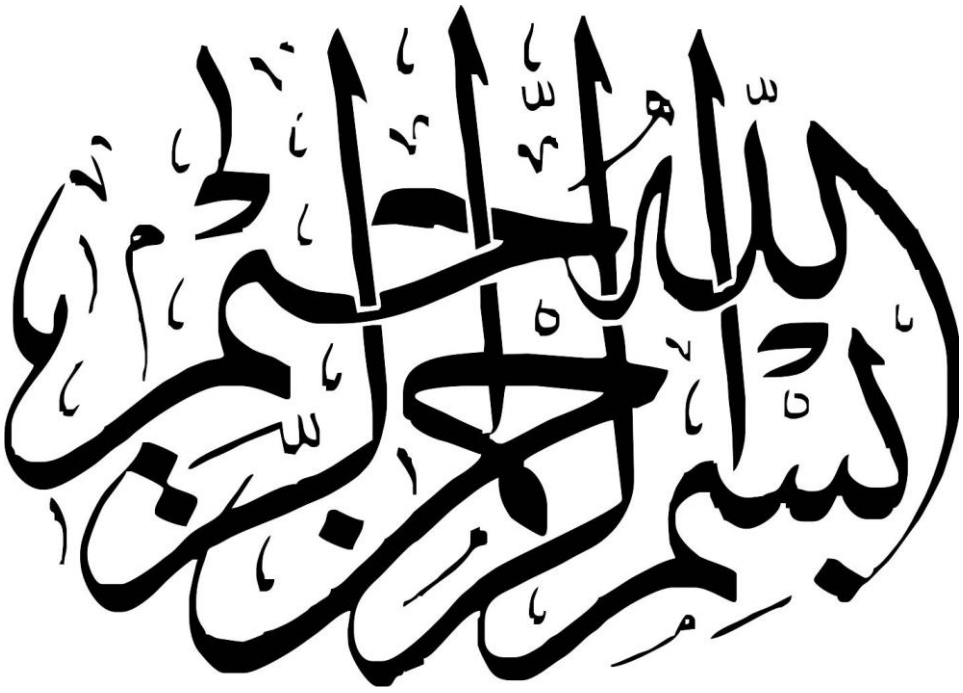

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه ارومیه

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی مکانیک

پایاننامه کارشناسی ارشد تبدیل انرژی

بررسی عددی تأثیر فشار ورودی بر عملکرد دستگاه ورتکس تیوب مجهز به نازل‌های همگرا

مسعود رشیدزاده

استاد راهنما

دکتر نادر پورمحمود

شهریور ماه ۱۳۹۳

کلیه حقوق این اثر متعلق به دانشگاه ارومیه است.

دانشگاه ارومیه

دانشکده فنی و مهندسی

بررسی عددی تأثیر فشار ورودی بر عملکرد دستگاه ورتکس تیوب مجهز به نازل‌های همگرا

دانشجو:

مسعود رشیدزاده

این پایاننامه به عنوان بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی مقطع کارشناسی ارشد مهندسی **مکانیک** گرایش **تبدیل انرژی** در تاریخ **۱۳۹۳/۶/۲۶** توسط هیئت داوران ذیل مورد پذیرش قرار گرفت.

استاد راهنما: دکتر نادر پورمحمود

داور خارجی: دکتر شهرام خلیل آریا

داور داخلی: دکتر مجید عباسعلیزاده

نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر مهدی چهل امیرانی

کلیه حقوق این اثر متعلق به دانشگاه ارومیه است.

دانشگاه ارومیه

دانشکده فنی و مهندسی

تعهد نامه پژوهشی

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایاننامه های تحصیلی دانشجویان دانشگاه ارومیه مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشجو میباشد که با استفاده از اعتبارات دانشگاه انجام میشود، برای آگاهی دانشجو و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان گرامی نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد میشوند:

۱. قبل از چاپ پایان نامه خود، مراتب را بطور کتبی به مدیریت تحصیلات تکمیلی دانشگاه اطلاع و کسب اجازه نمایند.

۲. در انتشار نتایج پایان نامه در قالب مقاله، همایش، اختراع، اکتشاف و سایر موارد ذکر نام دانشگاه ارومیه الزامی است.

۳. انتشار نتایج پایان نامه باید با اطلاع و کسب اجازه از استاد راهنما صورت گیرد.

اینجانب **مسعود رشیدزاده** دانشجوی گرایش **تبدیل انرژی** مقطع **کارشناسی ارشد** تعهدات فوق و ضمانت اجرایی آنرا قبول کرده و به آن ملتزم میشوم.

تاریخ و امضا دانشجو

تقدیم به پدر مادرم که صبوری و مهرشان تکیه گاه من است.

چکیده

در این تحقیق با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی به شبیه سازی عددی جریان فوق چرخشی در ورتکس تیوب‌های مجهز به نازل‌های همگرا پرداخته شده است. مدل مورد مطالعه به شش نازل همگرا مجهز شده است که به بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی مانند زاویه همگرایی نازل‌های ورودی، فشار ورودی به دستگاه و تأثیر نسبت جرمی جریان در خروجی سرد بر عملکرد ورتکس تیوب مجهز به نازل‌های همگرا پرداخته شده است. معادلات بنیادی میدان جریان بوسیله کد استاندارد نرم افزار فلوئنت و با یک مدل تراکم‌پذیر سه بعدی و توربولانس با مدل استاندارد k-ε حل گردیده‌اند. با استفاده از نتایج تحلیل عددی، تاثیر فشار ورودی روی جدایش دمایی بررسی شده است و نشان داده شده است که افزایش فشار ورودی در تمامی زوایای همگرایی، باعث افزایش جدایش دمایی می‌شود و نیز زاویه همگرایی نازل‌ها روی عملکرد دستگاه بررسی شده و زاویه همگرایی ۲° بهینه‌ترین زاویه برای این مدل از ورتکس تیوب می‌باشد و تاثیر نسبت جرمی‌جریان در خروجی سرد روی جدایش دمایی مورد مطالعه قرار گرفته شده است و نشان داده شده است که همانند ورتکس تیوب با نازل مستقیم، به ازای کسر جرمی‌سرد ۰/۳، بیشترین جدایش دمایی حاصل خواهد شد. در پایان، نتایج و توصیه‌هایی برای طراحی ارائه گردیده است که برای دستیابی به جدایش انرژی بیشتر می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند.

کلمات کلیدی

ورتکس تیوب، نازل همگرا، زاویه همگرایی، نسبت جرمی‌جریان، شبیه سازی عددی، فشار ورودی، جدایش دمایی.

فهرست مطالب | شماره صفحه

فصل اول: مقدمه و ساختار کلی پایان‌نامه ۱

مقدمه ۲
ساختار کلی پایان نامه ۳

فصل دوم: معرفی ورتکس تیوب و مروری بر تحقیقات پیشین ٤

۲-۱ معرفی دستگاه ورتکس تیوب ٥
۲-۱-۱ رانکیو-هیلش ورتکس تیوب ٥
۲-۱-۲ تحقیقات رانکیو ٦
۲-۱-۳ تحقیقات هیلش ۷
۲-۱-۴ ورتکس تیوب مخروطی یا واگرا ۸
۲-۱-۵ ساختار کلی دستگاه ۹
۲-۱-۶ مزایا و معایب ورتکس تیوب ۹
۲-۱-٦-۱ مزیتهای عمده ورتکس تیوب ۱۰
۲-۱-٦-۲ برخی معایب ورتکس تیوب ۱۰
۲-۱-۷ ورتکس تیوب‌های تجاری ۱۱
۲-۱-۸ کاربردهای ورتکس تیوب ۱۱
۲-۱-۸-۱ خنک کاری موضعی ۱۱۱
۲-۱-۸-۲ گرمایش موضعی ۱۲
۲-۱-۸-۳ خنک کنندهی هوای شخصی ۱۲
۲-۱-۸-٤ کاربرد به عنوان یک سیستم جدا کننده رسوب ۱۳
۲-۱-۸-٥ کاربرد به عنوان یک سیستم پالاینده در صنایع نفت و گاز ۱۳
۲-۱-۸-٦ کاربرد در جوشکاری اولتراسونیک ۱٤
۲-۱-۹ کارهای آزمایشگاهی ۱٤
۲-۲ مروری بر تحقیقات پیشین ۱٥
۲-۲-۱ تحقیقات آزمایشگاهی بر روی ورتکس تیوب ۱٥
۲-۲-۱-۱ پارامترهای ترموفیزیکی ۱٦
۲-۲-۱-۲ پارامترهای هندسی ۱٦
۲-۲-۲ تحقیقات تئوری بر روی ورتکس تیوب ۱۷
۲-۲-۲ -۱ مدل تراکم و انبساط آدیاباتیک ۱۷
۲-۲-۲-۲ اثر اصطکاک و توربولانس ۱۷
۲-۲-۲-۳ مدل جریان آکوستیک ۱۸
۲-۲-۲-٤ مدل چرخش ثانویه ۱۹
۲-۲-۳ تحقیقات عددی بر روی ورتکس تیوب ۲۰
۲-۲-۳-۱ محل نقاط سکون طولی و شعاعی داخل ورتکس تیوب ۲۱
۲-۲-۴ بررسی نازلهای تزریق دستگاه ۲۲
۲-۲-٤-۱ تحقیقات آزمایشگاهی بر روی نازلهای تزریق دستگاه ورتکس تیوب ۲۳
۲-۲-٤-۲ مطالعات عددی بر روی نازلهای تزریق دستگاه ورتکس تیوب ۲٤

فصل سوم: تجزیه و تحلیل نظری ورتکس تیوب ۲٥

۳-۱ بررسی ترمودینامیکی ورتکس تیوب ۲٦

۳-۱-۱ قانون اول ترمودینامیک ۲۷
۳-۱-۲ قانون دوم ترمودینامیك ۲۸
۳-۲ مدل چرخش ثانویه آلبرن ۳۱
۳-۲-۱ مدل چرخش ثانویه آلبرن (مدل مبدل حرارتي) ۳۱
۳-۲-۲ مدل اصلی چرخش ثانویه آلبرن ۳۳
۳-۲-۳ تفسیر مدل آلبرن ۳٤
۳-۲-۴ مدل آلبرن اصلاح شده ۳۵

فصل چهارم: مدل عددی بررسی شده ۳۹

۴-۱ شبیهسازی عددی ورتکس تیوب ٤۰
۴-۱-۱ معادلات حاکم ٤۰
۴-۱-۲ مدلسازی توربولانس ٤۲
۴-۲ توصیف هندسی ورتکس تیوب مدل شده ٤۳
۴-۳ شرایط مرزی ٤٤
۴-۳-۱ ورودی(INLET) ٤٤
۴-۳-۲ خروجی سرد (COLD EXIT END) ٤۵
۴-۳-۳خروجی گرم(HOT EXIT END) ٤۵
۴-۳-۴ دیواره ورتکس تیوب (Wall) ٤۵
۴-۴ اهداف و دورنمای بررسی و تحقیق عددی ٤٦
۴-۵ مفاهیم پرکاربرد در تحقیق ٤٦
۴-۵ بررسی استقلال نتایج عددی از مش بندی ٤۷
۴-۶ مقایسه نتایج عددی با تجربی و اعتبار دهی به نتایج عددی ٤۷

فصل پنجم: نتایج ٤۹

۵-۱ بررسی اثر فشار ورودی روی عملکرد ورتکس تیوب با نازل همگرا و معرفی زاویه همگرایی بهینه ۵۱
۵-۱-۱ تحقیقات آزمایشگاهی بر روی فشار ورودی ۵۱
۵-۱-۲ تحقیقات عددی بر روی فشار ورودی ۵۱
۵-۱-۳ اثر فشار ورودی بر روی دمای خروجی های سرد و گرم ۵۲
۵-۱-۴ اثر فشار ورودی روی مولفه‌های فشار ۵۵
۵-۱-۵ اثر فشار ورودی روی مولفه‌های سرعت ۵۹
۵-۲ بررسی اثر نسبت جرمی‌جریان در خروجی سرد روی عملکرد ورتکس تیوب با نازل همگرا ٦۳
۵-۲-۱ اثر نسبت جرمی‌جریان و فشار ورودی روی اختلاف دمای خروجی سرد ٦۳
۵-۲-۲ ضریب عملکرد دستگاه ٦۵
۵-۲-۳ تاثیر کسر جرمی‌سرد بر مولفه‌های فشار ٦٦
۵-۲- تاثیر کسر جرمی‌سرد بر مولفه‌های سرعت ٦۸

فصل ششم:خلاصه نتایج و پیشنهادات ۷۰

۶-۱ خلاصه نتایج ۷۱
۶-۲ پیشنهاد برای کارهای آتی ۷۳
فهرست منابع و مأخذ ۷٤
ABSTRACT ۷۹

فهرست جداول شماره صفحه

جدول ۲-۱ طول و قطر ورتکس تیوب‌های استفاده شده در برخی از مقالات ۲۰
جدول ۴-۱مشخصات هندسی ورتکس تیوب مدل شده ٤٤

فهرست اشکال شماره صفحه

شکل ۲-۱ نحوه عملکرد و اجزای یک ورتکس تیوب ٥
شکل ۲–۲ سطح مقطع ورتکس تیوب طراحی شده توسط رانکیو ٦
شکل ۲-۳ ورتکس تیوب مربوط به شرکت EXAIR ٦
شکل۲-۴ شماتیک ورتکس تیوب با جریان مخالف ۷
شکل ۲-۵ شماتیک ورتکس تیوب با جریان موازی ۸
شکل ۲-۶ شماتیک ورتکس تیوب مخروطی ۸
شکل ۲-۷ اجزا تشکیل دهنده ورتکس تیوب به همراه پلان مونتاژ ۹
شکل ۲-۸ یک نمونه از ورتکس تیوب ساخت شرکت ITW VORTEC (تفنگ هوای سرد) ۱۱
شکل ۲-۹ کابینت کنترلی ساخته شرکت EXAIR ۱۲
شکل ۲-۱۰ جزئیات خنک کاری یک کابینت کنترلی توسط ورتکس تیوب ساخته‌ی شرکت EXAIR ۱۲
شکل ۲-۱۱ کاربرد ورتکس تیوب در جلیقه‌ی هوا ۱۳
شکل ۲-۱۲استفاده از ورتکس تیوب بعنوان استخراج و جدا کننده رسوب از یک جریان ۱۳
شکل ۲-۱۳ استفاده از ورتکس تیوب به عنوان پالاینده و جدا کننده هیدروکربن‌های سنگین ۱٤
شکل ۲-۱۴ استفاده از ورتکس تیوب برای خنک‌کاری محل جوشکاری اولتراسونیک ۱٤
شکل ۲-۱۵ جریان ثانویه در ورتکس تیوب ۱۹
شکل ۲-۱۶ مولفه‌های سرعت چرخشی و محوری در z=۰/۰۰۷L و z=۰/۵L برای کسر دبی‌های مختلف ۲۲
شکل ۲-۱۷ توزیع مولفه‌های سرعت محوری برای نسبت‌های دبی جرمی‌مختلف در خروجی سرد ۲۲
شکل ۳-۱ حجم کنترل در نظر گرفته شده برای آنالیز ترمودینامیکی ۲۷
شکل۳-۲ نتایج حاصل از آنالیز ترمودینامیکي برای دماي سرد و گرم خروجي به صورت تابعي از کسر جرمی سرد. ۳۰
شکل ۳-۳ مدل چرخش ثانویه (الف) جریان چرخشی درونی و محیطی در ورتکس تیوب (ب) حلقه چرخش ثانویه و محیطی در ورتکس تیوب ۳۲

شکل ۳-۴ توزیع سرعت رانکین در محفظه چرخش ۳۵
شکل۳-۵ رابطه بین نسبت فشار بی بعد X و عدد ماخ $M_{a,0}$ ۳۷
شکل ۴-۱ الگوریتم حل تفکیکی بکار گرفته شده در حل معادلات ۴۱
شکل ۴-۲ پروفیل شبکه ایجاد شده در مدل سه بعدی پریودیک با نمایش میدان محاسباتی مساله برای نازل مستقیم ۴۳
شکل ۴-۳ پروفیل شبکه ایجاد شده در مدل سه بعدی پریودیک با نمایش میدان محاسباتی مساله برای نازل همگرا ۴۴
شکل ۴-۴ مطالعه استقلال از مش بندی بر مبنای حداکثر جدایش دمایی سرد ۴۷
شکل ۴-۵ مطالعه استقلال از مش بندی بر مبنای حداکثر سرعت چرخشی در محفظه چرخش ۴۷
شکل ۴-۶ جدایش دمایی به دست آمده در خروجی گرم ۴۸
شکل ۴-۷ جدایش دمایی به دست آمده در خروجی سرد ۴۸
شکل۵-۱شکل هندسی نازل‌های ورودی همگرا ۵۰
شکل ۵-۲ جدایش دمایی در خروجی سرد ۵۲
شکل ۵-۳ جدایش دمایی در خروجی گرم ۵۳
شکل ۵-۴ جریان برگشتی ایجاد شده در خروجی سرد ۵۴
شکل ۵-۵ توزیع دمای کل در سرتاسر ورتکس تیوب برای B=۲° ۵۴
شکل ۵-۶ خطوط مسیربرای برای المان‌هایی از سیال بر حسب دمای کل ۵۵
شکل ۵-۷ پروفیل شعاعی فشار استاتیک برای B=۲° ۵۶
شکل ۵-۸ پروفیل شعاعی فشار کل برای B=۲° ۵۶
شکل ۵-۹ پروفیل شعاعی فشار استاتیک برای B=۱۰° ۵۷
شکل ۵-۱۰ پروفیل شعاعی فشار کل برای B=۱۰° ۵۷
شکل ۵-۱۱ کانتور فشار کل برای B=۲° و A=۰/۳ ..... ۵۸
شکل ۵-۱۲ کانتور فشار استاتیک برای B=۲° و A=۰/۳ ..... ۵۸
شکل ۵-۱۳ پرفیل شعاعی سرعت محوری برای B=۲° ۶۰
شکل ۵-۱۴ پروفیل شعاعی سرعت چرخشی برای B=۲° ۶۰
شکل ۵-۱۵ پرفیل شعاعی سرعت محوری برای B=۱۰° ۶۱
شکل ۵-۱۶ پروفیل شعاعی سرعت چرخشی برای B=۱۰° ۶۱
شکل ۵-۱۷ نمودار بردارهای سرعت محوری جریان در ورتکس تیوب ، A=۰/۳ ..... ۶۲
شکل ۵-۱۸ شماتیک توزیع سرعت چرخشی با نمایش نواحی با دمای سرد و انرژی جنبشی کم ۶۲
شکل ۵-۱۹ الگوی چرخش در ناحیه ورودی برای شش نازل همگرا بر حسب سرعت جریان ۶۲
شکل ۵-۲۰ اختلاف دمای خروجی سرد در ورتکس تیوب با نازل همگرا ۶۴

شکل ۵-۲۱ ضریب عملکرد سرمایش ورتکس تیوب با نازل همگرا ٦٦
شکل ۵-۲۲ ضریب عملکرد گرمایش ورتکس تیوب با نازل همگرا ٦٦
شکل ۵-۲۳ پروفیل شعاعی فشارکل در موقعیت‌های مختلف ٦٧
شکل ۵-۲۴پروفیل شعاعی فشار استاتیکی در موقعیت‌های مختلف..... ٦٧
شکل ۵- ۲۵ پروفیل شعاعی سرعت چرخشی در موقعیت‌های مختلف محوری برای B=۲°..... ٦٩
شکل ۵-۲۶پروفیل شعاعی سرعت محوری در موقعیت‌های مختلف محوری برای B=۲°..... ٦٩

فصل اول
مقدمه و ساختار کلی پایان‌نامه

مقدمه

ورتکس تیوب یک وسیله مکانیکی است با هندسه‌ای نسبتاً ساده و بدون پیچیدگی در اجزای تشکیل‌دهنده که قادر است جریان گاز فشرده ورودی به لوله را به دو جریان جداگانه، یکی گرم‌تر و دیگری سردتر نسبت به ورودی تقسیم کند.

پارامترهای اصلی موثر در میزان جدایش دمایی در ورتکس تیوب به دو دسته پارامترهای ترموفیزیکی(نظیر نوع سیال، فشار ورودی، دمای ورودی و غیره) و پارامترهای هندسی(نظیر تعداد و پروفیل نازل‌های ورودی، قطر لوله، طول و غیره) تقسیم می‌شوند. پورمحمود و همکاران [۱، ۲، ۳، ۴ و ۵]، تحقیقات عددی زیادی را در هر دو زمینه ترموفیزیکی و هندسی روی ورتکس تیوب انجام داده‌اند که بصورت مفصل در فصل مروری بر کارهای گذشته به آن اشاره شده است که در همه آنها هدف، بالا بردن جدایش دمایی در ورتکس تیوب بوده است. پایین بودن ضریب عملکرد دستگاه یکی از معایب این دستگاه می‌باشد به صورتی که استفاده آن از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد و مورد انتقاد بسیاری از محققان قرار گرفته است و به خاطر کارایی منحصر به فرد دستگاه در صنعت، مبنای این پایان نامه بر بهبود کارایی دستگاه قرار گرفته است. جهت بالا بردن میزان کارایی روی پارامتر پروفیل نازل ورودی کار شده است و از نازل‌های همگرا استفاده شده است و هدف بالا بردن میزان سرعت چرخشی هوای ورودی به دستگاه جهت افزایش میزان جدایش دمایی می باشد همچنین پارامتر دیگری که جهت بالا بردن کارایی در این نوع ورتکس تیوب مورد مطالعه قرار گرفته است پارامتر فشار ورودی می‌باشد و تاثیر فشار ورودی بصورت مفصل مورد بررسی قرار گرفته است و با مقایسه زوایای همگرایی مختلف روی میزان جدایش دمایی، زاویه بهینه بدست آمده است. همچنین یکی دیگر از پارامترهایی که مورد مطالعه قرار گرفته است پارامتر نسبت جرمی جریان در خروجی سرد می‌باشد در مطالعات قبلی که روی ورتکس تیوب با نازل مستقیم صورت گرفته است نسبت جرمی جریان سرد ۰/۳، به عنوان موثرترین نسبت جرمی سرد روی میزان جدایش دمایی، معرفی شده است و بیشتر کارهای صورت گرفته بر اساس این نسبت جرمی انجام گرفته‌اند اما با توجه به متفاوت بودن مدل مورد مطالعه با مدل‌های قبلی، در این رساله نیاز به بررسی مجدد این پارامتر دیده شده است و با بررسی تاثیر این پارامتر روی میزان جدایش دمایی به اهمیت نقش این پارامتر در طراحی ورتکس تیوب پی برده شده است.

با در اختیار داشتن نتایج حاصل شده(تاثیر سه پارامتر زاویه همگرایی، فشار ورودی، نسبت جرمی جریان در خروجی سرد روی میزان جدایش دمایی) اطلاعات لازم برای طراحی ورتکس تیوب با بالاترین میزان کارایی حاصل شده است. در این مطالعه عددی، از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، استفاده شده است و معادلات حاکم میدان جریان به وسیله کد استاندارد نرم‌افزار فلوئنت و با یک مدل تراکم‌پذیر سه‌بعدی توربولانس با مدل استاندارد k-ε حل گردیده‌اند.

ساختار کلی پایان نامه

فصل اول شامل مقدمه ای در مورد کارهای صورت گرفته در پایان نامه می‌باشد و نیاز به تحقیق صورت گرفته و اهداف آن بیان شده است. در فصل دوم معرفی دستگاه ورتکس تیوب و مروری بر کارهای گذشته صورت گرفته است و شامل مزایا و معایب آن و کاربردهای آن در صنعت می‌باشد. در فصل سوم قانون‌های ترمودینامیکی که در ورتکس تیوب کاربرد دارد بیان شده و ویژگی‌های مدل چرخش ثانویه آلبرن ارائه شده است. در فصل چهارم مدل عددی بررسی شده در پایان نامه معرفی و معادلات و شرایط مرزی حاکم بر آن بیان می‌شود. همچنین نتایج عددی بدست آمده با مقایسه با نتایج تجربی، اعتبار دهی شده‌اند. در فصل پنجم تأثیر پارامتر فشار ورودی بر عملکرد و جدایش دما در ورتکس تیوب با نازل همگرا بررسی شده است و با بررسی زوایای همگرایی مختلف، زاویه همگرایی بهینه معرفی شده است و تاثیر نسبت جرمی‌جریان در خروجی سرد روی عملکرد دستگاه بررسی شده است. در فصل ششم خلاصه‌ای از نتایج و پیشنهاداتی برای کارهای آتی آورده شده است.

فصل دوم
معرفی ورتکس تیوب و مروری بر تحقیقات پیشین

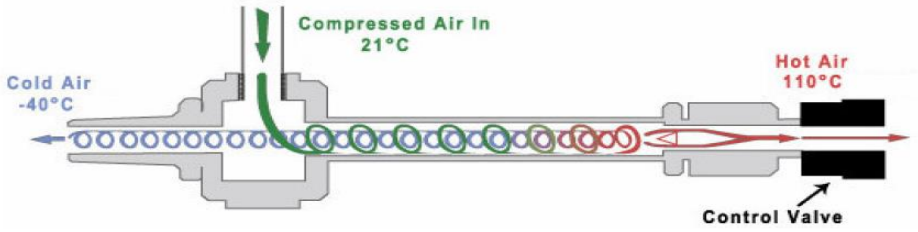
۲–۱ معرفی دستگاه ورتکس تیوب

ورتکس تیوب یک اختراع ابتکارانه از دو دانشمند به نامهای جورج ژوزف رانکیو و رودولف هیلش می‌باشد، که جداگانه این دستگاه را در طول جنگ در دهه ۱۹۴۰ درست کردند.[۶] به همین خاطر ورتکس تیوب را به افتخار این دو، رانکیو-هیلش ورتکس تیوب[۱] نیز می‌نامند.

ورتکس تیوب جریان گاز ورودی به لوله را به دو جریان جداگانه، یکی گرمتر و دیگری سردتر نسبت به ورودی تقسیم می‌کند. نکته جالب توجه در مورد این دستگاه، عدم وجود هیچ جزء متحرک، قطعه الکتریکی یا شیمیایی و یا کار ورودی به آن می‌باشد. علی‌رغم اینکه هندسه ورتکس تیوب ساده می‌باشد ولی فرآیند دینامیک سیالات و ترمودینامیک آن بسیار پیچیده می‌باشد. تا کنون کارهای آزمایشگاهی، تئوریک و عددی فراوانی برای بررسی پدیده‌ی جدایش دما[۲] در ورتکس تیوب انجام گرفته است. واضح است که با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی[۳]، می‌توان از پیچیدگی‌ها و هزینه‌های مربوط به کارهای تجربی کاست.

۲–۱–۱ رانکیو–هیلش ورتکس تیوب

در قرن نوزدهم فیزیکدان بریتانیایی جیمز ماکسول پیشنهاد داد که یک سیستم با دو خروجی مجزای آب سرد و گرم عبوری از یک لوله می‌توان ساخت که با باز و بسته کردن یک شیر کوچک کار کند. شیر باید به طور خودکار زمانیکه یک مولکول از آب گرم به آن می‌رسد، باز و هنگامیکه یک مولکول از آب سرد به آن می‌رسد، بسته شود[۷]. این وسیله خیالی می‌توانست به عنوان منبعی جهت دست‌یابی به سیال‌های سرد و گرم به طور همزمان باشد. این دستگاه که ابتدا با نام لوله جنّی ماکسول نامیده می‌شد، یک قرن بعد به واقعیت تبدیل شد و امروزه به نام ورتکس تیوب شناخته می‌شود. شکل ۲-۱ یک طرح شماتیک از این دستگاه را نشان می‌دهد که هوای متراکم ورودی را به دو جریان هوای سردتر و گرمتر تقسیم می‌کند. جذابیت این وسیله برای محققین همانطور که اشاره شد، عدم استفاده از هر گونه ابزار متحرک و یا کار ورودی به آن می‌باشد.



شکل ۲-۱ نحوه عملکرد و اجزای یک ورتکس تیوب [۸]

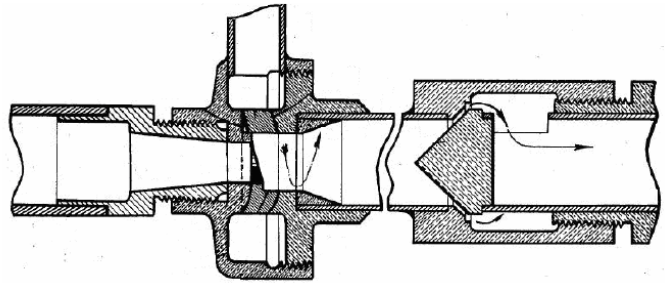
همانطورکه اشاره شد در اصل ورتکس تیوب به نام دو دانشمند شناخته می‌شود، اولی یک فرانسوی به نام رانکیو که در سال ۱۹۳۳ ورتکس تیوب را کاملاً به طور تصادفی کشف نمود و دوم یک آلمانی به نام رودولف

[۱] Ranque-Hilsch Vortex Tube
[۲] Temperature Separation
[۳] Computational Fluid Dynamics (CFD)

هیلش که در سال ۱۹۴۶ با انجام کارهای آزمایشگاهی جامع و انتشار مقاله‌ای در این زمینه، دستگاه را با موفقیت ساخت و تست نمود. تحقیقات این دو نفر به صورت جزئی‌تر در ادامه بحث می‌شود.

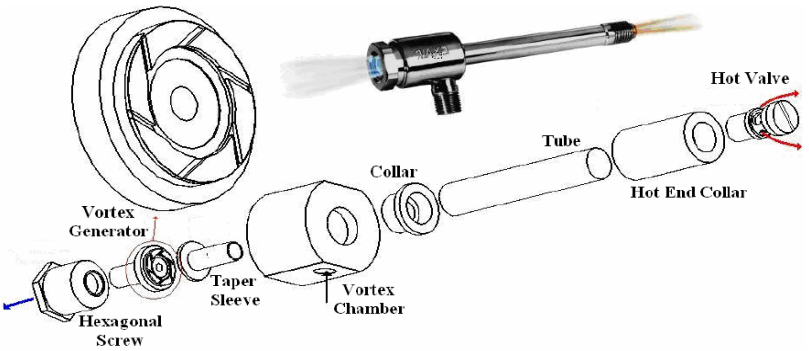
۲-۱-۲ تحقیقات رانکیو

یکی از جامع‌ترین مقالات دارای جزئیات مربوط به آنالیز نحوه کشف ورتکس تیوب، توسط فولتن[۶] اندکی بعد از کشف آن توسط رانکیو منتشر شد که در آن اشاره به این موضوع شده است که رانکیو دمای سکون[۱] را با دمای استاتیک[۲] اشتباه گرفت و برای همین ورتکس تیوب ساخته شده توسط وی درست کار نکرد. شکل ۲-۲ ورتکس تیوب طراحی شده توسط رانکیو[۹] را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲ سطح مقطع ورتکس تیوب طراحی شده توسط رانکیو [۹]

ورتکس تیوبهای مدرن امروزی از لحاظ ساختار و نحوه طراحی شبیه آنچه در شکل ۲-۳ نمایش داده شده است، می‌باشد که همراه با نقشه انفجاری آن است. این ورتکس تیوب ساخته‌ی شرکت Exair می‌باشد.



شکل ۲-۳ ورتکس تیوب مربوط به شرکت Exair [۱۰].

نخستین مقاله انتشار یافته در زمینه ورتکس تیوب مربوط به رانکیو در سال ۱۹۳۱ می‌باشد. وی در این مقاله نشان داد که ورودی هوا به صورت مماسی و شامل یک یا چند نازل تزریق[۳] می‌تواند باشد. او همچنین توضیح داد که چگونه می‌توان با تنظیم اندازه قطر خروجی سرد یا تغییر مساحت خروجی گرم، به میزان

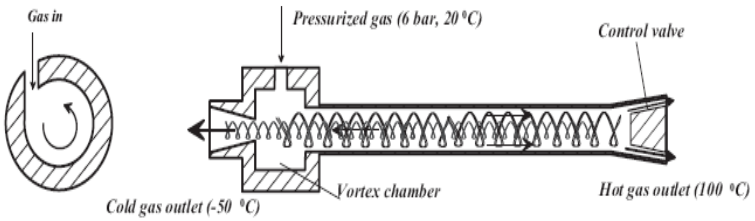
[۱] Stagnation Temperature
[۲] Statics Temperature
[۳] Injection Nozzle

سرمایش مورد نظر رسید. همچنین نتیجه گرفت که اگر خروجی گرم بسته باشد، دمای روی دیواره لوله[1] به بیشترین مقدار خود می‌رسد و نیز اینکه با افزایش فشار، دمای خروجی سرد کاهش می‌یابد. خلاصه تئوری رانکیو به این صورت است که جریان گاز دارای چرخش در یک ورق ضخیم روی دیواره منبسط می‌شود و لایه‌های داخلی این ورق روی لایه‌های خارجی بوسیله‌ی یک نیروی گریز از مرکز فشار می‌آورند و آنها را فشرده می‌سازند و بنابراین باعث حرارت دادن به آنها می‌شوند. در همان زمان لایه‌های داخلی منبسط می‌شوند و سرد می‌گردند و اصطکاک میان لایه‌ها نیز به کمترین مقدار خود می‌رسد[۹].

۲-۱-۳ تحقیقات هیلش

هیلش[۱۱] یک مقاله در سال ۱۹۴۶ منتشر نمودو در آن به طور مختصر به کار رانکیو در سال ۱۹۳۳ به عنوان منبع اصلی این ایده اشاره نمود و به طراحی مشابهی برای ورتکس تیوب خود دست یافت. او در این مقاله نوشت که هوا از طریق اریفیس در یک میدان سانتریفیوژی از ناحیه فشار بالا در دیواره لوله به یک ناحیه فشار پایین در نزدیکی محور لوله انبساط می‌یابد. در طول این انبساط هوا بخش قابل توجهی از انرژی جنبشی خود را از طریق افزایش اصطکاک به لایه‌های محیطی می‌دهد. بنابراین این لایه‌ها با افزایش دما روبرو می‌شوند. اصطکاک داخلی باعث جریان یافتن انرژی از محور لوله به محیط آن می‌شود و سعی در رسیدن به یک سرعت زاویه‌ای واحد[2] و یکنواخت در سطح کل لوله می‌نماید. [۱۱]

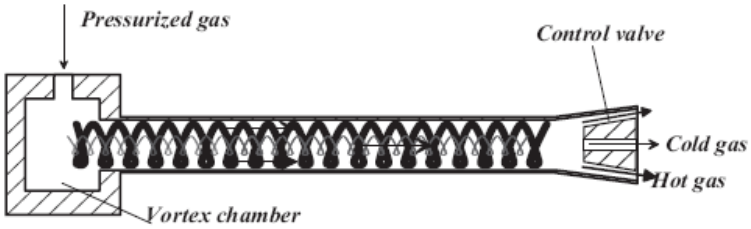
نکته قابل ذکر این است که طبقه بندی ورتکس تیوب بر اساس محل قرارگیری خروجی هوای سرد در دو نوع بنا شده است. اولی ورتکس تیوب با جریان مخالف[3] که با توجه به شکل ۲-۴، این وسیله شامل یک قسمت ورودی با یک سری نازل‌های دارای یک سوراخ مرکزی، یک لوله گرم و یک شیر مخروطی می‌باشد. گاز فشرده با فشار و سرعت بالا به درون نازل‌ها وارد می‌شود. با انبساط هوای داخل لوله، گردابه‌ای سریع تشکیل شده که با تنظیم شیر مخروطی می‌توان مقدار هوای سرد را تغییر داد و در نهایت گازهایی که از اطراف سوراخ عبور می‌کنند سرد و باقی مانده آن، گرم می‌شود.



شکل۲-۴ شماتیک ورتکس تیوب با جریان مخالف[۱۲]

[1] Wall Temperature
[2] Unique Angular Velocity
[3] Counter-Flow Vortex Tube

ورتکس تیوب نوع دوم، ورتکس تیوب با جریان موازی[1] می‌باشد و همانند حالت قبلی بوده با این تفاوت که هوای سرد به طور هم مرکز با هوای گرم خارج می شود. عملکرد آن نیز شبیه به حالت جریان مخالف است. طرح کلی این نوع ورتکس تیوب در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.

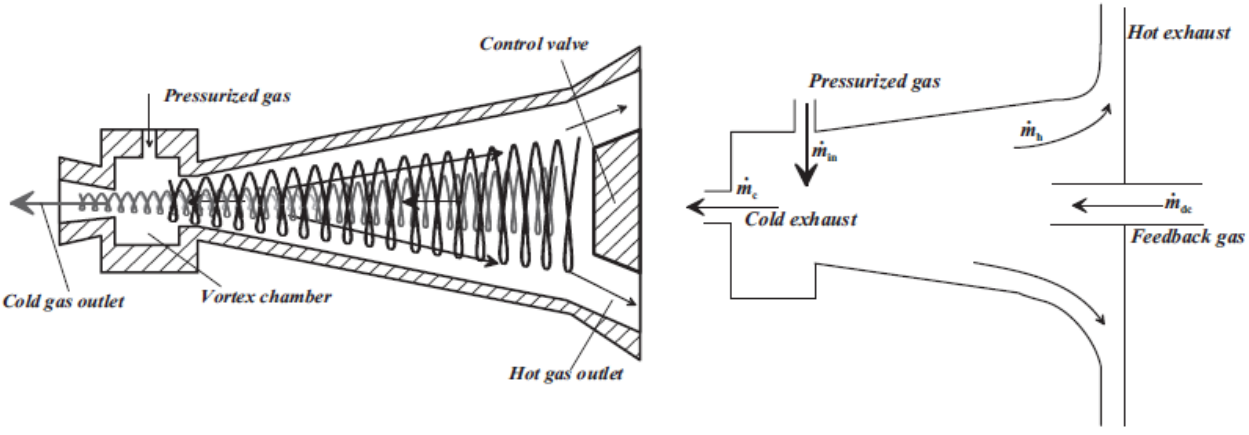


شکل ۲-۵ شماتیک ورتکس تیوب با جریان موازی[۱۲]

بعد از هیلش، تقریباً همه از طراحی ورتکس تیوب با جریان مخالف استفاده کرده‌اند تا نوع جریان موازی آن. این امر به این خاطر است که طراحی و ساخت ورتکس تیوب با نوع جریان مخالف ساده‌تر است و دو جریان سرد و گرم مجزا در دو خروجی روبروی هم بدست می‌آید. در این پایان نامه نیز بر روی ورتکس تیوب با جریان مخالف کار می‌شود.

۲-۱-۴ ورتکس تیوب مخروطی یا واگرا[2]

در این نوع از ورتکس تیوب‌ها که در شکل ۲-۶ دیده می‌شود، تیوب یا لوله‌ی ورتکس تیوب دارای زاویه واگرایی حدوداً۴ الی ۷ درجه می‌باشد، این نوع از ورتکس تیوبها در مقایسه با انواع مرسوم از طول کارکرد کمتری برخوردارند و برای کاربردهای خاص استفاده می‌شوند.



شکل ۲-۶ شماتیک ورتکس تیوب مخروطی[۱۲]

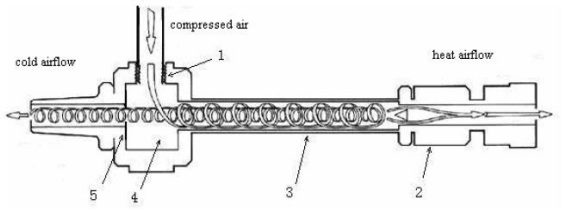
[1]Uni-Flow Vortex Tube
[2]Conical or Divergent flow Vortex Tube

۲-۱-۵ ساختار کلی دستگاه

همان‌گونه که قبلاً گفته شد ورتکس تیوب دارای هندسه‌ای نسبتا ساده می‌باشد و به دور از هر گونه پیچیدگی در تعدد اجزاء تشکیل دهنده بوده که این مساله از مهمترین امتیازات در مورد ورتکس تیوب می باشد. به طور کلی یک ورتکس تیوب شامل بدنه‌ای ساخته شده از یک لوله با طول و قطر مشخص و نیز از یک یا چند نازل برای ورود جریان به داخل دستگاه که ابعاد هندسی نازلها و لوله بسته به طراحی متغیر خواهند بود، می‌باشد. همچنین یک شیر کنترل کننده در انتهای گرم وجود دارد که میزان بازشدگی این شیر نقش تعیین کننده‌ای در بازده‌ی دستگاه دارد و در نهایت یک خروجی سرد اجزای اصلی تشکیل دهنده ورتکس تیوب هستند. شکل ۲-۷ ساختار کلی دستگاه به همراه اجزای تشکیل دهنده وکلیه قطعات موجود در یک ورتکس تیوب را نشان می‌دهد.

اجزای دستگاه عبارتند از :

۱- یک یا چند نازل ورودیInjection Nozzle
۲- بدنه لوله Tube
۳- محفظه چرخش Vortex Chamber
۴- اورینگ یا واشرهای حلقویO-ring
۵- خروجی هوای سردCold Exit
۶- خروجی هوای گرم(دریچه قابل تنظیم)Hot End Valve



1. nozzle 2. hot valve 3. hot end tube 4 .vortex chamber 5. separating cold plate
Fig.1. schematic diagram of vortex tube

شکل ۲-۷ اجزا تشکیل دهنده ورتکس تیوب به همراه پلان مونتاژ[۱۲]

۲-۱-۶ مزایا و معایب ورتکس تیوب

باید خاطر نشان کرد هر چند ورتکس تیوب برخی معایب مانند پایین بودن راندمان به نسبت سایر وسایل مهندسی را دارد اما این وسیله یک وسیله منحصر بفرد می‌باشد. از آنجایی که در مراکز صنعتی و کارخانجات، خط هوای فشرده موجود می‌باشد و از طرفی چون ورتکس تیوب‌ها به عامل محرک دیگری به جز هوای متراکم نیاز ندارند، از این وسیله در مراکز صنعتی به طور گسترده می‌توان استفاده نمود. کوچک بودن، سبک و کم حجم بودن، تعمیر و نگهداری آسان، هزینه ساخت پایین، تولید هوای سرد فوری، دوام بالا (زیرا از استیل ضد زنگ ساخته می‌شود و دارای محیط کاری تمیز می‌باشد)، امکان تنظیم هوای سرد و گرم،