

مطالعه تجربی افت فشار در جریان جوششی داخل لوله‌های پهن شده

میثم نصر^۱، محمدعلی اخوان بهابادی^۲ و مسعود جمالی آشتیانی^۳

دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۰۹/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۱/۲۲)

چکیده

در این مطالعه به بررسی افت فشار جریان جوششی اجباری مبرد R-134a درون لوله‌های افقی پهن شده پرداخته می‌شود. به این منظور، لوله‌های مسی گرد با قطر خارجی ۹/۵۲ میلی‌متر به چهار میزان متفاوت با ارتفاع داخلی ۲/۸، ۳/۸، ۵/۵ و ۶/۶ میلی‌متر پهن می‌شوند. دستگاه مورد استفاده در این بررسی یک سیستم تبرید تراکمی بخار مجهز به کلیه وسایل اندازه‌گیری مورد نیاز می‌باشد. این سیستم شامل سه تبخیرکننده گرم‌شونده با گرمکن الکتریکی می‌باشد که به ترتیب تبخیرکننده اولیه، تبخیرکننده آزمایش و تبخیرکننده ثانویه نامیده می‌شوند. رابطه‌ای برای محاسبه افت فشار جریان جوششی سیال در لوله‌های پهن شده ارائه شده که داده‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر را با دقت $\pm 20\%$ پیش‌بینی می‌کند. داده‌های آزمایشگاهی با روابط موجود برای پیش‌بینی افت فشار در لوله‌های پهن شده مقایسه شده‌اند. نتایج تجربی حاصله نشان می‌دهد که پهن کردن مقطع لوله باعث افزایش افت فشار نسبت به لوله گرد مشابه می‌شود. در بدترین حالت افت فشار، جریان جوششی درون لوله پهن شده افقی تا ۶۰۰٪ نسبت به لوله گرد مشابه افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: افت فشار، جریان جوششی، R-134a، لوله پهن شده، تجربی

Empirical Investigation of Boiling Flow Pressure Drop Inside Flattened Tubes

M. Nasr, M.A. Behabadi, and M.J. Ashtiyani

Mech. Eng. Dep't., College of Eng., Univ. of Tehran

ABSTRACT

In this study pressure drop of R-134a refrigerator under convective boiling conditions in horizontal flattened tubes was investigated. Round copper tubes with outer diameter of 9.52 mm are flattened into oblong shape with different internal height of 6.6 mm, 5.5 mm, 3.8 mm, and 2.8 mm. The experimental set-up used is a well-instrumented vapor compression refrigeration cycle. It includes three evaporators named pre-evaporator, test evaporator, and after evaporator. The results show that pressure drop increases as the tube profile is flattened. The obtained experimental data are compared with the results of existing correlations for estimation of pressure drop inside flattened tubes. In worst condition, the maximum boiling flow pressure drop is increased to 600% for the horizontal flattened tube relative to the round tube values. Also, a correlation is developed to predict the boiling flow pressure drop inside flattened tubes. This correlation predicts the experimental results within an error band of $\pm 20\%$.

Keywords: Pressure Drop, Boiling Flow, R-134a, Flattened Tube, Empirical

۱- کارشناس ارشد: meisam.nasr@yahoo.com

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): akhavan@ut.ac.ir

۳- کارشناس ارشد: jamali_59@yahoo.com

فهرست علائم

A	مساحت مقطع لوله
d_e	قطر معادل
d_i	قطر داخلی لوله
F	ضریب اصطکاک
Fr	عدد فرود
G	سرعت جرمی
G	شتاب جاذبه
H	ارتفاع داخلی لوله پهن شده
L	طول تبخیرکننده
ΔP	افت فشار
Pr	عدد پرانتل
x	کیفیت بخار
α	ضریب وید
η	راندمان سطح
μ	ویسکوزیته دینامیک
ρ	چگالی
σ	کشش سطحی
ϕ	ضریب تصحیح افت فشار

زیرنویس‌ها

f	مایع
fri	اصطکاک
g	گاز
in	ورودی
mom	ممنتوم
out	خروجی
Sta	استاتیکی
tot	کل

بالانویس‌ها

—	مقدار متوسط
o	مقدار مرجع
*	مقدار بی بعد

۱- مقدمه

امروزه با عنایت به محدودیت منابع انرژی و لزوم صرفه‌جویی در مصرف آن، بهینه‌سازی مصرف انرژی در طراحی و ساخت تبادل‌گرهای حرارتی، به ویژه تبخیرکننده‌ها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این مسأله به معنی افزایش انتقال حرارت همراه با کمترین میزان افزایش افت فشار است. بنابراین، مطالعه افت فشار به همراه انتقال حرارت در لوله‌ها از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. محققان زیادی به مطالعه

افت فشار و انتقال حرارت در لوله‌ها پرداخته‌اند [۱]. موضوع کاربرد انتقال حرارت افزایشی در تبادل‌گرهای حرارتی، به طور جدی دنبال می‌شود. اگرچه می‌توان سطوح افزایشی را در تمام تبادل‌گرها به کار برد، ولی باید دید با توجه به این‌که استفاده از آن‌ها باعث افزایش توان مصرفی می‌شود، آیا این کاربرد به صرفه است یا خیر؟ بنابراین، مطالعه افت فشار در این تبادل‌گرها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به منظور افزایش میزان انتقال حرارت در صنعت از روش‌های فعال و غیرفعال مختلفی استفاده می‌شود. محققان بسیاری روش‌های فعال و غیر فعال را در مبدل‌های حرارتی مورد مطالعه قرار داده‌اند [۲]. یکی از روش‌های غیرفعال استفاده از لوله‌های با مقطع پهن شده می‌باشد.

ویلسون^۱ و همکارانش [۳] به بررسی افت فشار در لوله‌های افقی با مقطع پهن‌شده در کندانسور پرداختند. لوله مورد استفاده در مطالعه آن‌ها لوله مسی با قطر داخلی ۸/۹۱ mm بوده که تا ارتفاع ۰/۹۷۴، ۲/۵۷، ۴/۱۵ و ۵/۷۴ میلی‌متر پهن شده‌اند. در مطالعه آن‌ها مبدل‌های R-134a و R-410 در محدوده دبی $(400 - 75) \text{ kg/m}^2\text{s}$ و کیفیت بخار $(0.80 - 0.10)$ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعه آن‌ها بیانگر این است که داده‌های بدست آمده برای افت فشار برای لوله‌های با مقطع پهن‌شده با در نظر گرفتن قطر هیدرولیکی با ۴۰ درصد خطا توسط روابط موجود در لوله گرد ارائه شده توسط جونگ و رادرماجر^۲ [۴] و سوزا^۳ و همکارانش [۵] قابل پیش‌بینی می‌باشد. همچنین، بررسی نتایج، افزایش افت فشار و ضریب انتقال حرارت ناشی از پهن‌شدن مقطع با ثابت ماندن سرعت جرمی و کیفیت بخار را نشان می‌دهد.

تام و مورنو^۴ [۶] افت فشار در جریان دو فازی مبدل‌های R-22 و R-410 در لوله‌های گرد با قطرهای $(13/8 - 8)$ میلی‌متر که هر کدام تا ارتفاع $(3 - 2)$ میلی‌متر پهن‌شده بودند را در محدوده سرعت جرمی $(500 - 150) \text{ kg/m}^2\text{s}$ مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه بیانگر این است که افزایش افت فشار ناشی از پهن‌شدن مقطع با ثابت ماندن سرعت جرمی می‌تواند تا ۷ برابر نسبت به لوله گرد افزایش یابد. در مطالعه آن‌ها

1-Wilson

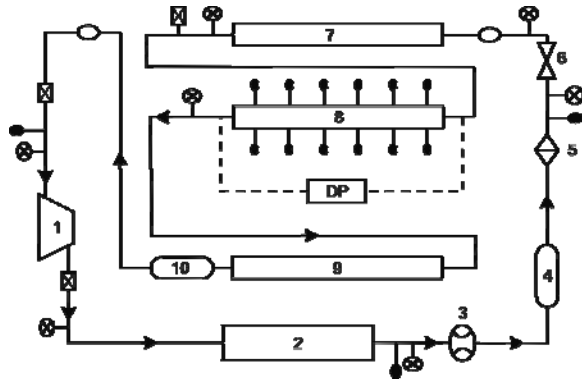
2-Jung & Radermacher

3-Souza

4- Thome & Moreno

هر تبخیرکننده و گرمکن مربوطه به طور کامل عایق شده است. با این وجود مقدار کمی از حرارت گرمکن‌ها به محیط انتقال می‌یابد. بنابراین، راندمان گرمکن η به صورت زیر تعیین گردیده و در محاسبات تأثیر داده می‌شود.

$$\eta = \frac{Q_{\text{موردنیاز}}}{Q_{\text{المنت}}} \quad (1)$$



- | | |
|---------------------------------|----------------------|
| ۱- کمپرسور | ۶- شیر انبساط |
| ۲- کندانسور | ۷- تبخیرکننده اولیه |
| ۳- دی سنج میرد | ۸- تبخیرکننده آزمایش |
| ۴- دریافت کننده مایع | ۹- تبخیرکننده ثانویه |
| ۵- فیلتر درایر | ۱۰- جمع کننده مایع |
| DP- دستگاه اندازه‌گیری افت فشار | فشارسنج |
| شیر قطع و وصل | ترموکوپل |
| جهت جریان | |

شکل (۱): نمای طرح کلی دستگاه آزمایشگاهی.

ترموکوپل‌های استفاده شده از نوع سری T بوده که با دقت 0.1°C کالیبره شده‌اند، فشار سنجه‌ها نیز با دقت ۲ kPa کالیبره گردیده‌اند. برای اندازه‌گیری افت فشار جریان عبوری از تبخیرکننده آزمایش، از یک دستگاه اندازه‌گیری افت فشار که قادر به اندازه‌گیری اختلاف فشار تا ۳ bar بوده و برای $0-150\text{ kPa}$ توسط شرکت سازنده کالیبره گردیده است، استفاده می‌شود.

ارتفاع داخلی h، فاصله عمودی دیواره بالایی و پایینی در داخل لوله را نشان می‌دهد و بیانگر میزان پهن‌شدگی لوله می‌باشد. لوله‌های پهن‌شده با چهار ارتفاع داخلی (میزان پهن‌شدگی) متفاوت $2/8$ ، $3/8$ ، $5/8$ و $6/8$ میلی‌متر مورد بررسی

رابطه گرونر^۱ [۷] برای پیش‌بینی داده‌های آزمایشگاهی اصلاح گردید.

در این تحقیق، به مطالعه تجربی افت فشار در جریان جوشی R-134a داخل لوله‌های پهن‌شده پرداخته می‌شود. مطالعه حاضر بر روی میرد R-134a صورت پذیرفت، زیرا پتانسیل تخریب لایه اوزن (ODP) این گاز صفر بوده و به همین دلیل استفاده از آن رو به افزایش است.

۲- دستگاه آزمایش

برای انجام آزمایش یک سیستم جوشش درون لوله‌ای طراحی، ساخته و نصب گردید. در واقع این دستگاه یک سیستم تبرید تراکمی بخار مجهز به کلیه وسایل اندازه‌گیری مورد نیاز است. نمای طرح کلی دستگاه آزمایشگاهی در شکل ۱ نشان داده شده است. تبخیرکننده مورد آزمایش (تبخیرکننده آزمایش) شامل یک لوله مسی به قطر خارجی ۹/۵۲ mm و طول ۱،۲۰۰ mm می‌باشد. گرمای مورد نیاز آزمایش تبخیرکننده توسط گرمکن الکتریکی، که به طور یکنواخت دور لوله مسی پیچیده شده (شار ثابت)، تأمین می‌گردد. مقدار توان مطلوب گرمکن الکتریکی توسط یک دیمر صنعتی ۲ kW تنظیم می‌شود. از آنجا که طول لوله مورد آزمایش محدود است، دامنه کمی از تغییرات کیفیت بخار در تبخیرکننده آزمایش قابل حصول می‌باشد. بنابراین، به‌منظور پوشش دادن کل دامنه جوشش، سیستم به‌گونه‌ای طراحی شده که کیفیت‌های متفاوت بخار، در ورود به تبخیرکننده آزمایش قابل دستیابی باشد. این کار با نصب یک تبخیرکننده اولیه پیش از تبخیرکننده آزمایش محقق شده و با تغییر ولتاژ ورودی به گرمکن الکتریکی بر روی تبخیرکننده اولیه می‌توان کیفیت بخار را در ورود به آزمایش تبخیرکننده تنظیم کرد.

تبخیرکننده‌های اولیه و ثانویه به قطر خارجی ۹/۵۲ mm و طول ۱،۲۰۰ mm می‌باشند، که گرمای آن توسط یک دیمر صنعتی ۳ kW تنظیم می‌شود. برای فوق‌گرم^۲ کردن میرد و جلوگیری از ورود مایع به کمپرسور از یک تبخیرکننده ثانویه و یک جمع‌کننده مایع استفاده می‌گردد. برای جلوگیری از اتلاف حرارت گرمکن‌ها به محیط، مجموعه

1-Gronnerud
2- Superheat

۴- افت فشار لوله گرد

افت فشار کل جریان متشکل از سه ترم افت فشار اصطکاکی ΔP_{fri} ، افت فشار در اثر تغییر ممنتوم ΔP_{mom} و افت فشار استاتیکی ΔP_{sta} می‌باشد و از معادله (۲) بدست می‌آید.

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_{fri} + \Delta P_{mom} + \Delta P_{sta} \quad (2)$$

به علت اینکه در لوله افقی تغییر ارتفاع وجود ندارد، $\Delta P_{sta} = 0$ می‌باشد. در نتیجه معادله (۲) به فرم معادله (۳) تبدیل خواهد شد.

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_{fri} + \Delta P_{mom} \quad (3)$$

افت فشار ناشی از سرعت در لوله بوسیله معادله (۴) محاسبه می‌گردد.

$$\Delta P_{mom} = G_{tot}^2 \left\{ \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_f (1-\alpha)} + \frac{x^2}{\rho_g \alpha} \right]_{out} - \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_f (1-\alpha)} + \frac{x^2}{\rho_g \alpha} \right]_{in} \right\} \quad (4)$$

در رابطه فوق، α ضریب وید بوده و با استفاده از فرمول ارائه شده توسط اشتاینر^[۱۰] به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

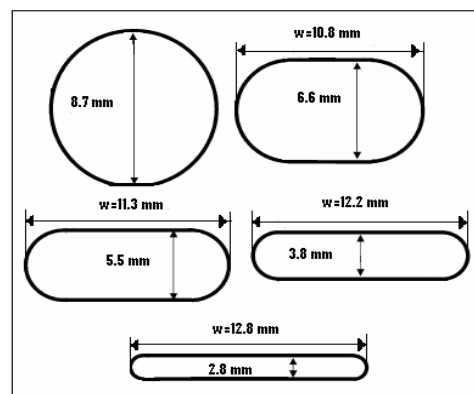
$$\alpha = \frac{x}{\rho_g} \left[(1+0.12(1-x)) \left(\frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_f} \right) + \frac{1.18(1-x) \left[g \sigma (\rho_f - \rho_g) \right]^{0.25}}{G_{tot}^2 \rho_f^{0.5}} \right]^{-1} \quad (5)$$

افت فشار کل در تبخیرکننده آزمایش (ΔP_{tot}) با دستگاه افت فشار اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از خواص جریان، افت فشار ناشی از تغییر ممنتوم با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد. بنابراین، افت فشار اصطکاکی طبق معادله (۳) از کم کردن دو مقدار مذکور بدست می‌آید.

از مقایسه نتایج بدست آمده برای لوله گرد با روابط ارائه شده برای پیش‌بینی افت فشار در لوله گرد ملاحظه شد که چندین رابطه از جمله رابطه فریدل^[۱۱] تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند. این امر نشان دهنده صحت عملکرد دستگاه و وسایل اندازه‌گیری بکار رفته می‌باشد.

قرار گرفتند. شکل ۲ نمایی از مقاطع لوله گرد و چهار لوله پهن‌شده که در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفتند را نشان می‌دهد. جهت پهن نمودن لوله‌ها یک دستگاه نورد در جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران طراحی و ساخته شد. این دستگاه شامل دو غلتک بوده که بار و فاصله غلتک‌ها از یکدیگر قابل تنظیم می‌باشند. با تغییر بار و فاصله غلتک‌ها از یکدیگر لوله گرد به چهار میزان مختلف پهن گردید.

برای تعیین درجه حرارت اشباع و آنتالپی‌های اشباع و فوق‌گرم R-۱۳۴a از مرجع [۸] و سایر خواص مثل لزجت از [۹] استفاده می‌شود. با نوشتن رابطه آنتالپی ثابت دو سر شیر سوزنی کیفیت بخار ورودی به تبخیرکننده اولیه محاسبه می‌شود و برای محاسبه کیفیت بخار در ورودی و خروجی تبخیرکننده آزمایش از موازنه حرارتی استفاده شده است.



شکل (۲): نمای لوله گرد و لوله‌های پهن‌شده.

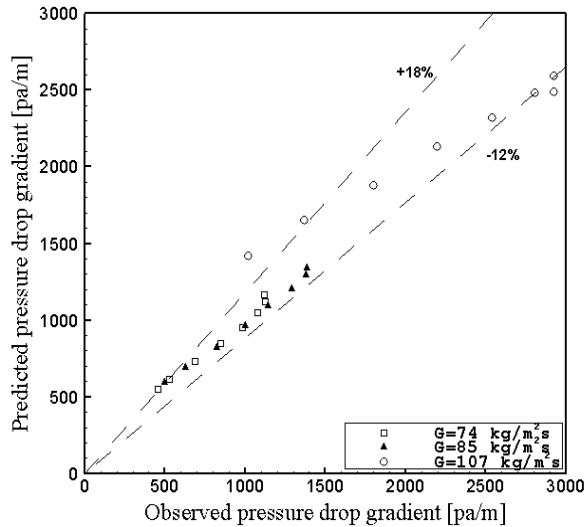
۳- جمع آوری و تحلیل داده‌ها

در مجموع ۱۲۰ آزمایش مختلف با سه سرعت جرمی متفاوت ۷۴، ۸۵ و ۱۰۷ $\text{kg/m}^2\text{s}$ برای لوله گرد و لوله‌های پهن‌شده صورت گرفت. حدود تغییرات متغیرهای کاری به صورت زیر می‌باشند:

جدول (۱): محدوده پارامترهای آزمایش.

۷۴-۱۰۷ $\text{kg/m}^2\text{s}$	سرعت جرمی مبرد
۰/۲ - ۰/۹	کیفیت بخار ورودی به تبخیرکننده آزمایش
۰/۳ - ۱	کیفیت بخار خروجی از تبخیرکننده آزمایش
۱۰۰۰-۳۰۰۰	عدد رینولدز مایع
۴۴,۰۰۰-۱۰۵,۰۰۰	عدد رینولدز گاز
۲/۸ - ۶/۶ mm	میزان پهن شدگی (ارتفاع داخلی)

بدست آمد. در ادامه، تأثیر متغیرهای گوناگون از قبیل سرعت جرمی، کیفیت بخار و هندسه لوله بر افت فشار مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.



شکل (۳): مقایسه افت فشار آزمایشگاهی لوله گرد با مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه فریدل [۹].

شکل ۴ تغییرات افت فشار با کیفیت بخار برای لوله گرد و لوله‌های پهن‌شده در سرعت جرمی $74 \text{ kg/m}^2\text{s}$ را نشان می‌دهد. برای ترسیم این نمودار از گرادیان افت فشار و کیفیت بخار به عنوان محورهای مختصات و از میزان پهن‌شدگی لوله بعنوان پارامتر مشخصه استفاده شده است. جهت مشاهده بهتر روند تغییرات گرادیان افت فشار یک منحنی چند جمله‌ای از بین نقاط به‌دست آمده برای هر لوله گذرانده شده است. نتایج مربوط به لوله گرد نیز برای مقایسه آورده شده است.

از این شکل می‌توان افزایش افت فشار در مقابل افزایش کیفیت بخار در لوله‌های پهن‌شده را ملاحظه نمود. این رفتار شبیه رفتار مربوط به لوله گرد می‌باشد. علت آن را نیز مشابه لوله گرد می‌توان بدین‌گونه تشریح کرد که با افزایش میزان کیفیت بخار، مقدار چگالی کاهش یافته و طبق رابطه بقای جرم باعث افزایش سرعت جریان و در نتیجه افزایش تنش برشی بین سیال و دیواره لوله می‌شود. از طرفی با افزایش کیفیت بخار سرعت نسبی بین فاز مایع و گاز نیز زیاد شده

فریدل [۱۱] رابطه زیر را برای محاسبه گرادیان فشار اصطکاکی دوفازی ارائه نمود:

$$\Delta P_{fi} = \Delta P_f \phi^2, \quad (6)$$

که در آن، افت فشار فاز مایع از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta P_f = 4f_f \left(\frac{L}{d_i} \right) G_{tot}^2 \left(\frac{1}{2\rho_f} \right). \quad (7)$$

عدد رینولدز و ضریب اصطکاک مایع به‌صورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$\text{Re}_f = \frac{G_{tot} d_i}{\mu_f}, \quad (8)$$

$$f_f = 0.079 \text{Re}_f^{-0.25}. \quad (9)$$

وی ضریب تصحیح دوفازی را به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$\phi^2 = E + \frac{3.24 F \cdot H}{Fr_H^{0.045} We_f^{0.035}}. \quad (10)$$

ضرایب بدون بعد E و F و H به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$E = (1-x)^2 + x^2 \left(\frac{\rho_f f_g}{\rho_g f_f} \right), \quad (11)$$

$$F = x^{0.78} (1-x)^{0.224}, \quad (12)$$

$$H = \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0.91} \left(\frac{\mu_g}{\mu_f} \right)^{0.19} \left(1 - \frac{\mu_g}{\mu_f} \right)^{0.7}. \quad (13)$$

عدد فرود به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$Fr_H = \frac{G_{tot}^2}{gd_i \rho_h^2}. \quad (14)$$

عدد وبر و چگالی همگن نیز به‌صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$We_f = \frac{G_{tot}^2 d_i}{\rho_h \sigma}, \quad (15)$$

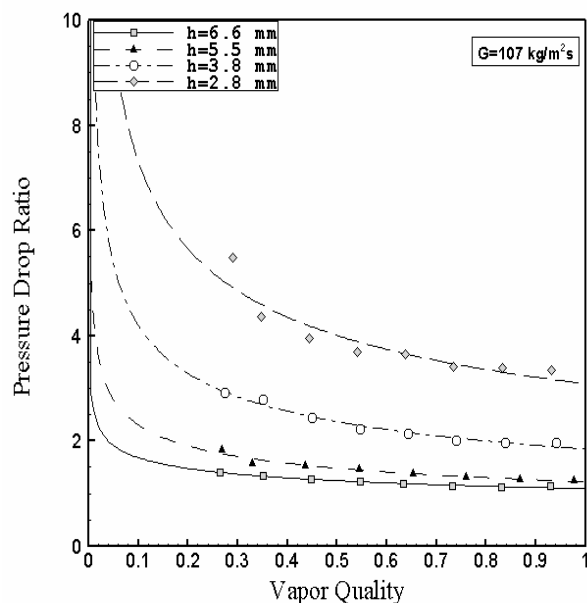
$$\rho_h = \left[\frac{x}{\rho_g} + \frac{(1-x)}{\rho_f} \right]^{-1}. \quad (16)$$

رابطه فریدل همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است داده‌های آزمایشگاهی را در بازه $+18 - 12\%$ درصد پیش‌بینی می‌کند.

۵- افت فشار لوله پهن شده

داده‌های آزمایشگاهی برای لوله‌های با مقطع پهن‌شده با چهار میزان پهن‌شدگی متفاوت $2/8$ ، $3/8$ ، $5/5$ و $6/6$ میلی‌متر و در سه سرعت جرمی مبرّد متفاوت 74 ، 85 و $107 \text{ kg/m}^2\text{s}$

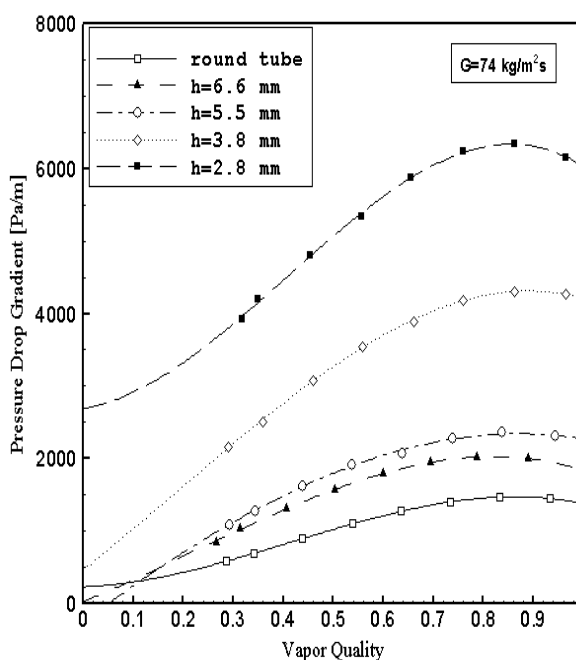
می‌شود که افت فشار در لوله‌های پهن‌شده با میزان پهن‌شدگی متفاوت با افزایش سرعت جرمی افزایش می‌یابد. با تعریف ضریب افزایش افت فشار به صورت نسبت افت فشار لوله پهن‌شده به لوله گرد، نحوه تأثیر پهن کردن لوله بر افزایش افت فشار مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۵ نحوه تغییرات این ضریب را بر حسب کیفیت بخار برای سرعت جرمی $107 \text{ kg/m}^2\text{s}$ نشان می‌دهد. از بین نقاط به دست آمده برای هر لوله یک تابع توانی عبور داده شده است.



شکل (۵): تغییرات ضریب افت فشار (افت فشار نسبت به لوله گرد) بر حسب کیفیت بخار.

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود افزایش افت فشار نسبت به لوله گرد عموماً با افزایش کیفیت بخار کاهش می‌یابد. بیشترین افزایش افت فشار در کمترین کیفیت بخار تقریباً برابر با $0/3$ در لوله با کمترین ارتفاع داخلی $2/8 \text{ mm}$ (پهن‌ترین لوله) اتفاق می‌افتد که 7 برابر افت فشار در لوله با مقطع گرد است. این در حالی است که کمترین افزایش افت فشار در بالاترین سرعت جرمی $107 \text{ kg/m}^2\text{s}$ و در کیفیت بخار $0/80$ از لوله با بزرگترین ارتفاع داخلی $6/6 \text{ mm}$ (کمترین پهن‌شدگی) حاصل می‌شود که فقط 12% بیشتر از افت فشار در لوله گرد می‌باشد.

که منجر به افزایش نیروی برشی در سطح مشترک آن دو و در نتیجه باعث افزایش مضاعف میزان افت فشار می‌گردد. بیشترین میزان افت فشار در لوله‌های پهن‌شده در محدوده کیفیت بخار ($0/8 - 0/9$) رخ می‌دهد و سپس میزان آن کاهش می‌یابد. علت این موضوع می‌تواند پدیده خشک‌شدگی جزئی در سطح فوقانی لوله باشد که باعث می‌شود جریان از حلقوی به حالت جدا شده موجی تبدیل شود. این پدیده با افزایش میزان پهن‌شدگی و افزایش سرعت جرمی، بیشتر مشاهده می‌شود.



شکل (۴): مقایسه گرادینان افت فشار برای لوله‌های پهن‌شده در سرعت جرمی $74 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

همچنین، از شکل ۴ دیده می‌شود که پهن کردن مقطع، افت فشار بالاتری را در مقایسه با جریان لوله با مقطع گرد ایجاد می‌کند و این میزان با افزایش میزان پهن‌شدگی افزایش می‌یابد. می‌توان علت آن را بدین صورت بیان کرد که پهن‌شدن مقطع، موجب کاهش سطح مقطع و افزایش سرعت سیال شده که خود تنش برشی در لایه مایع و هسته بخار را افزایش داده و در نتیجه افت فشار افزایش می‌یابد. بعلاوه، از بررسی نتایج بدست آمده در لوله‌های پهن‌شده مشخص

ارزیابی کلی شکل‌های ۶-۷ نشان می‌دهد که پیش‌بینی این روابط از ۶۲+ درصد نسبت به داده‌های تجربی حاضر تغییر می‌کند. علت این اختلاف می‌تواند این باشد که رابطه تام و مورنو [۶] از داده‌های تجربی سیالات غیر R-۱۳۴a و در محدوده سرعت جرمی متفاوتی نسبت به مطالعه حاضر بدست آمده است. همچنین، رابطه ویلسون [۳] برای جریان چگالشی مبرد R-۱۳۴a در داخل کندانسور ارائه شده است.

با توجه به این که پیش‌بینی روابط تام و مورنو [۶] و ویلسون [۳] اختلاف نسبتاً زیادی با داده‌های آزمایشگاهی این مطالعه دارند، تصمیم گرفته شد که روابطی برای تخمین افت فشار جریان جوششی در لوله‌های پهن‌شده پیشنهاد شود به نحوی که داده‌های آزمایشگاهی این مطالعه را با دقت بیشتری پیش‌بینی کنند.

بر اساس رابطه ارائه شده توسط فریدل در لوله گرد، رابطه (۱۷) جهت تخمین افت فشار در لوله‌های پهن‌شده به صورت زیر بدست آمد:

$$\Delta P = \Delta P_{Fridel} F_{flat}, \quad (17)$$

$$F_{flat} = (2.52 - 0.61x) G^* h^{-0.32} \quad (18)$$

در رابطه (۱۷)، Δp_{Fridel} افت فشار بدست آمده از رابطه فریدل می‌باشد با این تفاوت که d_i با d_e که قطر معادل لوله پهن‌شده با لوله گرد با مساحت برابر می‌باشد و از رابطه زیر بدست می‌آید، جایگزین می‌شود.

$$d_e = \sqrt{4A/\pi}, \quad (19)$$

که در آن، G و h به ترتیب سرعت جرمی بی بعد و ارتفاع داخلی بی بعد لوله می‌باشند که از رابطه زیر بدست می‌آیند:

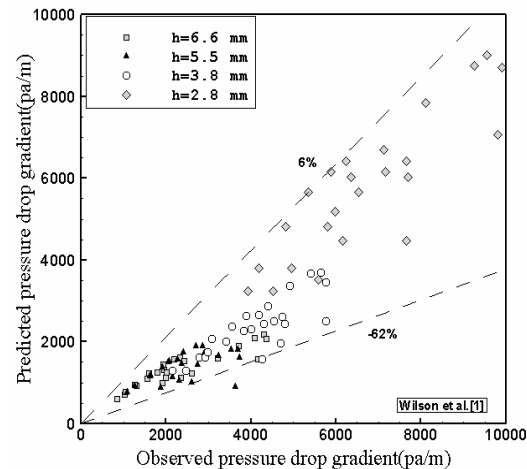
$$h = \frac{h}{h_0}, \quad G = \frac{G}{G_0}, \quad (20)$$

که در آن، G_0 و h_0 به ترتیب سرعت جرمی مرجع و ارتفاع داخلی مرجع در لوله پهن شده بوده و برابر با $85 \text{ kg/m}^2\text{s}$ و $5/5 \text{ mm}$ می‌باشند.

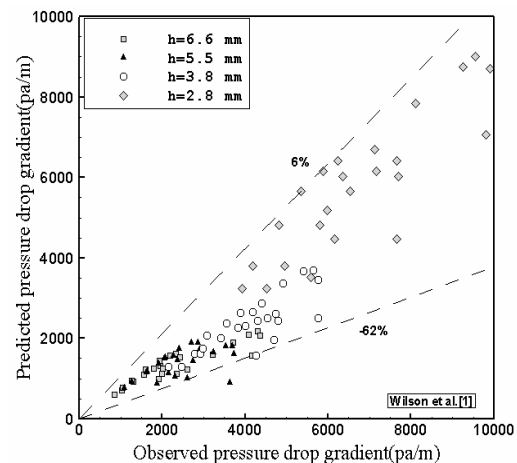
شکل ۸ مقایسه افت فشار آزمایشگاهی لوله‌های پهن‌شده با مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه (۱۷) را نشان می‌دهد. رابطه فوق داده‌های آزمایشگاهی را در بازه $\pm 20\%$ پیش‌بینی می‌کند. انحراف میانگین و انحراف استاندارد افت فشار لوله پهن شده افقی پیش‌بینی شده بوسیله رابطه (۱۷) به ترتیب برابر با $2/93\%$ و 13% می‌باشد.

۶- رابطه پیشنهادی برای محاسبه افت فشار لوله‌های پهن‌شده

در بخش قبلی به رابطه تام و مورنو [۶] و رابطه ویلسون [۳] برای تخمین افت فشار در لوله افقی پهن‌شده اشاره شد. در ابتدا افت فشار محاسبه شده از داده‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر با افت فشار پیش‌بینی شده توسط دو رابطه مذکور مقایسه می‌شود. مقدار افت فشار کل پیش‌بینی شده از جمع افت فشار اصطکاکی محاسبه شده بوسیله این روابط و افت فشار ممنتوم رابطه (۴) بدست می‌آید. مقایسه بین داده‌های آزمایشگاهی با روابط مذکور در شکل‌های ۶-۷ ارائه می‌گردد.



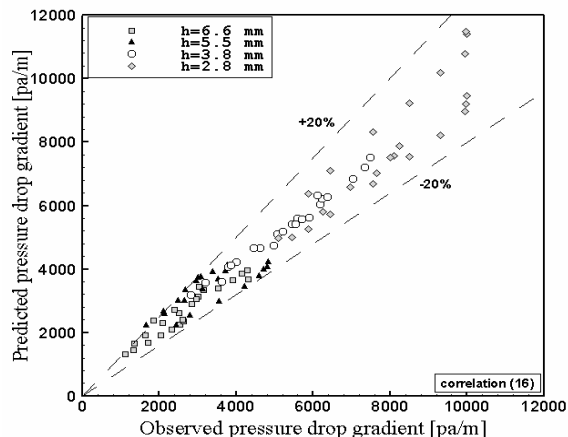
شکل (۶): مقایسه افت فشار آزمایشگاهی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه تام و مورنو [۶].



شکل (۷): مقایسه افت فشار آزمایشگاهی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه ویلسون [۳].

مراجع

۱. نظری، م. و عالم رجبی، ع.، "بررسی عددی سه‌بعدی اثر ملحقات بر انتقال حرارت و افت فشار در یک لوله"، نشریه مکانیک و هوافضا، جلد ۴، شماره ۲، تابستان ۸۷، ص.ص. ۱-۱۴.
۲. اخوان بهابادی، م.، محمدپور، الف. و جمالی، م.، "ارزیابی عملکرد نوارهای پیچیده شده داخل یک تبخیرکننده در افزایش انتقال حرارت جوششی و تأثیر آن بر میزان افت فشار"، مجله مکانیک و هوافضا، جلد ۳، شماره ۴، زمستان ۸۶، ص.ص. ۱-۱۴.
3. Wilson, M.J., Newell, T.A., Chato, J.C., and Infante Ferreira, C.A., "Refrigerant Charge, Pressure Drop, and Condensation Heat Transfer in Flattened Tubes", Int. J., Refrigeration, Vol. 26, No. 4, pp. 442-451, 2003.
4. Jung, D.S. and Radermacher, R., "Prediction of Pressure Drop During Horizontal Annular Flow Boiling of Pure and Mixed Refrigerants", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 32, No. 12, pp. 2435-2446, 1989.
5. Souza, A.L., Chato, J.C., Wattelet, J.P., and Christoffersen, B.R., "Pressure Drop During Two-phase Flow of Pure Refrigerants and Refrigerant-Oil Mixtures in Horizontal Tubes", Heat Transfer with Alternate Refrigerants, ASME HTD, Vol. 243, pp. 35-41, 1993.
6. Thome, J.R. and Moreno Quiben, J., "Refrigeration Evaporation Characteristics Inside Flat Passages", ARTI Final Report ARTI-21CR/605-20040-01, Arlington, VA, USA, 2004.
7. Gronnerud, R., "Investigation of Liquid Hold-Up, Flow-Resistance and Heat Transfer in Circulation Type Evaporators, part IV: Two-phase Flow Resistance in Boiling Refrigerants", Annexe 1972-1, Bull. De l'Inst. du Froid, 1972.
8. Sonntag, R., Borgnakke, C., and Van Wylen, G., "Fundamentals of Thermodynamics", 6th Ed., John Wiley and Sons, New York, 2003.
9. Collier, J. and Thome, J., "Convective Boiling and Condensation", Oxford Univ. Press, New York, 1994.
10. Steiner, D., "VDI-Wärmeatlas (VDI Heat Atlas), Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GCV) Düsseldorf", Chapter Hbb, 1993.
11. Friedel, L., "Improved Friction Pressure Drop Correlations for Horizontal and Vertical Two-phase Pipe Flow", European Two-phase Flow Group Meeting, Paper E2, Ispra, Italy, June 1979.



شکل (۸): مقایسه افت فشار آزمایشگاهی با مقادیر

پیش‌بینی شده توسط رابطه (۱۷).

رابطه تجربی بدست آمده بر اساس داده‌های آزمایشگاهی بر روی مبرد R-134a می‌باشد ولی با توجه به این که این رابطه بر اساس متغیرهای بی‌بعد بیان شده است، برای مبردهای دیگر نیز می‌تواند کاربرد داشته باشد و صحت آن برای مبردهای دیگر می‌تواند در مطالعه جداگانه‌ای مورد بررسی قرار بگیرد.

۷- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

- نتایج حاصل از افزایش افت فشار با افزایش کیفیت بخار و سرعت جرمی در لوله گرد در لوله‌های با مقطع پهن‌شده نیز مشاهده می‌شود،
- پهن کردن مقطع لوله‌ها افت فشار را زیاد می‌کند. در پهن‌ترین حالت، افت فشار به میزان ۶۰۰ درصد نسبت به لوله گرد افزایش می‌یابد،
- میزان افت فشار در لوله‌های پهن‌شده تابعی از میزان پهن‌شدگی، کیفیت بخار و سرعت جرمی مبرد می‌باشد. با ثابت ماندن سایر شرایط، با افزایش میزان پهن‌شدگی افت فشار افزایش می‌یابد،
- تأثیر پهن کردن مقطع بر افت فشار در دبی‌های پایین و بر کیفیت بخار بیشتر است و
- در نهایت، با استفاده از داده‌های تجربی مطالعه حاضر، رابطه‌ای برای محاسبه افت فشار در لوله‌های پهن‌شده ارائه گردید.