

روابط تجربی برای محاسبه افت فشار در اواپراتور با لوله های پخ شده افقی

میثم نصر^۱، محمد علی اخوان بهابادی^۲

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران؛ meisam.nasr@yahoo.com
^۲دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده های فنی، دانشگاه تهران؛ akhavan@ut.ac.ir

چکیده

در این تحقیق به بررسی افت فشار جریان جوشی اجباری مبرد R-134a درون لوله های افقی صاف پخ پرداخته می شود. برای انجام این کار، لوله های گرد مسی با قطر خارجی ۹/۵۲ میلی متر به چهار میزان متفاوت، با ارتفاع داخلی ۶/۶، ۵/۵، ۳/۸ و ۲/۸ میلی متر پخ می شوند. دستگاه مورد استفاده در این بررسی، یک سیستم تبرید تراکمی بخار مجهز به کلیه وسایل اندازه گیری مورد نیاز می باشد. این سیستم شامل سه اواپراتور گرم شونده با هیتر الکتریکی می باشد که به ترتیب اواپراتور اولیه، تست اواپراتور و اواپراتور ثانویه نامیده می شوند.

نتایج تجربی حاصله نشان می دهد که پخ کردن مقطع لوله، باعث افزایش افت فشار نسبت به لوله گرد مشابه می شود. در بدترین حالت افت فشار جریان جوشی درون لوله پخ افقی تا ۶۰٪ نسبت به لوله گرد مشابه افزایش می یابد. داده های آزمایشگاهی با روابط موجود برای پیش بینی افت فشار در لوله های صاف تخت مقایسه می گردد. همچنین روابطی برای محاسبه افت فشار جریان جوشی سیال در لوله های تخت ارائه می شود. این رابطه داده های آزمایشگاهی مطالعه حاضر را با دقت $\pm 20\%$ پیش بینی می کند.

کلمات کلیدی: افت فشار، R-134a، لوله پخ، اواپراتور

مقدمه

داشتن یک اواپراتور با عملکرد مطلوب به معنی ماکزیمم انتقال حرارت در افت فشار بهینه می باشد. این امر ضرورت اصلی در طراحی یک اواپراتور و به طور کلی تبادلهای حرارتی است. با توجه به محدودیت منابع انرژی و نیاز به صرفه جویی در مصرف آن و با عنایت به کاربرد فراوان اواپراتورها در صنایع تهویه مطبوع، تبرید و سردخانه و ...، نقش عملکرد مطلوب یک اواپراتور در یک سیستم، از ضرورت های غیر قابل صرف نظر در طراحی آن می باشد.

در حقیقت فرآیند جوشش درون لوله ای در تجهیزات گوناگونی نظیر سیستم های تبرید و تهویه مطبوع رخ داده و طراحی بهینه این مبدل های حرارتی اهمیت زیادی در صرفه جویی انرژی دارد. بدین منظور روشهای مختلفی جهت افزایش انتقال حرارت پیشنهاد شده است. استفاده از این روش ها غالباً منجر به افزایش افت فشار در مبدل حرارتی می شود. پیش بینی افت فشار جریان دو فاز در اواپراتورها، کندانسورها و خطوط انتقال جریان دو فاز به منظور طراحی و بهینه سازی مبدل های حرارتی، سیستم های تبرید، تهویه مطبوع و پمپ حرارتی از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

افت فشار تخمین زده شده بوسیله روشهای مختلف مورد استفاده هنوز گاه تا ۱۰٪ با هم اختلاف دارند. با در نظر گرفتن این موضوع، اگر یک اواپراتور اشتباهاً با افت فشار دو فازی نصف مقدار واقعی خود طراحی شود، در آنصورت دمای اشباع و فشار در اواپراتور، بیش از حد انتظار کاهش می یابد که این امر باعث کاهش بازدهی سیستم می گردد. از طرف دیگر اگر افت فشار پیش بینی شده دو برابر مقدار واقعی باشد، آنگاه از تعداد لوله کمتری با طول بیشتری برای بدست آوردن یک واحد خیلی کوچکتر می تواند استفاده شده باشد. بنابراین، پیش بینی دقیق افت فشار جریان دو فازی یکی از اهداف کلیدی در بهینه سازی این سیستم ها می باشد.

در قرن حاضر تحقیقات زیادی بر روی HFC ها انجام گرفته و یا در حال انجام است زیرا که HCFC ها نیز در حال کنار گذاشته شدن می باشند. به همین جهت در این بررسی از مبرد R-134a به عنوان سیال عامل استفاده شده است که دارای کاربرد های زیادی در صنایع برودتی می باشد و بعنوان جایگزین مبرد R-12 انتخاب گردیده است.

یکی از روشهای افزایش انتقال حرارت، پخ کردن مقطع لوله می باشد. ویلسون و همکارانش [۱] به بررسی افت فشار در لوله های افقی با سطح مقطع پخ شده پرداختند. لوله مورد استفاده در مطالعه آنها لوله های مسی با قطر داخلی ۸/۹۱ میلی متر بوده که تا ارتفاع های ۵/۷۴، ۴/۱۵، ۲/۵۷ و ۰/۹۷۴ میلی متر پخ شده اند. در مطالعه آنها مبردهای R134-a و R410-a در محدوده دبی $400-75 \text{ kg/m}^2\text{s}$ و کیفیت بخار ۱۰ تا ۸۰ درصد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعه آنها بیانگر این است که داده های بدست آمده برای لوله های با مقطع پخ شده با در نظر گرفتن قطر هیدرولیکی با ۴۰ درصد خطا توسط روابط موجود در لوله گرد ارائه شده توسط جونگ و رادماچر [۲] و سوزا و همکارانش [۳] قابل پیش بینی می باشد. همچنین نتایج آنها، افزایش افت فشار ناشی از پخ شدن مقطع با ثابت ماندن سرعت جرمی و کیفیت بخار را نشان می دهد.

تام و مورنو [۴] افت فشار در جریان دو فازی مبرد های R-22 و R-410 در لوله های صاف با قطرهای ۱۳/۸ و ۸ میلی متر که هر کدام تا ارتفاع های داخلی ۲ و ۳ میلی متر پخ شده بودند را در محدوده سرعت جرمی $50-150 \text{ kg/m}^2\text{s}$ مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه آنها بیانگر این است که افزایش افت فشار ناشی از پخ شدن مقطع با ثابت ماندن سرعت جرمی می تواند تا ۷ برابر نسبت به لوله گرد افزایش یابد. در این مطالعه رابطه گروندر [۵] برای پیش بینی داده های آزمایشگاهی اصلاح گردید.

شرح دستگاه آزمایش

دستگاه مورد آزمایش یک سیستم تبرید تراکمی بخار مجهز به کلیه وسایل اندازه‌گیری مورد نیاز می‌باشد. در شکل ۱ نمای شماتیک دستگاه آزمایشگاهی نشان داده شده است. که شامل: اواپراتور اولیه، تست اواپراتور، اواپراتور ثانویه، کمپرسور، کندانسور، شیر انبساط و وسایل لازم برای اندازه‌گیری و کنترل می‌باشد.

اواپراتور مورد آزمایش (تست اواپراتور) شامل یک لوله مسی به قطر خارجی ۹/۵۲ mm و طول ۱۲۰۰ mm می‌باشد. گرمای اواپراتور توسط یک هیتر الکتریکی که به طور یکنواخت دور آن پیچیده شده (شار ثابت) تامین می‌گردد. مقدار توان مطلوب هیتر 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 تست اواپراتور قابل حصول می‌باشد. بنابراین به منظور پوشش دادن کل دامنه جوشش، سیستم به‌گونه‌ای طراحی شده که کیفیت‌های متفاوت بخار، در ورود به تست اواپراتور قابل دستیابی باشد، این کار با نصب یک اواپراتور اولیه پیش از تست اواپراتور محقق شده و با تغییر ولتاژ ورودی به هیتر الکتریکی بر روی اواپراتور اولیه می‌توان کیفیت بخار را در ورود به تست اواپراتور تنظیم کرد. برای سوپر هیت کردن مبرد و جلوگیری از ورود مایع به کمپرسور از یک اواپراتور ثانویه و یک جمع‌کننده مایع استفاده شده است.

برای جلوگیری از اتلاف حرارت المنت‌ها به محیط، مجموعه هر اواپراتور و المنت مربوطه به طور کامل عایق شده است با این وجود مقدار کمی از حرارت المنت‌ها به محیط انتقال می‌یابد که این مقدار از رابطه (۱) محاسبه گردیده و در محاسبات تاثیر داده شده است.

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

برای اندازه‌گیری افت فشار جریان مبرد R134-a عبوری از داخل تست اواپراتور، از یک دستگاه اندازه‌گیری اختلاف فشار که قادر به اندازه‌گیری اختلاف فشار تا ۳ bar بوده و برای ۰ تا ۱۵۰ kPa توسط شرکت سازنده کالیبره گردیده است، استفاده شد.

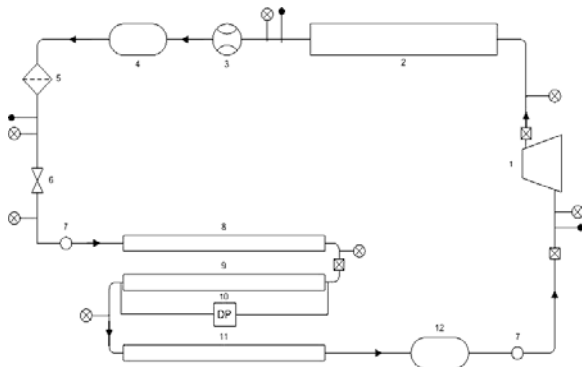
پارامتر h که فاصله عمودی دیواره بالایی و پایینی لوله را نشان می‌دهد، بیانگر میزان پخ شدگی لوله می‌باشد. لوله‌های پخ شده با چهار میزان پخ شدگی متفاوت ۶/۶، ۵/۵، ۳/۸ و ۲/۸ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در شکل ۲ نمایی از چهار لوله پخ شده که در آزمایشات مورد استفاده قرار گرفته‌اند، نشان داده شده است.

جمع آوری و آنالیز داده‌ها

مجموعاً ۲۴۰ آزمایش مختلف با سه سرعت جرمی متفاوت ۸۵، ۱۰۷ و ۵۴ kg/m²s برای لوله‌های گرد و پخ صورت گرفت.

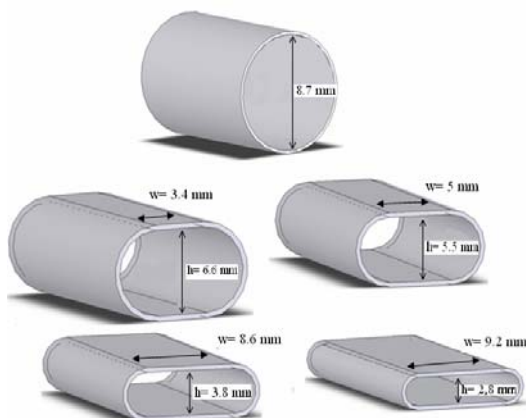
حدود تغییرات پارامترهای کاری بصورت زیر می‌باشند:

سیال مبرد	R-134a
سرعت جرمی مبرد	۱۰۷ - ۲۴ kg/m ² s
کیفیت بخار ورودی به تست اواپراتور	۰/۲ - ۰/۹
کیفیت بخار خروجی از تست اواپراتور	۰/۳ - ۱
عدد رینولدز مایع	۳۰۰ - ۱۰۰۰
عدد رینولدز گاز	۱۰۵۰۰ - ۴۴۰۰۰
میزان پخ شدگی h	۶/۶ - ۲/۸ mm



۱- کمپرسور	۷- شیشه رویت
۲- کندانسور	۸- اواپراتور اولیه
۳- دبی سنچ مبرد	۹- تست اواپراتور
۴- دریافت کننده مایع	۱۰- دستگاه اندازه‌گیری افت فشار
۵- فیلتر درایر	۱۱- اواپراتور ثانویه
۶- شیر انبساط	۱۲- جمع کننده مایع
● - ترموکوپل	⊗ - شیر قطع و وصل
← - جهت جریان	⊗ - فشارسنج

شکل ۱: نمای شماتیک دستگاه آزمایش



شکل ۲: نمای شماتیک لوله‌های پخ شده

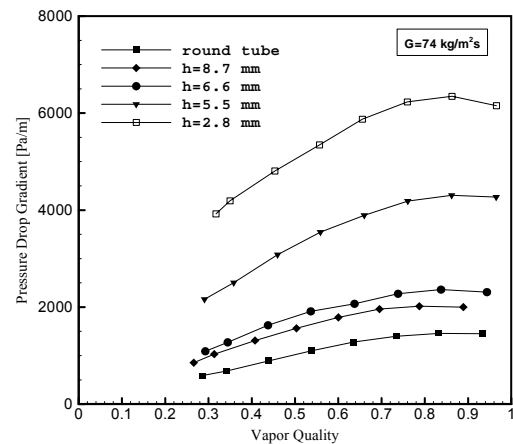
برای محاسبه درجه حرارت اشباع و آنتالپی‌های اشباع و سوپرهیت R-۱۳۴a از مرجع [۶] و سایر خواص از جمله ویسکوزیته

از [۷] استفاده شده است. با نوشتن رابطه آنتالپی ثابت دو سر شیر سوزنی کیفیت بخار ورودی به اواپراتور اولیه محاسبه می شود و همچنین برای محاسبه کیفیت بخار در ورودی و خروجی تست اواپراتور از موازنه حرارتی استفاده شده است. کیفیت بخار متوسط نیز به صورت میانگین کیفیت بخار ورودی و خروجی از تست اواپراتور محاسبه می گردد.

نتایج افت فشار در لوله های گرد و پخ

داده های آزمایشگاهی برای لوله های با مقطع پخ به چهار میزان متفاوت، $h = 2/8, 3/8, 5/5, 6/6$ mm در سه سرعت جرمی متفاوت مبرد $74 \text{ kg/m}^2\text{s}, 85 \text{ kg/m}^2\text{s}, 107 \text{ kg/m}^2\text{s}$ بدست آمد. تأثیر پارامترهای گوناگون از قبیل سرعت جرمی، کیفیت بخار و هندسه لوله بر افت فشار مورد بررسی قرار گرفت.

شکل ۳ تغییرات افت فشار با کیفیت بخار برای لوله های با مقطع پخ شده در سرعت جرمی $74 \text{ kg/m}^2\text{s}$ را نشان می دهد. برای ترسیم این نمودار از افت فشار و کیفیت بخار بعنوان محورهای مختصات و از میزان پخ شدگی لوله بعنوان پارامتر مشخصه استفاده شده است. منحنی لوله گرد نیز جهت مقایسه آورده شده است.



شکل ۳: مقایسه گرادیان افت فشار برای لوله های صاف پخ شده در سرعت جرمی

$$74 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

از شکل ۳ افزایش افت فشار در مقابل افزایش کیفیت بخار در لوله های پخ را می توان ملاحظه نمود. این رفتار شبیه رفتار مربوط به لوله گرد می باشد. علت آن را نیز مشابه لوله گرد می توان بدین گونه تشریح کرد که با افزایش میزان کیفیت بخار، مقدار دانسیته کاهش یافته و طبق رابطه بقای جرم باعث افزایش سرعت جریان و در نتیجه افزایش تنش برشی بین سیال و دیواره لوله می شود. از طرفی با افزایش کیفیت بخار سرعت نسبی بین فاز مایع و گاز نیز زیاد شده که منجر به افزایش نیروی برشی در سطح مشترک آن دو و در نتیجه باعث افزایش میزان افت فشار می گردد.

بیشترین میزان افت فشار در لوله های پخ شده در محدوده کیفیت بخار $x = 0/8$ تا $x = 0/9$ رخ می دهد و سپس میزان آن کاهش می یابد. علت آن می تواند پدیده خشک شدگی جزیی در

سطح فوقانی لوله باشد که باعث می شود جریان از حلقوی به حالت جدا شده موجی تبدیل شود. این پدیده با افزایش میزان پخ شدگی و افزایش سرعت جرمی، بیشتر مشاهده می شود

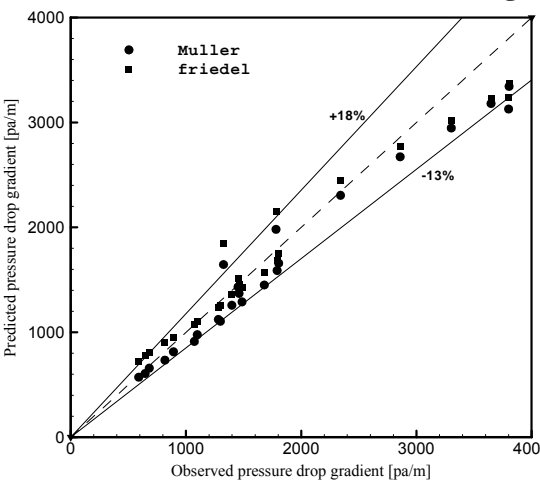
همچنین از شکل ۳ دیده می شود که پخ کردن مقطع، افت فشار بالاتری را در مقایسه با جریان در لوله با مقطع گرد ایجاد می کند. این میزان افزایش افت فشار با افزایش میزان پخ شدگی افزایش می یابد. می توان علت آن را بدین صورت بیان کرد که پخ شدن مقطع، موجب کاهش سطح مقطع و افزایش سرعت سیال شده که خود تنش برشی در لایه مایع و هسته بخار را افزایش داده و در نتیجه افت فشار افزایش می یابد.

از بررسی نتایج بدست آمده در لوله های صاف پخ مشخص می شود که افت فشار در لوله های پخ با میزان پخ شدگی متفاوت، با افزایش سرعت جرمی افزایش می یابد و افزایش افت فشار نسبت به لوله گرد عموماً با افزایش کیفیت بخار کاهش می یابد. بیشترین افزایش افت فشار در کمترین کیفیت بخار یعنی کیفیت تقریباً برابر با $0/3$ در لوله با کمترین ارتفاع داخلی $h = 2/8$ mm (پخ ترین لوله)، اتفاق می افتد که 7 برابر لوله با سطح 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 $0/8$ از لوله با بیشترین ارتفاع داخلی $h = 6/6$ mm (کمترین پخ شدگی) حاصل می گردد که فقط $1/12$ برابر افت فشار در لوله گرد می باشد.

روابط پیش بینی افت فشار جریان جوششی در لوله پخ افقی

ابتدا داده های آزمایشگاهی افت فشار در لوله با سطح مقطع دایروی با مقادیر پیش بینی شده توسط روابط موجود مقایسه گردید. از میان روابط موجود، روابط مولر و هک [۸] و رابطه فریدل [۹] داده های آزمایشگاهی این مطالعه را با دقت نسبتاً خوبی پیش بینی می کنند.

شکل ۴ مقایسه افت فشار نتایج آزمایشگاهی را با این دو رابطه نشان می دهد.



شکل ۴: مقایسه افت فشار نتایج آزمایشگاهی لوله گرد با مقادیر پیش بینی شده توسط روابط مولر و هک (۸) و فریدل (۹)

ارزیابی کلی شکلهای ۵ و ۶ نشان می‌دهد که پیش بینی این روابط از ۶۲٪ تا ۶٪ نسبت به داده‌های این آزمایش تغییر می‌کنند. علت این اختلاف می‌تواند این باشد که رابطه تام و مورنو از داده‌های تجربی سیالات غیر R-۱۳۴a و در محدوده سرعت جرمی متفاوتی نسبت به مطالعه حاضر بدست آمده است. همچنین رابطه ویلسون برای جریان چگالشی مبرد R-۱۳۴a در داخل کندانسور ارائه شده است.

با توجه به این که روابط تام و مورنو (۲۰۰۴) و ویلسون (۲۰۰۲) اختلاف نسبتاً زیادی با داده‌های آزمایشگاهی این مطالعه دارند، تصمیم به پیشنهاد روابطی برای تخمین افت فشار جریان جوششی در لوله‌های صاف پخ شده گرفته شد به نحوی که داده‌های آزمایشگاهی این مطالعه را با دقت بیشتری پیش بینی کنند.

نظر به اینکه روابط مولر و هک [۸] و فریدل [۹] نتایج آزمایشگاهی افت فشار در لوله افقی گرد این مطالعه را با دقت خوبی پیش بینی می‌کنند. ابتدا روابطی براساس روابط مذکور به دست آمد. سپس رابطه‌ای بر اساس رابطه لوله پخ تام و مورنو [۵] که خود بر اساس رابطه گرونز [۵] در لوله گرد افقی ارائه شده است، بدست آمد. در ادامه روابط بدست آمده ارائه خواهند شد.

بر اساس رابطه ارائه شده توسط مولر و هک [۸] در لوله صاف گرد، رابطه‌ای جهت تخمین افت فشار در لوله‌های صاف پخ شده به صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$\Delta P = \Delta P_{muller} F_{flat} \quad (2)$$

$$F_{flat} = (3.01 - 1.19x) G^* h^{-0.15} \quad (3)$$

که در رابطه (۲) ΔP_{muller} ، افت فشار بدست آمده از رابطه مولر و هک [۸] می‌باشد. با این تفاوت که d_i با d_e که قطر معادل لوله پخ شده با لوله گرد با مساحت برابر می‌باشد، جایگزین می‌گردد. d_e از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$d_e = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (4)$$

G و h در رابطه (۳) به ترتیب سرعت جرمی بی بعد و ارتفاع داخلی بی بعد لوله می‌باشند که از رابطه زیر بدست می‌آیند.

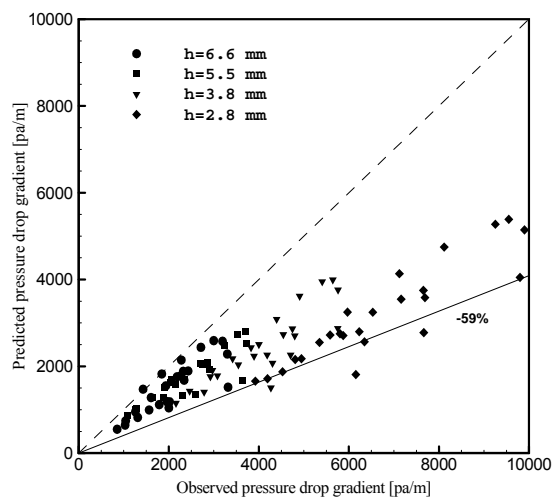
$$G = \frac{G}{G_0} \quad \text{و} \quad h = \frac{h}{h_0} \quad (5)$$

G_0 و h_0 به ترتیب سرعت جرمی مرجع و ارتفاع داخلی مرجع در لوله پخ شده می‌باشند که برابر با $G_0 = 107 \text{ kg/m}^2\text{s}$ و $h_0 = 5/5 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده‌اند.

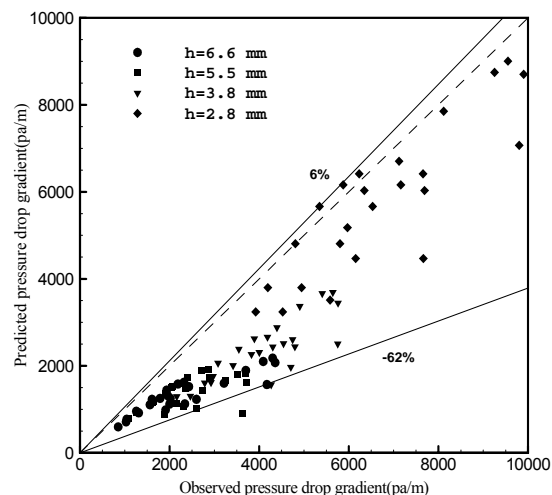
شکل ۷ مقایسه پیش بینی رابطه (۲) و داده‌های آزمایشگاهی این مطالعه را نشان می‌دهد. یک ارزیابی کلی از این شکل نشان می‌دهد که رابطه پیشنهادی، داده‌های آزمایشگاهی را با دقت $\pm 20\%$ پیش بینی می‌کند که تطابق نسبتاً خوبی با داده‌های تجربی بدست آمده دارد. انحراف میانگین و انحراف استاندارد افت فشار لوله

با توجه به اینکه این روابط داده‌های آزمایشگاهی افت فشار در لوله‌های صاف گرد این مطالعه را با تقریب خوبی پیش بینی می‌کنند در ادامه بحث، از این روابط برای محاسبه افت فشار در لوله پخ استفاده خواهد شد.

در بخش قبلی به رابطه تام و مورنو [۴] و رابطه ویلسون [۱] برای تخمین افت فشار در لوله صاف پخ شده اشاره شد. در اینجا ابتدا افت فشار محاسبه شده از داده‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر را با افت فشار پیش بینی شده توسط رابطه تام و مورنو (۲۰۰۴) و رابطه ویلسون (۲۰۰۲) مقایسه می‌کنیم. مقدار افت فشار کل پیش بینی شده از جمع افت فشار اصطکاکی محاسبه شده بوسیله این روابط و افت فشار ممتوم رابطه استینر [۱۰] بدست آمده است. مقایسه بین داده‌های آزمایشگاهی با روابط مذکور در شکلهای ۵ و ۶ ارائه شده است.

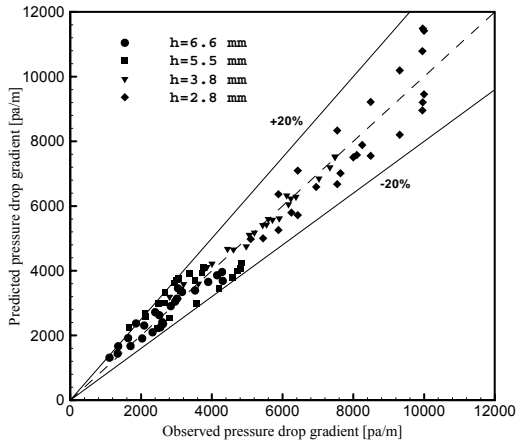


شکل ۵: مقایسه افت فشار آزمایشگاهی لوله افقی پخ شده با مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه تام و مورنو (۴)

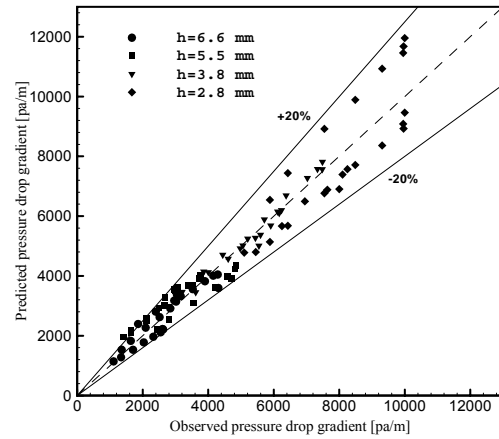


شکل ۶: مقایسه افت فشار آزمایشگاهی لوله افقی پخ شده با مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه ویلسون (۱)

صاف پخ شده پیش بینی شده بوسیله رابطه (۲) به ترتیب برابر با ۹۸٪ و ۱۲٪ می باشد.



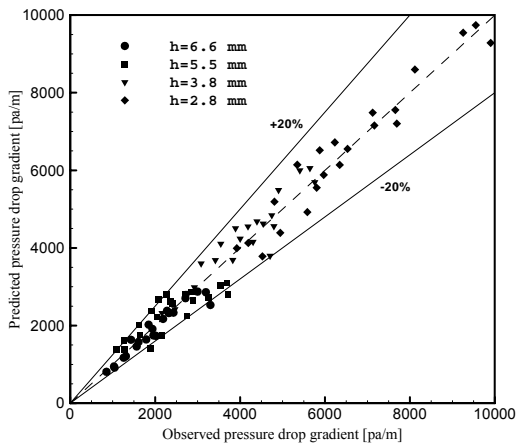
شکل ۸: مقایسه افت فشار آزمایشگاهی لوله صاف با سطح مقطع پخ شده با مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه (۶)



شکل ۷: مقایسه افت فشار آزمایشگاهی لوله صاف با سطح مقطع پخ شده با مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه (۲)

در رابطه (۸)، Δp_{gd} افت فشار بدست آمده از رابطه گرومر [۵] می باشد با این تفاوت که به جای قطر لوله d_i ، از قطر معادل d_e محاسبه شده بوسیله رابطه (۴) استفاده می گردد. G و h در روابط (۹) و (۱۰) از رابطه (۵) بدست می آیند. همچنین G_0 و h_0 به ترتیب برابر با $G_0 = 85 \text{ kg/m}^2\text{s}$ و $h_0 = 5/5 \text{ mm}$ در نظر گرفته می شوند.

چنانچه از شکل ۹ بر می آید، این رابطه داده‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر را با دقت $\pm 20\%$ پیش‌بینی می‌کند. انحراف میانگین و انحراف استاندارد افت فشار لوله صاف پخ شده پیش بینی شده بوسیله رابطه (۸) به ترتیب برابر با 12.28% و 12.2% می باشد.



شکل ۹: مقایسه افت فشار آزمایشگاهی لوله صاف با سطح مقطع پخ شده با مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه (۸)

بر اساس رابطه ارائه شده توسط فریدل [۹] برای لوله افقی گرد، رابطه (۶) برای تخمین افت فشار جریان جوشی در لوله های افقی پخ شده، پیشنهاد می‌شود:

$$\Delta P = \Delta P_{Fridel} F_{flat} \quad (6)$$

$$F_{flat} = (2.52 - 0.61x) G^* h^{*-0.5} \quad (7)$$

که در رابطه (۶)، ΔP_{Fridel} افت فشار بدست آمده از رابطه فریدل می باشد با این تفاوت که d_i ، با d_e که از رابطه (۴) بدست می آید، جایگزین می شود. G و h در رابطه (۷) از رابطه (۵) بدست می آیند. G_0 و h_0 به ترتیب سرعت جرمی مرجع و ارتفاع داخلی مرجع بوده که برابر با $G_0 = 85 \text{ kg/m}^2\text{s}$ و $h_0 = 5/5 \text{ mm}$ در نظر گرفته شده اند.

شکل ۸ مقایسه پیش بینی رابطه (۶) و داده های آزمایشگاهی این مطالعه را نشان می دهد. پیش بینی این رابطه از -20% تا $+20\%$ نسبت به داده‌های این آزمایش تغییر می‌کند که تطابق نسبتاً خوبی را با داده های آزمایشگاهی نشان می دهد. انحراف میانگین و انحراف استاندارد افت فشار لوله پخ افقی پیش بینی شده بوسیله رابطه (۶) به ترتیب برابر با 12.93% و 13% می باشد.

بر اساس رابطه ارائه شده برای لوله پخ افقی توسط تام و مورنو [۴] که خود بر اساس رابطه لوله گرد گرومر [۵] بدست آمده است، رابطه زیر بدست آمد.

$$\Delta P_{fri} = \Delta P_{gd} F_{round} F_{flat} \quad (8)$$

$$F_{round} = (1.42 - 0.74x) G^* \quad (9)$$

$$F_{flat} = (3.76 - 1.67x) h^* \quad (10)$$

نتیجه گیری و جمع بندی

نتایج زیر از این کار تحقیقی تجربی بدست آمد:

- ۱- پخ کردن مقطع لوله، باعث افزایش افت فشار نسبت به لوله گرد مشابه می شود. در بدترین حالت افت فشار جریان جوششی درون لوله پخ افقی تا ۶۰٪ نسبت به لوله گرد مشابه افزایش می یابد.
- ۲- میزان افت فشار در لوله های با مقطع پخ شده تابعی از میزان پخ شدگی، کیفیت بخار و سرعت جرمی میرد می باشد. با ثابت ماندن سایر شرایط، مشاهده شد که با افزایش میزان پخ شدگی افت فشار افزایش می یابد.
- ۳- با استفاده از داده های آزمایشگاهی مطالعه حاضر، سه رابطه مختلف برای تخمین مقادیر افت فشار جریان جوششی در لوله های پخ شده بدست آمد. این روابط داده های آزمایشگاهی را در محدوده $\pm 20\%$ پیش بینی می نمایند.

فهرست علائم

A	مساحت، m^2
d_e	قطر معادل، m
d_i	قطر داخلی لوله، m
F	ضریب تصحیح افت فشار (لوله های پخ)
G	سرعت جرمی، kg/m^2s
h	ارتفاع داخلی لوله پخ شده، m
ΔP	افت فشار، pa
Q	میزان انتقال حرارت، W
علائم یونانی	
η	راندمان
زیر نویس	
flat	پخ
round	گرد
0	مرجع
بالا نویس	
*	بی بعد شده

مراجع

- [1]- Wilson, M.J, Newell, T.A, Chato, J.C and Infanate Ferreira, C.A. "Refrigerant charge, pressure drop and condensation heat transfer in flattened tubes", Int.J Refrigeration, Vol.26, 2002.
- [2]- Jung, D.S, Radermacher, R. "Prediction of pressure drop during horizontal annular flow boiling of pure and mixed refrigerants", Int.J heat transfer , Vol. 32, pp. 2435-36,1989.
- [3]- Souza, A.L, Chato J.C, Wattelet J.P, 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.
- [4]- Wolverine Tube, Inc., Engineering Data Book III, Chapter 13, 2007.
- [5]- 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.
- [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 University Press, 1994.
- [8]- Muller-Steinhagen, H., Heck, K., "A Simple Friction Pressure Drop Correlation for Two-Phase Flow in Pipes", Chem Eng Process, Vol.20, PP.297-308, 1986.
- [9]- 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.
- [10]- Steiner, D., "VDI-Wärmeatlas (VDI Heat Atlas), Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GCV) Düsseldorf, Chapter Hbb, 1993.
- [11]- Martinelli, R. C. and Nelson, D. B. "Prediction of Pressure Drop during Forced Circulation Boiling of Water". Trans. ASME, Vol. 70, PP. 695, 1948.