



دانشکده مهندسی مکانیک
گروه حرارت و سیالات

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بررسی تجربی و عددی انتقال حرارت جابجایی آزاد به استوانه افقی سرد همدم در بالای یک صفحه عایق

دانشجو:

محمد هادی صداقت

اساتید راهنما:

دکتر محمد جواد مغربی

دکتر محمود یعقوبی

استاد مشاور:

دکتر علی سر رشته داری

شهریور ماه ۱۳۸۹



تشکر و قدردانی

با تقدیر و تشکر از اساتید ارجمند جناب آقای دکتر مغربی، جناب آقای دکتر یعقوبی، جناب آقای دکتر سر رشته داری و که با راهنمایی های ارزشمندشان مرا در انجام این تحقیق یاری نمودند.

همچنین با تشکر فراوان از رئیس مرکز محاسبات سریع دانشگاه شیراز جناب آقای دکتر علیشاهی و کارمندان آن مرکز که بدون کمک و یاری این عزیزان انجام این پروژه برای اینجانب مقدور نبود.

و در پایان از پدر، مادر و برادر عزیز و مهربانم که همواره باعث ایجاد انگیزه در من برای ادامه تحصیل و تلاش در این راه بوده اند و همه اساتید گرانقدر تشکر و قدردانی نموده، توفیق و عزت همه را از خداوند متعال مسئلت می نمایم.

محمد هادی صداقت

چکیده

بررسی تجربی و عددی انتقال حرارت جابجایی آزاد به استوانه افقی سرد همدم در بالای یک صفحه عایق

به کوشش

محمد هادی صداقت

انتقال حرارت جابجایی آزاد به استوانه های سرد افقی که در بالای یک سطح قرار دارند در بسیاری از کاربردهای صنعتی نظیر سردخانه ها، سیستم های تهویه و غیره انجام می گیرد. برای انتقال حرارت جابجایی آزاد به یک استوانه تنها که در محیط بینهایت قرار دارد مطالعات گسترده ای صورت گرفته اما در مورد استوانه ای که نزدیک به یک سطح عایق قرار دارد تحلیل های بسیار اندکی انجام گرفته است. در تحقیق حاضر انتقال حرارت جابجایی آزاد به استوانه سرد افقی که در بالای یک سطح عایق و همچنین محصور بین دو سطح عایق عمود بر هم قرار دارد به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

در اندازه گیری آزمایشگاهی تأثیر فاصله استوانه از صفحه عایق افقی (L/D) در محدوده بین 0.1 تا $1/5$ و همچنین از صفحه عایق قائم (S/D) در محدوده بین 0.1 تا 1 برای اعداد رایلی 3×10^5 و 6×10^5 مورد بررسی قرار گرفته است. قطر لوله 8 سانتیمتر بوده و به ازای مقادیر مختلف دمای سطح، آزمایش های متعددی انجام گرفته است.

برای انجام بررسی عددی، معادلات حاکم جریان آرام جابجایی آزاد، از روش حجم محدود با کد C++ به کمک نرم افزار OpenFOAM که یک نرم افزار منبع باز تحت سیستم عامل لینوکس است حل شده اند. مطالعات عددی انجام گرفته در محدوده وسیعی از اعداد رایلی از 10^4 تا 10^6 انجام گرفته تا نتایج با داده های آزمایشگاهی مقایسه گردند.

خطوط جریان، خطوط هم دما و بردارهای سرعت به ازای مقادیر مختلف فاصله از صفحات عایق ترسیم گردیده. جریان هوای سرد پس از حرکت به سمت پایین و برخورد به سطح عایق افقی به هر دو سمت حرکت می کند، که اگر سطح عایق عمودی هم وجود داشته باشد در آن سمت متوقف شده و به سمت مخالف حرکت می کند. میدان های ترسیم شده اطراف استوانه نسبت به حالتی که استوانه در محیط بینهایت قرار دارد متفاوت است.

نتایج نشان می دهد که ضریب انتقال حرارت متوسط لوله، وابستگی شدیدی به تغییرات L/D دارد اما تغییرات S/D تأثیر زیادی بر آن ندارد. با این حال، وجود صفحه قائم تأثیر زیادی بر میزان انتقال حرارت دارد.

با استفاده از نتایج عددی و آزمایشگاهی رابطه ای تجربی برای نسبت عدد نوسلت متوسط به عدد نوسلت متوسط یک لوله در محیط بینهایت بر حسب عدد رایلی و نسبت فاصله استوانه از سطح عایق به قطر استوانه (L/D) برای استوانه ای که در زیر یک سطح عایق قرار دارد، ارائه شده است. (رابطه (۵-۱))

فهرست

عنوان	صفحه
۱- جابجایی طبیعی از استوانه محصور.....	۱
۲- مروری بر تحقیقات انجام شده.....	۵
۲-۱- انتقال حرارت جا بجایی آزاد از یک استوانه افقی گرم در هوای ساکن.....	۵
۲-۲- انتقال حرارت جا بجایی آزاد از یک استوانه افقی گرم در زیر سقف.....	۸
۲-۳- انتقال حرارت جا بجایی آزاد به یک استوانه افقی سرد در هوای ساکن.....	۱۳
۳- شرح آزمایش.....	۱۵
۳-۱- مقدمه.....	۱۵
۳-۲- اندازه گیری شار حرارتی.....	۱۷
۳-۳- تجهیزات آزمایش.....	۱۹
۳-۳-۱- اتاقک آزمایش.....	۲۰
۳-۳-۲- سیستم سرمایش، گرمایش اتاق.....	۲۱
۳-۳-۳- سیکل سرمایش برای سرد کردن لوله آزمایش.....	۲۳
۳-۴- دستگاه انتقال اطلاعات از ترموکوپل به کامپیوتر (Data Logger).....	۲۴
۳-۵- صفحات عایق.....	۲۶
۳-۴- کالیبره کردن ترموکوپل ها.....	۲۷
۳-۵- روش آزمایش.....	۲۷
۴- مدل سازی محاسباتی.....	۲۸
۴-۱- مقدمه.....	۲۸
۴-۲- نرم افزار OpenFOAM.....	۲۹
۴-۲-۱- پیش پردازش.....	۳۰
۴-۲-۲- پس پردازش.....	۳۱
۴-۲-۳- برنامه نویسی در OpenFOAM.....	۳۱
۴-۳- مدل سازی عددی.....	۳۵
۴-۳-۱- استقلال از شبکه و دامنه محاسباتی.....	۳۷
۴-۳-۲- تولید شبکه محاسباتی.....	۳۹
۴-۳-۳- حل مسأله توسط OpenFOAM.....	۴۴
۴-۳-۴- الگوریتم پیزو برای جریانهای گذرا.....	۴۷
۴-۳-۵- رسیدن به حالت پایا.....	۴۸

۴۹.....	۴-۳-۶- شرایط محیطی و خصوصیات هوا
۵۰.....	۵- نتایج
۵۰.....	۵-۱- استوانه در بالای یک سطح عایق
۵۱.....	۵-۱-۱- محاسبات عددی
۶۶.....	۵-۱-۲- محاسبات آزمایشگاهی و مقایسه آن با نتایج عددی
۶۷.....	۵-۱-۳- ارائه رابطه تجربی
۶۸.....	۵-۲- استوانه افقی محصور در یک گوشه
۷۰.....	۵-۲-۱- محاسبات عددی
۸۴.....	۵-۲-۲- محاسبات آزمایشگاهی و مقایسه آن با نتایج عددی
۸۷.....	۵-۳- جمع بندی نتایج
۸۹.....	۵-۴- پیشنهاداتی جهت تحقیقات آینده
۹۰.....	مراجع

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل (۱-۱) انتقال حرارت جابجایی آزاد از هوا به لوله سرد در بالای یک صفحه عایق.....	۳
شکل (۲-۱) انتقال حرارت جابجایی آزاد از هوا به لوله محصور بین دو صفحه عایق عمود بر هم	۴
شکل (۱-۲) یک لوله داغ که در زیر یک سقف با دمای ثابت لورنس و همکارانش	۹
(۱۹۹۸)	۹
شکل (۲-۲) تغییرات عدد نوسلت بر اساس فاصله لوله از سقف لورنس و همکارانش	۱۰
(۱۹۹۸)	۱۰
شکل (۳-۲) دامنه حل عددی برای یک لوله همدمای در زیر سقف عایق کوریا و همکارانش	۱۱
(۲۰۰۵)	۱۱
شکل (۴-۲) تغییرات عدد نوسلت متوسط با فاصله لوله از سقف کوریا و همکارانش	۱۱
(۲۰۰۵)	۱۱
شکل (۵-۲) دامنه حل عددی برای یک لوله همدمای بین دو صفحه موازی رضایی و همکاران(۱۳۸۶)	۱۲
شکل (۶-۲) تغییرات عدد نوسلت محلی با زاویه تهور و یعقوبی (۲۰۰۸)	۱۳
شکل (۱-۳) شمای کلی آزمایش.	۱۶
شکل (۲-۳) لوله آزمایش و مشخصات لایه ها.	۱۸
شکل (۳-۳) ابعاد قطعه تست.	۱۹
شکل (۴-۳) اتاق تست و تجهیزات کنترل و سیکل سرمایش لوله آزمایش	۲۱
شکل (۵-۳) سیکل سرمایش برای کنترل دمای اتاق.	۲۲
شکل (۶-۳) سنسور های دما و رطوبت اطراف لوله آزمایش.	۲۲
شکل (۷-۳) سیکل سرمایش برای سرد کردن لوله آزمایش.	۲۴
شکل (۸-۳) دستگاه انتقال اطلاعات از ترموکوپل به کامپیوتر.	۲۴
شکل (۹-۳) منوی اصلی برنامه	۲۵
شکل (۱۰-۳) یک نمونه دمای سنسور های روی لوله آزمایش(دما بر حسب درجه سانتیگراد)	۲۶

- شکل (۳-۱۱) نمونه نمایش دما و رطوبت سنسورهای اتاق کنترل..... ۲۶
- شکل (۳-۱۲) نمای جانبی از صفحات عایق در مجاورت لوله آزمایش..... ۲۷
- شکل (۴-۱) نمای استوانه مورد مطالعه و محورهای مختصات..... ۳۷
- شکل (۴-۲) تغییرات عدد نوسلت متوسط در اطراف استوانه بر حسب تعداد نقاط شبکه..... ۳۸
- شکل (۴-۳) تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب نسبت دامنه محاسباتی به قطر استوانه..... ۳۸
- شکل (۴-۴) شبکه محاسباتی انتخابی اطراف یک نیم استوانه افقی در محیط بینهایت..... ۴۰
- شکل (۴-۵) دامنه محاسباتی یک لوله افقی در محیط بینهایت..... ۴۰
- شکل (۴-۶) شبکه محاسباتی انتخابی برای یک لوله افقی در بالای یک سطح عایق..... ۴۱
- شکل (۴-۷) دامنه محاسباتی یک لوله افقی در بالای یک سطح عایق..... ۴۲
- شکل (۴-۸) شبکه محاسباتی انتخابی برای یک لوله افقی محصور بین دو سطح عایق..... ۴۳
- شکل (۴-۹) دامنه محاسباتی یک لوله افقی محصور بین دو سطح عایق..... ۴۳
- شکل (۴-۱۰) مقادیر باقیمانده خطا برای حل یک استوانه در محیط بینهایت در عدد رایلی 10^4 ۴۹
- شکل (۵-۱) انتقال حرارت جابجایی آزاد از هوا به لوله در بالای یک صفحه عایق..... ۵۱
- شکل (۵-۲) خطوط جریان و دما ثابت اطراف استوانه در L/D مختلف در اعداد رایلی 10^4 و 10^6 ۵۲
- شکل (۵-۳) کانتور سرعت و دما اطراف استوانه در L/D مختلف در اعداد رایلی 10^4 و 10^6 ۵۳
- شکل (۵-۴) بردارهای سرعت اطراف استوانه در L/D مختلف در عدد رایلی 10^4 ۵۶
- شکل (۵-۵) بردارهای سرعت اطراف استوانه در L/D مختلف در عدد رایلی 10^6 ۵۹
- شکل (۵-۶) تغییرات عدد نوسلت محلی اطراف استوانه در فواصل مختلف صفحه در عدد رایلی 10^4 ۶۰
- شکل (۵-۷) تغییرات عدد نوسلت متوسط استوانه با L/D در عدد رایلی 10^4 ۶۱
- شکل (۵-۸) تغییرات عدد نوسلت محلی اطراف استوانه در فواصل مختلف صفحه در عدد رایلی 10^5 ۶۲
- شکل (۵-۹) تغییرات عدد نوسلت متوسط استوانه با L/D در عدد رایلی 10^5 ۶۲
- شکل (۵-۱۰) تغییرات عدد نوسلت محلی اطراف استوانه در فواصل مختلف صفحه در عدد رایلی 3×10^5 ۶۳
- شکل (۵-۱۱) تغییرات عدد نوسلت محلی اطراف استوانه در فواصل مختلف صفحه در عدد رایلی 6×10^5 ۶۴

شکل (۵-۱۲) .. تغییرات عدد نوسلت محلی اطراف استوانه در فواصل مختلف صفحه در عدد رایلی 10^6	۶۵
شکل (۵-۱۳) تغییرات عدد نوسلت متوسط استوانه با L/D در عدد رایلی 10^6	۶۵
شکل (۵-۱۴) تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب L/D در اعداد رایلی مختلف	۶۶
شکل (۵-۱۵) مقایسه نتایج تجربی و عددی عدد نوسلت متوسط استوانه با L/D در عدد رایلی 3×10^5	۶۷
شکل (۵-۱۶) مقایسه نتایج تجربی و عددی عدد نوسلت متوسط استوانه با L/D در عدد رایلی 6×10^5	۶۷
شکل (۵-۱۷) نمای استوانه محصور بین دو سطح عایق	۷۰
شکل (۵-۱۸) کانتور سرعت اطراف استوانه به ازای مقادیر مختلف S/D و L/D در عدد رایلی 6×10^5	۷۱
شکل (۵-۱۹) خطوط جریان و دما ثابت اطراف استوانه در L/D مختلف در اعداد رایلی 6×10^5	۷۲
شکل (۵-۲۰) بردارهای سرعت اطراف استوانه در $S/D = 0.1$ و L/D مختلف در عدد رایلی 6×10^5	۷۶
شکل (۵-۲۱) بردارهای سرعت اطراف استوانه در $S/D = 0.1$ و L/D مختلف در عدد رایلی 6×10^5	۷۹
شکل (۵-۲۲) تغییرات عدد نوسلت محلی بر روی استوانه برای $S/D = 0.1$ و عدد رایلی 6×10^5	۸۰
شکل (۵-۲۳) تغییرات عدد نوسلت محلی بر روی استوانه برای $S/D = 0.3$ و عدد رایلی 6×10^5	۸۰
شکل (۵-۲۴) تغییرات عدد نوسلت محلی بر روی استوانه برای $S/D = 0.5$ و عدد رایلی 6×10^5	۸۱
شکل (۵-۲۵) تغییرات عدد نوسلت متوسط بر روی استوانه در عدد رایلی 3×10^5	۸۲
شکل (۵-۲۶) تغییرات عدد نوسلت محلی بر روی استوانه در عدد رایلی 6×10^5	۸۲
شکل (۵-۲۷) تغییرات عدد نوسلت محلی بر روی استوانه در عدد رایلی 10^6	۸۳
شکل (۵-۲۸) مقایسه تغییرات عدد نوسلت متوسط آزمایشهای تجربی با نتایج عددی در رایلی 3×10^5	۸۵
شکل (۵-۲۹) مقایسه تغییرات عدد نوسلت متوسط آزمایشهای تجربی با نتایج عددی در رایلی 6×10^5	۸۷

فهرست جداول

جدول (۱-۳) شرایط محیطی و خصوصیات هوا برای آزمایش	۲۲
جدول (۱-۴) شرایط مرزی یک لوله افقی در محیط بینهایت	۴۱
جدول (۲-۴) شرایط مرزی یک لوله افقی در بالای یک سطح عایق	۴۲
جدول (۳-۴) شرایط مرزی یک لوله افقی محصور بین دو سطح عایق عمود برهم	۴۴
جدول (۴-۴) شرایط محیطی و خصوصیات هوا در مدل سازی محاسباتی	۴۹
جدول (۱-۵) محدوده محاسبات عددی و تجربی انتقال حرارت به استوانه افقی در بالای یک سطح عایق	۵۱
جدول (۲-۵) محدوده محاسبات عددی و تجربی انتقال حرارت به استوانه افقی محصور در یک گوشه در اعداد رایلی 3×10^5 و 6×10^5	۶۸
جدول (۳-۵) محدوده محاسبات عددی و تجربی انتقال حرارت به استوانه افقی محصور در یک گوشه در عدد رایلی 10^6	۶۹

فهرست علائم

مساحت تبادل حرارت (m^2)	A
قطر استوانه	D
گرمای ویژه در فشار ثابت	C_p
تابع نمایی	exp
عدد گراشف	Gr
شتاب جاذبه (m/s^2)	g
ضریب متوسط انتقال حرارت ($W/m^2 K$)	\bar{h}
ضریب موضعی انتقال حرارت ($W/m^2 K$)	h_θ
ضریب هدایت حرارتی ($W/m K$)	k
فاصله استوانه از صفحه عایق افقی (m)	L
لگاریتم طبیعی	ln
عدد نوسلت متوسط	\overline{Nu}
عدد نوسلت تعریف شده در معادله (۲-۹)	$\overline{\overline{Nu}}$
عدد نوسلت تعریف شده در معادله (۲-۳)	${}_x\overline{Nu}$
عدد نوسلت محلی	Nu_θ
عدد پرانتل	pr
مقدار رایلی	Ra
سرعت رینولدز	Re
فاصله استوانه از صفحه عایق عمودی (m)	S
درجه حرارت	T

دمای استاندارد	T_0
مولفه افقی سرعت (m/s)	u
مولفه عمودی سرعت (m/s)	v
عرض سقف عایق (m)	w

نماد های یونانی

ضریب پخش حرارتی (m^2/s)	α
ضریب انبساط حجمی هوا ($1/K$)	β
ویسکوزیته ($kg/m.s$)	μ
ویسکوزیته سینماتیک (m^2/s)	ν
زاویه پیموده شده بر روی استوانه (deg)	θ
جرم حجمی (kg/m^3)	ρ
جرم حجمی در شرایط استاندارد (kg/m^3)	ρ_0
پارامتر بدون بعد در معادلات (۲-۱۲) و (۵-۱)	η

۱- جابجایی طبیعی از استوانه محصور

انتقال حرارت از یک جسم که در هوای آزاد قرار گرفته و درجه حرارت آن با درجه حرارت هوای اطراف متفاوت می باشد، از دو طریق تشعشی^۱ و جابجایی^۲ انجام می گیرد. انتقال حرارت تشعشی در اختلاف دما های پایین، بسیار کمتر از انتقال حرارت جابجایی است. انتقال حرارت جابجایی با توجه به ساکن بودن و یا در جریان بودن اجباری هوای اطراف به ترتیب انتقال حرارت جابجایی آزاد^۳ یا جابجایی اجباری^۴ نامیده می شود. اجباری یا آزاد بودن جریان اغلب توسط نسبت پارامتر Gr/Re^2 مشخص می شود که Gr عدد گراشف^۵ و Re عدد رینولدز^۶ می باشد. برای نسبت های کمتر از ۱ این پارامتر، انتقال حرارت از نوع جابجایی اجباری و برای نسبت های بزرگتر از ۱ انتقال حرارت از نوع جابجایی آزاد می باشد. در نسبت های تقریباً نزدیک به ۱ انتقال حرارت جابجایی از نوع مرکب^۷ است. از نقطه نظر انتقال گرما مقدار انتقال حرارت در جابجایی اجباری به مراتب بیشتر از جابجایی آزاد است. با این وجود در بسیاری از موارد انتقال حرارت جابجایی آزاد مکانیزم اصلی انتقال حرارت است. در بعضی از شرایط که انتقال حرارت جابجایی آزاد اهمیت دارد شامل موارد زیر است:

۱- در سیستم هایی که تمایل به انتقال حرارت نداریم ولی به علت اختلاف دمای سطوح این نوع انتقال حرارت اتفاق می افتد و تا حد امکان باید با تغییر شرایط محیطی و سطوح میزان

¹ Radiation

² Convection

³ Free Convection Heat Transfer

⁴ Force Convection Heat Transfer

⁵ Grashof Number

⁶ Reynolds Number

⁷ Mixed Convection

انتقال حرارت را کمینه کرد.

۲- در شرایطی که انتقال حرارت مفید است ولی بخاطر محدودیت هایی از قبیل مصرف انرژی ، آلودگی صوتی ، هزینه زیاد ، فضای مورد نیاز و یا خاموش شدن دمنده ها هنگام قطع برق استفاده از دمنده مناسب به نظر نمی رسد. بنابر این در بسیاری از موارد صنعتی و عمومی که محدودیت های بالا دیده می شود، استفاده از انتقال حرارت جا بجایی آزاد بر نوع اجباری آن برتری دارد.

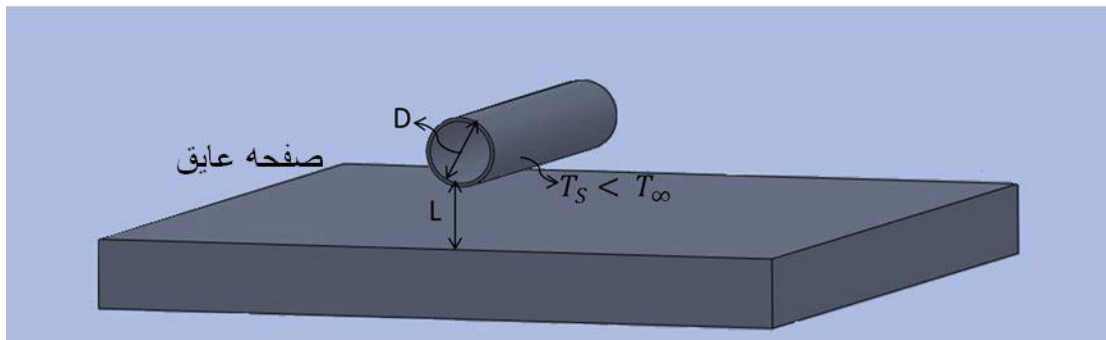
۳- در مواردی که ضروری است انتقال حرارت محدود و ناچیز باشد

انتقال حرارت جا بجایی آزاد ناشی از اختلاف دمای سطح جسم و هوای محیط و کاهش چگالی هوای اطراف جسم نسبت به چگالی هوا می باشد که در حضور گرانش سبب جابجا شدن هوای گرم به سمت بالا و جایگزینی آن با هوای سرد می شود. نرخ انتقال حرارت جابجایی آزاد به اختلاف دما، نوع سیال ، نحوه جابجایی و حرکت سیال و هندسه جسم بستگی دارد. از جمله هندسه های متداول و با کاربرد زیاد در صنعت، انتقال حرارت از استوانه های گرم و یا به استوانه های سرد افقی می باشد که در یک محیط محدود و یا نا محدود قرار دارند. ردیف استوانه های افقی در نیروگاه های حرارتی، خطوط انتقال سیال، تاسیسات حرارتی ساختمان ها، کابل های فشار قوی، کند انسورها، و غیره کاربرد گسترده ای دارد. با توجه به نبود سیستم دمنده در انتقال حرارت جا بجایی آزاد، بررسی راه های افزایش یا کاهش انتقال حرارت از یک استوانه امری ضروری به نظر می رسد. در بسیاری از سیستم ها با وجود انتقال حرارت جا بجایی آزاد به دنبال روش هایی هستیم که بتوانیم با هدایت حرکت سیال و یا افزایش سطح، انتقال حرارت را افزایش دهیم و یا در مواردی با تغییر هندسه و یا استقرار استوانه انتقال گرما را کاهش داد.

یکی از موارد پر کاربرد صنعتی انتقال حرارت جابجایی آزاد به استوانه های سرد افقی است که در بالای یک سطح عایق قرار می گیرند. در بیشتر مراکز صنعتی و مسکونی که دارای واحد های تأسیساتی هستند، از آب به عنوان سیال عامل انتقال حرارت از واحد مرکزی به رادیاتور ها و فنکویل

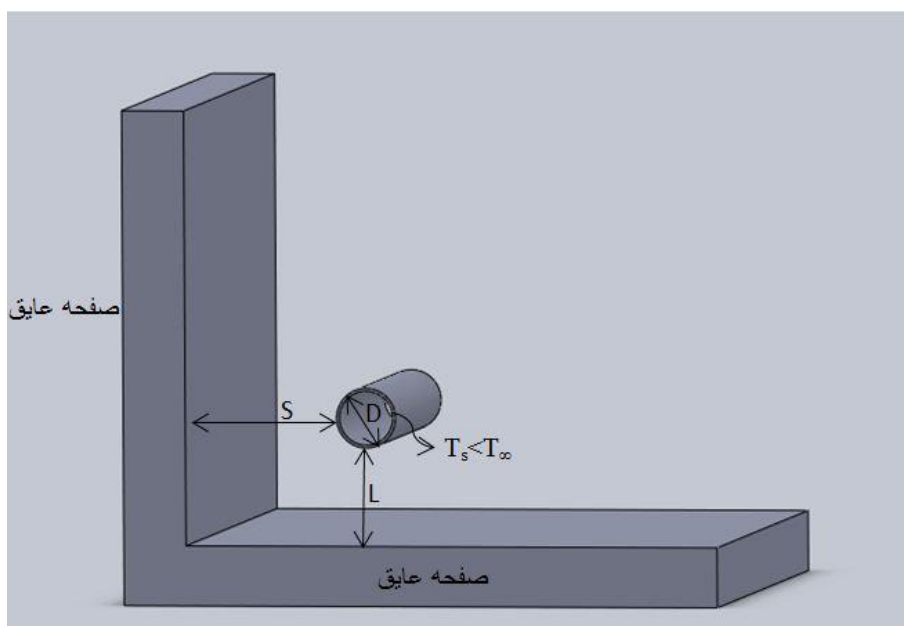
ها استفاده می شوند و در اکثر مراکز صنعتی این لوله ها در بالای سقف های کاذب و یا درون کانال های سیمانی نصب میشود تا علاوه بر اینکه نمای ساختمان را نازیبا نکنند از آسیب های فیزیکی و شیمیایی به آنها جلوگیری شود. در این حالت امکان دسترسی به لوله ها برای تعمیر و نگهداری آنها وجود دارد و فضای کمتری برای خنک کردن ساختمان مورد نیاز است. بنابراین برای جلوگیری از اتلاف حرارت تا حد امکان این سطوح و کانال ها را عایق کاری می کنند. همچنین می توان با تنظیم فاصله این لوله ها از سطوح اطراف میزان انتقال حرارت به این لوله ها را به کمترین مقدار ممکن رسانید تا سیال عامل اگر سرد است به جای اینکه در بین مسیر گرما را از محیط دریافت کند در داخل فنکویل این کار انجام شود.

در این پژوهش در مرحله اول اثر وجود یک صفحه عایق بر روی انتقال حرارت جابجایی آزاد به یک لوله افقی با دمای سرد یکنواخت که در بالای این سطح قرار دارد مانند شکل (۱-۱) مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل (۱-۱) انتقال حرارت جابجایی آزاد از هوا به لوله سرد در بالای یک صفحه عایق.

در مرحله بعد علاوه بر وجود صفحه عایق در زیر لوله، یک صفحه عایق در کنار لوله نیز مانند شکل (۲-۱) قرار گرفته تا اثرات فواصل مختلف این صفحات بر انتقال حرارت جابجایی آزاد به لوله بررسی گردد.



شکل (۲-۱) انتقال حرارت جابجایی آزاد از هوا به لوله محصور بین دو صفحه عایق عمود بر هم

برای اطمینان از محاسبات ابتدا انتقال حرارت جابجایی آزاد به یک لوله گرم در محیط بینهایت، بررسی می شود. در استفاده از کد محاسباتی، صحت روش عددی و نوع شبکه انتخاب شده مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از آن با نتایج ارائه شده توسط سایر محققین مقایسه می گردد. در مرحله بعد اثر انتقال حرارت به یک لوله تنها که در بالای یک سطح عایق و همچنین محصور بین دو سطح عایق قرار دارد به ازای فواصل مختلف سطوح از لوله در اعداد رایلی مختلف مورد بررسی قرار می گیرد.

تحقیقات صورت گرفته در این پژوهش به دو صورت تجربی و عددی انجام می شود. بررسی تجربی در اتاق کنترل آزمایشگاه ترمودینامیک دانشگاه شیراز و در بررسی عددی از کد عددی اپن فوم^۱ که یک نرم افزار کدباز^۲ تحت سیستم عامل لینوکس^۳ است استفاده می گردد.

1 OpenFOAM

2 Open Source

3 Linux

۲- مروری بر تحقیقات انجام شده

بررسی انجام شده در این پروژه، انتقال حرارت جا بجایی آزاد به لوله افقی است که در بالای یک سقف عایق قرار گرفته است. با این وجود بررسی انتقال حرارت جا بجایی آزاد از روی لوله افقی گرم و به لوله افقی سرد واقع در محیط بینهایت و همچنین لوله ای که در درون یک محیط محدود مانند یک محفظه بسته قرار دارد می تواند درک بهتری از تاثیر وجود سقف عایق بر روی خصوصیات انتقال حرارت جابجایی آزاد به یک لوله سرد در بالای آن بدهد.

۲-۱- انتقال حرارت جا بجایی آزاد از یک استوانه افقی گرم در هوای ساکن

مطالعات بسیاری بر روی انتقال حرارت جا بجایی آزاد از یک استوانه افقی انجام گرفته است. مراجع بسیار زیادی جا بجایی آزاد از یک استوانه تنها را بررسی کرده اند. نسبت طول به قطر استوانه در این مطالعات از ۳ تا ۹۰۰۰ متغیر بوده است. در این بررسیها عدد رایلی Ra بر اساس قطر استوانه و اختلاف دمای سطح استوانه و دمای متوسط سیال اطراف تعریف شده است. بر اساس داده های این مراجع و معادلات برازش شده به آنها، معمولا رابطه ای به صورت زیر برای جابجایی آزاد از یک استوانه افقی ارائه گردیده است :

$$\overline{Nu} = A + B(Ra)^m \quad (۱-۲)$$

که \overline{Nu} عدد نوسلت^۱ متوسط، A و B و M ثوابت مشخصی هستند.

در مطالعه ای تجربی مورگان (۱۹۷۴) برای عدد نوسلت متوسط روابط زیر را ارائه داده است:

$$\begin{aligned} \overline{Nu} &= 0.85Ra^{0.1888} & 10^2 \leq Ra \leq 10^4 \\ \overline{Nu} &= 0.48Ra^{0.25} & 10^4 \leq Ra \leq 10^7 \end{aligned} \quad (2-2)$$

در یک مطالعه عددی که توسط کوهن و گلدشتین (۱۹۸۰) انجام شده است، انتقال حرارت جابجایی آزاد از یک استوانه افقی دما ثابت با حل معادلات ناویر-استوکس و انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج برای اعداد رایلی در محدوده ۱ تا 10^7 ارائه گردیده است. برای بررسی صحت نتایج عددی بررسی تجربی نیز توسط تداخل سنج ماک - زندر انجام گرفته است. نتایج عددی و تجربی آنها مطابق خوبی با همدیگر نشان می دهند. نتایج این مطالعات به صورت رابطه زیر برای عدد نوسلت ارائه شده است:

$$\begin{aligned} \overline{Nu} &= 2/\ln(1 + 2/Nu_x) \\ \overline{Nu}_x^{15} &= (0.3994Ra^{0.25})^{15} + (0.1Ra^{0.333})^{15} \end{aligned} \quad (3-2)$$

تا کورا و همکاران (۱۹۸۳) در یک مطالعه تجربی که توسط روش تداخل سنجی انجام گرفته است، انتقال حرارت از یک استوانه تنه را به صورت رابطه زیر ارائه کرده اند:

$$\overline{Nu} = 0.463Ra^{0.25} \quad 2.8 \times 10^4 \leq Ra \leq 2.8 \times 10^5 \quad (4-2)$$

اسپارو و بئوسینک (۱۹۸۳) در یک تحقیق تجربی دیگر رابطه زیر را برای عدد نوسلت پیشنهاد کرده اند:

$$\overline{Nu} = 0.592Ra^{0.23} \quad 2 \times 10^4 \leq Ra \leq 2 \times 10^5 \quad (5-2)$$

¹ Nusselt Number

در بررسی عددی دیگری که توسط بدر (۱۹۸۷) انجام گرفته است، انتقال حرارت جا بجایی آزاد گذرا از یک استوانه مورد بررسی قرار گرفته است . در این بررسی ها عدد رایلی از ۱۰ تا ۱۰۰۰ تغییر کرده است و از هوا به عنوان سیال عامل استفاده شده است. نتایج این مطالعات بصورت عدد نوسلت محلی و متوسط ناپایدار داده شده است. با توجه به نتایج این بررسی ها عدد نوسلت محلی در بالای استوانه کمترین و در پایین استوانه بیشترین مقدار را دارا میباشد . عدد نوسلت برحسب زمان کاهش می یابد و در نهایت در حالت پایدار به مقدار معینی می رسد. سرعت کاهش عدد نوسلت با افزایش عدد رایلی افزایش می یابد.

صادقیپور و عاشقی (۱۹۹۳) در یک مطالعه تجربی رابطه زیر را برای عدد نوسلت برای اعداد رایلی کم پیشنهاد کرده اند:

$$\overline{Nu} = 0.62Ra^{0.25} \quad 350 \leq Ra \leq 900 \quad (۶-۲)$$

هراز و بلدا (۲۰۰۲) انتقال حرارت جا بجایی آزاد از یک استوانه افقی دما ثابت را با استفاده از تداخل سنجی مورد بررسی قرار داده اند. رابطه زیر برای عدد نوسلت متوسط ارائه گرد یده است :

$$\overline{Nu} = 0.022Ra^{0.5682} \quad 2.2 \times 10^3 \leq Ra \leq 1.6 \times 10^5 \quad (۷-۲)$$

اخیراً کورسیونه (۲۰۰۴) در یک مطالعه عددی که محدوده وسیعی از اعداد رایلی را در بر میگیرد رابطه زیر را برای انتقال حرارت از یک استوانه افقی دما ثابت پیشنهاد کرده است :

$$\overline{Nu} = 0.626 + 0.417Ra^{0.25} \quad 10^2 \leq Ra \leq 10^6 \quad (۸-۲)$$

این رابطه تطابق خوبی را با نتایج بدست آمده قبلی نشان میدهد.

۲-۲- انتقال حرارت جا بجایی آزاد از یک استوانه افقی گرم در زیر سقف

انتقال حرارت از یک استوانه افقی گرم در زیر سقف، در موارد متعددی از جمله خطوط لوله جهت انتقال سیالات گرم که توسط نگهدارنده هایی در زیر یک سقف نصب شده اند، به چشم می خورد. با این وجود بر خلاف مسائل کلاسیک مانند انتقال حرارت از روی یک لوله تنها، مطالعه روی آنها بسیار محدود انجام گرفته است.

سایتو و همکارانش (۱۹۶۹) در یک بررسی تجربی، مطابق شکل (۲-۱) یک صفحه باریک $0.94 < W/D < 3.7$ و بلند از جنس باکلیت را که در داخل ورق نازک آلومینیومی پیچیده شده است را در بالای یک لوله داغ قرار دادند.

آن ها به این نتیجه رسیدند که برای اعداد گراشف $2/1 \times 10^6$ تا $3/2 \times 10^6$ میزان انتقال حرارت جابجایی کمترین مقدار خود را در حالتی دارد که فاصله بی بعد سقف و لوله L/D برابر با 0.12 است. همچنین آنها دریافتند که در این حالت عدد نوسلت حدوداً 11% کمتر از حالتی است که این صفحه بر بالای لوله قرار ندارد.

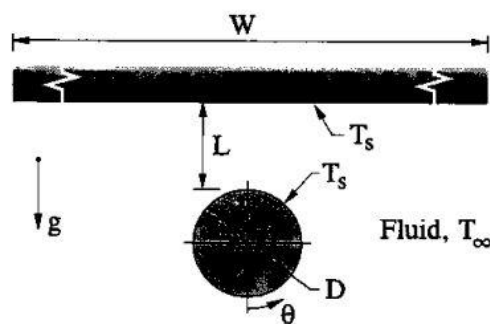
کوییزومی و هوزوکاوا (۱۹۹۶) در مطالعه ای تجربی با استفاده از روش نمایان سازی جریان^۱ به بررسی جریان انتقال حرارت جا بجایی آزاد از روی یک لوله در زیر سقف پرداختند. در این مطالعه علاوه بر اثر تغییر قطر لوله و فاصله بین لوله و سقف بر نرخ انتقال حرارت، اثر نوع سقف از نظر عایق و یا همدم بودن نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

آزمایشهای آنها برای سیال هوا در اعداد رایلی $4/8 \times 10^4$ تا 10^7 انجام شده است. آنها در این بررسی

¹ Flow Visualization

سه حالت مختلف جریان بر اساس فاصله لوله از سقف و عدد رایلی برای سقف هم دما بدست آورده اند. در اعداد رایلی کمتر از 10^5 ، جریان سیال برای مقادیر L/D کمتر از ۵ پایدار و دو بعدی است. برای اعداد رایلی بالاتر از مقدار 10^5 ، زمانی که سقف به لوله نزدیک باشد ($L/D=0.4$) حالت جریان ناپایدار و سه بعدی می شود. در حالتی که فاصله لوله از سقف زیاد باشد نیز جریان پلوم حاصل از لوله در زیر سقف شروع به نوسان می کند و حالتی از جریان که موسوم به جریان دوبعدی با پلوم نوسانی است را سبب می شود. در این مطالعه عدد نوسلت محلی بر روی محیط لوله Nu_0 به ازای عدد رایلی $10^6 \times 1/3$ و ($L/D=0.2$ و 0.5) برای هر دو نوع سقف نشان داده شده اند.

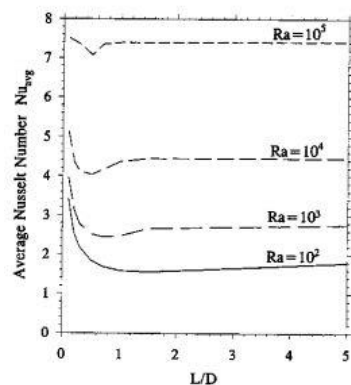
لورنس و همکارانش (۱۹۹۸) در یک بررسی تجربی، عددی به مطالعه انتقال حرارت جا بجایی آزاد از روی یک لوله داغ که در زیر یک سقف با دمای ثابت (دمای محیط) قرار دارد پرداختند.



شکل (۱-۲) یک لوله داغ که در زیر یک سقف با دمای ثابت لورنس و همکارانش (۱۹۹۸)

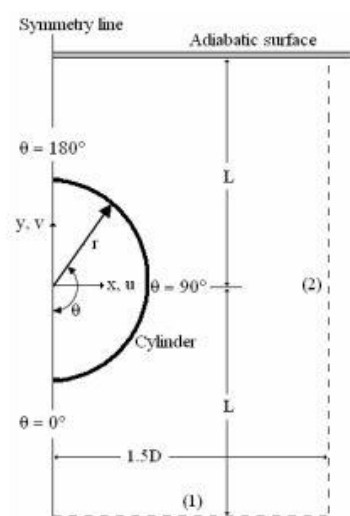
آنها با استفاده از روش عددی المان محدود و روش تجربی تداخل سنجی ماخ-زندره برای سیال هوا و اعداد وایلی 10^2 تا 10^5 به بررسی خطوط هم دما و هم سرعت در اطراف لوله پرداختند و نتایج حاصل از روش عددی المان محدود را با نتایج حاصل از روش تجربی مورد مقایسه قرار دادند. برای حالتی که فاصله بین لوله و سقف بیشتر از قطر لوله است، سقف اثری بر میزان انتقال حرارت از لوله ندارد. اما با کاهش این فاصله مطابق شکل (۲-۲) میزان انتقال حرارت از لوله افزایش می یابد که این

ناشی از وجود انتقال حرارت هدایت بین لوله و سقف است. در حالتی که فاصله بین لوله و سقف در حدود یک چهارم قطر لوله است، انتقال حرارت از روی لوله حدوداً ۱۰٪ بیشتر از حالتی است که لوله در محیط بینهایت قرار دارد.



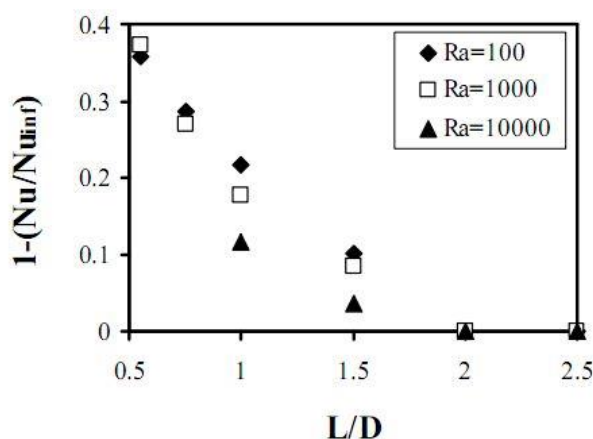
شکل (۲-۲) تغییرات عدد نوسلت بر اساس فاصله لوله از سقف لورنس و همکارانش (۱۹۹۸)

کوریا و همکارانش (۲۰۰۴) جریان جا بجایی آزاد از روی یک لوله همدمما در زیر سقف عایق را طبق شکل (۳-۲) با استفاده از حل عددی به روش حجم محدود با شبکه ای مربعی مورد بررسی قرار دادند.



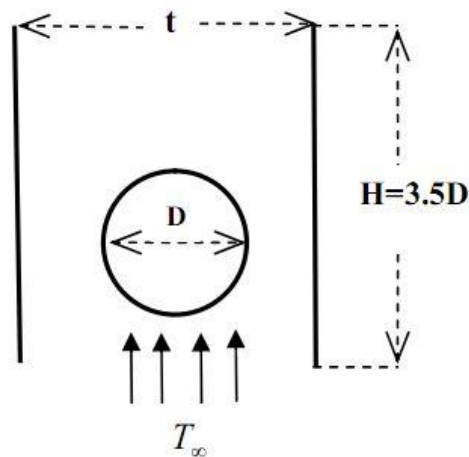
شکل (۳-۲) دامنه حل عددی برای یک لوله همدم در زیر سقف عایق کوریا و همکارانش (۲۰۰۵)

در این بررسی با تغییر عدد رایلی از 10^2 تا 10^5 و L/D از 0.55 تا $2/5$ طبق شکل (۴-۲) دریافتند که وجود سقف بر روی لوله زمانی تاثیر گذار است اگر مقدار L/D کمتر از ۲ باشد و با کاهش فاصله بین لوله و سقف عدد نوسلت میانگین بر روی لوله به طور کامل کاهش می یابد. البته نتایجی که در این تحقیق برای عدد نوسلت محلی و متوسط بدست آمده است در فواصل کم لوله با سقف با نتایج کوییزومی و هوزوکاوا (۱۹۹۶) سازگاری ندارد. تفاوت بدلیل افزایش عدد نوسلت محلی در بررسی ها تجربی برای ناحیه بالای لوله است.



شکل (۴-۲) تغییرات عدد نوسلت متوسط با فاصله لوله از سقف کوریا و همکارانش (۲۰۰۵)

رضایی، ضیاء بشر حق و یوسفی (۱۳۸۷) در یک مطالعه عددی که توسط کد فلونت انجام گرفته به اثرات انتقال حرارت یک لوله که مابین دو سطح عایق موازی طبق شکل (۵-۲) قرار دارد در محدوده بین اعداد رایلی ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که بیشترین میزان انتقال حرارت زمانی رخ می دهد که $H/D=1$ و $t/D=1/75$ باشد.



شکل (۵-۲) دامنه حل عددی برای یک لوله همدمای مابین دو صفحه موازی رضایی و همکاران (۱۳۸۶)

و در نهایت، یعقوبی و اشتیاقی (۲۰۰۸) در یک مطالعه تجربی با استفاده از روش تداخل سنجی نوری ماخ-زندر و مطالعه عددی به روش حجم محدود (نرم افزار فلوئنت) انتقال حرارت جابجایی آزاد از یک لوله و یک دسته لوله در زیر سقف عایق را مورد بررسی قرار داده اند. پس از بررسی و مطالعه آزمایشگاهی رابطه زیر را برای عدد نوسلت متوسط بر اساس نسبت فاصله از سقف به قطر، و عدد رایلی پیشنهاد داده است.

$$\overline{Nu} = 1 - 0.2357 \times \exp\left(-\left(\frac{\eta - 0.8921}{0.9955}\right)^2\right) \quad (۹-۲)$$

با دقت $R^2 = ۰/۹۰۶۱$ که در این رابطه

$$\overline{Nu} = \frac{Nu}{Nu_{\infty}} \quad (۱۰-۲)$$

در رابطه (۱۰-۲) Nu_{∞} از رابطه ارائه شده توسط مورگان (۱۹۷۵) حاصل می شود.

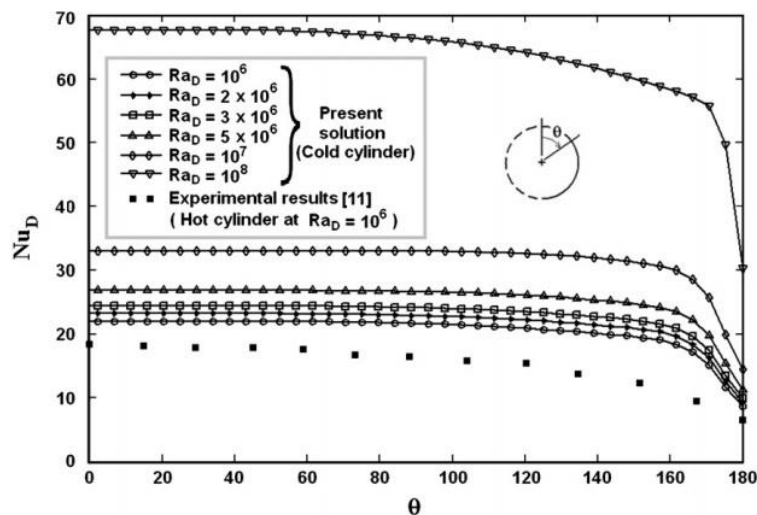
$$\begin{aligned} \overline{Nu}_{\infty} &= 0.85Ra^{0.1888} & 10^2 \leq Ra \leq 10^4 \\ \overline{Nu}_{\infty} &= 0.48Ra^{0.25} & 10^4 \leq Ra \leq 10^7 \end{aligned} \quad (۱۱-۲)$$

و مقدار η برابر است با

$$\eta = \left(\left(\frac{L}{D} \right)^{1.215} Ra^{0.141} - 0.2 \right)^{0.52} \quad (12-2)$$

۳-۲- انتقال حرارت جا بجایی آزاد به یک استوانه افقی سرد در هوای ساکن

تهور و یعقوبی (۲۰۰۸) در یک مطالعه عددی به روش شبکه عصبی مصنوعی^۱ در اعداد رایلی 10^6 تا 10^8 به بررسی انتقال حرارت به یک استوانه سرد افقی که در هوای ساکن قرار دارد پرداختند و همانطور که در شکل (۶-۲) مشاهده می شود با افزایش زاویه از بالای استوانه عدد نوسلت محلی کاهش می یابد و مقدار متوسط نوسلت لوله سرد کمی از مقدار متوسط لوله گرم بیشتر شده است.



شکل (۶-۲) تغییرات عدد نوسلت محلی با زاویه تهور و یعقوبی (۲۰۰۸)

¹ Artificial Neural Network(ANN)

همچنین رابطه زیر را برای محاسبه عدد نوسلت متوسط با توجه به داده های نوسلت محلی پیشنهاد کرده اند.

$$\overline{Nu} = 0.3607Ra^{0.2802} \quad (۱۳-۲)$$

مطالعات فوق نشان می دهد که انتقال حرارت از لوله یا استوانه سرد تر از محیط در شرایطی که لوله بالای یک سطح عایق و یا محدود در یک گوشه باشد انجام نشده است.

لوله های سرد در سیستم های سرمایش، تأسیسات ساختمان و تأسیسات پتروشیمی اغلب در محیطی محدود قرار می گیرند و انتقال حرارت از آنها را نمی توان با دقت لازم بر اساس روابط (۱-۲) تا (۱۳-۲) محاسبه گردد. از اهداف این پژوهش بررسی انتقال حرارت از لوله ای سرد می باشد که از یک جهت و یا دو جهت محصور گردیده است.

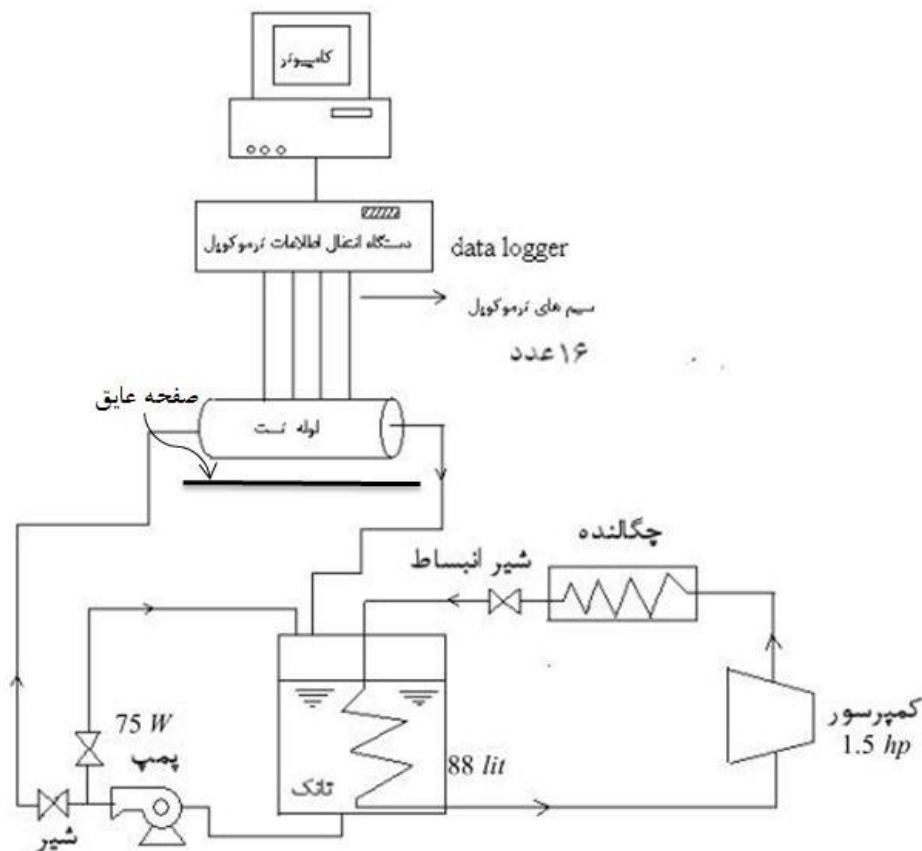
۳- شرح آزمایش

۳-۱- مقدمه

روش آزمایش برای اندازه گیری انتقال حرارت جابجایی آزاد به یک استوانه سرد افقی در بالای یک سطح عایق یا در گوشه عایق موضوع فصل حاضر است. در این راستا لازم است سیستم خاصی طراحی، ساخته و آزمایش گردد. جهت انجام آزمایش ها علاوه بر طراحی سیستم، باید شرایط اطراف محیط استوانه نیز کنترل شود. برای این منظور تجهیزات مختلفی باید ساخته و آماده گردد که شامل اتاق کنترل، سیستم تولید گرما و سرما، ابزار دقیق و تجهیزات کنترل دما و رطوبت اتاق کنترل می باشد.

شکل (۳-۱) شمای کلی دستگاه آزمایش را نشان می دهد. آزمایش روی لوله آلومینیومی که در اتاق تست روی پایه ای فلزی سوار شده انجام می گیرد. برای آزمایش دمای سطح باید پایین آورده شده و کنترل گردد. برای اینکه کنترل روی دمای سطح لوله انجام شود، باید مبرد ثانویه انتخاب گردد و دمای لوله را پایین آورد. برای این منظور، محلول اتیلن گلیکول و آب به عنوان مبرد ثانویه انتخاب شد. برای پایین آوردن دمای مبرد ثانویه و ثابت نگه داشتن آن در دمای مورد نظر، از یک سیکل سرمایش، استفاده شده است. این سیکل از یک کمپرسور، کندانسور، یک مخزن که اواپرا تور در آن قرار گرفته تشکیل شده است. مبرد ثانویه در مخزن سرد شده و توسط یک پمپ که روی سیکل

سرمایش نصب شده، برای سرد کردن قطعه تست بر طبق شکل (۱-۳) فرستاده می شود.



شکل (۱-۳) شمای کلی آزمایش.

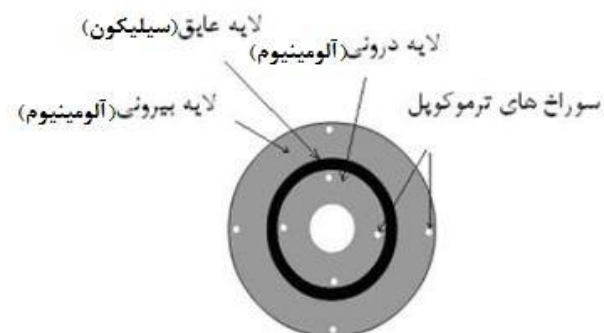
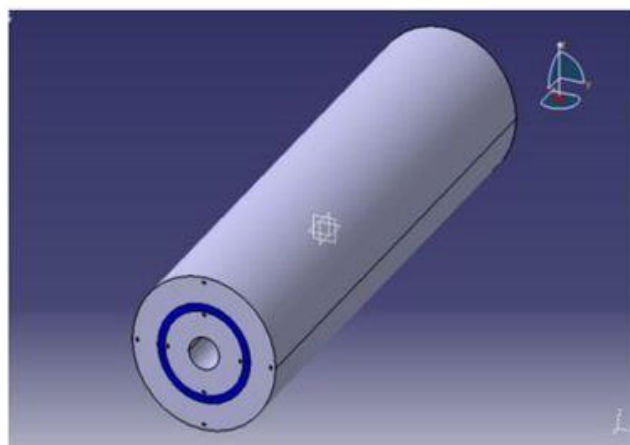
برای اندازه گیری انتقال حرارت جابجایی از لوله شرایط محیط نیز باید کنترل گردد. برای این کار از یک اتاق کنترل که دمای آن بوسیله یک سیستم گرمایش و یک سیکل سرمایش و رطوبت آن توسط رطوبت زن و رطوبت سنج تنظیم می شود استفاده شده است. جزئیات اتاق کنترل و چگونگی کنترل آن در مراجع یعقوبی و خوشنظر (۲۰۱۰)، یعقوبی و نبوتی (۲۰۱۰) و تهور و یعقوبی (۲۰۰۸) آمده است.

برای انجام آزمایش، دمای محلول اتیلن گلیکول و آب توسط دستگاه سرمایش به دمای مورد نظر برای اندازه گیری رسانده، سپس این سیال توسط پمپ از لوله آزمایش عبور داده شده و دوباره به مخزن بر می گردد

اطلاعات مربوط به دما در نقاط مختلف توسط ترموکوپلها به دستگاه انتقال اطلاعات ، برای اندازه گیری شار حرارتی به کامپیوتر فرستاده، و در فاصله زمانی تنظیم شده، ثبت می گردد.

۲-۳- اندازه گیری شار حرارتی

لوله آزمایش به قطر ۸۰ میلی متر و طول ۳۰۰ میلی متر از سه قسمت، لوله بیرونی ، لوله درونی و عایق که بین دو لوله قرار دارد، تشکیل شده است. شکل (۲-۳)



شکل (۲-۳) لوله آزمایش و مشخصات لایه ها.

در آزمایش جابجایی طبیعی با توجه به بالا بودن ضریب هدایت فلز (۱۷۰ W/mK و عدد بایوت^۱ پایین)، اختلاف دمای مرکز لوله تا سطح استوانه بسیار کم می گردد لذا این اختلاف کم دما باعث خطا در اندازه گیری شار حرارتی به لوله می شود. برای کم کردن خطای اندازه گیری باید اختلاف دمای مرکز و سطح استوانه را افزایش داد. برای ایجاد این اختلاف دما، از یک عایق با ضریب هدایت کم ۰/۱۷ W/mK بین دو لوله استفاده شده است. برای اندازه گیری دما سوراخ هایی به قطر ۱/۵ میلیمتر در راستای طول لوله و در بالا و پایین عایق (طبق شکل (۳-۳)) ایجاد شده و سیم های ترموکوپل نوع T در داخل آن قرار گرفته است. سوراخ های تعبیه شده به ترتیب در زوایای صفر، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه نسبت به نقطه بالای لوله قرار دارند. برای اینکه شار حرارتی متوسط در طول لوله محاسبه گردد، دو سری سوراخ به فاصله ۱۶ سانتیمتر از یکدیگر در طول لوله ایجاد شده است. در پایین و بالای عایق چهار عدد ترموکوپل و در مجموع شانزده ترموکوپل در دو سمت لوله برای اندازه گیری دما استفاده شده است. با اندازه گیری دما در دو طرف لایه عایق و داشتن ضریب گرمایی عایق، شار گرمایی از رابطه (۱-۳) محاسبه می شود.

$$q'' = \frac{2 \times K \times (T_{r2} - T_{r1})}{D \times \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (1-3)$$

که در آن K ضریب هدایت حرارتی عایق بین دو لایه استوانه، T_{r1} و T_{r2} به ترتیب دمای متوسط ترموکوپل های لایه خارجی و داخلی لوله آزمایش، D قطر لوله و r_1 و r_2 به ترتیب شعاع لایه داخلی و خارجی اطراف لایه عایق است.

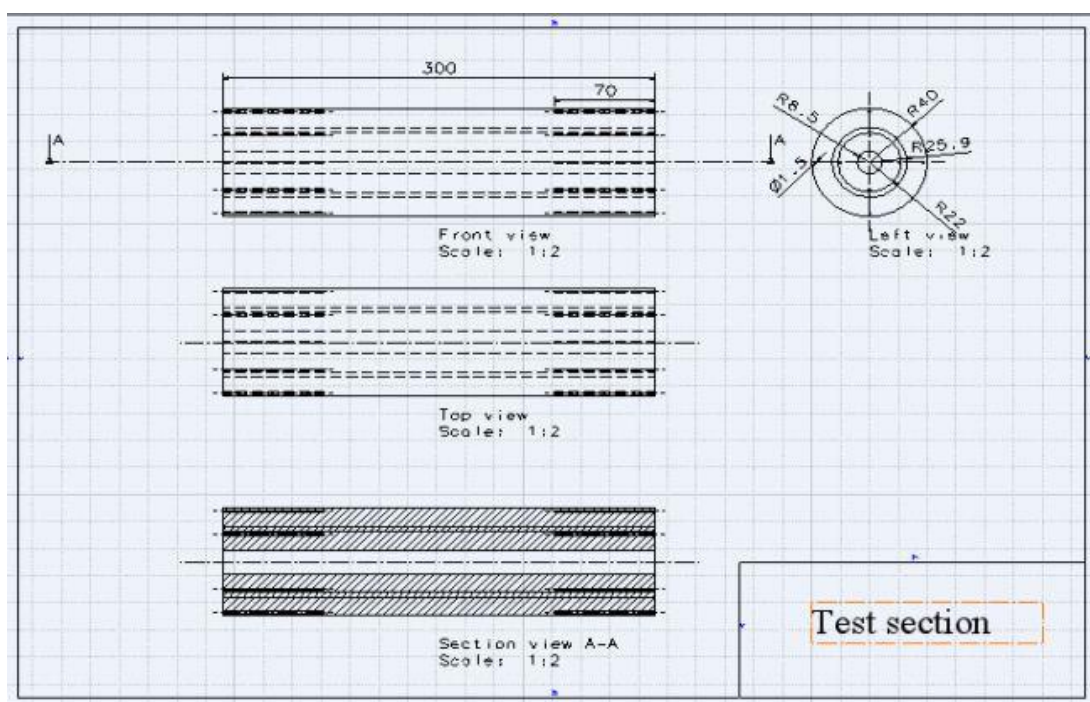
ضریب هدایت حرارتی متوسط و عدد نوسلت متوسط از روابط زیر محاسبه می شود.

$$\bar{h} = \frac{q''}{(T_s - T_\infty)} \quad (2-3)$$

¹ Biot Number

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}D}{k_f} \quad (3-3)$$

در روابط فوق q'' شار حرارت محاسبه شده از رابطه (۳-۱) ، T_s دمای سطح لوله ، D قطر لوله و k_f ضریب هدایت حرارتی سیال (هوا) است.



شکل (۳-۳) ابعاد قطعه تست.

۳-۳- تجهیزات آزمایش

تجهیزات آزمایش شامل :

۱- اتاقک آزمایش

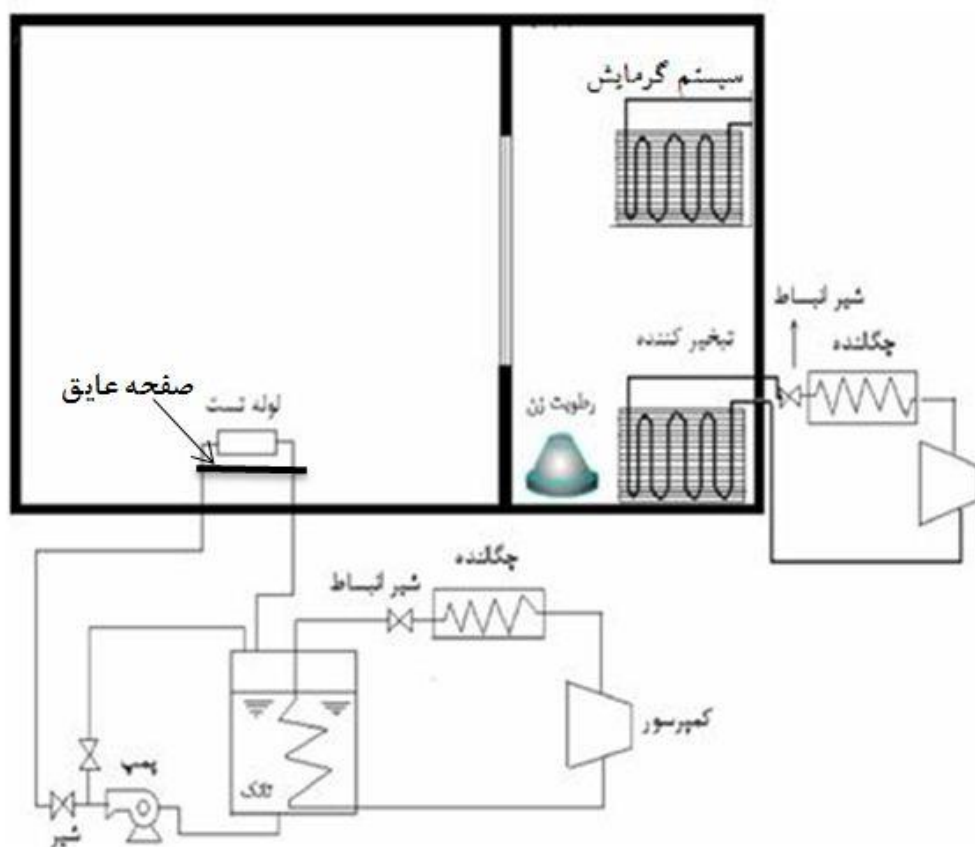
۲- سیکل سرمایش و سیستم گرمایش برای کنترل دمای اتاق

۱- سیکل سرمایش برای سرد کردن لوله آزمایش

۲- صفحه مدار (board) برای انتقال اطلاعات از ترموکوپل به کامپیوتر

۳-۱- اتاقک آزمایش

ابعاد این اتاق $۵/۸ \times ۳ \times ۴$ متر بوده و ازدو قسمت تشکیل شده است . در یک قسمت سیستم سرمایش و گرمایش اتاق و رطوبت زن و در قسمت دیگر لوله آزمایش و تجهیزات مرتبط مانند شکل (۳-۴) قرار گرفته است. برای خنک و یا گرم کردن اتاق، هوای اتاقک توسط سیستم سرمایش یا گرمایش کنترل می شود. هوای مورد نیاز بوسیله کانال هوای بزرگی که در سقف و دیوار تعبیه شده، به قسمت پایین اتاقک تست فرستاده می شود. برای کم کردن تلافات حرارتی، این اتاق از دیواره چوبی دو جداره، که بین آنها عایق قرار دارد، ساخته شده است. قبل از انجام آزمایش، باید اتاق برای آزمایش آماده می شد. برای این منظور ، به دلیل دیواره چوبی اتاقک اتاق و جلوگیری از اثر رطوبت روی آن، دیوار ها رنگ آمیزی و کف آن با پلاستیک پوشیده شده است.



شکل (۴-۳) اتاق تست و تجهیزات کنترل و سیکل سرمایش لوله آزمایش

۳-۳-۲- سیستم سرمایش، گرمایش اتاق

سیکل سرمایش شامل یک کمپرسور با توان $1/5$ اسب بخار برای تنظیم دمای اتاق می باشد. تبخیر کننده آن در داخل اتاق تست و کمپرسور و کند انسور آن در بیرون اتاق تست طبق شکل (۳-۵) قرار دارد. سیستم گرمایش هم از یک بخاری برقی تشکیل شده است. برای تنظیم دمای اتاق چهار عدد ترموکوپل که دما و رطوبت اتاق را به ترموکنترل انتقال می دهد، اطراف لوله آزمایش مانند شکل (۳-۶) نصب شده اند.



شکل (۵-۳) سیکل سرمایش برای کنترل دمای اتاق.



شکل (۶-۳) سنسورهای دما و رطوبت اطراف لوله آزمایش.

در کلیه آزمایش‌ها شرایط محیط، خصوصیات هوا و دمای سطح لوله چنان انتخاب شده که تقطیر روی آن صورت نگیرد به عبارت دیگر دمای سطح لوله از دمای شبنم اتاق بیشتر است. شرایط محیطی و خصوصیات هوا در جدول (۱-۳) نشان داده شده است.

جدول (۱-۳) شرایط محیطی و خصوصیات هوا برای آزمایش

دمای نقطه شبنم	رطوبت نسبی	فشار محیط (pa)	دمای محیط (C°)	دمای سطح (C°)	قطر استوانه (m)	Ra
۱۱/۷	%۳۰	۸۱۹۴۰	۳۱/۵	۲۱/۵	۰/۰۸	۳×۱۰ ^۵
۱۱/۷	%۳۰	۸۱۹۴۰	۳۱/۵	۱۳	۰/۰۸	۶×۱۰ ^۵

۳-۳-۳- سیکل سرمایش برای سرد کردن لوله آزمایش

برای خنک کردن لوله آزمایش، سیکل سرمایش طراحی و ساخته شده است. قطعات این دستگاه شامل، کمپرسور، کندانسور، شیر انبساط، شیر برقی، مبدل، خشک کن، مخزن مبرد ثانویه، تبخیر کننده، پمپ، تابلو برق، ترموکنترل، سنسور دما، شیر، اتصالات و لوله می باشد که همگی روی شاسی متحرک نصب شده است. هدف از طراحی این دستگاه، رساندن دمای مبرد ثانویه به دمای مورد نیاز و تامین تلفات حرارتی در قطعه آزمایش، مخزن، پمپ، لوله و اتصالات مخزن و لوله های انتقال مبرد به لوله آزمایش است این سیکل با پمپ مبرد و تنظیم دمای لایه داخلی لوله آزمایش دمای سطح لوله را ثابت نگه می دارد. شکل (۳-۷) تجهیزات تولید مبرد سرد کننده لوله آزمایش را نشان می دهد.



شکل (۷-۳) سیکل سرمایش برای سرد کردن لوله آزمایش.

۳-۴-۳- دستگاه انتقال اطلاعات از ترموکوپل به کامپیوتر (Data Logger)

این دستگاه دارای دو قسمت سخت افزاری و نرم افزاری می باشد. نرم افزار بر روی کامپیوتر شخصی نصب شده است. دقت هر کدام از ترموکوپل ها ± 0.1 درجه سانتیگراد می باشد. سخت افزار این دستگاه دارای ۱۶ کانال ورودی است که اطلاعات مربوط به ترموکوپل ها را می تواند دریافت کند. اطلاعات دریافتی را بصورت موازی توسط پورت کام به کامپیوتر انتقال داده و توسط نرم افزار مربوط به آن در هر بازه زمانی دلخواه به نرم افزار Excel فرستاده و ذخیره می کند. این دستگاه دارای دو ماژول برای تبدیل اطلاعات آنالوگ به دیجیتال و یک ماژول برای ارسال اطلاعات دیجیتال به کامپیوتر می باشد. این دستگاه به شرکت ایران مدار سفارش داده و ساخته شده است. شکل (۸-۳) دستگاه انتقال اطلاعات را نشان می دهد.



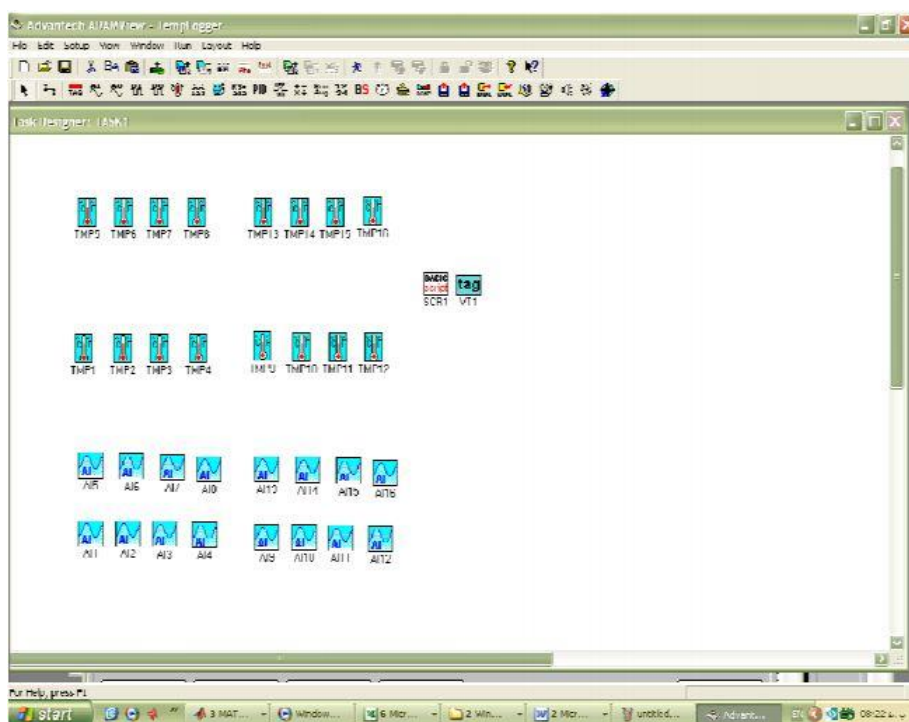
شکل (۸-۳) دستگاه انتقال اطلاعات از ترموکوپل به کامپیوتر.

برای ثبت اطلاعات انتقال داده شده توسط دستگاه انتقال اطلاعات ترموکوپل و همچنین تنظیم فاصله زمانی ثبت اطلاعات از نرم افزار (Adam View) استفاده شده است. اطلاعات انتقال یافته به نرم افزار Excel انتقال داده شده و ثبت می گردد. چون دستگاه انتقال اطلاعات قادر به دریافت اطلاعات از انواع مختلف ترموکوپل ، ولتار و آمپر می باشد، در نتیجه بعد از نصب برنامه، برای هر کانال ورودی

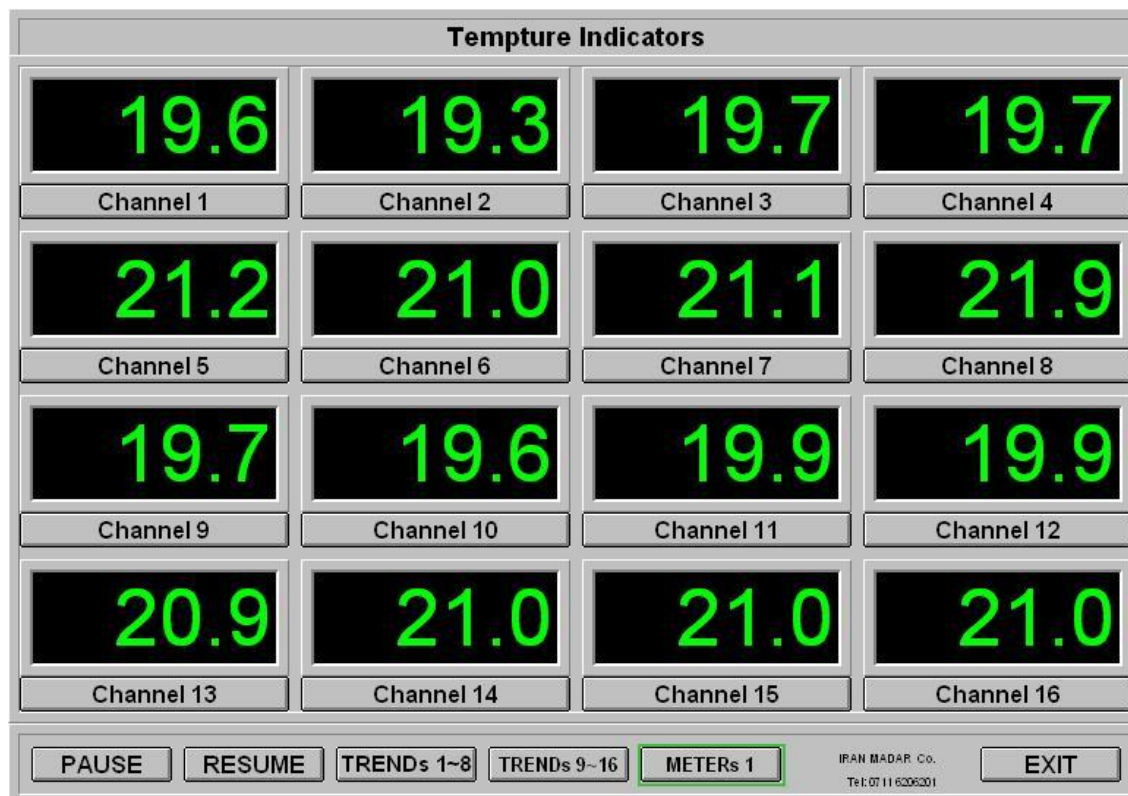
نوع ترموکوپل باید مشخص گردد. با کلیک کردن روی هر کانال در منوی اصلی مانند شکل (۳-۹) باید نوع ترموکوپل وارد شود. بعد از اجرا کردن برنامه، اطلاعات در صفحه نمایش اصلی بصورت عدد و نمودار نمایش داده شده و در بازه زمانی تعیین شده ثبت می گردد.

برای نمونه شکل (۳-۱۰) دمای ۱۶ سنسور روی لوله آزمایش را نشان می دهد و شکل (۳-۱۱) دما و رطوبت ۴ سنسور اتاق کنترل که در اطراف لوله آزمایش قرار دارند را نشان می دهند.

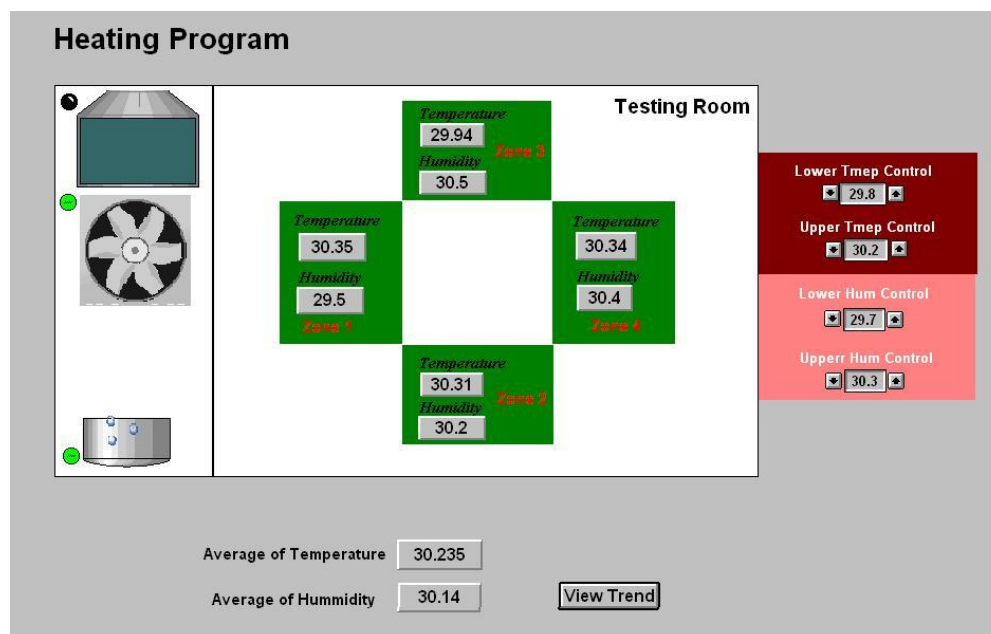
در شکل (۳-۱۰) کانال های ۱، ۲، ۳ و ۴ دمای لایه درونی و کانال های ۵، ۶، ۷ و ۸ دمای لایه بیرونی لوله را به ترتیب در زوایای صفر، ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ نشان می دهند و کانال های ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ دمای لایه درونی و کانال های ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ دمای لایه بیرونی در سمت دیگر لوله آزمایش را در همان زوایا نشان می دهند.



شکل (۳-۹) منوی اصلی برنامه



شکل (۳-۱۰) یک نمونه دمای سنسورهای روی لوله آزمایش (دما بر حسب درجه سانتیگراد)

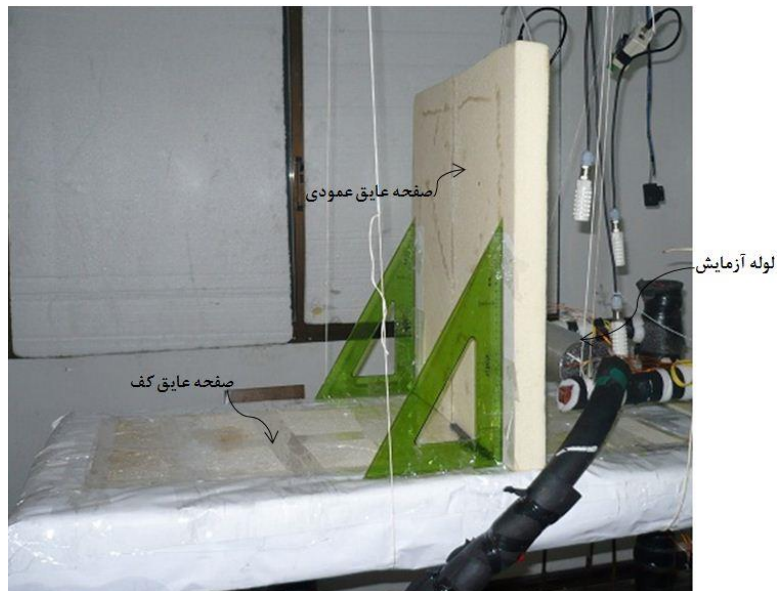


شکل (۳-۱۱) نمونه نمایش دما و رطوبت سنسورهای اتاق کنترل.

۳-۳-۵- صفحات عایق

صفحه عایق افقی که برای زیر لوله در نظر گرفته شده از جنس پلاستوفوم معمولی با ضخامت ۱۰

سانتیمتر است و صفحه عایق عمودی که در کنار لوله آزمایش قرار می گیرد از جنس پلاستوفوم فشرده با ضخامت ۴ سانتیمتر است. شکل (۳-۱۲) صفحه عایق زیر لوله و کنار لوله را نشان می دهد.



شکل (۳-۱۲) نمای جانبی از صفحات عایق در مجاورت لوله آزمایش

۳-۴- کالیبره کردن ترموکوپل ها

برای کالیبره کردن ترموکوپل ها آن ها را در یک ظرف آب قرار داده و در دو دمای مختلف ۱۰ و ۳۰ درجه سانتیگراد، دمای ترموکوپل ها را خوانده و با دمای ترمومتر جیوه ای که دمای آب را اندازه گیری می کند مقایسه می شود.

ملاحظه گردیده که اختلاف دمای ترموکوپل ها با دمای آب حداکثر ۰/۵ درجه است.

۳-۵- روش آزمایش

قبل از شروع آزمایش اطراف لوله آزمایش توسط عایق پوشانده شده تا انتقال حرارت فقط در راستای شعاعی صورت گرفته و دمای لوله یکنواخت گردد. سپس مرا حل زیر را به ترتیب انجام می شود:

۱- سیکل سرمایش و یا سیستم گرمایش اتاق را روشن کرده تا دما و رطوبت اتاق تنظیم گردد.

۲- عایق ها را با فواصل مورد نیاز اطراف لوله آزمایش تنظیم می کنیم.

۳- سیکل سرمایش ثانویه را روشن کرده و دمای مبرد ثانویه را به مقدار مورد نیاز می‌رسانیم تا دمای لوله آزمایش به دمای مورد نظر برسد.

۴- دستگاه انتقال اطلاعات از ترموکوپل به کامپیوتر را روشن کرده و نرم افزار آن را تنظیم و اجرا می‌کنیم.

۵- با گذشت زمان دمای سطح لوله به دلیل تغییر شار حرارتی اندکی تغییر می‌کند. جریان مبرد ادامه می‌یابد تا دمای لوله ثابت شود و هنگامی که به حالت پایا^۱ رسید اطلاعات با تنظیم اولیه انجام شده ذخیره می‌گردد.

۶- با داشتن اطلاعات مربوط به دمای لایه داخلی و خارجی استوانه و با استفاده از روابط (۳-۱)، (۳-۲) و (۳-۳) عدد نوسلت متوسط بر روی استوانه محاسبه می‌شود.

۴- مدل سازی محاسباتی

۴-۱- مقدمه

مطالعات تجربی برای بررسی جامع انتقال حرارت از لوله افقی در شرایط آزمایشگاهی دارای محدودیت هایی است. از جمله این محدودیت ها عدم توانایی در مشاهده میدان سرعت، وقت گیر بودن آزمایش ها و محدود بودن انجام مدلسازی در چند رایلی خاص وابسته به شرایط محیطی است. انجام هرگونه تغییر در مدل مورد آزمایش هزینه بر بوده و نیاز به وقت زیادی برای انجام آزمایش های مربوط به

¹ steady

طراحی، ساخت و کالیبره کردن ابزار اندازه گیری مدل جدید دارد. با گزینش سخت افزارها و نرم افزارهای کامپیوتر نسبت به سیستم های آزمایشگاهی به سادگی بیشتر می توان با استفاده از روش های محاسبات عددی حالت های بیشتری از هندسه لوله های بالای یک سقف را مورد مطالعه قرار داد. در این قسمت مدل سازی عددی جهت بررسی رفتار جریان جا بجایی آزاد در اطراف لوله افقی در بالای یک سقف عایق و همچنین محصور بین دو صفحه عایق با استفاده از نرم افزار OpenFOAM تشریح می گردد. این نرم افزار رایگان، کد باز و تحت سیستم عامل لینوکس است. پس از مدلسازی کامپیوتری داده های عددی در اعداد رایلی متفاوت محاسبه شده و نتایج با داده های تجربی مقایسه گردیده و مقدار بهینه عدد نوسلت بر اساس داده های موجود در شرایط مختلف استوانه از سقف و یا استوانه در یک گوشه بدست می آید.

۴-۲- نرم افزار OpenFOAM

نرم افزار OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) یک نرم افزار حل عددی جهت حل مسائل مختلف شامل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) در حوزه مکانیک محیط پیوسته می باشد. OpenFOAM یک نرم افزار منبع باز^۱ رایگان تحت لینوکس که خود یک سیستم عامل منبع باز و رایگان است می باشد. این نرم افزار شامل یک مجموعه بزرگ از حلال ها^۲ و کاربرد های^۳ از پیش نوشته شده قابل بهره گیری در محدوده وسیعی از مسائل می باشد. همچنین با داشتن معلومات پیش نیاز از روش مورد استفاده در فیزیک مسئله و تکنیک های برنامه نویسی مربوطه می

^۱ Opensource

^۲ Solvers

^۳ Utilities

توان حل کننده و کاربرد جدید ایجاد به این نرم افزار اضافه کرد. OpenFOAM یکی از اولین و بهترین مجموعه های علمی نوشته شده به ++C می باشد که توسط شرکت انگلیسی OpenCFD Ltd تولید شده است.

۴-۲-۱- پیش پردازش^۱

۱- **مش بندی:** این نرم افزار علاوه بر داشتن ابزارهای توانمندی نظیر blockMesh (که برای ترسیم مش های ساختار یافته بکار می رود) و snappyHexMesh (که برای تولید مش های سه بعدی شش وجهی به کار می رود) قابلیت دریافت و تبدیل مش از نرم افزارهای معروف تولید مش نظیر CFX، Fluent، GAMBIT، I-DEAS، ANSYS، KIVA3v، StarCD/Prostar و غیره را دارا می باشد. همچنین این نرم افزار قابلیت حل اشکالی که داری مش بندی ساختار یافته ای نیستند نیز دارد به علاوه این نرم افزار شامل مجموعه وسیعی از ابزارهای کاربردی نظیر checkMesh، mergeMesh، autoPatch و ... است که برای بهبود وضعیت مش و کاهش اعوجاج های شبکه به کار می روند.

از امکانات دیگر این نرم افزار در زمینه مش بندی می توان به قابلیت dynamicMesh اشاره نمود که برای ترسیم مش های متحرک به کار می رود.

۲- **اعمال شرایط مرزی:** نرم افزار OpenFOAM شامل طیف وسیعی از شرایط مرزی است که قابل اعمال به شرایط گوناگون دارد و از آن جمله می توان به pressureInletVelocity (که با دانستن فشار در ورودی با توجه به شار عمودی، سرعت محاسبه می شود) ویا pressureTransmissiv (که برای جریان های ما فوق صوت به کار می رود) و ده ها شرایط مرزی دیگر که در جریان های مختلف قابل استفاده است. مزیت قابل توجه شرایط مرزی این نرم افزار به نرم افزارهای دیگر در این است که به علت باز بودن کد می توان کنترل بیشتری

¹ Pre Processing

روی شرایط مرزی داشت و علاوه بر نوع، مقدار و جهت هر متغیر را برای آن تنظیم نمود.

۴-۲-۲- پس پردازش^۱

این نرم افزار قابلیت های گسترده ای در پس پردازش داده ها دارد و از آن جمله می توان به محاسبه اعداد پکلت^۲، ماخ^۳ و همچنین محاسبه ورتسیتی^۴، تنش برشی روی دیواره^۵، خطوط جریان^۶، شار حرارتی روی دیواره^۷ و دهها قابلیت دیگر اشاره نمود. همچنین این نرم افزار امکان ارتباط با نرم افزارهای معروف ترسیم، نظیر ParaView، Gnuplot، FieldView، EnSight و Tecplot را دارد تا برای رسم نمودارها و کانتورها از آنها استفاده نمود. به علاوه این نرم افزار امکان فرستادن داده های حل شده به نرم افزارهای تحلیلی سیالات نظیر Fluent را دارد تا برای پس پردازش داده ها بتوان از این نرم افزارها هم استفاده نمود.

۴-۲-۳- برنامه نویسی در OpenFOAM

زبان برنامه نویسی C++ این قابلیت را دارد که به کمک خواص شیئی گرایی خود بین کلاس^۸های خود ارتباط برقرار کند و OpenFOAM نیز از این خاصیت استفاده کرده و برای معرفی مواردی نظیر ماتریس ها، بردارها، مش و مواردی که در CFD مورد استفاده قرار می گیرد کلاسهایی تعریف کرده است. کدهای این نرم افزار با بقیه کدهای CFD متفاوت است. برای مثال اگر از نرم افزار فلوئنت استفاده شود، برای یک حل مثال خاص تعداد زیادی انتخاب موجود است و باید با انتخاب گزینه های

¹ Post Processing

² Pecklet Number

³ Mach Number

⁴ vorticity

⁵ wall shear stress

⁶ streamFunction

⁷ Wall heat flux

⁸ class

مناسب کد را برای یک مثال خاص اجرا نمود. اما OpenFOAM کتابخانه ای از کلاس ها در اختیار کاربر قرار می دهد که می توان برای نوشتن یک کد CFD از آن استفاده کرد. هر کدام از این کلاس ها یک کار مشخص را انجام می دهد. زبان ++C یک زبان بسیار گسترده است و ابزارهای بسیاری برای برنامه نویسی شیئی گرا ارائه می دهد و یادگیری آن زمان زیادی را صرف می کند با وجود این، کاربران مبتدی OpenFOAM نیاز به دانستن اطلاعات زیادی در مورد این زبان برنامه نویسی برای اجرا و تغییر کدهای OpenFOAM ندارند.

برنامه های ++C از کدهایی تشکیل شده که در فایل هایی با پسوند C و H. نگهداری می شوند و برای اجرا باید به فایل های قابل اجرا کامپایل¹ شوند. کدهای OpenFOAM نیز فایل هایی با همین پسوند هستند در پوشه ای تحت عنوان applications که در پوشه اصلی OpenFOAM است نگهداری می شوند. در این پوشه، زیر پوشه های زیر وجود دارد:

Solver: که شامل کدهای CFD برای حل جریان های مختلف است.

Utilities: که معمولاً شامل کدهای کوچکی است که یک کار خاص را انجام می دهند. هر کد که کار خاصی را انجام می دهد درون دایرکتوری خودش قرار دارد. برای مثال یک کد با عنوان streamFunction وجود دارد که خطوط جریان هر بردار سرعت را در هر لحظه محاسبه و ذخیره می کند. این کد در آدرس زیر قرار دارد:

OpenFOAM/ applications/utilities/postProcessing/velocityField /streamFunction

در این دایرکتوری فایلی تحت عنوان streamFunction.C وجود دارد که کد اصلی این برنامه است و در کنار آن یک دایرکتوری با عنوان Make که شامل فایل های files و options است وجود دارد. کامپایل کردن کدهای ++C بسیار پیچیده است و پارامترهای زیادی برای این کار احتیاج دارد. اما OpenFOAM یک سیستم کامپایل کردن تحت عنوان wmake دارد که اطلاعات را از فایل های

¹ Compile

files و options گرفته و فایل مورد نظر را به راحتی کامپایل می کند.

OpenFOAM محدوده وسیعی از کلاسها را دارد، بعضی از مهمترین آنها عبارتند از:

- **Dimensioned numbers**: که شامل `dimensionedVector` , `dimensionedScalar` است.
- اشیائی برای دسترسی به دیکشنری ها (`IObject`, `dictionary`)
- کلاسی برای کنترل زمان و بازه های زمانی: این، کلاسی از زمان ها است ولی فقط یکی از آنها قابل استفاده است و معمولا در `header` فایلها ساخته می شود و با نام `runtime` مشخص می شود.
- کلاسی برای مش های `finite volume` که تحت عنوان `fvMesh` شناخته می شوند. مانند حالت قبل اکثر کدهای CFD تنها از یکی از اینها استفاده می کند و آن از یک `header` فایل با عنوان `createMesh.H` ساخته می شود و شیء ساخته شده از آن، مش نام دارد.
- کلاسی برای میدان های عددی، برداری و تانسوری که هر کدام از آنها مجموعه ای از اعداد (بردار یا ماتریس) در هر سلول مش است. که اینها به ترتیب `volScalarField` و `volVectorField` و `volTensorField` شناخته می شوند. اینها می توانند با هم جمع، تفریق، ضرب و یا تقسیم شوند. در نتیجه یک کد CFD یک سری از این داده ها را تولید می کند.
- کلاسی برای ماتریس های اعداد، بردار و تانسورها. این کلاسها از کلاسی به نام `fvMatrix` مشتق می شوند و به نامهای `fvScalarMatrix` و `fvVectorMatrix` و `fvTensorMatrix` شناخته می شوند. این کلاسها برای تولید کدهای واقعی CFD مورد استفاده قرار می گیرند. شیء های تولید شده از هر کلاس از چند طریق قابل دسترسی هستند. اغلب کلاس ها داری توابع داخلی هستند که از طریق `function()`. قابل دسترسی هستند. برای مثال فایلی تحت عنوان `magU` که یک بردار سرعت را می گیرد و اندازه آن را در هر مش حساب می کند. بردار سرعت ورودی از کلاس `volVectorField` است و مقادیر سرعت از که خروجی این فایل است از کلاس

volScalarField است یعنی magU یک وهله^۱ از این کلاس است. وهله های این کلاس می توانند از توابع تعریف شده در این کلاس استفاده کنند. برای مثال کلاس volScalarField تابعی به نام internalField دارد. و magU.internalField() مقادیر داخلی مش را برمی گرداند (یعنی مقادیر مرزی را شامل نمی شود). ضمناً از توابع پیش فرض C++ نیز می توان استفاده کرد. برای مثال دستور max(magU.internalField) بزرگترین مقدار magU را برمی گرداند و دستور min(magU.internalField) کوچکترین مقدار آن را برمی گرداند. اگر دو volScalarField مانند AA و BB داشته باشیم می توانیم آنها را با هم جمع کنیم. AA + BB که مقادیر AA و BB را برای هر سلول جمع می زند و یک volScalarField جدید می سازد. و یا اگر U یک میدان برداری باشد می توانیم آن را در یک میدان اسکالر ضرب کنیم. (AA * U)

با وجود مطالب مطرح شده، برنامه نویسی در محیط OpenFOAM بسیار آسان است و اکثر توابع ریاضی به صورت کلاس های پیش فرض در آن تعریف شده اند و نیازی به تعریف آنها نیست. برای مثال معادله ممنتوم که به صورت رابطه (۴-۱) بیان می شود را به راحتی با کد زیر می توان در OpenFOAM در هر بازه زمانی حل نمود.

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot \rho U U - \nabla \cdot \mu \nabla U = -\nabla p \quad (۴-۱)$$

solve

```
(
    fvm::ddt(rho, U)
  + fvm::div(phi, U)
  - fvm::laplacian(mu, U)
  ==
  - fvc::grad(p)
);
```

¹ Instance

در کد فوق fvm کلاسی است که به کمک آن می توان معادلات را به روش ضمنی^۱ حل نمود، ddt نشان دهنده $\frac{\partial}{\partial t}$ ، div نشان دهنده دیورژانس $(\nabla \cdot)$ ، laplasian نشان دهنده ∇^2 و grad معرف ∇ است.

۳-۴- مدل سازی عددی

جهت شبیه سازی میدان دمایی و میدان سرعت اطراف استوانه افقی از کد عددی OpenFOAM استفاده شده است. در این کد از روش حجم محدود جهت شبیه سازی جریان سیال در هندسه های مختلف استفاده می شود. به منظور آشنایی با مسیر مدل سازی عددی جریان جا بجایی آزاد، ابتدا معادلات حاکم برای جریان پایدار، آرام و غیرقابل تراکم بر روی یک استوانه افقی گرم تنها در محیط بینهایت حل شده است. معادلات حاکم برای هندسه نمایش داده شده از شکل (۴-۱) با در نظر گرفتن تقریب بوسینیسک جهت مدل سازی جریان جا بجایی آزاد، در مختصات کارترین بصورت زیر می باشد:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (۲-۴)$$

معادله ممنتوم:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \rho g \beta (T - T_{\infty}) \quad (۳-۴)$$

^۱ Implicit

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (4-4)$$

و معادله انرژی

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (5-4)$$

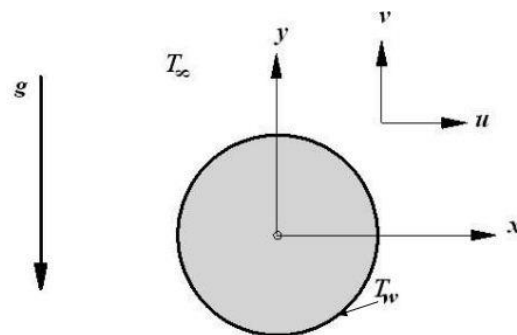
که در آن ρ چگالی، u و v به ترتیب سرعت در راستای x و y ، P فشار، μ ویسکوزیته دینامیکی، g شتاب گرانش، β ضریب انبساط حرارتی و k ضریب هدایت حرارتی سیال است.

برای حل معادلات حاکم از کد عددی OpenFOAM استفاده شده است. مبنای حل معادلات در این کد، روش حجم محدود^۱ و روش حل پیرو^۲ است که بطور کامل در مرجع پتینکار (۱۹۸۰) توضیح داده شده است. این نرم افزار مسائل را به صورت پیش فرض غیر پایا حل می کند و برای رسیدن به حالت پایا باید زمان مناسب برای حل معادلات در نظر گرفت تا مقادیر باقیماندهای خطا از مقدار مشخصی کمتر شوند.

مد سازی و شبکه بندی در نرم افزار گمبیت انجام شده است. در مدل کردن استوانه سعی گردیده تا هندسه و شرایط مرزی به شرایط واقعی نزدیک باشد.

^۱ Finite Volume

^۲ PISO

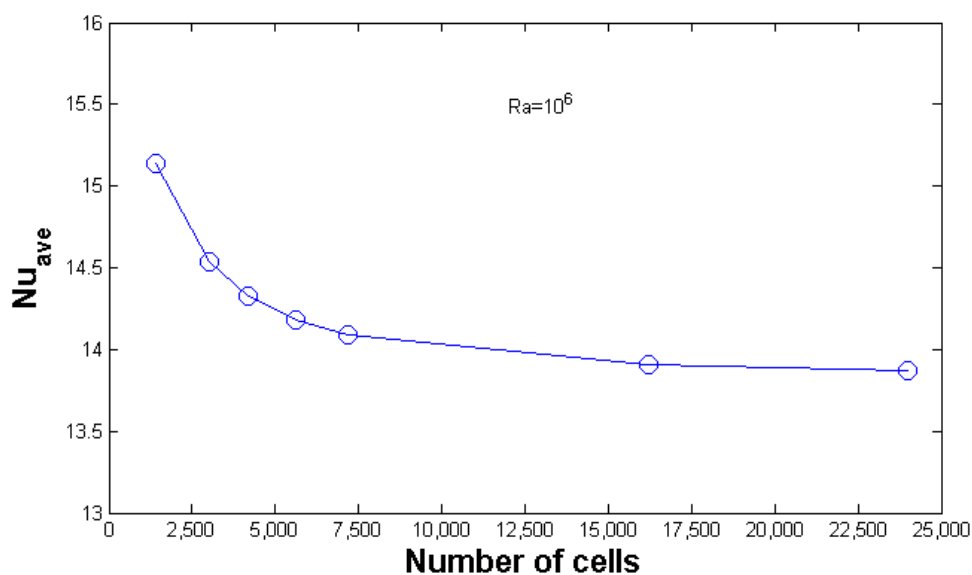


شکل (۴-۱) نمای استوانه مورد مطالعه و محور های مختصات

۴-۳-۱- استقلال از شبکه و دامنه محاسباتی

قبل از استخراج هر نتیجه ابتدا باید عدم وابستگی نتایج حاصله از نوع و کیفیت شبکه حل و دامنه محاسباتی مورد بررسی واقع شود. جهت حصول این منظور جریان جابجای آزاد در اطراف استوانه در محیط بینهایت را برای چند شبکه حل متفاوت حل می نمائیم و نتایج را بر حسب تعداد سلول ها در شبکه مورد بررسی قرار می دهیم. چنانچه حل انجام شده مستقل از شبکه حل باشد، با کاهش اندازه سلول ها یا به عبارتی افزایش تعداد سلول ها در داخل میدان حل، عدد نوسلت متوسط در اطراف استوانه نباید تغییری داشته باشد و اگر حل انجام شده مستقل از دامنه محاسباتی باشد با افزایش طول دامنه محاسباتی مقدار عدد نوسلت متوسط تغییر نخواهد کرد.

در شکل (۴-۲) نحوه تغییرات عدد نوسلت متوسط بر روی استوانه در محیط بینهایت بر اساس تعداد سلول ها در میدان حل در عدد رایلی 10^6 نمایش داده شده است.



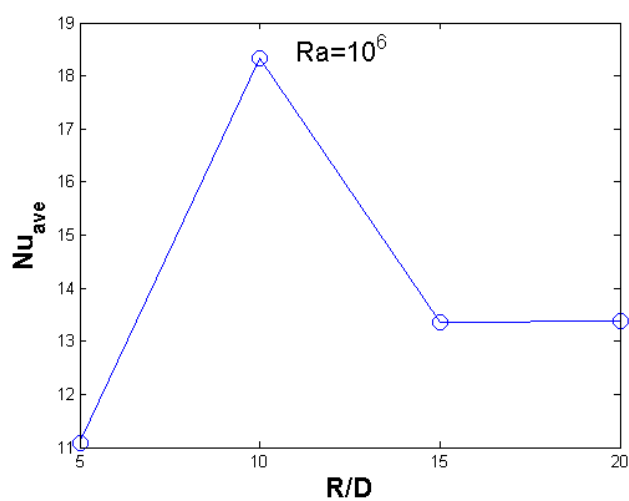
شکل (۲-۴) تغییرات عدد نوسلت متوسط در اطراف استوانه بر حسب تعداد نقاط شبکه

چنانچه از شکل فوق ملاحظه می شود با افزایش تعداد شبکه از ۷۵۰۰ عدد نوسلت متوسط تقریباً

ثابت می ماند بنا براین این تعداد شبکه به عنوان شبکه مورد نظر انتخاب می شود.

در شکل (۲-۴) نحوه تغییرات عدد نوسلت متوسط بر روی استوانه در محیط بینهایت بر اساس نسبت

طول دامنه محاسباتی به قطر لوله در عدد رایلی 10^6 نشان داده شده است.



شکل (۳-۴) تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب نسبت دامنه محاسباتی به قطر استوانه

در شکل فوق R نشان دهنده طول دامنه محاسباتی و D قطر استوانه است. همانطور از نمودار فوق ملاحظه می شود بعد از $R/D=15$ عدد نوسلت متوسط ثابت می ماند بنابراین طول دامنه محاسباتی ۱۵ برابر قطر استوانه در نظر گرفته شده است.

۴-۳-۲- تولید شبکه محاسباتی

المان بندی مورد استفاده در تحقیق از نوع شبکه سازمان یافته با المان های چهار وجهی^۱ است. و برای بهبود جواب ها از المان بندی نوع لایه مرزی^۲، نیز استفاده شده است.

۱- استوانه در محیط بینهایت:

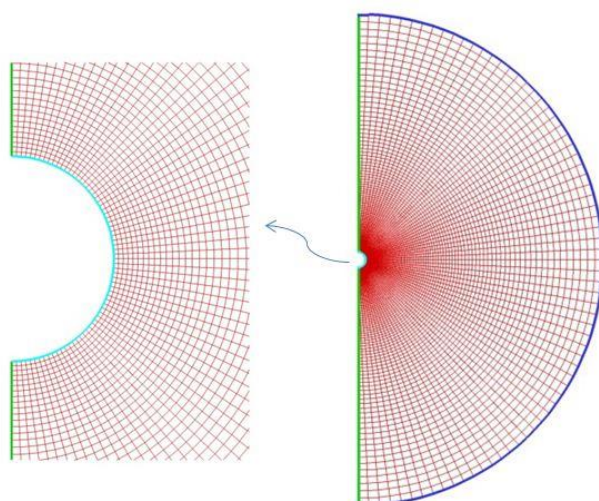
برای یک استوانه که با محیط تبادل گرما می کند بدلیل اینکه در نزدیکی استوانه گرادیانهای دما بیشتر از سایر نواحی است لذا در اطراف آن به شبکه ریزتری نیاز است تا محاسبات با دقت بیشتری انجام شود. هرچه از صفحه دور شده و به مرزهای منطقه محاسباتی نزدیک شویم، بدلیل اهمیت کمتر میدان جریان، شبکه بندی درشت تر می شود. از آنجا که شکل (۴-۱) متقارن است نیمی از استوانه مورد مطالعه قرار می گیرد. پس از تولید شبکه محاسباتی مانند شکل (۴-۴) لازم است تا شرایط مرزی را برای آن تعیین کنیم. برای اینکار دامنه محاسباتی را از نوع شرط مرزی PressureInletVelocity (این نوع شرط مرزی در OpenFOAM با داشتن مقدار فشار، مقدار سرعت را محاسبه می کند)، دیواره استوانه از نوع شرط مرزی دیوار^۳، و مرزهای سمت چپ از نوع شرط مرزی تقارن^۴ انتخاب شده است. شکل (۴-۱)، شکل (۴-۵) جدول (۴-۱) نام و نوع شرط مرزی یک لوله افقی در محیط بینهایت را مشخص کرده است.

¹ Quad

² Boundary layer

³ wall

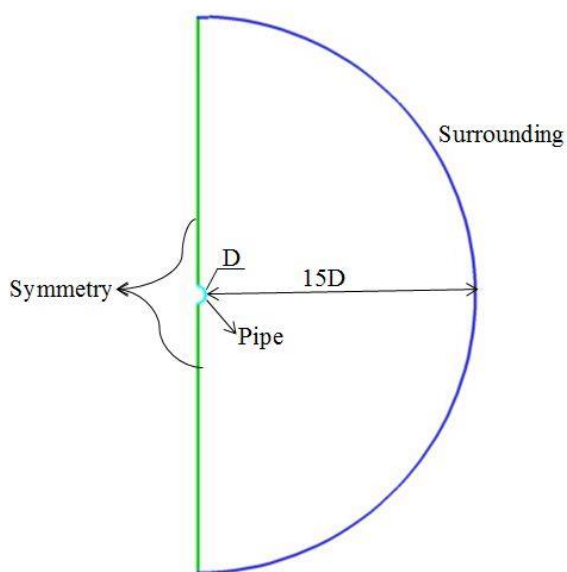
⁴ symmetry



ب) (نزدیک لوله)

الف) (تمام دامنه)

شکل (۴-۴) شبکه محاسباتی انتخابی اطراف یک نیم استوانه افقی در محیط بینهایت



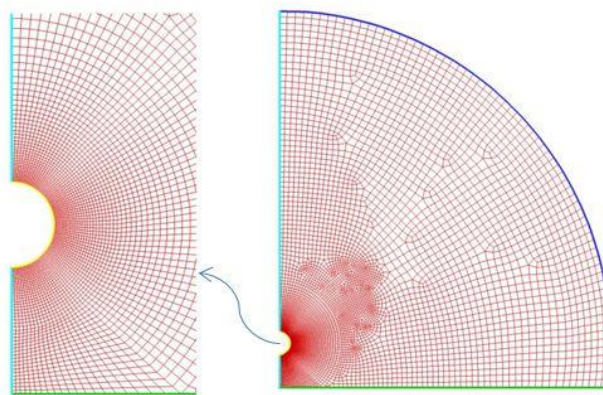
شکل (۵-۴) دامنه محاسباتی یک لوله افقی در محیط بینهایت

جدول (۴-۱) شرایط مرزی یک لوله افقی در محیط بینهایت

	T(K)	U(m/s)	P(pa)
Surrounding	fixedValue uniform 305.65	PressureInletVelocity Uniform (0 0 0)	fixedValue uniform 0
Symmetry	symmetryPlane	symmetryPlane	symmetryPlane
Pipe	fixedValue uniform 286.15	fixedValue uniform (0 0 0)	zeroGradient

۲- استوانه در بالای یک سطح عایق:

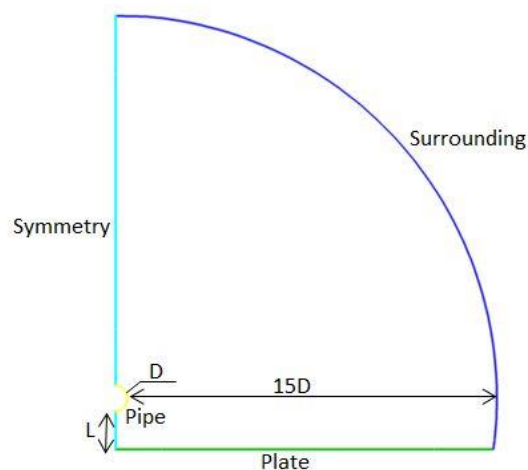
شبکه محاسباتی، میدان محاسباتی و نوع شرایط مرزی به ترتیب بر طبق شکل (۴-۶)، شکل (۴-۷) جدول (۴-۲) برای یک استوانه در بالای یک صفحه عایق برای عدد رایلی 10^6 نشان داده شده است.



ب) نزدیکی لوله

الف) تمام دامنه

شکل (۴-۶) شبکه محاسباتی انتخابی برای یک لوله افقی در بالای یک سطح عایق



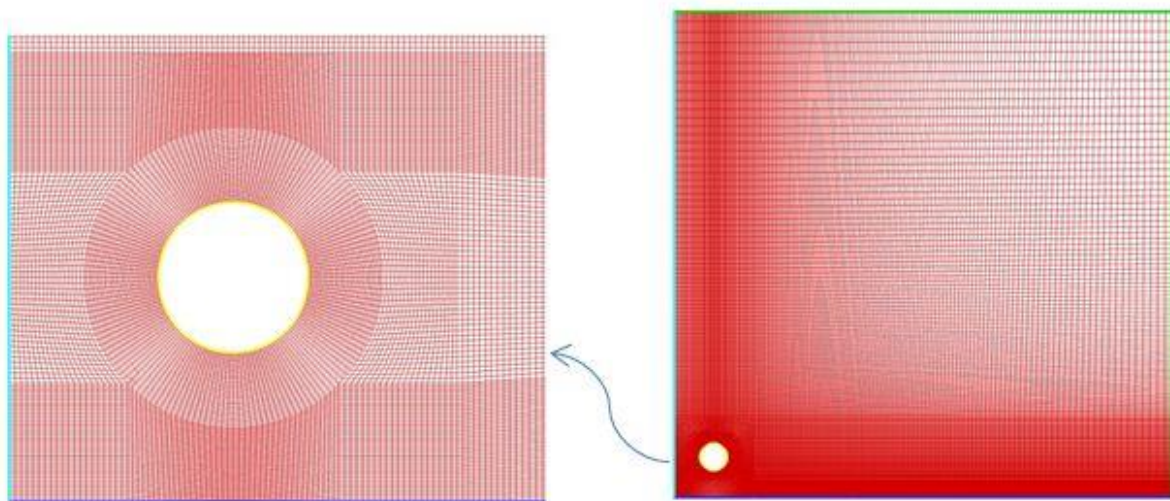
شکل (۴-۷) دامنه محاسباتی یک لوله افقی در بالای یک سطح عایق

جدول (۴-۲) شرایط مرزی یک لوله افقی در بالای یک سطح عایق

	T(K)	U(m/s)	P(pa)
Surrounding	fixedValue 305.65 uniform	PressureInletVelocity Uniform (0 0 0)	fixedValue uniform 0
Plate	zeroGradient	fixedValue uniform (0 0 0)	zeroGradient
Symmetry	symmetryPlane	symmetryPlane	symmetryPlane
Pipe	fixedValue uniform 286	fixedValue uniform (0 0 0)	zeroGradient

۳- استوانه محصور بین دو سطح عایق عمود بر هم:

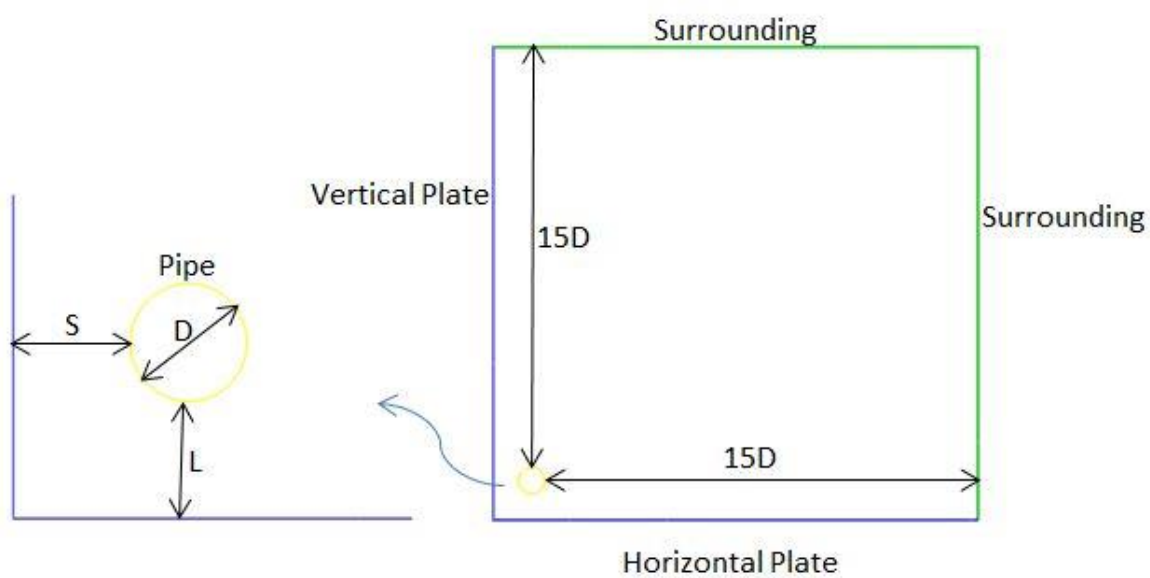
و برای یک استوانه محصور بین دو سطح عایق عمود بر هم شبکه ، میدان محاسباتی و شرایط مرزی به صورت شکل (۴-۸) شکل (۴-۹) جدول (۴-۳) برگزیده شده اند.



ب) (نزدیکی لوله)

الف) (تمام دامنه)

شکل (۸-۴) شبکه محاسباتی انتخابی برای یک لوله افقی محصور بین دو سطح عایق



شکل (۹-۴) دامنه محاسباتی یک لوله افقی محصور بین دو سطح عایق

جدول (۳-۴) شرایط مرزی یک لوله افقی محصور بین دو سطح عایق عمود برهم

	T(K)	U(m/s)	P(pa)
Surrounding	fixedValue 305.65 uniform	PressureInletVelocity Uniform (0 0 0)	fixedValue uniform 0
Horizontal Plate	zeroGradient	fixedValue uniform (0 0 0)	zeroGradient
Vertical Plate	zeroGradient	fixedValue uniform (0 0 0)	zeroGradient
Pipe	fixedValue uniform 286	fixedValue uniform (0 0 0)	zeroGradient

۳-۳-۴ حل مسئله توسط OpenFOAM

بعد از ترسیم شکل و مش بندی و دادن شرایط مرزی در نرم افزار Gambit ، فایل *.msh را وارد نرم افزار OpenFOAM می گردد . برای انجام این کار از دستور fluentMeshToFoam استفاده می شود.البته باید توجه داشت که اگر فایل *.msh دو بعدی به عنوان آرگومان به این دستور فرستاده شود این دستور آن فایل را به یک فایل سه بعدی تبدیل می کند که شرایط مرزی صفحات بالا و پایین empty است و برای مطمئن شدن از شرایط مرزی قبل از run کردن مسئله باید شرایط مرزی را در فایل boundary که در پوشه PolyMesh قرار دارد چک نمود.

در مطالعه حاضر یک فایل *.msh دو بعدی برای هر یک از هندسه های شکل(۴-۴)، شکل(۴-۴) و شکل(۴-۸) تهیه می گردد. برای وارد کردن این فایل به نرم افزار OpenFOAM و حل مسئله مورد نظر مراحل زیر به ترتیب انجام می گیرد.

- ۱- با باز کردن کانسول لینوکس و تایپ دستور run وارد پوشه run نرم افزار در user جاری می شویم.
- ۲- با تایپ دستور زیر یک پوشه با نام case مورد نظر در آن آدرس می سازیم:

```
mkdir casename
```

- ۳- با تایپ دستورات زیر در ترمینال لینوکس پوشه های مورد نظر برای معرفی یک case در

OpenFOAM ساخته می شود:

```
mkdir casename/system
mkdir casename/constant
mkdir casename/constant/polyMesh
mkdir casename/0
```

۴- فایل های fvSchemes و fvSolution و controlDict مربوط به جریان جابجایی آزاد را در پوشه system کپی می کنیم.

۵- فایل های transportProperties و environmentalProperties مربوط به جریان جابجایی آزاد را در پوشه constant کپی می کنیم.

۶- فایل file.msh را در case مورد نظر کپی می کنیم و با تایپ دستور زیر وارد پوشه case می شویم:

```
cd casename
```

۷- دستور زیر را در ترمینال لینوکس تایپ می کنیم تا فایل file.msh را به فرمتی که برای

OpenFOAM شناخته شده باشد تبدیل کند و فایل mesh زده شده و شرایط مرزی داده شده وارد OpenFOAM شود:

```
fluentMeshToFoam file.msh
```

با تایپ دستور فوق همانطور که مشاهده می کنیم در پوشه polyMesh فایل هایی که شامل نقاط، صفحات، مقادیر مرزی و ... ساخته شده است. فایل boundary را باز می کنیم و ملاحظه می کنیم که تمام مرزها با شرایط مرزی آنها وارد شده باشند.

۸- از پوشه 0 فایل هایی با عنوان P,T,U را می سازیم. این فایل ها باید شامل نام مرزها و شرایط مرزی در لحظه 0 برای هر کدام از متغیرهای فوق باشد. شرایط اولیه و مرزی این سه فایل باید از مقادیر جدول (۴-۱)، جدول (۴-۲)، جدول (۴-۳) جایگزین شود.

۹- از پوشه constant فایل transportProperties را باز کرده و خواص هوا را در دمای مورد نظر تنظیم می کنیم.

۱۰- برای پایداری جواب به روش پیزو بر طبق مرجع پتنکار (۱۹۸۰) باید عدد کورانت^۱ کمتر از یک شود. این ضریب از رابطه زیر بدست می آید :

$$Co = \frac{|U|\delta t}{\delta x} \quad (۴-۶)$$

با توجه به مقادیر δx و $|U|$ باید مقداری را برای δt بدست آورد تا عدد کورانت کمتر از یک شود و جواب همگرا شود. البته معمولاً δt از سعی و خطا به دست می آید. مقدار بدست آمده برای δt و تعداد بازه زمانی ذخیره اطلاعات و زمان اجرای برنامه برای رسیدن به حالت پایا را در فایل controlDict که در پوشه system قرار دارد تنظیم می کنیم.

۱۱- حل کننده^۲ مورد استفاده در این پروژه boussinesqBuoyantFoam نام دارد که برای حل جریان جابجایی آزاد آرام به کار می رود. با اجرای دستور زیر در ترمینال لینوکس مسأله مورد نظر با شرایط ذکر شده شروع به حل می گردد و مقادیر p ، U و T را در زمان های مختلف در پوشه ای با عنوان شماره همان زمان ذخیره می کند.

`boussinesqBuoyantFoam > log &`

دستور فوق مقادیر باقیمانده ها^۳ را در یک فایل log ذخیره می کند تا بتوان برای رسم مقادیر باقیمانده ها از آن استفاده نمود.

۱۲- بعد از اتمام حل با اجرای دستور ParaFoam در ترمینال لینوکس می توان نرم افزار Para View را که داده های این مسأله به آن وارد شده اند بالا آورد و از امکانات این نرم افزار در پس پردازش داده ها استفاده نمود.

۱۳- خروجی نرم افزار، نتایج سرعت (U)، فشار (p) و دمای (T) نقاط مختلف شبکه در زمان های مختلف است. می توان این نتایج را برای پس پردازش به نرم افزارهای معروف ترسیم فرستاد و یا با استفاده از

^۱ Courant Number

^۲ Solver

^۳ Residuals

امکانات OpenFOAM، پس پردازش را انجام داد. در این تحقیق، برای بدست آوردن عدد نوسلت متوسط از یک تابع آماده در OpenFOAM به نام wallHeatFlux استفاده شده است. این تابع شار حرارتی عمودی وارد شده یا خارج شده از یک دیوار را به ازای تمامی زمان ها محاسبه می کند. سپس به کمک تابع دیگری به نام sampleDict مقادیر محاسبه شده شار حرارتی در هر زمان را به تفکیک مختصات نقطه مورد نظر بر روی لوله در یک فایل متنی گزارش داده می شود. نحوه محاسبه عدد نوسلت محلی و متوسط از مقادیر شار حرارتی در زیر آمده است.

$$q'' = k_f \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=D/2} \quad (۷-۴)$$

$$h_\theta = \frac{q''}{(T_s - T_\infty)} \quad (۸-۴)$$

$$\bar{h} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi h_\theta d\theta \quad (۹-۴)$$

$$Nu_\theta = \frac{h_\theta D}{k_f} \quad (۱۰-۴)$$

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h} D}{k_f} \quad (۱۱-۴)$$

در روابط فوق k_f ضریب هدایت حرارتی هوا، D قطر لوله، T_s دمای سطح لوله و T_∞ دمای محیط است. در رابطه (۷-۴) q'' شار حرارتی محاسبه شده توسط نرم افزار است.

محاسبات برای شرایط مختلف به نحوی انجام گرفته اند که خطای محاسبات در معادلات ممنتوم و انرژی کمتر از 10^{-5} و در معادله تصحیح فشار کمتر از 10^{-6} باشد. با توجه به وجود ترم فشار در معادله ممنتوم روش حل معادلات فوق الگوریتم پیزو است.

۴-۳-۴ الگوریتم پیزو برای جریان های گذرا

حل توأم معادلات سرعت - فشار در جریان های گذرا دارای مراحل است که به صورت زیر بیان میشود.

۱- ابتدا معادله ممنتوم با یک میدان فشار حدسی حل می شود. میدان فشار حدسی میتواند از

پله زمانی قبل مورد استفاده قرار گیرد. این مرحله به مرحله پیش‌بینی ممنتوم^۱ معروف است.

حل معادله ممنتوم، مقادیر جدید سرعت را بدست خواهد داد.

۲- با توجه به سرعت‌های بدست آمده از مرحله قبل، مقدار U قابل محاسبه خواهد بود. و با توجه

به آن میتوان به محاسبه میدان فشار پرداخت. این مرحله به مرحله حل معادله فشار^۲ معروف

است.

۳- با توجه به میدان فشار بدست آمده سرعت‌ها تصحیح می‌شوند. این مرحله به مرحله تصحیح

سرعت صریح^۳ معروف است.

۴-۳-۵- رسیدن به حالت پایا

نرم افزار OpenFOAM به صورت پیش فرض مسائل را در حالت گذرا^۴ حل می کند. بنابراین برای

حل مسائل پایا باید حل تا زمان مناسب ادامه پیدا کند تا به حالت پایا برسد و مقادیر باقیمانده خطا از

مقدار مشخصی کمتر شود. برای نمونه مقادیر باقیمانده های خطا برای یک لوله در محیط بینهایت در

عدد رایلی 10^4 در شکل (۴-۱۰) ترسیم شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می کنید در

زمان ۱۰۰ ثانیه مقادیر باقیمانده خطای مولفه افقی و عمودی سرعت ثابت بوده و از 10^{-6} کمتر اند،

همچنین مقادیر باقیمانده خطای دما ثابت بوده و از 10^{-5} کمتر است. در نتیجه زمان ۱۰۰ ثانیه زمان

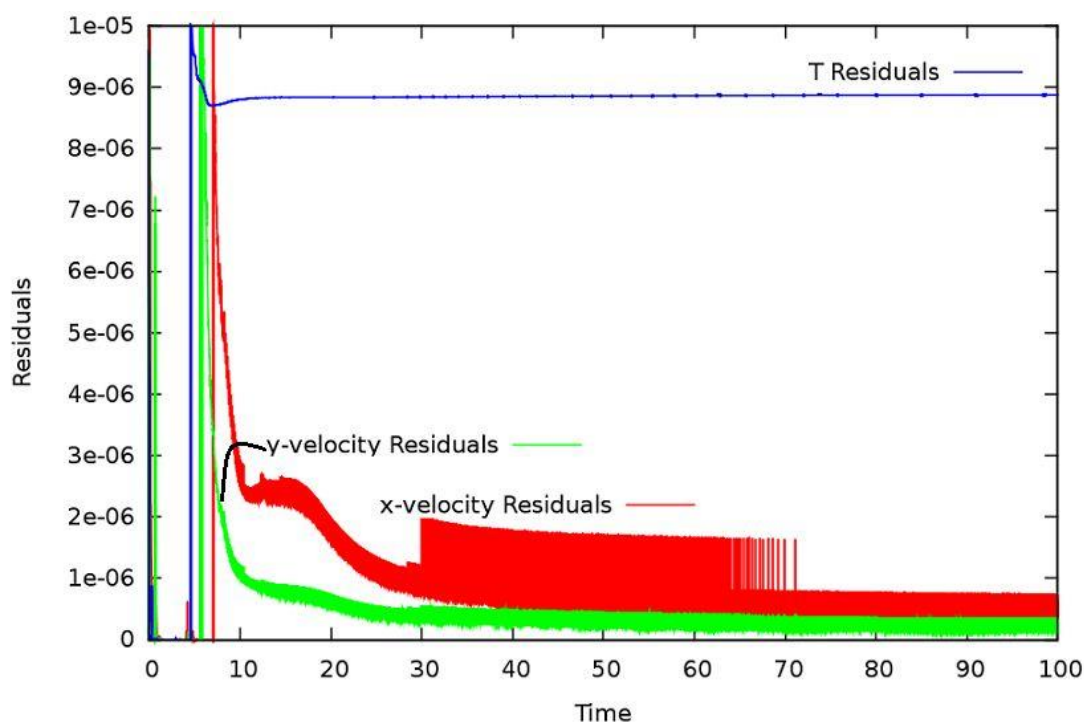
مناسبی برای رسیدن به حالت پایا است.

1 Momentum Predictor

2 Pressure Solution

3 Explicit Velocity Correction

4 Unsteady



شکل (۴-۱۰) مقادیر باقیمانده خطا برای حل یک استوانه در محیط بینهایت در عدد رایلی 10^4

۴-۳-۶- شرایط محیطی و خصوصیات هوا

مدل سازی محاسباتی در ۵ عدد رایلی مختلف به ازای مقادیر مختلف دمای سطح و استوانه صورت

گرفته که مقادیر آن در جدول (۴-۴) آورده شده است.

جدول (۴-۴) شرایط محیطی و خصوصیات هوا در مدل سازی محاسباتی

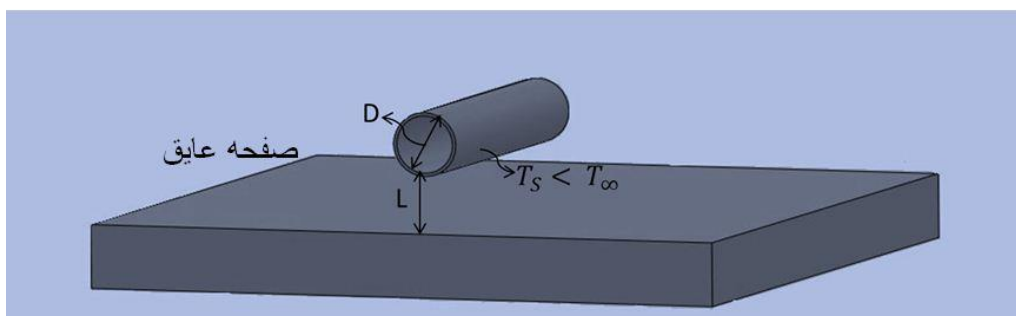
Ra	قطر استوانه (m)	دمای سطح (C°)	دمای محیط (C°)	فشار محیط (pa)
10^4	۰/۰۱۶	۱۳	۴۱/۵	۱۰۱۳۲۵
10^5	۰/۰۴	۱۳	۲۹/۳	۱۰۱۳۲۵
3×10^5	۰/۰۸	۲۱/۵	۳۱/۵	۸۱۹۴۰
6×10^5	۰/۰۸	۱۳	۳۱/۵	۸۱۹۴۰
10^6	۰/۰۸	۱۳	۳۲/۵	۱۰۱۳۲۵

۵- نتایج

در این فصل نتایج انتقال حرارت جا بجایی آزاد به یک استوانه افقی سرد در بالای یک صفحه عایق و همچنین محصور بین دو صفحه عایق عمود بر هم مورد مطالعه قرار گرفته است. پس از حصول اطمینان از صحت انجام آزمایشها و اعتبار نتایج بدست آمده از کد عددی ، نتیجه گیری کلی بر اساس نتایج تجربی و عددی در هر مورد ارائه می شود.

۵-۱- استوانه در بالای یک سطح عایق

در این بخش اثرات فاصله عمودی یک استوانه افقی از صفحه ای عایق که در زیر آن مانند شکل (۵-۱) قرار گرفته و همچنین عدد رایلی ($Ra = \frac{g\beta D^3 (T_s - T_{\infty})}{\alpha\theta}$) بر میزان انتقال حرارت جا بجایی آزاد به استوانه افقی به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایشها برای نسبت فاصله عمودی به قطر استوانه های متفاوت و اعداد رایلی مختلفی انجام شده است. بازه تغییرات فاصله برای این استوانه در محاسبات عددی و تجربی در جدول (۵-۱) ارائه شده است.



شکل (۱-۵) انتقال حرارت جابجایی آزاد از هوا به لوله در بالای یک صفحه عایق.

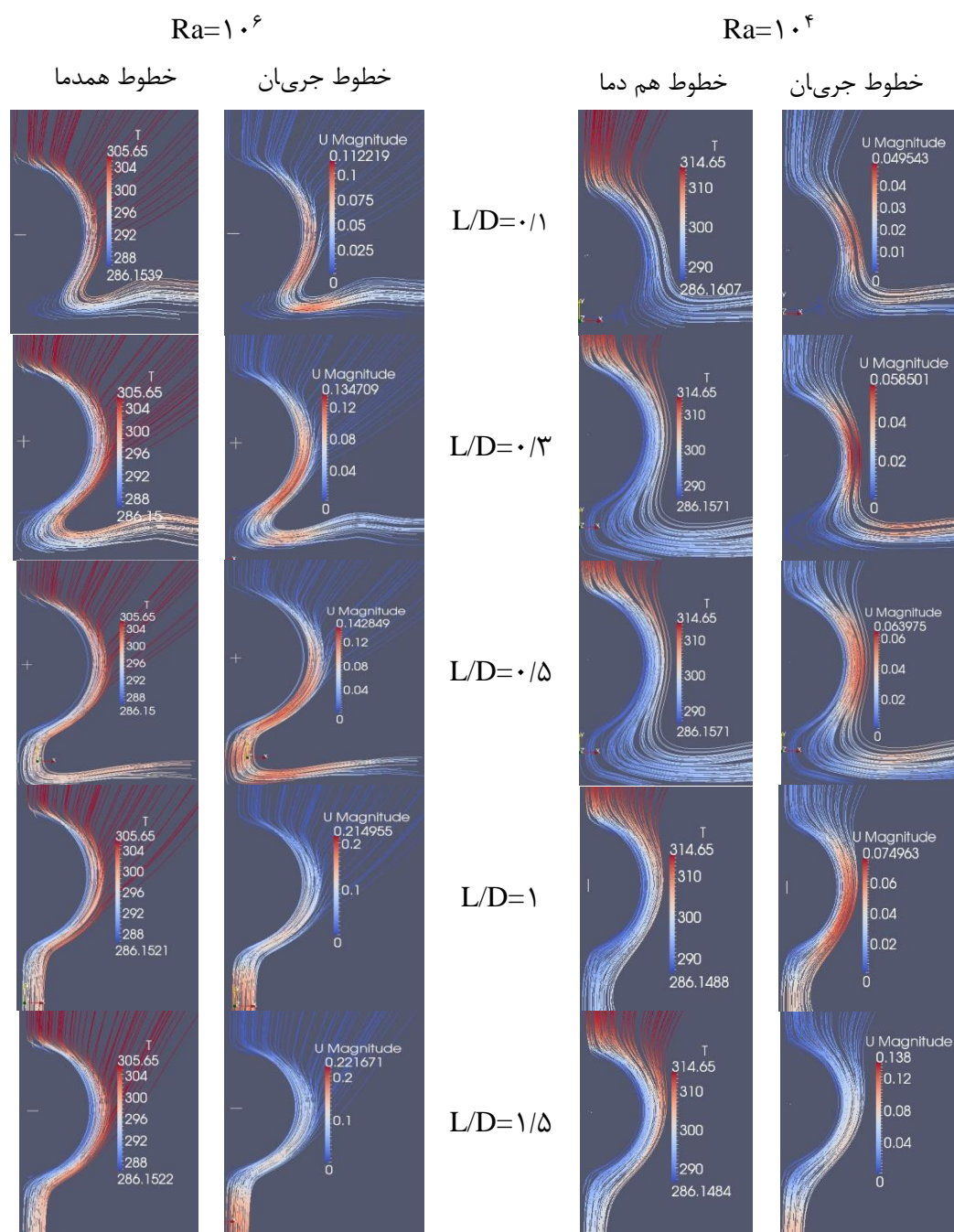
جدول (۱-۵) محدوده محاسبات عددی و تجربی انتقال حرارت به استوانه افقی در بالای یک سطح عایق

Ra L/D	10^4	10^5	3×10^5	6×10^5	10^6
$0/1$	عددی	عددی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی
$0/3$	عددی	عددی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی
$0/5$	عددی	عددی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی
$0/75$	-	-	تجربی	تجربی	-
1	عددی	عددی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی
$1/5$	عددی	عددی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی
2	عددی	-	-	-	-

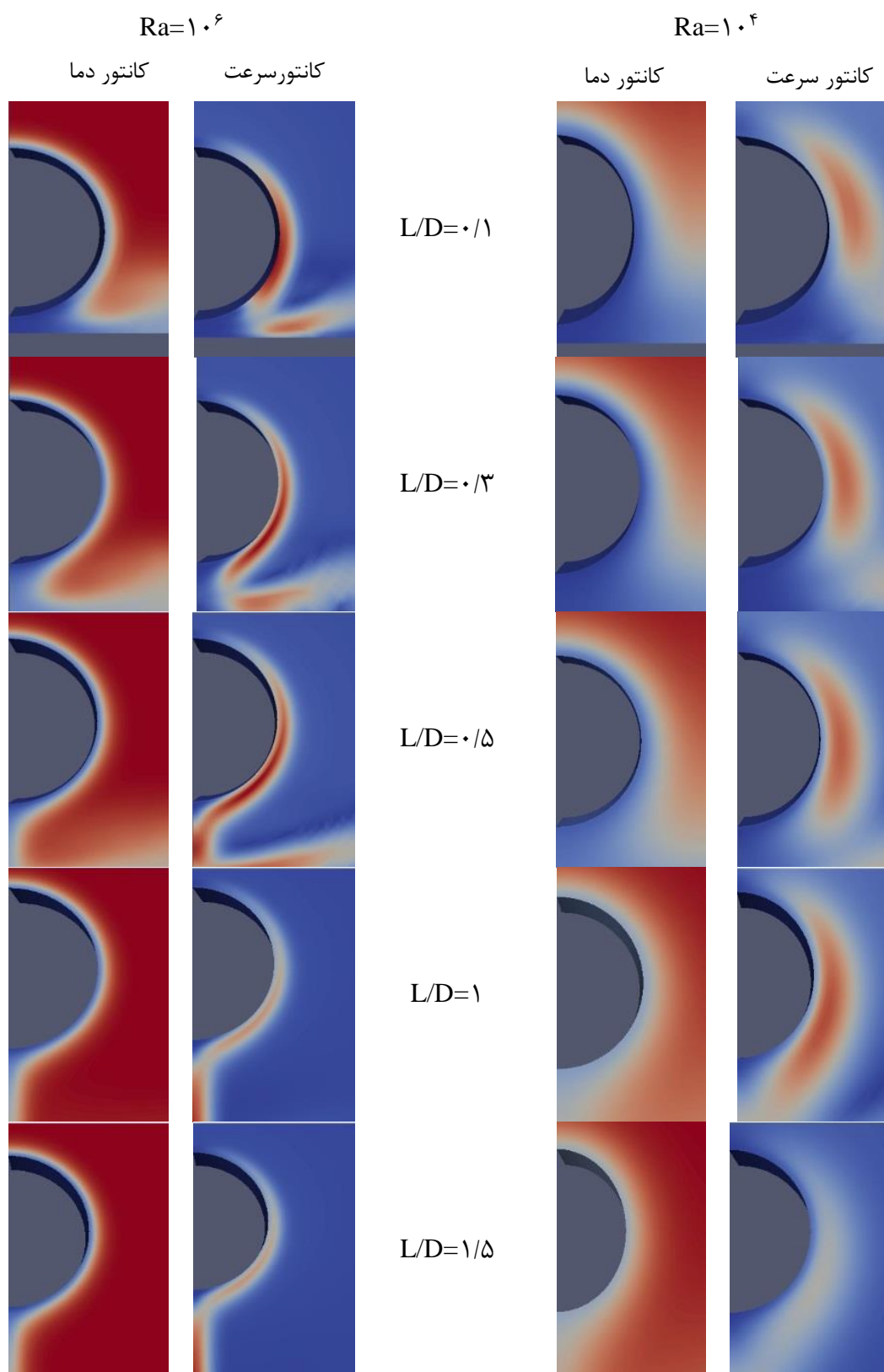
ابتدا به بررسی نتایج عددی پرداخته و سپس نتایج آزمایشگاهی آورده می شود و در نهایت به مقایسه نتایج پرداخته می گردد.

۱-۱-۵ محاسبات عددی

در کلیه شکل ها Nu عدد نوسلت محلی ، Nu_{ave} عدد نوسلت متوسط اطراف لوله و Nu_{∞} عدد نوسلت متوسط یک لوله در محیط بینهایت است. این مقادیر از روابط (۷-۴) (۱۱-۴) محاسبه شده اند.

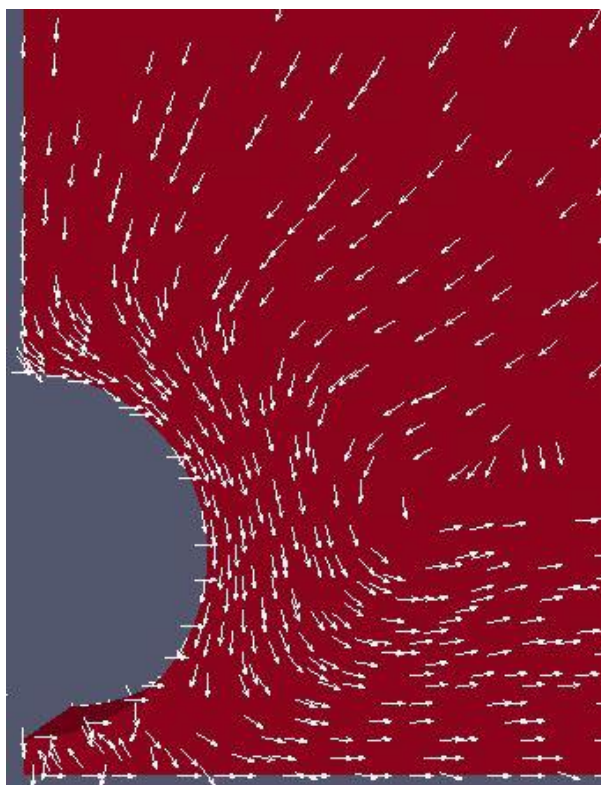


شکل (۵-۲) خطوط جریان و دما ثابت اطراف استوانه در L/D مختلف در اعداد رایلی 10^4 و 10^6

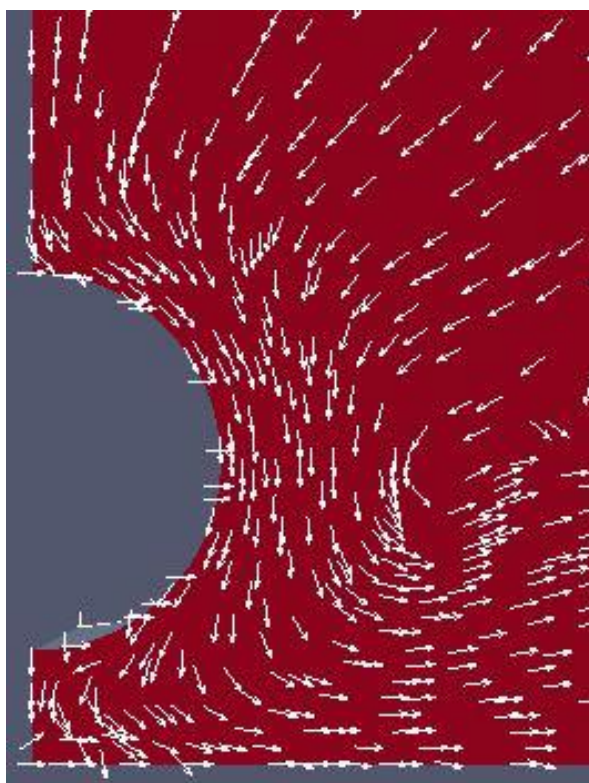


شکل (۳-۵) کانتور سرعت و دما اطراف استوانه در L/D مختلف در اعداد رایلی 10^4 و 10^6

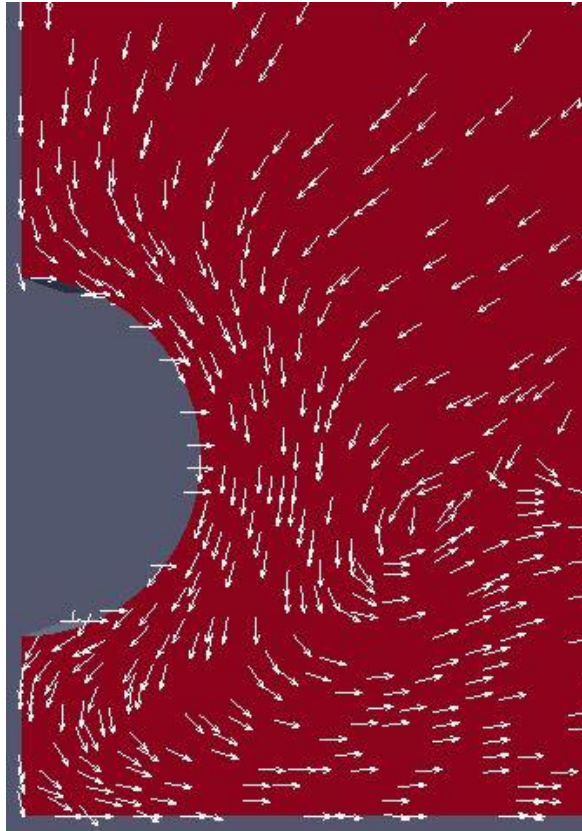
$Ra=10^4$



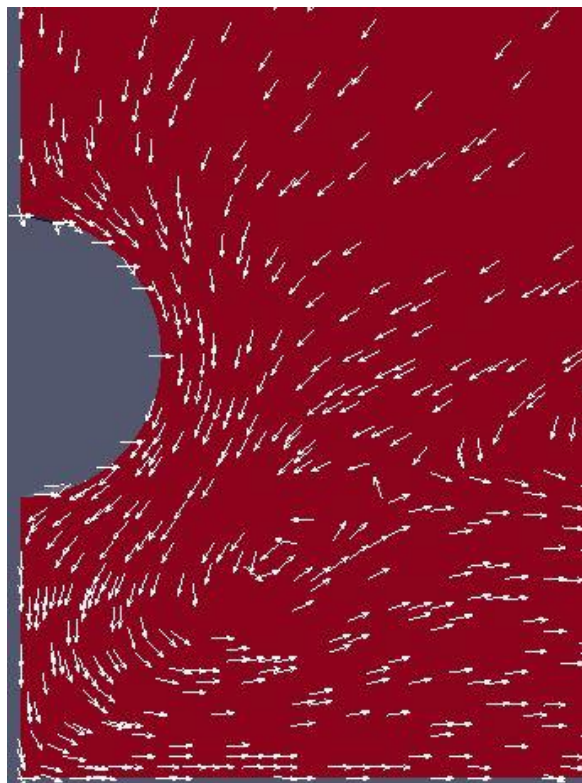
$L/D=0.1$



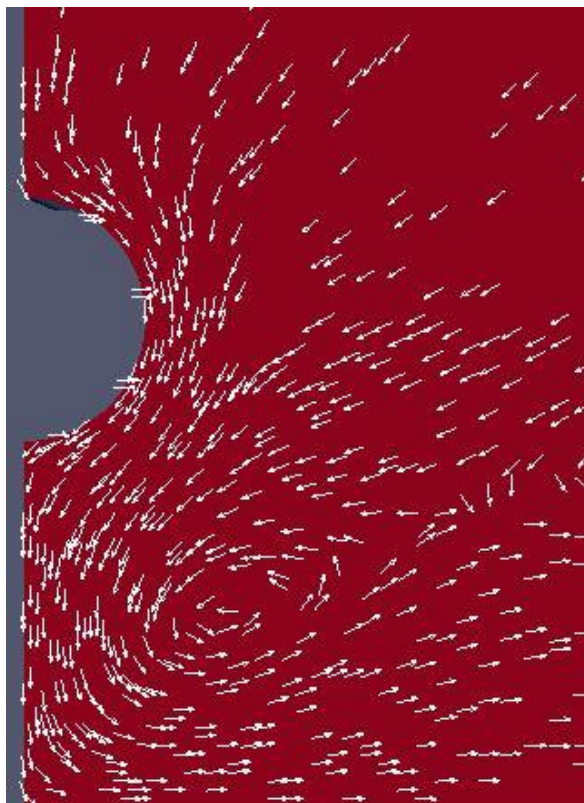
$L/D=0.3$



$L/D=0.5$



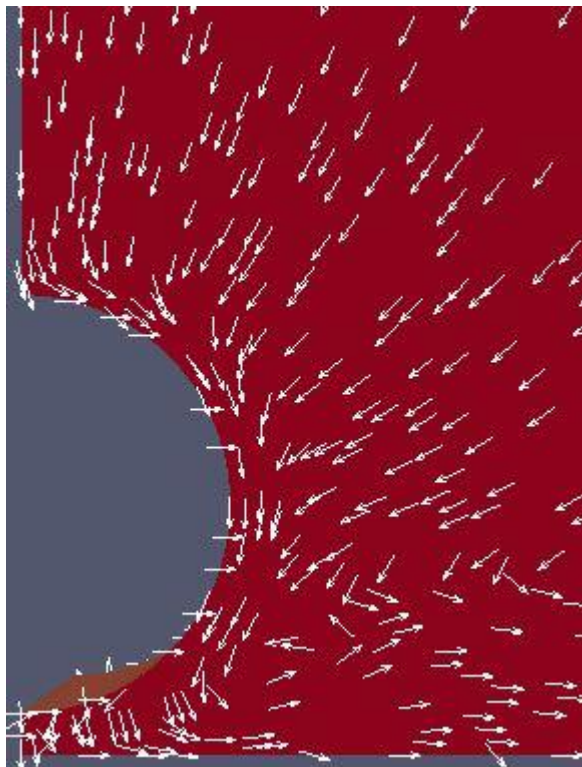
$L/D=1$



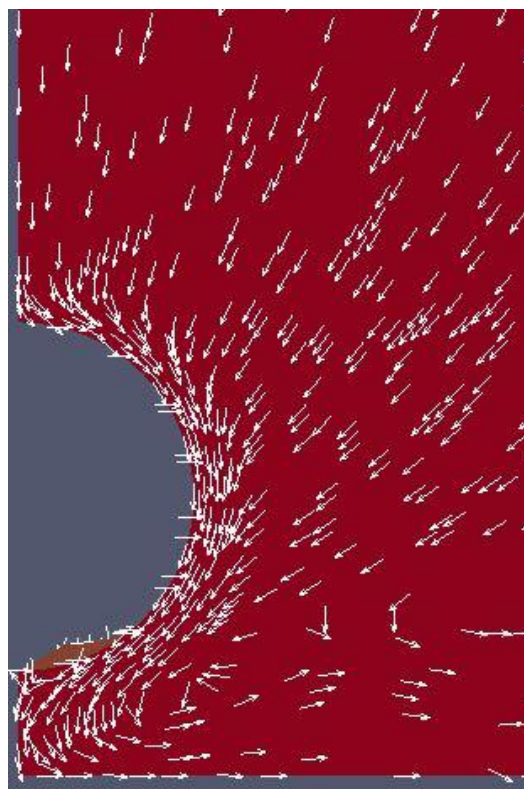
$$L/D=1/5$$

شکل (۴-۵) بردارهای سرعت اطراف استوانه در L/D مختلف در عدد رایلی 10^4

$$Ra=10^6$$

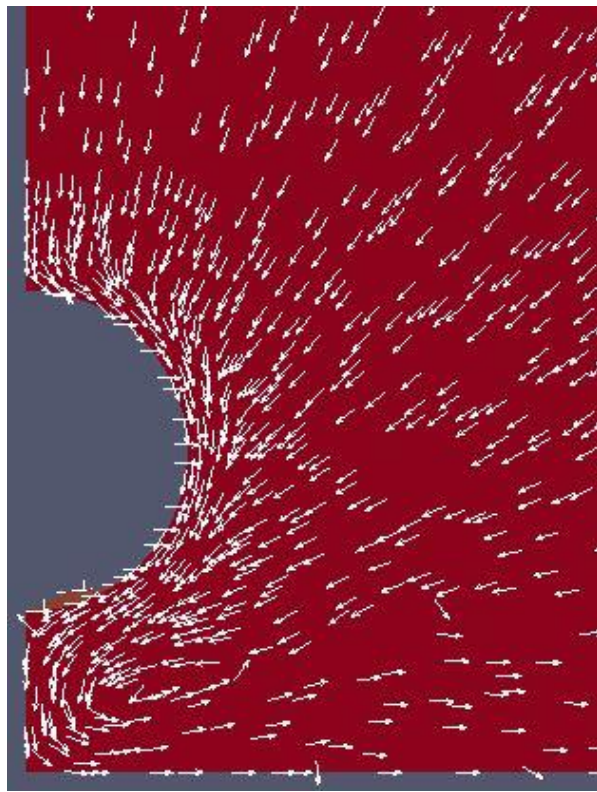


$$L/D=0.1$$

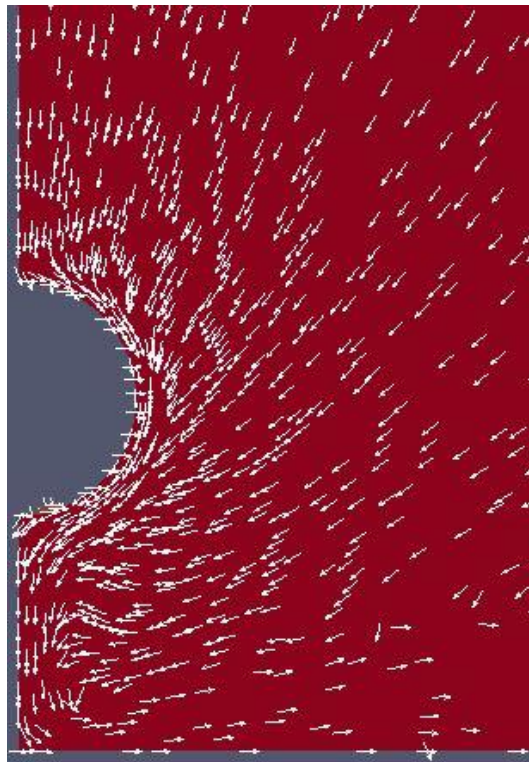


$$L/D=0.3$$

$$\Delta \gamma$$

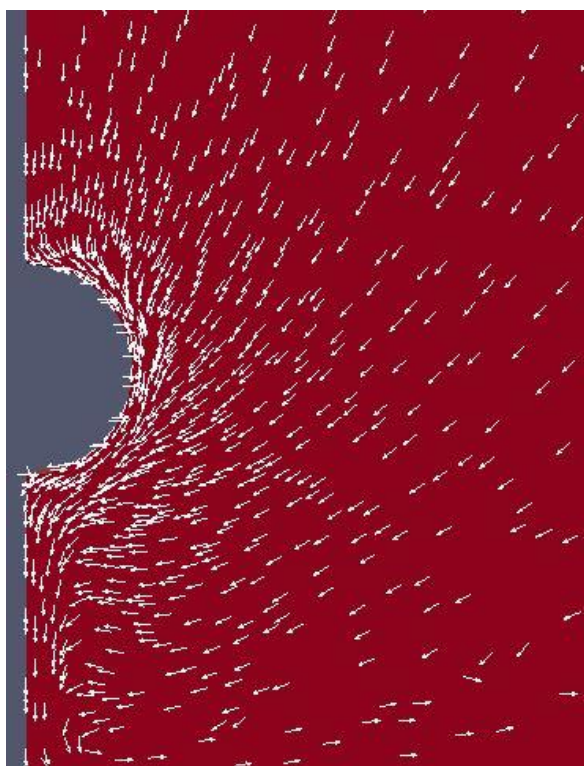


$L/D=0.5$



$L/D=1$

$\Delta\lambda$



$$L/D=1/5$$

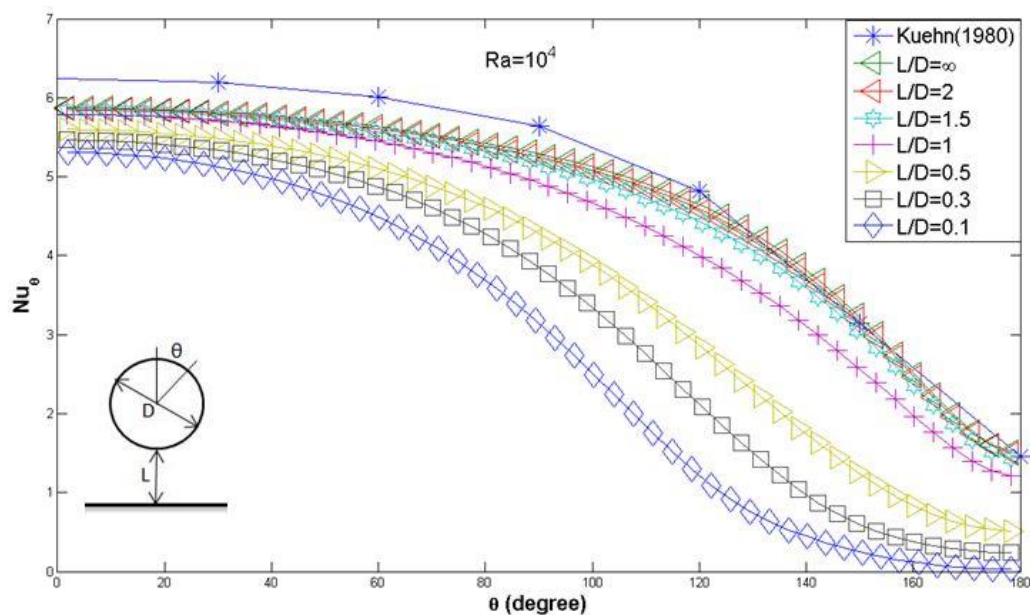
شکل (۵-۵) بردارهای سرعت اطراف استوانه در L/D مختلف در عدد رایلی 10^6

شکل (۲-۵) خطوط جریان و دما ثابت، شکل (۳-۵) کانتور سرعت و دما را در اعداد رایلی 10^4 و 10^6 حول استوانه نشان می دهند. همچنین شکل (۴-۵) و شکل (۵-۵) بردارهای سرعت را به ترتیب در اعداد رایلی 10^4 و 10^6 حول استوانه نشان می دهد. همانطور که از شکل های فوق ملاحظه می شود هوای سرد پس از تشکیل لایه مرزی روی استوانه افقی به صورت قائم و در اطراف زاویه صفر به سمت پایین حرکت می کند و پس از رها شدن در پایین استوانه به صورت پلوم سرد پایین آمده و با صفحه عایق برخورد می نماید. پلوم^۱ سرد تشکیل شده پس از آن بر روی صفحه به طرف راست جریان می یابد. اثر صفحه کف در میدان دمایی و میدان جریان در عدد رایلی 10^4 در حالتی که نسبت

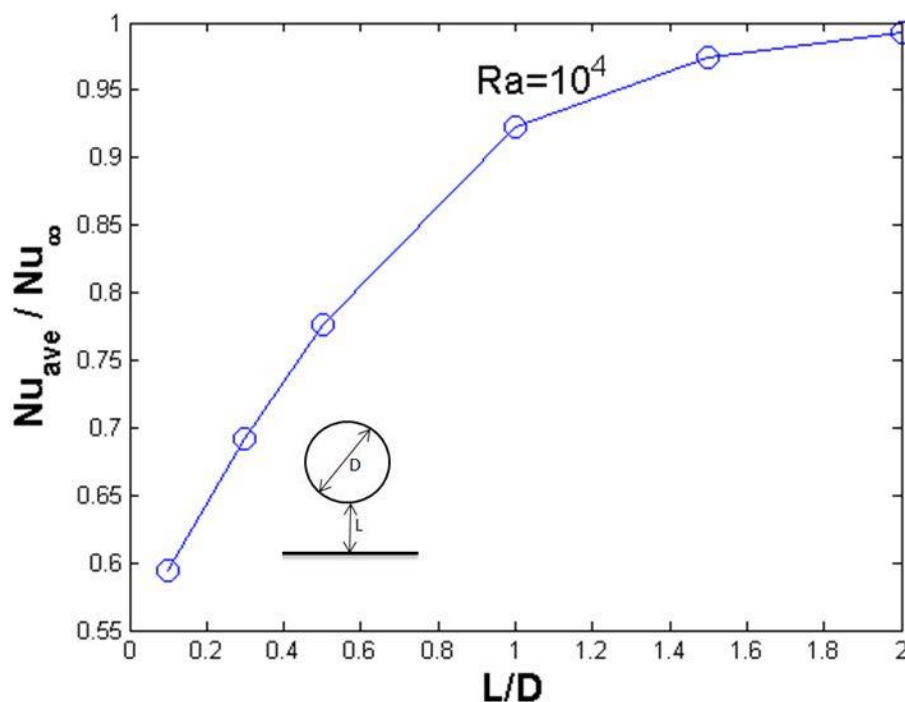
^۱ Plume

فاصله استوانه از صفحه به قطر استوانه بیشتر از $1/5$ است مشاهده می شود و با افزایش عدد رایلی تا 10^6 چون لایه مرزی باریکتر شده اثر فاصله کف به کمتر از $L/D = 0.5$ رسیده است. در فواصل کمتر از این مقدار هوای سرد، پس از برخورد به استوانه به دلیل نزدیکی صفحه با استوانه متوقف شده و امکان طی مسیر تا نزدیکی زاویه 180° درجه را ندارد.

تغییرات عدد نوسلت محلی و متوسط استوانه با L/D در عدد رایلی 10^4 در شکل (۵-۶) و شکل (۵-۷) نمایش داده شده است.



کل (۵-۶) تغییرات عدد نوسلت محلی اطراف استوانه در فواصل مختلف صفحه در اعداد رایلی 10^4 ، 10^5 و 10^6

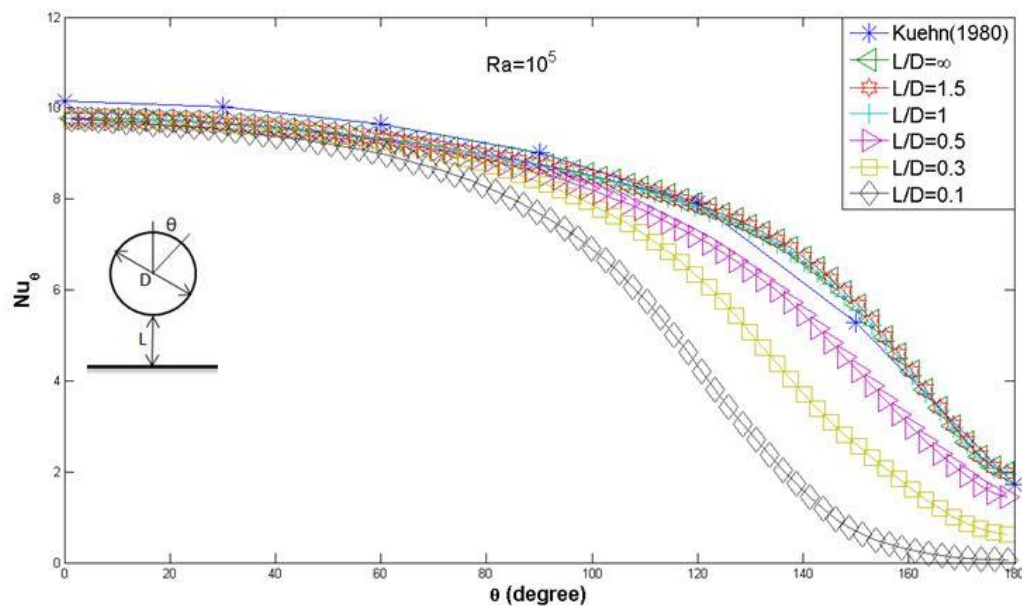


شکل (۷-۵) تغییرات عدد نوسلت متوسط استوانه با L/D در عدد رایلی 10^4

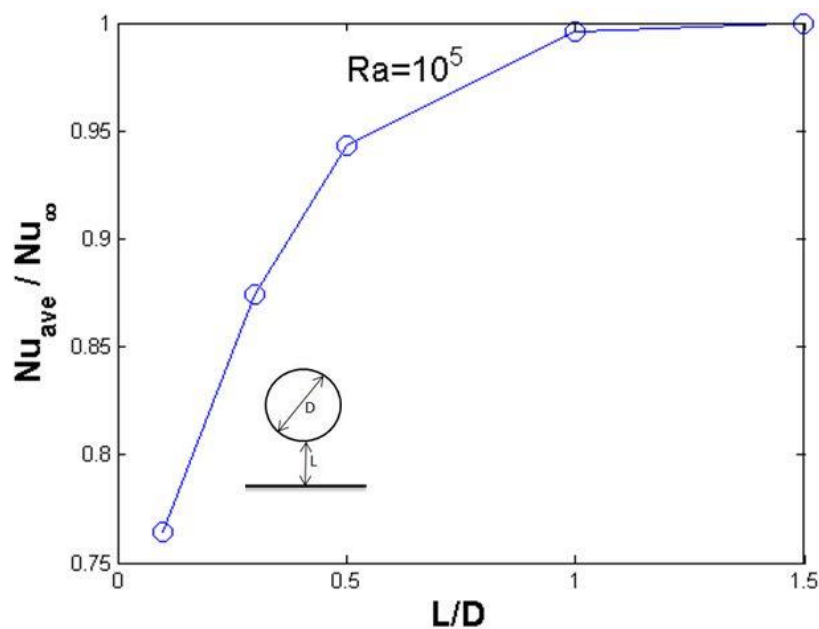
همانطور که از شکل (۶-۵) مشاهده می شود تطابق خوبی بین داده های یک لوله در محیط بینهایت ($L/D=\infty$) و نتایج کوهن و گلدشتین (۱۹۸۰) وجود دارد. این نمودار نشان می دهد که اثرات صفحه عایق بر روی عدد نوسلت محلی حتی در $\theta=0$ نیز برای $0.1 < L/D < 1$ مشاهده می شود یعنی دیوار جلوی جریان را به نحوی گرفته است. و اختلاف عدد نوسلت محلی با افزایش مقادیر مختلف L/D بیشتر می شود. همچنین از شکل (۷-۵) ملاحظه می شود که نسبت عدد نوسلت متوسط به عدد نوسلت یک لوله در بینهایت در این عدد رایلی در فاصله $2 < L/D < \infty$ به صورت ثابت و بدون تغییر است. این بدان معنی است که انتقال حرارت جابجایی آزاد به استوانه سرد در این عدد رایلی در حالتی که نسبت فاصله استوانه از صفحه به قطر آن بیشتر از ۲ باشد، تاثیری از صفحه نمی گیرد و مقدار آن با حالتی که صفحه در زیر استوانه وجود ندارد برابری می کند. اثر صفحه بر روی انتقال حرارت به استوانه از مکانی که نسبت فاصله استوانه از صفحه به قطرش کمتر از ۲ باشد آغاز می شود. این اثر با کاستن از فاصله استوانه از کف کاهش می یابد. در $L/D=0.1$ مقدار عدد نوسلت متوسط تقریباً برابر ۰/۶ عدد نوسلت لوله در محیط بینهایت است که تأثیر قابل ملاحظه ی کف را در کاهش انتقال

حرارت از استوانه افقی را نشان می دهد.

نمودار تغییرات عدد نوسلت محلی و متوسط برای عدد رایلی 10^5 در شکل (۵-۸) و شکل (۵-۹) نشان داده شده است.



شکل (۵-۸) تغییرات عدد نوسلت محلی اطراف استوانه در فواصل مختلف صفحه در عدد رایلی 10^5

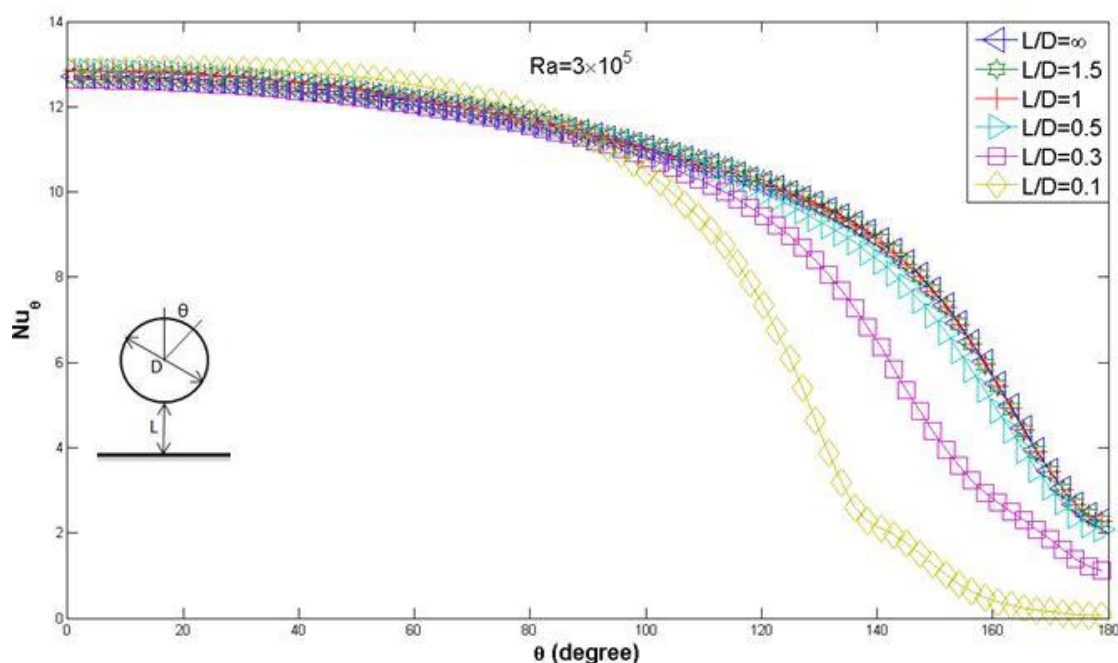


شکل (۵-۹) تغییرات عدد نوسلت متوسط استوانه با L/D در عدد رایلی 10^5

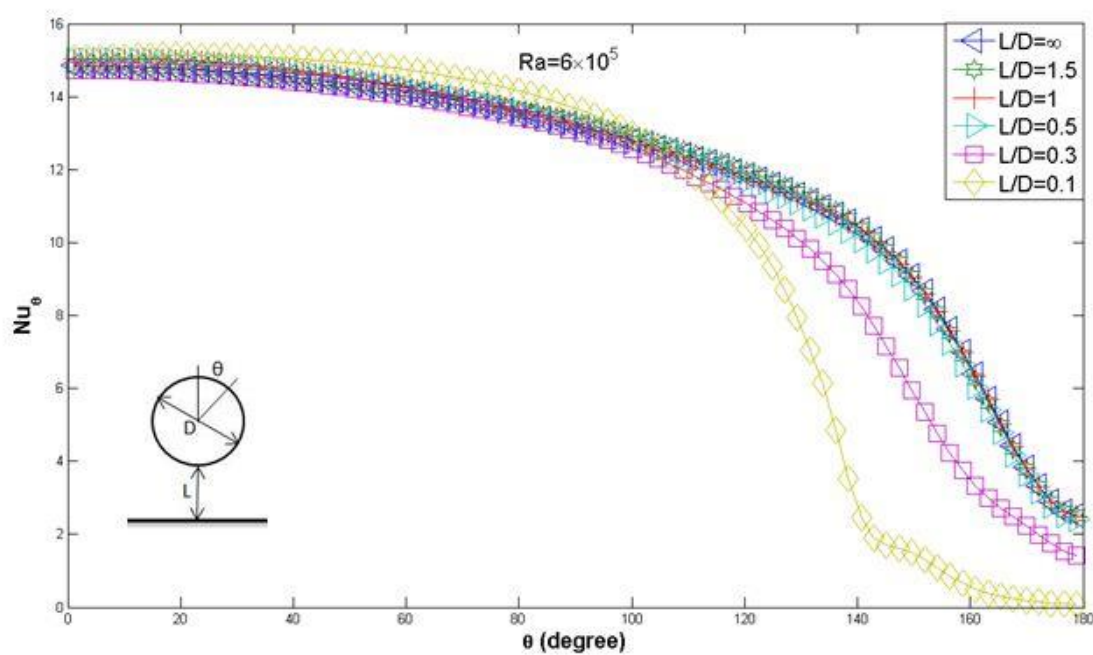
با توجه به شکل (۵-۸) ملاحظه می شود که این بار هم نتایج تطابق قابل قبولی با نتایج کوهن و

گلدشتین (۱۹۸۰) دارند. همچنین چنانچه از این نمودار مشخص است حدوداً بعد از زاویه ۶۰ درجه اختلاف عدد نوسلت محلی به ازای مقادیر مختلف L/D شروع شده و قبل از آن به ازای تمامی مقادیر L/D ، مقدار عدد نوسلت محلی با هم یکسان است. تفاوتی که در این عدد رایلی نسبت به حالت قبل دیده می شود این است که با توجه به شکل (۵-۹) با افزایش فاصله استوانه از صفحه به بیشتر از مقدار ۱ عدد نوسلت تقریباً با عدد نوسلت لوله در محیط بینهایت برابر شده و افزایش فاصله تأثیری بر میزان انتقال حرارت ندارد. در صورتی که در عدد رایلی 10^4 این مقدار برابر ۲ بود. و در $L/D = 0/1$ مقدار عدد نوسلت متوسط تقریباً برابر $0/77$ عدد نوسلت لوله در محیط بینهایت است که از حالت قبل بیشتر است.

برای اعداد رایلی 3×10^5 و 6×10^5 نتایج عددی تغییرات عدد نوسلت محلی محاسبه و در ارائه شده اند. لازم به ذکر است که نتایج این قسمت، همانطور که در جدول (۴-۴) آمده است، در فشار ۸۱۹۴۰ پاسکال (که فشار محیط آزمایشگاه است) و رطوبت ۳۰ درصد محاسبه شده است.



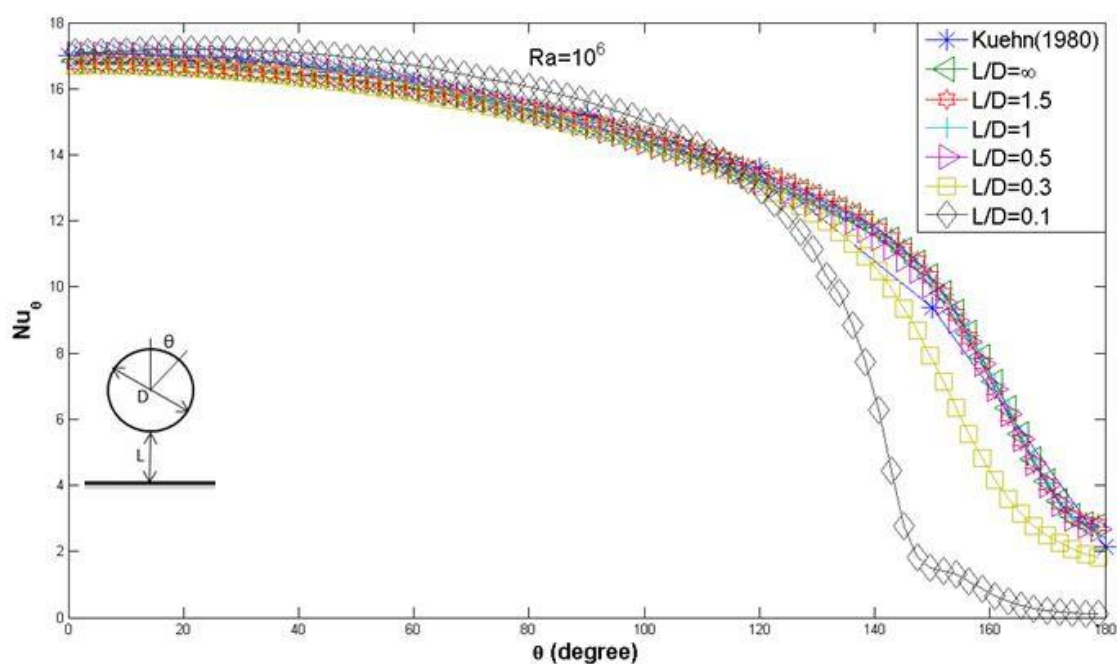
شکل (۵-۱۰) تغییرات عدد نوسلت محلی اطراف استوانه در فواصل مختلف صفحه در عدد رایلی 3×10^5



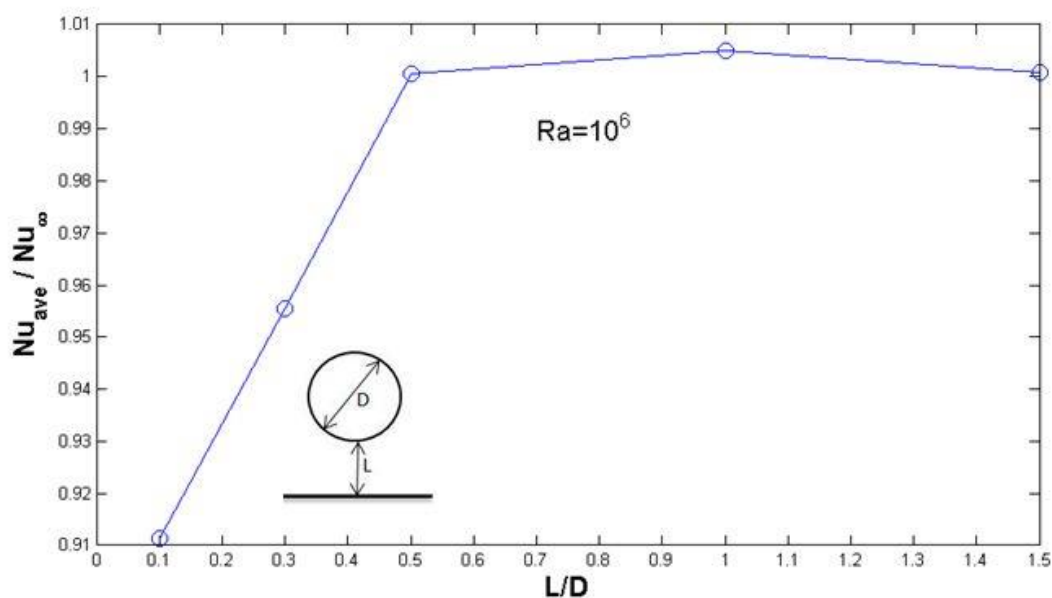
شکل (۵-۱۱) تغییرات عدد نوسلت محلی اطراف استوانه در فواصل مختلف صفحه در عدد رایلی 6×10^5

چنانچه مشاهده می شود و انتظار می رفت با افزایش عدد رایلی، زاویه تأثیر پذیری استوانه از کف نیز افزایش می یابد این زاویه در عدد رایلی 3×10^5 حدود 100° درجه است در حالی که در عدد رایلی 6×10^5 این زاویه به حدود 110° درجه افزایش می یابد.

محاسبات عددی برای عدد رایلی 10^6 نیز صورت گرفته که نتایج زیر حاصل شده اند.

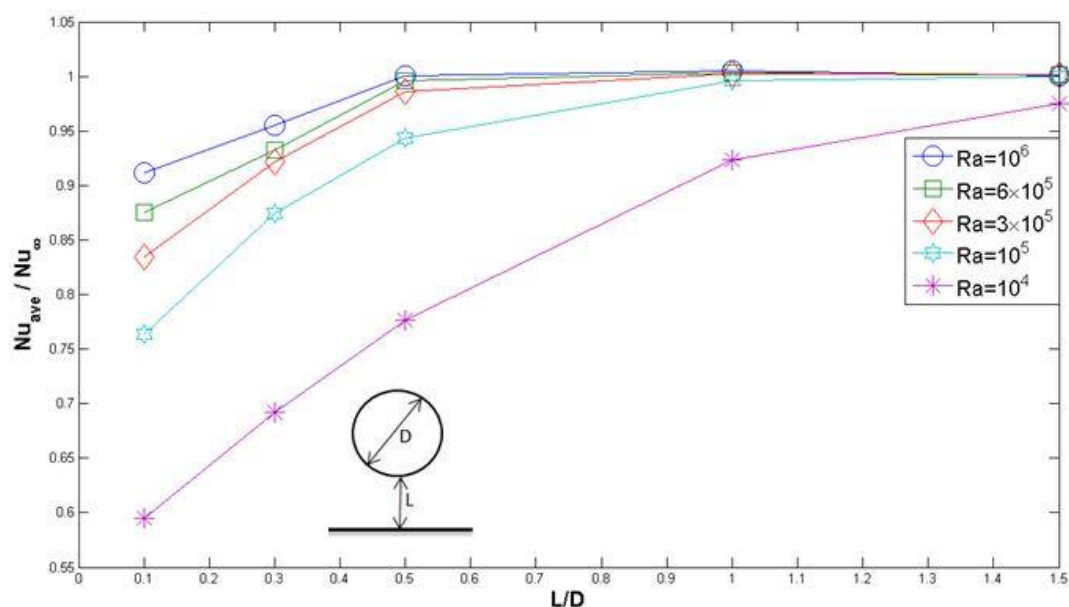


شکل (۵-۱۲) تغییرات عدد نوسلت محلی اطراف استوانه در فواصل مختلف صفحه در عدد رایلی 10^6



شکل (۵-۱۳) تغییرات عدد نوسلت متوسط استوانه با L/D در عدد رایلی 10^6

همانطور که از شکل (۵-۱۲) مشاهده می شود بین مقادیر نوسلت محلی لوله در محیط بینهایت و نتایج کوهن و گلدشتین (۱۹۸۰) مطابقت خوبی وجود دارد. همچنین تا قبل از زاویه 120° درجه جریان هوا هنوز اثرات وجود صفحه در زیر استوانه را درک نکرده و عدد نوسلت محلی به ازای تمام L/D ها تقریباً با هم برابرند. شکل (۵-۱۳) نیز نشان می دهد که عدد نوسلت متوسط بعد از $L/D = 0.5$ ثابت باقی می ماند. همچنین در $L/D = 0.1$ مقدار عدد نوسلت به عدد نوسلت یک لوله در محیط بی نهایت برابر 0.91 است که از مقادیر اعداد رایلی قبل بیشتر است. نتایج عددی نسبت عدد نوسلت متوسط به عدد نوسلت یک لوله در محیط بی نهایت برای تمام اعداد رایلی در شکل (۵-۱۴) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۴) تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب L/D در اعداد رایلی مختلف

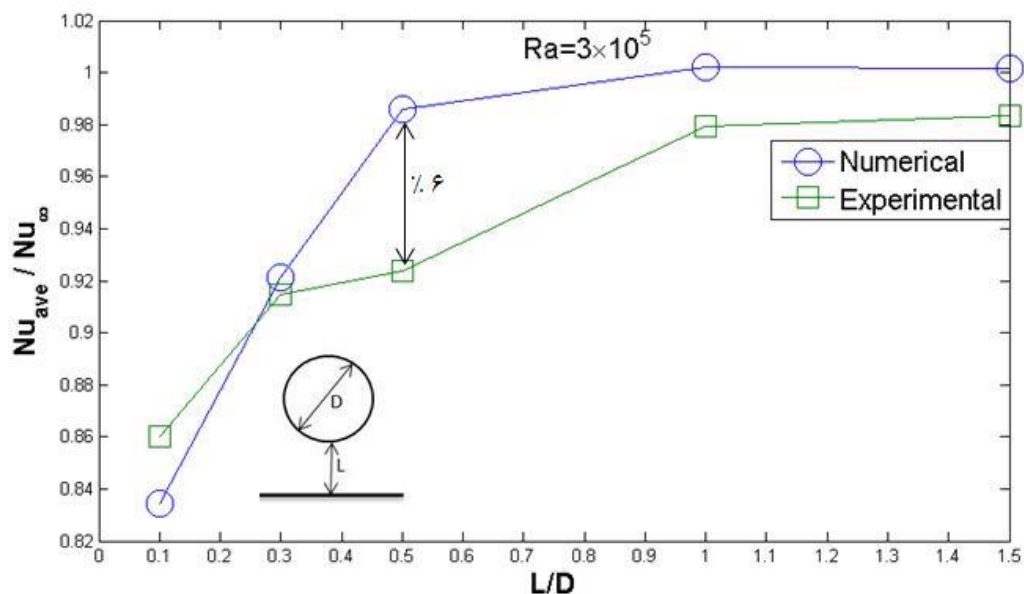
با توجه به شکل (۵-۱۴) با افزایش عدد رایلی، نسبت Nu_{ave}/Nu_{∞} در L/D کوچکتری به ۱ نزدیک می شود و همچنین در یک L/D ثابت با افزایش عدد رایلی نسبت Nu_{ave}/Nu_{∞} نیز افزایش می یابد که این می رساند با افزایش عدد رایلی تأثیر صفحه عایق بر عدد نوسلت و در نتیجه بر میزان انتقال حرارت کم می شود. علت این امر را می توان به باریکتر شدن لایه مرزی حرارت با افزایش عدد رایلی دانست.

۵-۱-۲- محاسبات آزمایشگاهی و مقایسه آن با نتایج عددی

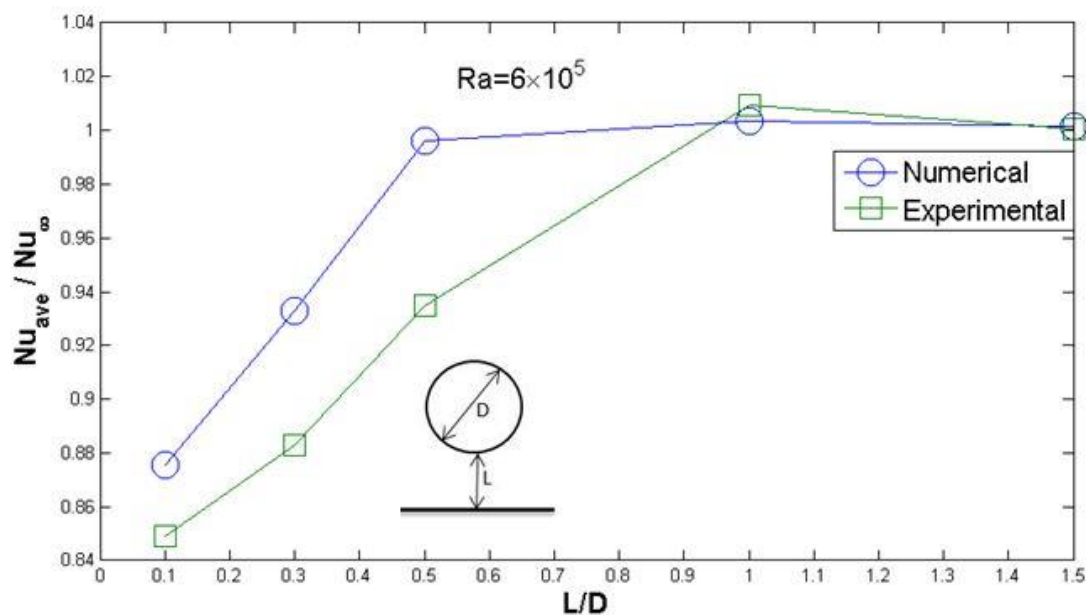
چنانچه در فصول قبلی هم ذکر شده آزمایش ها برای بررسی تأثیر صفحه عایق بر میزان انتقال حرارت از لوله افقی در دو عدد رایلی 3×10^5 و 6×10^5 انجام شده است.

همانطور که از شکل (۵-۱۵) و شکل (۵-۱۶) مشاهده می شود تطابق خوبی بین نتایج عددی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. و میزان اختلاف در بدترین حالت کمتر از ۶٪ است. همانطور که مشاهده می کنید با افزایش عدد رایلی میزان اختلاف نتایج کاهش می یابد و این به علت اختلاف دمای بیشتر

است و سبب اندازه گیری بهتر دما در مدل سازی تجربی می شود.



شکل (۵-۱۵) مقایسه نتایج تجربی و عددی عدد نوسلت متوسط استوانه با L/D در عدد رایلی 3×10^5



شکل (۵-۱۶) مقایسه نتایج تجربی و عددی عدد نوسلت متوسط استوانه با L/D در عدد رایلی 6×10^5

۵-۳-۱-۳- ارائه رابطه تجربی

پس از بررسی روش عددی و تطابق نسبتاً خوب آن با نتایج آزمایشگاهی، از داده های بدست آمده جهت ارائه یک رابطه تجربی که بیان کننده رفتار عدد نوسلت متوسط استوانه بر اساس نسبت فاصله از

صفحه به قطر و عدد رایلی باشد استفاده شده است. رابطه ارائه شده به صورت زیر می باشد.

$$\frac{\overline{Nu}}{\overline{Nu}_{\infty}} = A + \frac{B}{Ra} + \frac{C}{Ra^2} + D\eta + E\eta^2 + F \frac{\eta}{Ra} \quad (1-5)$$

با دقت $R^2 = 0.958$ که در این رابطه

$$\eta = L/D, Ra = \frac{g\beta D^3 (T_s - T_{\infty})}{\alpha \theta}$$

$$A = 0.851, B = -7890.315, C = 47939464.631, D = 0.363, E = -0.171, F = 1860.061$$

در رابطه (1-5) از \overline{Nu}_{∞} رابطه (2-2) ارائه شده توسط مورگان (1975) حاصل می شود.

$$\overline{Nu}_{\infty} = 0.48 Ra^{0.25} \quad 10^4 \leq Ra \leq 10^7 \quad (2-5)$$

رابطه (1-5) در محدوده اعداد رایلی بین 10^4 تا 10^6 معتبر خواهد بود.

2-5- استوانه افقی محصور در یک گوشه

در این بخش اثرات فاصله عمودی و افقی یک استوانه افقی از صفحات عایقی که در زیر و کنار آن طبق شکل (5-17) قرار گرفته اند و همچنین عدد رایلی بر میزان انتقال حرارت جا بجایی آزاد به استوانه افقی به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج با توجه به نسبت فاصله عمودی و افقی مختلف صفحه به قطر استوانه و اعداد رایلی متفاوتی انجام شده است. بازه تغییرات فاصله برای این استوانه در محاسبات عددی و تجربی در شکل (5-2) جدول (5-2) و جدول (5-3) آورده شده است.

جدول (5-2) محدوده محاسبات عددی و تجربی انتقال حرارت به استوانه افقی محصور در یک گوشه در اعداد رایلی

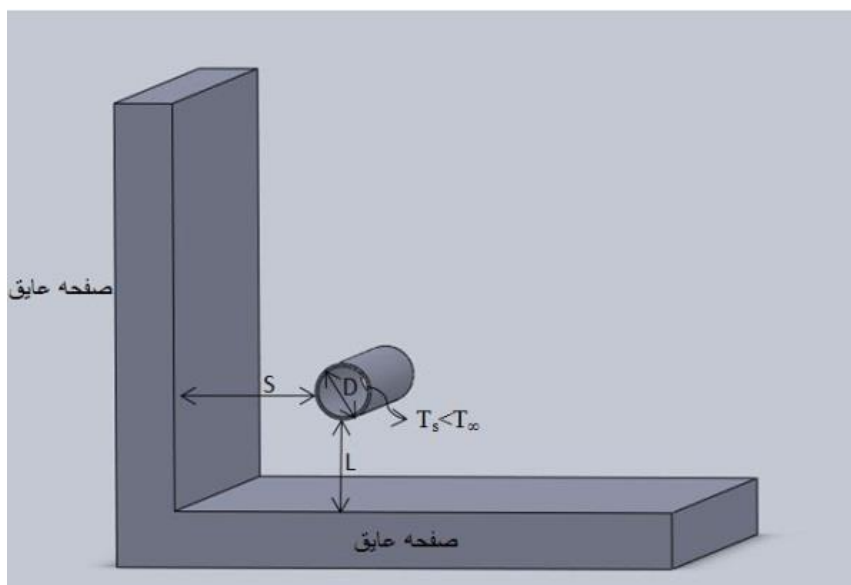
$$3 \times 10^5 \text{ و } 6 \times 10^5$$

S/D \ L/D	0.1	0.3	0.5	0.75	1
-----------	-----	-----	-----	------	---

عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی
عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی
عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی
عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی
عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی	عددی-تجربی

جدول (۳-۵) محدوده محاسبات عددی و تجربی انتقال حرارت به استوانه افقی محصور در یک گوشه در عدد رایلی 10^6

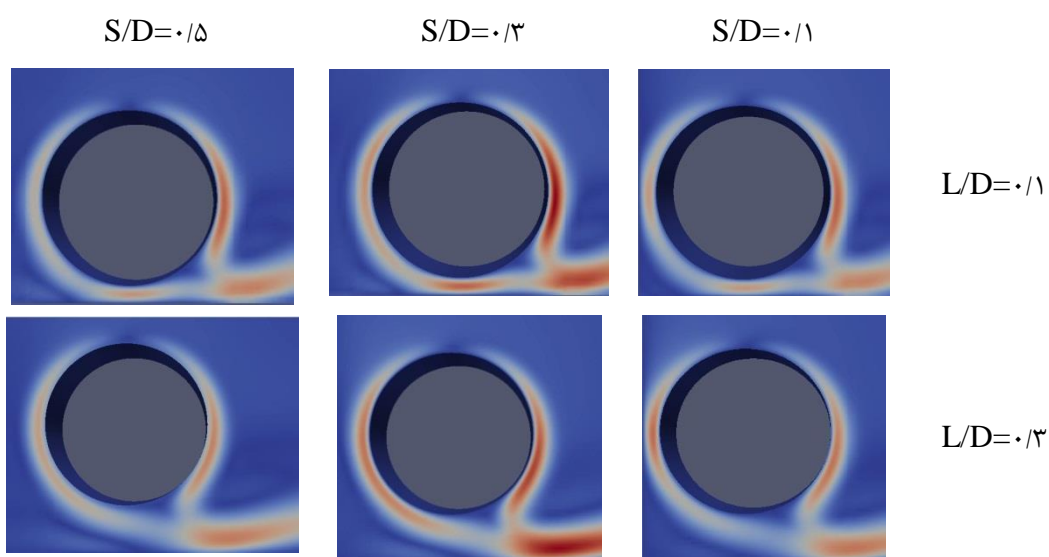
S/D L/D	۰/۱	۰/۳	۰/۵	۰/۷۵	۱
۰/۱	عددی	عددی	عددی	عددی	عددی
۰/۳	عددی	عددی	عددی	عددی	عددی
۰/۵	عددی	عددی	عددی	عددی	عددی
۰/۷۵	عددی	عددی	عددی	عددی	عددی
۱	عددی	عددی	عددی	عددی	عددی

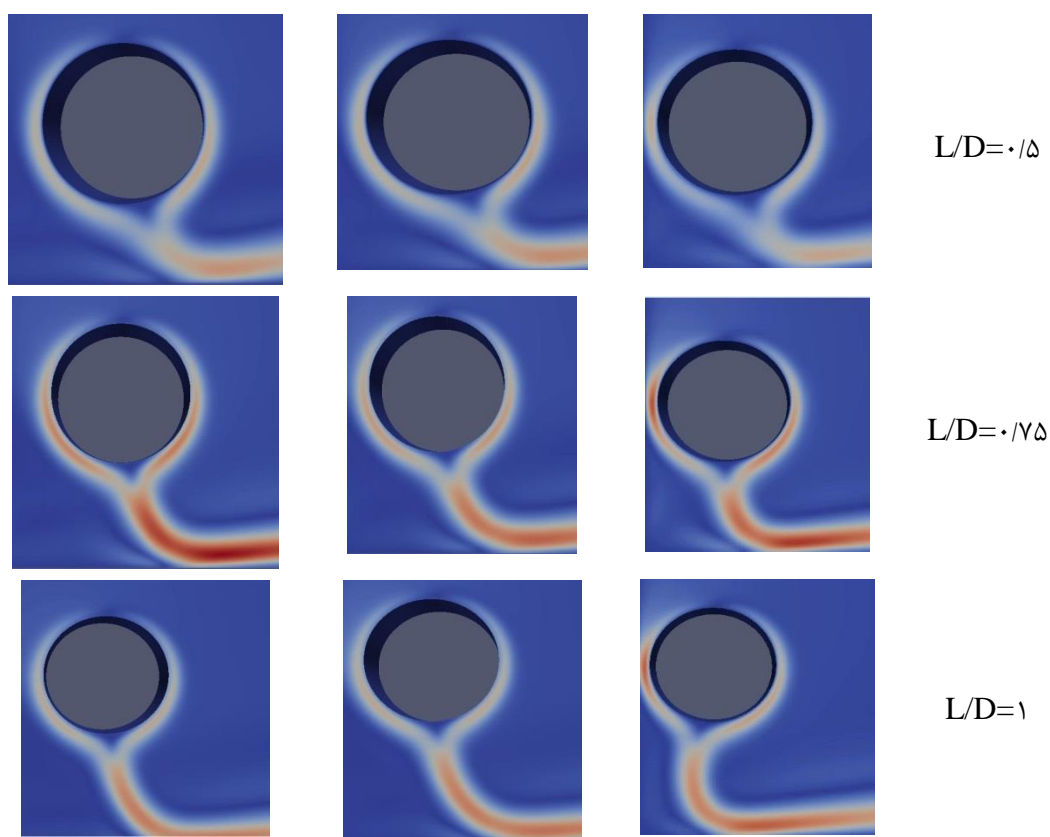


شکل (۵-۱۷) نمای استوانه محصور بین دو سطح عایق

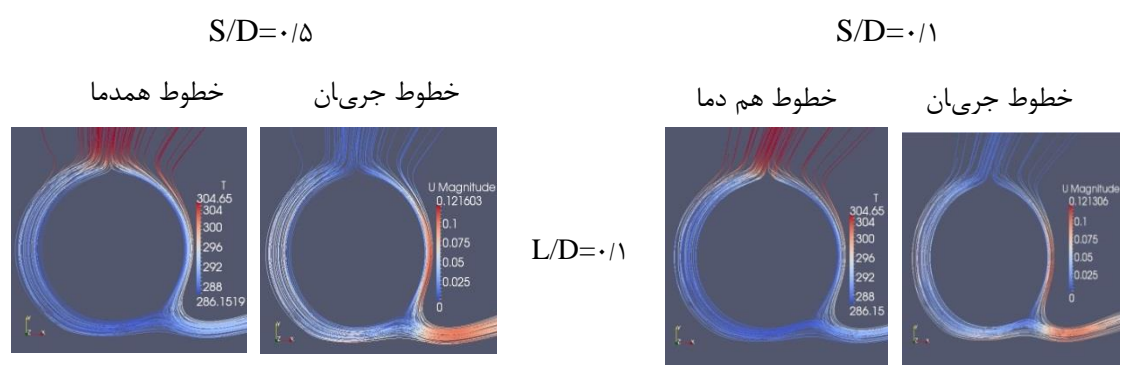
۵-۲-۱- محاسبات عددی

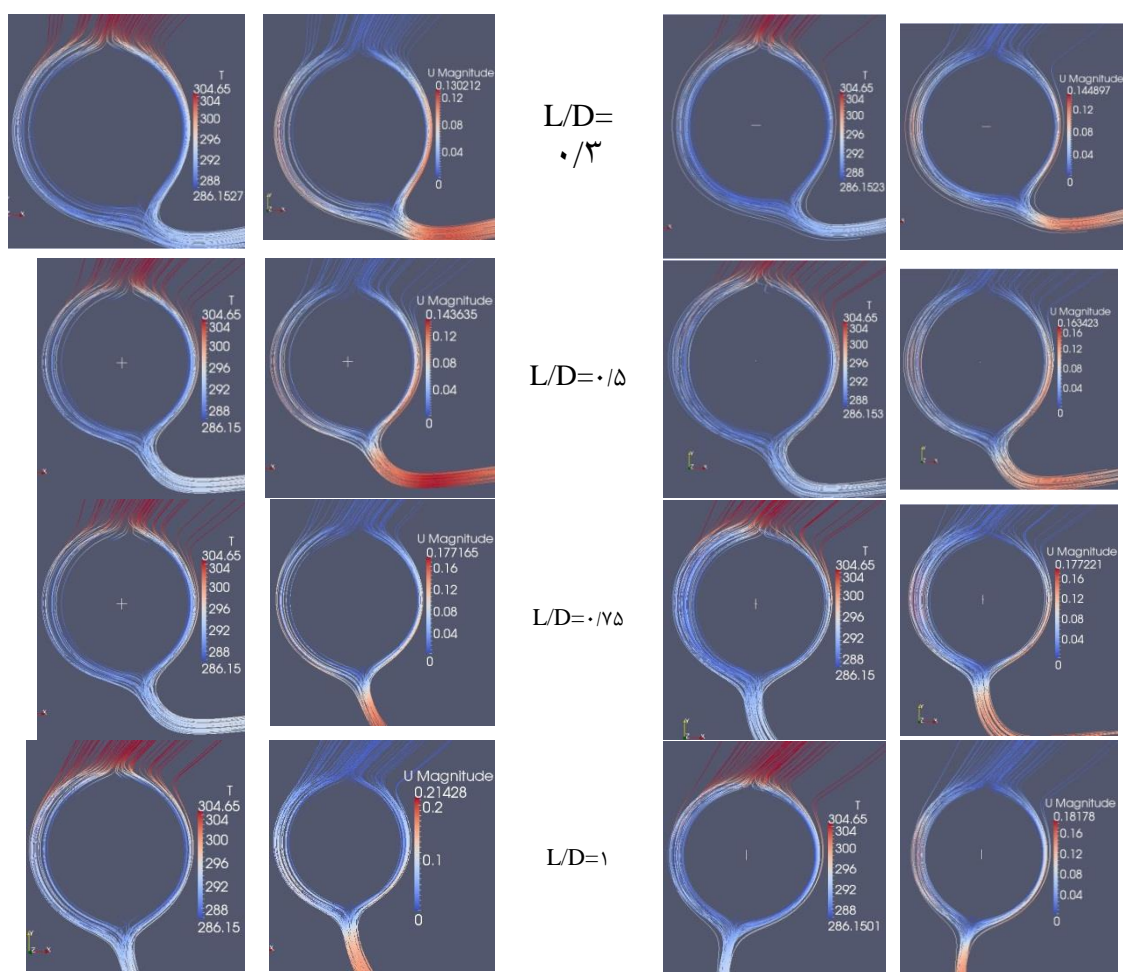
نتایج عددی انتقال حرارت به یک استوانه در محصور در یک گوشه در اعداد رایلی 3×10^5 ، 6×10^5 و 10^6 انجام گرفته که برای نمونه در شکل (۵-۱۸) کانتور سرعت اطراف استوانه را در عدد رایلی 6×10^5 مشاهده می کنید.





شکل (۵-۱۸) کانتور سرعت اطراف استوانه به ازای مقادیر مختلف S/D و L/D در عدد رایلی 6×10^5





شکل (۵-۱۹) خطوط جریان و دما ثابت اطراف استوانه در L/D مختلف در اعداد رایلی 6×10^5

با توجه به شکل (۵-۱۸) در یک S/D ثابت با افزایش مقدار L/D میدان های سرعت به صورت نسبتاً متقارن به سمت پایین لوله حرکت کرده و پس از برخورد به صفحه عایق به سمت آزاد حرکت می کند. با افزایش مقدار S/D از ۰/۱، صفحه قائم تأثیری در میدان جریان ندارد و میدان جریان بدون اثر پذیری از صفحه قائم به سمت پایین حرکت می کند ولی در برخورد به صفحه تخت به سمت آزاد

ادامه پیدا می کند.

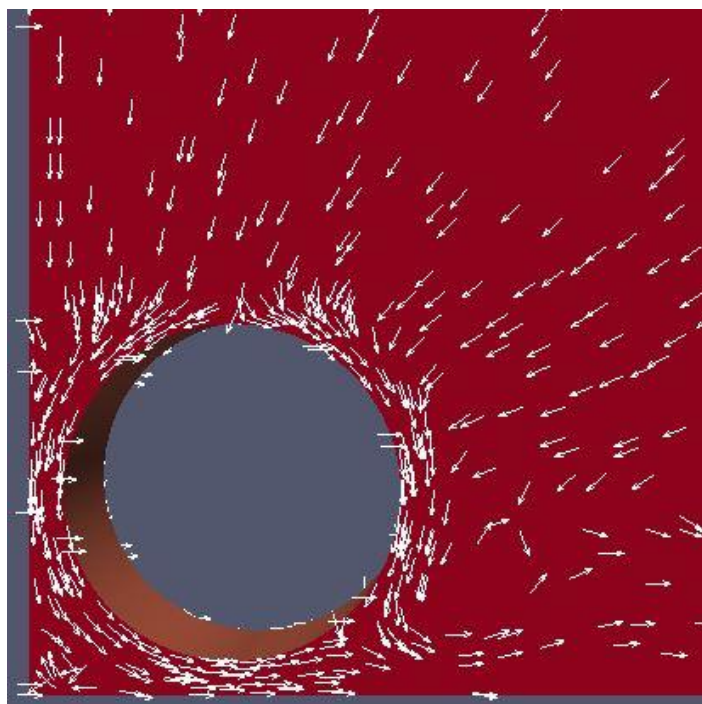
همانطور که شکل (۵-۱۹) نشان می دهد، با افزایش مقدار L/D خطوط جریان و دما ثابت به صورت متقارن از نقطه پایین استوانه خارج می شوند. اما در L/D کم این عدم تقارنی که در اثر وجود صفحه عایق در پایین استوانه است کاملاً قابل مشاهده است. همچنین در $S/D = 0.1$ خطوط جریان از سمت راست در بالای استوانه وارد می شوند که این موضوع در $S/D = 0.5$ کمی تعدیل تر شده و خطوط جریان با انحراف کمتری وارد می شوند.

خطوط جریان به صورت مایل به استوانه وارد می شوند که این ، اثر زیاد وجود صفحه قائم بر خطوط جریان را نشان می دهد همچنین در L/D کم این خطوط به علت وجود صفحه افقی و تأثیر آن بر این خطوط به صورت افقی از پایین صفحه خارج می شوند.

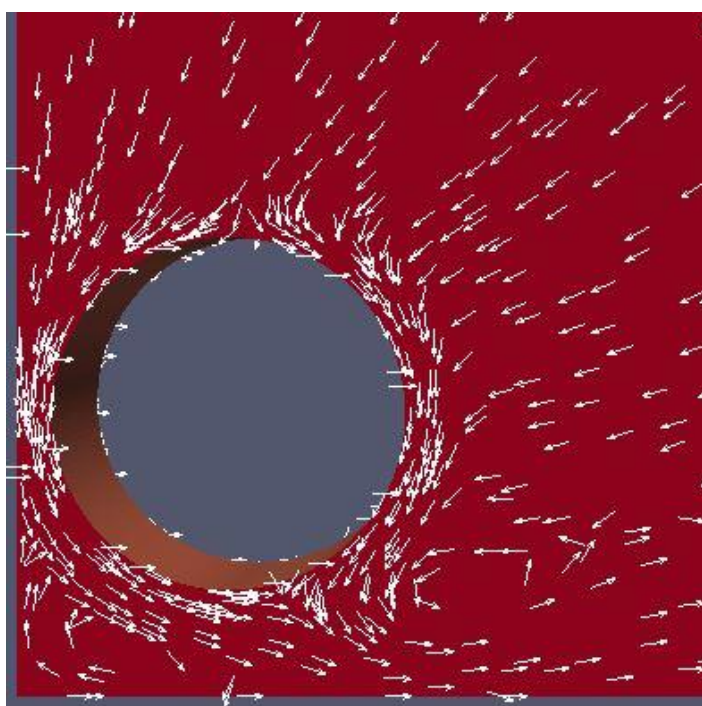
پدیده دیگری که از خطوط جریان به خصوص در $S/D = 0.1$ قابل رویت است آن است که ضخامت لایه مرزی در سمت چپ استوانه از سمت راست آن بیشتر است و این به خاطر آن است که به علت فاصله کم استوانه با دیواره قائم، هوا فضای کافی برای نفوذ به آن ناحیه را پیدا نمی کند و یک مکش نسبی در آن ناحیه به وجود می آید

بردارهای سرعت در $S/D = 0.1$ و $S/D = 0.3$ در عدد رایلی 6×10^5 در شکل (۵-۲۰) و شکل (۵-۲۱) قابل مشاهده است.

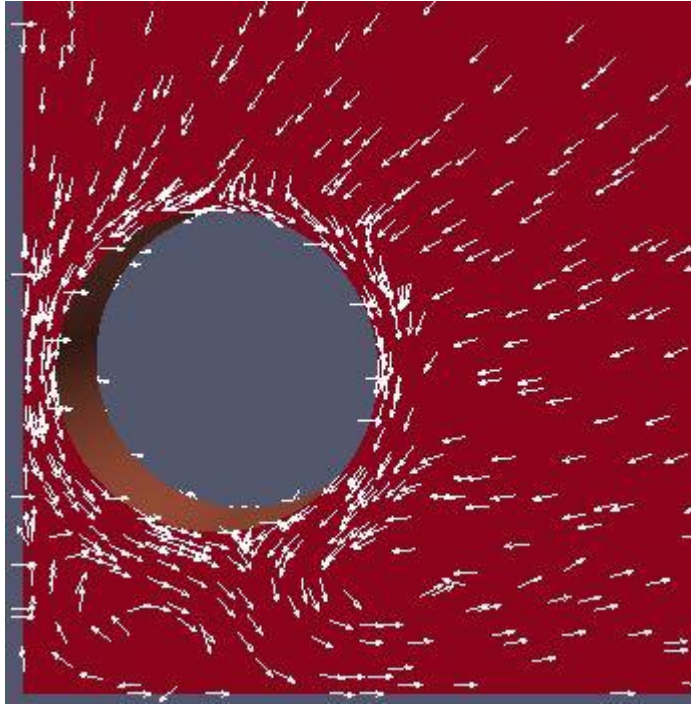
$$S/D=0.1$$



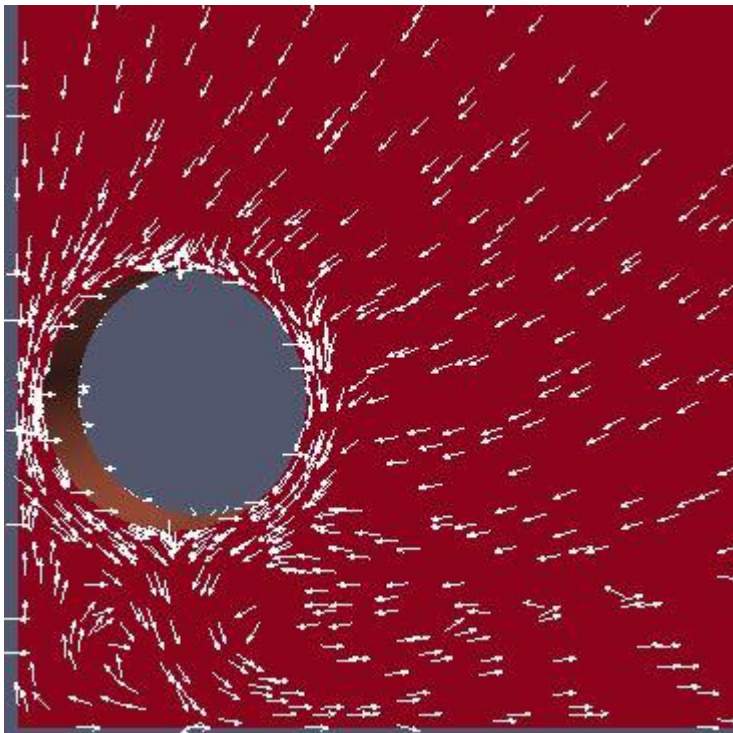
$L/D=0.1$



$L/D=0.3$

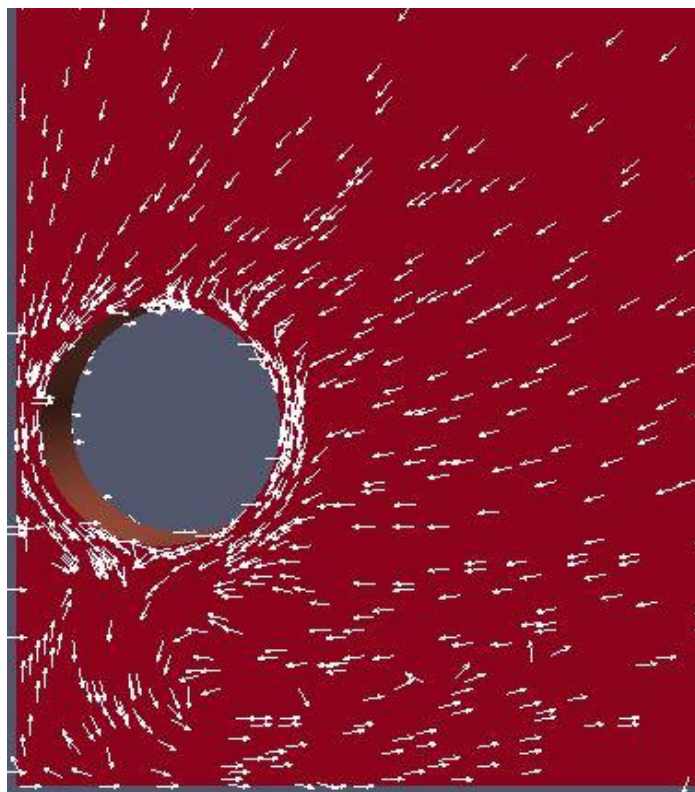


$$L/D = 0.5$$



$$L/D = 0.75$$

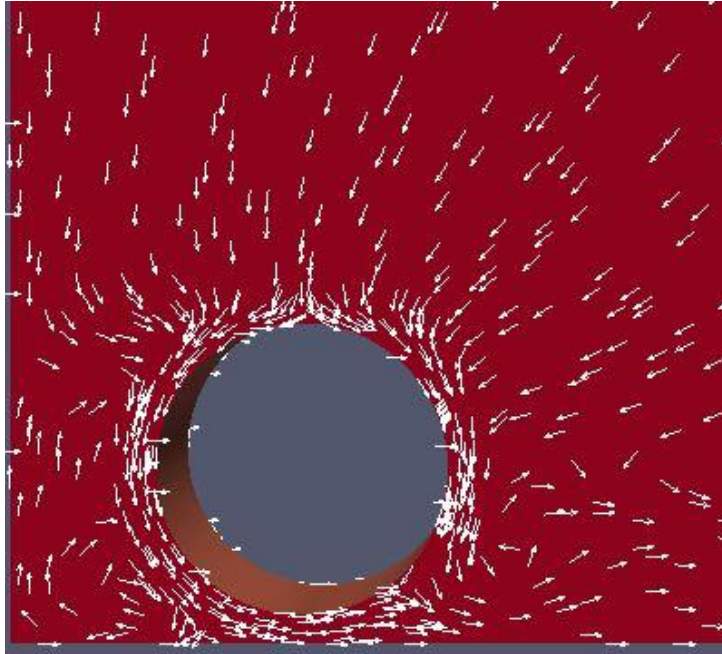
$$\gamma \Delta$$



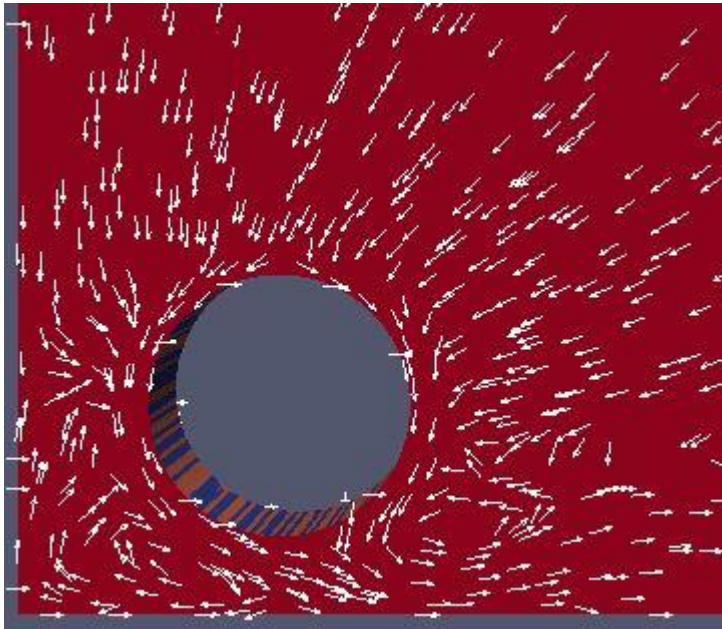
$$L/D=1$$

شکل (۵-۲۰) بردارهای سرعت اطراف استوانه در $S/D = 0.1$ و L/D مختلف در عدد رایلی 6×10^5

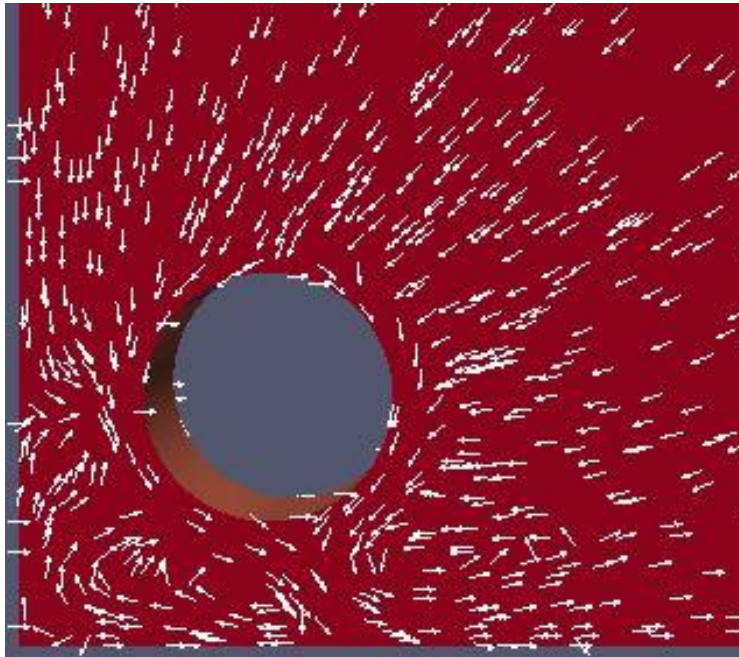
$$S/D = 0.5$$



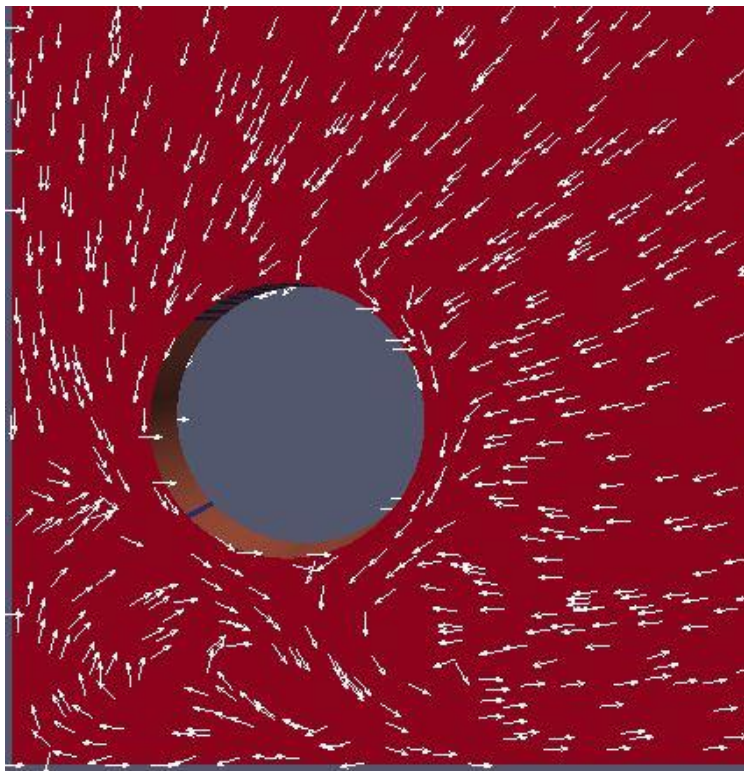
$$L/D = 0.1$$



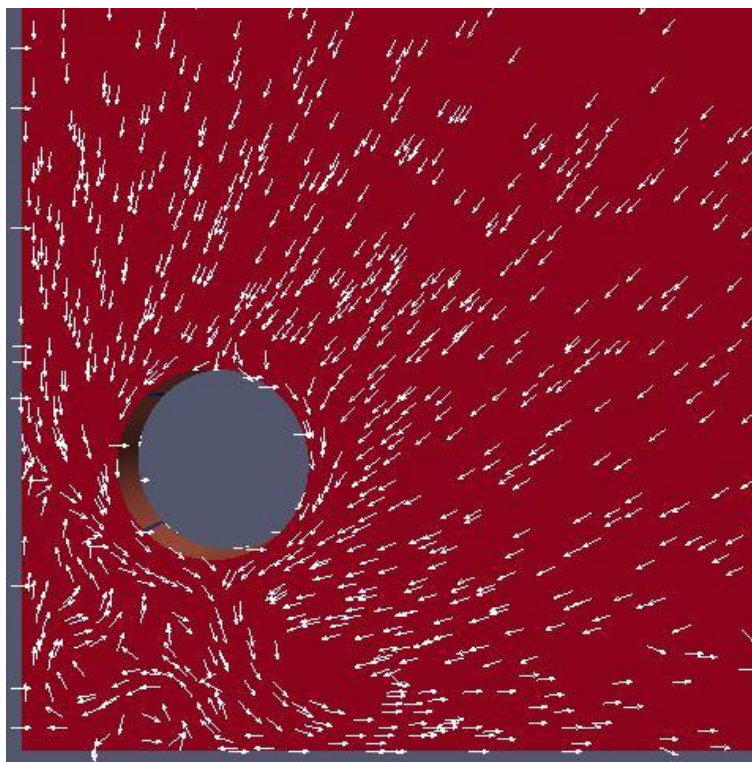
$$L/D = 0.3$$



$$L/D = 0.5/\delta$$



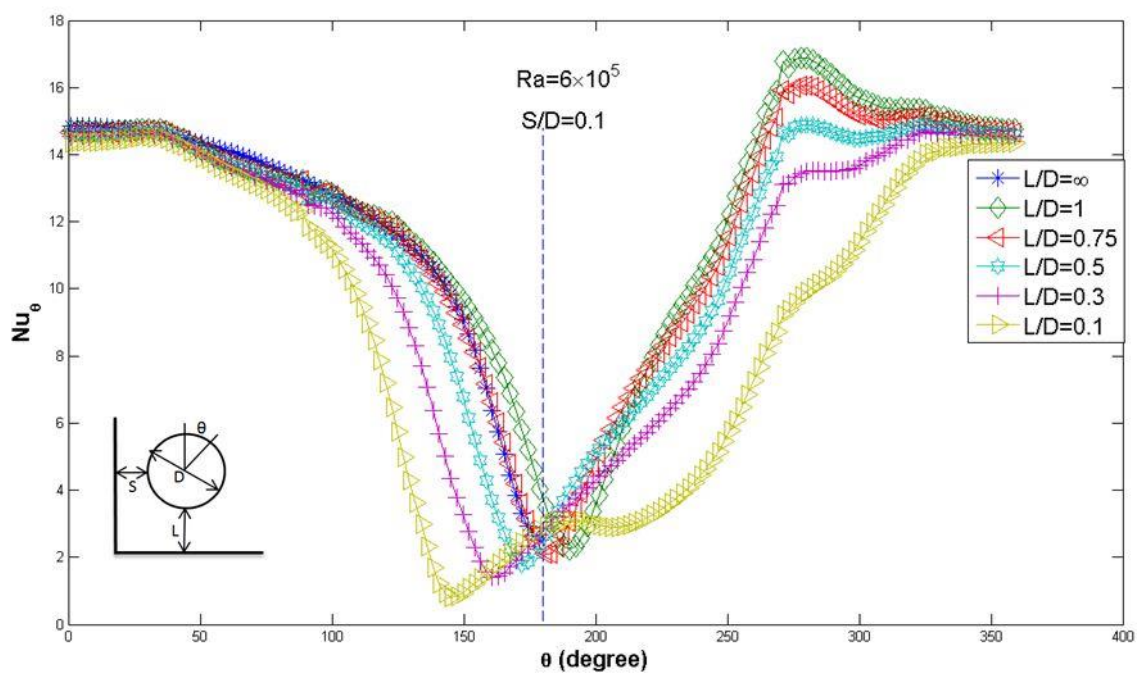
$$L/D = 0.7/\delta$$



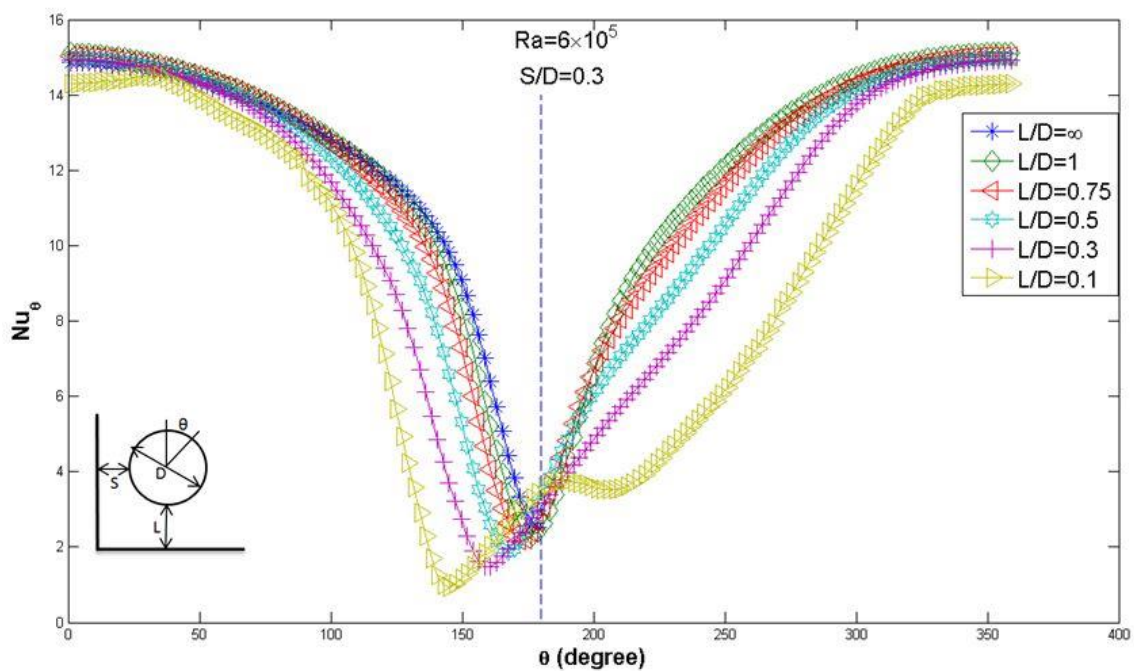
$L/D=1$

شکل (۲۱-۵) بردارهای سرعت اطراف استوانه در $S/D=0.1$ و L/D مختلف در عدد رایلی 6×10^5

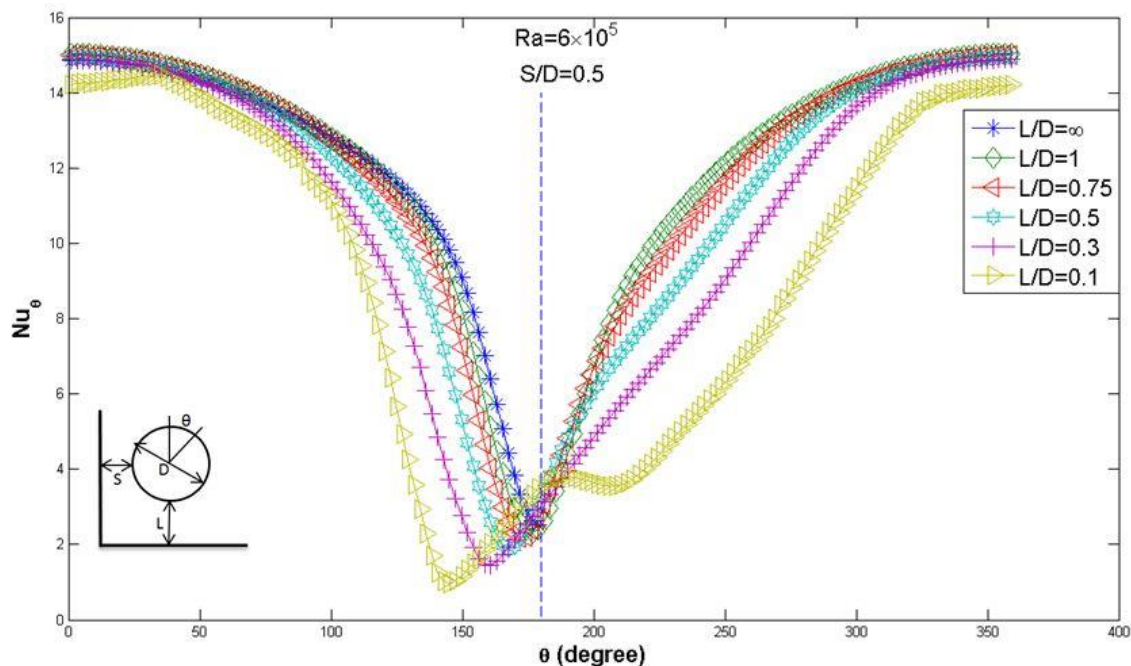
جهت مطالعه دقیق تر اثرات برهم کنش لایه مرزی سرعت و دما اطراف استوانه با صفحات عایق مجاورش بر میزان انتقال حرارت از استوانه، مقدار عدد نوسلت محلی روی استوانه در شکل (۵-۲۲) شکل (۲۳-۵) شکل (۲۴-۵) رسم شده است. این نمودارها در عدد رایلی 6×10^5 و بازه متغیرهای هندسی $S/D=0.1, 0.3, 0.5$ و $L/D=0.1, 0.3, 0.5, 0.75, 1, \infty$ رسم شده اند. همانطور که در شکل ها دیده می شود با افزایش فاصله صفحه افقی از استوانه مقادیر عددی نوسلت محلی، نسبت به زاویه 180° درجه که با خط چین نشان داده شده تقارن بیشتری پیدا می کنند.



شکل (۲۲-۵) تغییرات عدد نوسلت محلی بر روی استوانه برای $S/D = 0.1$ و عدد رایلی 6×10^5



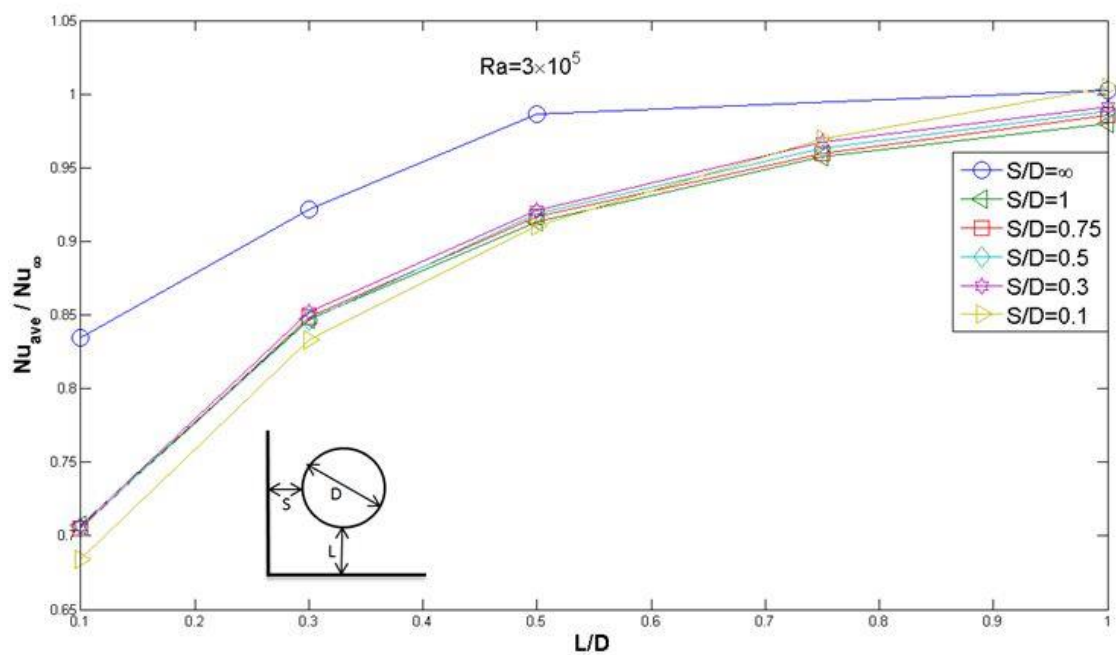
شکل (۲۳-۵) تغییرات عدد نوسلت محلی بر روی استوانه برای $S/D = 0.3$ و عدد رایلی 6×10^5



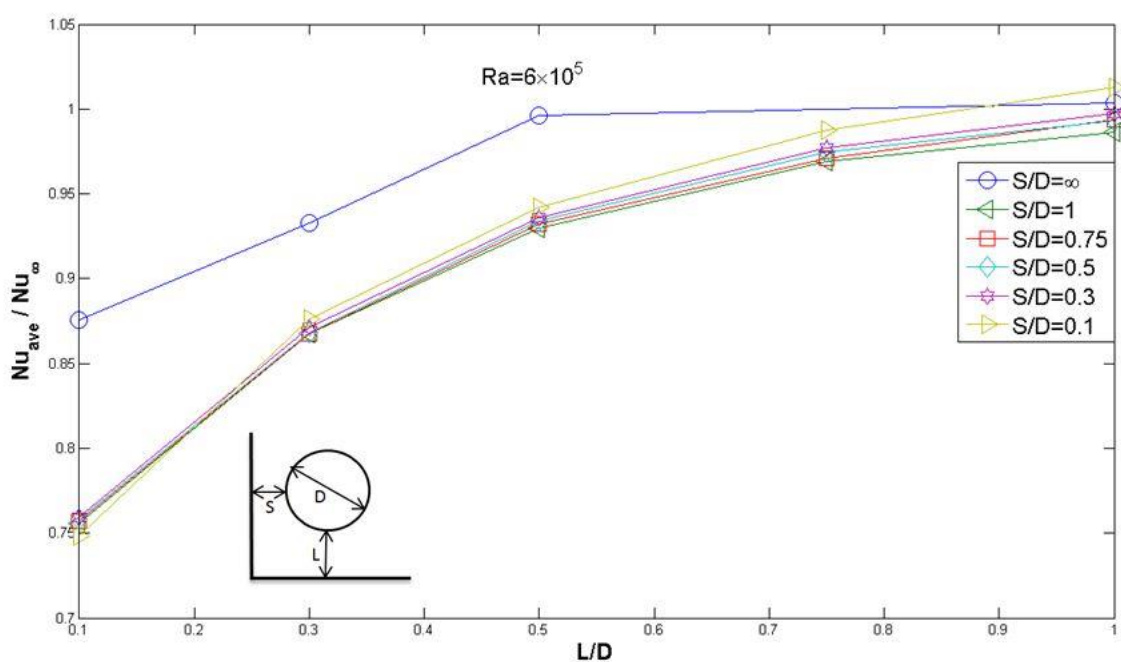
شکل (۵-۲۴) تغییرات عدد نوسلت محلی بر روی استوانه برای $S/D = 0.5$ و عدد رایلی 6×10^5

همچنان که ملاحظه می شود در $S/D = 0.1$ این تقارن نسبت به مقادیر $S/D = 0.3$ و $S/D = 0.5$ بسیار کمتر است که این نشان از تأثیر پذیری عدد نوسلت از دیواره قائم مجاور است. در $L/D = 0.1$ ، اطراف زاویه 210° درجه به علت نزدیکی لوله به سطح افقی و اینکه هوا بین دو صفحه عایق محصور می شود مقدار عدد نوسلت محلی مقداری کاهش می یابد و بعد از آن دوباره به روند صعودی خود ادامه می دهد.

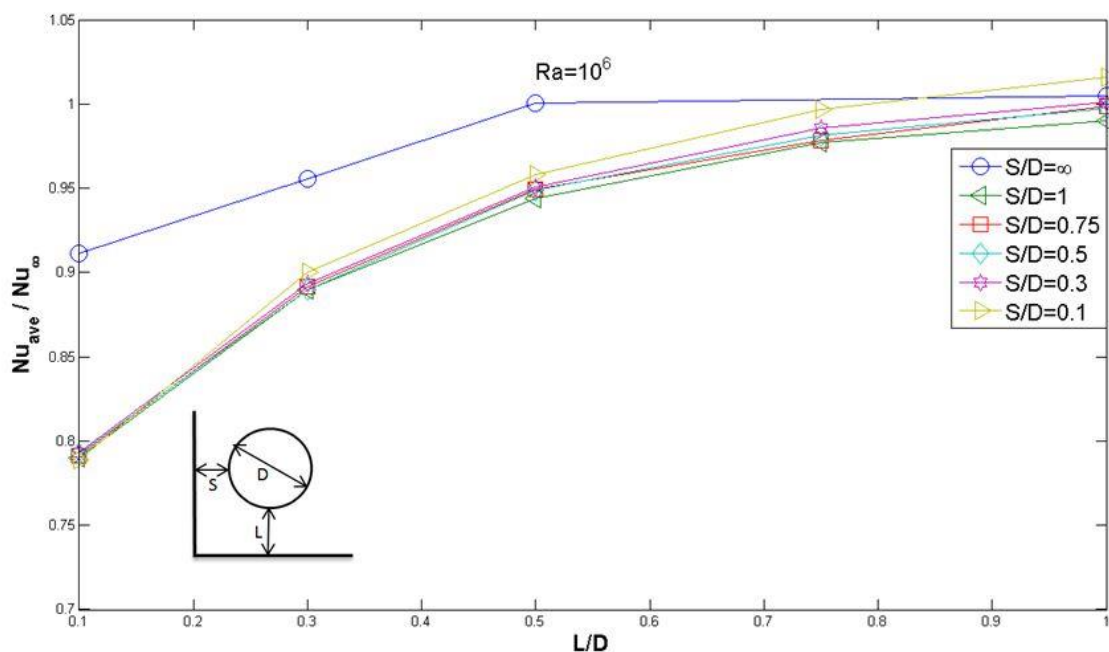
به منظور تحلیل بهتر اثرات عدد رایلی و فاصله افقی و عمودی سطوح عایق از استوانه بر روی عدد نوسلت، مقدار عدد نوسلت متوسط به ازای مقادیر مختلف L/D و S/D در اعداد رایلی 3×10^5 ، 6×10^5 و 10^6 در رسم شده اند.



شکل (۲۵-۵) تغییرات عدد نوسلت متوسط بر روی استوانه در عدد رایلی 3×10^5



شکل (۲۶-۵) تغییرات عدد نوسلت محلی بر روی استوانه در عدد رایلی 6×10^5



شکل (۵-۲۷) تغییرات عدد نوسلت محلی بر روی استوانه در عدد رایلی 10^6

با بررسی سه نمودار فوق به نتایج زیر می توان رسید:

۱- با افزایش عدد رایلی مقدار Nu_{ave}/Nu_{∞} در یک S/D و L/D خاص افزایش می یابد و این

یعنی با افزایش عدد رایلی اثرات صفحات عایق بر روی میزان انتقال حرارت کمتر می شود.

۲- در عدد رایلی 3×10^5 به ازای $0 < L/D < 0.5$ با کاهش مقدار S/D از 0.3 عدد نوسلت

متوسط کم می شود یعنی در این حالت صفحه قائم بر میزان انتقال حرارت تأثیر می گذارد

ولی با افزایش عدد رایلی همین تأثیر هم از میان می رود.

۳- با افزایش مقدار L/D در یک S/D خاص عدد نوسلت متوسط به صورت صعودی افزایش می

یابد در حالی که زمانی که صفحه قائم در کنار لوله قرار ندارد ($S/D = \infty$) عدد نوسلت متوسط

بعد از افزایش مقدار خاصی از L/D ثابت می شود. به عنوان مثال در عدد رایلی 10^6 در یک

S/D خاص با افزایش L/D از مقدار 0.1 تا مقدار 1 عدد نوسلت متوسط 20% افزایش می یابد

در حالی که در حالت بدون وجود صفحه عایق ($S/D = \infty$) با افزایش میزان L/D از 0.1 تا 0.5

عدد نوسلت متوسط حدود 10% افزایش می یابد و بعد از آن تا $L/D = 1$ میزان عدد نوسلت

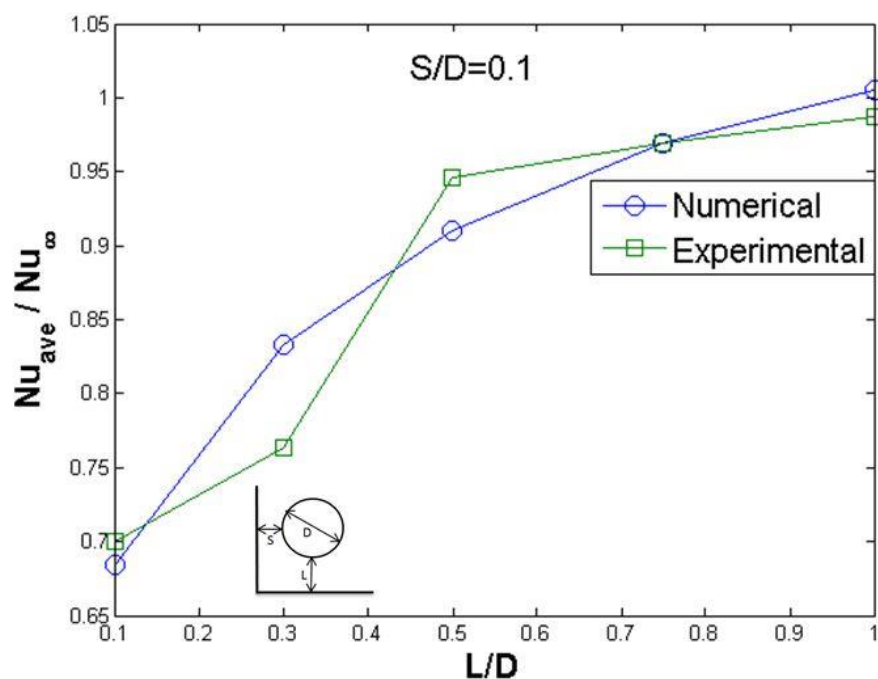
متوسط ثابت می ماند.

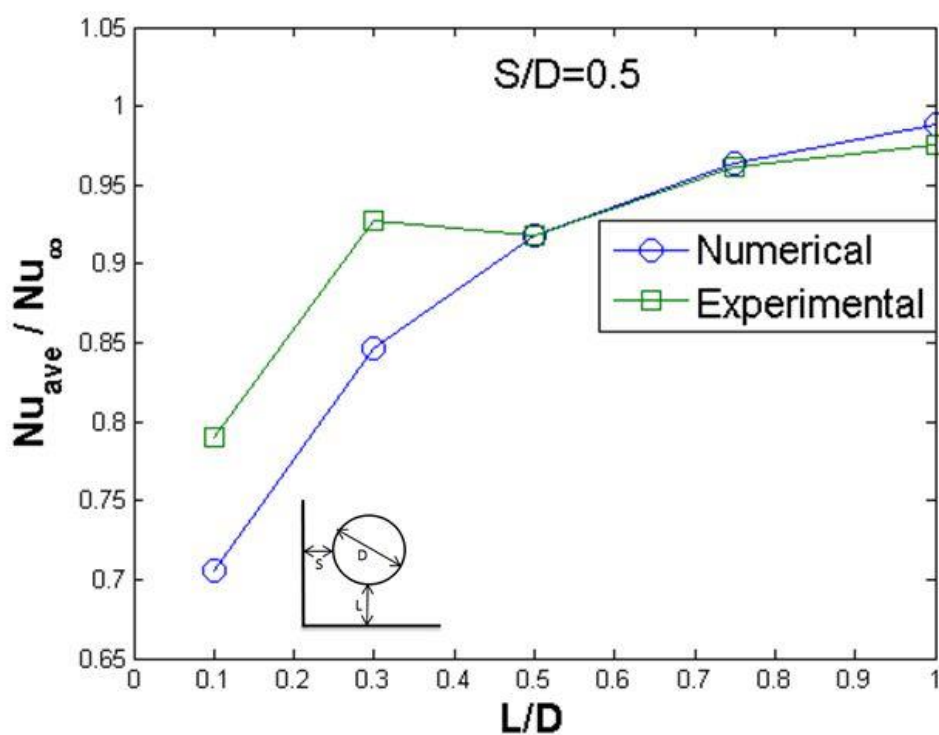
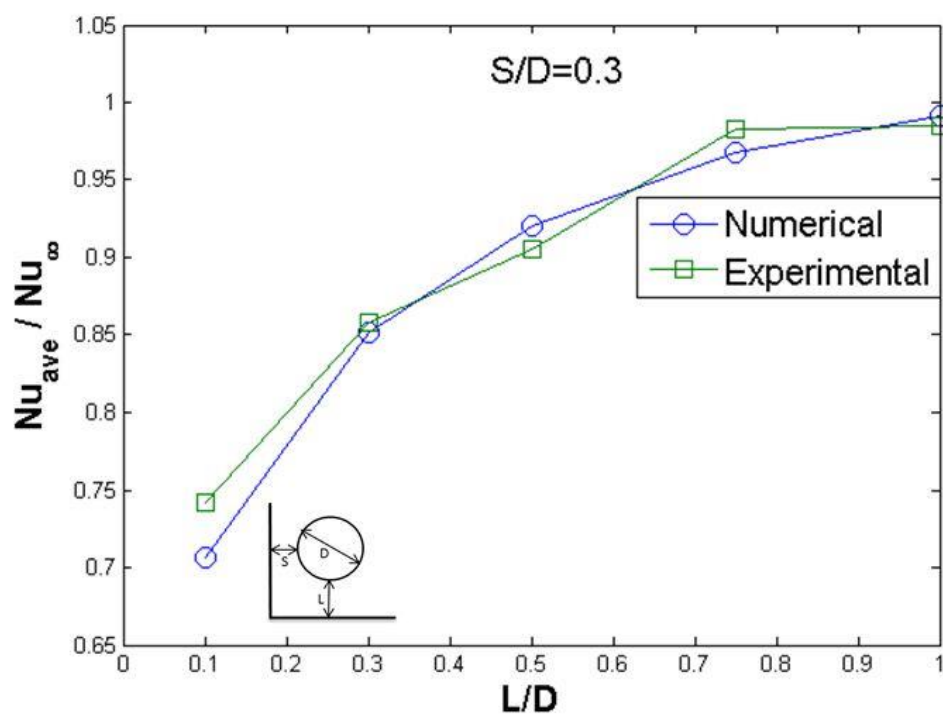
۴- گرچه شکل های فوق نشان می دهند که به ازای افزایش میزان فاصله صفحه قائم بعد از $S/D = 0.3$ عدد نوسلت متوسط در هر L/D ثابت می ماند ولی وجود همین صفحه باعث می شود که عدد نوسلت به میزان چشمگیری نسبت به حالتی که این صفحه وجود ندارد کاهش پیدا کند. یعنی جدای از فاصله این صفحه وجود همین صفحه بر میزان انتقال حرارت تأثیر فراوانی دارد که این به علت نداشتن آزادی هوا در حرکت به سمت چپ به علت وجود این صفحه است. به عنوان مثال در عدد رایلی 10^6 در حالت $L/D = 0.1$ عدد نوسلت متوسط در حالتی که صفحه قائم حضور ندارد، حدوداً 10% بیشتر از حالتی است که این صفحه در کنار لوله وجود داشته باشد.

۵-۲-۲- محاسبات آزمایشگاهی و مقایسه آن با نتایج عددی

آزمایش های انجام شده در این بخش به بررسی تأثیر صفحات عایق عمود بر هم بر میزان انتقال حرارت از لوله افقی در دو عدد رایلی 3×10^5 و 6×10^5 می پردازد.

$$Ra = 3 \times 10^5$$



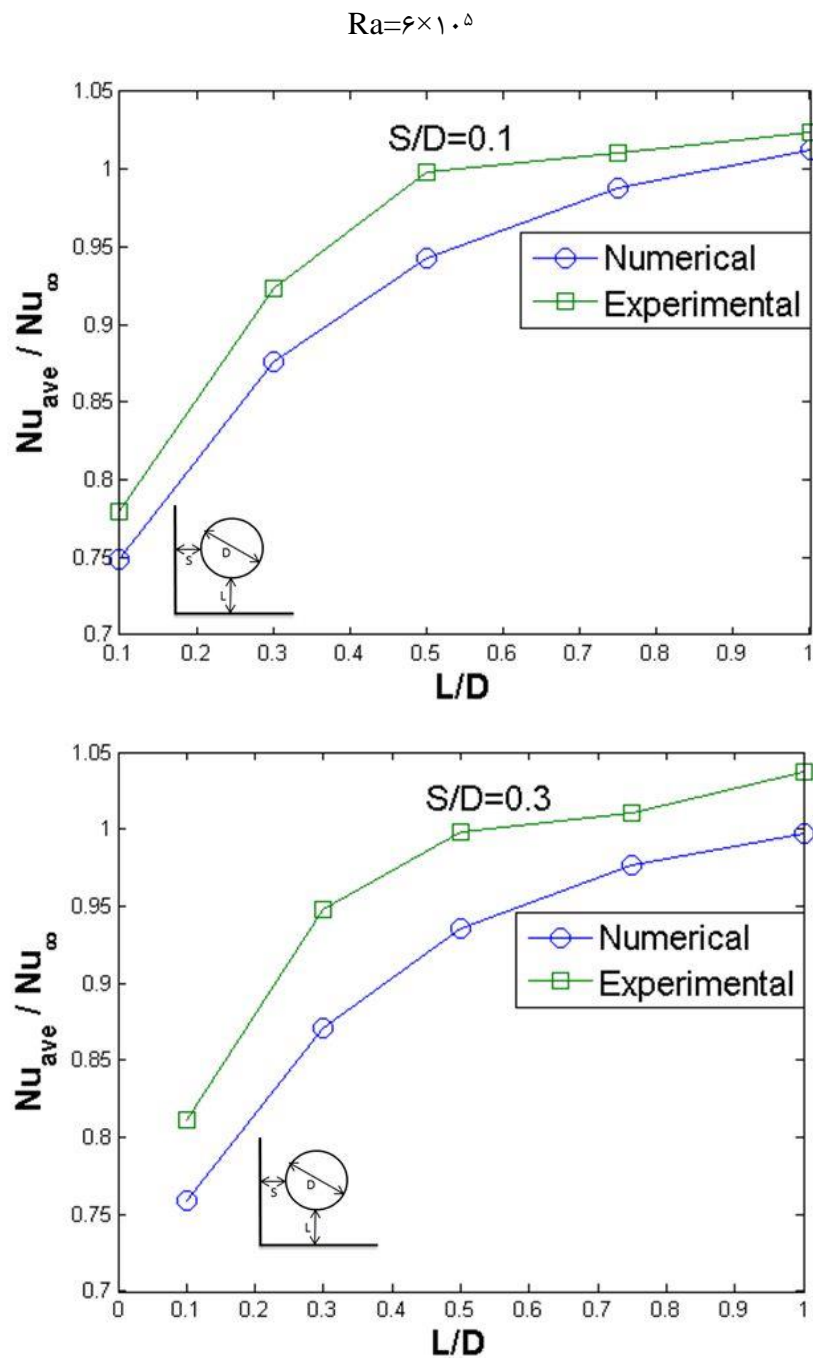


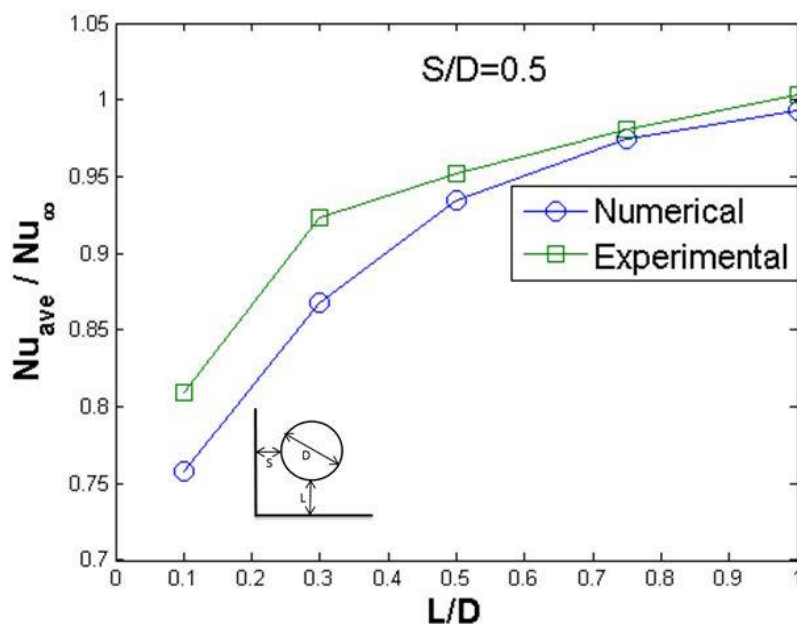
شکل (۵-۲۸) مقایسه تغییرات عدد نوسلت متوسط آزمایشهای تجربی با نتایج عددی در رایلی 3×10^5

در شکل (۵-۲۸) تغییرات عدد نوسلت متوسط به ازای مقادیر مختلف L/D و S/D از روش عددی و آزمایشگاهی در عدد رایلی 3×10^5 نشان داده شده و با هم مقایسه گردیده اند. همان طور که شکل

فوق نشان می دهد اختلاف این نتایج بسیار ناچیز بوده و می توان از صحت نتایج اطمینان حاصل نمود.

برای بررسی بیشتر، مقایسه نتایج در عدد رایلی 6×10^5 نیز در شکل (۵-۲۹) نشان داده شده است.





شکل (۵-۲۹) مقایسه تغییرات عدد نوسلت متوسط آزمایشهای تجربی با نتایج عددی در رایلی 6×10^5

شکل (۵-۲۹) نشان می دهد، نتایج مربوط به عدد رایلی 6×10^5 نیز تطابق خوبی بین داده های عددی و آزمایشگاهی نشان می دهد.

۵-۳- جمع بندی نتایج

در این پایان نامه انتقال حرارت جا بجایی آزاد به یک استوانه سرد افقی که در زیر یک سقف عایق و محصور بین دو سطح عایق عمود بر هم قرار دارند بصورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این قسمت با توجه به مقایسه هایی که بین مطالعات حاضر و نتایج سایر محققان قبل انجام گرفت، نتایج نهایی بر اساس روشهای تجربی و عددی ارائه شد که بطور خلاصه عبارتند از:

- برای استوانه ای که در زیر یک سقف عایق قرار دارد با افزایش عدد رایلی تغییرات عدد نوسلت محلی در زاویه بیشتری نسبت به رأس استوانه اتفاق می افتد یعنی با افزایش عدد رایلی هوا در زاویه بزرگتری از وجود صفحه در زیر استوانه آگاه شده و تغییرات عدد نوسلت

محلی از آن زاویه به ازای مقادیر مختلف L/D آغاز می شود.

- با افزایش عدد رایلی برای استوانه در زیر یک سقف عایق، نسبت عدد نوسلت متوسط به عدد نوسلت یک لوله در محیط بینهایت ($\frac{Nu}{Nu_{\infty}}$) در L/D کوچکتری به ۱ نزدیک تر می شود و مقدار آن به ازای یک L/D ثابت افزایش می یابد که این بدان معنی است که با افزایش عدد رایلی اثرات صفحه عایق بر میزان انتقال حرارت کاهش می یابد.
- بر اساس کلیه اندازه گیری ها، برای یک استوانه در زیر سقف عایق رابطه (۵-۱) در محدوده عدد رایلی بین 10^4 تا 10^6 ارائه شد.
- برای یک استوانه که در بین دو صفحه عایق عمود بر هم محصور است با افزایش فاصله استوانه از صفحه قائم نسبت به قطر استوانه (S/D) تقارن عدد نوسلت محلی حول نقطه پایین استوانه ($\theta=180^\circ$) بیشتر می شود.
- تأثیر پذیری عدد نوسلت متوسط از صفحه قائم بسیار کمتر از صفحه افقی است با این وجود با افزایش عدد رایلی میزان تأثیر پذیری عدد نوسلت متوسط از دیواره قائم کمتر می شود.
- با افزایش نسبت فاصله صفحه افقی به قطر استوانه (L/D) تا مقدار ۱ عدد نوسلت متوسط در یک S/D خاص به صورت صعودی افزایش می یابد در حالی که زمانی که صفحه قائم وجود ندارد در همان عدد رایلی به ازای مقادیر کمتر L/D مقدار عدد نوسلت متوسط ثابت می ماند.
- با وجودی که تغییر فاصله صفحه قائم از استوانه، تأثیر کمی بر عدد نوسلت متوسط دارد اما وجود این صفحه سبب کاهش چشمگیر عدد نوسلت متوسط نسبت به زمانی که این صفحه وجود ندارد، می شود.
- وجود صفحه قائم به خصوص در S/D کم باعث خروج خطوط جریان به صورت مایل از زیر استوانه می شود همچنین وجود این صفحه باعث می شود که ضخامت لایه مرزی در سمت چپ و راست استوانه متفاوت باشد که آن به علت نداشتن فضای کافی برای نفوذ هوا به آن ناحیه شده و یک مکش نسبی در آنجا به وجود می آید.

- وجود صفحه افقی به خصوص در L/D کم، سبب می شود که خطوط جریان به صورت مایل از زیر استوانه خارج شوند.

۵-۴- پیشنهاداتی جهت تحقیقات آینده

به منظور ادامه پژوهش در زمینه انتقال حرارت جا بجایی آزاد به استوانه های افقی موضوعات زیر برای ارائه در تحقیقات آینده پیشنهاد می شود:

- بررسی تجربی و عددی انتقال حرارت جابجایی آزاد به ردیف افقی استوانه هایی با قطرهای مختلف که در بالای یک سقف افقی و عایق و یا غیر عایق قرار گرفته اند.
- بررسی تجربی و عددی انتقال حرارت جا بجایی آزاد به ردیف افقی استوانه هایی که در بالای یک سطح شیب دار قرار گرفته اند.
- بررسی تجربی انتقال حرارت جا بجایی آزاد از ردیف افقی استوانه هایی گرم که در زیر یک سقف عایق قرار گرفته اند برای محدوده عدد رایلی بزرگ 10^4 الی 10^6 .
- مطالعه موارد فوق برای استوانه ای با شار ثابت.
- مطالعه انتقال حرارت به ردیف افقی استوانه های افقی زیر یک سقف در حالت جا بجایی ترکیبی آزاد و اجباری
- بررسی تجربی و عددی انتقال حرارت جا بجایی آزاد به ردیف افقی استوانه هایی که محصور بین دو سطح عایق عمود بر هم قرار گرفته اند برای محدوده عدد رایلی بزرگ 10^4 الی 10^6 .
- بررسی تجربی و عددی انتقال حرارت جا بجایی آزاد به استوانه افقی که محصور بین دو سطح عایق عمود بر هم قرار گرفته است برای محدوده عدد رایلی کم 10^1 الی 10^4 .

مراجع

اشتیاقی الف.ح ، پایان نامه ارشد: "مطالعه تجربی و عددی انتقال حرارت جابجایی آزاد از سه استوانه

افقی همدم در زیر یک سقف عایق"، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، (۱۳۸۷)

رضایی ا.ع، ضیاء بشر حق م و یوسفی ت، "بررسی اثر موقعیت لوله مابین دو دیوار عایق بر

روی عدد نوسلت موضعی"، دوازدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران (۱۳۸۷)

- Arora J. S, Baenziger, G. "Uses of artificial intelligence in design and optimization." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 54 (1986): 303-323.
- B, Berer M. *Encyclopedia of Materials Science and Engineering*. Massachusetts, n.d.
- Bejan A, Fower A.J, Stanescue G. "The Optimal Spacing Between Horizontal Cylinders in a Fixed Volume Cooled by Natural Convection." *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1995: 2047-2055.
- Chatha A, Fakheri A. "Experimental investigation of natural convection heat transfer from a horizontal array of three heated cylinders." *Proceedings of the 2005 ASME International Mechanical Engineering Conference and Exposition*. Florida, 2005.
- Corcione, M. "Correlating Equations for Free Convection Heat Transfer From Horizontal Isothermal Cylinders Set in a Vertical Array." *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2005: 3660-3673.
- Correa M, Parra R, Vidal A, Rodriguez J, Aguilera M.E, Gonzalez D. "Natural convection around a horizontal cylinder near an adiabatic cover wal." *Proceeding of Fourth ICCHMT*, 2005: 336.
- Decker J. E, Pekelsky J. R. "Gauge Block Calibration by Optical Interferometry at the National Research Council of Canada." *Measurement Science Conference*. Pasadena, 1997.
- Eckert E. R, G. Goldstein. *Measurements in Heat Transfer*. 2nd. New York: McGrawHill, Inc, 1972.
- Eckert E. R. G, Soehngen E. E. "Studies on Heat Transfer in Laminar Free Convection with the Mach-Zehnder Interferometer." AF Technical Report 5747, Ohio, 1948.
- Farouk B, Guceri, S. I. "Natural convection from horizontal cylinders in interacting flow fields." *Int. J. Heat and Mass Transfer* 26 (1983): 231-243.
- Herraez J. V, Belda R. "A Study of Free Convection in Air Around Horizontal Cylinders of Different Diameter Based on Holographic Interferometry." *Int. J. Therm. Sci*, 2002: 261-267.
- Koizumi H, Hosokawa I. "Chaotic behavior and heat transfer performance of natural convection around a hot horizontal cylinder affected by a flat ceiling." *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 1996: 1081-1091.
- Kuehn T.H, Goldstein R.J. "Numerical solution to the Navier-Stokes equations for laminar natural convection about a horizontal isothermal circular cylinder." *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 1980: 971-979.

- Lawrence G. B, Jardine G. E, Naylor D, Machin A. D. "Free convection from a horizontal heated cylinder located below a ceiling." *Transaction of the CSME*, 1998: 19-35.
- M, Badr H. "Heat Transfer in Transient Boyancy Driven Flow Adjacent to a Horizontal Rod." *Int. J. Heat Mass Transfer No 30*, 1987: 1997-2012.
- Sadeghipour M, Asheghi M. "Free Convection Heat Transfer from Arrays of Vertically Separated Horizontal Cylinders at Low Rayleigh Numbers." *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1994: 103-109.
- Saito T, Ishiguro R, Fujishima Y. "Natural convection heat transfer around a horizontal cylinder (effect of a horizontal plate placed above the cylinder)." *Proceeding of the 6th national heat transfer symposium of Japan*. 1969. 61-64.
- Tahavvor A.R, Yaghoubi M. "Natural cooling of horizontal cylinder using Artificial Neural Network (ANN) ." *International Communications in Heat and Mass Transfer* , 2008: 1196–1203.
- Tokani H, Kuriyama M, Harada E, Konno H. "Natural convection heat transfer from vertical and inclined arrays of horizontal cylinders to air." *J. Chemical Engineering of Japan*, 1997: 728-734.
- Tokura H, Saito K, Kisinami K, Muramoto M. "An Experimental Study of Free Convection Heat Transfer from a Horizontal Cylinder in a Vertical Array Set in Free Space Between Parallel Walls." *J. heat Transfer*, 1983: 102-107.
- V, Patankar C. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: Hemisphere /McGraw-Hill, 1980.
- V.T, Morgan. "The Overall Convective heat transfer from smooth circular cylinders." *Advances in Heat Transfer*, 1975: 199-264.
- Yaghoubi M, Ashjaee M, Eshtiaghi A.H, Yousefi T. "Thermal study of an array of inline horizontal cylinders below a nearly adiabatic ceiling." *Experimental Thermal and Fluid Science* 33, 2009: 232-239.
- Yaghoubi M, Khoshnazar H. "Experimental study of natural frost formation on a horizontal cylinder." *AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference*. Chicago, 2010.
- Yaghoubi M, Nabovati B. "Experimental study of condensation heat transfer over an inclined tube." *20th National and 9th International ISHMT-ASME Heat and Mass Transfer Conference*. 2010.

Abstract

Free convection from horizontal pipes or tubes placed over a floor carrying cold fluid encounters in many refrigeration, air-conditioning and freezing equipments. Heat gain by such cylinders which have different boundary conditions from a horizontal cylinder surrounded by an infinite medium is not the same. Accurate thermal exchanges with environment for such cylinders are important for any design simulation. Heat transfer from a single horizontal cylinder surrounded by infinite fluid has been studied extensively but for a single cylinder close over a floor or an angle is not analyzed yet.

In the present analysis, steady state two-dimensional laminar free convection heat transfer from a single horizontal, isothermal cylinder located above a nearly adiabatic floor and inclosed between two flat adiabatic walls is studied experimentally and numerically.

For experimental measurements effects of cylinder distance from horizontal floor to its diameter (L/D) changes from 0.1 to 1.5 and vertical distance to its diameter (S/D) changes from 0.1 to 1, on heat transfer coefficient from cylinder are investigated for Rayleigh numbers 3×10^5 and 6×10^5 . Cylinder diameter of 8 cm are tested in a control room for various cylinder surface temperature and room conditions.

To carry numerical computations the governing equations of laminar natural convection were solved using finite volume technique with a C++ code obtained from OpenFOAM (an open source software). Computations are made for wide range of Rayleigh numbers from 10^4 to 10^6

and comparison are made for the corresponding experimental measurements.

Flow stream lines and isothermal lines are plotted for different cylinder position. Cold plume flow downstream strikes to the horizontal floor. After collision the plume divide to two parts. Each part moves horizontally away from cylinder over the horizontal floor. For the present of vertical floor, the plume will moves opposite to the vertical wall after collision to the floor. The finite space between cylinder and floor makes the flow different from those cylinders in an infinite medium.

Results indicate that variation of average heat transfer coefficient of cold cylinder, depends highly on L/D but variation of S/D dose not effect on it much despite the existence of vertical floor has high effect on the value of convective coefficient.

By use of experimental and numerical results a new correlation from a single horizontal cylinder placed close on a floor with adiabatic thermal exchange is estimated.