان ظرفیت حرارتی جریان گرم خروجی است. توان حرارتی و کار مورد نیاز برای متراکم کردن جریان از فشار خروجی به فشار ورودی لوله گردبادی طی یک فرآیند تراکم هم‌دمای برگشت‌پذیر به‌صورت زیر تعریف می‌شوند. در نتیجه ضریب عملکرد گرمایی به‌صورت معادله (7) ارائه می‌شود:

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_h \cdot c_p \cdot (T_h - T_{in}) \quad (5)$$

$$P = \dot{m}_{in} \cdot R \cdot T_{in} \cdot \ln(p_{in} / p_c) \quad (6)$$

$$COP_{hp} = \dot{Q}_h / P = \frac{\gamma \cdot (1 - \mu_c) \cdot (T_h - T_{in})}{(\gamma - 1) \cdot \ln(p_{in} / p_c)} \quad (7)$$

5- عدم قطعیت در اندازه‌گیری و محاسبه کسر جرمی

برای اعتبار سنجی داده‌ها آنالیز خطای منابع و بزرگی خطای ابزار انجام می‌پذیرد. خطاهای مرتبط با اندازه‌گیری‌های دما و فشار در اینجا بررسی می‌شوند. بیشینه خطاهای ممکن، در پارامترهای مختلف مانند دما و فشار، با روش پیشنهادی موفات [17] تخمین زده می‌شوند. خطاها به‌وسیله کمترین مقادیر خروجی و دقت ابزار قابل تخمین است. این روش بر مبنای تعیین دقیق عدم قطعیت در اندازه‌گیری‌های تجربی مختلف است. اگر یک کمیت



شکل 6 تصویر لوله گردبادی دو جداره

3- نحوه انجام آزمایش

تجهیزات مورد استفاده در آزمایش و نحوه قرارگیری و چیدمان لوله گردبادی دو جداره در آزمایش در شکل 7 نشان داده شده است. برای انجام مجدد آزمایش با لوله گردبادی معمولی نیاز است که لوله گردبادی دوجداره در این تجهیزات جایگزین نمونه معمول در شکل 7 شود. فشار آزمایش 4 بار می‌باشد. دما و فشار جریان پس از عبور از رگلاتور به‌وسیله دماسنج و فشارسنج تعبیه شده اندازه‌گیری می‌شود. سپس جریان گاز از درون نازل‌های روی ژنراتور با چرخش به درون محفظه گردبادی وارد می‌شود و به سمت خروجی گرم می‌رود. شش نازل روی ژنراتور گردبادی وجود دارد. به‌دلیل آن که تمام جریان اجازه خروج از شیر گرم را پیدا نمی‌کند از میان جریان رفت مسیر خود را باز کرده و به‌سمت خروجی سرد می‌رود. در آزمایش لوله گردبادی معمولی، در خروجی سرد و گرم نیز دماسنج‌ها دمای دو جریان را اندازه‌گیری می‌کنند. در آزمایش لوله گردبادی دو جداره، دما پس از شیر خروجی گرم اندازه‌گیری نمی‌شود، بلکه این جریان با عبور از روی لوله گرم خود را به خروجی می‌رساند. اندازه‌گیری دمای گرم در این نقطه اتفاق می‌افتد. دماسنج مورد استفاده در این آزمایش از نوع سنسورهای پلاتینیوم 100 می‌باشد.

4- روابط و معادلات حاکم

برای بررسی عملکرد لوله گردبادی دو جداره و مقایسه آن با نمونه معمول نیاز به تعریف پارامترهایی است. کسر جرمی سرد به‌صورت نسبت نرخ جرمی جریان سرد ایجاد شده در لوله به نرخ جرمی جریان کل ورودی تعریف می‌شود و با μ_c نشان داده می‌شود. اختلاف دمای سرد به صورت اختلاف دمای جریان ورودی و دمای جریان سرد خروجی تعریف می‌شود. به‌طور مشابه اختلاف دمای جریان گرم به‌صورت اختلاف دمای جریان گرم خروجی و دمای جریان ورودی تعریف می‌شود. این دو پارامتر به‌صورت $\Delta T_c = T_{in} - T_c$ و $\Delta T_h = T_h - T_{in}$ تعریف می‌شوند. در تحلیل هر دو نمونه لوله گردبادی، قانون اول ترمودینامیک به‌صورت رابطه (1) ارائه می‌شود.

$$(h_0)_{inlet} = \mu_c (h_0)_{cold} + (1 - \mu_c) (h_0)_{hot} \quad (1)$$

h_0 انتالپی سکون است. با صرف‌نظر کردن از انرژی پتانسیل جریان در خروجی‌ها، برای یک گاز ایده‌آل معادله بقا می‌تواند به‌صورت رابطه (2) نیز نوشته شود.

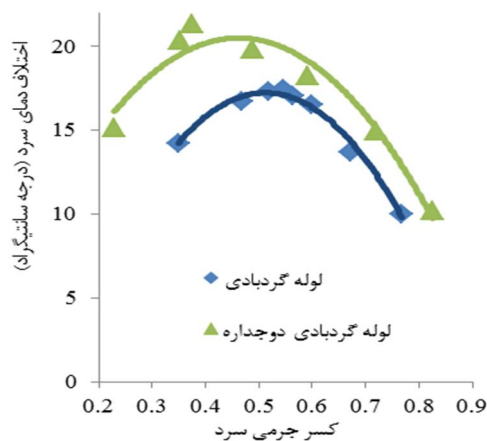
$$c_p T_{in} = \mu_c c_p T_c + (1 - \mu_c) c_p T_h \quad (2)$$

در این شرایط T_{in} دمای گاز ورودی، T_c دمای جریان سرد و T_h دمای جریان گرم است. وقتی معادله (2) بر حسب μ_c مرتب می‌شود، می‌توان نسبت دبی جرمی جریان سرد را به‌وسیله دمای خوانده شده تخمین زد. با داشتن دماهای خروجی و اندازه‌گیری دمای جریان ورودی طبق معادله 3، کسر جرمی سرد با فرض گاز ایده‌آل قابل محاسبه است.

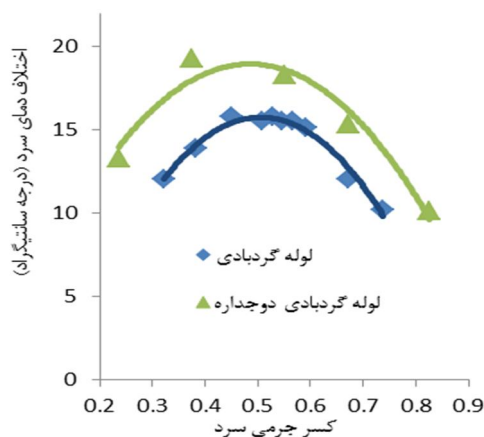
بهینه به واسطه تغییر توازن فشار درون و خروجی‌های لوله گردبادی معمولی است که توسط لاو [19] و پیرایشویل و فوزیوا [20] بیان شده است.

در زمانی که شیر سرد هنوز مورد استفاده قرار نگرفته است، در محدوده کسر جرمی بهینه سرد تا مقدار 1، طبق شکل 10، افت فشار کلی در لوله گردبادی معمولی جمع افت فشار در ورودی (ا)، افت فشار ژنراتور (ب)، افت فشار جریان (ج)، افت فشار اریفیس سرد (د) و افت فشار شیر کنترل خروجی گرم (ر) می‌باشد. افت فشار در ژنراتور ناشی از شکل ژنراتور و تعداد نازل‌های تعبیه شده روی آن است. افت فشار جریان نیز شامل نابودی گردباد جریان چرخشی و کم شدن یا معکوس شدن سرعت محوری در مرکز لوله می‌باشد. افت فشار ناشی از شیر کنترلی لوله گرم به واسطه تصمیم‌گیری برای مقدار کسر جرمی سرد و موقعیت نقطه سکون محوری است (نیمبالکار و مولر [21]). بدیهی است هر چه افت فشار در سمت لوله گرم کم شود یا افت فشار سمت سرد ناشی از اریفیس سرد و یا شیر سرد زیاد شود، کسر جرمی کاهش می‌یابد.

لوله گردبادی دو جداره در سرد کردن جریان ورودی عملکرد بهتری را نسبت به نمونه معمولی ارائه داده است و در تمام محدوده کسر جرمی، بیشترین اختلاف دمای سرد را ایجاد نموده است. این لوله با ژنراتور آ در کسر جرمی 0/37 به 21/3 درجه سلسیوس اختلاف دمای سرد دست پیدا کرده است (بر اساس شکل 8). برای ژنراتور ب در همین کسر جرمی بیشینه اختلاف دمای سرد مطابق با شکل 9، 19/3 درجه سلسیوس ثبت شده است.



شکل 8 اختلاف دمای سرد بر حسب کسر جرمی با ژنراتور آ



شکل 9 اختلاف دمای سرد بر حسب کسر جرمی با ژنراتور ب

تخمین زده شده γ ، به متغیرهای مستقل X_i بستگی داشته باشد خطا در مقادیر γ با رابطه (8) تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial \gamma}{\gamma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial X_i}{X_i} \right)^2} \quad (8)$$

که $\partial X_i / X_i$ خطا در متغیر مستقل، ∂X_i عبارت است از دقت ابزار اندازه‌گیری و X_i عبارت است از کمترین مقدار خروجی اندازه‌گیری شده. سنسورهای دمایی پلاتینیوم 100 برای اندازه‌گیری دما مورد استفاده قرار گرفته است. دقت اندازه‌گیری این سنسورها و لاگر داده‌ها، 0/5 و 0/1 درجه سلسیوس می‌باشد. بیشینه خطای ممکن در اندازه‌گیری دما با استفاده از مقادیر کمینه دمای اندازه‌گیری شده و دقت ابزار به دست می‌آید. طبق رابطه (9) داریم:

$$\frac{\partial T}{T} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_{PT100}}{T_{min}} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{log}}{T_{min}} \right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.5}{12} \right)^2 + \left(\frac{0.1}{12} \right)^2} = 0.04 = 4\% \quad (9)$$

ترنس미터 فشار برای اندازه‌گیری فشار مورد استفاده قرار می‌گیرد. فشار به صورت مستقیم از طریق لاگر با دقت 0/01 بار نمایش داده می‌شود. طبق رابطه (10) داریم:

$$\frac{\partial p}{p} = \sqrt{\left(\frac{\partial p_{trans}}{p_{min}} \right)^2 + \left(\frac{\partial p_{log}}{p_{min}} \right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.01}{1.33} \right)^2 + \left(\frac{0.01}{1.33} \right)^2} = 0.01 = 1\% \quad (10)$$

برای محاسبه عدم قطعیت کسر جرمی سرد، از روش کلاین-مک کلینتوک [18] استفاده می‌شود. طبق این روش برای محاسبه عدم قطعیت متغیر μ_c با رابطه f نسبت به متغیرهای T_c ، T_{in} و T_h از رابطه (11) استفاده می‌شود:

$$W_{\mu_c} = \left[\left(\frac{\partial f}{\partial T_{in}} W_T \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial T_c} W_T \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial T_h} W_T \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

که در آن $W_T = 0.5^\circ\text{C}$ عدم قطعیت در اندازه‌گیری دما می‌باشد. برای $T_{in} = 16^\circ\text{C}$ و $T_h = 70^\circ\text{C}$ ، $T_c = -8^\circ\text{C}$ عدم قطعیت در محاسبه کسر جرمی سرد 0/5 درصد محاسبه می‌شود.

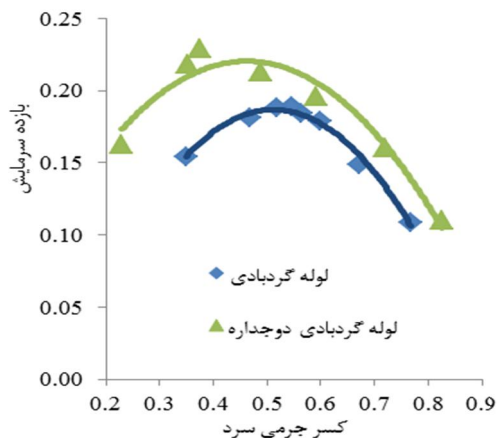
6- نتایج

نتایج آزمایش‌های انجام شده روی لوله گردبادی معمولی و دو جداره بر اساس اختلاف دمای سرد و گرم، بازده سرمایشی و ضریب عملکرد گرمایی ارائه شده‌اند. اختلاف دمای سرد در شکل 8 و شکل 9 به ترتیب برای ژنراتور آ و ب ارائه شده است. با افزایش کسر جرمی سرد اختلاف دمای سرد روندی صعودی نزولی را طی می‌کند. در این دو شکل پیداست که در یک مقدار میانی برای کسر جرمی سرد، بهترین عملکرد سرمایشی لوله گردبادی معمولی و لوله گردبادی دو جداره برای هر دو ژنراتور آ و ب اتفاق افتاده است. نکته‌ای که در هر دو نمودار قابل مشاهده است، تغییر کسر جرمی بهینه سرمایش آزمایش است. کسر جرمی بهینه سرمایش نقطه‌ای است که در آن بیشینه اختلاف دمای سرد حاصل می‌شود.

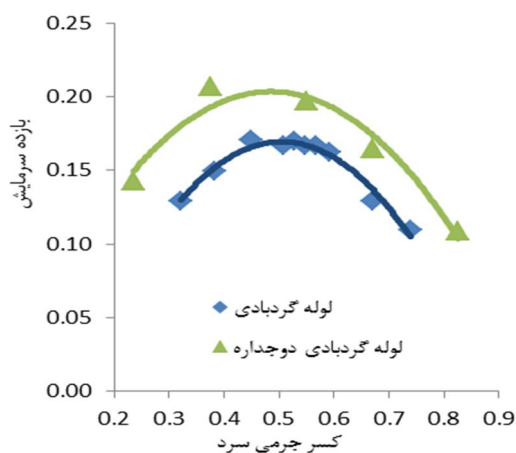
در آزمایش لوله گردبادی معمولی، کسر جرمی بهینه سرمایشی زمانی حاصل شده است که هر دو شیر گرم و سرد باز هستند. تغییر کسر جرمی

بازده سرمایش برای دو نمونه لوله گردبادی و دو ژنراتور آ و ب در شکل 13 و شکل 14 ارائه شده است. بازده سرمایش روندی منحنی شکل را طی می کند، به طوری که بازده در کسر جرمی پایین از مقادیر کمتری آغاز شده و در مقادیر میانی کسر جرمی به بیشینه مقدار خود رسیده و مجدداً با افزایش کسر جرمی سرد کاهش می یابد. علت روند صعودی نزولی منحنی بازده با معادله 4 قابل توضیح است. با توجه به معادله 4 و ارتباط مستقیم بازده سرمایش با اختلاف دمای سرد و ثابت بودن سایر پارامترهای این معادله، روند بازده سرمایشی مشابه با روند اختلاف دمای سرد می باشد. به همین دلیل بازده لوله گردبادی دو جداره نیز چنین روندی را نشان می دهد. برای ژنراتور آ، بیشینه بازده سرمایش لوله دو جداره و لوله گردبادی معمولی 23/6% و 19% می باشد. برای ژنراتور ب، بیشینه بازده سرمایش به ترتیب 21% و 17% می باشد.

ضریب عملکرد گرمایی برای دو نمونه لوله گردبادی مطابق رابطه 7 محاسبه شده، در شکل 15 و شکل 16 آمده است. کسر جرمی بهینه گرمایی کسر جرمی است که در آن بیشینه ضریب عملکرد گرمایی حاصل شده است. با افزایش کسر جرمی، عبارت مربوطه در صورت معادله 7 کاهش می یابد، اما اختلاف دمای گرم زیاد می شود تا مقدار کسر جرمی بهینه گرمایی، اثر افزایش اختلاف دما بر کاهش جمله کسر جرمی در صورت معادله 7 می چربد (یعنی نقطه کسر جرمی بهینه گرمایش) و پس از آن فرایند برعکس می شود.



شکل 13 بازده سرمایش برحسب کسر جرمی با ژنراتور آ

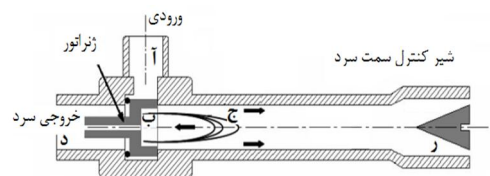


شکل 14 بازده سرمایش برحسب کسر جرمی با ژنراتور ب

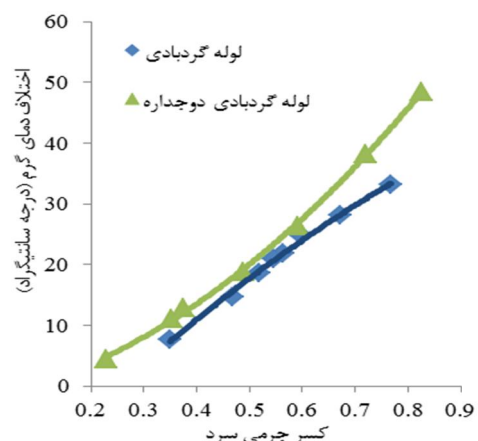
با توجه به اختلاف دمای گرم بزرگتر لوله گردبادی دو جداره مقدار کسر جرمی بهینه گرمایی در مقادیر بزرگتری حاصل می شود.

در شکل 11 و شکل 12 اختلاف دمای گرم ارائه شده است. با افزایش کسر جرمی روند تغییر این پارامتر صعودی می باشد. برای هر دو نمونه لوله گردبادی، افزایش اختلاف دمای گرم مشاهده می شود. در ایجاد اختلاف دمای گرم لوله گردبادی دو جداره دارای عملکرد بهتری نسبت به نمونه دیگر است. در آزمایش لوله گردبادی دو جداره، برای هر دو ژنراتور آ و ب، 48 درجه سلسیوس اختلاف دمای گرم ثبت شده است.

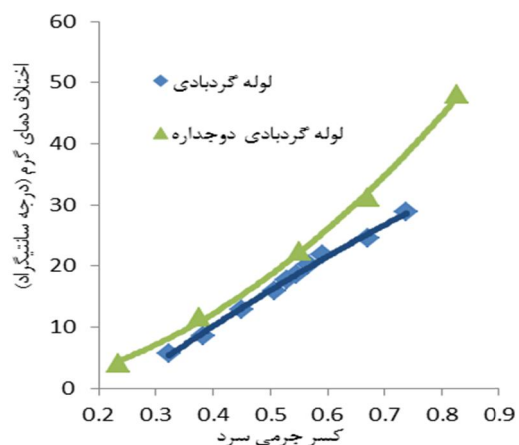
از مقایسه چهار شکل 8، 9، 11 و 12 بین روند سرمایش و گرمایش در کل محدوده کسر جرمی سرد، تفاوتی مشاهده می شود. در اختلاف دمای سرد، یک نقطه در محدوده میانی کسر جرمی دارای بیشینه مقدار می باشد. در صورتی که اختلاف دمای گرم دارای روندی صعودی است. در کسر جرمی بسیار کم، با بیشتر شدن مقدار کسر جرمی سرد، اختلاف دما سرد و گرم هر دو افزایش می یابند، یعنی در این محدوده از کسر جرمی، بیشتر جریان از سمت گرم عبور می کند و برگشت جریان سردی وجود ندارد تا تبادل حرارت بین دو جریان سرد و گرم اتفاق افتد.



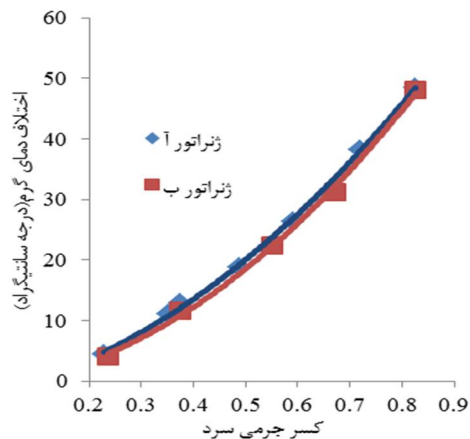
شکل 10 لوله گردبادی معمولی و موقعیت های ایجاد کننده افت فشار



شکل 11 اختلاف دمای گرم برحسب کسر جرمی با ژنراتور آ



شکل 12 اختلاف دمای گرم برحسب کسر جرمی با ژنراتور ب



شکل 18 مقایسه اختلاف دمای گرم برای لوله گردبادی دو جداره

لذا با افزایش کسر جرمی و تبادل انرژی بین دو جریان، اختلاف دمای سرد و گرم افزایش می‌یابد. با ادامه روند، مقدار جرم عبوری از خروجی گرم کاهش یافته و لذا حرارتی که این جریان به دست می‌آورد باعث افزایش بیشتر دما می‌شود. به همین دلیل است که در نمودار اختلاف دمای گرم، روند صعودی جریان گرم قابل مشاهده می‌باشد. با افزایش کسر جرمی، دمای گرم خروجی افزایش و دمای سرد خروجی کاهش می‌یابد. یعنی اختلاف دمای سرد و گرم هر دو افزایش می‌یابند تا جاییکه سطح اریفیس سرد خروجی جوابگوی افزایش دبی سرد خروجی نبوده و قطر جریان برگشتی از قطر اریفیس سرد بیشتر شده و عملکرد رو به رشد سرمایشی معکوس می‌شود.

7- اثر لوله گردبادی بر کسر جرمی سرد بهینه

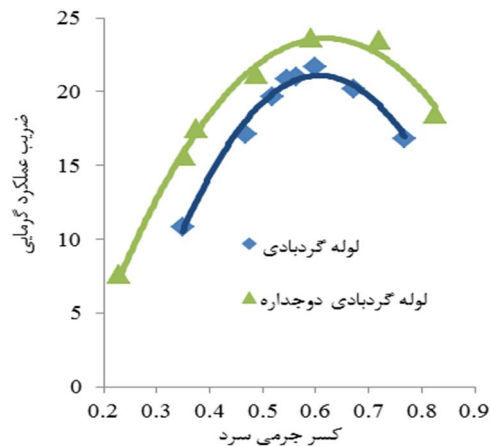
بر مبنای داده‌های تجربی به دست آمده، معادله‌ای برای ΔT_h بر حسب کسر جرمی سرد برازش می‌شود (یعنی دو معادله برای دو نمونه لوله گردبادی). برای مثال، معادله برازش شده برای لوله گردبادی معمولی در معادله (12) ارائه شده است.

$$\Delta T_h = -26.415\mu_c^2 + 91.792\mu_c - 21.553 \quad (12)$$

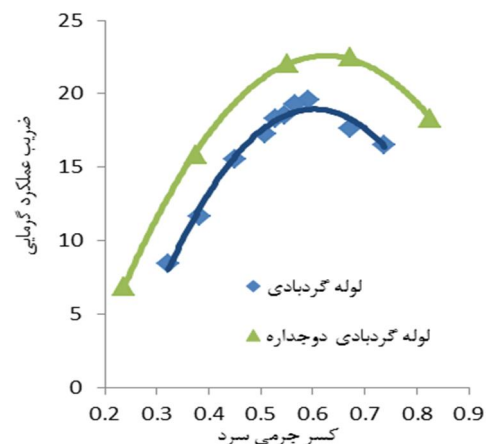
برای ΔT_h معین، مقدار کسر جرمی سرد به دست آمده و سپس از طریق معادله $\Delta T_c = \Delta T_h (1/\mu_c - 1)$ که از قانون اول ترمودینامیک حاصل می‌شود، ΔT_c محاسبه می‌شود. برای لوله گردبادی معمولی و لوله گردبادی دو جداره، برای اختلاف دمای گرم 5، 10 و 20 درجه سلسیوس شکل 19 به دست آمده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود برای مقدار معین اختلاف دمای گرم، دو نقطه برای لوله گردبادی معمولی و دو جداره به دست آمده است، که این نقاط بر روی منحنی معادله $\Delta T_c = \Delta T_h (1/\mu_c - 1)$ قرار دارند. مقدار کسر جرمی برای لوله گردبادی دوجداره کمتر از مقدار مربوط به لوله گردبادی معمولی است. اما انتظار این است که با توجه به افزایش طول مسیر گرم در لوله گردبادی دو جداره، مقاومت مسیر گرم بیشتر شده و جریان کمتری از آن عبور نماید. اما آن‌چه که باعث تغییر در کسر جرمی می‌شود، فشار سمت سرد و گرم است.

دو عامل این افت فشار را ایجاد می‌کنند، افت فشار ناشی از مسیر جریان و افت فشار ناشی از شیر سرد و گرم. درست است که افت فشار مسیر گرم لوله گردبادی معمولی کمتر از دو جداره است اما عامل اصلی و تعیین کننده، شیرهای دو طرف لوله گردبادی هستند که تعیین می‌کنند، چه مقدار از جریان از دو سمت خارج شوند.

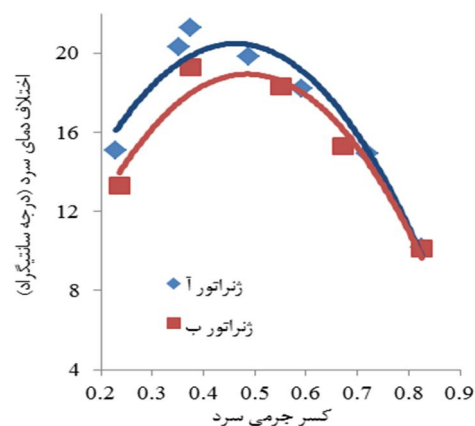
طبق شکل 17 و شکل 18، این نکته قابل مشاهده است که برای لوله گردبادی دو جداره، عملکرد گرمایشی دو ژنراتور آ و ب مشابه هم می‌باشد و این در حالی است که در سرمایش ژنراتور آ در مقایسه با ژنراتور ب جریان سردتری را به وجود می‌آورد. سطح مقطع نازل به واسطه اینکه تعیین کننده در میزان دبی جرمی وارد شده به درون محفظه گردبادی است، پارامتری مهم در بهبود بازده محسوب می‌شود.



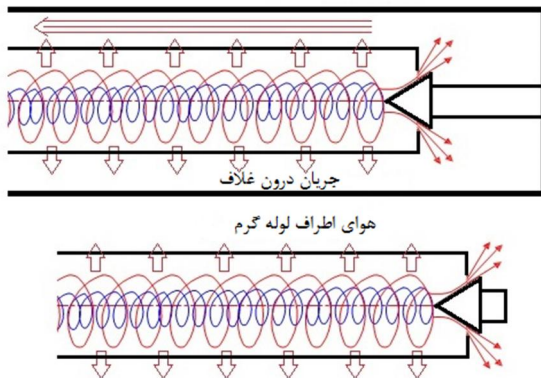
شکل 15 ضریب عملکرد گرمایی بر حسب کسر جرمی با ژنراتور آ



شکل 16 ضریب عملکرد گرمایی بر حسب کسر جرمی با ژنراتور ب



شکل 17 مقایسه اختلاف دمای سرد برای لوله گردبادی دو جداره

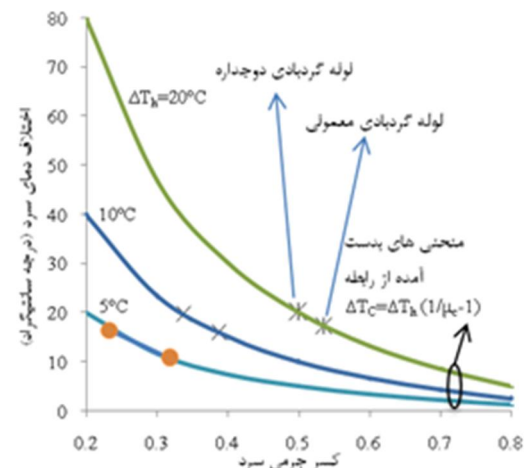


شکل 20 لوله گردبادی دو جداره و معمولی در تبادل حرارت لوله گرم با اطراف

در لوله گردبادی دو جداره مطابق شکل 20، جریان گاز با سرعت بالا از روی لوله داخلی عبور می‌کند و سپس خارج می‌شود. در آزمایش‌ها انجام شده، دمای خروجی از لوله گردبادی دو جداره نسبت به معمولی بیشتر است. می‌توان این افزایش دما را از انتهای شیر مخروطی تا خروجی در لوله گردبادی دو جداره در نظر گرفت. بنابراین گرما از جریان درون لوله داخلی به جریان در پوسته منتقل می‌شود. این اتلاف گرما نسبت به لوله گردبادی معمولی بیشتر می‌باشد. به واسطه سرعت بالای جریان از روی لوله داخلی، انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری ایجاد می‌شود که باعث اتلاف بیشتر حرارت در مقایسه با لوله گردبادی معمولی خواهد شد. این شیوه با سرد کردن لوله گرم در لوله گردبادی قابل مقایسه می‌باشد. آیمسا و همکاران [22] با خنک کردن لوله گرم لوله گردبادی معمولی بیان کردند که 5 تا 9 درصد بازده سرمایشی را بهبود داده و اختلاف دمای سرد در حدود 5/5 تا 8/8 درصد افزایش یافته است. علت بهبود این نکته است که آب سرد کننده اطراف لوله گرم به‌عنوان دریافت کننده حرارت جریان محیطی عمل کرده و این امر کمک به تراکم بیشتر جریان گرم در دیواره می‌نماید و به دنبال آن، انبساط جریان سرد در مرکز لوله بهبود می‌یابد. انبساط بهتر جریان در مرکز لوله باعث کاهش بیشتر دما می‌شود. به عبارت دیگر آب خنک کننده سبب سهولت انتقال حرارت بین ناحیه داخلی و خارجی می‌شود. کاهش بیشتر دمای سرد در لوله گردبادی دو جداره در مقایسه با لوله گردبادی معمولی نیز بیانگر افزایش میزان انتقال حرارت از ناحیه مرکزی به ناحیه بیرونی باشد. همین افزایش انتقال حرارت موجب کاهش بیشتر دمای جریان سرد لوله گردبادی دو جداره در مقایسه با لوله گردبادی معمولی می‌شود.

9- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله با معرفی لوله گردبادی دو جداره، عملکرد آن به‌صورت تجربی در مقایسه با لوله گردبادی معمولی در جدایش حرارتی یک جریان پر فشار مورد مطالعه قرار گرفت. هر دو نمونه لوله گردبادی معمولی و دو جداره دارای نسبت طول به قطر لوله 10 می‌باشند. برای بررسی بهتر مشاهدات، دو ژنراتور با ابعاد متفاوت در سطح مقطع برای آزمایش مورد استفاده قرار گرفت که هر دو دارای شش نازل هستند. نسبت سطح مقطع نازل به سطح لوله گرم برای این دو ژنراتور که با نام A و B نامگذاری شده‌اند، 0/15 و 0/18 می‌باشد. قطر اریفیس سرد هر دو ژنراتور 6/4 میلی‌متر است. نتایج نشان می‌دهد که روند تغییر عملکرد دو نمونه لوله گردبادی برای هر دو ژنراتور مشابه است، اما لوله گردبادی دو جداره میزان جدایش سرمایشی و گرمایشی را ارتقا داده است. لوله گردبادی دو جداره با تغییر در میدان جریان درون لوله و افزایش اتلاف



شکل 19 مقایسه کسر جرمی سرد دو نمونه لوله بر حسب اختلاف دمای گرم

در انجام آزمایش دو شیر در دو سمت سرد و گرم مورد استفاده قرار گرفته است. اگر برای هر دو نمونه لوله گردبادی شیر گرم و سرد خروجی کاملاً باز شود کسری از جرم که از سمت گرم لوله گردبادی دو جداره خارج می‌شود کمتر است، یعنی کسر جرمی سرد لوله دو جداره بزرگ‌تر از کسر جرمی سرد لوله گردبادی معمولی می‌شود. اما برای لوله دو جداره نقطه کسر جرمی بهینه که در آن کمینه دمای سرد به‌دست آمده، زمانی حاصل شده است که شیر سمت سرد، فشار خروجی سرد را بالا برده و در نتیجه دبی سرد (و کسر جرمی سرد) کاهش یافته است. اما در لوله گردبادی معمولی زمانی که شیر سرد مورد استفاده قرار می‌گیرد، عملکرد جدایش دمایی وسیله پایین‌تر می‌آید.

همچنین شکل 19 نشان می‌دهد که با افزایش اختلاف دمای گرم، اختلاف بین کسر جرمی سرد بهینه مربوط به لوله گردبادی معمولی و لوله گردبادی دو جداره کاهش می‌یابد. علت آن است که در هر دو نمونه لوله گردبادی، مقادیر بزرگ اختلاف دمای گرم در انتهای بازه کسر جرمی سرد (به‌واسطه روند صعودی قابل مشاهده در شکل 18) اتفاق می‌افتد. همان‌گونه که بیان شد، شیر سرد عامل ایجاد کننده اختلاف بین مقدار کسر جرمی بهینه سرمایشی لوله گردبادی معمولی و لوله گردبادی دو جداره است. در مقادیر کسر جرمی بزرگ، اثر شیر سرد کم‌رنگ‌تر شده و به همین دلیل مقادیر بهینه کسر جرمی سرد دو نمونه لوله گردبادی به هم نزدیکتر می‌شوند.

8- علت جدایش حرارتی بیشتر در لوله گردبادی دو جداره

با توجه به تفاوت مسیر جریان درون دو نمونه لوله گردبادی مورد بررسی، مشاهده می‌شود که میدان دمایی و فشاری درون لوله گردبادی دو جداره در مقایسه با لوله گردبادی معمولی متفاوت می‌باشد. همین تفاوت در میدان جریان، سبب عملکرد متفاوت لوله گردبادی دو جداره می‌شود. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که سطح خارجی لوله گرم لوله گردبادی معمولی دارای دمای بالایی بوده و چون با هوای اطراف تماس دارد، بخشی از انرژی گرمایی جریان گرم در اثر این تماس به هوای اطراف داده می‌شود (شکل 20). این اتلاف حرارتی را می‌توان انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد فرض کرد. یعنی گرما از جریان میانی لوله گردبادی معمولی جدا شده و به لایه‌های جریان اطراف دیواره داده می‌شود و بخشی از این گرما از طریق دیواره لوله گردبادی معمولی به هوای اطراف منتقل می‌شود.

- 153, 2004.
- [6] V. Kırmacı, Exergy analysis and performance of a counter flow Ranque-Hilsch vortex tube having various nozzle numbers at different inlet pressures of oxygen and air, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 32, No. 7, pp. 1626-1633, 2009.
- [7] R. Shamsoddini, A. Hossein Nezhad, Numerical analysis of the effects of nozzles number on the flow and power of cooling of a vortex tube, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 33, No. 4, pp. 774-782, 2010.
- [8] S. Eiamsa-ard, Experimental investigation of energy separation in a counter-flow Ranque-Hilsch vortex tube with multiple inlet snail entries, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 6, pp. 637-643, 2010.
- [9] N. Pourmahmoud, A. Hassanzadeh, O. Moutaby, Numerical analysis of the effect of helical nozzles gap on the cooling capacity of Ranque-Hilsch vortex tube, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 35, No. 5, pp. 1473-1483, 2012.
- [10] M. H. Saidi, M. S. Valipour, Experimental modeling of vortex tube refrigerator, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 23, No. 15, pp. 1971-1980, 2003.
- [11] H. Takahama, H. Kawamura, S. Kato, H. Yokosawa, Performance characteristics of energy separation in a steam-operated vortex tube, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 17, No. 6, pp. 735-744, 1979.
- [12] K. Chang, Q. Li, G. Zhou, Q. Li, Experimental investigation of vortex tube refrigerator with a divergent hot tube, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 34, No. 1, pp. 322-327, 2011.
- [13] M. Farzaneh-Gord, M. Kargar, Recovering Energy at Entry of Natural Gas into Customer Premises by Employing a Counter-Flow Vortex Tube, *Oil Gas Sci. Technology. Rev. IFP Energies nouvelles*, Vol. 65, No. 6, pp. 903-912, 2010.
- [14] M. S. Valipour, N. Niazi, Experimental modeling of a curved Ranque-Hilsch vortex tube refrigerator, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 34, No. 4, pp. 1109-1116, 2011.
- [15] B. Markal, O. Aydin, M. Avci, An experimental study on the effect of the valve angle of counter-flow Ranque-Hilsch vortex tubes on thermal energy separation, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 34, No. 7, pp. 966-971, 2010.
- [16] Accessed 23 November 2013; <http://www.universal-vortex.com>.
- [17] R. J. Moffat, Using Uncertainty Analysis in the Planning of an Experiment, *Trans. ASME, Journal Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 173-178, 1985.
- [18] S. J. Kline, F. A. McClintock, Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments, *Mechanical Engineering*, Vol. 75, No. 1, pp. 3-8, January 1953.
- [19] W. J. Love, Prediction of Pressure Drop in Straight Vortex Tubes, *AIAA Journal*, Vol. 12, No. 7, pp. 959-965, 1974/07/01, 1974.
- [20] S. A. Piralishvili, A. A. Fuzeeva, Hydraulic Characteristics of Ranque-Hilsch Energy Separators, *High Temperature*, Vol. 43, No. 6, pp. 900-907, 2005/11/01, 2005. English
- [21] S. U. Nimbalkar, M. R. Muller, An experimental investigation of the optimum geometry for the cold end orifice of a vortex tube, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 2-3, pp. 509-514, 2009.
- [22] S. Eiamsa-ard, K. Wongcharee, P. Promvong, Experimental investigation on energy separation in a counter-flow Ranque-Hilsch vortex tube: Effect of cooling a hot tube, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 2, pp. 156-162, 2010.

انرژی حرارتی از لوله داخلی، باعث بهبود در جدایش دمایی در لوله گردبادی دو جداره می‌شود. این نوآوری بازده سرمایش را 4 درصد برای هر دو ژنراتور در مقایسه با لوله گردبادی معمولی بیشتر نموده است. برای هر دو نمونه لوله گردبادی اختلاف دمای گرم روندی افزایشی داشته در حالی که تغییرات اختلاف دمای سرد دارای نقطه بیشینه‌ای در یک کسر جرمی میانی بوده است. به واسطه بالانس فشار در دو سمت خروجی لوله گردبادی، کسر جرمی سرد بهینه برای دو نمونه لوله گردبادی متغیر می‌باشد. با افزایش کسر جرمی در محدوده صفر تا یک، دمای گرم خروجی افزایش و دمای سرد خروجی کاهش می‌یابد. این امر باعث افزایش اختلاف دمای سرد و گرم می‌شود تا جایی که سطح اریفیس سرد خروجی جوابگوی افزایش دبی سرد خروجی نبوده و قطر جریان برگشتی از قطر اریفیس سرد بیشتر شده و عملکرد رو به رشد سرمایشی معکوس می‌شود. لذا از کسر جرمی بهینه سرد به بعد، از اختلاف دمای سرد کاسته می‌شود. اما جریان گرم در کسر جرمی بالا دارای دبی کمی است و کم شدن دبی باعث ارتقا دمای گرم تا محدوده کسر جرمی 0/8 می‌شود. به واسطه اینکه لوله گردبادی دو جداره اجازه عبور مجدد جریان از روی لوله گرم را داده عملکرد جدایش انرژی را هم در کاهش دمای سرد خروجی و هم در افزایش دمای گرم خروجی ارتقا می‌بخشد. سهولت انتقال حرارت بین جریان داخلی و جریان بیرونی عامل کاهش بیشتر دمای سرد و افزایش دمای گرم در مقایسه با لوله گردبادی معمولی می‌باشد. در نتیجه با توجه به بالاتر بودن بازده لوله گردبادی دو جداره در مقایسه با نمونه معمول، این نمونه از لوله گردبادی می‌تواند جایگزین مناسبی برای لوله گردبادی معمولی باشد.

10- مراجع

- [1] Accessed 23 November 2013; www.newmantools.com.
- [2] S. Eiamsa-ard, P. Promvong, Review of Ranque-Hilsch effects in vortex tubes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, No. 7, pp. 1822-1842, 2008.
- [3] B. Ahlborn, J. Gordon, The vortex tube as a classical thermodynamic refrigeration cycle, *Journal. Applied. Physics.*, Vol. 88, pp. 3645-65, 2000.
- [4] R. Hilsch, The Use of Expansion of Gases in a Centrifugal Field as a Cooling Process, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 2, No. 13, pp. 108-113, 1947.
- [5] P. K. Singh, R. G. Tathgir, D. Gangacharyulu, G. G. S., An experimental performance evaluation of vortex tube, *IE Journal -MC*, Vol. 84, pp. 149-