

## اثر پارامترهای موثر بر روی بهینه‌سازی سطوح گسترش یافته مبدل حرارتی هوا خنک با استفاده از تئوری ساختاری

امیر مشرف دهکردی<sup>۱</sup>، افسین احمدی ندوشن<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

\* شهرکرد، صندوق پستی ۱۱۵ ahmadi@eng.sku.ac.ir

### چکیده

در کار حاضر بهینه‌سازی مبدل حرارتی هوا خنک با استفاده از تئوری ساختاری بژان و همچنین نرم‌افزار فلوئنت بررسی شده است. برای حل مسئله، دو محدودیت به صورت همزمان در فرایند بهینه‌سازی اعمال می‌شود: اول سطح لوله ثابت  $A$  و دوم نسبت سطح تبادل حرارت کلی به سطح لوله ثابت  $\varphi$ . با استفاده از این دو قید و تئوری مذکور بهترین هندسه که هندسه‌ای متقاضن از لوله و پره است به دست آمده و اثرات پارامترهایی همچون افت فشار، عدد استانتون، نسبت ضرایب انتقال حرارت جابجایی، نسبت ضرایب هدایت، تعداد پره‌ها و ... بررسی شد. برای لوله‌ای به طول ۵.۸ سانتی‌متر و شعاع ۴.۳ سانتی‌متر بهینه‌ترین نسبت قطر پره به قطر لوله ۱.۸۸ و بهینه‌ترین تعداد پره ۷ عدد به دست آمد. سپس با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت و کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب هندسه به دست آمده از لحظه ارتفاع پره‌ها و همچنین فواصل بین پره‌ها بررسی شد و با توجه به قیود در نظر گرفته شده، ساختاری انتخاب شد که انتقال حرارت از کلیه پره‌ها یکسان باشد. دیده شد که میزان انتقال حرارت باز هم بهینه‌تر شد و به میزان ۶.۲ درصد افزایش پیدا کرد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۷ مهر ۱۳۹۴

پذیرش: ۰۴ آذر ۱۳۹۴

ارائه در سایت: ۰۹ دی ۱۳۹۴

کلید واژگان:

بهینه‌سازی

مبدل حرارتی

تئوری ساختاری

هوا خنک

لوله - پره

## The effect of drastic parameters on optimization of developed layers in heat exchanger using constructural theory

Amir Moshraf Dehkordi, Afshin Ahmadi Nodoshan\*

Department of Mechanical Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran

\* P.O.B. 115, Shahrood, Iran, ahmadi@eng.sku.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 29 September 2015

Accepted 25 November 2015

Available Online 30 December 2015

**Keywords:**  
Optimization  
Heat Exchanger  
Constructural theory  
Air cooler  
Finned-tube

### ABSTRACT

In the present work, optimization of air-cooled heat exchanger using structural theory of Bejan using fluent software has been investigated. Two constraints are applied in the optimization process: the first one is to fix the overall area of heat exchanger,  $A$ , and second, the ratio of fraction of total heat exchange surface in the fixed pipe,  $\varphi$ . Using these two constraints and the aforementioned theories, the best geometry, which is a symmetric geometry of the tube and the fins, was obtained. Furthermore, the effect of parameters such as pressure, Stanton number, ratio of fraction of the convective heat transfer coefficients, ratio of fraction of the conductivity, and the number of fins, etc. was investigated. The results show that for tubular length of 5.8 cm and 4.3 cm radius, the fraction of optimal fins diameter to pipe diameter is 1.88 and the optimal number of fins is 7. By using software such as Fluent and Matlab, the fins height and the distance between the fins were investigated. According to structural constraints, a structure was selected such that heat transfer from all the fins are equal. It was observed that the amount of the heat transfer was optimized by 6.2%.

سازی مقاومت حرارتی بین یک حجم با تولید حرارت و یک نقطه بود، ایده تئوری ساختاری به ذهن‌ش خطرور کرده است. بژان در بهینه‌سازی مسئله مذکور به یک شبکه درختی<sup>۱</sup> دست یافت که هر عضو آن نتیجه از یک فرایند بهینه‌سازی است. به عبارت دیگر شبکه درختی حاصل و اجزای آن در ابتدا فرض نمی‌شوند، بلکه هر عضو آن نتیجه‌ای از بهینه‌سازی مقاومت حرارتی بین آن حجم و نقطه است. وی سپس نتیجه گرفت که هر شبکه درختی طبیعی دیگر

1- Tree Network

در سال‌های اخیر از پره‌ها برای بالا بردن راندمان تجهیزات حرارتی همچون مبدل‌ها بهدلیل کاهش جرم و افزایش انتقال حرارت استفاده شده است. همچنین تحقیقات زیادی بر روی بهینه‌سازی ساختاری اجسام، گیاهان، جانداران و... صورت گرفته است. بژان [۱]، نخستین بار در سال ۱۹۹۶ تئوری ساختاری را مطرح نمود. وی در کتاب‌هایش [۲, ۱] به این نکته اشاره کرده است که نخستین بار در حالی که در تلاش برای حل مسئله مربوط به مینیمم-

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Moshraf Dehkordi, A. Ahmadi Nodoshan, The effect of drastic parameters on optimization of developed layers in heat exchanger using constructural theory, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 173-180, 2016 (in Persian)

بعد بودند. ایشان دو محدودیت در فرایند بهینه‌سازی اعمال کردند: حجم کل ثابت مبدل حرارتی و کسر حجمی ثابت از مواد پره. وی با استفاده از این تئوری یک هندسه بهینه از لوله و پره را به دست آورد که در این هندسه تعداد پرهها بهینه شد. همچنین بژان و آل ابراهیم [11] نیز با استفاده از تئوری ساختاری با در نظر گرفتن کسر حجمی ثابت از پره یک مبدل پره دار را از حیث ماکزیمم انتقال حرارت با محیط و همچنین تغییر دمای ایجاد شده در لوله با استفاده از تغییر در تعداد پرهها بهینه کردند. اشوک [12] به تجزیه و تحلیل قانون دوم ترمودینامیک در یک مبدل حرارتی لوله مارپیچ برای هر دو جریان آرام و مغشوش پرداختند. آن‌ها چهار پارامتر بدون بعد: عدد پرانتل، عدد دین، نرخ قطر تیوب و پارامتری که وظیفه تبادل گرما را به عهده دارد را ملاک کار خود قرار دادند. مشاهده شده است که برای مقادیر خاص عدد پراندل، عدد دین و پارامتر انتقال گرما یک نرخ قطر بهینه وجود دارد به طوری که نرخ تولید بی‌نظمی در حالت کمینه است. همچنین دریافتند که با افزایش عدد دین یا رینولدز مقدار بهینه نرخ قطر برای یک مقدار خاص از عدد پرانتل و پارامتر انتقال گرما کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها نشان دادند که در لوله مارپیچ مبدل با شرط مرزی شار ثابت، نسبت قطر سیم پیچ به لوله معیار مهمی است که باید در مقدار بهینه تنظیم شده باشد.

شیوداس و همکاران [13] به تحلیل انتقال حرارت از طریق آرایه فین با استفاده از همروف طبیعی پرداخت. نتایج نشان دهنده انتقال حرارت طبیعی از آرایه‌های پره مستطیل شکل عمودی با بریدگی و بدون بریدگی را به صورت تجربی و نظری بررسی شد. همچنین علاوه بر شکاف، اشکال هندسی مختلفی را برای مقایسه و بهینه‌سازی تجزیه و تحلیل کردند. با استفاده از پره آلومینیومی به عنوان یک ماده متفاوت روی نرخ انتقال حرارت تحقیقات خود را ادامه دادند. وایز [14] بر روی بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی لوله - پره تحقیقاتی انجام داد. برخلاف سایر دانشمندان که معمولاً اثرات فین را یک بعدی بررسی می‌کنند، اثرات فین را دو بعدی در نظر گرفت. او به این نتیجه رسید که نرخ تبادل حرارت فقط به ابعاد سطح دیواره، ضریب انتقال حرارت و اختلاف درجه حرارت بین سیال که صفحه و درجه حرارت سطح صفحه را احاطه کرده است، بستگی ندارد بلکه سرعت هوای خارج، سرعت سیال داخل، شکل پره و ... نیز عوامل مهم هستند؛ چرا که پروفیل صفحه را تحت تأثیر جهت جریان قرار می‌دهند. همچنین تمام نتایج به دست آمده محاسبه شده با توجه به جریان هوا و انحراف جریان ناشی از سطح گسترش یافته و هندسه لوله، نسبت به روش‌های بهینه‌سازی دیگر بر این مزیت است که در آن دما دو بعدی در نظر گرفته می‌شود. همچنین اصلاح شکل پره و کاهش حرم، مقوله مهم دیگری است که باعث افزایش راندمان می‌شود.

بژان و لورنته [15] تحقیقات زیادی بر روی تئوری ساختاری تولید هندسه در طبیعت و مهندسی انجام دادند. یک نمونه از قانون ساختاری حرکت گردشی اتمسفر در مقیاس روزانه، که انتقال حرارت نسبت به عدد اکمن بهینه می‌شود، فراخوانده می‌شود هر چند این بهینه‌سازی ثانوی بر مبنای متغیرهای متفاوت بسیار زیادی است، در عمل نتایج مشابهی برای دمای سطح زمین و متغیرهای دیگر ایجاد می‌کند.

اچنده و بژان [16] با استفاده از نتایج کلیدی تئوری ساختاری پیش بینی فواصل بهینه نشان دادند که در طراحی مبدل‌های حرارتی به جای استفاده از دسته‌ای از استوانه‌های هماندازه و هم‌فاصله بهتر است که از چیدمان استوانه‌ها با چندین قطر استفاده کنیم. آن‌ها نشان دادند که هر قطر و فاصله و هر دسته به افت فشار کلی بهینه می‌شود. هنگامی که  $Be$  افزایش یابد همه فاصله‌ها کاهش خواهد یافت.

نیز به طور طبیعی نتیجه بهینه‌سازی عملکرد جریان میان یک حجم و نقطه است. با توجه به گستردگی شبکه‌های طبیعی درختی و با توجه به این که این ساختارها قابل استنتاج از هیچ قانون مشخصی نیستند، وی این فرض را مطرح ساخت که بهینه‌سازی پیکربندی‌ها می‌تواند به عنوان قانون جدیدی مطرح شود و آن را تئوری ساختاری نامید. تئوری ساختاری، دیدگاهی است که می‌تواند برمبنای یک اصل فیزیکی (تئوری ساختاری) استوار باشد. این تئوری بیان می‌کند که مسئله اساسی در تحلیل هر سیستم، ساختار فیزیکی و هندسی آن است و بهینه‌سازی این ساختار، مسیر حداکثر کردن کارایی کل آن سیستم می‌باشد [3]. در واقع این تئوری قبل از تحلیل عملکرد هر سیستم، بهینه‌سازی ساختار فیزیکی و هندسی آن را مقدم می‌داند. به این ترتیب تئوری ساختاری با توجه به هدف موردنظر، تحلیل جامعی از عملکرد سیستم با توجه به مقتضیات ساختار و هندسه ارائه می‌کند. تاکنون سیستم‌های بسیاری با روش تئوری ساختاری مورد آنالیز و بهینه‌سازی قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال، می‌توان به طراحی و بهینه‌سازی پره‌های T-T شکل توسط تئوری ساختاری اشاره کرد [5.4]. در این پژوهش‌ها، مقاومت حرارتی کل با توجه به محدود بودن میزان ماده مصرفی، حجم کل پره و حجم فضای خالی پره حداقل گشته، سپس نتایج تحلیلی حاصله با نتایج حاصل از حل عددی مقایسه شده است. همچنین طراحی ساختار بهینه برای سیستم‌های انرژی خورشیدی مورد استفاده در ساختمانها و افزایش راندمان کلی سیستم با استفاده از تئوری گاز رقیق با افت کمینه و تعیین کمینه مقاومت حرارتی، از دیگر موارد استفاده از این تئوری جهت بهینه‌سازی است [6].

گستره‌ی کاربرد انتقال حرارت در صنعت، از خنک‌کاری ریزپردازندۀ‌ها تا فرآیندهای عظیم در صنایع پتروشیمی را در بر می‌گیرد. بژان و سیوبا [7] برای اولین بار از این تئوری برای چیدمان بهینه صفحات موازی که برای خنک‌سازی سیستم‌های الکترونیکی کاربرد دارد، استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از روش تقاطع مجانب‌ها، فاصله‌ی بهینه صفحات را بر حسب طول کanal  $\frac{b_{opt}}{L}$  و ماکزیمم انتقال حرارت به ازای واحد حجم را به صورت عبارتی از یک پارامتر بدون بعد به دست آوردند. این پارامتر بدون بعد به عنوان عدد بژان شناخته می‌شود. آن‌ها دریافتند که نرخ انتقال حرارت بیشینه با  $\frac{1}{\Delta p^2}$  ضخامت مجموع صفحات  $H$ ، بیشینه اختلاف دمای ممکن بین صفحات و دمای سیال ورودی نسبت مستقیم دارد. لازم به ذکر است که دمای صفحات و شار حرارتی نیز یکنواخت در نظر گرفته شد. نتایج حاکی از این بود که شرایط دمایی سطح (دمای یکنواخت و شار یکنواخت) کمترین تأثیر را بر فاصله‌ی بهینه و نرخ انتقال حرارت بیشینه دارد.

سلیمپور و همکاران [8] انتقال حرارت را در آرایه‌ای از کانال‌های دایره‌ای و غیردایره‌ای با حجم و افت فشار ثابت بررسی کردند. شکوهمند و جلیلی [9] اثرات هدایت گرمایی بین لوله‌های یک مبدل حرارتی لوله - پره را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند انتقال حرارت هدایتی پره‌ها نه تنها انتقال حرارت با سیال بیرون لوله‌ها را افزایش می‌دهد؛ بلکه هدایت حرارتی از یک لوله به لوله مجاور آن را نیز موجب می‌شود.

شکوهمند و همکاران [10] به بررسی بهینه‌سازی لوله پره‌دار با استفاده از تئوری ساختاری پرداختند لوله در نظر گرفته شده در تحقیق ایشان با پره‌های حلقوی مجهز شده بود. هدف شکل‌گیری هندسه برای به حداقل رساندن مقاومت حرارتی کلی بود. پارامترهای هندسی و فیزیکی - حرارتی که در نظر گرفته شده بود، تعداد پره، نسبت ارتفاع باله به قطر لوله، نرخ هدایت پره به هدایت هوا، نرخ هدایت مایع درون لوله به هدایت هوا و افت فشار بدون

معادله مومنتوم در راستای  $x$  به صورت معادله (8) است.

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

معادله مومنتوم در راستای  $y$  به صورت معادله (9) است.

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

معادله مومنتوم در راستای  $z$  به صورت معادله (10) است.

$$\rho \left( u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (10)$$

معادله انرژی به صورت معادله (11) است.

$$\rho C_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (11)$$

#### 4- بی بعدسازی معادلات حاکم

از آنجا که سطح به عنوان یک محدودیت ثابت در نظر گرفته شده است، ما  $A^{1/2}$  را برای رسیدن به طول بدون بعد اعمال می‌کنیم. با استفاده از  $h_0$  ضریب انتقال حرارت جابجایی هوا، ضرایب انتقال حرارت داخلی و خارجی و کلی بدون بعد می‌شوند. همچنین با استفاده از ضریب انتقال حرارت هدایتی  $k_0$ ، ضرایب هدایتی بی بعد شده‌اند. با استفاده از این متغیرهای بی بعد، معادلات بی بعد زیر بدست آمده است.

شرط محدود کننده اول بصورت فرمول (12) بیان می‌شود:

$$\hat{D}_1 \hat{L} = \frac{1}{\pi} \quad (12)$$

$$\frac{\hat{L}}{\hat{H}_0} = n \quad (13)$$

$$\hat{H}_0 - \hat{D}_0 = C_1 \hat{H}_1^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

در فرمول (14) داریم:

$$C_1 = \pi^{-\frac{1}{4}} \text{ و } \hat{L} = \frac{\Delta P A^{\frac{1}{2}}}{\mu \alpha} \quad (15)$$

$$\hat{h}_1 = \frac{\eta}{2 \hat{D}_1 \hat{H}_0} (\hat{H}_1^2 - \hat{D}_1^2) + \left( 1 - \frac{\hat{D}_0}{\hat{H}_0} \right) \quad (16)$$

$$\eta = f \left[ \frac{(\hat{H}_1 - \hat{D}_1) C_2}{(2 \hat{D}_0)^{\frac{1}{2}}} , \frac{\hat{H}_1}{\hat{D}_1} \right] \quad (17)$$

در فرمول (16) داریم:

$$C_2 = \left( \frac{K_0}{K_f} \right)^{\frac{1}{2}} \Pi^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

شرط محدود کننده دوم در فرمول (17) بیان شده است:

$$\Phi = \frac{n\pi}{2} (\hat{H}_1^2 - \hat{D}_1^2) + n\pi \hat{H}_1 \hat{D}_0 + n\pi \hat{D}_1 (\hat{H}_0 - \hat{D}_0) \quad (19)$$

$$\hat{q} = \frac{\pi \hat{D}_1^2}{4 St} \left[ 1 - \exp \left\{ -4 \frac{\hat{h}_e}{\hat{D}_1} St \hat{L} \right\} \right] \quad (20)$$

که در فرمول (18) داریم:

$$St = \frac{h_0}{P_i C_{p,i} U_i} \quad (21)$$

همچنین مقدار  $h_e$  در فرمول (18) مطابق فرمول (19) است.

$$\frac{1}{h_e} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_f} \quad (22)$$

ضریب انتقال حرارت بی بعد داخل لوله به صورت فرمول زیر بیان می‌شود

$$\hat{h}_i = 0.023 \left\{ \frac{\Pi^{0.5} \hat{D}_1}{\frac{K_i}{K_0} Pr St} \right\}^{0.8} Pr^{0.4} \frac{K_i}{K_0} / (\hat{D}_1 \Pi^{0.5}) \quad (23)$$

#### 5- روش حل مسئله

در نرم‌افزار متلب برای حل معادلات از روش نیوتن با استفاده از کد دستوری

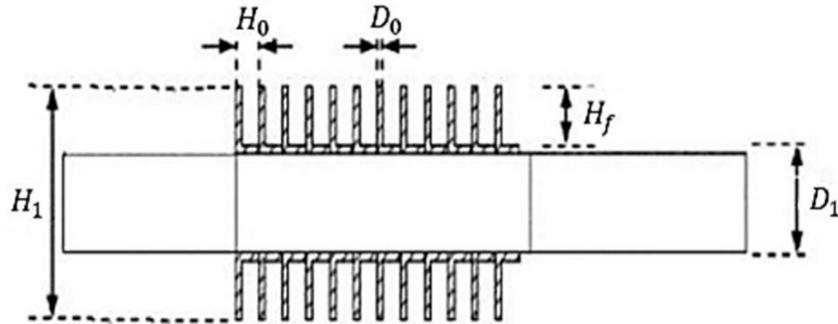


Fig. 1 Studied geometry

شکل 1 هندسه مورد بررسی

#### 2- بیان مسئله و حل عددی

کار حاضر از یک تیوب خالی با پره‌های حلقوی متصل شده بر روی آن تشکیل شده است که هدف پیدا کردن بهترین هندسه می‌باشد (شکل 1). منظور از بهترین هندسه، هندسه‌ای است که با توجه به دو قید: سطح لوله ثابت  $A$  و نسبت سطح تبادل حرارت کلی لوله پره به سطح لوله ثابت  $\varphi$ ، بتواند بیشترین تبادل حرارت با محیط بیرون را داشته باشد. در این تحقیق سیال داخلی آب، سیال خارجی هوا، جریان آرام و جنس پره‌ها از مس می‌باشد. با استفاده از دو لوله بلند در ابتدا و انتهای جریان داخل لوله اصلی را کنترل شده و "کاملاً" فراگیر کردیم. و سپس با استفاده از بی بعدسازی معادلات و نوشتن کد متلب، بیشترین تعداد پره بهینه بر روی لوله و پره مشخص شده، سپس برای صحت کد نوشته شده تحلیل نرم‌افزاری با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت صورت می‌گیرد.

در بهینه سازی اول هندسه‌ای متقاضی از لوله و پره‌ها به دست خواهد آمد. سپس با استفاده از مقادیر به دست آمده روی لوله و پره‌ها و نوشتن دستگاه معادلات در نرم‌افزار متلب و استفاده از معادله (17) و نامعادله (20) بهینه سازی را طوری انجام می‌دهیم که نرخ انتقال حرارت عبوری از اجزای هندسه یکنواخت گردد.

برای اعتبارسنجی نتایج تحلیلی، کار تحلیلی آقایان شکوهمند و محجوب [10] و برای اعتبارسنجی بخش نرم‌افزاری مرجع [17] مورد بررسی قرار گرفت.

#### 3- معادلات حاکم بر مسئله

با توجه به روابط انتقال حرارت داریم:  
 $q_0$  انتقال حرارت روی یک پره است.

$$\frac{q_0}{\pi D_1 H_0} = h_1 (T_s - T_\infty) \quad (1)$$

$$q_0 = \eta \frac{\pi}{2} (H_1^2 - D_1^2) h_0 (T_s - T_\infty) + \pi D_1 (H_0 - D_0) h_0 (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

$\eta$  راندمان پره و تابعی بسل از مشخصات هندسی می‌باشد.

$$\eta = \text{function} \left[ \left( \frac{H_1}{2} - \frac{D_1}{2} \right) \left( \frac{2h_0}{K_f D_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \frac{H_1}{D_1} \right] \quad (3)$$

$$\frac{T_m - T_\infty}{T_{mi} - T_\infty} = \exp \left( - \frac{\pi D_1 h_e}{m C_p} x \right) \quad (4)$$

$$q = \dot{m} C_p (T_{mi} - T_\infty) \left[ 1 - \exp \left( - \frac{\pi D_1 h_e}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (5)$$

با استفاده از مرجع [10]

$$\frac{H_0 - D_0}{H_1} \sim \left( \frac{\mu \alpha}{H_1^2 \Delta P} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

معادلات انتقال حرارت حاکم:

معادله پیوستگی به صورت معادله (7) است.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

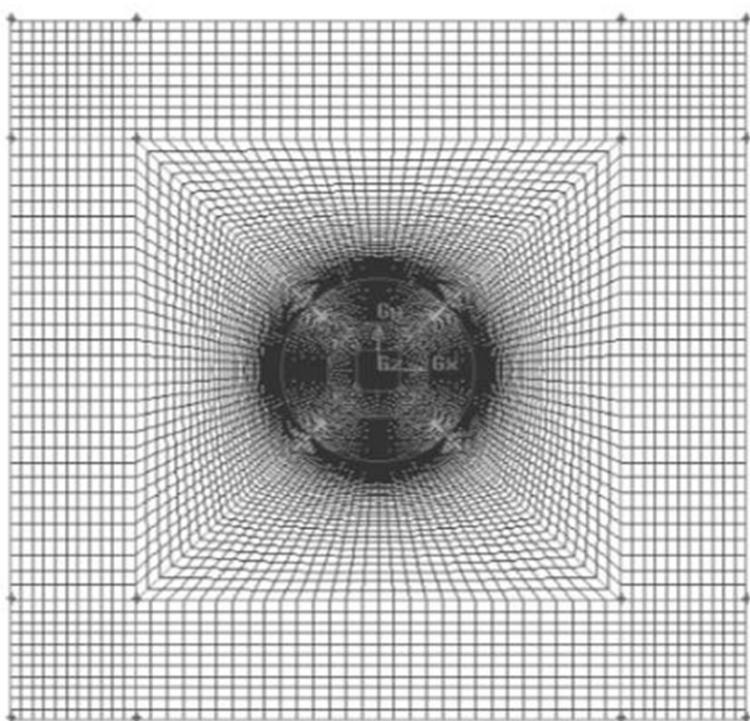


Fig. 2 Section mesh geometry

شکل 2 شب مقطع هندسه

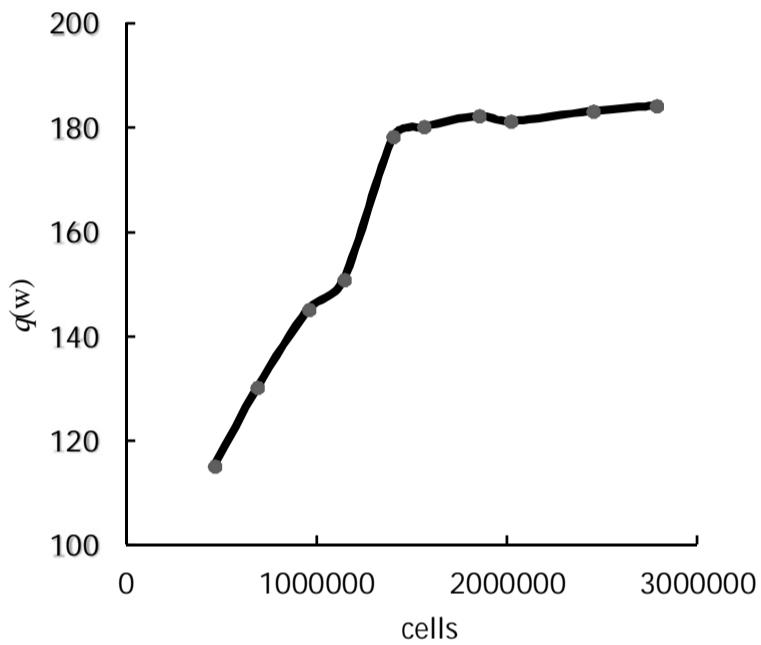


Fig. 3 Chart of heat transfer dependence on meshing

شکل 3 نمودار میزان وابستگی انتقال حرارت نسبت به شب

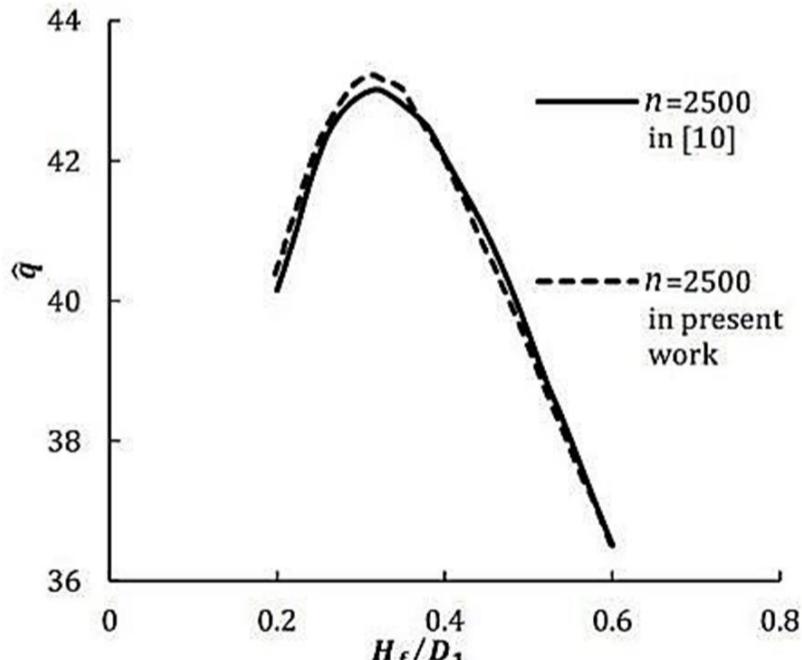


Fig. 4 Comparison of heat transfer in 2500 fins using written code of present work and reference [10]

شکل 4 مقایسه میزان انتقال حرارت با استفاده از کد نوشته شده کار حاضر و مرجع [10] در 2500 پره

## 7- بررسی اعتبارسنجی

برای بررسی صحت کار انجام شده از مرجع [10] و [17] استفاده شده است.

تابع "اف سالو"<sup>1</sup> استفاده شده است. به طور کلی روش نیوتون سریع‌تر از روش -های تکراری دیگر نظری نصف کردن یا وتری می‌باشد. زیرا همگرایی آن فوق خطی و از مرتبه دوم است. در این نرم‌افزار ابتدا یک حدس اولیه‌ای از مقادیر هندسی ( $H_0, D_0, H_1, D_1$  و  $L$ ) با استفاده از معادلات 12، 13، 14، 17 و 21 به دست آوردیم. سپس با استفاده از کد نوشته شده و حل دستگاه معادلات با استفاده از کد دستوری اف سالو میزان انتقال حرارت بی‌بعد را در ابعاد متمایز هندسه به دست آوردیم و از این مقادیر انتقال حرارت، میزان حداکثر انتقال حرارت را با توجه به محدودیت‌های گفته شده به دست آوردیم. همچنین در نرم‌افزار فلوئنت، روشی که برای حل میدان سرعت استفاده شد به نام الگوریتم سیمپل مشهور است. این الگوریتم بیانگر روش نیمه ضمنی برای معادلات است. در این نرم‌افزار با استفاده از ابعاد استخراج شده از نرم‌افزار متلب و با استفاده از روش سیمپل و حلگر مبتنی بر فشار میزان انتقال حرارت را در کل هندسه به دست آوردیم. برای این که بتوانیم میزان انتقال حرارت تفکیک شده را بر روی هندسه به دست آوریم. برای هر پره یک ناحیه تعریف کردیم. سپس با توجه به میزان انتقال حرارت بر روی هر ناحیه و با استفاده از نرم‌افزار متلب و حل یک دستگاه معادلات یکبار فواصل بین پره‌ها و یکبار ارتفاع پره‌ها را با هدف یکنواخت‌سازی انتقال حرارت به صورت متمایز برای هر پره به دست آوردیم. و در نهایت با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت مقدار انتقال حرارت کلی با استفاده از بهینه‌سازی ثانویه با بهینه‌سازی اولیه مقایسه شد.

## 6- شبکه و بررسی استقلال از شبکه

مدل‌سازی و شبکه‌بندی مسئله در نرم‌افزار گمبیت انجام شده است. به منظور بررسی دقیق، هندسه ساخته شده بایستی شبکه‌بندی مناسبی بر روی هندسه ایجاد گردد. نحوه شبکه‌بندی در روش حل بسیار مؤثر است به گونه‌ای که هرگاه از شبکه‌بندی مناسب استفاده نشود باعث کندی روند و یا حتی واگرایی جواب‌ها می‌گردد. همان‌طور که در شکل 2 مشخص است برای ایجاد بهترین نوع شبکه را با استفاده از خطوطی به چهارضلعی تقسیم کرده که بتوان م Mesh مربعی<sup>2</sup> را در صفحه و به تبع آن Mesh مکعبی<sup>3</sup> را در حجم ایجاد کرد.

همان‌طور که در شکل 2 دیده می‌شود داخل لوله و پره و اطراف پره‌ها Mesh را ریزتر و هرچه به سمت محیط بیرون می‌رویم Mesh را درشت‌تر می‌کنیم که هزینه محاسبات خیلی بالا نرود. این شبکه‌بندی از لحاظ معیار بدترین انحراف زاویه‌ای<sup>4</sup> مورد بررسی قرار گرفت و دیده شد که این مقدار برابر 0.59 شد که مقدار خیلی خوبی است.

بررسی استقلال حل از شبکه معمولاً با مطالعه چندین مقدار برای اندازه شبکه‌های مختلف انجام می‌شود و نتایج حل عددی برای مقادیر مختلف اندازه شبکه، بررسی شده و از یک تعداد شبکه به بعد نباید تغییر چندانی در نتایج مشاهده شود. چون در پژوهش حاضر هدف ما حداکثر کردن میزان کل انتقال حرارت است. میزان انتقال حرارت دفع شده از هندسه به عنوان معیار برای شبکه‌بندی انتخاب شده است. شکل 3 وابستگی انتقال حرارت به Mesh را نشان می‌دهد. دیده شد که هرچه تعداد Mesh زیادتر باشد حل دقیق‌تر است.

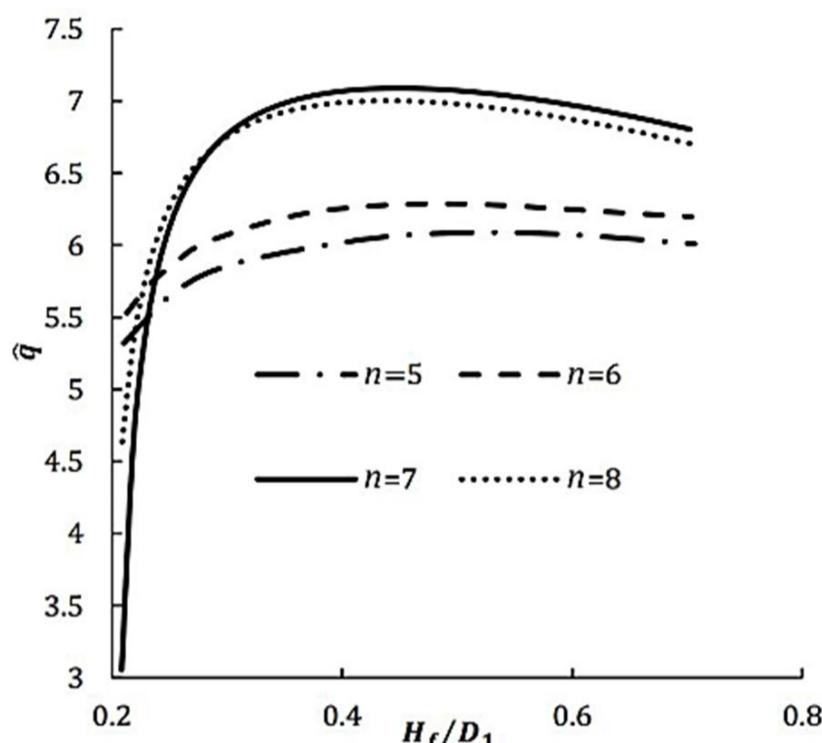
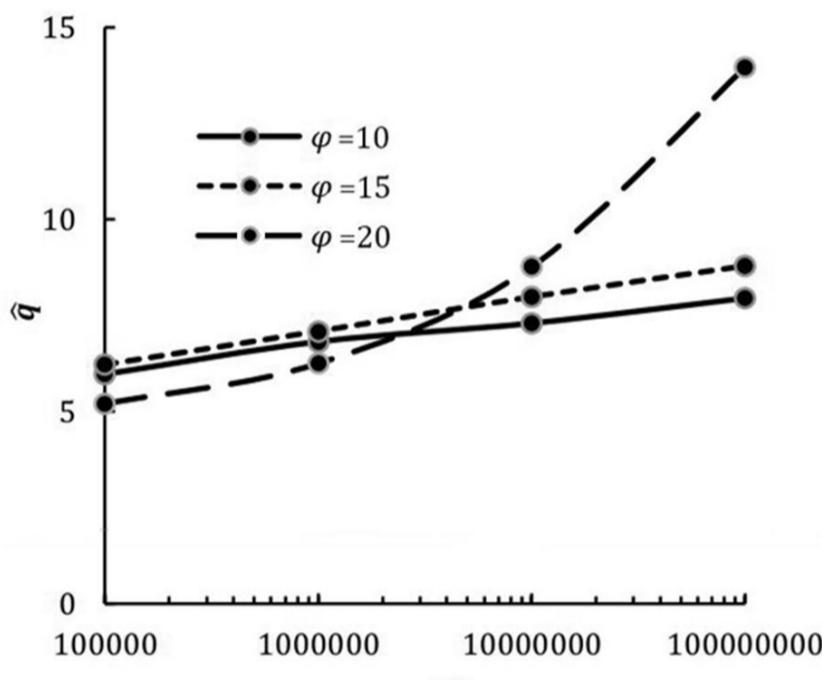
در این پژوهش با تغییر تعداد سلول از 400000 تا 2700000 مشاهده شد که از تعداد 1400000 سلول به بالا میزان انتقال حرارت تغییر محسوسی نمی‌کند و زیاد کردن تعداد Mesh بیش از این مقدار فقط هزینه محاسبات را بالا می‌برد. پس در این پژوهش تعداد 1401025 سلول معیار کار در نظر گرفته شده است.

1- fsolve

2- map

3- cooper

4- Equiangle skew

Fig. 6 Variations of  $\hat{q}$  with  $H_f/D_1$  for some  $n$ 'sشکل 6 تغییرات  $\hat{q}$  با تعداد پره های مختلفFig. 7 variations of  $\hat{q}$  with respect to  $\Pi$  for some  $\varphi$ 's.شکل 7 تغییرات  $\hat{q}$  بر حسب  $\Pi$  در مقادیر مختلف  $\varphi$ 

سپس با استفاده از معادلات (12) تا (20) و نامعادله (21) مجموعه جواب‌هایی از میزان انتقال حرارت در  $H_f/D_1$  های مختلف با استفاده از حل دستگاه معادلات گفته شده به دست می‌آوریم. حال اگر پارامترهای فیزیکی ثابت را به صورت  $\varphi=15$ ,  $\Pi=10^6$ ,  $St=10^{-4}$ ,  $k_i/k_o=25$ ,  $\frac{k_i}{k_o}=10^4$  و  $\hat{H}_f/\hat{D}_1=2$  تعریف کنیم. با حل این دستگاه معادلات، مطابق شکل 6 تغییرات  $\hat{q}$  بر حسب  $H_f/D_1$  برای مقادیر مختلف  $n$  نمایش داده شده است.

با استفاده از ثابت  $\varphi=15$  و پارامترهای گفته شده برای مقادیر مختلف  $n$  افزایش پره‌ها تا 7 پره، به مقدار انتقال حرارت می‌افزاید ولی افزایش بیش از 7 پره موجب کاهش انتقال حرارت می‌شود. مشخص شد که میزان انتقال حرارت بیشینه در این حالت در تعداد 7 پره در  $H_f/D_1$  حدود 0.4 می‌باشد که این نقطه معيار طراحی قرار گرفت. بدیهی است با تغییر  $\varphi$  تعداد پره‌ها تغییر می‌کند.

سپس به بررسی اثر پارامترهای هندسی و فیزیکی در نرخ انتقال حرارت بهینه می‌پردازیم. بنابرین در شکل 7 اثر  $\varphi$  را در تغییرات انتقال حرارت حداکثر می‌بینیم. همان‌طور که مشخص است، کاهش  $\Pi$  کاهش انتقال حرارت را نتیجه می‌دهد. چون با کاهش  $\Pi$  سرعت جریان بیش از حد کاهش می‌یابد. پس انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

در مرجع [10] بهینه‌سازی مبدل حرارتی را با استفاده از قیود حجم ثابت و نسبت حجم کل پره‌ها به حجم ثابت انجام دادند. شکل 4 دیگرام به دست آمده با استفاده از کد متلب نوشته شده صحت کار را تایید می‌کند. در جدول 1 و 2 نتایج در تعداد پره‌های 2500 و 4000 آورده شده که با تقریب 1.23 خوبی با کار حاضر شبیه است. دیده شد که بیشینه خطای کمتر از 1.23 درصد است.

برای اعتبارسنجی نرم‌افزار فلوئنت از مرجع [17] استفاده شده است. که در این مرجع انتقال حرارت یک سیلندر آلومینیومی در تعداد مختلف پره بررسی شده است. شکل 5 به مقایسه انتقال حرارت بین کار حاضر و مرجع [17] می‌پردازد. در این نمودار مقدار خطای بیشینه 0.98 درصد است.

## 8- بحث و نتایج

### 8-1- نتایج با استفاده از نرم‌افزار متلب

با استفاده از شرط پره‌های بلند [10] داریم  $0.2 < H_f/D_1 < 0.7$  در نتیجه: (21)

$2.4 < \hat{H}_f/\hat{D}_1 < 1.4$   
معادله بالا مرزهای بالای و پایینی  $\hat{H}_f$  را نشان می‌دهد. این به این معنی است که مقدار آن را نمی‌توان به دلخواه بالا یا پایین آورد.  
ابتدا با استفاده از نرم‌افزار میپل و معادلات (12) تا (14) و معادله (17) و نامعادله (21) یک حدس اولیه‌ای برای مجھولات هندسی ( $\hat{H}_1$  قطر بدون بعد پره،  $\hat{D}_1$  قطر بدون بعد لوله،  $\hat{H}_0$  گام بدون بعد،  $\hat{D}_0$  ضخامت بدون بعد پره،  $\hat{L}$  طول بدون بعد لوله) به دست می‌آوریم.

جدول 1 مقایسه میزان انتقال حرارت کار حاضر و مرجع [10] در 2500 پره

Table 1 Comparison of heat transfer in 2500 fins between present work and reference [10]

$H_f/D_1$	$\hat{q}$ in [10]	$\hat{q}$ in present work	Error percent
0.3	42.9277	43.1	0.4
0.4	42.0482	41.95	0.23
0.5	39.5344	39.36	0.414
0.6	36.502	36.52	0.05

جدول 2 مقایسه میزان انتقال حرارت کار حاضر و مرجع [10] در 4000 پره

Table 2 Comparison of heat transfer in 4000 fins between present work and reference [10]

$H_f/D_1$	$\hat{q}$ in [10]	$\hat{q}$ in present work	Error percent
0.3	40.4819	40.2	0.7
0.4	37.69746	37.43	0.72
0.5	33.80578	33.39	1.23
0.6	29.85941	29.79	0.23

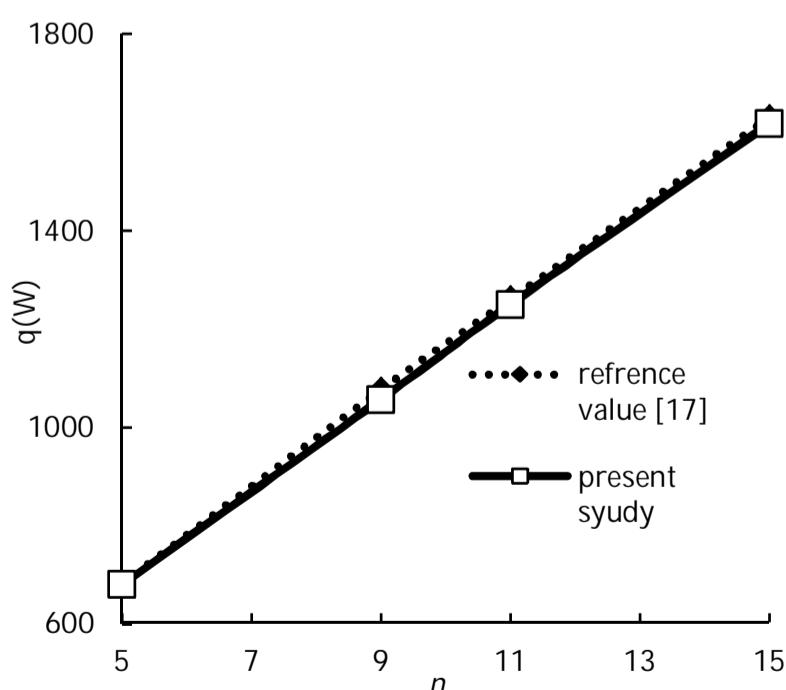


Fig. 5 Heat transfer comparison diagram between present work and reference [17]

شکل 5 نمودار مقایسه میزان انتقال حرارت در کار حاضر و مرجع [17]

می‌توان هندسه لوله پره مربوط را رسم کرد.

$H_0 = 0.83 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$   
و در سه حالت یعنی با سه هندسه متفاوت در نقاط طراحی بیشینه در شکل 6 صحت کار انجام شده را بررسی کرد. برای این‌که مطمئن باشیم که در محدوده لوله پره ما جریان داخل کامل‌ا" فراگیر شده در ورود و خروج از لوله پره دو تیوب هم قطر لوله با شرط مرزی عایق قرار می‌دهیم. با شرایط مرزی: ورودی لوله عدد رینولدز 1000، خروجی لوله شرط فشار خروجی، ورودی هوا، عدد رینولدز 50000 و خروجی هوا نیز شرط فشار خروجی به بررسی هندسه بهدست آمده کردیم. حال مقدار انتقال حرارت بهدست آمده توسط نرم‌افزار فلوئنت بایستی با مقدار حل دستی تایید شود.

$$\dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T = U_r \cdot A \cdot \Delta T$$

$$\dot{m} = \text{Mass flow rate} = 0.0676 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$T_{\text{inlet}} = 500 \text{ K}$$

$$C_p = 4182 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\text{Area weighted average in outlet} = 498.721 \text{ K}$$

$$Q = 0.067646 \cdot 4182 \cdot (500 - 498.721) = 361.578 \text{ W}$$

حال نتیجه دستی با توجه به معادله بهدست آمده توسط مرجع [10] و مرجع [18] برای انتقال حرارت جابجایی روی لوله پره را به دست می‌آوریم.

$$U_r \cdot A \cdot \Delta T = \sum_1^7 \eta h_s \cdot A \cdot T + \sum_1^7 h_o \cdot A \cdot T = 375.704 \text{ W}$$

در نتیجه خطای حالت دستی و نرم‌افزاری 3.77 درصد است. حال که از صحت کار اطمینان یافته‌یم به بررسی انتقال حرارت با شرایط مساوی در هندسه با شش و هشت پره می‌پردازیم. با توجه به جدول 3 مشخص است که مقدار انتقال حرارت هندسه با شش پره مینیمم و هندسه با هفت پره ماکزیمم است. با توجه به میزان انتقال حرارت هر پره و همچنین میزان انتقال حرارت فواصل بین پره‌ها با استفاده از معادله کلی نوشته شده برای  $\varphi$ , یکبار ارتفاع پره‌ها و یک بار فواصل بین پره‌ها را مجددا" بهینه می‌کنیم. اگر میزان انتقال حرارت پره‌ها را از شروع از لوله به ترتیب با پره 1، پره 2, ... و پره 7 و فواصل بین پره‌ها را به ترتیب از شروع از ورودی لوله با  $A_1, A_2, \dots, A_7$  نام‌گذاری کنیم. با توجه به جدول 4 مشخص است که میزان انتقال حرارت از پره یک تا ششم مداوم کم می‌شود که این بدیهی است. اما در پره آخر چون از یک طرف به فضای بین پره و یک طرف به هوای آزاد راه دارد طبیعی است که ضخامت لایه مرزی کمتر شده و انتقال حرارت از پره‌های قبل بیشتر است. همچنین در فضاهای بین پره‌ای نیز همین روال برقرار است. کانتور دما در این حالت مطابق شکل 10 می‌باشد. مطابق این شکل هرچه از سمت راست که همان ورود سیال به داخل لوله است به سمت خروج حرکت کنیم بایستی دمای پره‌ها کاهش یابد. پره‌های ابتدایی دمای بیشتری دارند و هرچه به خروج نزدیک می‌شویم دمایها کمتر می‌شود.

حال با استفاده از بهینه‌سازی مجدد، ارتفاع پره‌ها و فواصل بین پره‌ها را طوری تغییر داده که میزان دفع حرارت از قسمت‌های لوله و پره‌ها تا حدودی یکنواخت گردد در نتیجه هندسه‌ی جدیدی مطابق شکل 11 حاصل می‌گردد. با توجه به ابعاد هندسه شکل 11 که در جدول 5 به صورت تفکیک شده مشخص است هندسه جدید رسم می‌شود و میزان انتقال حرارت دوباره بررسی می‌گردد این میزان انتقال حرارت از لوله و پره، با یکنواخت‌سازی انتقال حرارت بهدست آمده است. ابتدا با متغیر قرار دادن ارتفاع پره‌ها در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت در نظر گرفتن میزان گام پره، قطر لوله، ضخامت پره و طول لوله مطابق آنچه در دیاگرام 6 در شکل 6 ( $n=7$ ) در نظر گرفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کنیم و سپس با متغیر قرار دادن گام پره در معادله عمومی  $\varphi$  و ثابت قرار دادن بقیه پارامترهای گفته شده ( $L = 5.8 \text{ cm}$ ,  $H_1 = 16.03 \text{ cm}$ ,  $D_1 = 8.6 \text{ cm}$ ,  $D_0 = 0.38 \text{ cm}$ ) گفته شد. میزان ارتفاع متغیر پره‌ها را پیدا می‌کن

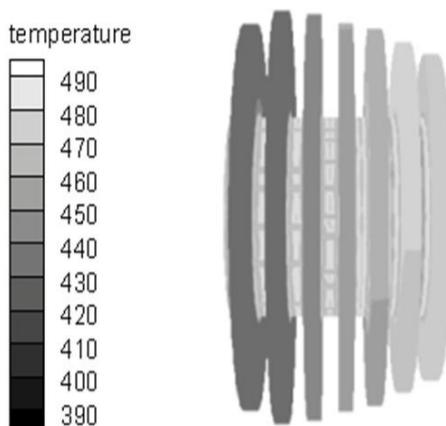


Fig. 12 Temperature contour in secondary optimization

شکل 12 کانتور دما در بهینه‌سازی ثانویه

جدول 5 ابعاد هندسه تفکیک شده با بهینه‌سازی ثانویه

Table 5 Separated geometry dimension using secondary optimizing

		فاصله بین پره (cm)	شعاع پره (cm)	پره	طول (cm)
0.4299	$La_1$	6.7913	1	پره	
0.442	$La_2$	7.38725	2	پره	
0.4562	$La_3$	8.05085	3	پره	
0.4704	$La_4$	8.3087	4	پره	
0.4705	$La_5$	8.66985	5	پره	
0.4793	$La_6$	8.81735	6	پره	
0.3916	$La_7$	8.2468	7	پره	

جدول 6 انتقال حرارت تفکیک شده بر روی لوله و پرهها در بهینه‌سازی ثانویه

Table 6 The rate of separated heat transfer on tubes and fins in the secondary optimization

		فاصله بین پره	میزان انتقال حرارت (w)	پره	میزان انتقال حرارت (w)	فاصله بین پره	پره
3.760	$A_1$	50.810	1	پره	3.813	$A_1$	56.397
3.981	$A_2$	50.950	2	پره	3.727	$A_2$	51.023
3.713	$A_3$	51.333	3	پره	3.582	$A_3$	46.54
3.794	$A_4$	51.712	4	پره	3.494	$A_4$	45.235
3.296	$A_5$	51.234	5	پره	3.483	$A_5$	44.588
3.684	$A_6$	50.596	6	پره	3.421	$A_6$	43.933
3.985	$A_7$	51.422	7	پره	4.095	$A_7$	47.11

جدول 7 مقایسه میزان عدد ناسلت متوسط در دو حالت بهینه‌سازی

Table 7 Comparison of Nusselt number in two optimized mode

بهینه‌سازی ثانویه	بهینه‌سازی اولیه	لوله بدون پره	میزان انتقال حرارت (w)
$Nu_m=50.861$	$Nu_m=51.038$	$Nu_m=50.982$	

## 9- نتیجه گیری

انتقال حرارت جابجایی اجباری بر روی هندسه شامل لوله پرهدار، تحت نظریه‌ی ساختاری با در نظر گرفتن دو محدودیت برای هندسه بررسی شد. اولین محدودیت، ثابت گرفتن مساحت لوله و دومین محدودیت ثابت در نظر گرفتن نسبت مساحت لوله و پرهها به سطح لوله.

دیدیم که پارامترهای زیادی در بهبود میزان انتقال حرارت موثر می‌باشند. و با تغییر این پارامترها نرخ انتقال حرارت بهینه تغییر می‌کند. و تنها افزایش سطح تبادل انرژی تاثیرگذار نیست هرچند گاهی این افزایش بیش از حد سطح تبادل انرژی، نتیجه معکوس می‌دهد. دیده شد که میزان ناسلت در هر سه حالت تقریباً ثابت می‌ماند و این دلیل بر کارایی پره است. همچنین مشخص شد که با یکنواخت سازی نرخ انتقال حرارت میزان انتقال حرارت باز هم بهینه‌تر شد و به میزان 6.2 درصد بیشتر شد. از این ساختار جایی که نیازمند حداکثر کردن نرخ انتقال حرارت هستیم می‌توان استفاده کرد.

(16.03 cm,  $D_1 = 8.6$  cm,  $D_0 = 0.38$  cm آوردیم. کانتور دما در این حالت مطابق شکل 12 می‌باشد. میزان انتقال حرارت تفکیک شده در این حالت بهینه‌سازی، مطابق جدول 6 است. از این جداول مشخص است که میزان انتقال حرارت یکنواخت گردیده است. و این اختلاف که وجود دارد در اثر تأثیر انتقال حرارت بین پره‌ای است.

با توجه به جداول 4 و 6 مشخص است که میزان انتقال حرارت در حالت دوم بیشتر از حالت اول شده است و به میزان 6.2 درصد بیشتر شده است. این میزان افزایش بهینه‌سازی به دلیل این که هیچ‌گونه تغییری در میزان سطح تبادل حرارت و شرایط مرزی صورت نگرفته و فقط با تغییر در ساختار هندسه ایجاد شده است قابل توجه است.

همچنین میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت متوسط در سه حالت مختلف محاسبه شده که نتایج آن در جدول 7 قابل رویت است.

جدول 3 میزان انتقال حرارت در هندسه‌های با پره‌های مختلف

Table 3 Heat transfer rate in fins with different geometry

تعداد پره	8	7	6	تعداد پره
میزان کل انتقال حرارت	351.802	360.441	623.52	

جدول 4 میزان انتقال حرارت تفکیک شده روی لوله و پرهها در بهینه‌سازی اولیه

Table 4 The rate of separated heat transfer on tubes and fins in the primal optimization

میزان انتقال حرارت (w)	فاصله بین پره	میزان انتقال حرارت (w)	فاصله بین پره	پره
3.813	$A_1$	56.397	1	پره
3.727	$A_2$	51.023	2	پره
3.582	$A_3$	46.54	3	پره
3.494	$A_4$	45.235	4	پره
3.483	$A_5$	44.588	5	پره
3.421	$A_6$	43.933	6	پره
4.095	$A_7$	47.11	7	پره

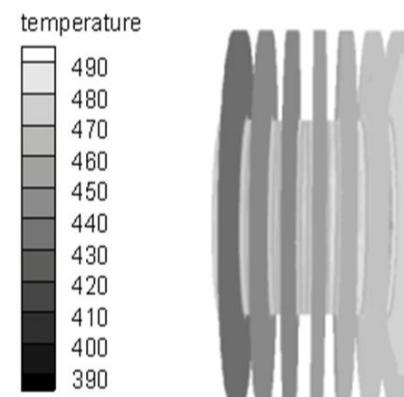


Fig. 10 Temperature contour in primal optimization

شکل 10 کانتور دما در بهینه‌سازی اولیه

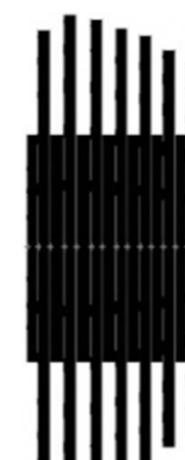


Fig. 11 The obtained geometry using secondary optimization

شکل 11 هندسه به دست آمده با بهینه‌سازی ثانویه

10 - فهرست علائم	
مساحت	A
	b
افت فشار بی بعد	Be
پارامتر	c <sub>1</sub>
پارامتر	c <sub>2</sub>
حرارت مخصوص	c <sub>p</sub>
ضخامت پره	D <sub>0</sub>
قطر لوله	D <sub>1</sub>
پره	F
ضریب انتقال حرارت جابجایی	H
ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت هوا یک گام	h <sub>1</sub>
ضریب کلی انتقال حرارت جابجایی	h <sub>e</sub>
ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال داخل	h <sub>i</sub>
ضریب انتقال حرارت جابجایی سمت هوا	h <sub>o</sub>
ضخامت مجموع صفحات	H
گام	H <sub>0</sub>
قطر پره	H <sub>1</sub>
ارتفاع پره	H <sub>f</sub>
ضریب هدایت	K
ضریب هدایت سیال داخل لوله	k <sub>i</sub>
ضریب هدایت پره	k <sub>f</sub>
ضریب هدایت هوا	k <sub>o</sub>
طول لوله	l
طول فاصله بین پره ای	L <sub>a</sub>
دبی جرمی	m̄
تعداد پره	n
عدد ناسلت	Nu
فشار	p
عدد پراندل	Pr
انتقال حرارت	q
عدد استانتون	St
دمای میانگین	T <sub>m</sub>
دمای میانگین داخل لوله	T <sub>mi</sub>
دمای سطح لوله	T <sub>s</sub>
دمای محیط	T <sub>∞</sub>
سرعت در راستای محور x	U
ضریب انتقال حرارت کلی	U <sub>r</sub>
سرعت در راستای محور y	V
سرعت در راستای محور z	W
محور مختصات	X
محور مختصات	Y
محور مختصات	Z
علائم یونانی	
ضریب پخش حرارتی	α
تفعیرات	Δ