



بررسی تجربی تأثیر ملحقات توپر بر افزایش انتقال حرارت در جریان مغشوش داخلی

در تحقیق حاضر اثر قرار گرفتن چهار ملحقه درون لوله‌ای به قطر ۱۰۰ میلی‌متر که در شرایط دمایی دیواره ثابت قرار دارد، در محدوده اعداد رینولدز ۴۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰ به صورت تجربی بررسی شده است. ملحقه‌های مورد بررسی به اشکال مختلف از جمله دایره، بیضی، مربع، مستطیل و مثلث و در دو حالت عمود بر جریان و یا با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جریان قرار می‌گیرند. به منظور بررسی افزایش همزمان افت فشار و انتقال حرارت پارامتری به عنوان "معیار ارزیابی عملکرد" تعریف می‌شود. هرچه مقدار این معیار بیشتر از صفر باشد مطلوبتر است. با استفاده از این ملحقه‌ها، نسبت به حالت بدون ملحقه، عدد ناسلت حد اکثر ۳٫۷ برابر و افت فشار حد اکثر ۱۰۷ برابر و معیار ارزیابی عملکرد در بهترین حالت ۱/۸۹ می‌شود.

علی اکبر عالم رجبی^۱

دانشیار

امیر توکلی^۲

کارشناس ارشد

واژه‌های راهنما: ملحقه، تشدید انتقال گرما، لوله، جریان داخلی مغشوش

۱- مقدمه

اصلاح عملکرد مبدل‌های حرارتی به دلیل کاربرد وسیع آنها در صنعت در طی قرن گذشته همواره مورد توجه محققان قرار گرفته است. اصلاح ضریب تأثیر مبدل‌های حرارتی می‌تواند به کوچکتز شدن آنها منجر شود. از طرف دیگر یک مبدل حرارتی با عملکرد خوب می‌تواند در یک اندازه معین، گرما را با شدت بیشتری انتقال دهد. همچنین با اصلاح عملکرد مبدل‌های حرارتی می‌توان اختلاف دمایی بین دو سیال را کاهش داد و از مقدار اتلاف انرژی کاست. تاکنون روشهای مختلفی برای اصلاح عملکرد مبدل‌های حرارتی به کار گرفته شده است. افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی یکی از روشهای معمول و پر اهمیت در اصلاح عملکرد مبدل‌های حرارتی است. محققان و صنعتگران با استفاده از انواع روشها همچون افزودن زبریها [۱]، دنده‌ها^۳ [۲]، مغشوش کننده‌ها^۴ [۳]، فنرها و نوار پیچیده‌ها^۵ [۴-۵]، پرزها^۶ [۶-۷] و ملحقات^۷

^۱ نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، rajabi@cc.iut.ac.ir

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان

^۳ Ribs

^۴ Turbulators

^۵ Twisted Tapes

^۶ Fibers

^۷ Inserts

مختلف [۸-۱۰] سعی در افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نموده‌اند. عالم‌رجبی و مرادی [۱۱ و ۱۲] اثر قرار گرفتن یک یا چند ملحقه حلقوی مورب با نسبت شعاعی ثابت ۰/۵ را در یک لوله افقی با دمای دیواره ثابت برای زوایای میل ۳۰ تا ۹۰ درجه نسبت به امتداد جریان در محدوده اعداد رینولدز ۱۳۰۰ تا ۶۰۰۰ بررسی نموده و نتایج زیر را به دست آوردند.

- وقتی از چند ملحقه استفاده می‌شود، چیدمان بهینه زمانی است که ملحقه اول در ابتدای لوله و ملحقه‌های بعدی به فاصله‌ای از ملحقه قبلی قرار گیرند که طول لوله آزمایش به فاصله‌های مساوی تقسیم شود.

- در بررسی اثر زاویه ملحقه نسبت به امتداد جریان، برای سه و چهار ملحقه، زاویه ۴۵ درجه، بهترین زاویه از لحاظ افزایش انتقال حرارت و افت فشار می‌باشد.

- با افزایش تعداد ملحقه‌ها عدد ناسلت و افت فشار افزایش می‌یابد.

- در دامنه اعداد رینولدز مورد بررسی، در اعداد رینولدز بالاتر، اثر ملحقه‌ها بر افزایش ناسلت و افت فشار بیشتر است.

عالم‌رجبی و کرمی‌پور [۱۳، ۱۴ و ۱۵] به بررسی تأثیر چرخش ملحقه‌های حلقوی نسبت به یکدیگر در محدوده اعداد رینولدز ۱۳۰۰ تا ۶۰۰۰ پرداختند. ایشان تأثیر تغییر قطر سوراخ داخلی ملحقه‌های حلقوی را نیز بررسی کردند و همچنین آزمایشهایی در ارتباط با شکل سوراخ ملحقه انجام دادند و نیز اثر ملحقه‌های توپر که به شکلهای مختلفی ساخته شده‌اند، بر انتقال حرارت و افت فشار را بررسی کردند.

نظر به اینکه اثر ملحمات بر انتقال گرما در اعداد رینولدز بالا مورد بررسی قرار نگرفته، در ادامه پژوهشهای قبلی، در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر دیسکهای توپر بر انتقال حرارت در جریان آشفته (اعداد رینولدز تا ۴۰۰۰)، درون لوله‌ای که در شرایط دمای دیواره ثابت قرار دارد پرداخته می‌شود.

۲- دستگاه آزمایش

نمایی از دستگاه آزمایش در شکل (۱) دیده می‌شود. هوای محیط توسط یک فن وارد جعبه هوا می‌شود و پس از عبور از قطعه لانه زنبوری با سرعت یکنواخت وارد لوله آزمایش می‌گردد. قطر لوله در قسمت آزمایش با قطر لوله‌های قبل و بعد از آن یکسان است. قسمت آزمایش از یک لوله مسی با قطر ۱۰۰ mm و طول ۹۵۰ میلی‌متر تشکیل شده که از درون حمام بخار آب می‌گذرد. برای تولید بخار آب از سه عدد گرمکن برقی با توان کلی ۶ کیلووات استفاده می‌شود که در آب درون مخزن غوطه‌ور هستند. برای اطمینان از ثابت ماندن فشار و دما در حمام بخار، روزنه‌ای در دیواره آن ایجاد شده است. برای کنترل دبی هوا از دو عدد شیر در خروجی فن و قبل از جعبه هوا استفاده می‌شود. برای اندازه‌گیری دبی جریان یک سرعت‌سنج دیجیتالی، مجهز به یک پروب پروانه‌ای به کار گرفته می‌شود. با قرار دادن یک نازل در خروجی سیستم قطر لوله خروجی هوا به ۶۳ میلی‌متر تبدیل می‌شود و از آنجا که قطر پروب پروانه‌ای سرعت‌سنج هم ۶۳ میلی‌متر است می‌توان سرعت متوسط خروجی را اندازه‌گیری نمود و با دانستن دما و فشار و محاسبه چگالی، دبی جرمی جریان را محاسبه کرد. برای اندازه‌گیری دمای سطح لوله در قسمت آزمایش و نیز دمای حمام بخار آب از پنج ترموکوپل در نقاط مختلف استفاده می‌شود. محل قرارگیری این ترموکوپلها در شکل (۱) با T نشان

داده شده است. ترموکوپل ها از نوع K (کرومل - آلومل) و قطر سیم آنها ۰/۱۹ میلی متر است. به علاوه دمای هوا، قبل و بعد از قسمت آزمایش اندازه گیری می شود. از یک دستگاه دماسنج دیجیتال با حساسیت ۰/۱ درجه سلسیوس و با ظرفیت ۱۰ کانال ورودی برای خواندن دمای نقاط مختلف استفاده شده است. در خروجی قسمت آزمایش یک اریفیس تعبیه شده و لوله پایین دست آن عایق کاری شده تا تلفات حرارتی آن به حداقل برسد. به فاصله مناسبی از اریفیس، دمای هوای خروجی اندازه گیری می شود. وجود اریفیس باعث می شود تا جریان هوا بعد از آن کاملاً مغشوش و مخلوط شود و به این ترتیب دمای متوسط هوا اندازه گیری می شود. همچنین دو قطعه از جنس تفلون بین لوله آزمایش و لوله های دو طرف آن قرار داده شده است تا انتقال حرارت بین آنها به حداقل ممکن برسد. برای اندازه گیری افت فشار در قسمت آزمایش از یک فشار-سنج دیجیتال استفاده می شود.

ملحقه های مورد بررسی در این پژوهش از جنس چوب روکش دار به ضخامت ۶ میلیمتر هستند که همگی به صورت دیسک هایی توپر و به شکلهای دایره، بیضی، مربع، مستطیل و مثلث می باشند. در هر آزمایش از چهار ملحقه مشابه استفاده می شود که با قرار گرفتن بر روی میله نازکی که از مرکز لوله آزمایش می گذرد، در جای خود مستقر می شوند. ملحقه ها در دو حالت عمود بر جریان و با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جریان مورد بررسی قرار گرفته اند. در شکل (۲) موقعیت قرار گرفتن ملحقه ها درون لوله مشخص شده است. اولین ملحقه در ابتدای لوله قرار می گیرد و ملحقه های دیگر به صورتی قرار می گیرند که لوله را به فواصل مساوی تقسیم کنند. زاویه ملحقه ها نسبت به جریان و نسبت به یکدیگر به ترتیب θ و φ نامیده می شود. یعنی ملحقه ها درون لوله می توانند نسبت به یکدیگر بچرخند. تصویر ملحقه هایی که به صورت مایل نسبت به جریان قرار دارند روی صفحه عمود بر جریان متناظر با ملحقه های عمود بر جریان هستند یعنی چنانچه در جهت جریان به آنها نگریسته شود به صورت ملحقه های عمود بر جریان به نظر می آیند. این ملحقه ها به دلیل رسانایی کم چوب به هیچ وجه نقش پره ندارند و فقط با مغشوش کردن جریان باعث افزایش انتقال حرارت می شوند.

۳- استخراج نتایج آزمایش و بحث

بعد از اطمینان از عملکرد صحیح کلیه اجزای دستگاه آزمایش، ابتدا توزیع دما در مقطع ورودی قسمت آزمایش و نیز در مقطع خروجی، اندازه گیری شد. همانطور که انتظار می رفت توزیع دما در این مقاطع با دقت خوبی یکنواخت بود به طوری که حداکثر اختلاف دما در اعداد رینولدز پایین، کمتر از ۰/۱ درجه سلسیوس و در اعداد رینولدز بالا حدود ۰/۲ درجه سلسیوس بود. اختلاف دمای دیواره لوله مسی در نقاط مختلف در حمام بخار نیز در بیشترین شدت جریان، کمتر از ۰/۳ درجه سلسیوس اندازه گیری شد. این مقدار در اعداد رینولدز پایین ناچیز بود. به این ترتیب فرض دمای ثابت برای دیواره لوله مورد آزمایش و پروفیل دمایی یکنواخت برای جریان در مقطع ورودی و خروجی تأیید و محقق می شود.

با انتخاب حجم معیاری شامل لوله قسمت آزمایش و نوشتن موازنه انرژی برای آن و اعمال قانون سرمایش نیوتن نتیجه می شود [۱۶]:

$$\bar{h} = \dot{m}c(T_o - T_i) / \pi DL\Delta T_{lm} \quad (1)$$

در این رابطه \bar{h} ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط، D قطر لوله و L طول آن است. ΔT_{lm} میانگین لگاریتمی اختلاف دماست و با در نظر گرفتن یک اختلاف دمای متوسط بین جریان و دیواره لوله در دهانه‌های ورودی و خروجی لوله به دست می‌آید. به این ترتیب با اندازه‌گیری دمای دیواره لوله (T_w) و دمای هوا در مقاطع ورودی و خروجی و محاسبه دبی جرمی و داشتن مشخصات فیزیکی لوله می‌توان ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط را محاسبه نمود.

به منظور عمومیت دادن به نتایج حاصله، مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط، \bar{h} در قالب عدد بی‌بعد ناسلت قابل بیان است. اعداد رینولدز و ناسلت به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\text{Re} = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu}, \quad \overline{Nu} = \frac{\bar{h} D}{k} \quad (2)$$

در این روابط μ لزجت دینامیکی و k ضریب هدایت گرمایی هواست. برای سهولت در مقایسه، نتایج برای لوله ساده (بدون دیسک) نیز در شکلها نشان داده شده است.

به منظور برآورد افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نسبت به لوله بدون دیسک، از نسبت $\overline{Nu}/\overline{Nu}_o$ استفاده می‌شود [۹، ۱۰ و ۱۷] که در آن \overline{Nu}_o معرف عدد ناسلت برای حالت لوله بدون دیسک است. با توجه به اینکه توان پمپ یا فن متناسب با حاصل ضرب افت فشار جریان داخلی در دبی حجمی است، افت فشار پارامتر مهمی محسوب می‌گردد. افت فشار در لوله ساده بدون دیسک از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Delta P_{baretube} = 0.5 f(\text{Re}) \rho(T_i) (l/D) \left(\frac{\text{Re} \mu(T_i)}{\rho(T_i) D} \right)^2 \quad (3)$$

که در آن f ضریب اصطکاک لوله، ρ چگالی سیال و μ لزجت دینامیکی آن، در دمای هوای ورودی برآورد می‌شوند. افت فشار در آزمایشهایی که دیسک در لوله قرار دارد، توسط فشارسنج اندازه‌گیری می‌گردد و سپس f از رابطه داری به دست می‌آید [۱۸].

برای بررسی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار می‌توان از عاملی به نام "معیار ارزیابی عملکرد"^۱ استفاده کرد که چنین تعریف می‌شود [۱۹]:

$$PEC = (\overline{Nu}/\overline{Nu}_o)^{3/5} / (f/f_o) \quad (4)$$

در این رابطه و در ادامه، زیرنویس "o" معرف مقدار کمیت برای لوله ساده بدون ملحقه است. نتایج آزمایشها به کمک این معیار سنجیده می‌شود. هر چه این نسبت از صفر بزرگتر باشد مطلوبتر است و در مواردی که از یک بزرگتر است از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر می‌باشد.

۳-۱- بررسی تاثیر ملحقه‌های مدور توپر عمود بر جریان

در این قسمت تأثیر ملحقه‌های مدور که به صورت عمود بر جریان قرار می‌گیرند، بررسی می‌شود. در جدول ۱ نمای کلی این ملحقه‌ها نشان داده شده و در شکل (۳) عدد ناسلت حاصل از کاربرد ملحقه‌های با قطرهای متفاوت، با یکدیگر مقایسه شده است. چنانچه مشاهده می‌شود در اثر استفاده از این ملحقه‌ها، به علت ایجاد اغتشاش و گردابه‌هایی که در نزدیکی سطح لوله ایجاد می‌شود و باعث کاهش ضخامت لایه مرزی می‌گردد، عدد ناسلت نسبت به حالت بدون ملحقه به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. چنانچه انتظار می‌رود

ملحقه‌ای که دارای بیشترین قطر است به علت اینکه انسداد و گردابه‌های بیشتری ایجاد می‌کند، بیشترین افزایش در عدد ناسلت را باعث می‌شود.

در شکل (۴) نسبت Nu / Nu_o برای ملحقه‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. چنانچه ملاحظه می‌شود در این ملحقه‌ها با افزایش عدد رینولدز، نسبت Nu / Nu_o کاهش می‌یابد ولی از آهنگ کاهش آن با افزایش عدد رینولدز کاسته می‌شود. به نظر می‌رسد در محدوده اعداد رینولدز تحت بررسی افزایش اغتشاشات ایجاد شده به علت نصب ملحقه‌ها، تأثیر چندانی بر روی نسبت عدد ناسلت در لوله با ملحقه به عدد ناسلت در لوله بدون ملحقه ندارد. لازم به ذکر است که در این دسته از لوله‌ها که ملحقه درون آنها نصب شده است، بر اساس عدد رینولدز نمی‌توان در مورد آرام بودن جریان اظهار نظر نمود چون به علت نصب ملحقه‌ها در لوله، جریان در اعداد رینولدز پایین هم دارای اغتشاشات زیادی است و مانند جریان آرام و لایه‌ای نیست. حداکثر افزایشی که ملحقه با قطر ۷۵ میلیمتر در عدد ناسلت ایجاد می‌کند در ابتدای محدوده اعداد رینولدز تحت بررسی و به میزان ۲۰۷ درصد است و حداقل افزایشی که در عدد ناسلت ایجاد می‌کند در انتهای محدوده اعداد رینولدز تحت بررسی و به میزان ۱۶۶ درصد است. حداکثر افزایشی که ملحقه با قطر ۶۰ میلیمتر در عدد ناسلت ایجاد می‌کند، ۱۲۴ درصد می‌باشد و حداقل افزایشی که ملحقه با قطر ۶۰ میلیمتر در عدد ناسلت ایجاد می‌کند، ۸۵ درصد است.

در شکل (۵) میزان افت فشار در لوله در اثر استفاده از هر یک از ملحقه‌ها بر حسب عدد رینولدز نشان داده شده است. با افزایش عدد رینولدز افت فشار به شدت افزایش می‌یابد که با توجه به متناسب بودن افت فشار با توان دوم عدد رینولدز این امر منطقی به نظر می‌رسد. چنانچه انتظار می‌رود هر چه قطر ملحقه افزایش می‌یابد افت فشار نیز افزایش می‌یابد.

در شکل (۶) نسبت f / f_o بر حسب عدد رینولدز رسم شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش عدد رینولدز، f / f_o نیز افزایش می‌یابد. بیشترین افت فشار مربوط به ملحقه با قطر ۷۵ میلیمتر است که در اعداد رینولدز حدود ۳۸۰۰۰ افت فشار را ۱۰۸ برابر می‌کند و در اعداد رینولدز حدود ۴۵۰۰ افت فشار را ۵۹ برابر می‌کند. کمترین افت فشار مربوط به ملحقه با قطر ۶۰ میلیمتر است که در اعداد رینولدز حدود ۴۰۰۰۰ افت فشار را ۳۲ برابر می‌کند و در اعداد رینولدز حدود ۴۵۰۰ افت فشار را ۱۸ برابر می‌کند.

پس از بررسی افت فشار و انتقال حرارت بطور جداگانه نوبت به بررسی آنها به‌طور همزمان می‌رسد. تا اینجا بهترین ملحقه از نظر افزایش انتقال حرارت ملحقه با قطر ۷۵ میلیمتر و کمترین افت فشار مربوط به ملحقه با قطر ۶۰ میلیمتر است. در شکل (۷) معیار ارزیابی عملکرد (PEC) برای هر یک از ملحقه‌ها بر حسب عدد رینولدز رسم شده است. چنانچه در نمودار مشخص است در این ملحقه‌ها با افزایش عدد رینولدز معیار ارزیابی عملکرد کاهش می‌یابد که این مسئله به دلیل کاهش نسبت Nu / Nu_o و افزایش نسبت f / f_o در محدوده اعداد رینولدز تحت بررسی می‌باشد. ملاحظه می‌شود که بهترین معیار ارزیابی عملکرد متعلق به ملحقه با قطر ۶۸ میلیمتر است که در اکثر موارد بیشترین مقدار را دارد. حداکثر معیار ارزیابی عملکرد مربوط به این ملحقه در اعداد رینولدز حدود ۴۴۰۰ و تقریباً ۰/۹۶ می‌باشد. از روی نمودار می‌توان ملاحظه نمود که استفاده از ملحقه‌ها در اعداد رینولدز پایین بسیار مقرون به صرفه‌تر از استفاده از ملحقه‌ها در اعداد رینولدز بالا است.

۳-۲- بررسی تأثیر ملحقه‌های بیضوی مایل

پس از اینکه ملحقه‌های مدور که به صورت عمود بر جریان قرار داشتند بررسی شد، ملحقه‌های بیضوی مورد آزمایش قرار گرفت. طبق نتایج تحقیقات انجام شده قبلی [۱۳، ۱۴ و ۱۵] بهترین زاویه نسبت به جریان برای نصب ملحقه‌ها، زاویه ۴۵ درجه و بهترین زاویه ملحقه‌ها نسبت به یکدیگر، زاویه ۱۸۰ درجه است.

ملحقه‌های مورد استفاده در این قسمت به شکل بیضی هستند و هر کدام از آنها متناظر با یکی از ملحقه‌های مورد آزمایش در قسمت قبل که مربوط به ملحقه‌های مدور عمود بر جریان است، می‌باشد. این ملحقه‌ها نیز به صورتی هستند که اگر در امتداد جریان به آنها نگاه شود به صورت دایره توپر دیده می‌شوند. در جدول (۱) نمای کلی این ملحقه‌ها نشان داده شده است. از این قسمت به بعد فقط نمودار مربوط به معیار ارزیابی عملکرد آورده شده است، چون مابقی نمودارها بسیار شبیه به نمودارهای ذکر شده در قسمت قبل می‌باشد. با استفاده از این ملحقه‌ها نیز عدد ناسلت و افت فشار نسبت به حالت بدون ملحقه شدیداً افزایش می‌یابد. همچنین نسبت Nu / Nu_o با افزایش عدد رینولدز کاهش و نسبت f / f_o با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. در این حالت نیز ملحقه‌ای که بیشترین انسداد را در مسیر جریان ایجاد می‌کند، بیشترین افزایش در عدد ناسلت و افت فشار را ایجاد می‌کند.

در شکل (۸) معیار ارزیابی عملکرد برای هر یک از ملحقه‌ها بر حسب عدد رینولدز آمده است. چنانچه ملاحظه می‌شود در این ملحقه‌ها نیز با افزایش عدد رینولدز معیار ارزیابی عملکرد کاهش می‌یابد. ملحقه با قطر ۸۲ میلیمتر با اینکه بیشترین افزایش در عدد ناسلت را ایجاد کرده است ولی به واسطه افت فشار بسیار شدیدی که ایجاد می‌کند، نمی‌تواند معیار ارزیابی عملکرد خوبی داشته باشد. این موضوع روی نمودار کاملاً مشخص شده است. با توجه به این نمودار می‌توان متوجه شد که بهترین معیار ارزیابی عملکرد متعلق به ملحقه با قطر ۷۵ میلیمتر است. البته ملحقه با قطر ۶۸ میلیمتر هم دارای معیار ارزیابی عملکرد بسیار نزدیک به معیار ارزیابی عملکرد مربوط به این ملحقه است. با افزایش عدد رینولدز معیار ارزیابی عملکرد مربوط به ملحقه با قطر ۷۵ میلیمتر کاهش می‌یابد و در اعداد رینولدز حدود ۴۴۰۰ ماکزیمم مقدار خود را به میزان ۱،۵۸ دارد، ولی در ادامه با افزایش عدد رینولدز مقدار آن کاهش می‌یابد که این مسئله به دلیل کاهش Nu / Nu_o و افزایش f / f_o در محدوده اعداد رینولدز تحت بررسی است. نکته قابل توجه در این ملحقه‌ها این است که در اعداد رینولدز پایین، معیار ارزیابی عملکرد از یک بیشتر می‌شود که از نظر اقتصادی بسیار مورد توجه می‌باشد.

۳-۳- بررسی تأثیر ملحقه‌های مربعی عمود بر جریان

در این قسمت تأثیر ملحقه‌های مربعی که به صورت عمود بر جریان قرار گرفته‌اند بررسی می‌شود. اثر چرخش این ملحقه‌ها نیز بررسی خواهد شد. ابتدا آزمایشها با ملحقه‌های مربعی که به صورت عمود بر جریان قرار دارند و هیچگونه چرخشی نسبت به یکدیگر ندارند انجام شده است و در ادامه با مشخص شدن اینکه کدام ملحقه معیار ارزیابی عملکرد بهتری دارد، چرخشهای ممکن برای این ملحقه‌ها بررسی شده است. بدین منظور دو حالت چرخش ملحقه‌ها به مقدار ۲۲٫۵ و ۴۵ درجه نسبت به یکدیگر، بر روی بهترین ملحقه مورد آزمایش اعمال شده است. به این دلیل فقط دو حالت ۲۲٫۵ و ۴۵ درجه چرخش ملحقه‌ها نسبت

به یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته که دیگر چرخشها با زاویه‌ای که مضرب $۲۲/۵$ درجه است در حقیقت تکرار همین دو مورد ذکر شده است. در جدول (۱) نمای کلی این ملحقه‌ها نشان داده شده است. در شکل (۹) تغییرات عدد ناسلت برای ملحقه‌ها مختلف بر حسب عدد رینولدز دیده می‌شود. مجدداً ملاحظه می‌شود ملحقه‌ای که بیشترین انسداد را ایجاد کرده بیشترین افزایش در عدد ناسلت را نیز ایجاد کرده است. در این نمودار برای ملحقه مربعی با ضلع ۶۹ میلی‌متر تأثیر چرخش نیز بررسی شده است. می‌توان ملاحظه نمود که چرخش ملحقه‌ها تأثیر چندانی بر روی افزایش عدد ناسلت نداشته و عدد ناسلت این ملحقه در حالت بدون چرخش و دو حالت چرخش $۲۲/۵$ و ۴۵ درجه تقریباً با یکدیگر برابر است. برابر بودن عدد ناسلت در دو حالت بدون چرخش نسبت به یکدیگر و با چرخش نسبت به یکدیگر می‌تواند به این دلیل باشد که به علت زیاد بودن عدد رینولدز و مغشوش بودن جریان و همچنین گردابه‌های زیادی که توسط ملحقه به وجود می‌آید، گردابه‌هایی که توسط چرخش ملحقه‌ها نسبت به یکدیگر به وجود می‌آید، تأثیری بر روی عدد ناسلت نخواهد داشت. به واسطه استفاده از ملحقه‌ها افت فشار جریان نیز به شدت افزایش می‌یابد و ملحقه‌ای که بیشترین انسداد را ایجاد کرده است بیشترین افت فشار را هم ایجاد می‌کند. نکته قابل توجه در مورد افت فشار اینکه، در حالتی که ملحقه‌های با ابعاد $۶۹\text{mm} \times ۶۹\text{mm}$ نسبت به یکدیگر چرخش دارند، افت فشار نسبتاً کمتری نسبت به حالت بدون چرخش ایجاد می‌کنند.

برای اینکه بتوانیم بهترین ملحقه را از نظر اقتصادی انتخاب کنیم باید افت فشار و انتقال حرارت را همزمان بررسی کنیم. بدین منظور نمودار مربوط به معیار ارزیابی عملکرد را برای ملحقه‌ها مختلف رسم می‌کنیم. در شکل (۱۰) نمودار معیار ارزیابی عملکرد ملحقه‌های که نسبت به یکدیگر بدون چرخش می‌باشند، بر حسب عدد رینولدز رسم شده است. از بین این ملحقه‌ها همانطور که در ابتدا گفته شد بهترین ملحقه انتخاب شده است و سپس تأثیر چرخش این ملحقه نیز بررسی شده است. در اثر استفاده از این ملحقه‌ها معیار ارزیابی عملکرد با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد که این امر به دلیل کاهش نسبت Nu / Nu_o و افزایش نسبت f / f_o در محدوده اعداد رینولدز مورد بررسی می‌باشد. با توجه به اینکه ملحقه به ابعاد $۶۹\text{mm} \times ۶۹\text{mm}$ میلی‌متر دارای بهترین معیار ارزیابی عملکرد است، تأثیر چرخش ملحقه‌ها نسبت به یکدیگر برای این ملحقه بررسی شده است. بدین منظور این ملحقه را در حالت چرخشهای $۲۲/۵$ و ۴۵ درجه مورد آزمایش قرار می‌دهیم. در شکل (۱۱) معیار ارزیابی عملکرد این ملحقه‌ها بر حسب عدد رینولدز رسم شده است. معیار ارزیابی عملکرد این ملحقه در حالت‌های فوق‌الذکر بسیار به یکدیگر نزدیک است و بسیار مشکل است که یکی از این حالتها را به عنوان برتر انتخاب کرد.

۳-۴- بررسی تأثیر ملحقه‌های مستطیلی مایل

ملحقه‌های مستطیلی با زاویه معینی نسبت به محور لوله قرار گرفته‌اند. این ملحقه‌ها متناظر با ملحقه‌های مربعی هستند یعنی اگر در جهت جریان به آنها نگاه کنیم به صورت یک مربع دیده خواهند شد. در جدول (۱) نمای کلی این ملحقه‌ها نشان داده شده است. این ملحقه‌ها نسبت به جریان با زاویه ۴۵ درجه قرار دارند و نسبت به یکدیگر نیز ۱۸۰ درجه چرخیده‌اند. برای ملحقه‌ای که بهترین معیار ارزیابی عملکرد را داشته باشد در حالت بدون چرخش ملحقه‌ها نسبت به یکدیگر نیز آزمایشهایی انجام شده است.

در شکل (۱۲) تغییرات معیار ارزیابی عملکرد برای ملحقه‌ها مستطیل بر حسب عدد رینولدز آمده است. ملاحظه می‌شود در تمامی ملحقه‌ها، با افزایش عدد رینولدز معیار ارزیابی عملکرد کاهش می‌یابد. بیشترین معیار ارزیابی عملکرد متعلق به ملحقه با ابعاد 98×69 میلیمتر است. در قسمتی از محدوده اعداد رینولدز مورد آزمایش، ملحقه‌ها با چرخش 180° درجه‌ای نسبت به یکدیگر، دارای معیار ارزیابی عملکرد بهتری است و در قسمت دیگر، ملحقه‌ها بدون چرخش نسبت به یکدیگر، معیار ارزیابی عملکرد بهتری دارد. با استفاده از این ملحقه در حالتی که ملحقه‌ها نسبت به یکدیگر بدون چرخش هستند، در اعداد رینولدز حدود 4380 معیار ارزیابی عملکرد، تقریباً $1/89$ می‌باشد که از نظر اقتصادی بسیار حائز اهمیت است.

۳-۵- بررسی تأثیر ملحقه‌های مثلثی

در این قسمت فقط دو اندازه ملحقه مورد بررسی قرار می‌گیرند. به دلیل اینکه مثلثهایی که درون لوله محاط می‌شوند مساحت بسیار کمی خواهند داشت، از این رو بزرگترین مثلثی که درون لوله محاط می‌شود را مورد آزمایش قرار می‌دهیم. حالت اول ملحقه‌ی است به شکل مثلث متساوی‌الاضلاع، که به صورت عمود بر جریان قرار می‌گیرد. طول هر یک از اضلاع این مثلث 83 میلیمتر می‌باشد. این ملحقه‌ها نسبت به یکدیگر هیچگونه چرخشی ندارند. ملحقه دیگر یک مثلث متساوی‌الساقین است که با زاویه 45° درجه نسبت به جریان نصب می‌شود و متناظر با مثلثی است که در بالا به آن اشاره شد. اگر در امتداد جریان به این مثلث نگاه کنیم آنرا به شکل مثلث متساوی‌الاضلاع خواهیم دید. در ضمن این ملحقه‌ها نسبت به یکدیگر دارای زاویه 180° درجه نیز هستند. در جدول (۱) نمای کلی این ملحقه‌ها نشان داده شده است.

معیار ارزیابی عملکرد برای ملحقه‌ها مثلث در شکل (۱۳) رسم شده است. چنانچه مشاهده می‌شود برای هریک از ملحقه‌ها با افزایش عدد رینولدز معیار ارزیابی عملکرد کاهش می‌یابد. چنانچه انتظار می‌رفت بیشترین معیار ارزیابی عملکرد متعلق به ملحقه‌ای است که تحت زاویه 45° درجه نصب شده است. معیار ارزیابی عملکرد این ملحقه، در اعداد رینولدز حدود 4600 به مقدار حداکثر خود یعنی $1/12$ می‌رسد.

۳-۶- مقایسه معیار ارزیابی عملکرد ملحقه‌های مختلف

پس از انجام آزمایشهای مربوط به ملحقه‌های مختلف لازم است که عملکرد این ملحقه‌ها را با یکدیگر مقایسه کنیم. بدین منظور در هر نوع ملحقه بهترین عملکرد را انتخاب و سپس نمودار معیار ارزیابی عملکرد مربوط به بهترینها را در کنار یکدیگر رسم می‌نماییم.

در ملحقه‌های مدور که به صورت عمود بر جریان نصب شده بودند ملحقه با قطر 68 میلیمتر بهترین معیار ارزیابی عملکرد را دارا بود. در ملحقه‌های بیضوی که با زاویه 45° درجه نسبت به جریان و زاویه 180° درجه نسبت به یکدیگر نصب شده بودند، ملحقه با قطر 75 میلیمتر بهترین معیار ارزیابی عملکرد را داشت. در ملحقه‌های مربعی که بر جریان عمود هستند بهترین معیار ارزیابی عملکرد متعلق به ملحقه با ابعاد 69×69 میلیمتر می‌باشد که ملحقه‌ها نسبت به یکدیگر بدون چرخش هستند. در ملحقه‌های مستطیلی که با زاویه 45° درجه نسبت به جریان قرار دارند بهترین معیار ارزیابی عملکرد متعلق به ملحقه با ابعاد 98×69 میلیمتر می‌باشد که در این حالت نیز ملحقه‌ها نسبت به یکدیگر بدون چرخش می‌باشند. و در نهایت در ملحقه‌های

مثلثی، ملحقه‌هایی که با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جریان و ۱۸۰ درجه نسبت به یکدیگر نصب شده‌اند، بهترین معیار ارزیابی عملکرد را دارا می‌باشند.

در شکل (۱۴) ملاحظه می‌شود که در ملحقه‌های توپر بهترین معیار ارزیابی عملکرد متعلق به ملحقه بیضوی است که با جریان زاویه ۴۵ درجه دارد و ملحقه‌ها نسبت به یکدیگر ۱۸۰ درجه چرخیده‌اند. بعد از این ملحقه، ملحقه مستطیلی که مجدداً دارای زاویه ۴۵ درجه نسبت به جریان است در مقام دوم قرار دارد. و ملحقه‌های مثلثی که با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جریان و زاویه ۱۸۰ درجه نسبت به یکدیگر قرار دارند، در مقام سوم هستند. بعد از این ملحقه‌ها، ملحقه‌هایی که بر جریان عمود هستند قرار دارند. با توجه به این نمودار می‌توان بیان داشت که ملحقه‌هایی که نسبت به جریان با زاویه ۴۵ درجه نصب می‌شوند، دارای معیار ارزیابی عملکرد بهتری نسبت به دیگر ملحقه‌ها هستند.

می‌توان بیان داشت که در حالت کلی ملحقه‌های عمود بر جریان نتیجه چندان مناسبی ندارند. اما در مورد ملحقه‌های مثلثی که با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جریان نصب شده‌اند، می‌توان گفت که نسبت به ملحقه‌های عمود بر جریان دارای معیار ارزیابی عملکرد بهتری هستند ولی در مقایسه با دیگر ملحقه‌هایی که با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جریان نصب شده اند عملکرد چندان مناسبی ندارند.

۳-۷- برازش منحنی و به دست آوردن رابطه ناسلت بر حسب عدد رینولدز

پس از بررسی نتایج آزمایشهای انجام شده به صورت جداگانه، مفید است که با برازش منحنی از نمودارهای به دست آمده، نتایج به صورت رابطه بیان شود. برای به دست آوردن رابطه ناسلت بر حسب عدد رینولدز، از تمامی نمودارهای ناسلت منحنی‌هایی عبور داده شده است و چنین به نظر می‌آید که تمامی این منحنیها از یک فرم واحد که در رابطه (۷) مشخص شده است پیروی می‌کنند:

$$Nu = k(a Re^b + c) \quad (7)$$

برای تمامی ملحقه‌های مورد آزمایش، ضرایب a و b و c یکسان هستند و تفاوت منحنیها فقط در ضریب k می‌باشد که این ضریب بیانگر تأثیر درصد انسداد ایجاد شده توسط ملحقه‌هاست و نشانگر فرم کلی معادله به صورتی که در رابطه (۸) آمده می‌باشند. در جدول (۲) روابطی برای ضریب k برای ملحقه‌ها مختلف بر حسب درصد انسداد بیان شده است.

$$Nu = k(0.1194 Re^{0.42} - 2.54) \quad (8)$$

در اینجا لازم است به چند نکته اشاره شود:

- k بیانگر ضریب درصد انسداد هر یک از ملحقه‌هاست.
- برای ملحقه‌هایی که به صورت مایل نسبت به جریان قرار دارند درصد انسداد حاصل از تصویر آنها در صفحه عمود بر جهت جریان باید در روابط جایگزین شود.

لازم به ذکر است در ملحقه‌های مثلثی، به دلیل اینکه تعداد آزمایشهای ممکن کم بود، امکان استخراج روابطی برای ضریب k فراهم نشد.

به طور کلی در کلیه روشهای افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به نحوی سعی می‌شود میزان اغتشاشات، جریانهای ثانویه و گردابه‌ها را درون جریان افزایش دهند. افزایش میزان اغتشاش جریان باعث بر هم زدن لایه مرزی خصوصاً کاهش ضخامت زیر لایه آرام می‌شود. جریانهای ثانویه و گردابه‌ها هم به نوبه خود انتقال انرژی و ممنتوم (بویژه در جهت عمود بر جریان) را افزایش و ضخامت لایه مرزی را کاهش می‌دهند. کاهش ضخامت زیر لایه آرام و افزایش اغتشاش جریان باعث تخت‌تر شدن پروفیل‌های دما و سرعت در مرکز جریان و افزایش شدید گرادیانهای دما و سرعت در نزدیک دیواره می‌شود، این موضوع سبب افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و ضریب اصطکاک می‌شود. کلیه ملحقه‌های به کار برده شده در این پژوهش نیز در همین راستا عمل می‌کنند و به همین دلیل امکان بیان اثر آنها در قالب روابط (۷) و (۸) فراهم شد.

تندیراواگلو [۲۰] به بررسی تأثیر محل و زاویه قرار گرفتن بافل‌هایی به شکل نیم دایره، درون لوله‌های مدور به منظور افزایش انتقال حرارت پرداخت. وی بافلها را در سه زاویه ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ درجه نسبت به هم (با چرخاندن بافلها حول محور لوله) مورد بررسی قرار داد. طبق نتایج به دست آمده توسط وی بهترین حالت از نظر افزایش انتقال حرارت هنگامی رخ می‌دهد که موانع دارای زاویه ۹۰ درجه نسبت به یکدیگر هستند. همچنین بیشترین افزایش در افت فشار هنگامی اتفاق می‌افتد که موانع دارای زاویه ۱۸۰ درجه نسبت به یکدیگر هستند. در پژوهش حاضر نیز اثر چرخاندن ملحقه‌ها نسبت به هم بررسی شد که با نتایج مرجع [۲۰] توافق دارد.

۴- تحلیل عدم قطعیت

در پژوهشهای تجربی، تعیین عدم قطعیت موجود در نتایج حاصل از آزمایشها از اهمیت خاصی برخوردار است. برای تحلیل عدم قطعیت نتیجه نهایی، می‌توان از روشهای مختلفی استفاده نمود. در این تحقیق برای برآورد عدم قطعیت نتایج، از روش ارائه شده توسط هولمن [۲۱] استفاده شده است. با توجه به تجربی بودن پژوهش حاضر سه منبع خطا شامل خطای ناشی از وسایل اندازه‌گیری، خطای اندازه‌گیری و خطای ناشی از محاسبات می‌تواند بر دقت و عدم قطعیت نتایج اثر بگذارد. با برآورد خطای هر یک از وسایل اندازه‌گیری و انجام محاسبات لازم، عدم قطعیت هر یک از اعداد بی‌بعد که در ارائه نتایج به کار رفته‌اند محاسبه گردید. در مجموع عدم قطعیت نتایج نسبتاً ناچیز بود. جزئیات استخراج عدم قطعیت نتایج در مرجع [۱۶] آورده شده است. به عنوان نمونه عدم قطعیت عدد نوسلت برحسب عدد رینولدز و همچنین منحنی برازش شده از نمودار تغییرات عدد ناسلت در شکل (۱۵) نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود منحنی برازش شده از این نقاط، در اکثر موارد از درون محدوده محاسبه شده عبور می‌کند.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر ملحقه‌ها بر افزایش انتقال حرارت به صورت تجربی بررسی شد که نتایج آن به صورت خلاصه بدین شرح است:

✓ به واسطه استفاده از ملحقه‌ها، عدد ناسلت نسبت به حالت بدون ملحقه افزایش می‌یابد و هر چه انسداد ایجاد شده توسط ملحقه‌ها در مسیر جریان بیشتر باشد عدد ناسلت نیز بیشتر افزایش می‌یابد.

✓ در اثر استفاده از این ملحقه‌ها افت فشار به شدت افزایش می‌یابد و به علت متناسب بودن افت فشار با توان دوم عدد رینولدز، مقادیر افت فشار در اعداد رینولدز بالا بسیار زیاد می‌باشد.

✓ برای بررسی همزمان اثر ملحقه بر انتقال حرارت و افت فشار، پارامتری به نام "معیار ارزیابی عملکرد" معرفی گردید. معیار ارزیابی عملکرد ملحقه‌ها با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد و بیشترین مقادیر آن در اعداد رینولدز پائین اتفاق می‌افتد. به نظر می‌رسد در اعداد رینولدز بالا به دلیل اینکه جریان بدون استفاده از این ملحقه‌ها هم دارای اغتشاش زیادی بوده است، نصب ملحقه‌ها و افزایش اغتشاشات جریان، بیشتر از اینکه بر انتقال حرارت تأثیر بگذارد باعث افزایش افت فشار و متعاقباً کاهش معیار ارزیابی عملکرد می‌شود.

✓ به طور کلی ملحقه‌هایی که به صورت مایل نسبت به جریان نصب می‌شوند دارای معیار ارزیابی عملکرد بهتری نسبت به ملحقه‌های عمود بر جریان هستند و در این بین ملحقه بیضوی مایل در اکثر نقاط، در محدوده اعداد رینولدز تحت بررسی، دارای بهترین معیار ارزیابی عملکرد می‌باشد.

مراجع

- [1] Slannciauskas, A., "Two Friendly Rules of the Turbulent Heat Transfer Enhancement", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 2155-2161, (2001).
- [2] Murata, A., and Mochizuki, S., "Large Eddy Simulation with a Dynamic Subgrid-scale Model of Turbulent Heat Transfer in an Orthogonally Rotating Rectangular Duct with Transverse Rib Turbulators", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 1243-1259, (2000).
- [3] Myrum, T.A., Acharya, S., Sinha, S., and Qui, X., "Effect of Placing Vortex Generators above Ribs in Ribbed Ducts on the Flow, Flow Temperature, and Heat Transfer Behavior", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 118, pp. 294-300, (1996).
- [4] Garcia, A., Vincente, P.G., Viedma, A., and Solano, J.P., "Enhancement of Laminar and Transitional Flow Heat Transfer in Tubes by Means of Wire Coil Inserts", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 3176-3189, (2007).
- [5] Manglik, R.M., and Bergles, A.E., "Correlation for Laminar Flow Enhanced Heat Transfer in Uniform Wall Temperature Circular Tubes with Twisted-tape Inserts", *American Society of Mechanical Engineers, Heat Transfer Division, (Publication) HTD*, Vol. 68, pp. 19-25, (1987).

- [6] Lund, K.O., and Knowles, T.R., "Enhanced Laminar-flow Heat Transfer at Fiber-flocked Surfaces", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 1627-1636, (2001).
- [7] Lund, K. O., "Fully Developed Turbulent Flow and Heat Transfer at Fiber-flocked Surfaces", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 3799-3810, (2001).
- [8] Hsieh, S.S., Wu, F.Y., and Tsai, H.H., "Turbulent Heat Transfer and Flow Characteristics in Horizontal Circular Tube with Strip-type Inserts, Part I, Fluid Mechanics", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 823-835, (2003).
- [9] Hsieh, S.S., Wu, F.Y., and Tsai, H.H., "Turbulent Heat Transfer and Flow Characteristics in Horizontal Circular Tube with Strip-type Inserts, Part II, Heat Transfer," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 837-849, (2003).
- [10] Saha, S.K., and Longille, P., "Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Laminar Flow through a Circular Tubes with Longitudinal Strip Inserts under Uniform Wall Heat Flux", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 124, pp. 421-432, (2002).
- [۱۱] مرادی، غ.، "بررسی تجربی اثر ملحقه‌های مورب در افزایش انتقال حرارت در لوله،" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، (۱۳۸۴).
- [12] Alemrajabi, A.A., and Moradi, G.R., "Effect of Inclined Disks on Heat Transfer in a Tube of Constant Wall Temperature", *Heat Transfer Engineering Journal*, Vol. 28, No. 12, (2007).
- [۱۳] عالم رجبی، ع.ا. و کرمی پور، ه.، "اثر دیسکهایی با اشکال هندسی متفاوت بر انتقال حرارت در لوله،" چهاردهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اردیبهشت، (۱۳۸۵).
- [۱۴] عالم رجبی، ع.ا. و کرمی پور، ه.، "بررسی تجربی اثر شکل، اندازه و نحوه استقرار دیسکها بر انتقال گرما در لوله،" مجموعه مقالات دهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه یزد، آبان، (۱۳۸۵).
- [15] Karamipour, H., and Alemrajabi, A.A., "Effect of Disks' Geometry on Heat Transfer in a Tube", *International Conference on Energy and Environment*, University Tenaga National, Malaysia, (2006).
- [۱۶] توکلی، ا.، "بررسی تجربی اثر ملحقه‌های مورب بر افزایش انتقال حرارت در جریان مغشوش درون لوله،" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، (۱۳۸۶).
- [17] Bergles, A.E., Blumenhronz, A.R., and Taborak, J., "Performance Evaluation Criterion for Enhanced Heat Transfer Surfaces", *Proceedings of International Heat and Mass Transfer Conference.*, Vol. 2, pp. 239-243, (1974).

[۱۸] اینکروپرا، ف.، ترجمه رستمی، ع. ا. و شیرازی، م.، "مقدمه‌ای بر انتقال گرما"، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، (۱۳۸۵).

[19] Maezawa, S., and Lock, G.S.H., "Heat Transfer Inside a Tube with a Novel Promoter", Proceeding of Sixth International Heat Transfer Conference, Toronto, Canada, pp. 595-600, (1978).

[20] Tandiroglu, A., "Effect of Flow Geometry Parameters on Transient Heat Transfer for Turbulent Flow in a Circular Tube with Baffle Inserts", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, pp. 1559-1567, (2007).

[21] Holman, J.P., "*Experimental Methods for Engineers*", 15th Edition, McGraw-Hill Publishing Company, New York, (1989).

فهرست نمادهای انگلیسی

\bar{h} : ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی متوسط

\dot{m} : دبی جرمی

c : گرمای ویژه فشار ثابت

T_i : دمای متوسط ورودی

T_o : دمای متوسط خروجی

D : قطر لوله

L : طول لوله

ΔT_{lm} : اختلاف دمای لگاریتمی

Nu : عدد ناسلت

Re : عدد رینولدز

k : ضریب هدایت حرارتی

ΔP : افت فشار

f : ضریب اصطکاک

$P.E.C$: معیار ارزیابی عملکرد

فهرست نمادهای یونانی

ϕ : زاویه ملحقه‌ها نسبت به یکدیگر

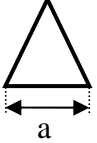
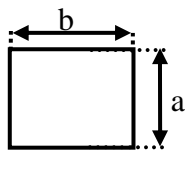


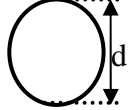
μ : لزجت

θ : زاویه ملحقه‌ها نسبت به جریان

ρ : چگالی

جدولها

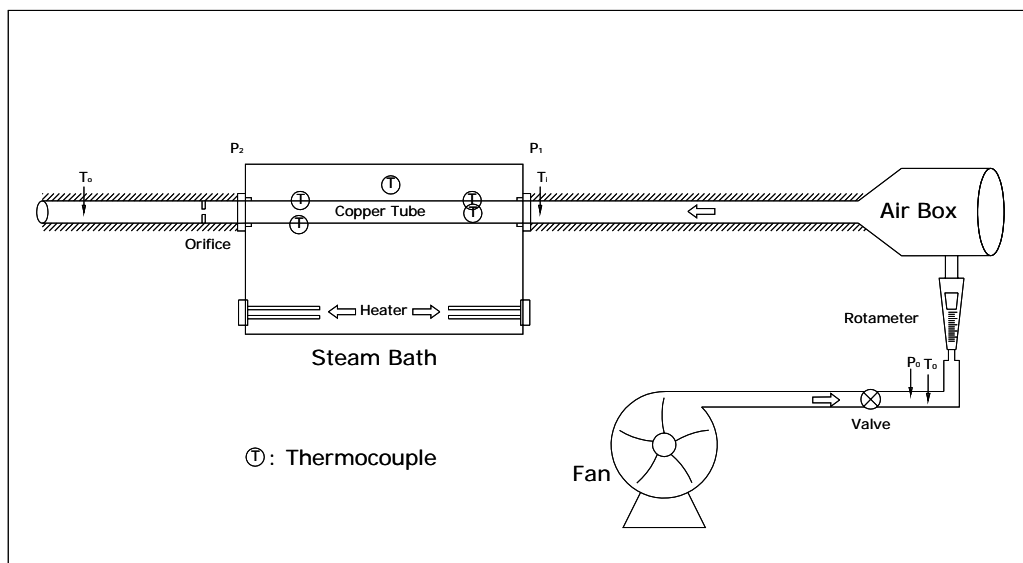
جدول ۱- نمای شماتیک ملحقه‌های بررسی شده

				
مثلث عمود بر جریان	مستطیل مایل	مربع عمود بر جریان	بیضوی مایل	مدور عمود بر جریان

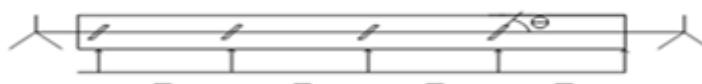
جدول ۲ - روابط محاسبه ضرایب تاثیر درصد انسداد در عدد ناسلت مربوط به هر یک از ملحقه‌ها

مشخصات ملحقه	ضریب تاثیر درصد انسداد (k)
ملحقه‌های مدور به صورت عمود بر جریان	$k = 0.5352e^{1/1764L}$
ملحقه‌های بیضوی با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جریان و چرخش ۱۸۰ درجه‌ای ملحقه‌ها نسبت به یکدیگر	$k = 0.54e^{1/1749L}$
ملحقه‌های مربعی به صورت عمود بر جریان و بدون چرخش ملحقه‌ها نسبت به یکدیگر	$k = 0.5399e^{1/1748L}$
ملحقه‌های مستطیلی با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جریان و چرخش ۱۸۰ درجه‌ای ملحقه‌ها نسبت به یکدیگر	$k = 0.6112e^{1/1715L}$
ملحقه مثلثی به صورت عمود بر جریان، بدون چرخش ملحقه‌ها نسبت به یکدیگر و با درصد انسداد ۳۸٪	$k = 1$
ملحقه مثلثی با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جریان و چرخش ۱۸۰ درجه‌ای ملحقه‌ها نسبت به یکدیگر و درصد انسداد ۳۸٪	$k = 1.04$

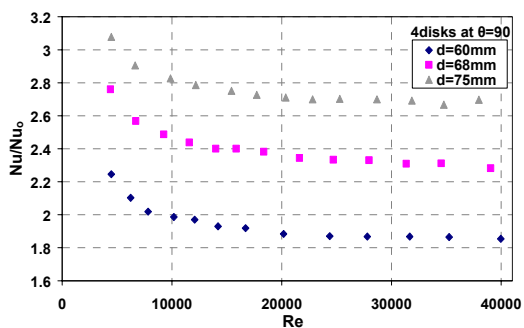
شکلها



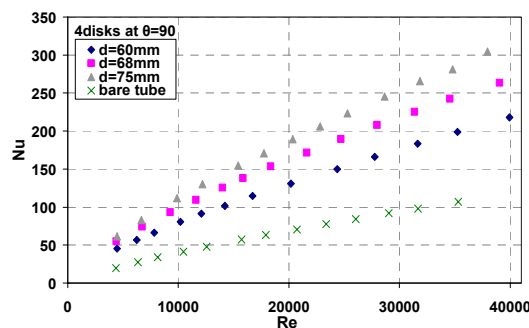
شکل ۱- طرحواره دستگاه آزمایش



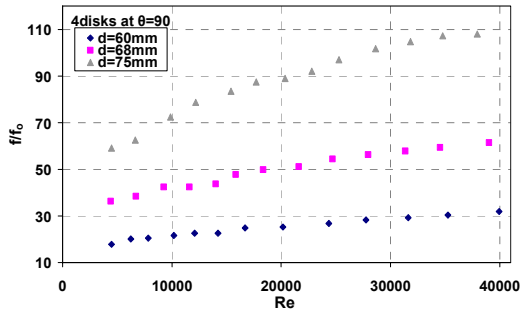
شکل ۲- موقعیت قرار گرفتن ملحقه‌ها درون لوله آزمایش



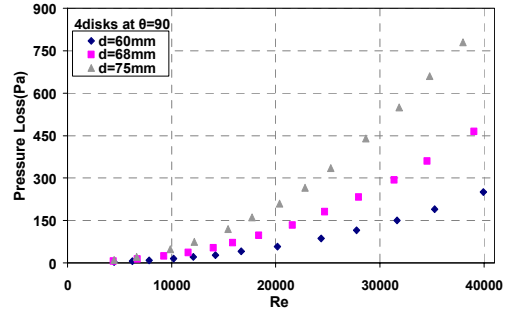
شکل ۴- مقایسه Nu/Nu_0 در ملحقه‌های مدور عمود بر جریان بر حسب عدد رینولدز



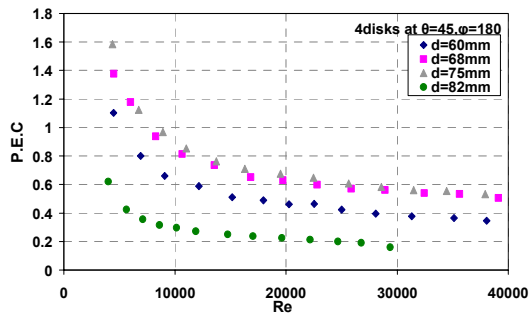
شکل ۳- عدد ناسلت در ملحقه‌های مدور عمود بر جریان بر حسب عدد رینولدز



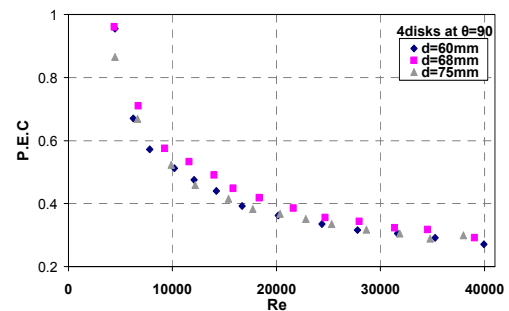
شکل ۶- نسبت f/f_0 در ملحقه‌های مدور عمود بر جریان بر حسب عدد رینولدز



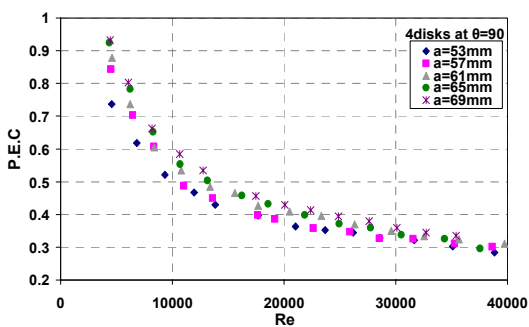
شکل ۵- افت فشار در ملحقه‌های مدور عمود بر جریان بر حسب عدد رینولدز



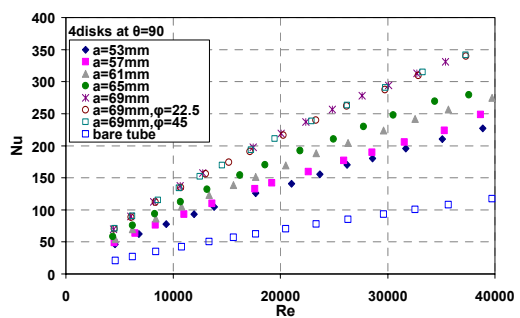
شکل ۸- معیار ارزیابی عملکرد در ملحقه‌های بیضوی مایل بر حسب عدد رینولدز



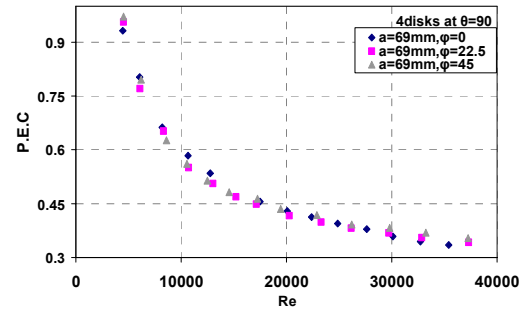
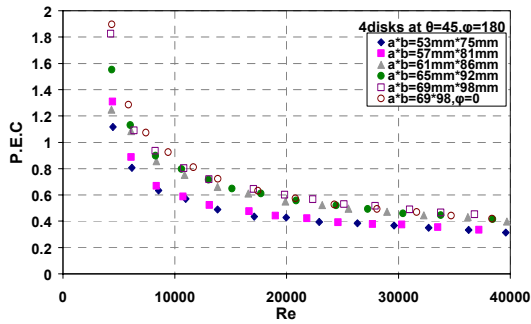
شکل ۷- معیار ارزیابی عملکرد ملحقه‌های مدور عمود بر جریان بر حسب عدد رینولدز



شکل ۱۰- معیار ارزیابی عملکرد ملحقه‌های مربعی عمود بر جریان بر حسب عدد رینولدز (در حالت بدون چرخش ملحقه‌ها نسبت به یکدیگر)

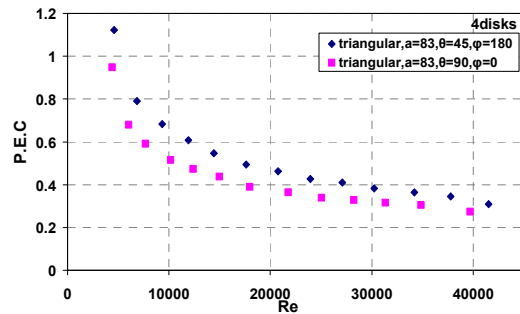
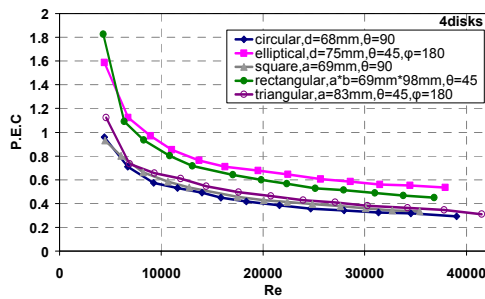


شکل ۹- عدد ناسلت در ملحقه‌های مربعی توپر بر حسب عدد رینولدز



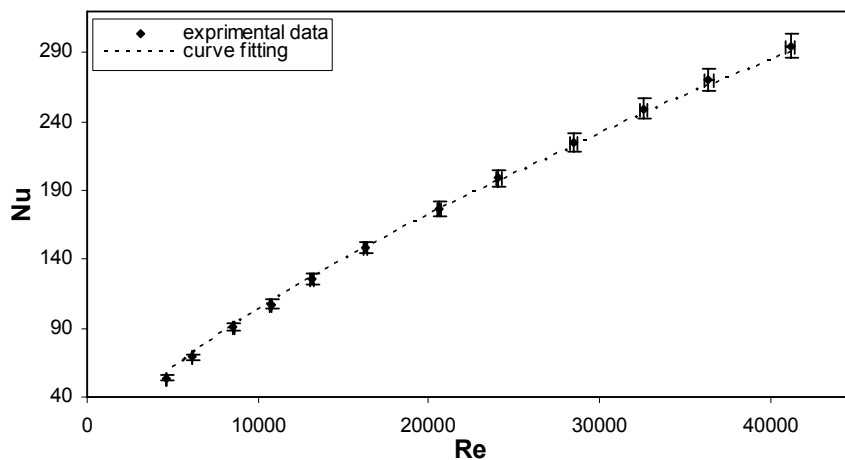
شکل ۱۲- معیار ارزیابی عملکرد ملحقه‌های مستطیلی مایل بر حسب عدد رینولدز

شکل ۱۱- معیار ارزیابی عملکرد در ملحقه‌های مربعی عمود بر جریان بر حسب عدد رینولدز (با چرخش ملحقه‌ها نسبت به یکدیگر)



شکل ۱۳- معیار ارزیابی عملکرد ملحقه‌های مثلثی بر حسب عدد رینولدز

شکل ۱۴- معیار ارزیابی عملکرد ملحقه‌های توپر بر حسب عدد رینولدز



شکل ۱۵- بررسی تحلیل عدم قطعیت برای ناسلت

Abstract

Heat transfer enhancement in heat exchangers has been the subject of many researches. In the present work, effect of applying four solid inserts in a tube of 100 mm inner diameter and 950 mm length with constant wall temperature has been investigated experimentally in the range of turbulent Reynolds numbers of 4000 to 40000. The inserts were of different geometrical shapes, e.g. circular, elliptical, rectangular, triangular, etc. and were located either normal to the tube axis or inclined at 45° relative to it. Four similar inserts were used in each experiment. As a result of using these inserts, pressure drop also increases. To consider simultaneous effect of inserts on heat transfer and pressure drop, "performance evaluation coefficient" (PEC) is defined. PECs greater than one are desirable. For different inserts, the PEC ranges from 0.95 to 1.89.