

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

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

محمد رضا روحی، دانشجوی مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی؛ mre.rouhi@gmail.com

مصطفی کرزالدین، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران؛ Korzaleddin.mostafa@gmail.com

آرمین دلالی، دانشجوی مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران؛ ArminDallali@gmail.com

چکیده

در این مقاله ما به تحلیل عددی اثر تغییرات فشار هوای ورودی یک لوله گردبادی رنک- هیلش^۱ با ۳ نازل ورودی به وسیله نرم افزار انسیس فلونت^۲ می پردازیم. در این نرم افزار قطعه طراحی شده را از هر نرم افزار طراحی مدل ۳ بعدی وارد کرده و با مشخص کردن متغیرهایی مانند فشار هوای ورودی و جنس لوله تحلیل را آغاز می کنیم. این سه نازل طراحی شده با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به هم قرار دارند و مماس به سطح داخلی مقطع استوانه ای لوله می باشند.

بیشتر تحقیقات انجام شده بر روی لوله گردبادی یک نازله صورت پذیرفته است، اما در این مقاله به بررسی نوع دیگری از لوله گردبادی با دارا بودن ۳ نازل می پردازیم.

آزمایش های تجربی با استفاده از هوای فشرده شده به وسیله کمپرسور صورت پذیرفته و بر نتایج به دست آمده از این مقاله مبنی بر اثرات فشار بر دمای خروجی صحنه گذاشته است. برای بهبود عملکرد کمپرسور می توان از فیلترهای رطوبت گیر و جداساز ذرات هوا استفاده کرد. همچنین برای تنظیم دستگاه و یافتن بهترین طول لوله از پیچ تنظیمی در انتهای آن بهره گرفته شده است.

کلمات کلیدی: لوله گردبادی رنک- هیلش، بازده دمایی، کانتور، مش بندی و انسیس فلونت.

مقدمه

لوله گردبادی رنک- هیلش یک دستگاه مکانیکی با هندسه ای ساده است که قادر به تقسیم ورودی مماسی گاز متراکم شده به دو خروجی سرد و گرم می باشد. در این روش هوای ورودی با فشار بالا به صورت مماسی وارد لوله شده و با استفاده از قوانین ترمودینامیک، جداسازی یک جریان هوای فشرده به دو جریان هوای سرد و گرم صورت می پذیرد.

از مزایای این دستگاه سرمایشی و گرمایشی نداشتن هیچ قطعه متحرکی است، اما کاربرد مهم آن در خنک کردن نقطه ای می باشد [1]، که کاربردهای مهم آن عبارتند از:

خنک کننده مدارهای الکترونیکی، خنک کننده عملیات ماشین کاری،

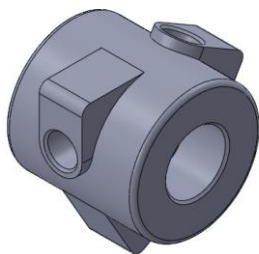
جداسازی مخلوط های گازی و جداسازی ذرات در جریان گاز.

این اثر برای اولین بار به طور تصادفی توسط رنک [2] در زمانی که وی در حال تحقیق بر روی جداسازی گردوغبار به وسیله این دستگاه بود، کشف شد. دو سال پس از وی توسط هیلش مشخصه های طراحی آن مشخص گردید [3]. محققین دیگری نیز تحقیقات تجربی گسترده ای بر روی این دستگاه انجام داده اند، افرادی مانند Elser و Hoch [4]،

Martynovskii و Alekseev [5]، Takahama [6]، Bruun [7] و Skye *et al.* [8] تحقیقات تجربی گسترده ای بر روی این دستگاه انجام داده اند. [9] Fulton آنالیز تحلیلی بر روی پارامترهایی از قبیل جدایش انرژی، سرعت و پروفیل های دما را انجام داد. Deissler و Perlmutter [10]، Young و Mc Cutcheon [11]، Ahlborn *et al.* [12] و Stephan *et al.* [13,14] بر روی تحلیل جدایش انرژی تحقیق می کردند. Dincer *et al.* [15]، Kirmaci. V. [16]، Akhesmeh [17]، Bramo و پور محمود [18-20] و پور محمود [21] بر روی اثر پارامترهای مؤثر بر روی کارکرد لوله گردبادی تحقیق کرده اند [1]. آنالیز تحلیلی بر روی مشخصه هایی از قبیل جدایش انرژی و سرعت از مهم ترین دستاوردهای این اشخاص بوده است [1]. این افراد بر روی مشخصه هایی دیگری مانند انرژی، سرعت، دما و کمیات مؤثر دیگر در ایجاد این اثر نیز تحقیق کرده اند. در تمام این تحقیقات نتیجه بارز، فارغ از استفاده از هر گازی و هر درجه حرارت محیطی، افزایش بازده دستگاه بوده است که منظور از بازده این تعریف است که با افزایش فشار هوای ورودی، دمای خروجی سرد پایین تر و دمای خروجی گرم بالاتر می رود. اما اکثر این محققین بر روی لوله گردبادی رنک- هیلش اولیه که فقط دارای ۱ نازل هوای ورودی بود تحقیق کرده اند، اما در مقاله ما به بررسی متغیرها در حالتی می پردازیم که چمبر دارای ۳ نازل ورودی باشد و با استفاده از نرم افزار فلونت به تحلیل تغییرات مشخصه های مختلف هوای ورودی لوله گردبادی ۳ نازله بر اثر افزایش فشار می پردازیم.

توصیف

برای آغاز مراحل تحلیل، نخست مدل مربوط به چمبر و نازل ها را در نرم افزار طراحی سه بعدی (مانند نرم افزار کتیا^۳) را تهیه می نمایم.



شکل ۱: ورودی لوله گردبادی ۳ نازله رنک- هیلش

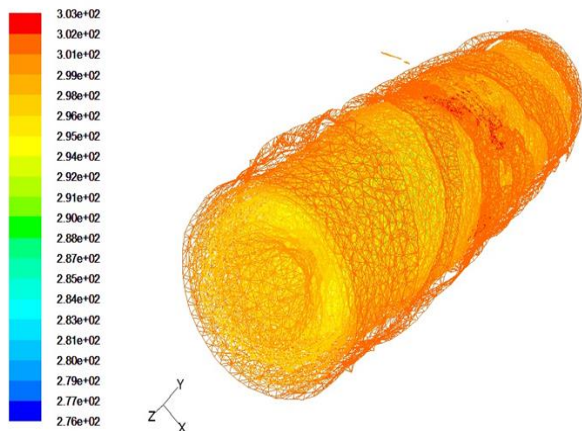
توجه داشته باشید که برای تحلیل سیالاتی المان محدود نیاز به مدل سازی کامل فضای درون چمبر و نازل ها می باشد و نه مدل سازی تمام مجموعه بر

¹ Ranque-Hilsch Vortex Tube

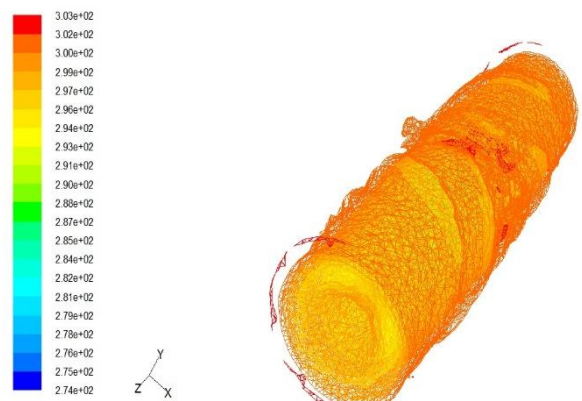
² Ansys Fluent

³ Catia

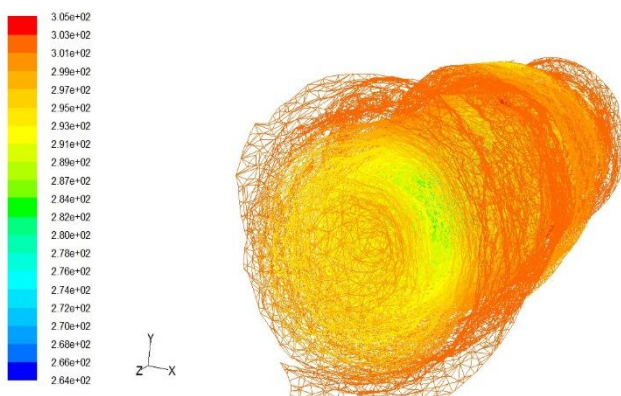
دوباره‌ی مسیر کل لوله و خارج شدن از طرف دیگر جریان هوای سرد را به ما می‌دهد. در طی این فرایند گردابه داخلی مومنومم زاویه‌ای^۱ خود را از دست می‌دهد و چون فرصت زیادی برای تبادل گرما با محیط خارج ندارد خود شروع به سرد شدن شدید می‌کند.



شکل 3: کانتور دما (K) در فشار هوای ورودی ۱ بار



شکل 4: کانتور دما (K) در فشار هوای ورودی 5 بار



شکل 5: کانتور دما (K) در فشار هوای ورودی ۱۲ بار

جریان گرمای سطحی

در این قسمت ماده استفاده شده در سطح را لوسیت^۲ در نظر می‌گیریم. خواص تجربی این ماده در جدول ۱ بیان شده است. استفاده از این ماده به

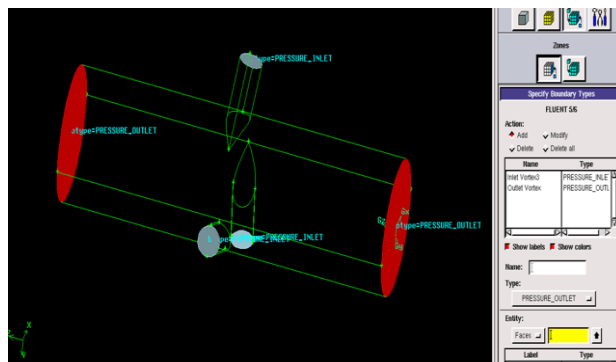
اساس نقشه موجود؛ بنابراین نازل‌هایی به قطر ۲ میلی‌متر به حالت مماسی وارد چمبر استوانه‌ای شکل به قطر ۹ میلی‌متر و طول ۳۰ میلی‌متر طراحی خواهند شد که در شکل ۱ نمایش داده شده است.

در این قطعه سه نازل با زاویه ۱۲۰ درجه بر چمبر ورودی مماس شده‌اند. توجه داشته باشید که این مدل فضایی است که هوا درون آن جریان می‌یابد و از دو طرف لوله استوانه‌ای خارج می‌شود. این سرعت مماسی نمایانگر حرکت چرخشی سیال در این مقطع می‌باشد که به راحتی و از فرمول زیر می‌توان دور بر دقیقه تولید شده در این مقطع را محاسبه کرد:

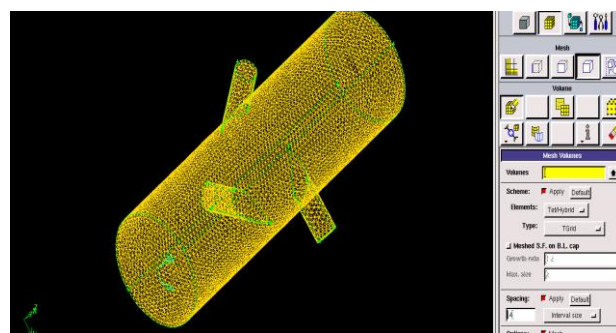
$$\omega = \frac{v \tan \alpha}{r} \times \frac{60}{\pi} \quad (1)$$

در حالت کلی برای تحلیل المان محدود، مدل‌سازی ایجاد شده مراحل زیر را طی خواهد کرد:

- ۱- مش بندی مدل: که به وسیله نرم‌افزار فلوئنت صورت پذیرفته است.
- ۲- تعریف شرایط مرزی: مانند مسدود بودن یا باز بودن لوله، فشار هوای ورودی، ایده آل گرفتن گاز ورودی (در اینجا هوا).
- ۳- تحلیل نهایی: که در ادامه به بررسی آن‌ها می‌پردازیم.



شکل ۲: تعیین شرایط مرزی در محیط تحلیلی نرم‌افزار



شکل ۳: نتیجه مش بندی در محیط تحلیلی نرم‌افزار

دما

دما مهم‌ترین فاکتور در یافتن بازده لوله‌های گردابه‌ای است، همان‌طور که در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نیز مشخص است افزایش فشار با افزایش اختلاف دما رابطه مستقیم دارد.

توجه به این نکته حائز اهمیت است که به علت مسدود بودن قسمتی از یک‌طرف لوله (طرف خروجی گرم) فشار در آن قسمت افزایش یافته و با برخورد جریان به شیر تنظیم مخروطی تعبیه شده باعث پس زدن گردابه به سمت مخالف (طرف خروجی سرد) می‌شود که این گردابه دوم با طی

¹ Angular Momentum

² Lucite

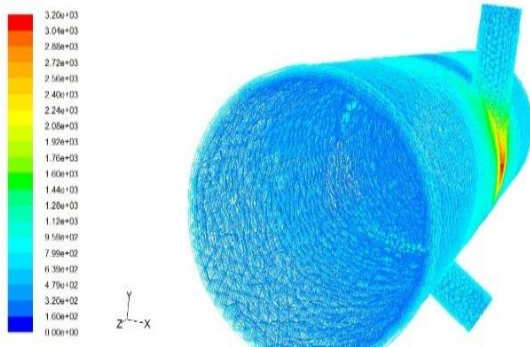
علت شرایط زبری سطح و ضریب انتقال حرارت مناسب تر از فلزات معمول مانند برنج و استیل است.

جدول ۱: خواص لوسیت

0.2	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)
20	ضریب انتقال حرارت (W/m ² .K)
1260	(j/kg.K) C _p
ترکیبی	شرایط حرارتی
10μm	ارتفاع عاج‌های سطحی
0.01	ضخامت دیواره (m)
1200	چگالی (kg/m ³)

مقادیر انتقال حرارت در پوسته‌ی لوله گردابه‌ای از دیواره‌ها و نیز مقدار سرعت مماسی بر خروجی‌های مدل بر اساس فرمول شماره ۱ در جدول بالا ذکر شده است.

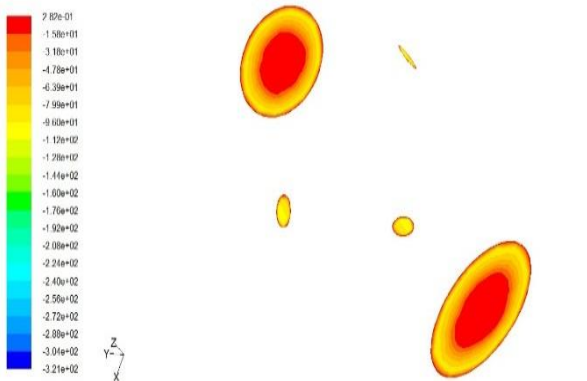
نتایج را در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ ملاحظه می‌کنید.



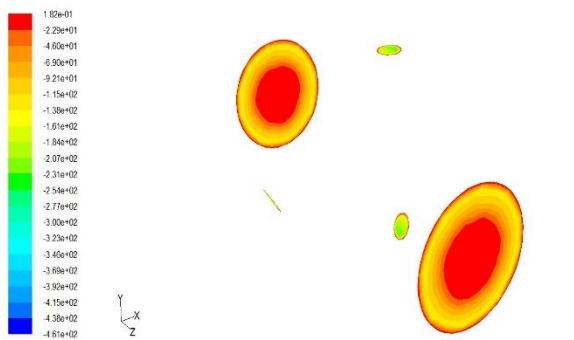
شکل ۸: کانتور جریان گرمای سطحی (W/m²) در فشار هوای ورودی ۱۲ بار

کانتورهای سرعت‌های مماسی

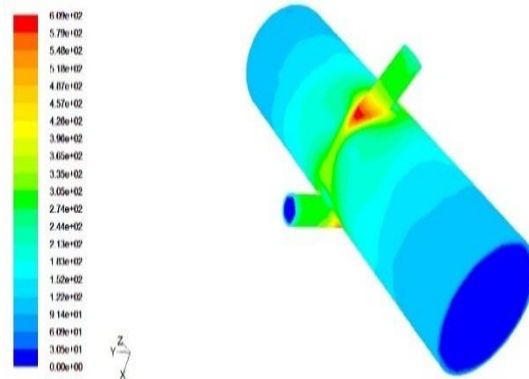
در تمامی تحلیل‌های نرم‌افزاری نشان داده‌شده در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱، افزایش یافتن فشار باعث افزایش سرعت مماسی هوای فشرده در مقاطع ورودی و خروجی شده است که این اثر به دلیل کاهش یافتن چرخش به دور محور میانی لوله با دور شدن از محور مرکزی و سپس افزایش دوباره به علت اصطکاک با سطح لوله می‌باشد. در قسمت ورودی سرعت‌های مماسی کم است زیرا تمرکز برای ورود جریان مماسی به لوله است و نه دارا شدن حالت گردابه.



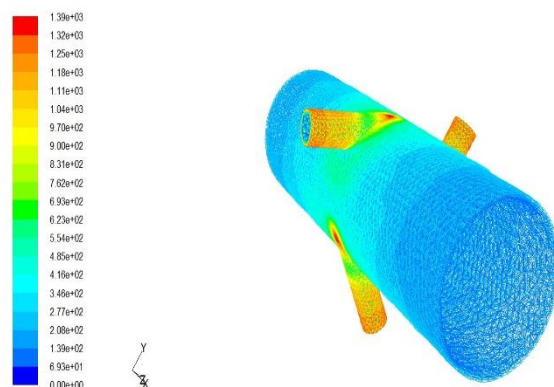
شکل ۹: کانتور سرعت‌های مماسی (m/s) در فشار هوای ورودی ۱ بار



شکل ۱۰: کانتور سرعت‌های مماسی (m/s) در فشار هوای ورودی ۵ بار



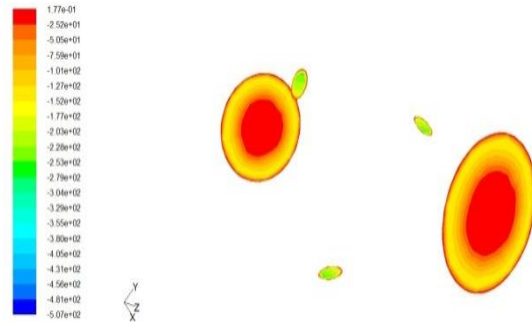
شکل ۶: کانتور جریان گرمای سطحی (W/m²) در فشار هوای ورودی ۱ بار



شکل ۷: کانتور جریان گرمای سطحی (W/m²) در فشار هوای ورودی ۵ بار

فشار در طول لوله

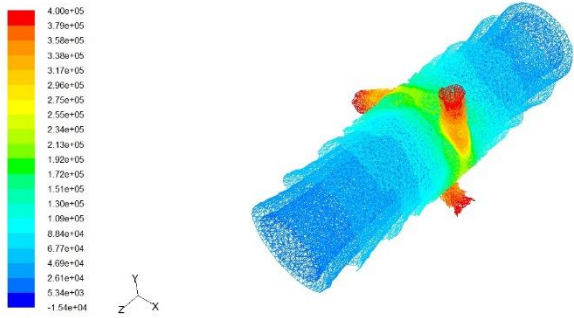
در این قسمت به بررسی عددی تغییرات فشار در طول لوله می‌پردازیم. آنالیز نحوه توزیع فشار در لوله گردابه‌ای به فهم مسیر جریان سیال کمک می‌کند. همان‌طور که در شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است به علت تراکم‌پذیری سیال مورد استفاده فشار کلی با ورود سیال به نازل کاهش پیوسته‌ای پیدا می‌کند اما در قسمت خروجی نازل یک موج شوکی^۱ ایجاد می‌شود که باعث افزایش فشار مجدد در داخل لوله می‌گردد.



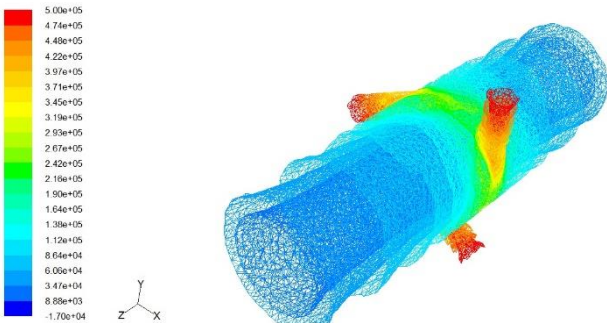
شکل ۱۱: کانتور سرعت‌های مماسی (m/s) در فشار هوای ورودی ۱۲ بار

سرعت

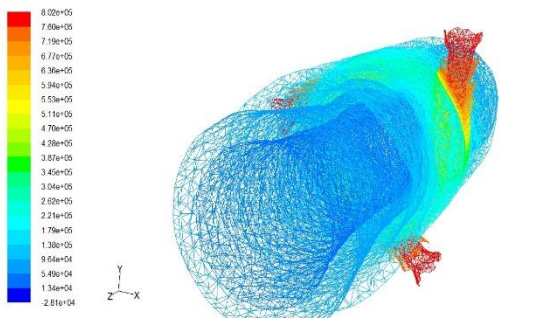
در این بخش به مقایسه سرعت سیال (در اینجا هوا) در قسمت ورودی لوله در فشارهای ۵، ۱۲ و ۱۳ بار می‌پردازیم. همان‌طور که در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نیز مشخص است کاهش سرعت در قسمت میانی لوله باعث کاهش انرژی جنبشی و سرد شدن هوای خروجی است. افزایش مجدد سرعت در قسمت خروجی نازل‌ها ناشی از همپوشانی جریان ۳ نازل است و همان‌طور که از ابتدا در طراحی آزمایش‌ها حدس زده می‌شد این همپوشانی باعث کامل‌تر شدن جریان گردابه و در نتیجه اختلاف دمای بیشتر می‌شود.



شکل ۱۵: فشار در طول لوله (Pa) در فشار هوای ورودی ۱ بار



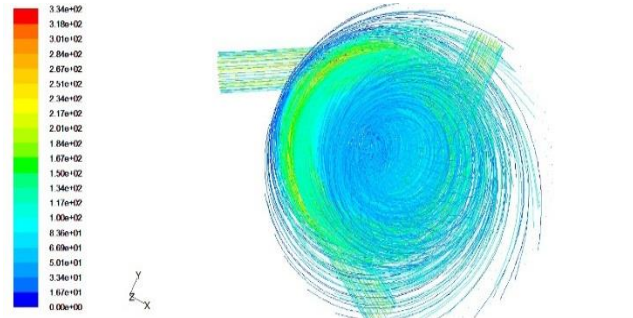
شکل ۱۶: فشار در طول لوله (Pa) در فشار هوای ورودی ۵ بار



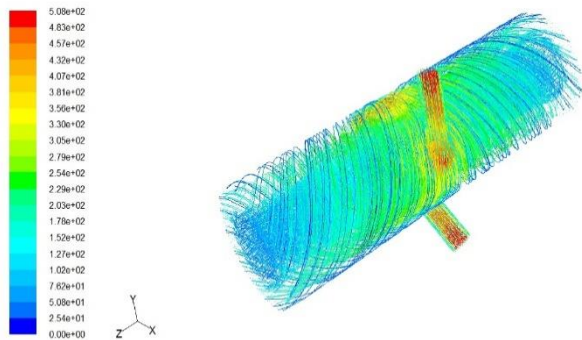
شکل ۱۷: فشار در طول لوله (Pa) در فشار هوای ورودی ۱۲ بار

چگالی

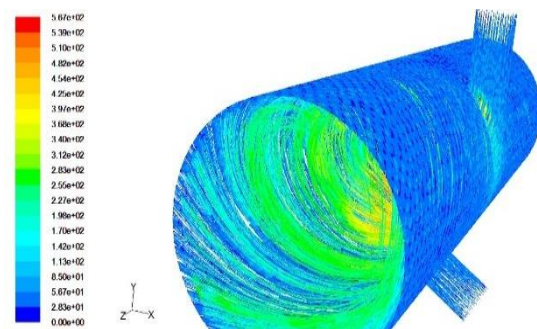
کاهش شدید چگالی درون لوله را می‌توان این‌گونه توضیح داد که هرچه به مرکز ورودی لوله نزدیک می‌شویم، بر اثر گردش هوا حول محور مرکزی لوله و ایجاد حالت سانتی‌فیوژی، مولکول‌های اکسیژن از نیتروژن جدا شده و در مرکز چگالی پایین‌تری را ایجاد می‌کنند. شکل‌های ۱۸، ۱۹ و ۲۰.



شکل ۱۲: مسیرهای با مقدار سرعت ثابت (m/s) در فشار هوای ورودی ۱ بار

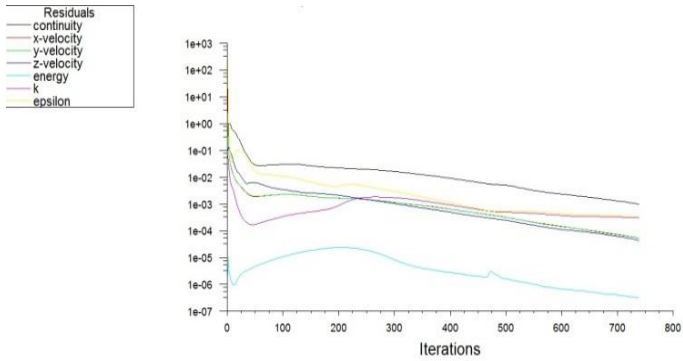


شکل ۱۳: مسیرهای با مقدار سرعت ثابت (m/s) در فشار هوای ورودی ۵ بار

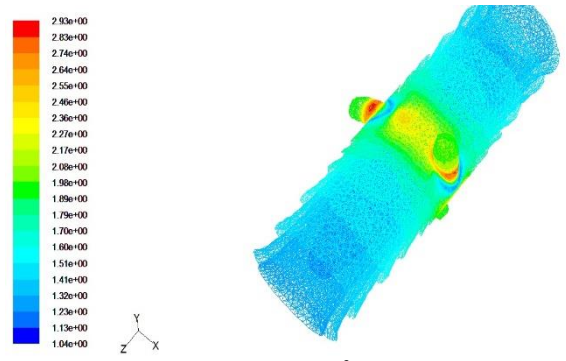


شکل ۱۴: مسیرهای با مقدار سرعت ثابت (m/s) در فشار هوای ورودی ۱۲ بار

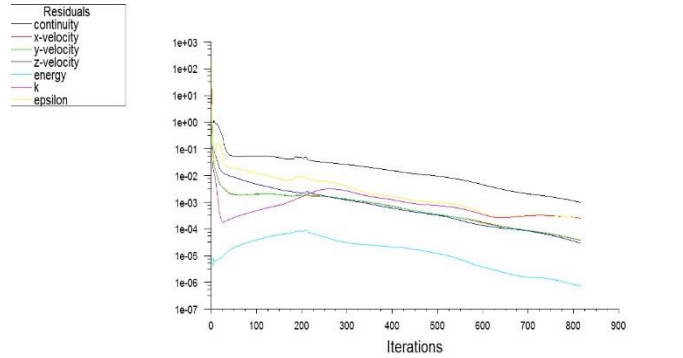
¹ Shock Wave



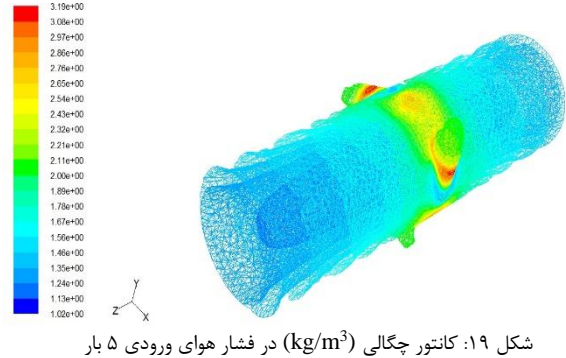
شکل ۲۱: تغییرات متغیرها در فشار هوای ورودی ۱ بار



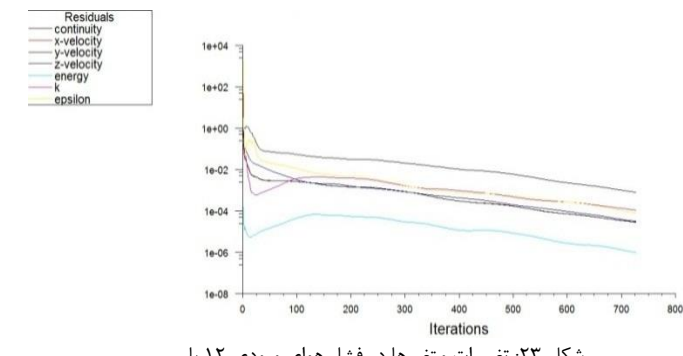
شکل ۱۸: کانتور چگالی (kg/m³) در فشار هوای ورودی ۱ بار



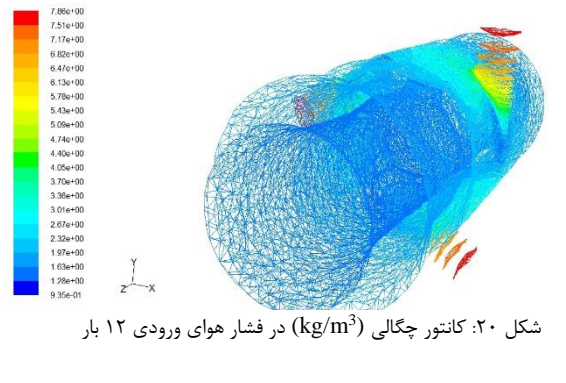
شکل ۲۲: تغییرات متغیرها در فشار هوای ورودی ۵ بار



شکل ۱۹: کانتور چگالی (kg/m³) در فشار هوای ورودی ۵ بار



شکل ۲۳: تغییرات متغیرها در فشار هوای ورودی ۱۲ بار



شکل ۲۰: کانتور چگالی (kg/m³) در فشار هوای ورودی ۱۲ بار

نتیجه‌گیری و دست آورد علمی صنعتی

در تمام حالات بررسی شده هدف نهایی بالاتر بردن اختلاف دمای ورودی با هر کدام از دو خروجی سرد و گرم بوده است که با آزمایش‌های انجام شده می‌توان به این نتیجه رسید که با بالاتر بردن فشار و استفاده از مواد با صافی سطح کمتر در ساخت این لوله می‌توان به نتیجه مطلوب‌تر رسید. در این بخش در شکل‌های ۲۱، ۲۲، ۲۳ و در جداول ۲ و ۳ خلاصه نتایج به‌دست‌آمده را ملاحظه می‌کنید.

با مشخص شدن بالاتر رفتن بازده لوله گردابه‌ای با افزایش فشار و مقایسه نتایج تحلیلی و نیز نتایج آزمایشگاهی با بازده لوله‌های گردابه‌ای تک نازله می‌توان با اطمینان به این نتیجه رسید که لوله گردابه‌ای دارای ۳ نازل اختلاف دمای بسیار بیشتری را نسبت به لوله‌های گردابه‌ای تک نازله برای ما فراهم می‌کند.

مقادیر محاسبه شده برای ۱۰ مرحله نخست آنالیز نیز در جداول زیر آمده است.

جدول (۲): مقایسه نتایج به‌دست‌آمده برای فشارهای ۱ تا ۵ بار

فشار اعمالی	۱ بار	۲ بار	۳ بار	۴ بار	۵ بار
دمای بیشینه (K)	۳۰۳.۵	۳۰۴.۶	۳۰۵.۸	۳۰۶.۹	۳۰۸.۱
انتقال حرارت با دیواره (W/m ²)	۱۷۸	۲۵۸	۳۳۴	۳۹۱	۴۳۵
سرعت مماسی بیشینه (ms)	۱۹۴	۲۱۲	۲۲۳	۲۴۷	۲۶۰
بیشترین سرعت چرخش در دقیقه / شعاع (۴۵mm)	۴۱۱۸۹۰	۴۵۰۱۰۶	۴۹۴۶۹۲	۵۲۴۴۱۶	۵۵۲۰۱۷
سرعت مماسی کمینه (ms)	۱۰	۱۲	۱۳.۵	۱۶.۲	۱۸.۸
کمترین سرعت چرخش در دقیقه / شعاع (۲mm)	۴۷۷۷۱	۵۷۳۲۵	۶۴۴۹۰	۷۷۳۸۹	۸۹۸۰۹

[7] Bruun H.H., "Experimental Investigation of The Energy Separation in Vortex Tubes", *Journal of Mechanic Engineering Science*, 11, 1969, pp. 567-582.

[8] Skye H.M., Nellis G.F., Klein S.A., "Comparison of CFD Analysis to Empirical Data in a Commercial Vortex Tube". *Int. J. Refrig.*, 29, 2006, pp. 71-80.

[9] Fulton C.D., "Ranque's Tube", *J Refrig Eng.*, 5, 1950, pp. 473-479.

[10] Deissler R.G., Perlmutter M., "Analysis of The Flow and Energy Separation in a Vortex Tube", *International Journal of Heat Mass Transfer*, 1, 1960, pp. 173-191.

[11] Young J., Mc Cutcheon A.R.S., "The Performance of Ranque-Hilsch Vortex Tube", *The Chemical Engineering*, 1973, pp. 522-528.

[12] Ahlbor, B., Keller J.U., Staudt R., Treitz G., Rebhan E., "Limits of Temperature Separation in a Vortex Tube", *Journal of Physics D: Appl. Phys.*, 27, 1994, pp. 480-488.

[13] Stephan K., Lin S., Drust M., "An Investigation of Energy Separation in a Vortex Tube", *International Journal of Heat Transfer*, 3, 1993, pp. 341-348.

[14] Stephan K., Lin S., Drust M., Seher D., "A Similarity Relation For Energy Separation in a Vortex Tub", *Int. J. of Heat Mass Transfer*, 6, 1984, pp. 911-920.

[15] Dincer K., Baskaya s., Uysal Z., "Experimental Investigation of The Effects of Length to Diameter Ratio and Nozzle Number on The Performance Counter Flow Ranque-Hilsch Vortex Tubes", *Int. J. of Heat Mass Transfer*, 44, 2008, pp. 367-373.

[16] Kirmaci V., "Optimization of Counter Flow Ranque-Hilsch Vortex Tube Performance Using Taguchi Method", *International Journal of Refrigeration*, 32, 2009, pp.1487-1494.

[17] Akhsmeh S., Pourmahmoud N., Sedgi H., Numerical "Study of The Temperature Separation in The Ranque-Hilsch Vortex Tube", *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3, 2008, pp. 181-187.

[18] Bramo A.R., Pourmahmoud N., "A Numerical Study on The Effect of Length to Diameter Ratio and Stagnation Point on The Performance of Counter Flow Vortex Tube", *Aust. J. Basic & Appl. Sci.*, 4, 2010, pp. 4943-4957.

[19] Bramo A.R., Pourmahmoud N., "CFD Simulation of Length to Diameter Ratio Effect on The Energy Separation in a Vortex Tube", *Thermal Science journal*, In Press.

[20] Pourmahmoud N., Bramo A.R., "The Effect of L/D Ratio on The Temperature Separation in The Counter Flow Vortex Tube", *IJRRAS*, 6, 2011, pp. 60-68.

[21] Pourmahmoud N., Hassan Zadeh A., Moutaby O., Bramo A.R., "CFD Analysis of Helica Nozzles Effects on the Energy Separation in a Vortex Tube", *Thermal Science journal*, In Press.

جدول (۳): مقایسه نتایج به دست آمده برای فشارهای ۸ تا ۱۳ بار

فشار اسمالی	بار ۸	بار ۹	بار ۱۰	بار ۱۱	بار ۱۲	بار ۱۳
دمای پیشینه (K)	۳۱۰	۳۱۲.۱	۳۱۴.۷	۳۱۸.۴	۳۲۲.۶	۳۳۰
دمای کیمینه (K)	۲۶۰	۲۵۷.۳	۲۵۵.۲	۲۵۲.۷	۲۴۸	۲۴۴.۳
انتقال حرارت متوسط با دیواره (W/m ²)	۸۹۷	۹۴۴	۹۸۶	۱۰۲۴	۱۰۵۹	۱۰۹۱
انتقال حرارت با دیواره (W)	۰.۸۲	۰.۸۶۴	۰.۹۰۲	۰.۹۳۷	۰.۹۰۷	۱
سرعت مماسی پیشینه (ms)	۳۹۴	۴۲۴	۴۴۰	۴۵۰	۴۶۴	۴۸۰
بیشترین سرعت چرخش در دقیقه / شعاع (r/min)	۹۴۱۰۸۳	۱۰۱۲۷۳۹	۱۰۵۰۹۵۵	۱۰۷۴۸۴۱	۱۱۰۸۲۸۰	۱۱۴۶۴۹۷

فهرست علائم

A	مساحت (m ²)
r	شعاع (mm)
V	سرعت (m/s)
c _p	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت (J/kg K)
ω	سرعت دورانی بر اساس دور بر دقیقه
ρ	چگالی (kg/m ³)
tang	بالانویس ها مماسی

قدردانی و تشکر

در انتها لازم است از پشتیبانی های دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، امکانات فراهم شده به وسیله مهندس ایرج حسابی ریاست بنیاد پروفیسور حسابی و خصوصاً جناب آقای دکتر جمشید قسیمي مدیریت محترم بخش تحقیقات و پژوهش بنیاد علمی پروفیسور حسابی و جناب آقای دکتر عادل مقصود پور عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

مراجع

[1] Pourmahmoud N., Hassan zadeh A., Moutaby O., Bramo A., *Numerical Investigation of Operating Pressure Effects on The Performance of a Vortex Tube*. Urumia, Urumia University, Department of Mechanical Engineering, pp. 1-2.

[2] Ranque G.J., "Experiences Sur la Détente Giratoire Avec Simultanes d'un Echappement d'air Chaud et d'un Enchappement d'air Froid" *J. Phys.Radium*, 4, 1933, pp. 112-114.

[3] Hilsch R., "Die Expansion Von Gasen im Zentrifugalfeld als Kälteproze". *Z. Naturforschung* 1, 1946, pp. 208-214.

[4] Elser K., Hoch M., "Das Verhalten Verschiedener Gase und die Trennung von Gasgemischen in einem Wirbelrohr", *Z. Naturf.*, 6a, 1951, pp. 25-31.

[5] Martynovskii V.S., Alekseev V.P., "Investigation of The Vortex Thermal Separation Effect For Gasses and Vapors", *Soviet Physics*, 1957, pp. 2233-2243.

[6] Takahama H., "Studies on Vortex Tube", *Bull. JSME*, 8, 1965, pp. 433-440.