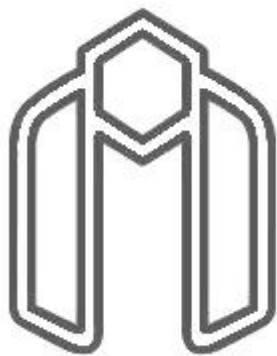






بنام خدا



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

عنوان پایان نامه :

بررسی تجربی و عددی جریان سیال درون یک لوله

گردبادی

دانشجو : مهیار کارگران

اساتید راهنما:

دکتر محمود فرزانه گرد

دکتر شهرام هاشمی مرغزار

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در

مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

بهمن ماه ۱۳۸۷

چکیده :

لوله گردبادی وسیله ایست که قادر است جریان گاز با فشار بالا را به دو جریان با دماهای مختلف در فشارهای پایین تر تفکیک کند . یک لوله گردبادی در حالت کلی برای رسیدن به دو هدف طراحی می شود . ۱- حداکثر جدایی گرمایی ۲- رسیدن به حداکثر راندمان .

در این رساله سعی شده است به بررسی تجربی رفتار گاز طبیعی و هوا در داخل یک لوله گردبادی و بررسی اثر پارمترهای ترموفیزیکی (فشار) و هندسی (طول لوله و قطر اریفیس) بر راندمان لوله گردبادی و همچنین میزان بار گرمایی و سرمایی به دست آمده از هر کدام پرداخته شود و به منظور آشنایی با چگونگی توزیع فشار ، دما و سرعت در داخل لوله گردبادی از حل عددی که توسط نرم افزار فلونت انجام شده استفاده شود . نتایج حاصله نشان می دهد که اثر قطر اریفیس بر راندمان لوله گردبادی بیشتر از طول لوله بوده و از طرفی با توجه به اینکه میزان جدایش دمایی برای هوا بیشتر از گاز طبیعی است اما میزان بار برودتی و گرمایی به دست آمده برای گاز بیشتر از هوا می باشد .

لذا با توجه به این که تا کنون در مورد رفتار گاز طبیعی درون لوله گردبادی هیچ گونه تحقیقی انجام نشده ، بررسی حاضر میتواند پاسخگوی بسیاری از ابهامات در مورد رفتار گاز طبیعی در درون لوله گردبادی باشد.

فصل اول :

مقدمه

۱-۱. لوله گرد بادی رانک - هیلش^۱

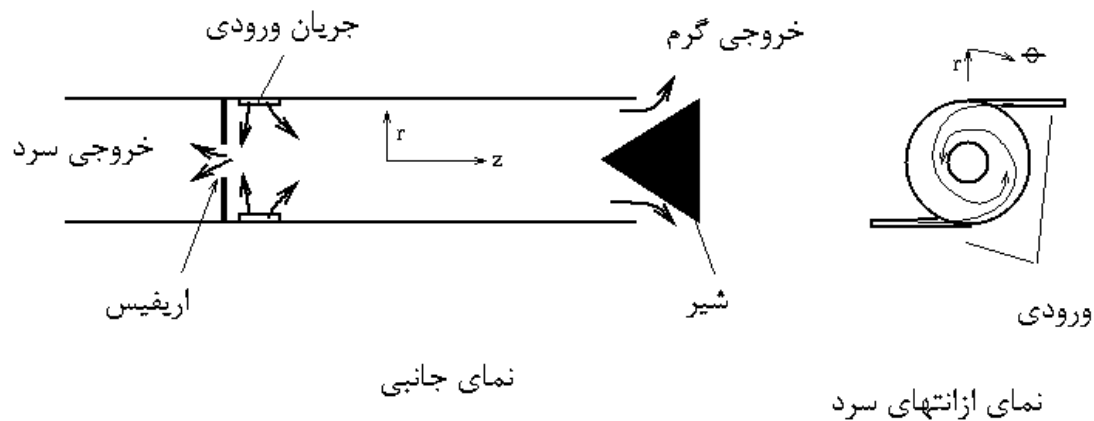
لوله گردبادی وسیله است که می تواند گاز ورودی با فشار بالاتر را به دو جریان با فشار پایین تر و دماهای متفاوت (که یکی دارای دمای بیشتر و دیگری دارای دمایی کمتر از دمای گاز ورودی است) تفکیک کند . این وسیله در ابتدا به وسیله فیزیکدان و متالورژیست فرانسوی رانک^۲ در سال ۱۹۳۳ کشف شد [۲و۱] و تا سال ۱۹۴۶ که هیلش^۳ [۳] اقدام به انتشار اطلاعات خود از یک بررسی عددی در زمینه لوله گردبادی کرد ، علاقه مندی زیادی به این موضوع وجود نداشت .

لوله گردبادی در حالت کلی به دو نوع تقسیم می شود . در نوع اول جریان سرد و گرم از دو سمت مخالف خارج می شود که به آن لوله گردبادی جریان مخالف گفته می شود ولی در نوع دوم جریان سرد و گرم از یک سمت لوله خارج می شوند و به آن لوله گردبادی هم جریان گفته می شود . با توجه به اینکه در لوله گردبادی جریان مخالف راندمان بیشتر از لوله گردبادی هم جریان می باشد لذا اکثر مطالعات بر روی این نوع لوله گردبادی انجام گرفته است و در اینجا منظور از لوله گردبادی ، لوله گردبادی جریان مخالف می باشد . در شکل (۱-۱) نمایی از لوله گردبادی جریان مخالف نشان داده شده است .

^۱ Ranque – Hilsch

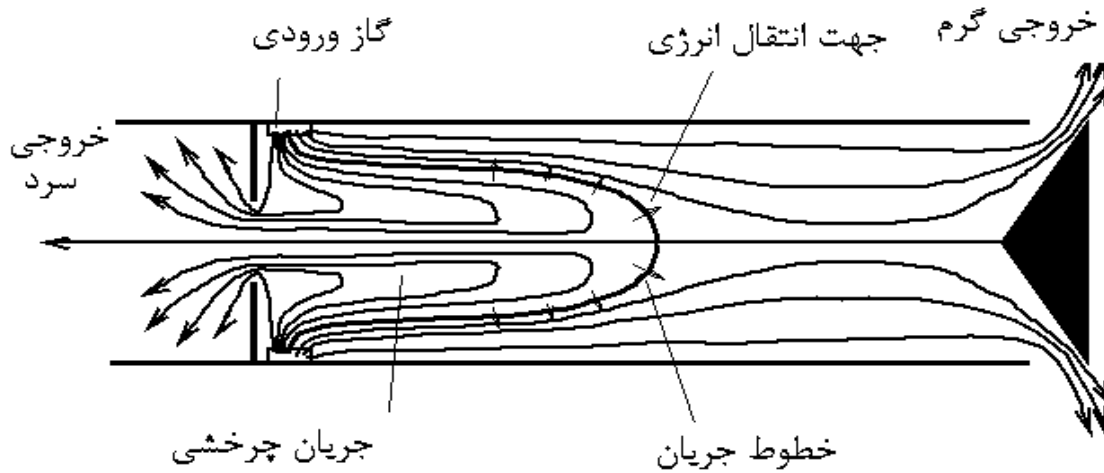
^۲ Ranque

^۳ Hilsch



شکل ۱-۱: نمایی از لوله گردبادی جریان مخالف

برای درک بهتر از چگونگی توزیع جریان در لوله گردبادی ، طرحی از الگوی جریانی فرضی در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود نواحی خارجی جریان ، گرمتر از گاز ورودی هستند در حالیکه گازی که در حوالی مرکز لوله قرار دارد دارای دمایی کمتر از گاز ورودی می باشد . یک اریفیس که دقیقاً در پشت جریان های ورودی قرار گرفته ، گاز سردی را که در مرکز لوله جریان دارد جدا می کند و این گاز از سمت چپ لوله خارج می گردد. جریان گرم نیز از اطراف شیر مخروطی که در سمت راست لوله مشاهده می گردد ، خارج می شود.



شکل ۱-۲: الگوی جریان در لوله گردبادی

لوله گردبادی دارای مزایای فراوانی از جمله نداشتن قطعات متحرک که باعث افزایش طول عمر دستگاه و قابلیت اطمینان می شود ، عدم نیاز به نیروی برق یا هرگونه سوخت در راه اندازی و کارکرد دستگاه ، ابعاد کوچک و وزن کم ، قیمت تمام شده ارزان و می باشد . که این مزایا باعث افزایش روز افزون آن به خصوص در صنایع گاز ، صنایع سرمایش و ... شده است .

از گذشته مطالعات بر روی لوله گردبادی به دو دسته تقسیم می شدند. دسته اول مطالعات عددی و تحلیلی که با توجه به نرم افزار های موجود و روش های عددی انجام می گرفت و دسته دوم مطالعات تجربی که خود به دو دسته تقسیم می شوند . دسته اول مربوط به بررسی اثر پارامتر های ترمو فیزیکی مانند فشار، سرعت و دما که موجب به دست آوردن پروفیل های سرعت و فشار و دما در طول لوله می شوند و دسته دوم مربوط به بررسی پارامتر های هندسی بر عملکرد لوله گردبادی می باشند.

۱-۲. اهداف پروژه

با توجه به کاربردهای فراوان لوله گردبادی در صنعت ، میزان راندمان لوله گردبادی و عوامل موثر بر این راندمان و راه های افزایش آن از اهمیت زیادی برخوردار است .

لذا در این پروژه اثر پارامترهای ترموفیزیکی (فشار) و هندسی (طول لوله و قطر اریفیس) بر راندمان لوله گردبادی بررسی شده است ، به همین منظور چند نمونه از لوله گردبادی که بر اساس نتایج مطالعات تجربی می توانند بیشترین راندمان و جدایی گرمایی را داشته باشند ، ساخته شده است. نتایج آزمایشات به منظور درک بهتر به صورت نمودار ارئه شده است و درانتها مقادیر به دست آمده برای هوا وگاز با هم مقایسه شده اند.

لازم به ذکر است که در تمام شبیه سازی های رایانه ای پیشین که توسط محققین قبلی انجام گرفته است ، دماهای خروجی به عنوان شرایط مرزی دانسته شده فرض شده است . لذا در این تحقیق هدف از استفاده از حل عددی تنها نشان دادن توزیع سرعت ، دما و فشار در لوله گردبادی می باشد .

۱-۳. ساختار پایان نامه

مطالب در این پایان نامه به ترتیب زیر بیان می شود :

فصل اول : مقدمه . در این فصل به معرفی لوله گردبادی ، انواع کاربردهای آن و اهداف پروژه می پردازیم .

فصل دوم : مروری بر کارهای گذشته . در این فصل مطالعات و کارهای انجام شده بر روی لوله گردبادی به منظور انتخاب ابعاد مناسب برای ساختن لوله مورد آزمایش را بررسی می کنیم .

فصل سوم : مبانی تئوری و روابط حاکم بر لوله گردبادی . در این فصل روابط و پارامترهای مورد استفاده تعریف و بررسی می شوند .

فصل چهارم : روش کار آزمایشگاهی . در این فصل با وسایل و تجهیزاتی که مورد استفاده قرار گرفته شده است و همچنین روش آزمایش آشنا خواهیم شد .

فصل پنجم : حل عددی لوله گردبادی . در این فصل حل عددی لوله گردبادی به کمک نرم افزار فلونتت به منظور آشنایی با چگونگی توزیع سرعت و فشار در داخل لوله گردبادی انجام گرفته است .

فصل ششم : نمودار و نتایج به دست آمده از آزمایشات . در این فصل به بررسی نمودارها و تحلیل نتایج به دست آمده از انجام آزمایشات می پردازیم .

فصل هفتم : نتیجه گیری و ارائه پیشنهاد .

۲. فصل دوم :

مروری بر کارهای

گذشته

۲-۱. تاریخچه

لوله گردبادی ابتدا توسط فیزیکدان و متالورژیست فرانسوی رانک کشف شد. در ابتدا انجمن مهندسان و دانشمندان نسبت به این کشف بی تفاوت بودند زیرا این دستگاه دارای بازدهی کمی بود. بعد از چند سال مطالعه بر روی این دستگاه توسط دانشمند آلمانی هیلش از سر گرفته شد. هیلش مطالعات آزمایشی و تئوری زیادی را برای بیشتر شدن بازده لوله گردبادی انجام داد. او اثر فشار ورودی و پارامترهای هندسی (شکل لوله) را بر بازده لوله گردبادی بررسی کرد. بعد از هیلش مطالعات تجربی زیادی بر روی لوله گردبادی توسط دانشمندان مختلف انجام شد. به عنوان مثال اسچپر^۱ [۴] در سال ۱۹۵۱ سرعت و گرادیان دما را در فشارهای مختلف اندازه گرفت. مارتینوسکی^۲ و الکسیو^۳ [۵] به بررسی تجربی پارامترهای هندسی بر لوله گردبادی پرداختند. آنها لوله گردبادی با قطرهای ۲۸ و ۴,۴ میلیمتر را با فشار ورودی ۱۲ اتمسفر آزمایش کردند و توانستند که دمای گاز را تا ۵۳- درجه سانتیگراد کاهش دهند. در سال ۱۹۵۶ هارتنت^۴ و اکرت^۵ [۷و۶] میزان سرعت و فشار را در طول یک لوله گردبادی هم جریان اندازه گرفتند. آنها لوله گردبادی با قطر ۷۶,۲ میلیمتر را با فشار ورودی ۲,۴ اتمسفر آزمایش کردند و توانستند که دمای هوا را تا ۱۱,۷- درجه سانتیگراد کاهش دهند.

^۱ Scheper
^۲ Martynovskii
^۳ Alekseev
^۴ Hartnett
^۵ Ekert

اسچلر^۱ و بران^۲ [۸] در سال ۱۹۵۷ تحقیقات خود را بر روی اندازه گیری فشار ، سرعت و دما به منظور به دست آوردن پرفیل هر یک در طول لوله گردبادی انجام دادند . آنها لوله گردبادی با قطر ۲۵,۴ میلیمتر را با فشار ورودی ۶,۱ اتمسفر آزمایش کردند و توانستند که دمای هوا را تا ۲۳- درجه سانتیگراد کاهش دهند . لیندرسترام- لانگ^۳ [۹] تاثیر سیال عامل و شکل هندسی لوله بر میزان جدایش را بررسی کرد و دریافت که موثرترین عامل بر میزان جدایش نسبت دبی خروجی سرد و گرم است . در سال ۱۹۶۵ تاکاهاما^۴ [۱۰] به بررسی لوله گردبادی به منظور افزایش راندمان آن پرداخت و توانست فرمولی برای پروفیل های سرعت و دما در طول لوله گردبادی ارائه دهد . او لوله گردبادی با قطرهای ۲۸ و ۷۸ میلیمتر را مورد آزمایش قرار داد . ونس^۵ [۱۱] در سال ۱۹۶۸ ضمن اندازه گیری سرعت و فشار استاتیکی در طول لوله گردبادی به وجود مقدار قابل توجه سرعت چرخشی در داخل لوله پی برد . لوله گردبادی مورد آزمایش او دارای قطر ۴۱,۳ میلیمتر تحت فشار ورودی ۲ اتمسفر بود که در این شرایط توانست دمای هوا را تا ۱۳- درجه سانتیگراد کاهش دهد . پرولکر^۶ [۱۲] نتایج آزمایش های تجربی خود را در رابطه با یک لوله گرد بادی کوتاه ارائه کرد و احتمال اینکه بتوان یک لوله گردبادی را در لوله گردبادی دیگری قرارداد را بررسی کرد . این نوع لوله به گونه ای بود که در حالیکه جریان سرد از یک طرف لوله خارج می گردد ، داخل لوله ای دیگر وارد شده و لذا خنک تر

^۱ Scheller

^۱ Brown

^۳ Linderstrom-Lang

^۴ Takahama

^۵ Vennos

^۶ Parulekar

می گردد. ، اتن^۱ [۱۳] ، رایسکیو^۲ و تانکل^۳ [۱۴] اثر کوچک تر کردن طول لوله و واگرا کردن کل یا قسمتی از لوله را بر راندمان لوله گردبادی بررسی کردند . آنها دریافتند که میزان واگرایی اگر با زاویه کم باشد می تواند راندمان لوله گردبادی را افزایش دهد . در سال ۱۹۸۳ استفان ات ال^۴ [۱۵] پروفیل دما را در طول لوله گردبادی اندازه گرفت و به این نتیجه رسید که طول لوله گردبادی یکی از عوامل مهم و موثر بر راندمان لوله گردبادی می باشد . او لوله گردبادی با قطر ۱۷٫۶ میلیمتر را با فشار ورودی ۶ اتمسفر آزمایش کرد و توانست در خروجی سرد دمای هوا را تا ۳۸- درجه سانتیگراد کاهش دهد و در خروجی گرم ، دما را تا ۷۸ سانتیگراد بالا ببرد . اورهان^۵ و موزافر^۶ [۱۶] به مطالعه تجربی اثر طول لوله و زاویه شیر مخروطی بر راندمان لوله گردبادی پرداختند . در سال ۲۰۰۳ سعیدی^۷ و ولیپور^۸ [۱۷] پارامترهای موثر بر راندمان لوله گردبادی را به پارامترهای فیزیکی مانند فشار گاز ورودی ، نوع گاز ، نسبت دبی خروجی سرد و پارامترهای هندسی از قبیل طول و قطر لوله گردبادی ، قطر اریفیس ، شکل نازل ورودی تقسیم بندی کردند . آنها لوله گردبادی با قطر ۹ میلیمتر را با فشار ورودی ۳ اتمسفر آزمایش کردند و توانست دما را تا ۱۷٫۳۷- درجه سانتیگراد کاهش دهند .

^۱ Otten
^۲ Raiskii
^۳ Tunkel
^۴ Estephan et al
^۵ Orhan
^۶ Muzaffer
^۷ Saidi
^۸ Valipour

. بالمر^۱ [۱۸] از آب به عنوان سیال عامل استفاده کرد و متوجه شده هنگامی که فشار ورودی را به مقدار قابل ملاحظه ای (بین ۲۰ تا ۵۰ بار) بالا رود، راندمان لوله افزایش می یابد. وجود این آزمایش ثابت می کرد که می توان از سیالات تراکم ناپذیر نیز به عنوان سیال عامل در لوله گردبادی استفاده کرد.

گالیو^۲ [۱۹] برای بهتر کردن راندمان، نسبت طول به قطر لوله را ۱۳ پیشنهاد کرد. در سال ۲۰۰۷ آیامزا-آرد^۳ و پراموانج^۴ [۲۰] به منظور درک ماهیت جدایش به مرور کارهای گذشته پرداختند و برای رسیدن به بیشترین مقدار راندمان، آنها نسبت قطر لوله به قطر اریفیس را مقدار ۰.۴۵، زاویه شیر مخروطی را ۵۵ درجه، نسبت طول به قطر لوله گردبادی را ۲۰ و نسبت قطر نازل ورودی به قطر لوله گردبادی را ۳۳ پیشنهاد کردند.

با توجه به مطالب گفته شده می توان دریافت که در طراحی یک لوله گردبادی استاندارد چند پارامتر مهم را باید در نظر گرفت که عبارتند از قطر لوله، قطر اریفیس، تعداد و اندازه و محل قرار گرفتن نازل ورودی، طول لوله و شکل (زاویه) شیر خروجی گرم که هر کدام از عوامل به تنهایی می تواند بر روی عملکرد لوله گردبادی تاثیر داشته باشند.

^۱ Balmer

^۲ Gulyaev

^۳ Eiamsa-ard

^۴ promvonge

۳. مبانی تئوری و

روابط حاکم بر لوله

گردبادی

۳-۱. مبانی تئوری

در این قسمت روابط مهم و حاکم بر لوله گردبادی را مورد تحلیل و بررسی قرار می گیرند ، معرفی خواهد شد .

۳-۱-۱. ترمودینامیک

اگر از سرعت جریان در خروجی صرف نظر کنیم و قانون اول ترمودینامیک را برای سیستمی که شامل یک مخزن ذخیره گاز فشرده شده و یک لوله گردبادی را به کار ببریم (هیلش [۳] نشان داد که میزان گاز خارج شونده از خروجی سرد را می توان به فرم μ_c نوشت که از رابطه (۳-۱) به دست می آید) آنگاه تغییرات آنتروپی مخصوص برای سیال عبور کننده از لوله از رابطه (۳-۲) به دست می آید و برای گاز ایده آل همانند هوا به رابطه (۳-۳) می رسیم.

$$\mu_c = \frac{T_{in} - T_h}{T_c - T_h} \quad (۳-۱)$$

$$\Delta s = \mu_c (s_c - s_{in}) + (1 - \mu_c)(s_h - s_{in}) \quad (۳-۲)$$

$$\Delta s = c_p \ln \left(1 - \frac{\Delta T_C}{T_{in}} \right) + R \ln \left(\frac{p_{in}}{p_c} \right) \quad (۳-۳)$$

برای یک لوله گردبادی اگر از تغییر انرژی پتانسیل و جنبشی صرف نظر شود و همچنین لوله کاملاً

عایق در نظر گرفته شود قانون اول ترمودینامیک را می توان به صورت ذیل نوشت :

$$\dot{m}_i h_i = \dot{m}_c h_c + \dot{m}_h h_h \quad (4-3)$$

با بازنویسی معادله بالا و اعمال قانون بقای جرم ($\dot{m}_i = \dot{m}_h + \dot{m}_c$) خواهیم داشت :

$$h_i = (\dot{m}_c / \dot{m}_i) h_c + ((\dot{m}_i - \dot{m}_c) / \dot{m}_i) h_h \quad (5-3)$$

حال با تقسیم دو طرف معادله بر جریان جرمی ورودی خواهیم داشت :

$$h_i = \mu_c h_c + (1 - \mu_c) h_h \quad (6-3)$$

و در نهایت با بازنویسی معادله بالا مقدار μ_c طبق رابطه پایین بدست خواهد آمد :

$$\mu_c = (h_h - h_i) / (h_h - h_c) \quad (7-3)$$

چنانچه سیال عامل را بتوان یک گاز ایده آل فرض کرد با توجه به تغییرات کم دما خواهیم داشت:

$$\mu_c = c_p (T_h - T_i) / c_p (T_h - T_c) \quad (8-3)$$

معادله بالا در نهایت بصورت ذیر خلاصه خواهد شد .

$$\mu_c = (T_h - T_i) / (T_h - T_c) \quad (9-3)$$

۳-۲. تعاریف اصلی

در این قسمت به تعریف پارامترهایی که مورد استفاده قرار میگیرند می پردازیم .

۳-۲-۱. نسبت دبی سرد

نسبت جرم سرد به صورت نسبت نرخ جرم هوای سرد به وجود آمده در لوله به جرم هوای ورودی

تعریف می شود :

$$\mu_c = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_i} \quad (۱۰-۳)$$

۳-۲-۲. افت دمای هوای سرد

این پارامتر به صورت اختلاف دمای هوای ورودی و دمای هوای سرد خروجی تعریف می شود:

$$\Delta T_c = T_i - T_c \quad (۱۱-۳)$$

۳-۲-۳. افت دمای هوای گرم

این پارامتر به صورت اختلاف دمای هوای گرم خروجی و دمای هوای ورودی تعریف می شود:

$$\Delta T_h = T_h - T_i \quad (۱۲-۳)$$

۳-۲-۴. بازده ایزنتروپیک

برای محاسبه بازده سرمایی لوله گردبادی اگر سیال عامل هوا باشد از قانون انبساط آدیابا تیک برای

گاز ایده آل استفاده می کنیم (هنگامی که هوا در لوله جریان دارد فرایند به صورت انبساط

ایزنتروپیک انجام می شود که می توان نوشت :

$$\eta_{vt} = \frac{T_i - T_c}{T_i \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_i}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)} \quad (13-3)$$

که در آن P_a و P_i به ترتیب فشار هوای ورودی و فشار اتمسفر و γ نسبت حرارت مخصوص است . اما

برای گاز طبیعی از رابطه (۱۴-۳) استفاده می شود:

$$\eta_{vt} = \frac{\Delta h}{\Delta h_{cs}} = \frac{h_i - h_c}{h_i - h_{cs}} \quad (14-3)$$

۳-۲-۵. ضریب کارائی

برای یافتن ضریب کارائی که به صورت نسبت نرخ سرما به انرژی لازم برای سرد کردن تعریف می

شود با توجه به قانون انبساط ادیاباتیک برای گاز ایده آل داریم :

$$cop = \frac{Q_c}{W} \quad (15-3)$$

$$cop = \frac{\mu_c C_p (T_i - T_c)}{\left(\frac{\lambda}{\lambda-1}\right) RT_i \left[\left(\frac{P_i}{P_c}\right)^{\lambda-1/\lambda} - 1\right]} \quad (16-3)$$

در رابط فوق λ نسبت حرارت مخصوص گاز ، فشار گاز ورودی و p_c فشار گاز در خروجی سرد است .

۳-۲-۶. بار گرمایی تولید شده توسط لوله گردبادی

بار گرمای تولید شده توسط لوله گردبادی از رابطه زیر به دست می آید :

$$Q_H = \dot{m}_h \Delta h_h = \dot{m}_h (h_h - h_i) \quad (۱۶-۳)$$

۳-۲-۷. بار سرمایی تولید شده توسط لوله گردبادی

بار سرمای تولید شده توسط لوله گردبادی از رابطه زیر به دست می آید :

$$Q_C = \dot{m}_c \Delta h_c = \dot{m}_c (h_i - h_c) \quad (۱۷-۳)$$

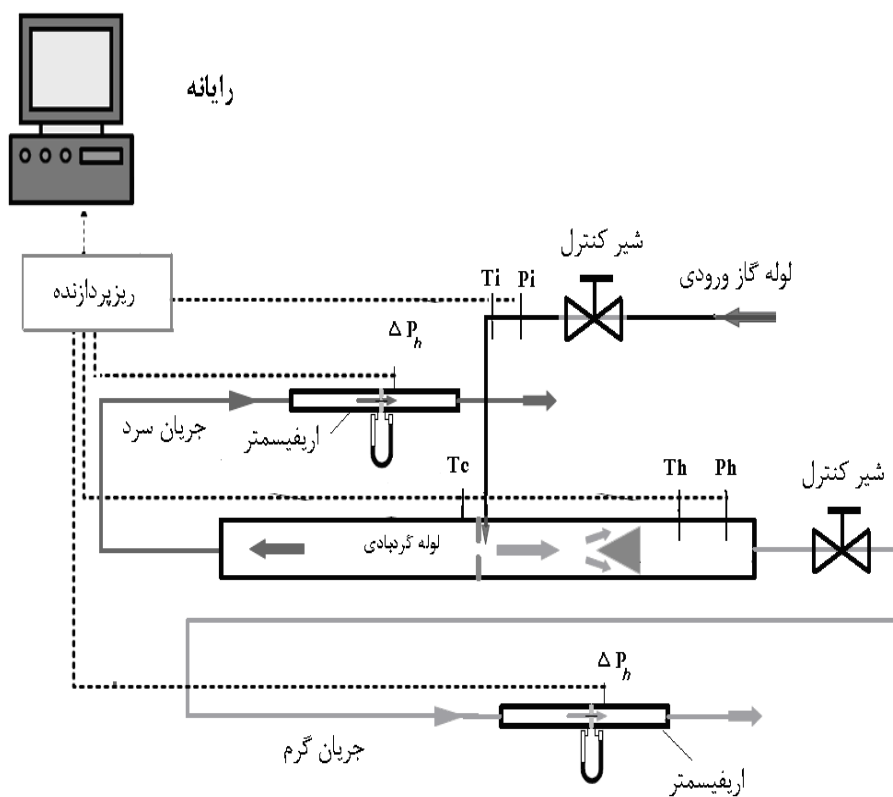
۴. فصل دوم:

روش کار آزمایشگاهی

۴-۱. آشنایی با تجهیزات

در این فصل ابتدا با وسایل و تجهیزاتی که مورد استفاده قرار گرفته شده است آشنا خواهیم شد و سپس به نحوه انجام آزمایش می پردازیم.

شکل ذیل طرحواره‌های از وسایل مورد استفاده در این تحقیق را نمایش میدهد .



شکل ۴-۱ : طرحواره کلی از دستگاه و نحوه اتصال آن به کامپیوتر

ابزار و وسایل مورد استفاده در این تحقیق شامل موارد ذیل بوده اند :

- لوله گردبادی شامل سه نمونه لوله گرم ، لوله سرد ، نازل ورودی و ۳ نمونه اریفیس سرد

- ۲ عدد جریان سنج اریفسمتر ساخته شده بر اساس استاندارد ISO5167
 - ۳ عدد حسگر دما از نوع PT100
 - ۲ عدد حسگر فشار (در بازه ۰-۴ و ۰-۱۰ بار)
 - ۲ عدد حسگر اختلاف سنج فشار دیجیتالی
 - ۴ عدد شیر توپی برای تنظیم جریان
 - ریزپردازنده AVR ATMEGA 32 و نمایشگر داده ها برای نمایش و ثبت داده ها که دارای ۸ کانال آنالوگ ورودی می باشد
 - رایانه قابل حمل و نرم افزار
- شکل ذیل نیز دستگاه مورد استفاده را در هنگام آزمایش در یکی از ایستگاههای تقلیل فشار TBS شاهرود نمایش می دهد .



شکل ۴-۲ دستگاه مورد آزمایش

وظایف اجزای دستگاه آزمایش بشرح ذیل می باشند :

۱- شیر ورودی : از این شیر برای تنظیم فشار ورودی استفاده می شود و گاز و هوا بعد از عبور از این شیر وارد لوله گردبادی می شود .

۲- لوله سرد : قسمتی از لوله گردبادی که هوای عبوری از اریفیس وارد این قسمت می شود و طول این قسمت از لوله در کل آزمایش ثابت می باشد .

۳- محل قرار گرفتن اریفیس : اریفیس های مورد آزمایش در این قسمت قرار میگیرند و ابعاد آنها در جدول ۴-۱ آمده است .

۴- لوله گرم : هوایی که از اریفیس عبور نمی کند ، در این لوله جریان پیدا می کند و ابعاد آنها در طول آزمایش برای بررسی پارامتر طول لوله بر راندمان لوله گردبادی تغییر می کند و ابعاد مورد آزمایش در جدول ۴-۱ آمده است .

۵- شیر خروجی گرم : این شیر برای کنترل مقدار هوای خروجی گرم و در نتیجه هوای سرد می باشد . با تنظیم این شیر مقدار جریان در قسمت گرم و سرد تغییر می کنند .

۶- جریان سنج اریفیسمتر برای جریان سرد : این لوله با قطر داخلی ۴۹ میلیمتر و قطر اریفیس ۲۴,۵ میلیمتر در مسیر خروجی سرد قرار میگیرد و طول مستقیم لوله برای توسعه یافتگی حدود ۹۰ سانتیمتر می باشد که از آن برای اندازه گیری دبی خروجی سرد استفاده می شود. این جریان سنج بر اساس استاندارد ISO5167 طراحی شده است و ساخت شرکت کولاب طوس بوده است .

۷- جریان سنج اریفیسمتر برای جریان گرم : ابعاد این جریان سنج مانند جریان سنج جریان سرد است که در مسیر خروجی گرم قرار میگیرد و طول لوله مستقیم برای توسعه یافتگی حدود ۹۰ سانتیمتر می باشد که از آن برای اندازه گیری دبی خروجی گرم استفاده می شود .

۸- شیر خروجی سرد : جریان گاز سرد شده بعد از عبور از اریفیس سرد از این قسمت خارج می شود .

۹- شیرخروجی گرم: جریان گاز گرم شده بعد از عبور از اریفیس گرم از این قسمت خارج می شود .

وسایل و ابزارهای اندازه گیری که در این آزمایش استفاده می شوند عبارتند :

حسگرهای های دما : در این آزمایش از سه عدد حسگر دمای PT 100 استفاده می شود که یکی بعد از شیر ورودی و برای اندازه گیری دمای ورودی و یکی قبل از شیر خروجی گرم برای اندازه گیری دمای هوای گرم و دیگری بعد از اریفیس سرد برای اندازه گیری دمای هوای سرد استفاده می شود . حسگرها از نوع سه سیم بوده که به ریزپردازنده متصل بوده و دما در نمایشگر ریزپردازنده و همچنین با توجه به اتصال ریزپردازنده به رایانه قابل حمل در رایانه نمایش داده می شود. باید توجه داشت که نرم افزار توسعه داده شده بطور خودکار اطلاعات را در یک فایل ثبت می کند.

حسگرهای فشار : در این آزمایش ۲ عدد حسگر فشار که یکی از آنها فشار را در بازه ۰-۴ بار و دیگری فشار ۰-۱۰ بار را اندازه گیری می کند و اطلاعات را به ریزپردازنده انتقال می دهد ، استفاده شده است . حسگرهای فشار نیز از نوع سه سیم بوده که بعد از شیر ورودی برای اندازه گیری فشار ورودی و قبل از شیر خروجی گرم برای اندازه گیری فشار خروجی گرم استفاده شده اند.

حسگرهای اختلاف سنج فشار : در هر یک از جریان سنج های مورد استفاده بر اساس استانداردهای موجود برای محاسبه دبی ، نیاز به اندازه گیری اختلاف فشار بین دو طرف اریفیس جریان سنج می باشد که این عمل با استفاده از دو حسگر اختلاف سنج انجام می گیرد. این دو اختلاف سنج با ریزپردازنده متصل بوده و اطلاعات را به ریزپردازنده منتقل می کنند.

ریز پردازنده AVR ATMEGA 32 و نمایشگر: در این تحقیق یک ریز پردازنده AVR ATMEGA 32 مورد استفاده قرار گرفت که این ریزپردازنده دارای ۸ کانال آنالوگ ورودی بوده که اطلاعات

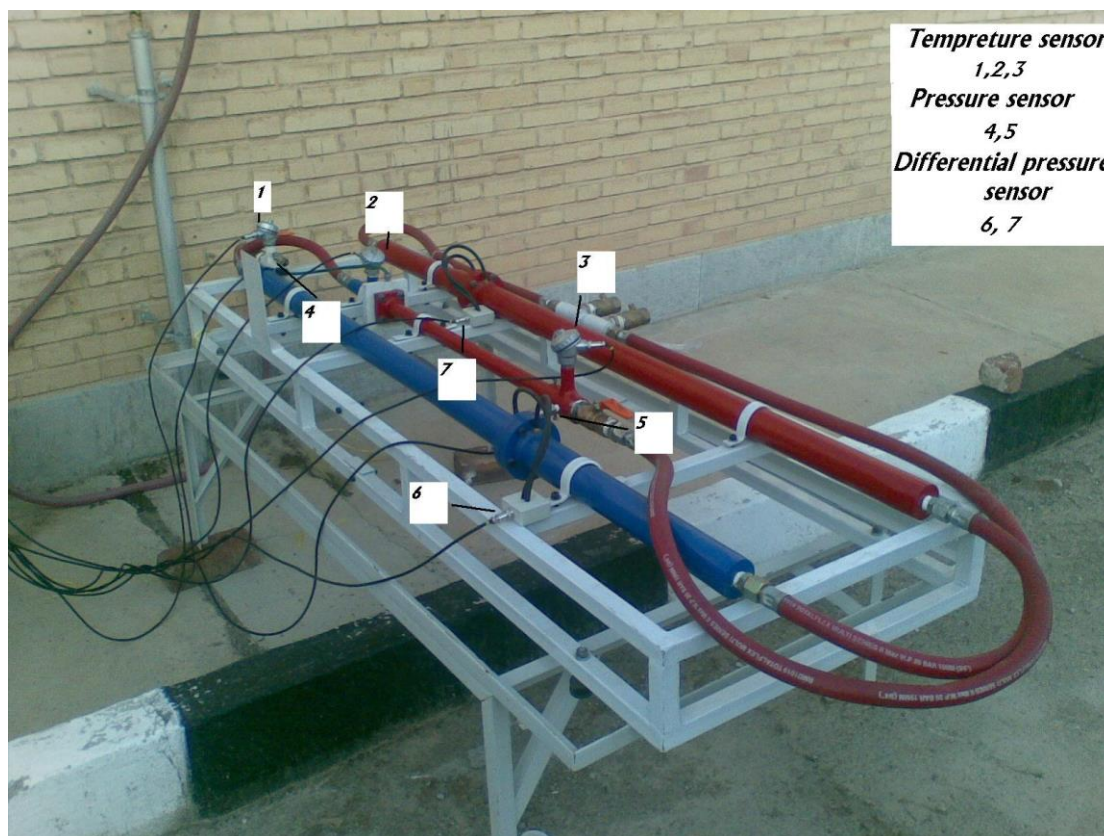
حسگرها را که بر حسب جریان یا ولتاژ می باشد ، دریافت می کند و بعد از تبدیل این اطلاعات به فشار و دما ضمن نمایش آنها در صفحه نمایشگر ، اطلاعات را به رایانه ارسال می کند.

رایانه و نرم افزار: در این تحقیق به منظور افزایش دقت در ثبت اطلاعات و عدم استفاده از روش

دستی ، از یک نرم افزار استفاده شده که این نرم افزار تمامی اطلاعات را در یک فایل اکسل^۱ ذخیره

میکنند.(این عمل به کمک نرم افزار ACM 800 انجام می شود).

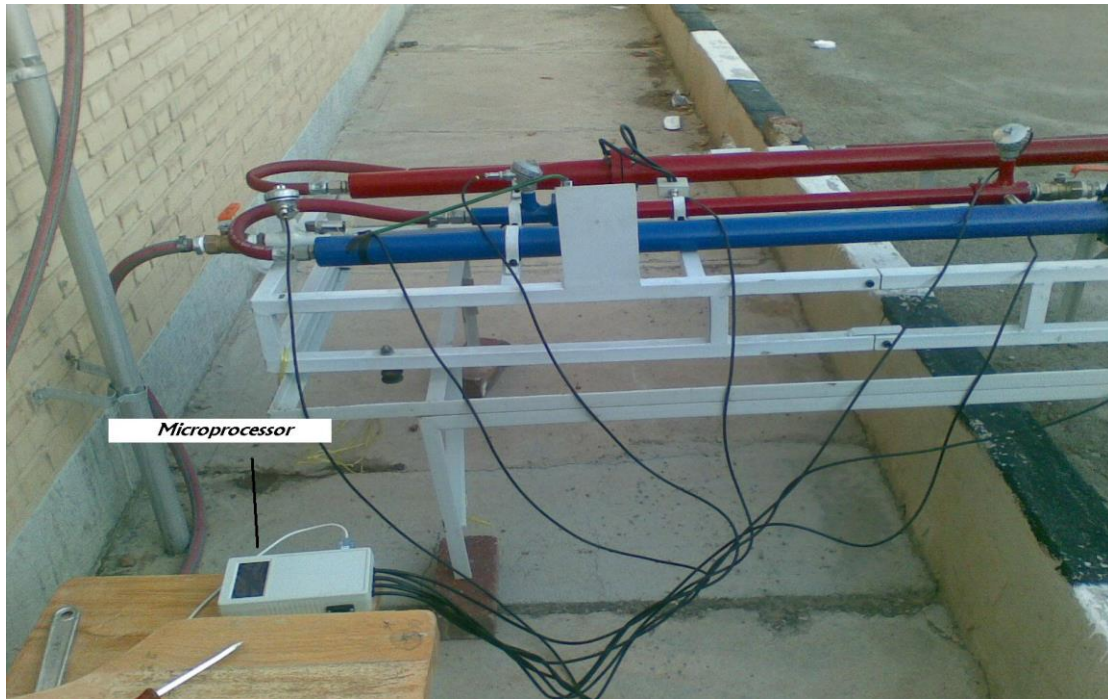
شکل ذیل محل قرار گیری حسگرها را نمایش می دهد.



شکل ۳-۴: محل قرار گرفتن سنسور های فشار و دما

^۱ Excel

چنان که اشاره شد در این طرح از یک ریز پردازنده برای دریافت ، پردازش و ارسال اطلاعات به رایانه استفاده شد. این ریزپردازنده بطور اختصاصی برای این طرح ساخته شده است و در شکل ذیل نمایش داده شده است .



شکل ۴-۴: میکرو پروسور برای خواندن اطلاعات

چنانچه اشاره شده اطلاعات ارسالی به رایانه توسط نرم افزار ACM800 دریافت شده و ضمن نمایش اطلاعات در نمایشگر بطور خودکار در یک فایل ثبت می شود این نرم افزار در حال استفاده در شکل ذیل نشان داده شده است.



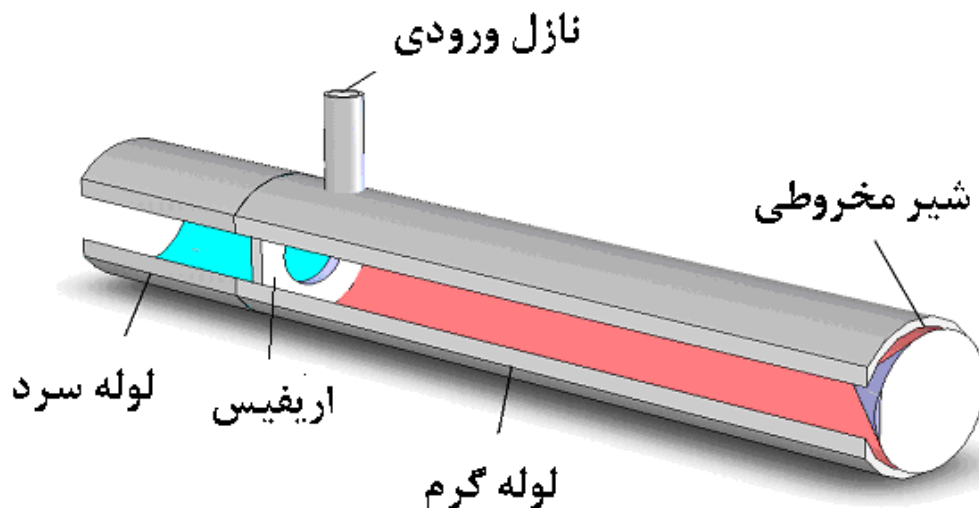
شکل ۴-۵: کامپیوتر و نرم افزار مورد استفاده در آزمایش

۴-۲. ابعاد هندسی لوله گردبادی

شکل ذیل طرحواره ای از لوله گردبادی را نمایش می دهد . چنانچه مشخص است این لوله شامل

تجهیزات ذیل است:

- لوله گرم
- لوله سرد
- نازل ورودی
- اوریفیس سرد
- شیر مخروطی



شکل ۴-۶: شماتیک کلی از لوله گردبادی

در این تحقیق با توجه به مراجع ذکر شده به خصوص مرجع ۲۰، پارامترهای هندسی که بر عملکرد لوله گردبادی تاثیر گذار است تغییر داده شده است تا اثر این پارامترها بررسی شود. در این مراجع تمام بررسی ها بر روی هوا انجام گرفته است که رفتاری نزدیک به یک گاز ایده آل را دارد. هدف از این تحقیق بررسی رفتار گاز طبیعی در لوله گردبادی می باشد.

در این تحقیق اثرات طول لوله گردبادی، قطر اریفیس سرد بررسی شده است. که در مرجع ۲۰ از این دو پارامتر، به عنوان مهمترین پارامترها یاد شده است. ابعاد لوله های گردبادی مورد آزمایش نیز در جدول (۴-۱) نشان داده شده است. همانطور که ذکر شد نمونه های ساخته شده از لوله بر اساس نتایج مطالعات تجربی انجام گرفته می باشد که می توانند بیشترین جدایی گرمایی را به وجود آورند.

جدول ۴-۱: ابعاد هندسی لوله گردبادی مورد آزمایش

زاویه مخروط (درجه)	طول لوله سرد (میلیمتر)	طول لوله گرم (میلیمتر)	قطر اریفیس (میلیمتر)	قطر لوله گردبادی (میلیمتر)	قطر نازل ورودی (میلیمتر)
۵۵	۵۰	۲۵۰	۸	۲۵	۸
۵۵	۵۰	۵۱۹	۸	۲۵	۸
۵۵	۵۰	۷۶۹	۸	۲۵	۸
۵۵	۵۰	۲۵۰	۱۲,۱	۲۵	۸
۵۵	۵۰	۵۱۹	۱۲,۱	۲۵	۸
۵۵	۵۰	۷۶۹	۱۲,۱	۲۵	۸
۵۵	۵۰	۲۵۰	۱۷,۷	۲۵	۸
۵۵	۵۰	۵۱۹	۱۷,۷	۲۵	۸
۵۵	۵۰	۷۶۹	۱۷,۷	۲۵	۸
۵۵	۵۰	۲۵۰	۵	۲۵	۸
۵۵	۵۰	۵۱۹	۵	۲۵	۸
۵۵	۵۰	۷۶۹	۵	۲۵	۸

۴-۳. روش انجام آزمایش

بعد از توضیح دستگاه مورد آزمایش ، اجزاء و وسایل اندازه گیری در این قسمت به شرح آزمایشات انجام گرفته پرداخته می شود. این آزمایشات طوری تنظیم شده است که اثرات پارامترهای هندسی و ترموفیزیکی مورد بررسی قرار گیرد.

آزمایشات شامل سه مرحله می باشند . آزمایشات سری اول و دوم مربوط به هوا می باشند که در فشار های ورودی ۵ و ۷٫۵ بار مورد آزمایش قرار گرفتند و آزمایشات سری سوم مربوط به گاز طبیعی می باشند که در فشار ورودی حدود ۵ بار مطلق انجام شده است که این فشار ، فشار خط لوله گاز طبیعی بوده است.

آزمایشات سری اول و دوم در شرکت کولاب طوس (مشهد) انجام گرفتند . برای کاهش فشار به فشار مورد نظر از یک رگلاتور استفاده شد. با توجه به ظرفیت بالای کمپرسورهای هوا و همچنین مخزن ذخیره هوا ، در طی آزمایش هیچ کاهش فشار ورودی تجربه نشد.

آزمایشات سری سوم در دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفتند . همچنین این سری آزمایشات در یکی از ایستگاههای تقلیل فشار شاهرود تکرار گردیدند. شکل ذیل طریقه اتصال لوله گردبادی به خط انتقال گاز داخل دانشگاه را نمایش می دهد. با توجه به گرمای هوا و تخلیه گاز خروجی به محیط ، این عمل در بعداظهر و شب انجام گرفت تا از خطرات احتمالی جلوگیری شود .



شکل ۴-۷: نحوه اتصال دستگاه به رگلاتور

روش انجام آزمایشات بدین ترتیب است که بعد از بستن دستگاه به منبع تامین گاز یا هوا ، اجازه داده می شود که جریان هوا برای چند دقیقه برقرار شده و جریان به حالت پایدار برسد . در عمل ، پایدار شدن جریان با توجه به عدم تغییر دمای هوای سرد و گرم قابل تشخیص می باشد ، سپس ثبت اطلاعات در کامپیوتر با راه اندازی نرم افزار شروع می شود(با این کار به جریان اجازه می دهیم تا به حالت پایدار^۱ برسد و در نتیجه اطلاعات دریافتی دقیق تر باشد).

^۱ steady

ثبت اطلاعات کاملا بصورت خودکار می باشد و توسط نرم افزار ACM 800 انجام می گیرد. بعد از فشردن کلیدی توسط اپراتور این نرم افزار اطلاعاتی دریافتی میکروپروسور را به صورت ۱۰۰ تایی در یک جدول اکسل ذخیره میکند . هر مرحله از آزمایشات شامل ۹ آزمایش می باشد ، در هر کدام از این آزمایشات برای بررسی تغییرات جریان ها سرد و گرم از تنظیم شیر توپی استفاده می شود . در هر حالت ، فشار و دمای ورودی ثابت و دبی خروجی گرم و سرد را از طریق تنظیم شیر خروجی گرم تغییر داده تا بتوان راندمان لوله را به دست آورد. لازم به ذکر است برای افزایش میزان دقت برای هر حالت دبی ، حدود ۳۰۰ نقطه از کامپیوتر گرفته شده و با متوسط گیری از این نقاط، مشخصات (دمایی و فشاری) آنها محاسبه می شود .

۵. فصل چهارم

حل عددی لوله گردباد^۱

۵-۱. مقدمه

در این قسمت در ابتدا به بررسی الگوریتم حل عددی مورد استفاده پرداخته و سپس نتایج حل به همراه توضیحات مربوطه ارائه می‌گردد. در خصوص تحلیل عددی پدیده ، از کد فلونت استفاده شده است و با حل همزمان معادلات ممنتوم و آشفتگی و حل معادلات انرژی ، تغییرات دمایی را بررسی نموده که نتایج آن در این بخش ذکر شده است .

معادلات کلی حاکم بر جریان سیال به شرح زیر می باشند .

۵-۱-۱. معادله بقای جرم

با توجه به قانون بقای جرم که بیان می‌کند، جرم سیال همواره ثابت می باشد معادله بقای جرم ، یا معادله پیوستگی ، به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = S_m \quad (1-5)$$

معادله (۱-۵) یک شکل کلی از معادله بقای جرم برای جریانهای قابل تراکم و غیرقابل تراکم می‌باشد. عبارت S_m ، جرم اضافه شده به فاز پیوسته از فاز دوم منتشر شده، می‌باشد.

۲-۱-۵. معادلات بقای مومنتم

قانون دوم نیوتن بیان می کند که نرخ تغییر اندازه حرکت یک ذره سیال برابر با برآیند نیروهای وارد شده بر ذره است. در نتیجه معادلات بقای مومنتم در جهت کلی i به صورت زیر است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2-5)$$

P فشار استاتیک، τ_{ij} تانسور تنش (که در زیر توضیح داده شده است)، ρg_i و F_i نیروهای جسمی

گرانشی و جسمی خارجی در جهت i می باشد. F_i همچنین می تواند شامل ترمهایی نظیر مدل محیط

متخلخل شود. تانسور تنش τ_{ij} به صورت زیر است.

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (3-5)$$

μ لزجت مولکولی و ترم دوم در سمت راست تأثیرپذیری ناشی از انبساط حجمی می باشد.

۳-۱-۵. معادله انرژی

معادله انرژی از قانون اول ترمودینامیک بدست می آید، که بیان می کند نرخ انرژی ذره سیال برابر با

نرخ حرارت اضافه شده به ذره سیال بعلاوه نرخ کار انجام شده بر روی ذره است. بنابراین معادله انرژی

در حالت کلی به شکل زیر می باشد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_{j'} h_{j'} J_{j'} + u_j (\tau_{ij})_{eff} \right) + S_h \quad (4-5)$$

که در رابطه فوق K_{eff} ضریب هدایت مؤثر $K_t + K$ می‌باشد، که K_t ضریب هدایت گرمایی جریان مغشوش، با توجه به مدل اغتشاش به کار رفته می‌باشد و $J_{j'}$ شار پخشی از گونه‌های λ می‌باشد، سه ترم اول در سمت راست معادله (۴-۵) به ترتیب بیان کننده انتقال انرژی به صورت هدایت، پخش گونه‌ها و پراکندگی لزجت می‌باشند. S_h شامل حرارت واکنشهای شیمیایی و دیگر ترمهای حرارتی حجمی که کاربر با آن مواجه خواهد شد، می‌باشد.

برای خلاصه شدن نتایج بدست آمده، از این بخش اطلاعات مربوط به شکل بقائی یا دیورژانسی سیستم معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت وابسته به زمان و سه بعدی سیال تراکم پذیر را در جدول (۱-۵) آورده شده است.

جدول ۱-۵ : معادلات کلی حاکم بر جریان سیال نیوتنی تراکم پذیر

جرم	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0$
اندازه حرکت-x	$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{ grad } u) + S_{Mx}$
اندازه حرکت-y	$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{ grad } v) + S_{My}$
اندازه حرکت-z	$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{ grad } w) + S_{Mz}$
انرژی داخلی	$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \text{div}(\rho i U) = -p \text{ div } (U) + \text{div}(K \text{ grad } T) + \Phi + S_i$
معادلات	$P = P(\rho, T) \quad i = i(\rho, T)$
حالت	$P = \rho R T \quad i = C_v T$

۵-۲. خطی سازی معادلات حاکم بر میدان سیال^۱

روشی که در آن معادلات حاکم خطی می گردند ، ممکن است بر اساس متغیر وابسته (یا یک گروه متغیر) مورد نظر، فرم ضمنی یا صریح داشته باشند . این دو روش در زیر شرح داده شده اند:

۵-۲-۱. روش ضمنی^۲

برای یک متغیر مورد نظر مقدار مجهول در هر سلول با استفاده از یک رابطه که شامل مقادیر مجهول و معلوم سلولهای مجاور است محاسبه می گردد. پس هر مجهول در بیش از یک معادله در سیستم به چشم می خورد و این معادلات باید به طور هم زمان حل شوند تا مقادیر مجهول به دست آیند.

۵-۲-۲. روش صریح^۳

برای یک متغیر مورد نظر مقدار مجهول در هر سلول با استفاده از یک رابطه که تنها شامل مقادیر معلوم است محاسبه می گردد. بنابراین هر مجهول تنها در یک معادله از سیستم ظاهر می گردد و معادلات برای مقدار مجهول در هر سلول در زمان مشخص قابل حل است تا مقادیر مجهول به دست آید.

^۱ Linearization

^۲ Implicit

^۳ Explicit

۵-۳. مجزاسازی^۱ معادلات حاکم بر میدان سیال

برنامه‌های بر مبنای CFD از یک تکنیک حجم کنترلی استفاده می‌کند تا معادلات حاکم را تبدیل به معادلات جبری نماید تا بتوان آنها را از روشهای عددی حل نمود. این تکنیک حجم کنترلی شامل بیان معادلات حاکم برای هر یک از حجمهای کنترلی می‌باشد، که منجر به معادلات مجزایی می‌گردد که بقاء هر کمیت روی حجم کنترل پایه ارضاء می‌گردد.

روشهای متفاوتی جهت گسسته سازی معادلات حاکم بر میدان جریان سیال وجود دارد ، که بسته به مقدار دقت مورد نظر و سایر پارامترها هر کدام از آنها را می‌توان انتخاب کرد. این روشها عبارتند از: آپ ویند مرتبه ۱^۲، آپ ویند مرتبه ۲، قاعده توانی^۳ و روش سریع. که در ادامه به بیان اجمالی هر یک از روشهای فوق پرداخته می‌شود.

۵-۳-۱. روش آپ ویند مرتبه ۱

هنگامی که دقت مرتبه اول مورد نیاز باشد مقادیر در صفحات سلول با فرض آنکه مقادیر متغیرهای مرکز سلول همان مقدار میانگین سلول می‌باشند و برای کل سلول در نظر گرفته شده‌اند ، تعیین می‌شوند. مقادیر صفحه‌ای مشابه مقادیر سلولی می‌باشد.

^۱ Discretization

^۲ Upwind

^۳ Power Law

۵-۳-۲. روش قاعده توانی

برنامه مجزاسازی قاعده توانی مقدار متغیر را به کمک میان‌یابی با استفاده از حل دقیق معادلهٔ یک بعدی پخش جابه‌جایی به دست می‌آید.

۵-۳-۳. روش آپویند مرتبه ۲

زمانی که دقت مرتبه ۲ نیاز باشد، مقادیر در وجوه صفحات سلول با به کارگیری یک برآیند بازسازی خطی چند بعدی محاسبه می‌شود، در این روش دقت مرتبه بالاتر در وجوه سلول از طریق یک بسط سری تیلور برای حل مرکز سلول، حول مرکز سلول حاصل می‌شود.

۵-۳-۴. روش مرتبه ۳ (Quick)

برای شبکه‌بندی شش وجهی و چهاروجهی زمانی که وجوه و سلولهای واحد بالا و پایین دست مشخص باشند، برای محاسبهٔ مقدار مرتبه بالاتر متغیر جابه‌جایی در یک صفحه، روش مرتبه سوم را نیز می‌توان به کار گرفت. روشهای مرتبه ۳ بر پایهٔ محاسبه میانگین جهت‌دار در روش آپویند مرتبه ۲ و میان‌یابی های مرکزی متغیرها می‌باشد.

۵-۳-۵. روشهای میان یابی فشار

روشهای استاندارد از پیش تعیین شده با استفاده از ضرایب معادله مومنتم، مقادیر فشار در وجوه را میان یابی می کند. این روش تا زمانی که تغییرات فشار بین مراکز سلول مناسب باشد، مطلوب به نظر می رسد. زمانی که تغییرات بزرگ یا جهش در ترمهای منبع مومنتم این حجمهای کنترل وجود دارد، پروفیل فشار تغییرات زیادی در وجه سلول خواهد داشت و نمی تواند با استفاده از این روش میان یابی شود. که چندین روش جایگزین برای مواردی که در آنها روش میان یابی استاندارد فشار کارآیی ندارد به شرح زیر می باشد.

۵-۳-۵ (۱) روش خطی

این روش فشار وجه را برابر متوسط مقادیر فشار در سلول های مجاور در نظر می گیرد.

۵-۳-۵ (۲) روش مرتبه دوم

این روش فشار وجه را به حالتی که برای ترمهای جابه جایی دقیق مرتبه دو استفاده شد، بازسازی می کند. این روش اصلاحاتی را بر روی روشهای خطی ایجاد می کند اما ممکن است در صورتی که در ابتدای محاسبات استفاده شود و یا با یک شبکه بندی نادرست به کار گرفته شود پاره ای مشکلات ایجاد نماید.

۵-۳-۵. روش وزنی نیروی حجمی

این روش فشار وجه را با فرض آنکه گرادیان عمودی تغییرات بین فشار و نیروهای حجمی ثابت است ، محاسبه می کند. این روش در صورتی خوب عمل می کند که نیروهای حجمی از قبل در معادلات مومنتم معلوم باشند .

۵-۳-۶. روش PRESTO^۱

از تعادل پیوستگی مجزا برای یک حجم کنترل حول وجه برای محاسبه فشار (یعنی فشار وجه) استفاده می کند. این روش در واقع شبیه روشهای شبکه بندی تفکیکی می باشد که با شبکه های سازمان یافته استفاده می شود.

۵-۴. نتایج تحلیل عددی

تولید مدل حجمی لوله گردبادی با یک نازل ورودی برای تحلیل عددی و ارائه نتایج نیاز به یک مدل هندسی به شرح زیر است.

- طول لوله گرم : ۲۵۰ میلیمتر

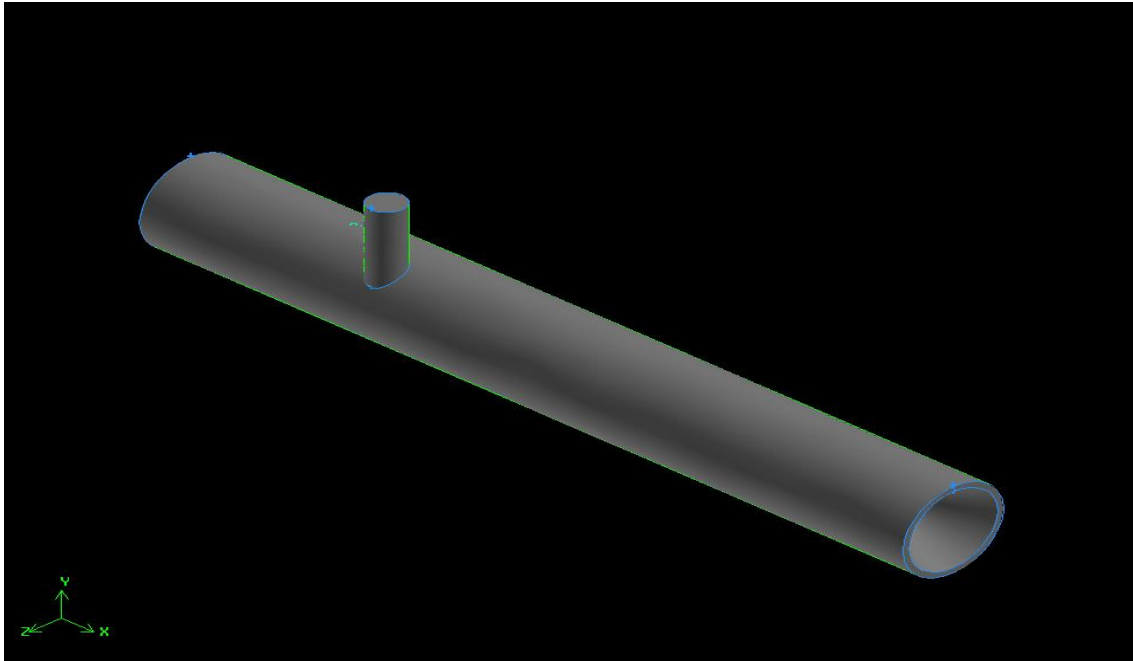
^۱ Pressure Staggering Option

- طول لوله سرد : ۵۰ میلی متر
- قطر نازل ورودی : ۸ میلی متر
- زاویه مخروط ۵۵ درجه

۵-۴-۱. شبکه بندی

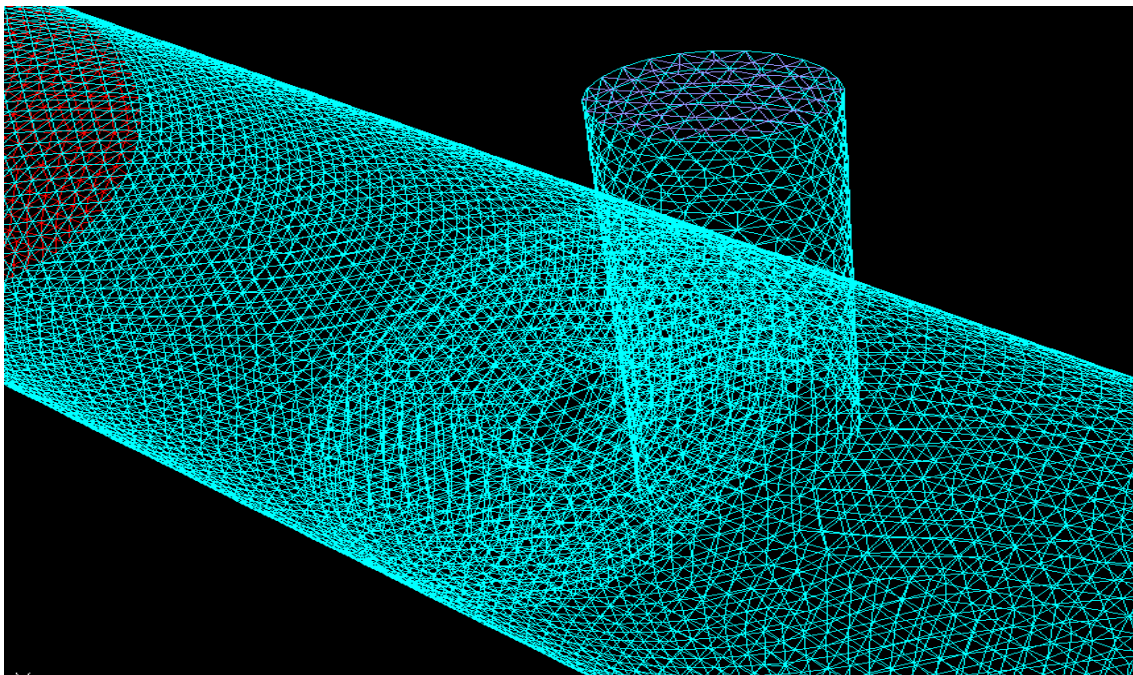
برای انجام تحلیل و مدلسازی جریان سیال از شبکه بندی با سازمان استفاده شده است. شبکه مورد استفاده در حدود ۱۰ میلیون سلول بوده که بر اساس این شبکه نتایج خواسته شده استخراج گردیده است. نمونه ای از شبکه بندی مورد تحلیل ارائه شده است.

از آنجا که نرم فزار فلوئنت یک نرم افزار تحلیلی می باشد و قدرت طراحی را ندارد لذا ابتدا لوله گردبادی در نرم افزار گمبیت ترسیم شده و سپس برای تحلیل به نرم فزار فلوئنت فرستاده می شود . شکل (۵-۱) لوله مدل شده را در نرم افزار گمبیت نشان می دهد .



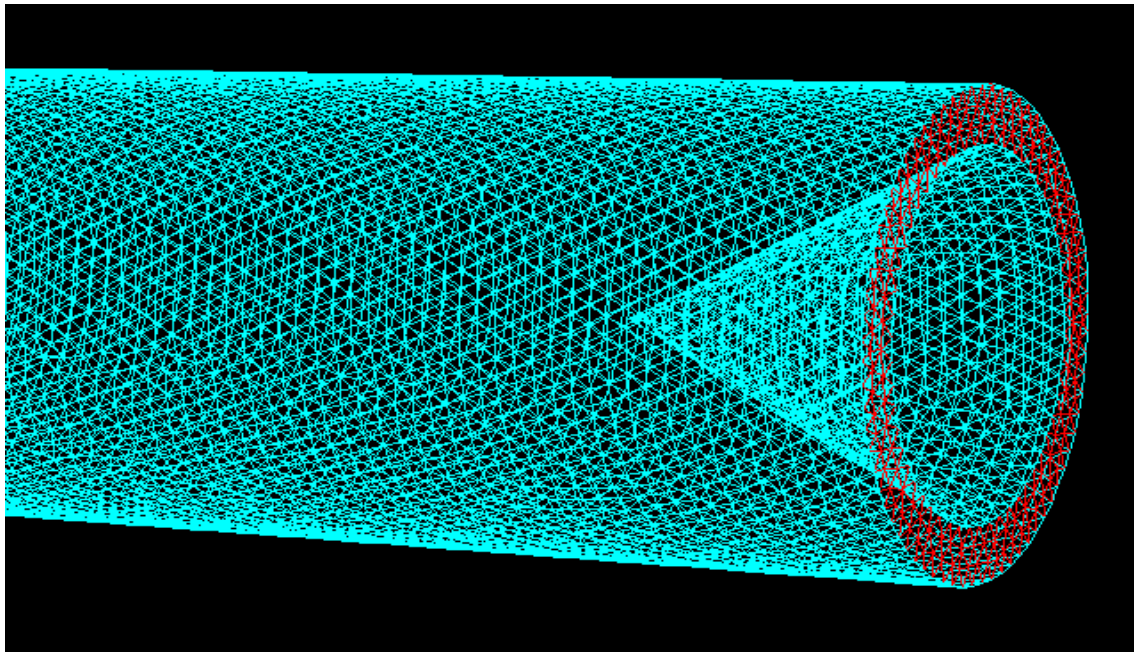
شکل ۱-۵ نمایی از لوله گردبادی مدل شده در نرم افزار گمبیت

همانطور که مشاهده می شود ، شکل (۲-۵) نحوی شبکه بندی نازل ورودی و اریفیس و قسمت سرد لوله گردبادی را در نرم افزار فلونت نشان می هد .



شکل ۲-۵ نمایی از شبکه اریفیس و نازل ورودی لوله گردبادی

شکل (۳-۵) نیز نحوی شبکه بندی شیر مخروطی و قسمت گرم لوله را در نرم افزار فلوئنت نشان می دهد . لازم به ذکر است که قست تیره تر که در انتهای لوله مشخص است ، نمایانگر گاز خروجی گرم می باشد .



شکل ۳-۵ نمایی از شبکه خروجی گرم لوله گردبادی

۲-۴-۵. شرایط مرزی

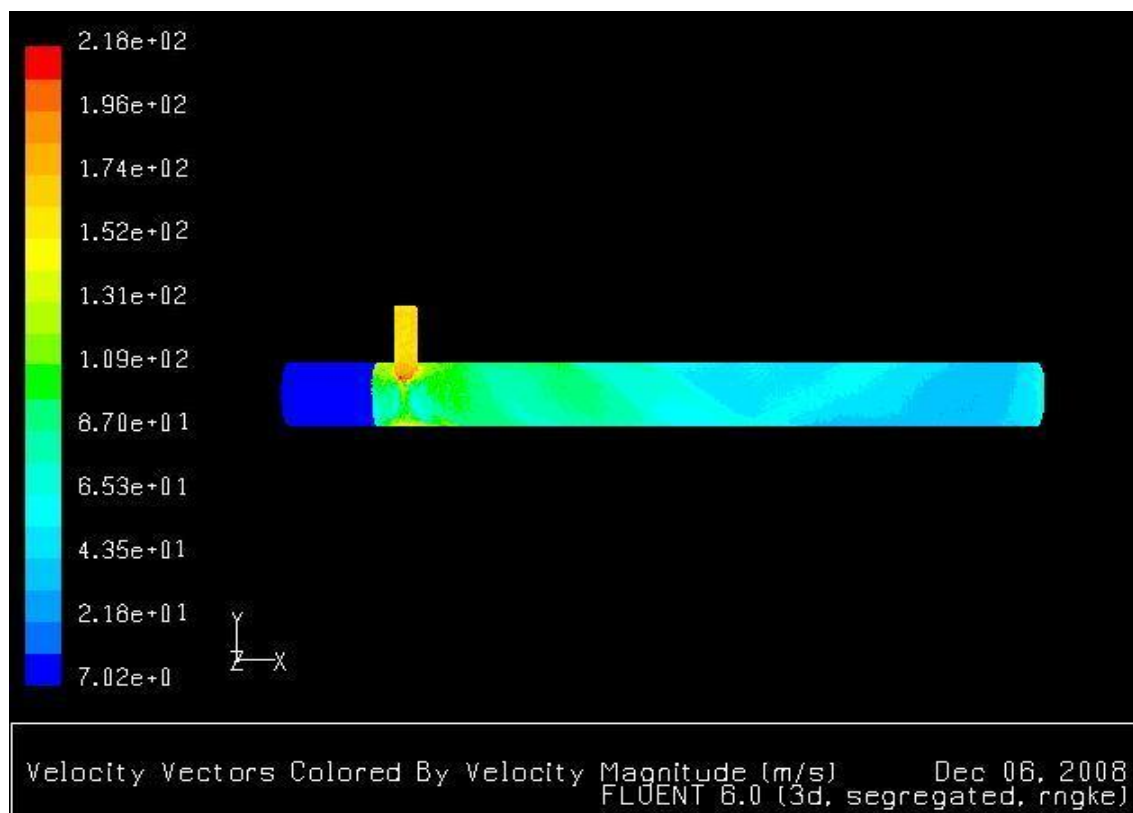
برای حل معادلات از روش حل معادلات تراکم پذیر به روش ضمنی استفاده شده است. از لحاظ زمانی شرایط را پایا^۱ فرض نموده ، به منظور گسسته سازی معادلات فشار از روش آپویند مرتبه ۲ و معادلات مومنتم از آپویند مرتبه ۲ استفاده شده است. شرایط مرزی در قسمت ورودی نازل ها تحت فشار

^۱ steady

ورودی^۱ بوده در خروجی های سرد و گرم از شرط مرزی فشار خروجی^۲ استفاده شده است که برای شرایط مرزی فوق شرایط دمایی خروجی لازم است که داده شود .

۳-۴-۵. تحلیل میدان جریان در لوله گردبادی

در این مدل اثرات تغییرات دمایی، فشار و سرعت برای نازل و فشار ورودی ۵ اتمسفر و قطر اریفیس ۸ mm با مشخصات طراحی شده مدل آزمایشگاهی بدست آمده است.

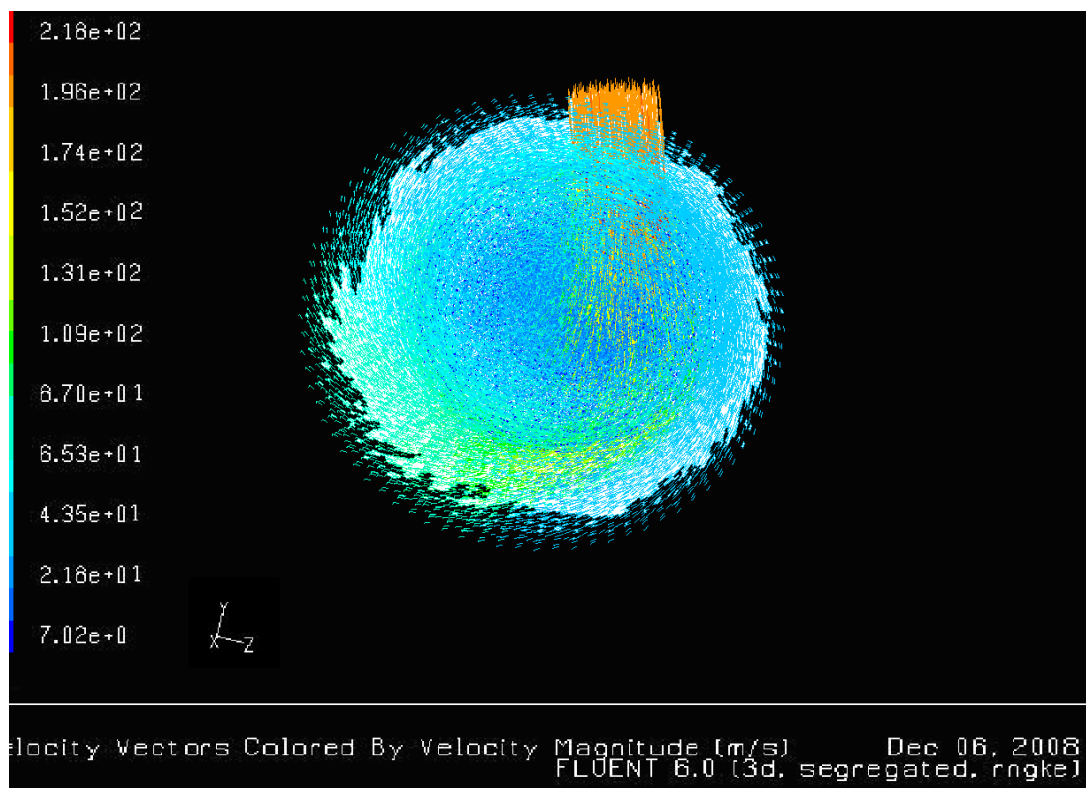


شکل ۴-۵ بردارهای سرعت در راستای طول گرم و سرد لوله گردبادی

^۱ pressure-Inlet
^۲ pressure-Outlet

شکل فوق بردارهای سرعت در قسمت های گرم و سرد لوله مشاهده می گردد. جریان چرخشی در لوله گرم ناشی از سرعت مماسی خروجی از نازل بوده و در قسمت لوله پیشروی می کند از طرف دیگر با توجه به شکل ، میزان سرعت چرخشی در لوله بسیار کم بوده و در این قسمت بعد از اریفیس یک جریان سرد با چرخشی خیلی کم وجود دارد.

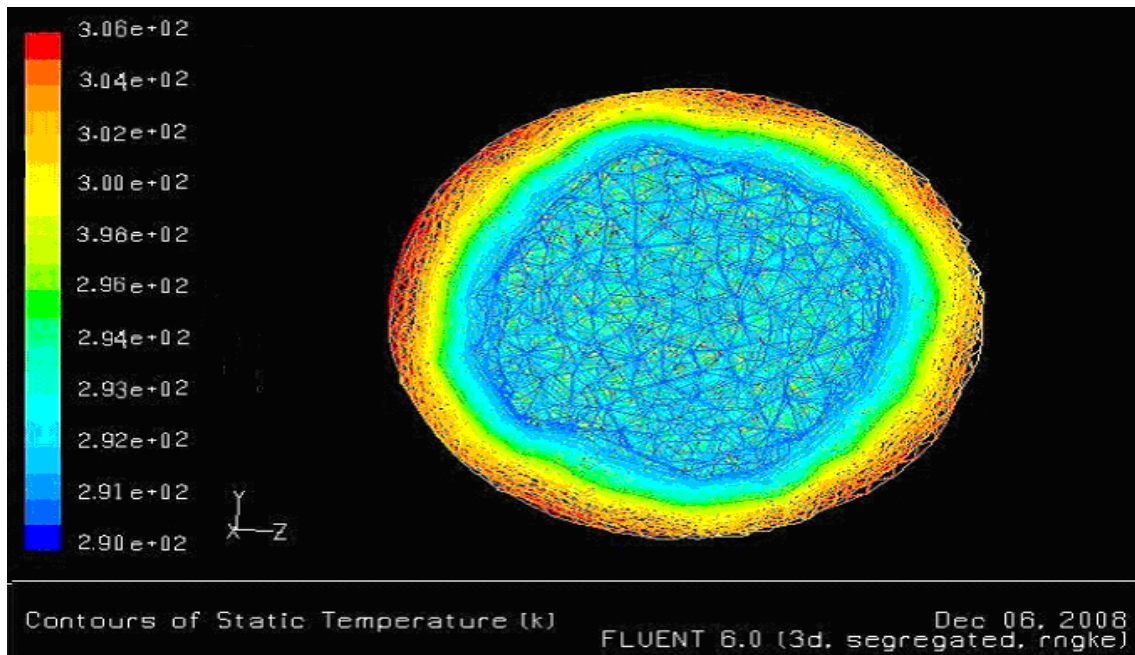
شکل (۵-۵) بردارهای سرعت در نزدیکی نازل در خود مقطع نازل نشان داده شده است. همان طور که مشاهده شده است میدان فشار در خروجی نازل تبدیل به سرعت شده و یک رژیم چرخشی وارد لوله گرم می شود . با توجه به شکل هسته چرخش در مرکز لوله واقع شده است که نشان دهنده جریان سرد در مرکز لوله می باشد .



شکل ۵-۵: اثر سرعت مماسی در چرخش المان های سیال

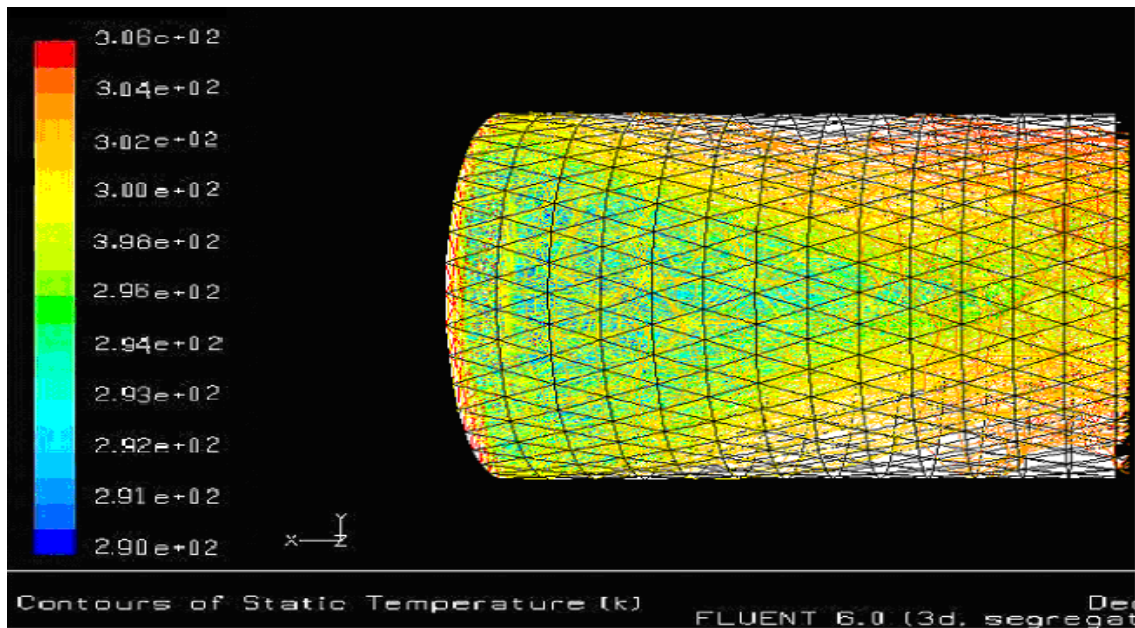
۴-۴-۵. بررسی تغییرات دمایی در لوله گردبادی

شکل (۶-۵) خروجی تغییرات دمایی در مقطع لوله نمایش می دهد. همان طور که انتظار می رود وجود هسته ی جریان سرد که خروجی از اریفیس بوده و دمای آن نسبت به دمای ورودی نازل کاهش یافته است ، در شکل نشان داده شده است .



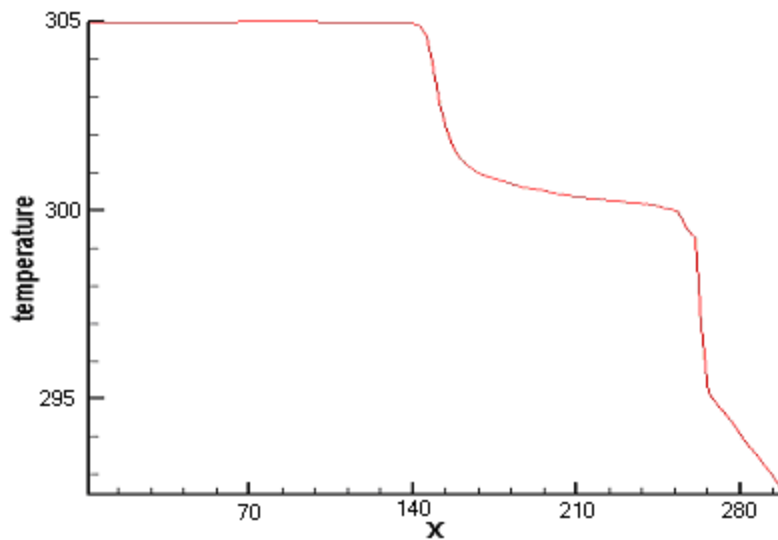
شکل ۶-۵ تغییرات دمایی در سمت لوله سرد

شکل (۷-۵) خروجی تغییرات دمایی در لوله گرم را نمایش می دهد. همان طور که انتظار می رود وجود هسته جریان گرم از اطراف مخروط می باشد در شکل نشان داده شده است .



شکل ۵-۷ تغییرات دمایی در سمت لوله گرم

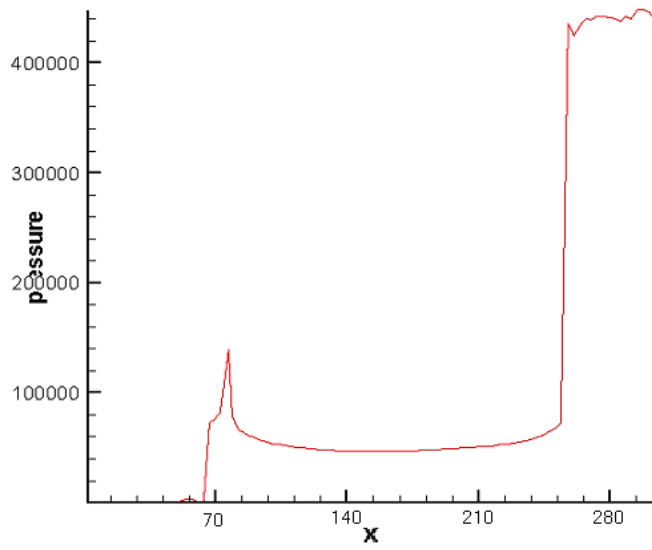
در شکل (۵-۸) تغییرات دمایی در کل لوله نشان داده شده است. همانطور که از شکل معلوم است شکستگی در نمودار فوق در مقطعی عبوری از اریفیس بوده است و تا انتهای لوله سرد دما کاهش یافته است. همچنین تغییرات دمایی که با شیب کمی در نمودار نشان داده می شود نشان دهنده ناحیه اختلاط جریان های گرم و سرد بوده است که دمای درون لوله گردبادی را کلویین و راستای طول لوله میلیمتر در نظر گرفته شده است .



شکل ۵-۸: نمودار تغییرات دما در طول لوله گردبادی

۵-۴-۵. بررسی تغییرات فشار در لوله گردبادی

شکل (۵-۹) تغییرات فشار در طول لوله گردبادی نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود تغییرات ناگهانی در قسمت نازل وجود دارد که ناشی از تغییرات سرعت در این مقاطع می باشد. مشابه با این موضوع در نواحی انتهای لوله گرم می باشد. تغییرات فشار در راستای لوله گردبادی در دو نقطه دارای تغییرات زیادی است که یکی در ناحیه اریفیس و نازل و دیگری در ناحیه شیر کنترل جریان می باشد.



شکل ۵-۹: تغییرات فشار در راستای لوله گردبادی

۶. فصل ششم:

نمودارها و نتایج به دست

آمده از آزمایشات

۶-۱. پارامترهای مورد مطالعه

هدف از انجام آزمایشات بر لوله گردابی به دست آوردن دمای خروجی سرد و دمای خروجی گرم ضمن تغییر حالت‌های شیر کنترل تویی است. این شیر کنترل در خروجی گرم تعبیه شده است. به ازاء تغیر دادن حالت‌های شیر می توان دبی خروجی جریان گرم را تغییر داد. به تبع آن ، دبی جریان سرد خروجی نیز تغییر خواهد کرد. با مقایسه این دماها در نهایت قادر خواهیم بود بهترین راندمان عملکرد که همان بیشترین اختلاف دما ها است را بدست آوریم.

مهمترین عامل تاثیر گذار بر راندمان لوله گردبادی برای یک شرایط هندسی و فشار ورودی ثابت نسبت جریان جرمی سرد به جریان جرمی ورودی μ_c است .

در این تحقیق این نسبت با توجه به اندازه گیریهای جریان جرمی سرد و گرم براحتی قابل محاسبه خواهد بود . همچنین اگر لوله گردبادی عایق فرض شود می توان با اعمال قانون اول ترمودینامیک بصورت رابطه (۳-۱) نیز μ_c به دست آورد .

برای اندازه گیری دبی گاز های خروجی سرد و گرم با نرم افزار اریفیس مترینگ^۱ و استفاده از استاندارد ISO5167-2 می توان دبی را تعیین کرد. به این ترتیب که با دادن پارمترهای مورد نیاز به نرم افزار از قبیل اختلاف فشار دو سر اریفیس ، قطر اریفیس و دمای گاز می توان دبی گاز را به دست آورد.

^۱ orifice metering

همانطور که گفته شد آزمایشات به دو گروه کلی تقسیم میشوند که گروه اول آزمایشات بر روی هوا و گروه دوم آزمایشات بر روی گاز طبیعی انجام گرفته است.

۶-۲. سیال عامل هوا و فشار ورودی آزمایش ۷,۸ بار

در ابتدا برای حصول اطمینان از وسایل اندازه گیری مورد استفاده به مقایسه نتایج بدست آمده برای ΔT_c و ΔT_h پرداخته می شود. در این مقایسه اختلاف دماهای ΔT_c و ΔT_h بر حسب μ_c رسم شده است. μ_c به دو روش محاسبه شده است که عبارتند از اندازه گیری با استفاده از جریان سنجها (روش تجربی) و با استفاده از معادله (۳-۹) برای هوا و (۳-۷) برای گاز طبیعی (چون گاز طبیعی را نمی توان گاز ایده آل در نظر گرفت). در این قسمت نتایج آزمایشگاهی به دست آمده برای ΔT_h و ΔT_c برای سه حالت را با نتایج تئوری مقایسه و دیاگرام های آنها را رسم شده است. در انتها نمودارهای تجربی به دست آمده برای بررسی اثر طول لوله و قطر اریفیس و یافتن بهترین حالت با هم مقایسه شده اند.

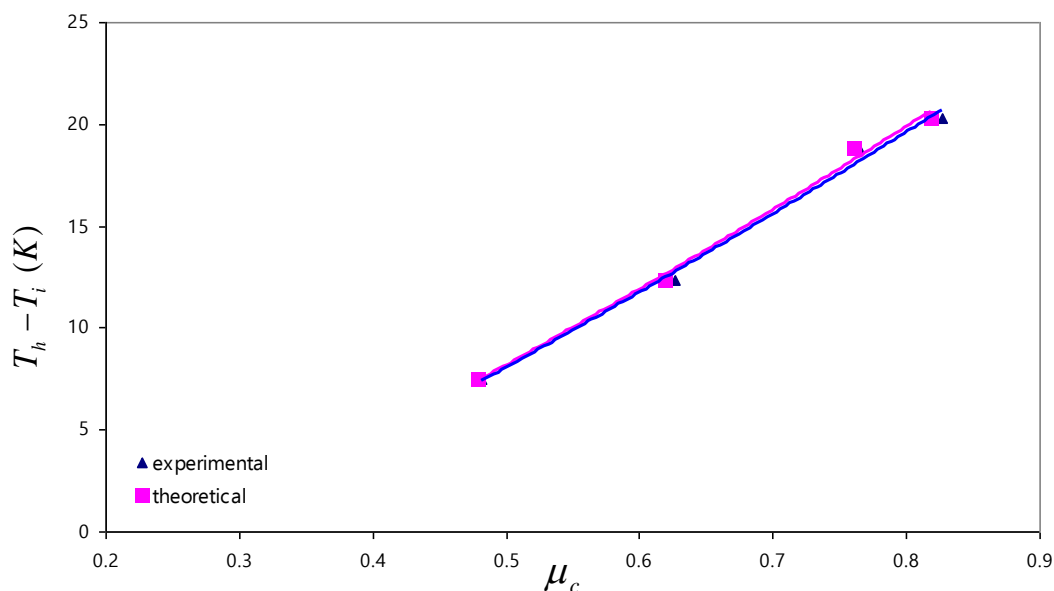
همچنین باید اشاره کرد که در تمام شکل‌های این قسمت، نقاط نشان دهنده نتایج تجربی می باشند.

همچنین بهترین منحنی نیز از این نقاط گذرانده شده تا تغییرات این نتایج واضحتر باشد.

۶-۲-۱. اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر و لوله با قطر ۲۵۰ میلیمتر

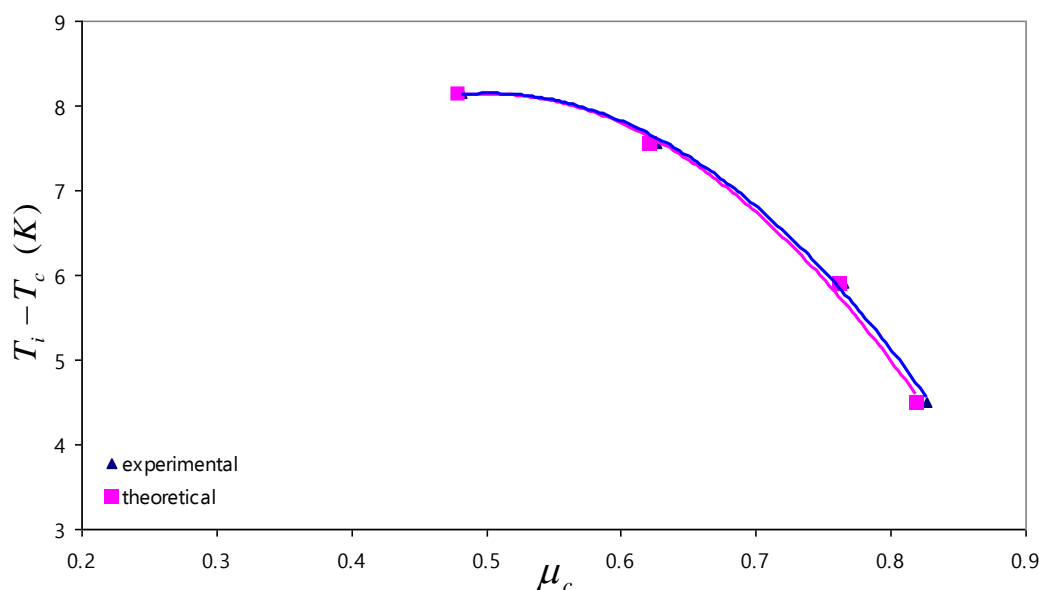
در این حالت قطر اریفیس سرد بیشترین مقدار خود یعنی ۱۷,۷ میلیمتر را دارا بوده و طول لوله گرم ۲۵۰ میلیمتر و فشار هوای ورودی ۷,۸ انتخاب شده است .

نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل نمایش داده شده است چنانچه مشاهده می شود دمای گرم با افزایش μ_c افزایش می یابد و بنظر می رسد که به یک ماکزیمم نزدیک شده است . حداکثر اختلاف دمای بوجود آمده در این حالت بیشتر از ۲۰ کلوین است. از نتایج قابل توجه دیگر، همخوانی خوب نتایج تجربی و تئوری برای μ_c است که نشان دهنده دقت خوب جریان سنجها در اندازه گیری جریان ها است.



شکل ۶-۱: مقایسه بین حالت تئوری و تجربی تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c

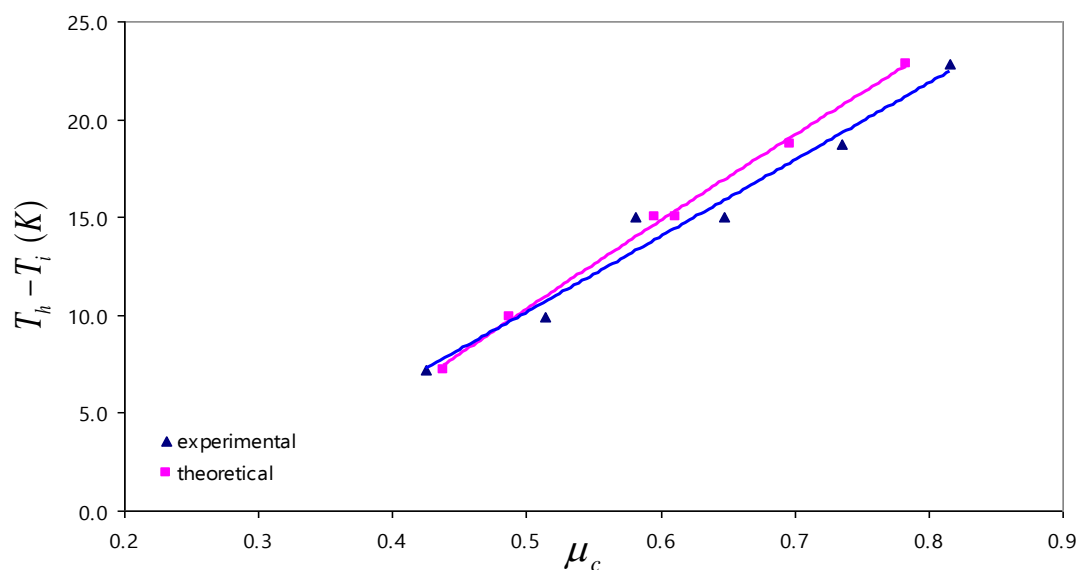
نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در شکل ۶-۲ نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود دمای سرد با افزایش μ_c کاهش می یابد و بنظر می رسد که به یک ماکزیمم در حداقل μ_c نزدیک شده است. از نتایج قابل توجه دیگر، همخوانی خوب نتایج تجربی و تئوری برای μ_c است که نشان دهنده دقت خوب جریان سنجها در اندازه گیری جریان است.



شکل ۶-۲: مقایسه بین حالت تئوری و تجربی تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c

۶-۲-۲. اریفیس با قطر ۱۲,۱ ولوله با طول ۲۵۰ میلیمتر

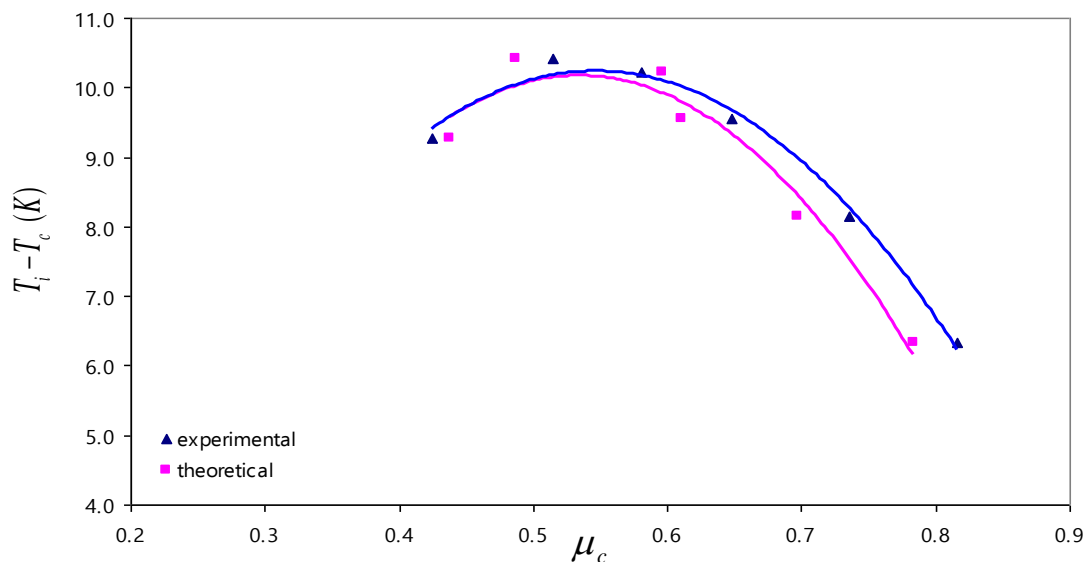
در این حالت قطر اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر می باشد و طول لوله گرم ۲۵۰ میلیمتر می باشد و فشار هوای ورودی ۷,۸ انتخاب شده است. نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود دمای گرم با افزایش μ_c افزایش می یابد و به یک ماکزیمم نزدیک می شود. اختلاف اندک بین این نتایج را می توان به عایق نبودن لوله گردبادی نسبت داد.



شکل ۳-۶: مقایسه بین حالت تئوری و تجربی تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c

نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است . در این جا دمای

سرد با افزایش μ_c کاهش می یابد و حداکثر اختلاف دما به بیش از ۱۰ کلوین رسیده است .



شکل ۴-۶: مقایسه بین حالت تئوری و تجربی تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c

نتیجه گیری :

با توجه به شکل‌های ۱-۶ تا ۴-۶ مربوط به این قسمت و هدف اصلی از این شکل‌ها نتایج ذیل را میتوان

به عنوان نمود :

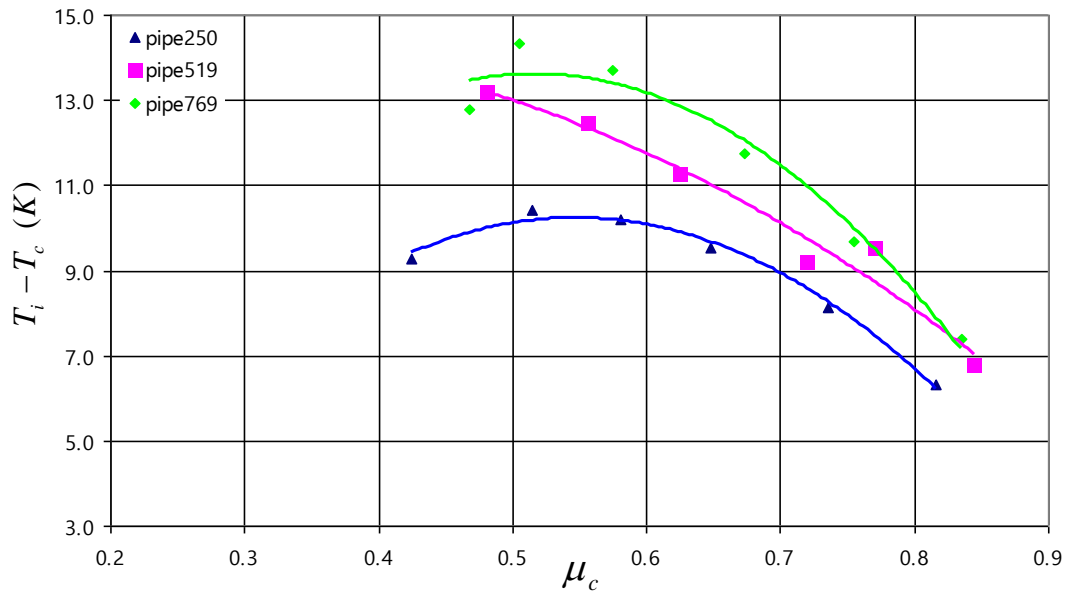
- با توجه به همخوانی خوب نتایج برای نسبت دبی خروجی سرد محاسبه شده توسط جریان سنجها و رابطه تئوری (۳-۹) ، میتوان نتیجه گرفت که وسایل اندازه گیری از دقت خوبی برخوردار بوده اند.
- حداکثر میزان جدایی دمایی بین خروجی گرم و دمای ورودی در هر حالت در مقدار معینی (حالتی که نسبت دبی سرد خروجی بین ۸ تا ۵ است) اتفاق می افتد و بعد از آن مقدار آن کاهش می یابد .
- حداکثر میزان جدایی دمایی بین دمای ورودی و خروجی سرد در هر حالت در مقدار معینی (حالتی که نسبت دبی سرد خروجی بین ۵ تا ۲ است) اتفاق می افتد و بعد از آن مقدار آن کاهش می یابد.
- با افزایش نسبت دبی خروجی سرد دمای خروجی گرم تا مقداری معین افزایش می یابد.
- با کاهش نسبت دبی خروجی سرد دمای خروجی سرد تا مقداری معین افزایش می یابد.

۳-۲-۶. بررسی اثر طول لوله گرم بر عملکرد لوله گردبادی

چنانچه اشاره شد یکی از پارامترهای موثر بر عملکرد لوله گردبادی طول لوله گرم می باشد. در این قسمت اثر طول لوله بر راندمان لوله گردبادی برای سه قطر اریفیس سرد ارائه و بررسی شده است و نتایج آزمایشات انجام شده برای هر اریفیس در طول های مختلف لوله با هم مقایسه و تحلیل شده اند. باید اشاره کرد که فشار ورودی ۷,۸ بار می باشد و سیال عامل هوا است.

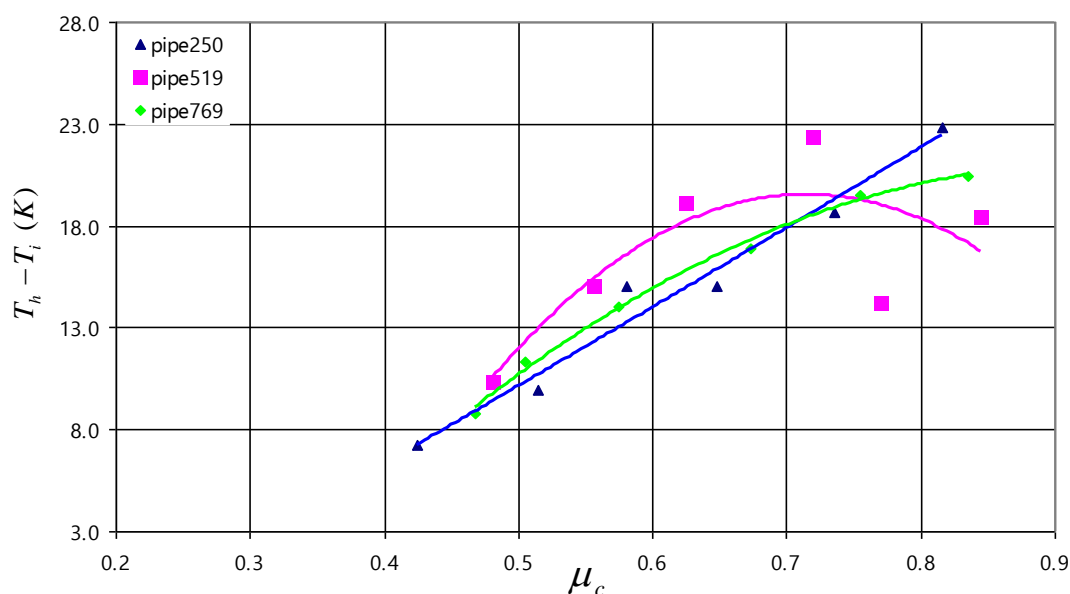
۳-۲-۶-۱) قطر اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر

نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است . چنانچه مشاهده می شود دمای سرد با افزایش μ_c کاهش می یابد و بنظر می رسد که به یک مینیمم در حداقل μ_c نزدیک شده است. حداکثر اختلاف دما در این حالت به ۱۴ کلوین رسیده است که برای لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر اتفاق افتاده است. بنابراین میتوان گفت که افزایش طول لوله باعث بهبود عملکرد لوله گردبادی در کاهش دمای سرد شده است.



شکل ۵-۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر

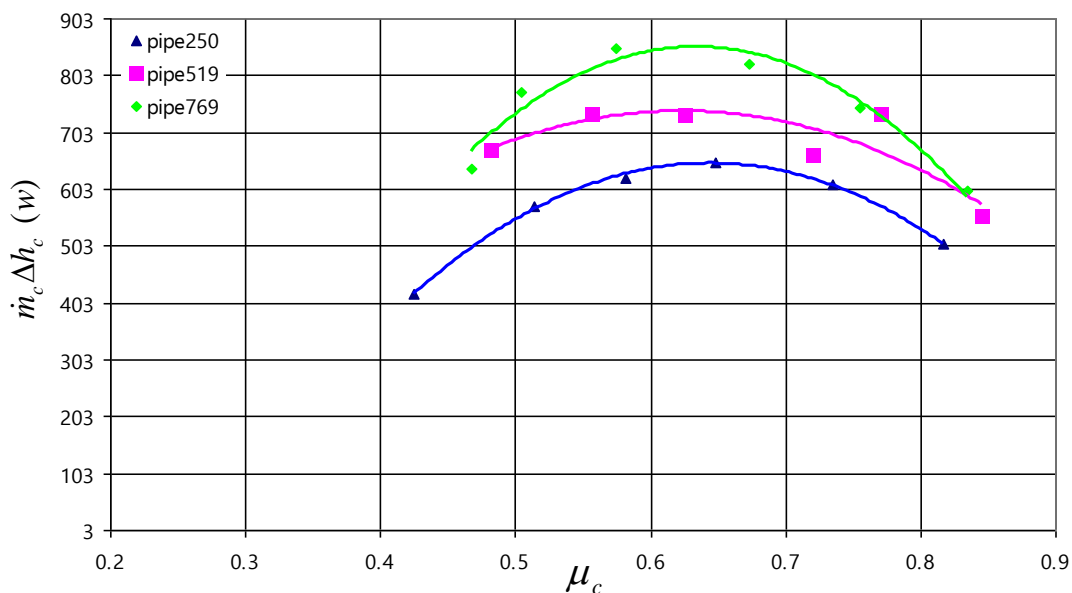
نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل برای این حالت نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود دمای گرم با افزایش μ_c افزایش می یابد و به یک ماکزیمم نزدیک می شود. در μ_c کمتر لوله بلندتر باعث ایجاد دمای گرم بیشتر و در μ_c بیشتر این لوله کوتاهتر است که دمای بیشینه بالاتری ایجاد میکند. حداکثر اختلاف دما در این حالت نزدیک ۲۳ کلوین است.



شکل ۶-۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_h برحسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر

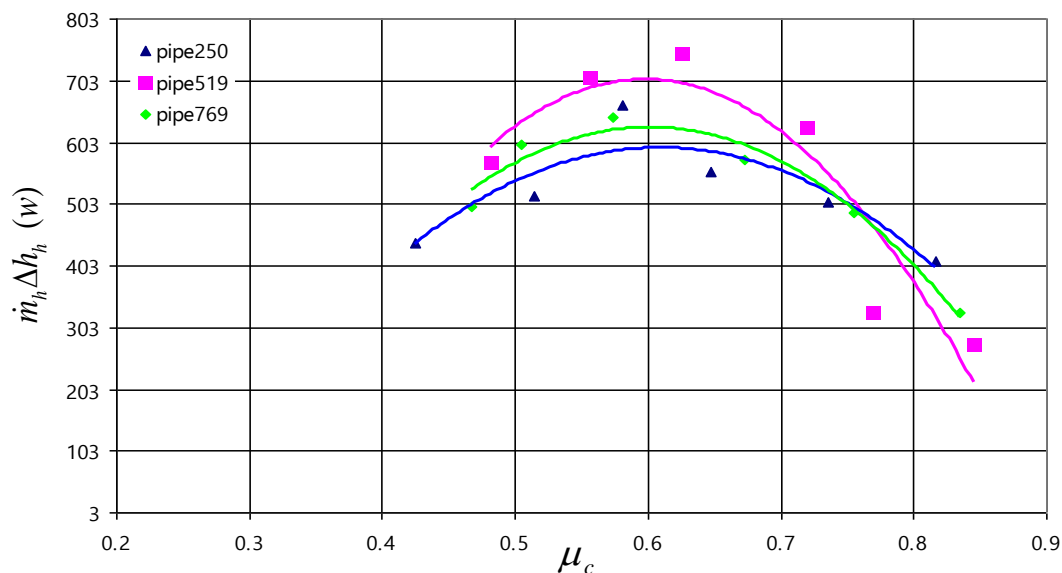
شکل ذیل میزان بار سرمایی ایجاد شده توسط جریان سرد را نشان میدهد. چنان که مشخص است

بیشترین بار سرمایی مربوط به لوله بلندتر می باشد.



شکل ۶-۷: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار سرمایی برحسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر

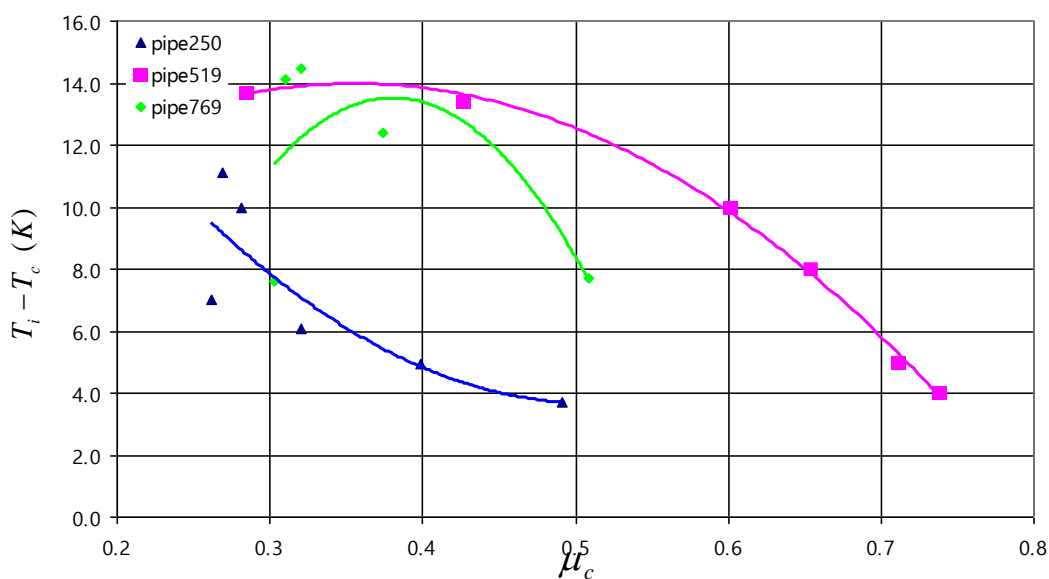
شکل ذیل میزان بار گرمایی ایجاد شده توسط جریان گرم را نشان میدهد. چنان که مشخص است بیشترین بار گرمایی به μ_c مربوط می باشد و برای μ_c مختلف متفاوت است .



شکل ۶-۸: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار گرمایی برحسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر

۶-۲-۳-۲ قطر اریفیس ۵ میلیمتر

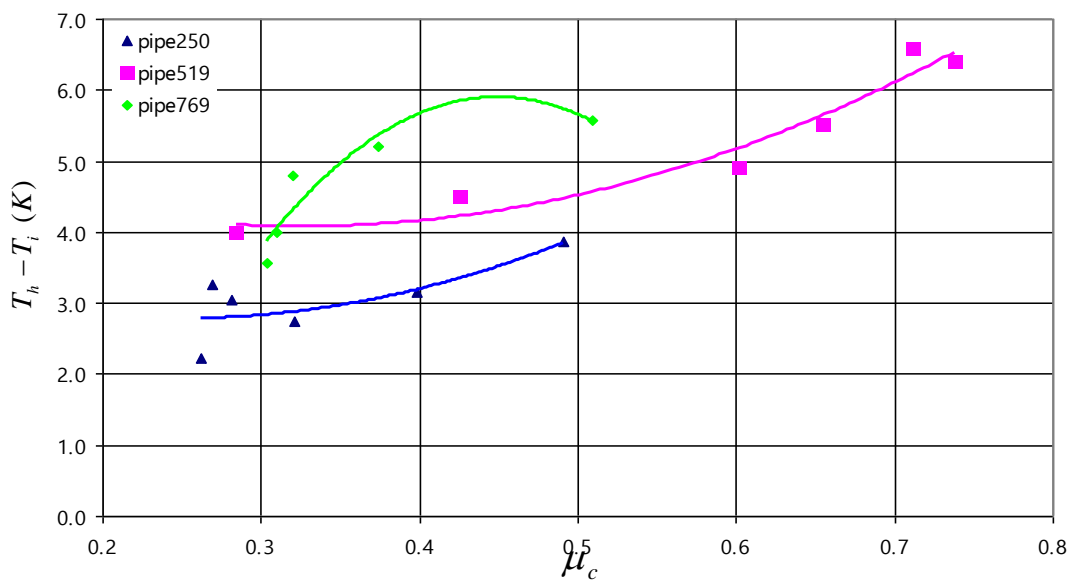
نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است . چنانچه مشاهده می شود دمای سرد با افزایش μ_c کاهش می یابد و به یک مینیمم در حداقل μ_c نزدیک شده است. حداکثر اختلاف دما در این حالت به ۱۴ کلوین رسیده است که برای لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر اتفاق افتاده است. بنابراین میتوان گفت که افزایش طول لوله باعث بهبود عملکرد لوله گردبادی در کاهش دمای سرد شده است.



شکل ۶-۹: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۵ میلیمتر

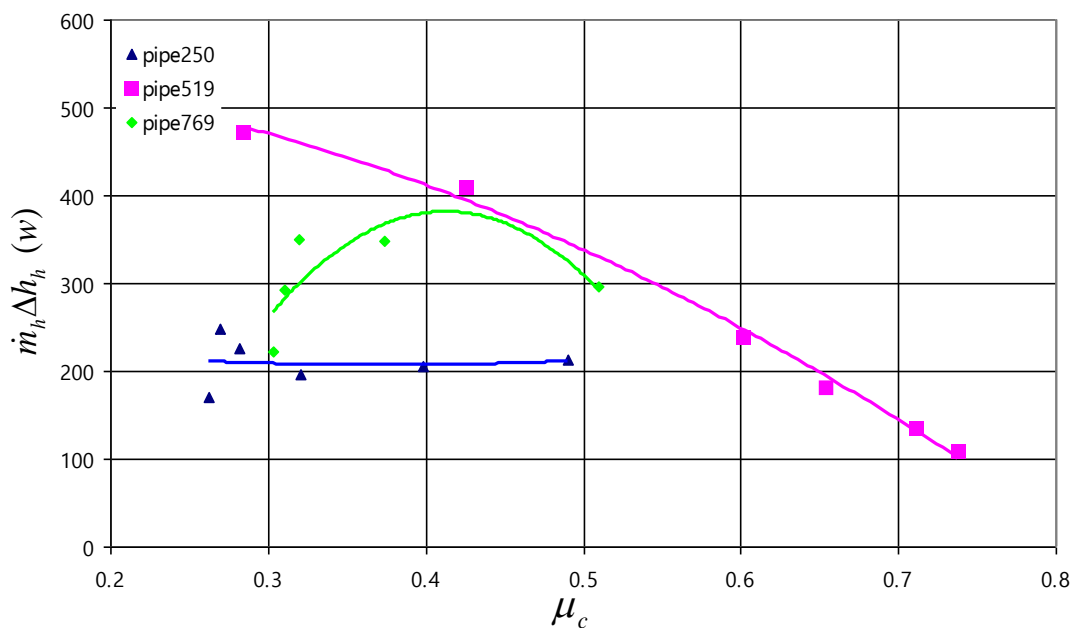
نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل برای این حالت نمایش داده شده است . ملاحظه می

شود بیشترین اختلاف دما مربوط به لوله بلندتر است که حداکثر اختلاف دما ی آن ۶,۵ کلوین است.



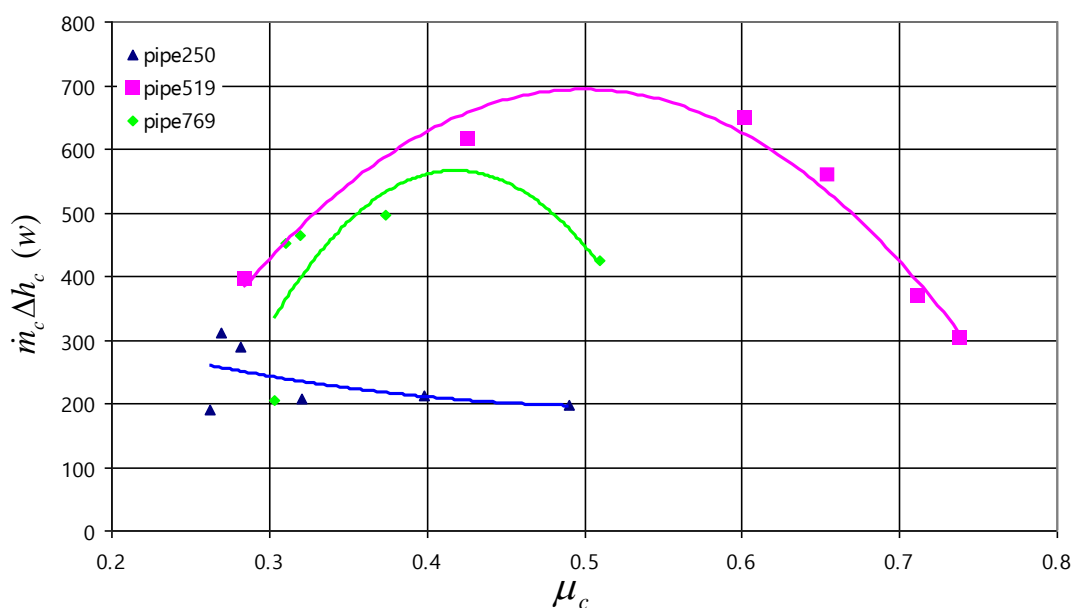
شکل ۶-۱۰: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۵ میلیمتر

شکل ذیل میزان بار گرمایی ایجاد شده توسط جریان گرم را نشان میدهد. چنان که مشخص است بیشترین بار گرمایی به μ_c مربوط می باشد و برای μ_c مختلف ، متفاوت است ولی بطور کلی برای لوله میانی و بلندتر بیشتر است.



شکل ۶-۱۱: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۵ میلیمتر

شکل ذیل میزان بار سرمایی ایجاد شده توسط جریان سرد را نشان میدهد. چنان که مشخص است بیشترین بار سرمایی مربوط به لوله میانی می باشد. در هر مورد یک ماکزیمم بار سرمایی در یک نسبت دبی خروجی سرد بوجود می آید .



شکل ۶-۱۲: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۵ میلیمتر

۶-۲-۳-۳ قطر اریفیس ۱۷,۷ میلیمتر

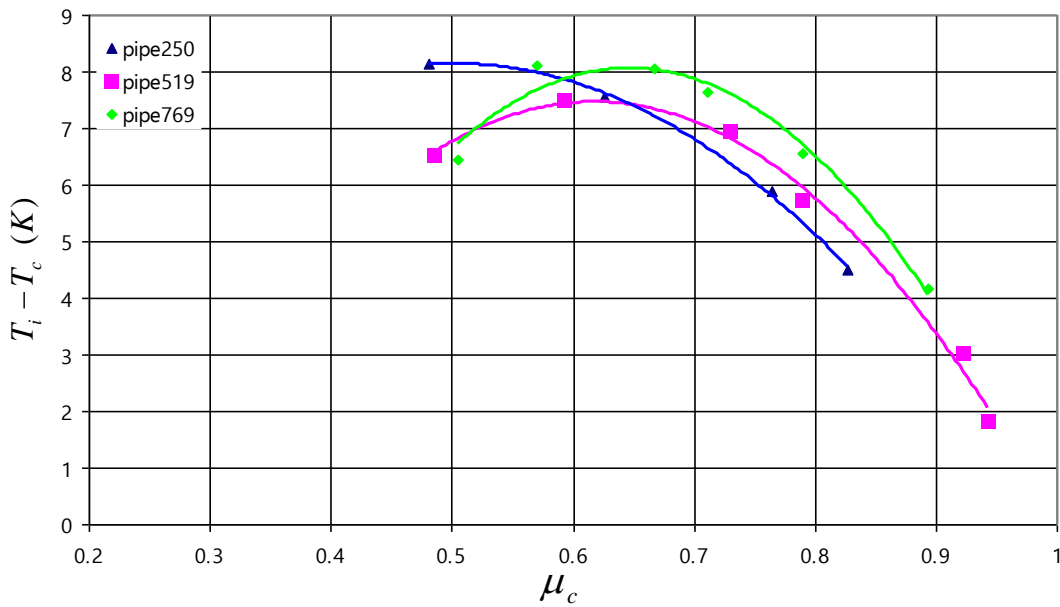
نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده

می شود دمای سرد با افزایش μ_c افزایش می یابد و به یک مینیمم در حداقل μ_c نزدیک شده است.

حداکثر اختلاف دما در این حالت به بیشتر از ۸ کلوین رسیده است که برای لوله گرم با ۲۵۰ میلیمتر

اتفاق افتاده است. هرچند باید اشاره کرد که تفاوت اختلاف دماها برای این حالت برای طول های

مختلف ناچیز به نظر می رسد.



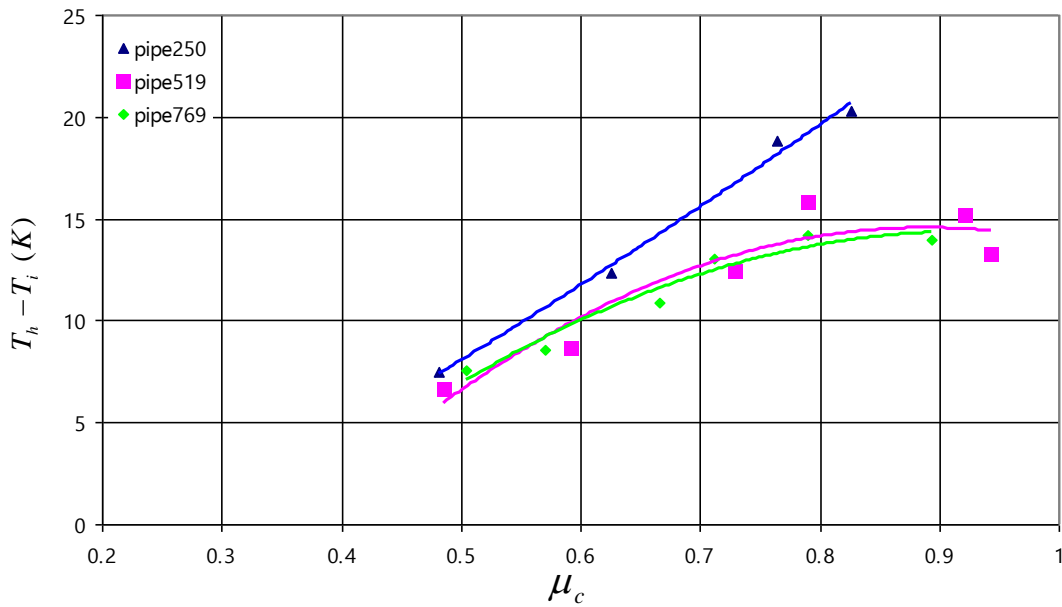
شکل ۶-۱۳: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_C بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۷٫۷ میلیمتر

نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل برای این حالت نمایش داده شده است چنانچه مشاهده

می شود دمای گرم با افزایش μ_c افزایش می یابد و به یک ماکزیمم نزدیک می شود. بیشترین

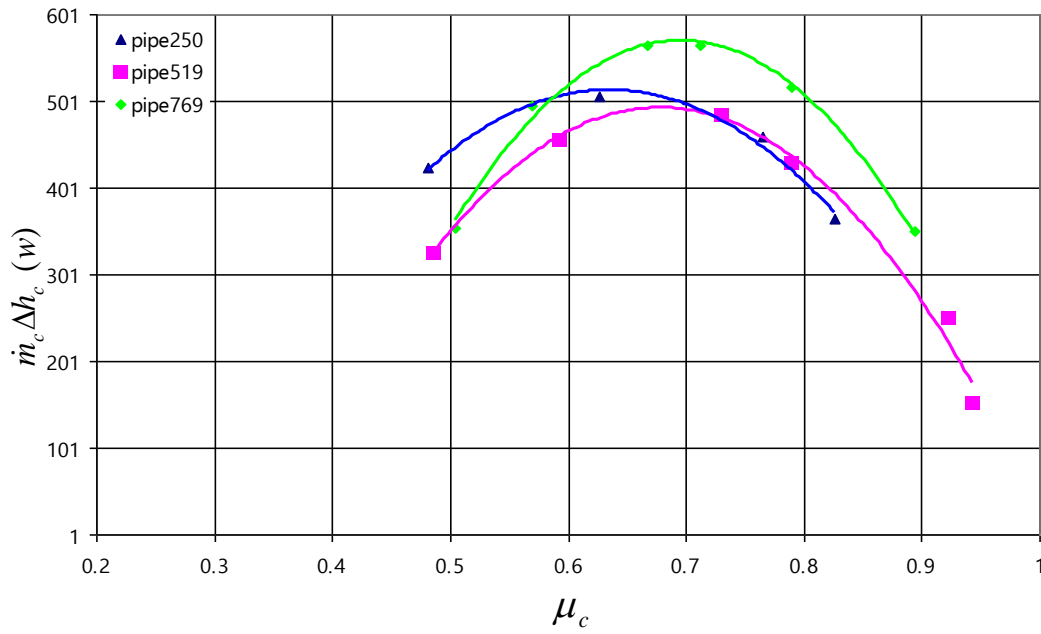
اختلاف دما مربوط به لوله کوتاهتر است. هر چند که باید اشاره کرد که بنظر می رسد اثر طول لوله

در این حالت چندان موثر بنظر نمی رسد. حداکثر اختلاف دما در این حالت ۲۰ کلوین است .



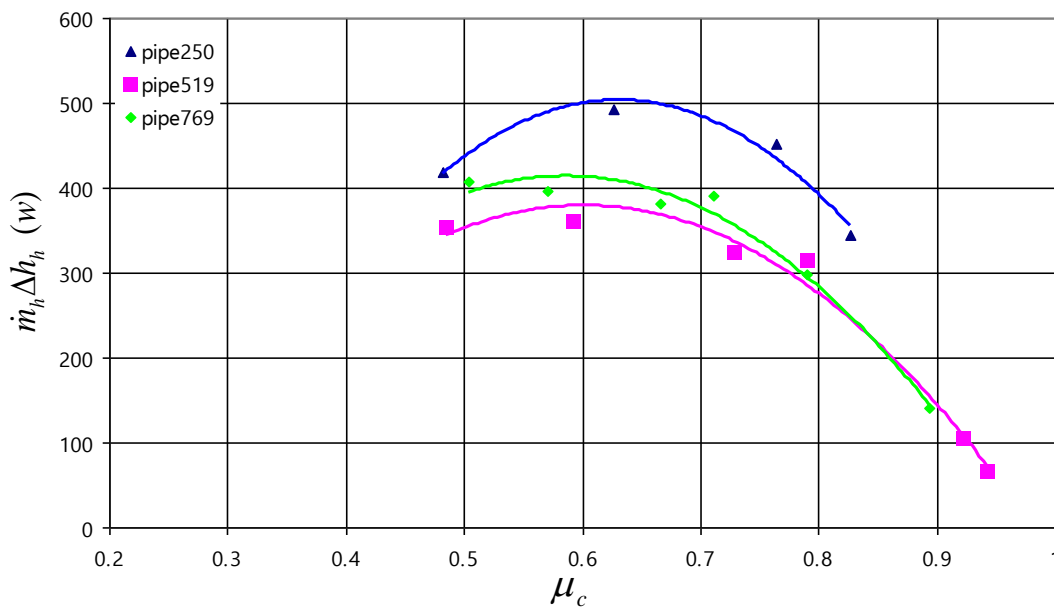
شکل ۶-۱۴: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر

شکل ذیل میزان بار سرمایی ایجاد شده توسط جریان سرد را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود ، بیشترین بار سرمایی مربوط به لوله بلندتر می باشد . در هر مورد یک ماکزیمم بار سرمایی در نسبت دبی خروجی سرد در حدود ۷. به وجود می آید که بعد از این نقطه میزان بار سرمایی کاهش می یابد .



شکل ۶-۱۵: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار سرمایی برحسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر

شکل ذیل میزان بار گرمایی ایجاد شده توسط جریان گرم را نشان میدهد.



شکل ۶-۱۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار سرمایی برحسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر

نتیجه گیری

با توجه به شکل‌های مربوط به این قسمت، نتایج حاصل به شرح ذیل می باشند:

- برای اریفیس با قطر ۵ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین خروجی گرم و ورودی در طول گرم ۵۱۹ میلیمتر اتفاق می افتد .
- برای اریفیس با قطر ۵ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین ورودی و خروجی سرد بطور کلی در طول گرم ۷۶۹ میلیمتر اتفاق می افتد .
- برای اریفیس با قطر ۵ میلیمتر بیشترین بار گرمایی را لوله با طول گرم ۵۱۹ دارا می باشد.
- بنابراین برای اریفیس با قطر ۵ میلیمتر لوله با طول گرم ۵۱۹ کارایی بهتری دارد .
- برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین خروجی گرم و ورودی در لوله میانی اتفاق می افتد. هر چند لوله بلندتر نیز رفتاری نزدیک دارد .
- برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین ورودی و خروجی سرد در طول گرم ۷۶۹ میلیمتر اتفاق می افتد .
- برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر بیشترین بار سرمایی مربوط به لوله با طول گرم ۷۶۹ و بیشترین بار گرمایی به وجود آمده مربوط به لوله با طول گرم ۵۱۹ می باشد .

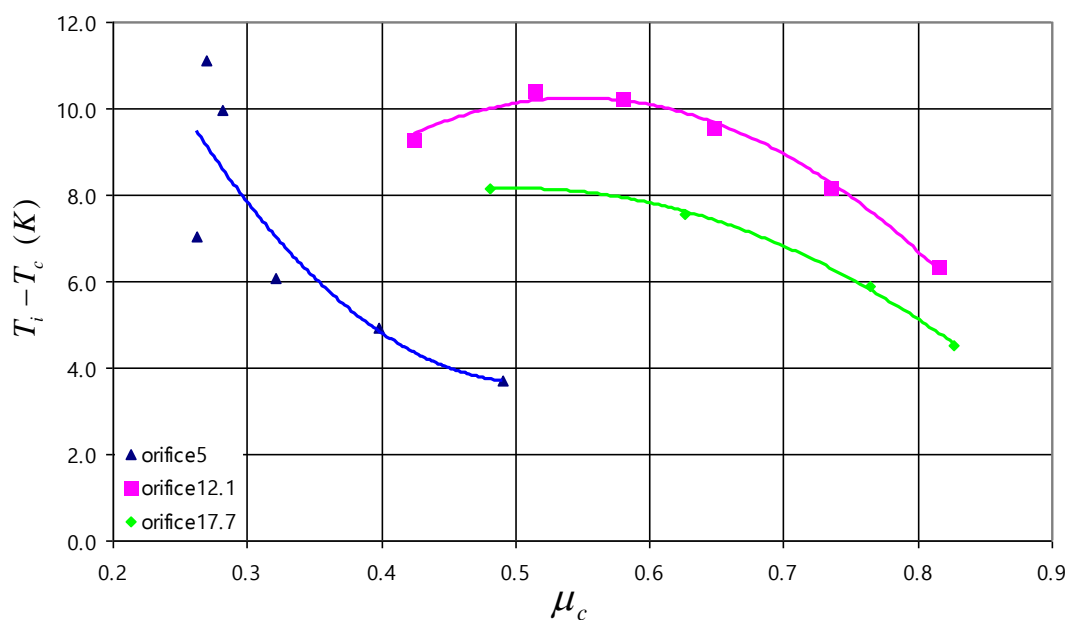
- بنابراین برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر عملکرد لوله میانی و سپس بلندتر مناسب تر است.
- برای اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین خروجی گرم و ورودی در طول گرم ۲۵۰ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین ورودی و خروجی سرد در طول گرم ۲۵۰ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر بیشترین بار گرمایی از دست داده مربوط به لوله با طول گرم ۲۵۰ و بیشترین بار گرمایی به به وجود آمده را لوله با طول گرم ۷۶۹ میلیمتر دارا می باشد.
- بنابراین برای اریفیس با قطر ۱۷,۷ لوله کوتاهتر عملکرد مناسب تری دارد.

۴-۲-۶. بررسی اثر قطر اریفیس بر عملکرد لوله گردبادی

در این قسمت به بررسی قطر اریفیس بر عملکرد لوله گردبادی می پردازیم . برای بررسی اثر قطر اریفیس بر راندمان لوله گردبادی نتایج آزمایشات انجام شده را برای هرطول لوله در قطر های اریفیس مختلف با هم مقایسه می کنیم.

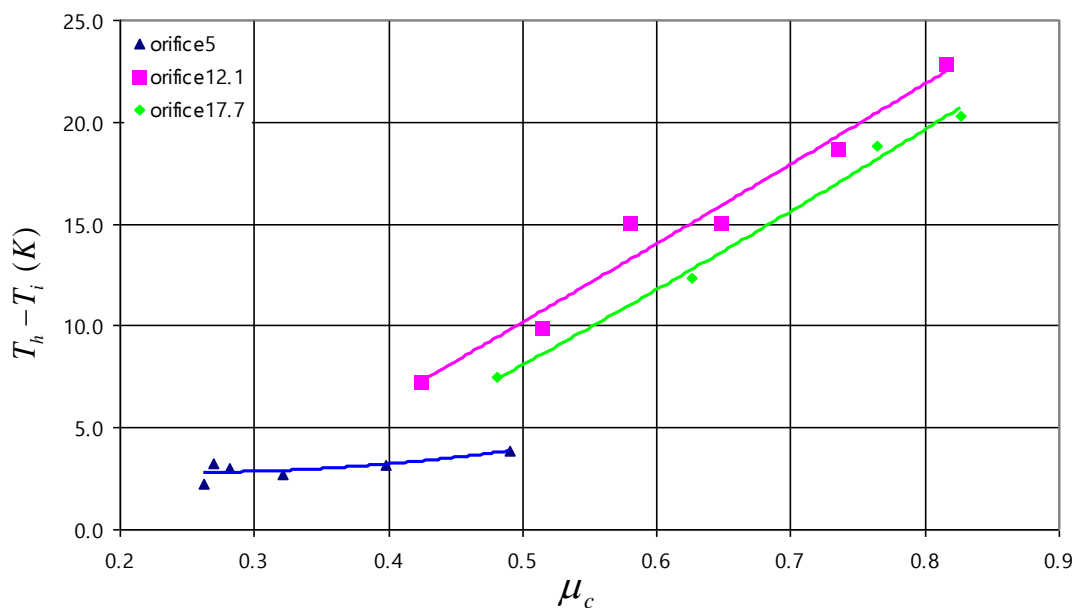
۶-۲-۴-۱) طول لوله گرم ۲۵۰ میلیمتر

نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود دمای سرد با افزایش μ_c افزایش می یابد و به یک مینیمم در حداقل μ_c نزدیک شده است. حداکثر اختلاف دما در این حالت به ۱۱ کلوین رسیده است که برای اریفیس با قطر ۵ میلیمتر اتفاق افتاده است. هرچند باید اشاره کرد که اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر عملکرد بهتری برای μ_c بالاتر دارد.



شکل ۶-۱۷: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم ۲۵۰ میلیمتر

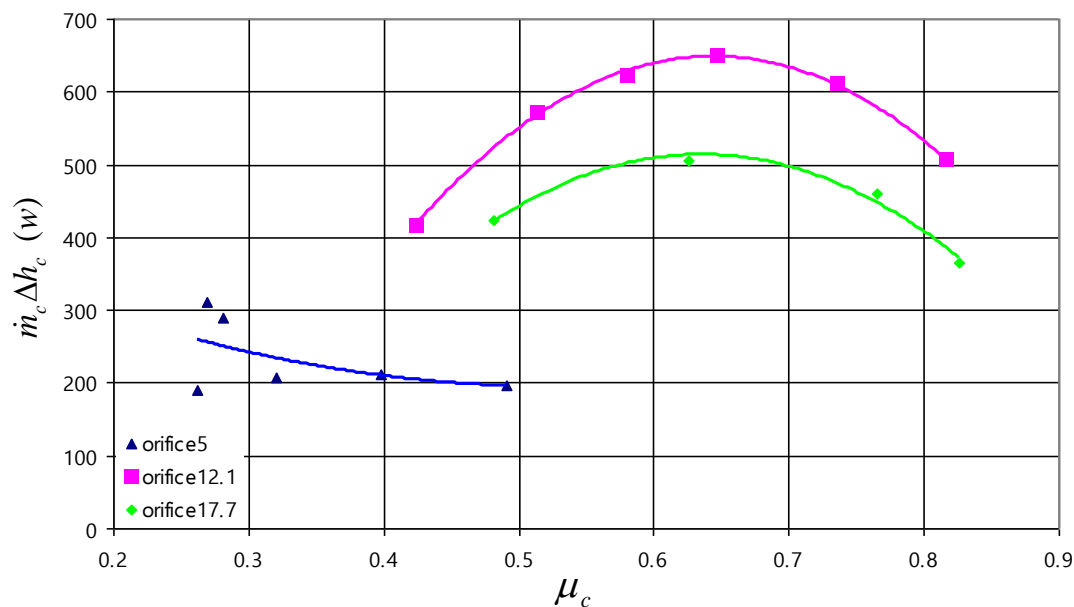
نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل برای این حالت نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود دمای گرم با افزایش μ_c افزایش می یابد و به یک ماکزیمم نزدیک می شود. بیشترین اختلاف دما مربوط به لوله اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر است. حداکثر اختلاف دما در این حالت ۲۳ کلوین است.



شکل ۶-۱۸: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم ۲۵۰ میلیمتر

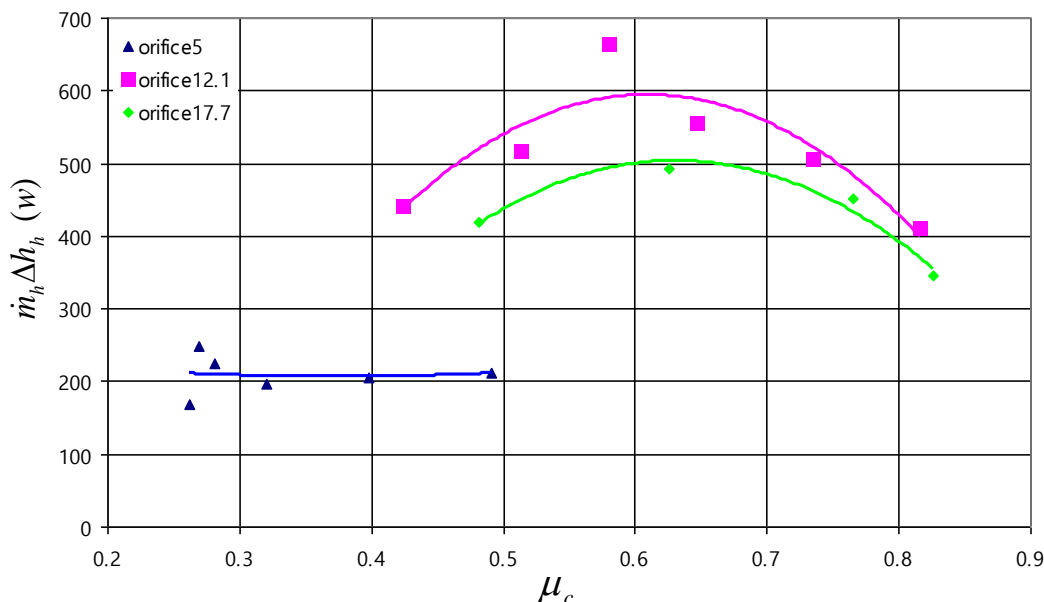
شکل ذیل میزان بار سرمایی ایجاد شده توسط جریان سرد را نشان میدهد. چنان که مشخص است

بیشترین بار سرمایی مربوط اریفیس ۱۲٫۱ میلیمتر می باشد .



شکل ۶-۱۹: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم ۲۵۰ میلیمتر

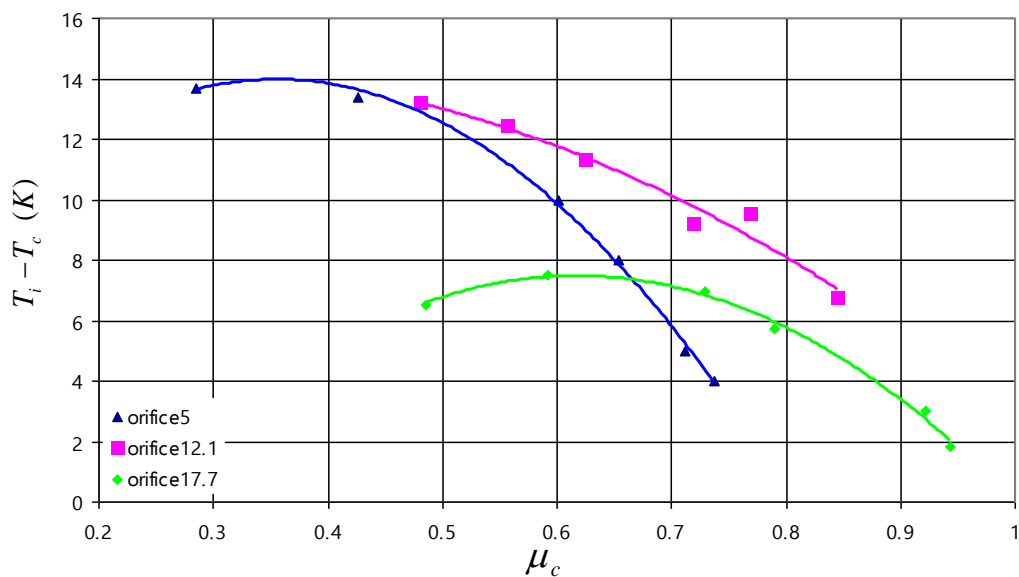
شکل ۶-۲۰ میزان بار گرمایی ایجاد شده توسط جریان گرم را نشان میدهد. چنان که مشخص است بیشترین بار گرمایی مربوط به اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر است.



شکل ۶-۲۰: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم ۲۵۰ میلیمتر

۶-۲-۴-۲ طول لوله گرم ۵۱۹ میلیمتر

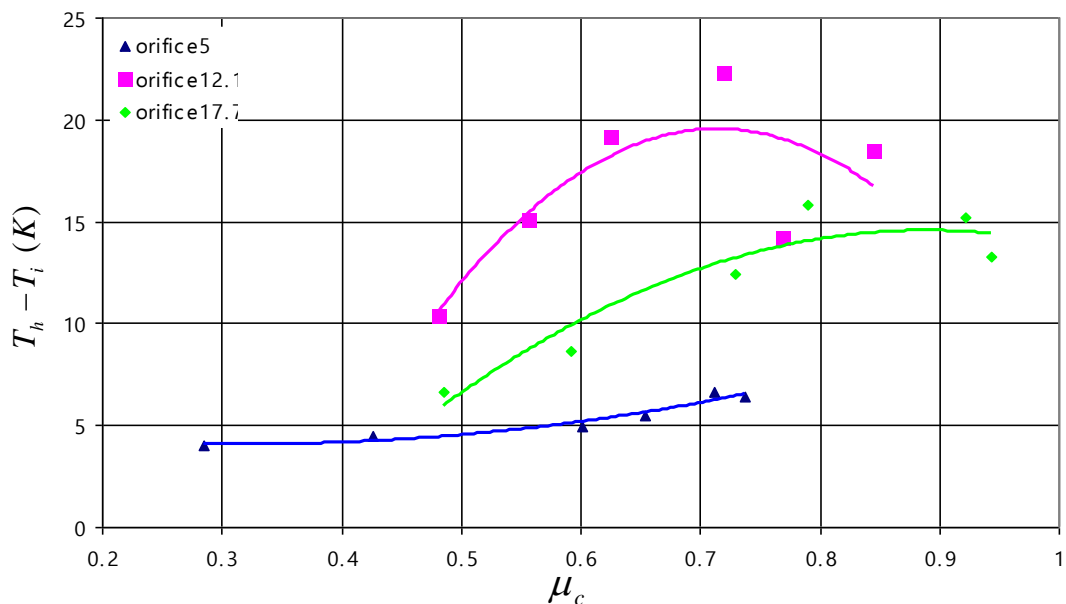
نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود دمای سرد با افزایش μ_c افزایش می یابد و بنظر می رسد که به یک مینیمم در حداقل μ_c نزدیک شده است. حداکثر اختلاف دما در این حالت به ۱۲ کلوین رسیده است که برای اریفیس ۵ میلیمتر اتفاق افتاده است. هر چند در μ_c بزرگتر از ۰,۵ اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر عملکرد بهتری دارد.



شکل ۶-۲۱: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم ۵۱۹ میلیمتر

نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل برای این حالت نمایش داده شده است . چنانچه مشاهده

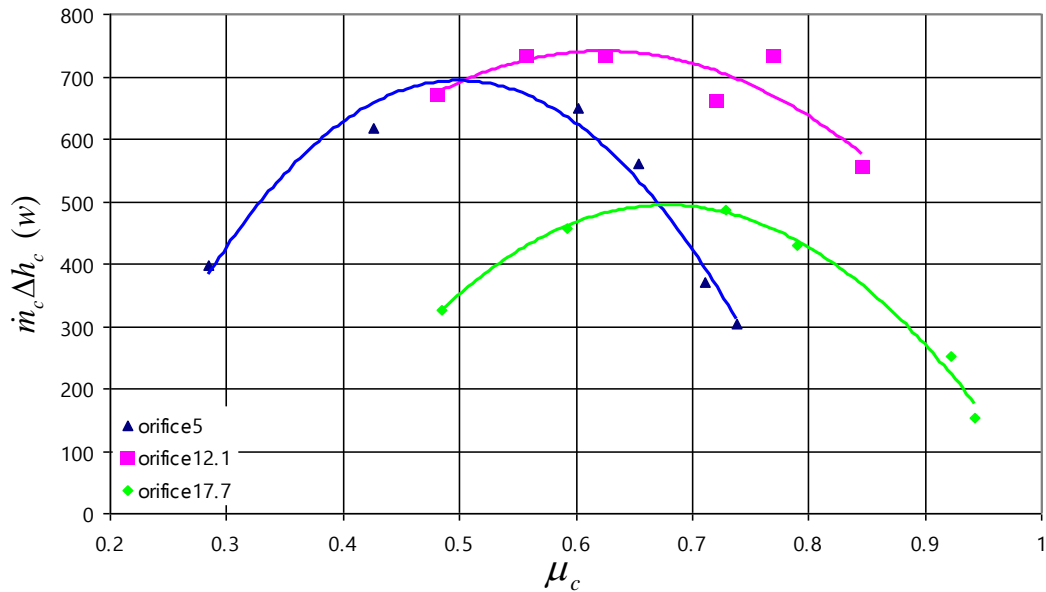
می شود دمای گرم با افزایش μ_c افزایش می یابد و به یک ماکزیمم نزدیک می شود.



شکل ۶-۲۲: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم ۵۱۹ میلیمتر

شکل ذیل میزان بار سرمایی ایجاد شده توسط جریان سرد را نشان میدهد. چنان که مشخص است بیشترین بار سرمایی مربوط اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر می باشد. در هر مورد یک ماکزیمم بار سرمایی در

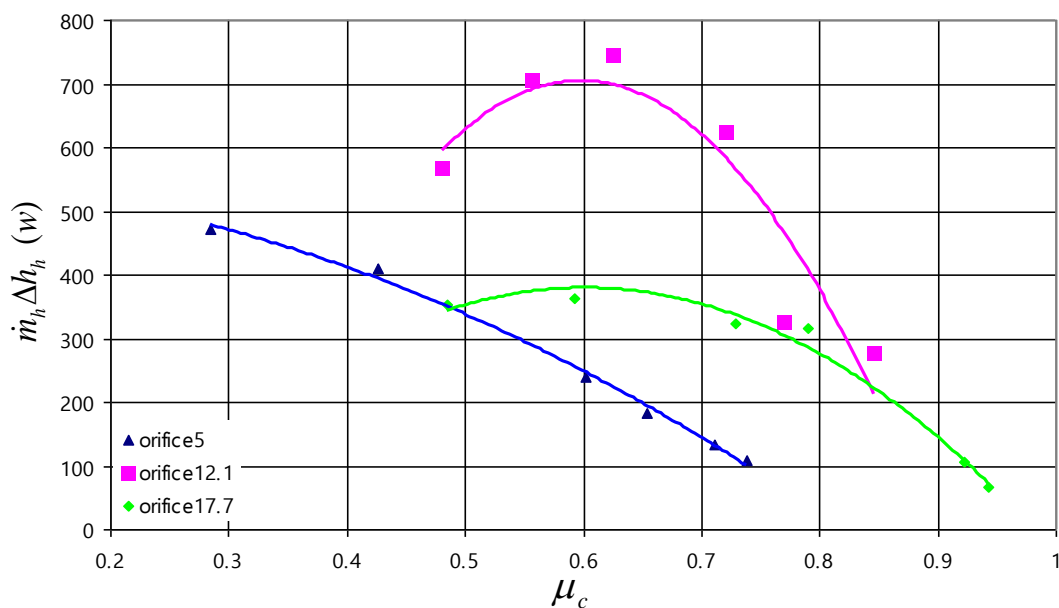
یک نسبت دبی خروجی سرد بوجود می آید.



شکل ۶-۲۳: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم ۵۱۹ میلیمتر

شکل ذیل میزان بار گرمایی ایجاد شده توسط جریان گرم را نشان میدهد. چنان که مشخص است

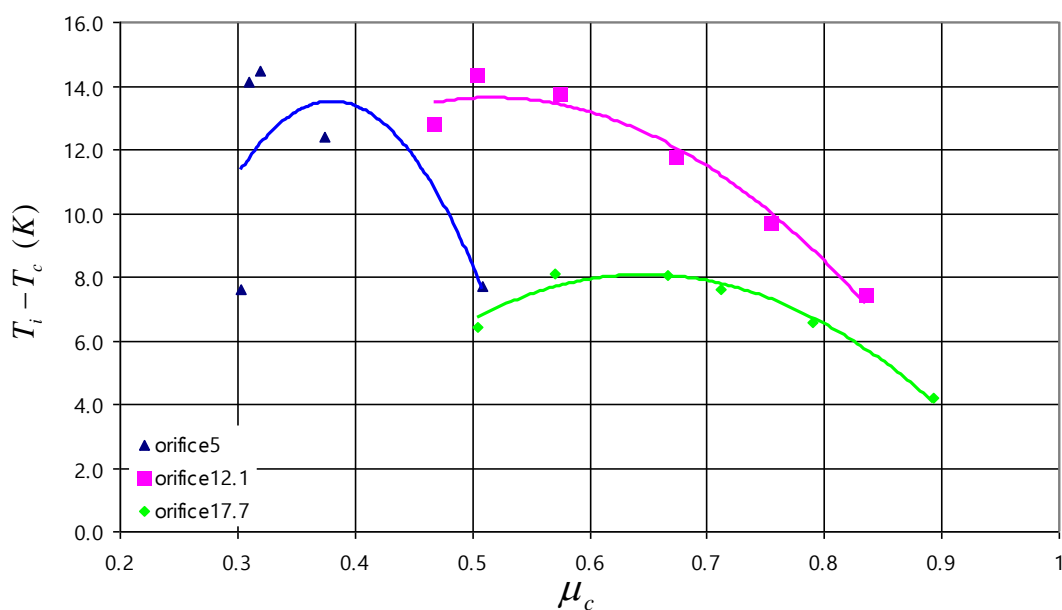
بیشترین بار گرمایی مربوط به اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر است.



شکل ۶-۲۴: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم ۵۱۹ میلیمتر

۶-۲-۴-۳ طول لوله ۷۶۹ میلیمتر

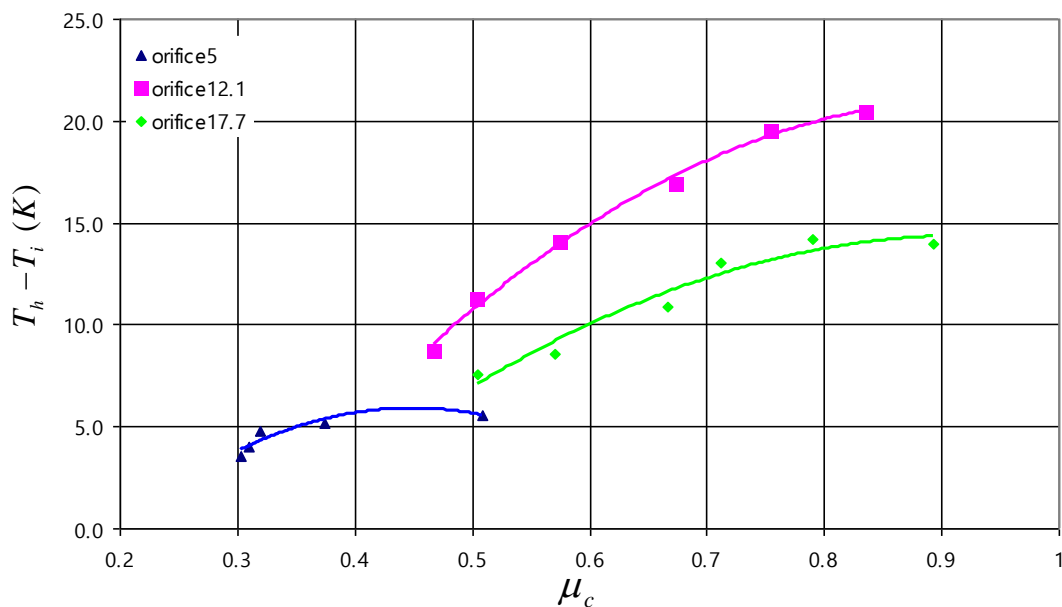
نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود دمای سرد با افزایش μ_c افزایش می یابد و به یک مینیمم در حداقل μ_c نزدیک شده است. حداکثر اختلاف دما در این حالت به بیشتر از ۱۴ کلوین رسیده است که برای اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر اتفاق افتاده است.



شکل ۶-۲۵: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_c برحسب μ_c برای لوله با طول گرم ۷۶۹ میلیمتر

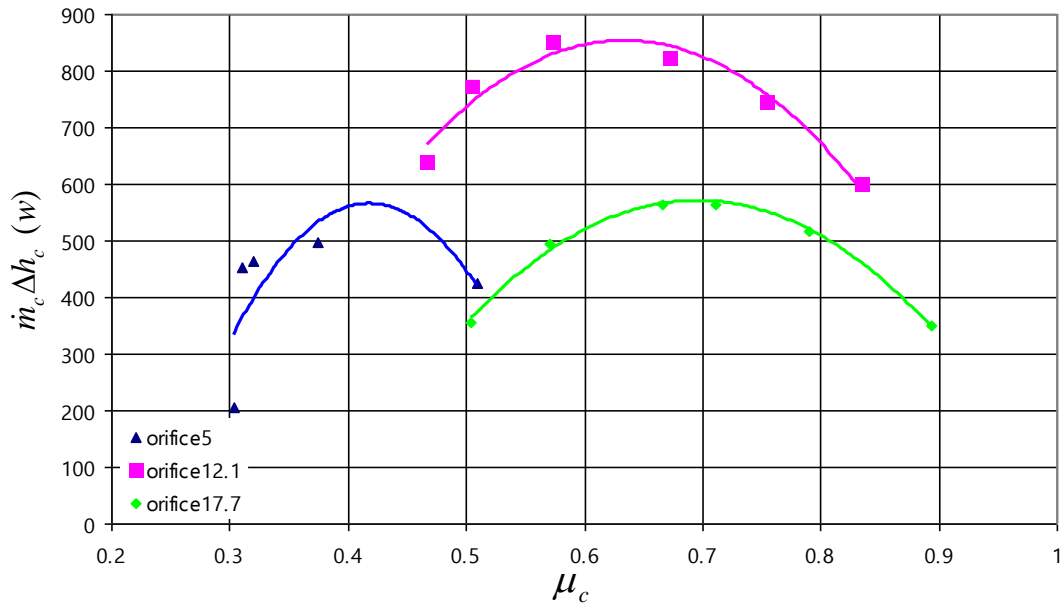
نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل برای این حالت نمایش داده شده است . چنانچه مشاهده

می شود دمای گرم با افزایش μ_c افزایش می یابد و به یک ماکزیمم نزدیک می شود.



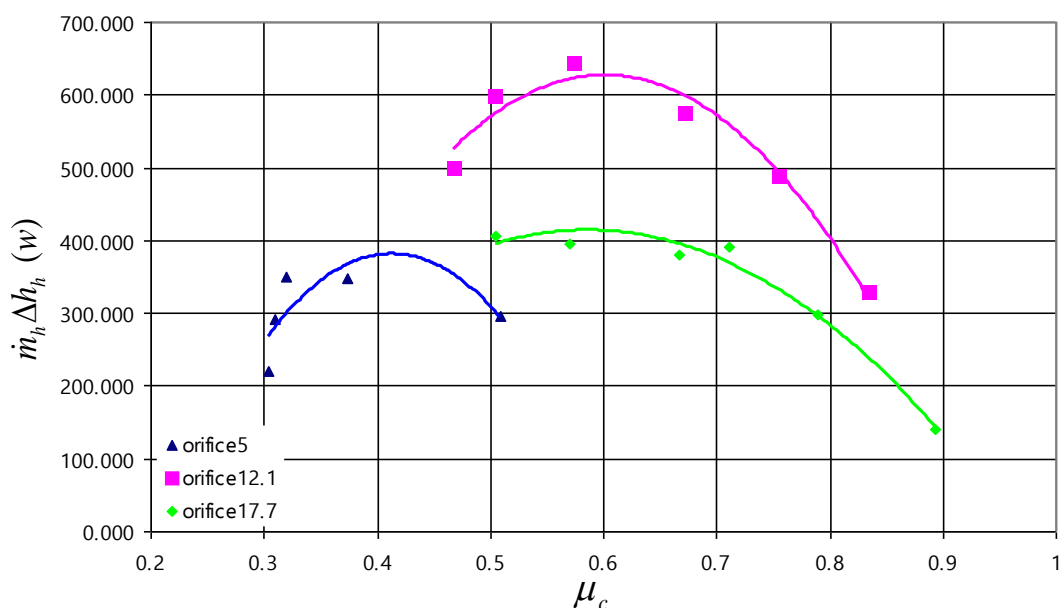
شکل ۶-۲۶: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_h برحسب μ_c برای لوله با طول گرم ۷۶۹ میلیمتر

شکل ذیل میزان بار سرمایی ایجاد شده توسط جریان سرد را نشان میدهد. چنان که مشخص است بیشترین بار سرمایی مربوط اریفیس ۱۲٫۱ میلیمتر می باشد.



شکل ۶-۲۷: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم ۷۶۹ میلیمتر

شکل ذیل میزان بار گرمایی ایجاد شده توسط جریان گرم را نشان میدهد. چنان که مشخص است بیشترین بار گرمایی مربوط به اریفیس ۱۲٫۱ میلیمتر است.



شکل ۶-۲۸: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم ۷۶۹ میلیمتر

نتیجه گیری

- برای لوله با طول گرم ۲۵۰ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین خروجی گرم و ورودی برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای لوله با طول گرم ۲۵۰ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین ورودی و خروجی سرد برای اریفیس با قطر ۵ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای لوله با طول گرم ۲۵۰ میلیمتر بیشترین بار سرمایی مربوط به اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر و بیشترین بار گرمایی مربوط به اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر می باشد.
- برای لوله با طول گرم ۵۱۹ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین خروجی گرم و ورودی برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر اتفاق می افتد.

- برای لوله با طول گرم ۵۱۹ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین ورودی و خروجی سرد برای اریفیس با قطر ۵ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای لوله با طول گرم ۵۱۹ میلیمتر بیشترین بار سرمایی مربوط به اریفیس با قطر ۱۲,۱ و بیشترین بار گرمایی مربوط به اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر می باشد.
- برای لوله با طول گرم ۷۶۹ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین ورودی و خروجی سرد برای اریفیس با قطر ۵ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای لوله با طول گرم ۷۶۹ میلیمتر کمترین بار سرمایی گاز سرد اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر و بیشترین بار گرمایی گاز گرم را اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر را دارا می باشند.
- برای لوله با طول گرم ۵۱۹ میلیمتر بیشترین بار سرمایی مربوط به اریفیس با قطر ۱۲,۱ و بیشترین بار گرمایی مربوط به اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر می باشد.
- برای لوله با طول گرم ۷۶۹ میلیمتر بیشترین بار گرمایی مربوط به اریفیس با قطر ۱۲,۱ و بیشترین بار گرمایی مربوط به اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر می باشد.
- بطور کلی میتوان نتیجه گرفت که اریفیس به قطر ۱۲,۱ میلیمتر بهترین عملکرد را داراست.

۳-۶. فشار آزمایش ۵ بار برای هوا

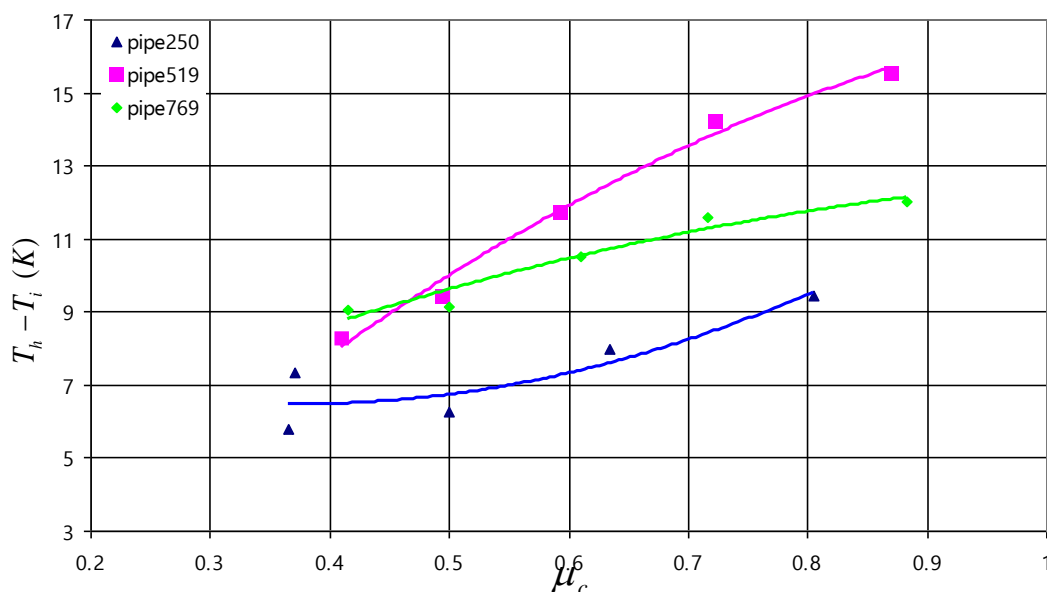
آزمایشات سری دوم با فشار ورودی ۵ بار انجام گرفت. این آزمایشات برای مقایسه بین هوا و گاز طبیعی به عنوان سیال عامل و بررسی اثر فشار بر راندمان لوله گردبادی طراحی گردیده است.

۱-۳-۶. بررسی اثر طول لوله بر راندمان لوله گردبادی

در این قسمت اثر طول لوله گرم بر راندمان لوله گردبادی برای سه قطر اریفیس سرد ارائه و بررسی شده است و نتایج آزمایشات انجام شده برای هر اریفیس در طول های مختلف لوله گرم با هم مقایسه و تحلیل شده اند. باید اشاره کرد که فشار ورودی ۵ بار می باشد و سیال عامل هوا است.

۱-۳-۶-۱) اریفیس ۸ با قطر میلیمتر

نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل برای این حالت نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود دمای گرم با افزایش μ_c افزایش می یابد و به یک ماکزیمم نزدیک می شود. در μ_c کمتر لوله بلندتر باعث ایجاد دمای گرم بیشتر و در μ_c بیشتر این لوله میانی است که دمای بیشینه بالاتری ایجاد میکند. حداکثر اختلاف دما در این حالت نزدیک ۱۶ کلوین است. بطور کلی می توان گفت که لوله با طول گرم ۵۱۹ میلیمتر عملکرد بهتری دارد.



شکل ۶-۲۹: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر

نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده

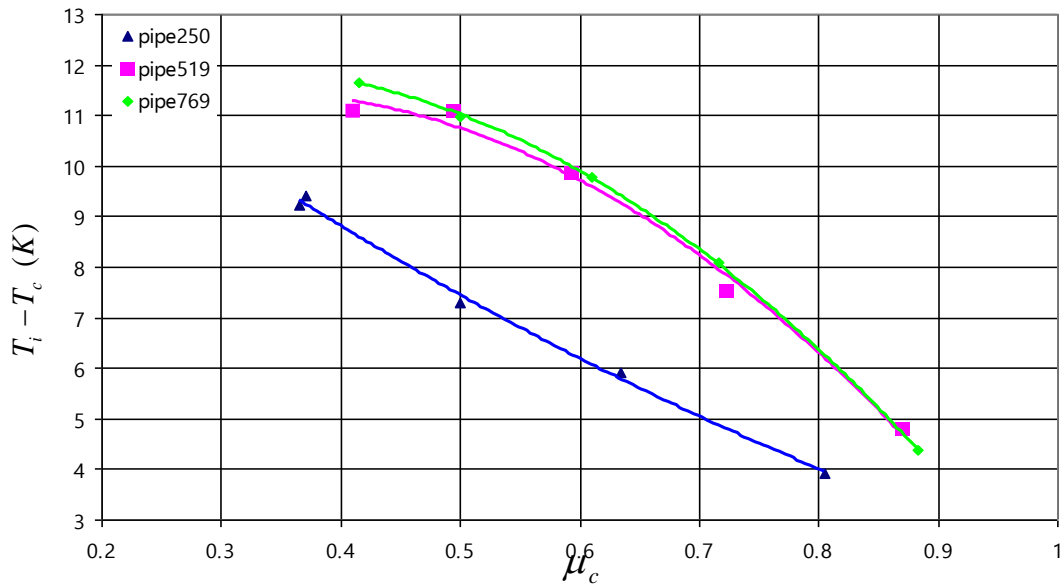
می شود دمای سرد با افزایش μ_c کاهش می یابد و بنظر می رسد که به یک مینیمم در حداقل μ_c

نزدیک شده است. حداکثر اختلاف دما در این حالت به بیش از ۱۲ کلوین رسیده است که برای طول

لوله گرم ۷۶۹ میلیمتر اتفاق افتاده است. بنابراین میتوان گفت که افزایش طول لوله باعث بهبود

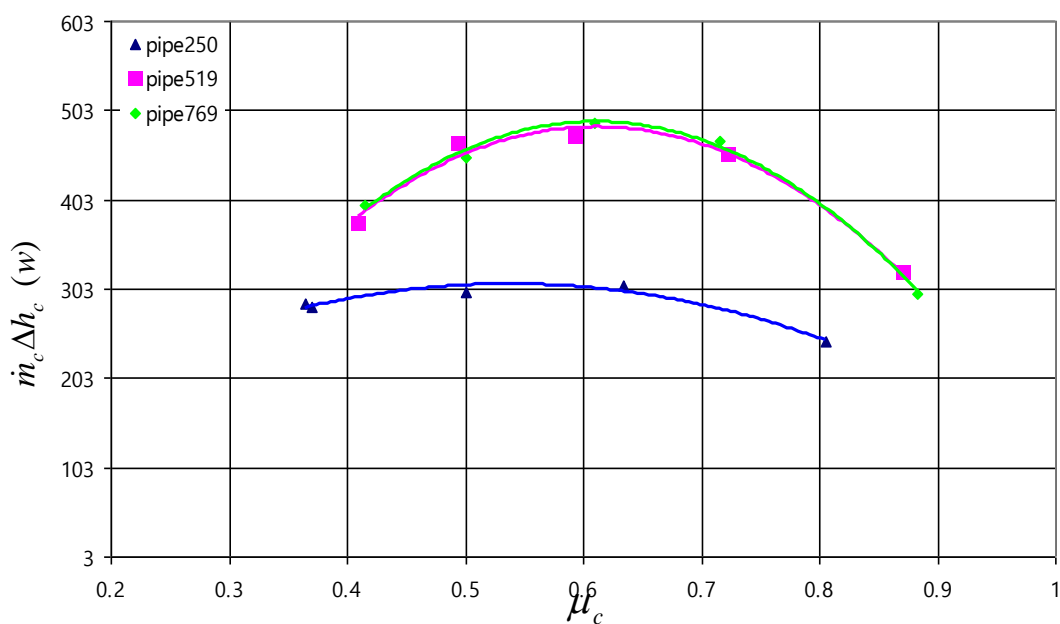
عملکرد لوله گردبادی در کاهش دمای سرد شده است. هرچند که باید اشاره کرد که عملکرد لوله با

طول گرم ۷۶۹ و ۵۱۹ میلیمتر خیلی شبیه به یکدیگر هستند.



شکل ۶-۳۰: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_C بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر

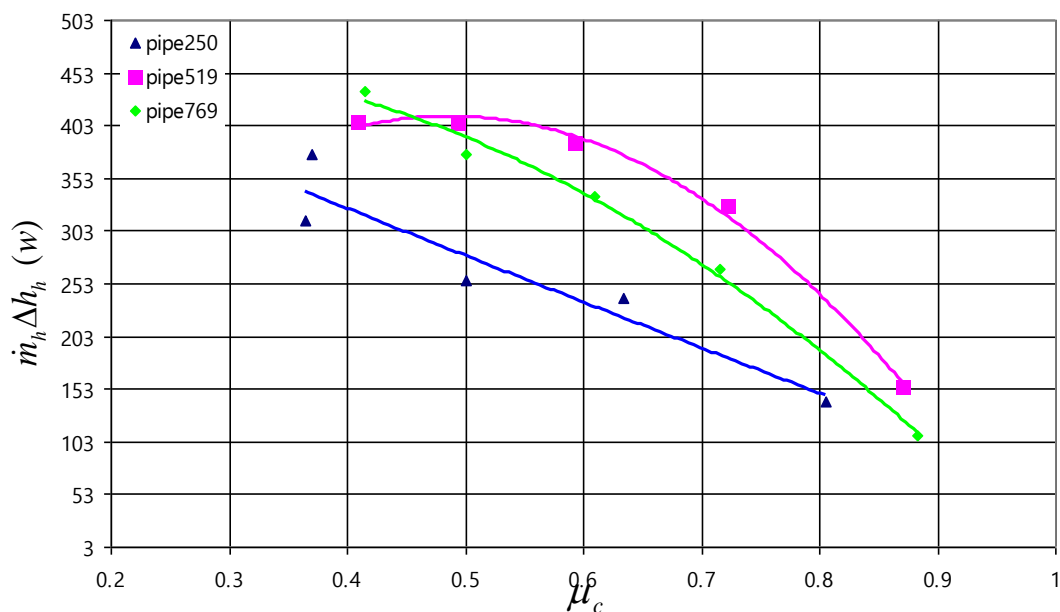
شکل ذیل میزان بار سرمایی ایجاد شده توسط جریان سرد را نشان میدهد. چنان که مشخص است بیشترین بار سرمایی مربوط به لوله های بلندتر می باشد. در هر مورد یک ماکزیمم بار سرمایی در یک نسبت دبی خروجی سرد بوجود می آید. لوله گرم ۷۶۹ و ۵۱۹ میلیمتر، عملکرد شبیه به یکدیگر دارند و از لوله کوتاهتر عملکرد بهتری دارند.



شکل ۶-۳۱: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر

شکل ذیل میزان بار گرمایی ایجاد شده توسط جریان گرم را نشان میدهد. چنان که مشخص است

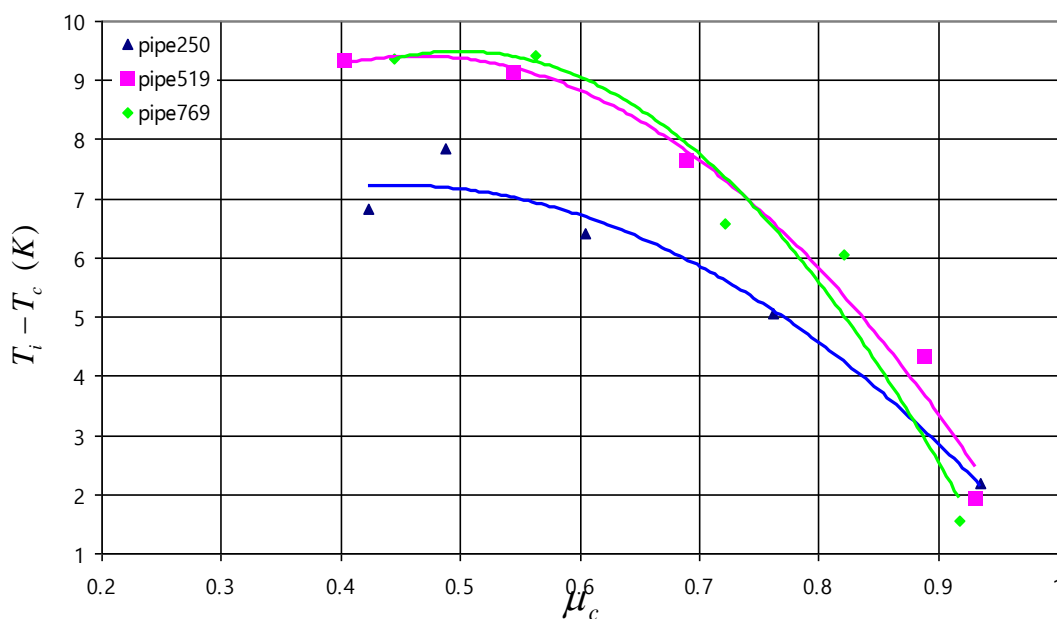
بیشترین بار گرمایی به μ_c مربوط می باشد و برای μ_c مختلف متفاوت است.



شکل ۶-۳۲: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر

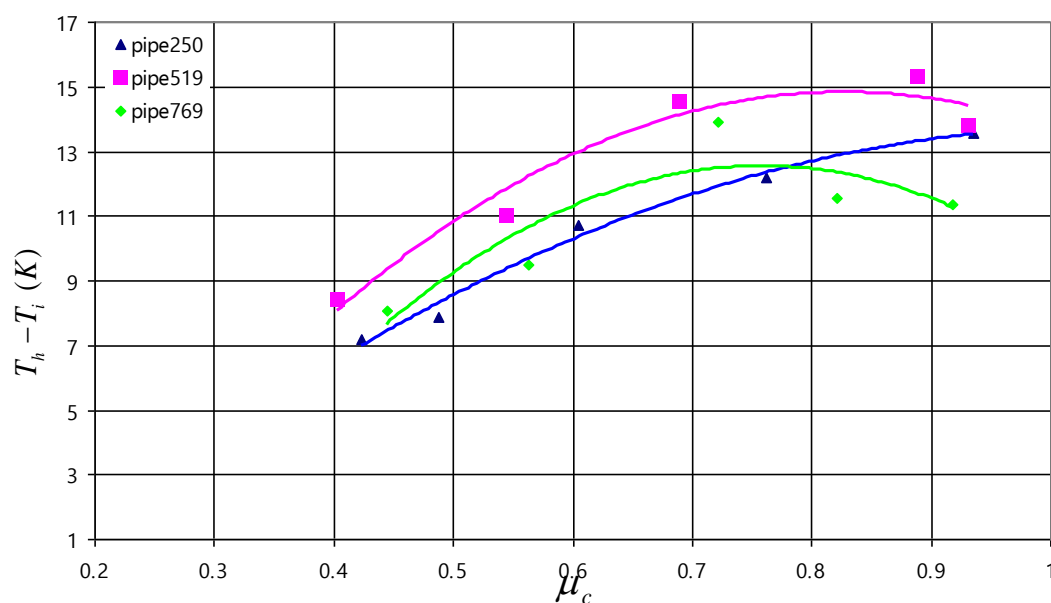
۲-۳-۶. اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر

نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است . چنانچه مشاهده می شود دمای سرد با افزایش μ_c کاهش می یابد و به یک مینیمم در حداقل μ_c نزدیک شده است. حداکثر اختلاف دما در این حالت به بیش از ۹ کلوین رسیده است که برای طول لوله گرم ۷۶۹ میلیمتر اتفاق افتاده است. بنابراین میتوان گفت که افزایش طول لوله باعث بهبود عملکرد لوله گردبادی در کاهش دمای سرد شده است.



شکل ۳-۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر

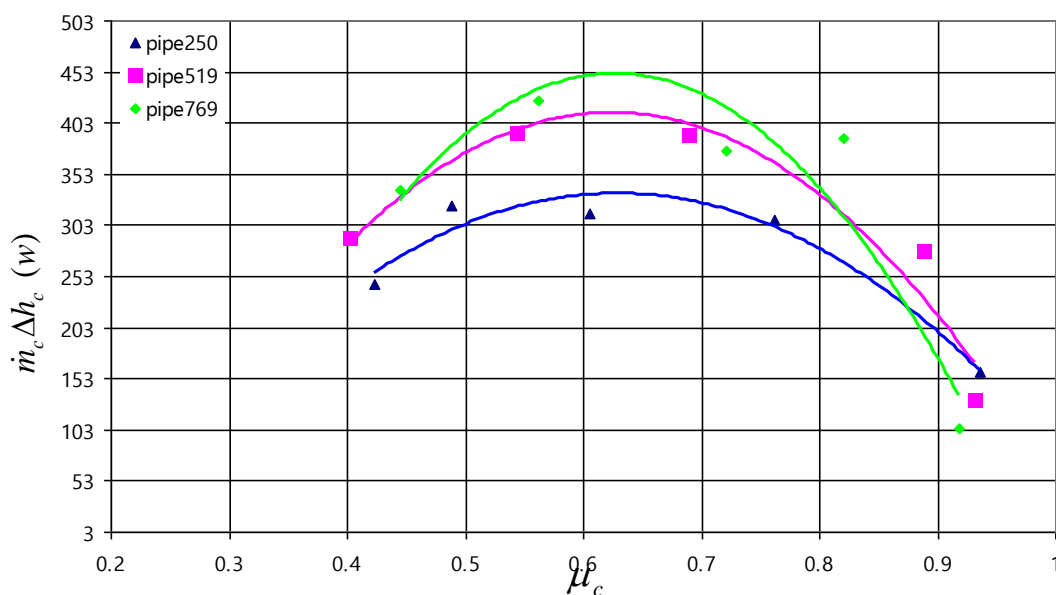
نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل برای این حالت نمایش داده شده است . چنانچه مشاهده می شود دمای گرم با افزایش μ_c افزایش می یابد و به یک ماکزیمم نزدیک می شود.



شکل ۳۴-۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای ارفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر

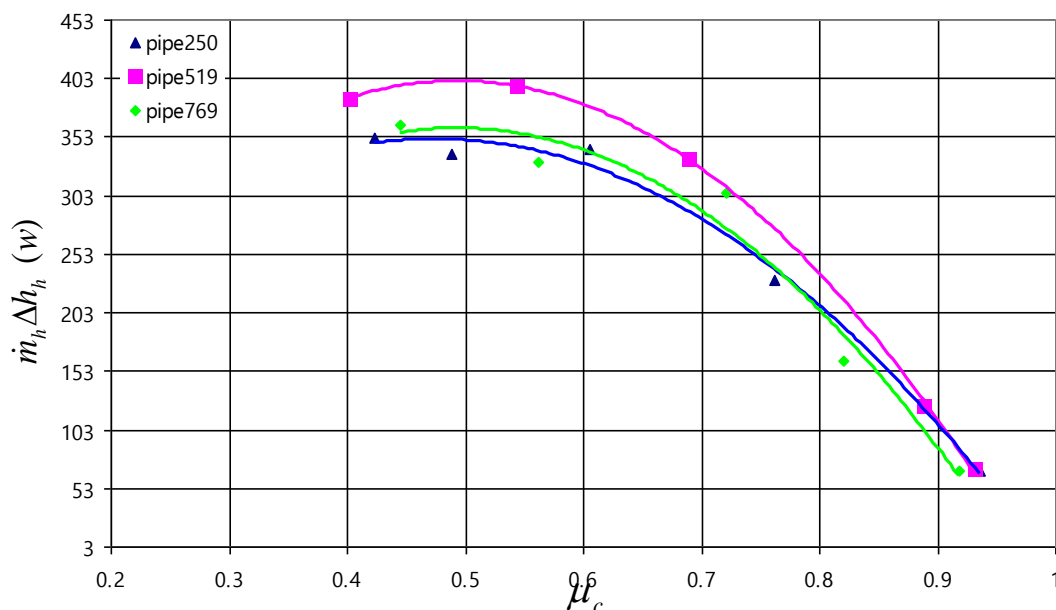
شکل ذیل میزان بار سرمایی ایجاد شده توسط جریان سرد را نشان میدهد. چنان که مشخص است

بیشترین بار سرمایی مربوط به لوله گرم ۷۶۹ میلیمتر می باشد.



شکل ۳۵-۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای ارفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر

شکل ذیل میزان بار گرمایی ایجاد شده توسط جریان گرم را نشان میدهد. چنان که مشخص است بیشترین بار گرمایی برای μ_c مختلف متفاوت است ولی بطور کلی برای لوله میانی بیشترین مقدار را دارد.

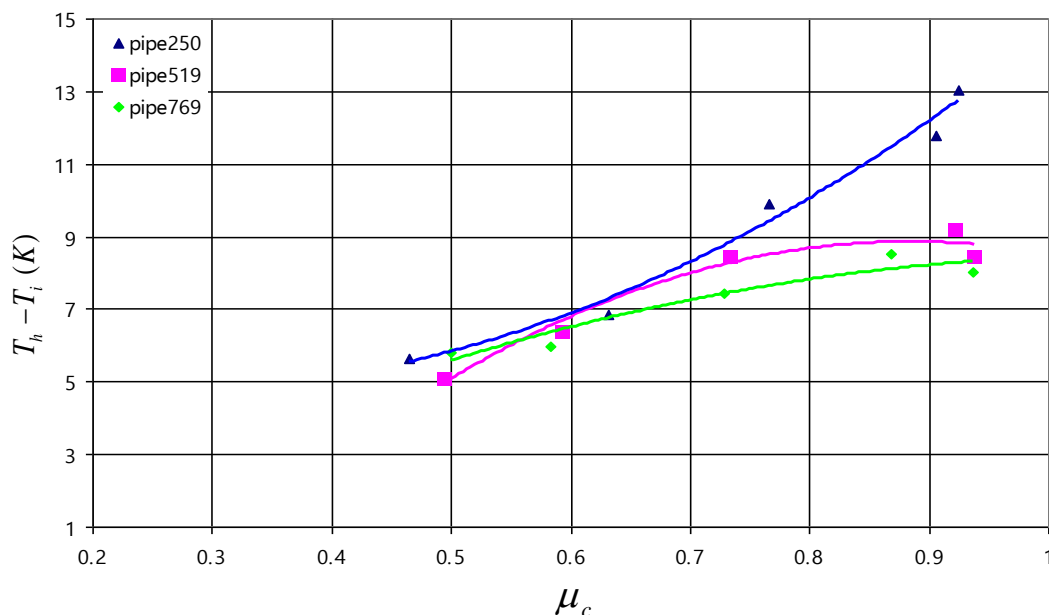


شکل ۶-۳۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر

۳-۳-۶. اریفیس با قطر ۱۷,۷

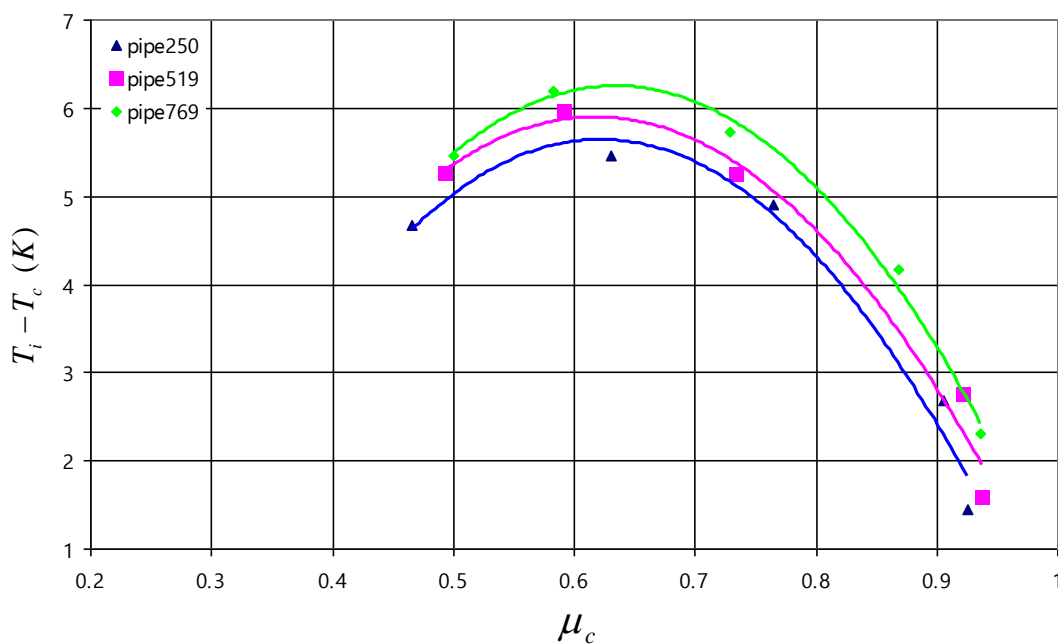
نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل برای این حالت نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود دمای گرم با افزایش μ_c افزایش می یابد و به یک ماکزیمم نزدیک می شود. بیشترین اختلاف دما مربوط به لوله گرم کوتاهتر است. هر چند که باید اشاره کرد که بنظر می رسد اثر طول

لوله در این حالت چندان به نظر نمی رسد. حداکثر اختلاف دما در این حالت بیش از ۱۲ کلوین می باشد.



شکل ۶-۳۷: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_h برحسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر

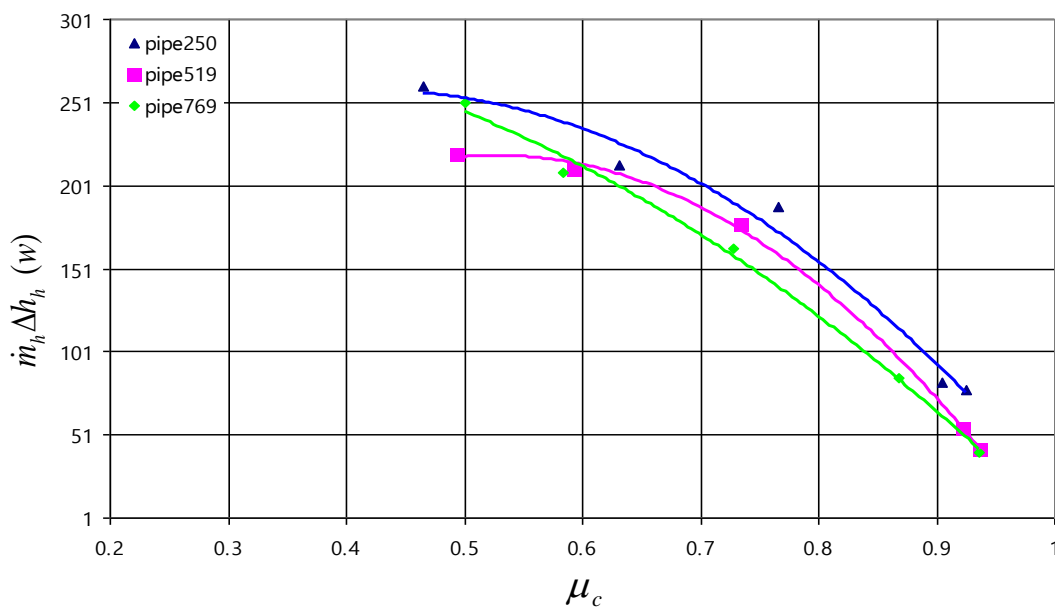
نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود دمای سرد با افزایش μ_c افزایش می یابد و بنظر می رسد که به یک مینیمم در حداقل μ_c نزدیک شده است. حداکثر اختلاف دما در این حالت به بیشتر از ۶ کلوین رسیده است که برای طول لوله گرم ۷۶۹ میلیمتر اتفاق افتاده است. هرچند باید اشاره کرد که تفاوت اختلاف دماها برای این حالت برای طول های مختلف ناچیز به نظر می رسد.



شکل ۶-۳۸: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_C بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر

شکل ذیل میزان بار گرمایی ایجاد شده توسط جریان گرم را نشان میدهد. چنان که مشخص است

بیشترین بار سرمایی مربوط به لوله گرم ۲۵۰ میلیمتر می باشد.

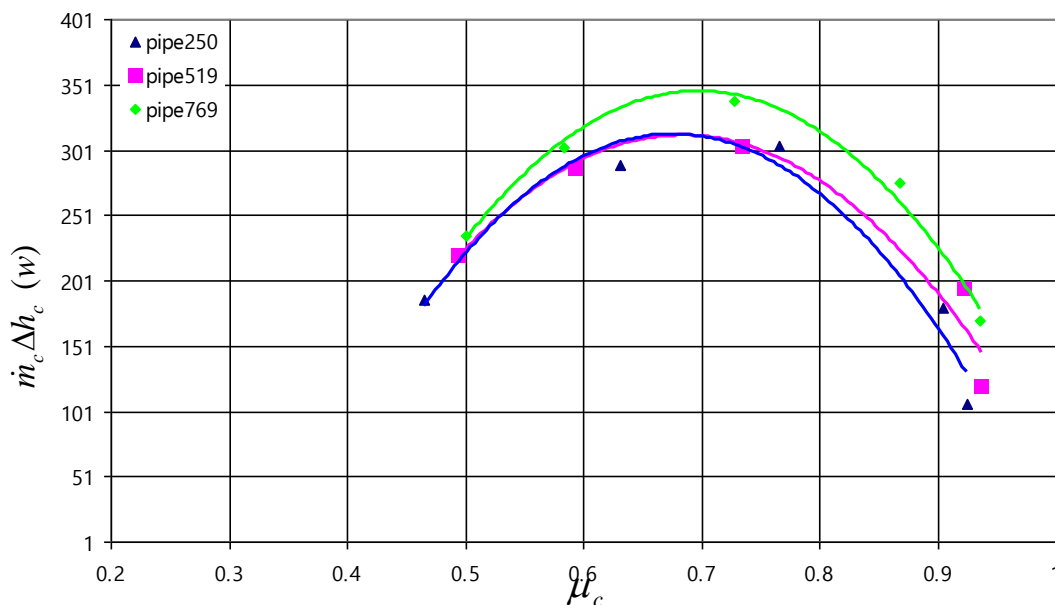


شکل ۶-۳۹: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر

شکل ذیل میزان بار سرمایی ایجاد شده توسط جریان سرد را نشان میدهد. چنان که مشخص است

بیشترین بار سرمایی مربوط به لوله بلندتر می باشد. در هر مورد یک ماکزیمم بار سرمایی در یک

نسبت دبی خروجی سرد بوجود می آید .



شکل ۶-۴: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر

نتیجه گیری

- برای اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین خروجی گرم و ورودی در طول ۵۱۹ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین ورودی و خروجی سرد در طول ۷۶۹ و ۵۱۹ میلیمتر اتفاق می افتد.

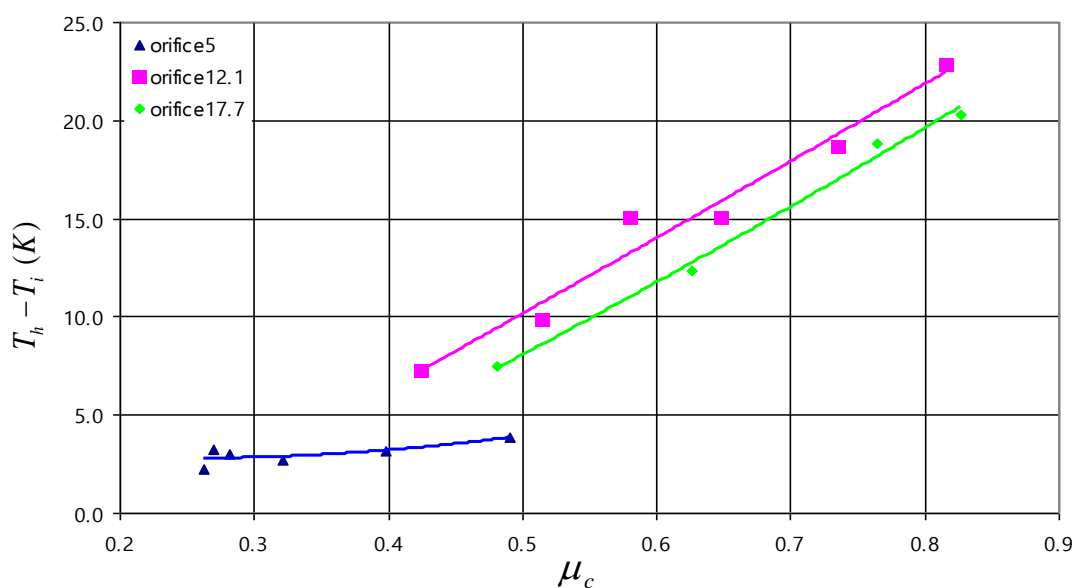
- برای اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر بیشترین بار سرمایی را لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر و بیشترین بار گرمایی را لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر دارا می باشد .
- برای اریفیس ۸ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین خروجی گرم و ورودی در طول ۵۱۹ میلیمتر اتفاق می افتد .
- برای اریفیس ۸ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین ورودی و خروجی سرد در طول ۷۶۹ و ۵۱۹ میلیمتر اتفاق می افتد .
- برای اریفیس ۸ میلیمتر بیشترین بار سرمایی را لوله گرم با طول های ۵۱۹ و ۷۶۹ میلیمتر و بیشترین بار گرمایی را لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر دارا می باشد.
- برای اریفیس ۸ و ۱۲,۱ میلیمتر افزایش طول لوله گرم بیشتر از ۵۱۹ میلیمتر تاثیری اندک بر بهبود عملکرد لوله گردبادی دارد.
- برای اریفیس ۱۷,۷ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین خروجی گرم و ورودی در طول ۲۵۰ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای اریفیس ۱۷,۷ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین ورودی و خروجی سرد در طول ۷۶۹ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای اریفیس ۱۷,۷ میلیمتر بیشترین بار سرمایی را لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر و بیشترین بار گرمایی گاز را لوله با طول ۲۵۰ میلیمتر دارا می باشد.

۴-۳-۶. بررسی اثر قطر اریفیس بر عملکرد لوله گردبادی

در این قسمت به بررسی قطر اریفیس بر عملکرد لوله گردبادی می پردازیم. برای بررسی اثر قطر اریفیس بر راندمان لوله گردبادی نتایج آزمایشات انجام شده را برای هر طول لوله در قطر های اریفیس مختلف با هم مقایسه میکنیم.

۴-۳-۶-۱) طول لوله ۲۵۰ میلیمتر است

نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل برای این حالت نمایش داده شده است چنانچه مشاهده می شود. بیشترین اختلاف دما مربوط به لوله با اریفیس ۱۲٫۱ میلیمتر است.

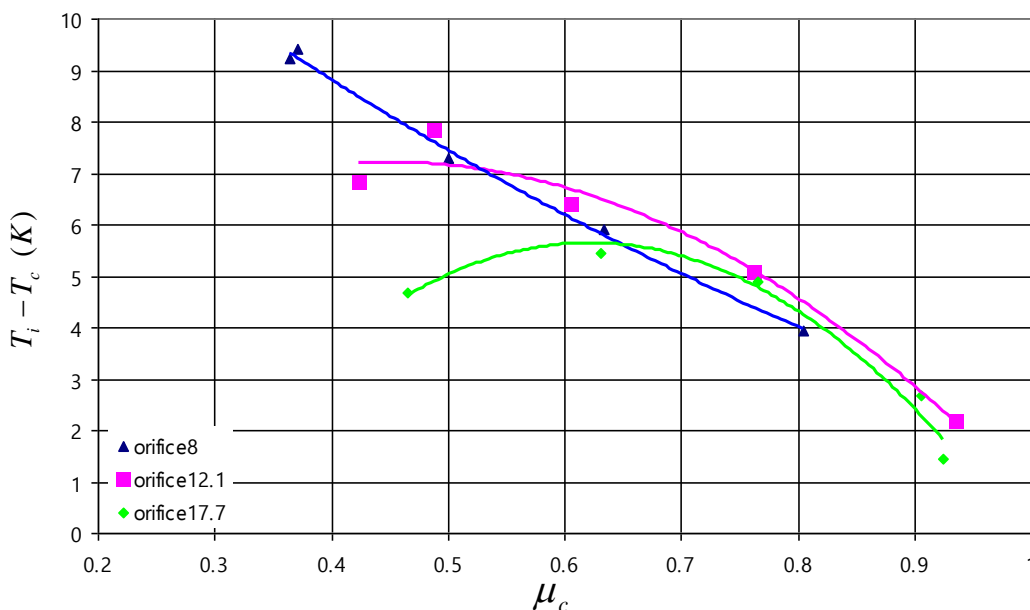


شکل ۴-۶: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر

نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده

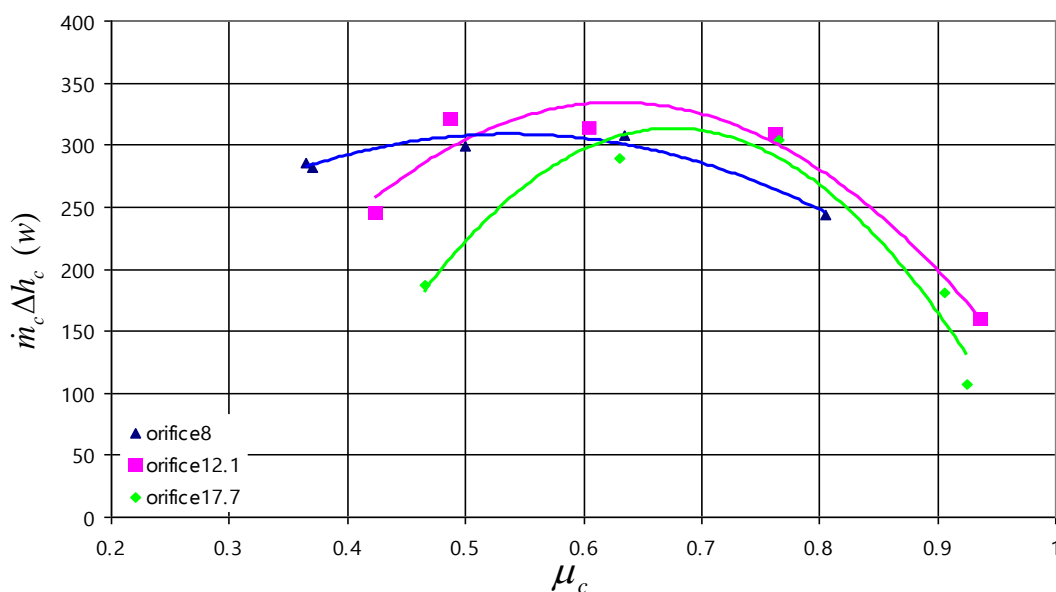
می شود دمای سرد با افزایش μ_c افزایش می یابد و بنظر می رسد که به یک مینیمم در حداقل μ_c

نزدیک شده است. حداکثر اختلاف دما در این حالت به بیش از ۹ کلوین رسیده است که برای اریفیس ۸ میلیمتر اتفاق افتاده است. هرچند که که اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر عملکرد بهتری برای μ_c بالاتر دارد.



شکل ۶-۴۲: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر

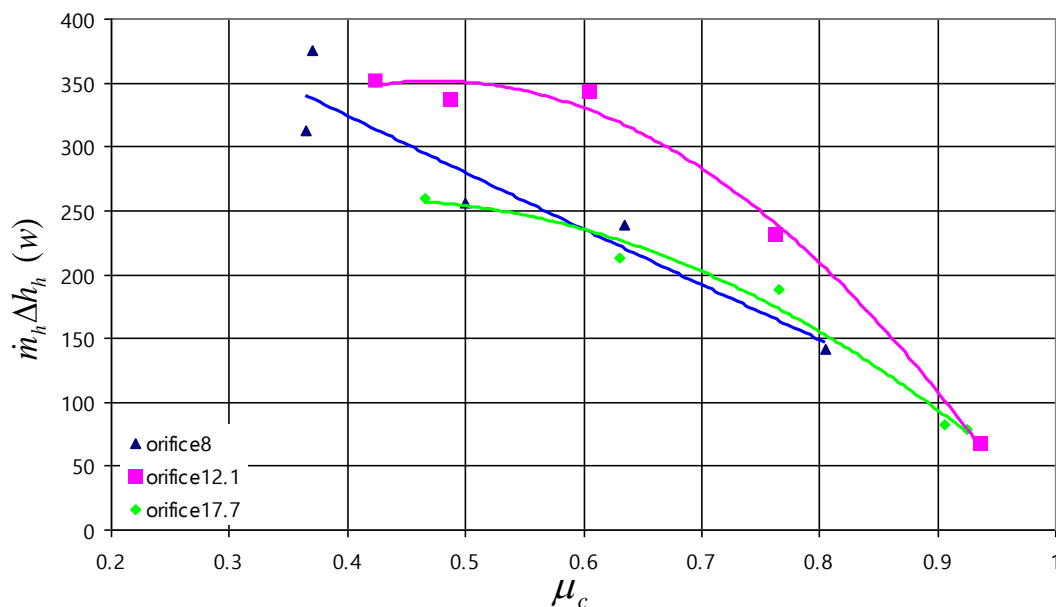
شکل ذیل میزان بار سرمایی ایجاد شده توسط جریان سرد را نشان میدهد. چنان که مشخص است بیشترین بار سرمایی مربوط به اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر می باشد. در هر مورد یک ماکزیمم بار سرمایی در یک نسبت دبی خروجی سرد بوجود می آید.



شکل ۶-۴۳: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر

شکل ذیل میزان بار گرمایی ایجاد شده توسط جریان گرم را نشان میدهد. چنان که مشخص است

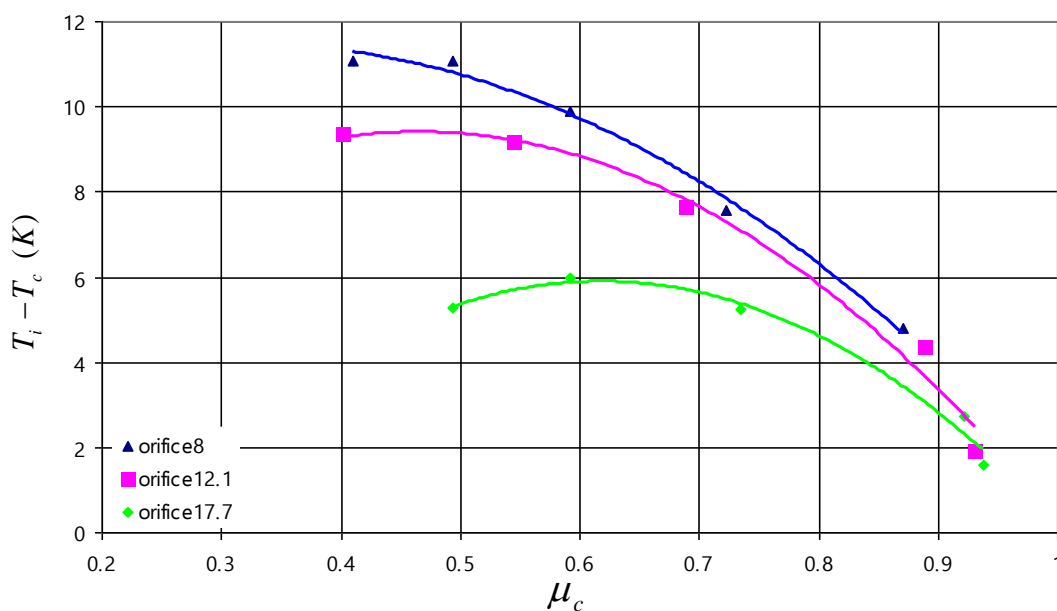
بیشترین بار گرمایی مربوط به اریفیس ۱۲٫۱ میلیمتر است.



شکل ۶-۴۴: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر

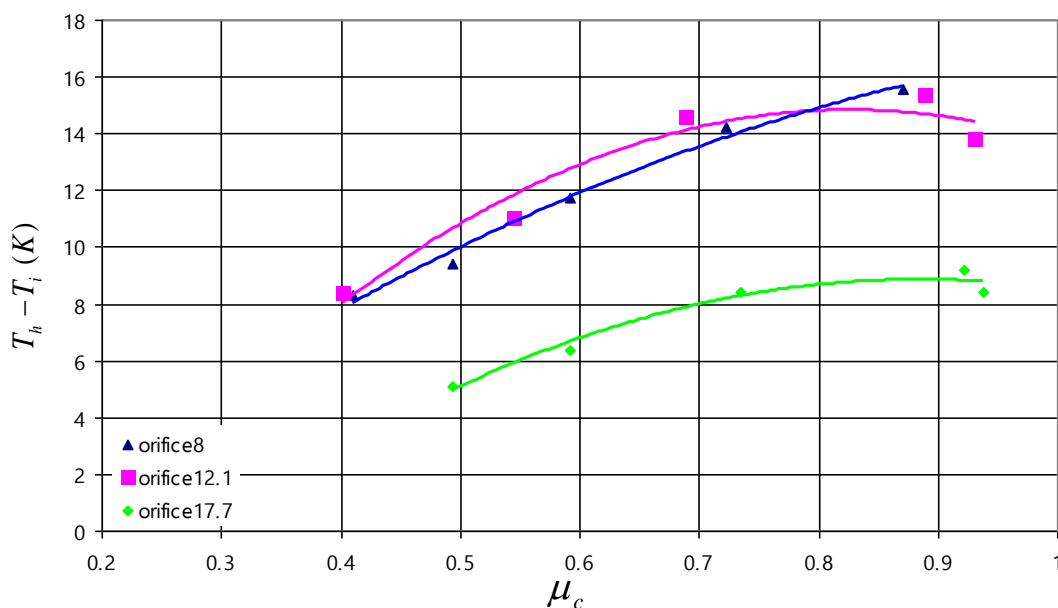
۵-۳-۶. طول لوله ۵۱۹ میلیمتر است

نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است . چنانچه مشاهده می شود دمای سرد با افزایش μ_c افزایش می یابد و بنظر می رسد که به یک مینیمم در حداقل μ_c نزدیک شده است. حداکثر اختلاف دما در این حالت به ۱۱ کلوین رسیده است که برای اریفیس ۸ میلیمتر اتفاق افتاده است.



شکل ۴۵-۶: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر

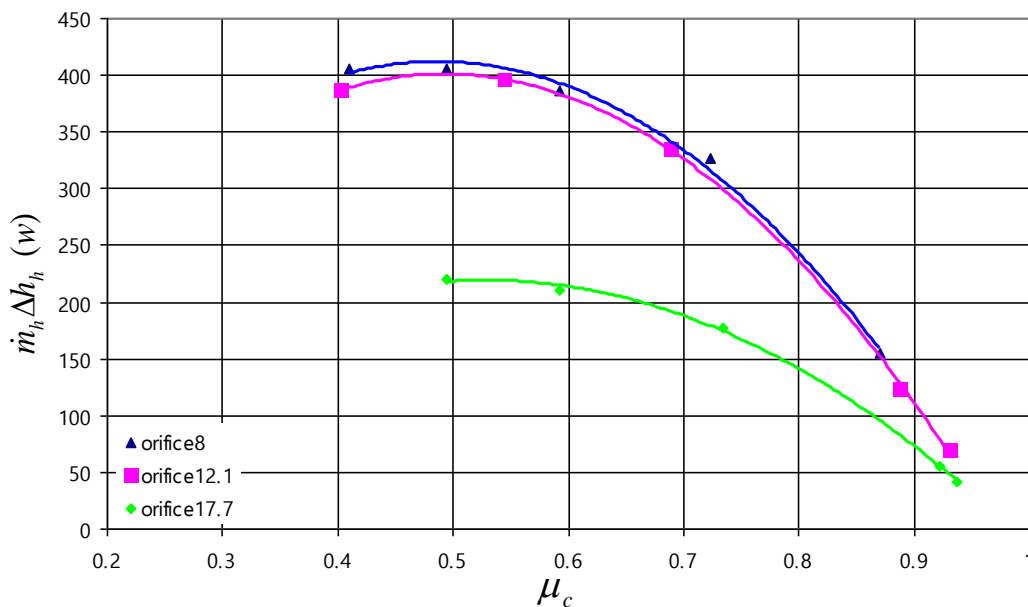
نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل برای این حالت نمایش داده شده است . چنانچه مشاهده می شود دمای گرم با افزایش μ_c افزایش میابد و به یک ماکزیمم نزدیک می شود. بیشترین اختلاف دما مربوط به اریفیس ۸ و ۱۲,۱ میلیمتر است. حداکثر اختلاف دما در این حالت به بیش از ۱۵ کلوین است .



شکل ۶-۴۶: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر

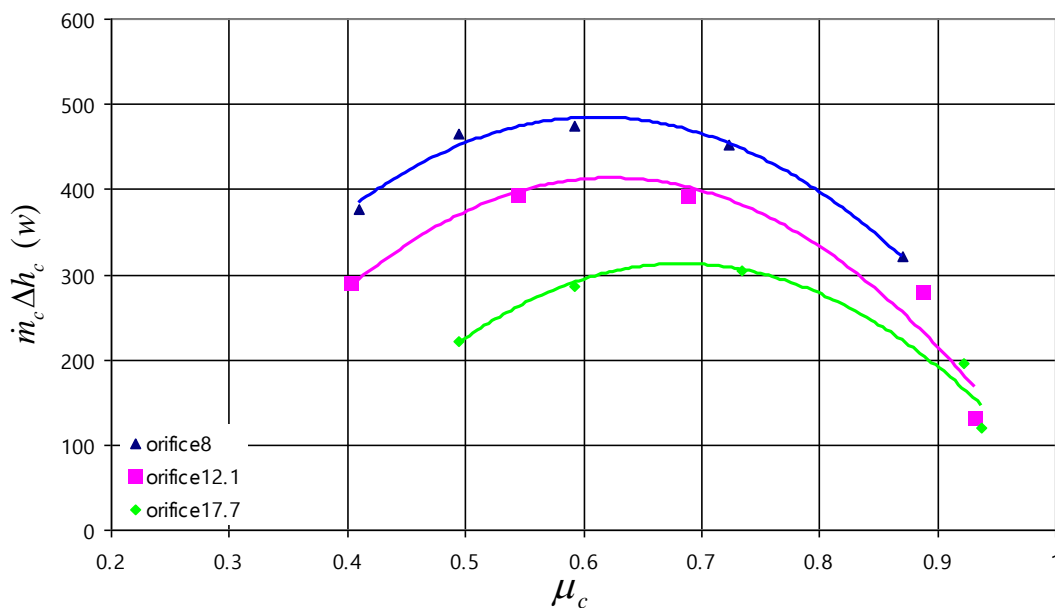
شکل ذیل میزان بار گرمایی ایجاد شده توسط جریان گرم را نشان میدهد. چنان که مشخص است

بیشترین بار گرمایی مربوط به اریفیس ۸ و ۱۲٫۱ میلیمتر است.



شکل ۶-۴۷: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر

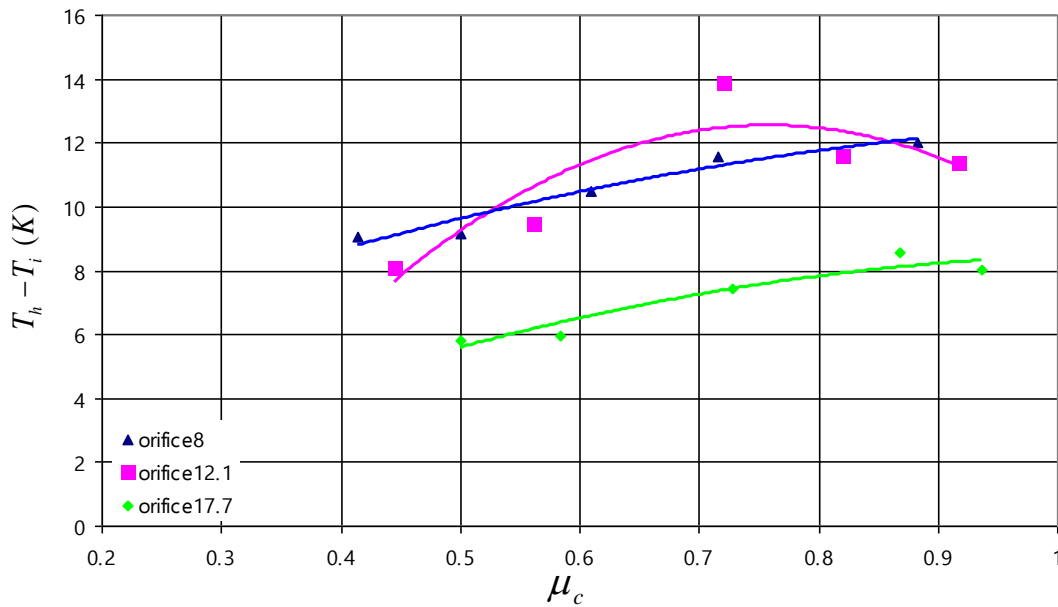
شکل ذیل میزان بار سرمایی ایجاد شده توسط جریان سرد را نشان میدهد. چنان که مشخص است بیشترین بار سرمایی مربوط اریفیس ۸ میلیمتر می باشد. در هر مورد یک ماکزیمم بار سرمایی در یک نسبت دبی خروجی سرد بوجود می آید .



شکل ۶-۴۸: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر

۶-۳-۵-۱) طول لوله ۷۶۹ میلیمتر

نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل برای این حالت نمایش داده شده است . چنانچه مشاهده می شود دمای گرم با افزایش μ_c افزایش میابد و به یک ماکزیمم نزدیک می شود. بیشترین اختلاف دما مربوط به لوله اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر است. حداکثر اختلاف دما در این حالت ۱۴ کلوین است.



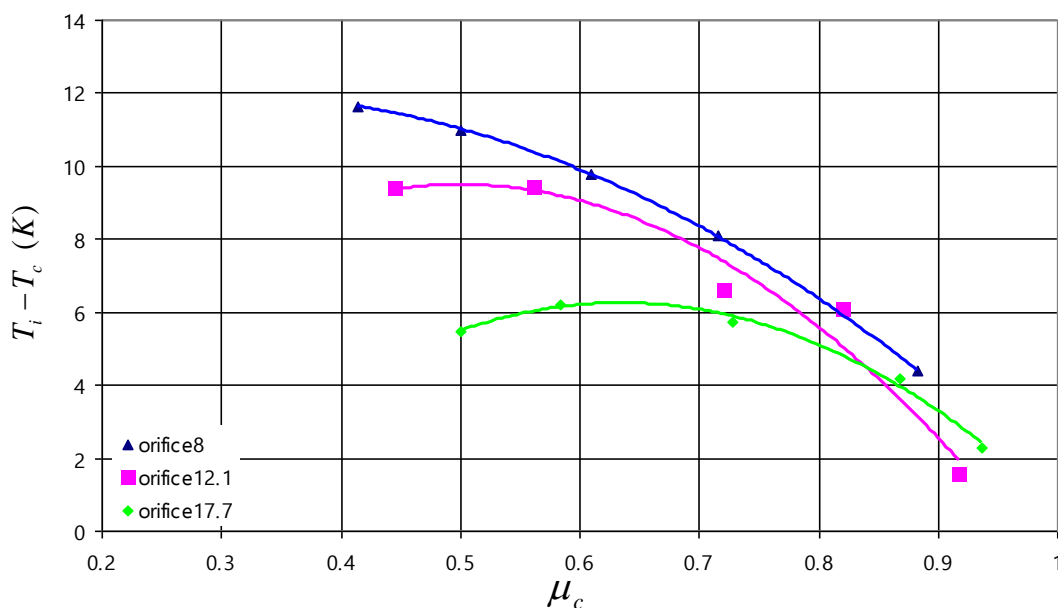
شکل ۶-۴۹: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۷۶۹ میلی‌متر

نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده

می شود دمای سرد با افزایش μ_c افزایش میابد و بنظر می رسد که به یک مینیمم در حداقل μ_c

نزدیک شده است. حداکثر اختلاف دما در این حالت به بیشتر از ۱۱ کلوین رسیده است که برای

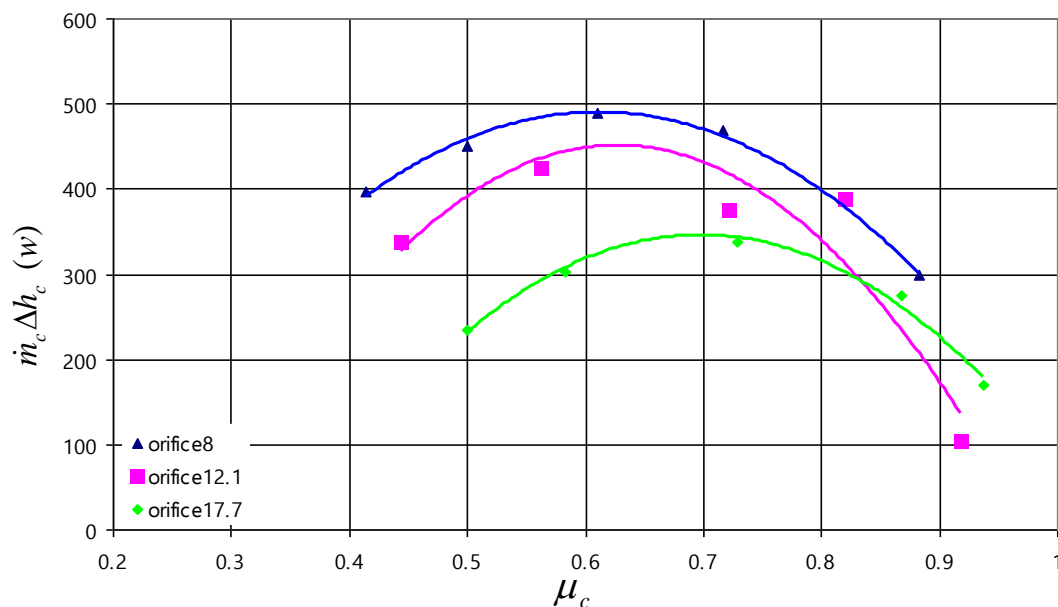
اریفیس ۸ میلی‌متر اتفاق افتاده است.



شکل ۶-۵۰: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر

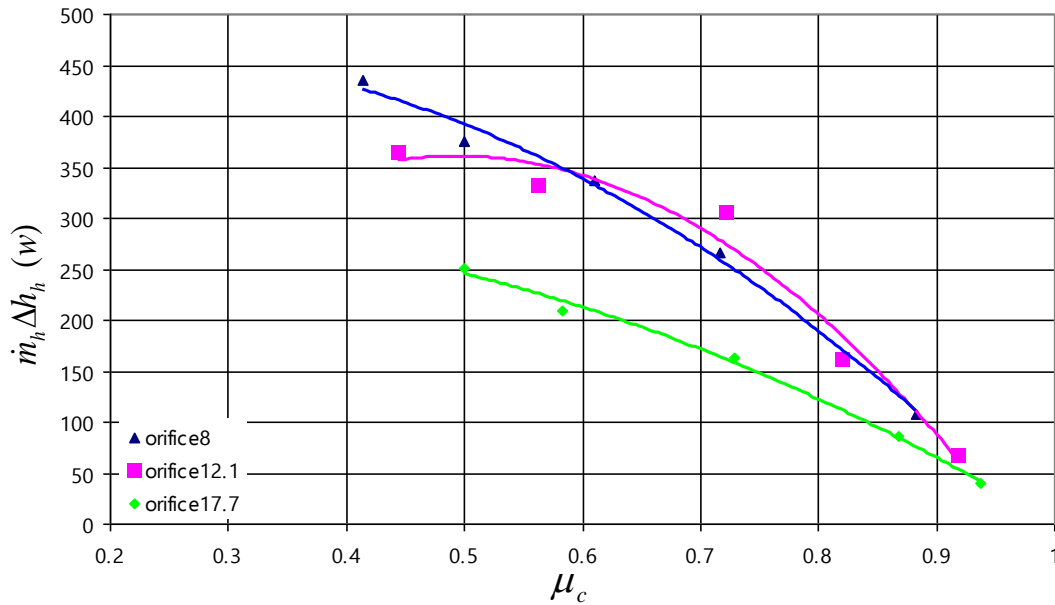
شکل ذیل میزان بار سرمایی ایجاد شده توسط جریان سرد را نشان میدهد. چنان که مشخص است

بیشترین بار سرمایی مربوط اریفیس ۸ میلیمتر می باشد.



شکل ۶-۵۱: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر

شکل ذیل میزان بار گرمایی ایجاد شده توسط جریان گرم را نشان میدهد. چنان که مشخص است بیشترین بار گرمایی مربوط به اریفیس ۸ میلیمتر است.



شکل ۶-۵۲: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر

نتیجه گیری

- برای لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین خروجی گرم و ورودی برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین ورودی و خروجی سرد برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر بیشترین بار گرمایی و سرماییه مربوط به اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر می باشد.

- برای لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین خروجی گرم و ورودی برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین ورودی و خروجی سرد برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر بیشترین بار گرمایی و سرمایی مربوط به اریفیس با قطر ۸ میلیمتر می باشد.
- برای لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین خروجی گرم و ورودی برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین ورودی و خروجی سرد برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر بیشترین بار گرمایی و سرمایی مربوط به اریفیس با قطر ۸ میلیمتر می باشد.

۴-۶. سیال عامل گاز طبیعی با فشار ۵ بار

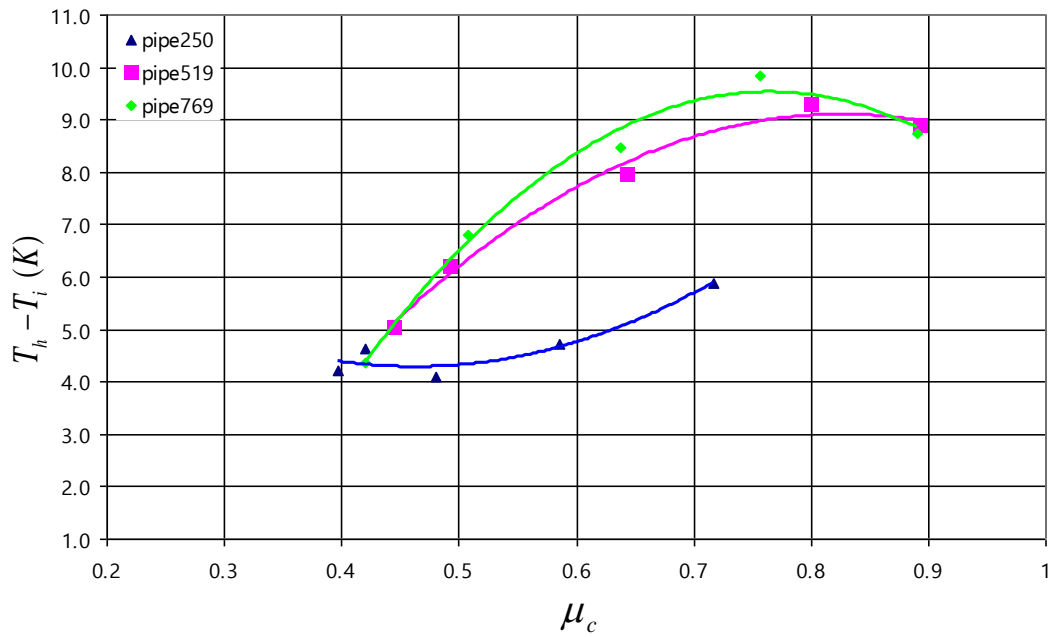
در این سری آزمایشات سیال عامل گاز طبیعی بوده و فشار ورودی حدود ۵ بار مطلق (دقیقا ۴,۹۳ بار) بوده است. هدف از این سری از آزمایشات بررسی رفتار گاز طبیعی در لوله گردبادی می باشد. مانند حالت قبل اثر طول لوله و قطر اریفیس بر راندمان لوله گردبادی را بررسی می کنیم.

۱-۴-۶. بررسی اثر طول لوله بر راندمان لوله گردبادی

در این قسمت اثر طول لوله بر راندمان لوله گردبادی برای سه قطر اریفیس سرد ارائه و بررسی شده است و نتایج آزمایشات انجام شده برای هر اریفیس در طول های مختلف لوله با هم مقایسه و تحلیل شده اند. باید اشاره کرد که فشار ورودی همچنان ۵ بار می باشد و سیال عامل گاز طبیعی است.

۶-۴-۱) اریفیس با قطر ۸ میلیمتر

نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل برای این حالت نمایش داده شده است چنانچه مشاهده می شود دمای گرم با افزایش μ_c افزایش می یابد و به یک ماکزیمم نزدیک می شود. در μ_c کمتر لوله بلندتر باعث ایجاد دمای گرم بیشتر و در μ_c بیشتر این لوله میانی است که دمای بیشینه بالاتری ایجاد میکند. حداکثر اختلاف دما در این حالت نزدیک ۱۰ کلوین است. بطور کلی لوله گرم ۷۶۹ میلیمتر عملکرد بهتری دارد.



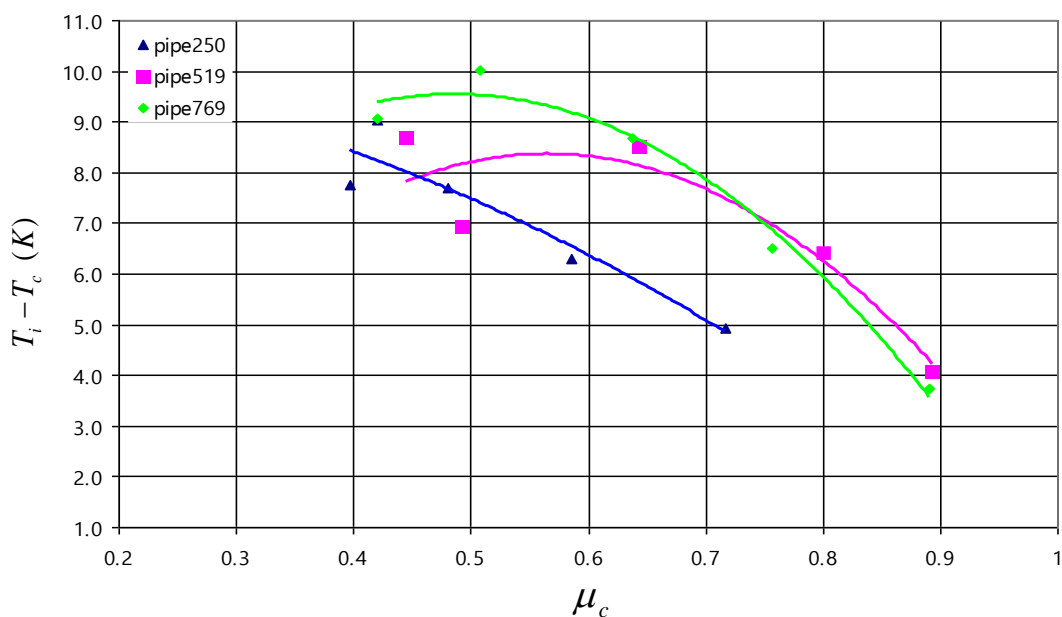
شکل ۶-۵۳: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر

نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است . چنانچه مشاهده

می شود دمای سرد با افزایش μ_c کاهش میابد و بنظر می رسد که به یک مینیمم در حداقل μ_c

نزدیک شده است. حداکثر اختلاف دما در این حالت به ۱۰ کلوین رسیده است که برای لوله گرم با

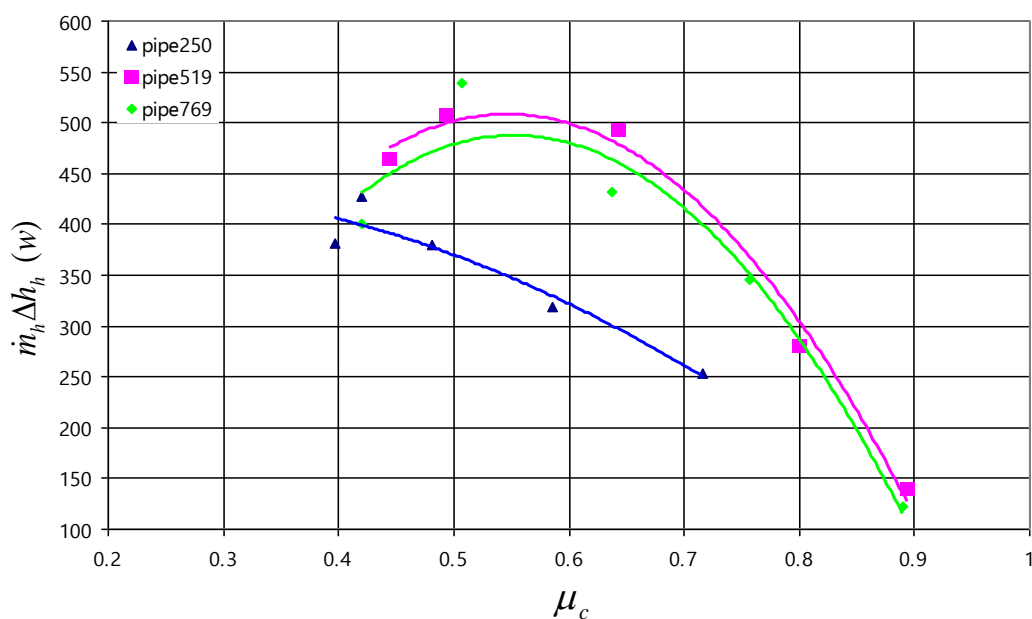
طول ۷۶۹ میلیمتر اتفاق افتاده است.



شکل ۶-۵۴: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_C بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر

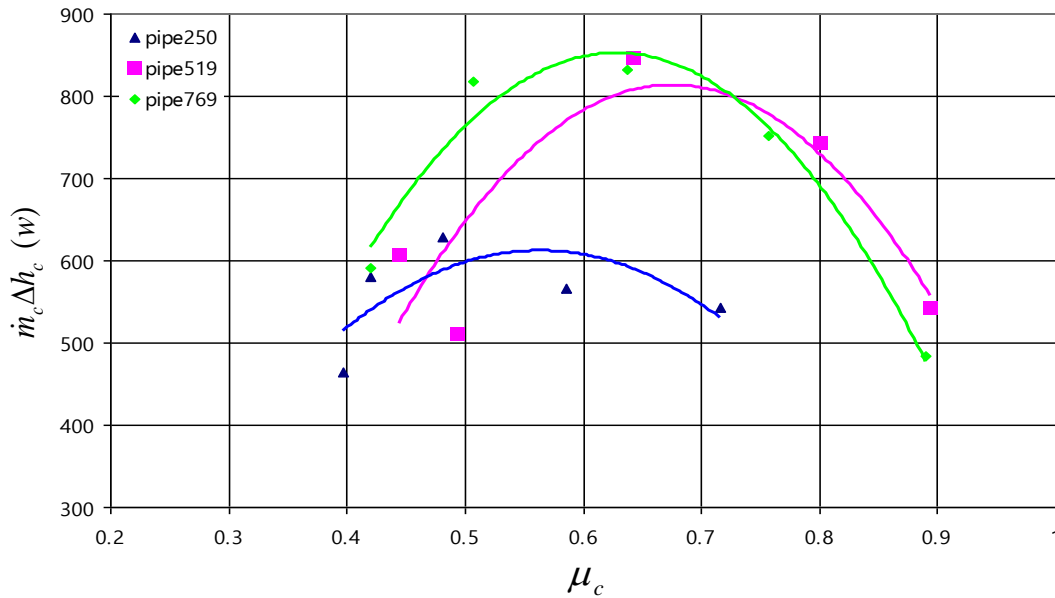
شکل ذیل میزان بار گرمایی ایجاد شده توسط جریان گرم را نشان میدهد. چنان که مشخص است

بیشترین بار گرمایی به μ_c مربوط می باشد و برای μ_c مختلف متفاوت است.



شکل ۶-۵۵: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر

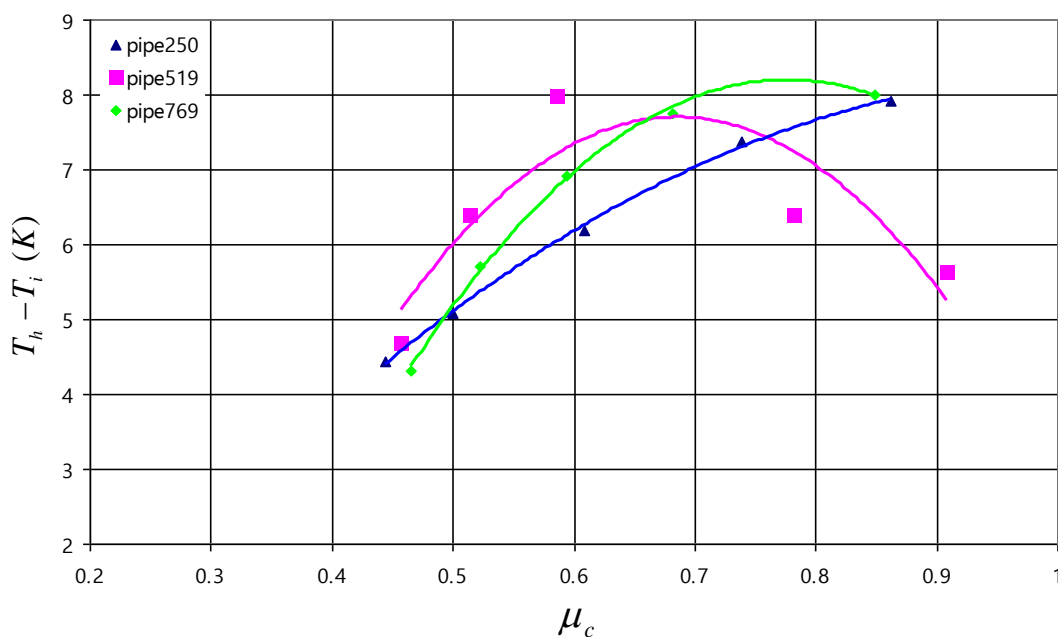
شکل ذیل میزان بار سرمایی ایجاد شده توسط جریان سرد را نشان میدهد. چنان که مشخص است بیشترین بار سرمایی مربوط به لوله ۷۶۹ میلیمتر است.



شکل ۶-۵۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر

۶-۴-۱-۲) اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر

نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل برای این حالت نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود دمای گرم با افزایش μ_c افزایش می یابد و به یک ماکزیمم نزدیک می شود. بیشترین اختلاف دما مربوط به لوله ۵۱۹ و ۷۶۹ میلیمتر است. حداکثر اختلاف دما در این حالت ۸ کلوین است.



شکل ۶-۵۷: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۲٫۱ میلی‌متر

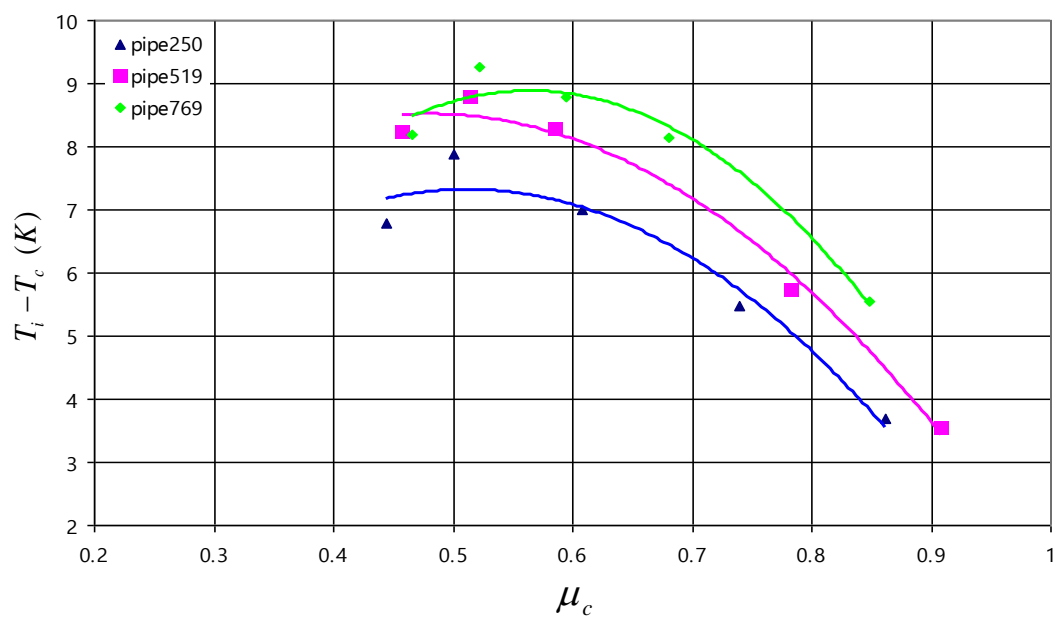
نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است . چنانچه مشاهده

می شود دمای سرد با افزایش μ_c کاهش می یابد و بنظر می رسد که به یک مینیمم در حداقل μ_c

نزدیک شده است. حداکثر اختلاف دما در این حالت به بیش از ۹ کلوین رسیده است که برای لوله

گرم با طول ۷۶۹ میلی‌متر اتفاق افتاده است. بنابراین میتوان گفت که افزایش طول لوله باعث بهبود

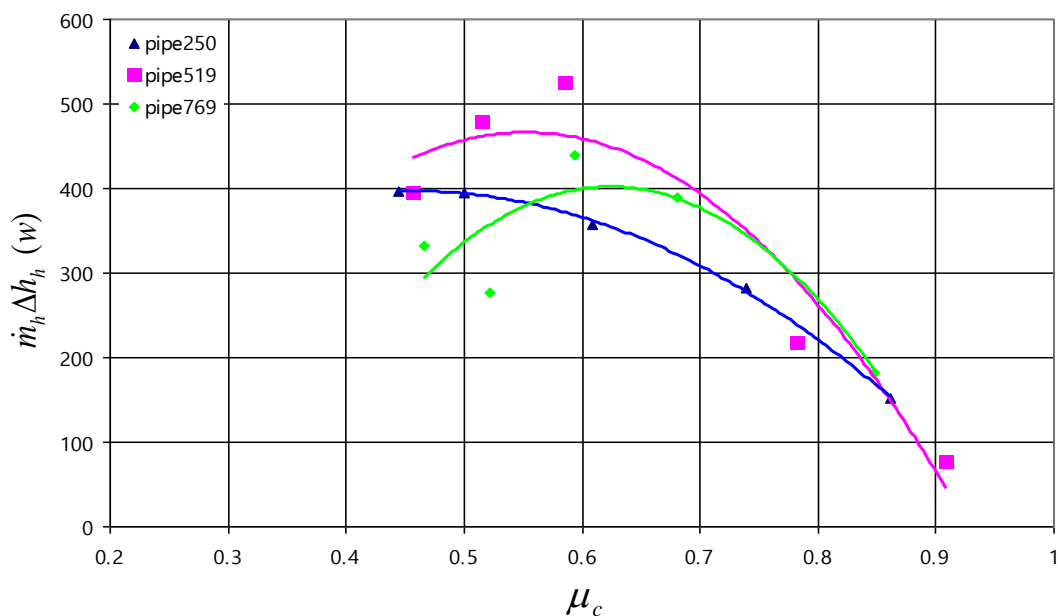
عملکرد لوله گردبادی در کاهش دمای سرد شده است.



شکل ۶-۵۸: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر

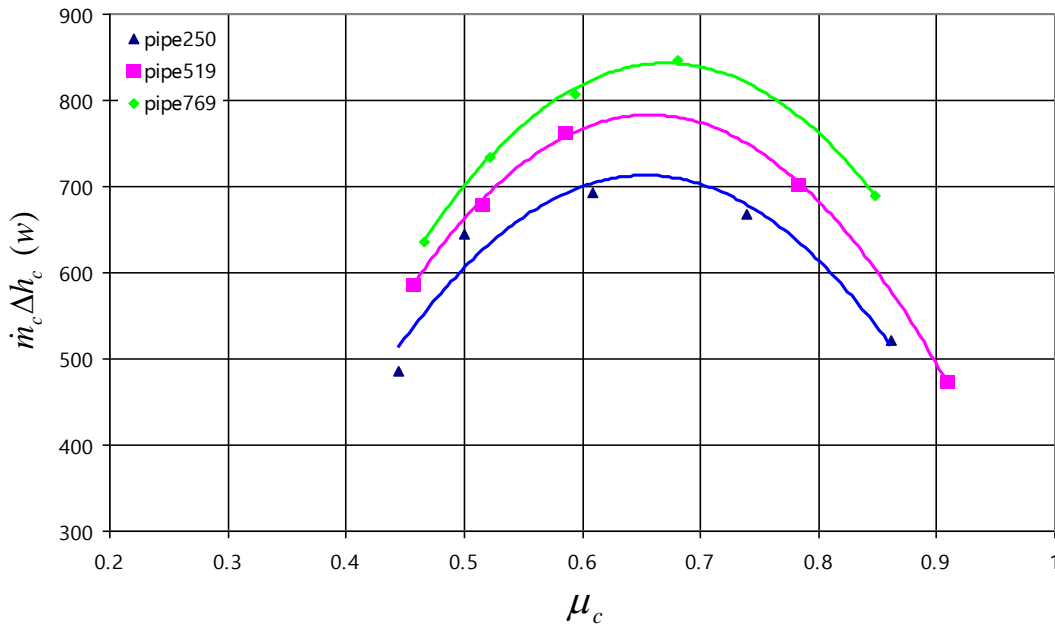
شکل ذیل میزان بار گرمایی ایجاد شده توسط جریان گرم را نشان میدهد. چنان که مشخص است

بیشترین بار گرمایی برای لوله میانی بیشترین مقدار را دارد.



شکل ۶-۵۹: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر

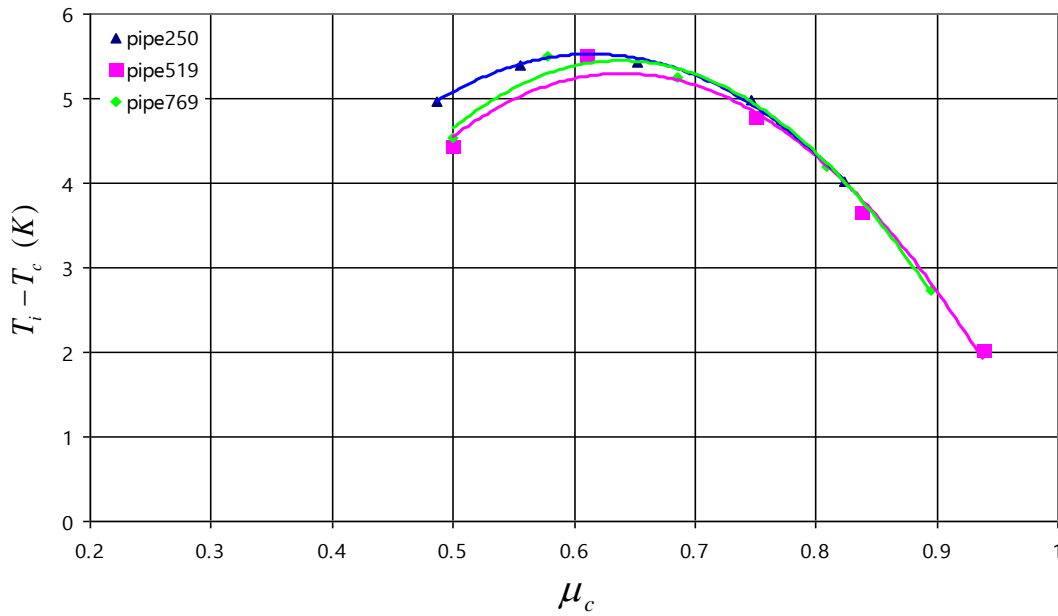
شکل ذیل میزان بار سرمایی ایجاد شده توسط جریان سرد را نشان میدهد. چنان که مشخص است بیشترین بار سرمایی مربوط به لوله ۷۶۹ میلیمتر میباشد. در هر مورد یک ماکزیمم بار سرمایی در یک نسبت دبی خروجی سرد وجود می آید.



شکل ۶-۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر

۶-۴-۱) اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر

نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است چنانچه مشاهده می شود دمای سرد با افزایش μ_c افزایش میابد و به نظر می رسد که به یک مینیمم در حداقل μ_c نزدیک شده است. حداکثر اختلاف دما در این حالت به بیشتر از ۵ کلوین رسیده است که برای لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر اتفاق افتاده است. هرچند باید اشاره کرد که تفاوت اختلاف دماها برای این حالت برای طول های مختلف ناچیز به نظر می رسد.



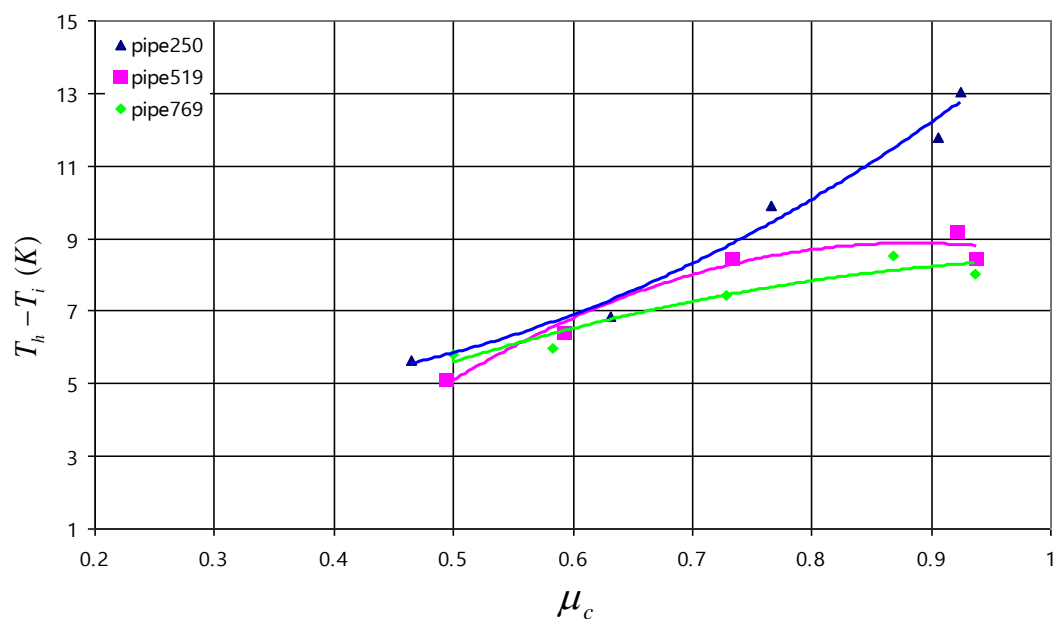
شکل ۶-۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۷٫۷ میلیمتر

نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل برای این حالت نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده

می شود دمای گرم با افزایش μ_c افزایش می یابد و به یک ماکزیمم نزدیک می شود. بیشترین

اختلاف دما مربوط به لوله کوتاهتر است. هر چند که باید اشاره کرد که بنظر می رسد اثر طول لوله

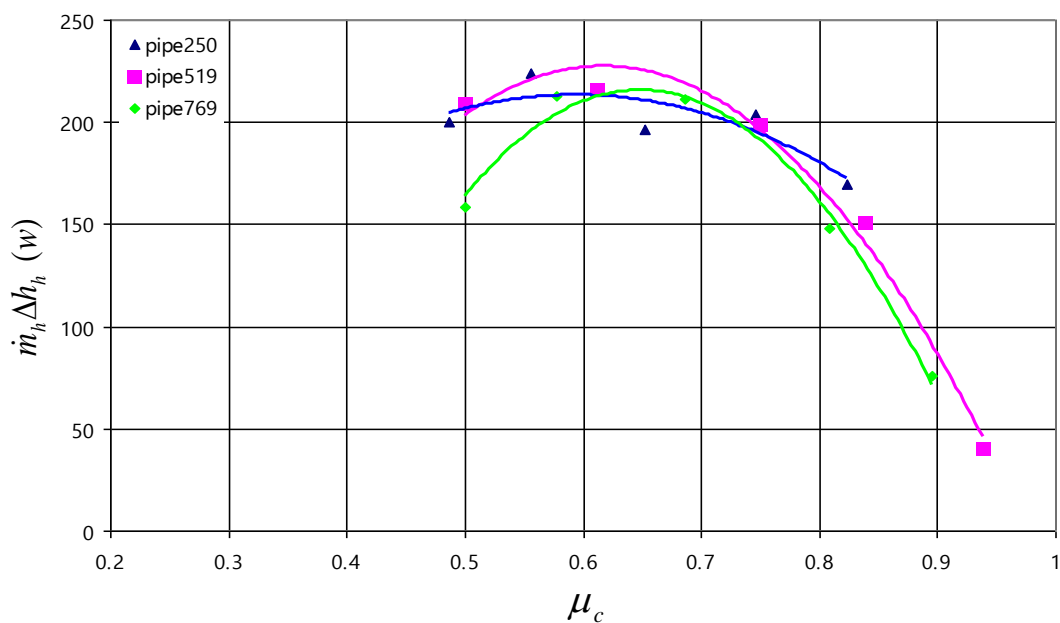
در این حالت چندان بنظر نمی رسد. حداکثر اختلاف دما در این حالت حدود ۱۳ کلوین است .



شکل ۶-۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_C بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر

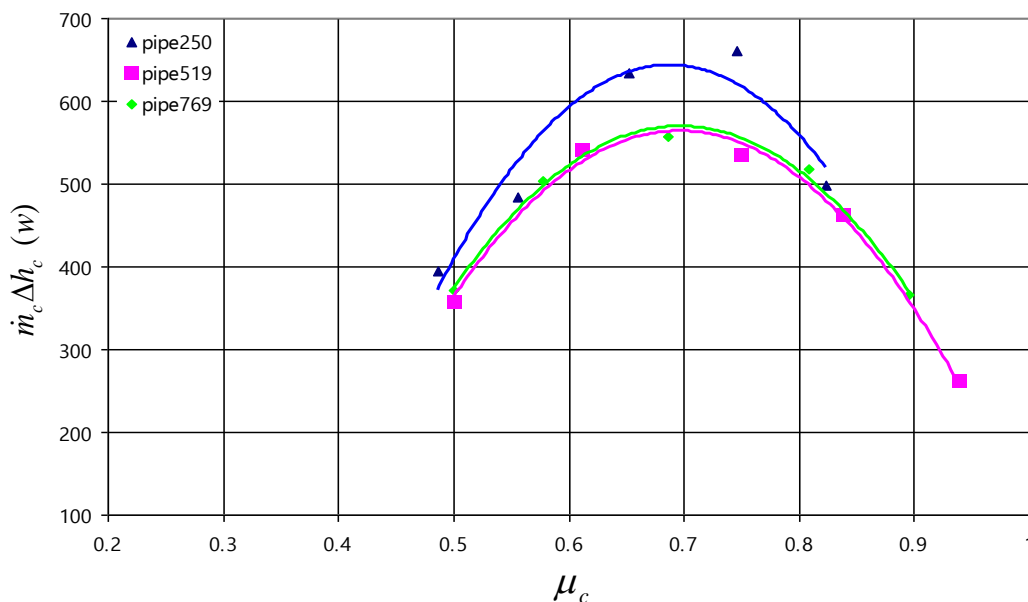
شکل ذیل میزان بار گرمایی ایجاد شده توسط جریان گرم را نشان میدهد. چنان که مشخص است در

هر مورد یک ماکزیمم بار گرمایی در یک نسبت دبی خروجی سرد بوجود می آید.



شکل ۶-۳: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر

شکل ذیل میزان بار سرمایی ایجاد شده توسط جریان سرد را نشان میدهد. چنان که مشخص است بیشترین بار سرمایی مربوط به لوله کوتاهتر میباشد.



شکل ۶-۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر

نتیجه گیری

- برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین خروجی گرم و ورودی در طول ۷۶۹ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین ورودی و خروجی سرد در طول ۷۶۹ میلیمتر اتفاق می افتد.

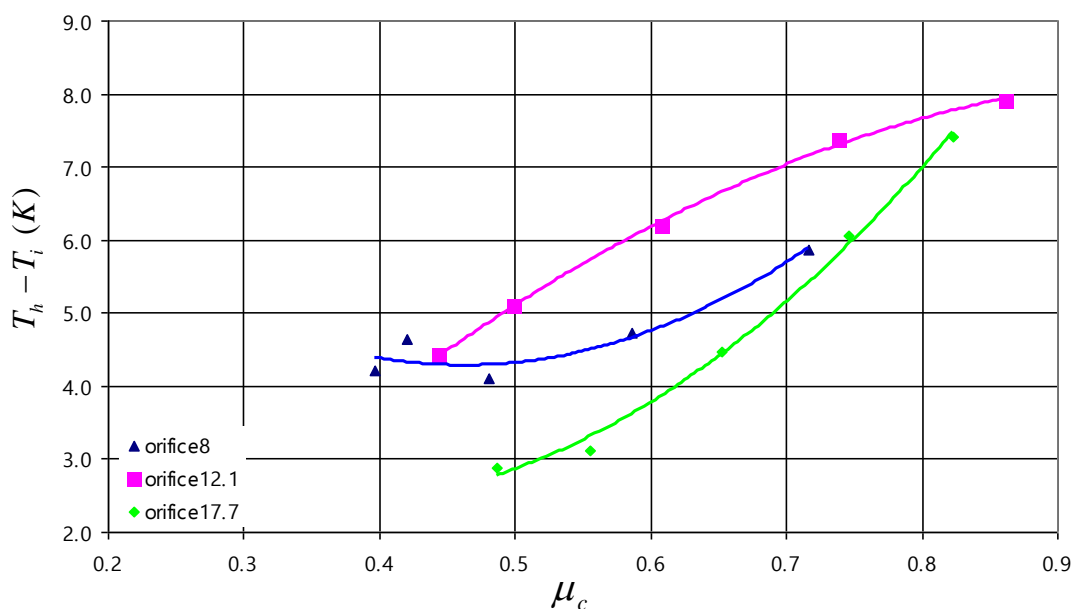
- برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر بیشترین بار گرمایی را لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر و بیشترین بار سرمایی را لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر ایجاد می کند.
- برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین خروجی گرم و ورودی در طول ۷۶۹ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای اریفیس ۸ بیشترین اختلاف دمایی بین ورودی و خروجی سرد در طول ۷۶۹ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر بیشترین بار گرمایی و سرمایی را لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر ایجاد می کند.
- برای اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین خروجی گرم و ورودی در طول ۲۵۰ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین ورودی و خروجی سرد در طول ۷۶۹ میلیمتر اتفاق می افتد. هر چند اختلاف دماها ناچیز بودند.
- برای اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر بیشترین بار گرمایی را لوله گرم به طول ۵۱۹ میلیمتر و بیشترین بار سرمایی را لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر دارا می باشد.

۲-۴-۶. بررسی اثر قطر اریفیس بر راندمان لوله گردبادی

در این قسمت به بررسی قطر اریفیس بر عملکرد لوله گردبادی میپردازیم. برای بررسی اثر قطر اریفیس بر راندمان لوله گردبادی نتایج آزمایشات انجام شده را برای هر طول گرم لوله در قطر های اریفیس مختلف با هم مقایسه میکنیم.

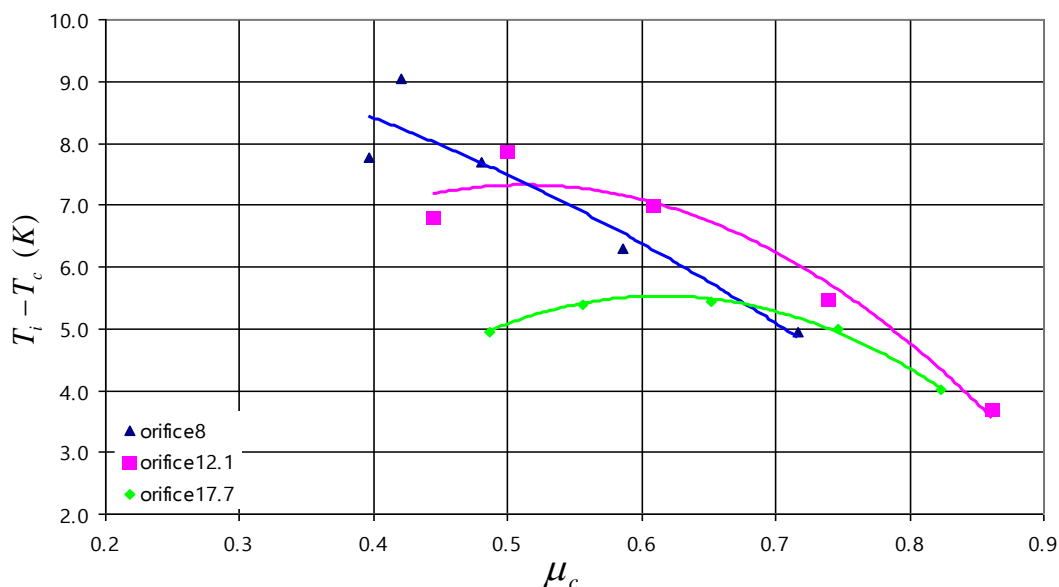
۲-۴-۶-۱) لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر

نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل برای این حالت نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود دمای گرم با افزایش μ_c افزایش می یابد و به یک ماکزیمم نزدیک می شود. بیشترین اختلاف دما مربوط به اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر است. حداکثر اختلاف دما در این حالت ۸ کلوین است.



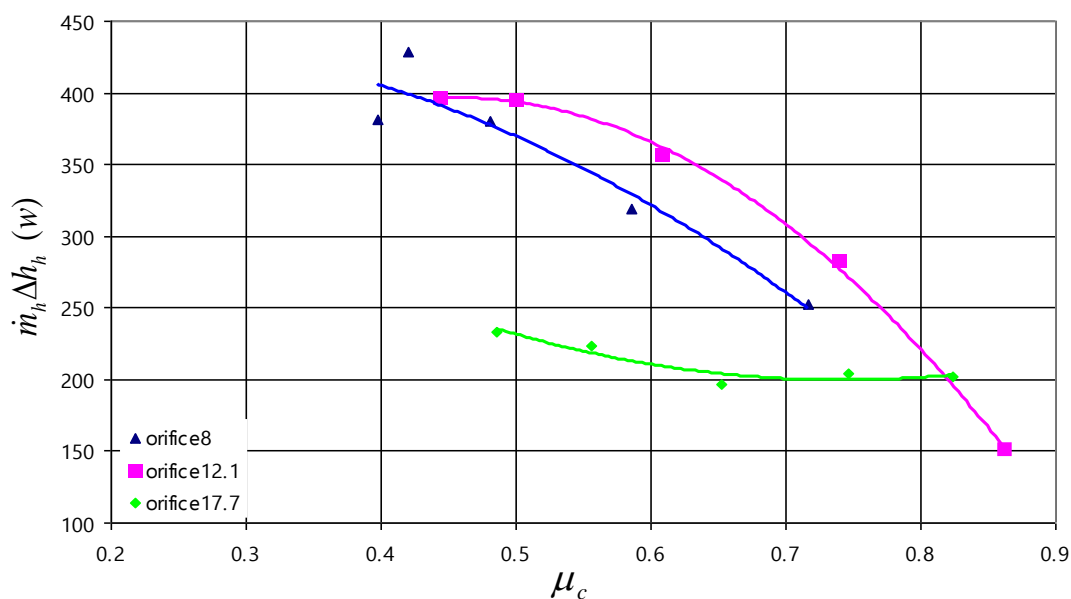
شکل ۶-۵: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر

نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود دمای سرد با افزایش μ_c افزایش می یابد و بنظر می رسد که به یک مینیمم در حداقل μ_c نزدیک شده است. حداکثر اختلاف دما در این حالت به بیش از ۹ کلوین رسیده است که برای اریفیس ۸ میلیمتر اتفاق افتاده است. هرچند باید اشاره کرد که اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر عملکرد بهتری برای μ_c بالاتر دارد .



شکل ۶-۶: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر

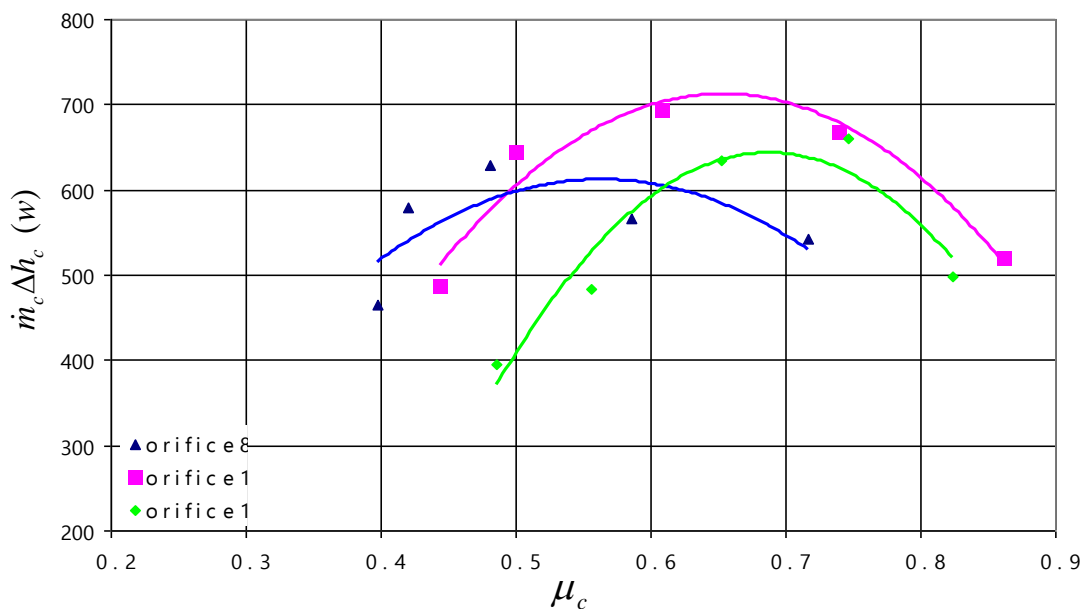
شکل ذیل میزان بار گرمایی ایجاد شده توسط جریان گرم را نشان میدهد. چنان که مشخص است بیشترین بار گرمایی مربوط به اریفیس ۸ میلیمتر است.



شکل ۶-۶۷: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر

شکل ذیل میزان بار سرمایی ایجاد شده توسط جریان سرد را نشان میدهد. چنان که مشخص است

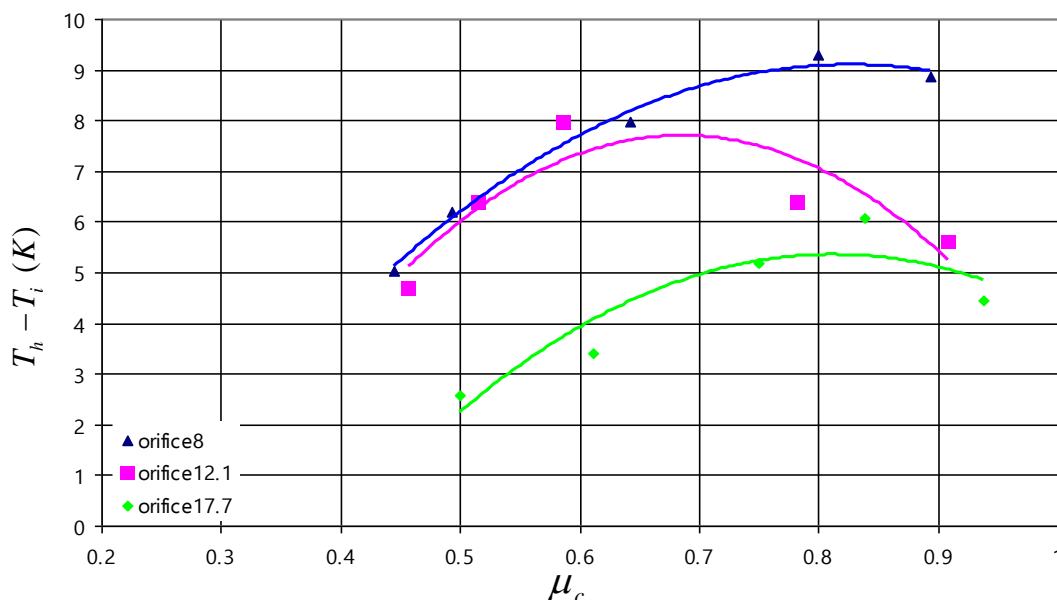
بیشترین بار سرمایی مربوط به اریفیس ۱۲٫۱ میلیمتر می باشد.



شکل ۶-۶۸: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر

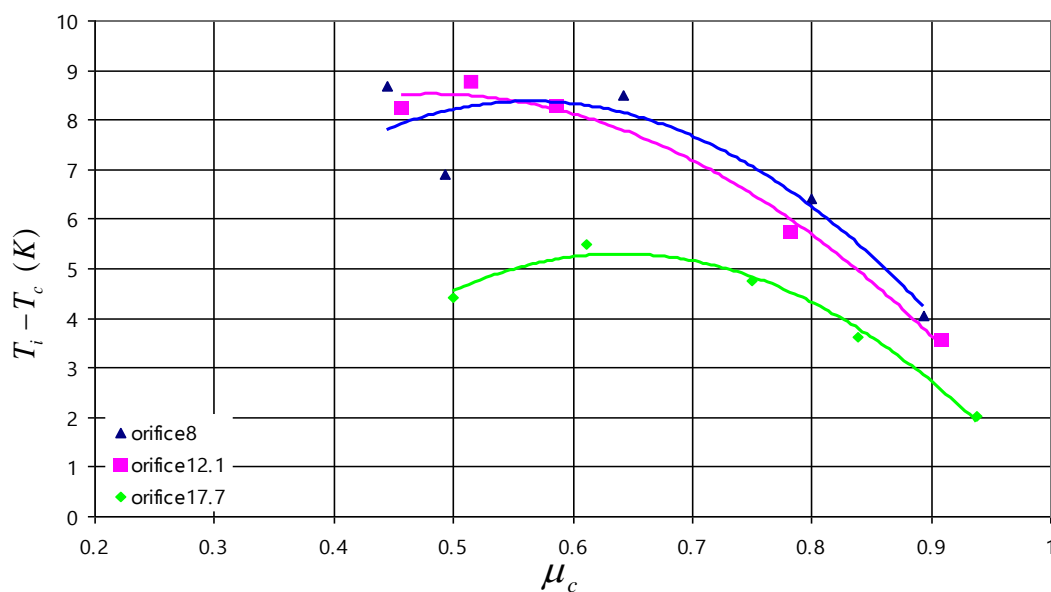
۶-۴-۲) لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر

نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل برای این حالت نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود دمای گرم با افزایش μ_c افزایش می یابد و به یک ماکزیمم نزدیک می شود. بیشترین اختلاف دما مربوط به اریفیس ۸ میلیمتر است. حداکثر اختلاف دما در این حالت به بیش از ۹ کلوین است.



شکل ۶-۶: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر

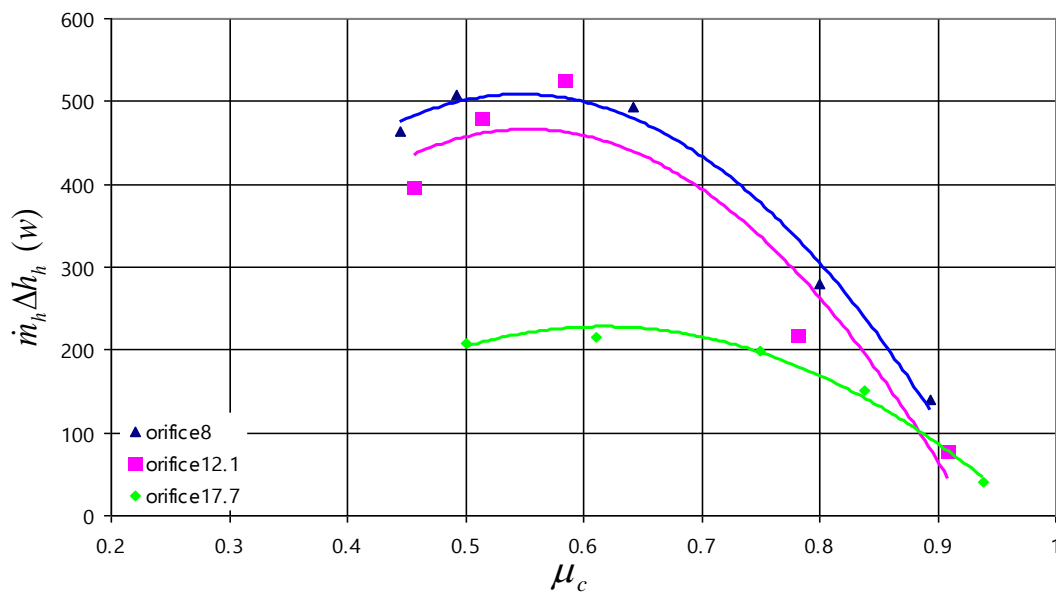
نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود دمای سرد با افزایش μ_c افزایش می یابد و بنظر می رسد که به یک مینیمم در حداقل μ_c نزدیک شده است. حداکثر اختلاف دما در این حالت به بیش از ۸ کلوین رسیده است که برای اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر اتفاق افتاده است .



شکل ۶-۷۰: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر

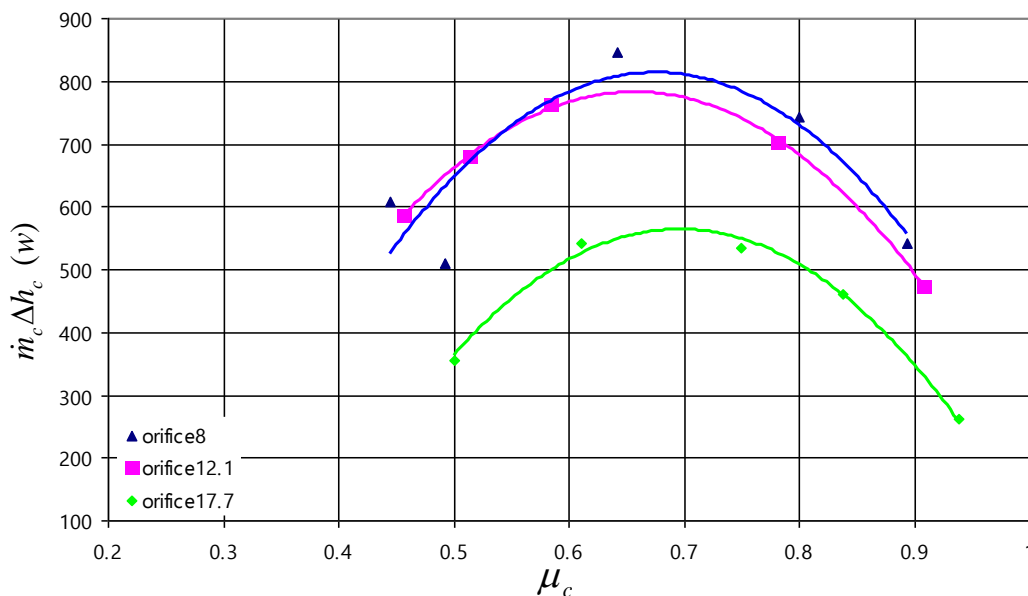
شکل ذیل میزان بار گرمایی ایجاد شده توسط جریان گرم را نشان میدهد. چنان که مشخص است

بیشترین بار گرمایی مربوط به اریفیس ۸ میلیمتر است.



شکل ۶-۷۱: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر

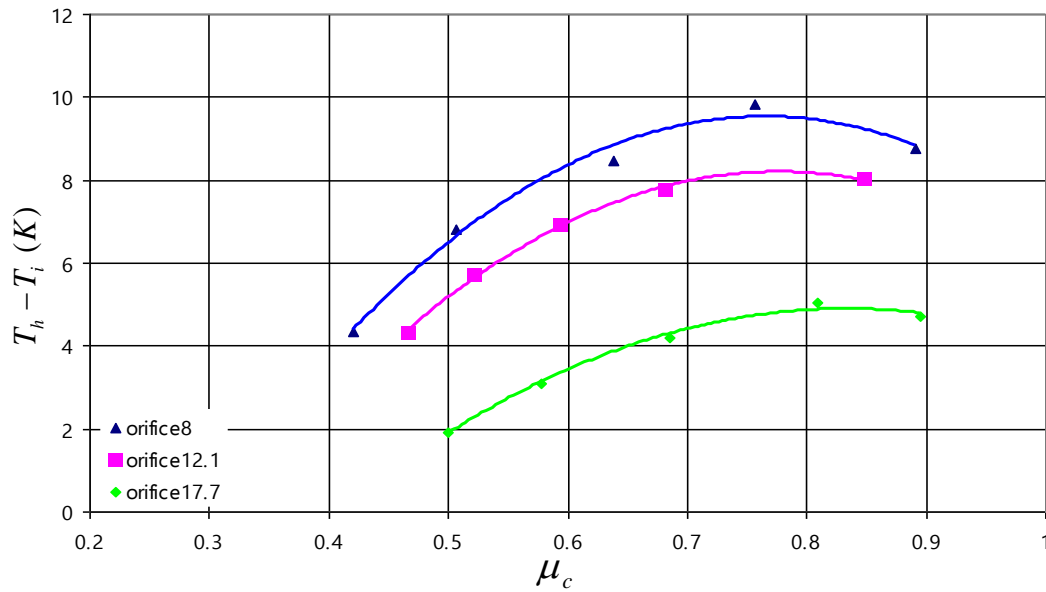
شکل ذیل میزان بار سرمایی ایجاد شده توسط جریان سرد را نشان میدهد. چنان که مشخص است بیشترین بار سرمایی مربوط اریفیس ۸ میلیمتر می باشد. در هر مورد یک ماکزیمم بار سرمایی در یک نسبت دبی خروجی سرد بوجود می آید.



شکل ۶-۷۲: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر

۶-۴-۲-۳) لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر

نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در شکل ذیل برای این حالت نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود دمای گرم با افزایش μ_c افزایش می یابد و به یک ماکزیمم نزدیک می شود. بیشترین اختلاف دما مربوط به اریفیس ۸ میلیمتر است. حداکثر اختلاف دما در این حالت بیش از ۹ کلوین است.



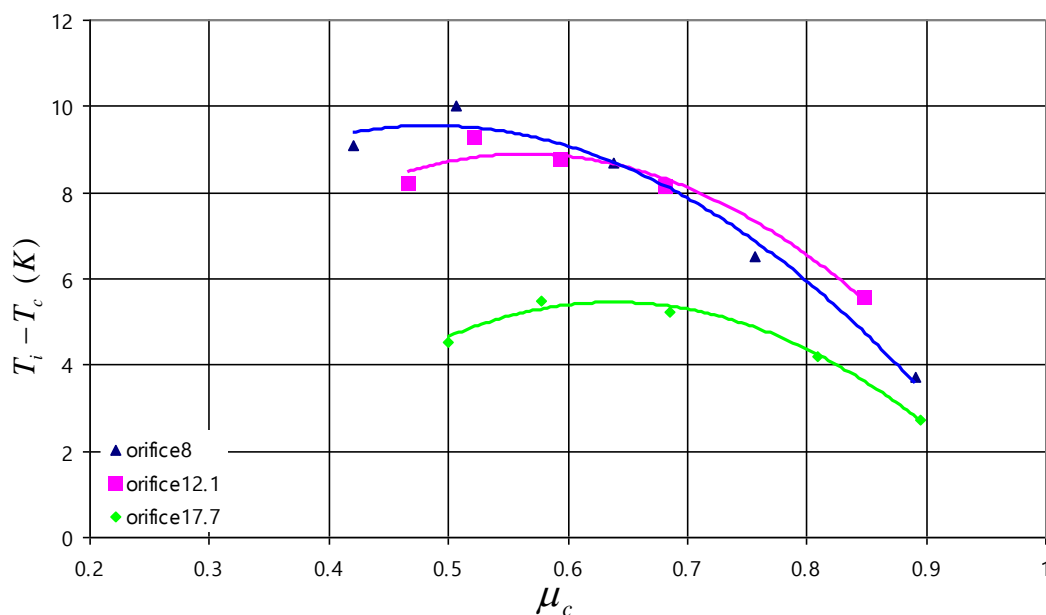
شکل ۶-۷۳: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۷۶۹ میلی‌متر

نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده

می‌شود دمای سرد با افزایش μ_c افزایش می‌یابد و بنظر می‌رسد که به یک مینیمم در حداقل μ_c

نزدیک شده است. حداکثر اختلاف دما در این حالت به بیشتر از ۹ کلوین رسیده است که برای

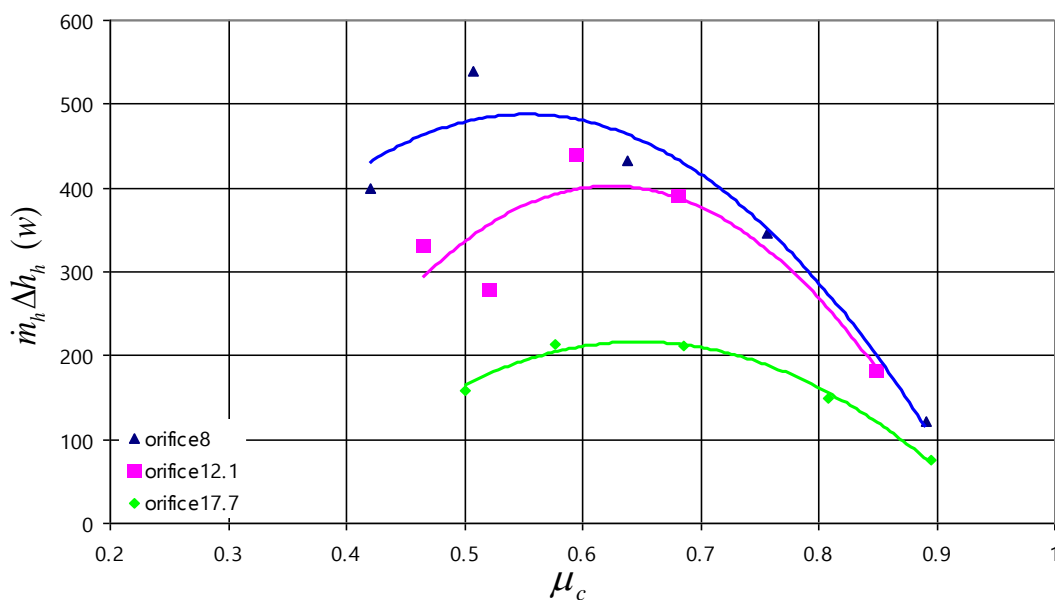
اریفیس ۸ میلی‌متر اتفاق افتاده است.



شکل ۶-۷۴: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر

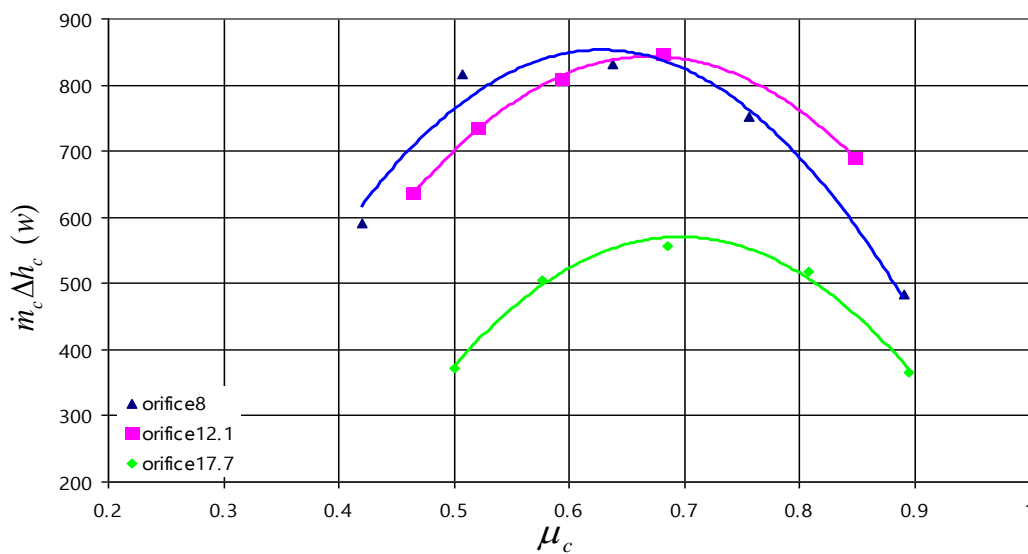
شکل ذیل میزان بار گرمایی ایجاد شده توسط جریان گرم را نشان میدهد. چنان که مشخص است

بیشترین بار گرمایی مربوط به اریفیس ۸ میلیمتر است.



شکل ۶-۷۵: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر

شکل ذیل میزان بار سرمایی ایجاد شده توسط جریان سرد را نشان میدهد. چنان که مشخص است بیشترین بار سرمایی مربوط اریفیس ۱۲٫۱ میلیمتر می باشد. در هر مورد یک ماکزیمم بار سرمایی در یک نسبت دبی خروجی سرد بوجود می آید .



شکل ۶-۷: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر

نتیجه گیری

- برای لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین خروجی گرم و ورودی برای اریفیس با قطر ۱۲٫۱ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین ورودی و خروجی سرد برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر بیشترین بار گرمایی را اریفیس با قطر ۸ میلیمتر و بیشترین بار سرمایی را اریفیس با قطر ۱۲٫۱ میلیمتر ایجاد می کند.

- برای لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین خروجی گرم و ورودی برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین ورودی و خروجی سرد برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر بیشترین بار گرمایی را اریفیس با قطر ۸ میلیمتر و بیشترین بار سرمایی را اریفیس با قطرهای ۱۲,۱ و ۸ میلیمتر ایجاد می کنند.
- برای لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین خروجی گرم و ورودی برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر بیشترین اختلاف دمایی بین ورودی و خروجی سرد برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر اتفاق می افتد.
- برای لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر بیشترین بار گرمایی و سرمایی را اریفیس با قطر ۸ میلیمتر ایجاد می کند.

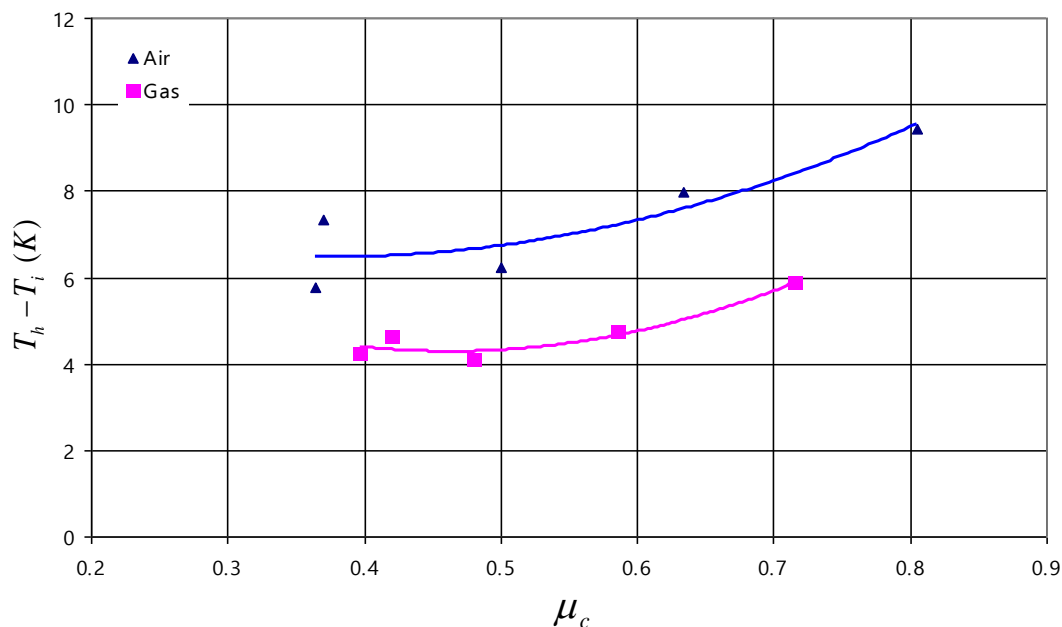
۵-۶. مقایسه بین هوا و گاز

در این قسمت رفتار گاز طبیعی و هوا را در درون لوله گردبادی مقایسه می شوند و اثر پارامترهایی که تا کنون مورد مطالعه قرار گرفته برای سه حالت هندسی متفاوت بررسی می شوند . لازم به ذکر است

که در صورت رفتار مشابه می توان از مطالعاتی که تا کنون برای هوا انجام گرفته است برای گاز طبیعی نیز استفاده کرد.

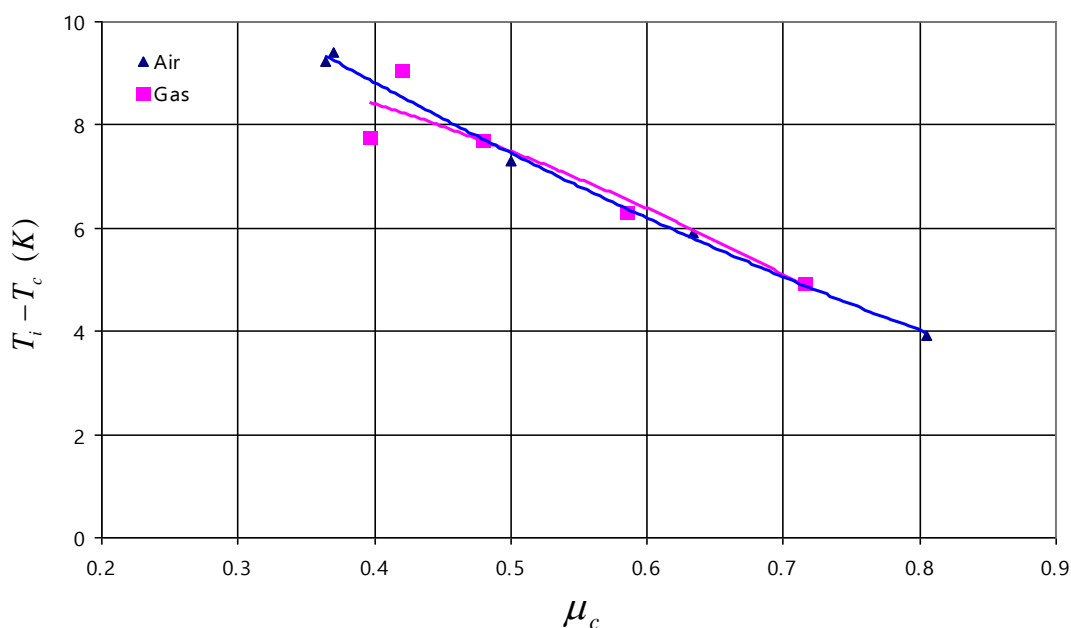
۱-۵-۶. اریفیس با قطر ۸ میلیمتر و لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر

شکل ذیل نشان دهنده اختلاف ΔT_h برای هوا و گاز در فشار ۵ بار و حالتی که قطر اریفیس ۸ میلیمتر و لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر است. همانطور که مشاهده می شود ، روند تغییرات دمایی برای هر دو یکسان و ΔT_h برای هوا بزرگتر و در نتیجه خروجی گرم هوا در شرایط یکسان دارای دمایی بیشتری نسبت به گاز است به طوریکه این مقدار برای هوا به بیش از ۹ کلوین می رسد در حالی که برای گاز طبیعی این مقدار کمتر از ۶ است .



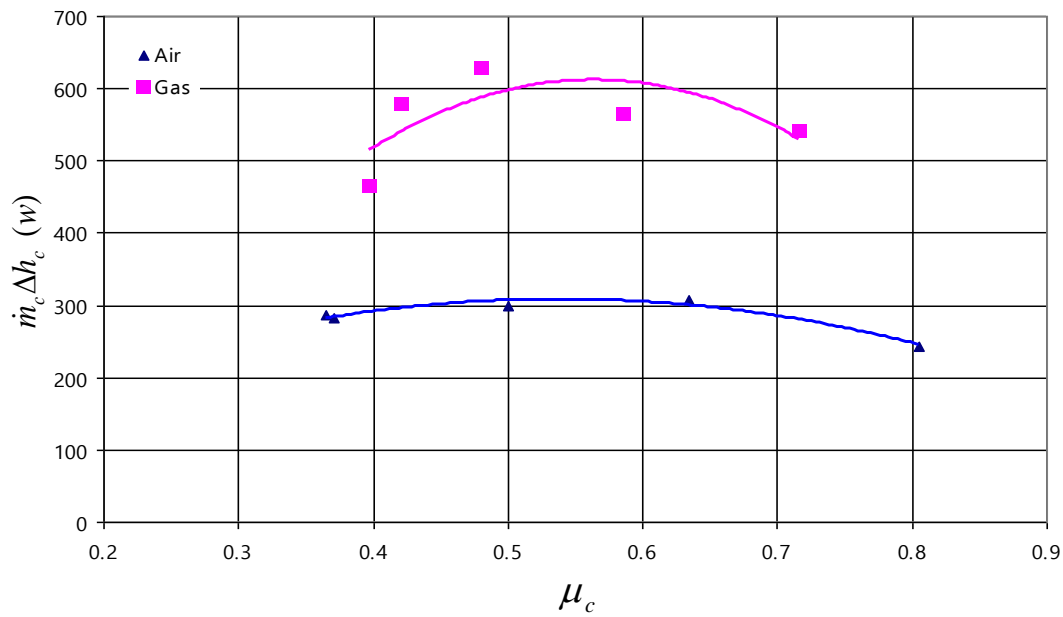
شکل ۶-۷۷: مقایسه ΔT_h بین هوا و گاز در فشار ۵ بار

شکل ذیل نشان دهنده اختلاف ΔT_c برای هوا و گاز در فشار ۵ بار و حالتی که قطر اریفیس ۸ میلیمتر و لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر است. همانطور که مشاهده می شود ، روند تغییرات دمایی برای هر دو یکسان و ΔT_c برای هوا کمی بزرگتر و در نتیجه خروجی سرد هوا در شرایط یکسان دارای اندک دمای کمتری نسبت به گاز طبیعی است.



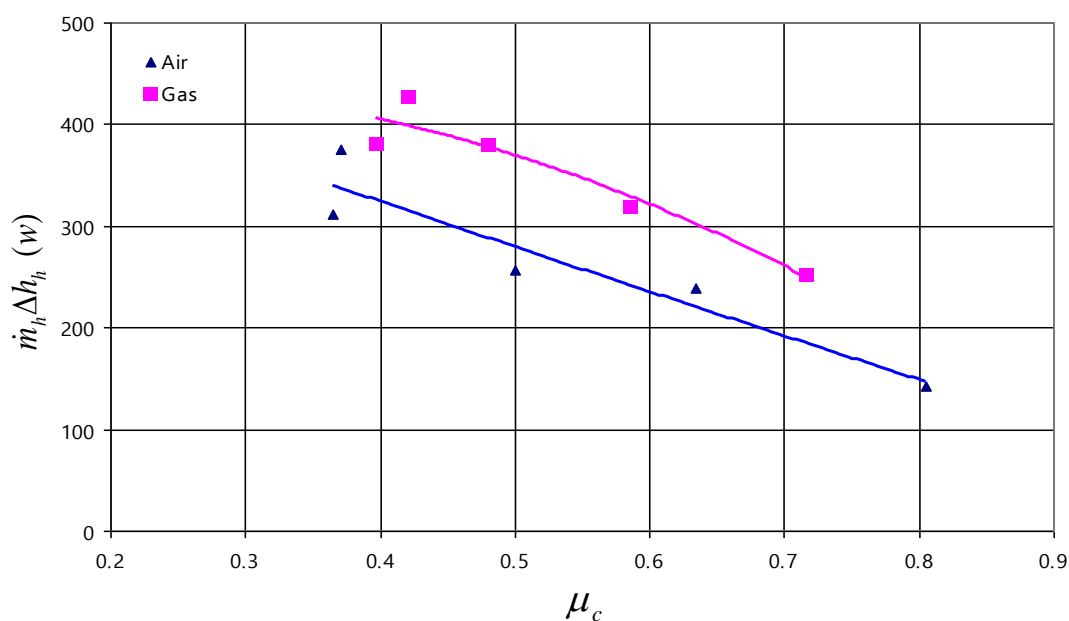
شکل ۶-۷۸: مقایسه ΔT_c بین هوا و گاز در فشار ۵ بار

شکل ذیل نشان دهنده تغییرات بار سرمایی گاز سرد بر حسب μ_c برای هوا و گاز در فشار ۵ بار و حالتی که قطر اریفیس ۸ میلیمتر و لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر است. همانطور که مشاهده می شود ، روند تغییرات بار سرمایی برای هر دو تقریباً مشابه و $m_c \Delta h_c$ برای گاز طبیعی بیشتر است. این به علت داشتن حرارت مخصوص بالاتر می باشد به طوریکه این مقدار برای گاز طبیعی به بیش از ۶۰۰ وات می رسد در حالی که برای هوا این مقدار ۳۰۰ وات است.



شکل ۶-۷۹: مقایسه انرژی سرمایی گاز سرد بین هوا و گاز در فشار ۵ بار

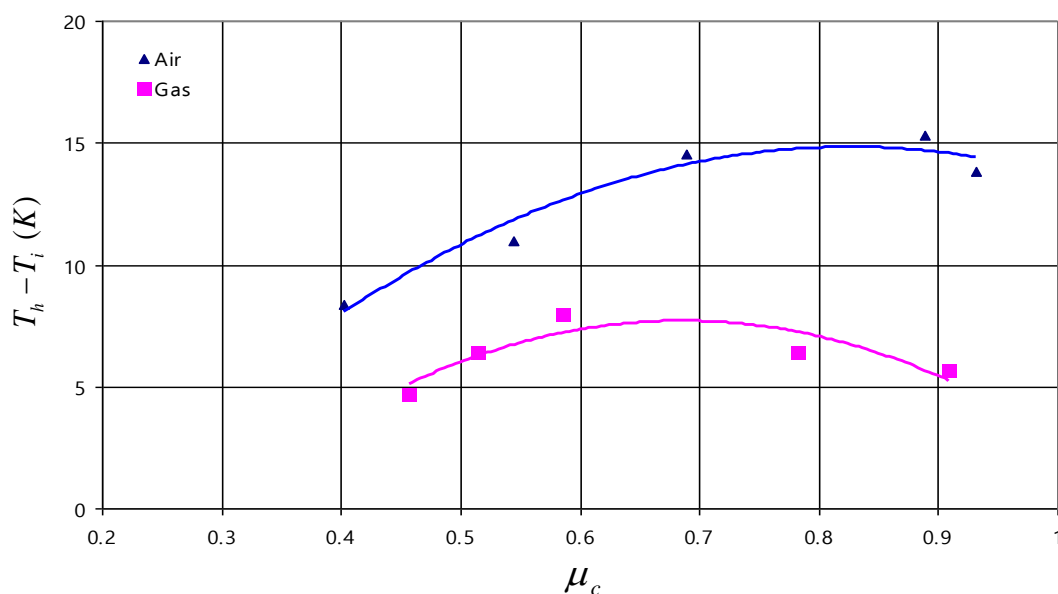
شکل ذیل نشان دهنده تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای هوا و گاز طبیعی در فشار ۵ بار و حالتی که قطر اریفیس ۸ میلیمتر و لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر است. همانطور که مشاهده می شود ، روند تغییرات انرژی سرمایی برای هر دو تقریباً مشابه و برای $m_h \Delta h_h$ و $m_c \Delta h_c$ گاز طبیعی بیشتر است. این به علت داشتن حرارت مخصوص بالاتر گاز طبیعی می باشد به طوری که این مقدار برای گاز به بیش از ۴۰۰ وات می رسد در حالی که برای هوا این مقدار کمتر از ۴۰۰ است .



شکل ۶-۸۰: مقایسه انرژی گرمایی گاز گرم بین هوا و گاز در فشار ۵ بار

۲-۵-۶. اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر و لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر

شکل ذیل نشان دهنده اختلاف ΔT_h برای هوا و گاز طبیعی در فشار ۵ بار و حالتی که قطر اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر و طول گرم لوله ۵۱۹ میلیمتر است. همانطور که مشاهده می شود ، روند تغییرات دمایی برای هر دو مشابه و ΔT_h برای هوا بزرگتر و در نتیجه خروجی گرم هوا در شرایط یکسان دارای دمایی بیشتری نسبت به گاز طبیعی است به طوریکه این مقدار برای هوا به بیش از ۱۵ کلوین می رسد در حالی که برای گاز طبیعی این مقدار کمتر از ۹ است.

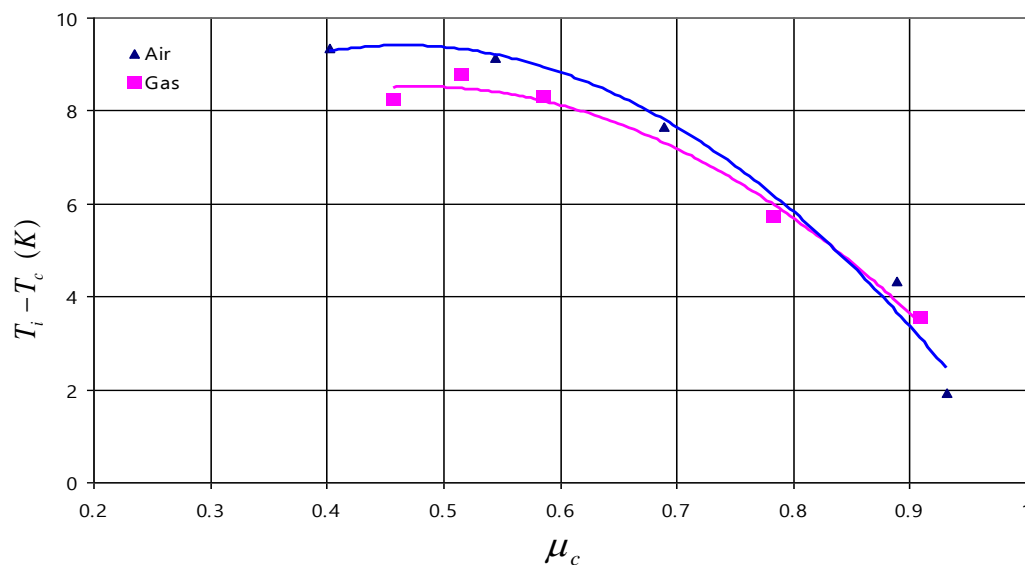


شکل ۶-۸۱: مقایسه ΔT_h بین هوا و گاز در فشار ۵ بار

شکل ذیل نشان دهنده اختلاف ΔT_c برای هوا و گاز طبیعی در شرایط مشابه قبل می باشد . همانطور

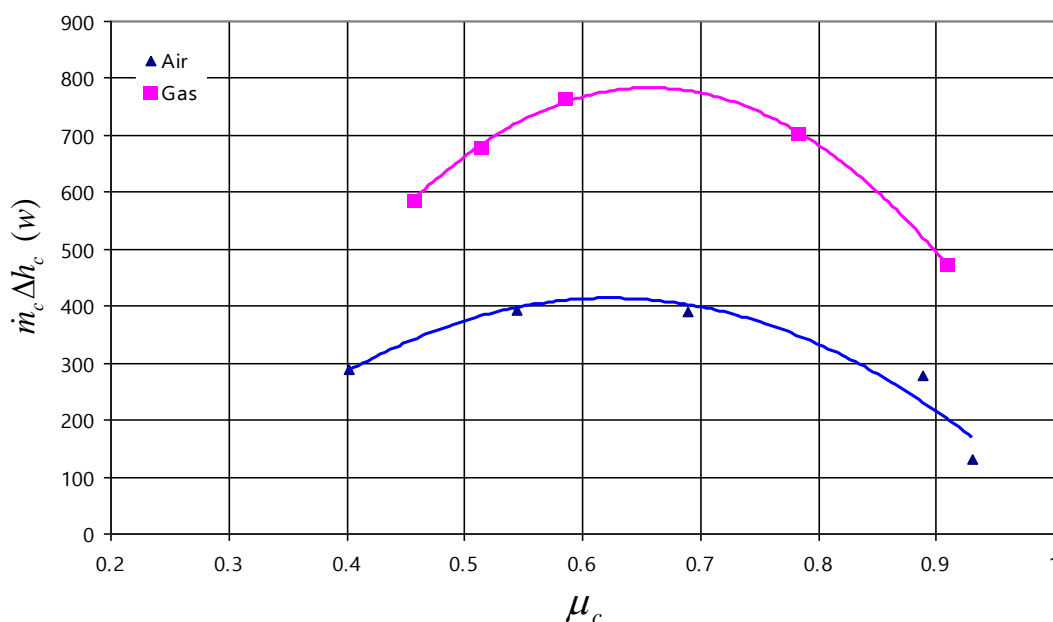
که مشاهده می شود ، روند تغییرات دمایی برای هر دو یکسان و ΔT_c برای هوا بزرگتر و در نتیجه

خروجی سرد هوا در شرایط یکسان دارای دمای کمتری نسبت به گاز طبیعی است.



شکل ۶-۸۲: مقایسه ΔT_c بین هوا و گاز در فشار ۵ بار

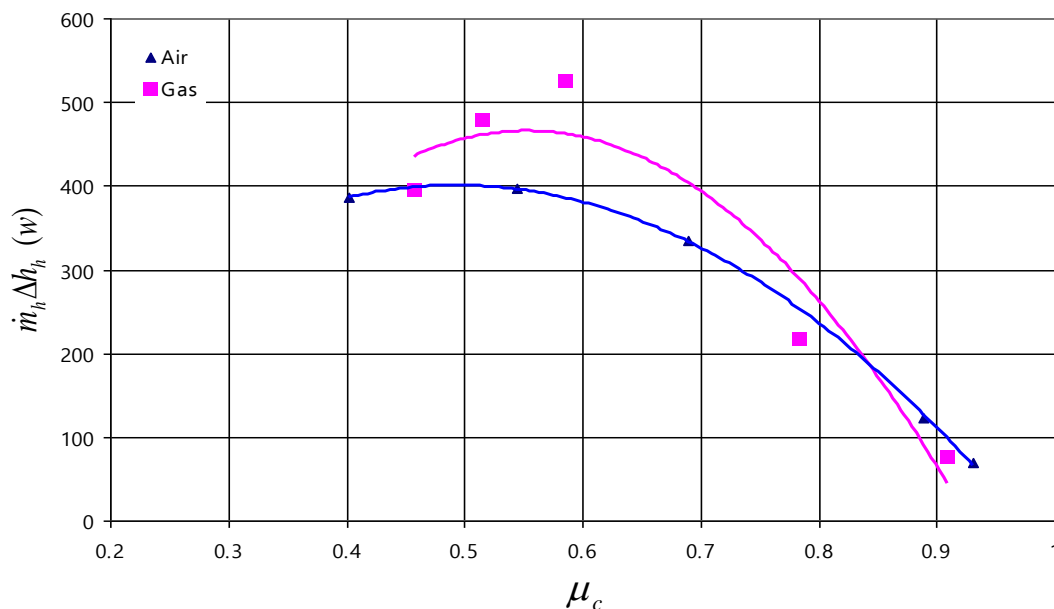
شکل ذیل نشان دهنده تغییرات انرژی سرمایی گاز سرد بر حسب μ_c برای هوا و گاز طبیعی در فشار ۵ بار و حالتی که قطر اریفیس ۱۲٫۱ میلیمتر و لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر است. همانطور که مشاهده می شود ، روند تغییرات انرژی سرمایی برای هر دو تقریباً مشابه و $\dot{m}_c \Delta h_c$ برای گاز طبیعی بیشتر است که این به علت داشتن حرارت مخصوص بالاتر گاز طبیعی می باشد به طوریکه این مقدار برای گاز به بیش از ۷۰۰ وات می رسد در حالی که برای هوا این مقدار ۴۰۰ وات است.



شکل ۶-۸۳: مقایسه انرژی سرمایی گاز سرد بین هوا و گاز در فشار ۵ بار

شکل ذیل نشان دهنده تغییرات انرژی سرمایی گاز سرد بر حسب μ_c برای هوا و گاز طبیعی در شرایط مشابه حالت قبل است. همانطور که مشاهده می شود روند تغییرات انرژی گرمایی برای هر دو تقریباً مشابه و $\dot{m}_h \Delta h_h$ برای گاز بیشتر است که این به علت داشتن حرارت مخصوص بالاتر گاز طبیعی است.

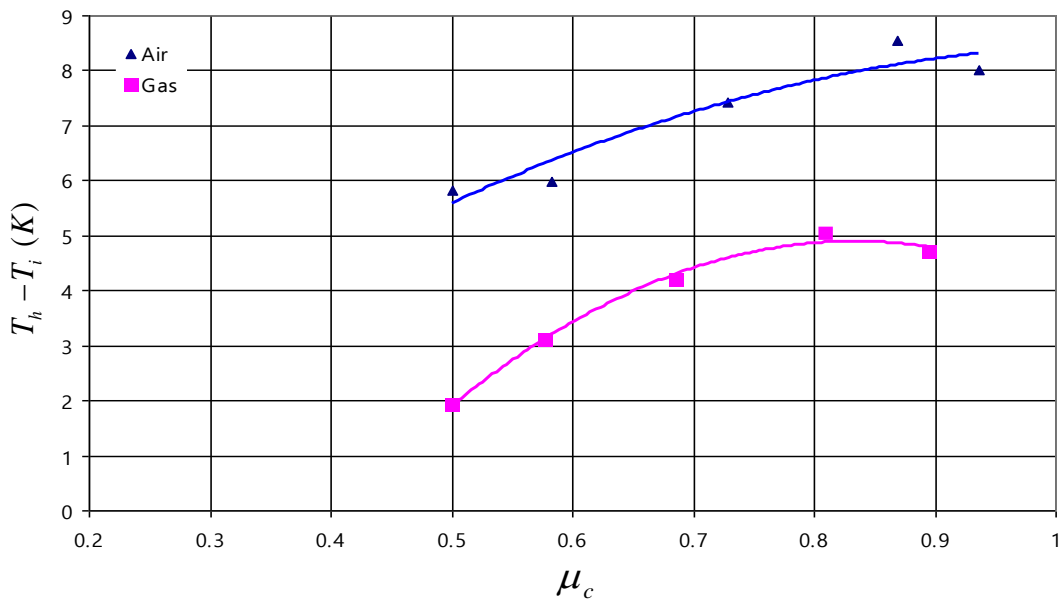
به طوریکه این مقدار برای گاز به بیش از ۵۰۰ وات می رسد در حالی که برای هوا این مقدار کمتر از ۴۰۰ است.



شکل ۶-۸۴: مقایسه انرژی گرمایی گاز گرم بین هوا و گاز در فشار ۵ بار

۳-۵-۶. اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر و لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر

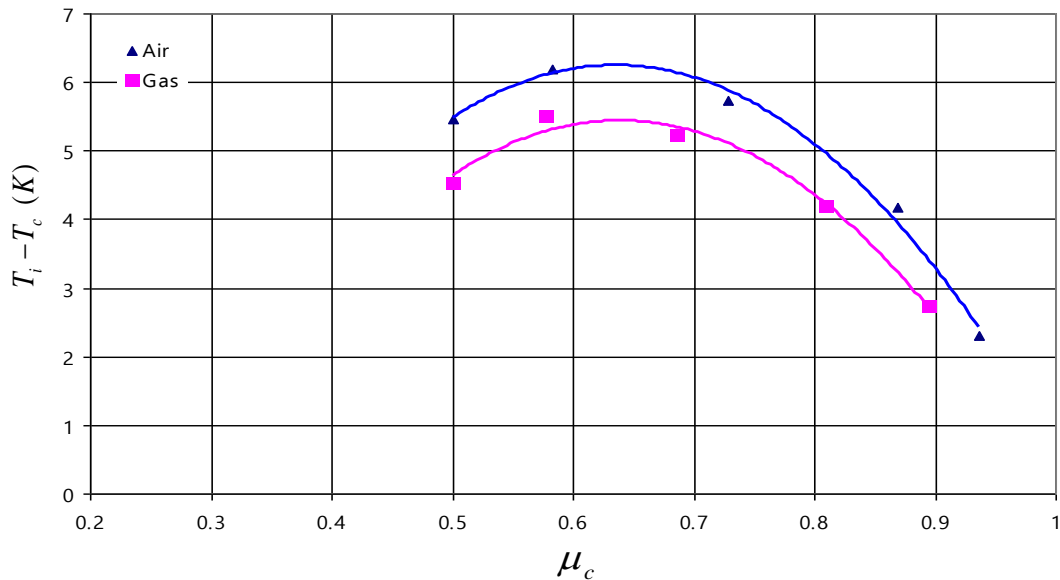
شکل ذیل نشان دهنده اختلاف ΔT_h برای هوا و گاز طبیعی در فشار ۵ بار و حالتی که قطر اریفیس ۱۷,۷ میلیمتر و لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر است. همانطور که مشاهده می شود روند تغییرات دمایی برای هر دو مشابه و ΔT_h برای هوا بزرگتر و در نتیجه خروجی گرم هوا در شرایط یکسان دارای دمایی بیشتری نسبت به گاز طبیعی است به طوریکه این مقدار برای هوا به بیش از ۸ کلوین می رسد در حالی که برای گاز این مقدار ۵ است.



شکل ۶-۸۵: مقایسه ΔT_h بین هوا و گاز در فشار ۵ بار

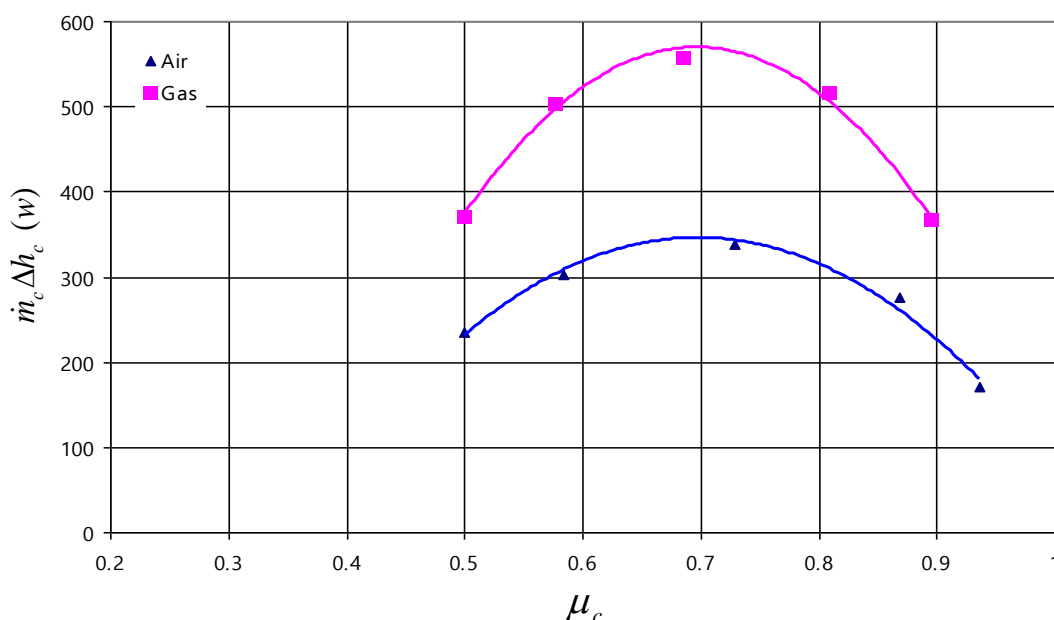
شکل ذیل نشان دهنده اختلاف ΔT_c برای هوا و گاز طبیعی در شرایط مشابه حالت قبل است .

همانطور که مشاهده می شود ، ΔT_c برای هوا بزرگتر از گاز طبیعی است.



شکل ۶-۸۶: مقایسه ΔT_c بین هوا و گاز در فشار ۵ بار

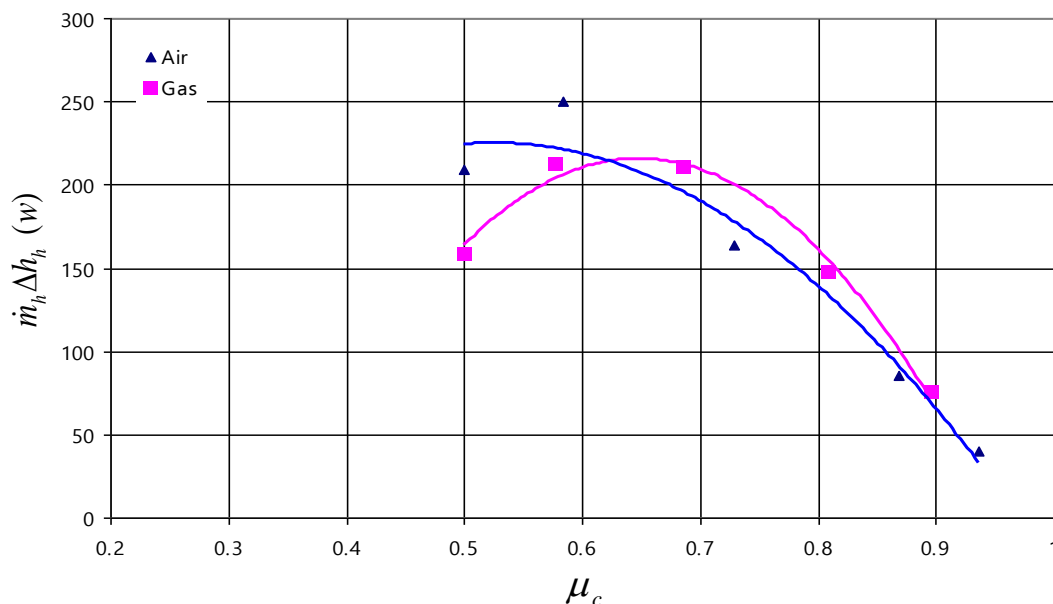
شکل ذیل نشان دهنده تغییرات انرژی سرمایی گاز سرد بر حسب μ_c برای هوا و گاز طبیعی در فشار ۵ بار و حالتی که قطر اریفیس ۱۷,۷ میلیمتر و طول لوله گرم ۷۶۹ میلیمتر است. همانطور که مشاهده می شود روند تغییرات انرژی سرمایی برای هر دو تقریبا مشابه و $\dot{m}_c \Delta h_c$ برای گاز طبیعی بیشتر است که این به علت داشتن حرارت مخصوص بالاتر گاز می باشد به طوریکه این مقدار برای گاز طبیعی به بیش از ۵۰۰ وات می رسد در حالی که برای هوا این مقدار به بیش از ۳۰۰ وات می رسد.



شکل ۶-۸۷: مقایسه انرژی سرمایی گاز سرد بین هوا و گاز در فشار ۵ بار

شکل ذیل نشان دهنده تغییرات انرژی سرمایی گاز سرد بر حسب μ_c برای هوا و گاز طبیعی در فشار ۵ بار و حالتی که قطر اریفیس ۱۷,۷ میلیمتر و طول لوله گرم ۷۶۹ میلیمتر است. همانطور که مشاهده می شود روند تغییرات انرژی گرمایی برای هر دو تقریبا مشابه و $\dot{m}_h \Delta h_h$ برای گاز طبیعی بیشتر است

که این به علت داشتن حرارت مخصوص بالاتر گاز طبیعی می باشد به طوریکه این مقدار برای گاز طبیعی به ۲۵۰ وات می رسد در حالی که برای هوا این مقدار ۲۰۰ وات است.



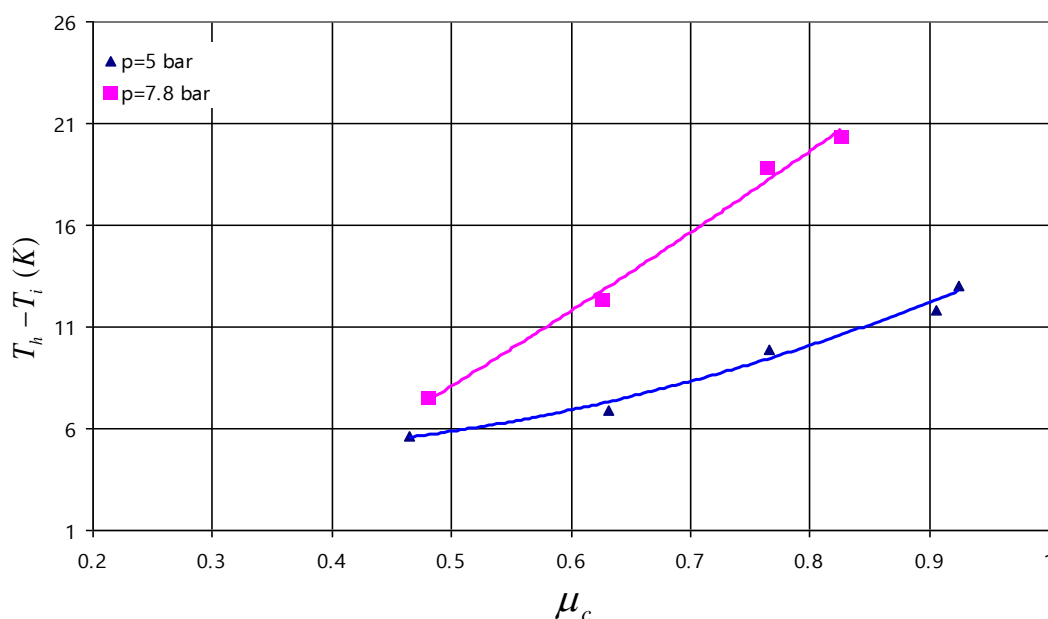
شکل ۶-۸۸: مقایسه انرژی گرمایی گاز گرم بین هوا و گاز در فشار ۵ بار

۶-۶. مقایسه فشارها

تاثیر فشار ورودی بر جدایش گرمایی و سرمایی سیال در درون لوله گردبادی نیز می تواند در پیش بینی عملکرد لوله گردبادی در فشارهای بالاتر بسیار مفید باشد. در این قسمت با داشتن اطلاعات مربوط به هوا برای فشارهای ۵، ۷، ۸ و ۱۰ بار، به بررسی اثر فشار ورودی بر راندمان لوله گردبادی و جدایش دمایی و همچنین بر انرژی گرمایی و سرمایی گازهای خروجی می پردازیم.

۶-۶-۱. اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر و لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر

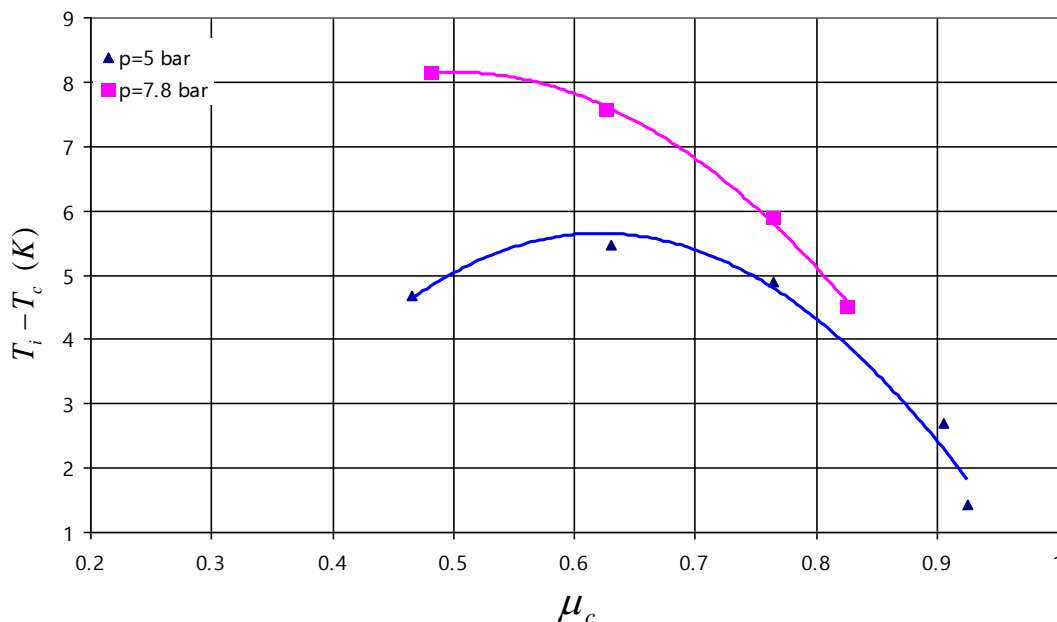
نتایج اختلاف دمای گرم ΔT_h در فشار های ۵ و ۷,۸ بار برای حالتی که قطر اریفیس ۱۷,۷ میلیمتر و طول لوله گرم ۲۵۰ میلیمتر است ، در شکل ذیل نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود با افزایش فشار ورودی میزان اختلاف دمایی گرم و در نتیجه میزان دمای گرم خروجی افزایش می یابد و بنظر می رسد که به یک ماکزیمم نزدیک می شود. حداکثر اختلاف دمای بوجود آمده برای فشار ۷,۸ با به بیشتر از ۲۰ کلوین می رسد در حالی که برای فشار ورودی ۵ بار به ۱۲ کلوین می رسد.



شکل ۶-۸۹: مقایسه بین اختلاف دمایی گرم بر حسب μ_c

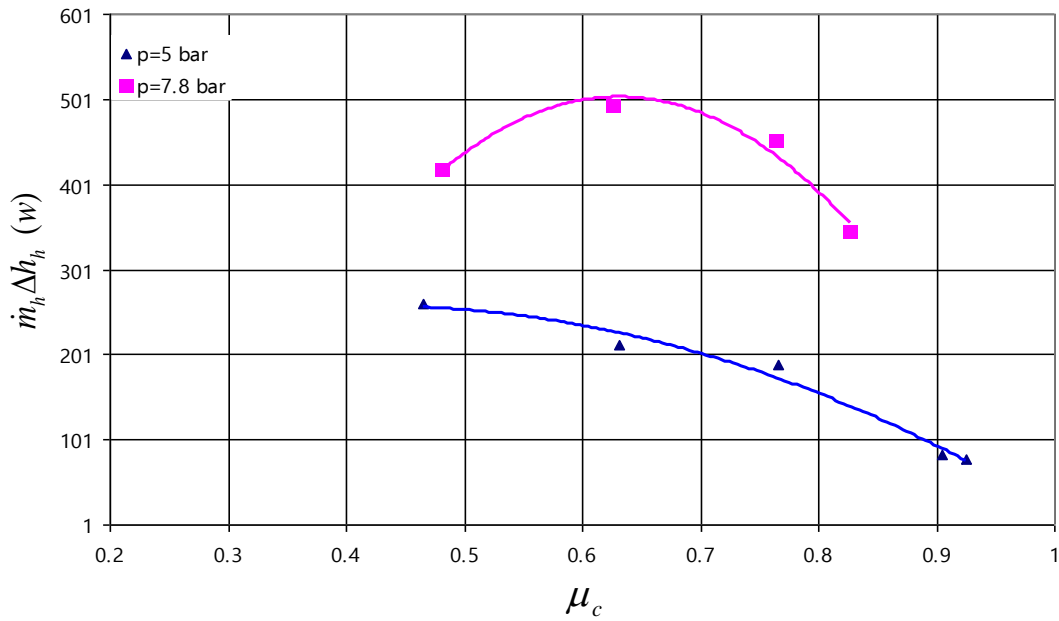
نتایج اختلاف دمای سرد ΔT_c برای فشار های ۵ و ۷,۸ بار برای حالتی که قطر اریفیس ۱۷,۷ میلیمتر و طول لوله گرم ۲۵۰ میلیمتر است ، در شکل ذیل نمایش داده شده است . چنانچه مشاهده می شود با افزایش فشار ورودی میزان اختلاف دمایی سرد افزایش و در نتیجه میزان دمای سرد

خروجی کاهش می یابد و حداکثر اختلاف دمای بوجود آمده برای فشار ۷,۸ با به بیشتر از ۸ کلوین می رسد در حالی که برای فشار ورودی ۵ بار به ۷ کلوین می رسد.



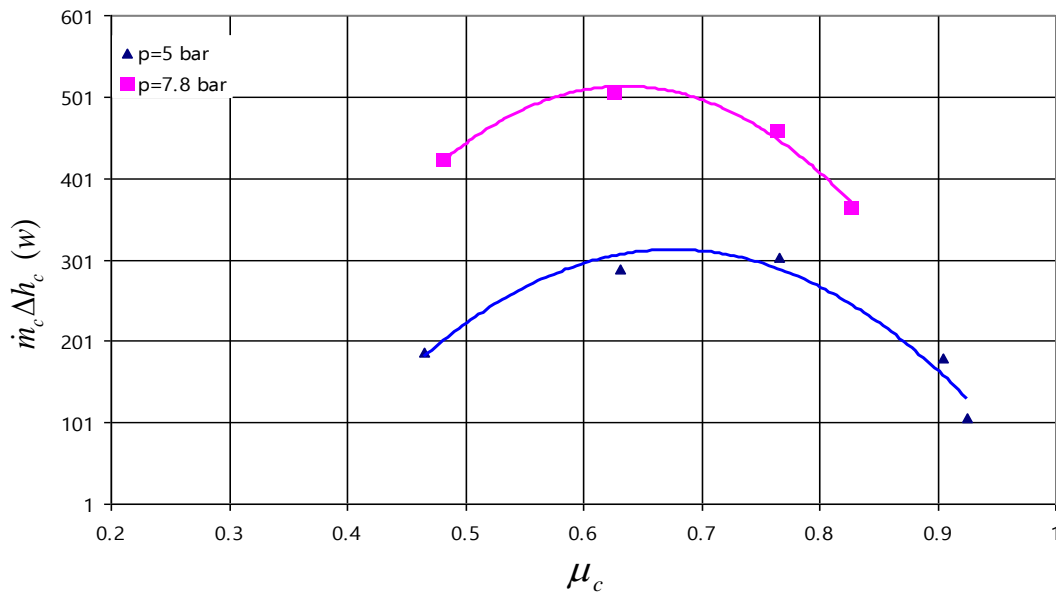
شکل ۶-۹۰: مقایسه بین اختلاف دمایی سردبر حسب μ_c

شکل ذیل میزان بار گرمایی ایجاد شده توسط جریان گرم را در فشار های ۵ و ۷,۸ برای حالتیکه قطر اریفیس ۱۷,۷ میلیمتر و طول لوله گرم ۲۵۰ میلیمتر است ، نشان میدهد. چنان که مشخص است میزان بار گرمایی خروجی برای فشار ۷,۸ بیشتر از ۵ بار است و مشاهده می شود که با افزایش فشار بار گرمایی افزایش می یابد به طوری که حداکثر بار گرمایی برای فشار ۷,۸ بار بیش از ۵۰۰ وات است در حالی که برای فشار ۵ بار این مقدار به کمتر از ۳۰۰ وات می رسد.



شکل ۶-۹۱: مقایسه بین انرژی گرمایی گاز گرم بر حسب μ_c

شکل ذیل میزان بار سرمایی ایجاد شده توسط جریان سرد را در فشارهای ۵ و ۷,۸ بار نشان میدهد. چنان که مشخص است میزان بار سرمایی گاز سرد خروجی برای فشار ۷,۸ بیشتر از ۵ بار است و نشان می دهد که با افزایش فشار، بار سرمایی افزایش می یابد به طوری که حداکثر بار سرمایی برای فشار ۷,۸ بار بیش از ۵۰۰ وات است در حالی که برای فشار ۵ بار این مقدار به وات ۳۰۰ می رسد.



شکل ۶-۹۲: مقایسه بین بار سرمایی گاز سرد بر حسب μ_c

نتیجه گیری

- در مقایسه بین هوا و گاز طبیعی، اختلاف دمایی به وجود آمده بین خروجی سرد و دمایی ورودی برای هوا بیشتر است.
- در مقایسه بین هوا و گاز طبیعی، اختلاف دمایی به وجود آمده بین خروجی گرم و دمایی ورودی برای هوا بیشتر است.
- در مقایسه بین هوا و گاز طبیعی، میزان بار سرمایی بوجود آمده برای گاز طبیعی بیشتر است. این بدلیل بالاتر بودن ضریب حرارت گرمایی ویژه گاز طبیعی است.

- در مقایسه بین هوا و گاز طبیعی، میزان بار گرمایی بوجود آمده برای گاز طبیعی بیشتر است.

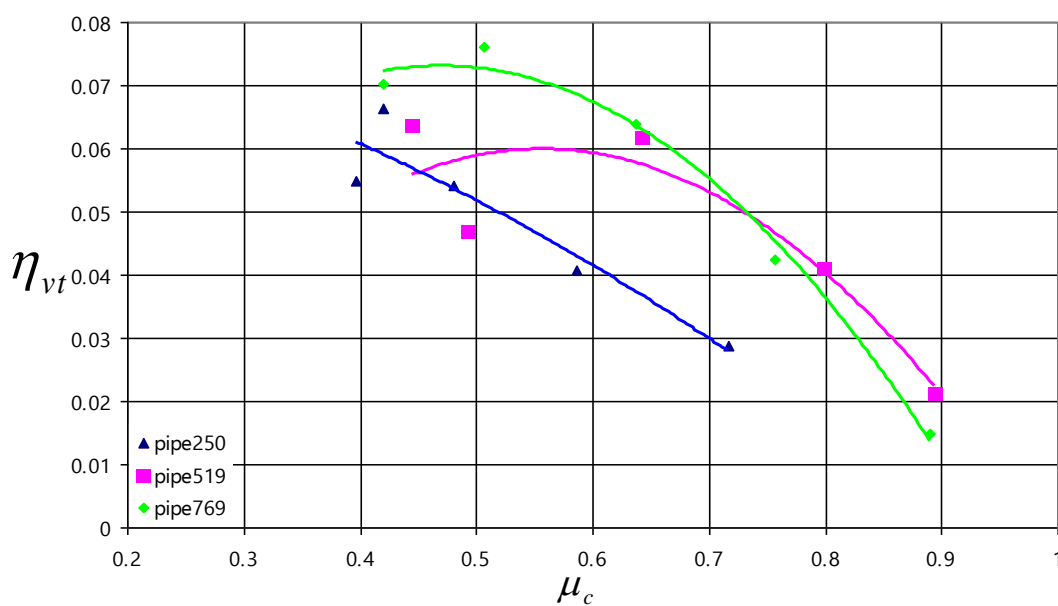
- با افزایش فشار ورودی به لوله گردبادی دمای خروجی گرم افزایش می یابد.
- با افزایش فشار ورودی به لوله گردبادی دمای خروجی سرد کاهش می یابد.
- با افزایش فشار به علت بیشتر شدن دبی های خروجی و اختلاف دماهای به وجود آمده بین خروجی گرم و دمای ورودی میزان بار گرمایی گاز گرم بیشتر می شود.
- با افزایش فشار به علت بیشتر شدن دبی های خروجی و اختلاف دماهای به وجود آمده بین خروجی سرد و دمای ورودی میزان بار سرمایی گاز سرد بیشتر می شود.

۶-۷. بررسی اثر طول لوله گرم بر بازده آیزنتروپیک

یکی از پارامترهای موثر بر عملکرد لوله گردبادی طول لوله گرم می باشد. در این قسمت اثر طول لوله بر بازده آیزنتروپیک لوله گردبادی برای سه قطر متفاوت اریفیس سرد ارائه و بررسی شده است و نتایج به دست آمده برای هر اریفیس در طول های مختلف لوله با هم مقایسه و تحلیل شده اند. باید اشاره کرد که در این مقایسه بازده آیزنتروپیک بر حسب μ_c رسم شده است و فشار ورودی ۵ بار می باشد.

۶-۷-۱. قطر اریفیس ۸ میلیمتر

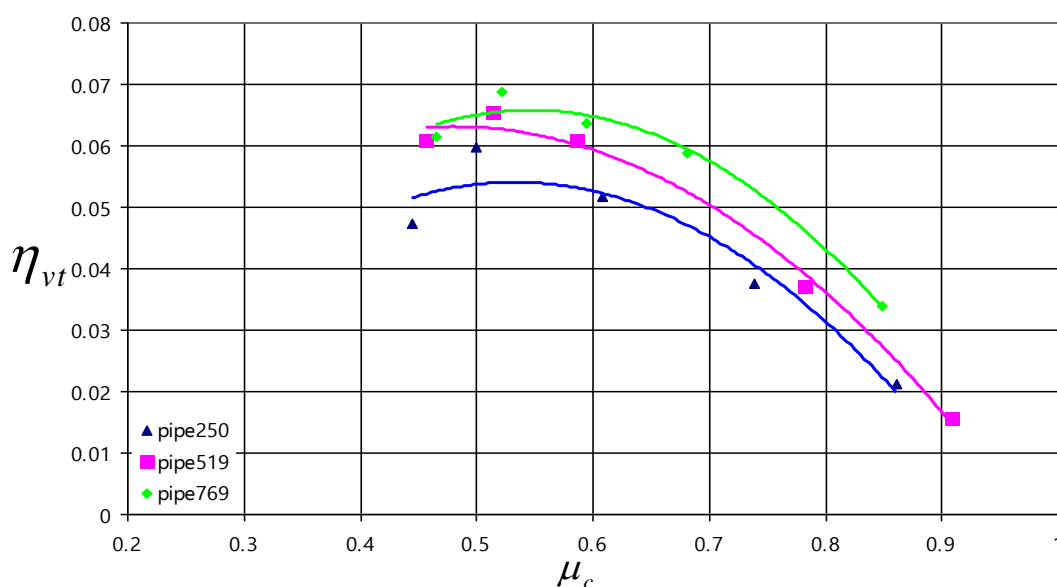
نتایج بازده آیزنتروپیک η_{vt} در این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است . چنانچه مشاهده می شود بازده آیزنتروپیک با افزایش μ_c ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد و به نظر می رسد که به یک مینیمم در حداکثر μ_c نزدیک شده است. بیشترین بازده آیزنتروپیک در این حالت بیش از ۰,۰۷ می باشد که برای لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر است . بنابراین میتوان گفت که افزایش طول لوله باعث بهبود بازده آیزنتروپیک لوله گردبادی شده است.



شکل ۶-۹۳: اثر طول لوله گرم بر تغییرات η_{vt} بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر

۲-۷-۶. قطر اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر

نتایج بازده آیزنتروپیک η_{vt} برای این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است . چنانچه مشاهده می شود بازده آیزنتروپیک روندی مشابه حالت قبل را طی می کند چنانچه بیشترین بازده آیزنتروپیک در این حالت کمتر از ۰,۰۷ می باشد که برای لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر است. بنابراین میتوان گفت که افزایش طول لوله باعث بهبود بازده آیزنتروپیک لوله گردبادی شده است.

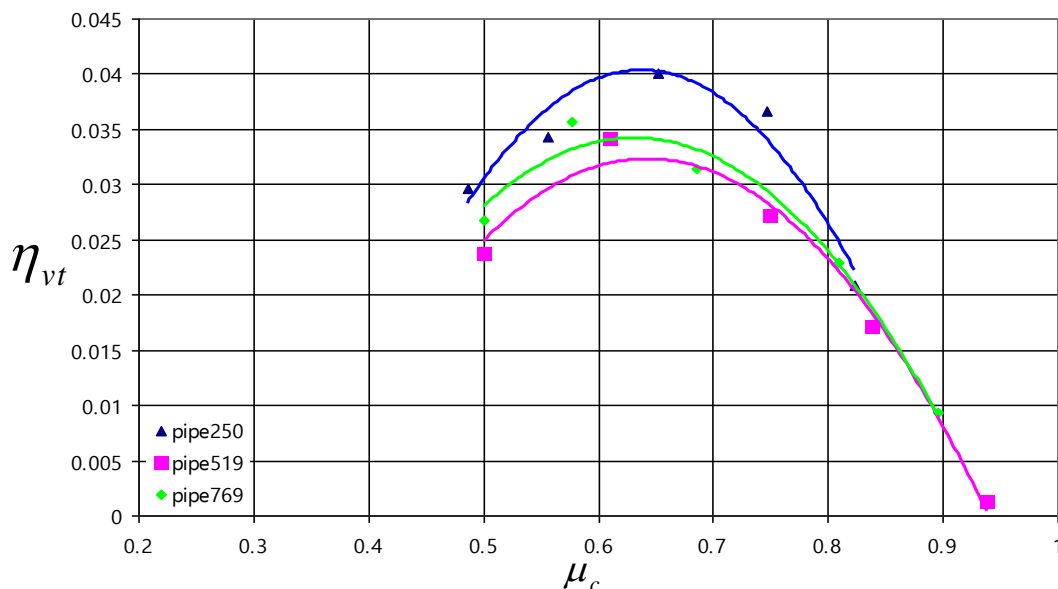


شکل ۶-۹۴: اثر طول لوله گرم بر تغییرات η_{vt} بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر

۳-۷-۶. قطر اریفیس ۱۷,۷ میلیمتر

بازده آیزنتروپیک η_{vt} برای این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است . چنانچه مشاهده می شود بازده آیزنتروپیک با افزایش μ_c ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد و بنظر می رسد که به یک

مینیمم در حداکثر μ_c نزدیک شده است. بیشترین بازده آیزنتروپیک در این حالت حدود $0,04$ می باشد که برای لوله با طول گرم 250 میلیمتر است .



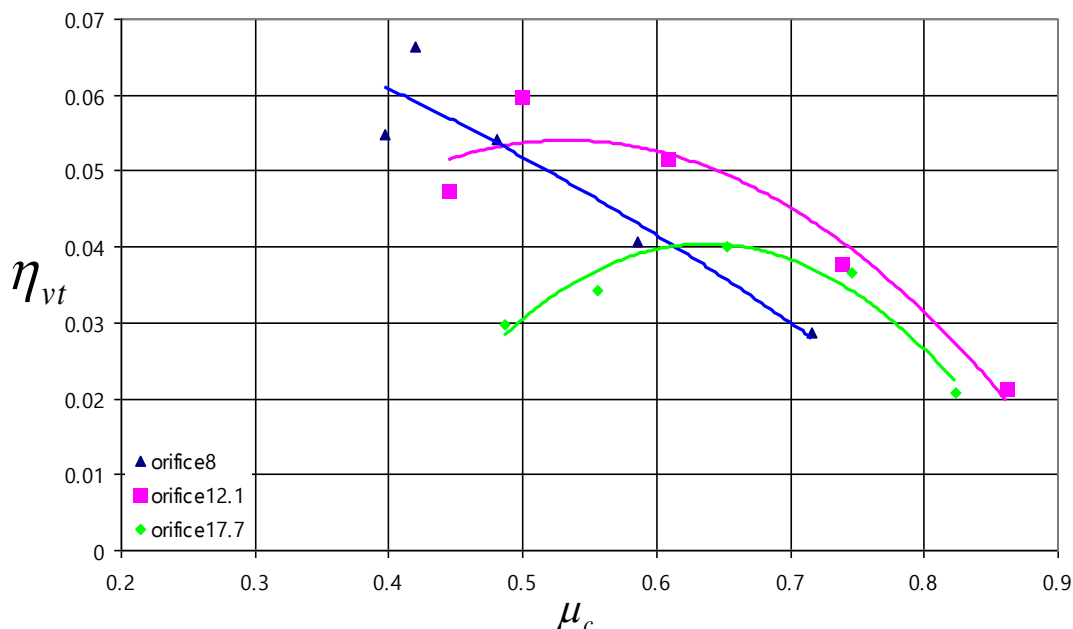
شکل ۶-۹۵: اثر طول لوله گرم بر تغییرات η_{vt} بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر $17,7$ میلیمتر

۸-۶. بررسی اثر قطر اریفیس بر بازده آیزنتروپیک

۸-۶-۱. طول لوله گرم 250 میلیمتر

بازده آیزنتروپیک η_{vt} برای این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود بازده آیزنتروپیک با افزایش μ_c ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد و به نظر می رسد که به یک مینیمم در حداکثر μ_c نزدیک شده است. بیشترین بازده آیزنتروپیک در این حالت کمتر از $0,07$ می

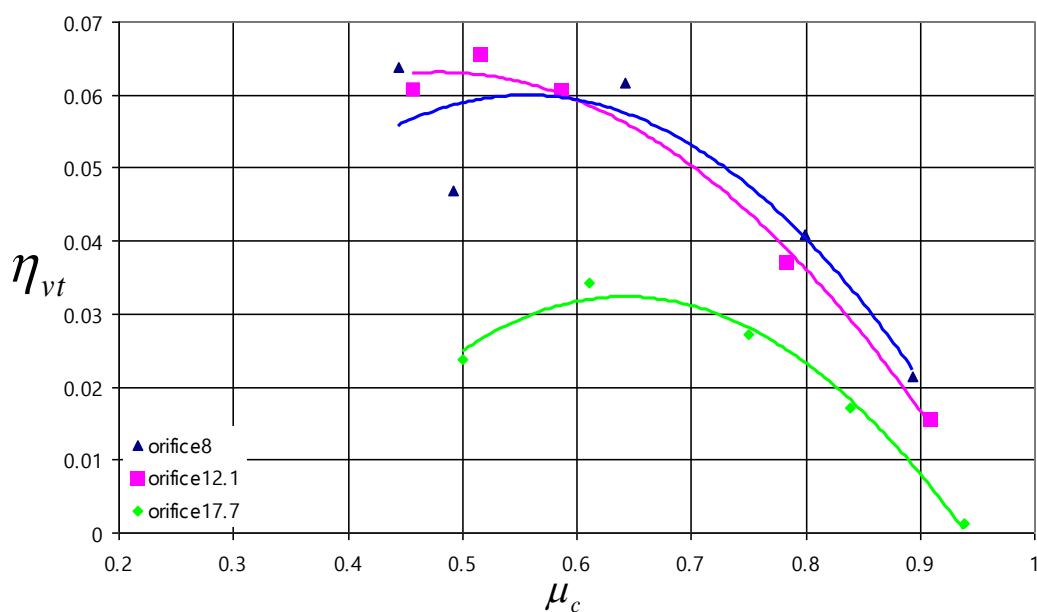
باشد که برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر است. از روی نمودار میتوان گفت که کاهش قطر اریفیس باعث بهبود بازده آیزنتروپیک لوله گردبادی شده است.



شکل ۶-۹۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات η_{vt} بر حسب μ_c برای لوله با طول ۲۵۰ میلیمتر

۲-۸-۶. طول لوله گرم ۵۱۹ میلیمتر

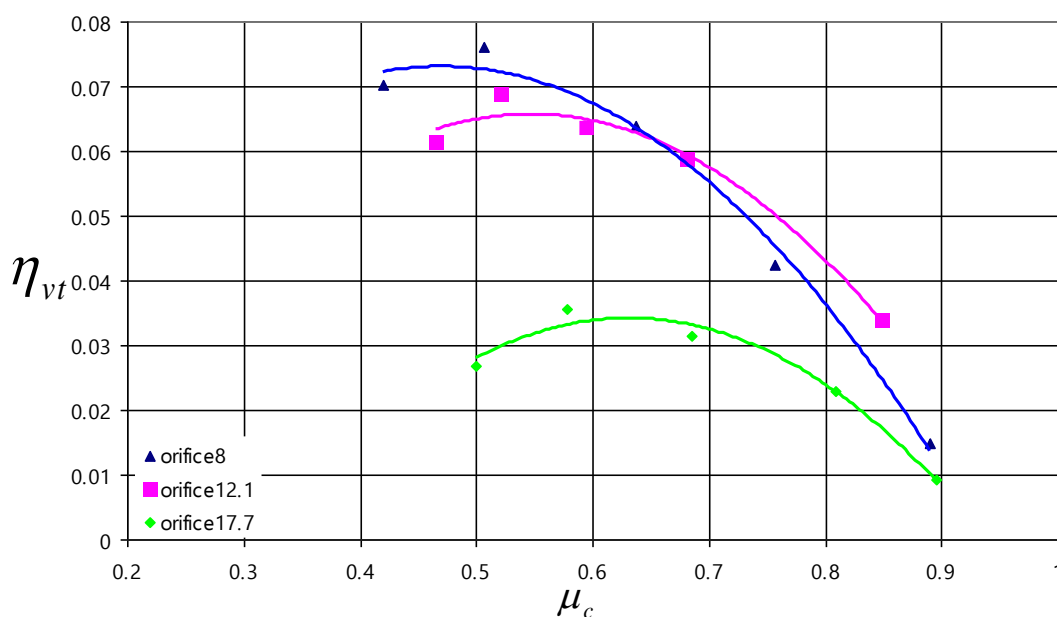
بازده آیزنتروپیک η_{vt} برای این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود بازده آیزنتروپیک با افزایش μ_c ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد و به نظر می رسد که به یک مینیمم در حداکثر μ_c نزدیک شده است. بیشترین بازده آیزنتروپیک در این حالت کمتر از ۰,۰۷ می باشد که برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر است. مانند حالت قبل از روی نمودار میتوان گفت که کاهش قطر اریفیس باعث بهبود بازده آیزنتروپیک لوله گردبادی شده است.



شکل ۶-۹۷: اثر طول لوله گرم بر تغییرات η_{vt} بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر

۳-۸-۶. طول لوله گرم ۷۶۹ میلیمتر

بازده آیزنتروپیک η_{vt} برای این حالت در شکل ذیل نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می شود بازده آیزنتروپیک با افزایش μ_c ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد و به نظر می رسد که به یک مینیمم در حداکثر μ_c نزدیک شده است. بیشترین بازده آیزنتروپیک در این حالت به بیش از ۰,۰۷ می باشد که برای اریفیس با قطر ۸ میلیمتر است. مانند حالات فوق میتوان گفت که کاهش قطر اریفیس باعث بهبود بازده آیزنتروپیک لوله گردبادی شده است.



شکل ۶-۹۸: اثر طول لوله گرم بر تغییرات η_{vt} بر حسب μ_c برای لوله با طول ۷۶۹ میلیمتر

نتیجه گیری:

- به طور کلی با افزایش طول لوله گرم بازده آیزنتروپیک لوله گردبادی افزایش می یابد .
- به طور کلی با افزایش قطر اریفیس بازده آیزنتروپیک لوله گردبادی کاهش می یابد .
- بیشترین راندمان مربوط به حالتی است که لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر و اریفیس با قطر ۸ میلیمتر استفاده شده است .
- کمترین راندمان مربوط به حالتی است که لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر و اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر استفاده شده است
- بیشترین بازده آیزنتروپیک برای نسبت دبی جرمی سرد (μ_c) بین ۰.۵ تا ۰.۷ می باشد .
- برای نسبت دبی جرمی سرد (μ_c) بیشتر از ۰.۷ بازده آیزنتروپیک کاهش می یابد .

۷. فصل هفتم

نتیجه گیری

با توجه به نتایج ارائه شده در فصل سوم ، در این فصل به تحلیل نتایج و انتخاب بهترین طراحی برای

هندسه های متفاوت مورد بررسی می پردازیم

۷-۱. بهترین انتخاب برای هوا با فشار ورودی ۷,۸

با توجه به نمودارهای فصل ۳ برای هوا در فشار ۷,۸ بار ، براحتی می توان نتیجه گرفت :

- از دیدگاه اختلاف دمای گرم اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر و لوله گرم به طول ۵۱۹

میلیمتر بهترین انتخاب می باشد. یا به گونه دیگر می توان گفت که

$$\text{نسبت } \frac{d}{D} = \frac{12.1}{25} = .48 \text{ و } \frac{L_h}{D} = \frac{519}{25} = 20.7 \text{ بهترین عملکرد را دارا هستند.}$$

- از دیدگاه اختلاف دمای سرد، اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر و لوله گرم به طول ۷۶۹

میلیمتر در μ_c بالاتر و اریفیس با قطر ۵ میلیمتر و لوله به طول ۵۱۹ در μ_c پایینتر

بهترین انتخاب می باشند.

- از دیدگاه میزان بار گرمایی تولید شده ، اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر و لوله به طول

۵۱۹ میلیمتر بهترین انتخاب می باشد. یا به گونه دیگر می توان گفت که نسبت

$$\frac{L_h}{D} = \frac{519}{25} = 20.7 \text{ و } \frac{d}{D} = \frac{12.1}{25} = .48 \text{ بهترین عملکرد را دارا هستند.}$$

- از دیدگاه میزان بار سرمایی تولید شده ، اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر و لوله گرم به طول ۷۶۹ میلیمتر بهترین انتخاب می باشد.

۲-۷. بهترین انتخاب برای هوا با فشار ورودی ۵

با توجه به نمودارهای فصل ۳ برای هوا در فشار ۵ بار ، براحتی می توان نتیجه گرفت :

- از دیدگاه اختلاف دمای گرم اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر و لوله گرم به طول ۵۱۹ میلیمتر بهترین انتخاب می باشد. یا به گونه دیگر می توان گفت که نسبت های $\frac{d}{D} = \frac{12.1}{25} = .48$ و $\frac{L_h}{D} = \frac{519}{25} = 20.7$ بهترین عملکرد را دارا هستند. از این

نسبتها می توان برای ساخت لوله گردبادی با ابعاد بزرگتر استفاده کرد.

- از دیدگاه اختلاف دمای سرد، اریفیس با قطر ۸ میلیمتر و لوله گرم به طول ۵۱۹ میلیمتر بهترین انتخاب می باشد . یا به گونه دیگر می توان گفت که نسبت های $\frac{d}{D} = \frac{8}{25} = .32$ و $\frac{L_h}{D} = \frac{519}{25} = 20.7$ بهترین عملکرد را دارا هستند .

- از دیدگاه میزان بار گرمایی تولید شده ، اریفیس با قطر ۸ میلیمتر و لوله گرم به طول ۵۱۹ میلیمتر بهترین انتخاب می باشد. به عبارت دیگر نسبت های $\frac{d}{D} = \frac{8}{25} = .32$ و

$$\frac{L_h}{D} = \frac{519}{25} = 20.7 \text{ بهترین عملکرد را دارا هستند .}$$

- از دیدگاه میزان بار سرمایی تولید شده ، اریفیس با قطر ۸ میلیمتر و لوله گرم به طول ۷۶۹ میلیمتر بهترین انتخاب می باشد.

۷-۳. بهترین انتخاب برای گاز طبیعی با فشار ورودی ۵ بار

همچنین با توجه به نمودارهای فصل ۳ برای گاز در فشار ۵ بار ، براحتی می توان نتیجه گرفت :

- از دیدگاه اختلاف دمای گرم اریفیس با قطر ۸ میلیمتر و لوله گرم به طول ۷۶۹ میلیمتر بهترین انتخاب می باشد. یا به عبارت دیگر نسبت های $\frac{d}{D} = \frac{8}{25} = 0.32$ و $\frac{L_h}{D} = \frac{769}{25} = 30.76$ بهترین عملکرد را دارا هستند .

- از دیدگاه اختلاف دمای سرد، اریفیس با قطر ۸ و ۱۲,۱ میلیمتر و لوله گرم به طول ۷۶۹ میلیمتر بهترین انتخاب می باشد .

- از دیدگاه میزان بار گرمایی تولید شده ، اریفیس با قطر ۸ میلیمتر و لوله گرم به طول ۵۱۹ میلیمتر بهترین انتخاب می باشد. به عبارت دیگر نسبت های $\frac{d}{D} = \frac{8}{25} = 0.32$ و $\frac{L_h}{D} = \frac{519}{25} = 20.7$ بهترین عملکرد را دارا هستند .

- از دیدگاه میزان بار سرمایی تولید شده ، اریفیس با قطر ۸ و ۱۲,۱ میلیمتر و لوله گرم به طول ۷۶۹ میلیمتر بهترین انتخاب می باشد.

۷-۴. پیشنهادات

با توجه با نتایج ارائه شده در این فصل و فصل قبلی می توان پیشنهادات ذیل را ارائه داد :

- با توجه به اینکه مقادیر ΔT_c و ΔT_h برای هوا بیشتر از گاز می باشد در صورتی که هدف تولید گاز با دمای بالاتر و یا پایین تر از گاز ورودی باشد ، می توان از هوا به عنوان استفاده کرد .
- از آنجا که مقادیر بار گرمایی و سرمایی گاز بیشتر از هوا می باشد ، در صورتی که هدف تولید گرما یا سرما باشد می توان از گاز طبیعی به عنوان سیال عامل استفاده کرد . که این امر در کشور ما به علت داشتن منابع زیاد گازی قابل انجام است .
- فشار ورودی بیشتر باعث بهتر شدن عملکرد لوله گردبادی خواهد شد لذا می توان با افزایش فشار به میزان قابل ملاحظه ای میزان بار گرمایی و سرمایی را افزایش داد و همچنین میزان دمای گازهای خروجی را بهبود بخشید .
- از آنجا که نسبت $3 < \frac{d}{D} < 4$ و $20 < \frac{L_h}{D} < 30$ بهترین عملکرد دارا هستند. از این نسبتها می توان برای ساخت لوله گردبادی با ابعاد بزرگتر استفاده کرد
- با توجه به اینکه در این آزمایشات تنها برای تنظیم دبی گرم از شیر استفاده می شد که می توانست دبی سرد را نیز تغییر دهد لذا توصیه می شود که برای تنظیم دقیقتر دبی سرد نیز از یک شیر دیگر استفاده شود تا بتوان نقاط بیشتری را به دست آورد .

فصل اول : مقدمه

۲ ۱-۱. لوله گرد بادی رانک - هیلش

۵ ۲-۱. اهداف پروژه

۶ ۳-۱. ساختار پایان نامه

فصل دوم : مروری بر کار های گذشته

۸ ۱-۲. تاریخچه

فصل سوم : مبانی تئوری و روابط حاکم بر لوله گردبادی

۱۳ ۱-۳. مبانی تئوری

۱۳ ۱-۱-۳. ترمودینامیک

۱۵ ۲-۳. تعاریف اصلی

۱۵ ۱-۲-۳. نسبت دبی سرد

۱۵ ۲-۲-۳. افت دمای هوا ی سرد

۱۵ ۳-۲-۳. افت دمای هوا ی گرم

۱۶ ۴-۲-۳. بازده ایزنتروپیک

۱۶ ۵-۲-۳. ضریب کارائی

۱۷ ۶-۲-۳. بار گرمایی تولید شده توسط لوله گردبادی

۱۷ ۷-۲-۳. بار سرمایی تولید شده توسط لوله گردبادی

فصل چهارم : روش کار آزمایشگاهی

۱۹ ۱-۴. آشنایی با تجهیزات

۲۶ ۲-۴. ابعاد هندسی لوله گردبادی

۲۹ ۳-۴. روش انجام آزمایش

فصل پنجم : حل عددی لوله گردبادی

۳۳ ۱-۵. مقدمه

۳۳ ۱-۱-۵. معادله بقای جرم

۳۴ ۲-۱-۵. معادلات بقای مومنتم

۳۴ ۳-۱-۵. معادله انرژی

۳۷ ۲-۵. خطی سازی معادلات حاکم بر میدان سیال

۳۷ ۱-۲-۵. روش ضمنی

۳۷ ۲-۲-۵. روش صریح

۳۸ ۳-۵. مجزاسازی معادلات حاکم بر میدان سیال

۳۸ ۱-۳-۵. روش آپویند مرتبه ۱

۳۹ ۲-۳-۵. روش قاعده توانی

۳۹ ۳-۳-۵. روش آپویند مرتبه ۲

۳۹ ۴-۳-۵. روش مرتبه ۳ (Quick)

۴۰. ۵-۳-۵. روشهای میان‌یابی فشار
۴۱. ۶-۳-۵. روش PRESTO
۴۱. ۴-۵. نتایج تحلیل عددی
۴۲. ۱-۴-۵. شبکه بندی
۴۴. ۲-۴-۵. شرایط مرزی
۴۵. ۳-۴-۵. تحلیل میدان جریان در لوله گردابی
۴۷. ۴-۴-۵. بررسی تغییرات دمایی در لوله گردابی
۴۹. ۵-۴-۵. بررسی تغییرات فشار در لوله گردابی
- فصل ششم: بررسی نتایج و نمودارهای به دست آمده از آزمایشات
۵۲. ۱-۶. پارامترهای مورد مطالعه
۵۳. ۲-۶. سیال عامل هوا و فشار ورودی آزمایش ۷,۸ بار
۵۴. ۱-۲-۶. اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر و لوله با قطر ۲۵۰ میلیمتر
۵۵. ۲-۲-۶. اریفیس با قطر ۱۲,۱ ولوله با طول ۲۵۰میلیمتر
۵۸. ۳-۲-۶. بررسی اثر طول لوله گرم بر عملکرد لوله گردبادی
۶۹. ۴-۲-۶. بررسی اثر قطر اریفیس بر عملکرد لوله گردبادی
۸۰. ۳-۶. فشار آزمایش ۵ بار برای هوا
۸۰. ۱-۳-۶. بررسی اثر طول لوله بر راندمان لوله گردبادی

- ۸۴ ۲-۳-۶. اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر
- ۸۶ ۳-۳-۶. اریفیس با قطر ۱۷,۷
- ۹۱ ۴-۳-۶. بررسی اثر قطر اریفیس بر عملکرد لوله گردبادی
- ۹۴ ۵-۳-۶. طول لوله ۵۱۹ میلیمتر است
- ۱۰۱ ۴-۶. سیال عامل گاز طبیعی با فشار ۵ بار
- ۱۰۱ ۱-۴-۶. بررسی اثر طول لوله بر راندمان لوله گردبادی
- ۱۱۲ ۲-۴-۶. بررسی اثر قطر اریفیس بر راندمان لوله گردبادی
- ۱۲۱ ۵-۶. مقایسه بین هوا و گاز
- ۱۲۲ ۱-۵-۶. اریفیس با قطر ۸ میلیمتر و لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر
- ۱۲۵ ۲-۵-۶. اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر و لوله گرم با طول ۵۱۹ میلیمتر
- ۱۲۸ ۳-۵-۶. اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر و لوله گرم با طول ۷۶۹ میلیمتر
- ۱۳۱ ۶-۶. مقایسه فشارها
- ۱۳۲ ۱-۶-۶. اریفیس با قطر ۱۷,۷ میلیمتر و لوله گرم با طول ۲۵۰ میلیمتر
- ۱۳۶ ۷-۶. بررسی اثر طول لوله گرم بر بازده آیزنتروپیک
- ۱۳۷ ۱-۷-۶. قطر اریفیس ۸ میلیمتر
- ۱۳۸ ۲-۷-۶. قطر اریفیس ۱۲,۱ میلیمتر
- ۱۳۸ ۳-۷-۶. قطر اریفیس ۱۷,۷ میلیمتر

۱۳۹ ۸-۶. بررسی اثر قطر اریفیس بر بازده آیزنتروپیک

۱۳۹ ۱-۸-۶. طول لوله گرم ۲۵۰ میلیمتر

۱۴۰ ۲-۸-۶. طول لوله گرم ۵۱۹ میلیمتر

۱۴۱ ۳-۸-۶. طول لوله گرم ۷۶۹ میلیمتر

۱۴۲ نتیجه گیری

فصل هفتم : نتیجه گیری و ارائه پیشنهاد

۱۴۴ ۱-۷. بهترین انتخاب برای هوا با فشار ورودی ۷,۸

۱۴۵ ۲-۷. بهترین انتخاب برای هوا با فشار ورودی ۵

۱۴۶ ۳-۷. بهترین انتخاب برای گاز طبیعی با فشار ورودی ۵ بار

۱۴۷ ۴-۷. پیشنهادات

فهرست اشکال

فصل اول

شکل ۱-۱: نمایی از لوله گردبادی جریان مخالف ۳

شکل ۲-۱: الگوی جریان در لوله گردبادی ۴

فصل چهارم

شکل ۱-۴ : طرحواره کلی از دستگاه و نحوه اتصال آن به کامپیوتر ۱۹

شکل ۲-۴ دستگاه مورد آزمایش ۲۱

شکل ۳-۴: محل قرار گرفتن سنسور های فشار و دما ۲۴

شکل ۴-۴: میکرو پرسسور برای خواندن اطلاعات ۲۵

شکل ۵-۴: کامپیوتر و نرم افزار مورد استفاده در آزمایش ۲۶

شکل ۶-۴: شماتیک کلی از لوله گردبادی ۲۷

شکل ۷-۴: نحوه اتصال دستگاه به رگلاتور ۲۹

فصل پنجم

شکل ۱-۵ نمایی از لوله گردبادی مدل شده در نرم افزار گمبیت ۴۳

شکل ۲-۵ نمایی از شبکه اریفیس و نازل ورودی لوله گردبادی ۴۳

شکل ۳-۵ نمایی از شبکه خروجی گرم لوله گردبادی ۴۴

- شکل ۴-۵ بردارهای سرعت در راستای طول گرم و سرد لوله گردابی ۴۵
- شکل ۵-۵: اثر سرعت مماسی در چرخش المان‌های سیال ۴۶
- شکل ۶-۵ تغییرات دمایی در سمت لوله سرد ۴۷
- شکل ۷-۵ تغییرات دمایی در سمت لوله گرم ۴۸
- شکل ۸-۵: نمودار تغییرات دما در طول لوله گردبادی ۴۹
- شکل ۹-۵: تغییرات فشار در راستای لوله گردبادی ۵۰

فصل ششم

- شکل ۱-۶: مقایسه بین حالت تئوری و تجربی تغییرات ΔT_h برحسب μ_c ۵۴
- شکل ۲-۶: مقایسه بین حالت تئوری و تجربی تغییرات ΔT_c برحسب μ_c ۵۵
- شکل ۳-۶: مقایسه بین حالت تئوری و تجربی تغییرات ΔT_h برحسب μ_c ۵۶
- شکل ۴-۶: مقایسه بین حالت تئوری و تجربی تغییرات ΔT_c برحسب μ_c ۵۶
- شکل ۵-۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_c برحسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر ۵۹
- شکل ۶-۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_h برحسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر ۶۰
- شکل ۷-۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات با سرمای برحسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۲,۱ میلیمتر ۶۰

شکل ۶-۸: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۶۱ ۱۲,۱ میلیمتر

شکل ۶-۹: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_C بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۶۲ ۵ میلیمتر

شکل ۶-۱۰: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۶۲ ۵ میلیمتر

شکل ۶-۱۱: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۶۳ ۵ میلیمتر

شکل ۶-۱۲: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۶۴ ۵ میلیمتر

شکل ۶-۱۳: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_C بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۶۵ ۱۷,۷ میلیمتر

شکل ۶-۱۴: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۶۶ ۱۷,۷ میلیمتر

شکل ۶-۱۵: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۶۷ ۱۷,۷ میلیمتر

شکل ۶-۱۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

- ۶۷ ۱۷,۷ میلیمتر
- شکل ۶-۱۷: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_C بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم
- ۷۰ ۲۵۰ میلیمتر
- شکل ۶-۱۸: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم
- ۷۱ ۲۵۰ میلیمتر
- شکل ۶-۱۹: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم
- ۷۱ ۲۵۰ میلیمتر
- شکل ۶-۲۰: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم
- ۷۲ ۲۵۰ میلیمتر
- شکل ۶-۲۱: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_C بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم
- ۷۳ ۵۱۹ میلیمتر
- شکل ۶-۲۲: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم
- ۷۳ ۵۱۹ میلیمتر
- شکل ۶-۲۳: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم
- ۷۴ ۵۱۹ میلیمتر
- شکل ۶-۲۴: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم
- ۷۵ ۵۱۹ میلیمتر

شکل ۶-۲۵: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم

۷۶ ۷۶۹ میلیمتر

شکل ۶-۲۶: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم

۷۶ ۷۶۹ میلیمتر

شکل ۶-۲۷: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم

۷۷ ۷۶۹ میلیمتر

شکل ۶-۲۸: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای لوله با طول گرم

۷۸ ۷۶۹ میلیمتر

شکل ۶-۲۹: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۸۱ ۸ میلیمتر

شکل ۶-۳۰: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۸۲ ۸ میلیمتر

شکل ۶-۳۱: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۸۳ ۸ میلیمتر

شکل ۶-۳۲: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۸۳ ۸ میلیمتر

شکل ۶-۳۳: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

- ۸۴ ۱۲,۱ میلیمتر
- شکل ۳۴-۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر
- ۸۵ ۱۲,۱ میلیمتر
- شکل ۳۵-۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر ۱۲,۱
- ۸۵ میلیمتر
- شکل ۳۶-۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر
- ۸۶ ۱۲,۱ میلیمتر
- شکل ۳۷-۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر
- ۸۷ ۱۷,۷ میلیمتر
- شکل ۳۸-۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر
- ۸۸ ۱۷,۷ میلیمتر
- شکل ۳۹-۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر
- ۸۸ ۱۷,۷ میلیمتر
- شکل ۴۰-۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر
- ۸۹ ۱۷,۷ میلیمتر
- شکل ۴۱-۶: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول
- ۹۱ ۲۵۰ میلیمتر

شکل ۶-۴۲: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول

۹۲ ۲۵۰ میلیمتر

شکل ۶-۴۳: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول

۹۳ ۲۵۰ میلیمتر

شکل ۶-۴۴: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول

۹۳ ۲۵۰ میلیمتر

شکل ۶-۴۵: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_C بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول

۹۴ ۵۱۹ میلیمتر

شکل ۶-۴۶: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول

۹۵ ۵۱۹ میلیمتر

شکل ۶-۴۷: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول

۹۵ ۵۱۹ میلیمتر

شکل ۶-۴۸: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول

۹۶ ۵۱۹ میلیمتر

شکل ۶-۴۹: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول

۹۷ ۷۶۹ میلیمتر

شکل ۶-۵۰: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_C بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول

۹۸

۷۶۹ میلیمتر

شکل ۶-۵۱: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول

۹۸

۷۶۹ میلیمتر

شکل ۶-۵۲: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول

۹۹

۷۶۹ میلیمتر

شکل ۶-۵۳: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۱۰۲

۸ میلیمتر

شکل ۶-۵۴: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۱۰۳

۸ میلیمتر

شکل ۶-۵۵: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۱۰۳

۸ میلیمتر

شکل ۶-۵۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۱۰۴

۸ میلیمتر

شکل ۶-۵۷: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۱۰۵

۱۲,۱ میلیمتر

شکل ۶-۵۸: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۱۰۶

۱۲,۱ میلیمتر

شکل ۶-۵۹: اثر طول لوله بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۱۰۶ ۱۲,۱ میلیمتر

شکل ۶-۶۰: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۱۰۷ ۱۲,۱ میلیمتر

شکل ۶-۶۱: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۱۰۸ ۱۷,۷ میلیمتر

شکل ۶-۶۲: اثر طول لوله گرم بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۱۰۹ ۱۷,۷ میلیمتر

شکل ۶-۶۳: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۱۰۹ ۱۷,۷ میلیمتر

شکل ۶-۶۴: اثر طول لوله گرم بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۱۱۰ ۱۷,۷ میلیمتر

شکل ۶-۶۵: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول

۱۱۲ ۲۵۰ میلیمتر

شکل ۶-۶۶: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول

۱۱۳ ۲۵۰ میلیمتر

شکل ۶-۶۷: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول

- ۱۱۴ ۲۵۰ میلیمتر
- شکل ۶-۶۸: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول
- ۱۱۴ ۲۵۰ میلیمتر
- شکل ۶-۶۹: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول
- ۱۱۵ ۵۱۹ میلیمتر
- شکل ۶-۷۰: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول
- ۱۱۶ ۵۱۹ میلیمتر
- شکل ۶-۷۱: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول
- ۱۱۶ ۵۱۹ میلیمتر
- شکل ۶-۷۲: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول
- ۱۱۷ ۵۱۹ میلیمتر
- شکل ۶-۷۳: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_h بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول
- ۱۱۸ ۷۶۹ میلیمتر
- شکل ۶-۷۴: اثر قطر اریفیس بر تغییرات ΔT_c بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول
- ۱۱۹ ۷۶۹ میلیمتر
- شکل ۶-۷۵: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار گرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول
- ۱۱۹ ۷۶۹ میلیمتر

شکل ۶-۷۶: اثر قطر اریفیس بر تغییرات بار سرمایی بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول

- ۱۲۰ ۷۶۹ میلیمتر
- ۱۲۲ شکل ۶-۷۷: مقایسه ΔT_h بین هوا و گاز در فشار ۵ بار
- ۱۲۳ شکل ۶-۷۸: مقایسه ΔT_c بین هوا و گاز در فشار ۵ بار
- ۱۲۴ شکل ۶-۷۹: مقایسه انرژی سرمایی گاز سرد بین هوا و گاز در فشار ۵ بار
- ۱۲۵ شکل ۶-۸۰: مقایسه انرژی گرمایی گاز گرم بین هوا و گاز در فشار ۵ بار
- ۱۲۶ شکل ۶-۸۱: مقایسه ΔT_h بین هوا و گاز در فشار ۵ بار
- ۱۲۶ شکل ۶-۸۲: مقایسه ΔT_c بین هوا و گاز در فشار ۵ بار
- ۱۲۷ شکل ۶-۸۳: مقایسه انرژی سرمایی گاز سرد بین هوا و گاز در فشار ۵ بار
- ۱۲۸ شکل ۶-۸۴: مقایسه انرژی گرمایی گاز گرم بین هوا و گاز در فشار ۵ بار
- ۱۲۹ شکل ۶-۸۵: مقایسه ΔT_h بین هوا و گاز در فشار ۵ بار
- ۱۲۹ شکل ۶-۸۶: مقایسه ΔT_c بین هوا و گاز در فشار ۵ بار
- ۱۳۰ شکل ۶-۸۷: مقایسه انرژی سرمایی گاز سرد بین هوا و گاز در فشار ۵ بار
- ۱۳۱ شکل ۶-۸۸: مقایسه انرژی گرمایی گاز گرم بین هوا و گاز در فشار ۵ بار
- ۱۲۳ شکل ۶-۸۹: مقایسه بین اختلاف دمایی گرم بر حسب μ_c
- ۱۳۳ شکل ۶-۹۰: مقایسه بین اختلاف دمایی سرد بر حسب μ_c
- ۱۳۴ شکل ۶-۹۱: مقایسه بین انرژی گرمایی گاز گرم بر حسب μ_c

شکل ۶-۹۲: مقایسه بین بار سرمایگی گاز سرد بر حسب μ_c

۱۳۵

شکل ۶-۹۳: اثر طول لوله گرم بر تغییرات η_{vt} بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۱۳۷

۸ میلیمتر

شکل ۶-۹۴: اثر طول لوله گرم بر تغییرات η_{vt} بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۱۳۸

۱۲,۱ میلیمتر

شکل ۶-۹۵: اثر طول لوله گرم بر تغییرات η_{vt} بر حسب μ_c برای اریفیس با قطر

۱۳۹

۱۷,۷ میلیمتر

شکل ۶-۹۶: اثر طول لوله گرم بر تغییرات η_{vt} بر حسب μ_c برای لوله با طول

۱۴۰

۲۵۰ میلیمتر

شکل ۶-۹۷: اثر طول لوله گرم بر تغییرات η_{vt} بر حسب μ_c برای لوله گرم با طول

۱۴۱

۵۱۹ میلیمتر

شکل ۶-۹۸: اثر طول لوله گرم بر تغییرات η_{vt} بر حسب μ_c برای لوله با طول

۱۴۲

۷۶۹ میلیمتر

فهرست جداول

۲۸

جدول ۴-۱

۳۶

جدول ۵-۱

فهرست علائم

C_p	گرمای ویژه در فشار ثابت k (kj/kg)
D	قطر لوله گردابی mm
D_c	قطر اریفیس سرد mm
h	آنتالپی kj/kg
L	طول لوله mm
\dot{m}	دبی جرمی kg/s
\dot{Q}	بار حرارتی تولید شده w
T_c	دمای استاتیکی گاز سرد K
T_h	دمای استاتیکی گاز گرم K

علائم یونانی

δ	قطر نازل ورودی
μ_c	نسبت دبی جرمی سرد به کل
γ	نسبت گرمای ویژه

1. Ranque GJ. Experiments on expansion in a vortex with simultaneous exhaust of hot air and cold air. *J Phys Radium (Paris)* 1933;4:112–4 S-115, June. Also translated as General Electric Co., Schenectady Works Library 1947; T.F. 3294
2. Ranque GJ. Method and apparatus for obtaining from a fluid under pressure two outputs of fluid at different temperatures. US patent 1:952,281, 1934
3. Hilsch R. The use of expansion of gases in a centrifugal field as a cooling process. *Rev Sci Instrum* 1947;18(2):108–13.
4. Scheper GW. The vortex tube; internal flow data and a heat transfer theory. *J ASRE Refrig Eng* 1951;59:985–9.
5. VS Martynovskii and V P Alekseev. Investigation of the vortex thermal separation effect for gases and vapors. *Soviet Physics : Technical Physics*, 26(2):pp. 2233–2243, 1957
6. Hartnett JP, Eckert ERG. Experimental study of the velocity and temperature distribution in a high-velocity vortex-type flow. *Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute*, Stanford University Press; 1956. p. 135–50.
7. Hartnett JP, Eckert ERG. Experimental study of the velocity and temperature distribution in a high-velocity vortex-type flow. *Trans ASME J Heat Transfer* 1957;79:751–8.
8. Scheller WA, Brown GM. The Ranque–Hilsch vortex tube. *J Ind Eng Chem* 1957;49(6):1013–6.
9. Linderstrom-Lang CU. Gas separation in the Ranque–Hilsch vortex tube. *Int J Heat Mass Transfer* 1964;7:1195–206.
10. Takahama H. Studies on vortex tubes. *Bull Jpn Soc Mech Eng* 1965;8(31):433–40.

11. Vennos SLN. An experimental investigation of the gaseous vortex. PhD thesis. Rensselaer Polytechnic Institute, 1968.
12. Parulekar BB. The short vortex tube. *J Refrig* 1961;4:74–80.
13. Otten EH. Production of cold air. London: Engineering; 1958. 154pp.
14. Raiskii Yu D, Tankel LE. Influence of vortex-tube saturation and length on the process of energetic gas separation. *J Eng Phys* 1974;27(6):1578–81.
15. Stephan K, Lin S, Durst M, Huang F, Seher D. An investigation of energy separation in a vortex tube. *IntJ Heat Mass Transfer* 1983;26:341–8.
16. Orhan Aydın, Muzaffer Baki, An experimental study on the design parameters of a counterflow vortex tube, *Energy* 31 (2006) 2763–2772
17. Saidi MH, Valipour MS. Experimental modeling of vortex tube refrigerator. *Appl Therm Eng* 2003;23:1971–80.
18. Balmer R.T., Pressure-driven Ranque-Hilsch temperature separation in liquids. *Trans. ASME, J. Fluids Engineering*, 110:161–164, June 1988
19. A I Gulyaev, Investigation of conical vortex tube, *Journal of Engineering physics*
20. Eiamsa-ard S, Promvong P., Review of Ranque–Hilsch effects in vortex tubes, *Renew Sustain Energy Rev* (2007) ,doi: 10.1016/j.rser . 2007.03.006
- 21 . Singh PK. An experimental performance evaluation of vortex tube. *IE(I) J-MC* 2004;84:149–53.