مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان 1396، دوره 17، شماره 8، ص‌ص 377-387

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

ارائه روشی به منظور ارزیابی و مطالعه پارامتری مبدل‌های حرارتی سه جریانی صفحه‌ای- فین‌دار با فین‌های مستطیلی

امیرفرهنگ ستوده[1*]، مهرانگیز قاضی[2]، مجید عمیدپور[3]

1-استادیار، مهندسی مکانیک، پژوهشگاه نیرو، تهران
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تاکستان، تاکستان
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
* تهران، صندوق پستی 14665517، asotoodeh@nri.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 23 اردیبهشت 1396
پذیرش: 28 خرداد 1396
ارائه در سایت: 27 مرداد 1396

کلید واژگان:
مبدل حرارتی صفحه‌ای فین‌دار سه جریانی
ارزیابی، مطالعه پارامتری
مدل‌سازی حرارتی
افت فشار
فین مستطیلی

چکیده

ارزیابی و طراحی مبدل‌های حرارتی سه جریانی برخلاف انواع دوجریانی آن دارای پیچیدگی بسیار زیادتری بوده و هنوز روش جامع و بالغی به این منظور ارائه نشده است. در این مقاله یک روش جدید به منظور ارزیابی مبدل‌های حرارتی سه جریانی صفحه‌ای- فین‌دار با فین‌های مستطیلی ارائه می‌شود. منظور از ارزیابی یک مبدل حرارتی، محاسبه بار حرارتی آن مبدل حرارتی یا به عبارتی دیگر محاسبه دمای خروجی هر جریان و نیز محاسبه افت فشار هر یک از جریان‌هاست. به همین منظور در این مقاله معادلات دیفرانسیل بقای انرژی و انتقال حرارت مربوط به هر جریان در حالت کلی استخراج و یک دستگاه معادله دیفرانسیل برحسب دماهای خروجی تشکیل شده و سپس پاسخ عمومی برای حصول مقدار دمای خروجی هر جریان استحصال می‌گردد. از طرفی برای بسط این پاسخ عمومی به مبدل‌های حرارتی سه جریانی صفحه‌ای- فین‌دار، مدل‌سازی هندسی، حرارتی و هیدرولیکی این نوع از مبدل‌های حرارتی با استفاده از پارامترهای هندسی فین‌های موجود- که در این مقاله بدون از دست دادن کلیت مسأله فین‌های مستطیلی انتخاب شده است، انجام می‌گیرد. براساس معادلات حاصل، الگوریتم کلی ارزیابی یک مبدل حرارتی صفحه‌ای- فین‌دار سه جریانی با جزییات ارائه می‌شود. برای بررسی روش و الگوریتم ارائه شده، از یک مطالعه موردی استفاده و نتایج آن بیان شده است. به منظور بررسی تأثیر پارامترهای هندسی فین‌ها نظیر ارتفاع و فرکانس فین بر بار حرارتی مبدل حرارتی و مقدار افت فشار جریان‌ها، یک مطالعه پارامتری روی مطالعه موردی مذکور انجام گرفته و نتایج حاصل ارائه شده است.

Design and Parametric Study of Three Stream Plate-Fin Heat Exchangers with Rectangular Fins

Amir Farhang Sotoodeh[1*], Mehrangiz Ghazi[2], Majid Amidpour[3]

1- Energy and Environment, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.
2- Mechanical Engineering, Takestan Branch, Islamic Azad University, Takestan, Iran
3- Energy System, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of technology, Tehran, Iran
* P.O.B. 14665517 Tehran, Iran, asotoodeh@nri.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 May 2017
Accepted 18 June 2017
Available Online 18 August 2017

Keywords:
Three Stream Plates –Fin Heat Exchanger
Rating
Parametric Study
Thermal Modeling
Pressure Drop
Rectangular Fin

ABSTRACT

In contrast with two stream heat exchangers, the three stream ones owns much more complexity in design and rating and a comprehensive rating method has not been proposed, yet. In this paper, a new rating method is presented in order to be used in three stream plate –fin heat exchangers. Rating, in heat exchangers, means finding out the heat load of the heat exchanger or in other words calculating the outlet temperature of each stream and furthermore, determining the pressure drops of each stream. In this paper, the differential equations of energy conservation and heat balance of each steam is extracted and a set of differential equations in terms of outlet temperatures is constructed. The general solution of this set of equations is then extracted. In order to expand the general solution to plate –fin heat exchangers, the geometric, thermal and hydraulic modeling are applied based on fin geometric specification which used rectangular type in this paper without losing generality. Based on all of the extracted equations, a comprehensive algorithm of rating of the three stream plate –fin heat exchangers is presented. In order to evaluate the presented algorithm, a case study is used and the results will be shown. Furthermore, a parametric study is applied to the case study to evaluate the effects of the geometric parameters of the fins such as height and frequency on heat load and pressure drop of the heat exchanger.

1- مقدمه

مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای- فین‌دار یکی از انواع متداول مبدل‌های حرارتی فشرده است که در صنایع مختلف از جمله صنایع نفت، گاز، پتروشیمی، نیروگاه‌ها، صنایع هوایی، صنایع شیمیایی و دیگران کاربرد فراوان دارد. از این نوع مبدل‌های حرارتی هم به صورت دو جریانی مانند پیش گرم‌کن‌های هوا در نیروگاه‌ها و هم به صورت سه و چندجریانی مانند جعبه‌های سرد در

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Farhang Sotoodeh, M. Ghazi, M. Amidpour, Design and Parametric Study of Three Stream Plate-Fin Heat Exchangers with Rectangular Fins, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 377-387, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.12.6]

صنایع گاز و پتروشیمی استفاده می‌شود. این نوع مبدل‌های حرارتی از تعداد زیادی صفحه تشکیل شده است که به صورت دسته‌ای روی یکدیگر چیده و بین این صفحات فین قرار می‌گیرد. مجموعه صفحات و فین‌ها به یکدیگر جوش می‌شوند. در این نوع مبدل‌های حرارتی علاوه‌بر ضریب تراکم بالا می‌توان به اختلاف دماهای خروجی بسیار پایین نیز دست یافت، همچنین استفاده از این نوع مبدل‌های حرارتی دارای محدودیت‌های دما و فشار بوده و به کارگیری آن‌ها مستلزم استفاده از سیالات تمیز است. از فین‌ها به دو منظور اساسی استفاده می‌شود: به عنوان سطوح ثانویه انتقال حرارت برای توزیع دمای بهتر و در نتیجه بهبود نرخ انتقال حرارت و نیز به عنوان تکیه‌گاه. امکان استفاده از انواع فین‌ها نظیر فین‌های صاف، نواری، کنگره‌ای و غیره موجبات ایجاد انعطاف‌پذیری بیشتری در طراحی این نوع مبدل‌های حرارتی را فراهم آورده است. از سوی دیگر مبدل‌های حرارتی از نظر تعداد جریان‌های تبادل‌کننده حرارت به مبدل‌های حرارتی دو جریانی، سه جریانی و چندجریانی تقسیم می‌شود. اگرچه برخی از منابع مبدل‌های حرارتی سه جریانی را نیز در دسته مبدل‌های حرارتی چندجریانی قرار می‌دهند، ولی از آن‌جایی که طراحی آن‌ها را می‌توان از طراحی مبدل‌های حرارتی چندجریانی متمایز دانست؛ بنابراین دسته‌بندی اول جامع‌تر به نظر می‌رسد. طراحی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای فین‌دار دو جریانی مانند سایر مبدل‌های حرارتی دوجریانی به صورت بالغ درآمده و انواع روش‌های طراحی و ارزیابی این نوع مبدل‌های حرارتی در مراجع مختلف ارائه شده است. با این وجود طراحی و ارزیابی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای- فین‌دار سه و چند جریانی به دلیل وجود تعداد زیاد جریان و پارامتر بسیار پیچیده بوده به نحوی که کماکان یک روش جامع برای طراحی و ارزیابی آن‌ها ارائه نشده است. یکی از دلایل پیچیدگی در طراحی این نوع مبدل‌های حرارتی این است که روش‌هایی مانند اختلاف دمای متوسط لگاریتمی و $\varepsilon - NTU$ که در مبدل‌های دو جریانی از آن‌ها به صورت گسترده استفاده می‌شود، در این نوع مبدل‌های حرارتی استفاده چندانی ندارد و این روش‌ها را نمی‌توان به منظور سهولت در طراحی این مبدل‌های حرارتی تعمیم داد. به طور کلی طراحی نوع دو جریانی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای– فین‌دار کاملاً توسعه یافته است به گونه‌ای که روش‌های مختلفی برای طراحی آن‌ها در کتاب‌های مربوط به اصول و طراحی مبدل‌های حرارتی آورده شده است [1-4]. با این وجود طراحی نوع چندجریانی این نوع مبدل‌های حرارتی بسیار پیچیده‌تر است. ساده‌ترین نوع مبدل‌های حرارتی چندجریانی مبدل‌های سه جریانی است که در آن‌ها نیز اضافه شدن جریان سوم اثر قابل ملاحظه‌ای بر افزایش پیچیدگی‌های طراحی و ارزیابی این نوع مبدل‌های حرارتی دارد. از مبدل‌های حرارتی سه جریانی اساساً در مواردی استفاده می‌شود که در آن‌ها سه جریان (دو جریان گرم و یک جریان سرد و یا دو جریان سرد و یک جریان گرم) به تبادل حرارت می‌پردازند. روش‌های مختلفی برای طراحی و ارزیابی این نوع مبدل‌های حرارتی در سال‌های اخیر توسط محققان ارائه شده است، با این وجود کماکان طراحی این نوع مبدل‌های حرارتی نیز نسبت به مبدل‌های حرارتی دو جریانی، که طراحی آن‌ها به بلوغ رسیده، دارای پیچیدگی و دشواری‌های بیشتری است.

نخستین بررسی‌ها در مورد مبدل‌های حرارتی سه جریانی به سال‌های نسبتاً دور باز می‌گردد. مورلی [5] برمبنای قانون سرمایش نیوتن و معادلات بقای انرژی یک دستگاه معادلات دیفرانسیل استخراج کرده و سپس به روش انتگرالی پاسخ تحلیلی این دستگاه معادلات را به دست آورد. او برای طراحی این نوع مبدل‌های حرارتی از یک روش سعی و خطا استفاده کرد که این روش بعدها توسط بسیاری از محققان گسترش داده شده است. سورلی [6] روش مشابهی را جهت طراحی مبدل‌های حرارتی سه جریانی گسترش داد. او با حل یک دستگاه معادلات مرتبه اول خطی یک پاسخ بسته برای دمای جریان‌ها استخراج و در ضمن عبارتی برای ضریب اثر کلی در این نوع مبدل‌های حرارتی پیشنهاد کرد. آولدس و بارون [7] مطالعات سورلی را برای یک مبدل حرارتی سه جریانی که همه جریان‌های آن با یکدیگر در تبادل حرارتی است، گسترش دادند. از این نوع مبدل‌های حرارتی در سیستم‌های سرمایش عمیق به صورت گسترده‌ای استفاده می‌شود. سکولیک و شاه [8] یک روش جامع برای طراحی مبدل‌های حرارتی سه جریانی با آرایش موازی ارائه کردند که در این روش مسائل طراحی و ارزیابی این گونه مبدل‌های حرارتی به صورت گام به گام بررسی می‌شود. تحلیل ارائه شده توسط آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از روش ε-NTU (در طراحی مبدل‌های حرارتی دو جریانی بسیار پر کاربرد و مفید است) در مبدل‌های سه جریانی تا حد زیادی بر پیچیدگی مسأله می‌افزاید، همچنین سایر تحقیقاتی که در زمینه مبدل‌های سه جریانی تا پیش از سال 1995 میلادی توسط محققان انجام شده، توسط سکولیک و شاه [8] به صورت نسبتاً کامل بررسی شده است که برای اختصار از بیان آن‌ها در این مقاله صرف‌نظر می‌شود. شری واستاوا و آمیل در دو مقاله متوالی [10,9] به بررسی مبدل‌های حرارتی سه جریانی پرداخته‌اند. در مقاله اول [9] آن‌ها یک مدل ریاضی ساده به منظور طراحی تحلیلی و بررسی مبدل‌های حرارتی سه جریانی ارائه کردند. برخی فرضیات اصلی آن‌ها عبارت از پایا بودن مبدل حرارتی، خواص ثابت برای سیالات، صرف‌نظر کردن از هدایت طولی و از همه مهم‌تر یک بعدی فرض کردن انتقال حرارت است، همچنین شش عدد بدون بعد توسط آن‌ها تعریف و اثرات هر یک بر توزیع دما در جریان‌های مبدل حرارتی بررسی شد. در مقاله دوم [10] با استفاده از این شش عدد بدون بعد و برای پنج هدف مختلف در مبدل حرارتی ضریب اثر مبدل حرارتی مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها نشان دادند که استفاده از یک تعریف واحد برای ضریب اثر مبدل حرارتی که قادر باشد همه این پنج حالت را دربر گیرد در عمل امکان‌پذیر نیست. سعید و سیتارامو [11] معادلات دیفرانسیل حاصل از انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی سه جریانی با جریان‌های همسو و ناهمسو که دارای دو ارتباط حرارتی با یکدیگر باشند را حل کرده و پاسخ‌های آن را ارائه کردند. روآن و همکاران [2] مفهوم ضریب اثر اگزرژتیک را برای ارزیابی عملکرد ترمودینامیکی مبدل‌های حرارتی سه جریانی با سه ارتباط حرارتی ارائه، همچنین از روش ارزیابی آنتروپی تولیدی برای بررسی اثرات پارامترهای بدون بعد بر تولید آنتروپی در مبدل‌های حرارتی استفاده کردند. ژایو و لی [14] روشی مشابه روش اختلاف دمای میانگین لگاریتمی که در مبدل‌های حرارتی دو جریانی استفاده می‌شود به نام روش اختلاف دمای میانگین انتگرالی برای مبدل‌های حرارتی سه جریانی ارائه کرده‌اند. این روش برای مبدل‌های حرارتی سه جریانی با جریان‌های موازی و با دو ارتباط حرارتی استخراج شده است. آن‌ها این روش را برای چهار حالت مختلف برای جریان‌های موجود در مبدل حرارتی مدل‌سازی و روابط آن را استخراج کرده‌اند. کریشنا و همکاران [15] اثرات تبادل حرارتی با محیط در یک مبدل حرارتی سه جریانی که در صنایع سرمایش عمیق کاربرد دارد را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از هفت عدد بدون بعد و در نظرگرفتن اثرات هر یک از آن‌ها بر عملکرد حرارتی مبدل حرارتی استفاده کردند. یوآن و کو [16] اثرات هدایت طولی دیواره را در

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.12.6]

عملکرد حرارتی یک مبدل حرارتی سه جریانی با جریان متعامد بررسی کردند. آن‌ها یک ضریب زوال انتقال حرارت برای لحاظ اثرات انتقال حرارت هدایت در دیواره معرفی کرده و اثرات تغییرات آن را بر تعداد مراحل انتقال، نسبت ظرفیت‌های حرارتی و نسبت هوای ورودی در سه حالت مختلف از چیدمان جریان‌های موجود بررسی کردند. کریشنا و همکاران [17] نیز اثرات هدایت طولی در دیواره‌ها را در معادلات دیفرانسیل مشتق شده از یک مبدل حرارتی سه جریانی با آرایش موازی در نظر گرفته و معادلات حاصل را به دو روش تحلیلی و روش المان محدود حل کردند. پنگ و همکاران [18] تأثیرات توزیع نامناسب جریان ورودی در یک مبدل حرارتی چندجریانی و از جمله سه جریانی را بر چیدمان جریان‌ها بررسی کردند. آن‌ها در این مقاله چیدمان بهینه جریان‌های موجود را با در نظر گرفتن اثرات حرارتی توزیع نامناسب جریان به دست آوردند. مبدل‌های حرارتی سه جریانی پرداخته‌اند. در زمینه بررسی انتقال حرارت در حالت ناپایا در مبدل‌های حرارتی سه جریانی، بیلسکی و میلانوفسکی [19] یک حل شبه تحلیلی برای تحلیل ناپایای مبدل‌های حرارتی سه جریانی موازی ارائه کردند. همین نویسندگان بعداً یک روش حل کاملاً تحلیلی را برای چنین مبدل‌های حرارتی ارائه کردند [20]. مالینوفسکی و بیلسکی [21] اثرات هدایت طولی در دیواره‌ها و انتقال حرارت ناپایا را هم‌زمان در معادلات لحاظ و به کمک یک روش عددی معادلات حاکم را حل کردند. تان و همکاران در دو مقاله متوالی [23,22] به بررسی تأثیر متغیر فرض کردن خواص ترموفیزیکی سیال در مبدل‌های حرارتی چندجریانی (حالت خاص مبدل سه جریانی) پرداختند. در مقاله اول [22] مدل‌سازی و تحلیل حساسیت این نوع مبدل حرارتی و در مقاله دوم [23] روشی برای ارزیابی مدل مربوط به ویسکوزیته و ضریب هدایت متغیر ارائه شده است.

در این مقاله یک مبدل حرارتی سه جریانی صفحه‌ای- فین‌دار با فین‌های مستطیلی مدل‌سازی و الگوریتم ارزیابی آن استخراج می‌شود. دو نوع الگوریتم طراحی (سایزینگ) و ارزیابی (ریتینگ) برای بررسی هر مبدل حرارتی موجود است. منظور از ارزیابی یک مبدل حرارتی محاسبه بار حرارتی آن مبدل حرارتی یا به عبارتی دیگر محاسبه دمای خروجی هر جریان و نیز محاسبه افت فشار هر یک از جریان‌ها با معلوم بودن هندسه آن مبدل حرارتی است، همچنین برای بررسی اثر پارامترهای هندسی مبدل حرارتی بر شاخص‌های طراحی از یک مطالعه پارامتری استفاده می‌شود. به این منظور روابط هندسی، حرارتی و هیدرولیکی مربوط به یک مبدل حرارتی سه جریانی صفحه‌ای- فین‌دار استخراج می‌شود. از آن‌جایی که برای طراحی مبدل‌های حرارتی سه جریانی استفاده از روش‌هایی مانند ε-NTU استفاده چندانی ندارد؛ بنابراین از یک مدل‌سازی حرارتی و استخراج پاسخ تحلیلی حاصل از حل آن استفاده می‌شود. براساس معادلات حاصل، الگوریتم کلی ارزیابی یک مبدل حرارتی صفحه‌ای– فین‌دار سه جریانی با فین‌های مستطیلی با جزییات ارائه می‌شود. این الگوریتم کلی بوده که در این مقاله بدون از دست دادن کلیت مسأله از فین‌های مستطیلی در آن استفاده شده است. به طور کلی نوآوری‌های این مقاله را می‌توان به صورت زیر نوشت.

1- مدل‌سازی و ارائه یک حل تحلیلی برای ارزیابی حرارتی مبدل‌های حرارتی سه جریانی صفحه‌ای- فین‌دار با فین‌های مستطیلی،

2- مطالعه پارامتری و بررسی اثر پارامترهای هندسی بر بار حرارتی و افت فشار مبدل‌های حرارتی سه جریانی صفحه‌ای- فین‌دار با فین‌های مستطیلی،

3- ارائه یک روش و الگوریتم کلی و جدید جهت ارزیابی یک مبدل حرارتی سه جریانی صفحه‌ای- فین‌دار با فین‌های مستطیلی،

همچنین از برتری‌های اصلی این روش در مقایسه با روش‌های مشابه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- استفاده از یک روش با حل صریح برای ارزیابی مبدل‌های حرارتی سه جریانی،
- ارزیابی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای– فین‌دار سه جریانی با در نظر گرفتن تمام پارامترهای هندسی مربوط به آن،
- کلی بودن روش، و امکان بسط آن به تمام فین‌های موجود،
- امکان انجام مطالعه پارامتری جامع با استفاده از یک الگوریتم صریح،

2- روش ارزیابی مبدل حرارتی صفحه‌ای– فین‌دار سه جریانی با فین‌های مستطیلی

مراحل مربوط به الگوریتم و روش ارزیابی مبدل‌های حرارتی سه جریانی صفحه‌ای- فین‌دار با فین‌های مستطیلی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

1- مدل‌سازی دیفرانسیلی و استخراج معادلات جرمی و انرژی مربوط،
2- حل تحلیلی معادلات استخراج شده،
3- ارائه روابط مربوط به نوزیع دما و محاسبه دمای خروجی هر جریان،
4- مدل‌سازی و استخراج روابط هندسی و هیدرولیکی فین‌های مستطیلی،
5- مدل‌سازی حرارتی مبدل حرارتی سه جریانی با فین مستطیلی،
6- ارائه الگوریتم کلی و روش ارزیابی مبدل حرارتی سه جریانی،

در ادامه هر یک از مراحل یادشده با جزییات کافی شرح داده خواهد شد.

2-1- مدل‌سازی و استخراج روابط حرارتی مربوط به مبدل حرارتی سه جریانی در حالت کلی

فرضیات زیر در سرتاسر مقاله به منظور ساده‌سازی در مدل‌سازی‌های مربوط به یک مبدل حرارتی سه جریانی در این مقاله و بدون از دست دادن کلیات در نظر گرفته می‌شود.

1- مبدل حرارتی به صورت پایا کار می‌کند.
2- خواص سیال و ضرایب انتقال حرارت در مبدل ثابت فرض می‌شود.
3- از هدایت جانبی در سیال و صفحات صرف‌نظر می‌شود.
4- از تلفات حرارتی با محیط صرف‌نظر می‌شود.
5- سیالات در فرآیند انتقال حرارت تغییر فاز نمی‌دهند.

یک مبدل حرارتی سه جریانی دارای سه جریان حرارتی (دو جریان گرم و یک جریان سرد و یا دو جریان سرد و یک جریان گرم) است. نمای کلی یک مبدل حرارتی سه جریانی که در آن جریان میانی با دو جریان دیگر دارای آرایش ناهمسو است، در شکل 1 نشان داده شده است. این شکل کلی‌ترین حالت یک مبدل حرارتی یعنی یک مبدل حرارتی سه جریانی با سه ارتباط حرارتی (یعنی هر جریان با هر دو جریان دیگر دارای تبادل حرارتی است) را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن یک المان به طول dx در طول مبدل حرارتی، برای جریان شماره جریان 1 در شکل 1 که جریان از چپ به راست جریان دارد، می‌توان رابطه (1) را نوشت.

$$\left[\dot{m}c_pT-\dot{m}c_p\left(T+\frac{\partial T}{\partial x}dx\right)\right]_1 - (UA)_{12}(T_1-T_2)\frac{dx}{L}-(UA)_{13}(T_1-T_3)\frac{dx}{L}=0 \quad (1)$$

به همین ترتیب برای جریان شماره 2 که از راست به چپ جریان دارد، می‌توان رابطه (2) را نوشت.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.12.6]

$$-\left[\dot{m}c_p\left(T+\frac{\partial T}{\partial x}dx\right)-mc_pT\right]_2 - (UA)_{12}(T_2-T_1)\frac{dx}{L}-(UA)_{23}(T_2-T_3)\frac{dx}{L}=0 \quad (2)$$

و برای جریان شماره 3 می توان رابطه (3) را نوشت.

$$\left[\dot{m}c_pT-\dot{m}c_p\left(T+\frac{\partial T}{\partial x}dx\right)\right]_3 - (UA)_{13}(T_3-T_1)\frac{dx}{L}-(UA)_{23}(T_3-T_2)\frac{dx}{L}=0 \quad (3)$$

با ساده کردن و بازنویسی روابط (1-3) می‌توان روابط (4-6) را نوشت.

$$\frac{dT_1}{dx}-\frac{(UA)_{12}}{L}(T_2-T_1)-\frac{(UA)_{13}}{L}(T_3-T_1)=0 \quad (4)$$

$$-\frac{dT_2}{dx}-\frac{(UA)_{12}}{L}(T_1-T_2)-\frac{(UA)_{23}}{L}(T_3-T_2)=0 \quad (5)$$

$$\frac{dT_3}{dx}-\frac{(UA)_{13}}{L}(T_1-T_3)-\frac{(UA)_{23}}{L}(T_2-T_3)=0 \quad (6)$$

می‌توان روابط (4-6) را به صورت بی‌بعد شده و مطابق روابط (7-9) بازنویسی کرد.

$$k_1\frac{d\theta_1}{d\hat{x}}=NTU_1[(\theta_2-\theta_1)-R_2(\theta_3-\theta_1)] \quad (7)$$

$$k_2\frac{d\theta_2}{d\hat{x}}=NTU_1C_{12}[(\theta_1-\theta_2)+R_1(\theta_3-\theta_2)] \quad (8)$$

$$k_3\frac{d\theta_3}{d\hat{x}}=NTU_1\frac{C_{12}}{C_{32}}[R_1(\theta_1-\theta_3)-R_2(\theta_2-\theta_3)] \quad (9)$$

که پارامترهای بدون بعد در روابط (7-9) به صورت روابط (10-15) تعریف می‌شود.

$$\hat{x}=\frac{x}{L} \quad (10)$$

$$NTU_1=\frac{(UA)_{12}}{C_1} \quad (11)$$

$$R_1=\frac{(UA)_{32}}{(UA)_{12}} \quad (12)$$

$$R_2=\frac{(UA)_{13}}{(UA)_{12}} \quad (13)$$

$$\theta_i=\frac{T_i-T_{1,\text{in}}}{T_{2,\text{in}}-T_{1,\text{in}}} \quad (14)$$

$$C_{ij}=\frac{C_i}{C_j} \quad (15)$$

از آن جایی که حاصل جمع روابط (7-9) صفر است (به دلیل آن‌که هیچ چاه یا منبع حرارتی در مبدل حرارتی وجود ندارد)، حل این سه معادله دیفرانسیل جهت حصول پاسخ برای محاسبه θ_1، θ_2 و θ_3 به دلیل غیرمستقل بودن آن‌ها منتج به پاسخ نمی‌شود. در این حالت معادله چهارمی برای یک المان کلی به طول dx که شامل کل جریان‌هاست به صورت رابطه (16) نوشته می‌شود.

$$\left[\dot{m}c_pT-\dot{m}c_p(T+\frac{\partial T}{\partial x}dx)\right]_1-\left[\dot{m}c_pT-\dot{m}c_p(T+\frac{\partial T}{\partial x}dx)\right]_2 + k_3\left[\dot{m}c_pT-\dot{m}c_p\left(T+\frac{\partial T}{\partial x}dx\right)\right]_3 = 0 \quad (16)$$

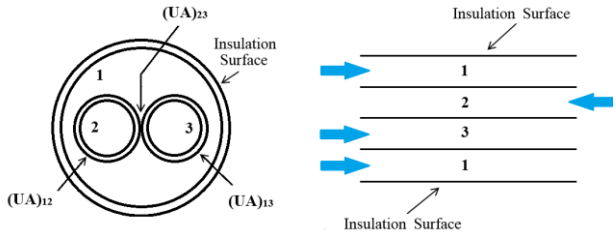

Fig. 1 General Schematic of Three Steam Heat Exchanger

شکل 1 نمای یک مبدل حرارتی سه جریانی در حالت کلی

صورت بدون بعد رابطه (16) را می‌توان به صورت رابطه (17) نوشت.

$$k_1C_{12}\frac{d\theta_1}{d\hat{x}}+k_2\frac{d\theta_2}{d\hat{x}}+k_3C_{32}\frac{d\theta_3}{d\hat{x}}=0 \quad (17)$$

به این ترتیب با حل دستگاه معادلات دیفرانسیل شامل روابط (17,8,7) می‌توان پروفیل‌های θ_1، θ_2 و θ_3 را به دست آورد. از آن‌جایی که این مقاله بدون از دست دادن کلیت مسأله، یک مبدل حرارتی سه جریانی با دو رابطه حرارتی مطابق شکل 2 را مورد بررسی قرار می‌دهد؛ بنابراین معادلات مربوط به این نوع مبدل حرارتی را می‌توان به صورت یک حالت خاص از معادلات بالا نوشت. در یک مبدل حرارتی با دو ارتباط حرارتی مطابق شکل 2، جریان مرکزی با هر دو جریان جانبی به تبادل حرارتی می‌پردازد. آرایش این نوع مبدل حرارتی نیز همان طور که در شکل 2 نشان داده شده است، به صورت موازی ناهمسو می باشد.

برای مبدل حرارتی سه جریانی با دو ارتباط، روابط (7-9) را می‌توان به صورت روابط (18-20) نوشت.

$$\frac{d\theta_1}{d\hat{x}}=NTU_1(\theta_2-\theta_1) \quad (18)$$

$$\frac{d\theta_2}{d\hat{x}}=NTU_1C_{12}[(\theta_2-\theta_1)+R_1(\theta_2-\theta_3)] \quad (19)$$

$$\frac{d\theta_3}{d\hat{x}}=NTU_1\frac{C_{12}}{C_{32}}R_1(\theta_2-\theta_3) \quad (20)$$

همچنین برای یک مبدل حرارتی مطابق شکل 2، رابطه (17) را نیز می‌توان به صورت رابطه (21) نوشت.

$$\theta_{1.\text{out}}C_{12}+(\theta_{2.\text{out}}-1)+(\theta_{3.\text{out}}-\theta_{3.\text{in}})C_{32}=0 \quad (21)$$

با حل دستگاه معادلات دیفرانسیل شامل روابط (21,19,18) می‌توان پاسخ عمومی برای محاسبه θ_1، θ_2 و θ_3 (دماهای خروجی بدون بعد) را به‌دست آورد.

سکولیک و شاه [8] راه حل عمومی این چنین دستگاه معادلاتی را به صورت رابطه (22) ارائه کردند.

$$\theta_j(\hat{x})=\theta_{2.\hat{x}=0}\phi_j(\hat{x})+\theta_{3.\ \hat{x}=0}\Psi_j(\hat{x}) \quad (22)$$

مقادیر $\phi_j(\hat{x})$ و $\Psi_j(\hat{x})$ در جدول 1 و مقادیر $\theta_{2.\hat{x}=0}$ و $\theta_{3.\hat{x}=0}$ برابر با روابط (24,23) است.

$$\theta_{2.\hat{x}=0}=\frac{1-\theta_{3.\text{in}}\Psi_2(1)}{\phi_2(1)} \quad (23)$$

$$\theta_{3.\hat{x}=0}=\theta_{3.\text{in}} \quad (24)$$

مقادیر $E^-(\xi)$ و $E^+(\xi)$ مندرج در جدول 1 به صورت روابط (26,25) محاسبه می‌شود.

$$E^+(\xi)=e^{s_1\hat{x}}+e^{s_2\hat{x}} \quad (25)$$

$$E^-(\xi)=e^{s_1\hat{x}}-e^{s_2\hat{x}} \quad (26)$$

که در آن s_1 و s_2 برابر با روابط (28,27) است.

$$s_1=-(\beta-\gamma)\frac{NTU_1}{2} \quad (27)$$

$$s_2=-(\beta+\gamma)\frac{NTU_1}{2} \quad (28)$$

که مقادیر β و γ در روابط (28,27) به صورت روابط () تعریف می‌شود.

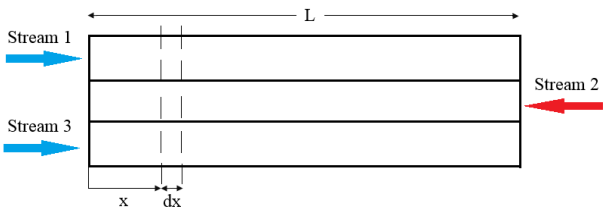

Fig. 2 Three Steam Heat Exchanger with Two Communications

شکل 2 یک مبدل حرارتی سه جریانی با دو ارتباط حرارتی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.12.6]

جدول 1 روابط محاسباتی مربوط به رابطه (22)

Table 1 The calculation relations of equation (22)

j	$\phi_j(\hat{x})$	$\Psi_j(\hat{x})$
1	$-\frac{1}{C_{32}}\Psi_1(\hat{x})+\frac{1}{\gamma}E^-(\xi)$	$\frac{1}{2a}\left[2-E^+(\xi)-E^-(\xi)\frac{\beta}{\gamma}\right]$
2	$-\frac{1}{C_{32}}\Psi_2(\hat{x})+\frac{1}{2}\left[E^+(\xi)-E^-(\xi)\frac{\beta-2}{\gamma}\right]$	$\Psi_1(\hat{x})-\frac{R_1C_{12}}{\gamma}E^-(\xi)$
3	$\frac{1}{C_{32}}[(\phi_2(\hat{x})-1)-C_{12}\phi_1(\hat{x})]$	$1-\frac{1}{C_{32}}[-\Psi_2(\hat{x})+C_{12}\Psi_1(\hat{x})]$

$$\beta = 1-\frac{1}{C_{12}}\left[1+R_1\left(1-\frac{1}{C_{32}}\right)\right] \tag{29}$$

$$\gamma = (\beta^2+4R_1C_{12}\alpha)^{\frac{1}{2}} \tag{30}$$

که مقدار α در رابطه (30) از رابطه (31) به‌دست می‌آید.

$$\alpha = 1+\frac{1}{C_{32}}(-1+C_{12}) \tag{31}$$

از طرفی می‌توان اثبات کرد که دمای خروجی هر جریان به صورت روابط (34-32) محاسبه می‌شود.

$$\theta_{1.\mathrm{out}} = \phi_2^{-1}(1)\{\phi_1(1) + \theta_{3.\mathrm{in}}[\phi_2(1)\Psi_1(1) - \phi_1(1)\Psi_2(1)]\} \tag{32}$$

$$\theta_{2.\mathrm{out}} = \phi_2^{-1}(1)[1-\theta_{3.\mathrm{in}}\Psi_2(1)] \tag{33}$$

$$\theta_{3.\mathrm{out}} = \phi_2^{-1}(1)\{\phi_3(1) + \theta_{3.\mathrm{in}}[\phi_2(1)\Psi_3(1) - \phi_3(1)\Psi_2(1)]\} \tag{34}$$

به این ترتیب می‌توان با استفاده از روابط حرارتی ارائه شده و براساس مدل‌سازی هندسی فین‌ها که در ادامه خواهد آمد، پروفیل دما و دمای خروجی جریان‌ها را با استفاده از روابط (34-32) استحصال کرد.

پیش از استخراج روابط هندسی، حرارتی و هیدرولیکی مربوط به فین‌های مستطیلی به منظور استخراج الگوریتم ارزیابی لازم است ابتدا مطلب مهم دیگری تحت عنوان تقاطع دما در مبدل‌های حرارتی سه جریانی مطرح و بررسی شود.

2-2- تقاطع دما

یکی از مباحث بسیار مهم در طراحی مبدل‌های حرارتی سه جریانی بحث تقاطع دما بین جریان‌های آن مبدل حرارتی است. تقاطع دما در مبدل‌های حرارتی دوجریانی زمانی رخ می‌دهد که دمای سیال سرد خروجی از دمای سیال گرم خروجی بیشتر شود. در مبدل های حرارتی سه جریانی تک گذره امکان برابری دما و تقاطع دما در هر مقطعی از مسیر جریان بین سیالات مجاور و غیرمجاور امکان‌پذیر است. به این صورت که برای نمونه در مقطعی از مبدل حرارتی یکی از جریان‌های گرم توسط جریان سرد، گرم می‌شود که این پدیده منجر به اتلاف سطح حرارتی شده و باید از وقوع آن در مبدل حرارتی ممانعت شود. چنین پدیده‌ای در برخی از انواع آرایش‌های ممکن امکان وقوع دارد، ولی در مورد آرایش جریان‌های موجود در این مقاله به دلیل آن که جریان وسطی نسبت به دو جریان جانبی دارای آرایش نسبی ناهمسو است، عملاً امکان تقاطع دما در هیچ مقطعی از مبدل حرارتی وجود نداشته و فقط تقاطع دمایی ممکن است مانند آن‌چه در مورد مبدل‌های دو جریانی تعریف می‌شود اتفاق بیافتد که اثری منفی بر عملکرد مبدل حرارتی نخواهد داشت. به این ترتیب در الگوریتم ارزیابی مستخرج در این مقاله که در ادامه خواهد آمد، به بررسی حصول تقاطع دما در مقاطع مختلف مبدل حرارتی نیازی نخواهد بود.

3- استخراج روابط مربوط به فین‌های مستطیلی

در این قسمت مدل‌سازی و استخراج روابط هندسی، هیدرولیکی و حرارتی مربوط به فین‌های مستطیلی به ترتیب ارائه خواهد شد.

3-1- روابط هندسی فین‌های مستطیلی

از آن‌جا که در این مقاله از فین‌های مستطیلی در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای- فین‌دار سه جریانی استفاده می‌شود، لازم است روابط هندسی، حرارتی و هیدرولیکی مربوط به این نوع از فین‌ها بیان و استخراج شود. نمای کلی یک صفحه حرارتی که دارای فین مستطیلی است در شکل 3 رسم شده است. پارامترهای هندسی یک فین مستطیلی شامل ضخامت فین، گام فین و ارتفاع فین است که به ترتیب با t_f، s و b در شکل 3 نشان داده شده است. قطر هیدرولیکی برای مقاطع غیردایره‌ای به صورت رابطه (35) تعریف می‌شود.

$$d_{\mathrm{h}} = \frac{4A}{p} \tag{35}$$

با توجه به شکل 3 قطر هیدرولیکی برای یک فین مستطیلی را می‌توان به صورت رابطه (36) نوشت.

$$d_{\mathrm{h}} = \frac{2(s-t_{\mathrm{f}})(b)}{(s-t_{\mathrm{f}}+b)} \tag{36}$$

از طرفی با توجه به شکل هندسی فین‌های مستطیلی، می‌توان سطح آزاد جریان را برای یک صفحه حرارتی به عرض W به صورت رابطه (37) نوشت.

$$A_{\mathrm{ff}} = (s-t_{\mathrm{f}})(b)\left(\frac{W}{s}\right) \tag{37}$$

مساحت کل انتقال حرارت در یک صفحه فین‌دار شامل مجموع سطح انتقال حرارت صفحه و سطح انتقال حرارت فین‌ها را می‌توان به صورت رابطه (38) نوشت.

$$A_{\mathrm{tot}} = A_{\mathrm{p}} + A_{\mathrm{fin}} \tag{38}$$

که در آن A_{tot} سطح کل انتقال حرارت، A_{p} سطح انتقال حرارت صفحه و A_{fin} سطح انتقال حرارت فین‌هاست. باجای‌گذاری مقادیر هندسی برای هر صفحه فین‌دار با فین مستطیلی می‌توان رابطه (39) نوشت.

$$A_{\mathrm{tot}} = 2WL\left(1+\frac{b}{s}\right) \tag{39}$$

که در آن L طول مبدل حرارتی است. از طرفی بازده کلی سطح حرارتی به صورت رابطه (40) تعریف می‌شود.

$$\eta_{\mathrm{o}} = 1-\left(\frac{A_{\mathrm{fin}}}{A_{\mathrm{tot}}}\right)(1-\eta_{\mathrm{f}}) \tag{40}$$

نسبت سطح انتقال حرارت فین‌ها به کل سطح انتقال حرارت به صورت رابطه (41) نوشته می‌شود.

$$\frac{A_{\mathrm{fin}}}{A_{\mathrm{tot}}} = \frac{2WL\left(\frac{b}{s}\right)}{2WL\left(1+\frac{b}{s}\right)} = \frac{b}{b+s} \tag{41}$$

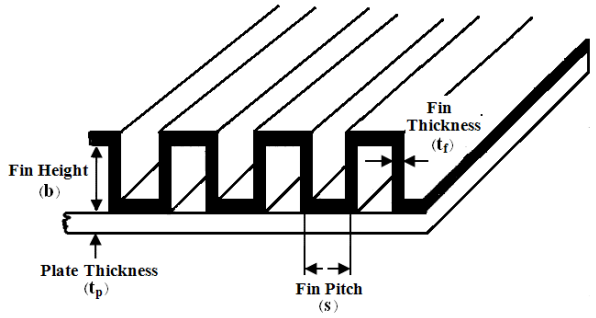

Fig. 3 A typical schematic of plate-fin heat exchanger with rectangular fins

شکل 3 شمای کلی یک مبدل حرارتی صفحه‌ای – فین‌دار با فین مستطیلی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.12.6]

با قرار دادن رابطه (41) در رابطه (40) می‌توان رابطه (42) نتیجه گرفت:

$$\eta_o = \frac{s + b\eta_f}{s + b} \tag{42}$$

به این ترتیب بازده کلی سطح را می‌توان برحسب بازده فین و پارامترهای هندسی فین نوشت.

3-2- روابط هیدرولیکی فین‌های مستطیلی

مقدار افت فشار یک سیال در یک صفحه فین‌دار به طول L و قطر هیدورلیکی d_h را می‌توان از رابطه (43) محاسبه کرد [24].

$$\Delta P = 2\frac{f}{\rho}\frac{L}{d_h}G^2 \tag{43}$$

در آن f ضریب فانینگ، ρ چگالی سیال و G شار جرمی سیال در هر صفحه است. شار جرمی سیال به صورت رابطه (44) محاسبه می‌شود.

$$G = \frac{\dot{m}}{A_{ff}} \tag{44}$$

که در آن $\dot{m}$ دبی جرمی سیال است، ضریب فانینگ را می‌توان برحسب عدد رینولدز به صورت رابطه (45) نوشت [24].

$$f = C_f \mathrm{Re}^{-y} \tag{45}$$

در آن Re عدد رینولدز و C_f و y ضرایب ثابت است. از طرفی عدد رینولدز به صورت رابطه (46) تعریف می‌شود.

$$\mathrm{Re} = \frac{G d_h}{\mu} \tag{46}$$

که در آن μ ویسکوزیته دینامیکی سیال است. با جای‌گذاری رابطه (46) در رابطه (45) می‌توان رابطه (47) نوشت.

$$f = C_f\left(\frac{G d_h}{\mu}\right)^{-y} \tag{47}$$

از طرفی با قرار دادن روابط (47,37,36) در رابطه (43) و ساده‌سازی آن می‌توان رابطه (48) نوشت.

$$\Delta P = 2\nu C_f\left(\frac{1}{\mu}\right)^{-y}(\dot{m})^{-y+2}\left[\frac{2(s-t_f)(b)}{(s-t_f+b)}\right]^{-y-1}\left[(s-t_f)(b)\left(\frac{W}{s}\right)\right]^{y-2}(L) \tag{48}$$

به این ترتیب مقدار افت فشار برای هرکدام از جریان‌های موجود در مبدل حرارتی صفحه‌ای- فین‌دار سه جریانی به‌دست می‌آید.

3-3- روابط حرارتی فین‌های مستطیلی

به‌دست آوردن ضریب کلی انتقال حرارت از جمله موارد اساسی در محاسبات مربوط به مبدل‌های حرارتی محسوب می‌شود. با صرف‌نظر کردن از انتقال حرارت هدایت در صفحه‌های جداکننده و بدون از دست دادن کلیت مسأله می‌توان رابطه (49) را به صورت زیر نوشت.

$$\frac{1}{(UA)_{i,j}} = \frac{1}{U_iA_i} = \frac{1}{U_jA_j} = \frac{1}{\eta_{o,i}h_iA_i} + \frac{1}{\eta_{o,j}h_jA_j} \tag{49}$$

که در رابطه (49)، η_o بازده کلی سطح، h ضریب انتقال حرارت و A سطح انتقال حرارت است. در عین حال اندیس‌های i و j دلالت بر شماره جریان دارد.

به همین منظور ضریب انتقال حرارت را می‌توان از رابطه (50) به دست آورد:

$$h = jC_pG\mathrm{Pr}^{-\frac{2}{3}} \tag{50}$$

که در آن j ضریب کولبرن است و آن را می‌توان به صورت رابطه (51) تعریف کرد.

$$j = \mathrm{St}\mathrm{Pr}^{\frac{2}{3}} \tag{51}$$

در آن Pr عدد پرانتل و St عدد استانتون است. مشابه ضریب فانینگ، ضریب کولبرن را نیز می‌توان برحسب عدد رینولدز به صورت رابطه (52) نوشت [24].

$$j = C_j\mathrm{Re}^{-x} \tag{52}$$

که در آن C_j و x ضرایب ثابت است و می‌توان اثبات نمود که عدد رینولدز را برای هر کانال می‌توان به صورت رابطه (53) نوشت:

$$\mathrm{Re} = \frac{2\dot{m}s}{\mu W(s - t_f + b)(NS)} \tag{53}$$

از طرفی بازده کلی سطح طبق رابطه (42) به دست می‌آید که در آن بازده فین را می‌توان به صورت رابطه (54) تخمین زد.

$$\eta_f = \frac{\tanh(mL_c)}{mL_c} \tag{54}$$

که در آن می‌توان به جای L_c تقریبا مقدار b/2 را قرار داد و مقدار m نیز به صورت رابطه (55) تعریف می‌شود.

$$m = \sqrt{\frac{2h}{kt_f}} \tag{55}$$

که در آن k ضریب هدایت مربوط به فین و t_f ضخامت فین مورد استفاده است.

به این ترتیب و براساس روابط حرارتی ارائه شده در این بخش می‌توان ضریب کلی انتقال حرارت بین هر دو جریان را به دست آورد. از ضرایب کلی انتقال حرارت محاسبه شده بین هر دو جریان به منظور محاسبه NTU_1 در رابطه (11)، محاسبه R_1 در رابطه (12) و R_2 در رابطه (13) استفاده می‌شود.

4- الگوریتم طراحی

براساس مدل‌سازی حرارتی، هندسی و هیدرولیکی یک مبدل حرارتی صفحه‌ای- فین‌دار سه جریانی با فین‌های مستطیلی و روابط مستخرج از آن‌ها، روش و الگوریتم مربوط به ارزیابی این نوع از مبدل‌های حرارتی استخراج گردیده و فلوچارت مربوط به آن در شکل 4 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 4 ملاحظه می‌شود مراحل مختلف ارزیابی یک مبدل حرارتی صفحه‌ای- فین‌دار سه جریانی با فین‌های مستطیلی به صورت گام به گام ارائه شده است.

نکته حایز اهمیت این است که گرچه الگوریتم ارائه شده مربوط به فین‌های مستطیلی است، ولی بدون از دست دادن کلیت روش از این الگوریتم می‌توان برای ارزیابی هر نوع مبدل حرارتی صفحه‌ای- فین‌دار سه جریانی با هر نوع فینی استفاده کرد. استفاده از سایر فین‌ها مستلزم استخراج روابط هندسی مربوط به آن نوع از فین و تعمیم آن روابط به معادلات حرارتی و هیدرولیکی می‌باشد. این روابط هندسی روند طراحی ارائه شده در شکل 3 را تغییر نداده و صرفاً برخی پارامترهای هندسی جدید و روابط مخصوص آن را به مسأله اضافه می‌کند.

در ادامه و به منظور بررسی روش و الگوریتم ارائه شده در خصوص ارزیابی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای- فین‌دار سه جریانی با فین‌های مستطیلی از یک مطالعه موردی استفاده می‌شود.

5- مطالعه موردی

در این بخش برای بررسی قابلیت روش و الگوریتم طراحی مبدل‌های حرارتی سه جریانی صفحه‌ای- فین‌دار با فین‌های مستطیلی، ارائه شده در این مقاله، از یک مطالعه موردی برگرفته از مراجع معتبر استفاده می‌شود. به همین منظور ابتدا ارزیابی این مبدل حرارتی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی انجام گرفته و سپس با استفاده از یک مطالعه پارامتری اثر تغییرات پارامترهای هندسی فین‌ها بر بار حرارتی مبدل حرارتی و افت فشار جریان‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.12.6]

5-1- کلیات مطالعه موردی

جهت بررسی الگوریتم ارزیابی ارائه شده در این مقاله از یک مطالعه موردی برگرفته از مرجع [8] (که بسیاری از مراجع دیگر نیز از آن به عنوان مطالعه موردی استفاده کرده‌اند) استفاده می‌شود. این مطالعه موردی دارای سه جریان که دو جریان آن سرد و یک جریان آن گرم است. در جدول 2 مشخصات فرآیندی مربوط به این جریان‌ها و پارامترهای هندسی مبدل‌حرارتی شامل دمای ورودی، طول مبدل حرارتی، تعداد لایه‌ها و فاز هر جریان آورده شده است، همچنین مشخصات هندسی مربوط به فین‌های هر کدام از این سه جریان شامل ارتفاع فین، ضخامت فین، چگالی فین، قطر هیدرولیکی فین، سطح آزاد جریان بر واحد عرض، نسبت سطح به حجم فین و نسبت سطح فین به کل سطح حرارتی محاسبه و در جدول 3 آورده شده است.

شبیه‌سازی الگوریتم ارائه شده برای ارزیابی (محاسبه دماهای خروجی جریان‌ها و بار حرارتی مبدل حرارتی) این مبدل حرارتی سه جریانی صفحه‌ای – فین‌دار با استفاده از کدنویسی در برنامه متلب و براساس فلوچارت شکل 4 انجام گرفته شده است.

5-2- نتایج و بحث

پیش از اجرای الگوریتم ارزیابی لازم است ضرایب توابع مربوط به محاسبات ضرایب کولبرن و فانینگ محاسبه شود. برای محاسبه ضرایب توابع مربوط به محاسبات ضرایب کولبرن و فانینگ از اطلاعات مرجع بسیار معتبر کیز و لندن [25] که به صورت آزمایشگاهی و با دقت بسیار زیادی گردآوری شده استفاده می‌شود. از اطلاعات آزمایشگاهی این مرجع ارزشمند در بسیاری از کارهای انجام شده توسط سایر محققان فراوان استفاده شده است.

در شکل 5 نمودار ضریب کولبرن برحسب عدد رینولدز برای هر سه فین مربوط به مطالعه موردی مندرج در جدول 3 و براساس مقادیر مرجع [25] رسم، همچنین در شکل 6 نمودار ضریب فانینگ برحسب عدد رینولدز برای همین فین‌ها براساس مقادیر مرجع [25] رسم و نشان داده شده است.

جدول 2 مشخصات فرآیندی جریان‌ها و هندسی مبدل حرارتی مطالعه موردی

Table 2 The Properties of Streams and Geometric Properties of the heat exchanger of the Case Study

مشخصات	جریان گرم	جریان‌های سرد	
	$H1$	$C1$	$C2$
C (W/K)	975.3	553.5	329.5
T_{in} (°C)	246.3	1.8	49.0
L (mm)	200	200	200
t_p (mm)	2	2	2
N_l	6	6	6
فاز جریان	گاز	گاز	گاز

جدول 3 مشخصات هندسی فین‌های استفاده شده در مطالعه موردی

Table 3 the Geometric Properties of Case Study Fins

مشخصات	جریان گرم	جریان‌های سرد	
	$H1$	$C1$	$C2$
ارتفاع فین (mm)	5.18	6.35	8.38
ضخامت فین (mm)	0.152	0.152	0.152
چگالی فین (تعداد بر متر)	1015	782	581
قطر هیدرولیکی (mm)	1.875	1.151	2.590
سطح آزاد جریان بر واحد عرض (mm)	4.25	5.46	7.5
نسبت سطح به حجم فین	1840.6	2807.1	1378
نسبت سطح فین به کل	0.849	0.884	0.884

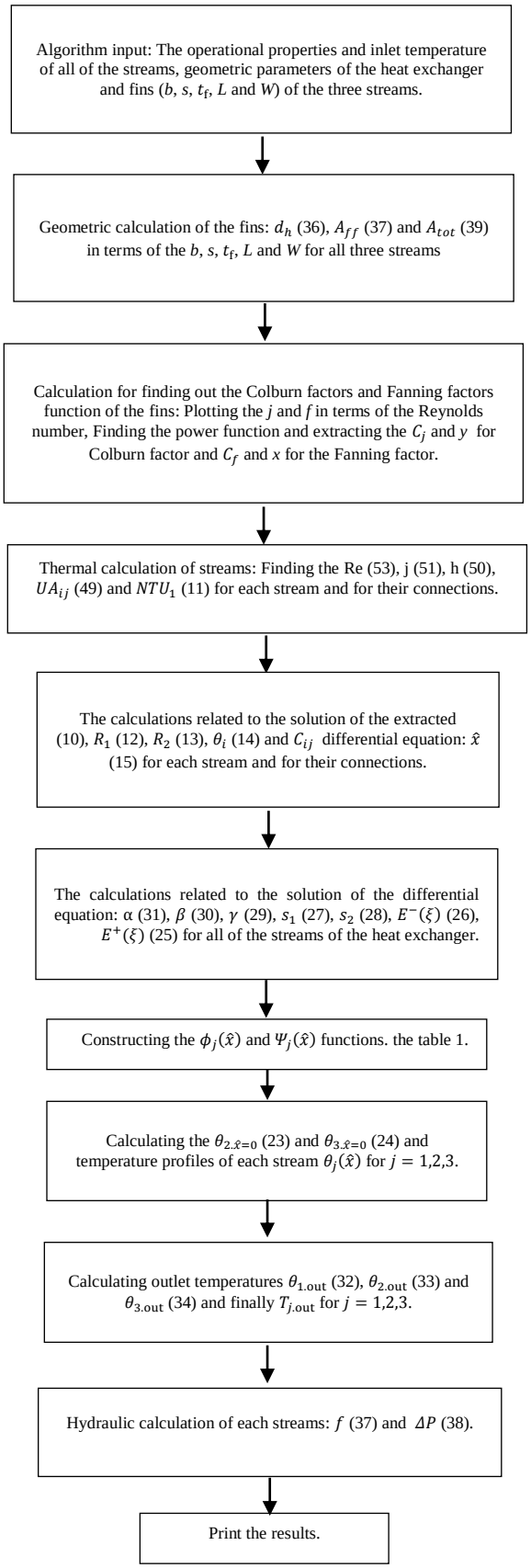

Fig. 4 A typical schematic of plate-fin heat exchanger with rectangular fins

شکل 4 شمای کلی یک مبدل حرارتی صفحه‌ای – فین‌دار با فین مستطیلی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.12.6]

براساس نمودارهای ارائه شده در شکل‌های 5 و 6 (نمودارهای ضرایب کولبرن و فانینگ برحسب عدد رینولدز) و با استفاده از محاسبات رایانه‌ای با استفاده از نرم‌افزار متلب ضرایب مربوط به توابع جهت محاسبه ضرایب کولبرن و فانینگ استخراج و محاسبه، مقدار این ضرایب در جدول 4 نیز آورده شده است.

همان‌طور که در شکل 5 ملاحظه می‌شود با افزایش عدد رینولدز مقدار ضریب کولبرن به تقریب برحسب یک تابع توانی کاهش پیدا می‌کند. این کاهش در اعداد رینولدز در حدود 100-2000 با شیب تند قابل ملاحظه‌ای اتفاق می‌افتد. در صورتی که هر چه عدد رینولدز بالاتر می‌رود، شیب کاهش کم شده به طوری که در رینولدزهای بسیار بالا شیب آن تقریباً ثابت می‌شود. به این ترتیب هرچه عدد رینولدز در هر یک از این جریان‌ها پایین‌تر باشد، مقدار عددی ضریب انتقال حرارت بیشتر شده و در نتیجه انتقال حرارت بین جریان‌ها افزایش می‌یابد. به همین ترتیب همان‌طور که در شکل 6 ملاحظه می‌گردد ضریب فان‌ینگ نیز رفتاری کاملاً مشابه با تغییرات ضریب کولبرن برحسب عدد رینولدز دارد. به این صورت که با افزایش عدد رینولدز ضریب فانینیگ کاهش یافته که این کاهش در رینولدزهای پایین با شیب تند و در رینولدزهای بالا با شیب ملایم انجام می‌گیرد. کاهش ضریب فانینگ با افزایش عدد رینولدز نشان می‌دهد که میزان افت فشار یک جریان با افزایش عدد رینولدز افزایش خواهد یافت یا به عبارتی افت فشار با افزایش عدد رینولدز رابطه مستقیم دارد. در نتیجه افزایش عدد رینولدز از یک طرف سبب کاهش انتقال حرارت در این نوع مبدل‌های حرارتی شده، ولی در مقابل سبب کاهش مقدار افت فشار می‌شود و نیز کاهش عدد رینولدز، مقدار ضریب انتقال حرارت را افزایش داده، ولی موجب افزایش افت فشار می‌گردد. کاهش میزان انتقال حرارت باعث می‌شود تا سطح انتقال حرارت در یک بار حرارتی ثابت به منظور جبران کاهش ضریب انتقال حرارت افزایش پیدا کند. این افزایش موجب افزایش هزینه خرید مبدل حرارتی یا به عبارتی دیگر موجب افزایش هزینه سرمایه‌گذاری گردد. از سویی افزایش مقدار افت فشار سبب افزایش هزینه پمپاژ جریان‌ها یا به عبارتی دیگر سبب افزایش هزینه عملیاتی می‌شود. به این ترتیب افزایش عدد رینولدز از یک سو سبب افزایش هزینه سرمایه‌گذاری در این نوع مبدل‌های حرارتی شده و از سوی دیگر باعث کاهش هزینه عملیاتی و در مقابل کاهش عدد رینولدز به کاهش هزینه سرمایه‌گذاری و افزایش هزینه عملیاتی در این نوع مبدل حرارتی منتج می‌گردد. اهمیت این مسأله به خصوص در مسائل طراحی و بهینه‌سازی یک مبدل حرارتی بسیار حایز اهمیت است.

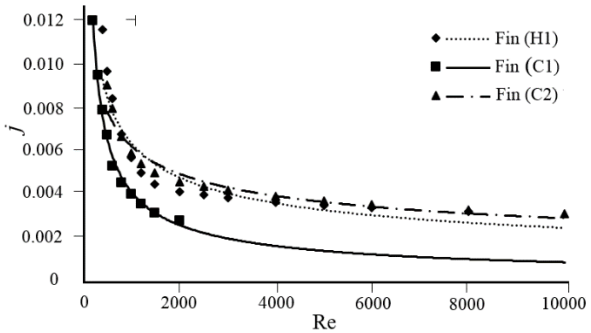

Fig. 5 The Graph of Colburn Factor Versus Reynolds Number Based on Experimental Data of Fins Used in the Case Study

شکل 5 رسم نمودار کولبرن برحسب عدد رینولدز براساس مقادیر آزمایشگاهی برای فین‌های موجود در مطالعه موردی

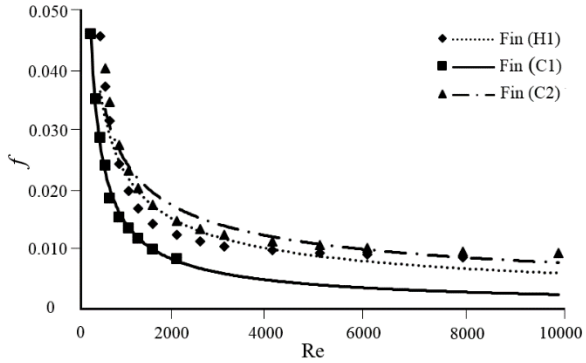

Fig. 6 The Graph of Fanning Factor Versus Reynolds Number Based on Experimental Data of Fins Used in the Case Study

شکل 6 رسم نمودار فانینگ برحسب عدد رینولدز براساس مقادیر آزمایشگاهی برای فین‌های موجود در مطالعه موردی

جدول 4 ضرایب محاسبه شده توابع مربوط به محاسبات ضرایب کولبرن و فانینگ

Table 4 the Calculated Coefficients of Colburn and Fanning Factors of the Fins

مشخصه	جریان گرم	جریان‌های سرد	
	$H1$	$C1$	$C2$
C_j	0.2444	0.8417	0.0760
x	0.5256	0.7502	0.3649
C_f	3.6091	7.2052	1.6541
y	0.7387	0.8852	0.6083

براساس شبیه‌سازی مطالعه موردی یادشده در محیط نرم‌افزار متلب، نتایج مربوط به ارزیابی این مبدل حرارتی سه جریانی صفحه‌ای فین‌دار با فین‌های مستطیلی استحصال و نتایج آن ارائه می‌شود. نمودار دما برحسب طول مشخصه مبدل حرارتی در شکل 7 رسم شده، همچنین در جدول 5 نتایج نهایی مربوط به شبیه‌سازی ارزیابی مبدل حرارتی سه جریانی صفحه‌ای فین‌دار با فین‌های مستطیلی مربوط به مطالعه موردی آورده شده است.

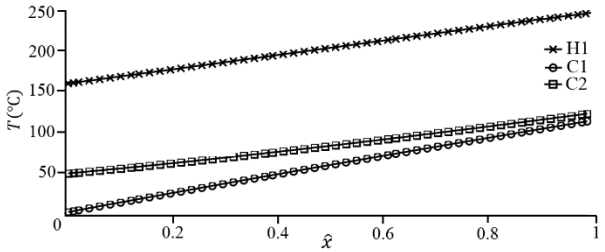

Fig. 7 The Temperature Profile of the Three Stream Heat Exchanger of the Case Study Versus Specific Length

شکل 7 نمودار دما برحسب طول مشخصه برای مبدل‌حرارتی سه جریانی مربوط به مطالعه موردی

جدول 5 نتایج ارزیابی مبدل‌حرارتی مربوط به مطالعه موردی

Table 5 the Results of Rating Design of the Case Study Heat Exchanger

مشخصات	جریان گرم	جریان‌های سرد	
	$H1$	$C1$	$C2$
T_{out} (°C)	158.5	113.7	122.7
h (W/m^{2}K)	928.1	385.7	195.7
بازده فین (%)	0.87	0.91	0.92
بار حرارتی در هر لایه (kW)	14.6	10.5	4.1
افت فشار (bar)	0.328	0.034	0.005

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.12.6]

همان‌طور که ملاحظه می‌شود دمای خروجی جریان‌ها (در نتیجه بار حرارتی مبدل حرارت)، ضریب انتقال حرارت محاسبه شده برای هر سه جریان، بازده فین‌ها، بار حرارتی هر لایه و میزان افت فشار هر جریان آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که جریان گرم از دمای 246.3°C به دمای 158.9°C و جریان سرد شماره 1 از دمای 1.8°C به دمای 113.7°C و جریان سرد شماره 2 از دمای 49°C به دمای 122.7°C می‌رسد، مقادیر افت فشار برای جریان گرم، سرد 1 و سرد 2 به ترتیب 0.328، 0.034 و 0.005 بار محاسبه شده است.

براساس شکل 7 به دلایلی که در بخش 2-2 بیان شد در این نوع چیدمان از مبدل حرارتی سه جریانی تقاطع دما رخ نمی‌دهد. از طرفی شیب جریان‌های سرد نشان می‌دهد، در صورتی که طول مبدل حرارتی بیش از مقدار کنونی آن باشد، دمای نهایی جریان $C1$ از جریان $C2$ بیشتر خواهد بود. به این ترتیب می‌توان با افزایش مجازی طول مبدل حرارتی موجود دماهای خروجی هر جریان را برحسب طول مبدل حرارتی به‌دست آورد. در واقع یکی دیگر از ویژگی‌های روش حاضر این است که می‌توان دمای خروجی هر جریان (یا به عبارتی بار حرارتی مبدل حرارتی) را برحسب تغییرات سایر پارامترهای هندسی مبدل حرارتی به‌دست آورد.

به این ترتیب همان‌طور که از نتایج ملاحظه می‌شود می‌توان یک مبدل حرارتی صفحه‌ای- فین‌دار سه جریانی با فین‌های مستطیلی را براساس الگوریتم ارائه شده در این مقاله ارزیابی کرد و دمای خروجی جریان‌های آن و در نتیجه بار حرارتی مبدل حرارتی را به‌دست آورد. در ادامه و در راستای اهداف این مقاله مبدل حرارتی مربوط به مطالعه موردی از نقطه نظر تغییرات پارامتری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. روش ارائه شده کلی بوده و قابل تعمیم به تمام فین‌های مورد استفاده در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای- فین‌دار است که در این بخش از فین‌های مستطیلی صرفاً به عنوان نمونه استفاده شده است. در واقع می‌توان با مدل‌سازی هندسی سایر انواع فین‌های موجود و تلفیق آن با مدل‌های حرارتی و هیدرولیکی ارائه شده، روش ارزیابی این نوع مبدل حرارتی با هر نوع فین را ارائه کرد.

5-3- مطالعه پارامتری (تحلیل حساسیت)

در این قسمت مبدل حرارتی سه جریانی مربوط به مطالعه موردی از نقطه نظر پارامتری مورد مطالعه و تحلیل قرار می‌گیرد. به همین منظور اثرات تغییرات پارامترهای هندسی یک فین مستطیلی شامل ارتفاع و فرکانس فین (و یا گام فین) بر بار حرارتی مبدل حرارتی و افت فشار آن بررسی می‌شود. به همین منظور در هر مرحله همه پارامترهای اصلی مبدل حرارتی (شامل طول مبدل حرارتی و سایر مقادیر هندسی فین‌ها) ثابت مانده و تنها پارامتر مورد مطالعه، در محدوده مورد نظر تغییر می‌کند. اثرات این تغییر بر دمای خروجی جریان گرم مورد مطالعه قرار می‌گیرد. دلیل انتخاب دمای خروجی جریان گرم این است که از آن‌جایی که دمای ورودی جریان گرم معلوم است بار حرارتی کل مبدل حرارتی با داشتن دمای خروجی جریان گرم به دست می‌آید. به این ترتیب می‌توان تأثیر تغییرات پارامترهای هندسی فین‌ها را بر بار حرارتی مبدل حرارتی ملاحظه کرد. با توجه به اهمیت مشابه افت فشار، تأثیر پارامترهای هندسی بر افت فشار جریان گرم، که دارای بیشترین افت فشار در مبدل حرارتی است، مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد.

در شکل 8 نمودار تغییرات دمای خروجی جریان گرم (به نوعی بار حرارتی) مبدل حرارتی سه جریانی مربوط به مطالعه موردی و در شکل 9 نمودار تغییرات افت فشار جریان گرم آن بر اثر تغییر ارتفاع فین همان جریان رسم شده است. همان طور که در شکل 8 ملاحظه می‌شود با افزایش ارتفاع فین مربوط به جریان گرم، دمای خروجی آن کاهش و در نتیجه بار حرارتی مبدل حرارتی افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل افزایش نرخ انتقال حرارت بر اثر افزایش سطح انتقال حرارت از یک سو و افزایش ضریب انتقال حرارت از سوی دیگر اتفاق می‌افتد. در مقابل براساس شکل 9 افزایش ارتفاع فین جریان گرم سبب افزایش افت فشار در آن می‌شود. به این ترتیب افزایش ارتفاع فین از یک سو سبب افزایش بار حرارتی ولی از سوی دیگر سبب افزایش افت فشار می‌شود. به این ترتیب افزایش ارتفاع فین از یک طرف می‌تواند هزینه سرمایه‌گذاری را کاهش و از طرف دیگر هزینه عملیاتی را افزایش دهد. از این نتیجه‌گیری می‌توان به منظور طراحی مفهومی و نیز بهینه‌سازی هوشمندانه یک مبدل حرارتی صفحه‌ای- فین‌دار سه جریانی با فین‌های مستطیلی استفاده کرد.

در شکل 10 نمودار تغییرات دمای خروجی جریان گرم این مبدل حرارتی و در شکل 11 نمودار تغییرات افت فشار جریان گرم با تغییرات فرکانس فین همان جریان رسم شده است. با مشاهده شکل 10 ملاحظه می‌شود که افزایش فرکانس فین در جریان گرم، سبب کاهش دمای خروجی آن و در نتیجه افزایش بار حرارتی مبدل حرارتی می‌شود. در مقابل همان طور که در شکل 11 مشاهده می‌شود افزایش فرکانس فین در جریان گرم باعث افزایش افت فشار در آن و به این ترتیب افزایش فرکانس فین از یک طرف باعث افزایش بار حرارتی ولی از طرفی دیگر سبب افزایش افت فشار می‌گردد.

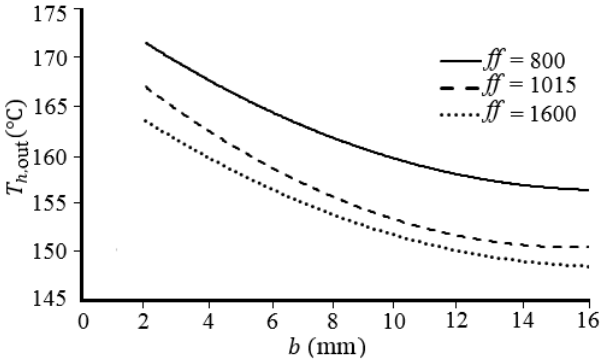

Fig. 8 The Diagram of the Effect of the Fin Height of the Hot Stream on Outlet Temperature of Hot Stream in Constant Fin Frequency

شکل 8 نمودار تأثیر تغییرات ارتفاع فین جریان گرم بر دمای خروجی آن در فرکانس ثابت فین

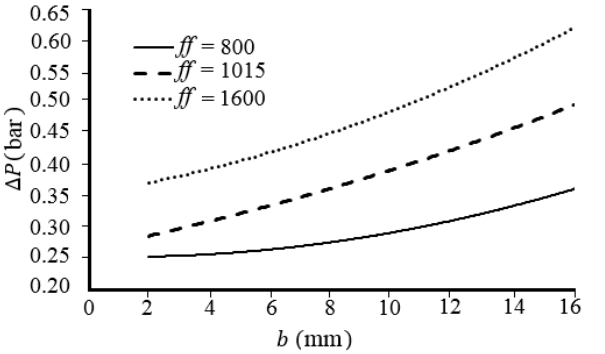

Fig. 9 The Diagram of the Effect of the Fin Height of the Hot Stream on Pressure Drop in Constant Fin Frequency

شکل 9 نمودار تأثیر تغییرات ارتفاع فین جریان گرم بر افت فشار آن در فرکانس ثابت فین

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.12.6]

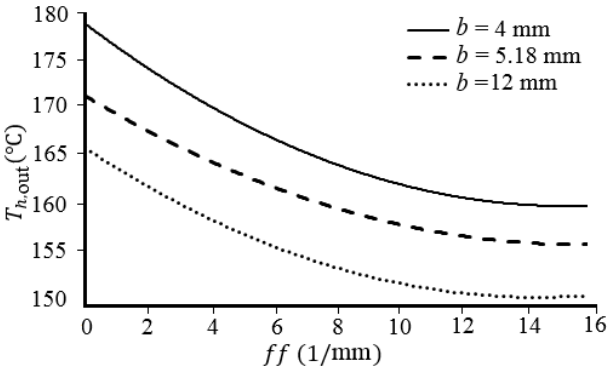

Fig. 10 The Diagram of the Effect of the Fin Frequency of the Hot Stream on Outlet Temperature of Hot Stream in Constant Fin Hieght

شکل 10 نمودار تأثیر تغییرات فرکانس فین جریان گرم بر دمای خروجی آن در ارتفاع ثابت فین

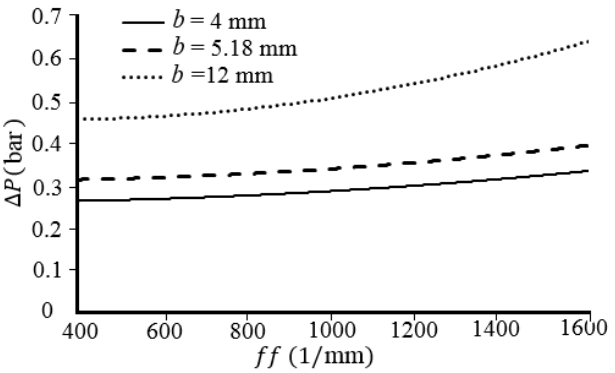

Fig. 11 the Diagram of the Effect of the Fin Frequency of the Hot Stream on Pressure Drop in Constant Fin Height

شکل 11 نمودار تأثیر تغییرات فرکانس فین جریان گرم بر افت فشار آن در ارتفاع ثابت فین

افزایش فرکانس فین از یک سو می‌تواند هزینه سرمایه‌گذاری را کاهش و از سویی دیگر هزینه عملیاتی را افزایش دهد که این نتیجه‌گیری نیز کمک شایانی به طراحی مفهومی و بهینه‌سازی این نوع از مبدل‌های حرارتی می‌کند.

به این ترتیب می‌توان تأثیر پارامترهای هندسی فین‌ها (در این مقاله به طور نمونه فین‌های مستطیلی) را بر بار حرارتی مبدل حرارتی و افت فشار جریان‌های آن را بررسی کرد. بررسی تأثیر پارامترهای هندسی یک مبدل حرارتی بر بار حرارتی و میزان افت فشار آن را می‌توان به طریقی که مشاهده شد، با استفاده از الگوریتم ارزیابی آن مبدل حرارتی به‌دست آورد. با این وجود نتایج حاصل از یک مطالعه و تحلیل پارامتری را می‌توان به منظور طراحی (سایزینگ) آن مبدل حرارتی استفاده نمود. به این صورت که با دانستن نحوه رفتار پارامترهای هندسی یک مبدل حرارتی و تأثیر آن‌ها بر بار حرارتی مبدل حرارتی و مقدار افت فشار هر جریان می‌توان طراحی کارآمدتری انجام داد. مهم‌تر از آن تأثیر انجام مطالعه پارامتری بر بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی است که فرآیندی زمان‌بر و سنگین است. انجام مطالعه و تحلیل پارامتری می‌تواند حجم بهینه‌سازی یک مبدل حرارتی را به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. این تأثیر به خصوص در اعمال حدود پایین و بالا و نیز گام تغییرات متغیرهای هندسی مؤثر بر تابع هدف مورد نظر نقش مهمی را ایفا می‌کند.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور ارزیابی مبدل‌های حرارتی سه جریانی صفحه‌ای فین‌دار یک روش جدید بر مبنای مدل‌سازی‌های حرارتی، هندسی و هیدرولیکی ارائه شد. نتایج کلی و دستاوردهای مهم این مقاله را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

- ارائه یک الگوریتم جدید به منظور ارزیابی مبدل‌های حرارتی سه جریانی صفحه‌ای- فین‌دار که به دلیل ماهیت سه جریانی بودن آن از پیچیدگی‌های بسیار بیشتری نسبت به مبدل‌های حرارتی دوجریانی برخوردار است.
- براساس الگوریتم ارزیابی ارائه شده می‌توان دمای خروجی جریان‌ها و در نتیجه بار حرارتی هر نوع مبدل حرارتی سه جریانی صفحه‌ای- فین‌دار را به‌دست آورد.
- الگوریتم ارزیابی ارائه شده محدود به نوع خاصی از فین نبوده، اگرچه در این مقاله از فین‌های مستطیلی به عنوان نمونه استفاده شده است، می‌توان آن را به هر نوع فین متداول در این نوع مبدل‌های حرارتی تعمیم داد. به همین منظور می‌توان از فین‌های استاندارد موجود در مراجع و یا مانند این مقاله از فین با کمیت هندسی پیوسته استفاده کرد.
- استفاده از روش ارزیابی ارائه شده در این مقاله ساده بوده و حل آن تحلیلی و مستقیم است و برای استفاده از ان نیازی به سعی و خطا نیست.
- بر طبق الگوریتم ارائه شده می‌توان از طریق یک مطالعه پارامتری تأثیر تغییرات پارامترهای هندسی فین‌ها مانند ارتفاع و فرکانس آن را بر بار حرارتی مبدل حرارتی و افت فشار جریان‌ها بررسی کرد. نتایج این بررسی بر مطالعه موردی انجام گرفته در این مقاله نشان می‌دهد که افزایش ارتفاع فین در فرکانس ثابت از یک سو سبب افزایش بار حرارتی، ولی از سوی دیگر سبب افزایش افت فشار و افزایش فرکانس فین در ارتفاع ثابت از یک طرف سبب افزایش بار حرارتی، ولی از طرفی دیگر سبب افزایش افت فشار می‌شود.
- می‌توان با اعمال تغییرات در الگوریتم ارزیابی ارائه شده آن را به منظور طراحی (سایزینگ) مبدل‌های حرارتی سه جریانی صفحه‌ای- فین‌دار تعمیم داد.
- روش و الگوریتم مطالعه و تحلیل پارامتری که بر مبنای روش ارزیابی ارائه شد، می‌تواند به منظور تسهیل طراحی مفهومی و نیز کاهش حجم و زمان بهینه‌سازی این نوع مبدل‌های حرارتی به کار رود.
- از طرفی از آن‌جایی که کاهش هزینه نهایی سالیانه این نوع مبدل‌های حرارتی تأثیر اقتصادی قابل ملاحظه‌ای در صنعت مربوط به آن دارد، می‌توان از الگوریتم حاضر و با انجام تغییراتی به منظور بهینه‌سازی این نوع مبدل‌های حرارتی استفاده کرد.

7- فهرست علایم

A	سطح حرارت (m^2)
A_{ff}	مساحت سطح آزاد جریان (m^2)
A_{fin}	مساحت انتقال حرارت سطوح ثانویه یا فین‌ها (m^2)
A_{tot}	مساحت انتقال حرارت کل (m^2)
b	ارتفاع فین (m)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.12.6]

C	نسبت گرماهای ویژه
C_f	ضریب مربوط به تابع محاسبه ضریب فانینگ
C_j	ضریب مربوط به تابع محاسبه ضریب کولبرن
c_p	گرمای ویژه ($kJkg^{-1}K^{-1}$)
d_h	قطر هیدرولیکی (m)
f	ضریب فانینگ
ff	فرکانس فین
G	شار جرمی ($kgm^{-2}s$)
h	ضریب انتقال حرارت ($kJK^{-1}m^{-2}$)
L_c	طول معادل (m)
m	عدد مورد استفاده در محاسبه راندمان فین (m^{-1})
$\dot{m}$	دبی جرمی (kgs^{-1})
NS	تعداد کانال‌ها
NTU	تعداد مراحل انتقال
P	فشار (Pa)
p	محیط ترشده (m)
Pr	عدد پرانتل
q	بار حرارتی (W)
Re	عدد رینولدز
s	گام فین (m)
St	عدد استانتون
T	دما (°C)
t_f	ضخامت فین (m)
t_p	ضخامت صفحه (m)
U	ضریب کلی انتقال حرارت ($Wm^{-2}K$)
W	عرض صفحه (m)
x	ضریب توانی مربوط به تابع محاسبه ضریب کولبرن
$\hat{x}$	طول بدون بعد
y	ضریب توانی مربوط به تابع محاسبه ضریب فانینگ

علایم یونانی

ρ	چگالی (kgm^{-3})
μ	ویسکوزیته دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
υ	حجم مخصوص ($m^3\ kg^{-1}$)
η_o	بازده کلی سطح
η_f	بازده فین
θ	دمای بی‌بعد شده

زیرنویس‌ها

in	ورودی
fin	فین
out	خروجی
tot	کل

8-مراجع

[1] R. K. Shah, P. Sekulic, *Fundamental of Heat Exchanger Design*, pp. 120-150, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003.

[2] E. A. Saunders, *Heat Exchangers: Selection, Design and Construction (Designing for Heat Transfer)*, pp. 50-150, John Wiley & Sons Inc, New York, 2nd Edition, 1989.

[3] T. Kuppan, *Heat Exchanger Design Handbook*, pp. 129-158, Marcel Dekker Inc, New York, 2000.

[4] E. M. Smith, *Advances in Thermal Design of Heat Exchangers*, pp. 129-158, John Wiley & Sons, USA, 2005.

[5] T.B. Morley, Exchange of heat between three fluids, *Engineer*, Vol. 155, pp. 314-320, 1933.

[6] T. Sorlie, *Three Fluid Heat Exchanger Design Theory, Counter and Parallel Flow*, Technical Report, Department of Mechanical Engineering, Stanford University Stanford, 1962.

[7] D.D. Aulds, R.F. Barron, *Three-fluid heat exchanger effectiveness*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 10, pp. 1457–1462, 1967.

[8] D.P. Sekulic, R.K. Shah, Thermal design theory of three-fluid heat exchanger, *Advanced Heat Exchanger*, Vol. 26, pp. 219–327, 1995.

[9] D. Shrivastava, T.A. Ameel, Three-fluid heat exchangers with three thermal communications Part A: General mathematical model, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 3855–3865, 2004.

[10] D. Shrivastava, T.A. Ameel, Three-fluid heat exchangers with three thermal communications Part B: Effectiveness evaluation, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 3867–3875, 2004.

[11] N.H. Saeid, K.N. Seetharamu, Finite element analysis for co-current and counter-current parallel flow three-fluid heat exchanger, *Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, Vol. 4716 pp. 324–337, 2006.

[12] D.F. Ruan, X.F. Yuan, S.Y. Wu, Y.R. Li, Exergy effectiveness analysis of threefluid heat exchanger, *Superconductivity and Novel Magnetism*, Vol. 23, pp. 1127–1131, 2010.

[13] D.F. Ruan, X.F. Yuan, Y.R. Li, S.Y. Wu, Entropy generation analysis of parallel and counter-flow three-fluid heat exchangers with three thermal communications *Non-Equilibrium Thermodynamics*, Vol. 36, pp. 141–154, 2011.

[14] M. Zhao,, Y. Li, New integral-mean temperature difference model for thermal design and simulation of parallel three-fluid heat exchanger, *Thermal Sciences*, Vol. 59, pp. 203–213, 2012.

[15] V. Krishna, P.G. Hegde, N. Subramanian, K.N. Seetharamu, Effect of ambient heat-in-leak on the performance of a three fluid heat exchanger, for cryogenic applications, using finite element method, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 5459–5470, 2012.

[16] P. Yuan, H.S. Kou, The comparison of longitudinal wall conduction effect on the crossflow heat exchangers including three fluid streams with different arrangements, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 21, pp. 1891–1907, 2001.

[17] V. Krishna, S. Spoorthi, P.G. Hegde , K.N. Seetharamu, Effect of longitudinal wall conduction on the performance of a three-fluid cryogenic heat exchanger with three thermal communications, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 62, pp. 567–577, 2013.

[18] X. Peng, Z. Liu, C. Qiu, J. Tan, Effect of inlet flow maldistribution on the passage arrangement design of multi-stream plate-fin heat exchanger, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 103, pp. 67–76, 2016.

[19] S. Bielski, L. Malinowski, A semi-analytical method for determining unsteady temperature field in a parallel-flow three-fluid heat exchanger, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 1071–1080, 2003.

[20] S. Bielski, L. Malinowski, An analytical method for determining transient temperature field in a parallel-flow three-fluid heat exchanger, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, pp. 1034–1044, 2005.

[21] L. Malinowski, S. Bielski, Transient temperature field in a parallel-flow three-fluid heat exchanger with the thermal capacitance of the walls and the longitudinal walls conduction, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 877–883, 2009.

[22] Y. Tan, W.Nookuea, H.Li, E. Thorin, J. Yan, Property Impacts on Plate-fin Multi-stream Heat Exchanger (Cold Box) Design in CO2 Cryogenic Process: Part I. Heat Exchanger Modeling and Sensitivity Study, *Energy Procedia*, Vol. 105, pp. 4587–4594, 2017.

[23] Y. Tan, W.Nookuea, H.Li, E. Thorin, J. Yan, Property Impacts on Plate-fin Multi-stream Heat Exchanger (Cold Box) Design in CO2 Cryogenic Process: Part II. Evaluation of Viscosity and Thermal Conductivity Models, *Energy Procedia*, Vol. 105, pp. 4595–4600.

[24] A.F.Sotoodeh, M.Amidpour, M.Ghazi, Design and analysis of plate fin heat exchangers in constant volume, constant heat transfer area and constant pressure drop to obtain maximum energy recovery, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp37-334, 2015 (in Persian فارسی).

[25]W. M. Kays, A. L. London, *Compact Heat Exchangers*, third Edition, pp. 120-155, New York: McGraw-Hill, 1984.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.8.12.6]