

بهبود عملکرد کولرهای هوایی با استفاده از

آشفته ساز جریان

کولرهای هوایی (مبدلهای حرارتی هوا خنک) یکی از مهمترین و پرکاربردترین اجزاء سیستمهای تبادل انرژی در صنایع نیروگاهی، پتروشیمی و پالایشگاهی هستند که وظیفه خنک کاری سیال سیستم را به واسطه هوا بر عهده دارند. از آنجایی که امروزه مقوله انرژی و آلودگی های محیط زیست در دنیا از اهمیت بالایی برخوردار گردیده، طراحی کولر هوایی با کمترین مصرف انرژی الکتریکی و استهلاك قطعات مورد توجه مهندسان قرار گرفته است. بهبود عملکرد کولرهای هوایی از نقطه نظر حرارتی، کاهش نرخ رسوب گرفتگی و هزینه های تعمیرات و نگهداری یکی از موضوعات پژوهشی کاربردی است که در این مقاله برای تبیین آن تلاش شده است. در این مطالعه نصب وسایل آشفته ساز که در واقع افزاینده ضریب انتقال حرارت سیال در سمت لوله های دستگاه است مورد توجه قرار گرفته است. به عنوان مطالعه موردی، عملکرد سیستم آب خنک کاری یک نیروگاه گازی با استفاده از مدلسازی آشفته سازهای جریان مختلف (سیم فنری، نوارهای تابیده و شبکه سیمی) به صورت مقایسه ای مورد بررسی قرار گرفته و ملاحظه گردید که آشفته ساز نوع سیم فنری در آن کاربری مناسب تر عمل می نماید. مقایسه ای نیز در خصوص مصرف انرژی بین طرح اولیه و طرح ارتقاء یافته کولر هوایی در فصول مختلف سال انجام شده است که حاصل عدم نیاز به حضور یکی از فن ها در مدار در بدترین شرایط بهره برداری است. بررسی اولیه اقتصادی نیز نشان میدهد اجرای این روش ۲۰ درصد بهبود اقتصادی در طول ۱۰ سال استفاده از آن را در بر خواهد داشت.

سیروس صائب^۱

کارشناس ارشد

محمد رضا جعفری نصر^۲

استاد

محمد قدیمی^۳

استادیار

واژه های راهنما: آشفته ساز جریان، کولر هوایی، سیم فنری، نوارهای تابیده، شبکه سیمی

۱- مقدمه

مبدلهای حرارتی هوا خنک تجهیزات انتقال حرارتی هستند که با عبور هوا از روی لوله ها باعث خنک شدن سیال گرم می شوند. غالباً این مبدل های حرارتی را کولر هوایی می نامند. از آنجا که هوا به میزان قابل ملاحظه ای در اطراف ما موجود است انتخاب خوبی به جای آب برای خنک کاری است. اگر چه هوا دارای انتقال حرارت کمتر در مقایسه با آب است، لذا برای یک انتقال حرارت مشخص به مقداری بیشتر هوا نسبت به سیال سرمایشی دیگر مانند آب احتیاج است.

^۱ sirous.saeb@yahoo.com

^۲ nasrmrj@ripi.ir

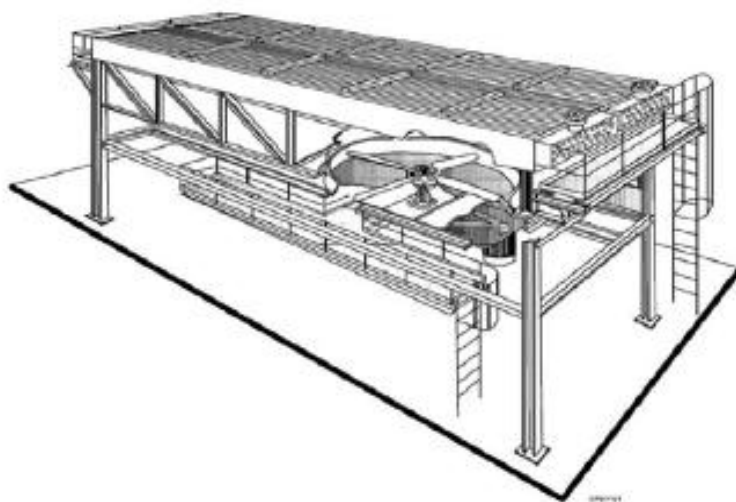
^۳ m.ghadimi@riau.ir

^۱ کارشناس ارشد، دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران

^۲ نویسنده مسئول، استاد، عضو هیئت علمی پژوهشگاه صنعت نفت و واحد علوم تحقیقات تهران

^۳ استادیار، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۰/۲۹، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۶/۱۰



شکل ۱- شمایی از یک کولر هوایی (مبدل هوا-خنک)

با توجه به همین ضعف از فن جهت تسریع در امر انتقال حرارت استفاده می شود. از آنجا که به مرور زمان و با استهلاک سیستم، مصرف توان به منظور کنترل دما و سایر شرایط فرآیندی افزایش می یابد، همواره راهکارهای افزایش راندمان کولر هوایی یا کاهش توان مورد نیاز فن ها مورد توجه است. در این پژوهش، با استفاده از آشفته سازهای جریان، به افزایش میزان انتقال حرارت سمت لوله اقدام نموده و تاثیرات آن ها را بر انتقال حرارت سمت هوا (میزان توان مصرفی فن ها) و هزینه های عملیاتی مورد بررسی قرار گرفته است. نهایتاً با انجام این بررسی بر روی کولر هوایی نیروگاه پرند، استفاده از آشفته ساز جریان^۱ به عنوان راهکاری موثر در جهت افزایش راندمان کولر های هوایی در حال کار پیشنهاد گردید.

نتایج این پژوهش نشان می دهد که علاوه بر بهبود دمای فرآیند، توان مصرفی فن ها را نیز به میزان چشمگیری کاهش یافته است.

۲- روشهای افزایش انتقال حرارت

تمایل به کاهش اندازه و وزن مبدلهای حرارتی همچنین صرفه جویی در هزینه اولیه و جاری مبدلهای حرارتی موجب استفاده از روشهای مختلفی برای افزایش نرخ انتقال حرارت شده است. این منظور معمولاً با افزایش ضریب انتقال حرارت بر واحد حجم برآورده می گردد. روش های مختلف افزایش نرخ انتقال حرارت را می توان به سه دسته تقسیم نمود:

¹ Turbulator

- ۱- روش های غیر فعال^۱ که نیازی به مصرف کار خارجی غیر از توان پمپاژ سیال ندارد. این روشها شامل (a) استفاده از سطوح ناصاف (b) سطوح پره دار (c) قراردادن آشفته ساز داخل مجاری جریان.
- ۲- روش های فعال^۲ که نیاز به مصرف کار خارجی داشته و شامل اقداماتی از قبیل: (a) مرتعش ساختن سطح مبدل حرارتی (b) اعمال میدان های الکترواستاتیکی (c) ایجاد ارتعاشات در سیال و غیره.
- ۳- روش های ترکیبی^۳ که یک روش مرکب است و در آن از روش فعال و غیر فعال به صورت ترکیبی استفاده می شود. روش ترکیبی شامل طراحی پیچیده بوده لذا کاربردهای محدودی دارد.

در انتخاب هر یک از روش های فوق نباید تنها به مسئله افزایش انتقال حرارت تمرکز نمود بلکه موضوع افزایش افت فشار و هزینه پمپاژ سیال که معمولا با افزایش انتقال حرارت همراه است نیز باید مد نظر قرار گیرد. طراحی مبدل حرارتی مناسب شامل راندمان ترمودینامیکی بالا با کمترین تولید آنتروپی و کمترین انرژی تلفات انرژی غیر ممکن است ولی با انجام طراحی مناسب می توان میزان آن را کاهش داد [۱].

۳- آشفته سازها

آشفته سازها وسایلی هستند که در داخل مجاری جریان قرار داده می شوند تا باعث ایجاد جریان چرخشی در سیال شوند. آشفته سازها در جریانهای ویسکوز در لایه مرزی اغتشاش ایجاد کرده و توده سیال (بالک) را با سیال کنار دیواره مخلوط و نهایتا موجب کاهش سرعت ته نشینی سیال و عدم تشکیل لایه مرزی می شوند بعلاوه افزایش سرعت شعاعی در جریان سیال داخل لوله باعث نوعی یکنواختی در توزیع دما در طول و در هر مقطع از لوله می شود [۲].

آشفته سازهای متداول جریان را می توان به صورت زیر نامگذاری نمود:

(a) سیم فنری^۴ (b) نوارهای تابیده^۵ (c) شبکه سیمی^۶

سیم به قطر e کوچکتر از قطر لوله انتخاب شد تا بر اثر عبور جریان سیال، فنرها حرکت رفت و برگشتی و دورانی داشته و باعث جریان یافتن سیال در راستای شعاعی گردد. این انتقال باعث افزایش حرارت جا به جایی می شود و از طرفی با پاره کردن لایه مرزی، مقاومت اعمالی آن را کم می کند. در ضمن زاویه دادن به سیال در برخورد با سطح جامد (تنش برشی) احتمال تشکیل رسوب را کم می کند و حتی در صورت تشکیل آن، باعث کنده شدن آن می شود که حالت تمیزکاری خودکار به آن می دهد. این تجهیزات با دو مشخصه (P/d) و (e/d) معرفی می شوند [۲].

¹ Passive

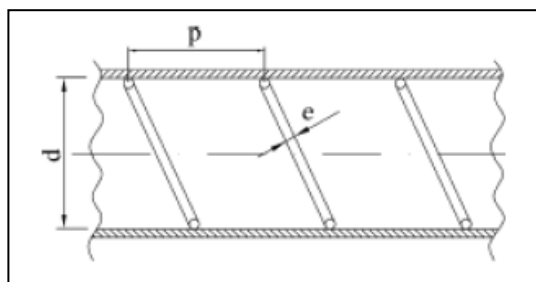
² Active

³ Compound

⁴ Wire Coil

⁵ Twisted Tape

⁶ Wire Matrix



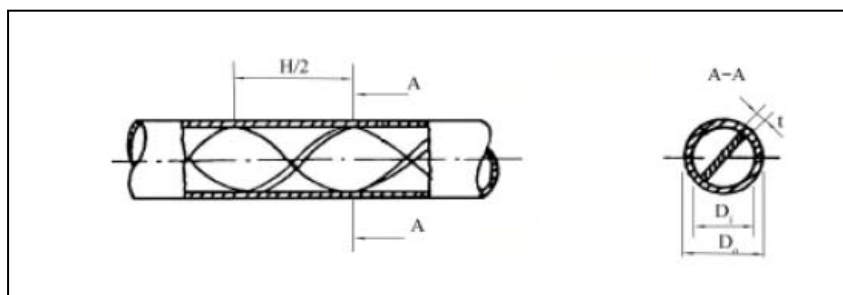
شکل ۲- آشفته ساز سیم فنری

نوارهای تابیده از یک نوار فلزی که به صورت مارپیچ تابیده شده تشکیل شده است و باعث جریان چرخشی و ایجاد جریانات ثانویه در جهت شعاعی و در نتیجه اختلاط بهتر سیال، افزایش آشفتگی، انتقال و جا به جایی سیال و نهایتاً افزایش ضریب انتقال حرارت در لوله می گردد. قرار دادن نوار تابیده شده به دو دلیل عمده زیر موجب افزایش ضریب انتقال حرارت می گردد:

۱- با قرار دادن نوار، حتی بدون پیچش، قطر هیدرولیکی مجرا کاهش یافته و در نتیجه ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد.

۲- نوار تابیده شده باعث بوجود آمدن یک سرعت چرخشی در جریان سیال می شود. این افزایش سرعت بخصوص نزدیک سطح لوله ضریب انتقال حرارت را بالا می برد. همچنین اگر سیال در حال گرم شدن باشد یک اختلاف جرم مخصوص بین سیال نزدیک مجرا و نزدیک سطح بوجود می آید که در میدان نیروی گریز از مرکز حاصله از چرخش سیال باعث راندن سیال سرد مرکز به سمت سطح لوله شده و مقدار انتقال حرارت را افزایش می دهد.

علاوه بر موارد فوق اگر تماس بین تیغه و سطح لوله برقرار بوده و ضریب هدایت حرارتی تیغه بزرگ باشد، مقداری انتقال حرارت هم بین تیغه و سیال انجام می پذیرد. مشخصه هندسی این تجهیزات به صورت نسبت پیچ یا گام (H/d) بیان می شود [۲].



شکل ۳- آشفته ساز نوار تابیده



شکل ۴- آشفته ساز شبکه سیمی دانسیته بالا

نوع دیگری از تجهیزات افزایش دهنده انتقال حرارت درون لوله ها شبکه های سیمی شامل حلقه های سیم متصل بهم اند که با دو سیم ضخیم تر که در مرکز لوله به دور هم تابیده شده اند، بافته می شوند (شکل ۴). آنها طوری بافته می شوند که قطرشان کمی بزرگ تر از قطر داخلی لوله باشد تا هنگام نصب و کشیده شدن به داخل لوله، سطح خارجی حلقه های سیم دقیقاً با سطح داخلی لوله در تماس باشد. تماس کامل سطح خارجی حلقه های سیم و سطح داخلی لوله باعث نوعی اثرات پره ای و افزایش انتقال حرارت و از طرفی از بین رفتن لایه مرزی حرارتی در سطح لوله است. همچنین با توجه به ساختمان خاص این شبکه ها و دانسیته زیاد سیم در مرکز لوله، نصب آنها باعث حرکت شعاعی سیال در لوله می شوند و در نتیجه مقاومت حرارتی در دیواره لوله کاهش می یابد. شبکه سیمی باعث افزایش مخلوط شدن سیال می شود و انتقال جرم و حرارت سمت لوله را افزایش می دهد و جریان سیال از حالت آرام به جریان آشفته تبدیل می شود. این شبکه ها با آشفته کردن لایه مرزی اثرات مقاومتی تنش برشی دیواره را کم و ضریب انتقال حرارت داخل لوله را بسیار زیاد می کنند. این تجهیزات را بر اساس تعداد حلقه سیم در واحد طول، یا به اصطلاح "دانسیته بافت" آنها تقسیم بندی می کنند [۲].

۴- شاخص ارزیابی عملکرد

به منظور ارزیابی آسان عملکرد آشفته سازهای مختلف از شاخص های عملکرد استفاده می شود. یکی از این شاخص ها توسط پلی و همکارانش^۱ معرفی شده و بصورت نسبت $\left(\frac{St^3}{f}\right)$ ، تعریف شده است. این نسبت با میزان سطح انتقال حرارت مورد نیاز رابطه معکوس داشته، به طوری که نسبت بالاتر آن به معنی سطح انتقال حرارت کمتر است. نکته قابل توجه در این شاخص آن است که این مقایسه در افت فشار (قدرت پمپاژ) یکسان صورت می گیرد [۳].

نظر به اینکه فاکتور اصطکاک در جریان سیال در لوله (f) و فاکتور انتقال حرارت (St) هر دو تابعی از عدد رینولدز هستند، می توان انتظار داشت که چرا این شاخص برای هر وسیله با عدد رینولدز تغییر می کند. بنابراین مقدار عدد رینولدز یک پارامتر کلیدی مهم در تعیین احتمال مزیت بکارگیری آشفته ساز جریان در لوله های مبدل حرارتی در مقایسه با لوله های ساده است. نتیجه دیگری که از مطالعه نتایج آزمایشات بدست آمد این است که به هنگام استفاده از آشفته ساز جریان، علیرغم ایجاد کاهش سرعت در

^۱ G.T. Polley et al.

لوله ها، به سطح حرارتی مورد نیاز کمتری احتیاج است. در این تحلیل، پلی و همکارانش فرض کرده اند که هیچگونه تاثیر و تداخلی میان مقاومت های حرارتی داخل و خارج لوله های مبدل حرارتی وجود ندارد. به بیان دیگر این تحلیل زمانی می تواند بیشتر بکار گرفته شود که مسئله از طرف لوله کاملاً کنترل کننده حرارت باشد. حال آنکه چنین فرضی در عمل ممکن است همواره امکان پذیر نباشد.

شاخص دیگری بر مبنای کار پلی و همکارانش، نیز توسط نصر و همکارانش توسعه و ارائه شد. در این شاخص اثرات تداخل سایر مقاومت های حرارتی بر روی ضریب انتقال حرارت در لوله ها بخوبی در نظر گرفته شده است. برای این منظور چنانچه تبادل حرارت میان سیال داخل لوله و بیرون برقرار باشد، در این صورت رابطه زیر را برای سطح حرارتی مبدل خواهیم داشت [۳].

$$A = \frac{mC_p}{h_t} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta T} \quad (1)$$

حال آنکه مطابق تعریف، عدد استانتون به شکل زیر بیان می گردد.

$$St = \frac{h_t}{mC_p} \quad (2)$$

از ترکیب دو معادله فوق داریم:

$$A = \frac{A_f}{St} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta T} \quad (3)$$

از طرفی افت فشار ناشی از عبور سیال از داخل آرایش های مختلف لوله ها مبدل توسط کیز و لندن^۱ به صورت زیر داده شده است.

$$\Delta P_t = \frac{2f}{\rho} \cdot \frac{A}{A_f} \cdot \left[\frac{m}{A_f} \right]^2 \quad (4)$$

این معادله را می توان بصورت زیر نوشت:

$$A_f = \left[\frac{2m^2}{\rho} \cdot \frac{A}{\Delta P_t} \cdot f \right]^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

با جایگزینی معادله (۳) در (۵) و مرتب کردن آن خواهیم داشت:

$$A^2 = \left(\frac{\Delta t}{\Delta T} \right)^3 \cdot \left(\frac{2m^2}{\rho \Delta P_t} \right) \cdot \left(\frac{f}{St^3} \right) \quad (6)$$

رابطه اختلاف درجه فیلمی و کلی نیز به صورت زیر داده شده است:

$$\Delta T = \frac{U}{h_i} \cdot \Delta T_o \quad (7)$$

با توجه به اینکه ضریب کلی انتقال حرارت به صورت زیر نیز تعریف شده است:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + R_{opp} \quad (8)$$

بنابراین از رابطه (۷) و (۸) خواهیم داشت:

¹ Kays & London

$$\frac{\Delta t}{\Delta T} = (1 + R_{opp} \cdot h_i) \cdot \left(\frac{\Delta t}{\Delta T_o}\right) \quad (9)$$

نهایتاً با جایگزینی معادله (۹) در رابطه (۶)، رابطه (۱۰) بدست خواهد آمد.

$$A^2 = \left(\frac{\Delta t}{\Delta T_o}\right)^3 \cdot (1 + R_{opp} \cdot h_i)^3 \cdot \left(\frac{2m^2}{\rho \Delta P_t}\right) \cdot \left(\frac{f}{St^3}\right) \quad (10)$$

بنابراین شاخص توسعه یافته جدید به صورت زیر بیان می شود:

$$P.I = \left(\frac{1}{1+R_{opp} \cdot h_i}\right)^{1.5} \cdot \sqrt{\frac{(St)^3}{f}} \quad (11)$$

در هنگام طراحی، در یک عدد رینولدز خاص مقدار شاخص (P.I) با لوله ساده مقایسه می شود. اگر در دامنه کار مبدل (محدوده رینولدز) مقدار شاخص (P.I) در هنگام استفاده از این وسایل، بالاتر از میزان آن در لوله ساده (خالی) باشد، نصب آشفته ساز جریان در سمت لوله ها منجر به طراحی مبدلی با سطح کمتر و در نتیجه هزینه سرمایه گذاری کمتری خواهد بود.

۵- نمونه صنعتی مورد مطالعه

در این مطالعه کولر هوایی نیروگاه گازی پرند به عنوان نمونه مورد بررسی قرار گرفته است. این کولر از نوع دمشی بوده و وظیفه خنک کاری آب برگشتی از کولر ژنراتور و از کولر روغن توربین گاز را بر عهده دارد. در طراحی، این کولر باید در بدترین شرایط آب و هوایی (دمای ۴۴ درجه سانتی گراد محیط) و با ۳ فن در مدار، اختلاف دمای ۵ درجه سانتی گراد در ورود و خروج آب را تامین نماید. ولی در عمل متاسفانه کولر مذکور قادر به انجام این مهم نبوده و تنها قادر به ایجاد ۲/۵ درجه سانتی گراد اختلاف در ورودی و خروجی آن هم با ۴ فن در مدار است. سیال عامل در سیستم فوق آب بدون املاح^۱ و ضدیخ با نسبت ترکیب (۳۰٪ اتیلن گلیکول + ۷۰٪ آب) است. مشخصات کامل کولر فوق در جدول (۱) ارائه شده است.

۶- مدلسازی در محیط نرم افزار

جهت مدلسازی کولر هوایی نیروگاه از نرم افزار تحقیقاتی انتقال حرارت (HTRI Xchanger suite) استفاده شده است. از آنجائیکه کولر هوایی قبلاً طراحی و نصب شده و صرفاً نیاز به بررسی وضعیت کولر از لحاظ راندمان، میزان انتقال حرارت نسبت به شرایط طراحی بود، لذا شیوه محاسبات به صورت عملکردی^۲ انتخاب گردیده است. جهت مدلسازی به اطلاعات دقیق مربوط مشخصات هندسی و اطلاعات فرآیندی مربوط به سیال ورودی به کولر هوایی نیاز است. این اطلاعات از مدارک و نقشه های سازنده، و استاندارد های موجود استخراج گردید. نتایج حاصل از مدلسازی در محیط نرم افزار مذکور، در جدول (۲) آورده شده است.

¹ Demineralized water

² Rating

جدول ۱- اطلاعات کولر هوایی نیروگاه پرنده [۴].

مشخصات عمومی		
۲۶۴۰	مبدل حرارتی (kW)	۱۴/۸ × ۱۰ (m ²)
۲۲۲۱۰	سطح فین نصب شده (m ²)	۴ \ ۲
۲۷/۸	نرخ انتقال حرارت از فین (W/m ² ·C)	۸۵
اطلاعات سمت لوله		
۴۱۰	دبی (m ³ /h)	۳ (bar)
۰/۰۰۰۱۷۲	ضریب رسوب (m ² ·C/W)	۰/۹ (bar)
اطلاعات سمت هوا		
۳۶۹	دبی (m ³ /s)	۱۴۴ (Pa)
۰/۰۰۰۳۴۴	ضریب رسوب (m ² ·C/W)	۱۵ (C°)
اطلاعات تجهیزات مکانیکی		
فن ها	الکتروموتورها	انتقال دهنده قدرت
۴/۲۷	۱۴۶۵ (RPM)	نسبت کاهش سرعت ۱ به ۷
۲۲۵	۴	تسمه HTD
۴	۴۰۰/۳/۵۰	ولتاژ/ فاز/ تناوب
۶	۳۷	قدرت (kW)
جنس		
A-214	کربن استیل	قطر لوله ها \ ضخامت (mm) ۲۵/۴ \ ۲/۱۱
	آلومینیوم \ جاسازی شده ^۱	قطر فین \ ضخامت \ گام (mm) ۵۷/۱۱ \ ۰/۴ \ ۶۵
	آلومینیوم \ کربن استیل	قاب دسته لوله

درصد طراحی اضافی منفی به مفهوم کوچک بودن سطح مبدل حرارتی جهت این میزان انتقال حرارت است که در عمل نیز توسط نیروگاه گزارش شده بود. در این پژوهش استفاده از آشفته سازها به دلیل داشتن ویژگیهایی مانند: نصب آسان، کمترین زمان ممکن جهت اجرا، نیاز به کمترین میزان تغییرات در هندسه کولر و هزینه کم، مد نظر قرار داشته تا ضمن امکانپذیری، نتایج اقتصادی تری نیز در بر داشته باشد. آشفته سازهای مورد بررسی شامل:

- سیم فنری $(e/d)=0.03$ و $(p/d)=1.25$
- نوارهای تابیده با دو نسبت گام 5 و 2 (H/D)
- شبکه سیمی با چگالی بالا و پایین

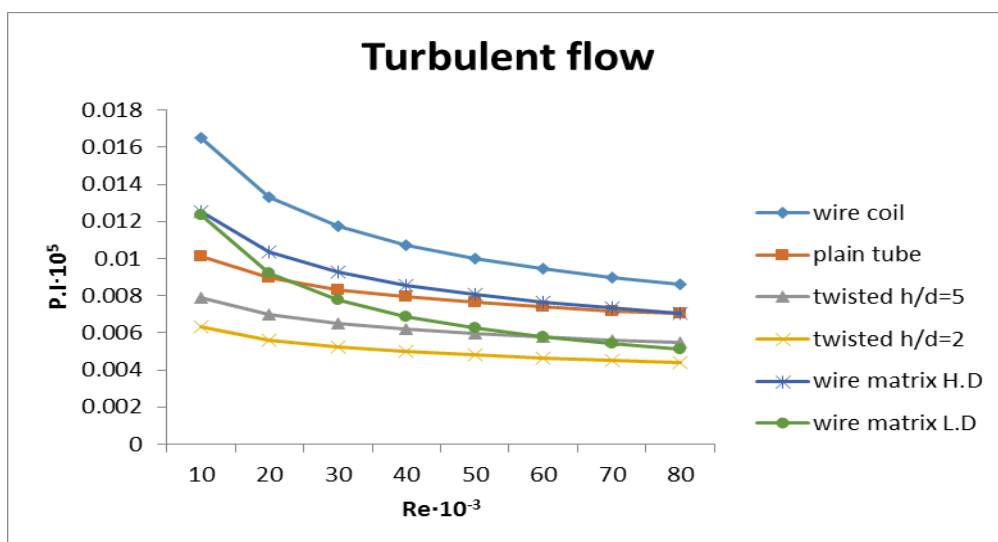
¹ Embedded

جدول ۲- راندمان کولر هوایی نیروگاه [۵].

۲۰۷۵۸/۷	سطح (m ²)
-۴/۴۶	درصد طراحی اضافی ^۱
۳۱/۴۷	ضریب فیلم سمت هوا (W/m ² K)
۵۰۴۲/۲۴	ضریب فیلم سمت لوله (W/m ² K)
۲۳/۵۱	ضریب انتقال حرارت کلی مورد نیاز (W/m ² K)
۲۲/۴۶	ضریب انتقال حرارت کلی واقعی (W/m ² K)
۲۵/۴۲	ضریب انتقال حرارت کلی در حالت تمیز (W/m ² K)
۵/۴	EMTD (C°)
۳۲۲۸۳	عدد رینولدز داخل لوله
۷۰۴۷	عدد رینولدز خارج لوله

حال با توجه به دبی جریان و شرایط فرآیندی سیال در گردش، عدد رینولدز و پرانتل سیال داخل لوله محاسبه شده، سپس جهت بررسی عملکرد آشفته سازهای مورد تحقیق از شاخص ارزیابی نصر و همکارانش استفاده نموده تا اثرات مقاومت حرارتی آشفته سازها و رسوب گذاری به خوبی دیده شود. نتایج در نمودار (۱) نشان داده شده است.

همانطور که از نمودار (۱) برآورد می شود آشفته ساز نوع سیم فنری به ازای یک افت فشار مشخص بالاترین مقدار شاخص تعریف شده را دارا است، لذا به لحاظ اقتصادی (هزینه سرمایه گذاری) مناسب تر عمل می نماید. بدیهی است شاخص های آشفته سازهایی که زیر منحنی لوله ساده قرار داشته مانند نوارهای تابیده از لحاظ اقتصادی مناسب نیستند.



شکل ۱- ارزیابی شاخص عملکرد نصر و همکارانش در جریان درهم

¹ Over design

پس از انتخاب نوع آشفته ساز اقدام به مدل کردن آن در محیط نرم افزار نموده، در این خصوص از روابط ارائه شده توسط گارسیا و همکارانش^۱ برای آشفته ساز سیم فنری در جریان درهم استفاده شد [۶].

$$Nu = 0.303 Re^{0.72} \cdot Pr^{0.37} \cdot \left(\frac{e}{d_i}\right)^{0.12} \cdot \left(\frac{P}{d_i}\right)^{-0.377} \quad (12)$$

$$f = 5.76 Re^{-0.217} \cdot \left(\frac{e}{d_i}\right)^{0.95} \cdot \left(\frac{P}{d_i}\right)^{-1.21} \quad (13)$$

نتایج مدلسازی آشفته ساز سیم فنری در داخل لوله های کولر هوایی افت فشار شدیدی را در داخل لوله ها نشان میدهد. این افت فشار شامل اتلاف ناشی از اصطکاک داخل لوله های کولر هوایی و مقاومت ناشی از حضور آشفته ساز جریان است که با افزایش ضریب اصطکاک همراه است.

$$\Delta P_t = 4f \frac{LN_p}{d_i} \cdot \frac{\rho u_m^2}{2} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0.14} \quad (14)$$

اتلاف ناشی از انقباض و انبساط ناگهانی و برگشت های جریان که سیال به دلیل تغییر مسیر در داخل لوله های کولر هوایی ممکن است تجربه کند نیز به عنوان اتلاف اصطکاک و بصورت رابطه (۱۵) بیان شده است.

$$\Delta P_r = 4N_p \cdot \frac{\rho u_m^2}{2} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0.14} \quad (15)$$

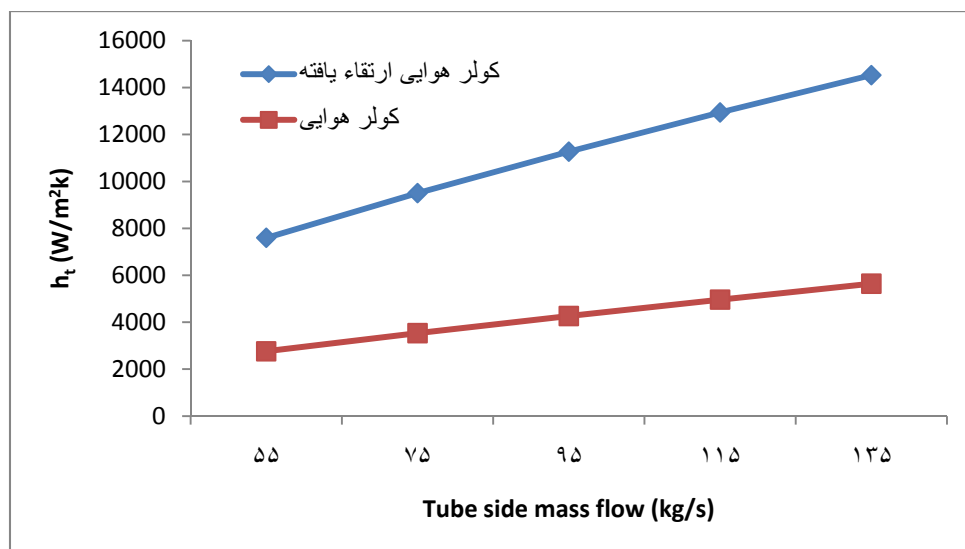
بنابراین افت فشار کل برابر است با:

$$\Delta P_{total} = \frac{\rho u_m^2}{2} \cdot \left[4f \cdot \frac{LN_p}{d_i} + 4N_p\right] \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{-0.14} \quad (16)$$

اما همانطوریکه قبلا در مقدمه اشاره شد، باید توجه داشت که در این رابطه با کم کردن تعداد گذرها امکان جبران افت فشار به راحتی وجود دارد. در کولر هوایی مورد بررسی، میزان افت فشار مجاز داخل لوله ها ۹۰ کیلوپاسکال تعریف شده که پس از اضافه کردن سیم فنری اختلاف فشار به ۲۳۷ کیلوپاسکال تغییر یافت. با کم کردن تنها یک گذر از کولر هوایی اختلاف فشار به ۱۰۸ کیلوپاسکال تغییر می نماید که میزان قابل قبولی است. کاهش تعداد گذرها در کلگی^۲ مبدل باعث کاهش افت فشار در دو انتهای کولر هوایی همچنین کاهش جریان برگشتی و افزایش ضریب انتقال حرارت می شود.

¹ Garcia et al.

² Header



شکل ۲- تغییرات ضریب انتقال حرارت جا به جایی بر حسب دبی

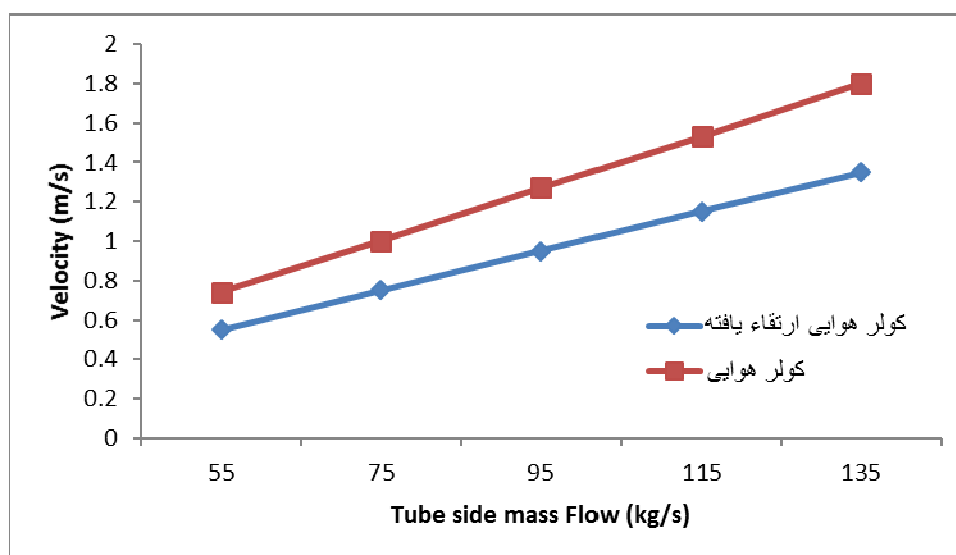
شکل (۲) میزان تغییرات ضریب انتقال حرارت جا به جایی سیال داخل لوله را بر حسب دبی های مختلف پمپ نشان می دهد. همانطور که از نمودار دیده می شود، آشفته ساز جریان سیم فنری برای جریان های درهم مناسب بوده و با افزایش سرعت، عملکرد بهتری از خود نشان می دهد و شیب منحنی را افزایش می دهد. جهت مقایسه بهتر نتایج، جدول (۳) در بدترین شرایط آب و هوایی تهیه شده است.

این جدول شامل سه ستون، که ستون اول مربوط به مشخصات طراحی اولیه کولر هوایی موجود در نیروگاه پرند است. ستون دوم با فرض آنکه امکان تغییر در ابعاد فن ها، عرض و طول دسته لوله ها وجود ندارد، مرتبط به بهینه سازی صورت گرفته به وسیله آشفته ساز سیم فنری است. ستون سوم نیز مربوط به طراحی کولر هوایی با استفاده از آشفته ساز سیم فنری است، با این فرض که تغییر در ابعاد فن ها، عرض و طول دسته لوله ها امکان پذیر باشد.

با توجه به جدول (۳)، سرعت در داخل لوله ها کاهش یافته که بسیار حائز اهمیت است، زیرا با کاهش سرعت، میزان سایش در لوله ها کاهش یافته و در نتیجه عمر لوله ها افزایش می یابد. همچنین به دلیل ایجاد سرعت شعاعی، تنش برشی افزایش و سطح رسوب خراشیده خواهد شد. این موضوع در واقع مانع از رشد لایه رسوب روی سطح لوله و یا روی سطح رسوب تشکیل شده اولیه می شود. در شکل (۳) تغییرات سرعت بر حسب دبی های مختلف سیال داخل لوله برای هر دو وضعیت کولر هوایی نشان داده شده است.

جدول ۳- مقایسه طراحی کولر هوایی با استفاده از آشفته ساز جریان و بدون آشفته ساز.

هندسه کولر هوایی	طرح اولیه	بهینه سازی با سیم فنری (ابعاد ثابت)	طراحی با سیم فنری (ابعاد متغیر)
تعداد لوله ها	۲۰۷	۲۰۷	۲۰۱
تعداد گذر ها	۴	۳	۳
طول لوله (m)	۱۴/۳	۱۴/۳	۱۴/۱
سطح موثر (m ²)	۲۰,۷۵۸	۲۰,۷۵۸	۱۹,۸۵۵
سرعت ورودی (m/s)	۱/۵۵	۱/۱۷	۱/۲۱
سرعت خروجی (m/s)	۱/۵۸	۱/۱۷	۱/۲
EMTD (C°)	۵/۴۱	۵/۳۹	۵/۳۹
درصد طراحی اضافی	-۴/۴۶	۳/۱۵	۰/۴
ضریب فیلم سمت هوا (W/m ² K)	۳۱/۴۷	۳۱/۴۶	۳۲/۱۳
ضریب فیلم سمت لوله (W/m ² K)	۵,۰۴۲	۱۳,۱۸۳	۱۳,۴۰۵
افت فشار داخل لوله (kPa)	۱۰۷/۳	۱۰۸/۳	۱۱۲/۵
U واقعی (W/m ² K)	۲۲/۴	۲۴/۳	۲۴/۷
قدرت فن (kW)	۳۰	۲۳/۸	۲۷
عدد رینولدز سمت لوله	۳۲,۲۸۳	۲۴,۴۷۳	۲۵,۲۰۴
عدد رینولدز سمت هوا	۷۰۴۷		
تعداد ردیف لوله ها	۶		
تعداد دهنه ها	۲		
تعداد دسته لوله ها	۴		



شکل ۳- تغییرات سرعت بر اساس دبی پمپ

۷- بهبود میزان انتقال حرارت کلی

شکل (۴) تغییرات درصد طراحی اضافی برای کولر ارتقاء یافته و کولر اولیه در دماهای مختلف هوا را نشان می دهد. همانطور که از نمودار دیده می شود شیب منحنی کولر هوایی ارتقاء یافته بیشتر از کولر هوایی اولیه است.

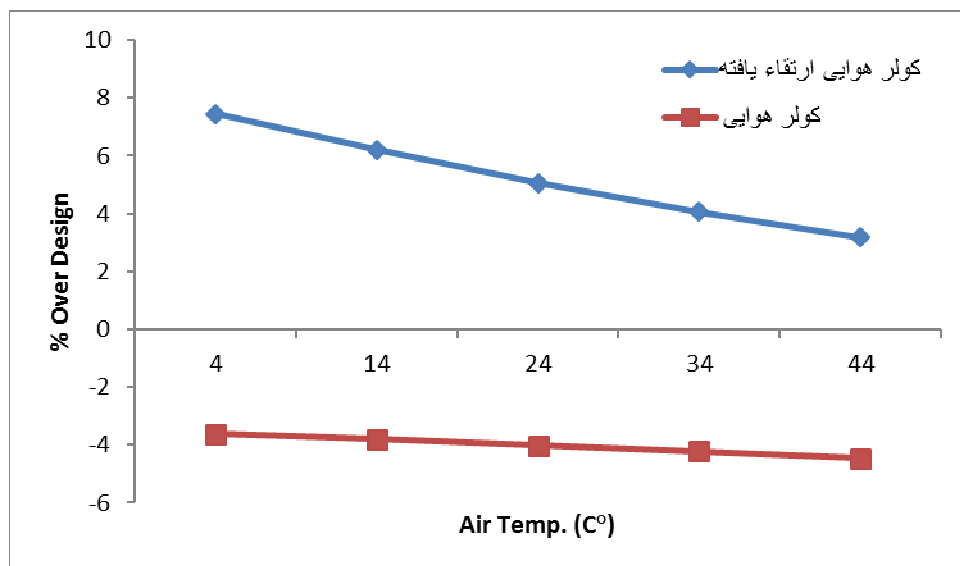
$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_o} + \frac{A_o}{A_i} \cdot \left(\frac{1}{h_i}\right) + R_o + \left(\frac{A_o}{A_i}\right) \cdot R_i + A_o R_w \quad (17)$$

$$\% \text{ Over design} = \left(\frac{U_{actual}}{U_{required}} - 1\right) \cdot 100 \% \quad (18)$$

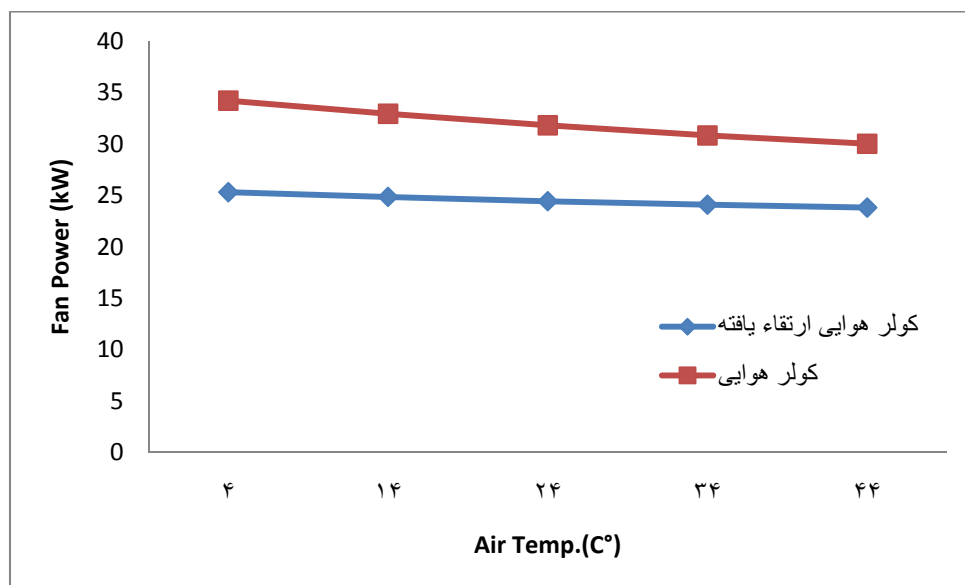
این موضوع به بهبود میزان انتقال حرارت کلی سمت هوای، کولر هوایی ارتقاء یافته اشاره دارد، بدین صورت که در یک شرایط دمایی یکسان، انتقال حرارت بیشتری در کولر هوایی ارتقاء یافته صورت می پذیرد. لذا میزان طراحی اضافی درصد بیشتری از خود نشان می دهد.

۸- کاهش سطح انتقال حرارت

سطح موثر انتقال حرارت در طرح کولر هوایی ابتدایی ۲۰۷۵۸ مترمربع در نظر گرفته شده بود که جهت انتقال حرارت کافی نبوده است. در نتیجه میزان درصد طراحی اضافی به صورت منفی نمایش داده شده است. جهت جبران این کمبود، سطح موثر کولر هوایی در طرح اولیه باید به ۲۱۷۴۸ متر مربع تغییر یابد، در صورتی که در کولر هوایی ارتقاء یافته این میزان ۱۹۸۵۵ مترمربع برآورد شده است. این اختلاف ۱۰ درصدی در ابعاد کولر هوایی در واقع باعث کاهش هزینه های سرمایه گذاری خواهد شد.



شکل ۴- تغییرات درصد طراحی اضافی بر حسب دمای هوا



شکل ۵- مقایسه قدرت هر فن بر حسب دمای هوا

۹- بهبود مصرف انرژی

در این بخش، جهت برآورد میزان بهبود مصرف انرژی به مقایسه میزان انرژی مصرفی در کولر هوایی ارتقاء یافته و کولر هوایی اولیه پرداخته شده است. برای این منظور قدرت هر فن در کولر هوایی ارتقاء یافته در فصل تابستان ۲۳/۸ کیلووات و میزان درصد طراحی اضافی ۳/۱۷ برآورد گردید که جهت تامین این میزان انتقال حرارت باید قدرت هر فن را به ۳۰ کیلووات در کولر هوایی اولیه تغییر داد.

این مهم در کل کولر هوایی به میزان ۶/۲ کیلووات برای هر فن، مجموعاً ۲۴/۸ کیلووات برای یک واحد نیروگاهی برآورد شده است که در واقع این میزان توان، معادل یک فن کامل در مدار در فصل تابستان است. حال با توجه به افزایش دانسیته هوا در فصول سرد سال قدرت فن نیز در این فصول افزایش بیشتری نشان می دهد تا آنجا که در فصل زمستان این میزان به مقدار ۸/۹ کیلووات به ازاء هر فن خواهد رسید. این تغییرات توان مصرفی بر حسب دمای هوا برای یک فن در کولر هوایی با آشفته ساز جریان و بدون آن در شکل (۵) نشان داده شده است.

۱۰- ملاحظات اقتصادی در استفاده از آشفته ساز جریان

از دیدگاه اقتصادی، در طرح بهبود عملکرد کولر هوایی به چهار عامل اصلی برای مقایسه توجه شده است.

- هزینه های اولیه
- این هزینه شامل هزینه های طراحی، خرید مواد مصرفی و ساخت کولر هوایی است همچنین در کولر هوایی ارتقاء یافته هزینه مربوط به خرید آشفته ساز جریان نیز لحاظ شده است.
- هزینه های انتقال و نصب

این هزینه شامل هزینه های مربوط به حمل و نقل سازه از کارخانه به نیروگاه و هزینه های مربوط به نصب کولر هوایی است، البته در کولر هوایی ارتقاء یافته هزینه های مربوط به نصب آشفته ساز جریان نیز لحاظ شده است.

• هزینه های تعمیرات و نگهداری

این هزینه شامل هزینه های تعویض و تهیه قطعات معیوب شامل بلبرینگ ها و تسمه های انتقال دهنده نیرو و ... ، تمیزکاری و شست و شوی لوله ها و بازدیدهای دوره ای است که در ۱۰ سال گذشته صورت پذیرفته است.

• هزینه های مصرف انرژی

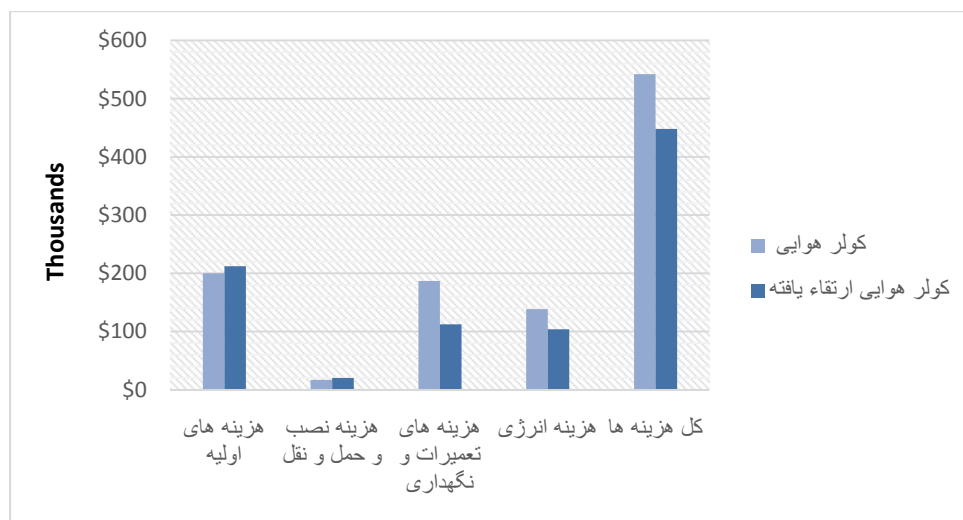
این هزینه مربوط به مصرف انرژی الکتریکی فن ها است که با توجه به آمار و اطلاعات ارائه شده توسط نیروگاه در خصوص میزان در مدار قرار داشتن فن ها در فصول مختلف سال و تعرفه مصرف برق صنعتی اقدام به محاسبه میزان بهاء مصرف انرژی شده است.

شکل (۶) مقایسه هزینه های کولر ارتقاء یافته و کولر هوایی اولیه را نشان می دهد. لازم به یادآوری

است، در این برآورد کلیه هزینه ها برای سال (۱۳۹۳) به روزآوری شده است.

همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است، میزان اختلاف هزینه ها در ۱۰ سال مجموعاً رقمی بالغ

بر ۳ میلیارد ریال، معادل ۲۰ درصد بهبود در هزینه های کل بوده که باعث جذابیت طرح فوق شده است.



شکل ۶- مقایسه هزینه های کولر هوایی بهبود یافته و معمولی در ده سال گذشته

۱۱- نتیجه گیری

پایین بودن ضریب انتقال حرارت هوا بزرگ ترین ضعف این سیال به عنوان عامل خنک کننده در کولرهای هوایی است که خود باعث بروز مشکلاتی مانند بالا رفتن سطح انتقال حرارت، قدرت فن و سر و صدای زیاد در کولرهای هوایی می شود. با استفاده از آشفته ساز جریان، علاوه بر این که تا حد زیادی می توان بر این مشکلات چیره شد و هزینه سرمایه گذاری و عملیاتی کولر هوایی را کاهش داد، از ماسیدگی و رسوب گرفتگی در داخل لوله نیز می توان جلوگیری کرد، همچنین عمر لوله ها نیز به دلیل کمتر شدن سرعت سیال داخل لوله ها و کاهش خوردگی افزایش خواهد یافت. در انتخاب آشفته ساز جریان باید به این نکته توجه داشت که نوع جریان و ویسکوزیته سیال عامل موثری در تعیین راندمان و کارایی این قبیل وسایل است لذا در هر مسئله باید ابتدا روابط حاکم بر آشفته سازها را برای سیال و عدد رینولدز مورد نظر مشخص نمود سپس با استفاده از رابطه شاخص ارزیابی عملکرد، میزان بهبود عملکرد آشفته سازها را مقایسه تا بهترین آنها از نظر اقتصادی انتخاب شود.

مراجع

- [1] Dewan, A., Mahanta, P., Sumithra Raju, K., and Suresh Kumar, P., "Review of Passive Heat Transfer Augmentation Techniques", Power and Energy, Vol. 218, Part A, pp. 509-527, (2004).
- [۲] جعفری نصر، محمدرضا، و سیدهادی، علایی، " فناوری نوین در بهبود عملکرد مبدل های حرارتی"، پژوهشگاه صنعت نفت، (۱۳۸۹).
- [۳] جعفری نصر، محمدرضا، علی تقی ذوقی و حمیدرضا خاکدامن، " توسعه یک شاخص مناسب به منظور ارزیابی عملکرد فناوری افزایش انتقال حرارت در طراحی مبدل های حرارتی"، فصلنامه تحقیق، ۴۳، ۳-۷، (۱۳۸۰).
- [4] Drago, "Air Cooler Data Sheet", Ansaldo Energia, Technical Document, (2003).
- [5] HTRI Xchanger Suite V6.00 Software, Heat Transfer Research Inc.
- [6] Ritchie, J., Droegemueller, P., and Higley, T., "Intensified Heat Transfer Technologies for Enhanced Heat Recovery", State of Art of Heat Transfer Enhancement Technologies and Their Benefits, Project No. 262205, Vol. 6, pp. 10-30, (2011).

فهرست نمادهای انگلیسی

- A: سطح حرارتی (m^2)
 A_f : سطح آزاد جریان سیال (m^2)
 A_i : سطح داخلی لوله (m^2)
 A_o : سطح خارجی لوله (m^2)
 C_p : حرارتی مخصوص در فشار ثابت ($kJ/kg \cdot C^\circ$)
 e : ضخامت فنر (m)
 f : ضریب اصطکاک
 h_i : ضریب انتقال حرارت جا به جا به جایی سمت لوله (W/m^2K)
 h_o : ضریب انتقال حرارت جا به جا به جایی سمت هوا (W/m^2K)
 H : گام نوار تابیده (m)
 L : طول لوله (m)
 m : جرم (kg)
 N_p : تعداد گذر
 Nu : عدد ناسلت
 P : گام فنر (m)
 Pr : عدد پرانتل
 Re : عدد رینولدز
 R_i : مقاوت ناشی از رسوب داخل لوله (m^2K/W)
 R_o : مقاوت ناشی از رسوب خارج لوله (m^2K/W)
 R_{opp} : مقاوت های مقابل جریان (m^2K/W)
 St : عدد استانتون
 U : ضریب کلی انتقال حرارت (W/m^2K)
 u_m : متوسط سرعت سیال (m/s)

نمادهای یونانی

- ΔP_t : اختلاف فشار سمت لوله (N/m^2)
 ΔT : اختلاف دمای فیلم (C°)
 ΔT_o : اختلاف دمای سرتاسری (C°)
 ρ : دانسیته (kg/m^3)
 μ : ویسکوزیته (cP)
 μ_w : ویسکوزیته در درجه حرارت جداره (cP)

Abstract

Applications of heat transfer enhancement by tube inserts (turbulators) have been used in many industries such as power plants, refineries and petrochemicals plants. The main objective is typically viewed primarily as a means to improve and to intensify the thermal performance, size and capital cost reduction of heat exchangers and air coolers. This article introduces a procedure for considering of heat transfer enhancement in a typical air cooler using different turbulators such as Wire coils, Twisted tape and Wire matrixes. Due to increase of the effective surface area, increase of eddies and back mixing in fluid and consequently increase of heat transfer rate, the required heat transfer area is reduced significantly. The case study shows application of wire coil inserts is more effective than others and goes beyond the size reduction. The comparison is revealed that about 20 percent improvement in total cost for 10 years operation of the existing air cooler equipped with the turbulator.