

## شبیه سازی رفتار انتقال حرارتی در مبدل حرارتی U-Tube

فرامرز ملکی مقدم<sup>۱</sup>، احد عابدینی<sup>۲\*</sup>

۱ - کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران  
 ۲- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران  
 \* سمنان، صندوق پستی 35145179، ahad.abedini@gmail.com

### چکیده

انتقال حرارت یکی از مهمترین و اساسی ترین پدیده های طبیعی می باشد. مبدل های حرارتی تقریباً پرکاربردترین عضو در فرآیندهای شیمیایی اند و می توان آن ها را در بیشتر واحدهای صنعتی ملاحظه کرد. آنها وسایلی هستند که امکان انتقال انرژی گرمایی بین دو یا چند سیال در دماهای مختلف را فراهم می کنند. این عملیات می تواند بین مایع- مایع، گاز- گاز و یا گاز- مایع انجام شود. مبدل های حرارتی به منظور خنک کردن سیال گرم و یا گرم کردن سیال با دمای پایین تر و یا هر دو، مورد استفاده قرار می گیرند. صنایع بسیاری در طراحی انواع مبدل های حرارتی فعالیت دارند و همچنین، دروس متعددی در کالجها و دانشگاهها با نامهای گوناگون در طراحی مبدل های حرارتی ارائه می گردد. در این مقاله انتقال حرارت یک مبدل حرارتی پوسته و لوله ای مدل شده که بصورت یو<sup>۱</sup> شکل می باشد. هندسه این مبدل با نرم افزار گمبیت<sup>۲</sup> رسم و شبکه بندی شده، سپس با نرم افزار انسیس فلونت<sup>۳</sup> تحلیل می شود. پس از آن جواب های بدست آمده با جواب های طراح که از نرم افزار اسپن<sup>۴</sup> بدست آمده، مقایسه می گردد. نوع جریان نیز سه بعدی و آشفتگی<sup>۵</sup> از مدل آشفتگی کی امگا<sup>۶</sup> استفاده شده است. قابل ذکر است که مبدل حرارتی، تک فاز مدل شده است.

### کلیدواژگان

انتقال حرارت، مبدل حرارتی پوسته و لوله ای، سه بعدی

## Heat Transfer Simulation in the Heat Exchanger U-Tube

Faramarz Maleki Moghaddam<sup>1</sup>, Ahad Abedini<sup>2\*</sup>

1- Graduate student, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran  
 2- Strategic Center for Energy and Sustainable Development, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran  
 \* P.O.B. 123456789 Semnan, Iran, ahad.abedini@gmail

### Abstract

Heat transfer used is one of the most important and applicable natural phenomenon. Heat exchangers are the must applicable member in the chemical process and we can consider them in lots of industrial units. That provided the hat energy transfer between two or several fluid with different temperature. This operation can be done between liquid - liquid, gas - gas and gas - liquid. Heat exchanger will be used in order to cooling hot fluid and heating fluid with lower temperature or both of them. Many industries are acting in design kind of heat exchanger and many field with difference names in heat exchangers design are submitted by college and university. In this dissertation, heat transfer of heat exchanger shell and tube is simulated that it is U figure and the geometric of heat exchanger has been plotted and are meshed in GAMBIT software then are analyze in ANSYS FLUENT software. Finally the obtained answers are compare with designer is answers that have obtained in ASPEN software. The flow kind has been three-dimensional and turbulence that it has been used of turbulence model  $k\omega$ -sst. That should be noted the heat exchanger has been simulated by single phase.

### Keywords

Heat transfer, Heat exchanger shell & tube, Three-dimensional

1. U  
 2. GAMBIT  
 3. ANSYS FLUENT  
 4. ASPEN  
 5.  $k\omega$   
 6. SST

## ۱- مقدمه

مبدل‌های حرارتی<sup>۷</sup> در محدوده وسیعی از کاربردها استفاده می‌شوند. این کاربردهای شامل نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌ها، صنایع پتروشیمی، صنایع ساخت و تولید، صنایع فرآیندی، صنایع غذایی و دارویی، صنایع ذوب فلز، گرمایش، تهویه مطبوع، سیستم‌های تبرید و کاربردهای فضایی می‌باشند. مبدل‌های حرارتی در دستگاه‌های مختلف نظیر دیگ‌بخار، مولدبخار، کندانسور، اواپراتور، تبخیرکننده‌ها، برج خنک‌کن، پیش‌گرم‌کن فن‌کویل، خنک‌کن و گرم‌کن روغن، رادیاتورها، کوره‌ها و ... کاربرد فراوان دارند. صنایع بسیاری در طراحی انواع مبدل‌های حرارتی فعالیت دارند و هم‌چنین، دروس متعددی در کالج‌ها و دانشگاه‌ها با نام‌های گوناگون در طراحی مبدل‌های حرارتی ارائه می‌گردد. محاسبات مربوط به مبدل‌ها کاری طولانی و گاهی خسته کننده است. انرژی هسته‌ای صورت غیر قابل چشم‌پوشی از انرژی است هم‌چنین انرژی هسته‌ای پاسخی بالقوه به مسئله گرمایش جهانی است زیرا نیروگاه‌های هسته‌ای بر خلاف نیروگاه‌های فسیلی گازهای گلخانه‌ای مثل دی اکسید کربن را اشاعه نمی‌دهد. بیشتر راکتورهای قدرت هسته‌ای در حال کار در دسته راکتورهای نسل دوم قرار دارند. نیاز به تحقیقات و آموزش نیروی کار، تولید رادیواروها و ... نیاز به بهره برداری از راکتورهای تحقیقاتی را افزایش داده است. تکامل نسل بعدی راکتورهای تحقیقاتی نیاز به شبیه‌سازی را افزایش می‌دهد. ابزارهای طراحی برای شبیه‌سازی سیستم‌های چند بعدی راکتورهای تحقیقاتی نیاز به شبیه‌سازی را افزایش می‌دهد. ابزارهای طراحی برای شبیه‌سازی سیستم‌های چند بعدی، چند فازی و چند فیزیکی مطلوب می‌باشند. نیاز به طراحی‌های ایمن‌تر و اقتصادی‌تر برای نسل‌های بعدی راکتورهای تحقیقاتی چالش‌های زیادی برای مهندسان ترموهیدرولیکی (کسانی که ابزارهای شبیه‌سازی برای طراحی‌های راکتورهای هسته‌ای، بهینه‌سازی کارایی و تحلیل ایمنی گسترش داده‌اند) ایجاد کرده است. در طول دهه‌های گذشته قابلیت‌های شبیه‌سازی فرایندهای ترموهیدرولیکی به طور چشمگیری افزایش یافته است تا پاسخگوی جنبه‌های مختلف مورد نیاز باشد. دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۸</sup> بزرگ مقیاس و موازی نیز مقبولیت زیادی در صنعت هسته‌ای بدست آورده است [۱].

اما به عنوان ابزار شبیه‌سازی و طراحی، دینامیک سیالات محاسباتی هنوز به طور گسترده‌ای توسط مهندسان هسته‌ای بکار گرفته نشده است. کمبود مقبولیت و استفاده کم از دینامیک سیالات محاسباتی توسط جامعه هسته‌ای به سه عامل اصلی مربوط است. اولین عامل، اعتبار محدود دینامیک سیالات محاسباتی در شبیه‌سازی جریان‌های دوفازی است که بیشتر راکتورهای هسته‌ای در حال کار از نوع آب سبک هستند که شبیه‌سازی دینامیک جریان و انتقال حرارت در آن‌ها نیازمند توانایی و قابلیت اطمینان چشمگیر برای مدل‌های دوفازی است. عامل دوم، به علت قوانین موجود در صنعت هسته‌ای، که هنوز دهه‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای گرفتن مجوز تحلیل ایمنی سیستم‌های هسته‌ای تایید نشده‌اند، با این حال کدهایی مانند ریلپ<sup>۹</sup> یا گوتیک<sup>۱۰</sup>، که به طور گسترده برای کاربردهای هسته‌ای توسعه داده شده‌اند و بشدت اعتبار سنجی شده‌اند، توسط کمیته تنظیم مقررات هسته‌ای آمریکا پذیرفته شده‌اند. عمل سوم، شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی سیستم‌های هسته‌ای نیازمند منابع زیاد محاسباتی می‌باشد. به هر حال دینامیک سیالات محاسباتی به آرامی هم‌زمان با بر طرف

کردن تدریجی سه فاکتور مزبور در حال بدست آوردن مقبولیت در بین محققان و مهندسان هسته‌ای می‌باشد. از آنجا که دانستن دماهای سیال ورودی به سیکل کاری بسیار مهم است لذا بدست آوردن دماهای مورد نظر بسیار مهم بوده، مخصوصا در راکتورهای هسته‌ای اهمیت، دو چندان می‌گردد؛ چرا که ترانس‌های دمای بدست آمده باعث اثرات مثبت و منفی در تولید قدرت راکتور خواهد شد زیرا شکافت اورانیوم به دمای سیال بستگی دارد. لذا شبیه‌سازی دقیق مبدل حرارتی راکتورهای هسته‌ای می‌تواند در کارکرد آن اثرگذار باشد. کارهای صورت گرفته در مبحث شبیه‌سازی مبدل‌های حرارتی اکثرا به تیوب‌های مستقیم با طول‌های کوتاه و تعداد بافل‌های کم محدود شده است آقایان جایاچاندرا<sup>۱۱</sup> و راجاسخار<sup>۱۲</sup>، انتقال حرارت یک مبدل پوسته و لوله‌ای سه بعدی را مدل کرده‌اند که لوله‌های آن به صورت مستقیم بوده که این مقاله در سال ۲۰۱۴ به ثبت رسیده است. انتقال حرارت برای دو آلیاژ متفاوت را بررسی کرده‌اند که یکی از آلیاژ مس و دیگری با آلیاژ استیل<sup>۱۳</sup> ۱۰۰۸. آقای جومر<sup>۱۴</sup> و همکاران، یک مبدل پوسته و لوله‌ای سه بعدی را مدل کرده‌اند که لوله‌های موجود در این مبدل مستقیم می‌باشد که در سال ۲۰۱۵ ثبت گردیده است. در این مبدل با زاویه‌دار کردن بافل‌ها، انتقال حرارت این مبدل بررسی شده است [۳]. آقایان سوپانیل سارما<sup>۱۵</sup> و داس<sup>۱۶</sup>، یک مبدل پوسته و لوله‌ای سه بعدی را مدل کرده‌اند که لوله‌های موجود در این مبدل مستقیم می‌باشد و بافل‌های آن سگمنتال بوده که در سال ۲۰۱۲ ثبت گردیده است. که در این مقاله با متغیر کردن سرعت ورودی این مبدل را آنالیز کرده‌اند [۴]. آقای دیویت بوگال<sup>۱۷</sup>، انتقال حرارت یک مبدل پوسته و لوله‌ای عمودی به صورت دو بعدی می‌باشد را مدل کرده‌اند. که در سال ۲۰۱۴ این مقاله ثبت گردیده است [۵]. آقای وینداهای ویسنی<sup>۱۸</sup> و همکاران، انتقال حرارت یک مبدل پوسته و لوله‌ای سه بعدی را مدل کرده‌اند که لوله‌های آن به صورت مستقیم بوده، که در سال ۲۰۱۴ این مقاله ثبت گردیده است [۶].

در این مقاله تیوب‌ها از نوع U شکل و طول مبدل مدل‌سازی شده تقریباً حدود ۶ متر و تعداد بافال‌های مد نظر ۲۰ عدد می‌باشد.

## ۲-۱- انواع مبدل‌ها

## ◀ بر اساس نوع و سطح تماس سیال سرد و گرم

یکی از جنبه‌های دسته‌بندی بیان شده در فوق، دسته‌بندی مبدل‌های حرارتی بر اساس نوع و سطح تماس سیال سرد و گرم می‌باشد که خود شامل دسته‌های مختلفی می‌باشد.

## ◀ بر اساس جهت جریان سیال سرد و گرم

علاوه بر دسته‌بندی ذکر شده در بند قبل، مبدل‌های حرارتی بر اساس جهت جریان سیال سرد و گرم نیز به انواع مختلفی قابل تقسیم بندی است.

5. B.Jayachandriah  
12. K. Rajasekhar  
7. Joemer.C.S  
8. Swapnaneel Sarma  
15. D.H.Das  
16. Dawit Bogal  
17. Vindhya Vasiny

7. Heat Exchanger  
8. Computational Fluid Dynamic  
9. RELAP5  
10. GOTHIC

در روش حجم محدود، معادلات عمومی بقا در شکل انتگرالی استفاده می گردد. محدوده حل به تعداد معینی حجم کنترل مجاور هم تقسیم شده و معادلات در آن محدوده حل می گردد. کمیت ها در مرکز گره ها محاسبه شده و جهت بدست آوردن مقادیر روی سطوح باید میان یابی انجام گیرد. روش حجم محدود برای تمام هندسه ها از جمله هندسه های پیچیده کاربرد دارد. حلگرهای انسیس فلونت مبتنی بر روش حجم محدود می باشند. در روش حجم محدود دامنه حل به مجموعه محدودی از حجم کنترل ها تجزیه می شود و سپس معادلات عمومی بقا (انتقال) برای جرم، مومنتوم، انرژی، گونه ها<sup>۲۱</sup> و غیره در این مجموعه از حجم کنترل ها حل می شود [۷]. فرم کلی معادلات به این شکل است:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\phi} \rho d\phi + \iint_s \rho \vec{V} \cdot \vec{ds} = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\phi} U d\phi + \iint_s \rho \vec{V} \cdot \vec{ds} = \iint_{\phi} Q_v d\phi + \iint_s Q_s \cdot \vec{ds} \quad (2)$$

معادله انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\phi} \rho E d\phi + \iint_s \rho \vec{V} \cdot \vec{ds} = \iint_{\phi} (\rho q + \rho \vec{V} \cdot \vec{V}) d\phi + \iint_s (-\vec{q}_c \cdot \vec{n} - p \vec{n} \cdot \vec{V} + \sigma_n \vec{n} \cdot \vec{V} + \sigma_s \vec{m} \cdot \vec{V}) ds \quad (3)$$

با گسسته سازی معادلات حاکم بر جریان در حجم کنترل ها معادلات دیفرانسیل جزئی به یک دستگاه از معادلات جبری تفکیک می شوند و سپس تمام معادلات جبری به صورت عددی حل می شوند تا میدان حل به دست آید.

## ۲-۲- تجزیه و تحلیل مبدل های حرارتی

در انتقال حرارت تجزیه و تحلیل مبدل های حرارتی به دو روش مورد بررسی قرار می گیرد:

« استفاده از اختلاف دما متوسط لگاریتمی (LMTD)، این روش زمانی کاربرد دارد که دماهای ورودی و خروجی سیالات مشخص باشند.

« استفاده از روش راندمان (NTU)، این روش زمانی کاربرد دارد که دماهای ورودی و خروجی سیال مشخص نباشد [۸]. که در این پروژه از روش LMTD استفاده شده است.

حرارت خارج شده از لوله ها و پوسته در مبدل های حرارتی، با بدست آوردن ضریب کل حرارتی، مساحت لوله ها و اختلاف دماهای موجود بدست می آید. که طبق رابطه زیر نشان داده می شود.

$$Q = FUA\theta_m \quad (4)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum R + \frac{1}{h_o}} \quad (5)$$

## « بر اساس ساختمان مکانیکی و ساختار مبدل ها

مبدل های حرارتی از نوع تماس غیرمستقیم (مبدل های با انتقال گرما از طریق دیواره) اغلب بر حسب مشخصات ساختاریشان توصیف می شوند. انواع عمده دسته بندی بر اساس ساختمان مکانیکی و ساختار آن ها، تقسیم بندی می شوند.

### ۱-۳- پژوهش حاضر

در این مقاله انتقال حرارت یک مبدل حرارتی پوسته و لوله ای مدل می شود، که کاربرد آن در صنعت می باشد که پس از تحلیل نتایج از آن در صنعت مورد استفاده قرار می گیرد، طول مبدل در نظر گرفته شده تقریباً حدود ۶ متر است و همچنین تعداد بافال های مد نظر ۲۰ عدد، بافال ها به صورت سگمنتال می باشد و دارای دو عدد تیوب شیت نیز می باشد.

## ۱- معادلات حاکم بر روش عددی

### ۱-۲- دینامیک سیالات محاسباتی

دینامیک سیالات محاسباتی علم پیش بینی رفتار جریان سیال، انتقال حرارت و جرم، واکنش های شیمیایی و پدیده های مرتبط با آن ها با استفاده از حل عددی مجموعه معادلات ریاضی حاکم بر آن ها می باشد.

این معادلات شامل بقای جرم، بقای مومنتوم، بقای انرژی، قانون بقای اجزا (واکنش های شیمیایی)، اثرات نیروهای حجمی و ..... می باشد. هدف از تحلیل های دینامیک سیالات محاسباتی رسیدن به مطالعات مفهومی طرح های جدید، توسعه محصولات، رفع مشکلات موجود و طراحی مجدد می باشد.

معادلات پایداری حرکت سیال از قوانین زیر استخراج می شوند:

- بقای جرم (پیوستگی)
- بقای مومنتوم خطی (قانون دوم نیوتن)
- بقای انرژی (قانون اول ترمودینامیک)

در صورتی که در آن ها جرم مخصوص در سرتاسر دامنه حل یکنواخت باقی بماند، فرض جریان تراکم ناپذیر را به کار می بریم. بنابراین در یک جریان تراکم ناپذیر، جرم مخصوص ثابت است و دیگر به عنوان مجهول در نظر گرفته نمی شود. افزون بر این، تغییرات ضریب لزجت ناچیز است و آن را نیز ثابت فرض می کنیم. در جریان تراکم ناپذیر معادله انرژی از دستگاه معادلاتی که شامل معادلات پیوستگی و مومنتوم است، جدا می باشد. بنابراین نخست، میدان های سرعت و فشار محاسبه می شوند و در صورت نیاز، معادله انرژی برای پیدا کردن توزیع دما حل می شود. ثانیاً، به علت کاهش تعداد مجهولات در داخل دامنه، ذخیره سازی و حافظه کامپیوتر کاهش می یابد. ثالثاً، بسته به نوع فرمول بندی روش خاصی را باید انتخاب نمود که ارتباط سرعت و فشار را ایجاد کند.

گسسته سازی معادلات به ۳ روش مختلف انجام می پذیرد:

- « روش تفاضل محدود<sup>۱۸</sup>
- « روش حجم محدود<sup>۱۹</sup>
- « روش المان محدود<sup>۲۰</sup>

18. Finite Difference  
19. Finite Volume  
20. Finite Element

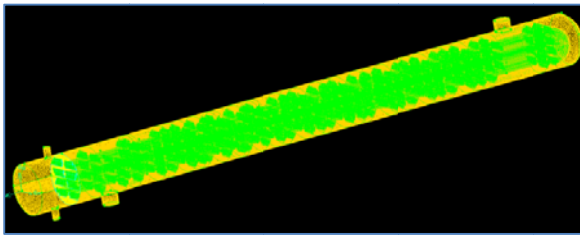
21. Species

جدول ۱- مشخصات هندسه مبدل حرارتی

1.	Shell inlet diameter	455.63 mm
2.	Shell Thickness	15 mm
3.	Length of the shell	5697 mm
4.	Tube inlet diameter	19.05 mm
5.	Tube Thickness	2.11 mm
6.	Length of the tube	4900 mm
7.	Tube No	76Us
8.	Tube Pitch	23.82 mm
9.	Transverse Pitch	20.63 mm
10.	Type of Tube layout	Triangular layout
11.	Material Shell & Tube	SS304L
12.	Baffle Cut	29% d
13.	Baffle Spacing	C/C 203.2 mm
14.	Baffle No	20
15.	Tube sheet No	2

جدول ۲- مشخصات حرارتی آلیاژ SS304L

Thermal Conductivity	16.3 W m-1 K-1
Density	7900 kg m-3
Specific Heat	500 j kg-1 K-1



شکل ۳- شبکه‌های تولید شده در گمبیت

جدول ۳- شرایط مرزی داده شده در گمبیت

Boundary Name	Type
Shell inlet	Velocity inlet
Shell outlet	Pressure outlet
Tube inlet	Velocity inlet
Tube outlet	Pressure outlet
Shell Wall tube wall	Wall
Domain inside shell	Fluid
Domain inside tube	Fluid
Domain of baffles	Wall

### ۳- استقلال از شبکه

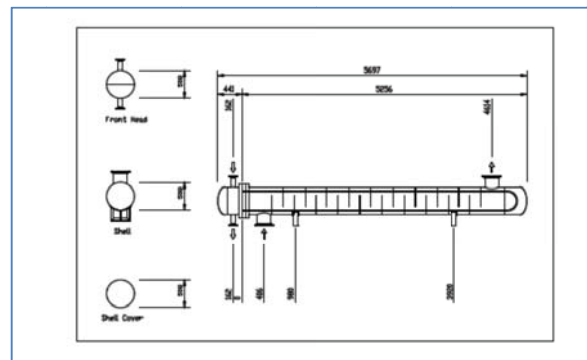
در این بخش برای اینکه اطمینان حاصل شود که تعداد نودهای<sup>۲۲</sup> تشکیل شده، برای مبدل مدل شده مناسب می‌باشد، مبدل با تعداد نودهای مختلف مورد مقایسه قرار می‌گیرد که این مقایسه در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به تغییرات دمای خروجی از هر یک از این تعداد نودها، می‌توان نتیجه گرفت که تعداد نودهای ۲۲۵۸۷۸۴ مناسب‌تر بوده و در ادامه به مدل‌سازی مبدل پیشنهادی با این تعداد نود پرداخته می‌شود.

$$\theta_m = \frac{(T_{h1} - T_{c1}) - (T_{h2} - T_{c2})}{\ln\left(\frac{T_{h1} - T_{c1}}{T_{h2} - T_{c2}}\right)} \quad (6)$$

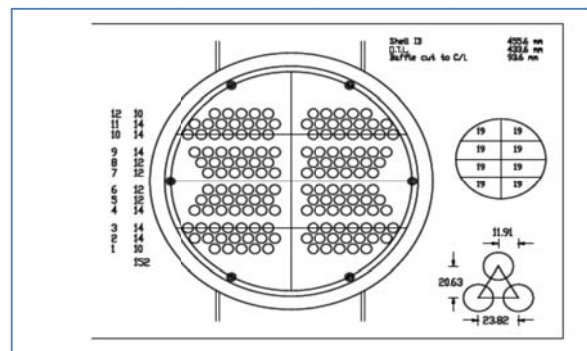
$$A = \pi \times D_o \times L \quad (7)$$

### ۲- معرفی مسئله

در واقع در این مقاله یک مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای مدل شده است که جنس آلیاژ استفاده شده SS304L می‌باشد. با توجه به مطالب گفته شده، که یک مبدل حرارتی پوسته و لوله می‌باشد از نوع U-Tube، که در این مبدل، سیال مورد استفاده شده از نوع آب - آب می‌باشد را با نرم‌افزارهای ذکر شده شبیه‌سازی می‌گردد. شکل دوبعدی مبدل حرارتی فوق، همراه با اندازه‌های آن در جدول ۱ و مشخصات حرارتی آلیاژ به کار رفته در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- شماتیک دو بعدی مبدل حرارتی



شکل ۲- شماتیک Letdown لوله‌های مبدل حرارتی

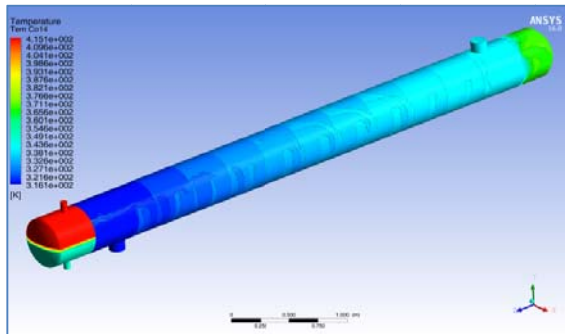
نمای کلی از مبدل حرارتی ترسیم شده در نرم‌افزار گمبیت به همراه شبکه‌های تولید شده در آن نرم‌افزار در شکل ۳ نشان داده شده است. در جدول ۳، نوع مرزها و شرایط مرزی به کار برده شده در این پروژه می‌باشد.

جدول ۷- مقادیر بدست آمده از نرم افزار Aspen

Parameters	Cold Water Inlet	Cold Water Outlet	Hot Water Inlet	Hot Water Outlet
Mass Flow (kg/s)	16.1109	16.1109	5.526	5.526
Temperature (K)	316.15	344.15	415.15	337.15
Pressure (Pa)	8e+005	741091	25e+005	2.37566e+006
Velocity (m/s)	0.95	1.452	1.8	2.123

#### ۵- جمع آوری اطلاعات

در شکل ۵ کانتور دمای کل مبدل حرارتی نشان داده شده است که در واقع بیانگر تغییرات دما در کل پوسته مبدل حرارتی می باشد. پوسته قرمز رنگ مبدل نشان دهنده ورودی آب گرم با دمای ۴۱۵/۱۵ درجه کلوین می باشد. پوسته آبی رنگ نیز نشان دهنده ورودی آب سرد به مبدل با دمای ۳۱۶/۱۵ درجه کلوین بوده که کار خنک کاری لوله ها را انجام می دهد. همانطور در شکل ۵ مشخص می باشد، در قسمت پوسته آب سرد، رنگ آبی پررنگ مبدل کم رنگ تر می شود تا آب سرد ورودی خارج شود، کم رنگ شدن نشان دهنده این است که دمای آب سرد رو به افزایش می باشد. در قسمت آخر پوسته که به صورت رنگ سبز می باشد، فقط لوله های U شکل بکار رفته که کار برگشت آب به لوله ها را انجام می دهند و چون در تماس با سیالی است که سرعت ندارد، دمای آن قسمت بیشتر از کل پوسته آب سرد می شود. در نهایت قسمت خروجی آب گرم که به صورت رنگ فیروزه ای می باشد نیز نشان داده شده است. قابل ذکر است که قسمت زرد رنگ (مابین رنگ های قرمز و فیروزه ای) صفحه جدا کننده پوسته ورودی آب گرم و خروجی آب گرم در این مبدل حرارتی می باشد.



شکل ۵- کانتور دمای کل مبدل حرارتی

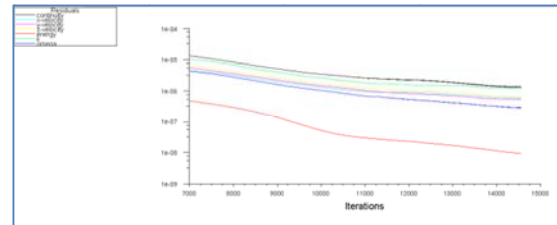
در شکل ۶ نمودار تغییرات دما نسبت به موقعیت افقی پوسته آب سرد نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود دما به صورت پیوسته در پوسته آب سرد تغییر نمی کند، بلکه با رسیدن به بافل های مختلف، پرشی در دمای سیال ایجاد می گردد که علت این پدیده در ادامه توضیح داده می شود. اگر به سرعت جریان دقت شود ملاحظه می گردد که جریان وقتی (شکل ۷) از روی بافل عبور می کند و به ناحیه بعدی وارد می شود، یک منطقه از سیال ساکن در پشت بافل به وجود می آید که در این منطقه به علت ساکن بودن سیال، زمان بیشتری برای تماس داشتن با آب داخل لوله بوجود آمده و سیال در آن قسمت نسبت به قبل از بافل که سیال سرعت دارد و به طور پیوسته عبور می کند (دما در آنجا کاهش پیدا می کند)، گرم تر می شود. اگر در نمودار شکل ۶ ابتدا و انتهای دمای بافل ها را به هم وصل کنیم، نشان می دهد که تغییرات دما به صورت خطی می باشد. همانطور که در

جدول ۴- دماهای خروجی با تعداد نودهای متفاوت

No. Nodes	Cold Outlet (K)	Hot Outlet (K)
1863846	338.30	345.68
2258784	340.78	347.89
2978953	340.81	347.92

#### ۴- نتایج بدست آمده

مطابق شکل ۴، نمودار نهایی می باشد که بعد از ۱۴۵۵۵ تکرار، بیانگر این است که نمودار باقیمانده<sup>۲۳</sup> به همگرایی رسیده است.



شکل ۴- نمودار باقیمانده بعد از ۱۴۵۵۵ تکرار

و در جدول ۵ خطاهای نسبی هر یک از نمودارها نشان داده شده است.

جدول ۵- اعداد باقیمانده در تکرار ۱۴۵۵۵

Continuity	X-velocity	Y-velocity	Z-velocity	Energy	k	Omega
1.3720e-06	5.8816e-07	5.4694e-07	6.3997e-07	9.4069e-09	1.260e-06	2.92e-07

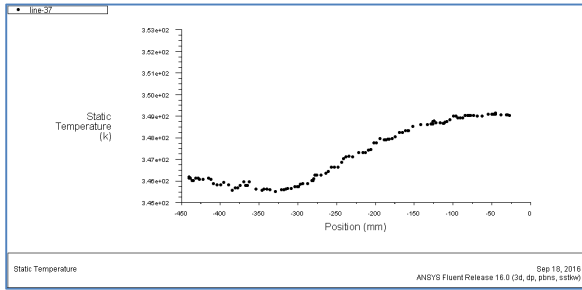
#### ۵-۱- صحت سنجی نتایج

همانطور که در مدل سازی مبدل گفته شده است کمیت های ورودی جهت شبیه سازی رفتار مبدل حرارتی شامل: سرعت ورودی، دماهای ورودی و فشار خروجی می باشد که در این قسمت نتایج بدست آمده از شبیه سازی در فلوننت مبدل حرارتی (جدول ۶) با مقادیر طراح که از نرم افزار اسپن<sup>۲۴</sup> بدست آمده (جدول ۷) اعتبار سنجی می شود. همانطور که در جداول مشاهده می شود سرعت ورودی، دماهای ورودی و فشار خروجی نرم افزار فلوننت با مقادیر ورودی طراح یکسان در نظر گرفته شده است و بر اساس این ورودی ها دبی گرمی، دمای خروجی، فشار ورودی و سرعت خروجی آب سرد و آب گرم محاسبه می شود. با مقایسه مقادیر بدست آمده از شبیه سازی مبدل حرارتی و مقادیر بدست آمده از نرم افزار اسپن مشاهده می شود رفتار مبدل حرارتی مدل شده با مدل طراحی شده مشابه است.

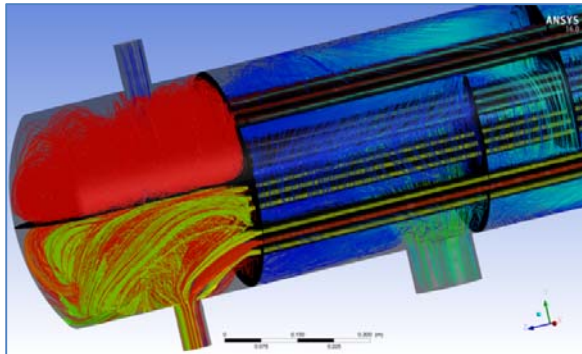
جدول ۶- مقادیر بدست آمده در فلوننت

Parameters	Cold Water Inlet	Cold Water Outlet	Hot Water Inlet	Hot Water Outlet
Mass Flow (kg/s)	14.5672	14.5672	5.02177	5.02177
Temperature (K)	316.15	340.78	415.15	347.89
Pressure (Pa)	759050	741091	2.38072e+006	2.37566e+006
Velocity (m/s)	0.95	1.39442	1.8	2.02252

23. Residual  
24. Aspen

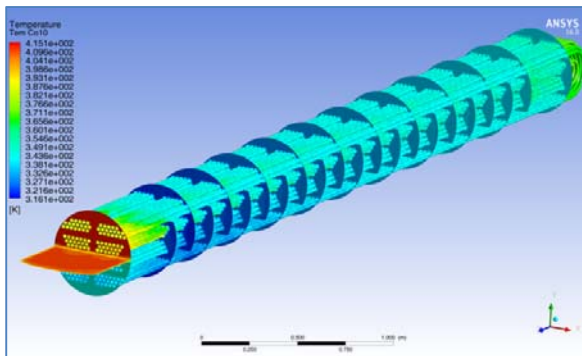


شکل ۹- تغییرات دما نسبت به موقعیت افقی پوسته آب گرم خروجی



شکل ۱۰- الگوی جریان استخراج شده از CFD Post

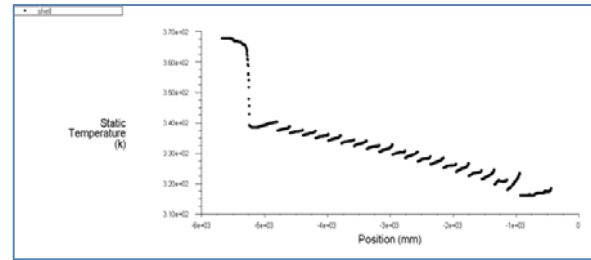
شکل ۱۱ روند تغییرات دما در لوله های موجود در این مبدل حرارتی را نشان می دهد. همانطور که مشخص است قسمت زرد رنگ لوله ها که ورودی آب گرم به درون لوله ها می باشد، بیشترین دمای ممکن در لوله ها را داراست. پس از ورود آب سرد به پوسته، لوله ها شروع به خنک شدن می کنند تا به قسمت لوله های U شکل برسند، سپس به دلیل ساکن بودن و سرعت نداشتن سیال در آن قسمت، دما افزایش پیدا می کند. لوله ها در قسمت برگشت، مجدداً شروع به خنک شدن می کنند. قابل ذکر است که در این لوله ها، دما خیلی کمتر از دمای طبقات بالا می باشد چون سیال برای بار دوم خنک شده که این امر موجب کاهش بیشتر دما می گردد.



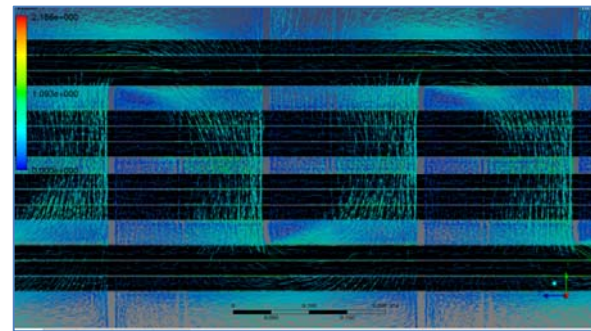
شکل ۱۱- کانتور دما لوله ها و بافل ها

همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است تغییرات دما نسبت به موقعیت افقی لوله ها در قسمت رفت و در قسمت برگشت، در یک نمودار نشان داده شده است. در قسمت رفت، نمودار با خط مشکی (Line-36) نشان داده شده و در قسمت برگشت لوله ها با خط قرمز (Line-37) نشان داده است. همانطور که مشاهده می شود، تغییرات دمای لوله ها به صورت خطی تغییر می کند. اما تغییرات دما در اول لوله به صورت منحنی می باشد، که علت آن

نمودار نشان داده شده است با رسیدن نمودار به تیوب شیت آخر، یک پرش بزرگ در دمای پوسته مشاهده می شود که علت آن این است که سرعت سیال در آن قسمت ساکن بوده و در نتیجه زمان بیشتری در تماس با آب گرم دارد.

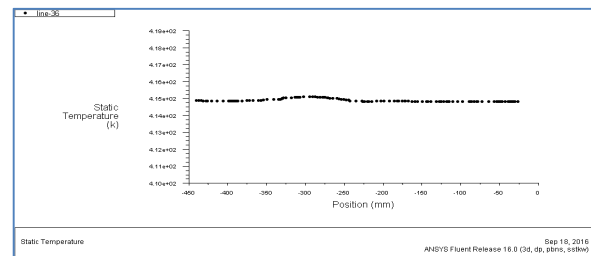


شکل ۶- تغییرات دما نسبت به موقعیت افقی پوسته آب سرد



شکل ۷- بردارهای سرعت در قبل و بعد از بافل ها

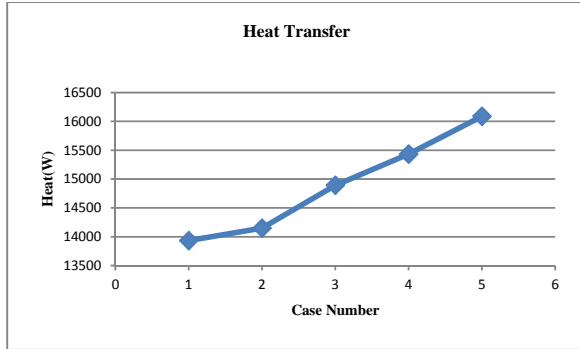
شکل ۸ بیانگر چگونگی تغییرات دما نسبت به موقعیت افقی پوسته آب گرم ورودی می باشد. همانطور که در شکل قابل مشاهده است، تغییرات به وجود آمده تقریباً ناچیز بوده، هرچند در مسافت ۲۵۰ تا ۳۵۰ خط صعودی می شود که دلیل این صعود به خاطر ورودی آب گرم تازه به پوسته می باشد و سپس دما کاهش پیدا کرده (در واقع دما به کمترین مقدار خود در این پوسته می رسد) که دلیل آن به خاطر نزدیک شدن به پوسته آب سرد می باشد.



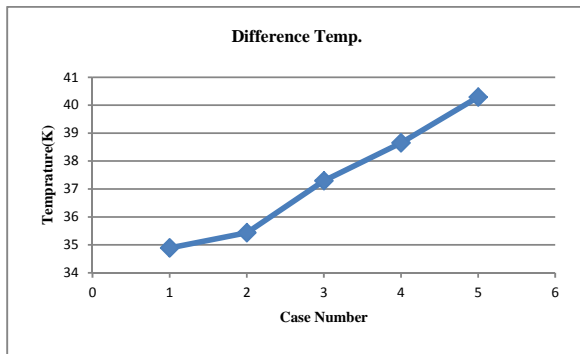
شکل ۸- تغییرات دما نسبت به موقعیت افقی پوسته آب گرم ورودی

در شکل ۹ تغییرات دما نسبت به موقعیت افقی پوسته آب گرم خروجی نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص شده، در ابتدای پوسته، دما بیشترین مقدار را دارا می باشد به این دلیل که خروج آب در لوله های طبقات بالا (شکل ۱۰) در آن قسمت جمع شده و ضمن ایجاد حالات گردابه ای، با صفحه جدا کننده آب گرم ورودی و خروجی، تبادل حرارت داشته که این امر سبب می شود دما در آن نقطه افزایش پیدا کند. سپس در قسمت خروجی، به دلیل مخلوط شدن میانگین آب گرم پشتی با آبی که از لوله های طبقات پایین خارج می شود، کمترین دمای ممکن ایجاد می گردد. بعد از این کاهش دما، به علت انتخاب نقاط نمایش نمودار در وسط پوسته (بین طبقات بالا و پایین لوله)، دمای آن قسمت افزایش پیدا می کند.

بین انتقال حرارت و اختلاف دما وجود داشته باشد که این امر به وضوح در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

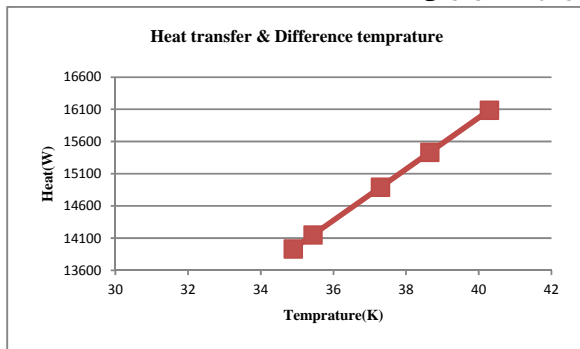


شکل ۱۳- تغییرات انتقال حرارتی لوله برای موارد ۱ تا ۵



شکل ۱۴- تغییرات اختلاف دما در روش LMTD برای موارد ۱ تا ۵

در شکل ۱۶ تغییرات انتقال حرارت لوله با اختلاف دمای آن به صورت یک نمودار نشان داده شده است. روش استفاده شده برای بدست آوردن انتقال حرارت در این مبدل، روش LMTD بوده که علت استفاده از این روش، به خاطر مشخص بودن دماهای ورودی و خروجی سیالات می باشد. با توجه به فرمول ۴ که انتقال حرارت موجود با اختلاف دمای متوسط لگاریتمی بدست آمده را نشان می دهد، می توان پیش بینی کرد که انتقال حرارت با اختلاف دما رابطه خطی داشته باشند، که این پیش بینی با نمودار بدست آمده در فلوننت سازگار می باشد.

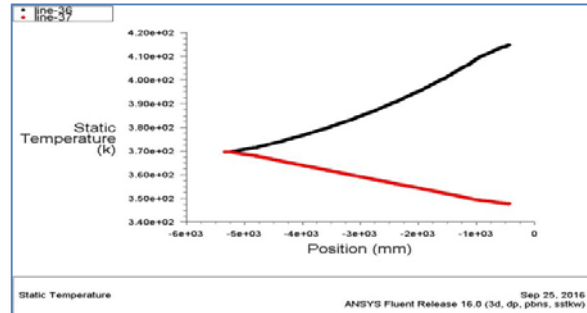


شکل ۱۵- تغییرات انتقال حرارت نسبت به اختلاف دما

#### ۷- نتیجه گیری

با نتایج بدست آمده، هدف این پروژه که شبیه سازی مبدل حرارتی پوسته و لوله ای که لوله های آن به صورت یو شکل بوده است برآورده شد، اما هدف دیگر در انجام این پژوهش، بدست آوردن جواب های قابل قبول

به خاطر اختلاف دمای شدید در ابتدای لوله (تبادل حرارت آب گرم با آب سرد ورودی) و همچنین وجود سیال ساکن در مقابل تیوب شیت، می باشد. این عوامل سبب می گردد که تغییرات دمایی در ابتدای لوله نسبت به سایر قسمت های لوله که سیال خنک کننده در آن ها با سرعت بیشتری در جریان است، کمتر شود.



شکل ۱۲- تغییرات دما نسبت به موقعیت افقی لوله ها در قسمت رفت و برگشت

#### ۶- اثر دمای ورودی آب گرم

مبدل حرارتی پیشنهادی در این پایان نامه، به منظور بررسی و تحلیل انتقال حرارت و صحت کارایی مدلسازی آن در دماهای دیگر، مورد آزمایش قرار گرفت. بدین ترتیب که دمای آب گرم ورودی متغیر بوده و دمای آب سرد ورودی، ثابت در نظر گرفته شده است. جواب این آزمایش در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۸- جواب های حرارتی استخراج شده در فلوننت

Case No.	1	2	3	4	5
Hot Inlet (K)	415.15	420.15	425.15	430.15	435.15
Hot Outlet (K)	347.89	349.46	350.25	351.49	352.99
Cold Inlet (K)	316.15	316.15	316.15	316.15	316.15
Cold Outlet (K)	340.78	342.12	343.16	344.3	345.52
Thermal Effectiveness (P)	0.2488	0.2479	0.2478	0.2469	0.2468
Solid Lines (R)	2.7308	2.7832	2.773	2.7943	2.7974
Correction Factor (F)	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
Difference Temp.(K)	34.891	35.434	37.293	38.65	40.289
Heat Transfer Tube (W)	13932.2	14149.5	14891.3	15433.1	16087.7
	02	44	83	84	702

شکل های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب هر کدام نشان دهنده، تغییرات انتقال حرارت لوله نسبت به تعداد دمای ورودی آب گرم و تغییرات اختلاف دما در روش LMTD می باشند. در ارتباط با اختلاف در موارد ۱ تا ۵ می توان دید که مقادیر بدست آمده مطابق با فرمول ۶ است. آنچه که در اینجا مهم است پیروی کردن رفتار انتقال حرارت نسبت به اختلاف دما است که در شکل ۱۶ نشان داده شده است. رفتار انتقال حرارت بدست آمده از شبیه سازی، مطابق با رفتار اختلاف دما است بیانگر همین موضوع، لازم به ذکر است که نتایج بدست آمده مطابقت خوبی با فرمول ۴ دارد، چرا که انتظار می رود رابطه خطی

برای حل مسأله می‌باشد که این پاسخ‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های طراح که از نرم‌افزار اسپن بدست آمده، مورد راستی آزمایی قرار گرفت. پس از مقایسه‌ی نتایج، می‌توان گفت، جواب‌های قابل قبول و منطقی از این شبیه‌ساز گرفته شده است. در مدل‌سازی مبدل حرارتی مسائل و مشکلات مختلفی باعث به وجود آمدن خطاهای مختلف در مدل‌سازی می‌شود. این خطاها با استفاده از مش‌بندی‌های مختلف و نیز تغییر در پارامترهای مختلف پس از مدل‌سازی، مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت پاسخ‌های خروجی با هم مقایسه گردیدند. به این ترتیب در این مقاله نشان داده شد که مبدل‌های حرارتی با ابعاد بزرگ و جزئیات بیشتر نیز می‌تواند مدل‌سازی شود و جهت استفاده از تحقیقات صنعتی یا آموزشی از جمله در شبیه‌سازهای صنعتی و آموزشی مورد استفاده قرارگیرد.

#### ۸- فهرست علائم

انتقال حرارت (W)	Q
ضریب تصحیح	F
ضریب کلی انتقال حرارتی $(\frac{W}{m^2.K})$	U
سطح جانبی لوله $(m^2)$	A
اختلاف دما (K)	$\theta_m$
دمای ورودی آب گرم (K)	$T_{h1}$
دمای خروجی آب گرم (K)	$T_{h2}$
دمای ورودی آب سرد (K)	$T_{c1}$
دمای خروجی آب سرد (K)	$T_{c2}$
طول لوله (m)	L
قطر داخلی لوله (m)	$D_o$

#### ۹- مراجع

- [1] F. Gheysai. *Tehran Reactor Research Analysis with Fluent*, Behshti University. Tehran(2014) (In Persian)
- [2] B.Jayachandriah1 and K. Rajasekhar, *Thermal Analysis of Tubular Heat Exchangers Using ANSYS*, International Journal of Engineering Research, Volume No.3 Issue No: Special 1, pp: 21-25
- [3] Joemer.C.S, Sijo Thomas, Rakesh.D, Nidheesh.P, *Optimization of Shell & Tube Heat Exchanger by Baffle Inclination & Baffle Cut*, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and, (ICETME-2015), Vol.4, Special Issue 12
- [4] Swapnaneel Sarma and D.H.Das, *CFD Analysis of Shell and Tube Heat Exchanger using triangular fins for waste heat recovery processes*, IRACST - Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ), ISSN: 2250-3498, Vol.2, No.6, December 2012
- [5] Dawit Bogale, *Design and Development of Shell and Tube Heat Exchanger for Harar Brewery Company Pasteurizer Application* (Mechanical and Thermal Design), American Journal of Engineering Research (AJER) e-ISSN : 2320-0847 p-ISSN : 2320-0936, Volume-03, Issue-10, pp-99-109
- [6] Vindhya Vasiny Prasad Dubey, Raj Rajat Verma, Piyush Shanker Verma& A. K. Srivas, *Steady State Thermal Analysis of Shell and Tube Type Heat Exchanger to Demonstrate the Heat Transfer Capabilities of Various Thermal Materials using Ansys*, olume 14 Issue 4 Version 1.0 Year 2014, Type: Double Blind Peer Reviewed International Research Journal Publisher: Global Journals Inc. (USA), Online ISSN:2249-4596Print ISSN:0975-5861
- [7] Amir. Tohidi, *Ansys Fluent Guide Tehran*, Dibagaran Artifice Kultur Institute. Tehran ,(2013) (In Persian)
- [8] L. L. Faulkner, *Heat Exchanger Design Handbook*