

## تحلیل عددی اثر تغییرات فشار هوای ورودی بر مشخصه های دینامیکی و ترمودینامیکی لوله گردبادی رنک - هیلش دو نازله

بنیامین ساریخانی<sup>۱</sup>، عادل مقصودپور<sup>۲</sup>، مصطفی کرزالدین<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مکانیک و هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران / Benyamin.Sarikhany@yahoo.com

<sup>۲</sup>دانشکده مکانیک و هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران / A.magsoudpour@srbiau.ac.ir

<sup>۳</sup>بنیاد پروفسور حسابی / Korzaledin.mostafa@gmail.com

### چکیده

در سیستم لوله گردبادی گاز تحت فشار از طریق کمپرسور 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 که سبب کاهش یا افزایش طول لوله و تغییر دمای جریان های خروجی می شود. (شکل ۱)

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]

کاربرد لوله گردبادی در سردکنندگی تابلوهای برق فشار قوی، سردکنندگی فرآیندهای صنعتی، جدا نمودن مخلوط های گازی و خشک نمودن گازها حائز اهمیت فراوان است.

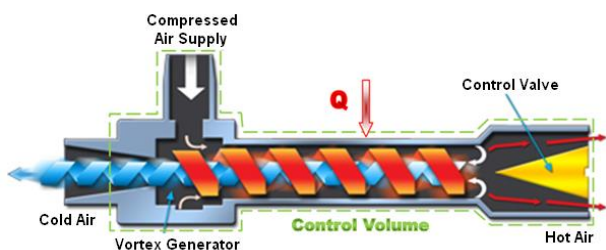
لوله گردبادی<sup>۱</sup> وسیله ای مکانیکی برای جداسازی یک جریان هوای فشرده به دو جریان هوای سردتر و گرمتر نسبت به جریان ورودی به طور همزمان است. طراحی ساده، حجم کم، عدم نیاز به تعمیر و نگهداری باعث شده تا این دستگاه دو منظوره در صنعت مورد توجه قرار گیرد. با توجه به پتانسیل علمی و امکانات موجود بر آن 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 داده و به تحلیل عددی مشخصه های دینامیکی و ترمودینامیکی آن با فشار های مختلف هوای فشرده ورودی پرداختیم.

### واژه های کلیدی

لوله گردبادی - دستگاه دو منظوره - تحلیل عددی

### مقدمه

پدیده ای که در لوله گردبادی رخ می دهد را اولین بار فیزیکدانی فرانسوی به نام جرج رنک<sup>۲</sup> در سال ۱۹۳۱ میلادی کشف کرد. سال ۱۹۴۷ مهندسی آلمانی به نام رادولف هیلش<sup>۳</sup> 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<sup>۴</sup> می نامند. [۱] 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.



شکل ۱: شمای کلی لوله گردبادی [۲]

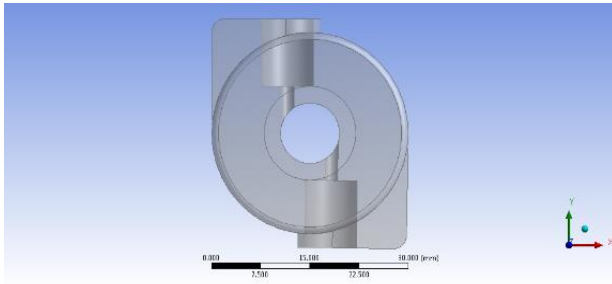
طی فرآیند ورود جریان هوایی با فشار بالا به درون لوله گردبادی، گردباد داخلی اندازه حرکت زاویه ای خود را از دست داده و این کاهش اندازه حرکت را به صورت انرژی جنبشی به گردباد بیرونی منتقل می کند که در نتیجه آن گردباد بیرونی داغ و جریان هوای درونی سرد از یکدیگر مجزا می شوند. با توجه به مخروطی بودن پیچ تنظیم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

<sup>۱</sup> Vortex tube

<sup>۲</sup> Georges J. Ranque

<sup>۳</sup> Rudolf Hilsch

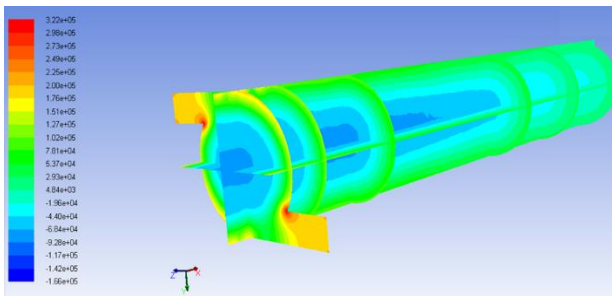
<sup>۴</sup> Ranque-Hilsch



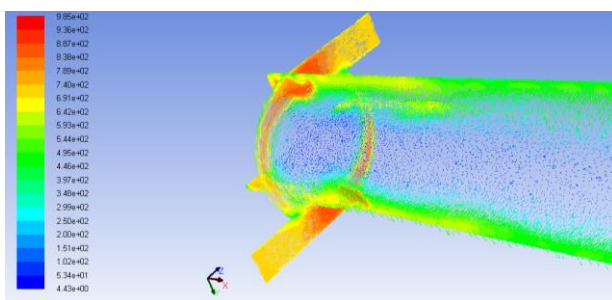
شکل ۲: مقطع روبرو نازل های ورودی لوله گردبادی

### تحلیل لوله گردبادی با استفاده از نرم افزار آنسیس فلونت<sup>۸</sup>

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 لوله اصلی 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

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<sup>۵</sup> 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.<sup>[۳]</sup>

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.<sup>[۴]</sup>

یکی از معایب این دستگاه پایین بودن راندمان است بطوریکه بیشترین میزان ضریب بهره وری انرژی<sup>(η<sub>s</sub>)</sup> (۰.۴۰٪) است. (فرمول<sup>(۱)</sup> [۵])

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

### طراحی لوله گردبادی توسط نرم افزار کتیا<sup>۶</sup>

یک نمونه لوله گردبادی با دو نازل ورودی را کاملاً با دانش فنی خود طراحی و ساخته و آزمایشات را بر روی آن انجام داده ایم. این نمونه را با نرم افزار کتیا نسخه ۲۱ شبیه سازی نمودیم. قطعات لوله گردبادی توسط دستگاه تراشکاری سی ان سی<sup>۷</sup> با دقت ۰.۱ میلی متر و تماماً از فلز برنج ساخته شده است.

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)

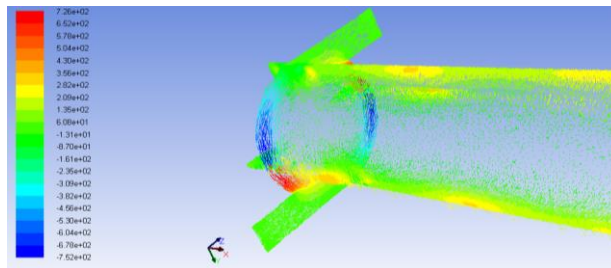
<sup>۵</sup> R.T.Balmer

<sup>۶</sup> Catia

<sup>۷</sup> CNC machine

<sup>۸</sup> Ansys Fluent

برای آزمایشات دو شرط فشار بین یک تا ۱۳ بار و 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.



شکل ۵: منحنی برداری سرعت دورانی در امتداد جریان گردبادی

نکته قابل توجه 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، حتما 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 کم شدن اختلاف دمای محیط با دمای دو سر سرد و گرم لوله می شود.

با توجه به مسیر یکنواخت و منطقی تغییرات مشخصه های مورد بررسی و برای اختصار متن در قسمت بعدی فقط اثر فشار های 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 ۶ و شکل ۷)

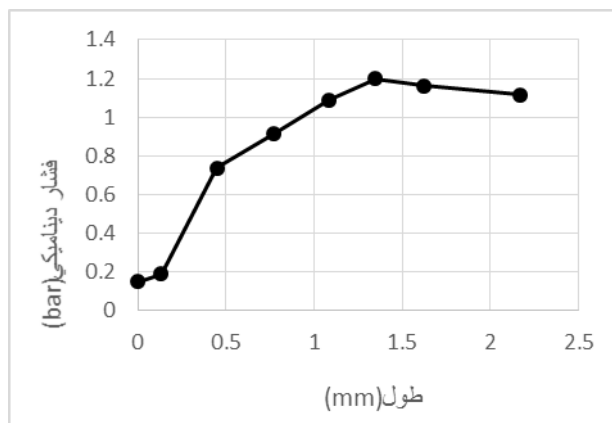
در این قسمت با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۹</sup> به بررسی اثر تغییرات مشخصه های ترمودینامیکی ورودی نازل ها مانند فشار، دما و رطوبت بر هر یک از پارامتر های انتقال حرارت دیواره ها، سرعت مماسی نازل های ورودی، سرعت گردبادهای درون لوله (برحسب دور بر دقیقه)، دمای خروجی سرد و دمای خروجی گرم 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:

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

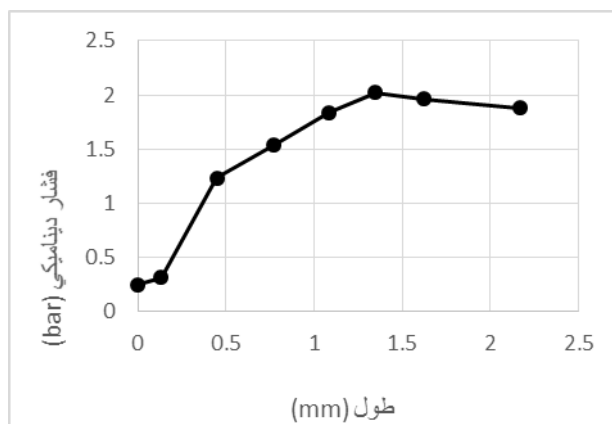
در جدول ۱ با توجه به لوله گردبادی ساخته شده، دو شعاع ورودی نمونه یعنی ۲ میلی متر و ۴ میلی متر در نظر گرفته شده است.

### نتایج

با توجه به آزمایشات انجام شده و تحلیل ها، به علت مشابه بودن نتایج آن ها با یکدیگر و برای اختصار متن مقاله، تغییرات مشخصه های ترمودینامیکی نازل های ورودی که وابسته به دما و فشار هستند را در قالب جداول ۱ و ۲ ارایه نمودیم: (دمای محیط ۳۰۰ کلوین)



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



شکل ۷: تغییرات فشار دینامیکی در طول نازل ورودی در فشار هوای ورودی ۱۳ بار

<sup>۹</sup> CFD: Computational fluid dynamics

جدول ۱: اثر تغییرات فشار ۱ 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 <sup>2</sup> )	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

اختلاف آنتالپی از فشار ورودی جریان اصلی به فشار جریان سرد در انبساط هم آنتروپی گاز ایده آل

$$\Delta I_s$$

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

$$\Delta I_x$$

### علائم یونانی

نسبت دبی جرمی جریان سرد به دبی جرمی جریان ورودی

$$M$$

rpm سرعت دورانی داخل لوله اصلی بر اساس دور بر دقیقه،

$$\Omega$$

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 <sup>2</sup> )	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

### قدردانی و تشکر

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

### مراجع

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

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

[3]URL [http://en.wikipedia.org/wiki/Vortex\\_tube](http://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_tube)

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

[5]Khait, A.V., Noskov, A.S., Alekhin, V.N., 2012, "Mathematical simulation of Ranque-Hilsch vortex tube heat and power performances". *14<sup>th</sup> International Conference on Computing in Civil and Bulding Engineering*.

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

### نتیجه گیری و جمع بندی

مهمترین مشخصه در لوله گردبادی اختلاف دمای دو جریان هوای سرد و گرم خروجی، با جریان هوای ورودی است. با توجه به نتایج بدست آمده (جداول ۱ و ۲) و همچنین آزمایشات تجربی، می توان گفت اختلاف دمای مذکور به چهار عامل مهم وابسته است که عبارتند از:

- ۱- فشار ورودی (با افزایش فشار اختلاف دما افزایش می یابد)
- ۲- قطر نازل (ها) ورودی و چگونگی ورود آن به لوله گردبادی

۳- جنس لوله اصلی: برای بهبود عملکرد لوله گردبادی باید برای لوله اصلی از فلزی استفاده شود که زبری سطح بالایی داشته باشد.

- ۴- نسبت طول لوله اصلی به قطر آن.

پیشنهاد: می توان مشخصه های ترمودینامیکی لوله گردبادی را با توجه به تعداد نازل های ورودی آن بررسی نمود.

### فهرست علائم

$V_{tang}$  سرعت مماسی، m/s

$r$  شعاع، m