



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

گرایش تبدیل انرژی

# مطالعه تحلیلی انتقال حرارت جابجایی اجباری به جریان آشفته آب فوق بحرانی

استاد راهنما : دکتر مجید بازارگان

نگارش : خسرو ابراهیمی

تیرماه ۱۳۸۲

## چکیده:

انتقال حرارت به سیالات فوق بحرانی، کلی ترین و پیچیده ترین نمونه از انتقال حرارت به سیالات باخواص متغیر می باشد. در فشارهای فوق بحرانی، خواص سیال با دما به شدت تغییر می کنند. به دنبال تغییرات غیرعادی گرمای ویژه و دیگر خواص، انتقال حرارت به جریان سیال فوق بحرانی در نزدیکی ناحیه بحرانی به طور چشمگیری افزایش می یابد. به دلیل وابستگی شدید خواص سیال به دما، معادله انرژی غیرخطی می شود و تناسب شار با اختلاف دما برقرار نخواهد بود. تغییرات جرم حجمی موجب تغییرات سرعت می گردد. انبساط حرارتی، شناوری و گرمای ویژه محلی بالا می توانند تأثیرات مهمی روی انتقال حرارت جابجایی داشته باشند.

یک مدل ریاضی، به منظور محاسبه ضرایب انتقال حرارت موضعی به جریان پایدار، توسعه یافته، متقارن و آشفته آب فوق بحرانی در یک لوله مدور، بنا نهاده شده است. برای حل همزمان معادلات به شدت به هم وابسته مومنتوم و انرژی حاکم بر جریان سیال (که در نتیجه تغییرات چشمگیر خواص سیال با دما می باشد)، یک روش عددی، بکار برده شده است. پایه و اساس مدل ارائه شده، تئوری قانون دیواره می باشد. عبارت تحلیلی مختلف برای پروفیل عمومی سرعت آزموده شده اند (عبارات دیسلر، پرائتل تیلور، ون دریست، فون کارمن، رنی و ریچارت). در مدل ارائه شده، علاوه بر تغییرات شعاعی شار حرارتی و تنش برشی، تغییرات شعاعی خواص سیال نیز لحاظ شده اند. همچنین مقایسه ای بین ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده توسط مدل و نتایج حاصل از برخی روابط همبسته بدون بعد تجربی، همچون رابطه سونسون، انجام گرفته است. عدم تطابق بین نتایج حاصل از روابط همبسته بی بعد تجربی با یکدیگر و با داده های تجربی نشان داد که اینگونه روابط در تخمین ضرایب انتقال حرارت قابل اعتماد نیستند. در این مطالعه، اثر عدد پرائتل آشفته نیز مورد بررسی قرار گرفته است. پیشرفت های اخیر که در تعریف عدد پرائتل آشفته انجام گرفته است، در مدل تحلیلی لحاظ شده اند. دو راهکار مختلف، در تعیین اثر تغییرات شدید خواص بر ضرایب پخش گردابه ای، مورد بررسی قرار گرفته اند. این راهکارها عبارتند از روش سو و اسمیت در تعیین اثر تغییرات جرم حجمی و روش هس و کونز در تعیین اثر تغییرات لزجت بر ضرایب پخش گردابه ای. مقایسات مختلف نشان می دهند که در غیاب نیروهای حجمی (شناوری و شتاب جریان)، تطابق خوب و نزدیکی بین نتایج حاصل از مدل و داده های تجربی وجود دارد.

برخی از پژوهشگران به این نتیجه رسیده اند که ماکزیموم ضرایب انتقال حرارت در مقطعی از جریان رخ می دهد که دمای اغلب نقاط سیال واقع در آن مقطع، بسیار نزدیک به دمای شبه باشد (دمای شبه بحرانی، درجه حرارتی است که در آن تغییرات خواص سیال به بیشترین مقدار می رسد). هرچند که نتایج حاصل از مدل کنونی، این نظریه را تأیید نمی کند. در این مطالعه، نشان داده شده است که ناحیه کوچکی از لایه میانی دارای اثر غالب بر نرخ انتقال حرارت می باشد. به عبارت دیگر، ضریب انتقال حرارت به مقدار ماکزیموم خود نخواهد رسید مگر آنکه ناحیه شبه بحرانی در لایه میانی قرار گیرد.

## به نام خداوند بخشنده مهربان

خداوند را سپاسگذارم که مرا یاری فرمود تا انجام این پایان نامه را به اتمام برسانم. بر خود لازم می دانم از همه کسانی که در طی این مدت مرا راهنمایی و پشتیبانی کردند تشکر و سپاسگذاری نمایم. از جناب آقای دکتر بازارگان به دلیل راهنمایی های روشنگرانه و پیگیری های دلسوزانه شان متشکرم. در طول این مدت، چه از لحاظ علمی و چه از لحاظ اخلاقی درس های زیادی از ایشان آموختم. از درگاه الهی برای ایشان و خانواده محترمشان آرزوی سلامت، پیروزی و بهروزی را دارم.

بی شک بیشترین زحمات، در مدت زمان انجام این پایان نامه، بر عهده مادر مهربان و فداکارم بوده است. چرا که ایشان علاوه بر رسیدگی به امور خانواده، با صبر و متانت همواره مشوق و یاریگر من بوده اند. برای ایشان نیز آرزوی سلامتی و طول عمر دارم. از سایر اعضای خانواده ام، به خصوص برادرم آقای خشایار ابراهیمی، نیز که در حد توان خود مرا در انجام این مهم کمک کردند سپاسگذاری می نمایم.

همچنین باید از دوستان و هم دوره ای های بزرگوام به ویژه آقای مهندس محمدرضا رجایی و آقای مهندس علی سلیم شیرازی که در طی این دوره از هیچ کمکی به من مضایقه نکردند و همواره مرا مورد لطف و محبت خویش قرار دادند تشکر و قدردانی نمایم. توفیقات روز افزون ایشان را از پروردگار متعال خواستارم.

در انتها امیدوارم این پایان نامه برای علاقمندان به تحقیق و پژوهش در این زمینه مفید واقع شود.

خسرو ابراهیمی

۱	<b>فصل اول: مقدمه و معرفی مسأله</b>
۳	۱-۴ - سیال فوق بحرانی و ویژگیهای آن
۸	۱-۴ - ویژگیهای انتقال حرارت به سیالات فوق بحرانی
۹	۱-۲-۱- بهبود چشمگیر انتقال حرارت
۱۰	۱-۲-۲-۱- اخلاص در انتقال حرارت
۱۲	۱-۲-۲-۱- تأثیر جابجایی آزاد
۱۳	۱-۲-۲-۱- تأثیر شتاب
۱۳	۱-۲-۵- تشابه با جوشش
۱۴	۱-۲-۶- اثرات دیگر
۱۵	۱-۳- اهداف و ویژگیهای این مطالعه
۱۷	<b>فصل دوم: مروری بر مطالعات گذشته</b>
۱۸	۱-۲- پژوهشهای تجربی و آزمایشگاهی
۲۶	۱-۲- پژوهشهای تحلیلی و محاسباتی
۳۹	<b>فصل سوم: معادلات حاکم</b>
۴۰	۱-۳- معادلات لحظه ای حاکم بر جریان
۴۲	۲-۳- ضرایب پخش گردابه ای و عدد پراتل آشفستگی
۴۴	۳-۳- معادلات متوسط زمانی حاکم بر جریان
۴۵	۳-۴- فرضیات ساده کننده
۴۵	۳-۵- معادلات ساده شده حاکم بر جریان
۴۷	<b>فصل چهارم: مدلسازی و حل عددی</b>
۴۸	۴-۱- قانون دیواره
۵۳	۴-۲- فرمولاسیون مدل
۵۵	۴-۳- روش حل عددی
۵۹	<b>فصل پنجم: ارزیابی مدل و اصلاح آن</b>
۶۰	۵-۱- پایداری حل عددی (تأثیر تعداد یا سایز مش ها)

۶۲	۲-۵- تأثیر استفاده از عبارات مختلف برای پروفیل عمومی سرعت
	۳-۵- مقایسه با سایر داده ها
۶۷	
۷۵	۴-۵- استفاده از روابط بی بعد تجربی و بررسی کارایی آنها
۸۰	۵-۵- تغییر و اصلاح مدل
۸۰	۱-۵-۵- تغییر پروفیل عمومی سرعت
۸۳	۲-۵-۵- تأثیر عدد پرانتل آشفستگی
۸۹	۳-۵-۵- اثر استفاده از تعریف گلدمن برای تعیین $u^+$ و $y^+$
۹۲	۴-۵-۵- بررسی اثر توزیع شار حرارتی و تنش برشی
۹۵	۵-۵-۵- اصلاح ضرایب پخش گردابه ای
۹۶	۱-۵-۵-۵- ارزیابی روش سو و اسمیت در تعیین اثر تغییرات دانسیته بر $\mathcal{E}$
۱۰۵	۲-۵-۵-۵- ارزیابی روش هس و کونز در تعیین اثر تغییرات لزجت بر $\mathcal{E}_M$
۱۰۷	۶-۵- اهمیت لایه میانی
۱۱۱	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
	۱-۶- نتیجه گیری
۱۱۴	۲-۶- پیشنهادات
۱۱۶	مراجع
۱۱۹	پیوست الف: برنامه کامپیوتری
۱۲۹	پیوست ب: نمونه ای از اجرای برنامه

## فهرست اشکال و جداول

عنوان \_\_\_\_\_  
صفحه \_\_\_\_\_

### فصل اول:

- شکل (۱-۱): نمودار بدون مقیاس درجه حرارت \_ حجم برای آب خالص ۳
- شکل (۲-۱): نمودار بدون مقیاس فشار- درجه حرارت آب خالص (دیگرام فاز) ۵
- شکل (۳-۱): نحوه تغییرات برخی خواص آب فوق بحرانی در فشار ۲۴ MPa ۷
- شکل (۴-۱): منحنی های تغییرات گرمای ویژه آب با در چند فشار فوق بحرانی ۷
- شکل (۵-۱): نمودار ضرایب انتقال حرارت برای جریان آشفته آب در داخل لوله حلقوی. در دوفشار ۱۰
- مختلف، یکی زیر بحرانی و دیگری فوق بحرانی ۱۰
- جدول (۶-۱): مشخصات نقطه بحرانی برای چند ماده خالص ۴

### فصل دوم:

- شکل (۱-۲): تأثیر فشار بر ضرایب انتقال حرارت (داده های سونسون و همکارانش) ۱۹
- شکل (۲-۲): تأثیر شار حرارتی بر ضرایب انتقال حرارت (داده های سونسون و همکارانش) ۲۰
- شکل (۳-۲): تأثیر شار حرارتی بر ضرایب انتقال حرارت (داده های یاماگاتا و همکارانش) ۲۲
- شکل (۴-۲): مقایسه ضرایب انتقال حرارت به جریان های افقی و قائم در مقادیر بالای شارهای حرارتی بالا ۲۳
- که اثرات شناوری نمود می یابند.

### فصل چهارم:

- شکل (۱-۴): قانون دیواره، پروفیل های سرعت در لایه مرزی جریان آشفته ۵۱
- شکل (۲-۴): اثر گرادیان فشار بر پروفیل سرعت لایه مرزی جریان آشفته ۵۳

### فصل پنجم:

- شکل (۵-۱الف): تأثیر تعداد یا سایز مش ها بر ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده ۶۱
- شکل (۵-۱ب): تأثیر ضریب رشد فواصل جزئی (مش ها) بر نتایج حل عددی ۶۲
- شکل (۵-۲الف): ضرایب انتقال تخمین زده شده توسط مدل، با استفاده از عبارات مختلف برای ۶۵
- پروفیل عمومی سرعت ۶۵
- شکل (۵-۲ب): داده های تجربی بازارگان ۶۵
- شکل (۵-۳): مقایسه ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده توسط مدل با استفاده از پروفیل های سرعت مختلف برای دو فشار مختلف. یکی فشار فوق بحرانی که در آن خواص سیال بشدت

- ۶۹ شکل (۴-۵الف): نتایج حاصل از مدل برای دو فشار مختلف فوق بحرانی
- ۶۹ شکل (۴-۵ب): داده های سونسون و همکارانش برای دو فشار مختلف فوق بحرانی
- ۷۲ شکل (۵-۵الف): نتایج مدل برای دو شار حرارتی مختلف
- ۷۲ شکل (۵-۵ب): داده های سونسون و همکارانش برای دو شار حرارتی مختلف
- ۷۳ شکل (۵-۶الف): پروفیل های سرعت حاصل از مدل در دو شار حرارتی مختلف
- ۷۳ شکل (۵-۶ب): پروفیل های دمای حاصل از مدل در دو شار حرارتی مختلف
- ۷۴ شکل (۵-۷الف): نتایج حاصل از مدل برای چهار شار حرارتی مختلف
- ۷۴ شکل (۵-۷ب): داده های تجربی یاماگاتا و همکارانش برای چهار شار حرارتی مختلف
- ۷۸ شکل (۵-۸): مقایسه نتایج حاصل از روابط تجربی بدون بعد مختلف
- شکل (۵-۹): مقایسه ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده توسط مدل با نتایج حاصل از رابطه تجربی بی بعد
- ۷۹ سونسون و همکارانش
- ۸۰ شکل (۵-۱۰): مقایسه نتایج حاصل از روابط بدون بعد نوسلت با حل عددی
- ۸۲ شکل (۵-۱۱): مقایسه نتایج حاصل از مدل با داده های تجربی یاماگاتا و همکارانش
- شکل (۵-۱۲): منحنی تغییرات عدد پرانتل آشفستگی در مقطعی از جریان که متناظر با ضریب انتقال حرارت
- ۸۶ ماکزیموم است
- ۸۷ شکل (۵-۱۳): اثر عدد پرانتل آشفستگی بر ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده توسط مدل
- شکل (۵-۱۴): مقایسه نتایج حاصل از مدل برای دو حالت  $Pr_f = 1$  و استفاده از معادله هالینگزورث برای تعیین
- ۸۸  $Pr_f$  و مقایسه آن با داده های تجربی یاماگاتا
- ۹۱ شکل (۵-۱۵): تأثیر استفاده از سرعت و فاصله بدون بعد تعریف شده توسط گلدمن در مدل تحلیلی
- شکل (۵-۱۶): تأثیر استفاده از سرعت و فاصله بدون بعد تعریف شده توسط گلدمن در مدل تحلیلی
- ۹۲ در قیاس با نتایج سونسون و همکارانش
- ۹۳ شکل (۵-۱۷): مقایسه نوعی بین توزیع واقعی و توزیع خطی شار حرارتی در عرض جریان
- شکل (۵-۱۸): مقایسه بین نتایج حاصل از مدل در دو حالت. در حالت اول، توزیع واقعی شار حرارتی
- ۹۴ در مدل اعمال شده و در حالت دوم، از فرض توزیع خطی شار حرارتی استفاده شده است
- شکل (۵-۱۹): مقایسه بین نتایج حاصل از مدل در دو حالت. در حالت اول، توزیع خطی تنش برشی
- در مدل اعمال شده و در حالت دوم، توزیع تنش برشی در عرض جریان یکنواخت
- ۹۵ فرض شده است.

- شکل (۵-۲۰): محاسبه ضرایب انتقال حرارت توسط مدل کنونی در دو حالت:  
( الف): بدون در نظر گرفتن اثر تغییرات دانسیته و  
۱۰۰ (ب): با در نظر گرفتن اثر تغییرات دانسیته بر ضرایب پخش گردابه ای با اعمال رویکرد سو و اسمیت  
شکل (۵-۲۱): مقایسه ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده توسط پروفیل سرعت فون کارمن در دو حالت:  
۱۰۲ حالت اول بدون احتساب عبارات اصلاحی سو و اسمیت و حالت دوم با احتساب این عبارات  
شکل (۵-۲۲): منحنی های نرمالیزه شده دما حاصل از مدل تغییر یافته توسط رویکرد سو و اسمیت,  
۱۰۳ منحنی های مختلف, متناظرند با مقاطع عرضی مختلف در طول لوله  
شکل (۵-۲۳): مقایسه نتایج حاصل از مدل با داده های تجربی. این مقایسه کارایی اصلاح هس و کونز  
۱۰۶ را نشان می دهد.  
شکل (۵-۲۴): تغییرات شعاعی ناحیه ای از جریان در طول لوله, که در آن گرمای ویژه به مقدار بیشینه  
۱۰۸ خود می رسد.  
شکل (۵-۲۵): پروفیل های نرمالیزه شده دما بوسیله دمای شبه بحرانی. پروفیل های مختلف, متناظرند با  
۱۱۰ مقاطع عرضی مختلف در طول لوله  
جدول (۵-۱): عبارات تحلیلی مختلف برای پروفیل عمومی سرعت  
۶۴  
جدول (۵-۲): روابط بدون بعد نوسلت, قابل استفاده برای جریان آب فوق بحرانی  
۷۶  
جدول (۵-۳): درصد خطای نتایج حاصل از مدل تحلیلی در دو حالت یکی بدون اعمال عبارات تصحیح  
۱۰۱  $F_H$  و  $F_M$  و دیگری با اعمال این عبارات



## فهرست علائم و اختصارات

ثابت ون دریست, معادله (۷-۲)	A <sup>+</sup>
مساحت جانبی تا فاصله x از ناحیه ورودی حرارتی, معادله (۱-۲)	A <sub>x</sub>
ضریب اصطکاک, معادله (۲۱-۴)	C <sub>f</sub>
ظرفیت گرمایی ویژه, KJ/Kg	C <sub>p</sub>
ضریب رشد مش ها	C
قطر لوله, m	d
سرعت جرمی, Kg/m <sup>2</sup> /s	G
شتاب گرانش, m/s <sup>2</sup>	g
ضریب انتقال حرارت, KW/m <sup>2</sup> °C, معادله (۲۴-۴).	h
انتالپی ویژه, KJ/Kg	i
مقدار لحظه ای مؤلفه نوسانی انتالپی, KJ/Kg	i'
ثابت فون کارمن, معادله (۷-۲)	K
ضریب انبساط گرمایی, W/m <sup>0</sup> C	k
طول اختلاط پراختل, m	l
دبی جرمی, Kg/s	m
عدد نوسلت, رابطه (۱۱-۲)	Nu
فشار, MPa	P
مقدار لحظه ای مؤلفه نوسانی فشار, MPa	P'
عدد پراختل, $\mu C_p / k$	Pr
عدد پراختل آشفتگی, رابطه (۱۰-۳)	Prt
شار حرارتی, KW/m <sup>2</sup> , رابطه (۷-۳)	q''
شار حرارتی, KW/m <sup>2</sup> , رابطه (۷-۳)	Q
عدد رینولدز, رابطه (۲۰-۴)	Re
فاصله شعاعی از مرکز لوله, m	r
شعاع لوله, m	r <sub>0</sub>
شعاع بدون بعد, $r_0 \sqrt{\tau_w / \rho_w} / v_w$	r <sub>0</sub> <sup>+</sup>
درجه حرارت, °C یا K	T
مقدار لحظه ای مؤلفه نوسانی دما, °C یا K	T'

سرعت حجمی سیال, $m/s$ , معادله (۲۲-۴)	U
سرعت در امتداد جریان, $m/s$	u
مقدار لحظه ای مؤلفه نوسانی سرعت در راستای $x$ , $m/s$	$u'$
سرعت بدون بعد در راستای $x$ , رابطه (۷-۴)	$u^+$
سرعت شعاعی یا عرضی, $m/s$	v
مقدار لحظه ای مؤلفه نوسانی سرعت در راستای شعاع, $m/s$	$v'$
فاصله طولی از ناحیه ورودی حرارتی, m	x
فاصله از دیواره, m	y
فاصله بدون بعد از دیواره, رابطه (۸-۴)	$y^+$
ترم اصلاحی ضریب پخش گردابه ای حرکت, رابطه (۱۶-۵)	$F_M$
ترم اصلاحی ضریب پخش گردابه ای گرما, رابطه (۱۸-۵)	$F_H$

#### علائم یونانی

ضریب پخش گرمایی, $k / \rho C_p$ , $m^2/s$	$\alpha$
لزجت دینامیکی, $Kg/ms$	$\mu$
لزجت سینماتیکی, $m^2/s$	$\nu$
جرم حجمی, $Kg/m^3$	$\rho$
ضریب پخش گردابه ای حرکت, $m^2/s$ , معادله (۸-۳)	$\epsilon_M$
ضریب پخش گردابه ای گرما, $m^2/s$ , معادله (۹-۳)	$\epsilon_H$
ضریب اصلاح شده پخش گردابه ای حرکت توسط رویکرد سو و اسمیت, $m^2/s$ , معادله (۱۴-۵)	$\epsilon_{Ms}$
ضریب اصلاح شده پخش گردابه ای گرما توسط رویکرد سو و اسمیت, $m^2/s$ , معادله (۱۷-۵)	$\epsilon_{Hs}$
تنش برشی, $N/m^2$ , معادله (۶-۳)	$\tau$
مؤلفه ای از تنش برشی که ناشی از آشفتگی جریان است, $N/m^2$ , رابطه (۱۲-۵)	$\tau_T$
سرعت جرمی, $Kg/m^2/s$	$\omega$

#### زیرنویس ها

مقادیر حجمی کمیت مورد نظر	b
مقادیر کمیت مورد نظر در دمای دیواره	w
مقدار محاسبه شده کمیت مورد نظر	CALC
مقدار تجربی کمیت مورد نظر	EXP
مقدار کمیت در مقطعی از جریان که در فاصله $x$ از ناحیه ورودی لوله قرار گرفته است.	x
مقدار کمیت مورد نظر در ورود به ناحیه حرارت دیده لوله.	inlet

# فصل ۱

## مقدمه و معرفی مسأله

فعالیت های پژوهشی در زمینه انتقال حرارت به سیالات فوق بحرانی، که پیچیده ترین و کلی ترین نمونه از انتقال حرارت به سیالات باخواص متغیر می باشد، از حدود سال ۱۹۵۰ میلادی آغاز شده است. در چند دهه اخیر استفاده از سیالات فوق بحرانی در سیستمهای مختلف مهندسی، افزایش وسیع و قابل توجهی یافته است. در این سیستمها از سیال فوق بحرانی، بعنوان سیال عامل<sup>۱</sup> یا مبرد<sup>۲</sup> استفاده شده است. در زیر به چند نمونه از این سیستمها اشاره می کنیم.

چندین دهه است که در سیکل های توربین بخار، از دیگهای فوق بحرانی<sup>۳</sup> استفاده میشود. بکار گرفتن این دیگها علاوه بر بهبود دادن نرخ انتقال حرارت، نیاز به تعبیه طبلکهای بخار<sup>۴</sup> در لوله ها و مجراهای دیگ به منظور جدا سازی بخار آب و آب مایع از یکدیگر را رفع کرده است. زیرا در شرایط فوق بحرانی، آب نه بحالت مایع و نه بحالت بخار، بلکه بصورت یک محیط پیوسته تک فاز میباشد.

<sup>۱</sup> Propellant Fluid

<sup>۲</sup> Coolant Fluid

<sup>۳</sup> Supercritical Boilers

<sup>۴</sup> Steam Drum

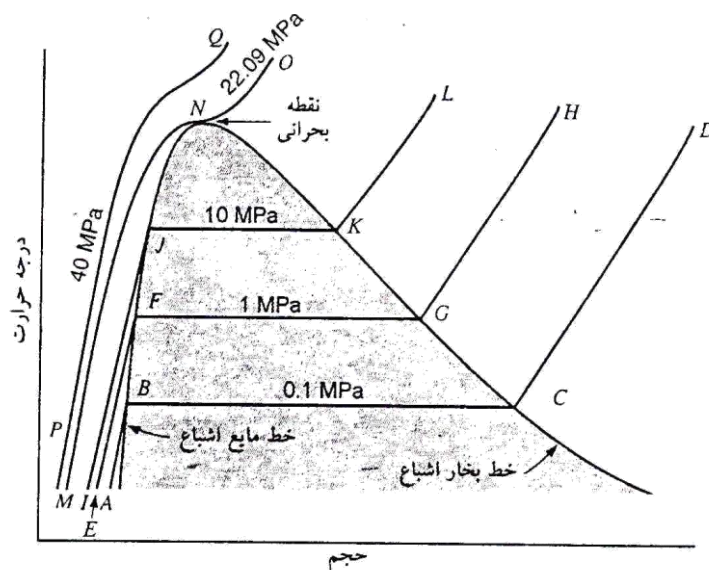
در انواع مختلف راکتورهای هسته ای از آب فوق بحرانی به عنوان ماده خنک کننده استفاده می شود. به منظور افزایش دادن نرخ انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی، در طراحی و ساخت آنها از سیالات فوق بحرانی استفاده می شود. از هلیوم فوق بحرانی، سالیان متمادی است که در سیستم‌های برودتی استفاده می شود. برای خنک کردن هادی‌های ماشین‌های الکتریکی نیز از هلیوم نزدیک به حالت بحرانی، بعنوان ماده خنک کننده، استفاده می شود. هیدروژن فوق بحرانی هم بعنوان سیال عامل و هم بعنوان جاذب گرما، در سیستم‌های رانش (راکت های) هسته ای و شیمیائی مورد استفاده قرار گرفته است. موتور برخی هواپیماهای مدرن نظامی، با پمپ کردن سوخت در فشارهای فوق بحرانی، از طریق لوله های اطراف موتور خنک می شود.

یکی از جدیدترین کاربردهای انتقال حرارت به سیال فوق بحرانی، انهدام و از بین بردن مواد زائد آلی می باشد. این تکنولوژی که، اکسیداسیون آب فوق بحرانی<sup>1</sup> SCWO نام دارد، صنعتی است که در خدمت محیط زیست می باشد. زیرا اولاً هیچگونه محصول فرعی مضر (همچون NO<sub>x</sub>) تولید نمی کند و ثانیاً بدون آنکه لازم باشد مواد زائد را بسوزاند آنها را به این طریق از بین می برد. همراه با خواص ترمودینامیکی و انتقالی، قابلیت انحلال آب نیز در شرایط فوق بحرانی دچار تغییرات بسیار شدیدی می شود. آب در فشارها و دماهای معمولی، ترکیبات معدنی را به خوبی در خود حل می کند، اما برای بسیاری از مواد آلی حلال خوبی نخواهد بود. بالعکس در شرایط فوق بحرانی، آب به خوبی مواد آلی را در خود حل می کند، در حالیکه دیگر حلال خوبی برای نمکهای معدنی نمی باشد. همین واقعیت، اساس کار را در تکنولوژی SCWO تشکیل می دهد. در این فن آوری، ماده زائد آلی، آب و اکسید کننده در کنار یکدیگر قرار می گیرند. سپس ماده آلی به سرعت اکسیده شده و تبدیل به آب و دی اکسید کربن میشود. بعلاوه تک فاز بودن واکنش بالا، بازده انهدام و تخریب مواد زائد آلی، بسیار بالا می باشد.

با توجه به گسترش و توسعه سیستم‌هایی که در شرایط فوق بحرانی کار می کنند، ضرورت دارد که مسأله انتقال حرارت در فشارهای فوق بحرانی مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. لازمه طراحی بهینه چنین سیستم‌هایی، درک عمیق و صحیح از مسأله انتقال حرارت به سیالات فوق بحرانی می باشد.

## ۱-۱- سیال فوق بحرانی و ویژگیهای آن

در شکل زیر، نمودار درجه حرارت - حجم برای یک سیال نشان داده شده است. خطوط فشار ثابت در این دیاگرام نشان داده شده‌اند. رفتار سیال در امتداد خطوط فشار ثابت ABCD، EFGH و IJKL مشابه می‌باشد، مثلاً برای خط فشار ثابت ABCD، اگر نقطه A، حالت اولیه سیال باشد (که به آن حالت مادون سرد<sup>۱</sup> می‌گویند) با انتقال حرارت به سیال در فشار ثابت، سیال در نقطه B در حالت مایع اشباع<sup>۲</sup> قرار می‌گیرد. در این حالت، کیفیت<sup>۳</sup> برابر صفر است، یعنی تمام سیال به حالت مایع است. با دادن گرمای بیشتر به سیال در فشار ثابت، سیال مایع در امتداد خط BC در دمای ثابت شروع به جوشش یا به عبارتی تغییر فاز از مایع اشباع به بخار اشباع می‌کند تا اینکه در نقطه C در حالت بخار اشباع<sup>۴</sup> با کیفیت ۱۰۰٪ قرار می‌گیرد. با انتقال گرمای بیشتر، سیال در امتداد خط CD پیش رفته و تبدیل به بخار مافوق گرم<sup>۵</sup> خواهد شد.



- Sub-Cooled<sup>۱</sup>
- Saturated Liquid<sup>۲</sup>
- Quality<sup>۳</sup>
- Saturated Vapor<sup>۴</sup>
- Super-heated Vapor<sup>۵</sup>

شکل (۱-۱): نمودار بدون مقیاس درجه حرارت \_ حجم برای آب خالص که نشان دهنده فازهای مایع و بخار است. (ون وایلن و زونتاک، ۱۹۸۵)

خط فشار ثابت MNO, متناظر با فشاری است که آن را فشار بحرانی می نامیم. در امتداد این خط، فرآیند تبخیر در دمای ثابت وجود نخواهد داشت. بجای آن یک نقطه N داریم که نقطه عطف است. شیب منحنی اشباع در این نقطه صفر می باشد. این نقطه، نقطه بحرانی<sup>۱</sup> نام دارد. در نقطه بحرانی، مایع اشباع و بخار اشباع یکی می شوند. خواص ترمودینامیکی و انتقالی سیال در نزدیکی نقطه بحرانی منحصر به فرد و قابل توجه می باشند. پاره ای از خصوصیات دیگر نقطه بحرانی بدین قرارند:

۱. تراکم پذیری همدم، به میزان نامحدودی افزایش می یابد.
۲. تراکم پذیری آدیاباتیک (آیزنتروپیک) به ماکزیموم مقدار خود می رسد، اما این مقدار ماکزیموم، مقدار محدودی است.
۳. سرعت صوت در این نقطه، از مقدار مینیموم غیر صفر خود عبور خواهد کرد. زیرا سرعت صوت و تراکم پذیری آیزنتروپیک نسبت عکس با هم دارند.
۴. گرماهای ویژه حجم ثابت و فشار ثابت هر دو بطور نامحدودی افزایش می یابند. البته شدت افزایش گرمای ویژه فشار ثابت بسیار بیشتر و پر قدرت تر از شدت افزایش گرمای ویژه حجم ثابت است.

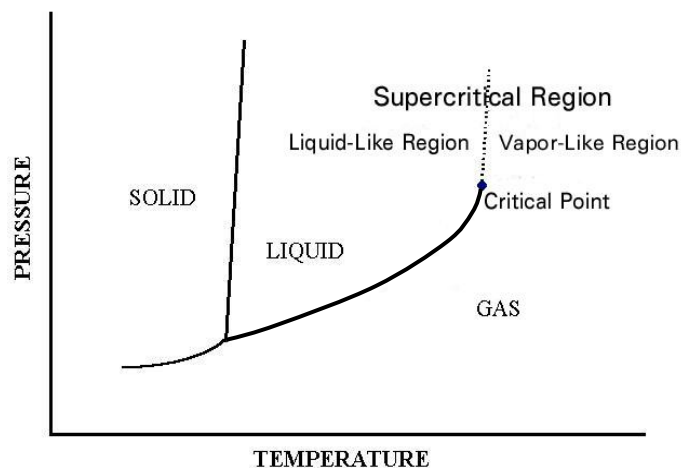
در جدول زیر مشخصات نقطه بحرانی برخی از سیالات آورده شده اند:

حجم بحرانی m <sup>3</sup> /Kg	فشار بحرانی Mpa	درجه حرارت بحرانی C
0.003155	22.09	374.14
0.002143	7.39	31.05
0.002438	5.08	-118.35
0.032192	1.30	-239.85

جدول (۱-۱): مشخصات نقطه بحرانی برای چند ماده خالص. (ون وایلن و زونتاک، ۱۹۸۵)

خط فشار ثابت PQ در شکل (۱-۱) را، که متناظر با فشاری بزرگتر از فشار بحرانی می باشد، در نظر بگیرید. سیال ابتدا در حالت P قرار دارد. اگر به سیال طی یک فرآیند فشار ثابت حرارت داده شود، هیچگاه دو فاز مایع و بخار را در کنار هم نخواهیم دید. یعنی هیچگاه دو فاز بخار و مایع از یک ماده خالص با یکدیگر در تعادل وجود نخواهند داشت. بلکه بجای آن یک تغییر پیوسته را در دانسیته سیال مشاهده خواهیم کرد بطوریکه همواره تنها یک فاز وجود دارد.

برای هر فشار فوق بحرانی، یک درجه حرارت نزدیک به دمای بحرانی وجود دارد که تغییرات خواص سیال، در آن درجه حرارت، حداکثر است. به این درجه حرارت، دمای شبه بحرانی<sup>۱</sup> گویند. در شکل (۲-۱)، دیاگرام فشار-درجه حرارت سیال نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود، دمای شبه بحرانی اندکی بزرگتر از دمای بحرانی است و مقدار آن با افزایش فشار افزایش می یابد. مکان هندسی نقاط شبه بحرانی با خط چین مشخص شده است. در اغلب موارد، منظور ما از منطقه فوق بحرانی، محدود می گردد به ناحیه مجاور به نقاط شبه بحرانی، که در آن تغییرات خواص سیال بسیار شدید است. این محدوده، ناحیه بحرانی<sup>۲</sup> نیز نامیده می شود. شکل (۲-۱): نمودار بدون مقیاس فشار-درجه حرارت آب خالص (دیاگرام فاز).



<sup>۱</sup> Pseudo-critical Temperature

<sup>۲</sup> Critical Region

مکان هندسی دماهای شبه بحرانی با خط چین مشخص شده است  
(بازارگان ۲۰۰۱).

در فشارهای فوق بحرانی، در دماهای پایین تر از دمای شبه بحرانی، سیال را شبه مایع<sup>۱</sup> و در دماهای بالاتر از دمای شبه بحرانی، سیال را شبه بخار<sup>۲</sup> می نامیم. لازم به تذکر است که در ناحیه فوق بحرانی، هرچه فشار نزدیکتر به فشار بحرانی باشد، تغییرات خواص در مجاورت دمای شبه بحرانی شدیدتر خواهد بود. اما با افزایش فشار، از شدت تغییر این خواص نیز کاسته خواهد شد.

از آنجا که تغییرات عرضی فشار در اغلب لایه های مرزی حرارتی قابل صرف نظر کردن است، لذا لازم است نحوه تغییرات خواص سیال در امتداد خطوط فشار ثابت را مورد بررسی قرار دهیم. دانش ما از تغییرات خواص ترمودینامیکی و انتقالی سیال در ناحیه بحرانی کامل نیست. لیکن، همانطور که در این پایان نامه توضیح داده خواهد شد، محدودیت درک و فهم از انتقال حرارت در ناحیه بحرانی، بیشتر به علت نقص دانش ما از فرآیندهای انتقال حرارت (نظیر پخش تلاطم و انتشار اغتشاش<sup>۳</sup> و نیز اثرات شناوری) می باشد تا نامعلومی خواص فیزیکی سیال.

در شکل (۳-۱)، نحوه تغییرات خواص ترمودینامیکی و انتقالی آب با درجه حرارت در فشار ۲۴ MPa نشان داده شده است. سایر خواص که، به منظور جلوگیری از تراکم اطلاعات، در شکل (۳-۱) نشان داده نشده اند نیز دچار تحول چشمگیری در نزدیکی دمای بحرانی می گردند. مثلاً؛ نحوه تغییرات جرم حجمی از لحاظ کیفی مشابه تغییرات ویسکوزیته بوده و مقدار آن بشدت در ناحیه بحرانی کاهش می یابد.

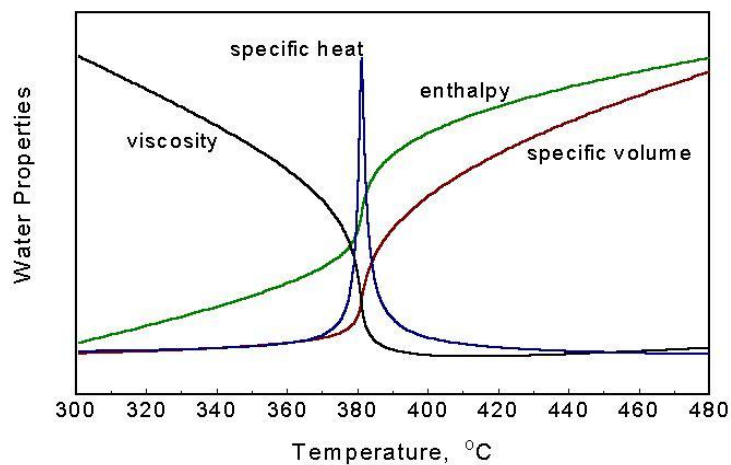
---

<sup>۱</sup> Liquid- Like

<sup>۲</sup> Vapor- Like

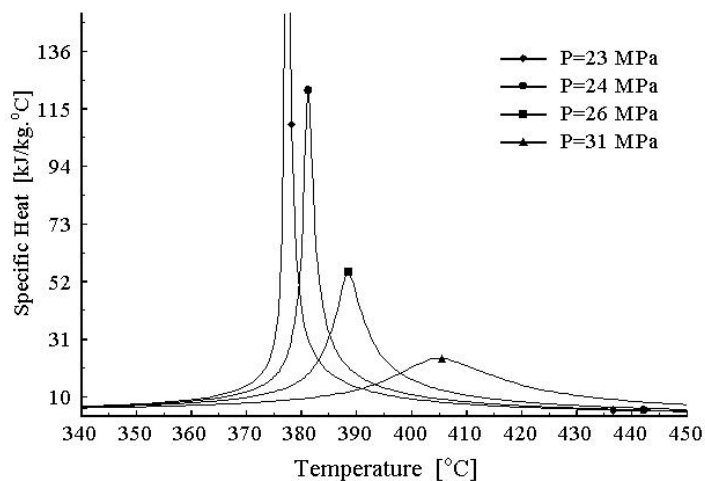
<sup>۳</sup> Turbulent diffusion





شکل (۳-۱): نحوه تغییرات برخی خواص آب فوق بحرانی در فشار ۲۴ MPa (بازارگان ۲۰۰۱)

مجدداً متذکر می شویم که با افزایش فشار در شرایط فوق بحرانی، علاوه بر آنکه دمای شبه بحرانی افزایش می یابد، از مقدار ماکزیموم گرمای ویژه نیز کاسته می شود و همچنین از شدت تغییرات خواص دیگر هم کاسته می شود.



شکل (۴-۱): منحنی های تغییرات گرمای ویژه آب با دما در چند فشار فوق بحرانی (بازارگان ۲۰۰۱).

این الگوی تغییر خواص تنها محدود به آب نمی شود، بلکه بسیاری از سیالات دیگر نیز از این الگو تبعیت می کنند. البته این تشابه رفتاری، محض و صریح نیست و الگوی تغییر خواص را نمی توان تنها برحسب فشار کاهیده<sup>۱</sup> و دمای کاهیده<sup>۲</sup> توصیف کرد. (هال<sup>۳</sup>، ۱۹۷۰، جکسون<sup>۴</sup> و هال (۱۹۷۹)

## ۱-۲- ویژگیهای انتقال حرارت جابجایی به سیالات فوق بحرانی

در جریانهای با فشار متعارف، معمولاً<sup>۱</sup> نوسانات یا اغتشاشات ناشی از تغییرات خواص سیال ناچیزند. اما در ناحیه فوق بحرانی، تغییرات شدید خواص فیزیکی با دما باعث پدید آمدن اثراتی میشود که قابل صرف نظر نمی باشند. به همین دلیل فرآیند انتقال حرارت به سیالات فوق بحرانی بسیار پیچیده تر از فرآیندهای انتقال حرارت به سیالات در شرایط متعارف و معمولی (خواص ثابت) می باشد. واضح است مدل‌های تئوری و روابط تجربی که برای پیش بینی میزان انتقال حرارت به سیالات با خواص ثابت بکار برده می شوند، در مورد سیالات فوق بحرانی کارایی لازم را ندارند.

در بررسی تجربی آثار و پدیده‌هایی که در ناحیه فوق بحرانی یا نزدیک به حالت بحرانی رخ می دهند، دشواری‌ها و پیچیدگیهای فراوانی وجود دارند. این دشواریها منحصر به کارکردن با دستگاه‌ها در دما و فشارهای بالا نیستند. تراکم پذیری سیال در ناحیه نزدیک به نقطه بحرانی افزایش بسیار چشمگیری را تجربه می کند، و در نتیجه موجب میشود که جرم حجمی نسبت به تغییرات نسبتاً کوچک فشار حساس شود. بنابراین جلوگیری از نوسانات فشار، هرچند هم که اندک باشد، برای تأمین صحت اندازه گیری‌ها و دقت آزمایش حیاتی است. گرمای ویژه نیز در نزدیکی نقطه بحرانی بشدت افزایش می یابد و به همین دلیل مانع برقراری سریع تعادل حرارتی می گردد. این امر موجب افزایش زمان آزمایش و پیدایش مشکلات مربوط به خود می شود.

وقتی فشار به میزان کافی پایین تر از فشار بحرانی باشد، آنگاه مسئله ما به سوی پدیده جوشش میل خواهد کرد. همچنین وقتی فشار به میزان کافی بالاتر از مقدار بحرانی آن باشد، با پدیده انتقال حرارت جابجایی با خواص ثابت مواجه خواهیم شد. اما تمرکز ما روی ناحیه ای است

<sup>۱</sup> Reduced Pressure

<sup>۲</sup> Reduced Temperature

<sup>۳</sup> Hall

<sup>۴</sup> Jackson

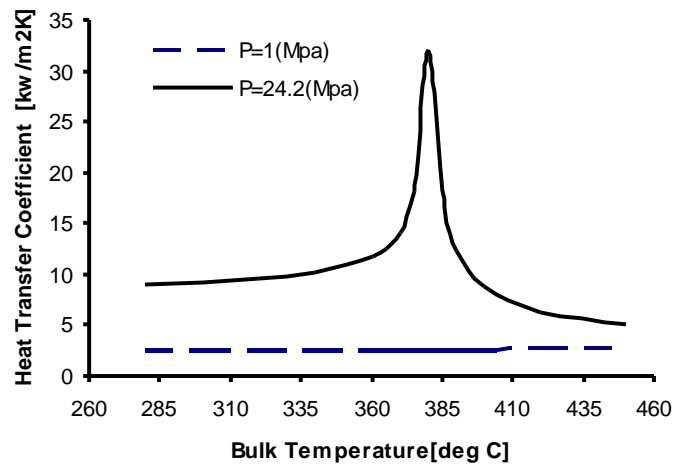
که به نقطه بحرانی نزدیکتر است. در این ناحیه، تغییرات خواص بسیار شدید است و اثرات انتقال حرارت بسیار مهمی وجود دارد. این اثرات غالباً در محدوده فشارهای بین فشار بحرانی تا  $1/2$  برابر آن رخ می دهند. ممکن است تصور شود که در این ناحیه جوشش و جابجایی حرارتی ترکیب میگردند (یکی میشوند). دانش ما از فرآیند انتقال حرارت در این ناحیه، اندک بوده و روشهای تئوری و تجربی موجود نیز ناکافی است.

از خصوصیات دیگر ناحیه فوق بحرانی آنستکه معادله انرژی غیرخطی می شود و تناسب شار با اختلاف دما دیگر برقرار نخواهد بود. تغییرات در جرم حجمی موجب تغییر سرعت خواهد شد که این پدیده هم می تواند به علت انبساط حرارتی باشد، و هم می تواند به علت شناوری باشد. این عوامل همراه با گرمای ویژه محلی بالا، تأثیرات مهمی روی انتقال حرارت جابجایی دارند. انتشار گرما در سراسر لایه مرزی که بوسیله جنبش ها و کنش های مولکولی و همچنین بوسیله حرکت آشفته توده ای ملکولها انجام می گیرد، تحت تأثیر تغییرات ضریب هدایت حرارتی و گرمای ویژه است. به عبارتی ضریب انتقال حرارت به شدت به شار حرارتی و شار جرمی وابسته است. در ادامه به شرح برخی از ویژگیهای منحصر بفرد انتقال حرارت جابجایی در این ناحیه پرداخته ایم.

### ۱-۲-۱- بهبود چشمگیر انتقال حرارت

به دنبال تغییرات شدید خواص سیال در ناحیه بحرانی، انتقال حرارت در این ناحیه به شدت افزایش می یابد. نمودار شکل (۱-۵) نحوه تغییرات ضرایب انتقال حرارت با دمای سیال را برای دو فشار بحرانی و غیر بحرانی نشان می دهد. سیال را آب در نظر گرفته ایم. جریان، کاملاً توسعه یافته، آشفته و داخل لوله ای مدور با سطح مقطع ثابت می باشد. دیواره لوله تحت تأثیر شار حرارتی یکنواخت قرار گرفته است.

همچنانکه از این شکل آشکار است، در حالت فوق بحرانی ( $P = 24 / 2 \text{ MPa}$ )، وقتی دمای شبه بحرانی بین دمای حجمی سیال و دمای دیواره لوله قرار می گیرد، ضریب انتقال حرارت به شدت افزایش می یابد. از مقایسه ضرایب انتقال حرارت در دو فشار زیر بحرانی<sup>۱</sup> و فوق بحرانی مشاهده می شود که میزان انتقال حرارت در شرایط فوق بحرانی به طرز فوق العاده ای بزرگتر از شرایط متعارف و معمولی می باشد. در واقع همین نرخ بالای انتقال حرارت در سیالات فوق بحرانی، اساس ایده استفاده از آنها در سیستمهای مختلف مهندسی می باشد.



شکل (۵-۱): نمودار ضرایب انتقال حرارت برای جریان آشفته آب در داخل لوله حلقوی، در دو

فشار زیر بحرانی ( $P = 1 \text{ MPa}$ ) و فوق بحرانی ( $P = 24.2 \text{ MPa}$ ) ;  $r_0 = 3/75 \text{ mm}$

$$q''_w = 10.7 \text{ kw/m}^2 ; G = 576 \text{ Kg/m}^2 / \text{sec}$$

بحث، بررسی و توضیح پدیده افزایش انتقال حرارت در ناحیه بحرانی، در واقع موضوع اصلی این پایان نامه است که در فصول بعدی به طور مشروح به آن خواهیم پرداخت.

### ۱-۲-۲-۱- اخلال در انتقال حرارت

باید توجه داشت که افزایش میزان انتقال حرارت، تنها ویژگی انتقال حرارت در فشارهای فوق بحرانی نیست. تحت یک شار جرمی معین با افزایش شار حرارتی از میزان افزایش انتقال حرارت در ناحیه بحرانی کاسته میشود. با افزایش بیشتر شار حرارتی روند ذکر شده در فوق تا آنجا ادامه می یابد که از افزایش انتقال حرارت بطور کامل جلوگیری میشود و حتی با پدیده اخلال در انتقال حرارت مواجه می شویم. این مطلب به وضوح از شکل (۶-۱) قابل ملاحظه است. گاه در اثر این اخلال، دمای دیواره تا حد نگران کننده ای بالا می رود.