

مطالعه عددی مقایسه لوله گردابه بیضی با لوله گردابه دایره با رویکرد قطر هیدرولیکی برابر در فشارهای کاری مختلف

نام و نام خانوادگی نویسنده اول:

محمد تقی زاده

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه ارومیه

نام و نام خانوادگی نویسنده دوم:

سید مهدی پسته‌ای

عضو هیئت علمی دانشگاه ارومیه

چکیده

در این پژوهش، یک شبیه‌سازی عددی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)^۱ برای مقایسه لوله گردابه بیضی^۲ با لوله گردابه دایره با رویکرد قطر هیدرولیکی^۳ در فشارهای کاری مختلف برابر انجام شده است. هدف اصلی این مطالعه بررسی دماهای خروجی سرد و گرم و تفکیک دمایی^۴ داخل لوله گردابه در کسرهای جرمی سرد^۵ مختلف در لوله گردابه بیضی و مقایسه آن با لوله گردابه دایروی است. رویکرد اساسی این مقایسه قطر هیدرولیکی برابر در هردو لوله گردابه می‌باشد. تغییرات دماهای خروجی لوله گردابه بیضی در مقایسه با لوله گردابه دایروی در قطرهای کوچک و بزرگ به ترتیب ۱۰.۴ و ۱۲.۶ میلی متر بدین صورت است که دمای خروجی سرد در کسرهای جرمی بالاتر از ۰.۳ در لوله گردابه بیضی کمی خنک تر از لوله گردابه دایروی می‌باشد (حدود ۱ درجه سانتی گراد). در عوض دمای خروجی گرم در کسرهای جرمی بالاتر از ۰.۳ در لوله گردابه با مقطع دایره بیشتر از لوله گردابه با مقطع بیضی می‌باشد. به طور کلی تفکیک دمایی در لوله گردابه دایروی در اکثر کسرهای جرمی سرد مختلف بهتر و بیشتر از لوله گردابه بیضی می‌باشد. تغییر فشار ورودی در لوله گردابه که موجب تغییر جرم سیال ورودی می‌شود، بصورت مستقیم بر دماهای خروجی تأثیر می‌گذارد. در کسر جرمی سرد برابر ۰.۳۸ این افزایش و کاهش فشار موجب شد در فشارهای کمتر از ۵.۱۳ بار، تفکیک دمایی در لوله گردابه با مقطع بیضی کمی بهتر از لوله گردابه لوله گردابه با مقطع دایره باشد. با افزایش فشار و گذر از فشار ۵.۱۳ بار این امر معکوس شده و لوله گردابه دایروی بهتر می‌شود. در واقع لوله گردابه بیضی در فشارهای پایین‌تر از ۵.۱۳ بار بهتر از لوله گردابه دایروی عمل می‌کند.

کلمات کلیدی

لوله گردابه بیضی، بررسی عددی، کسر جرمی سرد، فشار، قطر هیدرولیکی

¹ Computational fluid dynamics

² Oval vortex tube

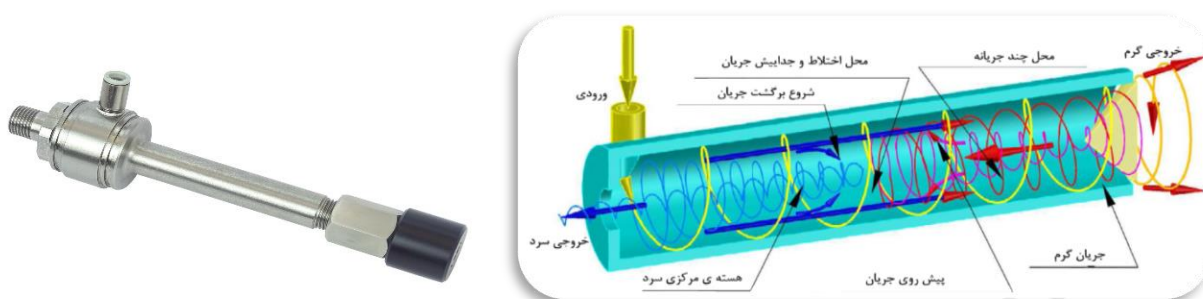
³ Hydraulic diameter

⁴ Temperature separation

⁵ Cold mass fraction

مقدمه

لوله گردابه‌ای^۱ بصورت کاملاً اتفاقی در سال ۱۹۲۸ اختراع شد. جوزف رانگ، متالوژیست و فیزیکدان فرانسوی، در حین آزمایش با یک پمپ از نوع گردابه ای متوجه خروج هوای گرم از یک طرف و هوای سرد از طرف مقابل شد. وی اختراع خود را در سال ۱۹۳۲ به عنوان یک اختراع فرانسوی و در سال ۱۹۳۴ (Ranque, 1934) به عنوان یک اختراع در آمریکا ثبت کرد. برخورد اولیه جامعه دانشمندان و مهندسين با اختراع وی دلسردکننده بود و به دلیل بازده ترمودینامیکی پایین، اختراع وی تا چند سال بدون هیچ گونه توجهی رها شد تا اینکه در سال ۱۹۴۷ یک فیزیکدان آلمانی به نام ردلف هیلش (Hilsch, 1947) مقاله ای منتشر کرد که حاوی نتایج آزمایشات و مطالعات تئوری بود که به منظور افزایش بازدهی لوله گردابه ای انجام شده بود. وی در مقاله خود اثر فشار هوای ورودی و پارامترهای فیزیکی لوله گردابه ای روی کارایی آن را به طور سیستماتیک مورد مطالعه قرار داد و یک توضیح محتمل برای فرآیند جدایی انرژی ارائه کرد. لوله گردابه ای به لوله هایی با عنوان لوله گردابه ای لانگا، لوله گردابه ای هیلش، لوله گردابه ای ماکسول دیمن و لوله گردابه ای رانگ-هیلش اشاره دارد. در همه این لوله ها یک محفظه سیلندر خالی که هوا یا دیگر سیالات فشرده شده به آن وارد می شود و شامل یک خروجی گرم در محیط لوله و یک خروجی سرد در مرکز لوله می باشد، مشترک است. یک نمونه لوله گردابه و نحوه عملکرد آن را به صورت شماتیک در شکل ۱ مشاهده می کنید.



شکل ۱: یک نمونه لوله گردابه و شماتیک عملکرد آن

لوله گردابه دارای مزایایی همچون:

- ساختمان فشرده و کم حجم و سبک
- عدم وجود فن و رادیاتور و ...
- قابلیت کنترل
- هزینه ساخت پایین
- دوام بالا
- عدم نیاز به روغن کاری

و معایبی مانند:

- پایین بودن راندمان تبرید در مقایسه با سایر وسایل مهندسی
- نیاز به هوای فشرده

¹ Vortex tube

• ایجاد آلودگی صوتی می باشد.

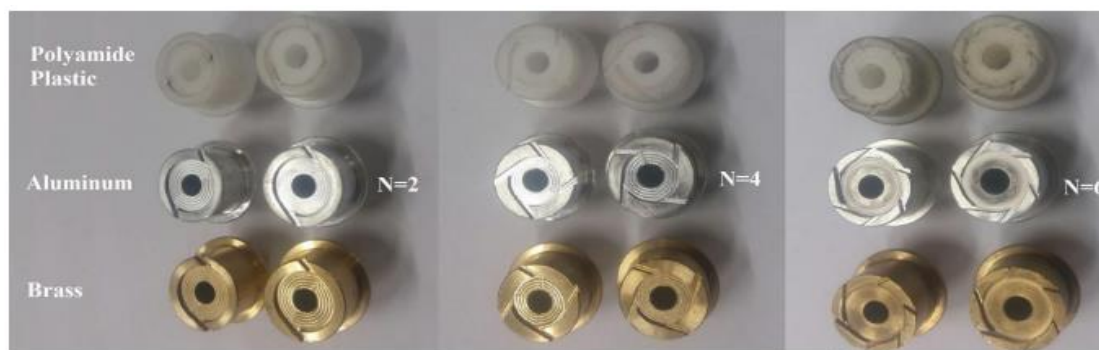
لوله گردابه به عنوان وسیله ای برای گرمایش، سرمایش و موارد دیگر به کار می رود که در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲: کاربردهای لوله گردابه

سرمایش	گرمایش	دیگر کاربردها
خنک کاری دستگاه های ذوب فلزات و مذاب فلزات	گرمایش در لحیم کاری و چسب کاری	مایع سازی و غلیظ کردن گاز ها
خنک سازی و تهویه کابین هواپیما ها	خشک کردن جوهر روی برچسبها و قوطی ها	تفکیک گاز های مخلوط
خنک کننده تیغه های ماشین تراش	گرمایش ایستگاه تقلیل فشار	تمیز کردن گاز
خنک کاری گاز و سیالات عامل در سیستم ها	گرمایش در زیردریایی های سرنشین-دار	جداکننده رسوب از یک جریان مانند زدودن هیدروکربن های سنگین و سولفید ها از مشتقات نفت و گاز

در سال های اخیر، مطالعات بسیار خوبی برای بهبود عملکرد لوله گردابه صورت گرفته است که به طور مختصر به برخی از آن ها اشاره می شود.

کایا و همکاران (Kaya et al, 2018) به بررسی تجربی عملکرد گرمایی اتصال موازی لوله های گردابه ای با جنس های مختلف نازل پرداختند. در این مطالعه، اثرات عدد نازل (تعداد ورودی نازل) و جنس آن بر عملکرد حرارتی لوله گردابه ای با محتوی هوای فشرده در فشارهای مختلف ورودی به صورت تجربی بررسی شده است. این جنس های مختلف شامل پلاستیک پلی آمید^۱، آلومینیوم^۲ و برنج^۳ هستند. هم چنین در کار ایشان دامنه تغییرات فشار ورودی مورد آزمایش ۱۵۰ تا ۵۰۰ کیلوپاسکال است. در این پژوهش از سه عدد نازل مختلف ۲، ۴ و ۶ در لوله گردابه ای استفاده شده است. نسبت طول به قطر لوله ها برابر ۱۴ کسر جرمی جریان سرد هوا برابر ۰.۳۶ است. نتایج مطالعات تجربی آن ها نشان داد که حداکثر عملکرد با نازل آلومینیومی با عدد نازل ۶ در فشار ورودی ۵۵۰ کیلوپاسکال به دست می آید. شکل ۲-۲۲ اتصالات آزمایش کایا و همکاران را نمایش می دهد.



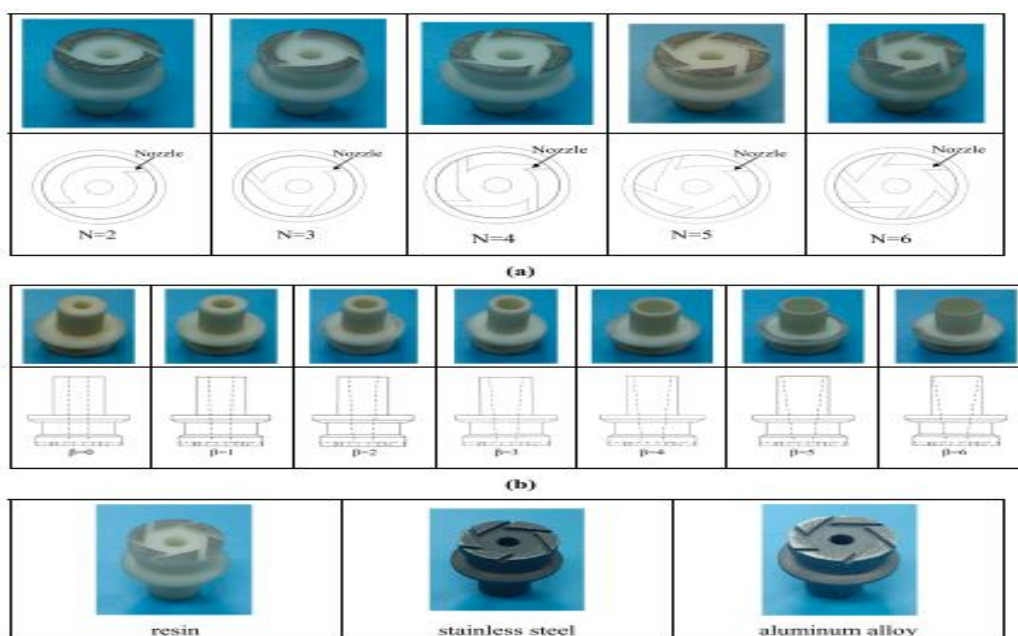
¹ Polyamide

² Aluminum

³ Brass

شکل ۲: اریفیس با جنس و تعداد نازل‌های مختلف آزمایش کایا

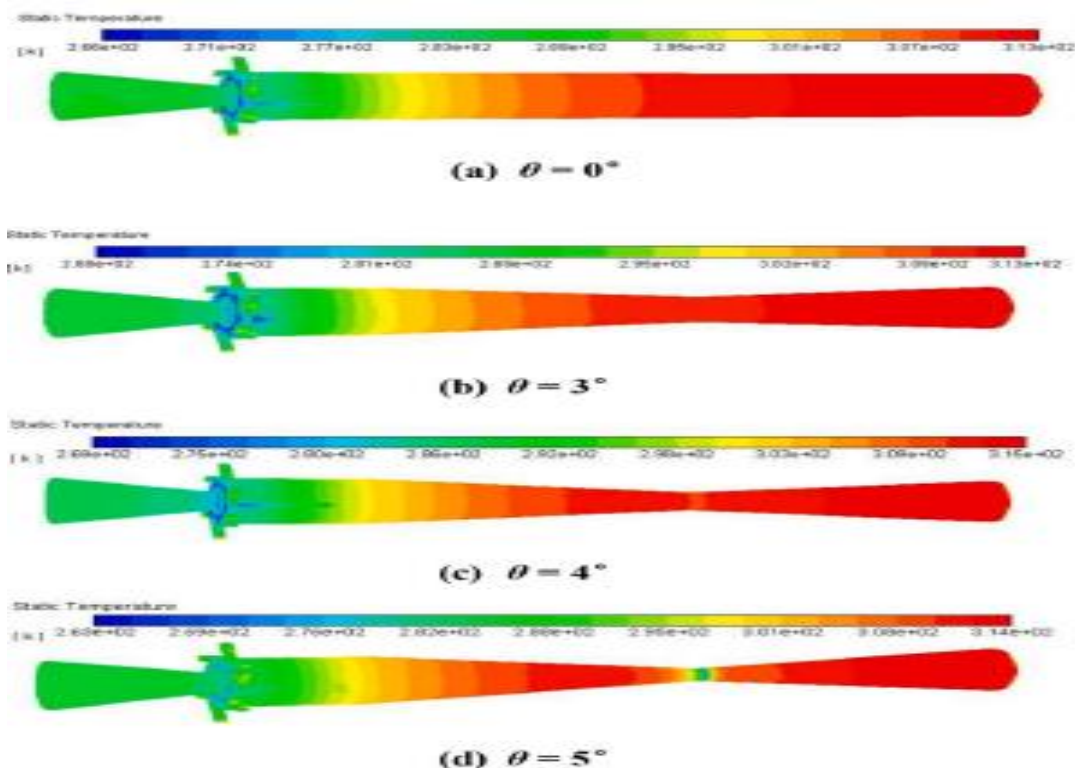
یکی از ارزشمندترین مطالعات اخیر در رابطه با دستگاه لوله گردابه‌ای مربوط به مطالعه تجربی لیانگ و همکاران (Liang et al, 2021) می‌باشد که بر روی پارامترهایی همچون تعداد نازل، زاویه مخروط سرد (θ) و مواد مربوط به جنس لوله گردابه‌ای تحقیق کردند. آن‌ها دریافتند که افزایش تعداد نازل ورودی باعث بهبود مستمر راندمان اگزرژی و افزایش مداوم ظرفیت سرمایشی و گرمایشی می‌شود. از طرفی در بحث زاویه مخروط سرد، پی بردند که با افزایش زاویه مخروط سرد، ظرفیت سرمایشی و گرمایشی ابتدا بالا رفته و سپس کاهش می‌یابد. بطوری که افزایش زاویه مخروط سرد تا ۲ درجه موجب افزایش ظرفیت سرمایشی و گرمایشی شده و در خود ۲ درجه به اوج خود می‌رسد. اما بعد از ۲ درجه، ظرفیت سرمایشی و گرمایشی نرخ نزولی به خود می‌گیرد. همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند که لوله گردابه‌ای از جنس رزین دارای اختلاف دمای بهینه سرد و گرم است و به دنبال آن فولاد ضدزنگ و آلایژ آلومینیوم کمترین مقدار را از این حیث برخوردارند. شکل ۳ مربوط به آزمایش لیانگ و همکاران می‌باشد.



شکل ۳: زاویه سرد خروجی، جنس و تعداد نازل‌های ورودی آزمایشات لیانگ و همکاران

لی و همکاران (Li et al, 2022)، به وسیله تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، مطالعه عددی را روی تفاوت سرعت و توزیع دما بین لوله گردابه مستقیم و لوله گردابه همگرا-واگرا انجام دادند. آن‌ها زاویه همگرا-واگرا لوله (گلوگاه) را در محدوده ۳ تا ۵ درجه در نظر گرفتند. نتایج آن‌ها نشان داد که قابلیت جداسازی دما در ساختار همگرا-واگرا بهتر از لوله مستقیم سنتی عمل می‌کند. همچنین دریافتند با افزایش زاویه همگرا-واگرا، دمای گلوگاه به تدریج کاهش می‌یابد و سرعت، تحت یک کسر جرمی سرد معین افزایش می‌یابد. در کسر جرمی سرد بالا افزایش زاویه همگرا-واگرا، ظرفیت سرمایش و گرمایش را افزایش می‌دهد. همچنین کار مماسی و انتقال حرارت در لوله گردابه تحت زاویه همگرا-واگرا برابر با ۴ درجه، تحت یک کسر جرمی سرد معین به حداکثر می‌رسد. همچنین لوله گردابه همگرا-واگرا تحت زاویه گلوگاه ۵ درجه در مقایسه با لوله گردابه مستقیم به ترتیب ۱۳٪ و ۱۸٪ افزایش می‌یابد. بطور کلی نتیجه گرفتند که با افزایش زاویه همگرا-واگرا، انتقال حرارت و کار مماسی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. کار محوری به تدریج کاهش و تحت یک کسر جرمی سرد معین، ظرفیت سرمایشی و گرمایشی تحت زاویه همگرا-

واگرا برابر با ۴ درجه به حداکثر می‌رسد. در شکل ۴ زاویه‌های مختلف همگرا-واگرا این پژوهش نشان داده شده است.



شکل ۴: زاویه‌های مختلف همگرا-واگرا

هدف از این پژوهش، بررسی هندسه بیضی لوله گردابه بر دماهای خروجی سرد و گرم و تفکیک دمایی داخل لوله گردابه با فشارهای کاری مختلف در کسرهای جرمی متفاوت و مقایسه آن با لوله گردابه دایروی^۱ می‌باشد. در این مطالعه عددی، لوله گردابه مرجع مدل اسکای می‌باشد و جریان به صورت سه بعدی و تراکم پذیر فرض شده و برای حل مسأله، روش حجم محدود^۲ انتخاب شده است. هم چنین جریان داخل لوله گردابه مغشوش فرض شده و برای مدلسازی این جریان، از مدل k-ε استفاده شده است.

روش تحقیق

دینامیک سیالات محاسباتی که به اختصار CFD شناخته می‌شود، یکی از قوی ترین و کم هزینه ترین روش های تحقیق است که استفاده از این ابزار دروازه جدیدی در شبیه سازی و کاهش خطای طراحی های مهندسی را فراهم می کند. بطوری که با کمترین هزینه قبل از تولید یا اعمال تغییر در محصول، می توان کارایی محصول را در شرایط مد نظر مورد بررسی قرار داد و قبل از تولید، هرگونه تغییر را برای بهبود عملکرد محصول و کاهش خطاهای احتمالی مربوطه را اعمال کرد. برای این شبیه سازی از بسته نرم افزار انسیس فلوئنت^۳ استفاده شده است.

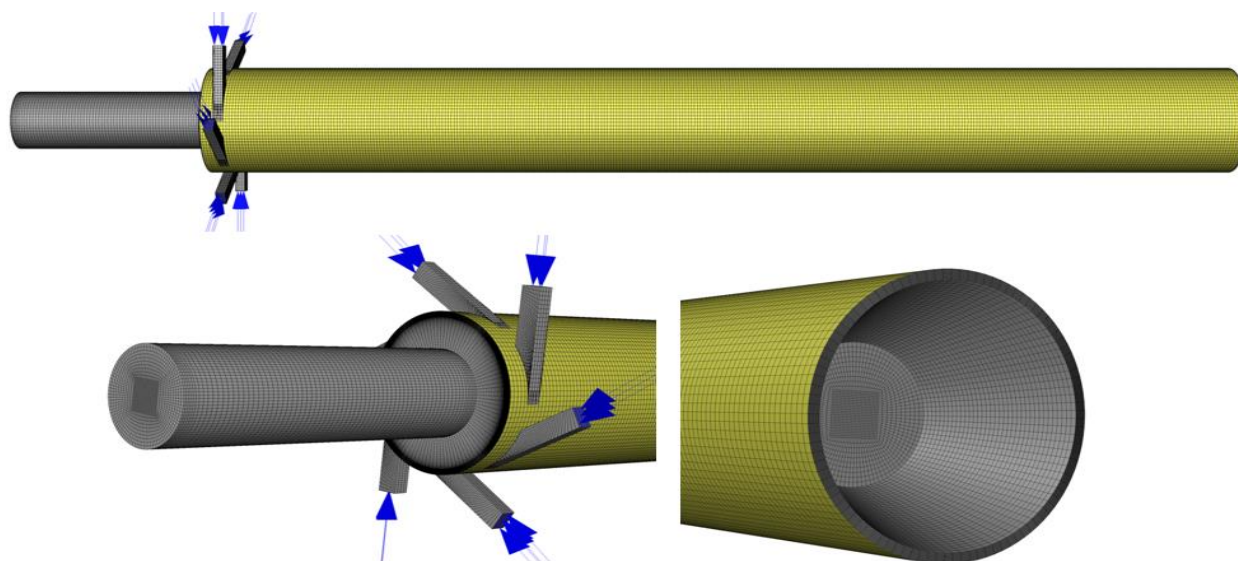
¹ Circle vortex tube

² Limited volume

³ Ansys fluent

یافته ها

لوله گردابه مرجع (اسکای) (Skye et al, 2006) دارای طول ۱۰۶ میلی متر و قطر لوله برابر ۱۱.۴ میلی متر می باشد. قطر خروجی سرد ۶.۲ میلی متر و نازلی به پهنای ۱.۴۱ میلی متر و عمقی برابر ۰.۹۷ میلی متر داراست. در این مدل، محفظه چرخش ورودی جریان دارای ۶ نازل مجزا به صورت متقارن با زاویه ۶۰ درجه می باشد. خروجی گرم به صورت یک صفحه تخت شبیه سازی شده است. برای شبکه بندی مدل سه بعدی از المان های سازمان یافته^۱ با رویکرد بلاک بندی در نرم افزار انسیس مشینگ به منظور تحلیل و دقت بالا و هم چنین زمان محاسبه کم استفاده شده است که در شکل ۵ شبکه تولید شده برای مدل سه بعدی مذکور نشان داده شده است.



شکل ۵: شبکه بندی ایجاد شده برای لوله گردابه مدل شده

شرایط مرزی ورودی، خروجی و دیواره بصورت زیر اعمال شده است.

بنا به اینکه در پژوهش کنونی هیچ یک از پارامترهای ترموفیزیکی تغییر نمی یابند، از این رو تمام شرایط مرزی اسکای عیناً اعمال می شود و برای ورودی شرط مرزی دبی جرمی ورودی در نظر گرفته شده است. به این سبب که فشار معادل دبی جرمی ورودی برابر ۴.۸۳ atm و دمای سکون برابر ۲۹۴.۲ K خواهد بود. دبی جرمی ورودی در این حالت برابر ۸.۳۵ gr/s می باشد. هم چنین جهت بردار جریان ورودی عمود بر مرز در ورودی در نظر گرفته می شود.

در خروجی سرد شرط مرزی فشار خروجی استفاده شده است. به عبارت دیگر فشار استاتیک در خروجی سرد معلوم فرض شده است که براساس نتایج آزمایشگاهی تثبیت و معین می شود. در خروجی سرد مطابق نتایج تجربی مقدار فشار را بسیار پایین می توان فرض کرد. نکته قابل ذکر دیگر این است که در نسبت های جرمی پایین در خروجی سرد، مدل CFD یک جریان برگشتی در خروجی جریان هوای سرد نشان می دهد. بنابراین دمای جریان برگشتی بایستی تعیین شود. برای تعیین دمای جریان برگشتی روش های مختلفی موجود است که در مراجع می توان یافت. در این مطالعه عددی برای محاسبه دمای جریان از نتایج مقالات و

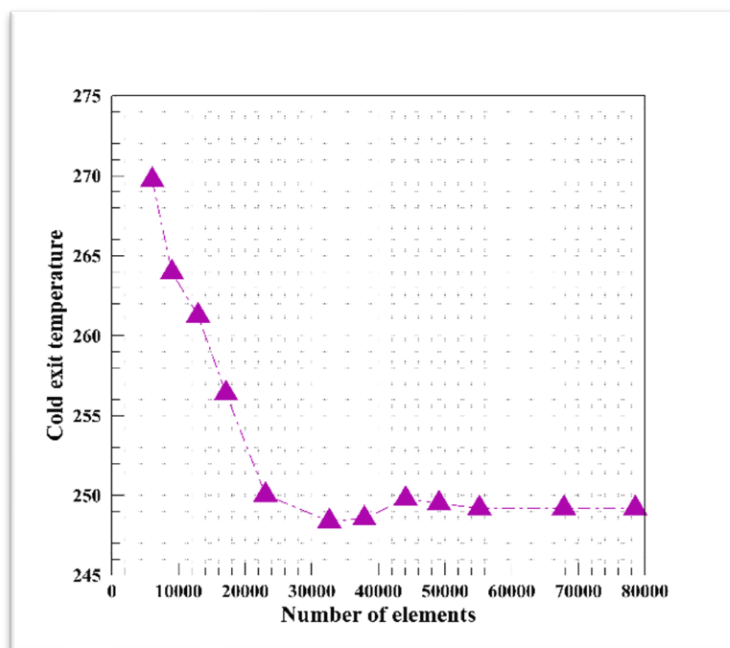
¹ Structured meshing

مراجع معتبر در این زمینه استفاده شده است که بر این اساس متوسط دمای کل جریانی که خروجی سرد را ترک می کند برابر دمای جریان برگشتی فرض شده است. برای مطالعه حاضر مقدار دمای جریان برگشتی برابر 300 K در نظر گرفته شده است.

برای خروجی گرم نیز همانند خروجی سرد، شرط مرزی فشار خروجی استفاده شده است. برای دستیابی به کسرهای جرمی مختلف، سطح مقطع خروجی گرم را کم و یا زیاد شده است.

در دیواره ها از شرط مرزی عدم لغزش استفاده شده است که با این اعمال این شرط تمام مولفه های سرعت در دیواره ها صفر می شود و همچنین این سطوح به شکل آدیاباتیک در نظر گرفته شده اند.

برای دقت بالای محاسبات، گسسته سازی ترم های جابجایی و پخش با استفاده از روش مرتبه دوم^۱ انجام گرفته و چون سیال عامل تراکم پذیر در نظر گرفته شده، برای وابسته کردن میدان سرعت و فشار از الگوریتم معروف SIMPLE استفاده شده است. در واقع باید گفت برای کوپل کردن سرعت و فشار در روش حل تفکیکی در محاسبات حالت پایدار از این الگوریتم استفاده می شود، که از رابطه بین اصلاحات فشار و سرعت استفاده می کند تا قانون بقای جرم را برآورده کند و میدان فشار را به دست آورد.

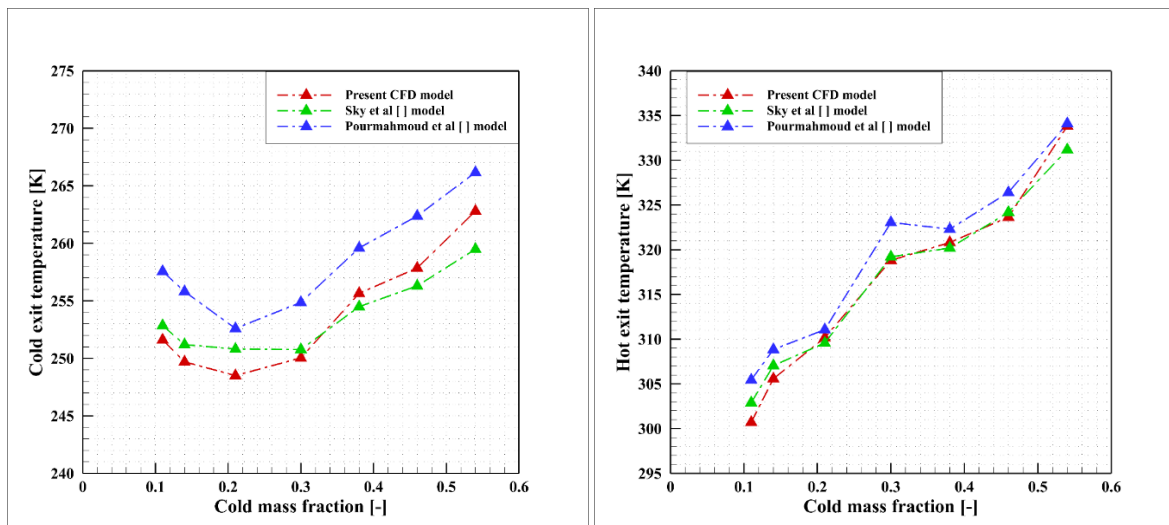


شکل ۶: نتایج استقلال از شبکه بندی

تجزیه و تحلیل عددی در تعداد عناصر مختلف انجام شد. تجزیه و تحلیل (CFD) با استفاده از تعداد سلول های بین ۶۰۰۰ تا ۸۰۰۰۰ انجام شد. نتایج نشان داد که هنگام کار از ۴۲۰۰۰ سلول به بعد نتایج تقریباً یکسان شده و با افزایش تعداد عنصر های شبکه، زمان و هزینه ی محاسباتی بیشتر می شود.

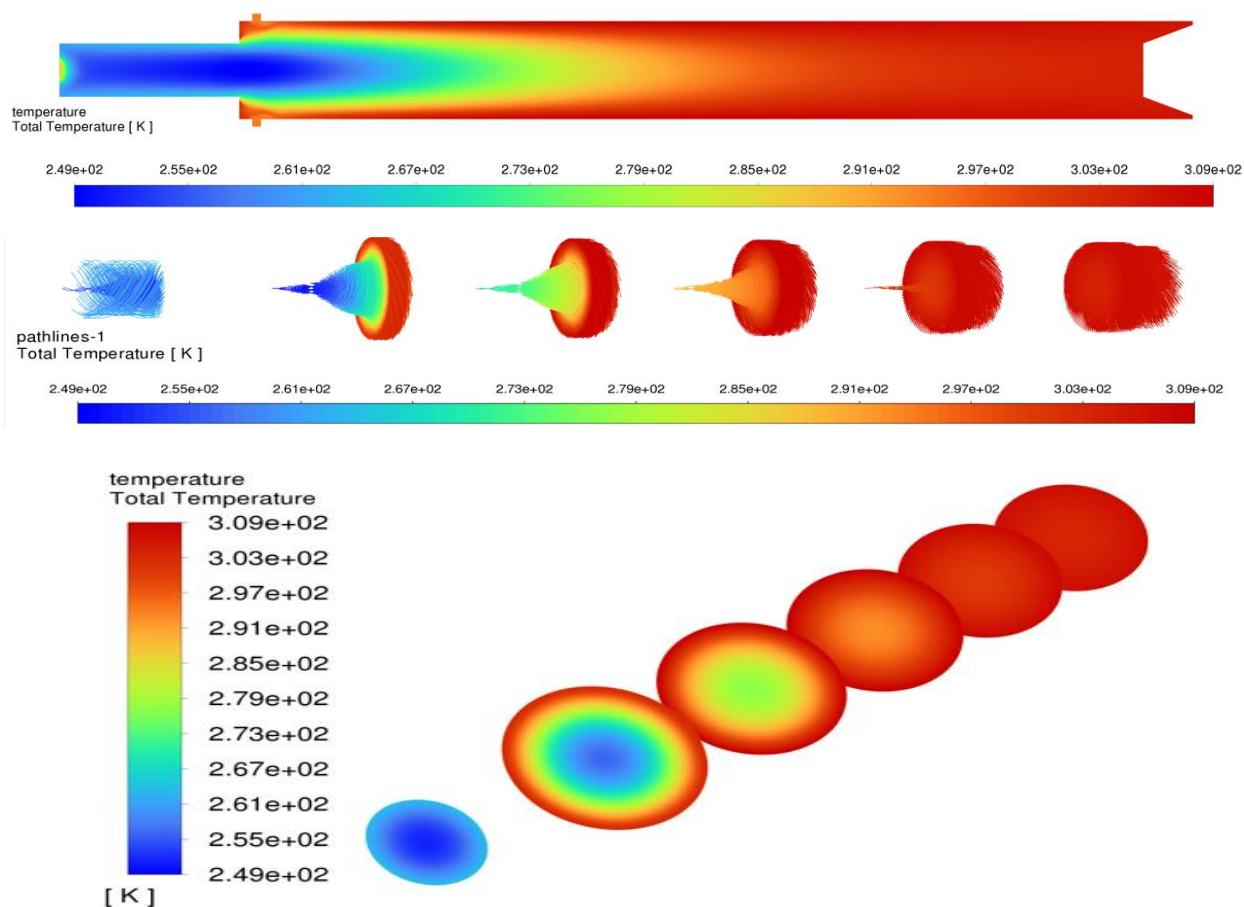
¹ Second order upwind

نتایج شبیه سازی کنونی در مقایسه با نتایج تجربی اسکای و پور محمود و همکاران (Pourmahmoud et al, 2014) بصورت نمودار و کانتور دمایی آورده شده است.



شکل ۸: دمای خروجی سرد در کسر جرمی سرد مختلف

شکل ۷: دمای خروجی گرم در کسر جرمی سرد مختلف



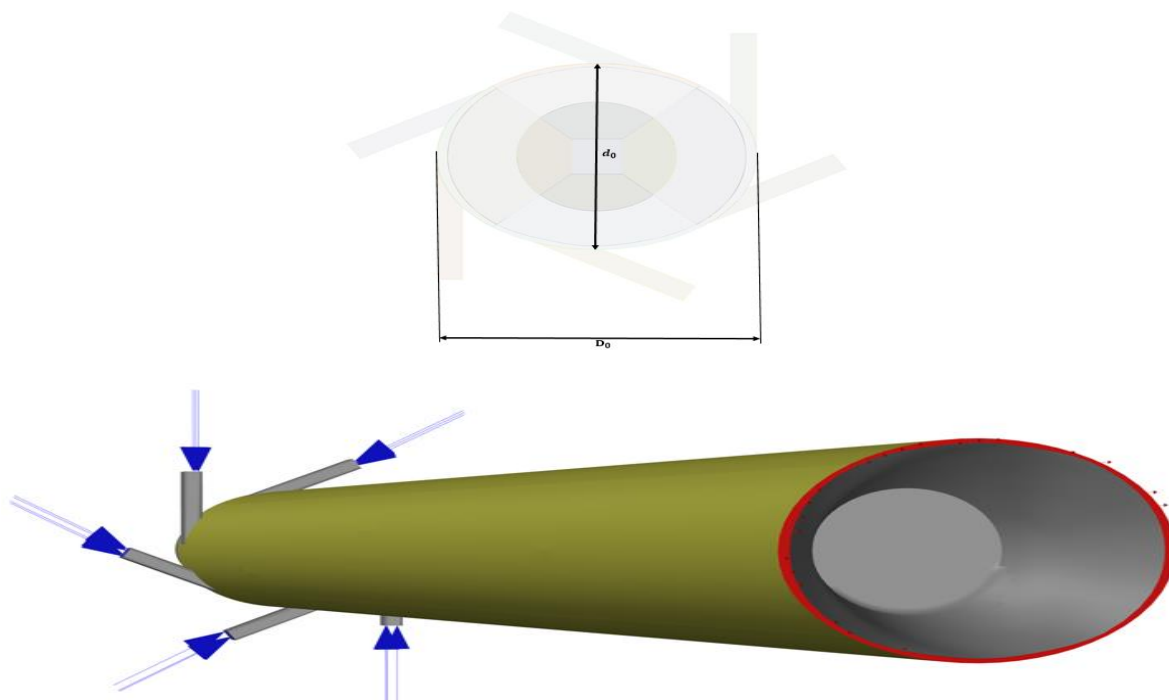
شکل ۹: کانتور دمایی لوله گردابه مدل اسکای

مشخصات لوله گردابه با مقطع بیضی در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲: مشخصات هندسی لوله گردابه بیضی

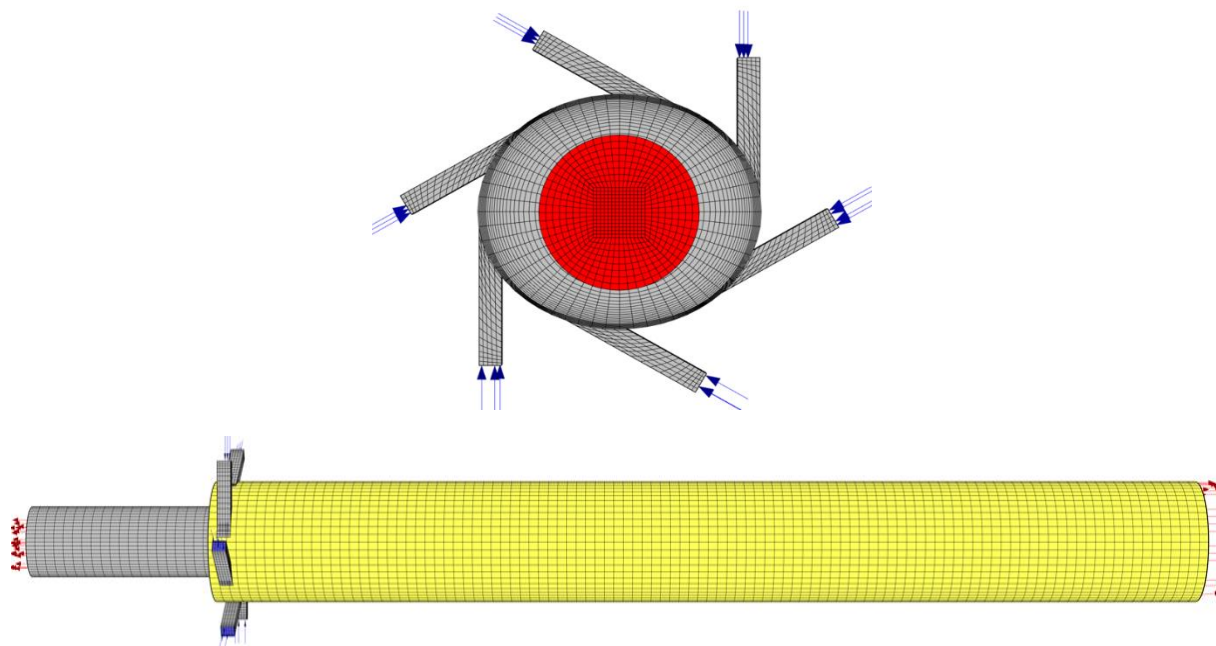
پارامتر	مقدار
طول لوله	۱۰۶ mm
قطر بزرگ لوله	۱۲.۴ mm
قطر کوچک لوله	۱۰.۶ mm
عمق نازل	۰.۹۷ mm
پهنای نازل	۱.۴۱ mm
سطح مقطع کلی ورودی نازل	۸.۲ mm ²
قطر خروجی سرد	۶.۲ mm
سطح مقطع خروجی گرم	۹۵ mm ²

در شکل ۱۰ شماتیکی از لوله گردابه بیضی آورده شده است. D_0 قطر بزرگ و d_0 قطر کوچک لوله گردابه بیضی می باشد.



شکل ۱۰: شماتیک طرح لوله گردابه بیضی

شبکه بندی ایجاد شده برای لوله گردابه بیضی همچون مدل های اسکای دارای شبکه سازمان یافته به منظور تحلیل بالا و دقیق و زمان محاسبات کم استفاده شده است که در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

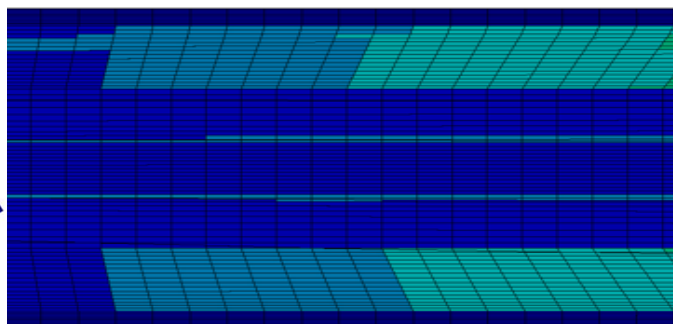
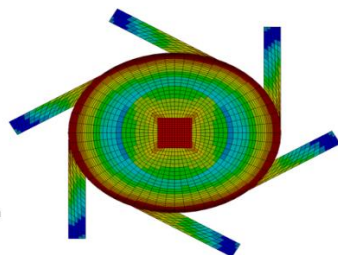


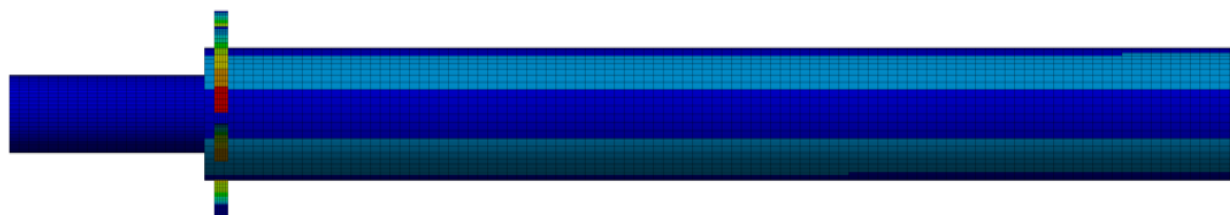
شکل ۱۱: شبکه بندی ایجاد شده برای لوله گردابه بیضی

کیفیت شبکه بندی یکی از اصلی ترین معیارهای تأثیرگذار شبیه سازی در CFD می باشد که مستقیماً بر همگرایی و نتایج شبیه سازی اثر می گذارد. بنابراین شبکه بندی ایجاد شده باید از کیفیت بالا و مطلوبی برخوردار باشد. کیفیت شبکه بندی ایجاد شده قابل مشاهده می باشد.

Mesh
Element Quality
6/9/2024 2:52 AM

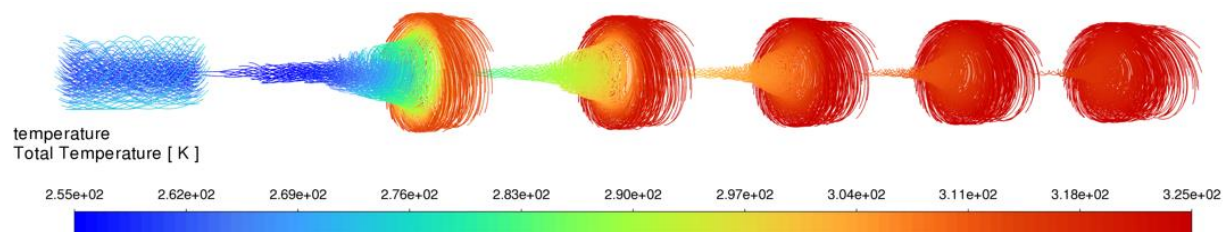
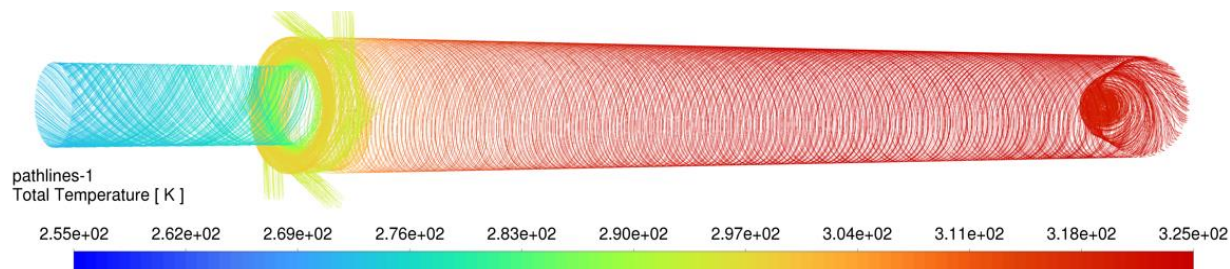
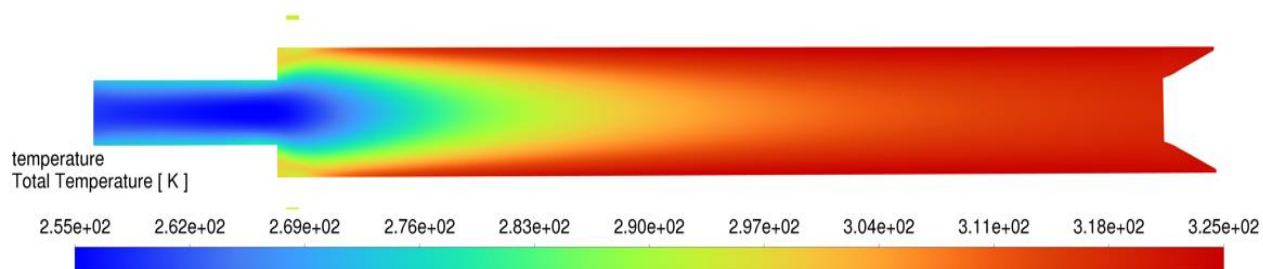
0.91521 Max
0.8214
0.7276
0.63379
0.53999
0.44618
0.35237
0.25857
0.16476
0.070955 Min

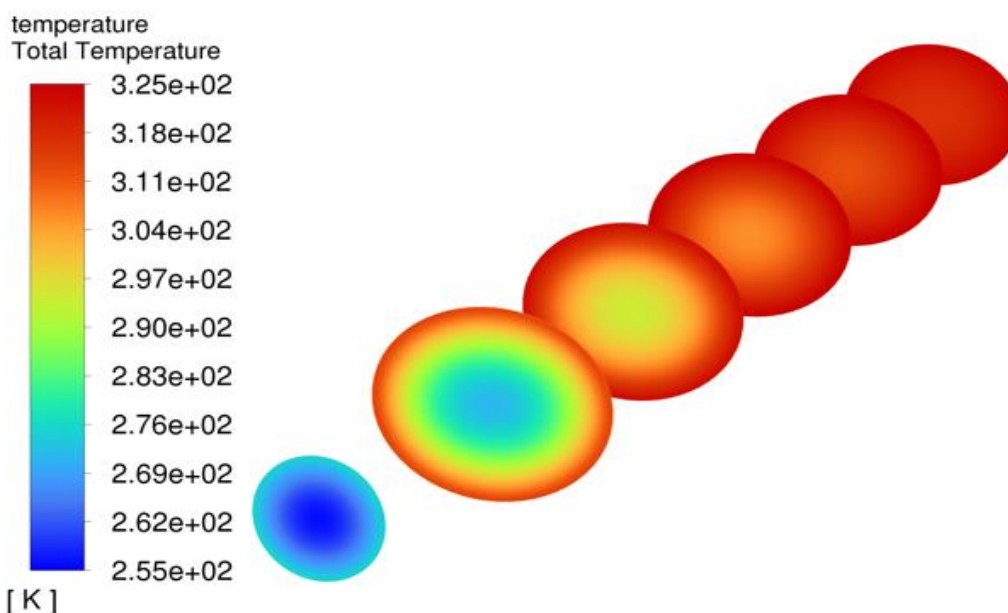




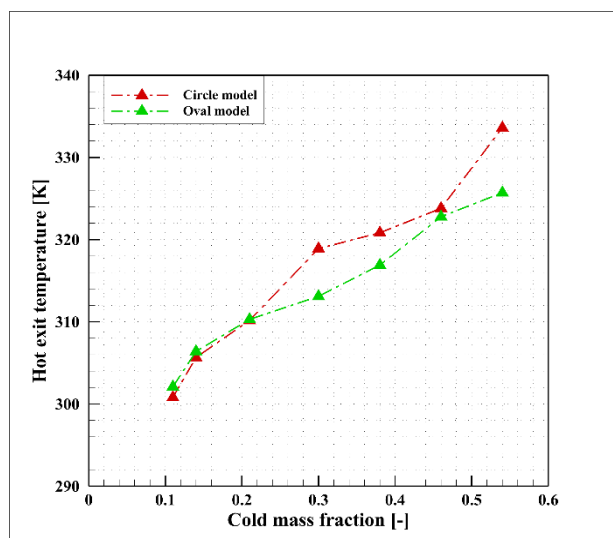
شکل ۱۲: کیفیت شبکه بندی ایجاد شده برای لوله گردابه بیضی

نتایج شبیه سازی نشان داده شده است.



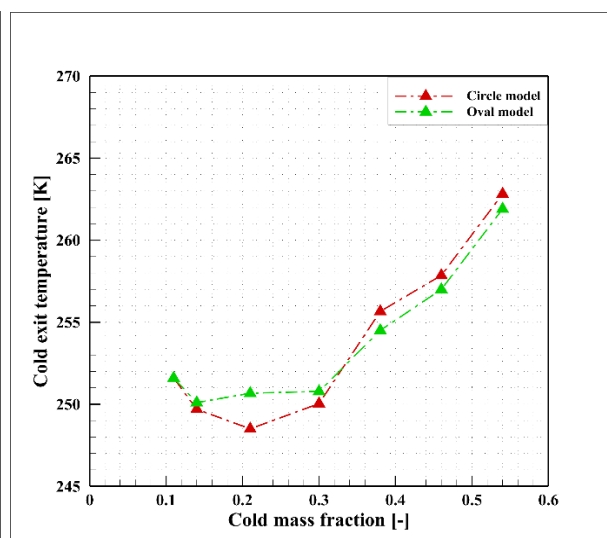


شکل ۱۳: سیال عبوری در لوله گردابه بیضی بصورت دمایی



شکل ۱۵: نمودار دمایی دمای خروجی گرم لوله

گردابه با هندسه دایره و بیضی

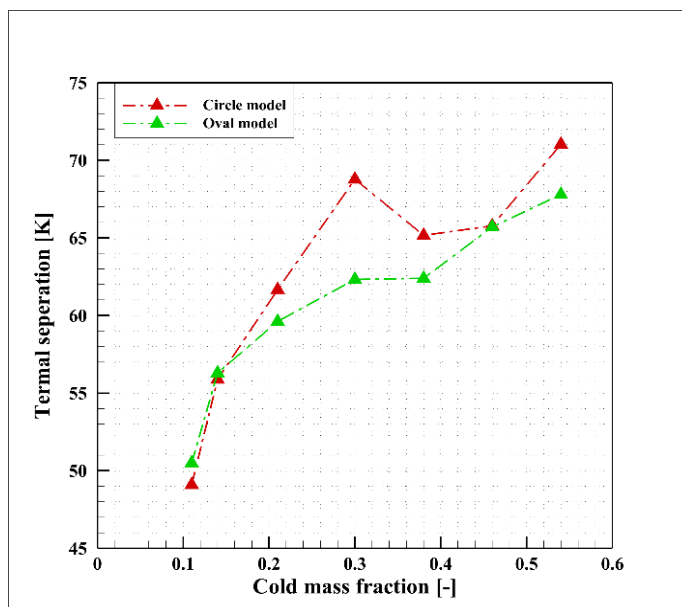


شکل ۱۴: نمودار دمایی دمای خروجی سرد لوله

گردابه با هندسه دایره و بیضی

همانطور که از نمودارهای بالا مشاهده می شود در کسرهای جرمی پایین، دمای خروجی سرد لوله گردابه با مقطع دایره نسبت به لوله گردابه با مقطع بیضی دارای دمای خنک تری می باشد. با افزایش کسر جرمی سرد از ۰.۳ به بعد که در واقع با کاهش مقطع خروجی گرم همراه است، لوله گردابه با مقطع بیضی نسبت به لوله گردابه دایره ای بهتر عمل کرده و دمای سرد خروجی خنک تر می شود. در سوی دیگر این مسأله معکوس می باشد. در واقع در کسرهای جرمی کمتر از ۰.۲ دمای گرم خروجی در لوله گردابه بیضی

نسبت به لوله گردابه با مقطع دایره بیشتر می باشد. با افزایش کسر جرمی سرد این امر معکوس شده و دمای گرم خروجی در مقطع بیضی نسبت به لوله گردابه دایروی کمتر می شود. تفکیک دمایی هردو مقطع برای فهم بهتر آورده شده است.



شکل ۱۶: نمودار تفکیک دمایی لوله گردابه دایروی و بیضی

با توجه به نمودار بالا، تفکیک دمایی مقطع بیضی در دو کسر جرمی پایین نسبت به مقطع دایروی مطلوب می باشد. اما با افزایش کسر جرمی سرد لوله گردابه با مقطع دایره دارای تفکیک دمایی بالایی بوده و بهتر از لوله گردابه با مقطع بیضی عمل می کند.

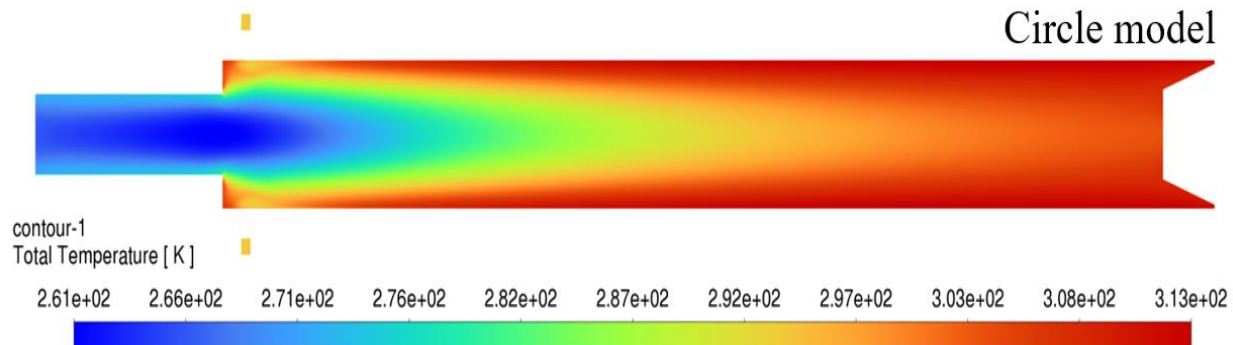
همانطور که در بخش استقلال از نتایج شبیه سازی ملاحظه شد، به دلیل نزدیک بودن نتایج شبیه سازی در دمای خروجی سرد و گرم نسبت به نتایج تجربی در کسر جرمی ۰.۳۸، در این کسر جرمی فشارهای ورودی مختلفی را برای هردو مقطع هندسی مورد بررسی قرار دادیم. فشارهای مورد استفاده در جدول ۳ زیر آورده شده است.

جدول ۳: دبی های متناسب با فشارهای ورودی مختلف

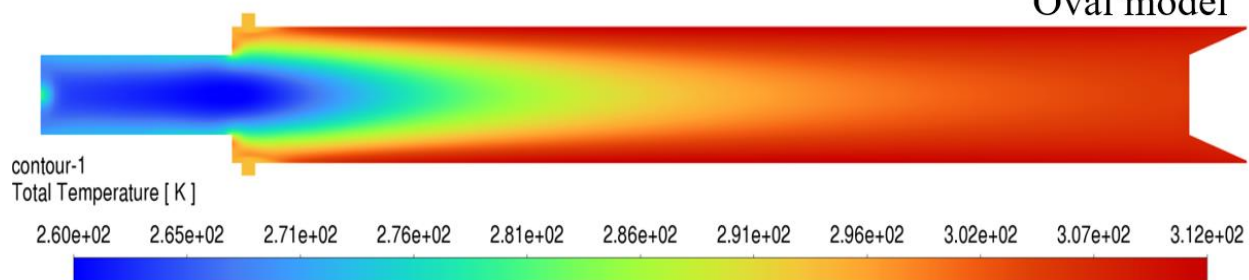
دبی جریان (gr/s)	فشار ورودی (bar)
۶.۲۴	۳.۴۷
۶.۷۲	۳.۷۷
۷.۲۶	۴.۱۲
۷.۸	۴.۴۷
۸.۳۴	۴.۸
۸.۸۲	۵.۱۳
۹.۱۸	۵.۳۶
۹.۷۲	۵.۷۱
۱۰.۲۶	۶.۰۷

نتایج شبیه سازی به صورت کانتور دمایی و نمودار قابل مشاهده می باشند.

Circle model

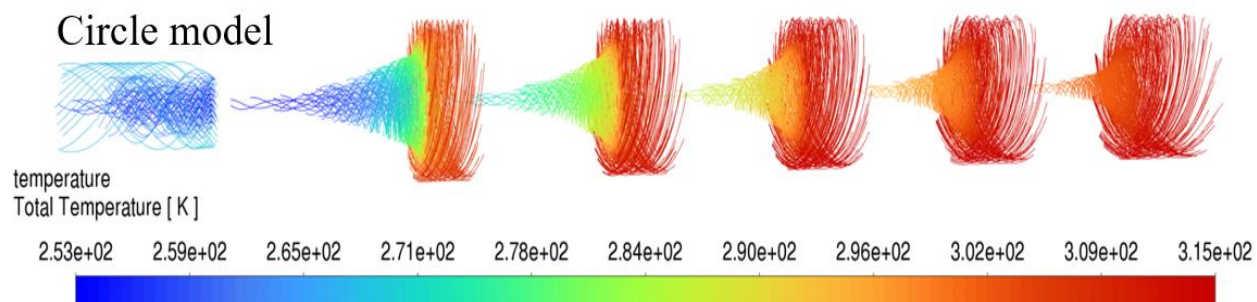


Oval model

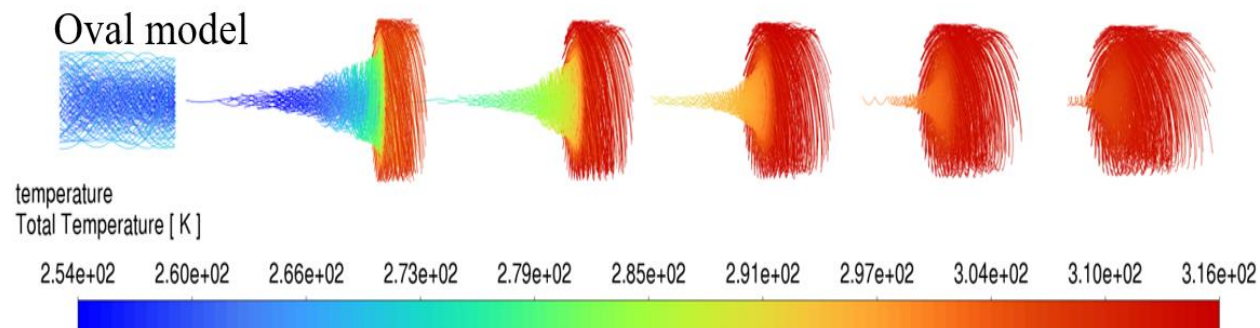


شکل ۱۷: کانتور دمایی در فشار ورودی ۳.۴۷ بار

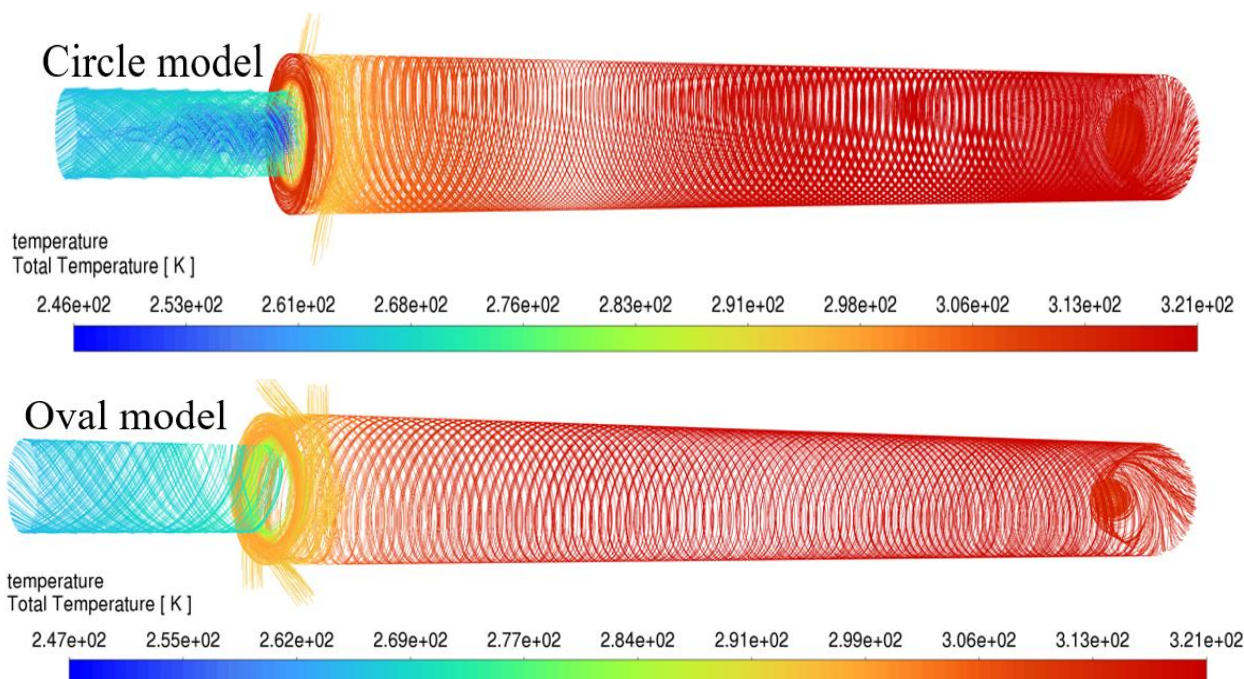
Circle model



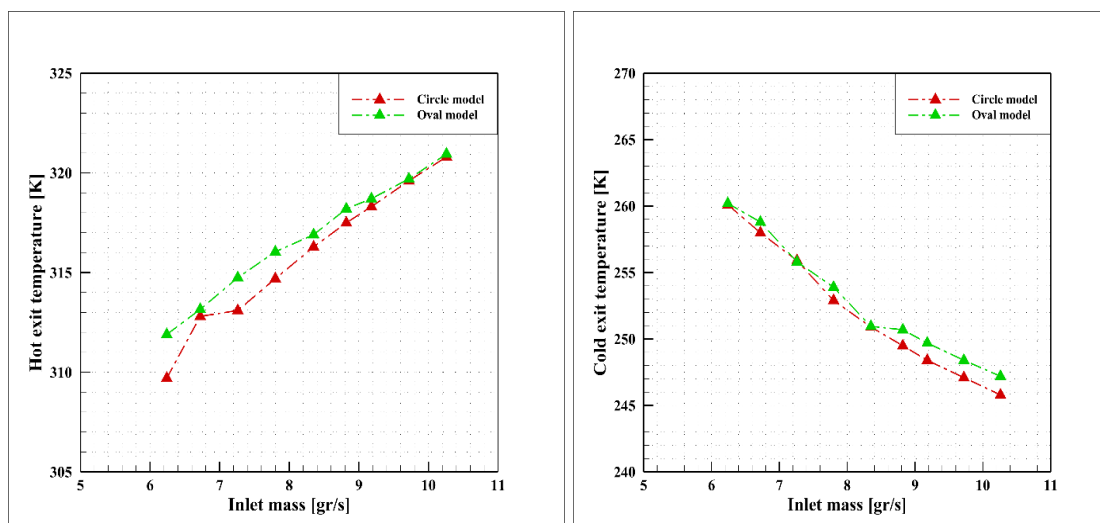
Oval model



شکل ۱۸: کانتور دمایی در فشار ورودی ۴.۴۷ بار



شکل ۱۹: کانتور دمایی در فشار ورودی برابر ۶.۰۷ بار



شکل ۲۱: دمای خروجی گرم در کسر جرمی

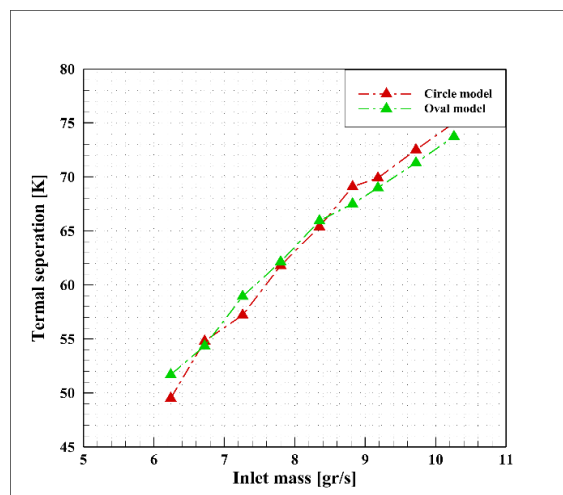
شکل ۲۰: دمای خروجی سرد در کسر جرمی

سرد ۰.۳۸ در جرم ورودی مختلف

سرد ۰.۳۸ در جرم ورودی مختلف

همانطور که در نمودارها ملاحظه می شود، دمای خروجی سرد در لوله گردابه بیضی کمی بیشتر از لوله گردابه دایروی می باشد. در نمودار دمای خروجی گرم، لوله گردابه بیضی در جرم های ورودی کمتر از ۹.۷ کمی بیشتر لوله گردابه دایروی می باشد. اما با افزایش

فشار ورودی که با افزایش جرم ورودی همراه است این دما در هر دو هندسه باهم برابر می شوند. برای اینکه بدانیم کدام لوله گردابه کارای بالاتری دارد در نمودار زیر، تفکیک دمایی^۱ هر کدام از هندسه ها آورده شده است.



شکل ۲۲: تفکیک دمایی لوله گردابه دایروی و بیضی

همانطور که مشاهده می شود در فشارهای پایین تر یا به عبارت دیگر در جرم ورودی کمتر از ۸.۸ گرم بر ثانیه عملکرد لوله گردابه بیضی در تفکیک دمایی بهتر از لوله گردابه دایروی می باشد. اما با افزایش جرم ورودی از ۸.۸ گرم بر ثانیه به بعد عملکرد تفکیک دمایی لوله گردابه دایروی بهتر از لوله گردابه بیضی می باشد.

معادلات حاکم

مدل عددی لوله گردابه شبیه سازی شده با استفاده از بسته نرم افزاری فلوئنت مدل شده است و معادلات بنیادی با استفاده از کد این برنامه در یک میدان سه بعدی تراکم پذیر و توربولانس حل گردیده اند. با توجه به اینکه جریان در لوله گردابه به شدت مغشوش می باشد، برای مدل سازی عددی جریان تراکم پذیر در لوله گردابه، علاوه بر معادلات بقای جرم، مومنتم، انرژی و معادله حالت گاز بایستی یک مدل توربولانسی نیز برای ایجاد اثر اغتشاش به کار رود. این معادلات به ترتیب در زیر آمده است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_i \rho \left(h + \frac{1}{2} u_j u_j \right) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right] \quad (3)$$

$$k_{eff} = K + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}$$

¹ Temperature separation

همچنین با توجه به اینکه سیال به کار رفته هوا می باشد، از مدل گاز ایده آل برای شبیه سازی استفاده شده است.

$$p = \rho RT \quad (4)$$

نسبت جرمی گاز سرد که بصورت نسبت دبی جرمی جریان خروجی از روزنه سرد به دبی جرمی ورودی از طریق نازل ها تعریف می شود:

$$\alpha = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_i} \quad (5)$$

در این رابطه α مقادیر بین ۰ و ۱ را اختیار می کند.

جدایش کلی یا عملکرد لوله گردابه به صورت اختلاف دمای جریان های خروجی از روزنه سرد و شیر کنترل گرم تعریف می شود:

$$\Delta T_{hc} = T_h - T_c \quad (6)$$

جدایش دمایی در خروجی سرد که ملاک اصلی برای تعیین عملکرد سرمایشی لوله گردابه می باشد، به صورت اختلاف دمای مابین جریان گاز ورودی به لوله گردابه از طریق نازل ها و جریان گاز خروجی از روزنه سرد تعریف می گردد و به طریق زیر تعیین می گردد:

$$\Delta T_{ic} = T_i - T_c \quad (7)$$

جدایش دمایی در خروجی گرم نیز به صورت اختلاف دمای مابین جریان گاز ورودی به لوله گردابه از طریق نازل ها و جریان گاز خروجی از شیر کنترل انتهای گرم تعریف می گردد که به طریق زیر تعیین می شود:

$$\Delta T_{hi} = T_h - T_i \quad (8)$$

قطر هیدرولیکی بصورت زیر تعریف می شود.

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (9)$$

در این فرمول، A مساحت سطح مقطع و P محیط سطح مقطع خیس شده می باشد. برای قطع بیضی این دو مولفه بصورت زیر تعریف می شود.

$$A = \pi \sqrt{2(a^2 + b^2)} \quad (10)$$

$$P = \pi ab \quad (11)$$

که a شعاع بزرگ و b شعاع کوچک هندسه بیضی می باشد.

بحث و نتیجه گیری

استفاده از ابزار دینامیک سیالات محاسباتی دروازه جدیدی در شبیه سازی و کاهش خطای طراحی های مهندسی را فراهم می کند. بطوری که با کمترین هزینه قبل از تولید یا اعمال تغییر در محصول، می توان کارایی محصول را در شرایط مد نظر مورد بررسی قرار داد و قبل از تولید هرگونه تغییر را برای بهبود عملکرد محصول و کاهش خطاهای احتمالی مربوطه را اعمال کرد. تغییرات دماهای خروجی لوله گردابه بیضی در مقایسه با لوله گردابه دایروی با رویکرد قطر هیدرولیکی برابر در قطرهای کوچک و بزرگ به ترتیب

۱۰۴ و ۱۲۰۶ میلی متر بدین صورت است که دمای خروجی سرد در کسرهای جرمی بالاتر از ۰.۳ در لوله گردابه بیضی کمی خنک تر از لوله گردابه دایروی می‌باشد (حدود ۱ درجه سانتی گراد). در عوض دمای خروجی گرم در کسرهای جرمی بالاتر از ۰.۳ در لوله گردابه با مقطع دایره بیشتر از لوله گردابه با مقطع بیضی می‌باشد. به طور کلی تفکیک دمایی در لوله گردابه دایروی در اکثر کسرهای جرمی سرد مختلف بهتر و بیشتر از لوله گردابه بیضی می‌باشد. تغییر فشار ورودی در لوله گردابه که موجب تغییر جرم سیال ورودی می‌شود، بصورت مستقیم بر دماهای خروجی تأثیر می‌گذارد. در کسر جرمی سرد برابر ۰.۳۸ این افزایش و کاهش فشار موجب شد در فشارهای کمتر از ۵.۱۳ بار، تفکیک دمایی در لوله گردابه با مقطع بیضی کمی بهتر از لوله گردابه لوله گردابه با مقطع دایره باشد. با افزایش فشار و گذر از فشار ۵.۱۳ بار این امر معکوس شده و لوله گردابه دایروی بهتر می‌شود. در واقع لوله گردابه بیضی در فشارهای پایین‌تر از ۵.۱۳ بار بهتر از لوله گردابه دایروی عمل می‌کند.

برای کارهای آتی پیشنهادات زیر ارائه می‌شود:

- بررسی تفکیک دمای داخل لوله گردابه بیضی در گازهای ورودی مختلف
- بررسی لوله گردابه بیضی در قطرهای مختلف دیگر با قطر هیدرولیکی برابر
- بررسی استفاده از لوله گردابه بیضی برای جداسازی
- تحلیل عددی مایع سازی گاز در لوله گردابه بیضی
- شبیه وجود محفظه خفه کن در لوله گردابه بیضی و بررسی تأثیر آن برای جدایش داخلی
- استفاده از سیال دو فازی و تأثیر خنک کاری در لوله گردابه بیضی

منابع

Ranque, G. L., (1934). "Method and Apparatus for Obtaining from a Fluid under Pressure Two Currents of Fluids at Different Temperatures". U.S. Patent, 1952281.

Hilsch, R., (1947). "The Use of the Expansion of Gases in a Centrifugal Field as a Cooling Process". Review of Scientific Instruments, 18(2), pp.108–113.

Pechini, M. P. (1967). Washington, DC: US patent and trademark office. *US patent*, 3, 697.

Pourmahmoud N, Sepehrian Azar F, Hassan Zadeh A (2014). Numerical simulation of secondary vortex chamber effect on the cooling capacity enhancement of vortex tube. *Heat Mass Transfer* 50:1225–1236.

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

Exair. Vortex Tubes and Spot Cooling Products. Available from: <http://www.exair.com>.

Exair. Super Blast Safety Air Gun. Available from: <http://www.eputec.de/en-exairsafetyairguns-super.php>

Muffler in vortex tube device: <https://www.nexflow.com/>

"vortex tube," wikipedia, 2017. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_tube.

Vortec. Spot cooling: Available from: <http://www.vortec.nl/solutions/cooling/spotcooling/>

Kaya, H., Günver, F., & Kirmaci, V. (2018). Experimental investigation of thermal performance of parallel connected vortex tubes with various nozzle materials. *Applied Thermal Engineering*, 136, 287-292.

Liang, F., Tang, G., Xu, C., Wang, C., Wang, Z., Wang, J., & Li, N. (2021). Experimental investigation on



improving the energy separation efficiency of vortex tube by optimizing the structure of vortex generator. *Applied Thermal Engineering*, 195, 117222.

Liang, F., Zeng, Q., Tang, G., Xin, L., Li, Q., & Li, N. (2022). Numerical investigation on the effect of convergent-divergent tube on energy separation characteristic of vortex tube. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 133, 105927.