

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی مکانیک

مدلسازی عددی انتقال جرم و حرارت جریان دوفاز دی اکسید کربن با رژیم حلقوی

Numerical Simulation of Two-Phase Heat and Mass Transfer in Annular
Flow Regime of Carbon Dioxide

نگارش:

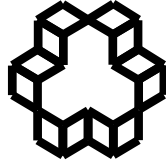
زهرا بنی عامریان

استاد راهنما:

دکتر سیروس آقا نجفی

اسفند ۱۳۸۹

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی مکانیک

تأییدیه هیأت داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان مدلسازی عددی انتقال جرم و حرارت جریان دوفاز دی اکسید کربن با رژیم حلقوی توسط خانم زهرا بنی عامریان صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه دکتری در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی بارتبه مورد تأیید قرار می دهند.

امضاء	آقای دکتر سیروس آقاجفی	۱- اسنڈ راهنما
.....		
امضاء	آقای دکتر کسوثری	۳- ممتحن خارجی
.....		
امضاء	آقای دکتر سپهر صنایع	۴- ممتحن خارجی
.....		
امضاء	آقای دکتر مجید بازارگان	۵- ممتحن داخلی
.....		
امضاء	آقای دکتر مهرزاد شمس	۶- ممتحن داخلی
.....		
امضاء	آقای دکتر	۷- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشگاه
.....		

اظهار نامه دانشجو

موضوع پایان نامه : مدلسازی عددی انتقال جرم و حرارت جریان دوفاز دی اکسید کربن با رژیم حلقوی

اسند راهنما: دکتر سیروس آقاجفی

نام دانشجو: زهرا بنی عامریان

شماره دانشجویی: 8605866

اینجانب زهرا بنی عامریان دانشجوی دوره دکتری مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تأیید می باشد، و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است . بعلاوه گواهی می نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

1- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد.

ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

2- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

با تشکر فراوان از راهنماییهای استاد راهنما و ممتحنین گواهی

تقدیم به همسر مه —ربانم بخاطر حمایت، همکاری و زحمات بی دریغش در طول آماده سازی این رساله و به مادر عزیزم.

چکیده

افزایش نرخ حرارت تولیدی بر واحد حجم، توسط سیستم های صنعتی متفاوت، دانشمندان را در سراسر جهان بر آن داشته تا به طراحی سیستم های موثرتر خنک کاری با بازدهی بالا بپردازند . جریان های دوفاز در سیستم های انتقال حرارت معمولاً کارایی

مناسبتی نسبت به جریانهای تکفاز دارند. زیرا سیال عامل در حین تغییر فاز بخش زیادی از حرارت تولیدی توسط ابزار صنعتی را بعنوان گرمای نهان دریافت می کند بدون آنکه تغییری در دمایش ایجاد گردد.

در یک دهه اخیر توجه دانشمندان در میان سیال عامل های مورد استفاده به استفاده از دی اکسید کربن (R-744) معطوف شده است. این امر با توجه به دسترس پذیری ساده تر، پایین بودن پتانسیل گرمایش جهانی، ضریب انتقال حرارت بالاتر و افت فشار کمتر آن نسبت به سایر مبردهای معمول قابل توجه است. آزمایش های محدودی در زمینه دی اکسید کربن صورت گرفته است. دی اکسید کربن بخاطر خواص ترموفیزیکی خاص، در جریان دوفاز رفتار متفاوتی از سایر مبردها نشان می دهد لذا استفاده از مدل های موجود برای شبیه سازی رفتار این سیال موفق نبوده و یک روش مدلسازی عددی بسیار مورد نیاز است.

در این رساله بر آنیم تا به مدلسازی انتقال حرارت و انتقال جرم جریان دوفاز دی اکسید کربن با رژیم حلقوی بپردازیم. مدلسازی جریان دو فاز در این پروژه به دو روش عددی و تحلیلی انجام شده است. در هر دو روش جریان دوفاز به شکل سه بعدی (متقارن محوری) با در نظر گرفتن انتقال جرم و انتقال حرارت بصورت توأم شبیه سازی شده است. نتایج مدل تحلیلی سپس با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه شده و مورد تایید قرار گرفته اند.

در جریان دوفاز با رژیم حلقوی چهار مکانیزم انتقال جرم وجود دارد این مکانیزمها شامل انتقال جرم تبخیری، چگالش، ته نشینی و قطره ای است. دو مکانیزم اول با استفاده از بالانس انرژی محاسبه می شود. یک مدل جامع برای شبیه سازی انتقال جرم قطره ای در جریان حلقوی در این پروژه ارائه می شود. این مدل بر مبنای فیزیک حاکم بر پدیده انتقال جرم قطره ای است و در این زمینه از ارزش بالایی برخوردار است. شبیه سازی انتقال جرم ته نشینی نیز با استفاده از تئوری دینامیک مولکولی صورت می گیرد.

مدلسازی عددی جریان و انتقال حرارت در این پروژه ترکیبی از شبیه سازی جریان جوشش در فیلم مایع و مدلسازی فصل مشترک دوفاز مایع و بخار در جریان حلقوی است. شبیه سازی پدیده جوشش در ناحیه فیلم مایع توسط دو مدل میکسچر و دمش-مکش صورت می گیرد در حالیکه ناحیه کلی جریان دوفاز با استفاده از مدل کسر حجمی شبیه سازی می شود. تعقیب فصل مشترک مایع و بخار نیز با استفاده از ترکیب دو مدل کار آمد کسر حجمی و لول ست صورت می گیرد. مدل عددی ارائه شده در نهایت توسط مدل تحلیلی که پیشتر توسط نتایج آزمایشگاهی معتبر شده بود و نیز نتایج تجربی موجود صحت گذاری می گردد.

در این پروژه در نظر گرفتن کلیه مکانیزم های انتقال جرم در کنار شبیه سازی عددی جریان و انتقال حرارت دوفاز در رژیم حلقوی برای اولین بار صورت گرفته است. علاوه بر این یک مدل نو و جامع جهت شبیه سازی انتقال جرم قطره ای ارائه شده که بدلیل عدم وابستگی به نوع سیال عامل و شرایط کارکرد از اهمیت بالایی برخوردار است. شبیه سازی پدیده جوشش و در نظر گرفتن جریان حبابی در ناحیه فیلم مایع جریان حلقوی از دیگر نوآوری های این پروژه محسوب می شود.

پروژه حاضر در شش فصل ارائه می شود. بدین منظور پس از ارائه یک مقدمه کوتاه در فصل اول به بررسی و مقایسه برخی از فعالیت های انجام شده در زمینه جریان های دوفاز در فصل دوم پرداخته می شود. فصل سوم به شبیه سازی امواج فصل مشترک مایع و بخار جهت مدلسازی انتقال جرم قطره ای می پردازد. در فصل چهارم یک مدل تحلیلی برای شبیه سازی جریان دوفاز با رژیم حلقوی ارائه شده است. فصل پنجم بطور کامل به شبیه سازی عددی جریان و انتقال حرارت و جرم رژیم حلقوی اختصاص داده شده است. در نهایت در فصل ششم به بررسی نتایج حاصل از مدلسازی و ارزیابی درستی مدل ارائه شده پرداخته می شود.

فهرست مطالب

علائم و اختصارات

۱.۱

فصل اول

۱.۲

مقدمه

۱.۳

۱-۱ مقدمه

۱.۴

۲-۱ رژیم های جرگن دوفاز

۱.۴

۳-۱ انواع سگلهای عامل مورد استفاده در فرایندهای خنک کاری

۱.۸

۴-۱ اثر مقطع کانال بر رژیم جرگن

۱.۹

فصل دوم

۲.۱

مروری بر فعالیت های انجام شده در زمینه جرگن های دوفاز

۲.۱

۱-۲ مروری بر فعالیت های انجام شده در زمینه جرگن های دوفاز

۲.۲

۲-۲ مروری بر فعالیت های انجام شده در زمینه جرگن های دوفاز با سگلهای عامل دی اکسید کربن

۲.۹

۲-۲-۲ انتقال حرارت جریان جوششی دی اکسید کربن

۳.۱

۳-۲-۲ افت فشار جرگن دوفاز دی اکسید کربن

۴.۲

۳-۲ جمع بندی

۴.۴

فصل سوم

۳.۱

بررسی فصل مشترک مایع - بخار در جرگن دوفاز

۳.۱

۱-۳ مقدمه

۳.۲

۲-۳ مدل سازی انتقال جرم قطره ای

۳.۳

۱-۲-۳ محاسبه طول موج بحرایی

۳.۴

۲-۲-۳ دامنه موج

۳.۵

۳-۳ بررسی درستی مدل ارائه شده

۳.۶

۴-۳ بحث و بررسی نتایج

۳.۷

۵-۳ جمع بندی

۳.۸

فصل چهارم

۴.۱

توسعه یک مدل تحلیلی برای شبیه سازی جریان رژیم حلقوی

۴.۱

۱-۴ مقدمه

۴.۲

۲-۴ بررسی درستی فرض عدم لغزش روی دیواره

۴.۳

۳-۴ معادلات حاکم بر جریان

۴.۴

۱-۳-۴ معادله بقای جرم

۴.۵

۲-۳-۴ روابط مربوط به مکانیزم های انتقال جرم

۴.۶

..... ۷۲	۳-۳-۴ بالانس ممنتوم در فیلم مایع
..... ۷۴	۴-۳-۴ بالانس ممنتوم در هسته بخار
..... ۷۷	۴-۴ روند حل مسئله
..... ۷۸	۵-۴ بررسی درستی روش تحلیلی
..... ۸۲	۶-۴ نتایج مدل تحلیلی
..... ۸۵	۷-۴ جمع بندی

فصل پنجم

..... ۸۶	مدلسازی عددی جرطن دوفاز
..... ۸۷	۱-۵ مقدمه
..... ۸۸	۲-۵ فرضیات مدلسازی انتقال حرارت رژیم حلقوی جرطن دوفاز
..... ۸۹	۳-۵ گسسته سازی معادلات تکفاز به روش حجم محدود
..... ۸۹	۱-۳-۵ معادلات اندازه حرکت
..... ۹۵	۲-۳-۵ معادله تصحیح فشار
..... ۹۸	۴-۵ جرطن دوفاز با رژیم حلقوی
..... ۹۹	۵-۵ روش کسر حجمی برای مدلسازی جرطن دوفاز
..... ۱۰۰	۶-۵ روشهای تعقیب فصل مشترک مایع-بخار
..... ۱۰۱	۱-۶-۵ تابع ارتفاع
..... ۱۰۲	۲-۶-۵ قطعات خطی
..... ۱۰۳	۳-۶-۵ روش کسر حجمی
..... ۱۰۳	۴-۶-۵ مقایسه روشهای کسر حجمی و ارتفاع
..... ۱۰۵	۷-۵ مدل میکسچر جهت شریع سازی جرطن جوششی در فیلم مایع
..... ۱۰۵	۱-۷-۵ معادله بهوستگی در مدل میکسچر
..... ۱۰۶	۲-۷-۵ معادله ممنتوم در مدل میکسچر
..... ۱۰۸	۳-۷-۵ معادله انرژی
..... ۱۱۲	۸-۵ مدل مکش-دمش جهت مدلسازی جرطن جوششی در فیلم مایع
..... ۱۱۳	۹-۵ الگوریتم حل مدل کلری دوفاز و جوشش
..... ۱۱۶	۱۰-۵ جمع بندی

فصل ششم

..... ۱۱۷	نتایج مدل عددی و ارزیابی مدل
..... ۱۱۸	۱-۶ نتایج مدلسازی عددی جریان دوفاز با رژیم حلقوی در ترکیب با مدلسازی جوشش در فیلم مایع
..... ۱۲۳	۲-۶ نتایج مدل میکسچر
..... ۱۲۷	۳-۶ نکاتی در مورد پیاده سازی مدل مکش-دمش
..... ۱۲۸	۴-۶ نکاتی در مورد پیاده سازی مدل تعقیب فصل مشترک
..... ۱۳۰	۵-۶ مقایسه رفتار مبردهای مختلف در جرطن دوفاز

۶-۶ بررسی اثر انتقال جرم بر طول خشکی سطح
 ۱-۶-۶ بررسی اثر انتقال جرم چگالش
 ۲-۶-۶ بررسی اثر انتقال جرم قطره ای
 ۳-۶-۶ بررسی اثر انتقال جرم ته نشینی
 ۷-۶ ضریب انتقال حرارت جرطن
 ۸-۶ بررسی درستی نتایج مدل عددی
 ۱-۸-۶ ارزیابی مدل تکفاز
 ۲-۸-۶ ارزیابی عدم وابستگی به مش
 ۳-۸-۶ ارزیابی مدل کسر حجمی-ارتفاع
 ۴-۸-۶ ارزیابی مدل میکسچر
 ۵-۸-۶ ارزیابی مدل عددی کلای

۱۲۸.....
 ۱۲۸.....
 ۱۲۹.....
 ۱۲۹.....
 ۱۳۰.....
 ۱۳۴.....
 ۱۳۴.....
 ۱۳۶.....
 ۱۳۸.....
 ۱۳۹.....
 ۱۴۵.....

جمع بندی

جمع بندی نتایج
 نقاط قوت مدلسازی و قابلیت تعمیم حل به مسائل مشابه
 پیشنهاداتی جهت ادامه کار

۱۴۹.....
 ۱۵۰.....
 ۱۵۱.....
 ۱۵۲.....

مراجع

بوست الف

دخام یک حباب
 الف-۱ مقدمه
 الف-۲ نیروهای مؤثر بر حباب
 الف-۲-۱ نیروی درگ
 الف-۲-۳ نیروی لیفت
 الف-۳ معادله حرکت حباب

۱۵۴.....
 ۱۶۰.....
 ۱۶۱.....
 ۱۶۱.....
 ۱۶۱.....
 ۱۶۳.....
 ۱۶۶.....

علائم و اختصارات

N_μ	عدد ویسکوزیته	a	ضریب شکلی کانال
Nu	عدد بی بعد نوسلت	A	مساحت، m^2
P	فشار، N/m^2	b	ثابت لاپلاس
P	محیط m	Bo	عدد بی بعد جوشش، $Bo = \frac{q_{ch}''}{G \cdot h_{fg}}$
Pe	عدد بی بعد پکله	c	سرعت پیشروی موج، m/s
P_{abs}	ماکزیم توان حرارتی جذب شده توسط سیال عامل، kW	C_p	ظرفیت گرمایی ویژه، $kJ/kg.K$
Δp	افت فشار، N/m^2	C	ضریب ثابت در رابطه Lockhart-Martinelli
P_0	توان حرارتی کل اعمال شده به سیال، kW	C_f	ضریب اصطکاک مایع
Pr	عدد بی بعد پرائتل	C_w	ضریب بی بعد
q''	شار حرارتی W/m^2	D_h	قطر هیدرولیکی، m
q_v	انتقال حرارت ورودی در واحد حجم W/m^3	D_e	قطر معادل، m
R	شعاع لوله مورد بررسی، m	e	انرژی داخلی/کیفیت قطرات داخل هسته بخار
R_u	ثابت جهانی گازها $N.m/kmol.K$	f	کیفیت فیلم مایع/ضریب اصطکاک
S	فاکتور کاهش انتقال حرارت	F	فاکتور افزایشی انتقال حرارت
Su	عدد بی بعد سوراتمان	g	شتاب ثقل، m/s^2
t	زمان، s	G	سرعت جریان جرمی، $kg/m^2.s$
t_w	پریود فرایند انتقال جرم قطره ای، s	h	ضریب انتقال حرارت، $W/m^2.K$
u	مولفه سرعت در راستای جریان m/s	H	ارتفاع کانال، m
v	مولفه سرعت در راستای شعاعی m/s	i	آنتالپی، kJ/kg
v	حجم مخصوص، m^3/kg	J_{g0}	سرعت ظاهری اولیه فاز بخار، m/s
W	عرض کانال، m	k	ضریب رسانش، $W/m.K$
x	کیفیت بخار $x = m_g / m$	k	عدد موج $k = 2\pi/\lambda$
x^*	پارامتر بی بعد مختصات	K	انحنای سطح $1/m$
y^*	پارامتر بی بعد مختصات	K_k	رسانش حرارتی نسبی
z	راستای جریان سیال در مختصات کارتزین	L	طول لوله، m
	علائم یونانی	m	ضریب جذب توان حرارتی جرگن دوفاز
ρ	چگالی، kg/m^3	\dot{m}	نرخ جریان جرمی، kg/s
σ	کشش سطحی، N/m	m_e	جرم قطرات موجود در هسته بخار، kg
λ	طول موج، m	\dot{m}_{en}	نرخ انتقال جرم قطره به فاز بخار، kg/s
θ	زاویه راستای جریان با افق	\dot{m}_{ev}	نرخ انتقال جرم تبخیری، kg/s
δ	ضخامت فیلم مایع، m	m_{ev}''	جرم تبخیر شده از هر المان مایع kg/s

ε	دامنه موج، m	M	جرم مولکولی kg
Γ	شار انتقال جرم $kg/m^2.s$	n	ضریب جذب توان حرارتی جریان تکفاز
τ	تنش برشی، N/m^2	N	تعداد موجها در طول جریان
∇_{lel}	حجم المان مایع	N_{CB}	عدد جابجایی
<i>sup</i>	فرونشانی حباب ها	∇_l	حجم مایع انتقال یافته توسط موج m^3
<i>th</i>	ترمودینامیکی	η	معادله موج
<i>tp</i>	دوفاز	ε	دامنه موج، m
<i>w</i>	موج	λ	طول موج، m
<i>z</i>	راستای محوری	χ	ضرایب معادله گسسته شده ممنتموم
		X	پارامتر اساسی Lockhart-Martinelli
		ϕ	تبادل انرژی بین فازها، kW
		φ_l^2	پارامتر Lockhart-Martinelli
		μ	لزجت، $N.s/m^2$
		ϖ	انحنای فصل مشترک
		α	کسر حجمی سیال در مدل میکسچر
		β	کسر حجمی سیال در مدل کسر حجمی
			اندیس های بکار رفته
		<i>a</i>	شتابی
		<i>air</i>	محیط
		<i>c, co</i>	هسته بخار
		<i>CB</i>	جوشش جابجایی
		<i>ch</i>	کانال
		<i>con</i>	چگالش
		<i>crit</i>	بحرانی
		<i>cs</i>	سطح مقطع
		<i>e, en</i>	مربوط به انتقال جرم قطره ای
		<i>ev</i>	تبخیری
		<i>f</i>	اصطکاکی
		<i>fl</i>	فیلم مایع
		<i>g</i>	گاز(بخار)
		<i>h</i>	هیدروستاتیکی
		<i>i</i>	فصل مشترک
		<i>IA</i>	انتقال از رژیم لخته ای به حلقوی
		<i>in</i>	ورودی
		<i>l</i>	مایع
		<i>lateral</i>	جانبی
		<i>lel</i>	المان مایع
		<i>lo</i>	مایع به تنهایی
		<i>NB</i>	جوشش هسته ای

out

خروجی

r

راستای شعاعی

s

دیواره

sat

اشباع

فصل اول

مق—دم—ه

۱-۱ مقدمه

هنگامی که مایع در مجاورت سطح داغی قرار می‌گیرد، گرم می‌شود تا به دمای جوشش برسد. در این شرایط حبابهایی در سطح دیواره داغ تشکیل می‌شوند که پس از رسیدن به قطر خاصی^۱ به واسطه حضور نیروی بویانسی از دیواره جدا شده و در جریان غوطه‌ور می‌شوند. از آنجا که این حباب‌ها ابعاد و سرعت‌های متفاوتی دارند در جریان به یکدیگر برخورد می‌کنند. این برخورد‌ها بسته به کشش سطحی سیال منجر به شکسته شدن حباب‌ها به قطرهای کوچکتر و البته هم پیوستن آنها تا تشکیل حباب بزرگتر می‌شوند. با بزرگ شدن حباب‌ها جریان، رژیم‌های متفاوتی را تجربه می‌کند (شکل ۱-۱ و ۱-۲) که در ادامه توضیح مختصری در مورد هر یک از آنها آورده شده است.

۱-۲ رژیم‌های جریان دوفاز

به طور کلی رژیم‌های جریان دوفاز در کانال‌ها را می‌توان به ترتیب زیر دسته‌بندی نمود:

رژیم جریان حبابی^۲: در این رژیم، حبابهای بخار پس از تشکیل از دیواره لوله جدا شده و به واسطه حضور نیروی شناوری، در بخش بالایی کانال و با سرعتی نزدیک به سرعت فاز مایع حرکت می‌کنند. مکانیزم‌های انتقال حرارت در رژیم جریان حبابی عبارتند از:

- انتقال حرارت جریان آشفته در اطراف حباب در حال جدا شدن
- جابجایی میکرو بین سیال و دیواره جامد در زمان رشد حباب
- جابجایی بین سیال و حباب در حال رشد
- عمل جابجایی سیال از لایه‌های سرد به نزدیکی دیوار در زمان جدایش حباب
- پدیده تبدیل سیال به بخار در نزدیکی دیواره و تبدیل بخار به سیال در لایه‌های بالایی

^۱ Departure diameter

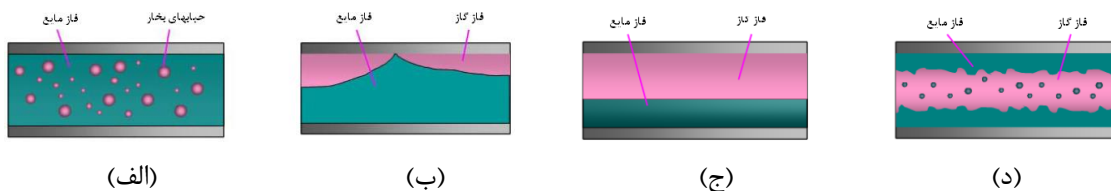
^۲ Bubbly Flow

رژیم جریان لخته ای متناوب^۱: در این جریان، حبابهای درشت تر از به هم پیوستن حبابهای کوچکتر در بخش بالایی کانال تشکیل می شوند. با افزایش سرعت فاز بخار، قطر حبابهای افزایش طول یافته (که به واسطه بهم پیوستن حبابهای کوچکتر تشکیل شده اند) تا اندازه ارتفاع کانال افزایش می یابد.

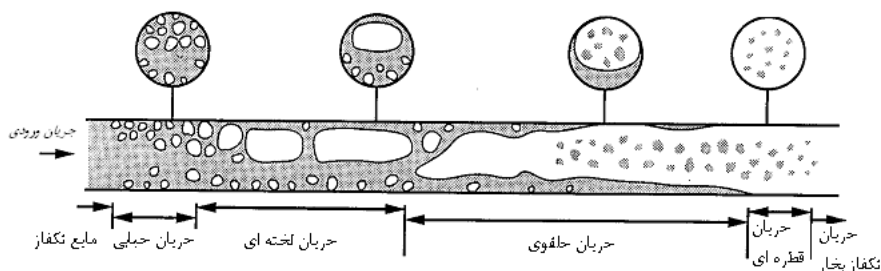
رژیم جریان لایه ای^۲: این رژیم هنگامی شکل می گیرد که سرعت فاز گاز و مایع پایین باشد. در این رژیم، گاز در بخش بالایی کانال و فاز مایع در بخش پایینی آن در حرکت است به نحوی که دو فاز کاملاً بطور مجزا در حضور یک فصل مشترک در حرکتند.

رژیم جریان حلقوی^۳: این رژیم از جریان در شرایط سرعت بالای فاز بخار و سرعتهای پایین فاز مایع تشکیل می شود به شکلی که فاز بخار در هسته کانال و فاز مایع به شکل حلقوی دور این هسته قرار میگیرد. رژیم پایدار جریان در اغلب شرایط، رژیم حلقوی است و معمولاً اکثر جریان های دوفاز در لوله به حالت رژیم پایدار حلقوی می رسند.

پس از رژیم جریان حلقوی با افزایش بیشتر شار حرارتی، از ضخامت فیلم مایع کاسته شده و در یک شار بحرانی^۴، رژیم حلقوی جای خود را به شرایط سطح خشک می دهد و در این شرایط رژیم قطره ای و یا جریان تکفاز بخار در لوله حاکم است که منجر به افت شدید انتقال حرارت می شود.



شکل (۱-۱) الگوی جریان دوفازی در کانال افقی (الف) جریان حبابی (ب) جریان لخته ای متناوب (ج) جریان لایه ای (د) جریان حلقوی [۱]



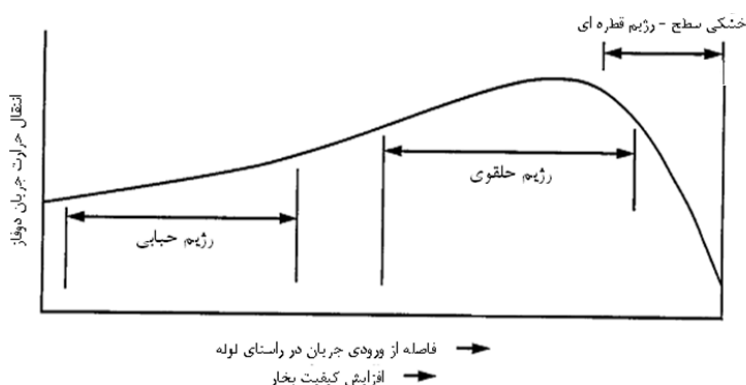
¹ Intermittent-slug flow

² stratified flow

³ Annular flow

^۴ CHF (Critical Heat Flux)

شکل (۲-۱) رژیم های مختلف جریان دوفاز در طول یک لوله افقی [۲]



شکل (۳-۱) تغییرات ضریب انتقال حرارت جریان دوفاز در رژیم های مختلف جریان [۲]

جدول (۱-۱) مقایسه ضرایب انتقال حرارت [۳]

Condition		Convective heat transfer coefficient $W/m^2 \cdot ^\circ C$
Natural convection	Gases	5 – 30
	Water	100 – 900
Forced convection	Gases	10 – 300
	Water	300 – 11,000
	Liquid metals	6,000 – 110,000
Phase change	Boiling liquids	3,000 – 60,000
	Condensing vapours	6,000 – 110,000

بطور کلی انتقال حرارت موثر جریان های دوفاز از جریان های تکفاز بسیار بیشتر است (جدول ۱-۱). البته رژیم های مختلف جریان دوفاز در میزان انتقال حرارت موثر با یکدیگر اختلاف دارند. شکل (۳-۱) تغییرات ضریب انتقال حرارت جریان دوفاز را در رژیم های مختلف نشان می دهد. همانطور که نشان داده شده است، ضریب انتقال حرارت از ناحیه جوشش هسته ای در راستای لوله مرتبا افزایش می یابد و پس از طی رژیم لخته ای به بیشترین مقدار خود در رژیم حلقوی می رسد. پس از رژیم حلقوی و گذر از شار بحرانی به دلیل ورود به ناحیه جریان قطره ای و جریان تکفاز بخار، انتقال حرارت افت پیدا می کند. لذا پارامتر اساسی که در طراحی سیستم های انتقال حرارت با جریان دوفاز باید مورد توجه قرار گیرد، اجتناب از نقطه CHF یا همان شرایط شار بحرانی است تا بدین وسیله حتی المقدور از پدیده خشکی سطح جلوگیری شود.

همانطور که در اشکال فوق مشاهده شد، رژیم های جریان دوفاز در طول کانال تغییر کرده و از رژیمی به رژیم دیگر تبدیل می شوند. تحقیقات فراوانی در زمینه معیارهای انتقال رژیم در جریان دوفاز تاکنون ارائه شده است. [۹-۴]

با کاهش طول مشخصه هندسه جریان، مکانیزم جوشش جریان به واسطه تغییر بالانس نیروهای اعمال شده به سیال تغییر می کند. لذا لازم است تعریف دقیقی از سایز را بعنوان معیار مشخصه داشته باشیم. بطور کلی دسته بندی کانال ها بر مبنای مسیر پویش آزاد مولکول ها در جریان تکفاز و اثرات کشش سطحی و الگوی جریان در جریان های دوفاز انجام می شود. دسته بندی کانال ها بر این مبنای، اولین بار توسط کندلیکار [۱۰] به ترتیب زیر صورت گرفت:

$$D_h > 3mm \text{ : کانال های معمولی}$$

$$200 \mu m \leq D_h < 3mm \text{ : مینی کانال ها}$$

$$10 \mu m \leq D_h < 200 \mu m \text{ : میکروکانال ها}$$

$$0.1 \mu m < D_h \leq 10 \mu m \text{ : کانال ها گذرا یا انتقالی}$$

$$1 \mu m < D_h \leq 10 \mu m \text{ : میکروکانال های انتقالی}$$

$$0.1 \mu m < D_h \leq 1 \mu m \text{ : نانوکانال های انتقالی}$$

$$D_h \leq 0.1 \mu m \text{ : نانوکانال های مولکولی}$$

با کاهش قطر هیدرولیکی کانال نسبت سطح جانبی کانال که در انتقال حرارت سهیم است، به حجم جریان داخل کانال افزایش می یابد. بعنوان مثال برای یک کانال با مقطع دایروی [۱۰]:

$$\frac{A_s}{V} = \frac{\pi DL}{(\pi/4)D^2 L} = \frac{4}{D} \quad (1-1)$$

ضریب انتقال حرارت نیز برای کانال های با قطر کوچکتر، بیشتر است. بعنوان مثال برای جریان آرام تکفاز داخل کانال، نسبت نرخ انتقال حرارت به حجم جریان عبارت است از:

$$\frac{q}{V} = \frac{h.A_s.\Delta T}{V} = Nu.\frac{4k}{D^2}\Delta T \quad (2-1)$$

همانطور که از رابطه فوق پیداست، نرخ انتقال حرارت حجمی در نوسلت ثابت، با مجذور قطر هیدرولیکی کانال نسبت عکس دارد. این امر تا حدودی مبین اهمیت نقش کانال های با ابعاد کوچک است.

با کاهش قطر هیدرولیکی، افت فشار جریان در لوله افزایش می یابد، نرخ جریان در کانال های کوچک، معمولاً کمتر از کانال های بزرگتر است. نرخ جریان جرمی اندک همراه با قطرهای هیدرولیکی کوچک، منجر به کوچک شدن عدد رینولدز جریان می شود که در اکثر موارد در محدوده جریان آرام قرار می گیرد.

انتقال حرارت جریان دوفاز، در کانال ها دارای دو مکانیزم است. اول انتقال حرارت جوشش هسته ای و دوم انتقال حرارت جوشش جابجایی اجباری. در ناحیه جوشش هسته ای، مایع نزدیک به دیواره کانال، فوق گرم می شود تا به وضعیت تشکیل و رشد حباب ها برسد. ضریب انتقال حرارت در این ناحیه وابستگی شدیدی به شار حرارتی ورودی دارد؛ این در حالیست که وابستگی بسیار اندکی به سرعت جرمی جریان و کیفیت بخار دارد. این شرایط برای رژیم حلقوی متفاوت است بطوریکه ضریب انتقال حرارت در این ناحیه به سرعت جرمی و کیفیت بخار وابسته است ولی وابستگی چندانی به شار حرارتی ورودی ندارد. [۱۱]

۱-۳ انواع سیالهای عامل مورد استفاده در فرایندهای خنک کاری

امروزه به منظور حفاظت از محیط زیست و جلوگیری از تخریب لایه اوزون، استفاده از سیالهای عامل طبیعی همچون دی اکسید کربن، آب و ... مورد توجه قرار گرفته است. دی اکسید کربن به جهت غیر سمی بودن، عدم اشتعال پذیری، دسترسی آسان و قیمت ارزان از اهمیت خاصی برخوردار است. علاوه بر موارد مذکور، CO_2 لزجت اندک و ضریب رسانش بالا دارد که خواص حرارتی مناسبی را سبب می شوند. این سیال بعلاوه دسترسی پذیری آسان و پایین بودن پتانسیل گرمایش جهانی^۱ نسبت به سایر مبردهای مورد استفاده، از اهمیت بیشتری برخوردار است. هم اکنون در سیستم های تبرید با دماهای پایین، پمپ های گرمایی و نیز سیستم تهویه بسیاری از خودروها از دی اکسید کربن استفاده می شود.

با مقایسه جریان سیال ها در دمای اشباع یکسان می توان دریافت که الگوی جریان CO_2 با سایر مبردها متفاوت است. بطور کلی شروع پدیده خشکی سطح و تبدیل الگوی جریان به جریان قطره ای برای سیال عامل دی اکسید کربن زودتر از سایر مبردها (در کیفیت های پایین تر) رخ می دهد. کشش سطحی کمتر و نیز کمتر بودن نسبت دانسیته مایع به بخار از دیگر مواردی است که دی اکسید کربن را نسبت به سایر مبردها متمایز می کند.

قطر جدایش حباب در مبردها کوچکتر از قطر جدایش در آب است. این امر سبب می شود که بخش قابل توجهی از طول کانال توسط مکانیزم انتقال حرارت جوشش هسته ای تبادل حرارت نماید. کشش سطحی بیشتر، منجر به تشکیل حباب های بزرگتری در آب نسبت به مبردها می شود. این امر منجر به انتقال سریع و آبی رژیم

^۱ GWP: Global Warming Potential

جریان به رژیم حلقوی در کیفیت های ترمودینامیکی نزدیک صفر می شود. آزمایشات نشان می دهند که رژیم جریان آب تحت شرایط شار حرارتی بالا، رژیم حلقوی با قطرات فراوان مایع در هسته بخار است. [۱۱ و ۱۲] در جریان آب در کانالها ی کوچک، عموماً ناحیه حبابی عمر بسیار کوتاهی دارد. [۱۳-۱۵] لذا احتمال حضور قطرات آب در هسته جریان حلقوی تا قبل از توسعه یافته شدن جریان وجود دارد. اکثر آزمایشها و فعالیت های تحقیقاتی در زمینه خنک کاری، توسط مبردهای سری R و آب صورت گرفته است. از آنجا که اکثر روابط موجود بر مبنای داده های اندازه گیری شده تحت شرایط آزمایشی خاص است، لذا این روابط تنها در همان شرایط پاسخگو خواهند بود و استفاده از این روابط برای سیال عامل های دیگر معمولاً با خطای بزرگی همراه است. در مورد دی اکسید کربن، امکان استفاده از روابط مربوط به سایر سیال ها بسیار کمتر است زیرا ماهیت فیزیکی خاص CO_2 ، آن را از سایر سیال ها متمایز نموده است.

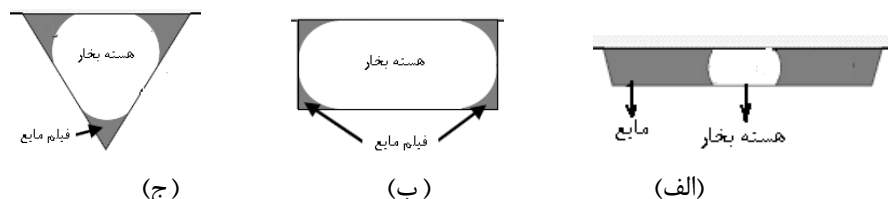
۱-۴ اثر مقطع کانال بر رژیم جریان

عملکرد حرارتی سیستم ها به الگوی جریان آنها بستگی دارد. پایداری یا ناپایداری الگوی جریان، عملکرد حرارتی کانال را تحت تاثیر قرار میدهد. پایداری جریان تا حدود زیادی به شکل مقطع کانال ارتباط دارد. ترکیب الگوهای جریان در کانال های مستطیلی و مثلثی، نسبت به نوع دایره ای بسیار ساده تر است. بطوریکه در کانال های مستطیلی، رژیم جریان حبابی و حلقوی غالب است و سایر رژیم ها دوام چندانی ندارند. پدیده خشکی سطح کامل نیز که منجر به افت شدید ضریب انتقال حرارت می شود به ندرت در کانال های مستطیلی و مثلثی مشاهده می شود. [۱۶ و ۱۷] در کانال های مستطیلی و مثلثی در صورت بروز پدیده خشکی سطح، خشک شدن از وسط دیواره های داخلی شروع می شود و در گوشه ها معمولاً حجمی از مایع تجمع یافته وجود دارد.

لی [۸] و همکارانش در سال ۲۰۰۳ یک اواپراتور متشکل از چند کانال با مقطع مستطیلی، شبه مستطیلی و مثلثی را به منظور بررسی تاثیر مقطع و اندازه کانال بر الگوی جریان آب و عملکرد انتقال حرارتی آن بکار گرفتند. طبق مشاهدات ایشان، در کانال های مثلثی یک جریان پایدار حلقوی، ناحیه حبابی را دنبال می کند. به منظور تشخیص وابستگی پایداری جریان به شکل مقطع کانال و این امر که آیا جریان پایدار حلقوی یک الگوی عمومی در کلیه کانال های کوچک است یا ناشی از اثرات شکل کانال است، پایداری جریان در چند مقطع مختلف بررسی شده است. (شکل ۱-۶)

مقاطع مختلف مورد بررسی در این تحقیق، مقطع مثلثی، مستطیلی و شبه مستطیلی است. پس از انجام آزمایش با شرایط یکسان روی سه مقطع مختلف میکروکانال و عکسبرداری توسط دوربین CCD، رژیم حلقوی در کانال

شبه مستطیلی مشاهده نشده است. پس از تکرار آزمایش و عکسبرداری با استفاده از دوربین های پر سرعت تر، جریان حلقوی در کانال شبه مستطیلی مشاهده می شود. این امر بدین خاطر است که جریان حلقوی در کانال های شبه مستطیلی بسیار ناپایدار بوده و تنها در حدود $0/3$ ثانیه دوام دارد. از نقطه نظر فیزیکی، پایداری هیدرودینامیکی، نیاز به یک نیروی دائمی دارد که در صورت تشکیل اغتشاشات طبیعی، آنها را دمپ نماید. بدون حضور چنین نیرویی، جریان قطعاً ناپایدار می شود. در مورد کانال مثلثی این نیروی دائمی برای پایدار نگاه داشتن جریان حلقوی وجود دارد. این نیروها در کانال با مقطع شبه مستطیلی وجود ندارند و موجب ناپایداری جریان در آن می شوند.



شکل (۱-۶) مقاطع مختلف در نظر گرفته شده در آزمایش [۸]

بنابراین مهمترین تفاوت کانال های شبه مستطیلی و مثلثی این است که در کانال های شبه مستطیلی جریان حلقوی بسیار ناپایدار است و پس از تشکیل سریعاً از بین می رود اما در کانال های مثلثی جریان حلقوی بسیار پایدار است. آزمایشها نشان می دهند که جریان در کانال مستطیلی کاملاً مشابه کانال مثلثی، پایدار است. این و همکارانش [۱۶]، در سال ۲۰۰۶، انتقال حرارت در میکروکانال با مقطع دایروی را با میکروکانال مستطیلی با قطر هیدرولیکی یکسان مقایسه نموده و به این نتیجه رسیدند که عملکرد کانال مستطیلی اندکی بهتر از تیوپ های دایره ای در انتقال حرارت جوشش جابجایی است. این امر ناشی از گوشه های تیز کانال مستطیلی است که به تقویت رژیم جوششی کمک می کند. با این وجود بدلیل فرایند ساده تر ساخت کارل های دایروی، استفاده از این دسته کانال ها رایج تر است.

در این رساله بر آنیم تا به مدلسازی انتقال حرارت و انتقال جرم جریان دوفاز دی اکسید کربن با رژیم حلقوی بپردازیم. مدلسازی جریان دو فاز در این پروژه به دو روش عددی و تحلیلی انجام شده است. در هر دو روش جریان دوفاز با رژیم حلقوی داخل لوله به شکل سه بعدی (مقارن محوری) با در نظر گرفتن انتقال جرم و انتقال حرارت بصورت توأم شبیه سازی شده است. انتقال جرم قطره ای بعنوان یکی از مهمترین فرایندهای انتقال جرم بصورت مفصل در فصل سوم مدلسازی شده و یک مدل جامع جهت شبیه سازی این پدیده ارائه شده است. نتایج هر دو مدل تحلیلی و عددی سپس یا فعالیتهای مشابه مقایسه و معتبر شده اند.