

# ارزیابی عملکرد نوارهای پیچیده شده در افزایش انتقال حرارت چگالشی و تأثیر آن بر میزان افت فشار

محمد علی اخوان بهابادی<sup>۱\*</sup> و وحیدحجازی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۱۲/۲۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۷/۱۷، تاریخ تصویب ۸۷/۸/۱۱)

## چکیده

در این تحقیق به بررسی افزایش انتقال حرارت توسط نوارهای پیچیده شده در داخل کندانسور و تأثیر همزمان آن بر میزان افت فشار چگالشی مبرد R-۱۳۴a پرداخته می شود. هدف از این آزمایش رسیدن به بالاترین میزان انتقال حرارت در افت فشار بهینه می باشد. بدین منظور یک سیکل تبرید تراکمی بخار طراحی، ساخته و نصب شد. کندانسور تحت آزمایش یک مبدل حرارتی دو لوله ای بوده که قطر داخلی لوله میانی که مبرد R-134a در آن جریان دارد برابر ۱۰/۷ mm و قطر خارجی این لوله برابر ۱۲/۷ mm و طول آن ۱/۰۴ m می باشد. به طور کلی تعداد ۲۱۶ اجرا بر روی یک لوله صاف و چهار لوله مجهز به نوار پیچیده شده با نسبت های پیچش ۶، ۹، ۱۲، و ۱۵ صورت می پذیرد. این آزمایش ها برای ۶ سرعت جرمی متفاوت ۵۶/۴۴، ۶۹/۴۹، ۸۲/۳۸، ۹۶/۵۲، ۱۱۳/۳۲ و ۱۳۰/۹ kg/m<sup>2</sup>s انجام می گردد. پس از جمع آوری کلیه داده ها و بررسی آن ها مشاهده شد که نوارهای پیچیده شده در بهترین حالت (نسبت پیچش ۶) میزان انتقال حرارت را تا ۴۰٪ نسبت به لوله صاف افزایش داده و میزان افت فشار را نیز در بدترین حالت (نسبت پیچش ۶) تا ۲۴٪ نسبت به لوله صاف افزایش می دهند. هم چنین این نتیجه حاصل شد که بهترین عملکرد مربوط به نوار با نسبت پیچش ۹ می باشد که در حین بهبود انتقال حرارت بیشتر، کمترین توان افت فشار را متحمل می شود.

**واژه های کلیدی:** انتقال حرارت، چگالش، افت فشار، نوار پیچیده شده، نسبت پیچش، R-۱۳۴a

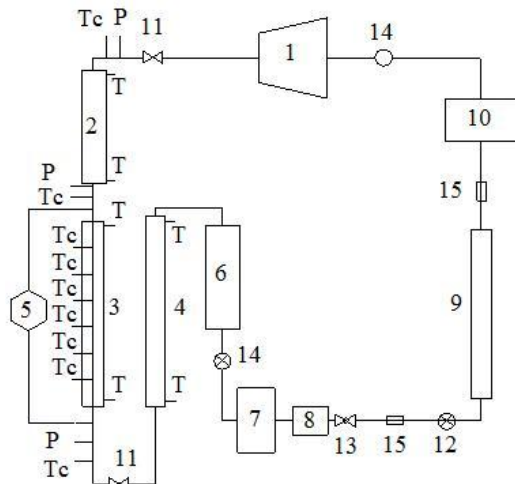
## مقدمه

در سال های اخیر، با توجه به محدودیت منابع انرژی استفاده از فناوری های مختلف به منظور افزایش انتقال حرارت در مبدل های حرارتی به یکی از زمینه های تحقیقاتی فعال تبدیل شده است. در صنایع مختلف نظیر یخچال سازی و کولر سازی به طور معمول از سطوح افزایشی در مبدل های حرارتی استفاده می کنند. در واقع هر مبدل نامزد بالقوه ای برای افزایش انتقال حرارت می باشد. بدین منظور از روش های مختلف فعال و غیر فعال<sup>۱</sup>، جهت افزایش انتقال حرارت استفاده می شود. یکی از روش های غیرفعال، استفاده از تجهیزات درون لوله ای مانند نوار پیچیده شده<sup>۲</sup> می باشد. استفاده از این وسایل به علت راحتی نصب و مقرون به صرفه بودن به لحاظ اقتصادی از رایج ترین روش ها جهت افزایش انتقال حرارت می باشد. بدیهی است که این وسایل علاوه بر ضریب انتقال حرارت، افت فشار را نیز افزایش می دهند. بنابراین، برای داشتن یک کندانسور با عمل کرد مطلوب، به دست آوردن حداکثر انتقال حرارت در افت فشار بهینه، یکی از اهداف اولیه طراحی محسوب می گردد.

با بررسی منابع موجود به این نتیجه می رسیم که اگر چه مطالعات زیادی در مورد روشهای مختلف افزایش انتقال حرارت در چگالش بخار داخل لوله های افقی، با نصب نوار پیچیده شده به عنوان افزایش دهنده انتقال حرارت صورت گرفته [۱-۴]، لیکن کارهای انجام شده در مورد استفاده از نوار پیچیده شده در داخل لوله های افقی در چگالنده یک سیکل تبرید با مبرد R-۱۳۴a بسیار نادر می باشد [۵] و در مورد بررسی هم زمان میزان افزایش افت فشار حاصله، اصولاً کاری انجام نشده است.

با توجه به اینکه در کندانسورهای مورد استفاده در صنایع تبرید و تهویه مطبوع، به دلیل خاصیت تر کنندگی مبردها، چگالش فقط به صورت لایه ای صورت می گیرد و از آنجا که ضریب هدایت حرارتی مبرد مایع پائین است، نیاز به استفاده از وسیله افزایش انتقال حرارت در سمت مبرد احساس می شود [۶].

در سال های اخیر، با توجه به محدودیت منابع انرژی استفاده از فناوری های مختلف به منظور افزایش انتقال حرارت در مبدل های حرارتی به یکی از زمینه های تحقیقاتی فعال تبدیل شده است. در صنایع مختلف نظیر یخچال سازی و کولر سازی به طور معمول از سطوح افزایشی در مبدل های حرارتی استفاده می کنند. در واقع هر مبدل نامزد بالقوه ای برای افزایش انتقال حرارت می باشد. بدین منظور از روش های مختلف فعال و غیر فعال<sup>۱</sup>، جهت افزایش انتقال حرارت استفاده می شود. یکی از روش های غیرفعال، استفاده از تجهیزات درون لوله ای مانند نوار پیچیده شده<sup>۲</sup> می باشد. استفاده از این وسایل به علت راحتی نصب و مقرون به صرفه بودن به لحاظ اقتصادی از رایج ترین روش ها جهت افزایش انتقال حرارت می باشد. بدیهی است که این وسایل علاوه بر ضریب انتقال حرارت، افت فشار را نیز افزایش می دهند. بنابراین، برای داشتن یک کندانسور با عمل کرد مطلوب، به دست آوردن حداکثر انتقال حرارت در افت فشار بهینه، یکی از



شکل ۱: نمودار دستگاه آزمایش.

1- Compressor	10- Accumulator
2- Pre-Condenser	11- Shut Off Valve
3- Test Condenser	12- Control Valve
4- After Condenser	13- Expansion Valve
5- DP	14- Sight Glass
6- Rotameter	15- Electrical Isolation
7- Receiver	TC- Thermocouple (T)
8- Filter-Drier	T- Thermocouple (PT100)
9- Evaporator	P- Pressure Gauge

در این مطالعه آزمایش بر روی لوله هایی با نوارهای پیچیده شده با نسبت های متفاوت پیچش ۶، ۹، ۱۲، و ۱۵ و لوله صاف انجام شد. نسبت پیچش از تقسیم گام نوار در یک پیچش ۱۸۰ درجه ای بر قطر داخلی لوله حاصل شد. جنس نوارها از فولاد زنگ نزن<sup>۸</sup> بوده و مشخصات ابعادی آنها در جدول (۱) نشان داده شده است. مشخصه های مورد استفاده عبارتند از: طول لوله  $L$ ، نسبت پیچش  $\gamma$ ، ضخامت نوار  $\delta_n$ ، و قطر داخلی لوله  $d_i$ .



شکل ۲: تصویر دستگاه آزمایش.

بنابراین مطالعه حاضر بر روی مبرد R-134a صورت پذیرفت، که پتانسیل تخریب لایه ازن<sup>۳</sup> (ODP) آن صفر می باشد و به همین دلیل استفاده از آن رو به افزایش است [۷].

## ساختار آزمایش

برای انجام آزمایش یک سیستم چگالش درون لوله ای طراحی، ساخته و نصب گردید. در واقع این دستگاه یک سیکل تبرید تراکمی بخار مجهز به کلیه وسایل اندازه گیری مورد نیاز می باشد. این سیستم به صورت نمودار در شکل (۱) و هم چنین تصویر آن در شکل (۲) به نمایش در آمده است. کندانسور مورد آزمایش<sup>۴</sup> یک مبدل حرارتی دو لوله ای از نوع جریان مخالف<sup>۵</sup> می باشد که آب خنک کن در حلقه خارجی آن جریان داشته و مبرد در لوله داخلی چگالیده می شود. لوله داخلی آن از جنس مس بوده با قطر داخلی ۱۰/۷ mm، قطر خارجی ۱۲/۷ mm، و طول ۱/۰۴mm می باشد.

دمای سطح خارجی لوله میانی در شش مقطع و در هر مقطع در دو نقطه بالا و پائین توسط ترموکوپل هایی از نوع T اندازه گیری می شود. همچنین دمای مبرد و دمای آب خنک کن در ورود و خروج از کندانسور اصلی (تست کندانسور) اندازه گیری می شود. افت فشار کل داخل کندانسور اصلی توسط دستگاه اندازه گیری افت فشار (DP) که برای ۱۵۰-۰ kPa کالیبره شده است، تعیین می گردد. به علاوه فشار استاتیکی مبرد در ورود و خروج از کندانسور اصلی اندازه گیری می شود.

برای آن که در ورود به کندانسور اصلی مبرد دارای کیفیت مطلوب باشد از یک کندانسور اولیه<sup>۶</sup> استفاده می شود تا بتوان آزمایش ها را برای محدوده نسبتا وسیعی از کیفیت بخار انجام داد. هم چنین برای آن که مبرد خروجی قبل از ورود به دبی سنج کاملاً مایع شده باشد از یک کندانسور ثانویه<sup>۷</sup> استفاده می گردد. همه کندانسورها توسط پشم شیشه عایق بندی می شوند. مشخصه هایی از قبیل دبی مبرد و دبی آب نیز اندازه گیری می گردند. هم چنین دمای مبرد قبل و بعد از کندانسور اولیه و ثانویه توسط ترموکوپل های نوع T و دمای آب قبل و بعد از این دو کندانسور و کندانسور اصلی توسط ترموکوپل های نوع PT100 که جداگانه تنظیم شده بودند به دست می آید.

جمله ویسکوزیته از [۹] استفاده شده است.

ضریب انتقال حرارت در کندانسور اصلی از رابطه زیر به دست می آید :

$$\bar{h} = \left[ \frac{\pi d_i L (t_s - t_{wo})}{\dot{m}_w C_{pw} (T_{wo} - T_{wi})} - \frac{d_i}{2k_w} \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right) \right]^{-1} \quad (1)$$

که در آن،  $\bar{h}$  ضریب انتقال حرارت متوسط،  $d_i$  و  $d_o$  به ترتیب قطرهای داخلی و خارجی لوله مسی،  $L$  طول کندانسور اصلی،  $t_s$  درجه حرارت اشباع متوسط مبرد،  $t_{wo}$  درجه حرارت متوسط سطح خارجی لوله میانی،  $\dot{m}_w$ ،  $C_{pw}$ ،  $T_{wo}$  و  $T_{wi}$  به ترتیب دبی جرمی مبرد، گرمای ویژه، دمای ورودی و دمای خروجی آب خنک کن و  $k_w$  ضریب هدایت حرارتی دیواره لوله می باشد. برای محاسبه کیفیت بخار در ورودی و خروجی کندانسور از موازنه حرارتی استفاده نمودیم. کیفیت بخار متوسط نیز به صورت میانگین کیفیت بخار ورودی و خروجی کندانسور اصلی محاسبه می شود.



شکل ۴: انواع نوارهای مورد آزمایش.

## ارائه نتایج و بحث و بررسی

### ضریب انتقال حرارت

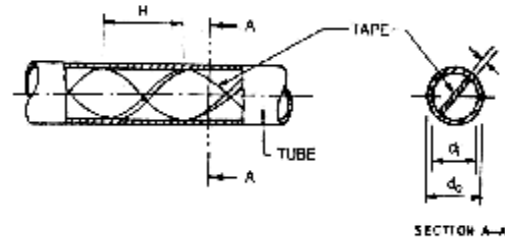
تغییرات ضریب انتقال حرارت لوله های مجهز به نوار پیچیده شده و لوله صاف نسبت به کیفیت بخار در شکل های (۵) تا (۹) نشان داده شده است. سه شکل نخست برای نشان دادن تأثیر گام نوار (نسبت پیچش) بر افزایش ضریب انتقال حرارت در سرعت جرمی ثابت و دو شکل بعدی (۸ و ۹) جهت نمایش اثر سرعت جرمی بر افزایش ضریب انتقال حرارت در نسبت پیچش معین ترسیم شده است.

جدول ۱: مشخصات لوله های دارای نوار پیچیده شده.

شماره	$d_i$ (mm)	L (mm)	$\delta_{tt}$ (mm)	Y
۱	۱۰/۷	۱۰۴۰	۰/۷	۶
۲	۱۰/۷	۱۰۴۰	۰/۷	۹
۳	۱۰/۷	۱۰۴۰	۰/۷	۱۲
۴	۱۰/۷	۱۰۴۰	۰/۷	۱۵
۵	۱۰/۷	۱۰۴۰	لوله صاف	

این نوارها به گونه ای ساخته می شوند که کاملاً به دیواره داخلی لوله بچسبند و یا حداقل میزان آزادی را دارا باشند.

در شکل (۳) یک نمونه از لوله با نوار پیچیده شده آورده شده است. شکل (۴) انواع نوارهای مورد استفاده در آزمایش را نشان می دهد.



شکل ۳: یک نمونه لوله دارای نوار پیچیده شده.

## جمع آوری و تحلیل داده ها

در مجموع ۲۱۶ آزمایش با شش سرعت جرمی متفاوت مبرد برای جریان داخل لوله صاف و داخل لوله های مجهز به نوار پیچیده شده انجام شد. محدوده مشخصه های مختلف آزمایش در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲: محدوده مشخصه های آزمایش.

کیفیت متوسط بخار	۰/۱-۰/۹۵
نسبت پیچش	۶-۱۵
درجه حرارت چگالش متوسط	۱۹/۴-۳۳/۲ °C
درجه حرارت آب خنک کن	۹/۳-۱۱/۵ °C
دبی جرمی آب خنک کن	۰/۲۱-۰/۱۷۶ kg/s
شارحرارتی کندانسور اصلی	۵/۱-۲۷/۶ kW/m <sup>2</sup>
سرعت جرمی مبرد	۵۶- ۱۳۰ kg/m <sup>2</sup> s

برای محاسبه درجه حرارت اشباع و آنتالپی های اشباع و سوپررहित R-۱۳۴a از مرجع [۸] و سایر خواص از

نتیجه گرفت که عموماً ورود نوار پیچیده شده به داخل لوله افقی، ضریب انتقال حرارت را به اندازه قابل توجهی افزایش می دهد. بهبود ضریب انتقال حرارت برای یک نوار پیچیده شده خاص ثابت نبوده، بلکه تابع پیچیده ای از سرعت جرمی، کیفیت بخار و ابعاد فیزیکی نوار پیچیده شده می باشد. بهترین نوار پیچیده شده در ناحیه با کیفیت بخار بالا ( نوار پیچیده شده با نسبت پیچش ۶ و در سرعت جرمی  $130/9 \text{ kg/sm}^2$  ) ضریب انتقال حرارت را تا ۴۰٪ نسبت به لوله ساده مشابه افزایش داده است.

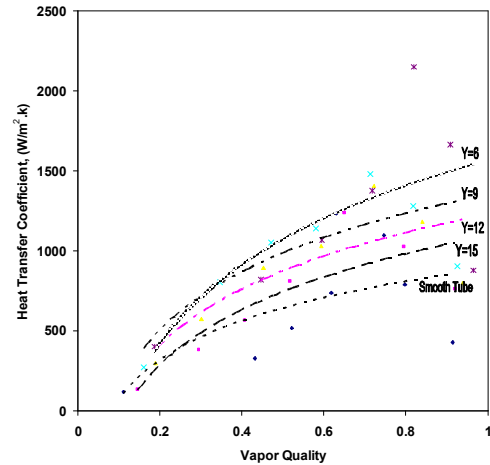
از شکل های (۵) تا (۹) نتیجه می شود که به طور کلی ضریب انتقال حرارت با افزایش کیفیت بخار افزایش می یابد. این پدیده بدین سبب است که در کیفیت بخار بالا، لایه مایع روی دیواره داخلی لوله نازک تر بوده باعث مقاومت حرارتی کمتر می شود.

همچنین از شکل های (۸) و (۹) می توان نتیجه گرفت که عموماً ضریب انتقال حرارت با افزایش سرعت جرمی، افزایش می یابد، هر چند در نواحی خاصی از کیفیت بخار پائین گاهی رفتار عکس مشاهده می شود که احتمالاً این نقاط نزدیک ناحیه گذار از جریان حلقوی به جریان موجی قرار دارند. اثر سرعت جرمی کاملاً قابل درک بوده و معمولاً براساس آثار جا به جایی بزرگ تر در سرعت جرمی بالاتر توجیه می شود. در حقیقت سرعت جرمی بالاتر باعث آشفتگی بیشتر در لایه مایع چگالیده و در نتیجه افزایش میزان چگالش می گردد.

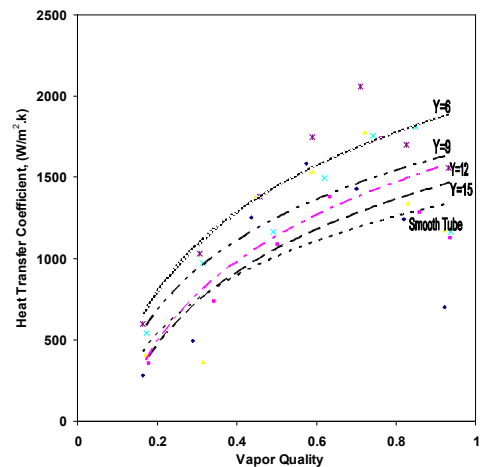
از شکل های (۵) تا (۷) که هر کدام برای یک سرعت جرمی خاص رسم شده، می توان دریافت که با کاهش گام (کاهش نسبت پیچش)، انتقال حرارت افزایش می یابد. علت این است که هر چه گام کوچک تر باشد، میزان آشفتگی و چرخش القاء شده در لایه مایع و هسته بخار افزایش یافته و در نتیجه میزان انتقال حرارت زیاد می گردد.

### افت فشار

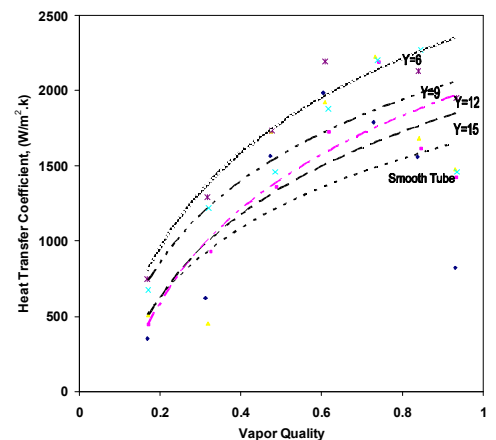
تغییرات افت فشار لوله های مجهز به نوار پیچیده شده و لوله صاف نسبت به کیفیت بخار در شکل های (۱۰) تا (۱۴) نشان داده شده است. سه شکل نخست برای نشان دادن تأثیر گام نوار (نسبت پیچش) بر افزایش افت فشار در سرعت جرمی ثابت و دو شکل (۱۳ و ۱۴) جهت نمایش



شکل ۵: مقایسه ضرایب انتقال حرارت برای لوله های مجهز به نوار پیچیده شده در سرعت جرمی  $56/44 \text{ kg/m}^2.s$ .



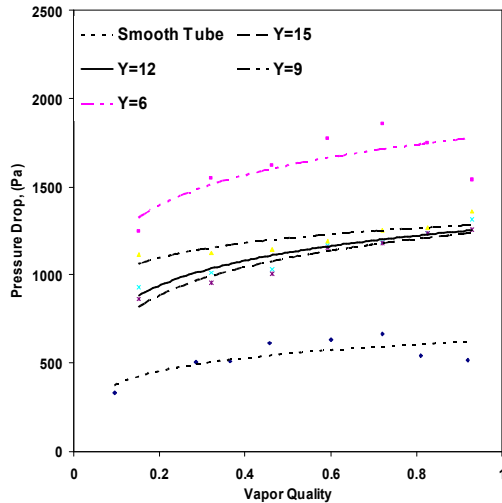
شکل ۶: مقایسه ضرایب انتقال حرارت برای لوله های مجهز به نوار پیچیده شده در سرعت جرمی  $95/62 \text{ kg/m}^2.s$ .



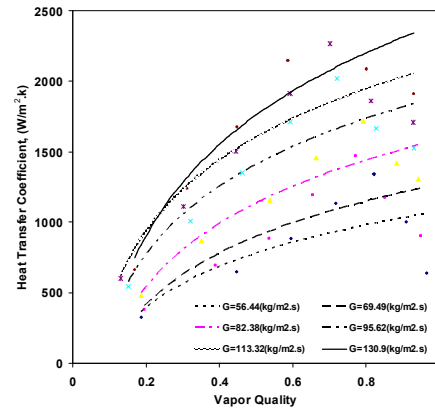
شکل ۷: مقایسه ضرایب انتقال حرارت برای لوله های مجهز به نوار پیچیده شده در سرعت جرمی  $130/9 \text{ kg/m}^2.s$ .

بر اساس بررسی دقیق شکل های (۵) تا (۷) می توان

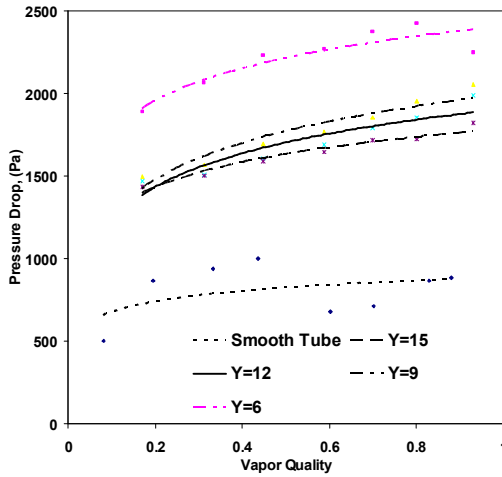
اثر سرعت جرمی بر میزان افت فشار در نسبت پیچش معین ترسیم شده است. همچنین شکل (۱۵) تغییرات نسبت افت فشار لوله با نوار پیچیده شده به لوله صاف با نسبت پیچش را برای تمامی سرعت های جرمی نشان می دهد.



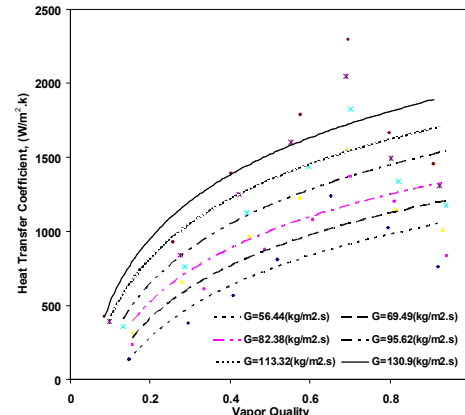
شکل ۱۱: مقایسه مقادیر افت فشار برای لوله های مجهز به نوار پیچیده شده در سرعت جرمی  $۹۵/۶۲ \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ .



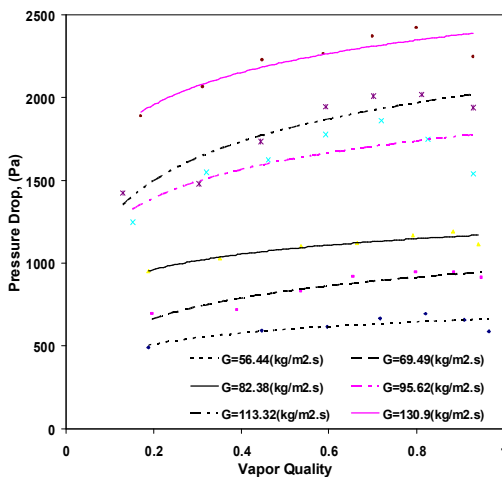
شکل ۸: تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار در لوله دارای نوار با نسبت پیچش ۶ و در سرعت های جرمی مختلف.



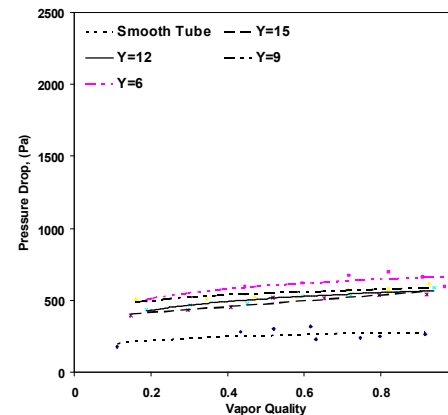
شکل ۱۲: مقایسه مقادیر افت فشار برای لوله های مجهز به نوار پیچیده شده در سرعت جرمی  $۱۳۰/۹ \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ .



شکل ۹: تغییرات ضریب انتقال حرارت با کیفیت بخار در لوله دارای نوار با نسبت پیچش ۱۵ و در سرعت های جرمی مختلف.



شکل ۱۳: تغییرات افت فشار با کیفیت بخار برای لوله مجهز به نوار پیچیده شده با نسبت پیچش ۶.



شکل ۱۰: مقایسه مقادیر افت فشار برای لوله های مجهز به نوار پیچیده شده در سرعت جرمی  $۵۶/۴۴ \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ .

پیچیده شده میزان افت فشار را در حدود ۲۴۰٪ نسبت به لوله صاف مشابه افزایش می دهد.

همان‌طور که در شکل های (۱۰) تا (۱۲) دیده می شود با افزایش کیفیت بخار، افت فشار افزایش می یابد. علت این است که با ازدیاد کیفیت بخار، حجم توده بخار و سرعت آن نسبت به لایه مایع افزایش می یابد که این امر موجب افزایش میزان تنش برشی بین دو فاز و در نتیجه افزایش افت فشار اصطکاکی می گردد.

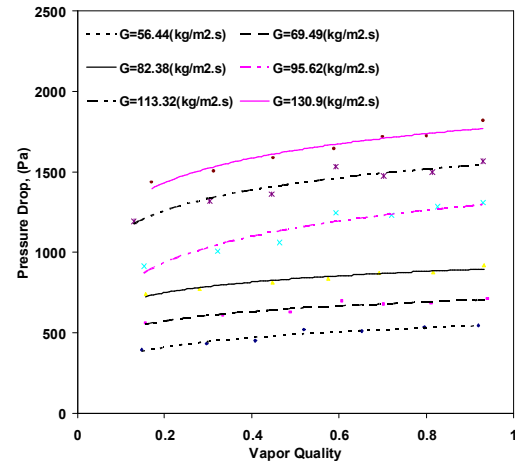
شکل های (۱۳) و (۱۴) بیانگر این مسئله است که عموماً افت فشار با افزایش سرعت جرمی زیاد می شود. این مورد به دلیل افزایش تنش برشی لایه مایع نسبت به دیواره داخلی لوله و سطح نوار حاصل می گردد. به علاوه در شکل های (۱۰) تا (۱۲) مشاهده می شود که با کاهش نسبت پیچش، افت فشار افزایش می یابد که دلیل عمده آن، پیمودن مسیر طولانی تر توسط مبرد در داخل کندانسور در نسبت های پیچش کوچک تر می باشد.

### ارزیابی عمل کرد نوارهای پیچیده شده

با تحلیل داده های مذکور مشاهده گردید که نصب نوارهای پیچیده شده در داخل لوله کندانسور، علاوه بر انتقال حرارت، افت فشار را نیز افزایش می دهد. در تحقیق حاضر این نوارها ضریب انتقال حرارت را در بهترین حالت ۴۰٪ و افت فشار را در بدترین حالت ۲۴۰٪ افزایش داده اند. حال سوالی که مطرح می شود این است که آیا میزان افزایش انتقال حرارت به دست آمده در برابر افزایش افت فشار حاصله به صرفه می باشد یا خیر؟

با توجه به این که ضرایب انتقال حرارت و افت فشار دو عامل مستقل بوده که توسط رابطه ای خاص به یک دیگر مرتبط نمی شوند، مقایسه این دو ساده نمی باشد. بنابراین باید عامل سومی را در نظر گرفت که با هر دو رابطه داشته و بتواند شرایط قیاس برای این دو عامل را ایجاد نماید.

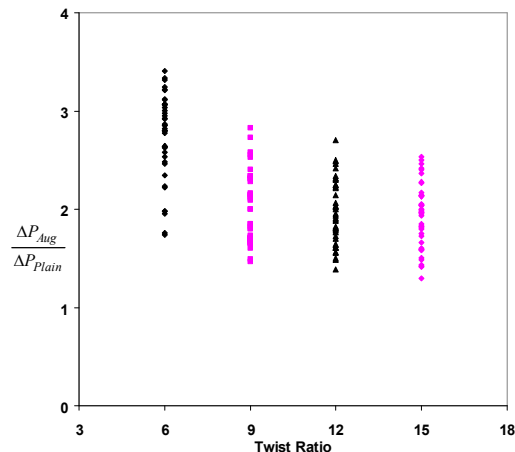
این عامل سوم می تواند نسبت توان مصرفی کمپرسور در طول تست کندانسور به گرمای مبادله شده از طریق تست کندانسور، HP/Q، یا نسبت توان مصرفی کمپرسور در طول تست کندانسور به ضریب انتقال حرارت، HP/h، باشد. آذر و همکارانش [۱۰] در ارزیابی عمل کرد مخلوط کن های استاتیکی<sup>۹</sup> در انتقال حرارت چگالشی داخل لوله های افقی، از نسبت توان پمپاژ<sup>۱۰</sup> به نرخ انتقال



شکل ۱۴: تغییرات افت فشار با کیفیت بخار برای لوله مجهز به نوار پیچیده شده با نسبت پیچش ۱۵.

از بررسی این شکل‌ها می توان نتیجه گرفت که به طور کلی ورود نوار پیچیده شده به داخل لوله کندانسور، میزان افت فشار را افزایش می دهد که به علت افزایش سطح تماس داخل لوله با مبرد و هم چنین افزایش طول مسیر پیموده شده به وسیله مبرد در داخل لوله اتفاق می افتد.

در شکل (۱۵) که تغییرات نسبت افت فشار لوله با نوار پیچیده شده به لوله صاف با نسبت پیچش را نشان می دهد، مشاهده می شود که نسبت افت فشار برای نسبت پیچش ۶، از ۱/۷ تا ۳/۴ متغیر بوده در حالی که برای نسبت پیچش ۱۵، تغییرات آن از ۱/۳ تا ۲/۵ می باشد.



شکل ۱۵: تغییرات نسبت افت فشار لوله های با نوار پیچیده شده به لوله صاف با نسبت پیچش.

همچنین از شکل های (۱۲) و (۱۵) نتیجه می شود که در بدترین شرایط (نسبت پیچش ۶ و سرعت جرمی ۱۳۰/۹ kg/m<sup>2</sup>s و کیفیت بخار حدود ۰/۹۵)، نوار



در این جا ابتدا نسبت توان مصرفی کمپرسور در طول تست کندانسور به ضریب انتقال حرارت مربوط به جریان چرخشی را محاسبه نموده و سپس میزان توان مصرفی کمپرسور در طول تست کندانسور به ضریب انتقال حرارت لوله صاف محاسبه می شود. سپس نسبت اول به نسبت دوم تقسیم می گردد تا مطابق رابطه زیر نسبت  $R_{\Delta P} / R_h$  به دست آید :

$$\left( \frac{\dot{V} \cdot \Delta P}{h} \right)_{Swirl} = \frac{\left[ \frac{\Delta P_{Swirl}}{\Delta P_{plain}} \right]}{\left[ \frac{h_{Swirl}}{h_{plain}} \right]} = \frac{R_{\Delta P}}{R_h} \quad (5)$$

در مواردی که این نسبت کوچک تر از یک باشد، استفاده از نوارهای پیچیده شده به صرفه می باشد، در غیر این صورت همان طوری که قبلاً اشاره شد، تنها تحت شرایط خاص و برای کاربردهای معین با در نظر گرفتن سازش مناسب میان بهبود انتقال حرارت و میزان توان انرژی حاصل از افت فشار می توان از نوارهای پیچیده شده استفاده نمود.

در شکل (۱۶) تغییرات  $R_{\Delta P} / R_h$  نسبت به سرعت جرمی برای لوله های مجهز به نوار پیچیده شده با نسبت های پیچش متفاوت نشان داده شده است. همان طور که در این نمودار مشاهده می شود، به جز تعداد بسیار اندکی از نقاط، سایر نقاط در بالای مقدار یک قرار می گیرند که مطابق توضیحات ارائه شده مطلوب نمی باشد. به همین علت استفاده از نوارهای پیچیده شده در حالت کلی توصیه نمی شود، ولیکن در موارد خاص که ضرورت ایجاد نماید به عنوان مثال در جایی که به علت کمبود فضا نیاز به مبدل های فشرده تر و کوچک تر باشد و مقوله افزایش توان پمپاژ در درجه دوم اهمیت قرار داشته باشد می توان از این نوارها استفاده کرد.

همچنین از شکل (۱۶) نتیجه می شود که بهترین عمل کرد مربوط به نوار با نسبت پیچش ۹ می باشد. نوار با نسبت پیچش ۱۵، در سرعت های جرمی پائین عمل کرد بدتری نسبت به سرعت های جرمی بالاتر دارد. نوارهای با نسبت پیچش ۶ و ۱۲ رفتاری متفاوت با نوار با نسبت پیچش ۱۵ دارند و با کاهش سرعت جرمی عمل کرد آنها بهبود می یابد.

حرارت به عنوان یک شاخص ارزیابی استفاده نمودند. توان پمپاژ از حاصل ضرب دبی حجمی مایع و افت فشار تست کندانسور به صورت زیر به دست می آید.

$$\dot{W} = \dot{V} \cdot \Delta P \quad (2)$$

که در آن  $\dot{W}$  میزان توان پمپاژ لازم برای جاری کردن سیال در کندانسور،  $\dot{V}$  دبی حجمی مبرد و  $\Delta P$  افت فشار داخل کندانسور می باشد.

شاخص آنها تحت قیود هندسه ثابت، دبی جرمی یکسان مبرد، و دما و دبی جرمی یکسان آب خنک کننده، ارزیابی گردید. سپس نموداری براساس این شاخص در مقابل رینولدز مایع برای لوله های مختلف تهیه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که افت فشار در واحد نرخ انتقال حرارت لوله های با نوار پیچیده شده بزرگ تر از مقادیر نظیرش در لوله صاف می باشد. یعنی در حالت کلی استفاده از مخلوط کن های استاتیکی به صرفه نمی باشد، لیکن برای کاربردهای معین و خاص بر اساس سازش میان بهبود انتقال حرارت و توان انرژی حاصل از افزایش افت فشار می توان از لوله های مجهز به سطوح افزایش یافته به جای لوله صاف استفاده نمود.

رویال و برگلز [۱۱] دو معیار را به منظور ارزیابی عمل کرد سطوح افزایشی در نظر گرفتند. آن ها معیار اول در عمل کرد بهینه کندانسورها را کاهش اندازه کندانسور به وسیله جایگزینی لوله های صاف با لوله های دارای سطوح افزایشی در نظر گرفته و معیار زیر را ارائه نمودند:

$$R_{\alpha} = \left\{ \frac{A_{aug}}{A_{plain}} \right\} \quad (3)$$

با به کار بردن این معیار برای انتخاب های ممکن فناوری های افزایشی، واضح بود که آن فناوری که  $R_{\alpha}$  بزرگ تری داشت، انتخاب می گردید. از طرف دیگر آنها برای لحاظ کردن تأثیرات افت فشار سطوح افزایشی، معیار دیگری را به صورت زیر مطرح نمودند :

$$R_{\Delta P} = \left\{ \frac{\Delta P_{aug}}{\Delta P_{plain}} \right\} \quad (4)$$

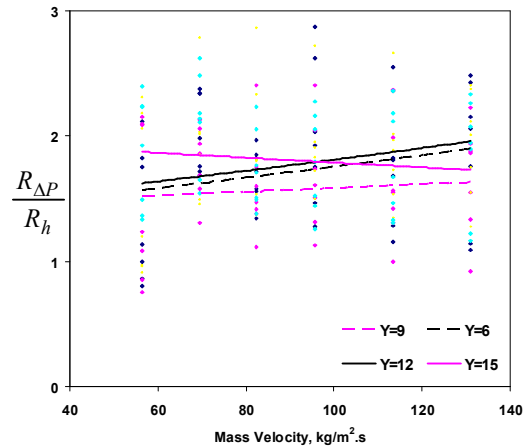
این معیار با توجه به ثابت بودن دبی حجمی، می تواند به عنوان نسبت توان پمپاژ نیز عنوان شود. در ادامه آنها این معیارها را با یک دیگر در دو شکل جداگانه مقایسه نموده و و به نتایج مشابهی با نتایج آذر و همکارانش رسیدند.

حرارت را حدود ۴۰٪ نسبت به لوله صاف مشابه افزایش می دهد، در بدترین حالت (نسبت پیچش ۶) افت فشار را در حدود ۲۴۰٪ نسبت به لوله صاف مشابه زیاد می کند.

۲- تقریباً برای تمامی آزمایش ها، نسبت  $R_{\Delta P} / R_h$  بزرگ تر از یک بوده که این مسئله نمایانگر عمل کرد نامطلوب نوارهای پیچیده شده می باشد.

۳- با ارزیابی شکل (۱۶) مشخص شد که بهترین عملکرد مربوط به نوار با نسبت پیچش ۹ می باشد.

۴- نتیجه نهایی این که به طور کلی استفاده از نوار پیچیده شده به عنوان افزایش دهنده انتقال حرارت در کندانسورها به صرفه نمی باشد مگر در موارد خاص که ضرورت داشته باشد، نظیر جایی که به علت کمبود فضا نیاز به مبدل های حرارتی فشرده تر و کوچک تر می باشد و مقوله افزایش توان پمپاژ از درجه دوم اهمیت برخوردار است.



شکل ۱۶: تغییرات  $R_{\Delta P} / R_h$  نسبت به سرعت جرمی برای نسبت های پیچش مختلف نوار

### نتیجه گیری

نتایج حاصله از این مطالعه عبارتند از:

- ۱- استفاده از نوار پیچیده شده در داخل لوله کندانسور در حالی که در بهترین حالت (نسبت پیچش ۶) ضریب انتقال

### مراجع

- 1 - 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.
- 2 - 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.
- 3 - Said, S. A. and Azer, N. Z. (1983a). "Heat transfer and pressure drop during condensation inside horizontal tubes with twisted tape inserts." *ASHRAE Trans.*, Vol.89, Part 1A, PP. 96-113.
- 4 - Ramakrishna, K. and Azer, N. Z. (1985). "Correlation for horizontal in-tube condensation with twisted tape inserts." *Proc. 8<sup>th</sup> Nat. Heat and Mass Conf., Andhra Univ., Andhra, India*, PP. 427-435.
- 5 - Akhavan-Behabadi, M. A., Rajabi-Najar, A. and Mohseni-Garakani, A. (1384). "Enhancement of heat transfer rates by twisted tape inserts during condensation of R-134a inside horizontal tubes." *J. Fanni Faculty, Tehran Univ.* Vol. 39, No. 6, PP. 713-721.
- 6 - Akhavan-Behabadi, M. A., Varma, H. K. and Agrawal, K. N. (2000). "Enhancement of heat transfer rates by coiled wires during forced convective condensation of R-22 inside horizontal tubes." *J. Enhanced Heat Transfer*, Vol. 7, PP. 69-80.
- 7 - Stoecker, W. F. (1998). *Industrial refrigeration handbook*, McGraw Hill Companies, Inc.
- 8 - Sonntag, R. E., Borgnakke, C. and Van Wylen, G. J. (1997). *Fundamentals of thermodynamics*, John Wiley and Sons, Newyork.
- 9 - Collier, J. G. and Thome, J. R. (1994) *Convective boiling and condensation*, Oxford University Press.
- 10 - Azer, N. Z., Fan, L. T. and Lin, S. T. (1976). "Augmentation of condensation heat transfer with in-tube static mixers." *Proceeding of the 1976 Heat Transfer and Fluid Mech. Inst., Stanford Univ. Press*, PP. 512-526.



- 
- 11 - Royal, J. H. and Bergles, A. E. (1978). "Pressure drop and evaluation of augmented in-tube condensation." *Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf.*, PP.459-464.

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1- Active and Passive Techniques
- 2- Twisted Tape
- 3- Ozone Depletion Potential
- 4- Test Condenser
- 5- Counter Flow
- 6- Pre-Condenser
- 7- After Condenser
- 8- Stainless Steel
- 9- Static Mixers
- 10- Pumping Power