

مطالعه تجربی ضریب انتقال حرارت جوششی مبرد R-134a درون لوله

موج‌دار پیچشی

مهدی اسماعیل پور^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۳/۲۱)

محمدعلی اخوان بهابادی^۱

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه تهران

چکیده

در این تحقیق، مطالعه آزمایشگاهی بر روی ضرایب انتقال حرارت جوششی جریان مبرد R-134a داخل لوله موج‌دار پیچشی با شیب‌های مختلف لوله نسبت به افق، α ، جهت بررسی یکی از روش‌های افزایش انتقال حرارت جوششی صورت گرفته است. دستگاه مورد استفاده، یک سیستم تبرید تراکمی بخار مجهز به کلیه وسایل اندازه‌گیری مورد نیاز است. این سیستم شامل یک اواپراتور تست است که، از یک لوله موج‌دار پیچشی استاندارد، از جنس مس، تشکیل شده است و مبرد R-134a جاری در آن به وسیله المنت حرارتی، گرم می‌شود. در این مطالعه داده‌های تجربی برای قرارگرفتن لوله در هفت شیب و برای چهار سرعت جرمی متفاوت مبرد جمع‌آوری گردید. تحلیل داده‌ها نشان داد که در سرعت جرمی پایین مبرد و کیفیت پایین بخار، بالاترین ضریب انتقال حرارت جوششی که مربوط به شیب $\alpha + 90^\circ$ می‌باشد، حدوداً $1/62$ برابر پایین‌ترین ضریب انتقال حرارت در شیب $\alpha = -90^\circ$ است. همچنین براساس نتایج آزمایشگاهی حاضر، رابطه‌ای برای ناسلت به‌عنوان عدد بی‌بعد جایگزین h پیشنهاد گردید که این رابطه 92% نتایج را در محدوده $\pm 10\%$ با بهره‌گیری از روش تحلیل خطای کول و شولتز پیش‌بینی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: افزایش انتقال حرارت، جریان دوفازی، الگوی جریان، لوله موج‌دار پیچشی، شیب لوله

Experimental Investigation of Evaporation Heat Transfer of R-134a Flow Inside a Corrugated Tube

M.A. Akhavan Behabadi

Mechanical Engineering Department

Tehran University

M. Esmailpour

Mechanical Engineering Department

Tarbiat Modares University

(Received: 13/January/2014; Accepted: 11/June/2014)

ABSTRACT

In this research, an experimental investigation has been carried out to study the heat transfer characteristics during evaporation of R-134a inside a corrugated tube. The corrugated tube has been provided with different tube inclination angles of the direction of fluid flow from horizontal, α . The Devices used in this study works based on a vapor compression refrigeration cycle. This test system includes an evaporator, which is composed of a standard corrugated tube. Heat required for evaporation of refrigerant in the evaporator is supplied by the heating element that is wrapped around it. The experiments were performed for seven different tube inclination angles, α , in a range of -90° to $+90^\circ$ and four mass velocities of 46, 81, 110 and $136 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ for each tube inclination angle during evaporation of R-134a. The results demonstrate that the tube inclination angle, α , affects the boiling heat transfer coefficient in a significant manner. For all refrigerant mass velocities, the best performing tube is that having inclination angle of $\alpha = +90^\circ$. The effect of tube inclination angle, α , on heat-transfer coefficient, h , is more prominent at low vapor quality and low mass velocity. In the low vapor quality region the heat transfer coefficient, h , for $+90^\circ$ inclined tube is about 62% more than that of the -90° inclined tube.

Keywords: Enhancement of Heat Transfer, Two Phase Flow, Flow Pattern, Corrugated Tube, Inclination

۱- استاد (نویسنده پاسخگو): akhavan@ut.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری

فهرست علائم و اختصارات

نمادهای لاتین	نمادهای یونانی
C_p ظرفیت گرمایی ویژه	α ضریب وید
d_o قطر معادل	η راندمان سطح
d_i قطر داخلی لوله	
E عمق شیار	
F ضریب اصطکاک	
Fr عدد فرود	
G سرعت جرمی	
G شتاب جاذبه	
L طول تبخیر کننده	
P گام	
ΔP افت فشار	
Pr عدد پرنتل	
Q میزان انتقال حرارت	
Re عدد رینولدز	
Q شار حرارتی شعاعی	
x کیفیت بخار	

۱- مقدمه

امروزه به دلیل محدودیت‌های منابع انرژی و افزایش هزینه‌ها، در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی، طراحی و ساخت اپراتورهایی با راندمان بالاتر و حجم کمتر به شدت مورد توجه قرار گرفته است، بنابراین روش‌های مختلفی جهت افزایش انتقال حرارت در اپراتورها پیشنهاد شده است [۴-۱]. جریان جوششی (دوفازی) در این مطالعه درون لوله موج‌دار پیچشی^۱ که یکی از روش‌های افزایش انتقال حرارت (روش غیرفعال) [۵] می‌باشد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. دلیل این مسئله، امکان ساخت و استفاده آسان آن در تجهیزات مربوطه و کارایی بالا و بهینه لوله‌های موج‌دار پیچشی در افزایش انتقال حرارت در مقایسه با لوله صاف با همان قطر داخلی می‌باشد. در واقع کارایی بالا و بهینه لوله‌های موج‌دار پیچشی در افزایش

انتقال حرارت، به دلیل ایجاد جریان چرخشی، ایجاد اغتشاش در جریان و محدود شدن رشد لایه مرزی ناشی از موج‌های پیچشی روی سطح این لوله است [۷-۶]. فرآیند جوشش درون لوله‌ای در تجهیزات گوناگونی از قبیل نیروگاه‌ها (بخار، خورشیدی و هسته‌ای)، کارخانجات صنایع شیمیایی، سیستم‌های تبرید و تهویه مطبوع رخ می‌دهد و طراحی بهینه این مبدل حرارتی اهمیت زیادی در صرفه‌جویی انرژی دارد. بدین‌منظور روش‌های مختلفی جهت افزایش ضریب انتقال حرارت پیشنهاد شده است که یکی از این روش‌ها، استفاده از لوله‌های موج‌دار پیچشی است. این لوله‌ها به دلایل: الف) سهولت ساخت ب) کاهش رسوب‌گذاری ج) افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت در مقابل افزایش جزئی افت فشار، نسبت به سایر سطوح زبر از قبیل: لوله‌های فین‌دار، لوله‌ها با سطوح زبر برجسته، سیم‌پیچ داخل لوله و لوله با شیار متقاطع، دارای برتری هستند [۸].

بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه افزایش انتقال حرارت با استفاده از لوله‌های موج‌دار پیچشی در جریان‌های چگالشی و جوششی و همچنین جریان‌های تک‌فاز نشان می‌دهد که این هندسه احتمالاً نخستین بار توسط وایدرز^۲ و همکاران جهت افزایش انتقال حرارت چگالشی بخار روی سطح خارجی لوله‌های موج‌دار پیچشی و صاف در ردیف‌های عمودی چگالنده نیروگاهی مورد بررسی قرار گرفت [۹]. نتایج تجربی در این بررسی افزایش ۵۰٪ انتقال حرارت در لوله‌های موج‌دار پیچشی را نسبت به لوله‌های صاف در دمای ۱۰۱ تا ۲۱۲ درجه فارنهایت گزارش دادند. زیمپارو^۳ و همکاران [۸] به بررسی انتقال حرارت و اصطکاک روی سطح خارجی لوله‌های موج‌دار در چگالنده‌های نیروگاهی به صورت تجربی پرداختند. معیار ارزیابی عملکرد (حاصل تقسیم ضریب افزایش انتقال حرارت لوله موج‌دار بر ضریب انتقال حرارت لوله صاف) برای تعیین میزان برتری ایجاد شده توسط لوله موج‌دار بررسی شد. لازم به ذکر است که، کاهش و یا حذف رسوب‌گذاری با استفاده از لوله‌های موج‌دار سبب افزایش بازدهی در چگالنده‌ها شد. همچنین نووز^۴ و همکاران [۱۰] به بررسی انتقال حرارت چگالشی میردهای CFC۱۱ و CFC۱۳ روی سطح خارجی لوله موج‌دار پیچشی در چگالنده دولوله‌ای هم‌مرکز کویلی شکل پرداختند.

2- Withers
3- Zimparov
4- Nozu

1- Corrugated Ttube

لاهارچا و وانگویز [۱۴] به بررسی اثرات پارامترهای هندسی موج‌های پیچشی سطح لوله بر ضریب انتقال حرارت و افت فشار درون لوله موج‌دار پیچشی در فرآیند چگالش مبرد R-134a در حالت افقی پرداختند. خویینی و همکاران [۱۵] به بررسی انتقال حرارت چگالشی جریان مبرد R-134a در داخل یک لوله موج‌دار پیچشی با شیب‌های متفاوت پرداختند. آنالیز داده‌ها نشان می‌داد که تغییرات شیب لوله تأثیر زیادی بر انتقال حرارت دارد و بیشترین ضریب انتقال حرارت متعلق به شیب ۳۰+ درجه بود که ۱/۴ برابر بزرگتر از حداقل مقدار آن در شیب ۹۰- درجه بود.

با توجه به اینکه چگونگی انتقال حرارت در لوله‌ها تحت تأثیر الگوی جریان دوفازی است و این الگو نیز متأثر از تقابل بین تنش برشی میان فازی، کشش سطحی و نیروی جاذبه می‌باشد، بنابراین میدان نیروی جاذبه (قدرت و جهت اثر آن) از تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر جریان دوفازی داخل لوله‌ها برخوردار است. از آنجا که مطالعات انجام شده تاکنون، اکثراً در خصوص تعیین تأثیر پارامترهای گوناگون موثر بر انتقال حرارت لوله‌های موج‌دار پیچشی از قبیل: آثار گام موج‌های پیچشی، نوع سیال عامل، اثر نوارهای پیچشی و غیره بر جریان دوفازی در لوله‌های افقی بوده است، لذا با مرور تحقیقات صورت گرفته و با توجه به فقدان مطالعات در خصوص تأثیر جهت نیروی جاذبه بر انتقال حرارت جریان جوششی، این نتیجه گرفته شد که مطالعه حاضر بر روی لوله‌های موج‌دار پیچشی با شیب‌های مختلف در محدوده ۹۰- تا ۹۰+ درجه (با فواصل ۳۰ درجه) انجام گردد.

۲- دستگاه آزمایش

به‌منظور جریان دادن بخار مبرد در قسمت تحت آزمایش از یک سیستم تبرید تراکمی بخار استفاده شده است. دیگرام شماتیک این سیستم در شکل ۱ نشان داده شده است. این سیستم شامل کمپرسور، اپراتور اولیه، تست اپراتور، اپراتور ثانویه، کندانسور، شیر انبساط، دریافت‌کننده مایع و وسایل لازم برای اندازه‌گیری می‌باشد.

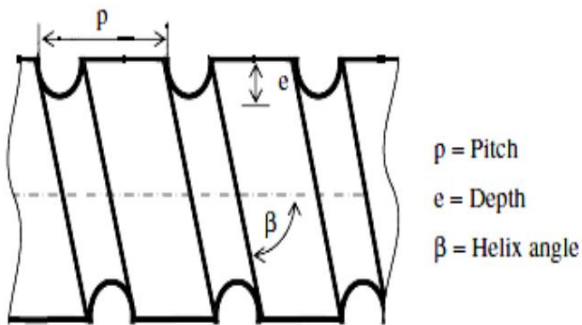
اپراتور تست شامل یک لوله موج‌دار پیچشی از جنس مس می‌باشد که گرمای مورد نیاز برای تبخیر مبرد R-134a به‌وسیله المنت حرارتی که به دور آن پیچیده شده است، تأمین می‌شود. لوله موج‌دار پیچشی با قطر خارجی ۹/۵۴ mm و طول ۱۱۰۰ mm می‌باشد. المنت حرارتی به‌طول ۸/۴ متر و مقاومت بر متر ۲/۶۶۹ Ω/m ، به‌طور یکنواخت بر روی لوله

در جریان چگالشی و جوششی درون لوله‌های موج‌دار پیچشی، تارگانسکی و شیسلینسکی^۱ [۱۱] در یک بررسی تجربی انتقال حرارت و افت فشار را در فرآیند تبخیر R-407C مورد بررسی قرار دادند. اطلاعات تجربی مربوط به R-407C خالص و نیز مخلوط R-407C/oil در دو لوله ساده و لوله موج‌دار پیچشی از جنس فولاد ضدزنگ ارائه شد. در طول آزمایشات کیفیت بخار در ورودی ۰ و در خروجی ۰/۷ در نظر گرفته شده است. آزمایش‌ها با در نظر گرفتن دمای اشباع متوسط صفردرجه و سرعت جرمی بین ۲۵۰ تا $2 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ، صورت گرفته است. به‌طور مشخص ضریب انتقال حرارت متوسط بالاتری برای لوله‌های موج‌دار پیچشی مشاهده شد. لاهالرچا و وانگویز^۲ [۱۲] اثر گام را بر ضریب انتقال حرارت و افت فشار درون لوله موج‌دار پیچشی در فرآیند چگالش مبرد R-134a در حالت افقی بررسی کردند. آزمایش‌ها در گام‌های لوله موج‌دار پیچشی در سه حالت ۵/۰۶ و ۶/۳۵ و ۸/۴۶ میلی‌متر انجام شد. نتایج حاصله نشان داد که با کاهش گام، ضریب انتقال حرارت تمایل به افزایش دارد، زیرا گام‌های کمتر سبب افزایش اغتشاش جریان مبرد و به‌دنبال آن اختلاط فیلم چگالیده شده را در پی دارد. این اغتشاش به‌دلیل موج‌های پیچشی روی سطح لوله است. لاهالرچا و وانگویز [۷] به بررسی تجربی انتقال حرارت و مشخصه جریان در فرآیند تبخیر R-134a داخل لوله موج‌دار پیچشی افقی پرداختند. نتایج حاکی از افزایش انتقال حرارت در لوله موج‌دار نسبت به لوله صاف بود زیرا سطح لوله موج‌دار سبب افزایش اختلاط فیلم مایع جاری در سطح لوله و در نتیجه افزایش انتقال حرارت و ناپایداری در جریان مبرد می‌شود. بیشترین افزایش عدد ناسلت در لوله موج‌دار نسبت به لوله صاف ۳۰٪ گزارش شد که این افزایش در کمترین گام لوله موج‌دار پیچشی بود. آرونارت و وانگویز^۳ [۱۳] به بررسی تجربی انتقال حرارت و مشخصه اصطکاک فرآیند تبخیر در لوله موج‌دار پیچشی عمودی در جریان رو به پایین R-134a پرداختند. مبدل حرارتی عمودی به‌طول ۰/۵ متر و به‌صورت دو لوله هم‌مرکز جریان مخالف بود، به‌طوری‌که مبرد در لوله داخلی (لوله موج‌دار پیچشی) و آب گرم در بین دو لوله جریان داشت. نتایج از افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش کیفیت بخار، شار جرمی و شار حرارتی خبر داد.

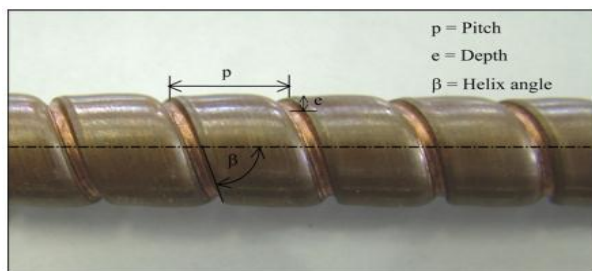
1- Targanski and Cieslinski

2- Laohalertdecha and Wongwise

3- Aroonrat and Wongwises



(ب)



(ج)

شکل (۲): تصویر و مشخصات هندسی لوله موج‌دار پیچشی (الف) تصویر برش خورده، برجستگی‌های پیچشی داخلی (ب) تصویر شماتیک لوله (ج) لوله موج‌دار پیچشی به همراه مشخصات هندسی.

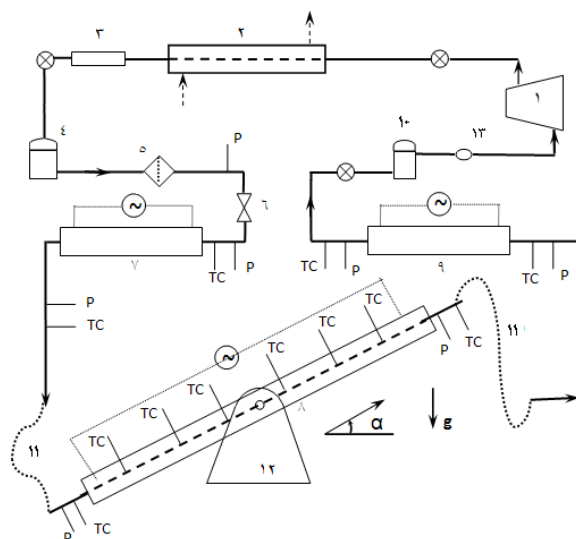
در جدول ۱، اندازه و نماد هر یک از مشخصات هندسی لوله موج‌دار پیچشی آمده است:

جدول (۱): اندازه و نماد مشخصات هندسی لوله موج‌دار پیچشی.

نام مشخصه هندسی	نماد	اندازه
قطر داخلی لوله	d_i	۸/۷ mm
قطر بیرونی لوله	d_o	۹/۵ mm
ضخامت دیواره	w_t	۰/۶ mm
گام	P	۸ mm
عمق شیار	e	۱/۵ mm
زاویه شیار با افق	β	۷۵°

از آنجاکه طول لوله مورد آزمایش محدود است، دامنه کمی از تغییرات کیفیت بخار در تست اپراتور قابل حصول می‌باشد. بنابراین به منظور پوشش دادن کل دامنه جوشش، سیستم به گونه‌ای طراحی شده است که کیفیت‌های متفاوت بخار، در ورود به تست اپراتور قابل دستیابی باشد، این کار با نصب یک پیش اپراتور در بین شیر انبساط و تست اپراتور محقق شده و با تغییر توان الکتریکی ورودی به المنت‌های حرارتی بر روی پیش اپراتور می‌توان کیفیت بخار را در ورود به تست اپراتور

مسی پیچیده شده است. مقدار توان مورد نیاز المنت حرارتی توسط یک عدد دیمر سه کیلووات (مجهز به تریاک صنعتی ۲۵ آمپر با حداکثر توان ۳۵۰۰ وات) تنظیم می‌شود. ترموکوپل‌های مورد استفاده از نوع T است که با دقت ۰/۱C و فشارسنج‌ها با دقت ۲KPa کالیبره شده‌اند. لوله‌های موج‌دار پیچشی از جنس مس بوده و مشخصات هندسی آن در شکل ۲ آمده است.



۱- کمپرسور	۶- شیر انبساط
۲- کندانسور	۷- تبخیر کننده اولیه
۳- دبی سنج مبرد	۸- تبخیر کننده تست
۴- دریافت کننده مایع	۹- تبخیر کننده ثانویه
۵- فیلتر درایر	۱۰- جمع کننده مایع
۱۱- شیلنگ	۱۲- الاکلنگ
DP- دستگاه اندازه‌گیری افت فشار	فشارسنج p
شیر قطع و وصل	ترموکوپل TC
جهت جریان	شیشه رویت

شکل (۱): نمای شماتیک دستگاه آزمایشگاهی.



(الف)

ضرایب انتقال حرارت در هر مرحله در تست اپراتور براساس گرمای داده شده توسط المنت و اختلاف درجه حرارت بین دیواره و مبرد در حال جوشش به دست می آید. مراحل محاسبه بدین شرح است:

درجه حرارت متوسط سطح خارجی تست اپراتور در یک نقطه، t_{ws} ، توسط معادله (۱) به دست می آید:

$$t_{ws} = \frac{t_T + t_B}{2} \quad (1)$$

که، t_T و t_B به ترتیب درجه حرارت های فوقانی و تحتانی سطح خارجی لوله در هر مقطع می باشند.

۱- میانگین درجه حرارت های سطح خارجی دیواره تست اپراتور، t_{wo} ، از متوسط گیری درجه حرارت های شش نقطه محوری به دست می آید:

$$t_{wo} = \frac{\sum_{i=1}^6 t_{ws}}{6} \quad (2)$$

۲- گرمای داده شده به تست اپراتور:

$$Q = W \times \eta \quad (3)$$

که، W توان الکتریکی دو سر المنت حرارتی تست اپراتور می باشد.

۳- شار حرارتی شعاعی q ، برای تست اپراتور توسط رابطه زیر محاسبه می شود:

$$q = Q / (\pi D_o L) \quad (4)$$

۴- افت درجه حرارت در دیواره لوله، Δt_w ، از رابطه زیر با استفاده از شار حرارتی شعاعی، هدایت حرارتی لوله مسی، K_w و اقطار داخلی و خارجی لوله محاسبه می شود:

$$\Delta t_w = \frac{q D \ln(D_o / D)}{2k_w} \quad (5)$$

۵- درجه حرارت متوسط سطح داخلی، t_{wi} ، با کاستن افت درجه حرارت در دیواره از درجه حرارت متوسط سطح خارجی محاسبه می شود:

$$t_{wi} = t_{wo} - \Delta t_w \quad (6)$$

۶- فشار استاتیک متوسط در تست اپراتور به صورت میانگین فشارهای ورودی و خروجی مبرد در نظر گرفته می شود. درجه حرارت اشباع بخار در این قسمت، t_s ، درجه حرارت اشباع متناظر با این فشار استاتیک می باشد.

تنظیم کرد. به علاوه جهت سوپرهیت کردن مبرد و جلوگیری از ورود مایع به کمپرسور، از اپراتور ثانویه بعد از تست اپراتور استفاده شده است. جهت قراردادن لوله موج دار پیچشی در شیب های مختلف، در دو طرف تست اپراتور شیلنگ های انعطاف پذیری نصب گردیده که کاملاً عایق هستند.

۳- دستورالعمل آزمایش و جمع آوری داده ها

مجموعاً ۲۲۴ آزمایش مختلف با چهار سرعت جرمی متفاوت $3 \text{ kgm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ، 8.0 و 10.7 و 13.6 برای لوله موج دار پیچشی در هفت شیب مختلف از -90° تا $+90^\circ$ (با فواصل 30°) صورت گرفت. حدود تغییرات پارامترهای کاری به صورت زیر در جدول ۲ نمایش داده شده است:

جدول (۲): حدود تغییرات پارامترهای کاری.

R-134a	سیال مبرد:
$53 \text{ تا } 136 \text{ kgm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	سرعت جرمی مبرد
$30/4 \text{ تا } 3/15^\circ \text{C}$	درجه حرارت جوشش متوسط
$0/19 \text{ تا } 0/94$	کیفیت بخار ورودی به تست اپراتور
$0/29 \text{ تا } 1$	کیفیت بخار خروجی از تست اپراتور
$4569 \text{ تا } 9138 \text{ W/m}^2$	شار حرارتی
$-90 \text{ تا } +90$	زاویه دوران تست اپراتور

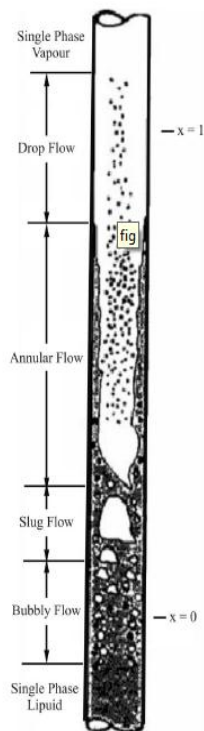
داده های آزمایشگاهی با انجام آزمایش در هر شیب با چهار دبی مبرد و در هر دبی با هشت کیفیت متوسط بخار به دست آمد.

درجه حرارت های اشباع و سوپرهیت و آنتالپی های اشباع R-134a توسط نرم افزار EES متعلق به شرکت کرهای F-Chart تحت حمایت شرکت سامسونگ براساس استاندارد ASHRAE به دست آمده اند، همچنین از جداول داده شده توسط سونتاک و همکارانش^۱ [۱۶] استفاده شده است. بعضی از خواص از جمله کشش سطحی و ویسکوزیته از مقادیر داده شده توسط کولیر و تام^۲ [۱۷] گرفته شده است.

با نوشتن رابطه آنتالپی ثابت دو سر شیر سوزنی، کیفیت بخار ورودی به اپراتور اولیه محاسبه می شود و همچنین برای محاسبه کیفیت بخار در ورودی و خروجی تست اپراتور، از موازنه حرارتی استفاده شده است. کیفیت بخار متوسط نیز به صورت میانگین کیفیت بخار ورودی و خروجی از تست اپراتور محاسبه می شود.

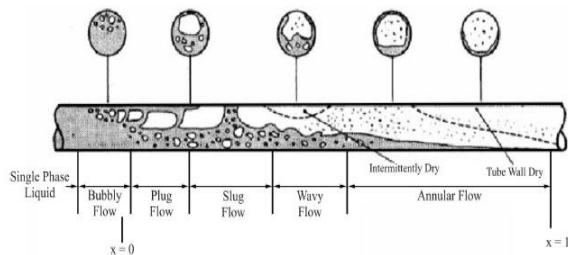
1- Sonntag et al
2- Collier & Thome

الگوهای جریان مشاهده شده در شکل ۳ را طی می کند تا در انتها به جریان تکفاز بخار برسد.



شکل (۳): الگوهای جریان دوفازی در لوله اپراتور در حالت عمودی.

در حالت افقی مایع به لوله افقی که تحت شار حرارتی یکنواخت کم قرار دارد، وارد شده و به صورت بخار سوپرهیت از آن خارج می گردد. تقریباً تمام حالت هائی که در لوله عمودی ایجاد می شود در اینجا نیز ایجاد می گردد. به علت عدم تقارن توزیع دوفاز مایع و بخار، الگوی جریان پیچیده تر از حالت عمودی است. فاصله خشک شدگی سطح بالائی و سطح پائینی لوله زیاد است و گاهی به ۸ تا ۱۰ متر می رسد. البته در سرعت های ورودی مایع بالا، اثر نیروی ثقل کمتر بوده و توزیع فازها متقارن تر است و در نتیجه الگوی جریان شبیه لوله عمودی است. این مطلب در شکل ۴ نمایش داده شده است:



شکل (۴): الگوهای جریان دوفازی در لوله اپراتور در حالت افقی.

۷- ضریب انتقال حرارت تست اپراتور با داشتن شار حرارتی، درجه حرارت جوشش متوسط و درجه حرارت سطح داخلی لوله، توسط معادله (۷) محاسبه می شود.

$$h = \frac{q}{(t_{wi} - t_s)} \quad (7)$$

و یا به صورت مستقیم می توان ضریب انتقال حرارت اپراتور اصلی را از معادله (۸) محاسبه نمود:

$$h = \left[\frac{\pi DL(t_{wo} - t_s)}{\eta VI} - \frac{D}{2k_w} \ln\left(\frac{D_o}{D}\right) \right]^{-1} \quad (8)$$

هرچند اپراتورها را کاملاً عایق گشته اند تا از نشت حرارتی به محیط جلوگیری شود، اما با این وجود مقدار کمی از حرارت المنتها به محیط انتقال می یابد. از آنجا که نحوه عایق کاری اپراتور اولیه، تست اپراتور و اپراتور ثانویه یکسان می باشد، می توان نشت حرارتی کل را به نسبت گرمایی که در آنها تولید می شود، تقسیم کرد. با تعریف ضریب η نشت حرارتی اپراتورها به محیط در محاسبات تأثیر داده می شود:

$$\eta = \frac{Q_{\text{منت}}}{Q_{\text{مورد نیاز}}} \quad (9)$$

که:

$$Q_{\text{مورد نیاز}} = \dot{m}(h_{out} - h_{in})$$

(۱۰)

$$Q_{\text{منت}} = \sum_{i=1}^3 W_i$$

که در آن، h_{out} آنتالپی مبرد سوپرهیت خروجی از اپراتور ثانویه و h_{in} آنتالپی مبرد دو فاز ورودی به اپراتور اولیه و المنت Q مجموع انرژی الکتریکی مصرف شده برای گرمایش سه اپراتور می باشد.

بنابراین، برای هر کدام از اپراتورها، حرارت خالص داده شده به مبرد داخل آنها (Q) از رابطه زیر به دست می آید:

$$Q = W \times \eta \quad (11)$$

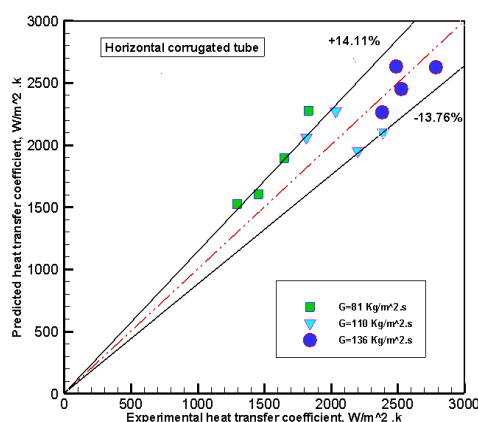
که در آن، W توان الکتریکی المنت گرم کننده اپراتور مورد نظر است.

۴- بررسی اشکال مختلف جریان دوفازی در لوله های عمودی و افقی

در لوله های عمودی مایع از پایین وارد لوله می گردد و به این لوله حرارت داده می شود. تا فاصله ای از ورودی لوله جریان تک فاز داریم. از آن به بعد مایع شروع به بخار شدن می کند و

۵- نتایج و بحث و بررسی

پیش از هر چیز، صحت داده‌های آزمایشگاهی و عملکرد درست دستگاه آزمایش، با جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی در لوله افقی و مقایسه آن با روابط ارائه‌شده در حالت افقی در لوله‌های موج‌دار پیچشی به اثبات رسید. داده‌های آزمایشگاهی مطالعه‌ی جریان جوششی در لوله موج‌دار پیچشی را با روابط ارائه شده توسط لاهارچا و ونگ‌وایز [۷] مقایسه گشته است (شکل ۵). این شکل بیانگر مقایسه‌ی داده‌های مطالعه‌ی حاضر با نتایج و مدل ارائه‌شده توسط لاهارچا و ونگ‌وایز [۷] می‌باشد. ایشان بررسی‌های خود را بر روی جریان جوشش داخل لوله‌های موج‌دار پیچشی در حالت افقی متمرکز کردند.



شکل (۵): مقایسه مقادیر آزمایشگاهی ضرایب انتقال حرارت لوله موج‌دار پیچشی افقی (نقاط)، با مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط لاهارچا و ونگ‌وایز (خطوط) [۷].

در مطالعه حاضر پارامترهای زیادی توسط ابزارهایی با دقت‌های متفاوت اندازه‌گیری شدند. خطاهای اندازه‌گیری این پارامترها بر دقت ضریب انتقال حرارت تاثیرگذار است. بنابراین لازم است تا تأثیر خطای هر کدام از این پارامترها، بر مقدار ضریب انتقال حرارت محاسبه گردد. خطای یک آزمایش به صورت قدرمطلق حداکثر انحراف ممکن از مقدار آزمایشگاهی گزارش شده، تعریف می‌شود. برای تحلیل خطای نتایج آزمایش از روش شولتز و کول^۱ [۱۸] استفاده شده است. همان‌طور که از شکل ۵ ملاحظه می‌شود، رابطه لاهارچا و ونگ‌وایز، داده‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر را بین $\pm 14\%$ پیش‌بینی می‌کند.

لاهارچا و وانگ‌ویز روابط تجربی انتقال حرارت و مشخصه جریان در فرآیند تبخیر جریان R-134a داخل لوله موج‌دار پیچشی افقی را به این صورت ارائه دادند:

$$Nu = 0.107 Re_{eq} Pr^{0.3} \left(\frac{\rho_l}{D_i}\right)^{-0.1} \quad (12)$$

$$Re_{eq} = Re_l + Re_v \left(\frac{\mu_v}{\mu_l}\right) \left(\frac{\rho_l}{\rho_v}\right)^{0.5} \quad (13)$$

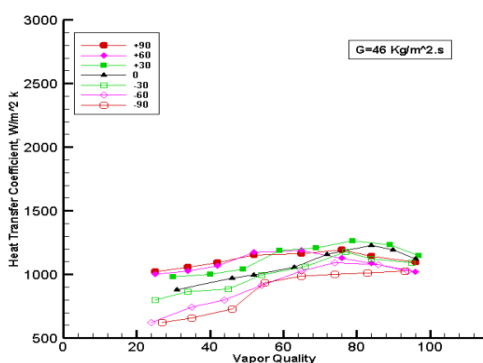
$$Re_l = \frac{GD(1-x)}{\mu_l} \quad (14)$$

$$Re_v = \frac{GDx}{\mu_v} \quad (15)$$

که در آن، e عمق شیار پیچشی، p گام شیار، اندیس‌های v و l به ترتیب نمایانگر مشخصات فاز بخار و مایع هستند. لازم به ذکر است که به دلیل بالا بودن محدوده کاری شار جرمی این دو محقق، داده‌های آزمایشگاهی این مطالعه حاضر با نتایج ایشان در سرعت جرمی پایین ($G=46 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$) اختلاف زیادی دارد.

۵-۱- بررسی اثر کیفیت بخار

تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله موج‌دار پیچشی آزمایش شده در شیب‌های مختلف در شکل‌های ۶ الی ۹ نشان داده شده است که هر کدام از این شکل‌ها برای سرعت جرمی مشخص در هفت زاویه مختلف ترسیم شده است.



شکل (۶): تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای سرعت جرمی $46 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ در شیب‌های مختلف.

کیفیت بخار بالا، لایه مایع روی دیواره داخلی لوله، نازکتر بوده باعث مقاومت حرارتی کمتری می‌شود. تا به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد و سپس افت می‌کند. تغییر شیب منحنی ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار می‌تواند به علت تغییر الگوی جریان و مکانیزم‌های مختلف جوشش (هسته‌ای و جابه‌جایی) باشد [۱۹] که در ادامه به توضیح آن می‌پردازیم.

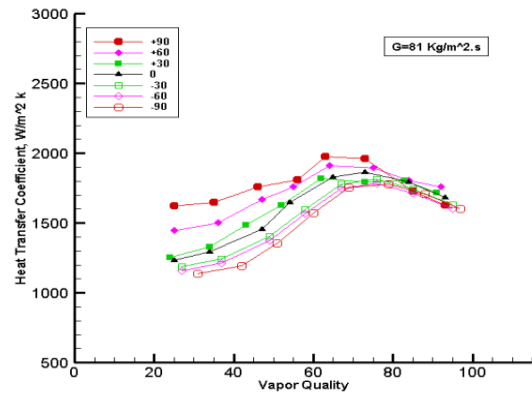
در کیفیت بخار پایین و با توجه به سرعت جرمی، الگوی جریان به جریان حلقوی و یا جریان موجی جداشونده تغییر می‌کند. در این شرایط جوشش جابه‌جایی به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. همزمان جوشش هسته‌ای نیز در فیلم مایع کاهش می‌یابد ولی هنوز وجود دارد. در نتیجه در این ناحیه هر دو مکانیزم جوشش هسته‌ای و جابه‌جایی وجود دارد. با افزایش میزان کیفیت بخار، لایه مایع روی دیواره نازکتر شده و باعث مقاومت حرارتی کمتری شود. زمانی که ضخامت فیلم بسیار کاهش می‌یابد جوشش هسته‌ای کاملاً از بین می‌رود [۲۰].

سرانجام فیلم مایع در بالای لوله کاملاً ناپدید می‌شود (به علت نیروی گرانشی) که در این حالت خشک‌شدگی جزئی دیواره لوله شروع می‌شود و ماکزیمم ضریب انتقال حرارت در شروع خشک‌شدگی اتفاق می‌افتد.

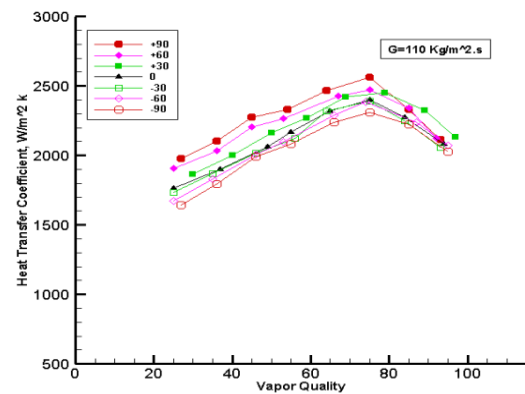
بعد از شروع خشک‌شدگی جزئی دیواره $(0.75 < X < 0.9)$ ، می‌توان از انتقال حرارت در قسمت خشک در مقایسه با قسمت خیس‌شده با مایع صرف‌نظر کرد. همچنین با افزایش کیفیت بخار ضخامت قسمت خیس دیواره کاهش یافته و ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد (به دلیل ضریب هدایت پایین بخار). زمانی که کل دیواره خشک می‌شود، انتظار می‌رود که ضریب انتقال حرارت نزدیک به مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری بخار اشباع گردد.

سرعت جرمی نیز نقش مهمی در مکانیزم جوشش جابه‌جایی در انتقال حرارت جوششی جریانی ایفا می‌کند. به عنوان نمونه، شکل ۱۰ ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار در لوله موج‌دار پیچشی آزمایش شده برای زاویه $+90^\circ$ (جریان عمودی روبه بالا) و با چهار سرعت جرمی مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که ضریب انتقال حرارت جوششی با افزایش سرعت جرمی و ثابت ماندن سایر پارامترها، افزایش می‌یابد.

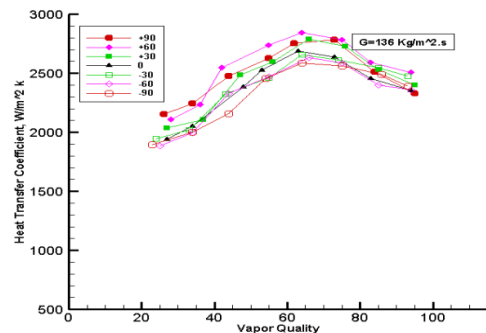
افزایش شار جرمی باعث تغییر الگوی جریان از موجی جداشونده به حلقوی می‌شود. در جوشش جابه‌جایی زمانی که سرعت سیال افزایش می‌یابد، گرمای دیواره لوله سریع‌تر توسط



شکل (۷): تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای سرعت جرمی $81 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ در شیب‌های مختلف.



شکل (۸): تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای سرعت جرمی $110 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ در شیب‌های مختلف.



شکل (۹): تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای سرعت جرمی $136 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ در شیب‌های مختلف.

وابستگی ضریب انتقال حرارت به کیفیت بخار متأثر از توزیع نسبی دو مکانیزم جوشش (هسته‌ای و جابه‌جایی) و الگوی جریان جوششی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت با افزایش کیفیت بخار در همه سرعت جرمی‌ها و همه شیب‌ها زیاد می‌شود، (این پدیده بدین سبب است که در

جدول (۳): نسبت بیشترین به کمترین ضریب انتقال حرارت در کیفیت‌های بالا و پایین.

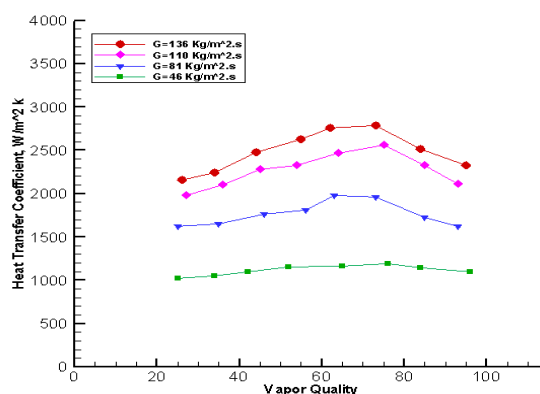
نسبت بیشترین به کمترین ضریب انتقال حرارت		سرعت جرمی G kgm ⁻² s ⁻¹
کیفیت بالا (0.85 < x < 0.95)	کیفیت پایین (0.2 < x < 0.35)	
۱/۱۳	۱/۶۲	۴۶
۱/۰۹	۱/۴۲	۸۱
۱/۰۸	۱/۱۸	۱۱۰
۱/۰۵	۱/۱۲	۱۳۶

همان‌طور که از جدول فوق پیداست افزایش سرعت جرمی و افزایش کیفیت بخار موجب کاهش این نسبت می‌شود. این مسئله را به این صورت می‌توان توجیه نمود که در سرعت‌های جرمی بالا و کیفیت‌های بالای بخار پارامتر اصلی تأثیرگذار بر جریان جوششی تنش برشی میان فازی می‌باشد و نیروی جاذبه و جهت آن تأثیر ناچیزی بر الگوی جریان دوفازی دارد. اما کیفیت بخار پایین و سرعت جرمی پایین موجب کم شدن تنش برشی میان فازی و نیروی اینرسی می‌شود، لذا در این شرایط نیروی جاذبه و جهت اعمال آن بر جریان جوششی از اهمیت بیشتری بر نحوه جریان داخل لوله برخوردار می‌گردد و نهایتاً باعث می‌گردد ضریب انتقال حرارت در شیب‌های مختلف مقادیر متفاوتی پیدا کند [۲۰].

همان‌طور که در شکل‌های ۹-۶ دیده می‌شود، در کیفیت‌های پایین بخار و در دبی‌های جرمی پایین ضریب انتقال حرارت در جریان عمودی رو به بالا (شیب +۹۰°) بیشترین مقدار را دارد. این مسئله را به این صورت می‌توان توجیه نمود که در جریان عمودی رو به بالا، میزان بالای اغتشاشات و تداخل فازها (به دلیل غیرهمسو بودن تنش برشی میان فازی و نیروی جاذبه) سبب بالاتر بودن ضریب انتقال حرارت در زاویه +۹۰° نسبت به بقیه زاویه‌ها می‌شود، یعنی در این حالت با توجه به اثر شناوری بخار و جهت نیروی جاذبه در دبی‌های جرمی پایین، الگوی جریان به هم‌ریخته‌ای باعث تداخل فازها و اغتشاشات میان فازی می‌گردد که ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهد.

با کاهش شیب لوله تا رسیدن به حالت افقی، در مقایسه با جریان عمودی رو به بالا (+۹۰°)، ضریب انتقال حرارت به دلیل تقدم در پدیده جداشدگی زودرس جریان، کاهش می‌یابد. یعنی با افزایش شیب از حالت افقی به حالت قائم، پدیده جداشدگی جریان دیرتر اتفاق افتاده تا اینکه در زاویه +۹۰°

سیال گرفته می‌شود و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر سرعت بالا، باعث افزایش عدد رینولدز می‌شود، بنابراین مانند جابه‌جایی اجباری تک‌فاز، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. به طور خلاصه، در سرعت جرمی بالاتر آثار جابه‌جایی بزرگ‌تر و همچنین آشفتگی بیشتر اتفاق افتاده و در نتیجه موجب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌گردد.



شکل (۱۰): تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار، برای سرعت‌های جرمی مختلف، در شیب +۹۰° درجه (عمودی رو به بالا).

۵-۲- بررسی اثر تغییر شیب لوله

اثر تغییر شیب لوله موج‌دار پیچشی بر ضرایب انتقال حرارت جوششی نیز با استفاده از شکل‌های ۹-۶ قابل بررسی است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، تغییر شیب لوله اثر قابل ملاحظه‌ای بر انتقال حرارت جوششی دارد. این اثر با کم شدن کیفیت بخار و سرعت جرمی، بیش‌تر می‌شود، به‌صورتی که در سرعت‌های جرمی بالا و کیفیت‌های بالای بخار، همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، منحنی‌های ضریب انتقال حرارت جوششی در شیب‌های مختلف به یکدیگر نزدیک می‌شوند و با کم شدن سرعت جرمی و کیفیت بخار، همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، نسبت بیشترین به کمترین ضریب انتقال حرارت در شیب‌های مختلف به بالاترین مقدار خود می‌رسد. به طوری که در کمترین دبی جرمی، ماکزیمم مقدار آن که در شیب +۹۰° اتفاق می‌افتد، ۱/۶۲ برابر کمترین مقدار آن در شیب -۹۰° می‌باشد. جدول ۳ این نسبت را برای محدوده گسترده‌تری نشان می‌دهد.

زاویه قرارگیری اپراتور آزمایش می‌باشد. براساس نتایج آزمایشگاهی حاضر، رابطه‌ای برای ناسلت به‌عنوان عدد بی‌بعد جایگزین h پیشنهاد گردید که از پارامترهای بی‌بعد رینولدز، پراتنل، پارامتر مارتینلی (X_{tt}) و پارامتری جهت اعمال اثر زاویه قرارگیری اپراتور آزمایش در آن استفاده شده است. این رابطه به‌صورت زیر می‌باشد:

$$Nu = 3.79 \times 10^{-3} Re_f^{1.02} F_\alpha^{0.11} \left(\frac{Pr_f}{X_{tt}} \right)^{0.92} \quad (16)$$

که در آن:

$$Nu = \frac{hD}{k_f}; \quad (17)$$

$$Re_f = \frac{GD(1-x)}{\mu_f}; \quad (18)$$

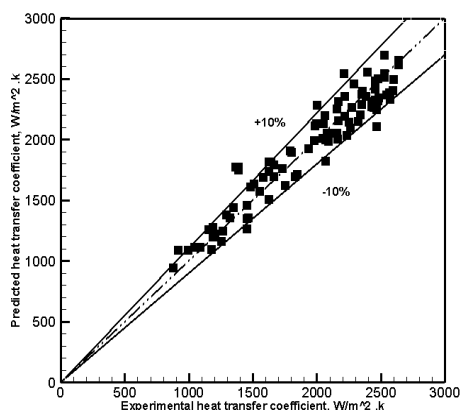
$$Pr_f = \frac{\mu_f C_{pf}}{k_f}; \quad (19)$$

$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_f}{\mu_g} \right)^{0.1} \quad (20)$$

$$F_\alpha = 1 + 0.25(1+x)^{0.6} \sin(\alpha) \quad \text{برای } x < 0.7 \quad (21)$$

$$F_\alpha = 1 - 0.6x^{0.97} \cos(\alpha - 10^\circ) \quad \text{برای } x > 0.7 \quad (22)$$

رابطه (۱۶) جهت پیش‌بینی عدد ناسلت انتقال حرارت جوششی درون لوله موج‌دار پیچشی در سرعت‌های جرمی مختلف، کیفیت‌های بخار مختلف و زوایای مختلف اپراتور ارائه شده که با بهره‌گیری از تحلیل خطای نتایج آزمایش از روش شولتز و کول [۱۸]، همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده، ۹۲٪ نتایج را در محدوده $\pm 10\%$ پیش‌بینی می‌کند:



شکل (۱۱): مقایسه مقادیر آزمایشگاهی ضرایب انتقال حرارت لوله موج‌دار پیچشی با مقادیر قابل پیش‌بینی توسط رابطه (۱۶).

جداشدگی جریان به‌وجود نمی‌آید. بنابراین با افزایش شیب لوله ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

مسئله‌ای دیگر که در شکل‌های ۹-۶ دیده می‌شود این است که پایین‌ترین ضریب انتقال حرارت مربوط به جریان در لوله‌های عمودی رو به پایین می‌باشد. به این‌صورت که در تمامی کیفیت‌های بخار در تمامی موارد لوله با زاویه 90° کمترین ضریب انتقال حرارت را دارا می‌باشد. این مسئله را به این‌صورت می‌توان توجیه کرد که در جریان عمودی رو به پایین به‌دلیل وجود اثرات شناوری بخار، که برخلاف جهت جریان روبه پایین می‌باشد، اثرات شتاب مایع و در نتیجه سهم انتقال حرارت جابه‌جایی کاهش می‌یابد. در این زاویه، همسوبودن تنش برشی میان‌فازی و نیروی جاذبه سبب می‌شود تنها الگوی جریان محتمل در طول لوله، جریان حلقوی باشد که در نتیجه آن در دبی‌های جرمی پایین و کیفیت‌های پایین بخار یک لایه ضخیم از فیلم مایع کل محیط لوله را می‌پوشاند و ایجاد یک عایق حرارتی می‌کند و موجب افت ضریب انتقال حرارت نسبت به شیب‌های دیگر می‌گردد، همچنین این مسئله باعث کم‌شدن مقدار اغتشاشات میان فازی نسبت به زوایای دیگر شده و ضریب انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. ونگ و ایزز و همکارانش^۱ [۱۳] نیز در مطالعه‌ی جریان در لوله‌های عمودی روبه پایین این مورد را گزارش کردند.

همان‌طور که در شکل‌های ۹-۶ دیده می‌شود با افزایش کیفیت بخار و دبی جرمی اختلاف ضریب انتقال حرارت در شیب‌های مختلف ناچیز و حتی در برخی موارد برعکس می‌باشد. این مسئله را به این‌صورت می‌توان توجیه کرد که در کیفیت‌های بالای بخار به‌دلیل سرعت زیاد بخار و غالب بودن اثر تنش برشی و وجود جریان حلقوی، اثرات شیب لوله و جهت نیروی گرانش ناچیز می‌باشد. یعنی با افزایش دبی جریان در کیفیت‌های بالای بخار به‌دلیل افزایش سرعت بخار و اغتشاشات بین دو فاز و کاهش اثرات نیروی وزن، ضرایب انتقال حرارت برای کلیه شیب‌ها به هم نزدیک می‌باشند و گاهی" نمودارها یکدیگر را قطع می‌کنند.

۶- رابطه تجربی جدید عدد ناسلت براساس نتایج آزمایش‌های حاضر

از مطالب فوق به این نکته پی برده می‌شود که ضریب انتقال حرارت جوششی، تابعی از سرعت جرمی مبرد، کیفیت بخار و

۷- نتیجه گیری

در مجموع نتایج زیر از مطالعه حاضر به دست می آید:

- ۱- داده های آزمایشگاهی مربوط به جوشش در لوله موج دار پیچشی افقی با روابط تجربی لاهالرچا و وانگویز [۷] مقایسه شد و مشخص شد که داده های آزمایشگاهی موجود را با خطای $13/67\%$ تا $14/11\%$ پیش بینی می کند.
- ۲- ضریب انتقال حرارت با افزایش کیفیت بخار و سرعت جرمی در همه شیب های لوله افزایش می یابد. با افزایش کیفیت بخار (نزدیک 70% الی 85%) ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد و به یک مقدار ماکزیمم می رسد و سپس به علت رخ دادن خشک شدگی جزئی دیواره افت می کند. این مقدار ماکزیمم در سرعت های جرمی بالا به وضوح مشخص است. البته محل این نقطه ماکزیمم در شیب های مختلف به دلیل تغییر جهت اثر گرانش و الگوهای مختلف جریان حلقوی تغییر می کند.
- ۳- در کنار کیفیت بخار، سرعت جرمی نیز نقش مهمی در میزان جوشش جابه جایی و در نتیجه ضریب انتقال حرارت جوششی جریانی ایفا می کند. ضریب انتقال حرارت با افزایش سرعت جرمی افزایش می یابد.
- ۴- تغییر شیب لوله اثر قابل ملاحظه ای بر انتقال حرارت جوششی دارد و تاثیر آن با کم شدن کیفیت بخار و سرعت جرمی، بیشتر می شود. به طوری که در پایین ترین سرعت جرمی و کیفیت بخار آزمایش شده، بیشترین ضریب انتقال حرارت که در شیب 90° اتفاق می افتد، برابر کمترین مقدار آن که در شیب 90° اتفاق می افتد، می باشد. در حالی که ضریب انتقال حرارت متوسط، در اپراتور آزمایش با شیب 90° ، 30% بیشتر از لوله با شیب 90° می باشد. یعنی با زیاد شدن سرعت جرمی و کیفیت بخار، فاصله ی میان ضرایب انتقال حرارت در شیب های مختلف کمتر شده و منحنی های ضریب انتقال حرارت جوششی در شیب های مختلف به یکدیگر نزدیک می شوند و
- ۵- در نهایت یک رابطه تجربی جدید براساس نتایج آزمایشگاهی حاضر، جهت پیش بینی ضرایب انتقال حرارت جوششی لوله موج دار پیچشی در زوایای مختلف اپراتور و کیفیت های بخار مختلف و سرعت های جرمی مختلف ارائه گردید (رابطه (۱۶)) که با بهره گیری از تحلیل خطای نتایج آزمایش از روش شولتز و کول [۱۸] اکثر داده های آزمایشگاهی را، در محدوده $10\% \pm$ پیش بینی می کند.

۸- مراجع

1. Agrawal, K.N. and Varma, H.K. "Experimental Study of Heat Transfer Augmentation Versus Pumping Power in a Horizontal R-12 Evaporator", International Journal of Refrigeration, Vol. 14, No. 5, pp. 273-281, 1991.
2. Akhavan-Behabadi, M.A., Kumar, R. and Mohammadpour, A. "Effect of Twisted Tape Insert on Heat Transfer and Pressure Drop in Horizontal Evaporator for the Flow of R-134a", International Journal of Refrigeration, Vol. 32, No. 9, pp. 922-930, 2009.
3. Wongwises, S. and Polsongkram, M. "Evaporation Heat Transfer and Pressure Drop of HFC-134a in a Helically Coiled Concentric Tube-in-Tube Heat Exchanger", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, No's.3-4, pp. 658-670, 2005.
4. Nazari, M. and Alam Rajabi, E. "Three Dimensional Numerical Investigation of Influence of Inserted Fin on Heat Transfer and Pressure Drop in a Tube", Aero. Mech. J., Vol. 4, No. 2, pp. 1-14, 2008 (in Persian).
5. Akhavan-Behabadi, M.A., Mohammadpour, A. and Jamali, M. "Investigation of Effect of Twisted Tape Insert on Heat Transfer and Pressure Drop in Evaporator", Aero. Mech. J., Vol. 3, No. 4, pp. 1-14, 2007 (in Persian).
6. Lohalertdecha, S., Dalkilic, A.S. and Wongwises, S. "Correlation for Evaporation Heat Transfer Coefficient and Two-Phase Friction Factor for R-134a Flowing Through Horizontal Corrugated Tubes", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 38, pp. 1406-1413, 2001.
7. Lohalertdecha, S. and Wongwises, S. "An Experimental Study into the Evaporation Heat Transfer and Flow Characteristics of R-134a Refrigerant Flowing Through Corrugated Tubes", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 34, pp. 280-291, 2011.
8. Zimparov, V.D., Vulchanov, N.L. and Delov, L.B. "Heat Transfer and Friction Characteristic of Spirally Corrugated Tube for Power Plants Condensers-1. Experimental Investigation and Performance Evaluation", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 34, No. 9, pp. 2187-2197, 1991.
9. Withers, J.G. and yong, E.H. "Steam Condensation on Vertical Rows of Horizontal Corrugated and Plain Tube", Ind. Engng chem.process Des. Dev., Vol. 10, No. 1, pp. 19-30, 1971.
10. Nozu, S., Honda, H. and Nakata, H. "Condensation of Refrigerant CFC11 and CFC13 in the Annulus of the Double-Tube Coil with an Enhanced Inner Tube", Experimental Thermal and Fluid Science, pp. 1140- 1151, 1995.
11. Targanski, T. and Cieslinski, J.T. "Evaporation of R407C/oil Mixtures Inside Corrugated and Micro-

- Fin Tubes", Appl. Therm. Eng. Vol. 27, No. 13, pp. 2226-2232, 2007.
12. Laohalertdecha, S. and Wongwises, S. "The Effects of Corrugation Pitch on the Condensation Heat Transfer Coefficient and Pressure Drop of R-134a Inside Horizontal Corrugated Tube", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, No's. 13-14, pp. 2924-2931, 2010.
 13. Aroonrat, K. and Wongwises, S. "Evaporation Heat Transfer and Friction Characteristics of R-134a Flowing Downward in a Vertical Corrugated Tube", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 35, No. 1, pp. 20-28, 2011.
 14. Laohalertdecha, S. and Wongwises, S. "Condensation Heat Transfer and Flow Characteristics of R-134a Flowing Through Corrugated Tubes", Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 54, No's. 11-12, pp. 2673-2682, 2011.
 15. Khoeini, D., Akhavan-Behabadi, M.A. and Saboonchi, A. "Experimental Study of Condensation Heat Transfer of R-134a Floe in Corrugated Tubes with Different Inclination", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 48, No. 1, pp. 1001-1006, 2001.
 16. Sonntag R., Borgnak C., Van Wylen G. "Fundamentals of Thermodynamics", University of Michigan, Wiley, 912 pages, 6rd Edition.
 17. Collier, J.G. and Thome, J.R. "Convective Boiling and Condensation", 3rd Edition, Oxford University Press, Oxford, 1994.
 18. Schultz, R.R and Cole, R. "Uncertainly Analysis in Boiling Nucleation", ALCH E Symp Ser Vol. 75, pp. 32-38, 1979.
 19. Razavi Nasab, M. "Evaporation Heat Transfer of R-134a Inside Microfin Tube with Different Tube Inclination", Thesis Submitted to the Faculty of Mechanical Engineering, University of Tehran, for the Degree of Master of Science, 2009 (in Persian).
 20. Mohseni, Garakani, S. "Flow Pattern Visualization and Heat Transfer Characteristics of R-134a during Condensation inside a Smooth and Microfin Tube with Different Tube Inclinations", Thesis Submitted to the Faculty of Mechanical Engineering, University of Tehran, for the Degree of Doctor of Philosophy, 2006 (in Persian).