

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

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

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

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

رضا رستگار

امیرفرهنگ ستووده

مجید عمیدپور

چکیده

علاوه بر ارتباط گرمائی با محیط، خواص متغیر جریان‌ها و هدایت گرمائی طولی در دیوارهای 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 دمای هر یک از جریان‌ها می‌باشد. در این مقاله تأثیر 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. سرمایش جریان گرم و گرمایش جریان سرد، دو هدف از بکارگیری مبادله‌کن به منظور بررسی کارایی، می‌باشند. تأثیر 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 تأثیرات 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 قطعه عمود بر جریان می‌شود و به کاهش هر دو کارایی گرم و سرد می‌انجامد. افزایش دمای جرمی سیال سرد به افزایش کارایی گرم و کاهش کارایی سرد منجر می‌شود. در اثر افزایش دمای جرمی جریان گرم، هر دو کارایی گرم و سرد مبدل افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مبادله‌کن سه‌جریانی، توزیع دما، کارایی گرمائی، تبادل گرماء، 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.

ساختاری در دو نوع صفحه پره و لوله‌ای ساخته می‌شوند که سه جریان می‌توانند با 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 سه‌جریانه در انواع آن توسط محققین در جهان صورت گرفته است. در این مطالعات روش‌های مختلف روش‌های متعددی به منظور دستیابی به توزیع دمای سه جریان از قبیل روش‌های صریح، تحلیلی و نیمه تحلیلی و عددی ارائه شده است.

شروع استوا و امیل [۳]، یک مدل ریاضی مربوط به مبادله‌کن‌های سه‌جریانه با سه ارتباط گرمائی بدون اتلاف گرمائی به محیط و صرف نظر از هدایت گرمائی طولی در دیواره مبادله‌کن را ارائه نموده و با این

۱- مقدمه

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

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

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۸/۲۲

تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۰۱

ورودی را بر رسانش گرمائی طولی در دیواره، مورد مطالعه قرار دادند. روان و همکاران [۱۳]، کارایی اگزرسی را به منظور بررسی و آنالیز کارایی ترمودینامیکی تعریف نمودند. اخیرا آنها [۱۴] از روش تولید آنتروپی به منظور بررسی تاثیر پارامترهای بی بعد متعدد بر تعداد واحدهای آنتروپی در مطالعه کنندهای سه‌جوابی استفاده نمودند.

مرجع [۱۵]، به بررسی رفتار گذرا در مبدل‌های سه‌جوابی جریان موازی پرداخته است. در این مقاله از روش عددی گوس-سیدل به منظور تحلیل رفتار گذرا با درنظر گرفتن تاثیر رسانش گرمائی طولی در راستای پوسته‌ی مطالعه کن، استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که رسانش گرمائی در راستای پوسته‌ی مطالعه کن، بر روی کارایی مطالعه کن گرما تاثیرگذار است. در مرجع [۱۶]، مطالعه کن سه‌جوابیانه لوله‌ای هم‌مرکز، با دو ارتباط گرمائی در شرایط پایا، به صورت تجزیی، مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور اندازه‌گیری تغییرات دمایی سیال و ضریب اصطکاک در طول مطالعه کن، 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 گذرا مطالعه کن سه‌جوابی جریان موایی با دو ارتباط گرمائی، با استفاده از روش المان محدود، در مرجع [۱۷]، بر اساس تغییرات دمای سیال گرم، مورد بررسی قرار گرفت. تاثیرات نفوذ گرمائی محیط بر مطالعه کن 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 شبیث ثابت دمای هر یک از سیالات، استفاده نمود.

بررسی عددی بر روی مطالعه کن‌های سه‌جوابی مورد استفاده در پمپ‌های گرمایی با منبع انرژی هیبریدی، در مرجع [۱۸]، انجام پذیرفت. سه مطالعه کن گرمائی با مسیرهای جریانی مختلف، به منظور بررسی میزان افت فشار و انتقال گرماء، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با بهینه‌سازی افت فشار و ضریب انتقال گرماء، می‌توان به کارایی بالاتری در مطالعه کن سه‌جوابی دست یافت.

همانطور که ذکر شد، تاثیر ارتباط گرمائی با محیط بدون لحاظ نمودن هدایت گرمائی در دیواره مطالعه کن‌های سه‌جوابی توسعه 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 دمای بدست آمده به صورت دقیق محاسبه شده است و الگوریتم تا رسیدن به شرط همگرایی دمای خروجی در سیال تکرار شده است. همچنین در کار حاضر برخلاف کار کریشنا و همکاران [۲]، از پارامترهای اصلی به جای پارامترهای بی بعد 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 مطالعه کن، دمای ورودی سیال مبدل، دمای هوای دیجیان، بر توزیع

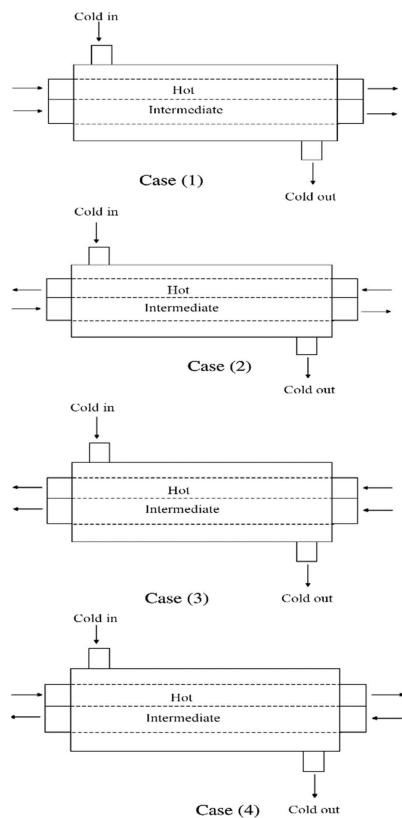
فرضیات تاثیرات پارامترهای بی بعد مختلف را بر توزیع دما، از روش حل تحلیلی معادلات، مورد بررسی قرار دادند. تعاریف و روابط مربوط به کارایی مطالعه کن گرمائی سه‌جوابی با توجه به هدف و کاربرد مورد نظر مطالعه کن، توسط شریوستاوا و امیل [۴] مطرح شد. روابط کارایی مربوط به سه هدف متعدد گرم نمودن جریان سرد، سرد 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 دمای متوسط انتگرالی به منظور طراحی گرمائی و شبیه‌سازی مطالعه کن‌های سه‌جوابی با دو ارتباط گرمائی توسعه مین ژاؤ و یان لی [۵] مطرح شد که از طریق روابط صریح به توزیع دمای جریان‌ها در حالتی که از اتفاق گرمائی به محیط و هدایت گرمائی طولی صرف‌نظر شود دست یافتدند. این روابط قابل استفاده در مطالعه کن گرمائی سه‌جوابی در حالتی است که مطالعه کن به صورت سه لوله هم مرکز در نظر گرفته شود. در این مقاله نحوه استفاده از این روابط در مطالعه کن‌های دوچریانه، با و بدون لحاظ ارتباط گرمائی با محیط نیز شرح داده شد. حل معادلات حاکم بر مطالعه کن‌های سه‌جوابی با دو ارتباط گرمائی با استفاده از روش المان محدود نیز توسط سعید و سیتارامو [۶] بیان شد.

گوپتا و آتری [۷]، کارایی مطالعه کن گرمائی دوچریانه جریان مخالف را با در نظر گرفتن نفوذ گرمائی از محیط و رسانش گرمائی طولی در دیواره مطالعه کن و با فرض عایق بودن مطالعه کن در دو انتهای مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله به منظور بیان تاثیر ارتباط گرمائی با محیط، رسانش گرمائی طولی و بعضی پارامترهای بی بعد، 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 گرمائی طولی در دیواره بر روی توزیع دما و کارایی مطالعه کن‌های سه‌جوابی با سه ارتباط گرمائی توسعه کریشنا و همکاران [۸] مورد بررسی قرار گرفت که این تاثیر به صورت کاهش کارایی گرم در مطالعه کن‌ها ظاهر شد و معادلات حاکم بدون لحاظ ارتباط گرمائی با محیط استخراج و از طریق تحلیلی حل شدند.

همانطور که ذکر شد، مطالعه کن‌های سه‌جوابی که در آنها سه‌جوابی در حال مطالعات گرمائی با یکدیگر بوده، دارای کاربردهای فراوانی می‌باشند. این مطالعه کن‌ها به نسبت مطالعه کن‌های دوچریانه دارای کارایی بالاتر و دارای ساختار جمع‌وجورتری می‌باشند. ولیکن، وجود ارتباط گرمائی میان سه‌جوابیانه کاریابی گرم در مطالعه کن‌ها را به لحاظ طراحی و ساخت، پیچیده‌تر می‌کند [۹]. لازم به ذکر است که اولین آنالیز مربوط به مطالعه کن‌های سه‌جوابی توسعه مورلی در سال ۱۹۳۳ انجام پذیرفت [۱۰]. او با استفاده از قانون سرمایش نیوتون، معادلات مربوط به مطالعه کن سه‌جوابی را استخراج نمود و بوسیله روش انتگرالی، به راه حل تحلیلی دست یافت. علاوه بر این، او توسط روش سعی و خطأ، طریقه طراحی ابعاد مطالعه کن را مطرح نمود.

سورلی نیز بر اساس کار مورلی، نظریه طراحی مطالعه کن‌های جریان موازی و جریان مخالف مطالعه کن‌های سه‌جوابی با سه ارتباط گرمائی را مطرح نمود [۱۱].

یان و کو [۱۲]، تاثیر رسانش گرمائی طولی بر کارایی مطالعه کن‌های سه‌جوابی جریان متقاطع را بررسی نمودند. آنها تاثیر عواملی چون نسبت ظرفیت گرمائی، تعداد واحدهای انتقال گرماء و نسبت دمای



شکل ۲- آرایش جریان‌ها

به منظور دستیابی به معادلات، فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شوند:
 (۱) مبادله کن در حالت پایا است. (۲) تعامل گرمائی با محیط برقرار است. (۳) از رسانش گرمائی طولی در دیوارهای صرف نظر 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 فاری در جریان‌ها دیده نمی‌شود. (۷) دبی ثابت است. (۸) تولید و یا مصرف انرژی در مبادله کن 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 $+1$ برای جریان با جهت موافق با محور X و با -1 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 مبادله کن گرمائی لوله‌ای سه‌جوابی موازی با سه ارتباط گرمائی و با هر نوع آرایش جریانی مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله معادلات استخراجی به منظور بررسی تأثیر برخی پارامترهای هندسی و طراحی از قبیل طول و قطر مبادله کن، دبی جرمی هر یک از جریان‌ها، دمای محیط و ضریب جابجایی، بر توزیع دما و کارایی مورد بررسی قرار گرفته است. صحت 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 مبادله کن سه‌جوابی با در نظر گرفتن پارامترهای اصلی، بدون نیاز به بعده‌سازی.

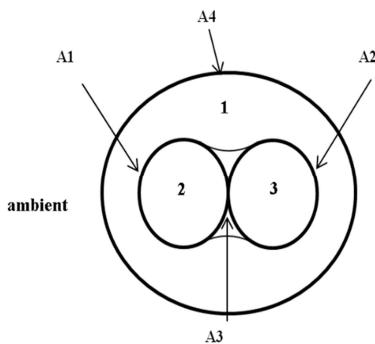
(۲) حل معادلات با در نظر گرفتن خواص متغیر سیال شامل لزجت و ظرفیت گرمائی ویژه.

(۳) بررسی میزان تأثیر برخی پارامترهای مؤثر بر کارایی و توزیع دما.

۲- فرمول بندی مدل و حل معادلات

۱-۲- نحوه ارتباط سه جریان و فرضیات

یک مبادله کن سه‌جوابی موازی، با سه ارتباط گرمائی 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 ارتباط گرمائی می‌باشد. جریان ۱ علاوه بر ارتباط گرمائی با جریان‌های ۲ و ۳، در تعامل گرمائی با محیط نیز می‌باشد. بر اساس جهت هر یک از جریان‌ها که در جهت مثبت محور افقی یا در جهت منفی محور افقی باشد، نوع آرایش جریانی طبق شکل ۲ ایجاد می‌شود.



شکل ۱- طرح‌واره مبادله کن سه‌جوابی با سه ارتباط گرمائی

حریان 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.

$$\begin{aligned} \theta_j &= \frac{T_j - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,in}}, X = \frac{x}{L}, p_1 = p_2 = \frac{\pi \times D_2}{2}, p_3 = D_2 \\ p_4 &= \pi \times D_1, b_1 = \frac{U_1 p_1 L}{m_1 C_1}, b_2 = \frac{U_2 p_2 L}{m_1 C_1}, b_3 = \frac{U_4 p_4 L}{m_1 C_1} \\ b_4 &= \frac{U_1 p_1 L}{m_2 C_2}, b_5 = \frac{U_3 p_3 L}{m_2 C_2}, b_6 = \frac{U_3 p_3 L}{m_3 C_3}, b_7 = \frac{U_2 p_2 L}{m_3 C_3} \end{aligned} \quad (4)$$

۲-۳- 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

$$\begin{aligned} \theta_{c,in} &= \frac{T_{c,in} - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,in}} = 0 \\ \bar{A} &= \begin{bmatrix} -i_1(b_1 + b_2 + b_3) & i_1 b_1 & i_1 b_2 & i_1 b_3 \\ i_2 b_4 & -i_2(b_4 + b_5) & i_2 b_5 & 0 \\ i_3 b_7 & i_3 b_6 & -i_3(b_6 + b_7) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

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. θ_4 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. θ_4 شرط مرزی برای دستیابی به توزیع دما مورد نیاز است که بر اساس دمای بی‌بعد ورودی سه جریان و دمای بی‌بعد محیط، همانطور که در معادلات (۷) تا (۱۰) بیان شده، بدست می‌آیند.

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

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

$$\theta_{i,in} = [0, 1] @ X = \frac{1 - i_1}{2} \quad (9)$$

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

هر مقدار بین صفر تا ۱

هر مقدار مثبت

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. درصورت استفاده از سیال عامل آب در مبادله‌کن گرمائی، از رابطه ظرفیت گرمایی ویژه آب در دمای T طبق معادله (۱۲) استفاده می‌شود، که در آن دما بر حسب کلوین می‌باشد [۲۰]. مقدار متوسط دمای جریان‌ها نیز طبق معادله (۱۳) محاسبه می‌شود.

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

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

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

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

$$h = \frac{k_f}{D} \left(0.027 Re^{\frac{4}{5}} \cdot pr^{\frac{1}{3}} \right) \quad (14)$$

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

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

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 دمای های 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 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	$\epsilon_i = \frac{Q_{actual}}{Q_{max}}$

جدول ۲- دماهای بی بعد دو جریان گرم و سرد این مطالعه و جدول ۲ از مقاله کریشنا و همکاران [۲] در مبادله کن سه جریانی با سه ارتباط گرمائی و برای آرایش جریانی نوع ۲، مقادیر پارامترها:

$$\begin{aligned} U_1 &= 7133.76(w/m^2 - {}^\circ C), U_2 = 10700.64(w/m^2 - {}^\circ C), \\ U_3 &= 22400(w/m^2 - {}^\circ C), U_4 = 152.79(w/m^2 - {}^\circ C), \\ \dot{m}_1 &= 8(kg/s), \dot{m}_2 = 10(kg/s), \dot{m}_3 = 5(kg/s), \\ D_1 &= 0.7(m), D_3 = 0.3(m), T_{c,in} = 2({}^\circ C), T_{h,in} = 55({}^\circ C), \\ T_{i,in} &= 34({}^\circ C), T_4 = 55({}^\circ C), L = 10(m), t = 0.02(m), \\ k &= 100(w/m - {}^\circ C) \end{aligned}$$

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

جدول ۳- دماهای بی بعد خروجی دو جریان گرم و سرد کار حاضر و جدول ۳ از مقاله کریشنا و همکاران [۲] در مبادله کن سه جریانی با سه ارتباط گرمائی و برای آرایش جریانی نوع ۱، مقادیر پارامترها:

$$U_2 = 0, U_4 = 0, \dot{m}_1 = 2, \dot{m}_2 = 1, \dot{m}_3 = 8, D_1 = 0.7, D_3 = 0.3, T_{i,in} = 2, T_{c,in} = 55, T_{h,in} = 34, T_4 = 55, L = 10, t = 0.02, K = 100$$

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

جدول ۴- مقادیر ضرایب انتقال گرمائی کلی متناسب با NTU

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

۵- بررسی توزیع دما و کارابی

به منظور بررسی توزیع دما و کارابی، با در نظر گرفتن یک مورد مطالعاتی، تاثیر عواملی چون نفوذ گرما از محیط به مبادله کن، خواص متغیر سیال و برخی پارامترهای تاثیرگذار بر کارابی از قبیل هندسه مبادله کن و دبی های جرمی سیالات، بر توزیع دما و کارابی مورد بررسی قرار می گیرد.

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

۴- صحت سنجی

معادلات و روابط بدست آمده در فصل قبل، برای هر مبادله کن سه جریانی موازی با سه ارتباط گرمائی با هر نوع آرایش جریانی، قابل استفاده می باشد. به منظور بررسی یک مورد مطالعاتی، جریان های ۲، ۱ و ۳ به ترتیب به عنوان جریان سرد، گرم و میانی در نظر گرفته شده است، و قطر جریان های گرم و میانی یکسان لحاظ می گردد.

به منظور بررسی صحت نتایج، مقایسه های 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 می باشد:

$$\begin{aligned} U_1 &= 7133.76(w/m^2 - {}^\circ C), U_2 = 10700.64(w/m^2 - {}^\circ C), \\ U_3 &= 22400(w/m^2 - {}^\circ C), U_4 = 152.79(w/m^2 - {}^\circ C), \\ \dot{m}_1 &= 8(kg/s), \dot{m}_2 = 10(kg/s), \dot{m}_3 = 5(kg/s), \\ D_1 &= 0.7(m), D_3 = 0.3(m), T_{c,in} = 2({}^\circ C), T_{h,in} = 55({}^\circ C), \\ T_{i,in} &= 34({}^\circ C), T_4 = 55({}^\circ C), L = 10(m), t = 0.02(m), \\ k &= 100(w/m - {}^\circ C) \end{aligned}$$

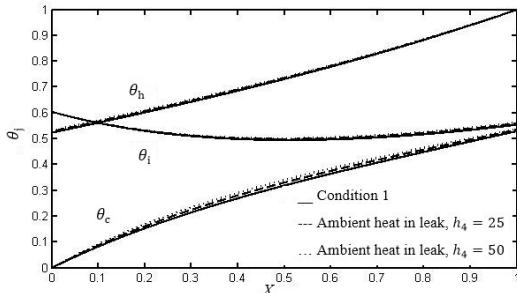
با در نظر گرفتن مقادیر مزبور و تعاریف (۱۷)، مقادیر پارامترهای دارای بعد مورد استفاده در مقاله حاضر استخراج شده اند که در عنوان جدول ۲، ارائه شده است. در اینجا مقادیر دماهای بی بعد دو جریان گرم و سرد در ۶ نقطه از طول مبادله کن و برای آرایش جریانی نوع ۲ محاسبه شده اند و نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است.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

$$\begin{aligned} NTU &= \frac{U_1 \cdot p_1 \cdot L}{C_c}, R_1 = \frac{C_h}{C_i}, R_2 = \frac{C_h}{C_c}, \\ H_1 &= \frac{U_2 \cdot p_2}{U_1 \cdot p_1}, H_2 = \frac{U_3 \cdot p_3}{U_1 \cdot p_1}, H_3 = \frac{U_4 \cdot p_4}{U_1 \cdot p_1} \end{aligned} \quad (۱۷)$$

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

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

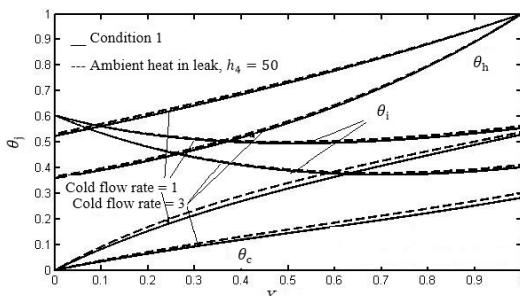
در این مقایسه، مقادیر دماهای خروجی بی بعد هرسه جریان برای ۵ مقدار متفاوت از NTU مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در جدول ۳ نشان داده شده است. در این مورد نیز دماهای خروجی جریان ها در هر دو کار برابر می باشند. مقادیر ضریب انتقال گرما کلی مورد استفاده در کار حاضر، متناسب با ۵ مقدار NTU در جدول ۴ نشان داده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



شکل ۳- تأثیر نفوذ گرما از محیط بر پروفایل دمایی مبادله‌کن گرمائی سه جریانی در آرایش جریانی نوع ۲ برای سه مقدار $h_4 = 0, 25, 50$ سه جریانی در آرایش جریانی نوع ۲ برای سه مقدار $h_4 = 0, 25, 50$ مقدار پارامترها:

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

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 جریانی کمتر، میزان افزایش بیشتری در پروفیل دمایی سرد و گرم ملاحظه می‌شود. این نتیجه، نمانگر این موضوع می‌باشد که در دبی جریانی کمتر، سیال اعمال، فرست بیشتری به منظور ارتباط گرمائی با محیط داشته و هوای محیط تأثیر بیشتری بر پروفیل دمایی دو جریان سرد و گرم، به ویژه جریان سرد که در ارتباط با محیط است، دارد.



شکل ۴- تأثیر نفوذ گرما از محیط بر پروفایل دمایی مبادله‌کن گرمائی سه جریانی در آرایش جریانی نوع ۲ برای دو مقدار $m_1 = 1, 3$ سه جریانی در آرایش جریانی نوع ۲ برای دو مقدار $m_1 = 1, 3$ مقدار پارامترها:

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

۱-۵- تأثیر نفوذ گرمائی از محیط و خواص متغیر سیال

تأثیر نفوذ گرمائی از محیط و خواص متغیر سیال بر توزیع دمای سه جریان و کارایی مبادله‌کن در مبادله‌کن‌های سه جریانی با سه ارتباط گرمائی، 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 گرمائی با محیط و خواص متغیر سیال صرفنظر شده است. به عبارت دیگر در شرط ۱، دیواره خارجی مبادله‌کن عایق بوده و لذا ضریب انتقال گرمائی جابجایی محیطی صفر در نظر گرفته شده و خواص سیال در دمای ورودی آن، به منظور انجام محاسبات لحاظ شده است.

نفوذ گرمائی 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 تأثیر 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. تأثیر نفوذ گرمائی از محیط برای دو مقدار $h_4 = 25, 50 \text{ w}/(\text{m}^2\text{C})$ در شکل ۳ نشان داده شده است. مقدار بیشتر h_4 موجب افزایش بیشتر دمای جریان سرد و گرم می‌شود. دمای بی بعد جریان گرم در آرایش جریانی نوع ۲ و برای $h_4 = 25$ از 0.5278 به 0.5234 (۰.۸۴٪)، از 0.5278 به 0.5234 (۰.۵۹٪) و برای $h_4 = 50$ از 0.5317 به 0.5234 (۰.۵۳٪) افزایش داشته است. این افزایش در پروفیل دمای 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.

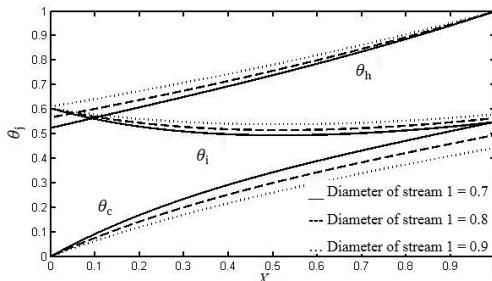
جدول ۵- مقدار کارایی و دمای بی بعد خروجی سه جریان با شرط

گوناگون برای آرایش جریانی نوع ۲. مقدار پارامترها:

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

$\theta_{h,out}$	$\theta_{c,out}$	ε_h	ε_c	شرط
0.5234	0.5295	0.3432	0.5295	شرط ۱
0.5278	0.5348	0.3401	0.5348	نفوذ گرمائی از محیط، $h_4 = 25$
0.5317	0.5385	0.3373	0.5385	نفوذ گرمائی از محیط، $h_4 = 50$
0.5145	0.5503	0.3485	0.5503	نفوذ گرمائی از محیط و خواص متغیر

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 $1/8$ متر به $1/85$ متر، هر سه کارایی گرم، سرد و میانی را 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 $1/8$ متر به $1/85$ متر، کارایی گرم را از 0.3485 به 0.3114 و کارایی سرد را از 0.5503 به 0.4953 کاهش می‌دهد.



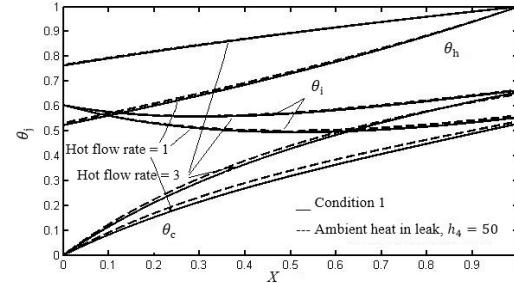
شکل ۷- تاثیر قطر جریان سرد بر پروفایلهای دمایی جریان‌های سرد، گرم و میانی در یک مبادله‌کن گرمائی سه‌جریانی با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمائی خواص متغیر سیال و نفوذ گرمائی از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:

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

جدول ۶- تاثیر قطر جریان سرد بر کارایی سرد، گرم و میانی در یک مبادله‌کن گرمائی سه‌جریانی با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمائی از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:

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

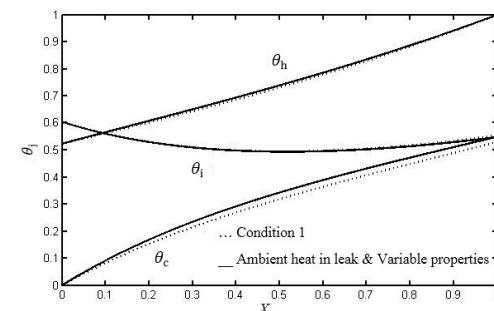
ϵ_h	ϵ_c	ϵ_i	$D_1(m)$
0.3485	0.5503	0.10842	$1/8$
0.3114	0.4953	0.10662	$1/85$
0.2796	0.4436	0.10410	$1/9$



شکل ۸- تاثیر نفوذ گرما از محیط بر پروفایل دمایی مبادله‌کن گرمائی سه‌جریانی در آرایش جریانی نوع ۲ برای دو مقدار متفاوت $m_2 = 1, 3$ مقادیر سایر پارامترها:

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

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

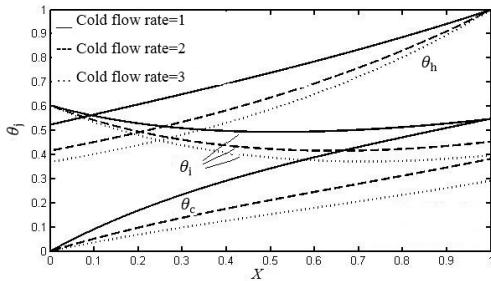


شکل ۹- تاثیر خواص متغیر جریان‌ها و نفوذ گرما از محیط بر پروفایل دمایی برای مبادله‌کن گرمائی سه‌جریانی در آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:

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

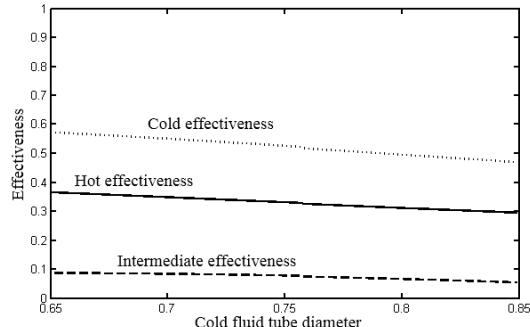
۲-۵- تاثیر قطر لوله جریان سرد، دبی جرمی جریان‌ها و دمای محیط بر توزیع دمای سیال‌ها و کارایی مبادله‌کن

تأثیر 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 گرمائی به جریان سرد از محیط اطراف، در شکل‌های ۷ الی ۱۵ نشان داده شده است. با افزایش قطر جریان سرد،



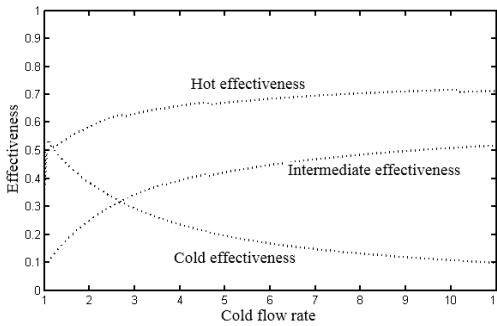
شکل ۹- تأثیر دبی جریان سرد بر پروفایل دمایی جریان های سرد، گرم و میانی در یک مبادله کن گرمائی سه‌جریانی با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمائی از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:

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



شکل ۸- تأثیر قطر جریان سرد بر کارایی سرد، گرم و میانی در یک مبادله کن گرمائی سه‌جریانی با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمائی از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:

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



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

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

افزایش دبی 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 7 kg/s ادامه می‌یابد و بعد از آن به طور مجانبی افزایش می‌یابد. کارایی میانی در دبی جریان گرم معادل $1/6$ برابر با صفر می‌باشد، که این موضع 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 1 kg/s به 2 kg/s موجب افزایش کارایی گرم از $0/3485$ به $0/4774$ و افزایش کارایی سرد از $0/5503$ به $0/6419$ می‌شود.

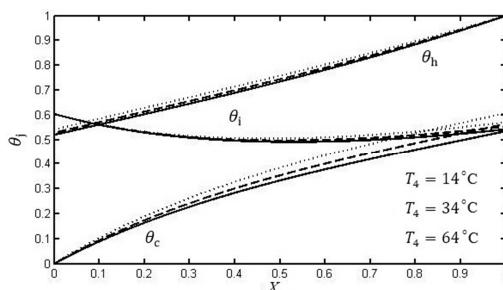
تأثیر دبی جریان‌ها بر توزیع دما و کارایی مبادله‌کن‌های سه‌جریانی در شکل‌های ۹ الی ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۹، افزایش دبی جریان سرد، گرم می‌شود. این کاهش در هر دو پروفایل دمایی هر دو جریان سرد و گرم می‌باشد. افزایش دبی جریان سرد می‌شود، همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. افزایش دبی جریان سرد از ۱ به ۲ طبق جدول ۷، کارایی گرم را از $0/3485$ به $0/5839$ افزایش می‌دهد و کارایی سرد را از $0/5503$ به $0/6419$ افزایش می‌دهد. از نتایج حاصله می‌توان دریافت که افزایش دبی سرد، به شدت موجب افزایش کارایی گرم و کاهش کارایی سرد می‌شود.

جدول ۷- تأثیر دبی جریان سرد بر کارایی سرد، گرم و میانی در یک مبادله کن گرمائی سه‌جریانی با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمائی از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم برای $\dot{m}_1 = 1, 2$. مقادیر سایر پارامترها:

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

\dot{m}_1	ϵ_h	ϵ_c	ϵ_l	$\dot{m}(\text{kg/s})$
$0/3485$	$0/5503$	$0/0842$	$\dot{m}_1 = 1$	
$0/5839$	$0/3825$	$0/2488$	$\dot{m}_1 = 2$	
$0/6419$	$0/2919$	$0/3412$	$\dot{m}_1 = 3$	

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



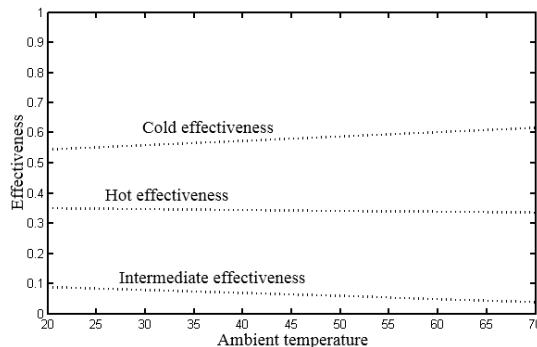
شکل ۱۳- تأثیر دمای محیط بر پروفایل دمایی جریان‌های سرد، گرم و میانی در یک مبادله‌کن گرمائی سه‌جهتی با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمائی از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:

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

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

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

ϵ_h	ϵ_c	ϵ_i	$T_4(^{\circ}\text{C})$
.۰/۳۵۱۶	.۰/۵۳۶۰	.۰/۰۹۳۹	۱۴
.۰/۳۴۵۵	.۰/۵۶۴۷	.۰/۰۷۴۴	۳۴
.۰/۳۳۷۱	.۰/۴۰۷۹	.۰/۰۴۲۰	۶۴

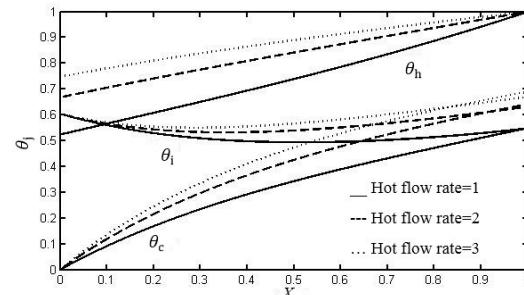


شکل ۱۴- تأثیر دمای محیط بر کارایی سرد، گرم و میانی در یک مبادله‌کن گرمائی سه‌جهتی با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمائی از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:

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

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پس از استخراج معادلات حاکم بر هر یک از جریان‌ها و دیوارهای مبادله‌کن گرمائی سه‌جهتی با سه ارتباط گرمائی 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



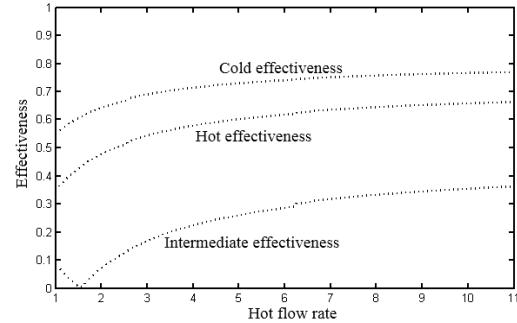
شکل ۱۱- تأثیر دبی جریان گرم بر پروفایل دمایی جریان‌های سرد، گرم و میانی در یک مبادله‌کن گرمائی سه‌جهتی با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمائی از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:

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

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

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

ϵ_h	ϵ_c	ϵ_i	$\dot{m}(\text{kg/s})$
.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- تأثیر دبی جریان گرم بر کارایی سرد، گرم و میانی در یک مبادله‌کن گرمائی سه‌جهتی با فرض خواص متغیر سیال و نفوذ گرمائی از محیط برای آرایش جریانی نوع دوم. مقادیر سایر پارامترها:

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

با افزایش دمای محیط، طبق شکل ۱۳ دمایهای 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 ۰/۳۵۱۶ به ۰/۵۳۶۰، افزایش و کارایی گرم را از ۰/۰۴۲۰ به ۰/۰۷۴۴ به ۰/۰۶۴۷ و کاهش می‌دهد. به تعبیر دیگر، با افزایش دمای محیط که

مبادله کن مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، تاثیر برخی پارامترهای موثر بر کارایی میادله کن از قبیل قطر لوله‌های سرد و پارامترهای طراحی شامل دبی جریان های 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 میادله کن، گرم نمودن جریان سرد باشد، کارایی را می‌افزاید. در حالی که، با هدف سرد نمودن جریان گرم، این افزایش توزیع 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 میادله کن انتظار می‌رود، می‌تواند تاثیر مثبت و یا منفی بر کارایی داشته باشد. به بیان دیگر، در صورت وجود نفوذ گرما از محیط به میادله کن، زمانی که به دنبال سرمایش جریان گرم میادله کن می‌باشیم، عایق کاری، کارایی را افزایش می‌دهد در غیر اینصورت اگر به دنبال کارایی سرد و گرم نمودن جریان سرد میادله کن می‌باشیم، عایق کاری باعث کاهش کارایی میادله کن 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 ضربی 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. لحظه نمودن خواص متغیر سیالات منجر به دستیابی به توزیع دما و کارایی به صورت دقیق تر نسبت به حالت خواص ثابت جریان در ورودی میادله کن، می‌گردد.

افزایش قطر جریان گرم، دمای دو جریان سرد و گرم را به هم نزدیکتر نموده و کارایی سرد و گرم میادله کن 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 میادله کن کارایی قبل را از دست داده و هر دو کارایی گرم و سرد با کاهش مواجه می‌گرددن. 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 میادله کن را تشدید می‌کند.
 - افزایش ضربی 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.

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

به منظور طراحی بهینه میادله کن گرمائی، جهت دستیابی به بهترین ابعاد میادله کن، 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 صرف نظر از پارامترهای کم‌تأثیر، جهت انجام بهینه‌سازی، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده برد و به طراحی بهینه میادله کن جهت رسیدن به بیشترین کارایی دست یافت.

۷- نمادها

مساحت جانبی دیواره میادله کن طبق شکل ۱ (m ²)	A
ماتریس ضرایب	\bar{A}
ضرایب طبق تعریف	$b_1 - b_7$
گرمائی ویژه در دبی جریان سیال (w/°C)	C
گرمائی ویژه در فشار ثابت (j/Kg·°C)	c_p
قطر لوله‌های یک، دو و سه (m)	D ₁ , D ₂ , D ₃
پارامتر بی بعد طبق تعریف	H
ضریب انتقال گرمائی جابجایی (w/m ² -°C)	h
ضریب انتقال گرمائی جابجایی داخلی (w/m ² -°C)	h_i
ضریب انتقال گرمائی جابجایی خارجی (w/m ² -°C)	h_o
ضریب نماینده جهت مثبت یا منفی جریان‌ها	i
رسانایی گرمائی دیواره (w/m·°C)	K
رسانایی گرمائی سیال (w/m·°C)	k_f
طول میادله کن (m)	L
طول میادله کن تعريف شده به صورت طول میادله کن تقسیم بر تعداد المان (m)	L _e
دبی جریان ۱، ۲ و ۳ (kg/s)	m_1, m_2, m_3
تعداد واحدهای انتقال گرمایی	NTU
عدد پرانتل	P _r
محیط تر شده ۱ الی ۴ طبق شکل ۱	p ₁ , p ₂ , p ₃ , p ₄
آهنگ انتقال گرمایی (w)	Q
پارامتر بی بعد طبق تعریف	R
عدد رینولدز	Re
شعاع داخلی لوله‌های میادله کن (m)	r _i
شعاع خارجی لوله‌های میادله کن (m)	r _o
دما (°C)	T
ضخامت	t
دمای متوسط جریان‌ها (°C)	\bar{T}
ضریب انتقال گرمایی کلی (w/m ² -°C)	U
ضرایب انتقال گرمایی کلی مربوط به مساحتهای جانبی (w/m ² -°C)	U ₁ , U ₂ , U ₃ , U ₄
ماتریس ویژه ماتریس ضرایب	V
مختصات محوری بی بعد	X

[13]	Ruan D. F., Yuan X. F., Wu S. Y., and Li Y. R., Exergy effectiveness analysis of threefluid heat exchanger, <i>Journal of Superconductivity and Novel Magnetism</i> , Vol. 23, pp. 1127-1131, 2010.	محصصات محوری (m)	x
[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, <i>Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics</i> , Vol. 36, pp. 141-154, 2011.	مقدادر ویژه ماتریس ضرایب \bar{A}	Z
[15]	Singh S. K., Kumar S., Mishra M., and Jha P. K., Transient behavior of co-current parallel flow three-fluid heat exchanger, <i>International Communications in Heat and Mass Transfer</i> , Vol. 52, pp. 46-50, 2014.	علایم یونانی	
[16]	Singh S. K., Mishra M., and Jha P. K., Experimental investigations on thermo-hydraulic behaviour of triple concentric-tube heat exchanger, <i>Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering</i> , Vol. 229, pp. 299-308, 2015.	دماي بى بعد	θ
[17]	Veerabhadrappa 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. <i>Materials Today: Proceedings</i> , Vol. 4, pp. 10596-10602, 2017.	ماتریس دماي بى بعد	$\bar{\theta}$
[18]	Zhang W., Shao S., Zhang H., and Tian C., Numerical Investigation on Three-fluid Heat Exchanger for Hybrid Energy Source Heat Pumps. <i>Energy Procedia</i> , Vol. 105, pp. 1692-1699, 2017.	کاراچي گرمائي	ϵ
[19]	Miller J. W., J r., Schon G. R., and Yaws C. L., Correlations, <i>Chemistry Engineering</i> , vol. 83, No. 23, p.129, 1976.	زبرنويس ها	
[20]	Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., Dewitt D. P., <i>Introduction to heat transfer</i> , Fifth edition, pp. 455-493. Wiley, New York, 2007.	جريان سرد	c
		جريان گرم	h
		جريان ميانى	i
		ورودي	in
		خروجي	o
		دماي ورودي سیال 1, 2 و 3	1,in, 2,in, 3,in

مراجع -۸

- [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.