

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

میثم سعدی^۱، محمود فرزانه‌گرد^{۲*}

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرورد، سمنان

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرورد، سمنان

* شاهروود، صندوق پستی ۳۱۶ mgord@shahroodut.ac.ir

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 اتفاق 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 ۴ بار، با گاز طبیعی انجام می‌شود. نسبت طول لوله به قطر لوله گرم در هر دو نمونه لوله گردبادی ۱۰ می‌باشد. قطر اریفیس سرد هر دو ژئاتور ۶/۴ میلیمتر است. مشاهده شد عبور مجدد جریان از روی لوله گرم در اوله گردبادی دو جداره، بازده سرمایشی لوله گردبادی معمولی را ۲۴٪ 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.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دربافت: ۲۸ بهمن ۱۳۹۲

پذیرش: ۲۹ فروردین ۱۳۹۳

ارائه در سایت: ۰۸ مهر ۱۳۹۳

کلید واژگان:

لوله گردبادی دو جداره

ژئاتور

بازده سرمایشی

ضریب عملکرد گرمایی

کسر جرمی بهینه سرد

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

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

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

۲- 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.

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 اگزایر اشاره نمود. لوله گردبادی شرکت نیو من تولز جریان هوای ورودی فیلتر شده با فشار ۶/۹ بار و دمای ۲۱ درجه سلسیوس را به دو جریان با دمای ۴۰- و ۵۸ درجه سلسیوس تبدیل می‌سازد [۱]. آیمسا و پرومونگ [۲] 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

۱- مقدمه لوله گردبادی معمولی وسیله‌ای است که یک جریان گاز پر فشار را به دو جریان گرمتر و سردر 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 لوله گرم از جریان برگشته و از سمت مخالف با دمای پایین‌تر خارج می‌شود. 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.

Please cite this article using:

M. Sadi, M. Farzaneh-Gord, Introducing Annular vortex tube and Experimental Comparison of its performance with Vortex Tube, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, pp. 166-174, 2014 (In Persian)

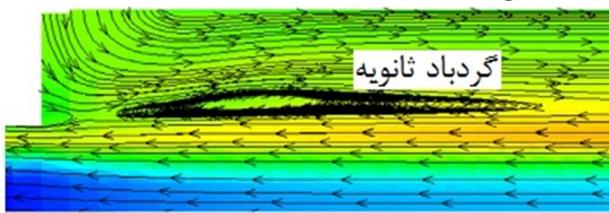
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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 گرددباد است، بررسی‌های تجربی انجام دادند. آیمسا پرموونگ [4] عدد ۰/۳۳ را برای نسبت قطر نازل به قطر لوله گرددبادی گزارش نمودند.

تعداد کاتال‌های جریانی که بر روی ژنراتور قرار گرفته‌اند نیز از پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد لوله گرددبادی است و بهمین دلیل موضوع بسیاری از تحقیقات عملی و نظری شده است. کرماقچی [6] به صورت آزمایشگاهی برای تعداد متغیر نازل، تحلیل انرژی را انجام داده و جدایش انرژی را بررسی کرد. شمس الدینی و حسینی نژاد [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 گرددبادی به مدل دو بعدی تقارن محوری نزدیکتر می‌شود. شکل کanal ورودی مارپیچی با تعداد نازل بین ۱ تا ۴، توسط آیمسا [8] مورد بررسی تجربی قرار گرفت. آیمسا نشان داد که لوله گرددبادی با نازل مارپیچی در مقایسه با لوله گرددبادی با نازل 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 نازل مارپیچی را با ورودی نازل معمولی بررسی کردند. آن‌ها به صورت عددی اثر نازل مارپیچی را بر روی توان سرمایشی لوله گرددبادی مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که این نازل باعث افزایش سرمایش می‌شود.

سعیدی و ولی‌بور [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 گرددبادی مشخص می‌شود که تابع جریان، تکنیک گالرکین، اختلاف محدود و حجم محدود برای حل معادلات استفاده شده است. فلورنت و سی ایکس از جمله نرم‌افزارهایی می‌باشند که توسط برخی از پژوهشگران برای تحلیل میدان جریان لوله گرددبادی استفاده شده‌اند. همچنین در مدل کردن جریان آشفته بیشتر از روش ۴-ک (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 تاکاهماما و همکاران [11] بیان شد. آن‌ها با واگرا کردن لوله گرم، امکان کوتاه‌تر کردن لوله گرددبادی معمولی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که واگرا کردن لوله گرم با یک زاویه کوچک حدود ۲ تا ۳ درجه باعث بهبود عملکرد وسیله می‌شود. چانگ و همکاران [12] نیز اثر تعییر 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



شکل ۲ گرددباد ثانویه ایجاد شده در حل عددی ارائه شده توسط آلبورن [1]

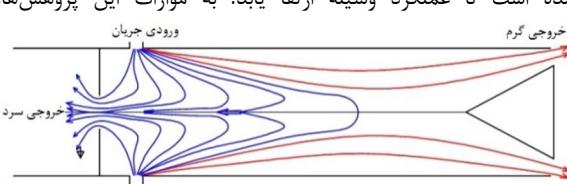
گرددبادی پیشنهاد داده‌اند که می‌توان به خنک‌کاری در عملیات ماشین کاری، خنک‌کاری مدار الکترونیکی، سرد کاری قالب تزریق پلاستیک، خشک کردن جوهر روی برچسب‌ها و بطری‌ها، تست حرارتی سنسورها، رطوبت‌گیری از گازها و سرد کردن پره‌ها اشاره کرد [2].

طرح‌واره‌ای از عملکرد لوله گرددبادی معمولی در جدایش دمایی در شکل ۱ نشان داده شده است. جریان ورودی به لوله گرددبادی معمولی با فشار بالا از طریق نازل مماسی وارد لوله اصلی شده و به وسیله اصطکاک بین 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 گردابیان 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 انتهای گرم اجازه نمی‌دهد که همه جریان از انتهای گرم خارج شود و از خروج جریان مرکزی جلوگیری می‌کند. در سمت سرد لوله گرددبادی معمولی، اریفیس سرد قرار دارد که بخشی از جریان مرکزی از طریق آن خارج می‌شود. با آزمایش، آلبورن و گردون [3] متوجه شدند که بخشی از جریان درون لوله گرددبادی معمولی سیرکوله می‌شود. در شکل ۲ به وجود آمدن جریان گرددباد ثانویه در حل عددی مشاهده می‌شود. محل تشکیل این گردابه درون لوله گرم بوده و با افزایش فشار جریان ورودی می‌تواند کشیده‌تر شود. آلبورن و همکاران گرددباد 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 جداکننده‌ای سیکلونی انجام می‌داد به طور کاملاً تصادفی متوجه گردابیان دما شد و لوله گرددبادی معمولی وی اختراع و در سال ۱۹۴۶ بهنام او ثبت شد. تا سال ۱۹۴۶ که هیلش اقدام به انتشار اطلاعات خود از یک بررسی عددی در زمینه کارکرد گرمایی لوله گرددبادی معمولی کرد علاقه‌مندی زیادی به این موضوع وجود نداشت [4].

بعضی از جزئیات ساختمانی اولیه بهمراه یک تئوری برای توصیف علت این پدیده در مقاله ارائه شد. لوله گرددبادی رانکیو-هیلش، لوله گرددبادی رانکیو و لوله گرددبادی هیلش برخی از نام‌های مورد استفاده برای این وسیله هستند. در دهه‌های اخیر تحقیقات بیشتری درباره‌ی لوله گرددبادی معمولی برای بهبود عملکرد و بیان علت جدایش دمایی ادامه پیدا کرده است. همچنین ابتكارات 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 گرددبادی می‌باشد.

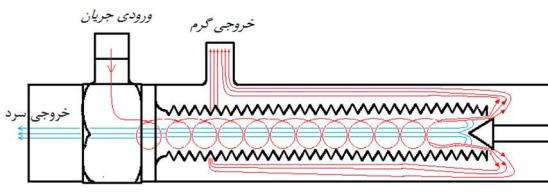
در تحقیقات تجربی و عددی روی بخش‌های مختلف لوله گرددبادی چون قطر و زاویه اریفیس سرد، سطح مقطع ورودی و تعداد نازل، شکل کanal نازل، زاویه شیر مخروطی و زاویه واگرایی لوله گرددبادی آزمایش‌های فراوانی انجام شده است تا عملکرد وسیله ارتقا یابد. به موازات این پژوهش‌ها، اثر



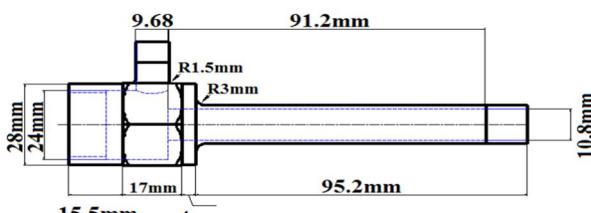
شکل ۱ مسیر جریان از ورودی به خروجی گرم و سرد در لوله گرددبادی معمولی

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

لوله گرددبادی دو جداره دارای بازده حرارتی بالاتری در مقایسه با نمونه معمولی آن است که این امر به واسطه 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 طرح وارهای از لوله گرددبادی 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 گرددبادی معمولی مورد استفاده در آزمایش و بعد آن ارائه شده است. بعد بخش‌های مشترک لوله گرددبادی دوجداره و لوله گرددبادی معمولی یکی می‌باشند. ژنراتور گرددبادی در شکل 5 نشان داده شده است. ژنراتور گرددبادی با عبور جریان ورودی از درون نازل هایش، آن را به صورت چرخشی در می‌آورد. برای بررسی بیشتر و نیز مقایسه، از دو ژنراتور گرددبادی با مساحت ورودی متفاوت در این آزمایش استفاده شده است. سطح نازل سطح ورودی به درون محافظه گرددبادی است که به جریان اجازه می‌دهد تا وارد لوله گرددبادی شود. مجرای وسط ژنراتور گرددبادی اریفیس سرد است که برای هر دو نمونه ژنراتور گرددبادی 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 گرددبادی 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 پیش‌روندۀ انجام می‌دهد سرد شده، انرژی خود را به جریان پیش‌روندۀ داده و آن را گرم می‌کند. تصویر لوله گرددبادی دو جداره مورد استفاده در آزمایش در شکل 6 نشان داده شده است.



شکل 3 طرح واره لوله گرددبادی دو جداره و اجزا آن



شکل 4 ابعاد لوله گرددبادی معمولی مورد اس تفاده در آزمایش



شکل 5 ژنراتور گرددبادی

گرم 11/7 % در مقایسه با لوله گرم سیندلری شکل بهبود یافته است. فرزانه‌گرد و کارگران [13] اثر طول لوله را بر جدایش جریان به صورت تجربی بررسی کرده و مشاهده نمودند که افزایش طول باعث بهتر شدن عملکرد جدایشی لوله گرددبادی می‌شود. ولی پور و نیازی [14] آزمایش‌هایی را روی چند لوله گرددبادی که در مسیر لوله گرم دارای خمیدگی محوری بود، انجام دادند. این آزمایش‌ها در فشارهای متفاوت انجام شد و برای بررسی تاثیر انحصار 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 گرددبادی 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.

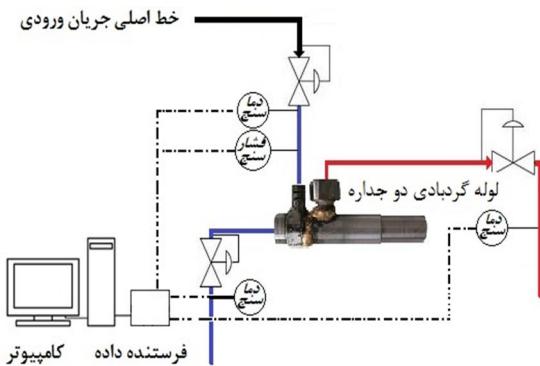
در استفاده از گرمایی ایجاد شده توسط لوله گرددبادی می‌توان به هیتر گازی گرددبادی شرکت ورتکس یونیورسال اشاره کرد که با استفاده از تکنولوژی لوله گرددبادی، گرمایش گاز طبیعی در ایستگاه‌های تقلیل فشار را انجام می‌دهند. این شرکت با راه اندازی سیستم خود در بیش از 700 واحد مختلف در دنیا توانسته است در کاهش مصرف سوخت ایستگاه‌های تقلیل 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 گرددبادی برای گرم کردن شیر اختناق استفاده می‌شود. در این طرح هدف، جلوگیری از یخ‌زدگی در شیر اختناق است. این طرح می‌تواند در تمام ایستگاه‌های تقلیل فشار گاز مورد استفاده قرار گیرد و باعث صرف‌جویی 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 گرددبادی معرفی شده که لوله گرددبادی 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، اتفاق حرارتی بیشتری از لوله گرم صورت می‌گیرد و کارایی لوله گرددبادی دو جداره در جدایش دمایی در مقایسه با نمونه معمول بالا می‌آورد. در هر دو نمونه لوله گرددبادی نسبت طول لوله به قطر لوله 10 می‌باشد. هدف بررسی میزان بهبود جدایش انرژی توسط لوله گرددبادی دو جداره در مقایسه با نمونه معمول آن است. برای بررسی بیشتر از دو عدد ژنراتور گرددبادی با مساحت نازل متفاوت استفاده شده است. نسبت مساحت نازل ژنراتورهای گرددبادی به مساحت لوله گرم برای آن دو ژنراتور گرددبادی 0/15 و 0/18 می‌باشد و آن‌ها به ترتیب ژنراتور آ و ب نامگذاری شده‌اند. قطر اریفیس سرد هر دو ژنراتور 6/4 میلیمتر است. در این طرح جریان گرم درون لوله گرددبادی معمولی از دو مجرأ عبور می‌کند و به واسطه تغییرات میدان جریان که در آن انفاق می‌افتد، کارایی در مقایسه با نمونه معمول افزایش می‌یابد.

2- معرفی لوله گرددبادی دو جداره

لوله گرددبادی دو جداره می‌تواند مشابه با لوله گرددبادی 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 گرددبادی دو جداره و معمولی مورد استفاده در پروژه و تجهیزات

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

در محاسبه 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 انثالپی ورودی و خروجی سرد تقسیم بر اختلاف انثالپی ورودی به خروجی سرد طی یک فرآیند آیزنتروبیک. هنگامی که گاز در لوله جریان دارد فرض بر این است که فرایند بهصورت انبساط آیزنتروبیک انجام می‌شود، لذا می‌توان رابطه (4) را نوشت:

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

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

لوله گرددبادی (دو جداره یا معمولی) اگر بهعنوان یک پمپ حرارتی فرض شود ضریب عملکرد آن بهصورت نسبت توان حرارتی (معادله 5) بهکار موردنیاز برای تراکم جریان (معادله 6) تعریف می‌شود. برای هر دو نمونه لوله گرددبادی توان حرارتی همان ظرفیت حرارتی جریان گرم خروجی است. توان حرارتی و کار موردنیاز برای متراکم کردن جریان از فشار خروجی به فشار ورودی لوله گرددبادی 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 موقوفات [17] تخمین زده می‌شوند. خطاهای 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 گرددبادی دو جداره

3- نحوه انجام آزمایش

تجهیزات مورد استفاده در آزمایش و نحوه قرارگیری و چیدمان لوله گرددبادی دو جداره در آزمایش در شکل 7 نشان داده شده است. برای انجام مجدد آزمایش با لوله گرددبادی معمولی نیاز است که لوله گرددبادی 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 دماسنجد و فشارسنج تعییه شده اندازه‌گیری می‌شود. سپس جریان گاز از درون نازل‌های روی ژنراتور با چرخش به درون محفظه گرددبادی وارد می‌شود و به سمت خروجی گرم می‌رود. شش نازل روی ژنراتور گرددبادی وجود دارد. بدليل آن که تمام جریان اجازه خروج از شیر گرم را پیدا نمی‌کند از میان جریان رفت مسیر خود را باز کرده و به سمت خروجی سرد می‌رود. در آزمایش لوله گرددبادی معمولی، در خروجی سرد و گرم نیز دماسنجد‌ها دمای دو جریان را اندازه‌گیری می‌کنند. در آزمایش لوله گرددبادی 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. دماسنجد مورد استفاده در این آزمایش از نوع سنسورهای پلاتینیوم 100 می‌باشد.

4- روابط و معادلات حاکم

برای بررسی عملکرد لوله گرددبادی 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 گرددبادی، قانون اول ترمودینامیک بهصورت رابطه (1) ارائه می‌شود.

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

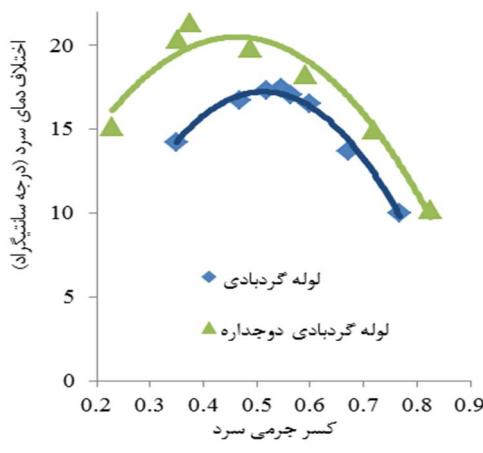
h_0 انتالپی سکون است. با صرف نظر کردن از انرژی پتانسیل جریان در خروجی‌ها، برای یک گاز ایده‌آل معادله بقا می‌تواند بهصورت رابطه (2) نیز نوشته شود.

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

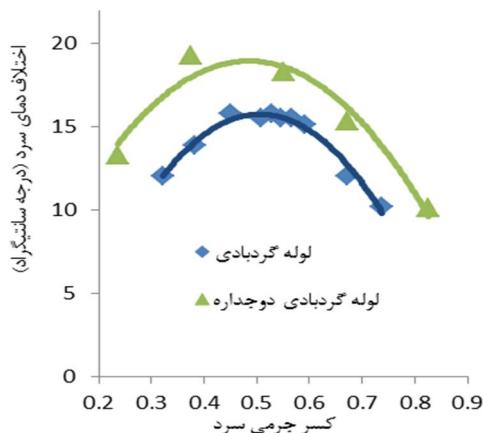
در این شرایط دمای گاز ورودی، T_c دمای جریان سرد و T_h دمای جریان گرم است. وقتی معادله (2) بر حسب c_p مرتب می‌شود، می‌توان نسبت دبی جرمی جریان سرد را بخوبی به دمای خوانده شده تخمین زد. با داشتن دمای‌های خروجی و اندازه‌گیری دمای جریان ورودی طبق معادله 3، کسر جرمی سرد با فرض گاز ایده‌آل قابل محاسبه است.

بهینه ب بواسطه تغییر توازن فشار درون و خروجی‌های لوله گردبادی معمولی است که توسط لاو [19] و پیرالیشیویل و فوزیو [20] بیان شده است. در زمانی که شیر سرد هنوز مورد استفاده قرار نگرفته است، در محدوده کسر جرمی بهینه سرد تا مقدار ۱، طبق شکل ۱۰، افت فشار کلی در لوله گردبادی معمولی جمع افت فشار در ورودی (۱)، افت فشار ژنراتور (۲)، افت فشار جریان (۳)، افت فشار اریفیس سرد (۴) و افت فشار شیر کنترل خروجی گرم (۵) می‌باشد. افت فشار در ژنراتور ناشی از شکل ژنراتور و تعداد نازلهای تعیینه 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 (نیمالکار 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 ۸). برای ژنراتور ب در همین کسر جرمی بیشینه اختلاف دمای سرد مطابق با شکل ۹ $19/3$ 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 ۷، به متغیرهای مستقل x_i بستگی داشته باشد خطای در مقادیر ۷ با رابطه (8) تعریف می‌شود:

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

که x_i/x_i خطای 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 ۱۰۰ برای اندازه‌گیری دما مورد استفاده قرار گرفته است. دقت اندازه‌گیری این سنسورها و لagger 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:

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

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

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

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

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

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

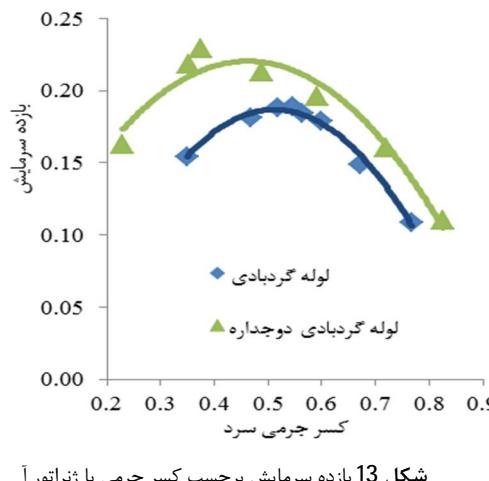
6- نتایج

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 ۸ و شکل ۹ 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.

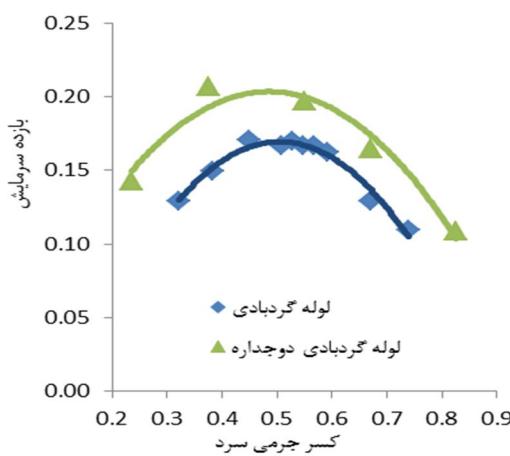
در آزمایش لوله گردبادی معمولی، کسر جرمی بهینه سرمایشی زمانی حاصل شده است که هر دو شیر گرم و سرد باز هستند. تغییر کسر جرمی

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 می‌کند، 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 می‌یابد. 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 می‌باشد. به همین دلیل بازده لوله گردبادی دو جداره نیز چنین روندی را نشان می‌دهد. برای ژنراتور آ، بیشینه بازده سرمایش لوله دو جداره و لوله گردبادی عاملی 23/6% و 19% می‌باشد. برای ژنراتور ب، بیشینه بازده سرمایش به ترتیب 21% و 17% می‌باشد.

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 مرivothe در صورت معادله 7 کاهش می‌یابد، اما اختلاف دمای گرم زیاد می‌شود تا مقدار کسر جرمی بهینه گرمایی، اثر افزایش اختلاف دما بر کاهش جمله کسر جرمی در صورت معادله 7 می‌چرید (یعنی نقطه کسر جرمی بهینه گرمایش) و پس از آن فرآیند برعکس می‌شود.



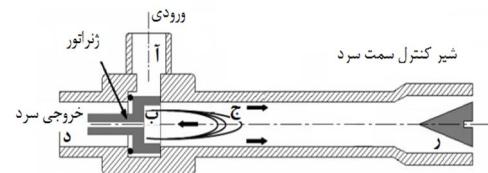
شکل 13 بازده سرمایش بر حسب کسر جرمی با ژنراتور آ



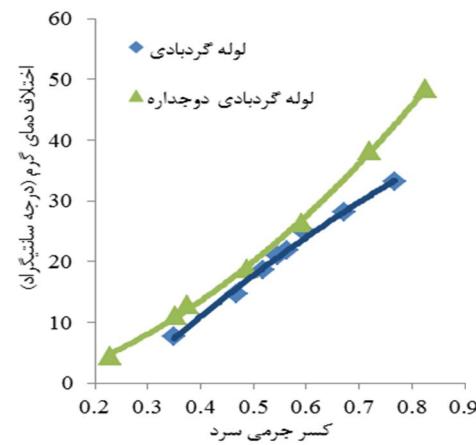
شکل 14 بازده سرمایش بر حسب کسر جرمی با ژنراتور ب
با توجه به اختلاف دمای گرم بزرگ‌تر لوله گردبادی دو جداره مقدار کسر جرمی بهینه گرمایی در مقادیر بزرگ‌تر حاصل می‌شود.

در شکل 11 و شکل 12 اختلاف دمای گرم ارائه شده است. با افزایش کسر جرمی روند تغییر این پارامتر صعودی می‌باشد. برای هر دو نمونه لوله گردبادی، افزایش اختلاف دمای گرم مشاهده می‌شود. 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.

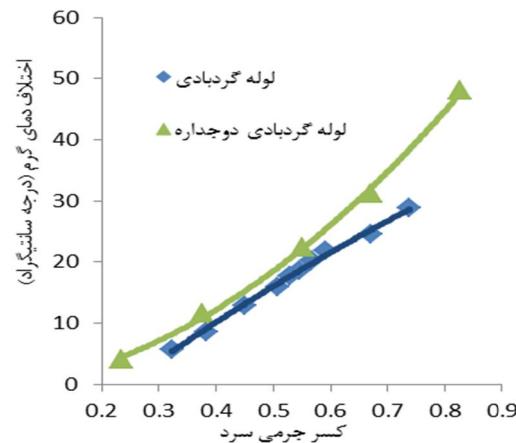
از مقایسه چهار شکل 11، 9، 8 و 12 بین روند سرمایش و گرمایش در کل محدوده کسر جرمی سرد، تفاوتی مشاهده می‌شود. در اختلاف دمای سرد، یک نقطه در محدوده میانی کسر جرمی دارای بیشینه مقدار می‌باشد. در صورتی که اختلاف دمای گرم دارای روندی صعودی است، در کسر جرمی بسیار کم، با بیشتر شدن مقدار کسر جرمی سرد، اختلاف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



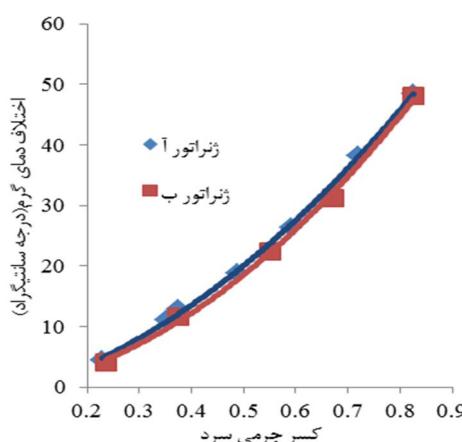
شکل 10 لوله گردبادی معمولی و موقعیت‌های ایجاد کننده افت فشار



شکل 11 اختلاف دمای گرم بر حسب کسر جرمی با ژنراتور آ



شکل 12 اختلاف دمای گرم بر حسب 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. بهمین 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

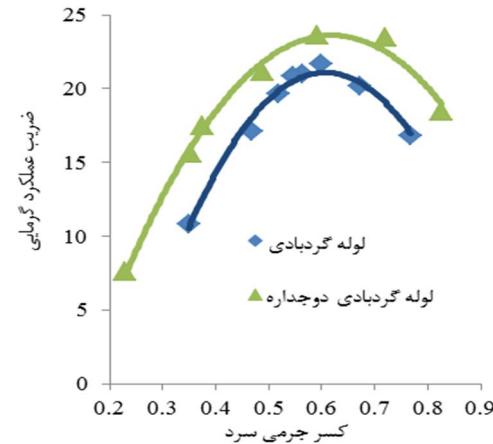
بر مبنای داده‌های تجربی به دست آمده، معادله‌ای برای ΔT_h بر حسب کسر جرمی سرد برآورده شود (یعنی دو معادله برای دو نمونه لوله گردبادی). برای مثال، معادله برآورش شده برای لوله گردبادی معمولی در معادله (12) ارائه شده است.

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

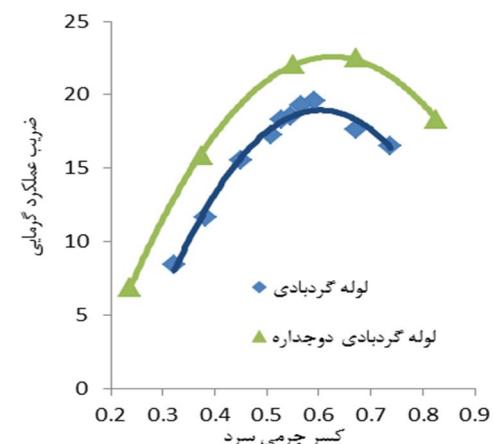
برای ΔT_h معین، مقدار کسر جرمی سرد به دست آمده و سپس از طریق معادله $\Delta T_c = \Delta T_h / (1/\mu_c - 1)$ که از قانون اول ترمودینامیک حاصل می‌شود، لوله گردبادی دو جداره برای محاسبه می‌شود. برای لوله گردبادی معمولی و لوله گردبادی دو جداره، برای اختلاف دمای گرم 10.5 و 20 درجه سلسیوس شکل 19 به دست آمده 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.

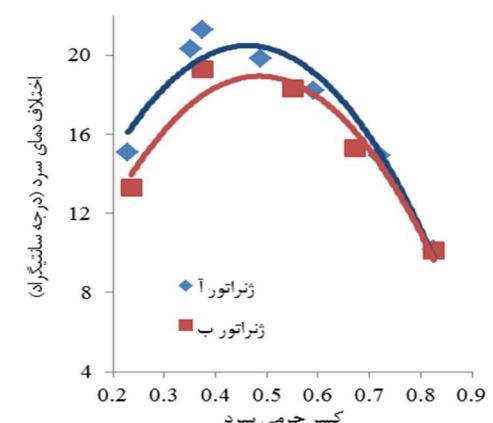
طبق شکل 17 و شکل 18، این نکته قابل مشاهده است که برای لوله گردبادی دو جداره، عملکرد گرمایشی دو ژنراتور آ و ب مشابه هم می‌باشد و این در حالی است که در سرمایش ژنراتور آ در مقایسه با ژنراتور ب جریان سرددتری را به وجود می‌آورد. سطح مقطع نازل به واسطه اینکه تعیین کننده در میزان دبی جرمی وارد شده به درون محفظه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



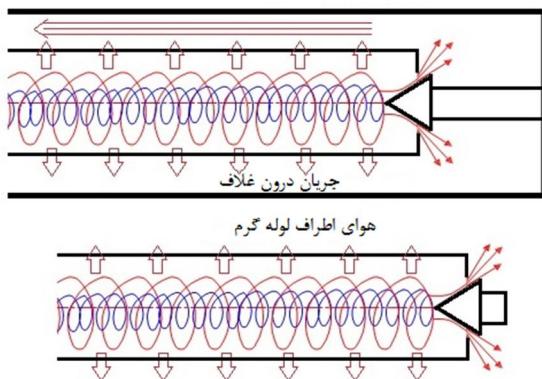
شکل 15 ضریب عملکرد گرمایی بر حسب کسر جرمی با ژنراتور آ



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



شکل 17 مقایسه اختلاف دمای سرد برای لوله گردبادی دو جداره

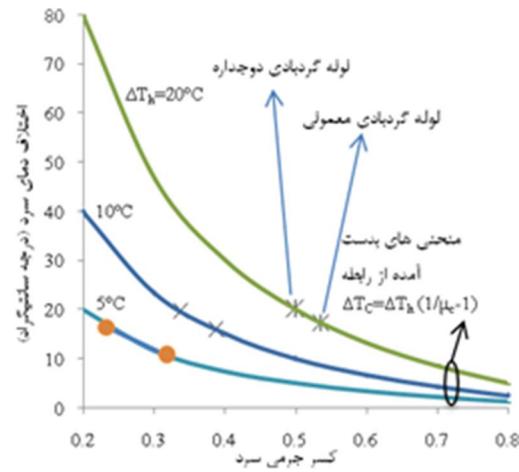


شکل 20 لوله گردبادی دو جداره و معمولی در تبادل حرارت لوله گرم با اطراف

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 اتفاق گرما نسبت به لوله گردبادی معمولی بیشتر می‌باشد. به واسطه سرعت بالای جریان از روی لوله داخلی، انتقال حرارت جابه‌جایی اجرای ایجاد می‌شود که باعث انتقال 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 به عنوان 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. انساط 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 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 به صورت 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 آ و ب نامگذاری شده‌اند، 0/18 و 0/15 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 اتفاق



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 به دست آمده، زمانی حاصل شده است که شیر سمت سرد، فشار خروجی سرد را بالا برد 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 به واسطه 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 کمتر 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 اتفاق 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 عملکرد جدایش دمایی وسیله پایین‌تر می‌شود.

- 153, 2004.
- [6] V. Kirmaci, 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. Kargaran, 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. Wongcharree, P. Promvonge, 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. بهواسطه بالанс 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 جائی 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. بهواسطه 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 معمولی، 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. Promvonge, Review of Ranque-Hilsch effects in vortex tubes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, No. 7, pp. 1822-1842, 2008.
- [3] B. Ahlbom, 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-