



لوله گردابه ای دوجداره و مقایسه تجربی آن با لوله گردابی معمولی

میلاد طاهرخانی^۱، محمد نیکیان^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، تاکستان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان، تاکستان، ایران

E-Mail: taherkanim@yahoo.com

چکیده

فشار ثابت ۴ بار، با گاز طبیعی انجام میشود. نسبت طول لوله به قطر لوله گرم در هر دو نمونه لوله گردابی ۱۰ میباشد. قطر اریفیس سرد هر دو ژنراتور ۶/۴ میلیمتر است. مشاهده شد عبور مجدد جریان از روی لوله گرم در لوله گردابی دو جداره، بازده سرمایشی لوله گردابی معمولی را ۲۴٪ در نقطه بیشینه اختلاف دمای سرد بهبود بخشیده است. کسر جرمی سرد که در آن کمینه دمای سرد در لوله گردابی دو جداره اتفاق میافتد کمتر از مقدار مربوط به لوله گردابی معمولی میباشد.

واژه های کلیدی: لوله گردبادی دو جداره، ژنراتور، بازده

سرمایشی، ضریب عملکرد گرمایی

لوله گردابی دوجداره لوله گردابی 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 گردابی دو جداره اتفاق میافتد، عملکرد این لوله گردابی به صورت تجربی آزمایش با عملکرد لوله گردابی معمولی مقایسه شده است. آزمایش برای

۱-مقدمه

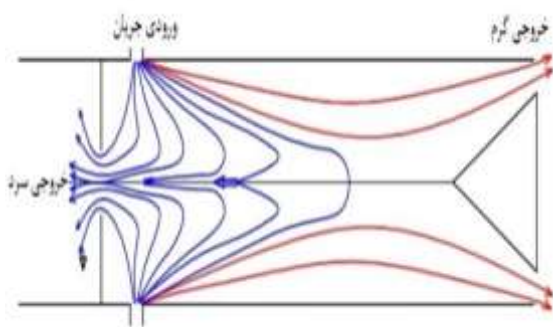
آریزونا ورتکس، نیو من تولز و اگزایر اشاره نمود. لوله گردبادی شرکت نیو من تولز جریان هوای ورودی فیلتر شده با فشار ۶/۹ بار و دمای ۲۱ درجه سلسیوس را به دو جریان با دمای ۴۰- و ۵۸ درجه سلسیوس تبدیل میسازد. آیمسا و پرومونگ [۲] محدوددهای دمایی سرد و گرم را که در کارهای تجربی گذشته گزارش شده بود، گردآوری کردند. این محدوده با توجه به شرایط آزمایش متفاوت، از جمله سیال عامل، فشار و لوله های گردابی معمولی با ابعاد و طراحی های متنوع، متغیر میباشد. تولید کنندگان نام برده شده، کاربردهای زیادی را برای لوله گردابی پیشنهاد داده اند که میتوان به خنک کاری در عملیات ماشین کاری، خنککاری مدار الکترونیکی، سرد کاری قالب تزریق پلاستیک، خشک کردن جوهر روی برجسبها و بطریها، تست حرارتی سنسورها، رطوبت گیری از گازها و سرد کردن پره ها اشاره کرد [2]. طرحوارهای از

لوله گردابی 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 می دهد و بخشی از جریان از این سمت خارج میشود. بخش دیگری از جریان برگشته و از سمت مخالف با دمای پایین تر خارج میشود. علاوه بر عملکرد سرمایشی و گرمایشی، لوله گردابی معمولی ساده، ارزان و مطمئن بوده و نیاز به تعمیرات ندارد. این ویژگی ها باعث شده است که در صنعت جایگزین مناسبی برای تجهیزات خنک کاری و گرمایش نقطه ای باشد.

شرکتهای مطرحی در دنیا ساخت لوله گردابی معمولی را انجام می دهند که از آن جمله می توان به سه شرکت

شد. لوله گردابی رانکیو- هیلش، لوله گردابی رانکیو و لوله گردابی هیلش برخی از نامهای مورد استفاده برای این وسیله هستند. در دهه های اخیر تحقیقات بیشتری درباره ی لوله گردابی معمولی برای بهبود عملکرد و بیان علت جدایش دمایی ادامه پیدا کرده است. همچنین ابتکارات زیادی روی آن انجام شده است. بهطور 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 گردابی می باشد.

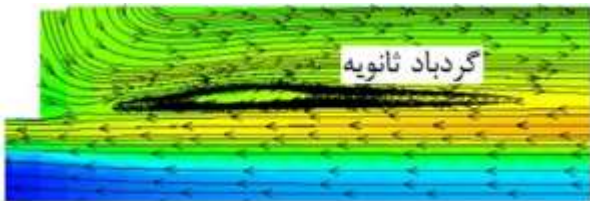
در تحقیقات تجربی و عددی روی بخش های مختلف لوله گردابی چون قطر و زاویه اریفیس سرد، سطح مقطع ورودی و تعداد نازل، شکل کانال نازل، زاویه شیر مخروطی و زاویه واگرایی لوله گردابی آزمایشهای فراوانی انجام شده است تا عملکرد وسیله ارتقا یابد. به موازات این پژوهشها، اثر پارامترهایی مانند فشار ورودی، دبی جرمی جریان سرد و گرم، نوع سیال عامل و میزان رطوبت نیز بررسی شده است. سینگ و همکاران [۵] روی سطح مقطع ورودی نازل که موثر در تشکیل گردابی است، بررسی هایی تجربی انجام دادند. آیمسا و پرومونتگ [4] عدد. ۳۳/ را برای نسبت قطر نازل به قطر لوله گردابی گزارش نمودند.



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

عملکرد لوله گردابی معمولی در جدایش دمایی در شکل ۱ نشان داده شده است. جریان ورودی به لوله گردابی معمولی با فشار بالا از طریق نازل مماسی وارد لوله اصلی شده و به وسیله این نازل ها یک جریان گردابی تولید میشود. به واسطه اصطکاک بین لایه های بیرونی و درونی، اختلاف فشاری بین جریان در ناحیه دیواره و جریان مرکزی به وجود می آید. 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 گردابی معمولی، اریفیس سرد قرار دارد که بخشی از جریان مرکزی از طریق آن خارج می شود. با آزمایش، آلبرن و گردون [۳] متوجه شدند که بخشی از جریان درون لوله گردابی معمولی سیرکوله میشود. در شکل ۲ به وجود آمدن جریان گرداب ثانویه در حل عددی مشاهده میشود. محل تشکیل این گردابه درون لوله گرم بوده و با افزایش فشار جریان ورودی میتواند کشیده تر شود. آلبرن 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 جداکننده های سیکلونی انجام میداد به طور کاملا تصادفی متوجه گرادیان دما شد و لوله گردابی معمولی توسط وی اختراع و در سال ۱۹۳۴ به نام او ثبت شد. تا سال ۱۹۴۶ که هیلش اقدام به انتشار اطلاعات خود از یک بررسی عددی در زمینه کارکرد گرمایی لوله گردابی معمولی کرد علاقه مندی زیادی به این موضوع وجود نداشت [4]. بعضی از جزئیات ساختمانی اولیه به همراه یک تئوری برای توصیف علت این پدیده در مقاله ارائه

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 [۱۱] بیان شد. آنها با واگرا کردن لوله گرم، امکان کوتاه تر کردن لوله گردابی 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 [۱۲] 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 گرم 11.7% در مقایسه با لوله گرم سیلندری شکل بهبود یافت است.



شکل ۲ گردباد ثانویه ایجاد

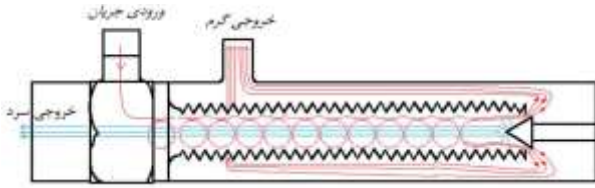
شده در حل عددی ارائه شده توسط آلبرن [2]

فرزانه گرد و کارگران [۱۳] اثر طول لوله را بر جدایش جریان به صورت تجربی بررسی کرده و مشاهده نمودند که افزایش طول باعث بهتر شدن عملکرد جدایشی لوله گردابی میشود. ولیپور و نیازی [۱۴] آزمایش هایی را روی چند لوله گردابی که در مسیر لوله گرم دارای خمیدگی محوری بود، انجام دادند. این آزمایشها در فشارهای متفاوت انجام شد و برای بررسی تاثیر انحنا و میزان آن از لوله هایی با زوایای انحنای متفاوت استفاده شد تا روند بهبود یا تخریب فرایند جدایش انرژی با تغییر انحنای محوری تعیین شود.

در این مقاله نمونه جدیدی از لوله گردابی معرفی شده که لوله گردبادی دو جداره نامگذاری شده است. جریان گرم پس از عبور از شیر مخروطی از روی لوله گرم عبور

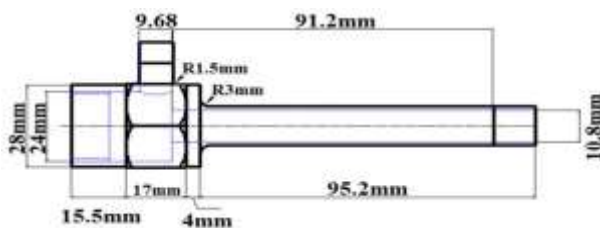
تعداد کانالهای جریانی که بر روی ژنراتور قرار گرفته اند نیز از پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد لوله گردابی است و به همین دلیل موضوع بسیاری از تحقیقات عملی و نظری شده است. کرماچی [۶] به صورت آزمایشگاهی برای تعداد متغیر نازل، تحلیل انرژی را انجام داده و جدایش انرژی را بررسی کرد. شمس الدینی و حسینی نژاد [۷] نیز اثر تعداد نازل ها را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. آنها گزارش کردند که هر چه تعداد نازل ها در مدل سه بعدی افزایش یابد، عملکرد لوله گردابی به مدل دو بعدی تقارن محوری نزدیک تر میشود. شکل کانال ورودی مارپیچی با تعداد نازل بین ۱ تا ۴، توسط آیسا [۸] مورد بررسی تجربی قرار گرفت. آیسا نشان داد که لوله گردابی با نازل مارپیچی در مقایسه با لوله گردابی 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 [۹] نیز در مطالعه های عددی اثر ورودی حلزونی را با ورودی نازل معمولی بررسی کرده اند. آنها به صورت عددی اثر نازل مارپیچی را بر روی توان سرمایشی لوله گردابی مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که این نازل باعث افزایش سرمایش میشود. سعیدی و ولیپور [۱۰] 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 درباره ی لوله گردابی مشخص میشود که تابع جریان، تکنیک گالرکین، اختلاف محدود و حجم محدود برای حل معادلات استفاده شده است. فلوننت و سی اف ایکس از جمله نرم افزارهایی می باشند که توسط برخی از پژوهشگران برای تحلیل میدان جریان لوله گردابی استفاده شده اند. همچنین در مدل کردن جریان آشفته بیشتر از روش $k-\epsilon$ (استاندارد و RNG) استفاده شده است. تحقیقات گذشته درباره ی لوله گرم عمدتاً متمرکز بر زاویه، طول و

شده است. در شکل ۴ لوله گردابی معمولی مورد استفاده در آزمایش و ابعاد آن ارائه شده است.



شکل ۳- طرحواره لوله گردابی دو جداره و اجزا آن

ابعاد بخش های مشترک لوله گردابی دوجداره و لوله گردبادی معمولی یکی می باشند. ژنراتور گردابی در شکل ۵ نشان داده شده است. ژنراتور گردابی با عبور جریان ورودی از درون نازل هایش، آن را به صورت چرخشی در می آورد. برای بررسی بیشتر و نیز مقایسه، از دو ژنراتور گردابی با مساحت ورودی متفاوت در این آزمایش استفاده شده است. سطح نازل سطح ورودی به درون محفظه گردابی است که به جریان اجازه میدهد تا وارد لوله گردابی شود. مجرای وسط ژنراتور گردابی اریفیس سرد است که برای هر دو نمونه ژنراتور گردابی یکی در نظر گرفته شده است. تنها اختلاف دو ژنراتور آ و ب در مساحت نازل ورودی می باشد. سطح بزرگتر اجازه ورود جرم بیشتری از جریان را به لوله گردابی 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 گردابی دو جداره مورد استفاده در آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است.



میکند. در اثر حرکت جریان خروجی گرم روی لوله گرم، اتلاف حرارتی بیشتری از لوله گرم صورت میگیرد و کارایی لوله گردابی دو جداره در جدایش دمایی در مقایسه با نمونه معمول بالا می رود. در هر دو نمونه لوله گردابی نسبت طول لوله به قطر لوله ۱۰ میباشد. هدف بررسی میزان بهبود جدایش انرژی توسط لوله گردابی دو جداره در مقایسه با نمونه معمول آن است. برای بررسی بیشتر از دو عدد ژنراتور گردابی با مساحت نازل متفاوت استفاده شده است. نسبت مساحت نازل ژنراتورهای گردابی به مساحت لوله گرم برای این دو ژنراتور گردابی ۰/۱۸ و ۰/۱۵، میباشد و آنها به ترتیب ژنراتور آ و ب نامگذاری شده اند. قطر اریفیس سرد هر دو ژنراتور ۶/۴ میلیمتر است. در این طرح جریان گرم درون لوله گردبادی معمولی از دو مجرا عبور میکند و به واسطه تغییرات میدان جریان که در آن اتفاق می افتد، کارایی در مقایسه با نمونه معمول افزایش می یابد.

۲- معرفی لوله گردبادی دو جداره

لوله گردابی دو جداره میتواند مشابه با لوله گردابی 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 به کار گرفته شود، به ویژه در جاهایی که جریان پر فشار می بایست به جریان با فشار پایین تبدیل شود. مشکل اساسی لوله گردابی معمولی بازده حرارتی پایین آن است. لوله گردابی 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 ۳ طرحواره های از لوله گردابی دو جداره ارائه شده است. در این شکل مسیر حرکت جریان گرم پس از عبور از شیر مخروطی نمایش داده

اندازه گیری میشود. سپس جریان گاز از درون نازل های روی ژنراتور با چرخش به درون محفظه گردابی وارد میشود و به سمت خروجی گرم میرود. شش نازل روی ژنراتور گردابی وجود دارد. به دلیل آنکه 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 گردابی معمولی، در خروجی سرد و گرم نیز دماسنج ها دمای دو جریان را اندازه گیری می کنند. در آزمایش لوله گردابی دو جداره، دما پس از شیر خروجی گرم اندازه گیری نمی شود، بلکه این جریان با عبور از روی لوله گرم خود را به خروجی میرساند. اندازه گیری دمای گرم در این نقطه اتفاق می افتد. دماسنج مورد استفاده در این آزمایش از نوع سنسورهای پلاتینیوم ۱۰۰ می باشد.

۴- 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 به صورت 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. به طور مشابه اختلاف دمای جریان گرم به صورت اختلاف دمای جریان گرم خروجی و دمای جریان ورودی تعریف میشود. این دو پارامتر به صورت $\Delta T_c = T_{in} - T_c$ و $\Delta T_h = T_h - T_{in}$ تعریف میشوند. در تحلیل هر دو نمونه لوله گردبادی، قانون اول ترمودینامیک به صورت رابطه (۱) ارائه میشود:

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

h_0 انتالپی سکون است. با صرف نظر کردن از انرژی پتانسیل جریان در خروجیها، برای یک گاز ایده آل معادله بقا میتواند به صورت رابطه (۲) نیز نوشته شود.

$$cpT_{in} = mcpT_c + (1-mc)cpT_h \quad (2)$$

شکل ۴- ابعاد لوله گردابی معمولی مورد اس تفاده در آزمایش



شکل ۵- ژنراتور گردابی



شکل ۶- تصویر لوله گردابی دو جداره

۳- نحوه انجام آزمایش

تجهیزات مورد استفاده در آزمایش و نحوه قرارگیری و چیدمان لوله گردابی دو جداره در آزمایش در شکل ۷ نشان داده شده است. برای انجام مجدد آزمایش با لوله گردابی معمولی نیاز است که لوله گردابی دوجداره در این تجهیزات جایگزین نمونه معمول در شکل ۷ شود. فشار آزمایش ۴ بار می باشد. دما و فشار جریان پس از عبور از رگلاتور به وسیله دماسنج و فشارسنج تعبیه شده

در لوله گردابی دو جداره مطابق شکل ۷ جریان گاز با سرعت بالا از روی لوله داخلی عبور میکند و سپس خارج میشود. در آزمایش ها انجام شده، دمای خروجی از لوله گردابی دو جداره نسبت به معمولی بیشتر است. میتوان این افزایش دما را از انتهای شیر مخروطی تا خروجی در لوله گردابی دو جداره در نظر گرفت. بنابراین گرما از جریان درون لوله داخلی به جریان در پوسته منتقل میشود. این اتلاف گرما نسبت به لوله گردابی معمولی بیشتر میباشد. به واسطه سرعت بالای جریان از روی لوله داخلی، انتقال حرارت جابه جایی اجباری ایجاد میشود که باعث اتلاف بیشتر حرارت در مقایسه با لوله گردابی معمولی خواهد شد. این شیوه با سرد کردن لوله گرم در لوله گردابی قابل مقایسه می باشد آیمسا و همکاران با خنک کردن لوله گرم لوله گردابی معمولی بیان کردند که ۵ تا ۹ درصد بازده سرمایشی را بهبود داده و اختلاف دمای سرد در حدود ۵/۸ تا ۸/۸ 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 می نماید 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 گردابی دو جداره در مقایسه با لوله گردابی 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 گردابی دو جداره در مقایسه با لوله گردابی معمولی میشود.

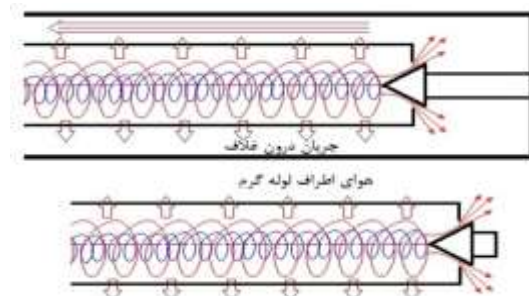
۶- بحث و نتیجه گیری

در این مقاله با معرفی لوله گردابی دو جداره، عملکرد آن به صورت تجربی در مقایسه با لوله گردابی معمولی در جدایش حرارتی یک جریان پر فشار مورد مطالعه قرار

در این شرایط T_{in} دمای گاز ورودی، T_c دمای جریان سرد و T_h دمای جریان گرم است. وقتی معادله (۲) بر حسب μC مرتب میشود، میتوان نسبت دبی جرمی جریان سرد را بخوسيله دمای خواننده شده تخمین زد. با داشتن دماهای خروجی و اندازهگیری دمای جریان ورودی طبق معادله ۳، کسر جرمی سرد با فرض گاز ایدهآل قابل محاسبه است.

۵- علت جدایش حرارتی بیشتر در لوله گردابی دو جداره

با توجه به تفاوت مسیر جریان درون دو نمونه لوله گردابی مورد بررسی، مشاهده میشود که میدان دمایی و فشاری درون لوله گردابی دو جداره در مقایسه با لوله گردابی معمولی متفاوت میباشد. همین تفاوت در میدان جریان، سبب عملکرد متفاوت لوله گردابی دو جداره میشود. آزمایشها نشان میدهد که سطح خارجی لوله گرم لوله گردابی 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. این اتلاف حرارتی را میتوان انتقال حرارت جابه جایی آزاد فرض کرد. یعنی گرما از جریان میانی لوله گردابی معمولی جدا شده و به لایه های جریان اطراف دیواره داده میشود و بخشی از این گرما از طریق دیواره لوله گردابی معمولی به هوای اطراف منتقل میشود.



شکل ۷- لوله گردابی دو جداره و معمولی در تبادل حرارت لوله گرم با اطراف

دمای سرد خروجی و هم در افزایش دمای گرم خروجی ارتقا می بخشد. سهولت انتقال حرارت بین جریان داخلی و جریان بیرونی عامل کاهش بیشتر دمای سرد و افزایش دمای گرم در مقایسه با لوله گردابی معمولی میباشد. در نتیجه با توجه به بالاتر بودن بازده لوله گردابی دو جداره در مقایسه با نمونه معمول، این نمونه از لوله گردابی میتواند جایگزین مناسبی برای لوله گردابی معمولی باشد.

گرفت هر دو نمونه لوله گردابی معمولی و دو جداره دارای نسبت طول به قطر لوله ۱۰ می باشند. 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 شده اند، ۰/۱۸ و ۰/۱۵ میباشد. قطر اریفیس سرد هر دو ژنراتور ۶/۴ میلیمتر است. نتایج نشان میدهد که روند تغییر عملکرد دو نمونه لوله گردابی برای هر دو ژنراتور مشابه است، اما لوله گردابی دو جداره میزان جدایش سرمایشی و گرمایشی را ارتقا داده است. لوله گردابی دو جداره با تغییر در میدان جریان درون لوله و افزایش اتلاف انرژی حرارتی از لوله داخلی، باعث بهبود در جدایش دمایی در لوله گردابی دو جداره میشود. این نوآوری بازده سرمایش را ۴ درصد برای هر دو ژنراتور در مقایسه با لوله گردابی معمولی بیشتر نموده است. برای هر دو نمونه لوله گردابی اختلاف دمای گرم روندی افزایشی داشته در حالی که تغییرات اختلاف دمای سرد دارای نقطه بیشینه‌های در یک کسر جرمی میانی بوده است. به واسطه بالانس فشار در دو سمت خروجی لوله گردابی، کسر جرمی سرد بهینه برای دو نمونه لوله گردابی 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 ۰/۸ میشود. به واسطه اینکه لوله گردابی دو جداره اجازه عبور مجدد جریان از روی لوله گرم را داده عملکرد جدایش انرژی را هم در کاهش

- [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.
- [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. 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. 149-153, 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.