

مطالعه‌ی تجربی تأثیر تخت‌کردن لوله بر ضریب انتقال حرارت در جوشش جابه‌جایی داخل لوله‌ی میکروفین‌دار

میثم نصر (دانشجوی دکتری)

محمدعلی اخوان بهابادی (استاد)

سید احسان مرعشی (کارشناس ارشد)

پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

مسعود جمالی آشتیانی (کارشناس ارشد)

مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

در مطالعه‌ی حاضر، ضمن بررسی مسئله‌ی جوشش اجباری میرد R-۱۳۴a داخل لوله‌های افقی میکروفین‌دار تخت، اثرات ناشی از تخت‌کردن مقطع بر انتقال حرارت بررسی شده است. دستگاه آزمایش، یک سیستم کامل تبرید تراکمی بخار مجهز به کلیه‌ی وسایل اندازه‌گیری مورد نیاز است. در این راستا، لوله‌های میکروفین‌دار گرد با قطر خارجی ۹/۵۲ میلی‌متر به چهار میزان متفاوت، با ارتفاع داخلی ۰/۶، ۰/۵، ۰/۵/۵ و ۰/۸ میلی‌متر تخت شده‌اند. داده‌های تجربی برای لوله‌های میکروفین‌دار تخت در محدوده‌ی سرعت جرمی $0.7-7.4 \text{ kg/m}^2\text{s}$ و محدوده‌ی کیفیت بخار $0.95-0.25$ جمع‌آوری می‌شود. نتایج حاصله حاکی از آن است که ضریب انتقال حرارت در لوله‌های تخت با افزایش کیفیت بخار، و سرعت جرمی مشابه لوله‌ی گرد با ثابت ماندن سایر شرایط افزایش می‌یابد. همچنین ضریب انتقال حرارت با افزایش میزان تخت‌شدگی لوله افزایش می‌یابد. با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایش رابطه‌ی برای پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت در لوله‌های میکروفین‌دار تخت ارائه می‌شود.

meisam.nasr@yahoo.com
akhavan@ut.ac.ir
ehsan_marashi@yahoo.com
jamali_59@yahoo.com

واژگان کلیدی: مطالعه‌ی تجربی، ضریب انتقال حرارت، جوشش جابه‌جایی، لوله‌ی میکروفین‌دار تخت.

مقدمه

خاص یا سیال‌های افزودنی استفاده می‌شود.^[۱] در روش‌های فعال به یک نیروی خارجی نظیر میدان‌های الکتریکی، آکوستیک یا ارتعاش سطحی نیازمندیم. یکی از روش‌های غیرفعال استفاده از لوله‌های میکروفین‌دار است. کارایی بالای لوله‌های میکروفین‌دار در افزایش انتقال حرارت موجب کاربرد گسترده‌ی آنها در صنایع شده، و عملکرد آنها نیز در تحقیقات عدیده مورد بررسی قرار گرفته است. روش دیگری که البته به‌منظور افزایش انتقال حرارت در کندانسور مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از لوله‌های تخت به‌جای لوله‌های گرد است.^[۲]

در مطالعه‌ی حاضر به بررسی تجربی افزایش انتقال حرارت در جریان جوششی R-۱۳۴a داخل لوله‌ی میکروفین‌دار تخت پرداخته‌ایم.

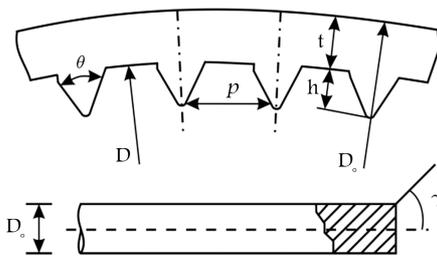
با توجه به اهمیت صرفه‌جویی در مصرف انرژی، مسائل مربوط به بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی همواره محققان بسیاری را به خود مشغول داشته است. در سال‌های اخیر توجه زیادی به مبدل‌های با سطوح فشرده معطوف شده است و در نتیجه مبدل‌هایی با وزن کم‌تر، کوچک‌تر و ارزان‌تر طراحی شده است. تجزیه‌کننده^۱ (اوپراتور) یکی از پرکاربردترین تبادلهای حرارتی است. در حقیقت فرایند جوشش درون‌لوله‌ی در تجهیزات گوناگون نظیر نیروگاه‌ها (حرارتی، خورشیدی و هسته‌ای)، کارخانجات صنایع شیمیایی، سیستم‌های تبرید و تهویه مطبوع رخ می‌دهد. بنابراین طراحی بهینه‌ی این تبادل‌گر حرارتی اهمیت زیادی در صرفه‌جویی انرژی دارد.

برای افزایش ضریب انتقال حرارت در تبادل‌گرها روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است. این روش‌ها به دو دسته روش‌های غیرفعال و روش‌های فعال تقسیم می‌شوند. در روش‌های غیرفعال به‌منظور افزایش انتقال حرارت از سطوح با هندسه‌های

دستگاه آزمایش

طرح شماتیک دستگاه آزمایش در شکل ۱ ارائه شده و اجزای آن در جدول ۱

تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۸/۱۰، اصلاحیه ۱۳۸۹/۶/۲۹، پذیرش ۱۳۸۹/۱۰/۱۳.



- $\theta = 25^\circ$: زاویه نوک فین:
- $\gamma = 15^\circ$: زاویه ماریج:
- $D_o = 9/52 \text{ mm}$: قطر خارجی:
- $D = 8/92 \text{ mm}$: قطر داخلی:
- $e = 0/25 \text{ mm}$: ارتفاع فین:
- $t = 0/3 \text{ mm}$: ضخامت دیواره:
- $p = 0/48 \text{ mm}$: گام فین:

شکل ۲. مشخصات لوله‌ی میکروفین‌دار.

توضیح داده شده است. این دستگاه در واقع یک سیستم تبرید تراکمی بخار مجهز به کلیه‌ی وسایل اندازه‌گیری مورد نیاز است. دستگاه شامل پیش‌اوپراتور، اوپراتور نمونه و پس‌اوپراتور است. به‌منظور حرارت‌دهی به تبخیرکننده‌ها (اوپراتورها) دور آنها المنت حرارتی پیچیده شده است. توان ورودی به اوپراتورها توسط دیمرها‌ی سری‌شده به منبع تغذیه الکتریکی قابل تنظیم است.

اوپراتور نمونه‌ی آزمایش، یک لوله‌ی مسی میکروفین‌دار به طول $1/10$ متر است که به‌صورت افقی در دستگاه آزمایش قرار داده شده است. شکل و مشخصات لوله‌ی میکروفین‌دار در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

با توجه به محدودبودن طول لوله‌ی مورد آزمایش، دامنه‌ی کمی از تغییرات کیفیت بخار در اوپراتور نمونه قابل حصول است. بنابراین به‌منظور پوشش دادن کل دامنه‌ی جوشش، سیستم به‌گونه‌ی طراحی شده است که کیفیت‌های متفاوت بخار، در ورود به اوپراتور نمونه قابل دست‌یابی باشد. این کار با نصب یک پیش‌اوپراتور در بین شیر انبساط و اوپراتور نمونه محقق شده است. با تغییر توان ورودی به المنت‌های حرارتی

نصب‌شده بر روی پیش‌اوپراتور می‌توان کیفیت بخار را در ورود به اوپراتور نمونه تنظیم کرد. به‌علاوه به‌منظور جوشش کامل میرد، پس‌اوپراتور را بعد از اوپراتور نمونه مورد استفاده قرار داده تا سیال به‌هنگام ورود به کمپرسور به‌صورت بخار سوپر هیت درآید و از ایجاد آسیب به کمپرسور جلوگیری شود.

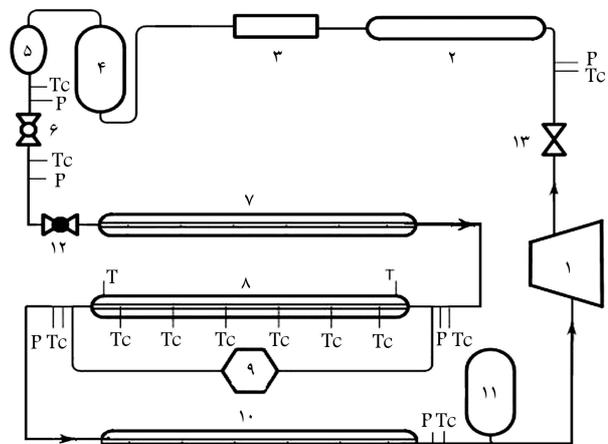
کندانسور مورد استفاده یک تبادل‌گر حرارتی از نوع پوسته و لوله است و برای اطمینان از مادون سرد شدن میرد از دو کندانسور استفاده شده است (کندانسور اصلی و کمکی). کندانسورها شامل لوله‌های مسی‌اند که به‌صورت رفت و برگشتی با اتصالات U شکل به هم متصل شده و درون یک لوله‌ی فولادی (پوسته) قرار گرفته‌اند. آب سرد در داخل پوسته و میرد در داخل لوله‌های مسی جریان می‌یابد. کندانسور اصلی در کل آزمایشات فعال است، ولی کندانسور کمکی در صورت نیاز (مادون سرد شدن میرد توسط کندانسور اصلی) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

دمای سطح خارجی دیواره‌ی اوپراتور نمونه در شش مقطع، و در هر مقطع در دو نقطه‌ی بالا و پایین لوله به‌وسیله‌ی ترموکوپل‌های سری T (قلع - مس) اندازه‌گیری می‌شود. میانگین دماهای به دست آمده به‌عنوان دمای متوسط سطح لوله در تحلیل نتایج مورد استفاده قرار می‌گیرد. دمای اشباع سیال عبارت است از دمای اشباع در فشار متوسط ورودی و خروجی اوپراتور نمونه. براساس مشخصات ترمودینامیکی استخراج شده برای میرد $R-134a$ [5]، ضریب انتقال حرارت در اوپراتور نمونه از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

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

که در آن، \bar{h} ضریب انتقال حرارت متوسط، D قطر داخلی لوله‌ی مسی و D_o قطر خارجی آن، L طول اوپراتور نمونه، t_s درجه حرارت اشباع میرد، t_{w_o} متوسط دمای سطح خارجی دیواره‌ی لوله در شش مقطع، k_w ضریب هدایت حرارتی دیواره‌ی لوله، V ولتاژ دو سر المنت الکتریکی و I جریان عبوری از آن است.

به‌منظور بررسی تأثیر تخت‌شدگی لوله بر ضریب انتقال حرارت، لوله‌های میکروفین‌دار گرد با عبور از میان دستگاه نورد به لوله‌هایی با سطح مقطع تخت و با ارتفاع داخلی $0/66$ ، $0/5$ ، $0/8$ و $0/8$ میلی‌متر تبدیل می‌شود (شکل ۳). چنان‌که مشاهده می‌شود شکل مقطع لوله‌ها به‌صورت مستطیلی با دوانحناء نیم‌دایره در کنار



شکل ۱. طرح شماتیک دستگاه آزمایش.

جدول ۱. اجزای دستگاه آزمایش.

شماره	نام وسیله
۱	کمپرسور
۲	کندانسور
۳	دبی‌سنج
۴	دریافت‌کننده‌ی مایع
۵	فیلتر درایر
۶	شیر انبساط
۷	پیش‌اوپراتور
۸	اوپراتور نمونه
۹	دستگاه اندازه‌گیری افت فشار
۱۰	پس‌اوپراتور
۱۱	جمع‌کننده‌ی مایع
TC	ترموکوپل
P	فشارسنج

انتقال حرارت لوله‌ی میکروفین دار گرد

پیش از هرچیز، ابتدا ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده براساس داده‌های آزمایشگاهی لوله‌ی میکروفین دار گرد با روابط موجود برای لوله‌ی گرد میکروفین دار مقایسه می‌شود. برای این منظور از روابط مختلفی می‌توان بهره جست. [۹-۷] این رابطه‌ها نتایج آزمایشگاهی به دست آمده را در محدوده‌ی قابل قبولی پیش‌بینی می‌کنند. در جدول ۴ میزان تفاوت نتایج آزمایشگاهی تحقیق حاضر با هریک از رابطه‌های مذکور به صورت مجزا آمده است. شکل ۴ نیز مقادیر پیش‌بینی شده توسط سه رابطه‌ی بالا را در کنار نتایج آزمایشگاهی به دست آمده برای لوله‌ی میکروفین دار گرد نشان می‌دهد.

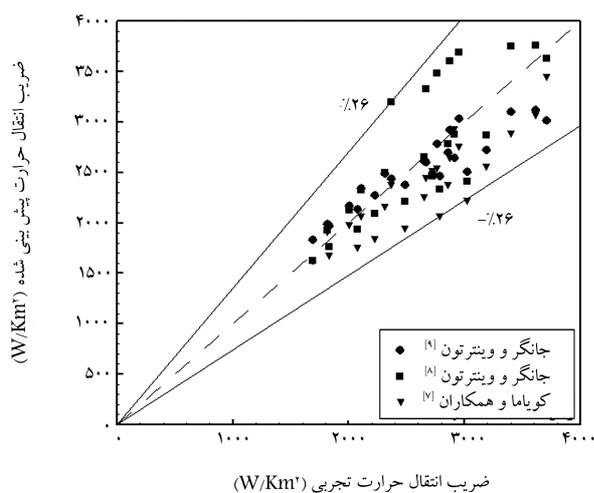
چنان که در شکل ۴ مشخص است، میزان تفاوت داده‌های آزمایشگاهی از داده‌های پیش‌بینی شده براساس روابط یادشده [۹-۷] از ۲۶٪- تا ۲۶٪+ است. تطبیق پذیری خوب میان نتایج آزمایشگاهی لوله‌ی میکروفین دار گرد با مقادیر پیش‌بینی شده براساس روابط مذکور، حاکی از صحت و دقت وسایل اندازه‌گیری و آزمایشات انجام شده است.

انتقال حرارت لوله‌ی میکروفین دار تخت

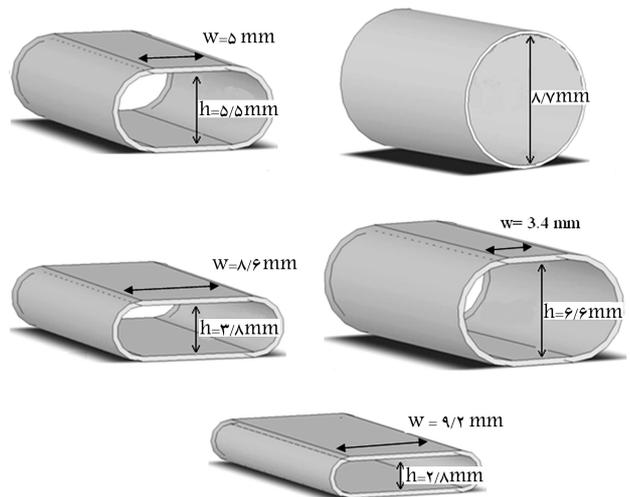
در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب ضرایب انتقال حرارت جوشمی برای لوله‌ی میکروفین دار گرد و لوله‌ی میکروفین دار تخت با ارتفاع داخلی ۳/۸ میلی‌متر نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود روندی مشابه در افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش کیفیت بخار در لوله‌ی گرد و تخت دیده می‌شود. وابستگی ضریب انتقال حرارت

جدول ۴. میزان اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی به دست آمده و روابط موجود برای لوله‌ی میکروفین دار گرد.

میزان اختلاف	رابطه‌ی پیشنهادی
۲۶٪- تا ۲۶٪+	کویاما و همکاران [۷] (۱۹۹۵)
۲۰٪- تا ۲۶٪+	جانگر و وینترتون [۸] (۱۹۸۵)
۱۹٪- تا ۹٪+	جانگر و وینترتون [۹] (۱۹۸۷)



شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی با نتایج پیش‌بینی شده براساس روابط موجود برای لوله‌ی میکروفین دار گرد.



شکل ۳. ابعاد سطح مقطع لوله‌ی تخت.

است. مقدار خطای متغیرهای مستقل مؤثر در این مطالعه در جدول ۲ آمده است. تحلیل خطاهای اندازه‌گیری برای تمام آزمایشات با روش ارائه شده توسط شولتز و کول [۶] انجام، و مشاهده شد که میزان خطا برای تمام آزمایشات کم‌تر از ۱۰ درصد است.

جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها

مجموعاً ۱۲۰ آزمایش مختلف با سه سرعت جرمی متفاوت برای لوله‌های میکروفین دار گرد و تخت صورت گرفت. محدوده‌ی تغییر پارامترهای آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲. میزان خطای متغیرهای مستقل.

متغیر	خطای اندازه‌گیری
قطر لوله	± 0.05
طول لوله	0.5 mm
توان	$\pm 1 \text{ W}$
درجه حرارت دیواره‌ی لوله	$\pm 1^\circ \text{C}$
فشار	$\pm 2 \text{ kPa}$

جدول ۳. محدوده‌ی پارامترهای آزمایش.

R-۱۳۴a	سیال مبرد
$74-107 \text{ kg/m}^3 \text{ s}$	سرعت جرمی مبرد
$0.2-0.9$	کیفیت بخار ورودی به اواپراتور نمونه
$0.3-1$	کیفیت بخار خروجی از اواپراتور نمونه
$1000-3000$	عدد رینولدز مایع
$44000-105000$	عدد رینولدز گاز
$2.8-6.6$ میلی‌متر	میزان تخت‌شدگی h

هسته‌ی بخاری شود. این اثر و نیز جوشش مستقیم لایه‌ی حلقوی به نازک‌تر شدن لایه‌ی مایع روی دیواره و در نتیجه کاهش مقاومت حرارتی، بر اثر افزایش میزان کیفیت بخار می‌شود.

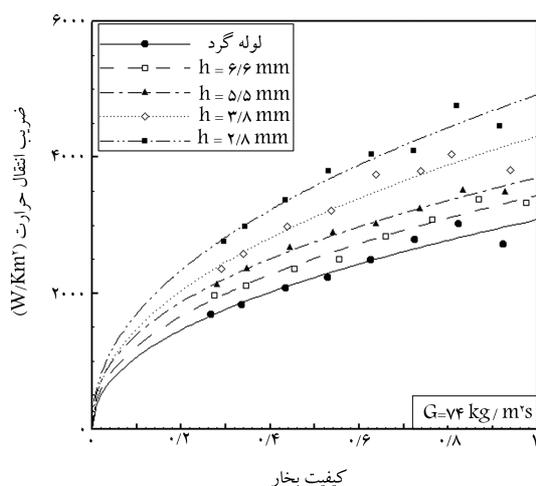
هنگامی که ضخامت فیلم بسیار کاهش می‌یابد جوشش هسته‌ی کاملاً از بین می‌رود و سرانجام فیلم مایع، به علت نیروی گرانشی، در بالای لوله کاملاً ناپدید می‌شود. در این حالت خشک‌شدگی جزئی دیواره‌ی لوله شروع می‌شود و بیشینه ضریب انتقال حرارت در شروع خشک‌شدگی اتفاق می‌افتد.

بعد از شروع خشک‌شدگی جزئی دیواره $(0.09 < x < 0.18)$ ، می‌توان از انتقال حرارت در قسمت خشک -- در مقایسه با قسمت خیس شده با مایع -- صرف‌نظر کرد. همچنین با افزایش کیفیت بخار ضخامت قسمت خیس دیواره کم می‌شود و به دلیل ضریب هدایت پایین بخار، ضریب انتقال حرارت نیز کاهش می‌یابد. هم‌زمان با خشک‌شدن کل دیواره، انتظار می‌رود ضریب انتقال حرارت نزدیک به مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری بخار اشباع شود.

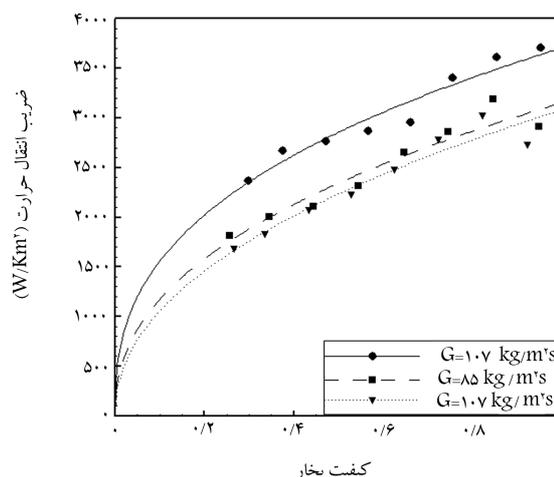
از طرف دیگر، اشکال ۵ و ۶ نشان می‌دهند که ضریب انتقال حرارت در لوله‌های گرد و تخت بر اثر افزایش سرعت جرمی افزایش می‌یابد. افزایش سرعت جرمی باعث تغییر الگوی جریان از موجی جداشونده به حلقوی می‌شود. در جوشش جابه‌جایی، وقتی سرعت سیال افزایش می‌یابد، گرمای دیواره‌ی لوله به سرعت توسط سیال گرفته می‌شود و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر سرعت بالا، عدد رینولدز $Re = GD/\mu$ بالا می‌دهد و بنابراین مانند جابه‌جایی اجباری تک‌فاز، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

با تعریف ضریب افزایش انتقال حرارت به صورت نسبت ضریب انتقال حرارت لوله‌ی میکروفین‌دار تخت به ضریب انتقال حرارت لوله‌ی گرد صاف، h_{fm}/h_{rs} ، به بررسی تأثیر حضور فین و تخت‌کردن لوله در میزان افزایش ضریب انتقال حرارت می‌پردازیم.

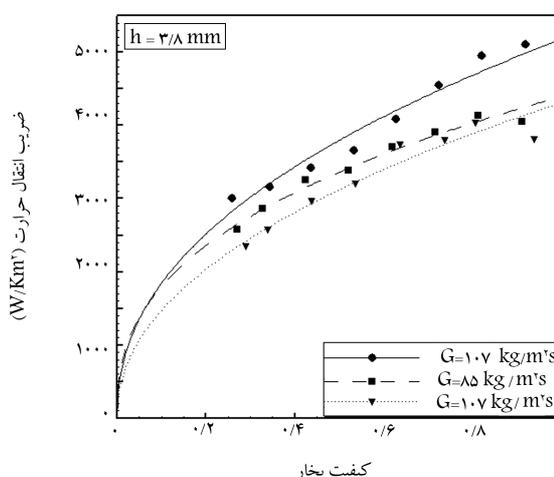
در شکل ۷ تغییرات ضریب افزایش انتقال حرارت برحسب کیفیت در سرعت جرمی $74 \text{ kg/m}^2\text{s}$ برای لوله‌ی گرد و لوله‌های تخت نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، روند کلی نمودار نشان می‌دهد که با افزایش کیفیت بخار، نسبت افزایش ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. این افزایش در سرعت‌های جرمی پایین بسیار ملموس‌تر است. همچنین مشخص است که این نسبت با کاهش ارتفاع داخلی لوله افزایش می‌یابد.



شکل ۷. تغییرات ضریب افزایش انتقال حرارت با کیفیت بخار در لوله‌های مختلف میکروفین‌دار در سرعت جرمی $74 \text{ kg/m}^2\text{s}$.



شکل ۵. تغییرات ضریب انتقال حرارت برای لوله‌ی میکروفین‌دار گرد.



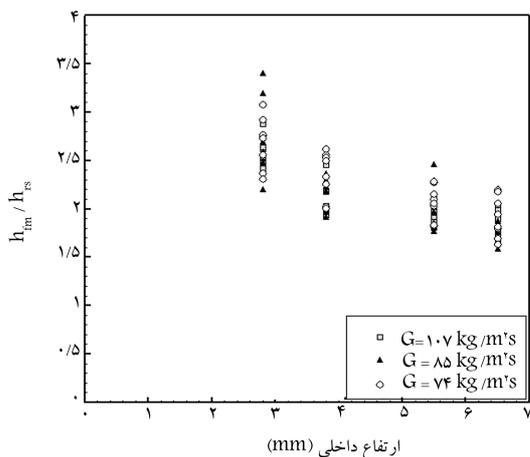
شکل ۶. تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله‌ی میکروفین‌دار تخت با ارتفاع داخلی $3/8$ میلی‌متر.

به کیفیت بخار متأثر از توزیع نسبی دو سازوکار جوشش (هسته‌ی و جابه‌جایی) و الگوی جریان جوششی است.

شکل‌های ۵ و ۶ نشان می‌دهند که ضریب انتقال حرارت با افزایش کیفیت بخار افزایش می‌یابد (علت این پدیده آن است که در کیفیت بخار بالا، لایه‌ی مایع روی دیواره‌ی داخلی لوله نازک‌تر است و باعث مقاومت حرارتی کم‌تری می‌شود) تا به مقداری بیشینه می‌رسد و سپس افت می‌کند. تغییر شیب منحنی ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار ممکن است ناشی از تغییر الگوی جریان و سازوکارهای مختلف جوشش (هسته‌ی و جابه‌جایی) باشد.

در الگوی جریان حبابی $(x < 0.2)$ جوشش هسته‌ی سازوکار غالب جوشش جریانی است. ولی با افزایش کیفیت بخار $(0.2 < x < 0.5)$ و با توجه به سرعت جرمی، الگوی جریان به جریان حلقوی یا جریان موجی جداشونده تغییر می‌کند. در این شرایط جوشش جابه‌جایی به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. هم‌زمان جوشش هسته‌ی نیز در فیلم مایع کاهش می‌یابد ولی هنوز وجود دارد. در نتیجه در این ناحیه هر دو سازوکار جوشش هسته‌ی و جابه‌جایی وجود دارد.

سرعت بالای بخار هسته‌ی میانی در جریان حلقوی و جریان موجی جداشونده در حین جوشش باعث جدا شدن قطرات مایع از فیلم مایع و معلق شدن در این



شکل ۹. تغییرات نسبت ضرایب انتقال حرارت با ارتفاع داخلی لوله‌ی میکروفین دار تخت.

۱. فین‌های ماریچ با بالا بردن آشفستگی در انتقال حرارت جابه‌جایی و افزایش سرعت مماسی در نزدیک دیواره و ایجاد جریان‌های چرخشی، بر ضریب انتقال حرارت تأثیر می‌گذارد.

۲. حرکت چرخشی باعث ایجاد میدان شتاب گریز از مرکز در درون لوله می‌شود. برای جریان‌های چرخشی دوفاز که در آن جوشش در دیواره‌ی لوله اتفاق می‌افتد، حباب‌های تشکیل شده در سطح داغ لوله سریعاً توسط مایع چرخشی احاطه می‌شوند. به علت اختلاف چگالی بین مایع و بخار، نیروی گریز از مرکز بیشتری به مایع (نسبت به حباب‌ها) وارد می‌شود. بنابراین حباب‌ها به سرعت از دیواره به سمت مرکز لوله منتقل، و مایع جایگزین آنها می‌شود.

۳. اثر فینی باعث افزایش سطح انتقال حرارت می‌شود. اهمیت این مورد نسبت به موارد دیگر ناچیز است.

۴. کاهش قطر هیدرولیکی به واسطه‌ی حضور فین‌ها نیز باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. کاهش سطح مقطع جریان، افزایش محیط مرطوب و افزایش سرعت جریان همگی به افزایش ضریب انتقال حرارت منجر می‌شود.

دلایل افزایش انتقال حرارت در لوله‌های تخت مشخص نیست، اما فرضیه‌هایی برای افزایش انتقال حرارت با استفاده از لوله‌های تخت در کندانسور مطرح شده^[۳] که برای انتقال حرارت جوششی نیز توجیه‌پذیرند:

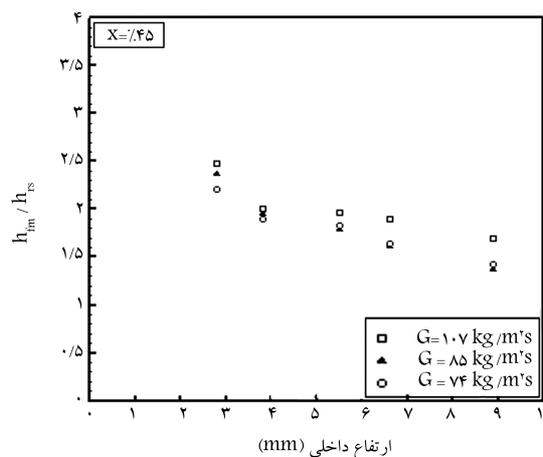
اولاً، کاهش ارتفاع داخلی لوله سبب کاهش انرژی مورد نیاز برای ترکردن سطح بالایی لوله می‌شود. در نتیجه تغییر رژیم جریان از جریان جدا شده به حلقوی نسبت به لوله‌ی گرد سریع‌تر اتفاق می‌افتد. با توجه به این که فیلم مایع اطراف لوله سبب افزایش اثرات توربولانس بین فاز مایع و گاز می‌شود، در نتیجه میزان انتقال حرارت در رژیم جریان حلقوی بیشتر است. بنابراین، میزان انتقال حرارت در لوله‌های تخت نسبت به لوله‌ی گرد بیشتر است.

ثانیاً، استفاده از لوله‌های تخت ممکن است میدان جریان را به گونه‌ی تغییر دهد که بدون تغییر رژیم جریان، میزان انتقال حرارت افزایش یابد؛ یعنی میدان جریان بدون آن که رژیم جریان از جدا شده به حلقوی تغییر کند تحت تأثیر قرار می‌گیرد. مثلاً در رژیم جریان حلقوی، در بعضی از جریان‌ها موج‌های مغشوش یا موج حلقوی دیده می‌شود در حالی که در بعضی از جریانات حلقوی این موج‌ها دیده نمی‌شوند. سومین احتمال را می‌توان ناشی از شکل‌گیری رژیم جریانی متفاوت -- به نحوی که میزان انتقال حرارت افزایش یابد -- دانست.

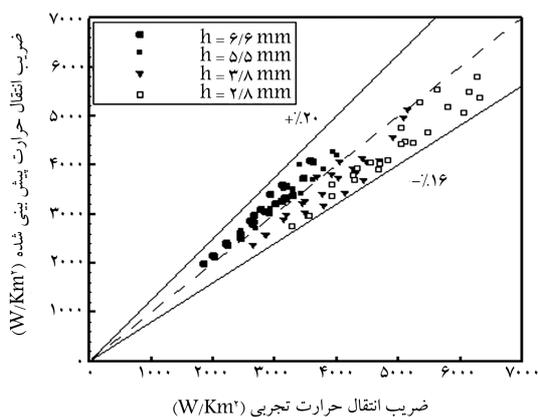
درخصوص رژیم جریان در لوله‌ی گرد میکروفین دار با استفاده از مطالعات پیشین^[۱۰] و نقشه‌ی اصلاح شده‌ی آن برای لوله‌ی میکروفین افقی^[۱۱] و نیز داده‌های جمع‌آوری شده در این مطالعه تجربی، مشاهده می‌شود که بعضی از داده‌ها در ناحیه‌ی جریان جدا شده موجی و بعضی در ناحیه‌ی جریان حلقوی قرار می‌گیرند. با توجه به این که مدل جدا شده موجی نوعی رژیم حلقوی با خشک‌شدگی جزئی تعریف می‌شود، می‌توان گفت که رژیم جریان در تمامی مقاطع تقریباً حلقوی است. درخصوص لوله‌های تخت شده اطلاع دقیقی از وضعیت الگوی جریان در لوله نیست، اگرچه یکی از دلایل محتمل برای افزایش ضریب انتقال حرارت ناشی از تخت شدن لوله ممکن است تغییر زودتر الگوی جریان از حالت جدا شده موجی به حالت حلقوی باشد.

در شکل ۸ تغییرات نسبت ضریب انتقال حرارت برحسب ارتفاع داخلی لوله‌ی میکروفین دار تخت در سرعت‌های جرمی متفاوت و کیفیت بخار ۴۵٪ نشان داده شده است. چنان که پیش‌تر گفته شد و در این شکل نیز مشهود است، با افزایش ارتفاع داخلی لوله (کاهش میزان تخت‌شدگی) نسبت افزایش ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. البته باید توجه داشت که مطالعه‌ی انجام شده در کندانسور^[۳] نشان می‌دهد که این نسبت در لوله‌ی با ارتفاع داخلی کم‌تر از ۲ میلی‌متر، کم‌تر از نسبت مربوط به لوله‌ی با ارتفاع داخلی ۳ میلی‌متر است. به همین دلیل انجام تحقیقات مشابه در اواپراتور ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به شکل ۸ همچنین می‌توان دریافت که در لوله‌ی با هندسه‌ی خاص و در کیفیت مشخص، روند یکناختی بین سرعت جرمی و نسبت افزایش انتقال حرارت دیده نمی‌شود.

در شکل ۹ نسبت ضرایب انتقال حرارت لوله‌ی گرد و تخت میکروفین دار به لوله‌ی گرد صاف، در تمامی موارد برحسب ارتفاع داخلی لوله نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود، نسبت ضرایب انتقال حرارت جوششی در لوله‌های تخت میکروفین دار به لوله‌ی گرد صاف در تمامی موارد بیشتر از ۱ است. این نسبت با کاهش ارتفاع داخلی لوله افزایش می‌یابد و بین ۱٫۳۴ تا ۳٫۳۹ در تغییر است. مطابق انتظار، بیشینه نسبت h_{fm}/h_{rs} در لوله‌ی تخت با کم‌ترین ارتفاع داخلی یعنی ۲٫۸ mm و در سرعت جرمی $85 \text{ kg/m}^2\text{s}$ روی می‌دهد. کم‌ترین مقدار این نسبت نیز در لوله‌ی با کم‌ترین میزان تخت‌شدگی و همین سرعت جرمی رخ می‌دهد. افزایش انتقال حرارت جوششی در مورد لوله‌های میکروفین دار عموماً ناشی از ترکیب چهار اثر زیر است:



شکل ۸. تغییرات نسبت ضریب انتقال حرارت با ارتفاع داخلی لوله‌ی میکروفین دار تخت در سرعت جرمی‌های مختلف و کیفیت ۴۵٪.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی ضرایب انتقال حرارت آزمایشگاهی لوله‌ی میکروفین دار تخت با پیش‌بینی رابطه‌ی ۲.

در شکل ۱۰ نتایج حاصل از مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ی ۲ نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، میزان انحراف داده‌های پیشنهادی این رابطه از نتایج آزمایشگاهی در محدوده‌ی $\pm 20\%$ است.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مطالعه‌ی انجام‌شده را می‌توان به‌طور خلاصه چنین ارائه کرد:

- ضریب انتقال حرارت جوششی در لوله‌های میکروفین دار تخت نیز مانند لوله‌ی میکروفین دار گرد با افزایش سرعت جرمی و کیفیت بخار افزایش می‌یابد.
- استفاده از لوله‌های تخت سبب افزایش انتقال حرارت نسبت به لوله‌ی گرد در سرعت جرمی و کیفیت بخار یکسان می‌شود. بیشترین میزان افزایش انتقال حرارت در لوله‌ی تخت میکروفین دار با ارتفاع داخلی ۲/۸ میلی‌متر (تخت‌ترین لوله) و در سرعت جرمی $85 \text{ kg/m}^2\text{s}$ روی می‌دهد که به‌میزان 239% نسبت به لوله‌ی صاف گرد است.
- نسبت ضریب انتقال حرارت لوله‌ی میکروفین دار تخت به ضریب انتقال حرارت لوله‌ی گرد صاف با افزایش کیفیت بخار افزایش می‌یابد ولی درمورد تغییر آن با افزایش سرعت جرمی نمی‌توان پیش‌بینی خاصی داشت.
- براساس داده‌های تجربی مطالعه‌ی حاضر، رابطه‌ی برای تخمین ضرایب انتقال حرارت در لوله‌های میکروفین دار تخت ارائه شد.

پانویس

1. evaporator

منابع

1. Akhavan-Behabadi, M.A.; Kumar, R. and Jamali, M. "Investigation on heat transfer and pressure drop dur-

رابطه‌ی پیشنهادی برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت

براساس نتایج آزمایشگاهی حاصله، رابطه‌ی ۲ برای پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت در لوله‌های میکروفین دار تخت ارائه می‌شود:

$$h_{TP} = h_f \left(1 + 3000 Bo^{0.86} + 1.12 \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.75} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0.41} \right) \times \frac{D}{D_f} \times \frac{S_m}{S_s} \times \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.5} \quad (2)$$

که در آن D معرف قطر داخلی در ریشه‌ی فین لوله‌ی گرد و D_f معرف قطر هیدرولیکی لوله‌ی تخت است که از رابطه $D_f = \frac{x \cdot A}{P}$ به دست می‌آید (A مساحت داخلی P محیط سطح داخلی ریشه‌ی فین لوله است). نسبت S_m/S_s نسبت افزایش سطح داخلی لوله‌ی میکروفین دار در اثر حضور فین است. ضریب انتقال حرارت تک‌فاز مایع (h_f) و عدد جوشش (Bo) نیز از طریق رابطه‌های ۳ و ۴ به دست می‌آیند:

$$h_f = 0.23 Re_f^{0.4} Pr_f^{0.4} \left(\frac{k_f}{D} \right) \quad (3)$$

$$Bo = \frac{q}{G h_{fg}} \quad (4)$$

عدد رینولدز مایع (Re_f) نیز از رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود:

$$Re_f = \frac{G(1-x)D}{\mu_f} \quad (5)$$

با توجه به این که رابطه‌ی جانگرو و وینرتون^[۹] تطابق خوبی با داده‌های این مطالعه در لوله‌ی گرد داشت، در واقع رابطه‌ی ارائه شده بر مبنای این رابطه است. عبارت

$$h_{TP} = h_f \left(1 + 3000 Bo^{0.86} + 1.12 \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.75} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0.41} \right)$$

مشابه رابطه‌ی لوله‌ی گرد است و ضرایب $\frac{D}{D_f} \times \frac{S_m}{S_s} \times \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.5}$ برای تأثیر میزان تخت‌شدگی، زبری لوله و تطابق بهتر با داده‌های آزمایش در نظر گرفته شده است. این رابطه برای سرعت جرمی بین $74 \text{ kg/m}^2\text{s}$ تا $107 \text{ kg/m}^2\text{s}$ در کیفیت بخار بین 0.2 تا 0.9 و میرد $R-134a$ به‌دست آمده است.

ing swirl flow boiling of R-134a in a horizontal tube", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **52**, pp. 1918-1927 (2009).

2. Akhavan-Behabadi, M.A.; Kumar, R. and Mohseni, S.G. "Condensation heat transfer of R-134a inside a microfin tube with different tube inclinations", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **50**, pp. 4864-4871 (2007).
3. Wilson, M.J.; Newell, T.A.; Chato, J.C. and Infante Ferreira, C.A. "Refrigerant charge, pressure drop and con-

- densation heat transfer in flattened tubes”, *International Journal of Refrigeration*, **26**, pp. 442-451 (2002).
4. Sonntag, R.; Borgnakke, C. and VanWylen, G., *Fundamentals of Thermodynamics*, Sixth Edition, John Wiley & Sons, New York, pp. 700-701 (2003).
 5. Collier, J. and Thome, J., *Convective Boiling and Condensation*, Oxford, University Press (1994).
 6. Schultz, R.R. and Cole, R. “Uncertainty analysis in boiling nucleation”, *AIChE Symp. Series*, **75**(189), pp. 32-38 (1979).
 7. Koyama, S.; Yu, J. and Momoki, S. “Experimental study of flow boiling heat transfer in a horizontal microfin tube”, *The Reports of Institute of Advanced Material Study, Kyushu University*, **9**, pp. 27-42 (1995).
 8. Gungor, K.E. and Winterton, R.H. “A general correlation for flow boiling in tubes and annuli”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **29**(3), pp. 351-358 (1985).
 9. Gungor, K.E. and Winterton, R.H. “Simplified general correlation for saturated flow boiling and comparison of correlations to data”, *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, **65**, pp. 148-156 (1987).
 10. Kattan, N.; Thome, J.R. and Favart, D. “Boiling of R-134a and R-123 in a microfin tube”, *Proc. 19th Int. Congress of Refrigeration Iva.*, pp. 337-344 (1995).
 11. Spindler, K. and Steinhagen, M.H. “Flow boiling heat transfer of R134a and R404A in a microfin tube at low mass fluxes and low heat fluxes”, *Heat Mass Transfer*, DOI 10.1007/s00231-007-0326-8 (2007).

