

# افزایش ضریب انتقال حرارت در چگالش بخار داخل لوله های

## مجهز به سیم پیچ

محمدعلی اخوان بهابادی

استادیار گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۷/۱۰/۲۱، تاریخ تصویب ۷۸/۱۰/۲۵)

### چکیده

در این تحقیق مسأله چگالش فرئون ۲۲ داخل لوله های افقی که در داخل آنها سیم پیچ نصب شده است به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته و اثرات ناشی از افزایش انتقال حرارت بررسی می شود. دستگاهی که در این بررسی مورد استفاده قرار می گیرد، در واقع یک سیستم کامل تبرید تراکمی بخار مجهز به کلیه وسایل اندازه گیری مورد لزوم است. کندانسور این سیستم شامل چهار مبدل حرارتی از نوع لوله های هم محور می باشد که به صورت سری به هم وصل شده اند و واحد آزمایش نامیده می شوند. هر واحد آزمایش یک مبدل حرارتی با جریان مخالف می باشد که در لوله داخلی آن فرئون ۲۲ چگالیده می شود مادامیکه حرارت خود را به آب خنک کن جاری در پوسته می دهد. داده های تجربی برای لوله های مجهز به سیم پیجهایی به ضخامت های مختلف و یک گام مشخص و همچنین سیم پیجهایی با گامهای مختلف و یک ضخامت مشخص جمع آوری می گردد. آنالیز و بررسی نتایج بدست آمده نشان می دهد که نصب سیم پیچ در داخل لوله های افقی (که کاملاً به جداره داخلی لوله می چسبد) باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی تا ۱۰۰٪ بیشتر از ضرایب انتقال حرارت مربوط به لوله صاف (بدون سیم پیچ) می شود. براساس داده های تجربی جمع آوری شده در این تحقیق، یک رابطه کلی برای محاسبه ضریب انتقال حرارت در چگالش بخار در داخل لوله های مجهز به سیم پیچ بدست آورده می شود.

**واژه های کلیدی:** افزایش انتقال حرارت، چگالش بخار، کندانسور، سیم پیچ، رابطه تجربی

### مقدمه

انگشت شماری مقاله در رابطه با استفاده از نصب سیم پیچ در لوله ها به چاپ رسیده است. اگر چه استفاده از سیم پیچ در جریان تک فازی و جوشش باعث افزایش قابل توجه ضریب انتقال حرارت شده است [۱ و ۲]، هیچ مقاله ای در رابطه با استفاده از آن در چگالش بخار تقریباً وجود ندارد. از طرف دیگر، انتظار می رود که اثر استفاده از سیم پیچ بر روی نرخ انتقال حرارت در چگالش بخار مهمتر از وسایلی نظیر نوار پیچیده شده باشد که تولید جریان چرخشی می کنند.

در کندانسورهایی که در تبرید و تهویه مطبوع بکار می روند به واسطه قابلیت خیس کنندگی بالای مبردها فقط چگالش لایه ای اتفاق می افتد. چون ضریب هدایت حرارتی مایع کم است، ضرایب انتقال حرارت طرف مبرد کم می باشد. بنابراین افزایش این ضرایب در کندانسورهایی که در تبرید و تهویه مطبوع بکار می روند مفید بوده و خیلی مهمتر از کندانسورهای بخار آب می باشد. بعد از پروتکل مونترال ۱۹۸۷، محققین توجه خود را معطوف

کندانسور یکی از وسایل مهمی است که دارای کاربرد فراوانی در صنایع تبرید و تهویه مطبوع، نیروگاههای حرارتی، تأسیسات شیمیایی و ... می باشد. با توجه با محدودیت منابع انرژی، طراحی و استفاده بهینه از مبدلهای حرارتی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. بدین منظور از روشهای مختلف فعال و غیرفعال<sup>۱</sup> به منظور افزایش ضریب انتقال حرارت در آنها استفاده می شود. یکی از روشهای غیرفعال استفاده از انواع وسایل نظیر نوار پیچیده شده<sup>۲</sup>، شبکه سیم یا بُرس<sup>۳</sup> و سیم پیچ<sup>۴</sup> می باشد که در داخل لوله نصب می شود. امتیاز این وسایل این است که نسبتاً ارزان هستند، نصب آنها در داخل لوله و همچنین بیرون آوردن آنها به منظور تمیز کردن لوله آسان می باشد. به همین دلیل محققین زیادی از این گونه وسایل برای افزایش انتقال حرارت در مبدلهای حرارتی استفاده نموده اند. بررسی اطلاعات موجود نشان می دهد که تحقیقات زیادی برای مطالعه و بررسی روشهای مختلف افزایش انتقال حرارت در چگالش بخار داخل لوله های افقی انجام شده است، ولیکن تعداد

۱۲/۷mm و قطر خارجی ۱۵/۴mm و طول ۸۵cm می‌باشد. لوله خارجی نیز یک لوله مسی بطول مساوی و با قطر داخلی ۵۰mm است. برای کسب مقادیر متوسط بهتر، دمای سطح خارجی هر کدام از چهار لوله میانی در بالا، پایین و کناره در چهار مقطع طولی مختلف اندازه گرفته می‌شود. دمای مبرد در ورود و خروج کندانسور مورد آزمایش و همچنین دمای آب خنک کن در ورود و خروج هر واحد آزمایش بوسیله ترموکوپل اندازه گیری می‌شود. همچنین فشار استاتیکی در ورود و خروج کندانسور مورد آزمایش اندازه گیری می‌شود. کل کندانسور مورد آزمایش بوسیله پشم شیشه عایق بندی شده است.

برای کسب کیفیت بخار مطلوب در ورودی کندانسور مورد آزمایش به منظور پوشش محدوده کامل کیفیت بخار، از یک پیش کندانسور<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. همچنین برای اینکه مبرد خروجی از کندانسور مورد آزمایش، در قیل از ورود به روتامتر کاملاً مایع شده باشد، از یک کندانسور ثانوی<sup>۲</sup> استفاده می‌گردد.

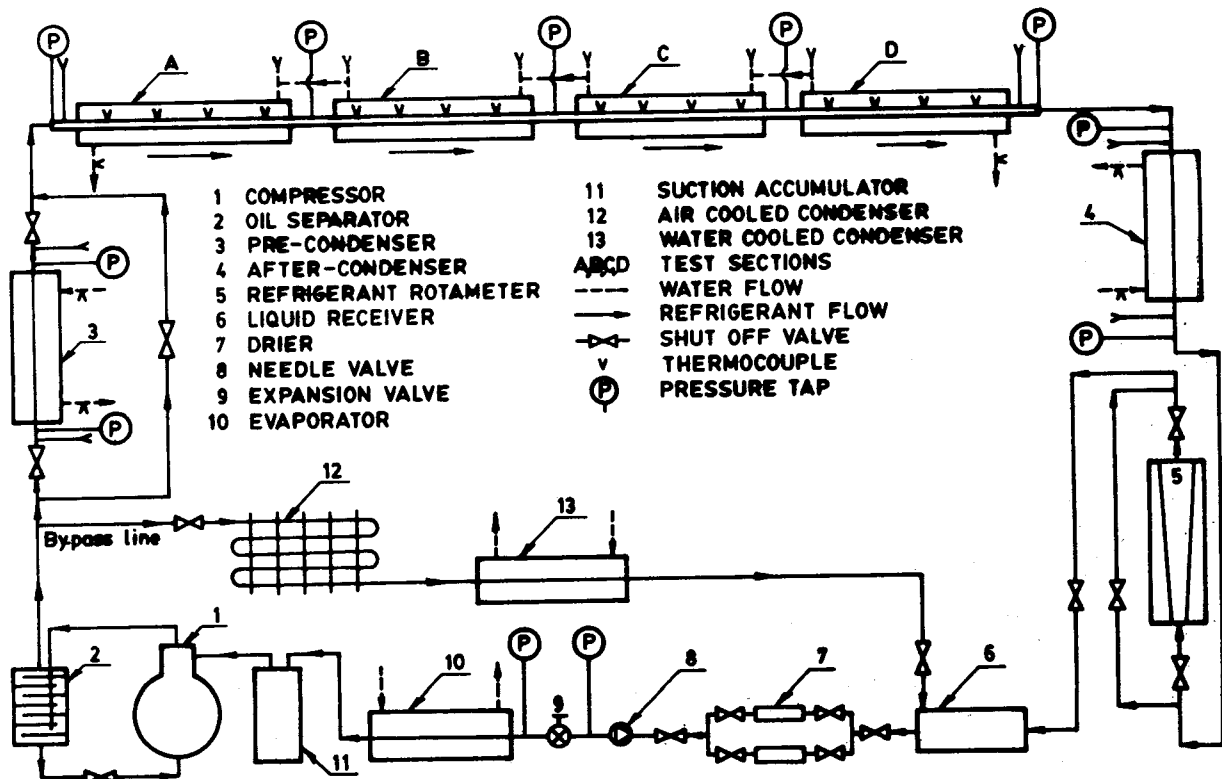
برای اندازه گیری دما، فشار استاتیکی و دبی جرمی ماده مبرد و آب خنک کن در نقاط مورد نظر، تمهیدات لازم معمول گشته است. برای افزایش انتقال حرارت، از سیم پیچ استفاده می‌شود. سیم پیچ با سیمهایی به قطر ۰/۶۵، ۱ و ۱/۵ میلیمتر و گام ۱۰/۶/۵ و ۱۳ میلیمتر ساخته شده و در تمام طول کندانسور مورد آزمایش نصب می‌گردد.

به میردهایی نظیر فرئون ۲۲ نمودند که از لحاظ زیست محیطی اثر کمتری بر تخریب لایه اوزون دارند. اگرچه فرئون ۲۲ نیز در دراز مدت تا سال ۲۰۳۰ باید از رده خارج شود [۳] ولیکن بواسطه اینکه به سادگی در دسترس هست و با عنایت به کاربرد موقفیت آمیز قبلی آن در سردخانه ها، کماکان در مورد آن تحقیقات انجام می‌شود [۴].

ازاین رو تحقیقات حاضر به منظور جمع آوری داده های تجربی انتقال حرارت برای چگالش فرئون ۲۲ در لوله های افقی مجهز به سیم پیچ و مطالعه اثرات افزایش انتقال حرارت انجام گرفته است.

### شرح دستگاه

دستگاه آزمایش یک سیستم تبرید تراکمی بخار مجهز به کلیه وسایل اندازه گیری مورد لزوم می‌باشد که در شکل (۱) بصورت شماتیک نشان داده شده است. کندانسور مورد آزمایش شامل چهار کندانسور مجزا از نوع لوله های هم محور می‌باشد که بصورت سری بهم وصل شده و با حروف A, B, C و D در شکل (۱) نمایش داده شده‌اند. هر کندانسور (واحد آزمایش) یک مبدل حرارتی با جریان مخالف می‌باشد که در داخل آن فرئون ۲۲ چگالیده می‌شود مادامی که حرارت خود را به آب خنک کن جاری در پوسته می‌دهد. برای هر واحد آزمایش، لوله داخلی یک لوله مسی به قطر داخلی



شکل ۱: شکل شماتیک دستگاه آزمایش.

جدول ۱: ابعاد مشخصه لوله های با سیم پیچ و لوله صاف.

نام لوله	D,mm	L,mm	e,mm	p,mm	Y	$\alpha$ ,deg
A	۱۲/۷	۸۵۰	۰/۶۵	۱۰/۰	۳/۳۲۷	۷۹
B	۱۲/۷	۸۵۰	۱/۰	۱۳/۰	۶/۰۵۷	۷۷
C	۱۲/۷	۸۵۰	۱/۰	۱۰/۰	۷/۷۸۴	۷۷
D	۱۲/۷	۸۵۰	۱/۰	۶/۵۰	۱۲/۱۱	۸۰
E	۱۲/۷	۸۵۰	۱/۵	۱۰/۰	۱۷/۷۲	۷۸
F	۱۲/۷	۸۵۰	-	-	-	-

## جمع آوری داده ها و آنالیز آنها

در مجموع ۱۴۰ آزمایش با پنج سرعت جرمی ماده مبرد مختلف ۲۰۶، ۲۳۶، ۲۸۰، ۳۲۷ و ۳۷۲ kg/s.m<sup>2</sup> برای جریان داخل لوله صاف و جریان داخل لوله زبر (با سیم پیچ) انجام می شود. محدوده عملکرد پارامترها بصورت زیر است:

سرعت جرمی ماده مبرد: ۲۰۰-۳۷۰ kg/s.m<sup>2</sup>

دمای چگالش متوسط: ۳۴-۴۸°C

فلوی حرارتی متوسط در واحد آزمایش: ۹۰۰۰-۲۸۰۰۰ W/m<sup>2</sup>

گذر جرمی آب خنک کن: ۳۰-۱۵۰۰ kg/hr

کیفیت بخار ورودی: ۰/۰۹-۱

نسبت پیچش (P/D): ۰/۵۰-۱/۰۲

نسبت قطر سیم به قطر لوله (e/D): ۰/۰۵۲-۰/۱۱۸

برای محاسبه دمای اشباع و انتالپی های حالت اشباع و بخار داغ فرئون ۲۲ از معادلات داده شده در مرجع [۵] استفاده شد. سایر خواص ترموفیزیکی فرئون ۲۲ با استفاده از روابط داده شده در مرجع [۶] محاسبه گردید. برای هر آزمایش، چهار ضریب انتقال حرارت متوسط مربوط به چهار واحد آزمایش محاسبه می شود. این ضرایب براساس حرارت کسب شده بوسیله آب خنک کن، مساحت سطح داخلی لوله میانی و اختلاف دمای متوسط بین مبرد و سطح داخلی لوله و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می شود.

$$\bar{h} = \left[ \frac{\pi DL(t_s - t_{wo})}{m_w C_{pw}(T_{wo} - T_{wi})} - \frac{D}{2k_w} \ln(D_o/D) \right]^{-1} \quad (1)$$

که در آن،  $\bar{h}$  ضریب انتقال حرارت متوسط،  $D$  و  $D_o$  به ترتیب قطر داخلی و خارجی لوله میانی،  $L$  طول واحد آزمایش،  $t_s$  دمای اشباع مبرد،  $t_{wo}$  دمای سطح خارجی لوله،  $m_w$ ،  $C_{pw}$ ،  $T_{wo}$  و  $T_{wi}$  به ترتیب دبی جرمی، گرمای ویژه، دمای ورودی و دمای خروجی آب خنک کن و  $k_w$  ضریب هدایت حرارتی دیواره لوله می باشد.

همچنین ضریب انتقال حرارت متوسط برای کل کندانسور مورد آزمایش (مجموع چهار واحد آزمایش) به روشی مشابه محاسبه می شود. کیفیت بخار موضعی در ورود و خروج هر واحد آزمایش، با برقراری موازنه انرژی در آن واحد محاسبه می گردد. کیفیت بخار متوسط هر واحد آزمایش بصورت متوسط کیفیت ورودی و خروجی آن واحد بدست می آید.

## ارائه نتایج و بحث های مربوطه

پارامترهای مشخص کننده هندسه لوله های زبر (با سیم پیچ) در جدول (۱) آمده است. آزمایشات با پنج لوله زبر A, B, C, D و E و یک لوله صاف (بدون سیم پیچ) F انجام می شود.

در این جدول،  $e$  قطر سیم،  $p$  گام کوئیل (۳۶۰)،  $Y = e^2/pD \times 1000$  شاخص سیم پیچ و  $\alpha$  زاویه پیچش کوئیل می باشد. چنانچه ملاحظه می شود زاویه پیچش کوئیل برای تمام سیم پیچها تقریباً یکسان است.

نخست ضرایب انتقال حرارت لوله صاف بدست آمده از این آزمایش با مقادیر محاسبه شده از روابط متعدد موجود مقایسه شد. ملاحظه گردید که این ضرایب بهترین سازگاری را با رابطه (۲) که اصلاح شده رابطه Kruzhilin و Boyko هست دارند [۷].

$$\bar{Nu} = 0.81 Pr^{1/3} (GD/\mu_1)^{0.66} \left\{ \frac{(\rho_1/\rho_m)_{in}^{0.5} + (\rho_1/\rho_m)_{out}^{0.5}}{2} \right\}^{0.90} (\Delta X \cdot D/L)^{0.29} \quad (2)$$

که در آن،

$$\rho_1/\rho_m = 1 + X \cdot (\rho_l \rho_v)/\rho_v \quad (3)$$

این است که برای پوشش محدوده وسیع تر کیفیت بخار، برای هر سرعت جرمی سه آزمایش با کیفیتهای بخار ورودی مختلف انجام شده است که این آزمایشات در فشار چگالش و فلوی حرارتی دقیقاً یکسان انجام نشده‌اند. نتایج مشابهی نیز برای چگالش بخار در لوله‌های افقی مجهز به نوار پیچیده شده گزارش شده است [۹].

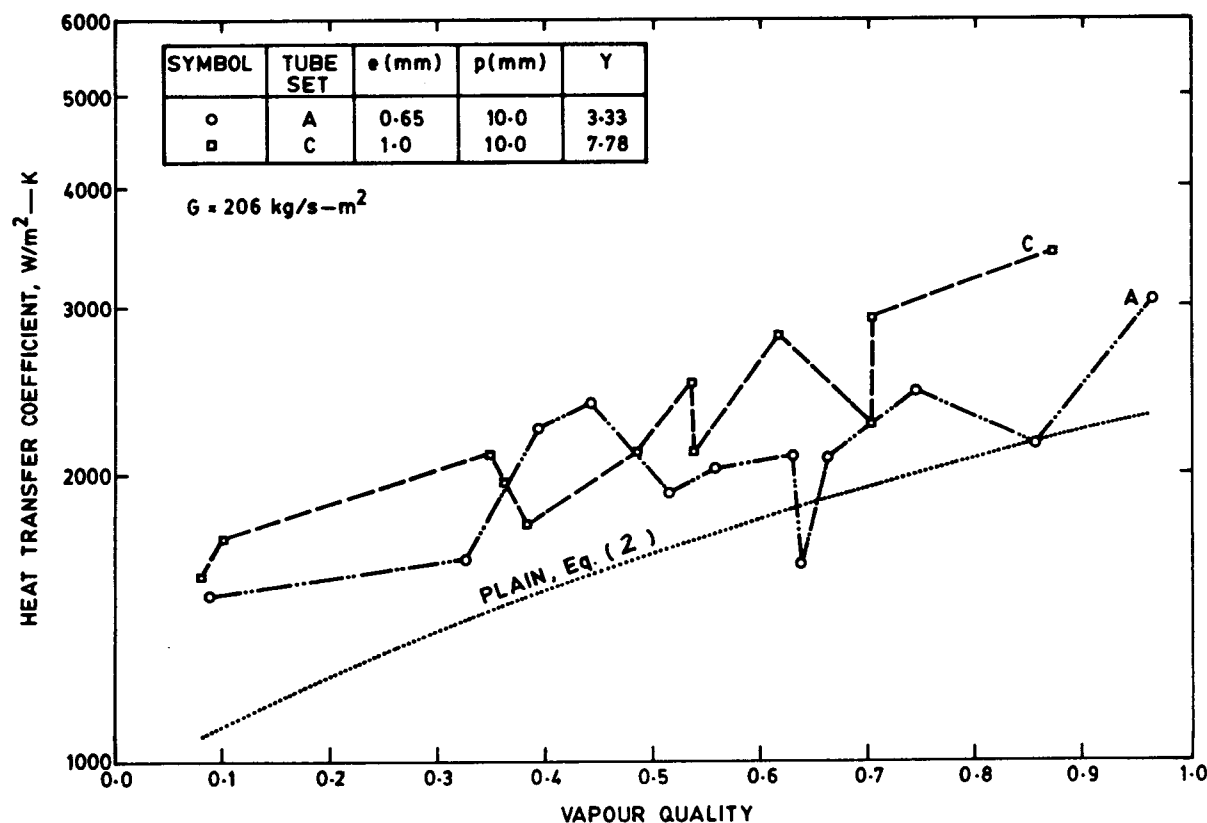
تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله‌های زبر همچنین در شکل‌های ۳ تا ۵ نشان داده شده است. هر شکل برای یک سرعت جرمی بخصوص است. برای هر لوله، نقاط مربوطه بوسیله منحنی‌های صاف<sup>۲</sup> بهم متصل شده‌اند. منحنی مربوط به جریان در داخل لوله صاف داده شده بوسیله رابطه (۲) نیز در این اشکال ترسیم شده است.

از بررسی دقیق شکل‌های ۳ تا ۵ و کل داده‌های تجربی جمع‌آوری شده برای لوله زبر نتیجه‌گیری می‌شود که بطور کلی نصب سیم پیچ در داخل لوله‌های افقی ضرایب انتقال حرارت را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد. میزان افزایش انتقال حرارت تابع پیچیده‌ای از سرعت جرمی، کیفیت بخار و ابعاد هندسی سیم پیچ می‌باشد. در بهترین حالت، لوله زبر E در ناحیه کیفیت بخار بالا، ضریب انتقال حرارت را تا ۱۰۰٪ بیشتر از ضریب انتقال حرارت لوله صاف مشابه افزایش می‌دهد. البته، در برخی حالتها سیم پیچ

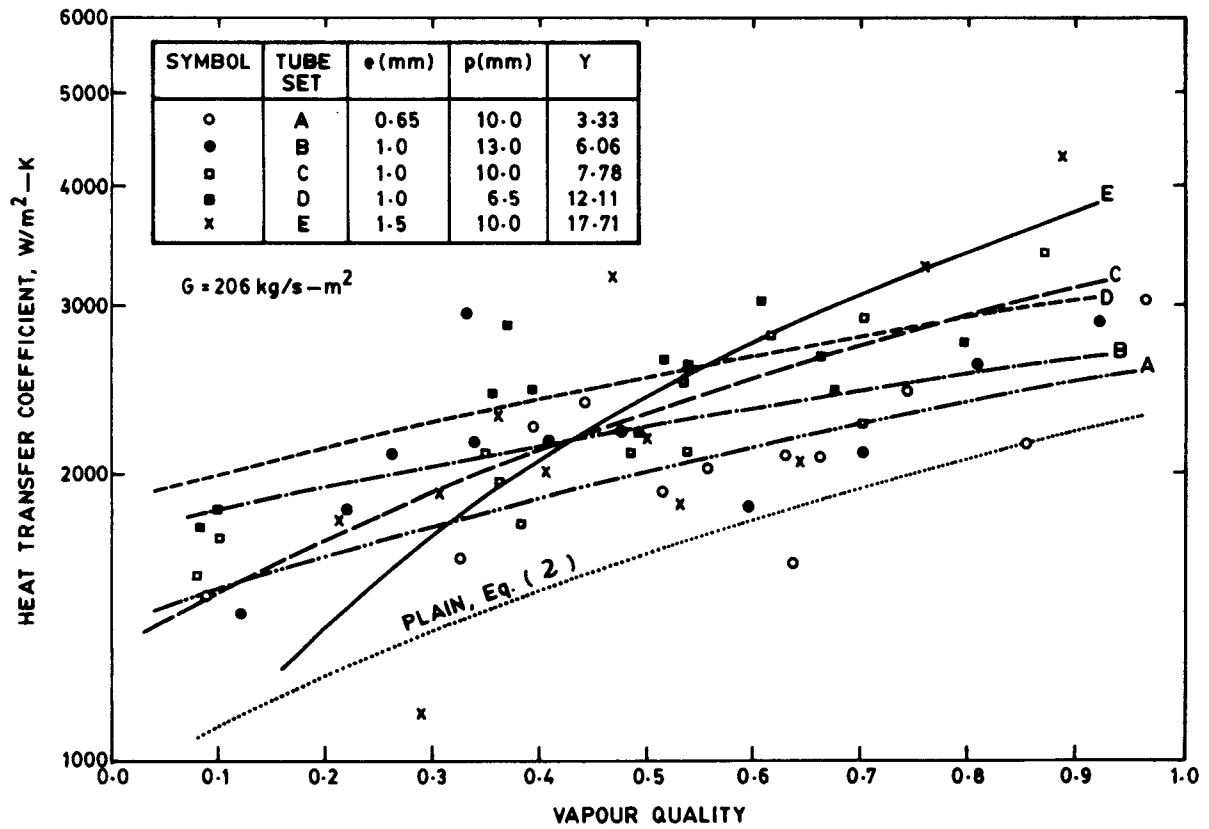
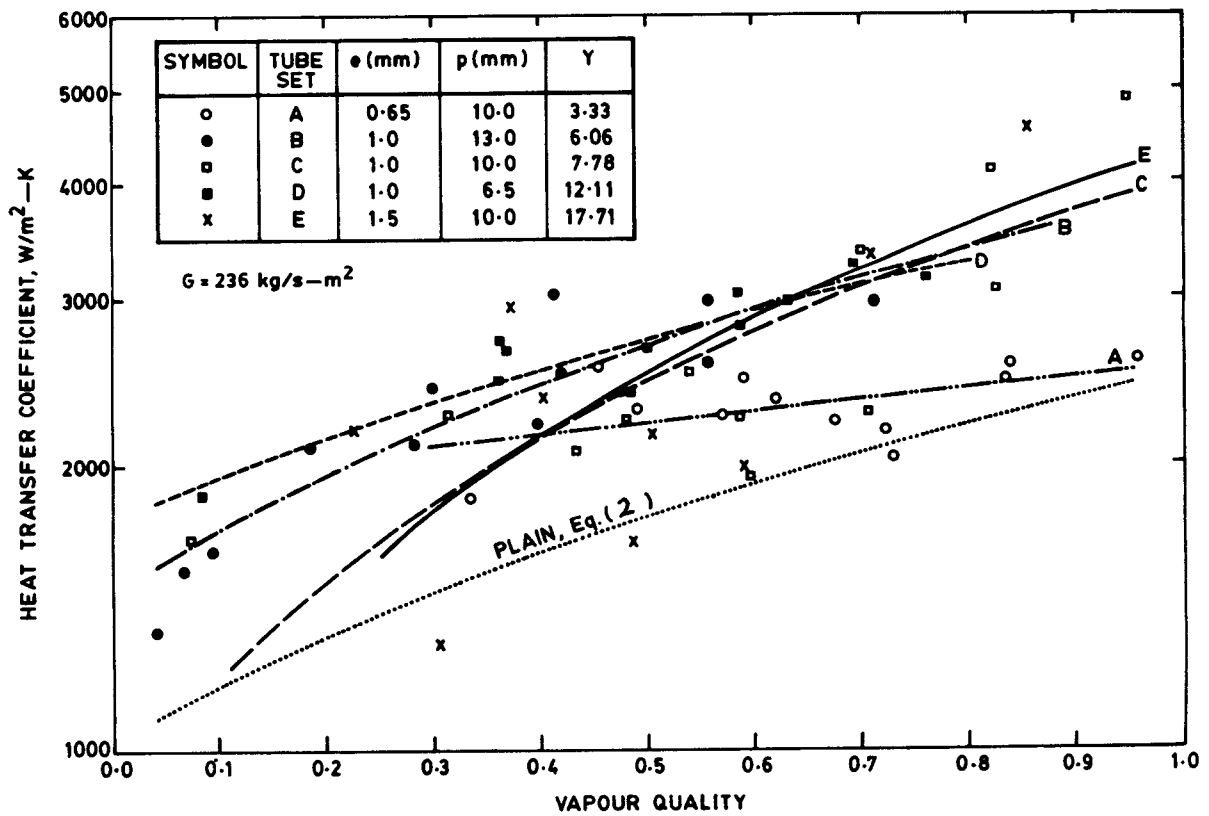
چون ضریب انتقال حرارت در چگالش بخار بستگی به فلوی حرارتی<sup>۱</sup> دارد [۸]، بنابراین ترم  $(\Delta x \cdot D/L)$  بعنوان منعکس‌کننده اثر فلوی حرارتی به ترم‌های بکار رفته در رابطه دو نفر مذکور اضافه گردید.

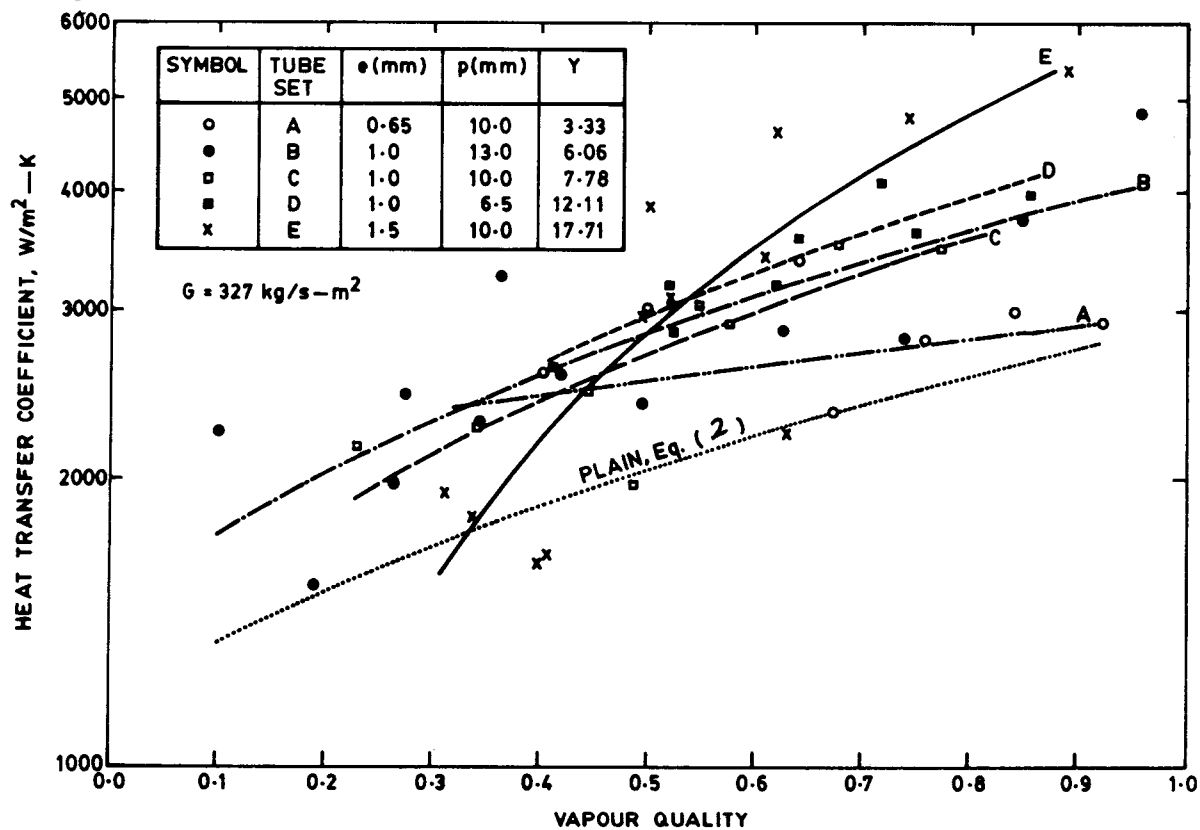
در روابط (۲) و (۳)،  $\bar{Nu}$  عدد نوسلت متوسط،  $Pr$  عدد پرانتل،  $G$  سرعت جرمی،  $\mu_1$  لزجت دینامیکی مایع،  $X$  کیفیت بخار،  $\Delta X$  کاهش کیفیت بخار در واحد آزمایش و  $\rho_1$  و  $\rho_v$  به ترتیب جرم مخصوص مایع و بخار می‌باشد.

شکل (۲) بعنوان یک نمودار نمونه برای نمایش تغییرات تصادفی ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار ترسیم شده است. این نمودار برای لوله‌های زبر A و C در سرعت جرمی یکسان  $kg/s \cdot m^2$  ۲۰۶ می‌باشد. نقاط بوسیله خطوط مستقیم بهم متصل شده‌اند. منحنی مربوط به جریان در داخل لوله صاف که بوسیله رابطه (۲) داده شده نیز در این شکل آمده است. در این شکل، تغییرات تصادفی ضرایب انتقال حرارت به وضوح دیده می‌شود. دلیل آن این است که چگالش بخار در جابجایی اجباری یک پدیده بسیار ناپایدار است که در آن ضمن اینکه دو فاز مایع و بخار با هم جریان دارند، تبدیل فاز هم وجود دارد. همچنین وجود سیم پیچ باعث ناپایداری فیلم مایع چگالیده شده بر روی سطح داخلی دیواره لوله می‌گردد. دلیل دیگر برای تغییر تصادفی ضرایب انتقال حرارت در شکل (۲)



شکل ۲: نمایش رفتار تصادفی ضرایب انتقال حرارت با کیفیت بخار برای لوله‌های A و C در سرعت جرمی  $206 \text{ kg/s} \cdot \text{m}^2$

شکل ۳: چگونگی تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار در سرعت جرمی یکسان  $۲۰۶ \text{ kg/s.m}^2$ .شکل ۴: چگونگی تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار در سرعت جرمی یکسان  $۲۳۶ \text{ kg/s.m}^2$ .



شکل ۵: چگونگی تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار در سرعت جرمی یکسان  $۳۲۷ \text{ kg/s.m}^2$ .

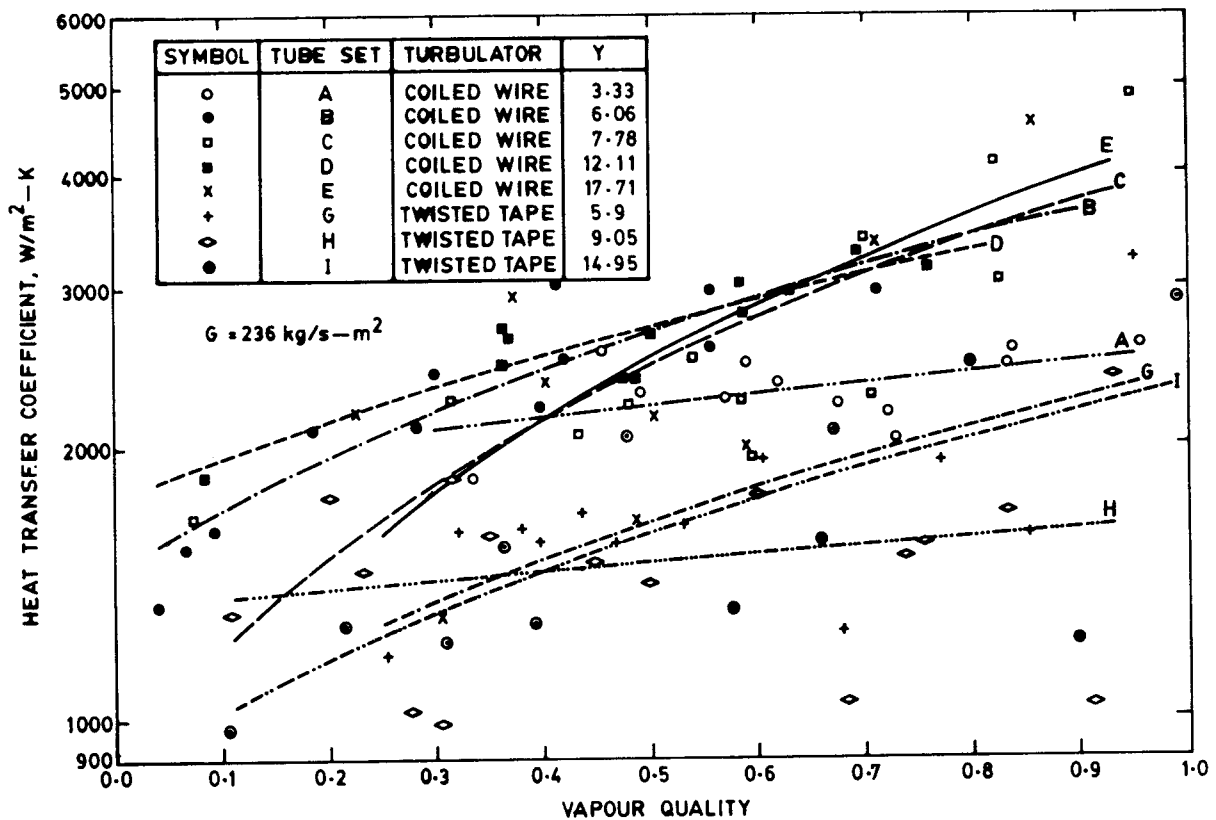
مایع مجاور سطح داخلی لوله در جریان حلقوی<sup>۱</sup> محاسبه شد. البته این روابط برای لوله صاف می‌باشند. نتایج نشان داد که در حالت کمترین سرعت جرمی، ضخامت فیلم مایع به حدود  $۰/۷ \text{ mm}$  می‌رسد قبل از اینکه رژیم جریان از حلقوی به موجی<sup>۲</sup> تغییر کند. تغییر رژیم معمولاً در کیفیت بخار بین  $۰/۴$  تا  $۰/۵$  اتفاق می‌افتد. در مورد لوله زبر، انتظار می‌رود که بعلت حضور سیم‌پیچ در سطح داخلی لوله، سرعت فیلم مایع کاهش یابد. بدین علت و به دلیل اثرات افزایش کشش سطحی، انتظار می‌رود که ضخامت فیلم مایع در لوله های زبر بیش از لوله صاف باشد قبل از اینکه جریان از حلقوی به موجی تبدیل شود. این بدین معنی است که در کیفیت بخار خیلی پایین و با ضخامت فیلم مایع حتی بیش از قطر ضخیم‌ترین سیم پیچ یعنی  $۱/۵ \text{ mm}$  نیز ممکن است رژیم جریان حلقوی باشد.

دلیل اینکه در ناحیه کیفیت بخار بالا، حداکثر افزایش انتقال حرارت از ضخیم‌ترین سیم پیچ حاصل می‌شود ممکن است این باشد که در کیفیت بخار بالا، یک قسمت از سیم پیچ خارج از فیلم مایع مجاور دیوار لوله و در ناحیه بخار میانی است. از این رو، سیم پیچ نه تنها بصورت دیواره هایی باعث قطع نمودن زیر لایه مرزی آرام می‌شود، بلکه به مقدار قابل توجهی نیز باعث افزایش اغتشاش

نه تنها باعث افزایش انتقال حرارت نمی‌شود، بلکه مقادیر ضرایب انتقال حرارت کمتر از لوله صاف را می‌دهد. شکل ۳ که برای کمترین سرعت جرمی یعنی  $۲۰۶ \text{ kg/s-m}^2$  می‌باشد، ضرایب انتقال حرارت برای جریان داخل لوله های مختلف را در یک محدوده وسیع از کیفیت بخار با هم مقایسه می‌کند. مشاهده می‌شود که افزایش ضرایب انتقال حرارت تابع پیچیده‌ای از کیفیت بخار و هندسه لوله‌ها می‌باشد.

برای سرعت جرمی یکسان و گام کوئل یکسان  $۱۰ \text{ mm}$  در کیفیت بخار بالا، حداکثر افزایش انتقال حرارت برای لوله E با ضخیم‌ترین سیم پیچ ایجاد می‌شود، مادامیکه برای کیفیت بخار پایین روال بر عکس است و حداکثر افزایش انتقال حرارت در لوله A با نازک‌ترین سیم پیچ روی می‌دهد. برای سرعت جرمی یکسان و قطر سیم یکسان  $۱ \text{ mm}$ ، در کیفیت بخار بالا مشاهده شد که ضریب انتقال حرارت تابع پیچیده‌ای از گام کوئل می‌باشد و هیچ گام مشخصی حداکثر افزایش انتقال حرارت را تولید نمی‌کند، ولیکن بنظر می‌رسد که در کیفیت بخار پایین، حداکثر افزایش برای لوله D با کمترین گام کوئل تولید می‌شود.

با کمک روابط داده شده در مرجع [۱۰] و با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده برای لوله های زبر در تحقیق حاضر، ضخامت فیلم



شکل ۶: مقایسه ضرایب انتقال حرارت در لوله های مجهز به سیم پیچ و لوله های با نوار پیچیده شده.

پیچیده شده انجام گرفته است.

در مرجع [۹] اثر نصب نوار پیچیده شده در چگالش فرئون ۲۲ داخل لوله مسی افقی بقطر ۱۲/۷ mm بررسی شده است. شکل (۶) همچنین برای مقایسه داده های تجربی مرجع مذکور با داده های این تحقیق ترسیم شده است. داده های هردو تحقیق که در شکل (۶) مورد استفاده قرار گرفته اند، در سرعت جرمی یکسان  $\text{kg/s.m}^2$  ۲۳۶ و محدوده فشار چگالش ۱۶ bar تا ۱۸ bar جمع آوری شده اند. از این شکل مشاهده می شود که ضرایب انتقال حرارت برای کلیه لوله های مجهز به سیم پیچ بیشتر از ضرایب انتقال حرارت مربوط به لوله های مجهز به نوار پیچیده شده می باشد. مکانیزم اصلی افزایش انتقال حرارت در لوله های با سیم پیچ قطع توسعه زیر لایه مرزی آرام فیلم مایع و افزایش درجه اغتشاش جریان می باشد. سیم پیچ معمولاً جریان چرخشی ایجاد نمی کند [۱]. در سرمایش، جریان چرخشی می تواند اثر جابجایی گریز از مرکز

در فیلم مایع می گردد. با توسعه چگالش، ضخامت فیلم مایع افزایش می یابد و کیفیت بخار پایین، سیم پیچ ضخیم بطور کامل در داخل فیلم مایع قرار می گیرد. در این حالت، سیم پیچ بصورت دیواره های بلند عمل می کند و باعث کاهش نرخ اغتشاش در فیلم مایع می گردد. از این رو، در کیفیت بخار پایین، عملکرد سیم پیچ نازک بهتر است چون ضمن قطع توسعه زیر لایه مرزی آرام باعث افزایش اغتشاش در فیلم مایع می گردد.

### مقایسه سیم پیچ با نوار پیچیده شده

افراد متعددی از نوارهای پیچیده شده که در داخل لوله نصب می شود برای افزایش انتقال حرارت در چگالش بخار داخل لوله های افقی استفاده نموده اند [۱۱، ۱۲ و ۱۳]. حداکثر افزایش ضریب انتقال حرارت برای این تحقیقات ۳۰٪ و بنابراین کمتر از افزایش انتقال حرارت در کار حاضر می باشد که با استفاده از سیم پیچ به جای نوار

مختلف شامل رگراسیون های متعدد با ترکیبات مختلف پارامترها استفاده شد. در نهایت نتیجه گرفته شد که بهترین پارامتر برای انعکاس اثر هندسه سیم پیچ  $e^2/PD$  می باشد. از این رو در رابطه نهایی بجای دو ترم  $e/D$  و  $P/D$ ، از ترم  $e^2/PD$  استفاده شد.

در برخی روابط تجربی که برای تخمین ضرایب انتقال حرارت در چگالش بخار داخل لوله های با پره داخلی استفاده می شود. برای انعکاس اثر هندسه پره از پارامتر  $b^2/\bar{w}D$  استفاده شده است، که در آن  $\bar{w}$  متوسط فاصله بین پره ها در پایه و نوک آنها و  $b$  ارتفاع پره می باشد [۱۱ و ۱۴]. این در حالی است که برای جریان تک فاز داخل لوله با پره داخلی، از پارامترهای بدون بعد  $b/D$ ،  $h/D$  و یا  $\bar{w}/h$  استفاده شده است. بنظر می رسد که دلیل ضرورت استفاده از ترم  $b^2/\bar{w}D$  در چگالش این است که نقش ارتفاع پره در انتقال حرارت سیستمهای چگالش مهمتر از سیستمهای تک فازی است. این موضوع شاید بواسطه حرکت سیلابی مایع در فاصله بین پره ها باشد. در کار حاضر، پارامتر هندسی سیم پیچ،  $e^2/PD$ ، مشابه پارامتر  $b^2/\bar{w}D$  می باشد که قبلاً برای لوله های با پره داخلی استفاده شده است.

بنابراین با استفاده از رابطه لوله صاف، رابطه (۲) و با اضافه نمودن عدد رینولدز بخار و پارامتر منعکس کننده اثر سیم پیچ (شاخص سیم پیچ)، رابطه ای به شکل زیر در نظر گرفته می شود.

$$\bar{Nu} = C_1 Pr^{1/3} (GD_e/\mu_l)^{a_1} \left\{ \frac{(\rho_l/\rho_m)_{in}^{0.5} + (\rho_l/\rho_m)_{out}^{0.5}}{2} \right\}^{a_2} (\Delta X.D/L)^{a_3} [1 + c_2 (e^2/PD)^{a_4} \cdot (G_v D_e/\mu_v)^{a_5}] \quad (7)$$

از داده های تجربی جمع آوری شده در این تحقیق برای چگالش فرئون ۲۲ در لوله های مجهز به سیم پیجهای مختلف استفاده شد تا ثابتها و توانهای رابطه (۷) با استفاده از آنالیز رگراسیون حداقل مربعات بدست آید. هردو ضرایب انتقال حرارت واحدهای آزمایش<sup>۲</sup> و کل کندانسور<sup>۳</sup> مورد آزمایش بکار گرفته شدند. در نهایت رابطه زیر بدست آمد.

$$\bar{Nu} = 0.00132 Pr^{1/3} (GD_e/\mu_l)^{1.405} \left\{ \frac{(\rho_l/\rho_m)_{in}^{0.5} + (\rho_l/\rho_m)_{out}^{0.5}}{2} \right\}^{2.48} (\Delta x.D/L)^{0.706} [1 + 1.37 \times 10^6 (e^2/PD)^{0.39} (G_v D_e/\mu_v)^{-1.06}] \quad (8)$$

معکوس داشته باشد که باعث کاهش ضریب انتقال حرارت جابجایی گردد. عملکرد بهتر سیم پیچ نسبت به نوار پیچیده شده در چگالش ممکن است به این دلیل باشد.

## رابطه پیشنهادی برای جریان داخل لوله های مجهز به سیم پیچ

نظریه اینکه هیچگونه رابطه ای برای تخمین ضریب انتقال حرارت در چگالش بخار داخل لوله های با سیم پیچ وجود ندارد، در این قسمت یک رابطه تجربی کلی براساس داده های تجربی جمع آوری شده در تحقیق حاضر ارائه می گردد. روش معمول برای بدست آوردن رابطه در جریان افزایش یافته این است که رابطه جریان در لوله صاف را بعنوان مبنا در نظر گرفته و آنرا با اضافه نمودن ترمهایی که منعکس کننده اثر افزایش دهنده می باشد، اصلاح می کنند. در اینجا نیز همین روش دنبال می گردد.

در مطالعه نتایج انتقال حرارت دریافتیم که افزایش انتقال حرارت تابع پیچیده ای از عدد رینولدز بخار و هندسه لوله مجهز به سیم پیچ می باشد. در بدست آوردن رابطه، تمام پارامترهای موجود در معادله لوله صاف، رابطه (۲)، بعنوان مبنا استفاده شده و سه پارامتر عدد رینولدز بخار  $(G_v D_e/\mu_v)$ ، نسبت قطر سیم به قطر داخلی لوله  $(e/D)$  و نسبت گام کوئل به قطر داخلی لوله  $(P/D)$  به آن اضافه گردید. بایستی توجه شود که قطر داخلی لوله در عدد رینولدز بوسیله قطر معادل  $D_e$  جایگزین شده است. در واقع قطر معادل بصورت ۴ برابر نسبت حجم فضای آزاد جریان به سطح تر شده کل تعریف می شود.

$$D_e = (D^2 - e \cdot \gamma)(D + \gamma) \quad (4)$$

که در آن،

$$\gamma = \pi e(D - e) / (P \sin \alpha) \quad (5)$$

بالاخره تصمیم گرفته شد که از رابطه ای به فرم زیر استفاده شود.

$$\bar{Nu} = f \left\{ Pr, (GD_e/\mu_l), \left[ \frac{(\rho_l/\rho_m)_{in}^{0.5} + (\rho_l/\rho_m)_{out}^{0.5}}{2} \right], (\Delta X.D/L), e/D, P/D, (G_v D_e/\mu_v) \right\} \quad (6)$$

از آنالیز رگراسیون حداقل مربعات<sup>۱</sup> برای بررسی پیشنهادی



در پایان لازم به یادآوری است که در این تحقیق پارامترهای متعددی بوسیله وسایل اندازه‌گیری با درجات دقت مختلف اندازه‌گیری شده است. ضروری است که اثر ترکیب این خطاها بر روی مقادیر ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده بررسی شود. با استفاده از روش ارائه شده در مرجع [۱۵]، آنالیز خطای وسایل اندازه‌گیری<sup>۴</sup> بر روی نتایج محاسبه شده انجام گرفت. این کار برای تمام داده‌های جمع‌آوری شده انجام شد. ملاحظه گردید که حداکثر این خطا ۷٪ می‌باشد.

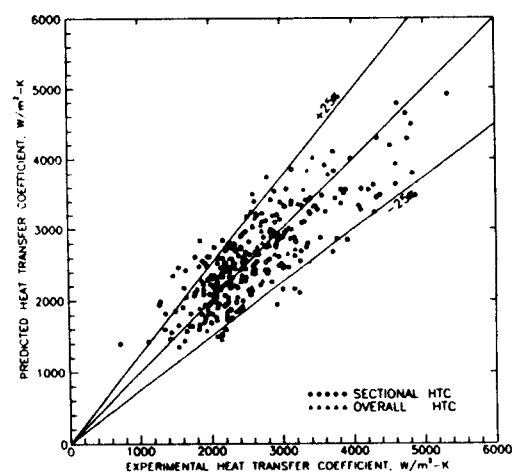
### نتیجه‌گیری

نتایج زیر از این کار تحقیقی بدست آمد.

- ۱ - نصب سیم پیچ در لوله‌های افقی باعث افزایش ضرایب انتقال حرارت تا ۱۰۰٪ بالاتر از مقادیر مربوط به لوله صاف مشابه گردید.
- ۲ - افزایش انتقال حرارت تابع پیچیده‌ای از عدد رینولدز بخار و هندسه سیم پیچ می‌باشد.
- ۳ - در چگالش، افزایش انتقال حرارت با استفاده از سیم پیچ بیشتر از نوار پیچیده شده می‌باشد.
- ۴ - نظریه اینکه هیچگونه رابطه‌ای برای محاسبه ضریب انتقال حرارت در چگالش بخار داخل لوله با سیم پیچ وجود نداشت، براساس داده‌های تجربی این تحقیق، رابطه‌ای بدست آورده شد. ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده بوسیله این رابطه در محدوده  $\pm 25\%$  مقادیر تجربی برای بیشترین داده‌ها می‌باشد.

انحراف متوسط<sup>۱</sup> و انحراف استاندارد<sup>۲</sup> ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده بوسیله رابطه پیشنهادی بالا از مقادیر تجربی این بررسی به ترتیب ۱/۳۱٪ و ۱۸/۲۶٪ می‌باشد. همچنین ضریب رابطه<sup>۳</sup> برابر ۰/۹۵ و تعداد نقاط داده‌ای که در بدست آوردن این رابطه استفاده شده ۳۲۷ عدد می‌باشد.

شکل (۷) مقایسه‌ای بین ضرایب انتقال حرارت محاسبه شده از رابطه پیشنهادی و مقادیر اندازه‌گیری شده در این تحقیق را نشان می‌دهد. می‌توان دید که بیش از ۹۰٪ مقادیر تخمین زده شده در محدوده  $\pm 25\%$  مقادیر تجربی قرار دارند. بنابراین همخوانی خیلی خوبی بین مقادیر مشاهده شده و رابطه پیشنهادی وجود دارد.



شکل ۷: مقایسه مقادیر تجربی با مقادیر محاسبه شده از رابطه (۸).

### مراجع

- 1 - Chiou, J. P. (1987). "Experimental investigation of the augmentation of forced convection heat transfer in a circular tube using spiral spring inserts." *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 109, PP. 300-307.
- 2 - Larson, R. L. (1948). "Effects of turbulence promoters in refrigerant evaporator coils." *J. ASRE, Refri. Engg.*, PP. 1193-1195.
- 3 - Miro, C. R. and Cox, J. E. (1993). "Montreal protocol revised in Copenhagen." *ASHRAE J.*, 14(Feb).
- 4 - Chiang, R. (1993). "Heat transfer and pressure drop during evaporation and condensation of Refrigerant-22 in 7.5 mm and 10 mm diameter axial and helical grooved tubes." *Heat transfer-Atlanta 1993, AIChE Symposium Series*, Vol. 89, PP. 205-210.
- 5 - Cleland, A. C. (1986). "Computer subroutines for rapid evaluation of refrigerant thermodynamic properties." *Int. J. Refrig.*, Vol. 9, PP. 346-351.
- 6 - Charters, W. W. S. and Sadafi, H. A. (1987). "Saturation property equations for R22." *Int. J. Refrig.*, Vol. 10, PP. 103-104.
- 7 - Boyko, L. D. and Kruzhilin, G. N. (1967). "Heat transfer and hydraulic resistance

- during condensation of steam in a horizontal tube and in a bundle of tubes." *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 10, PP. 361-373.
- 8 - Kaushik, N. and Azer, N. Z. (1988). "A general heat transfer correlation for condensation inside internally finned tubes." *ASHRAE Trans.*, Vol. 94, part 2, PP. 261-279.
- 9 - Lal, S. N. (1992). "Experimental studies on condensation of refrigerant by turbulence promoter." Ph.D. thesis, Mech. & Ind. Engg. Dept., Univ. of Roorkee, Roorkee- 247667, India.
- 10 - Soliman, H. M. (1982). "On the annular to wavy flow pattern transition during condensation inside horizontal tubes." *Canadian J. Chem. Engg.*, Vol. 60, PP. 475-481.
- 11 - Royal, J. H. and Bergles, A. E. (1978). "Augmentation of horizontal in-tube condensation by means of twisted tape inserts and internally finned tubes." *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 100, PP. 17-24.
- 12 - Luu, M. and Bergles, A. E. (1980). "Enhancement of horizontal in-tube condensation of R-113." *ASHRAE Trans.*, Vol. 86, Part 1, PP. 293-311.
- 13 - Said, S. A. and Azer, N. Z. (1983). "Heat transfer and pressure drop during condensation inside horizontal tubes with twisted tape inserts." *ASHRAE Trans.*, Vol. 89, Part 1A, PP. 96-113.
- 14 - Luu, M. and Bergles, A. E. (1981). "Augmentation of in-tube condensation of R-113 by means of surface roughness." *ASHRAE Trans.*, Vol. 87, Part 2, PP. 33-50.
- 15 - Schultz, R. R. and cole, R. (1979). "Uncertainty analysis in boiling nucleation." *AIChE Symp. Series*, No.189, Vol. 75, PP. 32-38.

### واژه نامه :

1 - Active and Pasive Techniques	روشهای مختلف فعال و غیرفعال
2 - Twisted Tape	نوار پیچیده شده
3 - Wire Mesh or Brush	شبه سیم یا برس
4 - Coiled Wire	سیم پیچ
5 - Pre - Condenser	پیش کندانسور
6 - After-Condenser	کندانسور ثانوی
7 - Heat Flux	فلوی حرارتی
8 - Smooth Curves	منحنی های صاف
9 - Annular Flow	جریان حلقوی
10 - Wavy Flow	جریان موجی
11 - Least Square Regression Analysis	آنالیز رگرسیون حداقل مربعات
12 - Test Sections	واحدهای آزمایش
13 - Test Condenser	کندانسور آزمایش
14 - Mean Deviation	انحراف متوسط
15 - Standard Deviation	انحراف استاندارد
16 - Correlation Coefficient	ضریب رابطه
17 - Uncertainty Analysis	آنالیز خطای وسایل اندازه گیری