

تحلیل نرم افزاری و بررسی تجربی اثر تغییرات فشار هوای ورودی نازل های ورودی بر متغیرهای دینامیکی و ترمودینامیکی لوله گردبادی دو نازله

عادل مقصودپور، استادیار دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران؛ A.maghsoodpour@sbiau.ac.ir

جمشید قسیمي، مدیر بخش تحقیق و توسعه، بنیاد علمی و فرهنگی پروفیسور حسابی؛ Jgh1001@yahoo.com

بنیامین ساریخانی، دانشجوی مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران؛ Benyamin.Sarikhany@yahoo.com

ایمان احمدی، دانشجوی مهندسی هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران؛ Iahmadi72@gmail.com

چکیده

در این مقاله به عوامل موثر بر افزایش بازده عملکرد لوله گردبادی^۱ پرداخته شده. لوله گردبادی وسیله ای مکانیکی برای جداسازی یک جریان هوای فشرده به دو جریان هوای سردتر و گرمتر از جریان ورودی به طور همزمان است. طراحی ساده، حجم کم و بی نیازی از تعمیر، باعث شده تا این دستگاه دو منظوره در صنعت مورد توجه قرار گیرد. [۱] با توجه به پتانسیل علمی و امکانات موجود بر آن شدیم تا بر روی آن تحقیقات و آزمایشات بیشتری انجام دهیم. لوله گردبادی با دو نازل ورودی را طراحی، ساخته و به صورت تجربی مورد آزمایش قرار دادیم. همچنین به تحلیل عددی مشخصه های دینامیکی و ترمودینامیکی نازل(ها) ورودی لوله گردبادی با استفاده از نرم افزارهای شبیه سازی^۲ و تحلیلی، در فشار های مختلف هوای ورودی پرداختیم که در قسمت نتیجه گیری نتایج آن تشریح خواهد شد. لازم به ذکر است به علت تاثیر گذاری نازل(ها) ورودی بر عملکرد لوله گردبادی، تحلیل این قسمت مورد توجه است.

کلمات کلیدی: لوله گردبادی - دستگاه دو منظوره - نازل ورودی - تحلیل عددی

مقدمه

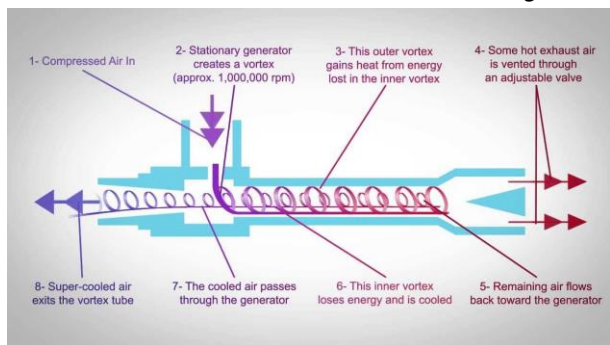
پدیده ای که در لوله گردبادی رخ می دهد را اولین بار فیزیکدانی فرانسوی به نام جرج رنک^۳ در سال ۱۹۳۱ میلادی کشف کرد. [۱] سپس در سال ۱۹۴۷ مهندسی آلمانی به نام رادولف هیلش طراحی لوله را اصلاح نموده و بازده آن را افزایش داد. به همین دلیل پدیده ای که در لوله گردبادی رخ می دهد را اثر رنک - هیلش می نامند. [۲]

همچنین لوله ی گردبادی در سال ۱۹۶۷ توسط لیندرستون لانگ^۴ برای جدا کردن اکسیژن و نیتروژن، کربن دی اکسید و هلیوم از هوا و جدایش مخلوط های گازی مورد استفاده قرار گرفت. [۳]

از آن پس محققان زیادی پیرامون این وسیله به تحقیق و بررسی پرداخته اند، اما تاکنون هیچ نظریه ی واحدی را برای توجیه این پدیده بیان ننموده اند. در این مقاله سعی شده عوامل موثر بر افزایش بازده لوله گردبادی را بررسی کنیم.

در سیستم لوله گردبادی گاز تحت فشار از طریق کمپرسور^۵ هوا به طور مماس از طریق یک یا چند نازل ورودی به یک لوله اصلی با سرعت و شتاب چرخشی بسیار بالا تزریق می شود. [۱]

اجزای لوله گردبادی: ۱- یک (یا چند) نازل ورودی. ۲- لوله اصلی. ۳- خروجی جریان هوای سرد. ۴- خروجی جریان هوای گرم. ۵- پیچ تنظیم کننده طول لوله اصلی. از مزایای این دستگاه می توان به عدم وجود قطعات متحرک و در نتیجه ی آن کاهش اتلاف انرژی ناشی از اصطکاک اشاره نمود. [۱] در شکل زیر همه ی اجزا و نحوه ی عملکرد لوله گردبادی آورده شده است. (شکل ۱)



شکل ۱: شمای کلی لوله گردباد [۴]

طی فرآیند ورود جریان هوایی با فشار بالا به درون لوله گردبادی، گردباد داخلی اندازه حرکت زاویه ای خود را از دست داده و این کاهش اندازه حرکت را به صورت انرژی جنبشی به گردباد بیرونی منتقل می کند که در نتیجه آن گردباد بیرونی داغ و جریان هوای درونی سرد از یکدیگر مجزا می شوند. با توجه به مخروطی بودن پیچ تنظیم واقع در انتهای لوله، تنها گردباد بیرونی هوای فشرده می تواند از انتهای لوله اصلی خارج شود. هوای فشرده باقی مانده مجبور به بازگشت به صورت گردباد داخلی است. گردباد داخلی دارای قطر کمتر نسبت به گردباد خارجی می باشد.

در سال ۱۹۸۸ آر تی بالمر^۶ سر راه خروجی کمپرسور مورد استفاده ی خود از فیلترهای رطوبت گیر استفاده نکرد و آب هم همراه با هوا وارد لوله گردبادی شد. در این آزمایش متوجه نکته ی جالبی شد که اگر فشار ورودی بین ۲۰ - ۵۰ بار باشد، در این حالت، در مورد آب (سیال تراکم ناپذیر) وارد شده به لوله گردبادی نیز، جداسازی سیال به صورت سرد و گرم همانند هوای فشرده با رطوبت بسیار کم، وجود دارد. [۵]

با توجه به تحقیقات و محاسبات انجام شده، در شرایطی که دمای محیط ۳۰۰ کلوین باشد لوله گردبادی می تواند هوای "گرمی" با حداکثر دمای ۴۷۳ کلوین و هوای "سردی" با حداقل دمای ۲۲۳ کلوین تولید کند. [۶]

¹ Vortex Tube

² Simulation

³George Ranque

⁴Linderstrom-Lang

⁵ Compressor

⁶ R.T.Balmer

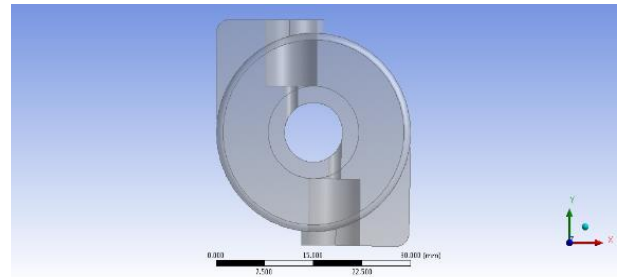
یکی از معایب این دستگاه پایین بودن راندمان است بطوریکه بیشترین میزان ضریب بهره وری انرژی، ۴۰٪ است. (فرمول ۱) [۷]

$$\eta_s = \frac{\mu \cdot \Delta I_x}{\Delta I_s + \mu \cdot \Delta I_s'} \quad (1)$$

طراحی لوله گردبادی توسط نرم افزار کتیا^۷

یک نمونه لوله گردبادی با دو نازل ورودی را کاملاً با دانش فنی خود با نرم افزار کتیا نسخه ۲۱ طراحی و توسط دستگاه تراشکاری سی ان سی با دقت ۰٫۱ میلی متر و تماماً از فلز برنج ساخته و آزمایشات را بر روی آن انجام داده ایم.

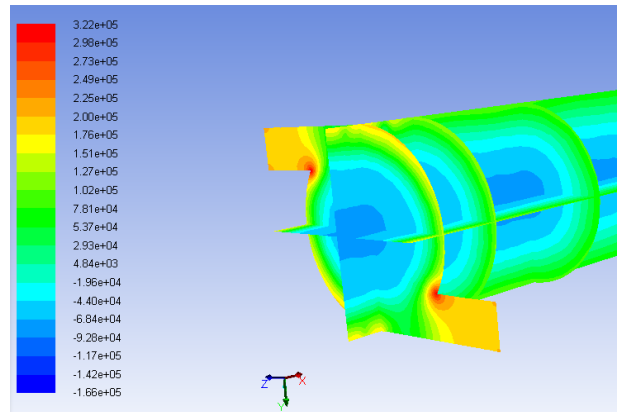
بدیهی است برای بوجود آمدن جریان گردبادی درون لوله باید دو نازل با زاویه ۱۸۰ درجه نسبت به هم بر مقطع دایره لوله وارد شود و در جهت مخالف یکدیگر باشد. (شکل ۲)



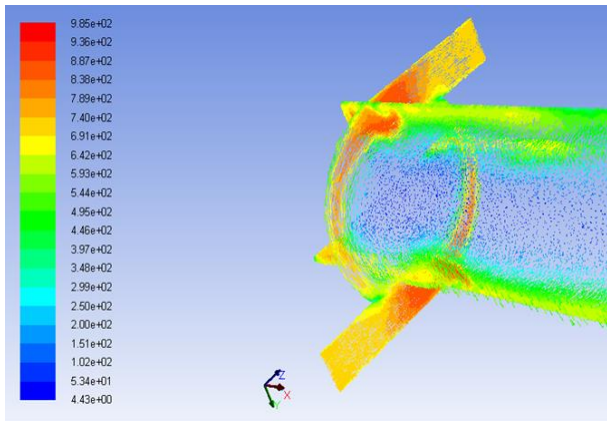
شکل ۲: مقطع روبرو نازل های ورودی لوله گردبادی

تحلیل لوله گردبادی با استفاده از نرم افزار آنسیس فلونت^۸

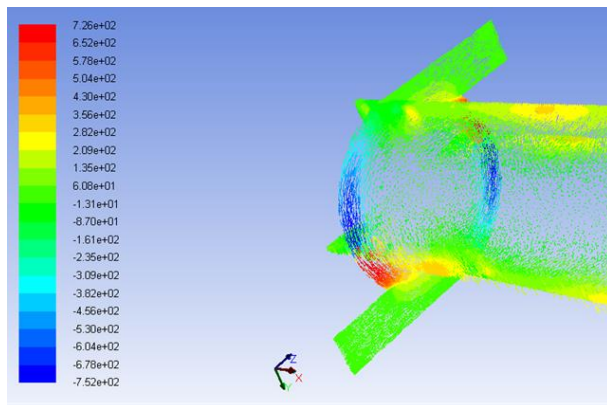
با استفاده از نرم افزار آنسیس فلونت نسخه ۱۴٫۵ مشخصه های مختلف قابل شبیه سازی لوله گردبادی که عبارتند از فشار، سرعت چرخش داخل نازل ورودی و سرعت دورانی در لوله گردبادی برای فشار هوای ورودی ۵ بار و دمای ۳۰۰ کلوین را مورد بررسی قرار دادیم. (شکل های ۳، ۴ و ۵)



شکل ۳: منحنی هم تراز فشار در امتداد جریان در لوله گردبادی

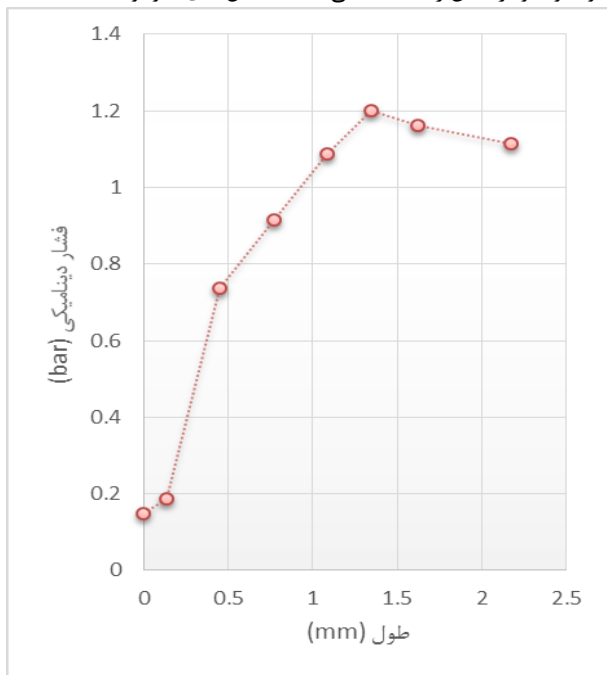


شکل ۴: منحنی برداری سرعت چرخشی در امتداد جریان لوله گردبادی



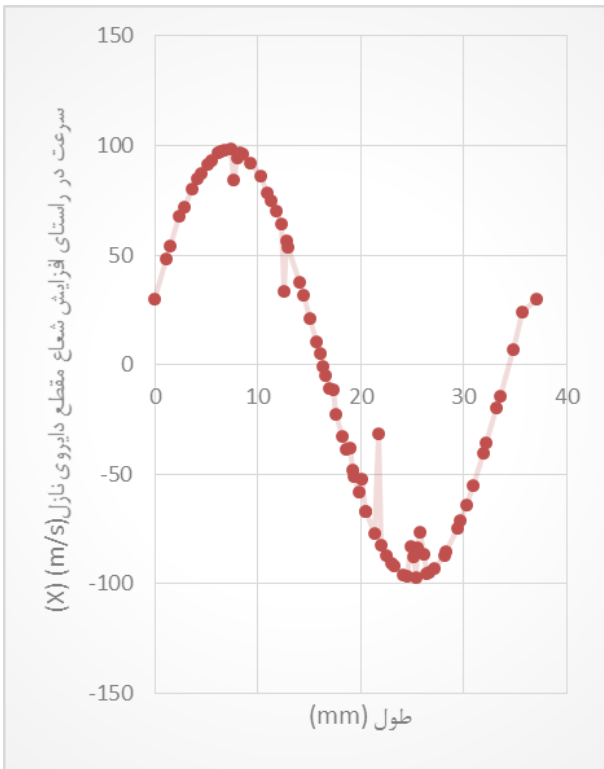
شکل ۵: منحنی برداری سرعت دورانی در امتداد جریان گردبادی

با توجه به مسیر یکنواخت و منطقی تغییرات مشخصه های مورد بررسی و برای اختصار متن در قسمت بعدی فقط اثر فشار های ۱۰٫۸ و ۱۳ بار ورودی را بر فشار دینامیکی وارد بر لوله گردبادی به صورت عددی تحلیل نموده و نمودارهایش را ملاحظه می کنید. (شکل های ۶ و ۷)

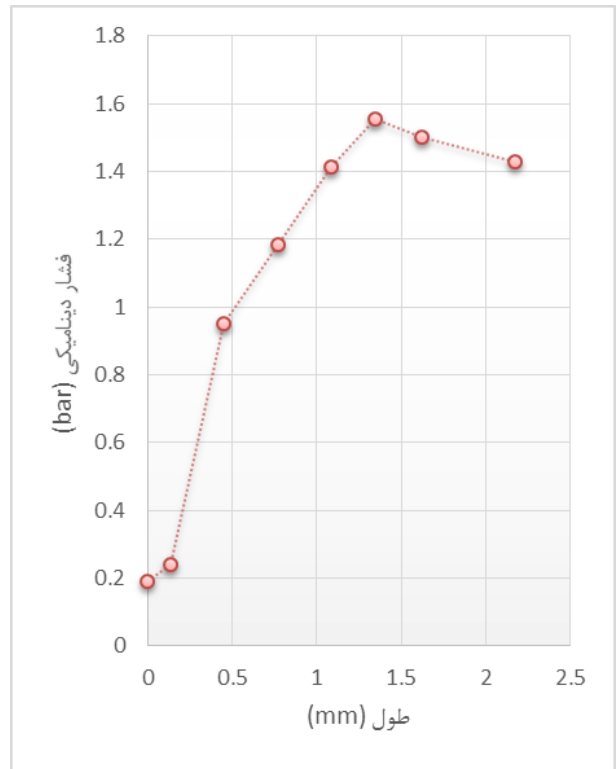


شکل ۶: تغییرات فشار دینامیکی در طول نازل ورودی در فشار هوای ورودی ۸ بار

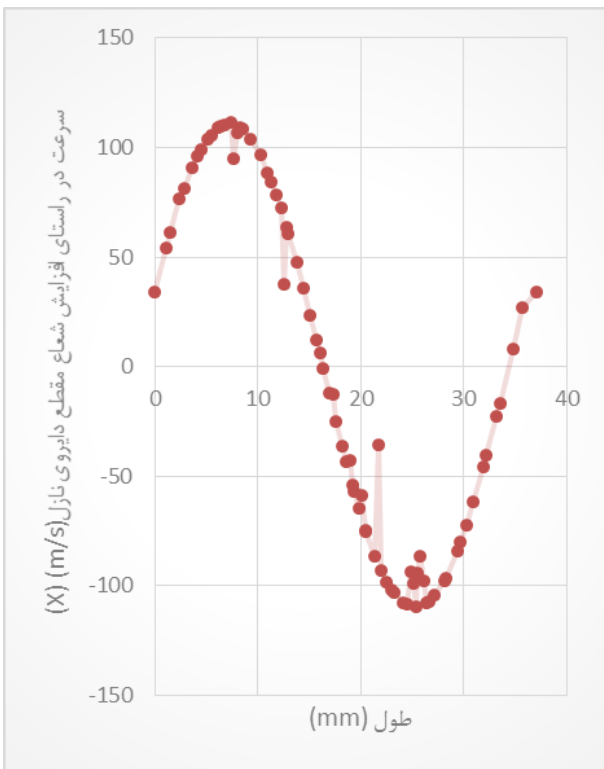
⁷ Catia
⁸ Ansys Fluent



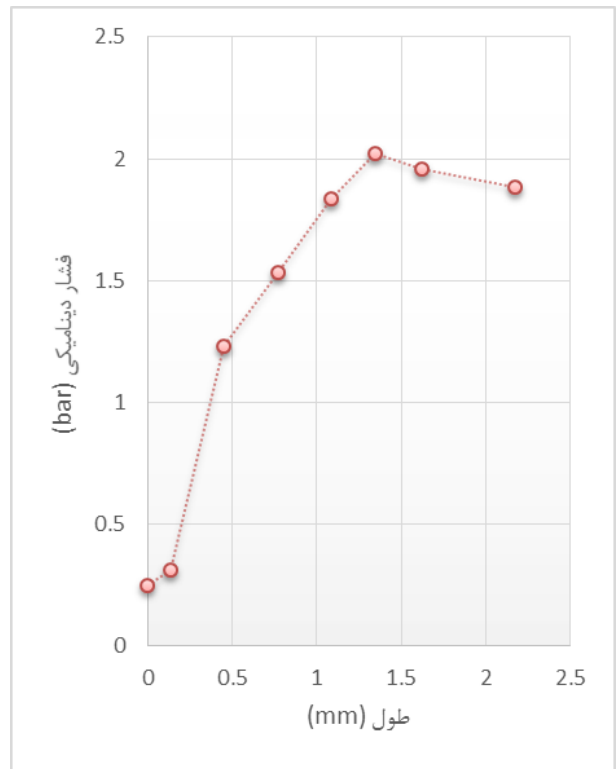
شکل ۹: سرعت دورانی داخل نازل ورودی در فشار ۸ بار



شکل ۷: تغییرات فشار دینامیکی در طول نازل ورودی در فشار هوای ورودی ۱۰ بار



شکل ۱۰: سرعت دورانی داخل نازل ورودی در فشار ۱۰ بار



شکل ۸: تغییرات فشار دینامیکی در طول نازل ورودی در فشار هوای ورودی ۱۳ بار

در ادامه به تحلیل عددی سرعت دورانی در نازل ورودی در راستای افزایش شعاع مقطع دایروی نازل با فشارهای ورودی ۱۰، ۸ و ۱۳ بار می پردازیم. (شکل های ۹، ۱۰ و ۱۱)

نتایج

با توجه به آزمایشات انجام شده و تحلیل ها، تغییرات مشخصه های دینامیکی و ترمودینامیکی نازل های ورودی که وابسته به دما و فشار هستند را در قالب جداول ۱ و ۲ ارائه کردیم: (دمای محیط ۳۰۰ کلوین)

جدول ۱: اثر تغییرات فشار تا ۵ بار هوای ورودی بر مشخصه ها

فشار ورودی	۱ بار	۲ بار	۳ بار	۴ بار	۵ بار
دمای بیشینه (k)	۳۰۲	۳۰۲.۵	۳۰۴.۴	۳۰۵.۳	۳۰۷
انرژی گرمایی منتقل شده از دیواره ها (W/m ²)	۱۳۲.۴	۲۱۰	۲۶۸	۳۱۴	۳۵۳
بیشینه سرعت مماسی m/s	۸۵	۱۱۵	۱۴۷	۱۵۰	۱۶۳
بیشینه سرعت چرخش گردباد با شعاع (۴ mm) دور بر دقیقه	۱۸۰۰۰۰	۲۴۴۰۰۰	۳۱۲۰۰۰	۳۱۸۰۰۰	۳۴۶۰۰۰
کمینه سرعت مماسی m/s	۸	۱۱	۱۲.۵	۱۵.۷	۱۷.۵
بیشینه سرعت چرخش گردباد با شعاع (۲ mm) دور بر دقیقه	۳۸۰۰۰	۵۲۰۰۰	۵۹۰۰۰	۷۵۰۰۰	۸۳۰۰۰

جدول ۲: اثر تغییرات فشار ۸ تا ۱۳ بار هوای ورودی بر مشخصه ها

فشار ورودی	۸ بار	۹ بار	۱۰ بار	۱۱ بار	۱۲ بار	۱۳ بار
دمای بیشینه (k)	۳۰۸.۵	۳۱۰	۳۱۳.۴	۳۱۵.۵	۳۱۹	۳۲۵.۶
انرژی گرمایی منتقل شده از دیواره ها (W/m ²)	۸۸۰	۹۱۰	۹۳۴	۹۸۹	۱۰۰۴	۱۰۵۰
بیشینه سرعت مماسی m/s	۳۳۵	۳۷۹	۳۹۸	۴۲۰	۴۴۱	۴۶۷
بیشینه سرعت چرخش گردباد با شعاع (۴ mm) دور بر دقیقه	۸۰۰۱۵۹	۹۰۵۲۵۵	۹۵۰۶۳۷	۱۰۰۳۱۸۵	۱۰۵۳۳۴۴	۱۱۱۵۴۴۶
دمای کمینه (k)	۲۶۳	۲۶۲	۲۶۰	۲۵۹	۲۵۸	۲۵۸

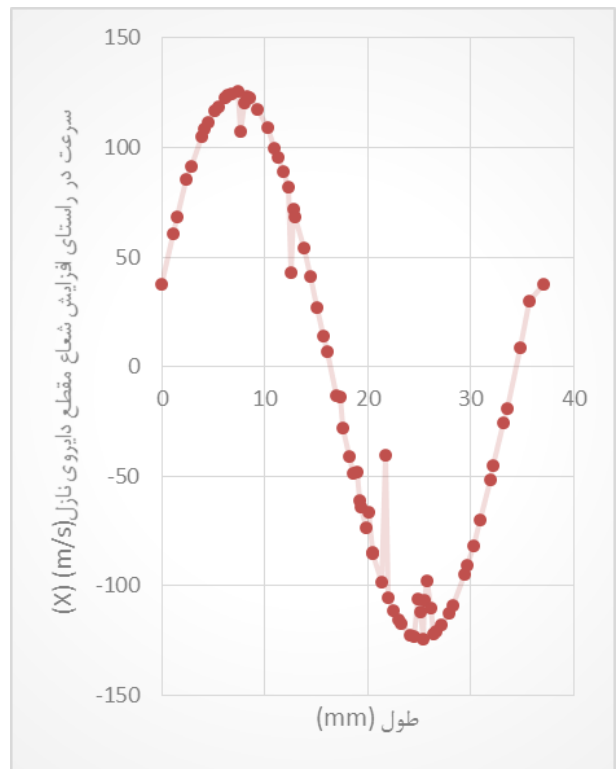
نتیجه گیری و جمع بندی

مهمترین مشخصه در لوله گردبادی که معمولاً به عنوان بازده از آن یاد می شود، اختلاف دمای دو جریان هوای سرد و گرم خروجی، با جریان هوای ورودی است. با توجه به نتایج بدست آمده در جداول ۱ و ۲ و مقایسه آن با آزمایشات تجربی می توان گفت اختلاف دمای مذکور به پنج عامل مهم وابسته است که عبارتند از:

- ۱- فشار ورودی: با افزایش فشار ورودی اختلاف دمای جریان ورودی و جریان های خروجی بیشتر می شود.
 - ۲- قطر نازل (ها) ورودی و چگونگی ورود آن به لوله گردبادی.
 - ۳- قطر نازل سرد: با کاهش قطر نازل خروجی هوای سرد بازده عملکردی افزایش می یابد.
 - ۴- نسبت طول لوله اصلی به قطر آن.
 - ۵- جنس لوله اصلی: برای بهبود عملکرد لوله گردبادی باید برای لوله اصلی از فلزی استفاده شود که زبری سطح بالایی داشته باشد.
- پیشنهاد: می توان مشخصه های ترمودینامیکی لوله گردبادی را با توجه به تعداد نازل های ورودی آن بررسی نمود.

قدردانی و تشکر

در انتها لازم است از پشتیبانی های دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران و همچنین بنیاد علمی و فرهنگی پرفسور حسابی، خصوصاً جناب آقای مهندس ایرج حسابی مدیریت محترم بنیاد پرفسور حسابی صمیمانه تشکر و قدردانی نماییم.



شکل ۱۱: سرعت دورانی داخل نازل ورودی در فشار ۱۳ بار

برای آزمایشات دو شرط ۱- فشار بین یک تا ۱۳ بار و ۲- دمای محیط (۳۰۰ کلوین) را در نظر گرفته و پنج مشخصه دمای خروجی گرم، دمای خروجی سرد، مقدار انرژی گرمایی انتقال یافته، سرعت مماسی ورودی، سرعت چرخش گردباد در مقطع دایروی لوله گردبادی را بررسی نمودیم. نکته حائز اهمیت در استفاده از لوله های گردبادی این است که باید هوای فشرده ورودی به لوله گردبادی عاری از رطوبت بوده و پس از شیر خروجی دستگاه کمپرسور هوا، حتماً فیلتر رطوبت گیر قرار گیرد. در غیر اینصورت آن مقدار آبی که وارد لوله گردبادی می شود، اگر فشار در بازه ی یک تا ۲۰ بار باشد، سبب اختلال در خط مسیر سیال داخل لوله می شود و میزان ضریب بهره وری انرژی لوله گردبادی را پایین می آورد. در نتیجه باعث کاهش اختلاف دمای محیط با دمای دو سر سرد و گرم لوله می شود. در این قسمت با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی اثر تغییرات مشخصه های ترمودینامیکی ورودی نازل ها چون: فشار، دما و رطوبت بر هر یک از پارامتر های انتقال حرارت دیواره ها، سرعت مماسی نازل های ورودی، سرعت گردبادهای درون لوله (برحسب دور بر دقیقه)، دمای خروجی سرد و دمای خروجی گرم مدل راپرداخته و استخراج نمودیم. سرعت مماسی نمایانگر حرکت چرخشی سیال در این مقطع می باشد که به راحتی و از فرمول ۲ می توان سرعت (دور در دقیقه) تولید شده در این مقطع را محاسبه نمود:

$$\omega = \frac{v_{tang}}{r} \times \frac{60}{\pi} \quad (2)$$

در جدول ۱ با توجه به لوله گردبادی ساخته شده، دو شعاع ورودی نمونه یعنی ۲ میلی متر و ۴ میلی متر در نظر گرفته شده است.

[2] G.J. Ranque, “ Experiments on expansion in a vortex with simultaneous exhaust of hot air and cold air”, *Le Journal de Physique et Le Radium*, 1933, 4(7):112-115.

[3] Chengming Gao, Experimental Study on the Ranque-Hilsch Vortex Tube, 2005, 2.

[4] URL <http://www.jotse.org/index.php/jotse/article/view/86/113>

[5] URL http://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_tube

[6] Walker, J., “The madness of stirring tea”. *The Flying Circus of Physics*. John Wiley & Sons, Inc., 1975 p. 97. ISBN 0-471-91808-3.

[7] Khait, A.V., Noskov, A.S., Alekhin, V.N, “Mathematical simulation of Ranque-Hilsch vortex tube heat and power performances”. *14th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, 2012.

فهرست علائم

سرعت مماسی، m/s	v_{tang}
شعاع، m	r
اختلاف آنتالپی از فشار ورودی جریان اصلی به فشار جریان سرد در انبساط هم آنتروپی گاز ایده آل	ΔI_s
اختلاف آنتالپی از فشار ورودی جریان های اضافی به فشار جریان سرد در انبساط هم آنتروپی گاز ایده آل	$\Delta I_s'$
اختلاف آنتالپی بین جریان ورودی اصلی و جریان سرد در لوله گردبادی	ΔI_x
علایم یونانی	
نسبت دبی جرمی جریان سرد به دبی جرمی جریان ورودی	M
بر rpm سرعت دورانی داخل لوله اصلی اساس دور بر دقیقه،	Ω

مراجع

[1] Hilsch, R, “The use of expansion of gases in a centrifugal field as cooling process”. *The Review of Scientific Instrument.*, 1947s, pp.108-113.