

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه بیرجند
دانشکده مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)

بررسی همرفت طبیعی حول هندسه‌های مختلف داخل
محفظه‌های بسته مربعی

نگارش:

حجت خزیمه نژاد

استاد راهنما:

دکتر سید علی میربزرگی

آبان ۱۳۹۱

تقدیم:

این پایان نامه را به تمام کسانی که برای علم قداست و حرمت قائل هستند و آن را فقط و فقط برای خدمت به بشریت می آموزند و آموزش می دهند تقدیم می کنم.

سپاسگزاری:

در ابتدا بر خود واجب می‌دانم که از خداوند متعال که توفیق انجام این پایان‌نامه را به من عنایت فرمودند کمال شکرگزاری را داشته باشم و اگر نبود توفیقات الهی هرگز موفق به انجام این کار نمی‌گشتم. همچنین از جناب آقای دکتر سید علی میربزرگی که راهنمای اینجانب در طول انجام این پایان‌نامه بودند کمال تشکر را دارم. از آقای دکتر صفوی نژاد و آقای دکتر ذوالفقاری نیز به دلیل قبول زحمت داوری این کار سپاس‌گزاری می‌کنم. در انتها نیز از خانواده عزیزم به ویژه پدر و مادر مهربانم به خاطر فراهم آوردن محیطی آرام برای انجام پایان‌نامه‌ام قدردانی می‌نمایم.

چکیده

در این پایان‌نامه، موضوع جریان همرفت طبیعی اطراف استوانه‌هایی با سطح مقطع مختلف درون محفظه بسته مربعی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در این شبیه‌سازی دمای بالاتر T_h برای استوانه داخلی و دمای پایین‌تر T_c برای دیواره‌های محفظه فرض گردیده است. به دلیل این اختلاف دما، سیال عامل که در اینجا هوا در نظر گرفته شده است یک جریان همرفت طبیعی را در حضور شتاب ثقل درون محفظه به وجود می‌آورد. برای حل معادلات حاکم بر مساله‌ی فوق از روش حجم محدود استفاده گردیده است. در این حل برای ارزیابی توام جملات پخش و جابه‌جایی از طرح هیبرید و برای برقراری ارتباط بین میدان سرعت و فشار از الگوریتم SIMPLE استفاده شده است. معادلات به روش ADI با استفاده از حلگر TDMA به صورت خط به خط حل گردیده است. همچنین برای تولید شبکه‌ی مورد نظر از روش قدرتمند جبری استفاده شده است. برای اعتبارسنجی برنامه عددی نوشته شده، نتایج حاصل از حل با یک مقاله معیار یعنی مقاله کیم و همکاران مقایسه گردید که تطابق بسیار خوبی بین آنها مشاهده شد. جریان همرفت طبیعی می‌تواند از جنبه‌های متنوعی مورد بررسی قرار گیرد. یکی از این جنبه‌هایی که کمتر به آن پرداخته شده است بررسی تغییر سطح مقطع استوانه است که در مطالعه حاضر برای یک بیضی با نسبت‌های منظری مختلف بررسی گردیده است. از طرف دیگر تاثیر تغییر شعاع در یک استوانه دایروی بر نرخ انتقال حرارت از محفظه مورد مطالعه قرار گرفت و در انتها تاثیر تغییر مکان عمودی استوانه با دو سطح مقطع دایره و مربع مطالعه شده است.

نتایج بررسی نسبت‌های منظری در استوانه بیضوی در سه عدد رایلی مختلف 10^3 ، 10^4 و 10^5 نشان می‌دهد که با افزایش عدد رایلی و نسبت منظری استوانه نرخ انتقال حرارت از محفظه نیز افزایش یافته است. به عنوان مثال، با افزایش عدد رایلی از 10^4 به 10^5 برای استوانه بیضوی با نسبت منظری نیم، ناسلت متوسط حدود ۸۰ درصد میزان اولیه و با تغییر نسبت منظری از صفر به یک در رایلی 10^5 ، ناسلت متوسط حدود ۴۰ درصد میزان اولیه افزایش یافته است. از طرف دیگر با بررسی حالات عایق و غیر عایق بودن نیمه‌های بالایی و پایینی بیضی نشان داده شد که برای حالتی که نیمه بالایی بیضی داغ است انتقال حرارت بیشتری از محفظه وجود خواهد داشت. در هنگام بررسی توزیع محلی ناسلت اطراف دیواره‌های محفظه در حضور استوانه بیضوی بدون عایق مشاهده شد که مقدار ناسلت در گوشه‌های محفظه‌ی مربعی تقریباً صفر است. این به معنای کمترین نرخ انتقال حرارت از این نواحی است. بعلاوه بررسی تاثیر تغییر مکان عمودی استوانه‌ها برای دو سطح مقطع دایره و مربع نشان داد که با دور شدن استوانه از مرکز محفظه به سمت دیواره‌های فوقانی و تحتانی، نرخ انتقال حرارت روند صعودی خواهد داشت. ولی این نرخ انتقال حرارت در حالتی که استوانه در نیمه پایین محفظه است از حالت نظیرش در

نیمه بالایی بیشتر می‌باشد. برای نمونه‌ای از نتایج، در رابلی 10^5 زمانی که استوانه دایروی از موقعیت مرکزی خود به اندازه ۱۰ درصد H در راستای قائم به سمت بالا جابه‌جا می‌شود ناسلت حدود ۵ درصد میزان اولیه افزایش می‌یابد در حالی که آن زمانی که به همین اندازه در راستای قائم اما رو به پایین جابه‌جا شود ناسلت به اندازه بیشتری یعنی به میزان ۹ درصد میزان اولیه افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: همرفت طبیعی، استوانه، محفظه بسته مربعی، روش حجم محدود

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ج	فهرست علایم و نشانه‌ها
ه	فهرست جدول‌ها
و	فهرست شکل‌ها
۱	فصل ۱- مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- همرفت
۵	۱-۲-۱- همرفت اجباری
۵	۲-۲-۱- همرفت طبیعی
۷	۱-۲-۲-۱- همرفت طبیعی حول اجسامی با هندسه‌های مختلف درون محفظه‌های بسته
۹	فصل ۲- مروری بر کارهای گذشته
۱۰	۱-۲- مقدمه
۱۱	۲-۲- مرور مطالعات گذشته‌ی مرتبط با کار حاضر
۲۰	۳-۲- استراتژی پیشرفت پایان‌نامه
۲۲	فصل ۳- معادلات حاکم و روش حل عددی آنها
۲۳	۱-۳- فرضیات
۲۴	۲-۳- معادلات حاکم
۲۴	۱-۲-۳- معادله بقای جرم
۲۵	۲-۲-۳- معادله بقای ممنت
۲۷	۳-۲-۳- معادله بقای انرژی
۲۸	۳-۳- بی‌بعد سازی معادلات حاکم
۲۹	۴-۳- شرایط مرزی
۲۹	۵-۳- روش حل عددی معادلات حاکم
۲۹	۱-۵-۳- تولید شبکه
۳۰	۱-۱-۵-۳- تولید شبکه یکنواخت در مختصات کارتیزین
۳۳	۲-۱-۵-۳- تولید شبکه غیریکنواخت در مختصات کارتیزین
۳۶	۳-۱-۵-۳- نحوه ارزیابی وزنی کمیات در محل وجوه
۳۶	۴-۱-۵-۳- تولید شبکه منحنی الخط
۳۹	۲-۵-۳- روش حجم محدود
۴۳	۱-۲-۵-۳- انفصال معادلات ممنت
۴۴	۲-۲-۵-۳- انفصال معادله‌ی انرژی

۴۵	..... ۳-۲-۵-۳- انفصال معادله‌ی پیوستگی
۴۷	..... ۳-۵-۳- محاسبه‌ی باقیمانده معادلات
۴۸	..... ۳-۵-۴- دستگاه مختصات عمومی
۴۸	..... ۳-۵-۴-۱- ملاحظات مقدماتی
۴۸	..... ۳-۵-۴-۲- انفصال معادله لاپلاس در مختصات منحنی الخط
۵۵	..... ۳-۵-۵- الگوریتم حل عددی به روش تکرار
۵۸	..... فصل ۴- نتایج و بحث
۵۹	..... ۴-۱- مقدمه
۶۰	..... ۴-۲- تنظیم داده‌های ورودی مساله
۶۱	..... ۴-۳- اعتبارسنجی برنامه عددی نوشته شده
	..... ۴-۴- موضوع اول: بررسی اثر نسبت منطری استوانه بیضوی بر نرخ انتقال حرارت از محفظه بسته
۶۴	..... مربعی
	..... ۴-۵- موضوع دوم: بررسی تاثیر تغییر قطر استوانه‌ی دایروی بر نرخ انتقال حرارت از محفظه بسته
۷۶	..... مربعی
۷۷	..... ۴-۵-۱- بررسی تاثیر تغییر قطر در عدد رایلی 10^4
۸۰	..... ۴-۵-۲- بررسی تاثیر تغییر قطر در عدد رایلی 10^5
۸۲	..... ۴-۵-۳- توزیع ناسلت محلی اطراف دیواره‌های محفظه بسته مربعی در دو رایلی 10^4 و 10^5
۸۵	..... ۴-۵-۴- مقایسه ناسلت کل محفظه برای قطرهای مختلف استوانه در رایلی 10^4 با 10^5
	..... ۴-۶- موضوع سوم: مقایسه اثر شکل مقطع دایروی و مربعی بر نرخ انتقال حرارت از محفظه بسته
۸۷	..... مربعی در مکان‌های عمودی مختلف
۹۲	..... ۴-۶-۱- مقایسه اثر سطح مقطع دایروی و مربعی بر نرخ انتقال حرارت در رایلی 10^5
۹۵	..... فصل ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۹۶	..... ۵-۱- نتیجه‌گیری
۹۷	..... ۵-۲- پیشنهادات
۹۸	..... ضمیمه أ - نمونه‌ای از شبکه‌های جبری تولید شده غیر از شبکه‌های مورد نیاز در این پایان‌نامه: ...
۱۰۹	..... فهرست مراجع
۱۱۱	..... واژه نامه:

فهرست علائم و نشانه‌ها

علامت اختصاری

عنوان

A	مساحت وجوه در یک حجم کنترل دلخواه شبکه تولید شده
a	قطر بزرگ استوانه بیضوی بر حسب متر
AR	نسبت منظری
b	قطر کوچک استوانه بیضوی بر حسب متر
$Conv$	جمله جابه‌جایی در معادلات منفصل شده
D	مشتق مادی
Dif	جمله پخش (نفوذ) در معادلات منفصل شده
e	انرژی کل واحد جرم سیال
F_b	نیروی حجمی در معادله ممنتوم
f_1	ضریب انبساط در راستای x (برای متراکم کردن شبکه تولید شده)
f_2	ضریب انبساط در راستای y (برای متراکم کردن شبکه تولید شده)
f_x	ضریب وزنی در راستای x
f_y	ضریب وزنی در راستای y
g	شتاب ثقل، بر حسب متر بر مجذور ثانیه
H	طول محفظه بسته مربعی، بر حسب متر
k	هدایت گرمایی بر حسب وات بر متر کلوین
n	جهت بردار عمود بر دیواره
\overline{Nu}	ناسلت متوسط
N_i	تعداد نقاط مرکزی در راستای x
N_j	تعداد نقاط مرکزی در راستای y
P	فشار بی‌بعد
Pr	عدد پرانتل
R	شعاع استوانه دایروی بر حسب متر
Ra	عدد رایلی
Res	باقیمانده
S	مسافت در طول دیواره محفظه بسته مربعی بر حسب متر
T	دما بر حسب کلوین
T_c	دما کمینه بر حسب کلوین
T_h	دما بیشینه بر حسب کلوین
U	سرعت بی‌بعد در راستای x
u	سرعت در راستای x بر حسب متر بر ثانیه
V	سرعت بی‌بعد در راستای y
v	سرعت در راستای y بر حسب متر بر ثانیه
w	سرعت در راستای z بر حسب متر بر ثانیه
X	مختصه بی‌بعد در راستای افق

x	مختصه طولی کارتیزین در راستای افق بر حسب متر
x_C	مختصه x نقاط گوشه
x_P	مختصه x نقاط مرکزی
Y	مختصه بی بعد در راستای عمود
y	مختصه طولی کارتیزین در راستای عمود بر حسب متر
y_C	مختصه y نقاط گوشه
y_P	مختصه y نقاط مرکزی
z	مختصه طولی کارتیزین در راستای عمود بر صفحه کاغذ بر حسب متر

نمادهای یونانی

α	ضریب نفوذ گرما، بر حسب مترمربع بر ثانیه
β	ضریب حجمی انبساط گرمایی بر حسب بر کلوین
θ	دمای بی بعد
ϑ	ضریب لزجت سینماتیکی بر حسب متر مربع بر ثانیه
μ	ضریب لزجت دینامیکی بر حسب کیلوگرم بر متر ثانیه
ρ	چگالی سیال بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب
∇	دل (گردابان)
$\nabla \cdot$	دیورژانس
τ	تنش بر حسب نیوتن بر متر مربع
Φ	تابع اتلافات لزجی
ϕ	متغیر عمومی در معادلات انفصالی
Γ	ضریب پخش در معادلات انفصالی

زیروند

en	محفظه
e	وجه شرقی یک حجم کنترل دلخواه در شبکه تولید شده
n	وجه شمالی یک حجم کنترل دلخواه در شبکه تولید شده
s	وجه جنوبی یک حجم کنترل دلخواه در شبکه تولید شده
w	وجه غربی یک حجم کنترل دلخواه در شبکه تولید شده

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۴۳	جدول ۱-۳: ضرایب معادله‌ی انتقال مربوط به طرح هیبرید
۴۷	جدول ۲-۳: ضرایب معادله‌ی تصحیح فشار
۵۳	جدول ۳-۳: ضرایب معادله‌ی لاپلاس در دستگاه مختصات عمومی منحنی‌الخط نامتعامل
۶۰	جدول ۱-۴: خواص ترموفیزیکی هوا به عنوان سیال عامل در دمای T_c
۶۲	جدول ۲-۴: Nu_{en} به دست آمده در تعداد گره‌های مختلف
۶۲	جدول ۳-۴: مقایسه Nu_{ave} به دست آمده در کار حاضر با نتایج کار کیم و همکاران

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

شکل‌های فصل اول:

- شکل ۱-۱ شیوه‌های کلی انتقال گرما شامل: هدایت، همرفت و تابش [1] ۳
- شکل ۲-۱ انتقال گرما از طریق همرفت اجباری ۴
- شکل ۳-۱ انتقال گرما از طریق همرفت طبیعی ۴
- شکل ۴-۱ شرایط سیال بین صفحات بزرگ افقی با دماهای مختلف (الف) شیب دمای ناپایدار (ب) شیب دمای پایدار ۶
- شکل ۵-۱ تشکیل لایه مرزی روی صفحه گرم عمودی ۷

شکل‌های فصل دوم:

- شکل ۱-۲ شبکه محاسباتی استفاده شده در کار روی چودهاری و همکاران [۱۲] (این شبکه حول یک استوانه دایروی درون یک محفظه بسته مربعی در نصف محدوده حل تولید شده است) ۱۲
- شکل ۲-۲ شبکه استفاده شده در کار دی و دالال [۱۳] (این شبکه حول یک استوانه مربعی درون یک محفظه بسته مربعی در نصف محدوده حل تولید شده است) ۱۳
- شکل ۳-۲ شماتیکی از کار کیم و همکاران [۱۴]، شامل یک استوانه دایروی داغ با تغییر موقعیت عمودی درون یک محفظه بسته مربعی سرد ۱۴
- شکل ۴-۲ شماتیکی از کار سو و همکاران [۱۵]، شامل یک استوانه مثلثی (متساوی الاضلاع) داغ با تغییر موقعیت زاویه‌ای درون یک محفظه دایروی سرد ۱۵
- شکل ۵-۲ شماتیکی از کار لی و همکاران شامل استوانه دایروی داغ با تغییر موقعیت (a) افقی (b) قطری درون یک محفظه بسته مربعی سرد [۱۶] ۱۶
- شکل ۶-۲ روند تغییرات Nu_{eff} نسبت به تغییر موقعیت استوانه (a) افقی (b) قطری در رابلی‌های مختلف برای کار لی و همکاران [۱۶] ۱۶
- شکل ۷-۲ شبکه تولید شده در کار کاستا و ریمانندو [۱۷]، شامل یک استوانه دایروی با گره‌های سازمان یافته یکنواخت درون یک محفظه بسته مربعی ۱۷
- شکل ۸-۲ شبکه تولید شده حول یک استوانه دایروی درون یک محفظه مربعی در کار حسین و حسین [۱۸] ۱۸
- شکل ۹-۲ شبکه تولید شده حول یک استوانه بیضوی درون یک محفظه دایروی در کار قاسمی و همکاران [۲۰] ۱۹
- شکل ۱۰-۲ شماتیکی از کار شیخ‌الاسلامی و همکاران [۲۱]، شامل یک استوانه دایروی داغ درون یک محفظه مربعی سرد پر شده از نانو سیال در حضور یک میدان مغناطیسی ۲۰

شکل‌های فصل سوم:

- شکل ۱-۳ شماتیکی از فیزیک مساله حاضر، استوانه دما بالا درون یک محفظه مربعی دما پایین به عمق واحد ۲۳
- شکل ۲-۳ شماتیکی از نقاط گوشه، حجم کنترل‌ها و نقاط مرکزی ۳۱
- شکل ۳-۳ نمونه‌ای از شبکه یکنواخت ایجاد شده به روش جبری با تعداد گره 100×100 ۳۳
- شکل ۴-۳ شماتیکی از طرح شبکه غیریکنواخت یک بعدی ۳۴
- شکل ۵-۳ نمونه‌ای از شبکه غیریکنواخت ایجاد شده به روش جبری با تعداد گره 100×100 و ضرایب انبساط $f_1=1/0.4$ و $f_2=1/0.4$ ۳۵

- شکل ۳-۶ شماتیکی از یک سلول عمومی (i,j) و دو سلول مجاور آن در شبکه غیریکنواخت..... ۳۶
- شکل ۳-۷ شماتیکی از یک محفظه بسته‌ی مربعی و استوانه‌ی داخلی آن ($R=0.2H$ و $L=H$)..... ۳۷
- شکل ۳-۸ نمونه‌ای از شبکه‌های ایجاد شده به روش جبری حول استوانه دایروی درون یک محفظه‌ی بسته مربعی..... ۳۹
- شکل ۳-۹ شبکه‌بندی و نام‌گذاری محلی سلول‌های مجاور یک سلول مرکزی..... ۴۲
- شکل ۳-۱۰ نمونه‌ای از شبکه منحنی‌الخط و گره‌های محاسباتی..... ۴۹
- شکل ۳-۱۱ شماتیکی از مولفه‌های اسکالر بردار سطح در محل وجوه e و n یک سلول مرکزی P ۵۱
- شکل ۳-۱۲ شماتیکی از بعضی پارامترهای معرفی شده در مختصات عمومی..... ۵۳
- شکل ۳-۱۳ فلوجارت کلی حل جریان همرفت طبیعی در یک محفظه بسته..... ۵۶
- شکل ۳-۱۴ فلوجارت الگوریتم *SIMPLE* برای حل معادلات ممنتوم و پیوستگی (گام اول در فلوجارت شکل ۳-۱۳)..... ۵۷

شکل‌های فصل چهارم:

- شکل ۴-۱ حوزه هندسی جریان همرفت طبیعی شامل محفظه مربعی و استوانه دایروی داخل آن به عمق واحد..... ۶۱
- شکل ۴-۲ مقایسه الگوهای دما و جریان در کار حاضر با کار کیم و همکاران [۱۴]..... ۶۳
- شکل ۴-۳ شماتیکی از محفظه بسته و استوانه داخلی با سطح مقطع بیضی در $b/H=0.2$ ۶۴
- شکل ۴-۴ نمونه‌ای از شبکه‌ی جبری تولید شده حول استوانه‌ی بیضی شکل درون محفظه‌ی بسته مربعی..... ۶۵
- شکل ۴-۵ (الف) خطوط هم‌دما (ب) خطوط جریان اطراف استوانه‌ی بیضوی درون یک محفظه بسته مربعی در عدد رایلی 10^3 ۶۵
- شکل ۴-۶ (الف) خطوط هم‌دما (ب) خطوط جریان اطراف استوانه‌ی بیضوی درون یک محفظه بسته مربعی در عدد رایلی 10^4 ۶۷
- شکل ۴-۷ (الف) خطوط هم‌دما (ب) خطوط جریان اطراف استوانه‌ی بیضوی درون یک محفظه بسته مربعی در عدد رایلی 10^5 ۶۸
- شکل ۴-۸ توزیع ناسلت محلی روی دیواره‌های محفظه بسته مربعی در حضور استوانه‌ی بیضوی در اعداد رایلی 10^3 ، 10^4 و 10^5 ۷۰
- شکل ۴-۹ (الف) خطوط هم‌دما (ب) خطوط جریان اطراف استوانه‌ی بیضوی درون یک محفظه بسته دایروی در عدد رایلی 10^5 ۷۱
- شکل ۴-۱۰ توزیع ناسلت محلی روی دیواره‌ی محفظه بسته دایروی در حضور استوانه‌ی بیضوی در عدد رایلی 10^5 ۷۲
- شکل ۴-۱۱ مقایسه الگوهای دمایی به دست آمده اطراف استوانه بیضوی با (الف) نیمه پایین عایق (ب) بدون عایق (ج) نیمه بالا عایق در رایلی 10^5 ۷۲
- شکل ۴-۱۲ توزیع ناسلت محلی اطراف محفظه مربعی برای سه بیضی با نیمه‌ی بالایی عایق، نیمه‌ی پایینی عایق و بدون عایق..... ۷۳
- شکل ۴-۱۳ (الف) خطوط هم‌دما (ب) خطوط جریان حول استوانه با سطح مقطع مستطیلی در هر سه رایلی 10^3 ، 10^4 و 10^5 ۷۴
- شکل ۴-۱۴ (الف) خطوط هم‌دما (ب) خطوط جریان حول استوانه دایروی در هر سه رایلی 10^3 ، 10^4 و 10^5 ۷۵
- شکل ۴-۱۵ توزیع ناسلت کلی دیواره‌های محفظه در رایلی‌های مختلف برای هر سه استوانه‌ی بیضوی، مستطیلی و دایروی..... ۷۶
- شکل ۴-۱۶ تغییرات قطر استوانه‌ی دایروی درون محفظه بسته مربعی..... ۷۶
- شکل ۴-۱۷ نمونه‌ای از شبکه جبری تولید شده حول استوانه دایروی با قطر $0.9H$ درون محفظه بسته مربعی..... ۷۷
- شکل ۴-۱۸ (الف) خطوط هم‌دما (ب) خطوط جریان حول استوانه دایروی با قطرهای مختلف در رایلی 10^4 ۷۸
- شکل ۴-۱۹ (الف) خطوط هم‌دما (ب) خطوط جریان حول استوانه دایروی با قطرهای مختلف در رایلی 10^5 ۸۱

شکل ۴-۲۰ توزیع ناسلت محلی روی دیواره‌های محفظه بسته مربعی در حضور استوانه‌های دایروی با نسبت‌های ۲R/H	مختلف در رایلی 10^4	۸۴
شکل ۴-۲۱ توزیع ناسلت محلی روی دیواره‌های محفظه بسته مربعی در حضور استوانه‌های دایروی با نسبت‌های ۲R/H	مختلف در رایلی 10^5	۸۵
شکل ۴-۲۲ توزیع ناسلت کل محفظه در شعاع‌های مختلف استوانه دایروی در رایلی 10^4 و 10^5.....	.....	۸۶
شکل ۴-۲۳ شماتیکی از استوانه دایروی و مربعی درون یک محفظه بسته مربعی.....	.....	۸۷
شکل ۴-۲۴ شبکه ایجاد شده جبری حول استوانه (الف) دایروی (ب) مربعی درون محفظه مربعی.....	.....	۸۸
شکل ۴-۲۵ خطوط هم‌دما و جریان حول استوانه دایروی درون محفظه مربعی.....	.....	۸۹
شکل ۴-۲۶ خطوط هم‌دما و جریان حول استوانه مربعی درون محفظه مربعی.....	.....	۸۹
شکل ۴-۲۷ توزیع ناسلت محلی اطراف دیواره‌های محفظه بسته مربعی در حضور استوانه‌های دایروی و مربعی در مکان‌های عمودی مختلف ($\delta = -0/2, -0/1, 0, 0/1, 0/2$) در رایلی 10^4.....	.....	۹۱
شکل ۴-۲۸ خطوط هم‌دما و جریان حول استوانه دایروی درون محفظه مربعی در مکان‌های عمودی مختلف برای رایلی 10^5.....	.....	۹۲
شکل ۴-۲۹ خطوط هم‌دما و جریان حول استوانه مربعی درون محفظه مربعی در مکان‌های عمودی مختلف برای رایلی 10^5.....	.....	۹۳
شکل ۴-۳۰ توزیع ناسلت محلی اطراف دیواره‌های محفظه بسته مربعی در حضور استوانه‌های دایروی و مربعی در مکان‌های عمودی مختلف ($\delta = -0/2, -0/1, 0, 0/1, 0/2$) در رایلی 10^5.....	.....	۹۳
شکل ۴-۳۱ توزیع ناسلت کل محفظه در مکان‌های عمودی مختلف استوانه‌های دایروی و مربعی برای سه رایلی $10^3, 10^4$ و 10^5.....	.....	۹۴

فصل ١ - مقدمه

انتقال گرما^۱، انتقال انرژی بر اثر اختلاف دما، بین مرز مشخص دو سیستم ترمودینامیکی است. این ویژگی حالت دینامیک داشته و به صورت ایستا در ماده موجود نیست. انتقال گرما تابع مسیر است و فقط به حالت ماده بستگی ندارد. مقدار انتقال گرما در یک فرایند ترمودینامیکی که حالت سیستم تغییر می‌کند، نه تنها به اختلاف خالص ابتدا و انتهای فرایند، بلکه به چگونگی انجام آن نیز وابسته است.

چنانچه در شکل ۱-۱ نیز مشاهده می‌شود انتقال گرما به روش‌های مختلفی صورت می‌گیرد که به طور کلی می‌توان آنها را به سه دسته‌ی رسانش^۲، تابش^۳ و همرفت^۴ تقسیم بندی کرد. رسانش که پخش نیز نامیده می‌شود یک تغییر میکروسکوپیکی مستقیم انرژی جنبشی ذرات از طریق مرز بین دو سیستم است. هنگامی که یک جسم در دمایی متفاوت با جسم دیگر یا با محیط اطرافش باشد، گرما بین آنها جریان یافته به طوری که جسم و محیط اطراف دارای دمای مشابه می‌شوند که در این حالت، آن‌ها در تعادل گرمایی خواهند بود. این انتقال گرمای خودبه‌خودی همیشه از جسم با دمای بالاتر به جسم با دمای پایین‌تر صورت می‌گیرد. نوع دیگر انتقال گرما که در هر محیط شفاف (جامد یا سیال) و حتی در خلا نیز وجود دارد تابش نامیده می‌شود. در واقع تابش، انرژی گسیل شده توسط ماده‌ای است که در دمای معینی قرار دارد. بعضی از ویژگی‌های این انتقال انرژی به وسیله امواج الکترومغناطیسی و بعضی دیگر توسط تئوری کوانتوم مکانیک قابل تفسیر هستند هر چند که هیچ یک از این تئوری‌ها به تنهایی قادر به تفسیر کامل این انتقال نخواهند بود. نوع دیگر انتقال گرما هنگامی است که جریان توده‌ای سیال، انرژی گرمایی را همراه جریان ماده در سیال حمل می‌کند که به آن همرفت گفته می‌شود. جریان سیال به وجود آمده، ممکن است با استفاده از پمپ، فن و یا دیگر وسایل مکانیکی به صورت اجباری ایجاد شود که به آن همرفت اجباری^۵ و یا ممکن است به خاطر نیروهای شناوری ناشی از اختلاف چگالی سیال به علت اختلاف دما در سیال به وجود آید که به آن همرفت طبیعی^۶ گفته می‌شود.

^۱ Heat Transfer

^۲ Conduction

^۳ Radiation

^۴ Convection

^۵ Forced convection

^۶ Natural convection



شکل ۱-۱ شیوه‌های کلی انتقال گرما شامل: هدایت، همرفت و تابش [۱]

۱-۲- همرفت

شیوه انتقال گرمای همرفت از دو مکانیزم تشکیل می‌شود. علاوه بر انتقال انرژی ناشی از حرکت توده‌ای (ماکروسکوپیک) سیال، انرژی بر اثر حرکت تصادفی مولکولی (پخش) نیز منتقل می‌شود. حرکت توده‌ای سیال ناشی از این واقعیت است که در هر لحظه تعداد زیادی از مولکول‌ها به طور انبوهی با یکدیگر حرکت می‌کنند. از آنجا که انبوه مولکول‌ها حرکت تصادفی‌شان را حفظ می‌کنند، کل انتقال گرما ترکیبی از انتقال انرژی ناشی از حرکت تصادفی مولکول‌ها و انتقال انرژی ناشی از حرکت توده‌ای سیال است. معمولاً از واژه کنوکسیون برای این انتقال حرارت ترکیبی و از واژه ادوکسیون^۷ برای انتقال حرارت ناشی از حرکت توده‌ای سیال استفاده می‌شود [۲].

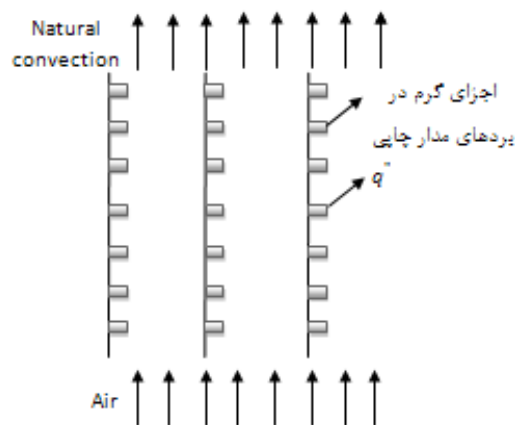
انتقال گرمای همرفت را بر حسب ماهیت جریان می‌توان رده‌بندی کرد. وقتی جریان توسط وسایل خارجی به وجود آمده باشد، همرفت اجباری داریم، مانند پنکه‌ای که اجزای گرم الکتریکی بردهای مدار چاپی را با همرفت اجباری خنک می‌کند (شکل ۱-۲). در مقابل، در همرفت طبیعی جریان بر اثر نیروهای شناوری (بالا نگهدارنده)^۸ به وجود می‌آید. این نیروها از اختلاف چگالی ناشی از تغییرات دما در سیال به وجود می‌آیند. انتقال گرما از اجزای گرم آرایه‌ی عمودی بردهای مدار چاپی در هوای ساکن نمونه‌ای از انتقال گرمای همرفت طبیعی است (شکل ۱-۳). دمای هوایی که با اجزای گرم تماس دارد افزایش می‌یابد و از این رو چگالی آن کم می‌شود. چون این هوا از هوای محیط سبک‌تر است نیروهای

^۷ Advection

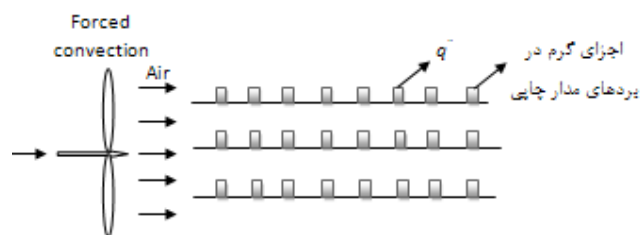
^۸ Buoyancy forces

شناوری، حرکتی عمودی رو به بالایی را ایجاد می‌کنند که به موجب آن هوای گرم از بردهای مدار بالا رفته و جریان هوای سردتر محیط جای‌گزین آن می‌شود.

اگرچه در شکل ۲-۱ همرفت اجباری خالص و در شکل ۳-۱ همرفت طبیعی خالص در نظر گرفته شده ولی شرایط همرفت اجباری و طبیعی ترکیبی نیز وجود دارد. مثلا اگر سرعت جریان شکل ۲-۱ کم باشد و یا نیروهای شناوری در آن بزرگ باشند، جریانی فرعی که با جریان اجباری قابل مقایسه باشد به وجود می‌آید. این جریان ثانویه بر جریان اجباری عمود است و تاثیر مهمی بر انتقال گرمای همرفت از اجزای برد مدار دارد. در شکل ۳-۱ اگر برای حرکت دادن هوا از میان بردهای مدار به طرف بالا (همسو با جریان شناوری) یا به طرف پایین (ناهمسو با جریان شناوری) از پنکه استفاده شود، همرفت ترکیبی^۹ به وجود می‌آید.



شکل ۳-۱ انتقال گرما از طریق همرفت طبیعی



شکل ۲-۱ انتقال گرما از طریق همرفت اجباری

انتقال گرمای همرفت، به عنوان نوعی انتقال انرژی در سیال توصیف شد که از اثر ترکیبی پخش و حرکت توده‌ای سیال ناشی می‌شود. معمولا این انرژی منتقل شده از نوع انرژی محسوس می‌باشد ولی در بعضی فرایندهای همرفت، علاوه بر آثار فوق، تبادل گرمای نهان نیز وجود دارد. این تبادل گرمای نهان معمولا به تغییر فاز بین حالت‌های مایع و بخار سیال مربوط می‌شود. دو حالت جوشش و چگالش را می‌توان به عنوان مثال‌هایی از این موارد نام برد [۲]. در ادامه به دلیل اهمیت و فراگیری بیشتر همرفت اجباری و طبیعی نسبت به بقیه موارد، فقط همین دو، مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

^۹ Mixed convection

۱-۲-۱- همرفت اجباری

همرفت اجباری یک مکانیزم یا نوعی انتقال گرمای مرتبط با حرکت سیالات است که می‌تواند به وسیله‌ی یک محرک خارجی ایجاد می‌شود. همرفت اجباری یکی از روش‌های عمده و مفید انتقال گرما بوده که میزان قابل توجهی از انرژی گرمایی را به صورت موثری منتقل می‌کند و این مکانیزم می‌تواند به صورت کاملاً عادی در زندگی روزانه هر فردی مشاهده شود. به طور مثال می‌توان به گرمایش مرکزی، تهویه مطبوع، توربین‌های بخار و غیره در این زمینه اشاره کرد. مهندسان نیز اغلب در طراحی یا تحلیل مبدل‌های حرارتی، جریان داخل لوله‌ها و جریان روی صفحه‌ای که دارای اختلاف دما با سیال عبوری از روی آن می‌باشد با مکانیزم همرفت اجباری برخورد می‌کنند.

در هر شرایط از همرفت اجباری مقداری همرفت طبیعی نیز وجود دارد به طوری که اگر این مقدار قابل صرف‌نظر کردن نباشد به این انتقال گرما، همرفت ترکیبی گفته می‌شود. هنگام تحلیل این همرفت، عدد بی‌بعد ریچاردسون^{۱۰} مطرح می‌گردد که در واقع بیان‌گر شدت نسبی همرفت طبیعی به اجباری است و از لحاظ فرمولی نیز نسبت عدد گراشف^{۱۱} به مربع عدد رینولدز^{۱۲} می‌باشد. زمانی که عدد ریچاردسون بزرگتر از یک باشد همرفت طبیعی غالب بوده و برعکس، هنگامی که عدد ریچاردسون کوچکتر از یک باشد همرفت اجباری غالب خواهد بود. زمانی که همرفت طبیعی عامل مهمی در انتقال حرارت نباشد پارامتر دیگری که مربوط به همرفت اجباری می‌شود و عدد پکلت^{۱۳} نام دارد دارای اهمیت ویژه‌ای خواهد شد. عدد پکلت نسبت ادوکشن به پخش است. زمانی که عدد پکلت بزرگتر از واحد باشد ادوکشن بر پخش غالب بوده و در پکلت‌های کوچکتر از واحد نرخ پخش نسبت به ادوکشن بالاتر خواهد بود.

۱-۲-۲- همرفت طبیعی

همرفت طبیعی یا آزاد هنگامی روی می‌دهد که یک نیروی حجمی بر سیالی که در آن شیب چگالی وجود دارد اعمال شود. اثر خالص این پدیده باعث ایجاد یک نیروی شناوری شده و این نیرو جریان‌های همرفت طبیعی را به وجود می‌آورد. در عمل نیروی حجمی معمولاً گرانشی است گرچه ممکن است از نوع نیروی گریز از مرکز در ماشین‌آلات سیالی یا نیروی کریولیزی در حرکت‌های چرخشی اتمسفریک و اقیانوسی نیز باشد. شیب چگالی به طرق مختلف در سیال به وجود می‌آید اما معمولاً ناشی از شیب دما است به طوری که چگالی گازها و مایعات به دما بستگی داشته و معمولاً با افزایش دما کاهش می‌یابد چرا

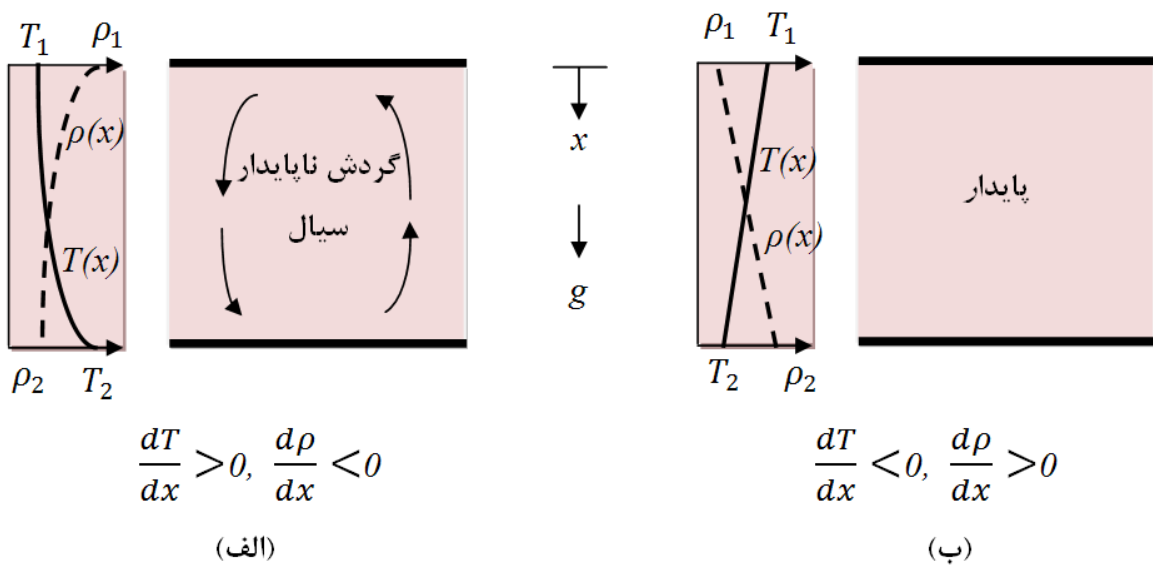
^{۱۰} *Richardson number*

^{۱۱} *Grashof number*

^{۱۲} *Reynolds number*

^{۱۳} *Peclet number*

که سیال منبسط می‌شود. بایستی توجه شود که همیشه وجود شیب چگالی سیال در یک میدان گرانشی به معنی به وجود آمدن جریان‌های همرفت طبیعی نیست. همانند شکل ۴-۱ سیالی را در میان دو صفحه بزرگ افقی با دمای مختلف ($T_1 \neq T_2$) در نظر گرفته به طوری که در حالت (الف) دمای صفحه پایینی از دمای صفحه بالایی بیشتر است و چگالی در جهت نیروی گرانشی کاهش می‌یابد. اگر اختلاف دما از یک مقدار بحرانی بیشتر شود شرایط ناپایدار شده و نیروهای شناوری ممکن است بر تاثیر نیروهای لزجتی که جریان را شتاب منفی می‌دهند غلبه کنند. نیروی گرانشی موثر بر سیال سبک در لایه‌های پایینی بیشتر است و نقش گردش نشان داده شده را به وجود خواهد آورد. سیال سنگین پایین می‌آید و گرم می‌گردد ولی سیال سبک بالا می‌رود هنگام حرکت سرد می‌شود. البته در حالت (ب) که $T_1 > T_2$ و چگالی در جهت نیروی گرانشی کم نمی‌شود چنین حالتی وجود ندارد. در این حالت، شرایط پایدار برقرار است و حرکت توده‌ای سیال وجود ندارد. در حالت (الف)، انتقال گرما با همرفت طبیعی از سطح پایینی به سطح بالایی و در حالت (ب) انتقال گرمای رسانشی (از بالا به پایین) روی می‌دهد.



شکل ۴-۱ شرایط سیال بین صفحات افقی با دماهای مختلف (الف) شیب دمای ناپایدار (ب) شیب دمای پایدار

جریان‌های همرفت طبیعی را می‌توان بر حسب این که جریان توسط یک سطح مقید شود یا محدودیتی برای آن از این جهت وجود نداشته باشد تقسیم‌بندی نمود. در صورتی که جریان توسط هیچ سطحی مقید نشود جریان‌های مرزی آزاد به صورت توده یا جت شناور خواهند بود. حالت دیگر همرفت طبیعی زمانی است که این جریان توسط سطحی مقید شود. به عنوان مثال شکل ۵-۱ را در نظر گرفته به طوری که در آن جریان توسط یک صفحه عمودی گرم مقید شده است. با توجه به اینکه دمای صفحه از دمای محیط بیشتر است ($T_s > T_\infty$), سیال نزدیک صفحه دارای چگالی کمتر از سیال دور از صفحه