

ISME2015-XXXX

تحلیل عددی اثر تغییرات فشار هوای ورودی بر مشخصه‌های ترمودینامیکی لوله گردابه‌ای رنک-هیلش سه نازله

محمد رضا روحی^۱، جمشید قسیمی^۲، ایمان احمدی^۲، آرمین دلالی^۴

^۱دانشکده مکانیک، خواجه‌نصیرالدین طوسی / Mre.rouhi@gmail.com

^۲بنیاد علمی و فرهنگی پروفیسور حسابی / jgh1001@yahoo.com

^۳دانشکده مکانیک و هوافضا، آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران / Iahmadi72@gmail.com

^۴دانشکده مکانیک و هوافضا، آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران / Armindallali@gmail.com

چکیده

این اثر برای اولین بار به‌طور تصادفی توسط رنک [2]، زمانی که وی در حال تحقیق بر روی جداسازی گردوغبار به‌وسیله این دستگاه بود، کشف شد. دو سال پس‌از آن توسط هیلش مشخصه‌های طراحی آن مشخص گردید [3].

محققین دیگری نیز تحقیقات تجربی گسترده‌ای بر روی این دستگاه انجام داده‌اند. آنالیز تحلیلی بر روی مشخصه‌هایی از قبیل جدایش انرژی و سرعت از مهم‌ترین دستاوردهای این اشخاص بوده است [1]. این افراد بر روی مشخصه‌هایی دیگری مانند انرژی، سرعت، دما و کمیات مؤثر دیگر در ایجاد این اثر نیز تحقیق کرده‌اند. 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 پایین‌تر و دمای خروجی گرم بالاتر می‌رود.

در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار فلونتت به تحلیل تغییرات مشخصه‌های مختلف هوای ورودی لوله گردابه‌ای ۳ نازله بر اثر افزایش فشار می‌پردازیم.

توصیف

برای آغاز مراحل تحلیل، نخست مدل مربوط به چمبر و نازل‌ها را در نرم‌افزار طراحی سه‌بعدی (در این مورد نرم‌افزار سالدورکز^۲) را تهیه می‌نماییم.



شکل ۱: ورودی لوله گردابه‌ای رنک-هیلش

توجه داشته باشید که برای تحلیل سیالاتی المان محدود نیاز به مدل‌سازی فضای درون چمبر و نازل‌ها می‌باشد و نه مدل‌سازی تمام مجموعه بر اساس نقشه موجود؛ بنابراین نازل‌هایی به قطر ۲ میلی‌متر

در این مقاله ما به تحلیل عددی اثر تغییرات فشار هوای ورودی یک لوله گردابه‌ای رنک-هیلش^۱ با ۳ نازل ورودی به‌وسیله نرم‌افزار فلونتت می‌پردازیم.

این سه نازل با زاویه‌ی ۱۲۰ درجه نسبت به هم قرار دارند و تمام آن‌ها مماس به سطح داخلی مقطع استوانه‌ای لوله می‌باشند. آزمایش‌های تجربی با استفاده از هوای فشرده‌شده به‌وسیله کمپرسور صورت پذیرفته و بر نتایج به‌دست‌آمده از این مقاله صحت گذاشته است. برای بهبود عملکرد کمپرسور می‌توان از فیلترهای رطوبت‌گیر 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. بیشتر تحقیقات انجام‌شده، بر روی لوله گردابه‌ای یک نازله صورت پذیرفته است، اما در این مقاله به بررسی نوع دیگری از لوله گردابه‌ای با دارا بودن ۳ نازل می‌پردازیم.

واژه‌های کلیدی

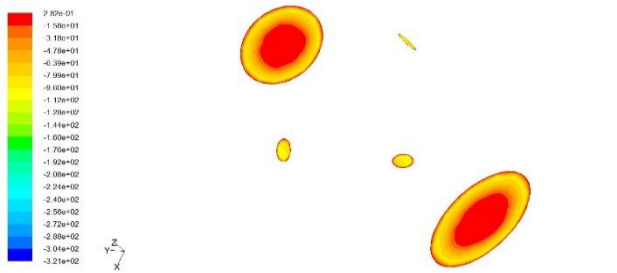
لوله گردابه‌ای رنک-هیلش، سرعت مماسی، فلونتت^۲ و کانتور

مقدمه

لوله گردابه‌ای رنک-هیلش یک دستگاه مکانیکی با هندسه‌ای ساده است که قادر به تقسیم ورودی مماسی گاز متراکم شده به دو خروجی سرد و گرم می‌باشد. در این روش هوای ورودی با فشار بالا به‌صورت مماسی وارد لوله شده و با استفاده از قوانین ترمودینامیک، جداسازی یک جریان هوای فشرده به دو جریان هوای سرد و گرم صورت می‌پذیرد. از مزایای این دستگاه سرمایشی و گرمایشی نداشتن هیچ قطعه متحرکی است، اما کاربرد مهم آن در خنک کردن نقطه‌ای می‌باشد [1]، که کاربردهای مهم آن عبارت‌اند از:

خنک‌کننده مدارهای الکترونیکی، خنک‌کننده عملیات ماشین‌کاری، جداسازی مخلوط‌های گازی و جداسازی ذرات در جریان گاز.

چرخش به دور محور میانی لوله با دور شدن از محور مرکزی کاهش یافته و سپس به علت اصطکاک با سطح لوله دوباره افزایش میابد.



شکل ۴: کانتور سرعت‌های مماسی (m/s) در فشار هوای ورودی بار ۱

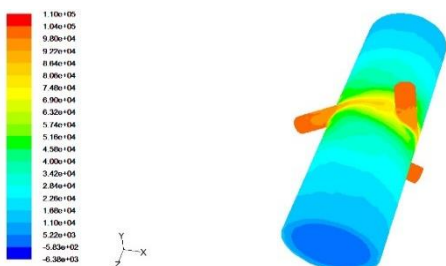


شکل ۵: کانتور سرعت‌های مماسی (m/s) در فشار هوای ورودی بار ۱۲

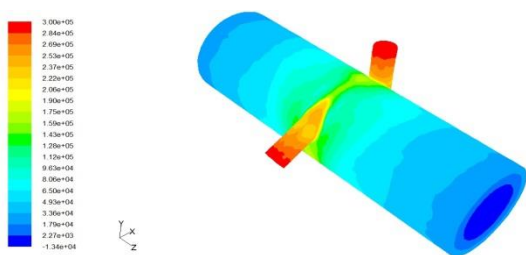
فشار در طول لوله

در این قسمت به بررسی عددی تغییرات فشار در طول لوله می‌پردازیم. آنالیز نحوه توزیع فشار در لوله گردابه‌ای به فهم خط مسیر جریان سیال کمک می‌کند.

همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است به علت تراکم‌پذیری سیال مورد استفاده فشار کلی با ورود سیال به نازل کاهش مداومی پیدا می‌کند اما در قسمت خروجی نازل یک شوک ایجاد می‌شود که باعث افزایش فشار مجدد در داخل لوله می‌گردد.



شکل ۶: فشار در طول لوله (Pa) در فشار هوای ورودی بار ۱



شکل ۷: فشار در طول لوله (Pa) در فشار هوای ورودی بار ۱۲

به حالت مماسی وارد چمبر استوانه‌ای شکل به قطر ۹ میلی‌متر و طول ۳۰ میلی‌متر خواهند شد. شکل ۱. در این پروژه سه نازل با زاویه ۱۲۰ درجه بر چمبر مماس شده‌اند. توجه داشته باشید که این مدل فضایی است که هوا درون آن جریان می‌یابد و از دو طرف استوانه خارج می‌شود.

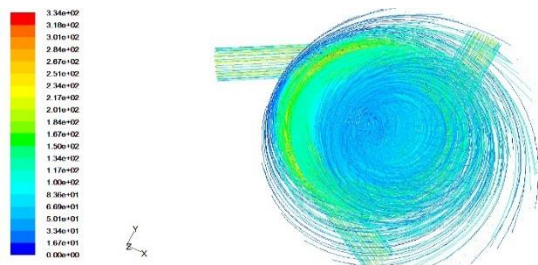
این سرعت مماسی نمایانگر حرکت چرخشی سیال در این مقطع می‌باشد که به راحتی و از فرمول زیر می‌توان دور بر دقیقه تولید شده در این مقطع را محاسبه کرد:

$$\omega = \frac{v_{\text{tang}}}{r} \times \frac{60}{\pi} \quad (1)$$

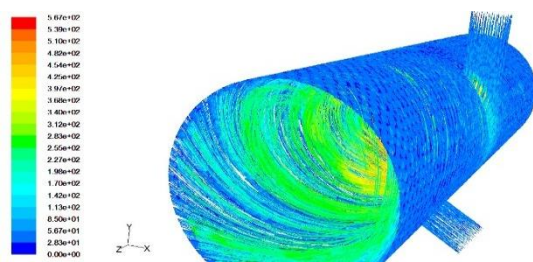
سرعت

در این بخش به مقایسه سرعت سیال در قسمت ورودی لوله در فشارهای ۱ و ۱۲ بار می‌پردازیم. همان‌طور که در شکل‌های ۲ و ۳ مشخص است کاهش سرعت در قسمت میانی لوله معادل کاهش انرژی جنبشی و سرد شدن خروجی است.

افزایش مجدد سرعت در قسمت خروجی نازل‌ها ناشی از همپوشانی جریان ۳ نازل دارد 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 ۲: مسیرهای با مقدار سرعت ثابت (m/s) در فشار هوای ورودی بار ۱



شکل ۳: مسیرهای با مقدار سرعت ثابت (m/s) در فشار هوای ورودی بار ۱۲

کانتورهای سرعت‌های مماسی

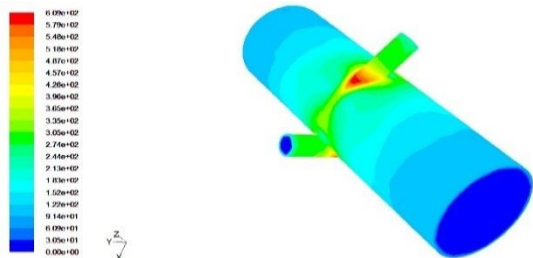
در تحلیل‌های نرم‌افزاری نشان داده شده در شکل‌های ۴ و ۵، افزایش یافتن فشار باعث افزایش سرعت مماسی هوای فشرده در مقاطع ورودی و خروجی می‌شود.

در قسمت ورودی سرعت‌های مماسی کم است زیرا تمرکز برای ورود جریان مماسی به لوله است و نه دارا شدن حالت گردابه.

دما

دما از فاکتورهای مهم در یافتن بازده لوله‌های گردابه‌ای است، همان‌طور که در شکل‌های ۸ و ۹ نیز مشخص است افزایش اختلاف دما با افزایش فشار رابطه مستقیم دارد.

باید توجه شود که به علت مسدود شدن نسبی یک‌طرف لوله (طرف گرم) فشار در آن قسمت افزایش یافته و باعث پس زدن گردابه به سمت مخالف می‌شود که این گردابه با طی مسیر کل لوله و خارج شدن از طرف دیگر جریان هوای سرد را به ما می‌دهد. در طی این فرایند گردابه داخلی اندازه حرکت زاویه‌ای خود را از دست می‌دهد و این باعث سردتر شدن هوای داخل ورودی لوله می‌گردد.



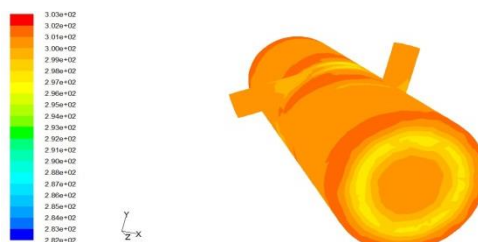
شکل ۱۰: کانتور جریان گرمای سطحی (W/m^2) در فشار هوای ورودی ۱ بار



شکل ۱۱: کانتور جریان گرمای سطحی (W/m^2) در فشار هوای ورودی ۱۲ بار



شکل ۸: کانتور دما (K) در فشار هوای ورودی ۱ بار



شکل ۹: کانتور دما (K) در فشار هوای ورودی ۱۲ بار

چگالی

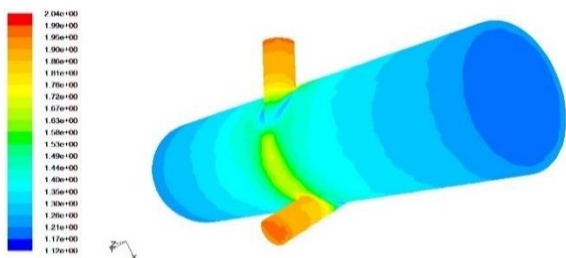
کاهش شدید چگالی درون لوله را می‌توان این‌گونه توضیح داد که هرچه به مرکز ورودی لوله نزدیک می‌شویم، بر اثر گردش هوا حول محور مرکزی لوله و ایجاد حالت سانتریفوژی، مولکول‌های اکسیژن از نیتروژن جدا شده و در مرکز چگالی پایین‌تری را ایجاد می‌کنند. شکل‌های (۱۲ و ۱۳).

جریان گرمای سطحی

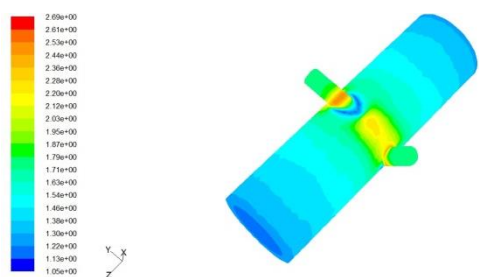
در این قسمت ماده استفاده شده در سطح را لوسیت^۴ در نظر می‌گیریم. خواص این ماده در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱: خواص لوسیت

۱	چگالی (kg/m^3)	1200
۲	C_p ($j/kg.K$)	1260
۳	ضریب هدایت حرارتی ($W/m.K$)	0.2
۴	ضریب انتقال حرارت ($W/m^2.K$)	20
۵	ضخامت دیواره (m)	0.01
۶	شرایط حرارتی ترکیبی	
۷	ارتفاع عاج‌های سطحی	10 μm



شکل ۱۲: کانتور چگالی (kg/m^3) در فشار هوای ورودی ۱ بار



شکل ۱۳: کانتور چگالی (kg/m^3) در فشار هوای ورودی ۱۲ بار

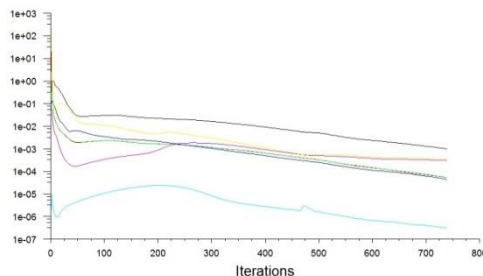
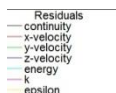
^۴ Lucite

نتایج

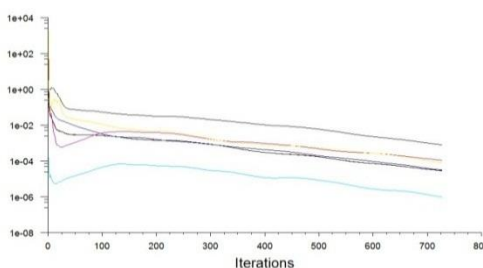
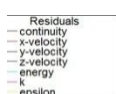
در این بخش در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ و در جداول ۲ و ۳ خلاصه نتایج به دست آمده را ملاحظه می‌کنید.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در تمام حالات بررسی شده هدف نهایی بالاتر بردن اختلاف دمای ورودی با هرکدام 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.



شکل ۱۴: تغییرات متغیرها در فشار هوای ورودی ۱ بار



شکل ۱۵: تغییرات متغیرها در فشار هوای ورودی ۱۲ بار

قدردانی و تشکر

در انتها لازم است از پشتیبانی‌های دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، امکانات فراهم شده به وسیله بنیاد پرفسور حسابی و خصوصاً جناب آقای دکتر جمشید قسیمی مدیریت محترم بخش تحقیقات و پژوهش بنیاد علمی پرفسور حسابی و جناب آقای دکتر عادل مقصودپور عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

فهرست علائم

C_p ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت،
j/kg.K

r شعاع، mm

V_{tang} سرعت مماسی، m/s

علائم یونانی

ω سرعت دورانی بر اساس دور بر دقیقه

مراجع

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

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

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

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

جدول (۲): مقایسه نتایج به دست آمده برای فشارهای ۱ تا ۵ بار

فشار اعمالی	۵ بار	۴ بار	۳ بار	۲ بار	۱ بار
دمای بیشینه (K)	۳۰۸.۱	۳۰۶.۹	۳۰۵.۸	۳۰۴.۶	۳۰۳.۵
انتقال حرارت با دیواره (W/m ²)	۴۳۵	۳۹۱	۳۳۴	۲۵۸	۱۷۸
سرعت مماسی بیشینه (ms)	۲۶۰	۲۴۷	۲۳۳	۲۱۲	۱۹۴
بیشترین سرعت چرخش در دقیقه / شعاع (۴.۵mm)	۵۵۲۰۱۷	۵۲۴۴۱۶	۴۹۴۶۹۲	۴۵۰۱۰۶	۴۱۱۸۹۰
سرعت مماسی کمینه (ms)	۱۸.۸	۱۶.۲	۱۳.۵	۱۲	۱۰
کمترین سرعت چرخش در دقیقه / شعاع (۲mm)	۸۹۸۰۹	۷۷۳۸۹	۶۴۴۹۰	۵۷۳۳۵	۴۷۷۷۱

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

فشار اعمالی	۱۳ بار	۱۲ بار	۱۱ بار	۱۰ بار	۹ بار	۸ بار
دمای بیشینه (K)	۳۳۰	۳۲۲.۶	۳۱۸.۴	۳۱۴.۷	۳۱۲.۱	۳۱۰
دمای کمینه (K)	۲۴۴.۳	۲۴۸	۲۵۲.۷	۲۵۵.۲	۲۵۷.۳	۲۶۰
انتقال حرارت متوسط با دیواره (W/m ²)	۱۰۹۱	۱۰۵۹	۱۰۲۴	۹۸۶	۹۴۴	۸۹۷
انتقال حرارت با دیواره (W)	۱	-۰.۹۰۷	-۰.۹۳۷	-۰.۹۰۲	-۰.۸۶۴	-۰.۸۲
سرعت مماسی بیشینه (ms)	۴۸۰	۴۶۴	۴۵۰	۴۴۰	۴۲۴	۳۹۴
بیشترین سرعت چرخش در دقیقه / شعاع (۴mm)	۱۱۴۶۴۷	۱۱۰۸۲۰	۱۰۷۴۸۴۱	۱۰۵۰۹۵۵	۱۰۱۲۷۳۹	۹۴۱۰۸۳