

تحلیل پارامتری توزیع دما و کارایی مبادله‌کن‌های گرمائی سه‌جریانی با سه ارتباط گرمائی

رضا رستگار

کارشناس ارشد، گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه خواجه نصیر طوسی، تهران، ایران

امیرفرهنگ ستوده*

استادیار، گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

مجید امیدپور

استاد تمام، گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه خواجه نصیر طوسی، تهران، ایران

چکیده

علاوه بر ارتباط گرمائی با محیط، خواص متغیر جریان‌ها و هدایت گرمائی طولی در دیواره‌ها، کارایی مبادله‌کن‌های گرمائی سه‌جریانی به شدت متاثر از پارامترهای هندسی و طراحی می‌باشد. پارامترهای هندسی، طول و قطر لوله‌های مبادله‌کن و پارامترهای طراحی از قبیل، دمای محیط و دبی هر یک از جریان‌ها می‌باشد. در این مقاله تاثیر پارامترهای هندسی و طراحی بر توزیع دما و کارایی مبادله‌کن‌های سه‌جریانی با سه ارتباط گرمائی، مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات حاکم بر جریان‌ها با در نظر گرفتن ارتباط گرمائی با محیط و خواص متغیر جریان‌ها، استخراج و بر مبنای قانون اول ترمودینامیک و به روش تحلیلی، حل می‌شوند. سرمایه‌های جریان گرم و گرمایش جریان سرد، دو هدف از بکارگیری مبادله‌کن به منظور بررسی کارایی، می‌باشند. تاثیر نفوذ حرارت از محیط، افزایش دمای جریان سرد است، که منجر به افزایش جزئی در پروفیل دمایی گرم می‌شود، که به افزایش کارایی سرد و کاهش کارایی گرم می‌انجامد. افزایش دمای محیط، موجب تقویت تاثیرات ناشی از نفوذ حرارت از محیط می‌شود. افزایش قطر لوله بیرونی مبدل که در آن جریان سرد در جریان است و در تماس حرارتی با محیط قرار دارد موجب فاصله دمایی جریان گرم و سرد در هر مقطع عمود بر جریان می‌شود و به کاهش هر دو کارایی گرم و سرد می‌انجامد. افزایش دبی جرمی سیال سرد به افزایش کارایی گرم و کاهش کارایی سرد منجر می‌شود. در اثر افزایش دبی جرمی جریان گرم، هر دو کارایی گرم و سرد مبدل افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مبادله‌کن سه‌جریانی، توزیع دما، کارایی گرمائی، تبادل گرما، خواص متغیر سیال.

A parametric effectiveness and Temperature distribution investigation of three-fluid heat exchanger with three thermal communication

Reza Rastgar

Department of Energy System Engineering, K. N. Toosi University of Technology Tehran, Iran

Amir Farhang Sotoodeh

Energy and Environment Faculty, Niroo Research Institute, Tehran, Iran

Majid Amidpour

Department of Energy System Engineering, K. N. Toosi University of Technology Tehran, Iran

Abstract

In addition to variable properties of fluids, heat interaction with ambient, and axial wall conduction, the temperature distribution of a three-fluid heat exchanger, is strongly affected by Geometric and design parameters. Geometric parameters such as exchanger length and tube diameter and design parameters are fluid flow rate and ambient temperature. In this study, the effect of geometric and design parameters on the temperature distribution and effectiveness of a three-fluid heat exchanger with three thermal communication have been investigated. The governing equations on the flow, are simulated considering heat-in-leak to the cold fluid and variable properties of the fluids, and are solved based on the first law of thermodynamics and analytical methods. Cooling the hot fluid and heating the cold fluid, have been considered as the objective of the three-flow heat exchanger, in order to effectiveness investigation. The effect of ambient heat in leak is to increase the cold fluid temperature, leading to a little lift on hot fluid temperature profile, will result in an enhancement in the cold effectiveness and a reduction on hot effectiveness. Increasing ambient temperature, enhances the effects of heat in leak from ambient. An increase in the diameter of outer tube, Where the cold fluid is flowing and is in contact with the ambient, makes the hot and cold temperatures become farther apart in each cross-section, and decreases the hot and cold effectiveness. An increase in the flow rate of the cold fluid, results in a higher hot effectiveness and reduces the cold effectiveness. Due to An increase in the hot flow rate, both the hot and cold effectiveness are enhanced.

Keywords: Three-fluid heat exchanger, Temperature distribution, Effectiveness, Thermal interaction, variable properties of fluid.

۱- مقدمه

ساختاری در دو نوع صفحه پره و لوله‌ای ساخته می‌شوند که سه جریان می‌توانند با دو ارتباط گرمائی و یا در نوع پیچیده‌تر آن با سه ارتباط گرمائی در کنار یکدیگر قرار بگیرند. تا به امروز مطالعات وسیعی در مورد مبادله‌کن‌های سه جریانه در انواع آن توسط محققین در جهان صورت گرفته است. در این مطالعات روش‌های متنوعی به منظور دستیابی به توزیع دمای سه جریان از قبیل روش‌های صریح، تحلیلی و نیمه تحلیلی و عددی ارائه شده است.

شریواستاوا و امیل [۳]، یک مدل ریاضی مربوط به مبادله‌کن‌های سه جریانه با سه ارتباط گرمائی بدون اتلاف گرمائی به محیط و صرفنظر از هدایت گرمائی طولی در دیواره مبادله‌کن را ارائه نموده و با این

امروزه مبادله‌کن‌های گرمائی سه جریانه کاربردهای فراوانی در صنایع دارند و بر اساس این کاربردها در انواع و ظرفیت‌های مختلفی ساخته می‌شوند. مبادله‌کن‌های گرمائی سه جریانه با سه ارتباط گرمائی که در آن‌ها هر سه جریان در حال ارتباط گرمائی با یکدیگر می‌باشند دارای کاربردهای متنوعی در صنعت هوافضا، پتروشیمی و صنایع شیمیایی می‌باشند [۱]. مبادله‌کن‌های سه‌جریانی و چندجریانه به طور وسیعی در فرایندهای دما پایین و شیمیایی [۲] از قبیل واحدهای جداسازی هوا، واحدهای جداسازی هلیوم هوا، خالص‌سازی و مایع‌سازی هیدروژن و سنتز گاز آمونیاک کاربرد دارند. این مبادله‌کن‌ها از لحاظ تقسیم‌بندی

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: asotoodeh@nri.ac.ir

ورودی را بر رسانش گرمایی طولی در دیواره، مورد مطالعه قرار دادند. روان و همکاران [۱۳]، کارایی اگزروی را به منظور بررسی و آنالیز کارایی ترمودینامیکی تعریف نمودند. اخیراً آنها [۱۴] از روش تولید آنتروپی به منظور بررسی تاثیر پارامترهای بی‌بعد متنوع بر تعداد واحدهای آنتروپی در مبادله‌کن‌های سه‌جریانی استفاده نمودند.

مرجع [۱۵]، به بررسی رفتار گذرا در مبدل‌های سه‌جریانی جریان موازی پرداخته است. در این مقاله از روش عددی گوس-سیدل به منظور تحلیل رفتار گذرا با در نظر گرفتن تاثیر رسانش گرمایی طولی در راستای پوسته‌ی مبادله‌کن، استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که رسانش گرمایی در راستای پوسته‌ی مبادله‌کن، بر روی کارایی مبادله‌کن گرما تاثیرگذار است. در مرجع [۱۶]، مبادله‌کن سه‌جریانه لوله‌ای هم‌مرکز، با دو ارتباط گرمایی در شرایط پابا، به صورت تجربی، مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور اندازه‌گیری تغییرات دمایی سیال و ضریب اصطکاک در طول مبادله‌کن، بررسی‌های آزمایشگاهی انجام پذیرفته است. نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی استاندارد مقایسه شدند، و نتایج در حد مجاز تطبیق داشته است. تاثیر نفوذ گرما از محیط بر رفتار گذرای مبادله‌کن سه‌جریانی جریان موازی با دو ارتباط گرمایی، با استفاده از روش المان محدود، در مرجع [۱۷]، بر اساس تغییرات دمایی سیال گرم، مورد بررسی قرار گرفت. تاثیرات نفوذ گرمایی محیط بر مبادله‌کن تا رسیدن به شرایط پایا بررسی شد. در این بررسی ملاحظه شد که با توجه به اینکه جریان سرد در تماس با محیط قرار دارد، تغییرات قابل توجه‌تری نسبت به دو جریان گرم و میانی داشته است. از روش استفاده شده می‌توان برای بررسی میزان تاثیر تغییرات پله‌ای، سینوسی، نمایی و یا با شیب ثابت دمایی هر یک از سیالات، استفاده نمود.

بررسی عددی بر روی مبادله‌کن‌های سه‌جریانی مورد استفاده در پمپ‌های گرمایی با منبع انرژی هیبرید، در مرجع [۱۸]، انجام پذیرفت. سه مبادله‌کن گرمایی با مسیرهای جریانی متفاوت، به منظور بررسی میزان افت فشار و انتقال گرما، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با بهینه‌سازی افت فشار و ضریب انتقال گرما، می‌توان به کارایی بالاتری در مبادله‌کن سه‌جریانی دست یافت.

همانطور که ذکر شد، تاثیر ارتباط گرمایی با محیط بدون لحاظ نمودن هدایت گرمایی در دیواره مبادله‌کن‌های سه‌جریانی توسط کریشنا و همکاران [۲] بررسی شد، که با اعمال قانون اول ترمودینامیک، معادلات، استخراج و حل شده و توزیع دما مورد بررسی قرار گرفت. در کار حاضر نیز از همان روش به منظور دستیابی به نتایج مربوط به توزیع دما و کارایی استفاده شد، با این تفاوت که خواص سیال به صورت متغیر با دما در طول جریان در نظر گرفته شده، بدین معنی که در الگوریتم مربوط به توزیع دما، خواص سیال با توجه به توزیع دمایی بدست آمده به صورت دقیق محاسبه شده است و الگوریتم تا رسیدن به شرط همگرایی دمایی خروجی در سیال تکرار شده است. همچنین در کار حاضر برخلاف کار کریشنا و همکاران [۲]، از پارامترهای اصلی به‌جای پارامترهای بی‌بعد استفاده شده است و تحلیل تاثیر هر یک از پارامترهای اصلی بر توزیع دما و کارایی به طور مجزا انجام شده است. با دستیابی به این معادلات دارای بعد، این امکان وجود دارد که به بررسی میزان تاثیر عوامل مختلف از قبیل طول و قطر مبادله‌کن، دمایی ورودی سیال مبدل، دمایی هوا و دبی جریان، بر توزیع

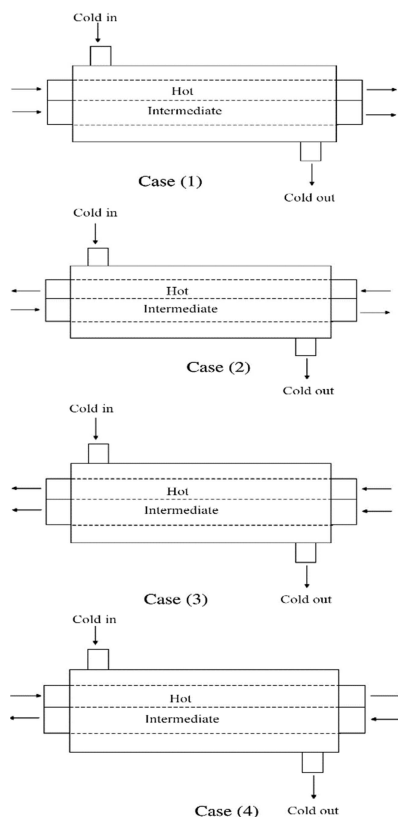
فرضیات تاثیرات پارامترهای بی‌بعد مختلف را بر توزیع دما، از روش حل تحلیلی معادلات، مورد بررسی قرار دادند. تعاریف و روابط مربوط به کارایی مبادله‌کن گرمایی سه‌جریانی با توجه به هدف و کاربرد مورد نظر مبادله‌کن، توسط شریواستاوا و امیل [۴] مطرح شد. روابط کارایی مربوط به سه هدف متنوع گرم نمودن جریان سرد، سرد نمودن جریان گرم و گرم یا سرد نمودن جریان میانی در پروژه حاضر نیز، با توجه به این تعاریف مورد استفاده قرار گرفته است. مدل جدید اختلاف دمایی متوسط انتگرالی به منظور طراحی گرمایی و شبیه‌سازی مبادله‌کن‌های سه‌جریانه با دو ارتباط گرمایی توسط مین ژائو و یان لی [۵] مطرح شد که از طریق روابط صریح به توزیع دمایی جریان‌ها در حالتی که از اتلاف گرمایی به محیط و هدایت گرمایی طولی صرف‌نظر شود دست یافتند. این روابط قابل استفاده در مبادله‌کن گرمایی سه‌جریانی در حالتی است که مبادله‌کن به صورت سه لوله هم‌مرکز در نظر گرفته شود. در این مقاله نحوه استفاده از این روابط در مبادله‌کن‌های دو‌جریانه، با و بدون لحاظ ارتباط گرمایی با محیط نیز شرح داده شد. حل معادلات حاکم بر مبادله‌کن‌های سه‌جریانی با دو ارتباط گرمایی با استفاده از روش المان محدود نیز توسط سعید و سیتارامو [۶] بیان شد.

گوپتا و آتری [۷]، کارایی مبادله‌کن گرمایی دو‌جریانه جریان مخالف را با در نظر گرفتن نفوذ گرمایی از محیط و رسانش گرمایی طولی در دیواره مبادله‌کن و با فرض عایق بودن مبادله‌کن در دو انتها مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله به منظور بیان تاثیر ارتباط گرمایی با محیط، رسانش گرمایی طولی و بعضی پارامترهای بی‌بعد، ضریبی با عنوان ضریب تنزل تعریف شد و تاثیر هر یک از موارد فوق بر اساس مقدار این ضریب مورد بررسی قرار گرفت. تاثیر رسانش گرمایی طولی در دیواره بر روی توزیع دما و کارایی مبادله‌کن‌های سه‌جریانی با سه ارتباط گرمایی توسط کریشنا و همکاران [۸] مورد بررسی قرار گرفت که این تاثیر به صورت کاهش کارایی گرم در مبادله‌کن‌ها ظاهر شد و معادلات حاکم بدون لحاظ ارتباط گرمایی با محیط استخراج و از طریق تحلیلی حل شدند.

همانطور که ذکر شد، مبادله‌کن‌های سه‌جریانی که در آنها سه جریان در حال مبادلات گرمایی با یکدیگر بوده، دارای کاربردهای فراوانی می‌باشند. این مبادله‌کن‌ها به نسبت مبادله‌کن‌های دو‌جریانه دارای کارایی بالاتر و دارای ساختار جمع‌وجورتری می‌باشند. ولیکن، وجود ارتباط گرمایی میان سه‌جریان، این مبادله‌کن‌ها را به لحاظ طراحی و ساخت، پیچیده‌تر می‌کند [۹]. لازم به ذکر است که اولین آنالیز مربوط به مبادله‌کن‌های سه‌جریانی توسط مورلی در سال ۱۹۳۳ انجام پذیرفت [۱۰]. او با استفاده از قانون سرمایه‌ی نیوتن، معادلات مربوط به مبادله‌کن سه‌جریانی را استخراج نمود و بوسیله روش انتگرالی، به راه‌حل تحلیلی دست یافت. علاوه بر این، او توسط روش سعی و خطا، طبقه طراحی ابعاد مبادله‌کن را مطرح نمود.

سورلی نیز بر اساس کار مورلی، نظریه طراحی مبادله‌کن‌های جریان موازی و جریان مخالف مبادله‌کن‌های سه‌جریانه با سه ارتباط گرمایی را مطرح نمود [۱۱].

یان و کو [۱۲]، تاثیر رسانش گرمایی طولی بر کارایی مبادله‌کن‌های سه‌جریانی جریان متقاطع را بررسی نمودند. آنها تاثیر عواملی چون نسبت ظرفیت گرمایی، تعداد واحدهای انتقال گرما و نسبت دمایی



شکل ۲- آرایش جریان‌ها

به منظور دستیابی به معادلات، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- (۱) مبادله‌کن در حالت پایاست. (۲) تعامل گرمایی با محیط برقرار است. (۳) از رسانش گرمایی طولی در دیواره‌ها صرف‌نظر می‌شود. (۴) در طول جریان توزیع دما در جهت عمود بر جریان یکسان بوده و برابر با دمای میانگین در آن مقطع می‌باشد. (۵) سطح مقطع عرضی عمود بر جریان در امتداد جریان ثابت است. (۶) هیچ تغییر فازی در جریان‌ها دیده نمی‌شود. (۷) دبی ثابت است. (۸) تولید و یا مصرف انرژی در مبادله‌کن وجود ندارد. (۹) خواص جریان‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود.

۲-۲- معادلات

با در نظر گرفتن قانون اول ترمودینامیک برای یک المان از هر یک از جریان‌ها، معادلات زیر استخراج می‌شوند [۲]:

جریان ۱

$$\frac{d\theta_1}{dX} + i_1(b_1 + b_2 + b_3)\theta_1 - i_1b_1\theta_2 - i_1b_2\theta_3 - i_1b_3\theta_4 = 0 \quad (1)$$

جریان ۲

$$\frac{d\theta_2}{dX} - i_2b_4\theta_1 + i_2(b_4 + b_5)\theta_2 - i_2b_5\theta_3 = 0 \quad (2)$$

جریان ۳

$$\frac{d\theta_3}{dX} - i_3b_7\theta_1 - i_3b_6\theta_2 + i_3(b_6 + b_7)\theta_3 = 0 \quad (3)$$

در معادلات (۱) تا (۳) مقادیر i_1, i_2, i_3 با مقدار +۱ برای جریان با جهت موافق با محور X و با -۱ برای جریان در خلاف جهت محور X ها جایگزین می‌شود. در این صورت این معادلات برای ۴ نوع آرایش

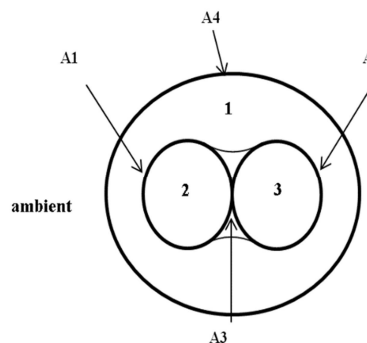
دما و کارایی، به طور مجزا پرداخته شود. مدل بدست آمده در این پروژه، مدلی کلی بوده و می‌تواند برای هر مبادله‌کن گرمایی لوله‌ای سه‌جریانی موازی با سه ارتباط گرمایی و با هر نوع آرایش جریانی مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله معادلات استخراجی به منظور بررسی تاثیر برخی پارامترهای هندسی و طراحی از قبیل طول و قطر مبادله‌کن، دبی جرمی هر یک از جریان‌ها، دمای محیط و ضریب جابجایی، بر توزیع دما و کارایی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده در مورد حل معادلات، با مقایسه با مقاله کریشنا و همکاران [۲]، بررسی شده است. در هر دو مقایسه صورت گرفته، تطبیق کامل بین نتایج بررسی بین دو مقاله مشاهده شده است، که بیانگر صحت روش استخراج و حل معادلات توزیع دما می‌باشد. پس از اطمینان از درستی معادلات استخراجی و حل آن، تحلیل پارامتریک توزیع دما و کارایی صورت پذیرفته است. از موارد نوآوری این کار به‌طور خلاصه می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- (۱) دستیابی به معادلات توزیع دمای مبادله‌کن سه‌جریانی با در نظر گرفتن پارامترهای اصلی، بدون نیاز به بی‌بعدسازی.
- (۲) حل معادلات با در نظر گرفتن خواص متغیر سیال شامل لزجت و ظرفیت گرمایی ویژه.
- (۳) بررسی میزان تاثیر برخی پارامترهای موثر بر کارایی و توزیع دما.

۲- فرمول بندی مدل و حل معادلات

۱-۲- نحوه ارتباط سه جریان و فرضیات

یک مبادله‌کن سه‌جریانی موازی، با سه ارتباط گرمایی بین سه جریان سرد، گرم و میانی در نظر گرفته می‌شود و همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، هر جریان با دو جریان دیگر در ارتباط گرمایی می‌باشد. جریان ۱ علاوه بر ارتباط گرمایی با جریان‌های ۲ و ۳، در تعامل گرمایی با محیط نیز می‌باشد. بر اساس جهت هر یک از جریان‌ها که در جهت مثبت محور افقی و یا در جهت منفی محور افقی باشد، ۴ نوع آرایش جریانی طبق شکل ۲ ایجاد می‌شود.



شکل ۱- طرح‌واره مبادله‌کن سه‌جریانی با سه ارتباط گرمایی

$$c_p = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L f(T(x)) dx \quad (11)$$

$$f(T) = c_p(T) = \left(\frac{8314}{18} \right) \times \left(8.712 + 1.25 \times 10^{-3} \times T \right) - 0.18 \times 10^{-6} \times T^2 \quad (12)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L T(x) dx \quad (13)$$

ضریب انتقال گرمای جابجایی در جریان‌های مغشوش طبق معادله (۱۴) [۱۹] و در جریان‌های لایه‌ای طبق معادله (۱۵) [۱۹] و در دمای متوسط جریان محاسبه می‌شوند. ضریب انتقال گرما کلی بین جریان‌ها طبق معادله (۱۶) محاسبه می‌شود. در جریان ۱ از قطر هیدرولیکی جریان استفاده می‌شود.

$$h = \frac{k_f}{D} \left(0.027 \text{Re}^{0.5} \cdot \text{Pr}^{1/3} \right) \quad \text{جریان مغشوش} \quad (14)$$

$$h = 4.36 \frac{k_f}{D} \quad \text{جریان لایه‌ای} \quad (15)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{r_i}{k} \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right) + \frac{r_i}{r_o \times h_o}} \quad (16)$$

به منظور دستیابی به رابطه توزیع دما بر اساس خواص متغیر جریان، ابتدا مقادیر C_p و h بر اساس مقادیر دمای ورودی جریان‌ها محاسبه می‌شود. بعد از حل معادله (۵) و دستیابی به رابطه توزیع دما، مقادیر مربوط به h و C_p بر اساس معادلات (۱۱) تا (۱۵) محاسبه می‌شوند. سپس معادله (۵) بر اساس این مقادیر جدید حل می‌شود. این فرایند تا همگرا شدن دماهای خروجی هر جریان، ادامه می‌یابد.

۳- تعریف کارایی

کارایی مبادله‌کن‌های گرمایی سه‌جریانی بر اساس کاربرد مبادله‌کن‌ها در جدول ۱ تعریف شده است [۴]. کارایی سرمایش جریان گرم با ϵ_h ، کارایی گرمایش جریان سرد با ϵ_c و کارایی سرمایش و یا گرمایش جریان میانی با ϵ_i نمایش داده می‌شود.

جدول ۱- تعریف کارایی گرمایی با توجه به کاربرد مبادله‌کن سه‌جریانی

| Q _{actual} | Q _{max} | شرط | کارایی |
|--|---|---------------------------------|---|
| $C_h \begin{pmatrix} T_{h,in} \\ -T_{h,o} \end{pmatrix}$ | $C_c (T_{h,in} - T_{c,in})$ | $C_h > C_c ; i_h \neq i_c, i_i$ | $\epsilon_h = \frac{Q_{actual}}{Q_{max}}$ |
| $C_h \begin{pmatrix} T_{h,in} \\ -T_{h,o} \end{pmatrix}$ | $C_h (T_{h,in} - T_{c,in})$ | سایر موارد | $\epsilon_h = \frac{Q_{actual}}{Q_{max}}$ |
| $C_c \begin{pmatrix} T_{c,o} \\ -T_{c,in} \end{pmatrix}$ | $C_h (T_{h,in} - T_{c,in}) + C_i (T_{i,in} - T_{c,in})$ | $C_h > C_c ; i_h \neq i_c, i_i$ | $\epsilon_c = \frac{Q_{actual}}{Q_{max}}$ |
| $C_c \begin{pmatrix} T_{c,o} \\ -T_{c,in} \end{pmatrix}$ | $C_c (T_{h,in} - T_{c,in})$ | سایر موارد | $\epsilon_c = \frac{Q_{actual}}{Q_{max}}$ |
| $C_i \begin{pmatrix} T_{i,in} \\ -T_{i,o} \end{pmatrix}$ | $C_i (T_{i,in} - T_{c,in})$ | سرمایش جریان میانی | $\epsilon_i = \frac{Q_{actual}}{Q_{max}}$ |

جریان قابل استفاده می‌باشد. دمای بی‌بعد جریان‌ها، طول بی‌بعد مبادله‌کن، محیط‌ترشده، و مقادیر b_1, b_2, \dots, b_7 در سری معادلات (۴) نشان داده شده است.

$$\theta_j = \frac{T_j - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,in}}, X = \frac{x}{L}, p_1 = p_2 = \frac{\pi \times D_2}{2}, p_3 = D_2$$

$$p_4 = \pi \times D_1, b_1 = \frac{U_1 p_1 L}{\dot{m}_1 C_1}, b_2 = \frac{U_2 p_2 L}{\dot{m}_1 C_1}, b_3 = \frac{U_4 p_4 L}{\dot{m}_1 C_1} \quad (4)$$

$$b_4 = \frac{U_1 p_1 L}{\dot{m}_2 C_2}, b_5 = \frac{U_3 p_3 L}{\dot{m}_2 C_2}, b_6 = \frac{U_3 p_3 L}{\dot{m}_3 C_3}, b_7 = \frac{U_2 p_2 L}{\dot{m}_3 C_3}$$

۳-۲- حل تحلیلی معادلات

معادلات حاکم را می‌توان به صورت معادلات (۵) نوشت:

$$\frac{d\bar{\theta}}{dX} = \bar{A}\bar{\theta} \quad (5)$$

که در آن

$$\theta_{c,in} = \frac{T_{c,in} - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,in}} = 0$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} -i_1(b_1 + b_2 + b_3) & i_1 b_1 & i_1 b_2 & i_1 b_3 \\ i_2 b_4 & -i_2(b_4 + b_5) & i_2 b_5 & 0 \\ i_3 b_7 & i_3 b_6 & -i_3(b_6 + b_7) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

با در نظر گرفتن ماتریس Z به عنوان ماتریس مقادیر ویژه و ماتریس V به عنوان بردارهای ویژه ماتریس \bar{A} ، رابطه توزیع دما طبق معادله (۶) بدست می‌آید. ۴ مقدار ویژه بردار \bar{A} ، قطر اصلی بردار Z را تشکیل می‌دهند. سایر مقادیر غیر قطری ماتریس Z ، صفر می‌باشد.

$$\theta_j = \sum_{i=1}^4 V_{ji} S_i \exp(Z_{ii} X) \quad (6)$$

در معادله (۶) θ_j برای $j=1, 2, 3$ به ترتیب دمای بی‌بعد جریان‌های ۱، ۲، ۳ می‌باشد و θ_4 بیانگر دمای بی‌بعد محیط است. در رابطه توزیع دما (۶)، مقادیر ضرایب ثابت که از شرایط مرزی نتیجه می‌شوند با S_i نشان داده شده‌اند. ۴ شرط مرزی برای دستیابی به توزیع دما مورد نیاز است که بر اساس دماهای بی‌بعد ورودی سه جریان و دمای بی‌بعد محیط، همانطور که در معادلات (۷) تا (۱۰) بیان شده، بدست می‌آیند.

$$\theta_{c,in} = \frac{T_{c,in} - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,in}} = 0 \quad (7)$$

$$\theta_{h,in} = \frac{T_{h,in} - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,in}} = 1 \quad (8)$$

$$\theta_{i,in} = [0, 1] @ X = \frac{1 - i_i}{2} \quad \text{هر مقدار بین صفر تا ۱} \quad (9)$$

$$\theta_4 = \frac{T_4 - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,in}} > 0 \quad \text{هر مقدار مثبت} \quad (10)$$

ظرفیت گرمایی بر اساس رابطه آن با دما و جایگذاری رابطه بدست آمده توزیع دما در معادله ظرفیت گرمایی، طبق معادله (۱۱) محاسبه می‌شود [۱۹]. تابع استفاده شده در این انتگرال، رابطه ظرفیت گرمایی بر اساس دما برای سیال عامل مربوطه می‌باشد. در صورت استفاده از سیال عامل آب در مبادله‌کن گرمایی، از رابطه ظرفیت گرمایی ویژه آب در دمای T طبق معادله (۱۲) استفاده می‌شود، که در آن دما بر حسب کلونین می‌باشد [۲۰]. مقدار متوسط دمای جریان‌ها نیز طبق معادله (۱۳) محاسبه می‌شود.

جدول ۲- دماهای بی بعد دو جریان گرم و سرد این مطالعه و جدول ۲ از

مقاله کریشنا و همکاران [۲]، در مبادله‌کن سه‌جریانی با سه ارتباط

گرمانی و برای آرایش جریانی نوع ۲، مقادیر پارامترها:

$$U_1 = 7133.76(w/m^2 - ^\circ C), U_2 = 10700.64(w/m^2 - ^\circ C),$$

$$U_3 = 22400(w/m^2 - ^\circ C), U_4 = 152.79(w/m^2 - ^\circ C),$$

$$\dot{m}_1 = 8(kg/s), \dot{m}_2 = 10(kg/s), \dot{m}_3 = 5(kg/s),$$

$$D_1 = 0.7(m), D_3 = 0.3(m), T_{c,in} = 2(^{\circ}C), T_{h,in} = 55(^{\circ}C),$$

$$T_{i,in} = 34(^{\circ}C), T_4 = 55(^{\circ}C), L = 10(m), t = 0.02(m),$$

$$k = 100(w/m - ^\circ C)$$

| X | θ_h | | θ_c | |
|-----|-------------|----------|-------------|----------|
| | مطالعه حاضر | مرجع [۲] | مطالعه حاضر | مرجع [۲] |
| ۰/۰ | ۰/۴۳۵۴ | ۰/۴۳۵۴ | ۰/۰۰۰۰ | ۰/۰۰۰۰ |
| ۰/۲ | ۰/۵۱۰۴ | ۰/۵۱۰۳ | ۰/۱۸۶۱ | ۰/۱۸۶۱ |
| ۰/۴ | ۰/۶۱۳۸ | ۰/۶۱۳۸ | ۰/۳۰۶۷ | ۰/۳۰۶۸ |
| ۰/۶ | ۰/۷۳۱۴ | ۰/۷۳۱۴ | ۰/۴۱۲۰ | ۰/۴۱۲۱ |
| ۰/۸ | ۰/۸۶۰۱ | ۰/۸۶۰۰ | ۰/۵۱۷۱ | ۰/۵۱۷۰ |
| ۱/۰ | ۱/۰۰۰۰ | ۱/۰۰۰۰ | ۰/۶۲۶۸ | ۰/۶۲۶۹ |

جدول ۳- دماهای بی بعد خروجی دو جریان گرم و سرد کار حاضر و

جدول ۳ از مقاله کریشنا و همکاران [۲]، در مبادله‌کن سه‌جریانی با سه

ارتباط گرمانی و برای آرایش جریانی نوع ۱، مقادیر پارامترها:

$$U_2 = 0, U_4 = 0, \dot{m}_1 = 2, \dot{m}_2 = 1, \dot{m}_3 = .8, D_1 = 0.7, D_3 = 0.3,$$

$$T_{i,in} = 2, T_{2,in} = 55, T_{3,in} = 34, T_4 = 55, L = 10, t = 0.02, K = 100$$

| NTU | $\theta_{h,out}$ | | $\theta_{c,out}$ | |
|-----|------------------|----------|------------------|----------|
| | مطالعه حاضر | مرجع [۲] | مطالعه حاضر | مرجع [۲] |
| ۱ | ۰/۳۷۷ | ۰/۳۷۷ | ۰/۳۱۱ | ۰/۳۱۱ |
| ۲ | ۰/۳۶۵ | ۰/۳۶۵ | ۰/۳۴۶ | ۰/۳۴۶ |
| ۳ | ۰/۳۶۷ | ۰/۳۶۷ | ۰/۳۵۸ | ۰/۳۵۸ |
| ۴ | ۰/۳۶۸ | ۰/۳۶۸ | ۰/۳۶۴ | ۰/۳۶۴ |
| ۵ | ۰/۳۶۸ | ۰/۳۶۸ | ۰/۳۶۶ | ۰/۳۶۶ |

جدول ۴- مقادیر ضرایب انتقال گرمای کلی متناسب با NTU

| NTU | $U_1 = (w/m^2 - ^\circ C)$ | $U_3 = (w/m^2 - ^\circ C)$ |
|-----|----------------------------|----------------------------|
| ۱ | ۱۷۸۳/۴۴ | ۸۴۰/۰۰ |
| ۲ | ۳۵۶۶/۸۸ | ۱۶۸۰/۰۰ |
| ۳ | ۵۳۵۰/۳۲ | ۲۵۲۰/۰۰ |
| ۴ | ۷۱۳۳/۷۶ | ۳۳۶۰/۰۰ |
| ۵ | ۸۹۱۷/۲۰ | ۴۲۰۰/۰۰ |

۵- بررسی توزیع دما و کارایی

به منظور بررسی توزیع دما و کارایی، با در نظر گرفتن یک مورد مطالعاتی، تاثیر عواملی چون نفوذ گرما از محیط به مبادله‌کن، خواص متغیر سیال و برخی پارامترهای تاثیرگذار بر کارایی از قبیل هندسه مبادله‌کن و دبی‌های جرمی سیالات، بر توزیع دما و کارایی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

| | | | |
|---|-----------------------------|---------------------|---|
| $C_i \left(\begin{matrix} T_{i,o} \\ -T_{i,in} \end{matrix} \right)$ | $C_i (T_{h,in} - T_{i,in})$ | گرمایش جریانی میانی | $\epsilon_i = \frac{Q_{actual}}{Q_{max}}$ |
|---|-----------------------------|---------------------|---|

۴- صحت‌سنجی

معادلات و روابط بدست آمده در فصل قبل، برای هر مبادله‌کن سه‌جریانی موازی با سه ارتباط گرمانی با هر نوع آرایش جریانی، قابل استفاده می‌باشد. به منظور بررسی یک مورد مطالعاتی، جریان‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب به عنوان جریان سرد، گرم و میانی در نظر گرفته شده است، و قطر جریان‌های گرم و میانی یکسان لحاظ می‌گردد.

به منظور بررسی صحت نتایج، مقایسه‌ای میان دو کار انجام شده توسط کریشنا و همکاران [۲] و پروژه حاضر انجام گرفته است. مقادیر مورد استفاده در جدول ۲ از مقاله کریشنا و همکاران [۲]، به صورت زیر می‌باشد:

$$U_1 = 7133.76(w/m^2 - ^\circ C), U_2 = 10700.64(w/m^2 - ^\circ C),$$

$$U_3 = 22400(w/m^2 - ^\circ C), U_4 = 152.79(w/m^2 - ^\circ C),$$

$$\dot{m}_1 = 8(kg/s), \dot{m}_2 = 10(kg/s), \dot{m}_3 = 5(kg/s),$$

$$D_1 = 0.7(m), D_3 = 0.3(m), T_{c,in} = 2(^{\circ}C), T_{h,in} = 55(^{\circ}C),$$

$$T_{i,in} = 34(^{\circ}C), T_4 = 55(^{\circ}C), L = 10(m), t = 0.02(m),$$

$$k = 100(w/m - ^\circ C)$$

با در نظر گرفتن مقادیر مزبور و تعاریف (۱۷)، مقادیر پارامترهای دارای بعد مورد استفاده در مقاله حاضر استخراج شده‌اند که در عنوان جدول ۲، ارائه شده‌است. در اینجا مقادیر دماهای بی‌بعد دو جریان گرم و سرد در ۶ نقطه از طول مبادله‌کن و برای آرایش جریانی نوع ۲ محاسبه شده‌اند و نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، مقادیر مربوط به دماهای محاسبه شده در طول مبادله‌کن، یکسان می‌باشند، که این موضوع بیانگر صحت معادلات و روش استفاده شده در این مقاله است. پارامترهای بی‌بعد استفاده شده در مقاله کریشنا و همکاران [۲]، با در نظر گرفتن $L_e = L$ ، به صورت معادلات (۱۷) می‌باشند، که بر همان اساس و بدون تغییر در این مقاله از آنها استفاده شده است و پارامترهای بی‌بعدی هستند که مورد استفاده توسط مرجع مزبور قرار گرفته است. لازم به توضیح است که پارامتر بی‌بعد H استفاده شده در مرجع [۲]، که در روابط (۱۷) تعریف شده است، متمایز از ضریب انتقال گرما جابجایی h بیان شده در این مقاله است.

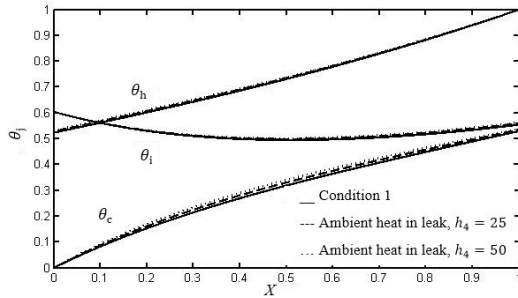
$$NTU = \frac{U_1 \cdot P_1 \cdot L}{C_c}, R_1 = \frac{C_h}{C_i}, R_2 = \frac{C_h}{C_c}, \quad (17)$$

$$H_1 = \frac{U_2 \cdot P_2}{U_1 \cdot P_1}, H_2 = \frac{U_3 \cdot P_3}{U_1 \cdot P_1}, H_3 = \frac{U_4 \cdot P_4}{U_1 \cdot P_1}$$

مقایسه دیگری که انجام شده، بین جدول ۳ از مقاله کریشنا و همکاران [۲] و کار فعلی می‌باشد. مقادیر پارامترهای استفاده شده در مقاله کریشنا [۲] به صورت روابط زیر می‌باشد:

$$H_1 = 0, H_2 = 0.3, H_3 = 0, \frac{C_i}{C_h} = 0.8, \frac{C_c}{C_h} = 2, \theta_{i,in} = 0.5$$

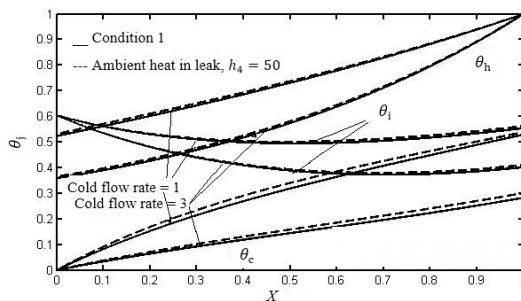
در این مقایسه، مقادیر دماهای خروجی بی‌بعد هر سه جریان برای ۵ مقدار متفاوت از NTU مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در جدول ۳ نشان داده شده است. در این مورد نیز دماهای خروجی جریان‌ها در هر دو کار برابر می‌باشند. مقادیر ضریب انتقال گرما کلی مورد استفاده در کار حاضر، متناسب با ۵ مقدار NTU، در جدول ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳- تاثیر نفوذ گرما از محیط بر پروفایل دمایی مبادله‌کن گرمایی سه‌جریانی در آرایش جریانی نوع ۲ برای سه مقدار $h_4 = 0, 25, 50$. مقادیر سایر پارامترها:

$$\dot{m}_1 = 1, \dot{m}_2 = 1, \dot{m}_3 = 1, D_1 = .7, D_3 = 0.3, L = 10, t = .02, K = 100, T_{1,in} = 2, T_{2,in} = 55, T_{3,in} = 34, T_4 = 24$$

نفوذ گرما از محیط برای دو مقدار متفاوت از دبی جریان سرد و دو مقدار متفاوت از دبی جریان گرم نیز، مطابق شکل‌های ۴ و ۵، منجر به افزایش پروفیل دمایی جریان سرد و گرم می‌شود. در دبی جرمی کمتر، میزان افزایش بیشتری در پروفیل دمایی سرد و گرم ملاحظه می‌شود. این نتیجه، نمایانگر این موضوع می‌باشد که در دبی جریانی کمتر، سیال عامل، فرصت بیشتری به منظور ارتباط گرمایی با محیط داشته و هوای محیط تاثیر بیشتری بر پروفیل دمای دو جریان سرد و گرم، به ویژه جریان سرد که در ارتباط با محیط است، دارد.



شکل ۴- تاثیر نفوذ گرما از محیط بر پروفایل دمایی مبادله‌کن گرمایی سه‌جریانی در آرایش جریانی نوع ۲ برای دو مقدار ۱، ۳، $\dot{m}_1 = 1$. مقادیر سایر پارامترها:

$$\dot{m}_2 = 1, \dot{m}_3 = 1, D_1 = .7, D_3 = 0.3, L = 10, t = .02, K = 100, T_{1,in} = 2, T_{2,in} = 55, T_{3,in} = 34, T_4 = 24, h_4 = 50$$

۵-۱- تاثیر نفوذ گرمایی از محیط و خواص متغیر سیال

تاثیر نفوذ گرما از محیط و خواص متغیر سیال بر توزیع دمای سه جریان و کارایی مبادله‌کن در مبادله‌کن‌های سه‌جریانی با سه ارتباط گرمایی، در شکل‌های ۳ الی ۶ مورد بررسی قرار گرفته است. شرط ۱ به عنوان وضعیت مبنا به منظور مقایسه با سایر شرایط در نظر گرفته شده است. در شرط ۱، از هر دو عامل ارتباط گرمایی با محیط و خواص متغیر سیال صرف‌نظر شده است. به عبارت دیگر در شرط ۱، دیواره خارجی مبادله‌کن عایق بوده و لذا ضریب انتقال گرمای جابجایی محیطی صفر در نظر گرفته شده و خواص سیال در دمای ورودی آن، به منظور انجام محاسبات لحاظ شده است.

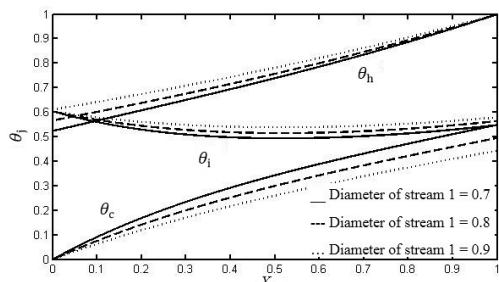
نفوذ گرما از محیط به جریان سرد، با در نظر گرفتن خواص ثابت جریان‌ها بر مبنای دمای ورودی آن‌ها، با توجه به شکل ۳، پروفیل دمای جریان سرد را کمی افزایش داده و تاثیر ناچیزی بر روی افزایش پروفیل دمای دو جریان گرم و میانی دارد. در شرط ۱، مقدار h_4 برابر صفر لحاظ شده و این بدان معنی می‌باشد که مبادله‌کن عایق است. تاثیر نفوذ گرما از محیط برای دو مقدار $h_4 = 25, 50 \text{ w/(m}^2\text{C)}$ در شکل ۳ نشان داده شده است. مقادیر بیشتر h_4 موجب افزایش بیشتر دمای جریان سرد و گرم می‌شود. دمای بی‌بعد جریان گرم در آرایش جریانی نوع ۲ برای $h_4 = 25$ از 0.5234 به 0.5278 (0.84%) افزایش پیدا کرده و برای $h_4 = 50$ از 0.5234 به 0.5317 (1.59%) افزایش داشته است. این افزایش در پروفیل دمایی سرد و گرم، طبق جدول ۵، موجب افزایش کارایی سرد و کاهش کارایی گرم می‌شود. به بیان دیگر، گرم نمودن جریان سرد با کارایی بیشتر و سرد نمودن جریان گرم با کارایی کمتری، در صورت ارتباط حرارتی قوی‌تر با محیط، امکان پذیر است.

جدول ۵- مقادیر کارایی و دمای بی‌بعد خروجی سه جریان با شروط گوناگون برای آرایش جریانی نوع ۲. مقادیر سایر پارامترها:

$$\dot{m}_1 = 1, \dot{m}_2 = 1, \dot{m}_3 = 1, D_1 = 0.7, D_3 = 0.3, L = 10, t = .02, K = 100, T_{1,in} = 2, T_{2,in} = 55, T_{3,in} = 34, T_4 = 24, h_4 = 25$$

| شروط | ϵ_h | ϵ_c | $\theta_{h,out}$ | $\theta_{c,out}$ |
|--------------------------------|--------------|--------------|------------------|------------------|
| شرط ۱ | ۰/۳۴۳۲ | ۰/۵۲۹۵ | ۰/۵۲۳۴ | ۰/۵۲۹۵ |
| نفوذ گرما از محیط، $h_4 = 25$ | ۰/۳۴۰۱ | ۰/۵۳۴۸ | ۰/۵۲۷۸ | ۰/۵۳۴۸ |
| نفوذ گرما از محیط، $h_4 = 50$ | ۰/۳۳۷۳ | ۰/۵۳۸۵ | ۰/۵۳۱۷ | ۰/۵۳۸۵ |
| نفوذ گرما از محیط و خواص متغیر | ۰/۳۴۸۵ | ۰/۵۵۰۳ | ۰/۵۱۴۵ | ۰/۵۵۰۳ |

پروفایل دمایی جریان سرد کاهش یافته، پروفایل دمایی جریان گرم افزایش می‌یابد و در نتیجه اختلاف دمایی بین جریان سرد و جریان گرم در هر مقطع افزایش می‌یابد، که در شکل ۷ این موارد مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۸، این تغییرات در پروفایل دمایی، منجر به کاهش هر دو کارایی گرم و سرد می‌شود. افزایش قطر جریان سرد از ۰/۶۵ متر به ۰/۸۵ متر، هر سه کارایی گرم، سرد و میانی را با یک شیب یکنواخت کاهش می‌دهد. مقادیر کارایی گرم، سرد و میانی برای سه مقدار متفاوت از قطر جریان سرد محاسبه شده و نتایج در جدول ۶ مشاهده می‌شود. افزایش قطر جریان سرد از ۰/۷ متر به ۰/۸ متر، کارایی گرم را از ۰/۳۴۸۵ به ۰/۳۱۱۴ و کارایی سرد را از ۰/۵۵۰۳ به ۰/۴۹۵۳ کاهش می‌دهد.



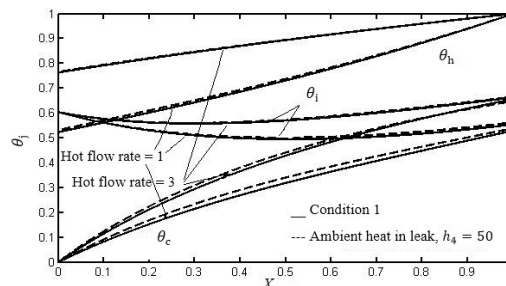
شکل ۷- تاثیر قطر جریان سرد بر پروفایل‌های دمایی جریان‌های سرد، گرم و میانی در یک مبادله‌کن گرمایی سه‌جریانی با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمایی از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:

$$\dot{m}_1 = 1, \dot{m}_2 = 1, \dot{m}_3 = 1, D_3 = 0.3, L = 10, t = .02, K = 100, T_{1,in} = 2, T_{2,in} = 55, T_{3,in} = 34, T_4 = 24, h_4 = 25$$

جدول ۶- تاثیر قطر جریان سرد بر کارایی گرم و میانی در یک مبادله‌کن گرمایی سه‌جریانی با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمایی

از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:
 $\dot{m}_1 = 1, \dot{m}_2 = 1, \dot{m}_3 = 1, D_3 = 0.3, L = 10, t = .02, K = 100, T_{1,in} = 2, T_{2,in} = 55, T_{3,in} = 34, T_4 = 24, h_4 = 25$

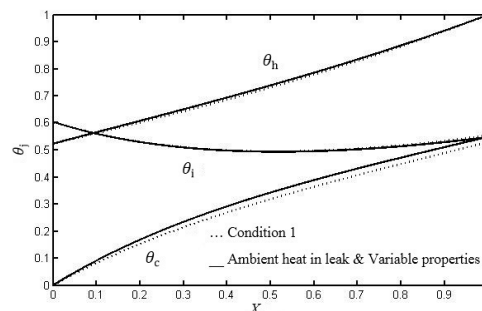
| ϵ_h | ϵ_c | ϵ_i | D_1 (m) |
|--------------|--------------|--------------|-----------|
| ۰/۳۴۸۵ | ۰/۵۵۰۳ | ۰/۰۸۴۲ | ۰/۷ |
| ۰/۳۱۱۴ | ۰/۴۹۵۳ | ۰/۰۶۶۲ | ۰/۸ |
| ۰/۲۷۹۶ | ۰/۴۴۳۶ | ۰/۰۴۱۰ | ۰/۹ |



شکل ۵- تاثیر نفوذ گرما از محیط بر پروفایل دمایی مبادله‌کن گرمایی سه‌جریانی در آرایش جریانی نوع ۲ برای دو مقدار متفاوت ۱، ۳ \dot{m}_2 مقادیر سایر پارامترها:

$$\dot{m}_1 = 1, \dot{m}_3 = 1, D_1 = .7, D_3 = 0.3, L = 10, t = .02, K = 100, T_{1,in} = 2, T_{2,in} = 55, T_{3,in} = 34, T_4 = 24, h_4 = 50$$

تاثیر همزمان خواص متغیر سیال و نفوذ گرما از محیط بر پروفیل دمایی هر سه جریان در شکل ۶ مشاهده می‌شود. اعمال همزمان این دو عامل، با وجود عدم تاثیر بر روی پروفیل دمایی جریان میانی و گرم، موجب افزایش پروفیل دمایی جریان سرد شده است. با توجه به ارتباط مستقیم جریان سرد با محیط، در شکل ۶ ملاحظه می‌شود که لحاظ نمودن ارتباط گرمایی با محیط و خواص متغیر، دارای تاثیر قابل توجه بر پروفیل دمایی جریان سرد می‌باشد. به منظور در نظر گرفتن خواص متغیر سیال، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انتقال گرمای سیال در دمای متوسط سیال لحاظ می‌گردد. در اینصورت به نتایج دقیق‌تری می‌توان دست یافت.

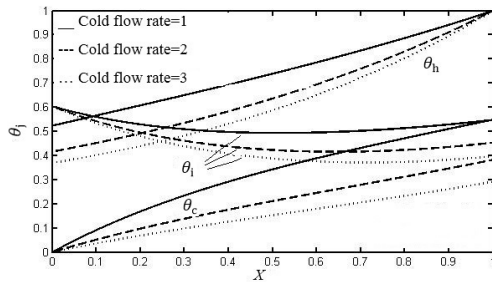


شکل ۶- تاثیر خواص متغیر جریان‌ها و نفوذ گرما از محیط بر پروفایل دمایی برای مبادله‌کن گرمایی سه‌جریانی در آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:

$$\dot{m}_1 = 1, \dot{m}_2 = 1, \dot{m}_3 = 1, D_1 = .7, D_3 = 0.3, L = 10, t = .02, K = 100, T_{1,in} = 2, T_{2,in} = 55, T_{3,in} = 34, T_4 = 24, h_4 = 25$$

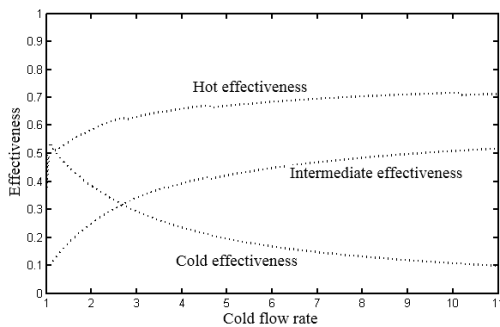
۲-۵- تاثیر قطر لوله جریان سرد، دبی جرمی جریان‌ها و دمای محیط بر توزیع دمای سیال‌ها و کارایی مبادله‌کن

تاثیر قطر لوله جریان سرد، دبی‌های جرمی و دمای محیط بر روی توزیع دمای سیال‌ها و کارایی سرد، گرم و میانی، با در نظر گرفتن خواص متغیر سیال و نفوذ گرمایی به جریان سرد از محیط اطراف، در شکل‌های ۷ الی ۱۵ نشان داده شده است. با افزایش قطر جریان سرد،



شکل ۹- تاثیر دبی جریان سرد بر پروفایل دمایی جریان های سرد، گرم و میانی در یک مبادله‌کن گرمایی سه جریانی با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمایی از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:

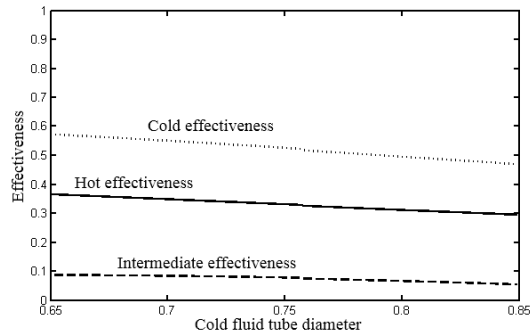
$$\dot{m}_2 = 1, \dot{m}_3 = 1, D_1 = 0.7, D_3 = 0.3, L = 10, t = .02, K = 100, T_{1,in} = 2, T_{2,in} = 55, T_{3,in} = 34, T_4 = 24, h_4 = 25$$



شکل ۱۰- تاثیر دبی جریان سرد بر کارایی سرد، گرم و میانی در جریانی با فرض خواص متغیر سیال و کن گرمایی سه یک مبادله نفوذ گرمایی از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:

$$\dot{m}_2 = 1, \dot{m}_3 = 1, D_1 = 0.7, D_3 = 0.3, L = 10, t = .02, K = 100, T_{1,in} = 2, T_{2,in} = 55, T_{3,in} = 34, T_4 = 24, h_4 = 25$$

افزایش دبی جرمی جریان گرم، مطابق شکل ۱۱، موجب افزایش پروفایل دمایی جریان‌های گرم و سرد شده که این افزایش، موجب بهبود کارایی گرم و سرد می‌شود که در جدول ۸ مقادیر کارایی گرم، سرد و میانی نشان داده شده است. منحنی‌های مربوط به کارایی گرم، سرد و میانی در شکل ۱۲ نشان می‌دهند که با افزایش دبی جریان گرم، هر دو کارایی سرد و گرم افزایش می‌یابند. این افزایش کارایی به طور پیوسته تا دبی جریان گرم به میزان ۷ kg/s ادامه می‌یابد و بعد از آن به طور مجانبی افزایش می‌یابد. کارایی میانی در دبی جریان گرم معادل ۱/۶ برابر با صفر می‌باشد، که این موضوع طبق تعریف کارایی میانی، بیانگر این مطلب است که در این دبی، دمای ورود و خروج جریان میانی با یکدیگر برابر می‌باشد. افزایش دبی جریان گرم از ۱ به ۲ kg/s، موجب افزایش کارایی گرم از ۰/۳۴۸۵ به ۰/۴۷۷۴ و افزایش کارایی سرد از ۰/۵۵۰۳ به ۰/۶۴۱۹ می‌شود.



شکل ۸- تاثیر قطر جریان سرد بر کارایی سرد، گرم و میانی در یک مبادله‌کن گرمایی سه جریانی با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمایی از

محیط برای آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:
 $\dot{m}_1 = 1, \dot{m}_2 = 1, \dot{m}_3 = 1, D_3 = 0.3, L = 10, t = .02, K = 100, T_{1,in} = 2, T_{2,in} = 55, T_{3,in} = 34, T_4 = 24, h_4 = 25$

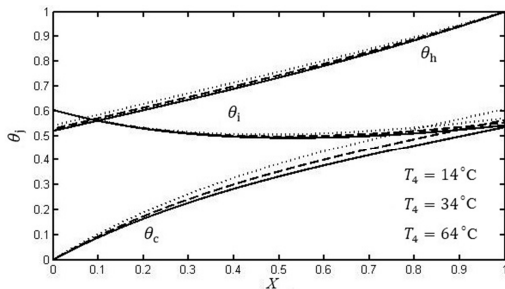
تاثیر دبی جریان‌ها بر توزیع دما و کارایی مبادله‌کن‌های سه جریانی در شکل‌های ۹ الی ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹، افزایش دبی جرمی جریان سرد، موجب کاهش پروفایل دمایی هر دو جریان سرد و گرم می‌شود. این کاهش در هر دو پروفایل دمایی، کارایی گرم را افزایش داده و موجب کاهش کارایی سرد می‌شود، همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. افزایش دبی جریان سرد از ۱ به ۲ طبق جدول ۷، کارایی گرم را از ۰/۳۴۸۵ به ۰/۵۸۳۹ افزایش می‌دهد و کارایی سرد را از ۰/۵۵۰۳ به ۰/۳۸۲۵ کاهش می‌دهد. از نتایج حاصله می‌توان دریافت که افزایش دبی سرد، به شدت موجب افزایش کارایی گرم و کاهش کارایی سرد می‌شود.

جدول ۷- تاثیر دبی جریان سرد بر کارایی سرد، گرم و میانی در یک مبادله‌کن گرمایی سه جریانی با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمایی از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم برای ۱، ۲. مقادیر سایر پارامترها:

$$\dot{m}_2 = 1, \dot{m}_3 = 1, D_1 = 0.7, D_3 = 0.3, L = 10, t = .02, K = 100, T_{1,in} = 2, T_{2,in} = 55, T_{3,in} = 34, T_4 = 24, h_4 = 25$$

| ϵ_h | ϵ_c | ϵ_i | $\dot{m}(\text{kg/s})$ |
|--------------|--------------|--------------|------------------------|
| ۰/۳۴۸۵ | ۰/۵۵۰۳ | ۰/۰۸۴۲ | $\dot{m}_1 = 1$ |
| ۰/۵۸۳۹ | ۰/۳۸۲۵ | ۰/۲۴۸۸ | $\dot{m}_1 = 2$ |
| ۰/۶۳۰۸ | ۰/۲۹۱۹ | ۰/۳۴۱۲ | $\dot{m}_1 = 3$ |

منجر به نفوذ گرما بیشتری به جریان سرد می‌شود، گرم نمودن جریان سرد موثرتر می‌باشد و کارایی گرم کاهش می‌یابد.



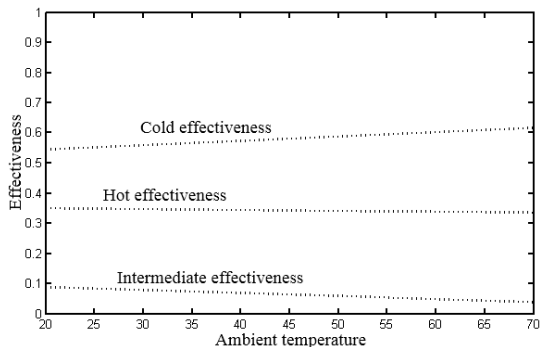
شکل ۱۳- تاثیر دمای محیط بر پروفایل دمایی جریان‌های سرد، گرم و میانی در یک مبادله‌کن گرمایی سه‌جریانی با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمایی از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:

$$\dot{m}_1 = 1, \dot{m}_3 = 1, D_1 = 0.7, D_3 = 0.3, L = 10, t = .02, K = 100, T_{1,in} = 2, T_{2,in} = 55, T_{3,in} = 34, T_4 = 24, h_4 = 25$$

جدول ۹- تاثیر دمای محیط بر کارایی سرد، گرم و میانی در یک مبادله‌کن گرمایی سه‌جریانه با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمایی از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:

$$\dot{m}_1 = 1, \dot{m}_2 = 1, \dot{m}_3 = 1, D_1 = 0.7, D_3 = 0.3, L = 10, t = .02, K = 100, T_{1,in} = 2, T_{2,in} = 55, T_{3,in} = 34, h_4 = 25$$

| ϵ_h | ϵ_c | ϵ_i | $T_4(^{\circ}C)$ |
|--------------|--------------|--------------|------------------|
| ۰/۳۵۱۶ | ۰/۵۳۶۰ | ۰/۰۹۳۹ | ۱۴ |
| ۰/۳۴۵۵ | ۰/۵۶۴۷ | ۰/۰۷۴۴ | ۳۴ |
| ۰/۳۳۷۱ | ۰/۶۰۷۹ | ۰/۰۴۴۰ | ۶۴ |

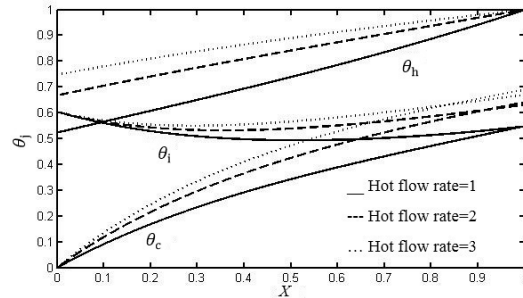


شکل ۱۴- تاثیر دمای محیط بر کارایی سرد، گرم و میانی در یک مبادله‌کن گرمایی سه‌جریانی با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمایی از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:

$$\dot{m}_1 = 1, \dot{m}_2 = 1, \dot{m}_3 = 1, D_1 = 0.7, D_3 = 0.3, L = 10, t = .02, K = 100, T_{1,in} = 2, T_{2,in} = 55, T_{3,in} = 34, h_4 = 25$$

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پس از استخراج معادلات حاکم بر هر یک از جریان‌ها و دیواره‌های مبادله‌کن گرمایی سه‌جریانی با سه ارتباط گرمایی و حل این معادلات و دستیابی به توزیع دما در جریان‌ها، تاثیر برخی عوامل از قبیل نفوذ گرما از محیط و خواص متغیر سیالات بر توزیع دما و کارایی



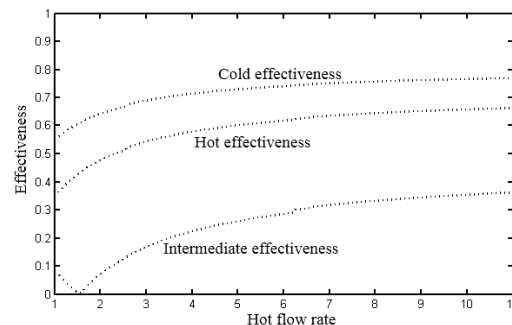
شکل ۱۱- تاثیر دبی جریان گرم بر پروفایل دمایی جریان‌های سرد، گرم و میانی در یک مبادله‌کن گرمایی سه‌جریانی با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمایی از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:

$$\dot{m}_1 = 1, \dot{m}_3 = 1, D_1 = 0.7, D_3 = 0.3, L = 10, t = .02, K = 100, T_{1,in} = 2, T_{2,in} = 55, T_{3,in} = 34, T_4 = 24, h_4 = 25$$

جدول ۸- تاثیر دبی جریان گرم بر کارایی سرد، گرم و میانی در یک مبادله‌کن گرمایی سه‌جریانی با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمایی از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:

$$\dot{m}_1 = 1, \dot{m}_3 = 1, D_1 = 0.7, D_3 = 0.3, L = 10, t = .02, K = 100, T_{1,in} = 2, T_{2,in} = 55, T_{3,in} = 34, T_4 = 24, h_4 = 25$$

| ϵ_h | ϵ_c | ϵ_i | $\dot{m}(kg/s)$ |
|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| ۰/۳۴۸۵ | ۰/۵۵۰۳ | ۰/۰۸۴۲ | $\dot{m}_2 = 1$ |
| ۰/۴۷۷۴ | ۰/۶۴۱۹ | ۰/۰۷۰۳ | $\dot{m}_2 = 2$ |
| ۰/۵۴۳۲ | ۰/۶۸۹۶ | ۰/۱۶۷۹ | $\dot{m}_2 = 3$ |



شکل ۱۲- تاثیر دبی جریان گرم بر کارایی سرد، گرم و میانی در یک مبادله‌کن گرمایی سه‌جریانی با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمایی از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:

$$\dot{m}_1 = 1, \dot{m}_3 = 1, D_1 = 0.7, D_3 = 0.3, L = 10, t = .02, K = 100, T_{1,in} = 2, T_{2,in} = 55, T_{3,in} = 34, T_4 = 24, h_4 = 25$$

با افزایش دمای محیط، طبق شکل ۱۳ دماهای جریان‌های سرد و گرم، بیشتر شده چرا که اختلاف دمایی بین دمای محیط و جریان سرد بیشتر می‌شود. این امر، موجب افزایش کارایی سرد و کاهش کارایی گرم می‌شود که این نتایج در شکل ۱۴ دیده می‌شود. افزایش دمای محیط از ۱۴ به ۳۴ درجه سلسیوس، کارایی سرد را طبق جدول ۹ از ۰/۵۳۶۰ به ۰/۵۶۴۷ افزایش و کارایی گرم را از ۰/۳۵۱۶ به ۰/۳۴۵۵ کاهش می‌دهد. به تعبیر دیگر، با افزایش دمای محیط که

- افزایش دبی جرمی جریان سرد، به افزایش کارایی گرم و کاهش کارایی سرد می‌انجامد.
- افزایش دبی جرمی جریان گرم، به افزایش کارایی گرم و سرد منجر می‌شود.

به منظور طراحی بهینه مبادله‌کن گرمائی، جهت دستیابی به بهترین ابعاد مبادله‌کن، می‌توان از نتایج این مقاله استفاده نموده و فرایند بهینه‌سازی را با در نظر داشتن متغیرهای تاثیرگذار اصلی به نحو ساده‌تری انجام داد. بدین منظور می‌توان با انتخاب پارامترهای تاثیرگذار به عنوان متغیر و با صرف‌نظر از پارامترهای کم‌تاثیر، جهت انجام بهینه‌سازی، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده برده و به طراحی بهینه مبادله‌کن جهت رسیدن به بیشترین کارایی دست یافت.

۷- نمادها

| | |
|-----------------------------------|---|
| A | مساحت جانبی دیواره مبادله‌کن طبق شکل ۱ (m^2) |
| \bar{A} | ماتریس ضرایب |
| $b_1 - b_7$ | ضرایب طبق تعریف |
| C | گرمای ویژه در دبی جرمی سیال ($w/^\circ C$) |
| c_p | گرمای ویژه در فشار ثابت ($J/Kg-^\circ C$) |
| D_1, D_2, D_3 | قطر لوله‌های یک، دو و سه (m) |
| H | پارامتر بی‌بعد طبق تعریف |
| h | ضریب انتقال گرمای جابجایی ($w/m^2-^\circ C$) |
| h_i | ضریب انتقال گرمای جابجایی داخلی ($w/m^2-^\circ C$) |
| h_o | ضریب انتقال گرمای جابجایی خارجی ($w/m^2-^\circ C$) |
| i | ضریب نماینده جهت مثبت یا منفی جریان‌ها |
| K | رسانایی گرمائی دیواره ($w/m-^\circ C$) |
| k_f | رسانایی گرمائی سیال ($w/m-^\circ C$) |
| L | طول مبادله‌کن (m) |
| L_e | طول موثر مبادله‌کن تعریف شده به صورت طول مبادله‌کن تقسیم بر تعداد المان (m) |
| $\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_3$ | دبی جرمی جریان ۱، ۲ و ۳ (kg/s) |
| NTU | تعداد واحدهای انتقال گرما |
| Pr | عدد پرانتل |
| p_1, p_2, p_3, p_4 | محیط تر شده ۱ الی ۴ طبق شکل ۱ |
| Q | آهنگ انتقال گرما (w) |
| R | پارامتر بی‌بعد طبق تعریف |
| Re | عدد رینولدز |
| r_i | شعاع داخلی لوله‌های مبادله‌کن (m) |
| r_o | شعاع خارجی لوله‌های مبادله‌کن (m) |
| T | دما ($^\circ C$) |
| t | ضخامت |
| \bar{T} | دمای متوسط جریان‌ها ($^\circ C$) |
| U | ضریب انتقال گرمای کلی ($w/m^2-^\circ C$) |
| U_1, U_2, U_3, U_4 | ضرایب انتقال گرمای کلی مربوط به مساحت‌های جانبی ($w/m^2-^\circ C$) |
| V | ماتریس ویژه ماتریس ضرایب \bar{A} |
| X | مختصات محوری بی‌بعد |

مبادله‌کن مورد بررسی قرار گرفت. علاوه‌براین، تاثیر برخی پارامترهای موثر بر کارایی مبادله‌کن از قبیل قطر لوله‌های سرد و پارامترهای طراحی شامل دبی جرمی هر یک از جریان‌های گرم و سرد و دمای محیط بر کارایی بررسی شد.

ارتباط گرمائی با محیط در وضعیت نفوذ گرما از محیط، بررسی شد. نفوذ گرما از محیط، باعث افزایش دما در هر سه جریان سرد، گرم و میانی می‌شود. این افزایش توزیع دما، در حالتی که هدف از مبادله‌کن، گرم نمودن جریان سرد باشد، کارایی را می‌افزاید. درحالی‌که، با هدف سرد نمودن جریان گرم، این افزایش دما باعث کاهش کارایی گرم می‌شود. به بیان دیگر کارایی سرد افزایش و کارایی گرم کاهش می‌یابد. در واقع نفوذ گرما از محیط بر اساس هدفی که از مبادله‌کن انتظار می‌رود، می‌تواند تاثیر مثبت و یا منفی بر کارایی داشته باشد. به بیان دیگر، در صورت وجود نفوذ گرما از محیط به مبادله‌کن، زمانی که به دنبال سرمایش جریان گرم مبادله‌کن می‌باشیم، عایق‌کاری، کارایی را افزایش می‌دهد در غیر اینصورت اگر به دنبال کارایی سرد و گرم نمودن جریان سرد مبادله‌کن می‌باشیم، عایق‌کاری باعث کاهش کارایی مبادله‌کن می‌گردد.

هر پارامتر طراحی که نفوذ گرما از محیط را افزایش دهد، به تقویت نتایج بدست آمده در بحث نفوذ گرما از محیط می‌انجامد. با افزایش ضریب انتقال گرما جابجایی محیطی و نیز افزایش اختلاف دمای میان جریان سرد و محیط که با تغییر دمای محیط حاصل می‌گردد، کارایی سرد افزایش بیشتر و کارایی گرم کاهش بیشتری را نشان می‌دهند. لحاظ نمودن خواص متغیر سیالات منجر به دستیابی به توزیع دما و کارایی به صورت دقیق‌تر نسبت به حالت خواص ثابت جریان در ورودی مبادله‌کن، می‌گردد.

افزایش قطر جریان گرم، دمای دو جریان سرد و گرم را به هم نزدیکتر نموده و کارایی سرد و گرم مبادله‌کن را افزایش می‌دهد. بدین معنی که گرم نمودن جریان سرد در قطرهای بیشتری از لوله جریان گرم به شکل بهتری انجام می‌پذیرد. این تغییرات به افزایش کارایی گرم نیز منجر می‌شود.

افزایش قطر جریان سرد، عکس نتایج قبلی را به دنبال دارد. در این حالت فاصله دمایی جریان‌ها افزایش یافته و مبادله‌کن کارایی قبل را از دست داده و هر دو کارایی گرم و سرد با کاهش مواجه می‌گردند.

افزایش دبی جریان گرم، باعث افزایش در پروفیل دمای گرم و سرد می‌شود. این تغییر منجر به افزایش کارایی گرم و سرد می‌شود. در حالی که افزایش دبی جریان سرد، تنها به افزایش در کارایی گرم می‌انجامد و کارایی سرد را کاهش می‌دهد.

نتایج بدست آمده را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- نفوذ گرما از محیط، به افزایش پروفیل دمایی هر سه جریان می‌انجامد.
- افزایش دمای محیط، تاثیر نفوذ گرما به مبادله‌کن را تشدید می‌کند.
- افزایش ضریب انتقال گرما جابجایی، موجب تقویت تاثیر نفوذ گرما از محیط می‌گردد.
- افزایش قطر لوله جریان سرد، منجر به فاصله دمایی بیشتر بین جریان سرد و گرم و کاهش کارایی می‌گردد.

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

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

[15] Singh S. K., Kumar S., Mishra M., and Jha P. K., Transient behavior of co-current parallel flow three-fluid heat exchanger, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 46-50, 2014.

[16] Singh S. K., Mishra M., and Jha P. K., Experimental investigations on thermo-hydraulic behaviour of triple concentric-tube heat exchanger, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 229, pp. 299-308, 2015.

[17] Veerabhadrapa K., Seetharamu K. N., and Hegde P. G., Effect of ambient heat-in-leak on transient behaviour of three-fluid heat exchanger with two thermal communications using finite element method. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, pp. 10596-10602, 2017.

[18] Zhang W., Shao S., Zhang H., and Tian C., Numerical Investigation on Three-fluid Heat Exchanger for Hybrid Energy Source Heat Pumps. *Energy Procedia*, Vol. 105, pp. 1692-1699, 2017.

[19] Miller J. W., J r., Schon G. R., and Yaws C. L., Correlations, *Chemistry Engineering*, vol. 83, No. 23, p.129, 1976.

[20] Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., Dewitt D. P., *Introduction to heat transfer*, Fifth edition, pp. 455-493. Wiley, New York, 2007.

| | |
|------------------|------------------------------------|
| x | مختصات محوری (m) |
| Z | مقادیر ویژه ماتریس ضرایب \bar{A} |
| علایم یونانی | |
| θ | دمای بی‌بعد |
| $\bar{\theta}$ | ماتریس دمای بی‌بعد |
| ε | کارایی گرمایی |
| زیر نویس‌ها | |
| c | جریان سرد |
| h | جریان گرم |
| i | جریان میانی |
| in | ورودی |
| o | خروجی |
| 1,in, 2,in, 3,in | دمای ورودی سیال 1، 2 و 3 |

۸- مراجع

[1] Sekulic D. P., Shah R. K., Thermal design theory of three-fluid heat exchangers, *Heat Transfer*, Vol. 26, pp. 219-329, 1995.

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

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

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

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

[6] Saeid N. H., Seetharamu K. N., Finite element analysis for co-current and counter-current parallel flow three-fluid heat exchanger, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Vol. 16, pp. 324-337, 2006.

[7] Gupta P., Atrey M. D., Performance evaluation of counter flow heat exchangers considering the effect of heat-in-leak and longitudinal conduction for low temperature applications, *Cryogenics*, Vol. 40, pp. 469-474, 2000.

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

[9] Chato J. C., Laverman R. J., and Shah J. M., Analyses of parallel flow, multi-stream heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 14, pp. 1691-1703, 1971.

[10] Morley T. B., Exchange of heat between three fluids, *Engineer*, Vol. 155, p. 314, 1933.

[11] Sorlie T., *Three-fluid heat exchanger design theory - Counter and parallel flow*, Department of Mechanic Engineering, Stanford University, Stanford, California, No. 57, 1962.

[12] Yuan P., Kou H. S., 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.