

پیش‌بینی افت فشار در جریان چرخشی - جوششی مبرد R-۱۳۴a در لوله‌ی افقی

محمدعلی اخوان‌بهادی (دانشیار)

مسعود جمالی‌آشتیانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

امیر محمدپور (دانشجوی کارشناسی ارشد)

پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

در این تحقیق افت فشار در جریان چرخشی - جوششی اجباری مبرد R-۱۳۴a درون لوله‌ی افقی بررسی می‌شود. برای انجام این کار از نوارهای پیچیده‌شده با نسبت پیش‌پیش ۶، ۹، ۱۲، ۱۵ استفاده می‌شود که در داخل لوله‌ی تبخیرکننده نصب می‌شوند. دستگاه مورد استفاده در این بررسی، یک سیستم تبرید تراکمی بخار مجهز به کلیه‌ی وسایل اندازه‌گیری مورد نیاز است. این سیستم شامل سه تبخیرکننده‌ی گرم‌شونده با گرم‌کن الکتریکی است که به‌ترتیب تبخیرکننده‌ی اولیه، تبخیرکننده‌ی آزمایشی و تبخیرکننده‌ی ثانویه نامیده می‌شوند. در مرحله‌ی نخست، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی رابطه‌ی برای پیش‌بینی افت فشار در لوله‌ی صاف ارائه می‌شود. سپس براساس داده‌های افت فشار به‌دست آمده از لوله‌ی صاف و لوله‌های مجهز به نوار پیچیده‌شده، روابطی برای محاسبه‌ی افت فشار جریان چرخشی ارائه می‌شود. این روابط داده‌های افت فشار جریان چرخشی را با دقت $\pm 15\%$ پیش‌بینی می‌کنند. واردکردن نوار پیچیده‌شده به داخل لوله‌ی افقی افت فشار را افزایش می‌دهد. در بدترین حالت افت فشار جریان جوششی تا 18% و به‌طور متوسط تا 10% نسبت به لوله‌ی صاف افزایش می‌یابد.

akhavan@ut.ac.ir
jamali_59@yahoo.com
amir_mp67@yahoo.com

واژگان کلیدی: افت فشار، جریان دوفاز، نوار پیچیده‌شده، جوشش، R-۱۳۴a.

مقدمه

صنایع تبرید، تپه‌ی مطبوع و پمپ حرارتی برای تبدیل از مبردهای کاربوآکسید و هیدروفلوروکربن‌ها (CFCs، HCFCs، HFCs، R-۱۱، R-۱۲، R-۱۱۴، ...)، به هیدروکربن‌ها (R-۲۲، R-۱۲۳، ...)، هیدروفلوروکربن‌ها (R-۱۳۴a، R-۱۵۲، ...) و مبردهای طبیعی (مانند هیدروکربن‌ها و آمونیاک) راهی بسیار طولانی پیش رو دارند. این تغییر نه تنها طراحی، بهینه‌سازی و آزمایش مجدد تمامی تجهیزات اصلی جدید را می‌طلبد، بلکه نیازمند ایجاد تغییرات اساسی در بسیاری از دستگاه‌های موجود است. ترکیب این فرایند با هدف توسعه‌ی روش‌های طراحی دقیق‌تر و چرخه‌های با بازده انرژی بیشتر، باعث شده که مقوله‌ی انتقال حرارت در صنعت تبرید به زمینه‌ی تحقیقاتی خوبی تبدیل شود. در قرن حاضر تحقیقات زیادی بر روی HFCها انجام گرفته و با در حال انجام است زیرا HCFCها نیز در حال کنارگذاشتن هستند. به همین جهت در این بررسی از مبرد R-۱۳۴a به‌عنوان سیال عامل استفاده شده است که کاربردهای زیادی در صنایع برودتی دارد و به‌عنوان جایگزین مبرد R-۱۲ انتخاب شده است.

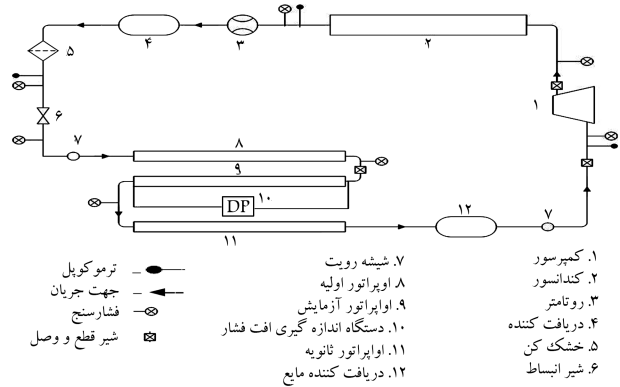
میزان افزایش انتقال حرارت و افت فشار کاملاً به نوع تکنیک و وسیله‌ی به کار رفته برای ایجاد جریان چرخشی وابسته است. به همین لحاظ فرمول‌های مختلفی برای پیش‌بینی انتقال حرارت و افت فشار در جریان چرخشی ارائه شده است. در حالی‌که اطلاعات نسبتاً زیادی در مورد انتقال حرارت و افت فشار جریان چرخشی تک‌فاز وجود دارد^[۱-۳]، فعالیت‌های معدودی برای انتقال حرارت و افت فشار جریان چرخشی - جوششی اجباری گزارش شده است.^[۴-۵] به همین دلیل، در تحقیق حاضر میزان افزایش افت فشار در جریان چرخشی - جوششی R-۱۳۴a داخل لوله‌ی افقی و با استفاده از نوار پیچیده‌شده بررسی می‌شود.

شرح دستگاه آزمایش

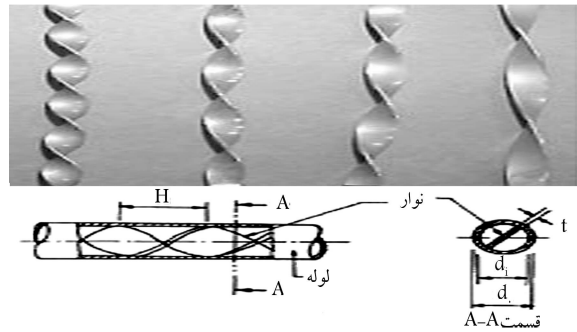
دستگاه مورد آزمایش یک سامانه‌ی تبرید تراکمی بخار مجهز به کلیه‌ی وسایل اندازه‌گیری مورد نیاز است. در شکل ۱ نمای شماتیک این سامانه، شامل: تبخیرکننده‌ی اولیه، تبخیرکننده‌ی آزمایشی، تبخیرکننده‌ی ثانویه، کمپرسور، کندانسور، شیر انبساط و وسایل لازم برای اندازه‌گیری و کنترل نشان داده شده است. تبخیرکننده‌ی آزمایشی شامل یک لوله‌ی مسی به قطر داخلی 7.5 mm و طول 1260 mm است. گرمای مورد نیاز این تبخیرکننده توسط گرم‌کن الکتریکی که

برای تعیین اثر جریان چرخشی بر انتقال حرارت تلاش‌های زیادی انجام گرفته است. چرخش جریان به افزایش انتقال حرارت در سیستم می‌انجامد، و همین امر باعث می‌شود که مبدل حرارتی کوچک‌تر و شاید ارزان‌تر تهیه شود، اما نیاز به افزایش توان پمپاژ مطلبی است که باید مورد توجه قرار گیرد.

زنگ‌نزن با ضخامت $mm\ 0.41$ و پهنا $mm\ 7.3$ (کمی کم‌تر از قطر داخلی لوله) است. «نسبت پیچش» نوار پیچیده شده برای یک چرخش 180° درجه با H نشان داده شده است. این نسبت به صورت نسبت گام نوار به قطر داخلی لوله (Y) تعریف می‌شود. در این مطالعه نوارهای پیچیده شده با چهار نسبت پیچش متفاوت ۶، ۹، ۱۲، ۱۵ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در شکل ۲ نمایشی از چهار نوار پیچیده شده که در آزمایشات مورد استفاده قرار گرفته‌اند نشان داده شده است.



شکل ۱. نمای شماتیک دستگاه آزمایش.



جمع‌آوری و آنالیز داده‌ها

مجموعاً ۱۶۰ آزمایش مختلف با چهار سرعت جرمی متفاوت $kg/m^3 s\ 136$ ، 114 ، 85 و 54 برای لوله‌ی صاف و لوله‌های دارای نوار پیچیده شده صورت گرفت. حدود تغییرات پارامترهای کاری عبارت‌اند از:

سیال میبرد: R-۱۳۴a

سرعت جرمی میبرد: $kg/m^3 s\ 136 - 54$

درجه حرارت جوشش متوسط: $19^\circ C$ تا $3 -$

کیفیت بخار ورودی به تبخیرکننده‌ی آزمایشی: $0.9 - 0.2$

کیفیت بخار خروجی از تبخیرکننده‌ی آزمایشی: $1 - 0.3$

شار حرارتی: $W/m^2\ 5300 - 1800$

عدد رینولدز مایع: $1250 - 3500$

عدد رینولدز بخار: $96000 - 41000$

نسبت پیچش $Y = \left(\frac{H}{d_i}\right) = 15 - 6$

برای محاسبه‌ی درجه حرارت اشباع، آنتالپی‌های اشباع، و سوپر‌هیت R-۱۳۴a، و نیز سایر خواص از جمله گران‌روی از اطلاعات موجود استفاده شده است. [۷۶] با نوشتن رابطه‌ی آنتالپی ثابت دوسر شیرسوزنی کیفیت بخار ورودی به تبخیرکننده‌ی اولیه محاسبه می‌شود؛ همچنین برای محاسبه‌ی کیفیت بخار در ورودی و خروجی تبخیرکننده‌ی آزمایشی از موازنه‌ی حرارتی استفاده شده است. کیفیت بخار متوسط نیز به صورت میانگین کیفیت بخار ورودی و خروجی از تبخیرکننده‌ی آزمایشی محاسبه می‌شود.

افت فشار لوله‌ی صاف

افت فشار کل جریان متشکل از سه عبارت افت فشار اصطکاکی (ΔP_{fri})، افت فشار در اثر تغییر ممنتوم (ΔP_{mom}) و افت فشار استاتیکی (ΔP_{sta}) است و طبق معادله‌ی ۲ عبارت است از:

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

چون در لوله‌ی افقی تغییر ارتفاع وجود ندارد، $\Delta P_{sta} = 0$ و در نتیجه معادله‌ی ۲ به معادله‌ی ۳ تبدیل خواهد شد.

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

افت فشار ناشی از سرعت در لوله به‌وسیله‌ی معادله‌ی ۴ محاسبه می‌شود.

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

به‌طور یکنواخت دور لوله‌ی مسی پیچیده شده (شار ثابت) تأمین می‌شود. مقدار توان مطلوب گرم‌کن الکتریکی توسط یک دیمر صنعتی $2 kW$ تنظیم می‌شود. به دلیل محدود بودن طول لوله‌ی مورد آزمایش، دامنه‌ی کمی از تغییرات کیفیت بخار در تبخیرکننده‌ی آزمایشی قابل حصول است. بنابراین به منظور پوشش دادن کل دامنه‌ی جوشش، سیستم به‌گونه‌ی طراحی شده که کیفیت‌های متفاوت بخار، در ورود به تبخیرکننده‌ی آزمایشی قابل دست‌یابی باشد. این کار با نصب یک تبخیرکننده‌ی اولیه پیش از تبخیرکننده‌ی آزمایشی محقق شده و با تغییر ولتاژ ورودی به گرم‌کن الکتریکی بر روی تبخیرکننده‌ی اولیه می‌توان کیفیت بخار را در ورود به تبخیرکننده‌ی آزمایشی تنظیم کرد. تبخیرکننده‌ی اولیه یک لوله‌ی مسی با قطر داخلی $10 mm$ و طول $1200 mm$ است، که گرمای آن توسط یک دیمر صنعتی $3 kW$ تنظیم می‌شود. برای گرم‌کردن ویژه‌ی میبرد و جلوگیری از ورود مایع به کمپرسور از یک تبخیرکننده‌ی ثانویه و یک جمع‌کننده‌ی مایع استفاده شده است.

برای جلوگیری از اتلاف حرارت المنت‌ها به محیط، مجموعه‌ی هر تبخیرکننده و المنت مربوطه به‌طور کامل عایق شده است. با این وجود مقدار کمی از حرارت المنت‌ها به محیط منتقل می‌شود که این مقدار (η) در محاسبات تأثیر داده شده است:

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

میزان η در کل آزمایشات بین 0.79 تا 0.95 است.

ترموکوپل‌های استفاده شده از نوع سری T بوده که با دقت $0.1^\circ C$ درجه سانتی‌گراد کالیبره شده‌اند، فشارسنج‌ها نیز با دقت $2 kPa$ کالیبره شده‌اند. برای اندازه‌گیری افت فشار جریان عبوری از تبخیرکننده‌ی آزمایشی، از یک دستگاه اندازه‌گیری اختلاف فشار که قادر به اندازه‌گیری اختلاف فشار تا $3 bar$ بوده و برای صفر تا $150 kPa$ توسط شرکت سازنده کالیبره شده است استفاده شد. نوار پیچیده شده از جنس فولاد

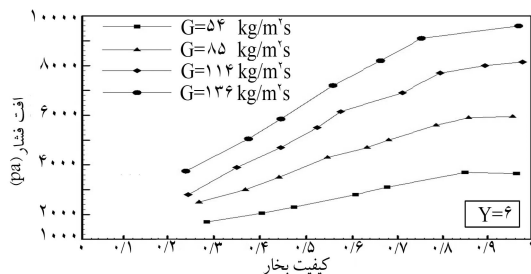
در شکل ۳ مقایسه‌ی بین افت فشار اصطکاکی حاصل از آزمایش با مقادیر پیش‌بینی شده به‌وسیله‌ی معادله‌ی ۶ نشان داده شده است. این رابطه داده‌های آزمایشگاهی را با دقت $\pm 15\%$ پیش‌بینی می‌کند.

افت فشار جریان چرخشی

در شکل ۴ نحوه‌ی تغییرات میزان افت فشار با کیفیت بخار در سرعت‌های جرمی مختلف برای نوار با نسبت پیچش ۶ نمایش داده شده است. شکل ۴ عموماً نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که اگر سایر شرایط بدون تغییر باقی بماند، افت فشار با افزایش سرعت جرمی زیاد می‌شود. این امر را می‌توان با توجه به رابطه‌ی مستقیم افزایش سرعت جرمی با افزایش تنش برشی، و افزایش افت فشار ناشی از آن توجیه کرد. از سوی دیگر، با توجه به شکل ۴، می‌توان افزایش افت فشار در مقابل افزایش کیفیت بخار را ملاحظه کرد. علت این امر را نیز می‌توان بدین‌گونه تشریح کرد که با افزایش کیفیت بخار، مقدار چگالی کاهش یافته و طبق رابطه‌ی بقای جرم باعث افزایش سرعت جریان و در نتیجه افزایش تنش برشی بین سیال و دیواره‌ی لوله می‌شود. از طرفی با افزایش کیفیت بخار، سرعت نسبی بین فاز مایع و بخار نیز زیاد می‌شود و همین امر منجر به افزایش نیروی برشی در سطح مشترک دو فاز شده و در نتیجه باعث افزایش مضاعف میزان افت فشار می‌شود.

در شکل‌های ۵ تا ۸ نحوه‌ی تغییرات افت فشار با کیفیت بخار برای لوله‌ی صاف و لوله‌های مجهز به نوارهایی با نسبت پیچش‌های مختلف در سرعت‌های جرمی متفاوت نشان داده شده است. از بررسی این شکل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که به‌طور کلی نصب نوار پیچیده شده در داخل لوله‌های افقی، افت فشار نسبت به لوله‌ی صاف را تا حد زیادی افزایش می‌دهد. همچنین نتیجه می‌گیریم هنگامی که نوار پیچیده شده داخل تبخیرکننده قرار می‌گیرد، افت فشار نسبت به لوله‌ی صاف مشابه افزایش می‌یابد. این میزان افزایش در نسبت‌های پیچش کوچک‌تر، بیشتر است.

از شکل‌های ۵ تا ۸ که هر کدام برای سرعت جرمی خاصی رسم شده، می‌توان دریافت که با کاهش نسبت پیچش افت فشار افزایش می‌یابد. می‌توان علت را چنین بیان کرد که هرچه نسبت پیچش کوچک‌تر باشد میزان آشفتگی و چرخش القاشده در لایه‌ی مایع و هسته‌ی بخار افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث افزایش افت فشار می‌شود. یکی از دلایل استفاده از نوار این است که حضور نوار در لوله موجب می‌شود که پدیده‌ی خشک‌شدگی جزئی به تعویق افتاده و در نتیجه بر میزان انتقال حرارت افزوده شود که این مسئله افزایش افت فشار را نیز به دنبال خواهد داشت. این امر به خوبی در شکل‌های ۵ تا ۸ مشخص است. در سرعت‌های جرمی پایین به علت سرعت کم سیال مقدار نیروی گرانشی از نیروی گریز از مرکز بیشتر است و این امر اتفاق نمی‌افتد،



شکل ۴. تغییرات افت فشار با کیفیت بخار برای لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده شده با نسبت پیچش ۶ و در سرعت‌های جرمی مختلف.

که در آن α ضریب وید است و با استفاده از فرمول ارائه شده توسط استینر^[۸] محاسبه می‌شود:

$$\alpha = \frac{x}{\rho_g} \left[(1 + 0.172(1-x)) \left(\frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_f} \right) + \frac{1.18(1-x) [g\sigma(\rho_f - \rho_g)]^{0.25}}{G_t^2 \rho_f^{0.5}} \right]^{-1} \quad (5)$$

افت فشار کل در تبخیرکننده‌ی آزمایشی (ΔP_{tot}) با دستگاه افت فشار اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از خواص جریان، افت فشار ناشی از تغییر ممتوم با استفاده از رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود. بنابراین افت فشار اصطکاکی طبق معادله‌ی ۳ از کم کردن دو مقدار مذکور به دست می‌آید. داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده (ΔP_{fpi}) با هفت روش محاسبه‌ی افت فشار اصطکاکی جریان دو فاز جوششی^[۹-۱۵] مقایسه شد و مشاهده شد که این داده‌ها بهترین تطابق را با رابطه‌ی مولر^[۱۳] دارند. رابطه‌ی مولر داده‌های آزمایشگاهی لوله‌ی صاف را در محدوده 35% تا 10% پیش‌بینی می‌کند. بنابراین با توجه به داده‌های آزمایشگاهی رابطه‌ی مولر برای محاسبه‌ی افت فشار جریان جوششی مبرد R-134a در لوله‌ی صاف به صورت رابطه‌ی ۶ اصلاح شد.

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta z} \right)_{fpi} = bx^{0.75} + G(1-x)^{0.75} \quad (6)$$

که در آن:

$$G = a + 2(b-a)x \quad (7)$$

x کیفیت بخار متوسط در تبخیرکننده‌ی آزمایشی است، و ضرایب a و b به ترتیب عبارت‌اند از گرادینان فشار اصطکاکی برای زمانی که کل جریان به صورت مایع $\left(\frac{dp}{dz} \right)_f$ یا به صورت گاز $\left(\frac{dp}{dz} \right)_g$ باشد.

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_g = \frac{2f_g G_{tot}^2}{d_i \rho_g} \quad (8)$$

$$\left(\frac{dp}{dz} \right)_f = \frac{2f_f G_{tot}^2}{d_i \rho_f}$$

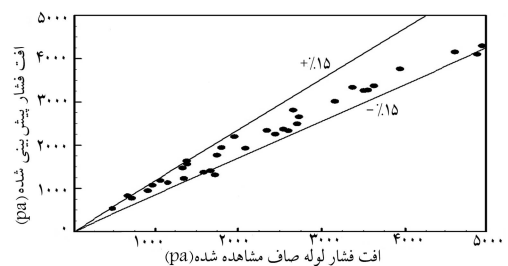
ضریب اصطکاک مایع و بخار (f_g, f_f) و همچنین عدد رینولدز آنها مطابق رابطه‌های ۹ و ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$f_g = 0.079 Re_g^{-0.25} \quad (9)$$

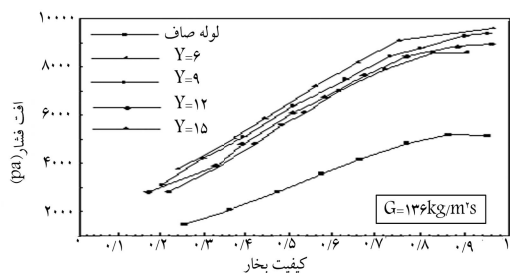
$$f_f = 0.079 Re_f^{-0.25}$$

$$Re_g = \frac{G_{tot} d_i}{\mu_g} \quad (10)$$

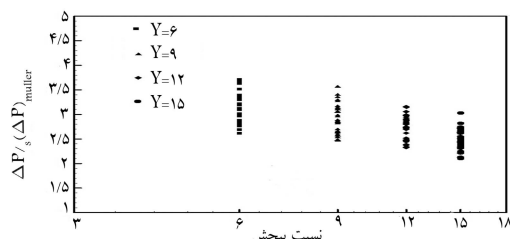
$$Re_f = \frac{G_{tot} d_i}{\mu_f}$$



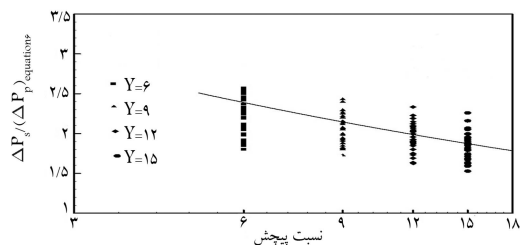
شکل ۳. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی لوله‌ی صاف با نتایج به دست آمده، با استفاده از معادله‌ی ۶.



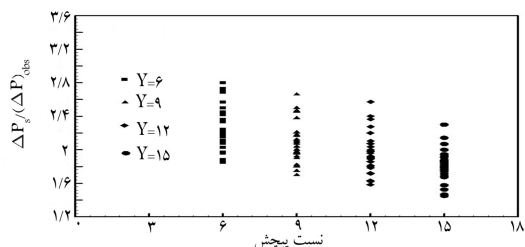
شکل ۸. مقایسه‌ی افت فشار لوله‌های مجهز به نوار پیچیده‌شده و لوله‌ی صاف در سرعت جرمی $136 \text{ kg/m}^2\text{s}$.



شکل ۹. تغییرات نسبت افت فشار لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده‌شده به افت فشار لوله‌ی صاف حاصل از رابطه‌ی مولر با نسبت پیچش.



شکل ۱۰. تغییرات نسبت افت فشار لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده‌شده به افت فشار لوله‌ی صاف حاصل از معادله‌ی ۶ با نسبت پیچش.



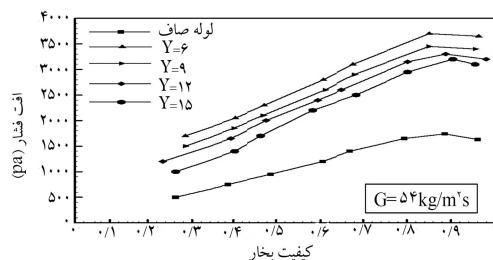
شکل ۱۱. تغییرات نسبت افت فشار لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده‌شده به افت فشار لوله‌ی صاف حاصل از آزمایش با نسبت پیچش.

$54 \text{ kg/m}^2\text{s}$ و نوار با نسبت پیچش $Y = 6$ روی می‌دهد. در این حالت افت فشار جوششی تا 18% افزایش می‌یابد. علت این است که نوار با نسبت پیچش $Y = 6$ باعث شده که الگوی جریان در سرعت جرمی 54 به حلقوی تغییر کرده و در نتیجه نسبت به لوله‌ی صاف که در آن الگوی جریان جدا شده موجی است، افزایش زیادی پیدا کند. بهترین حالت نیز در کیفیت بخار بالای سرعت جرمی $136 \text{ kg/m}^2\text{s}$ و نوار با نسبت پیچش $Y = 15$ روی می‌دهد که افزایش افت فشار جوششی تا 40% نسبت به لوله‌ی صاف را به همراه دارد (شکل ۱۱). علت این امر نیز آن است که در سرعت جرمی 136 الگوی جریان در لوله‌ی صاف حلقوی

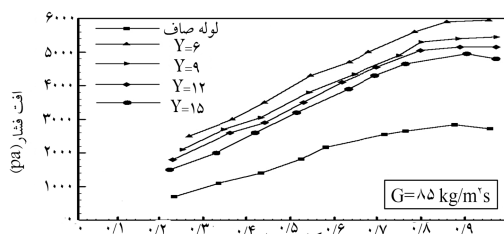
ولی در سرعت‌های جرمی بالا حضور نوار باعث می‌شود که خشک‌شدگی جزئی به تعویق افتاده و در نتیجه میزان انتقال حرارت و افت فشار در لوله افزایش یابد. در شکل ۹ نحوه‌ی تغییرات نسبت افت فشار کل لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده‌شده به افت فشار کل لوله‌ی صاف به دست آمده از رابطه‌ی مولر، $\left[\frac{(\Delta P_s)_{obs}}{(\Delta P_p)_{muller}} \right]$ ، با نسبت پیچش نشان داده شده است. در واقع افت فشار کل لوله‌ی صاف (ΔP) مجموع افت فشار اصطکاکی محاسبه‌شده به وسیله‌ی معادله‌ی مولر و افت فشار ممتوم حاصل از معادله‌ی ۴ است. در شکل ۱۰ نحوه‌ی تغییرات نسبت افت فشار کل لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده‌شده به افت فشار کل لوله‌ی صاف حاصل از معادله‌ی ۶:

$$\left[\frac{(\Delta P_s)_{obs}}{(\Delta P_p)_{equation,6}} \right]$$

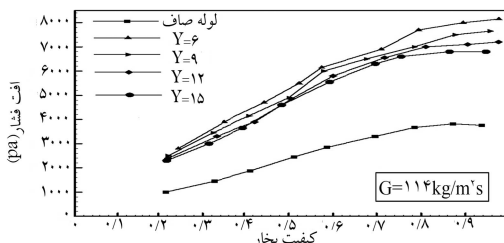
با نسبت پیچش نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۱ نحوه‌ی تغییرات نسبت افت فشار اصطکاکی نوار پیچیده‌شده به افت فشار لوله‌ی صاف حاصل از آزمایش با نسبت پیچش نشان داده شده است. چنان که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، این نسبت افت فشار برای نسبت پیچش $Y = 6$ از 1.9 تا 2.8 تغییر می‌کند در حالی که برای نسبت پیچش $Y = 15$ تغییرات آن از 1.4 تا 2.3 خواهد بود. با توجه به شکل‌های ۵ و ۱۱ بدترین حالت در کیفیت بخار پائین سرعت جرمی



شکل ۵. مقایسه‌ی افت فشار لوله‌های مجهز به نوار پیچیده‌شده و لوله‌ی صاف در سرعت جرمی $54 \text{ kg/m}^2\text{s}$.



شکل ۶. مقایسه‌ی افت فشار لوله‌های مجهز به نوار پیچیده‌شده و لوله‌ی صاف در سرعت جرمی $85 \text{ kg/m}^2\text{s}$.



شکل ۷. مقایسه‌ی افت فشار لوله‌های مجهز به نوار پیچیده‌شده و لوله‌ی صاف در سرعت جرمی $114 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

پیش بینی می‌کند. شکل ۱۳ نیز نشانگر مقایسه‌ی داده‌ها با رابطه آگروال برای R-۱۲ است. در این شکل دیده می‌شود که رابطه‌ی اخیر داده‌های آزمایشگاهی را بین ۵۵٪ تا ۲۵٪ برآورد می‌کند.

روابط پیشنهادی برای جریان داخل لوله‌های مجهز به نوار

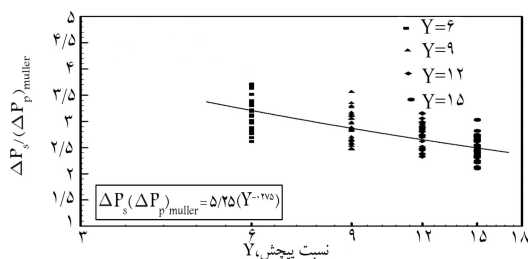
پیچیده شده

در این تحقیق با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و براساس رابطه‌ی ۱۱، برای به دست آوردن افت فشار لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده شده روابطی ارائه می‌شود: محاسبه‌ی افت فشار لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده شده بر اساس افت فشار لوله‌ی صاف به دست آمده از رابطه‌ی مولر^[۱۳]:

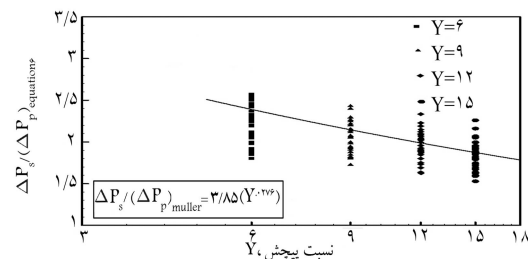
$$\frac{\Delta P_s}{(\Delta P_P)_{muller}} = 5,25(Y^{-0,175}) \quad (12)$$

محاسبه‌ی افت فشار لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده شده براساس افت فشار لوله‌ی صاف به دست آمده از رابطه‌ی ۶:

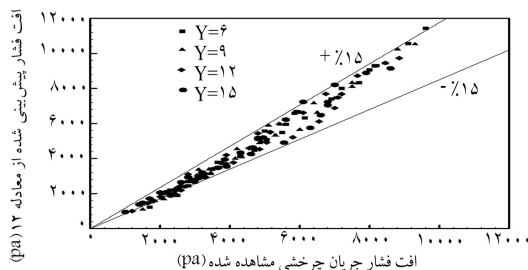
$$\frac{\Delta P_s}{(\Delta P_P)_{equation\ 6}} = 3,85(Y^{-0,266}) \quad (13)$$



شکل ۱۴. نمایش معادله‌ی ۱۲.



شکل ۱۵. نمایش معادله‌ی ۱۳.



شکل ۱۶. مقایسه‌ی افت فشار محاسبه شده از رابطه‌ی ۱۲ و مقادیر آزمایشگاهی برای لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده شده.

است و ورود نوار با نسبت پیچش $Y = 15$ تغییر در الگوی جریان و در نتیجه تغییرات زیادی در میزان افت فشار ایجاد نمی‌کند. به‌طور متوسط، میزان افت فشار ۱۰۰٪ نسبت به لوله‌ی صاف افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود این نسبت افت فشار در نسبت پیچش‌های مختلف متفاوت است.

مقایسه‌ی داده‌ها با روابط موجود برای لوله‌های مجهز به

نوار پیچیده شده

بلات و آگروال فرمول‌هایی برای محاسبه‌ی افت فشار جریان چرخشی - جوشی R-۱۲ و R-۱۱ ارائه کردند:^[۵۳]

$$\left(\frac{\Delta P_s}{\Delta P_P} \right) = \frac{C}{Y^n} \quad (11)$$

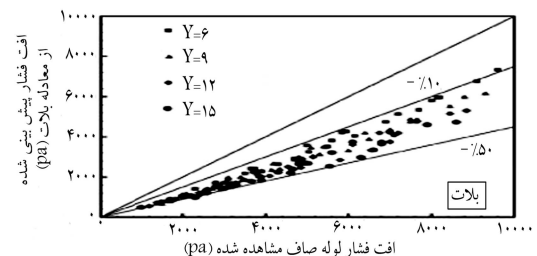
که در آن ΔP_P افت فشار کل لوله‌ی صاف و ΔP_s افت فشار کل لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده شده است. ثابت‌های c و n نیز با توجه به داده‌های آزمایشگاهی عبارت‌اند از:

$$\text{فرمول بلات: } n = 0,6 \text{ و } c = 7,36$$

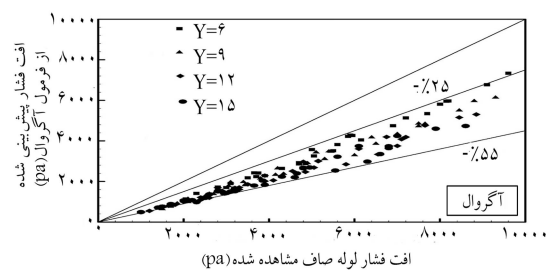
$$\text{فرمول آگروال: } n = 0,509 \text{ و } c = 5,12$$

در این بخش افت فشار محاسبه شده از داده‌های آزمایشگاهی مطالعه‌ی حاضر، با افت فشار پیش‌بینی شده توسط روابط مذکور مقایسه شده است. مقدار افت فشار کل لوله‌ی صاف استفاده شده در این روابط از جمع افت فشار اصطکاکی رابطه‌ی مولر و افت فشار ممتوم رابطه‌ی استینر به دست آمده است. مقایسه‌ی بین داده‌های آزمایشگاهی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط روابط مذکور در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ انجام شده است.

شکل ۱۲ نشانگر مقایسه‌ی داده‌ها با رابطه‌ی بلات برای R-۱۱ است. از این شکل دیده می‌شود که رابطه‌ی اخیر داده‌های آزمایشگاهی را بین ۵۰٪ تا ۱۰٪



شکل ۱۲. مقایسه‌ی افت فشار آزمایشگاهی لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده شده با مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ی بلات.^[۴]



شکل ۱۳. مقایسه‌ی افت فشار آزمایشگاهی لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده شده با مقادیر پیش‌بینی شده توسط رابطه‌ی آگروال.^[۱۵]

شده در محدوده $\pm 15\%$ مقادیر تجربی قرار دارند. بنابراین روابط فوق تطابق خوبی با مقادیر آزمایشگاهی دارند.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه عبارت‌اند از:

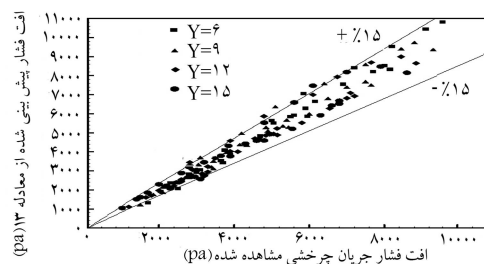
۱. افت فشار جریان چرخشی تابعی از هندسه‌ی لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده شده است و با کاهش نسبت پیش‌افزایش می‌یابد.
۲. وارد کردن نوار پیچیده‌شده به داخل لوله‌ی افقی به افزایش افت فشار می‌انجامد. در بدترین حالت افت فشار جوششی تا 18% و به‌طور متوسط تا 10% نسبت به لوله‌ی صاف مشابه افزایش می‌یابد.
۳. روابطی برای محاسبه‌ی افت فشار جریان جوششی میرد R-134a در داخل لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده‌شده ارائه شد: براساس رابطه‌ی مولز:

$$\left(\frac{\Delta P_s}{\Delta P_P}\right)_{muller} = 5,25(Y^{-0,275})$$

براساس معادله‌ی ۶:

$$\left(\frac{\Delta P_s}{\Delta P_P}\right)_{equation (6)} = 3,85(Y^{-0,266})$$

۴. افت فشار جریان جوششی میرد R-134a در لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده‌شده با دقت $\pm 15\%$ توسط روابط فوق پیش‌بینی می‌شود.



شکل ۱۷. مقایسه‌ی افت فشار محاسبه شده از رابطه‌ی ۱۳ و مقادیر آزمایشگاهی برای لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده‌شده.

فرم کلی معادلات ۱۲ و ۱۳ در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ رسم شده‌اند. برای محاسبه‌ی افت فشار کل لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده‌شده، ΔP_s کافی است افت فشار کل لوله‌ی صاف، ΔP_P را با استفاده از رابطه‌ی مولز یا رابطه‌ی ۶، و معادله‌ی افت فشار ممنتوم ۴ به دست آورده و سپس با استفاده از یکی از دو رابطه‌ی ۱۲ یا ۱۳، افت فشار کل لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده شده را به دست آوریم.

انحراف میانگین و انحراف استاندارد افت فشار لوله‌ی مجهز به نوار پیچیده‌شده حاصل از روابط پیشنهادی فوق از مقادیر تجربی به ترتیب برای رابطه‌ی ۱۲ عبارت از $2,3\%$ و $8,1\%$ و برای رابطه‌ی ۱۳ عبارت از $2,1\%$ و $9,7\%$ است. شکل‌های ۱۶ و ۱۷ مقایسه‌ی بین افت فشار محاسبه شده از روابط پیشنهادی و مقادیر اندازه‌گیری شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود، بیشتر مقادیر تخمین زده

منابع

1. Manglik, R.M. and Bergles, A.E. "Heat transfer and pressure drop correlations for twisted tape inserts in isothermal tubes: part 1 - laminar flows." *J. Heat Trans., T. ASME*, **115**, pp. 881-889, (1993).
2. Manglik, R.M. and Bergles, A.E. "Heat transfer and pressure drop correlations for twisted tape inserts in isothermal tubes: part II - transition and turbulent flows." *J. Heat Trans., T. ASME*, **115**, pp. 890-896, (1993).
3. Sarma, P.K.; Kishorea, V.D. and Subrahmanyam, T. "A combined approach to predict friction coefficients and convective heat transfer characteristics in a tube with twisted tape inserts for a wide range of Re and Pr." *Int. J. Therm. Sci.*, **44**, pp. 393-398, (2005).
4. Blatt, T.A. and Adt. R. "The effects of twisted tape swirl generators on the heat transfer rate and pressure drop of boiling freon 11 and water." *ASME*, **63**, pp. 63-71, (1963).
5. Agrawal, K.N. and Varma, H.K. "Pressure drop during forced convection boiling of R-12 under swirl flow." *ASME*, **104**, pp.758-762, (1982).
6. Sonntag, R.; Borgnakke, C. and Van Wylen, G. "Fundamentals of thermodynamics." John wiley and sons, New York, (1997).
7. Collier, J. and Thome, J. "Convective boiling and condensation." Oxford, Oxford University Press (1994).
8. Steiner, D. "VDI-Wärmeatlas (VDI Heat Atlas), verein deutscher ingenieure." VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GCV), Düsseldorf, Chapter Hbb, (1993).
9. Friedel, L. "Improved friction pressure drop correlations for horizontal and vertical two-phase pipe flow." European Two-Phase Flow Group Meeting, Paper E2, June, Ispra, Italy, (1979).
10. Lockhart, R.W. and Martinelli, R.C. "Proposed correlation of data for isothermal two-phase two-component flow in pipes." *Chem. Eng. Progr.*, **45**, pp. 39-45, (1949).
11. Chisholm, D. "Pressure gradients due to friction during the flow of evaporating two-phase mixtures in smooth tubes and channels." *Int. J. Heat Mass Transfer*, **16**, pp. 347-355, (1973).
12. 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, (1979).
13. Müller-Steinhagen, H. and Heck, K. "A simple friction pressure drop correlation for two-phase flow in pipes." *Chem. Eng. Process.* **20**, pp. 297-308, (1986).
14. Bankoff, S.G. "A variable density single-fluid model for two-phase flow with particular reference to steam-water." *J. Heat Transfer*, **2**, Series B, pp. 265-272, (1960).
15. Chawla, J.M. "Laminar condensation inside horizontal and inclined tubes." *ASHRAE J.*, **4**, pp. 52-60, (1967).