

## بررسی تجربی افزایش انتقال حرارت در اواپراتور عمودی مستقیم و مارپیچ

هاتف آریا<sup>۱</sup> و محمد علی اخوان بهابادی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک دانشگاه تهران hatefaria@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران akhavan@ut.ac.ir

### چکیده

بنابراین این مطالعه برای بدست آوردن ضریب انتقال حرارت آزمایشگاهی در جوشش R-134a در داخل یک لوله مستقیم و مارپیچ در زاویه عمودی انجام شده است و به مقایسه آنها پرداخته است.

جانگر و وینرتون<sup>۱</sup> (۱۹۸۵) [1] یک رابطه کلی جدید را برای جوشش جابجایی اجباری در لوله عمودی به کمک یک بانک داده عظیم برای آب، R-11، R-12، R-22، R-113، R-114 و اتیلن گلیکول توسعه دادند. رابطه جدید آن‌ها نسبت به روابط موجود تا آن زمان ساده‌تر و کوچکتر است. انحراف متوسط ضریب انتقال حرارت جوشش محاسبه شده بوسیله رابطه آنها و مقادیر آزمایشگاهی ۲۱/۴٪ برای جوشش اشباع و ۲۵٪ برای جوشش مادون سرد می‌باشد.

اکلز و پیت<sup>۲</sup> (1991) [2] جوشش میردهای R-12 و R-134a در داخل لوله را مورد بررسی قرار دادند و از آب گرم برای گرمایش در یک مبدل دو لوله ای استفاده نمودند. آنها ضریب های انتقال حرارت متوسط را به ترتیب برای ورودی و خروجی کیفیت بخار ۰/۱ و ۰/۹ به دست آوردند. آنها به این نتیجه رسیدند که R-134a در یک سرعت جرمی ثابت ضرایب انتقال حرارت 30-40٪ بیش از R-12 می‌دهد. در ضمن ضرایب جوشش برای هر دو مبرد با افزایش دمای اشباع افزایش می‌یابد.

برتود و جاینتی<sup>۳</sup> (۱۹۹۰) [3] به بررسی پدیده خشک شدگی در جوشش آب در لوله مارپیچ پرداختند. برای این منظور آن‌ها به بررسی عوامل مؤثر بر ضخامت فیلم مایع پرداختند و ناحیه خشک شدگی جزئی را به سه بخش که در آن‌ها پدیده‌های لایه‌ای شدن، پاشش قطرات مایع و انباشتگی مجدد غالب باشد تقسیم کردند. همچنین ایشان در هر ناحیه روابطی برای کیفیت بخار اولین خشک شدگی جزئی ارائه کرده‌اند. روابط دیگر ایشان شامل کیفیت بخار خشک شدگی کلی و انتشار محیطی جبهه خشک شدگی می‌باشد.

این مقاله به بررسی انتقال حرارت جوششی مبرد R-134a در اواپراتور با لوله مستقیم و مارپیچ عمودی پرداخته است. اواپراتور تحت بررسی یک مبدل دو لوله‌ای می‌باشد که مبرد R-134a در لوله داخلی و آب گرم در لوله بیرونی و در جهت مخالف در جریان می‌باشد. جنس لوله داخلی از مس با قطر خارجی ۹/۵۲ میلی‌متر، ضخامت ۰/۶۲ میلی‌متر و طول ۱/۲ متر برای لوله مستقیم و ۵/۸۷۰ متر برای لوله مارپیچ می‌باشد. لوله خارجی از جنس فولاد با قطر داخلی ۲۹ میلی‌متر است. لوله مارپیچ مورد بررسی در این مقاله ۶ دور لوله با قطر کویل ۳۰۵ میلی‌متر و گام ۴۵ میلی‌متر است. کیفیت بخار ورودی به اواپراتور از ۰/۱ تا ۰/۸ تغییر می‌کند و آزمایشات در سه سرعت جرمی متفاوت  $112, 132, 132 \text{ kg/m}^2\text{s}$  و ۱۵۲ انجام شده است. بررسی‌های انجام شده حاکی از آن هستند که ضریب انتقال حرارت دو فازی با افزایش کیفیت بخار و سرعت جرمی مبرد افزایش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** انتقال حرارت، جوشش، لوله‌های مارپیچ

### مقدمه

مسائل مربوط به بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی همواره محققان بسیاری را به خود مشغول داشته است. در سالهای اخیر توجه زیادی به مبدل‌های با سطوح فشرده معطوف شده است و در نتیجه مبدل‌هایی با وزن کمتر، کوچکتر و ارزاتر طراحی گردیده است. یکی از این نوع مبدل‌ها لوله مارپیچ است، از مزایای لوله مارپیچ کاهش فضای مفید اشغال شده و قرارگیری لوله با طول زیاد در یک حجم کم همراه با افزایش میزان انتقال حرارت می‌باشد. با توجه به اینکه مطالعات انجام شده در مورد تاثیر پیچش لوله بر میزان انتقال حرارت در جوشش بخار آب، R-11، R-12 و R-22 با یکدیگر تفاوت دارند، و تاکنون مطالعات زیادی در مورد میزان تاثیر پیچش لوله در جوشش بخار R-134a انجام نشده است. در مطالعه حاضر به بررسی نقش لوله مارپیچ در افزایش ضریب انتقال حرارت در جوشش بخار R-134a در زاویه عمودی می‌پردازیم. ضمناً با توجه به بحث از رده خارج شدن CFC ها به علت تاثیر مخرب آنها بر لایه اوزون و جایگزینی آنها به وسیله HFC ها در یخچالها و فریزرها، مطالعه حاضر بر روی مبرد R-134a انجام خواهد شد.

<sup>1</sup> Gunger & Winterton

<sup>2</sup> Eckels & Pate

<sup>3</sup> Berthoud & Jayanti

ژاو و همکارانش ۱ (۲۰۰۳) [4] به بررسی افت فشار و ویژگی‌های انتقال حرارت در جریان دو فاز در لوله‌های مارپیچ افقی کوچک پرداخته‌اند. آنها آزمایشات خود را بر روی کویل با قطر ۲۹۲

Archive of SID

---

<sup>1</sup> Zhao et al

کویل ۳۰۵ mm، ارتفاع کویل ۲۷۰ mm و گام کویل ۴۵ mm می‌باشد که فشار مبرد در ورودی و خروجی تست اواپراتور توسط فشار سنج‌های کالیبره شده با دقت 2 kPa اندازه‌گیری می‌شود، همچنین دما سطح خارجی لوله مسی نیز توسط ترموکوپل‌های نصب شده بر روی آن اندازه‌گیری می‌شود. اواپراتور کاملاً عایق کاری شده است تا از نشت حرارتی به محیط جلوگیری شود. به منظور حرارت دهی به مبرد و جوشش آن در تست اواپراتور از جریان مخالف آب گرم در تست اواپراتور دو لوله‌ای استفاده می‌شود برای این منظور یک چرخه جداگانه آب گرم طراحی و ساخته شده است. به منظور کامل شدن جوشش و ایجاد بخار سوپر هیت در ابتدای ورود به کمپرسور و جلوگیری از ورود مایع و صدمه خوردن کمپرسور از یک اواپراتور ثانویه که بعد از تست اواپراتور نصب شده است، استفاده می‌گردد.

### شیوه محاسبه

درجه حرارت‌های اشباع و سوپر هیت و انتالپی‌های اشباع R-134a از جداول داده شده توسط سانتاگ و همکارانش<sup>۱</sup> (۱۹۹۷) [5] و سایر خواص از جمله کشش سطحی و ویسکوزیته از مقادیر داده شده توسط کولیر و تام<sup>۲</sup> (۱۹۹۴) [6] گرفته شده است. کیفیت موضعی بخار در ورود و خروج از اواپراتور اولیه و تست صورت زیر محاسبه می‌شود:

با توجه به دمای ( $T_o$ ) اندازه‌گیری شده در قبل از شیر سوزنی مقدار انتالپی مربوطه از جدول R-134a در حالت مادون سرد خوانده می‌شود ( $h_o = h_f$ )، با توجه به فشار ( $P_1$ ) اندازه‌گیری شده در بعد از شیر سوزنی مقادیر ( $h_{f1}$ ,  $h_{g1}$ ) حالت دو فاز از جدول مربوط بدست می‌آید. آنگاه با استفاده از رابطه انتالپی ثابت دو سر شیر سوزنی، مقدار کیفیت بخار ورود به اواپراتور اولیه حاصل می‌گردد:

$$h_1 = h_o \quad (1)$$

$$x_1 = \frac{h_1 - h_{f1}}{h_{fg1}} \quad (2)$$

با توجه به مقدار Q داده شده به اواپراتور اولیه و تست اواپراتور، مقدار کیفیت بخار در ورود و خروج تست اواپراتور به صورت زیر محاسبه می‌شود.

کیفیت ورودی به تست اواپراتور:

$$h_2 - h_1 = \Delta h_1 = \frac{Q_1}{\dot{m}} \quad (3)$$

$$\Rightarrow x_2 = \frac{h_1 + \Delta h_1 - h_{f2}}{h_{fg2}}$$

میلیمتر و قطر لوله ۹ میلیمتر انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که مقدار انتقال حرارت جوششی به میزان سرعت جرمی و شار حرارتی وابستگی دارد و این دلالت دارد بر اینکه هر دو مکانیزم انتقال حرارت هسته‌ای و جابجایی نقش مهمی در انتقال حرارت جوششی لوله مارپیچ کوچک دارند متفاوت با آنچه در لوله مارپیچ با قطر کویل بزرگ دیده می‌شود. آنها همچنین مشاهده کردند که افت فشار اصطکاکی نه تنها به کیفیت بخار و فشار بستگی دارد بلکه به دبی جرمی هم بستگی دارد.

وونگ‌ویز و پولسونگرام<sup>۱</sup> (۲۰۰۶) [۵] ضرایب انتقال حرارت دو فاز و افت فشار R-134a را حین تبخیر در مبدل مارپیچ دو لوله‌ای هم مرکز به صورت آزمایشگاهی بدست آوردند. آنها کیفیت بخار ورودی به لوله آزمایش را توسط دما و فشار بدست آمده از آزمایش محاسبه کرده‌اند و تأثیر شار حرارتی، سرعت جرمی و دمای تبخیر را بر ضرایب انتقال حرارت و افت فشار لوله مارپیچ بررسی کردند. آنها دریافتند که ضرایب انتقال حرارت میانگین R134a در حین تبخیر با افزایش کیفیت بخار میانگین، سرعت جرمی، دمای تبخیر و شار حرارتی افزایش می‌یابد. همچنین تحقیقات آنها نشان داد که افت فشار لوله مارپیچ با افزایش کیفیت بخار میانگین، سرعت جرمی و شار حرارتی افزایش می‌یابد و در عوض افزایش دمای اشباع تبخیر از افت فشار می‌کاهد.

### دستگاه آزمایش

مهمترین هدف در طول این آزمایش جمع‌آوری داده‌های وسیعی برای محاسبه ضرایب انتقال حرارت لوله‌های مارپیچ می‌باشد، که جهت مقایسه، داده‌های مشابهی برای لوله مستقیم نیز جمع‌آوری شده است. به منظور جریان دادن بخار مبرد در قسمت تحت آزمایش از یک سیستم تبرید تراکمی بخار استفاده شده است. به منظور پوشش دادن دامنه جوشش وسیع، سیستم به گونه‌ای طراحی شده است که کیفیت‌های متفاوت بخار، در ورود به تست اواپراتور قابل دستیابی باشد، این کار با نصب یک پیش اواپراتور در بین شیر انبساط و تست اواپراتور محقق شده و با تغییر ولتاژ ورودی به المنت‌های حرارتی بر روی پیش اواپراتور می‌توان کیفیت بخار را در ورود به تست اواپراتور تنظیم کرد. در شکل ۱- نمای شماتیک مدار آزمایشگاهی نشان داده شده است. اواپراتور این آزمایش شامل یک مبدل دو لوله‌ای می‌باشد، لوله داخلی یک لوله مسی با قطر داخلی ۸,۳ mm و قطر خارجی ۹,۵۲ mm و طول ۱۲۰۰ mm برای لوله مستقیم و طول کل ۵۸۷۰ mm برای لوله مارپیچ می‌باشد که مبرد R134a از درون آن عبور می‌کند و لوله خارجی یک لوله فولادی با قطر داخلی ۲۹ mm و قطر خارجی ۳۴ mm می‌باشد که آب گرم از درون قسمت حلقوی عبور می‌کند. اواپراتور مارپیچ یک مبدل دو لوله‌ای به شکل کویل مارپیچ (فنری) با قطر

1- Sonntag et al.

2-Collier and Thome

<sup>1</sup> Wongwises & Polsongkram



## تغییرات ضریب انتقال حرارت در لوله مارپیچ

افزایش انتقال حرارت جوششی تحت جریان چرخشی عموماً ناشی از ترکیب سه اثر زیر می باشد:

طول موثر خط جریان و سرعت آن در جریان های پیچشی بیشتر از جریان مشابه در لوله مستقیم است. این قضیه از دوجهت بر ضریب انتقال حرارت تاثیر می گذارد، بالا بردن آشفتگی در انتقال حرارت جابجایی و سرعت بیشتر مماسی در نزدیک دیواره.

حرکت چرخشی باعث ایجاد میدان شتاب گریز از مرکز، درون لوله می شود. برای جریان های چرخشی دوفاز که جوشش در دیواره لوله اتفاق می افتد، حباب های تشکیل شده در سطح داغ لوله بوسیله مایع چرخشی بطور سریع احاطه می شوند. بعلت اختلاف چگالی بین مایع و بخار، نیروی گریز از مرکز بیشتری به مایع نسبت به حباب ها وارد می شود. بنابراین حباب ها به سرعت از دیواره به سمت مرکز لوله منتقل شده و مایع جایگزین آنها می شود.

ایجاد جریان ثانویه، اختلاط را در اثر حرکت پیچشی افزایش می دهد. اضافه شدن یک نیروی گریز از مرکز بر امتداد جریان مستقیم باعث ایجاد جریان چرخشی در جریان می گردد. تاثیر جریان ثانویه هسته بخار مرکزی بر روی فیلم مایع که باعث پخش شدن یکنواخت تر مایع بر روی سطح لوله می گردد.

در شکل ۳ دیده می شود که ضریب انتقال حرارت با افزایش کیفیت بخار برای همه سرعت جرمی ها زیاد می شود. که این رفتار مشابه آنچه در لوله مستقیم مشاهده گردید، می باشد. نکته دیگری که از مشاهده شکل ۳ می توان دریافت این است که سرعت جرمی اثر زیادی بر میزان انتقال حرارت دارد که این اثر در کیفیت بخارهای بالاتر بیشتر است. این پدیده توسط مطالعات برتود و جایانتی (1990) توضیح داده می شود. بدین ترتیب که تنش برشی میان فازی و شدت جریان ثانویه با افزایش سرعت جرمی افزایش می یابد که موجب تقویت پاشش قطرات و انباشته شدن مجدد آنها می شود. این پدیده باعث ایجاد موجهایی با تعداد و اندازه بزرگ تر در سطح فیلم مایع می شود که سطح انتقال حرارت را افزایش می دهد. علاوه بر این، سرعت های بالای پدید آمده توسط افزایش شار جرمی، باعث افزایش میزان اغتشاش جریان سیال می شود که منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت می گردد.

برای بررسی بهتر اثر سرعت جرمی، کیفیت بخار و مقایسه نتایج ضریب انتقال حرارت لوله های مارپیچ و لوله مستقیم، تغییرات نسبت ضرایب انتقال حرارت لوله مارپیچ به لوله مستقیم  $h_{hel} / h_{st}$  بر حسب کیفیت بخار در شکل ۴ نشان داده شده اند.

ضریب انتقال حرارت تست اوپراتور با داشتن شار حرارتی، درجه حرارت جوشش متوسط و درجه حرارت سطح داخلی لوله، توسط معادله (۶) محاسبه می شود که در آن  $t_{wi}$  دمای میانگین سطح لوله و  $t_s$  دمای اشباع میانگین میرد در ورود و خروج است.

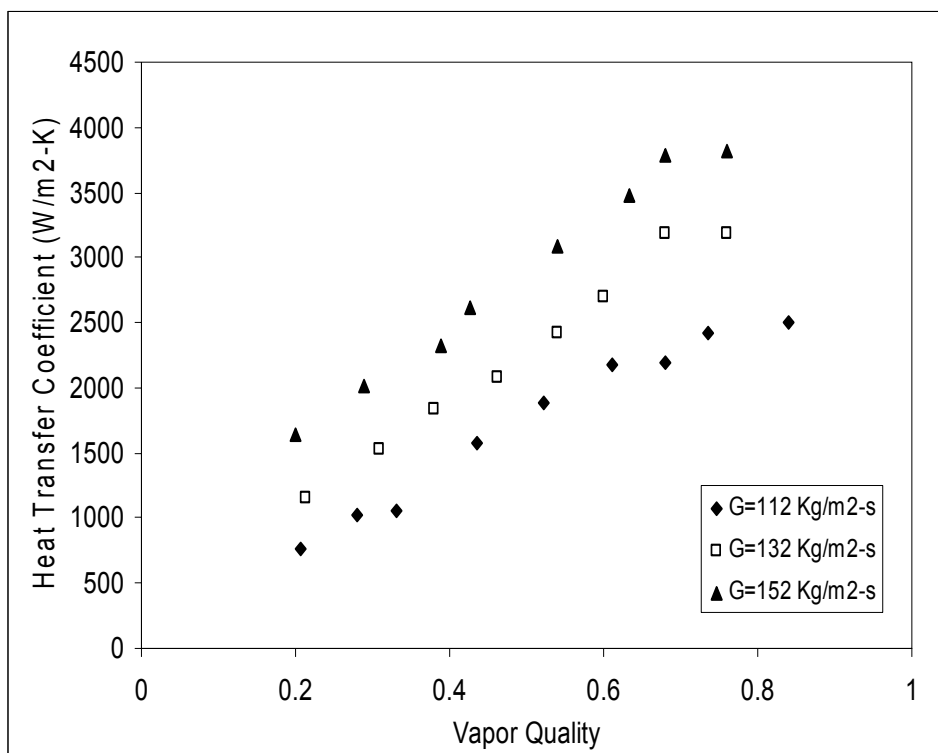
$$h = \frac{q}{(t_{wi} - t_s)} \quad (6)$$

## نتایج

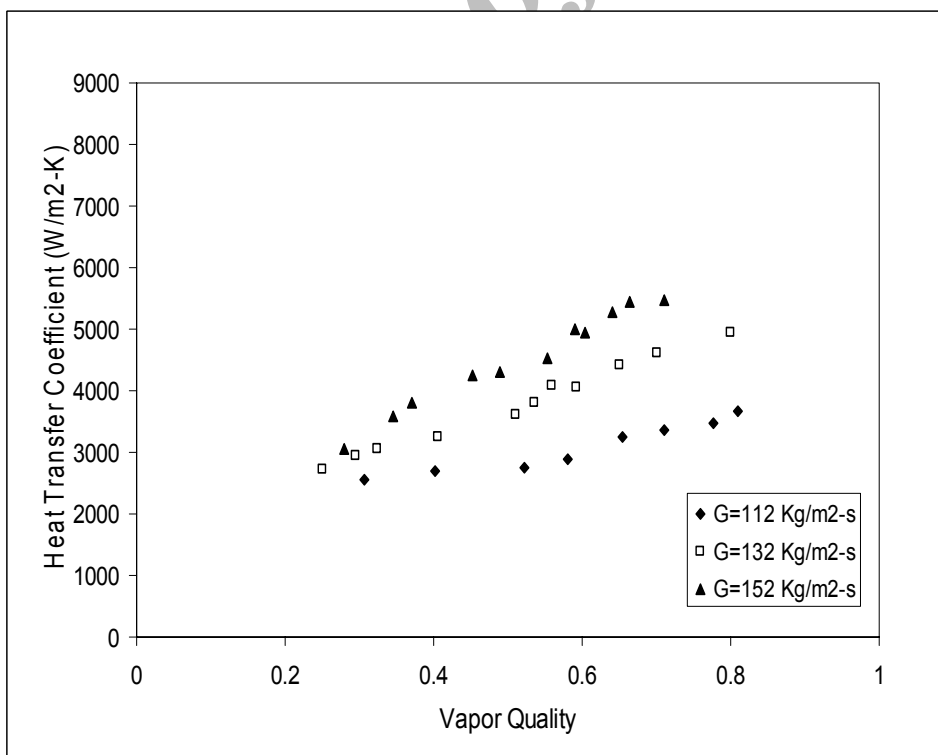
ضرایب انتقال حرارت جوششی برای جریان R-134a را در لوله مستقیم و همچنین لوله مارپیچ عمودی در شرایط مختلف با استفاده از مقادیر متوسط شار حرارتی، درجه حرارت جوشش و درجه حرارت های داخلی دیواره لوله بدست آوردیم. کیفیت بخار نیز با متوسط گیری از کیفیت های بخار در ورودی و خروجی اوپراتور تحت آزمایش حاصل شد. همچنین مطالعه تأثیرات عوامل گوناگون، از قبیل سرعت جرمی میرد و کیفیت بخار بر فرآیند جوشش R-134a و رفتار ضرایب انتقال حرارت صورت گرفت. در ادامه به بررسی مشاهدات صورت گرفته می پردازیم.

## تغییرات ضریب انتقال حرارت در لوله مستقیم

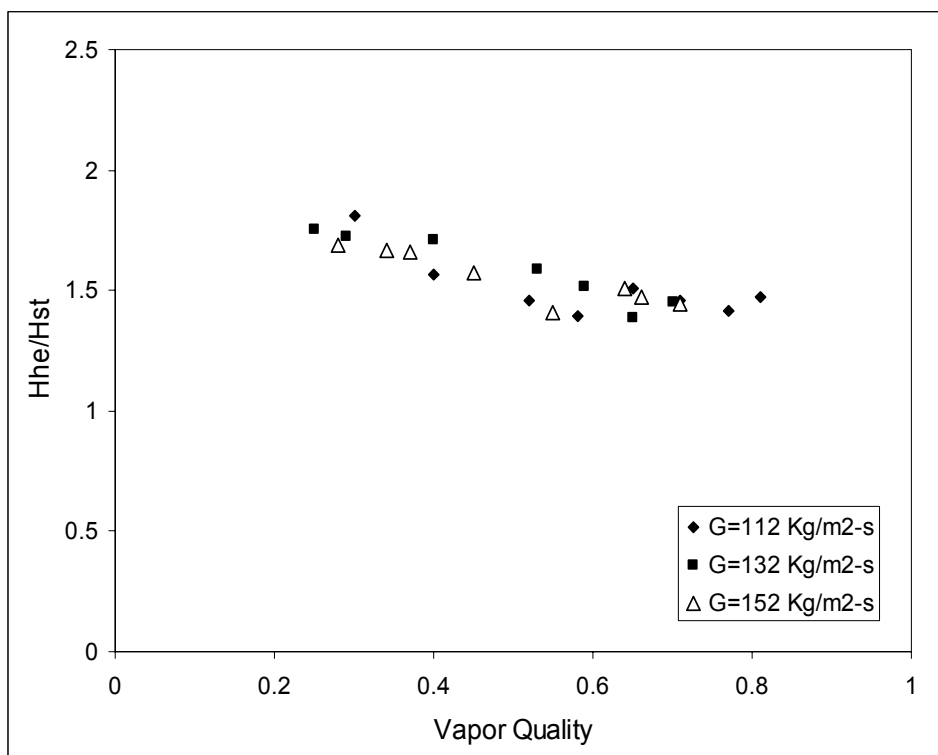
شکل ۲ اثر کیفیت بخار و سرعت جرمی بر ضریب انتقال حرارت جوششی در لوله مستقیم عمودی را نشان می دهد که در آنها داده ها برای هر سرعت جرمی رسم شده اند. این نمودارها برای سه سرعت جرمی متفاوت که در آنها آزمایش صورت گرفته ترسیم گشته اند. وابستگی ضریب انتقال حرارت به کیفیت بخار متأثر از توزیع نسبی دو مکانیزم جوشش (هسته ای و جابجایی) و الگوی جریان جوششی می باشد. در کنار کیفیت بخار سرعت جرمی نیز نقش مهمی در مکانیزم جوشش جابجایی در انتقال حرارت جوششی جریان ایفا می کند. افزایش سرعت جرمی باعث تغییر الگوی جریان از موجی جداشونده به حلقوی می شود. در جوشش جابجایی زمانی که سرعت سیال افزایش می یابد، گرمای دیواره لوله سریعتر توسط سیال گرفته می شود و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می یابد. به عبارت دیگر سرعت بالا، عدد رینولدز  $Re = \frac{GD}{\mu}$  بالا می دهد، بنابراین مانند جابجایی اجباری تک فاز، ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد.



شکل ۲- تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب کیفیت بخار در جریان داخل لوله مستقیم عمودی برای سرعت های جرمی مختلف



شکل ۳- تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله مارپیچ عمودی رو به پایین در سرعت های جرمی مختلف



شکل ۴- تغییرات نسبت ضرایب انتقال حرارت لوله مارپیچ به لوله مستقیم با کیفیت بخار در سرعت‌های جرمی مختلف در زاویه عمودی

tubes and annuli", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 29 (3), 351-358.

- [2] Eckels, S.J. and Pate, M.B., 1991, "Evaporation and condensation of HFC-134a and CFC-12 in smooth tube and a micro-fin tube", ASHRAE Transactions, Vol. 97, 71-81.
- [3] Berthoud, G., Jayanti, S., "Characterization of dryout in helical coils", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 33, No. 7, 1990, PP. 1451-1463.
- [4] 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, 2006, PP. 658-670.
- [5] Sonntag, R., Borgnakke, C., and Van wylen, G., "Fundamentals of thermodynamics", John wiley and sons, New York, 1997.
- [6] Collier, J.G. and Thome, J.R., 1994, "Convective Boiling and Condensation", Oxford University Press

#### نتیجه‌گیری مربوط به لوله مارپیچ

براساس مطالعه کل داده‌ها، نتایج زیر در مورد اثر پیچش لوله بر ضرایب انتقال حرارت در لوله افقی حاصل شد: مارپیچ کردن لوله ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. برای لوله عمودی در بهترین حالت ضریب انتقال حرارت جوششی تا ۷۲٪ نسبت به لوله مستقیم افزایش می‌یابد. این مقدار افزایش در سرعت جرمی  $112 \text{ kg/m}^2\text{s}$  و کیفیت بخار ۰/۳۲ اتفاق می‌افتد. میزان افزایش ضریب انتقال حرارت تابع پیچیده‌ای از عدد رینولدز، کیفیت بخار و زاویه قرارگیری محور لوله مارپیچ می‌باشد.

انتقال حرارت لوله مارپیچ همانند لوله مستقیم با زیاد شدن کیفیت بخار و سرعت جرمی افزایش می‌یابد. این پدیده به علت تأثیر جریان ثانویه و افزایش تنش برشی میان فازی و تغییر الگوی جریان به الگوی حلقوی می‌باشد. افزایش میزان انتقال حرارت در لوله مارپیچ عمودی با افزایش سرعت جرمی در کیفیت‌های بخار بالاتر بیشتر از کیفیت‌های بخار پایین است.

#### مراجع

- [1] Gungor, K.E. and Winterton, R.H., 1985, "A general correlation for flow boiling in