

## بهبود عملکرد حرارتی یک کانال مستطیلی به کمک آرایش مختلف بافل های V شکل

کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران، aliahmadi70777@gmail.com

علی احمدی

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران، m.rahimi@gu.ac.ir

معصومه رحیمی\*

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، unes.pahamly@semnan.ac.ir

یونس پهملی

### چکیده

یکی از راه کارهای افزایش انتقال گرما در کانال هواگرمکن های خورشیدی افزودن بافل در مسیر عبور جریان سیال می باشد. در این مطالعه به بررسی ویژگی های انتقال گرما و جریان سیال در کانالی با مقطع مستطیل شکل دارای بافل های V شکل که بر روی دو صفحه گرمکن خورشیدی در بالا و پایین کانال قرار دارد پرداخته شده است. پارامترهای بررسی شده شامل تعداد ردیف بافل ها، گام بافل ها و ارتفاع بافل ها در اعداد رینولدز مختلف می باشد. عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و ضریب عملکرد حرارتی به عنوان پارامترهای خروجی مورد بررسی قرار گرفته اند. معادلات حاکم بر مساله شامل پیوستگی، مومنتوم و انرژی می باشد. از مدل توربولانسی standard k-ε برای حل جریان آشفته در کانال استفاده شده است. نتایج نشان دهنده این است که با افزایش تعداد ردیف بافل، سرعت جریان هوا افزایش یافته و به تبع آن انتقال گرما نیز افزایش می یابد. در بررسی گام های مختلف مشخص شد کانال با بافل هایی با گام ۵۰ میلی متر بیشترین ضریب عملکرد حرارتی را دارد. همچنین با افزایش ارتفاع بافل ها در سطح انتقال گرما ثابت، به علت افزایش سرعت جریان عبوری از روی بافل، ضریب عملکرد در حدود ۲۸٪ افزایش پیدا می کند.

واژه های کلیدی: هواگرمکن خورشیدی، کانال مستطیلی، بافل های V شکل، جریان آشفته، انتقال گرما، افت فشار.

## Thermal Performance Improvement of a Rectangular Channel Using Different Arrangements of V-Shaped Baffles

A. Ahmadi

Mechanical Engineering Department, Golestan university, Gorgan, Iran

M. Rahimi

Mechanical Engineering Department, Golestan university, Gorgan, Iran

Y. Pahamly

Department of Mechanical Engineering, Semnan university, Semnan, Iran

### Abstract

One solution to increase the heat transfer in a channel of solar air heaters is adding baffles along the air path. In this study, investigation on the characteristics of heat transfer and fluid flow in a rectangular channel with V-shaped baffles located at the top and bottom walls of the heater is studied. The parameters such as baffle arrangement, baffle pitch and baffle height at different Reynolds numbers are examined. Nusselt number, friction factor and thermal performance coefficient have been investigated as output parameters. The governing equations include continuity, momentum and energy. The standard k-ε model is used to simulate the turbulence model in the channel. The results indicate that by increasing the number of baffle rows, the airflow velocity increases, flow becomes more turbulent and consequently the heat transfer increases. In the study of different baffle pitches, it was found that the channel with baffles with a step of 50 mm has the highest thermal performance coefficient. Also, by increasing the baffle height at a constant heat transfer surface, due to the increase in the velocity of the flow passing through the baffles, the coefficient of performance increases by about 28%.

**Keywords:** Solar air heater, Rectangular channel, V-shaped baffles, Turbulent flow, Heat transfer, Pressure drop.

### ۱- مقدمه

هانز و همکاران [۱] یک هواگرمکن خورشیدی که صفحه جاذب آن دارای ریب های V شکل بود را با یک هواگرمکن بدون ریب مقایسه کردند و دریافتند که هواگرمکن دارای ریب های V شکل ناسلت بیشتر، افت فشار کمتر و ضریب عملکرد حرارتی بیشتری دارند. قره-قونلو و رضازاده [۲] به بررسی تاثیر تغییر شکل پره های یک مبادله کن گرمایی بر انتقال گرما و الگوی جریان سیال پرداختند و نشان دادند مبادله کن گرمایی برای تعداد فین شش و دبی جرمی ۰/۴ عملکرد بهتری داشته و با توجه به نتایج، عدد ناسلت و ضریب عملکرد بیشتر و افت فشار کمتری را ایجاد می نماید. هانز و همکاران [۳] به صورت آزمایشگاهی یک هواگرمکن خورشیدی که صفحه جاذب آن دارای ریب هایی به شکل کمان و دارای گپ بود را با هواگرمکن دارای ریب-هایی به شکل کمان مقایسه کردند و دریافتند هواگرمکن با ریب های کمان شکل و با گپ دارای عدد ناسلت و افت فشار بیشتری می باشد. اسریپاتاناپیپات و همکاران [۴] به مقایسه یک جریان دو بعدی در یک

جریان هوای گرم در صنعت، کشاورزی، دامپروری و امور خانگی کاربرد فراوان دارد. با هدایت جریان هوای گرم از درون کانال هوا می-توان از ظرفیت حرارتی آن استفاده کرد. در کانال های هواگرمکن با استفاده از صفحات جاذب انرژی که شار حرارتی را دریافت می کنند، می توان دمای هوای عبوری از کانال را افزایش داد. روش های مختلفی برای بهبود ضریب عملکرد حرارتی هواگرمکن ها وجود دارد. افزودن فین ها، بافل ها و ریب ها در مسیر جریان هوای عبوری یکی از این روش هایی می باشد که باعث افزایش انتقال گرما می شود. همچنین با تغییر هندسه پره ها، بافل ها و ریب ها می توان افت فشار و ضریب اصطکاک سیستم را کاهش و به بهبود عملکرد سیستم کمک کرد. به همین منظور محققان زیادی مطالعات گسترده ای را در زمینه بهبود عملکرد هواگرمکن های خورشیدی انجام داده اند.

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.rahimi@gu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۰/۰۲/۰۷

تاریخ پذیرش: ۰۰/۰۶/۱۵

کانال با بافل‌هایی به شکل لوزی و بافل‌های مستطیلی پرداختند و دریافتند کانال با بافل‌های لوزی شکل با زاویه ۱۰-۵ درجه دارای ضریب عملکرد بیشتری نسبت به کانال با بافل مستطیلی می‌باشد. پیرام و همکاران [۵] به صورت تحلیلی به بررسی یک هواگرمکن خورشیدی که صفحه جذب آن دارای پره‌های موج‌دار است پرداختند و دریافتند هواگرمکن خورشیدی دارای پره‌های موج‌دار ضریب عملکرد حرارتی و همچنین ضریب هیدرولیک گرمایی بیشتری نسبت به دارد. کومار و همکاران [۶] مقایسه‌ای بین هواگرمکن خورشیدی با ریب‌های S شکل و بدون ریب انجام دادند که مشخص شد هواگرمکن با ریب‌های S شکل دارای ضریب عملکرد حرارتی بیشتری است. دهقانی راینی و گنجعلیخان نسب [۷] به شبیه‌سازی عددی هواگرمکن‌های خورشیدی صفحه‌ای با در نظر گرفتن اثرات تابشی گاز پرداختند و نشان دادند اگرچه درجه حرارت جریان هوا در این نوع گرمکن‌ها بسیار بالا نیست ولی اثرات تابشی گاز، مشخصه‌های حرارتی سیستم را تحت تاثیر قرار داده به طوری که با افزایش عمق اپتیکی از صفر (گاز غیر تابشی) تا ۲، نتایج عددی حدود ۷٪ افزایش در دمای گاز خروجی را نشان می‌دهند. وانگ و همکاران [۸] یک کانال U شکل با ریب‌های موج‌دار را با یک کانال با ریب‌های V شکل مقایسه کردند و دریافتند کانال U شکل با ریب‌های موج‌دار ضریب عملکرد حرارتی بیشتری دارد. پرومونگ و همکاران [۹] به بررسی یک کانال با مقطع مربعی که سطح بالا و پایین آن دارای ریب‌های V شکل ۶۰ درجه به صورت تکه‌تکه بود پرداختند و پی بردند ضریب عملکرد حرارتی نسبت به کانال بدون ریب افزایش می‌یابد. تونیوت و همکاران [۱۰] به صورت آزمایشگاهی یک کانال که دارای شیارها و ریب‌های V شکل بود را با کانال دیگر که فقط دارای ریب بود مقایسه کردند و نتیجه گرفتند ضریب عملکرد در کانال با شیار و ریب‌های V شکل افزایش پیدا می‌کند. محمدی و همکاران [۱۱] یک هواگرمکن خورشیدی با پره و بافل را با هواگرمکن خورشیدی ساده مقایسه کردند و نتیجه گرفتند هواگرمکن دارای پره و بافل دمای خروجی، انرژی مفید و بهره‌وری بالاتری دارد. هو و همکاران [۱۲] به مقایسه سه نوع هواگرمکن خورشیدی دو مسیره پرداختند که در همه شاره‌های حرارتی بررسی شده مشخص شد هواگرمکن با پره و بافل دارای ضریب عملکرد بیشتری نسبت به هواگرمکن با پره و هواگرمکن بدون پره و بافل می‌باشد. کنکامنگ و همکاران [۱۳] یک کانال مربعی با بافل‌های مستطیلی دارای زاویه ۳۰ درجه را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند این کانال دارای ضریب عملکرد بیشتری نسبت به کانال بدون بافل می‌باشد. پرومونگ و همکاران [۱۴] یک کانال با بافل‌های چندگانه V شکل با زاویه ۶۰ درجه را با یک کانال بدون بافل مقایسه کردند و نتیجه گرفتند کانال با بافل دارای عدد ناسلت، افت فشار و ضریب عملکرد بیشتری می‌باشد. لی و همکاران [۱۵] یک کانال با بافل‌های چندگانه V شکل را با یک کانال بدون بافل مقایسه کردند و نشان دادند کانال با بافل‌های چندگانه V شکل با زاویه ۴۵ درجه بیشترین عدد ناسلت، کمترین مقدار افت فشار، بنابراین بیشترین ضریب عملکرد را دارد. اتحاد و الهامی امیری [۱۶] به بررسی اثر هم‌زمان استفاده از نانوسیال و ماده متخلخل در دفع گرمایی از چشمه‌های حرارتی شار ثابت پرداختند و دریافتند هندسه مشخصی با بلوک‌های متخلخل منحنی‌وار با ضریب انحنای ۰/۵

بهترین عملکرد را در دفع گرما از منبع نشان می‌دهد. فرشاد و شیخ‌الاسلامی [۱۷] ساختار جریان نانوسیال در داخل لوله به همراه نوار پیچشی چند کاناله بر روی یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند با افزودن نوار پیچشی در مقایسه با لوله خالی ضریب عملکرد حرارتی افزایش می‌یابد. میرزاپور و بیاتی [۱۸] به بررسی عددی تاثیر تعداد پره و سهم دیواره پره‌دار و دیواره بدون پره از مقدار انتقال گرمای داخل یک کانال مستقیم پرداختند. آن‌ها دریافتند هرچند با افزایش تعداد پره مقدار انتقال گرمای کلی افزایش می‌یابد اما نرخ افزایش آن مستقیم نبوده و بنابر الگوی جریان روند کاهشی دارد. ودیعی و رستم‌زاده خسروشاهی [۱۹] هواگرمکن‌های خورشیدی بدون شیار و دارای شیارهایی با مقاطع مختلف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده این است بهترین حالت از لحاظ بازده گرمایی استفاده از شیارهای گوه‌ای می‌باشد. ساراوانکومار و همکاران [۲۰] به بررسی یک گرمکن خورشیدی با ریب‌های قوسی شکل به همراه پره‌ها و بافل‌ها پرداختند و دریافتند با افزایش طول و عرض بافل‌ها و افزایش تعداد پره‌ها ضریب اصطکاک و عدد ناسلت و ضریب عملکرد حرارتی افزایش می‌یابد. در مطالعه دیگری بنساکاکی و همکاران [۲۱] به مقایسه گرم-کن خورشیدی بدون پره و ۴ آرایش مختلف از بافل‌های مستطیلی در قسمت‌های مختلف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد آرایشی که در آن تمام صفحه دارای بافل می‌باشد ضریب عملکرد حرارتی بیشتری دارد. در یک مطالعه تجربی و عددی پرومونگ و اسکولونگ [۲۲] ویژگی‌های انتقال گرما در یک لوله مبادله‌کن گرما با بافل‌های V شکل با دو آرایش قسمت راس V در بالادست جریان و پایین دست جریان را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند مبدل حرارتی با بافل‌های V شکل در حالتی که قسمت راس V در بالا دست جریان قرار دارد به میزان ۶٪ ضریب عملکرد بیشتری دارد.

با بررسی مطالعات پیشین می‌توان دریافت که استفاده از بافل‌های V شکل تاثیر محسوسی در بهبود عملکرد گرمکن‌های خورشیدی دارد. اما مطالعه اثر تعداد، چیدمان، گام و ارتفاع این نوع بافل‌ها بر عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی هواگرمکن خورشیدی موضوعی است که به آن پرداخته نشده است. در همین راستا در این پژوهش به مطالعه جریان آشفته در یک هواگرمکن خورشیدی با کانالی با مقطع مستطیلی با بافل‌های V شکل پرداخته شده است. بافل‌ها بر روی گرمکن‌های موجود در مسیر عبور جریان هوا در یک ردیف، سه ردیف و پنج ردیف قرار می‌گیرند، به صورتی که در هندسه‌های سه ردیف و پنج ردیف بافل، بافل‌ها دارای فاصله از هم می‌باشند و سطح کلی انتقال گرما در هر سه هندسه برابر است. هم-چنین تاثیر ارتفاع و گام بافل‌ها بر جریان سیال و انتقال گرما مورد بررسی قرار می‌گیرد. پارامترهای خروجی شامل توزیع دمای محلی، تغییرات عدد ناسلت، تغییرات ضریب اصطکاک و ضریب عملکرد حرارتی کانال می‌باشد.

## ۲- تعریف مسئله

شکل ۱ نمای سه بعدی کانال مورد بررسی به همراه بافل‌های V شکل موجود بر روی صفحات گرمکن در مسیر سیال عبوری را نشان می‌دهد. این کانال به طول ورودی  $L_{in}=500$  میلی‌متر، طول صفحه

### ۳- مطالعه عددی

#### ۳-۱- معادلات حاکم

با توجه به این که سیال تراکم‌ناپذیر، جریان دائم و به صورت سه‌بعدی می‌باشد معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی استفاده شده در این مطالعه به صورت زیر می‌باشد [۱۵]:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

(ب) معادله مومنتوم

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho u_i' u_j' \right] \quad (2)$$

(ج) معادله انرژی برای سیال

$$\rho C_p u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ k_f \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho C_p u_j' T' \right] \quad (3)$$

(د) معادله انرژی برای جسم جامد

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_s \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (4)$$

با توجه به این که رژیم جریان سیال آشسته می‌باشد از روش k-ε استفاده می‌گردد [۱۵].

(ه) معادله انرژی جنبشی اغتشاش

$$\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \mu_t \left( \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \quad (5)$$

(و) نرخ اتلاف معادله انرژی جنبشی اغتشاش

$$\rho u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \mu_t \frac{\epsilon}{k} \left( \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

که در آن:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

مقدار ضرایب ثابت معادله‌های بالا به صورت زیر می‌باشد:

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1, \sigma_\epsilon = 1.3 \quad (8)$$

#### ۳-۲- شرایط مرزی

برای مقطع ورودی و خروجی کانال شرایط مرزی زیر در نظر گرفته می‌شود:

(الف) شرط مرزی ورودی

$$u = u_{in}, v = w = 0, T = T_{in} = 300K, k_{in} = \frac{k^2}{\epsilon} (u_{in}^2), \epsilon_{in} = \frac{k_{in}^{3/2}}{0.3D_h}, I = 5\% \quad (9)$$

عدد رینولدز جریان سیال ورودی در بازه ۸۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ متغیر می‌باشد.

(ب) شرط مرزی خروجی

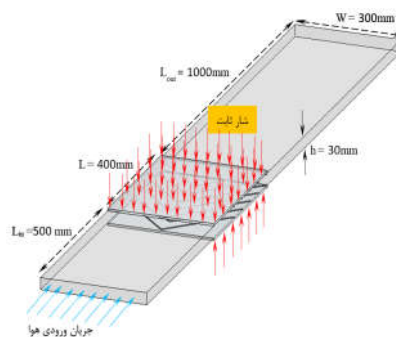
$$P = P_{atm}, \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = \frac{\partial T_f}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

برای دو صفحه گرمکن شرط مرزی گرمایی به صورت زیر می‌باشد:

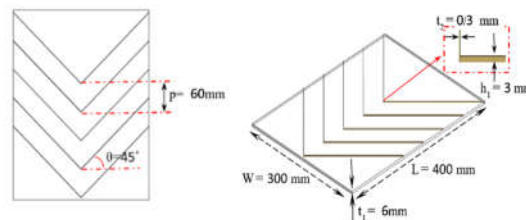
(ج) شرط مرزی گرمایی

$$q'' = 1000W / m^2 \quad (11)$$

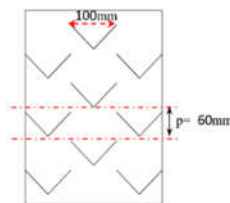
گرمکن شار ثابت به اندازه  $L=400$  میلی‌متر، طول خروجی  $1000$  میلی‌متر  $L_{out}$  میلی‌متر، عرض  $W=300$  میلی‌متر و ارتفاع  $h=30$  میلی‌متر می‌باشد که هوا با رژیم آشسته در آن جریان دارد. همچنین دو صفحه گرمکن در بالا و پایین کانال قرار دارد که طول و عرض آن‌ها به ترتیب  $L=400$  میلی‌متر و  $W=300$  میلی‌متر می‌باشد. ضخامت صفحات گرمکن و بافل‌ها به ترتیب  $t_1=6$  میلی‌متر و  $t_2=0.3$  میلی‌متر می‌باشد. زاویه بافل‌ها نسبت به راستای جریان  $45$  درجه و ارتفاع بافل‌ها  $h_1=3$  میلی‌متر است. به منظور بررسی اثر تعداد ردیف بافل بر روی جریان و انتقال گرما، تعداد یک ردیف بافل به ترتیب به سه ردیف بافل و پنج ردیف بافل در مسیر جریان هوا افزایش می‌یابد که در شکل ۲ قابل مشاهده است. همچنین عرض بافل‌ها در شکل ۲-الف)  $300$  میلی‌متر، در شکل ۲-ب)  $100$  میلی‌متر و در شکل ۲-ج)  $60$  میلی‌متر می‌باشد.



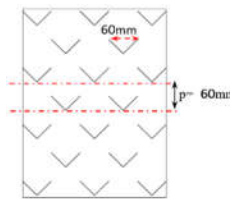
شکل ۱- نمای سه بعدی کانال گرمکن خورشیدی به همراه بافل‌های V شکل



(الف)

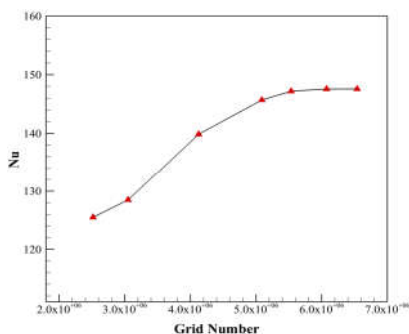


(ب)

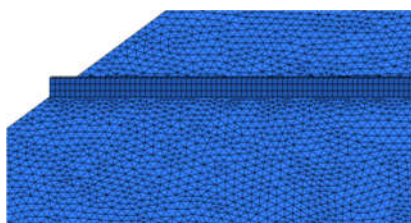


(ج)

شکل ۲- نمای سه بعدی و نمای بالا از صفحه گرمکن (الف) یک ردیف بافل (ب) سه ردیف بافل (ج) پنج ردیف بافل

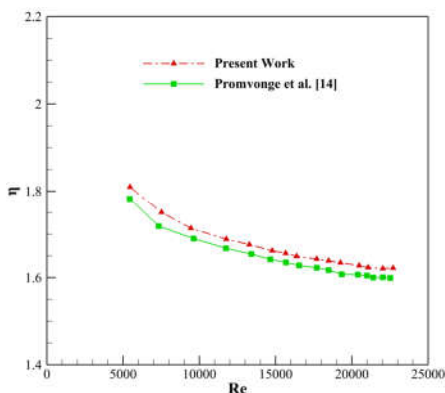


شکل ۳- نتایج استقلال از شبکه برای کانال با پنج ردیف بافل در عدد رینولدز ۱۲۰۰۰



شکل ۴- نمایی از شبکه بندی هندسه

برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از نتایج مقاله تجربی پرومونگ و همکاران [۱۴] استفاده شده است. آن‌ها یک کانال با مقطع مستطیلی با نسبت ابعادی ۱۰ و ارتفاع ۳۰ میلی‌متر را برای بافل‌های V شکل در زاویه ۶۰° در نسبت‌های انسداد مختلف بررسی قرار دادند. هوا با دمای ۳۰۰ کلوین وارد کانال می‌شود و شار ثابت  $1000 \text{ W/m}^2$  به صفحه زیرین کانال وارد می‌شود. اعداد رینولدز مورد بررسی آن‌ها بین ۵۰۰۰ تا ۲۲۰۰۰ می‌باشد. شکل ۵ مقایسه ضریب عملکرد حرارتی بر حسب عدد رینولدز در مطالعه عددی حاضر با نتایج پرومونگ و همکاران [۱۴] را نشان می‌دهد. درصد خطای متوسط بین نتایج عددی مطالعه حاضر و نتایج آزمایشگاهی پرومونگ و همکاران [۱۴] به میزان ۷٪ می‌باشد.



شکل ۵- اعتبارسنجی نتایج کار عددی حاضر با مقاله تجربی پرومونگ و همکاران [۱۸]

در دیواره‌ها شرایط مرزی به صورت زیر می‌باشد.  
(د) شرط مرزی دیواره

$$u = v = w = \frac{\partial T_s}{\partial \eta} = \frac{\partial T_f}{\partial \eta} = k = \varepsilon = 0 \quad (12)$$

### ۳-۳ پارامترهای مورد بررسی

پارامترهای خروجی که در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرند به صورت زیر تعریف و محاسبه می‌گردند [۱۵]:  
عدد رینولدز:

$$Re = \frac{\rho u_{in} D_h}{\mu} \quad (7)$$

قطر هیدرولیکی:

$$D_h = \frac{2WH}{(W + H)} \quad (8)$$

ضریب اصطکاک:

$$f = \frac{\Delta P D_h}{2 \rho L u_{in}^2} \quad (9)$$

عدد ناسلت:

$$Nu = \frac{q'' A_{heat} D_h}{A [T_w - \frac{(T_{in} + T_{out})}{2}] k_f} \quad (10)$$

ضریب عملکرد:

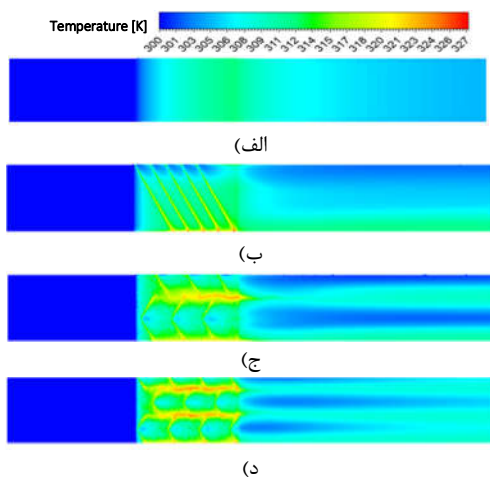
$$\eta = \left( \frac{Nu}{Nu_0} \right) \left( \frac{f}{f_0} \right)^{-1/3} \quad (11)$$

### ۳-۴ محاسبات عددی و اعتبارسنجی

شبیه‌سازی سه بعدی جریان و انتقال گرما در کانال مستطیلی به وسیله نرم‌افزار Ansys Fluent با روش حجم محدود انجام شده است. از الگوریتم SIMPLE برای کوپل فشار-سرعت و از الگوریتم بالادست مرتبه دوم برای گسسته‌سازی معادلات مومنتوم و فشار استفاده شده است. همگرایی معادلات پیوستگی و مومنتوم بر روی  $10^{-4}$  و انرژی بر روی  $10^{-6}$  تنظیم شده است. با توجه به آشفته بودن رژیم جریان، از مدل آشفته‌گی standard k-ε به دلیل همگرایی بهتر حل و نتایج دقیق‌تر در مقایسه با مقادیر آزمایشگاهی استفاده شده است.

برای به دست آوردن نتایج با دقت بالاتر استقلال از شبکه برای کانال با پنج ردیف بافل و در عدد رینولدز ۱۲۰۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد مشخص است از تعداد ۵۵۳۵۴۱۲ مش عدد ناسلت تغییر زیادی نداشته و به همین منظور مش با تعداد ۵۵۳۵۴۱۲ انتخاب شده است. همچنین نمایی از نوع مش به کار رفته در مطالعه حاضر در شکل ۴ نمایش داده شده است.

ردیف باعث افزایش سطح تماس جریان هوای عبوری در ردیف‌های پشتی شده که این امر به همراه سرعت افزایش یافته‌ی سیال باعث بهبود انتقال گرما از گرمکن به هوا می‌گردد.



شکل ۷- کانتور دما برای الف) کانال ساده ب) یک ردیف بافل ج) سه ردیف بافل د) پنج ردیف بافل

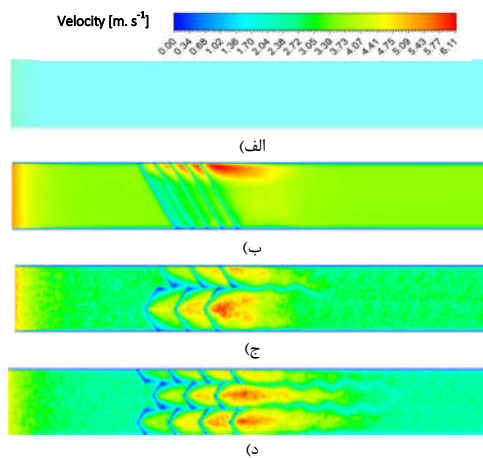
در شکل ۸ عدد ناسلت در اعداد رینولدز مختلف برای کانال ساده و کانال با یک ردیف بافل، سه ردیف بافل و پنج ردیف بافل نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد در تعداد ردیف بافل‌های مختلف با افزایش عدد رینولدز جریان، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. این امر به علت افزایش انتقال گرما بین بافل و جریان سیال و آشفته‌گی بیشتر جریان است. با افزایش تعداد ردیف بافل، جریان هوا در نواحی پشتی بافل‌ها حرکت بیشتری داشته که این امر منجر به افزایش انتقال گرما می‌گردد. هم‌چنین مشاهده می‌گردد به طور میانگین و در اعداد رینولدز متوسط، عدد ناسلت در کانال با پنج ردیف بافل بیشتر از کانال با سه ردیف و یک ردیف بافل می‌باشد. این امر به این علت است که قرار دادن بافل در مسیر جریان باعث ایجاد زاویه کمتر از ۹۰ درجه بین بردار سرعت سیال و بردار گرادیان دما می‌گردد، که این موضوع سبب ایجاد هم‌افزایی بین پدیده انتقال مومنوم و انتقال گرما می‌شود و در نهایت انتقال گرما افزایش می‌یابد. اما کمترین میزان عدد ناسلت برای کانال ساده بوده که به علت حرکت یکنواخت جریان هوا درون کانال و عدم انتقال گرما مناسب بین گرمکن و جریان است. افزایش عدد ناسلت در اعداد رینولدز میانی برای تعداد ردیف بافل سه و پنج نسبت به یک ردیف بافل به ترتیب ۱۰٪ و ۱۵٪ می‌باشد.

#### ۴- تحلیل و بررسی

در این بخش ابتدا نتایج مربوط برای کانال ساده و کانال با یک ردیف بافل، سه ردیف بافل و پنج ردیف بافل مورد بررسی قرار می‌گیرد، سپس تاثیر گام بافل‌ها و ارتفاع بافل‌ها بر عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و ضریب عملکرد حرارتی بررسی می‌گردد که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود.

##### ۴-۱- تاثیر تعداد ردیف بافل‌ها

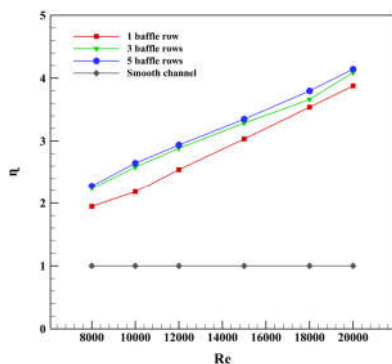
شکل ۶ نشان دهنده کانتور سرعت برای کانال ساده و کانال با یک ردیف بافل، سه ردیف بافل و پنج ردیف بافل است. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌گردد در هندسه با یک ردیف بافل، سرعت تنها در پشت ابتدای ناحیه برخورد بافل یعنی نوک آن زیاد است و در امتداد پره این سرعت کم است، اما در مقایسه با کانال ساده سرعت افزایش بیشتری دارد. با افزایش تعداد ردیف بافل و ثابت ماندن سطح انتقال گرما، سرعت در پشت بافل‌ها افزایش یافته، پهنای بیشتری از سطح کانال را در بر گرفته و در نتیجه اغتشاش جریان نیز بیشتر می‌گردد. در نهایت در هندسه با پنج ردیف بافل علاوه بر بیشتر شدن سطح افزایش یافته‌ی سرعت در عرض کانال، سرعت در طول کانال نیز افزایش یافته که در نتیجه‌ی آن در کل نواحی پشت بافل‌ها آشفته‌گی جریان افزایش یافته و به تبع آن انتقال گرما نیز افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۶- کانتور سرعت برای الف) کانال ساده ب) یک ردیف بافل ج) سه ردیف بافل د) پنج ردیف بافل

شکل ۷ نشان‌دهنده کانتور دما در ناحیه دیواره زیرین برای کانال ساده و کانال با یک ردیف بافل، سه ردیف بافل و پنج ردیف بافل است. با توجه به شکل مشاهده می‌گردد در کانال ساده دما به صورت یکنواخت از ناحیه گرمکن تا انتها تغییر می‌کند. اما در کانال با یک ردیف بافل، دما در ناحیه‌ای از کانال که بافل‌ها در آنجا وجود دارند زیاد می‌باشد. اما به علت مقاومت حرارتی بالاتر بافل‌ها به واسطه یکپارچه بودن آن‌ها میزان انتقال گرما از گرمکن به هوای عبوری کم می‌باشد. با ثابت نگه‌داشتن سطح کلی انتقال گرما بافل‌ها و تغییر در چیدمان قرارگیری، همان‌گونه که در شکل ۶ توضیح داده شد، سرعت جریان افزایش پیدا می‌کند. تقسیم بافل‌ها به تعداد سه ردیف و پنج

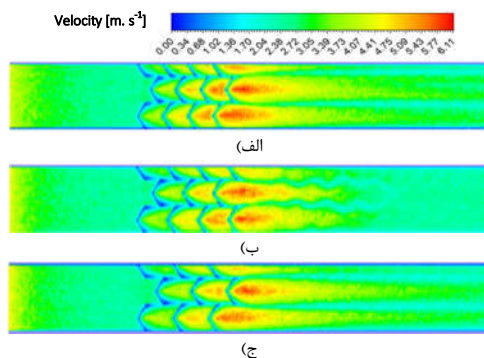
گرما افزایش می‌یابد. بنابراین انتقال گرما بیشتر شده و این امر باعث افزایش ضریب عملکرد سیستم می‌گردد. هم‌چنین با افزایش عدد رینولدز به واسطه افزایش سرعت جریان سیال ضریب عملکرد نیز افزایش پیدا می‌کند. به طور میانگین و در اعداد رینولدز متوسط افزایش ضریب عملکرد با افزایش تعداد ردیف پره از یک ردیف به سه ردیف و پنج ردیف به ترتیب ۱۱٪ و ۱۲٪ است.



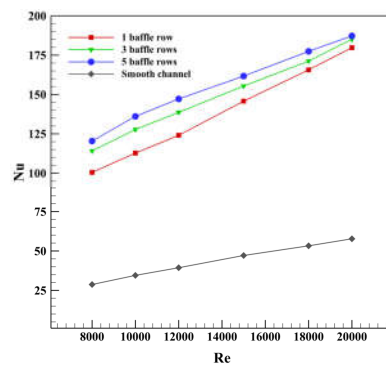
شکل ۱۰- نمودار ضریب عملکرد حرارتی بر حسب عدد رینولدز برای کانال ساده و کانال با ردیف‌های مختلف بافل

#### ۲-۴- تاثیر گام بافل‌ها

شکل ۱۱ نشان دهنده کانتور سرعت در گام‌های مختلف بررسی شده برای کانال با پنج ردیف بافل است. همانگونه که مشاهده می‌گردد، با افزایش گام بافل‌ها سرعت جریان هوا در پشت بافل‌ها کاهش پیدا می‌کند. در گام‌های کوچک‌تر به علت فاصله کم بین بافل‌ها جریان سریعاً به بافل بعدی برخورد کرده و منحرف می‌گردد، در نتیجه سرعت سریعاً افزایش پیدا می‌کند. اما با افزایش گام بین بافل‌ها سیال فضای بیشتری برای حرکت داشته و تا رسیدن به مانع بعدی زمان بیشتری نسبت به گام‌های کمتری سپری شده و در نتیجه سرعت آن کاهش پیدا می‌کند. با توجه به شکل، نواحی سرعت بالا در پشت بافل‌های انتهایی در گام ۵۰ میلی‌متر بسیار بلندتر بوده که این امر به نوبه خود باعث اغتشاش بیشتر جریان است. در نتیجه افزایش گام بافل از ۶۰ به ۷۰ میلی‌متر، باعث کاهش سرعت و کاهش گام بافل از ۶۰ به ۵۰ میلی‌متر باعث افزایش سرعت سیال و در نتیجه افزایش اغتشاش می‌گردد.

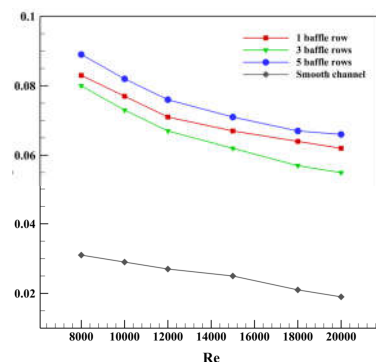


شکل ۱۱- کانتور سرعت برای کانال با پنج ردیف بافل با گام (الف) ۵۰ میلی‌متر (ب) ۶۰ میلی‌متر (ج) ۷۰ میلی‌متر



شکل ۸- نمودار عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای کانال ساده و کانال با ردیف‌های مختلف بافل

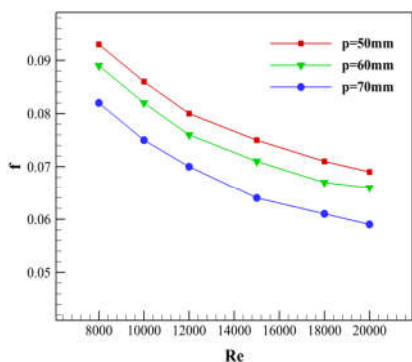
شکل ۹ نشان دهنده نمودار ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز برای کانال با یک ردیف بافل، سه ردیف بافل و پنج ردیف بافل است. همانگونه که مشخص است کانال ساده به علت حرکت یکنواخت جریان هوا دارای کمتری ضریب اصطکاک است. با افزایش عدد رینولدز به علت کاهش زمان برخورد سیال با بافل و هم‌چنین آزادی بیشتر جریان در نواحی پشتی بافل‌ها، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. هم‌چنین در بین موانع بافل‌دار کمترین ضریب اصطکاک مربوط به کانال با سه ردیف بافل می‌باشد. به دلیل این که در کانال با یک ردیف و پنج ردیف بافل انسداد جریان بیشتر می‌باشد، بنابراین ضریب اصطکاک آن‌ها هم بیشتر از کانال با سه ردیف بافل می‌باشد. به طور متوسط با افزایش تعداد ردیف بافل از یک ردیف به سه ردیف و پنج ردیف، ضریب اصطکاک به ترتیب ۹٪ کاهش و ۳٪ افزایش می‌یابد.



شکل ۹- نمودار ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز برای کانال ساده و کانال با ردیف‌های مختلف بافل

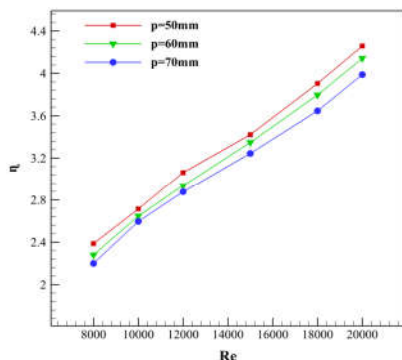
شکل ۱۰ نشان دهنده عملکرد برای کانال ساده و کانال با یک ردیف بافل، سه ردیف بافل و پنج ردیف بافل در اعداد رینولدز مختلف می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌گردد ضریب عملکرد در کانال بافل‌دار به علت افزایش اغتشاش جریان بسیار بیشتر از کانال ساده است. هم‌چنین ضریب عملکرد با افزایش تعداد ردیف بافل و افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. این امر به این علت است که با افزایش ردیف بافل‌ها سرعت جریان در نواحی پشت بافل‌ها افزایش پیدا کرده که باعث اغتشاش بیشتر جریان شده و به تبع آن انتقال

شکل ۱۴ نشان‌دهنده نمودار ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز در گام‌های مختلف در تعداد ۵ ردیف بافل است. مطابق شکل با افزایش گام بافل‌ها ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. زیرا در گام‌های کم فاصله بین بافل‌ها کم بوده بنابراین جریان سیال با سرعت بالا سریعاً با بافل‌ها برخورد داشته، اغتشاش جریان بیشتر شده و باعث افت فشار در مسیر جریان می‌گردد. اما با افزایش فاصله بین بافل‌ها جریان محدودتری برای حرکت داشته، سرعت آن کم شده و در برخورد با بافل‌ها فشار کمتری در جریان ایجاد می‌گردد. مطابق شکل، ضریب اصطکاک در گام ۵۰ میلی‌متر نسبت به ۶۰ و ۷۰ میلی‌متر به ترتیب ۳٪ و ۱۳٪ بیشتر می‌باشد.



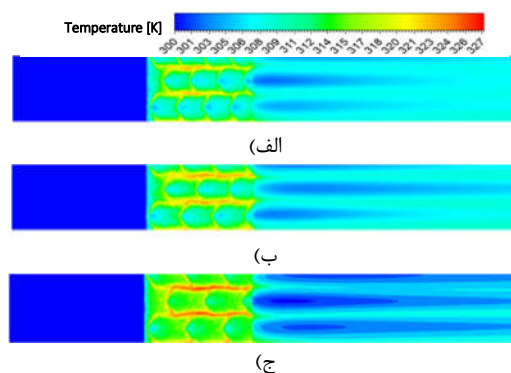
شکل ۱۴- نمودار ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز در سه گام مختلف در ۵ ردیف بافل

شکل ۱۵ نشان‌دهنده ضریب عملکرد برای سه گام متفاوت در اعداد رینولدز مختلف در ۵ ردیف بافل می‌باشد. مطابق شکل ضریب عملکرد با کاهش گام بافل‌ها افزایش و با افزایش گام بافل‌ها کاهش می‌یابد. طبق نتایج ارائه شده در شکل‌های ۱۳ و ۱۴، به دلیل این‌که با کاهش گام بافل‌ها سرعت جریان در نواحی پشت بافل‌ها افزایش پیدا می‌کند، اغتشاش جریان نیز بیشتر می‌گردد. در نتیجه انتقال گرما بیشتر شده و این امر باعث افزایش ضریب عملکرد کانال می‌گردد. در اعداد رینولدز مختلف به طور میانگین، با کاهش گام از ۶۰ به ۵۰ میلی‌متر ضریب عملکرد ۵٪ افزایش اما با افزایش گام از ۶۰ به ۷۰ میلی‌متر ضریب عملکرد ۳٪ کاهش می‌یابد.



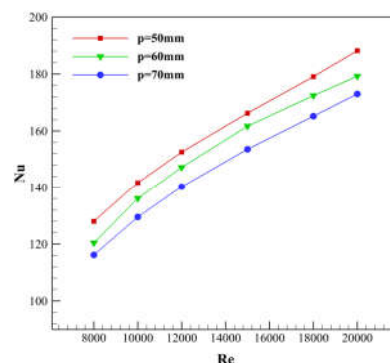
شکل ۱۵- ضریب عملکرد بر حسب عدد رینولدز در سه گام مختلف در ۵ ردیف بافل

شکل ۱۲ نشان‌دهنده کانتور دما در ناحیه دیواره کانال برای کانال با پنج ردیف بافل در گام‌های مختلف بافل می‌باشد. همانگونه که در شکل ۱۱ بحث گردید، به دلیل افزایش سرعت جریان هوا با کاهش گام بافل، در گام ۵۰ میلی‌متر انتقال گرما بیشتری بین بافل و جریان هوا اتفاق افتاده و دمای سیال مقدار بیشتری نسبت به گام‌های بیشتر خواهد داشت. اما با افزایش گام بافل‌ها سرعت سیال کاهش یافته و دمای سیال نیز به تبع آن کاهش می‌یابد که در نتیجه‌ی آن انتقال گرما نیز مقدار کمتری خواهد داشت. بنابراین بیشترین انتقال گرما از صفحات گرمکن و بافل‌ها به سیال و بیشترین دمای خروجی هوا در گام ۵۰ میلی‌متر رخ می‌دهد.



شکل ۱۲- کانتور دما برای کانال با پنج ردیف بافل با گام (الف) ۵۰ میلی‌متر (ب) ۶۰ میلی‌متر (ج) ۷۰ میلی‌متر

در شکل ۱۳ عدد ناسلت در اعداد رینولدز مختلف برای گام‌های مختلف در ۵ ردیف بافل مورد مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد عدد ناسلت در کانال با گام بافل ۵۰ میلی‌متر بیشتر از گام ۶۰ و ۷۰ میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ بحث گردید در گام‌های کوچک‌تر به علت فاصله کم بین بافل‌ها، جریان هوا سرعت بیشتری داشته که این امر باعث افزایش انتقال گرما می‌گردد. در نتیجه در گام‌های کوچک‌تر عدد ناسلت به واسطه افزایش اغتشاش جریان و افزایش انتقال گرما بیشتر می‌باشد. مطابق شکل در اعداد رینولدز مختلف، عدد ناسلت در گام ۵۰ میلی‌متر نسبت به ۶۰ و ۷۰ میلی‌متر به ترتیب ۵٪ و ۱۰٪ بیشتر می‌باشد.

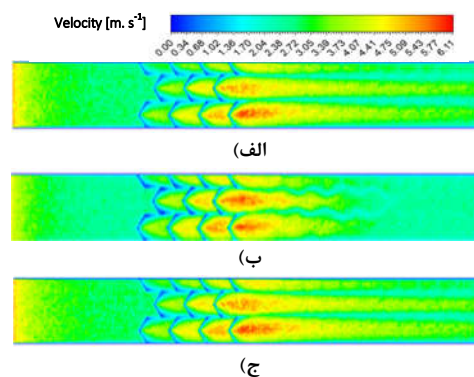


شکل ۱۳- نمودار عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در سه گام مختلف در ۵ ردیف بافل



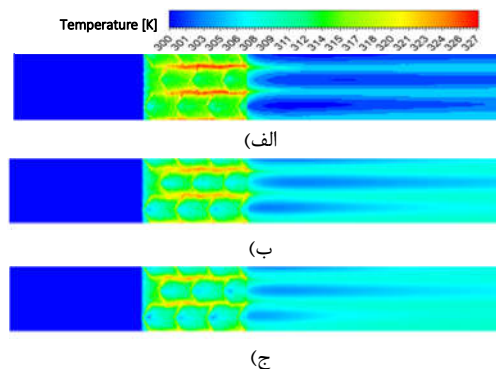
### ۳-۴- تاثیر ارتفاع بافل‌ها

برای بررسی تاثیر ارتفاع، سه مقدار مورد مطالعه قرار گرفته است، به صورتی که در نهایت با تغییر ارتفاع، سطح کلی انتقال گرما بافل‌ها ثابت باقی می‌ماند. به همین منظور ارتفاع ۲ میلی‌متر با ضخامت ۰/۴۵، ارتفاع ۳ میلی‌متر با ضخامت ۰/۳ و ارتفاع ۴ میلی‌متر با ضخامت ۰/۲۲۵ مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۶ نشان‌دهنده کانتور سرعت در ارتفاع‌های مختلف بررسی شده است. با افزایش ارتفاع بافل‌ها، سطح تماس جریان هوا با بافل افزایش می‌یابد. در نتیجه سرعت جریان هوا افزایش یافته که باعث آشفستگی بیشتر جریان و به تبع آن افزایش انتقال گرما می‌گردد.



شکل ۱۶- کانتور سرعت برای کانال با پنج ردیف بافل با ارتفاع بافل (الف) ۲ میلی‌متر (ب) ۳ میلی‌متر (ج) ۴ میلی‌متر

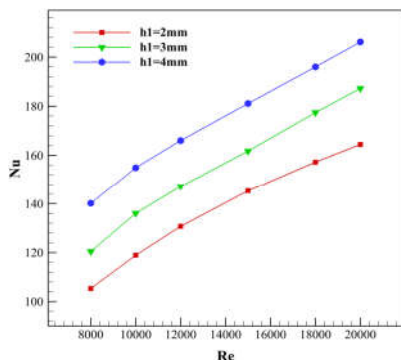
شکل ۱۷ نشان‌دهنده کانتور دما در ناحیه دیواره زیرین کانال برای ارتفاع‌های مختلف بافل می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۶ بحث گردید با افزایش ارتفاع سرعت جریان افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت باعث افزایش انتقال گرما بین بافل و جریان هوا شده و در نتیجه دمای هوای عبوری در نواحی پشت بافل‌ها و بعد از بافل‌ها افزایش خواهد یافت.



شکل ۱۷- کانتور دما برای کانال با پنج ردیف بافل با ارتفاع بافل (الف) ۲ میلی‌متر (ب) ۳ میلی‌متر (ج) ۴ میلی‌متر.

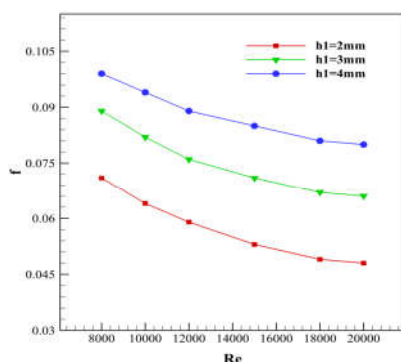
در شکل ۱۸ تغییرات عدد ناسلت بر حسب اعداد رینولدز مختلف در سه ارتفاع متفاوت نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد عدد ناسلت در کانال با ارتفاع بافل ۴ میلی‌متر بیشتر از

ارتفاع ۲ و ۳ میلی‌متر می‌باشد، به این علت که با افزایش ارتفاع بافل‌ها سرعت جریان بیشتر شده، اغتشاش بیشتر شده و به تبع آن انتقال گرما افزایش می‌یابد. به طور متوسط افزایش ارتفاع بافل‌ها از ۲ میلی‌متر به ۳ و ۴ میلی‌متر باعث افزایش ۱۰٪ و ۲۲٪ عدد ناسلت می‌شود.



شکل ۱۸- تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز برای سه ارتفاع مختلف بافل

شکل ۱۹ نشان دهنده تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز در ارتفاع‌های مختلف بافل است. همانطور که مشاهده می‌گردد در بافل با ارتفاع‌های بزرگتر به علت انسداد بیشتر جریان در گذر از بافل‌ها ضریب اصطکاک بیشتر است. اما با کاهش ارتفاع بافل، سیال با مساحت سطح کمتری از بافل برخورد کرده و در نتیجه ضریب اصطکاک کمتری خواهد داشت. به طور متوسط در اعداد رینولدز مختلف با افزایش ارتفاع از ۲ میلی‌متر به ۳ و ۴ میلی‌متر ضریب اصطکاک به ترتیب ۲۱٪ و ۲۸٪ افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۱۹- تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز برای سه ارتفاع مختلف بافل

شکل ۲۰ نشان دهنده ضریب عملکرد برای سه ارتفاع متفاوت در اعداد رینولدز مختلف است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد ضریب عملکرد با افزایش ارتفاع بافل‌ها افزایش می‌یابد، به دلیل این‌که با افزایش ارتفاع بافل‌ها سرعت جریان در نواحی پشت بافل‌ها افزایش پیدا کرده که باعث اغتشاش بیشتر جریان می‌گردد. بنابراین انتقال گرما بیشتر شده و این امر باعث افزایش ضریب عملکرد کانال می‌-



ارتفاع کانال (mm)	h
ارتفاع بافل‌ها (mm)	h <sub>1</sub>
شدت اغتشاش	I
ضریب رسانایی (W/m.K)	K
انرژی جنبشی اغتشاش	k
طول صفحه گرمکن (mm)	L
طول ناحیه ورودی (mm)	L <sub>in</sub>
طول ناحیه خروجی (mm)	L <sub>out</sub>
عدد ناسلت	Nu
فشار (Pa)	P
گام بافل‌ها (mm)	p
شار گرمایی (kW/m <sup>2</sup> )	q''
عدد رینولدز	Re
دما (K)	T
دمای دیواره (K)	T <sub>w</sub>
ضخامت صفحات گرمکن (mm)	t <sub>1</sub>
ضخامت بافل‌ها (mm)	t <sub>2</sub>
مولفه سرعت (m/s)	u, v, w
عرض کانال (mm)	W

### علائم یونانی

اتلاف جنبشی اغتشاش (J/kg.s)	ε
ضریب عملکرد حرارتی	η
زاویه بافل‌ها نسبت به راستای جریان (D)	θ
ویسکوزیته دینامیکی (N.s/m <sup>2</sup> )	μ
لزجت اغتشاش (N.s/m <sup>2</sup> )	μ <sub>t</sub>
چگالی سیال کاری (kg/m <sup>3</sup> )	ρ
ضریب اغتشاش	σ <sub>ε</sub> , σ <sub>k</sub>

### زیرنویس‌ها

سیال	f
ورودی	in
خروجی	out
جامد	S

### ۷- مراجع

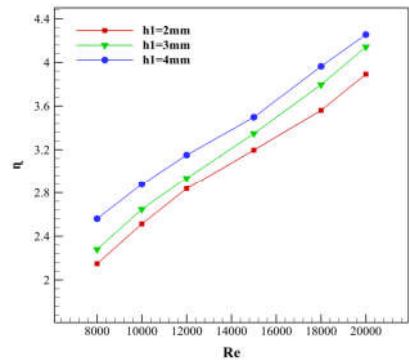
[1] Hans V.S., Saini R.P., Saini J.S., Heat transfer and friction factor correlations for a solar air heater duct roughened artificially with multiple v-ribs, *Solar Energy*, Vol. 84, pp. 898-911, 2010.

[2] جلایری قره قونلو، ع. و رضازاده س، مطالعه عددی تاثیر لوله‌های پرده‌دار طولی در مبادله‌کن گرمایی بر انتقال گرما و الگوی جریان. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د ۵۱، ش ۴، ص. ۵۸۵-۵۹۲، ۱۴۰۰.

[3] Hans V.S., Gill R.S., Singh S., Heat transfer and friction factor correlations for a solar air heater duct roughened artificially with broken arc ribs, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 80, pp. 77-89, 2017.

[4] Sripattanapipat S., Promvong P., Numerical analysis of laminar heat transfer in a channel with diamond-shaped baffles, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 32-38, 2009.

گردد. به طور متوسط با افزایش ارتفاع بافل از ۲ میلی‌متر به ۳ و ۴ میلی‌متر ضریب عملکرد به ترتیب ۴٪ و ۱۴٪ افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۲۰- ضریب عملکرد بر حسب عدد رینولدز برای سه ارتفاع مختلف بافل

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه جریان آشفته در یک کانال با مقطع مستطیلی با بافل‌های V شکل مورد بررسی قرار گرفته است. دمای هوای ورودی ۳۰۰ کلوین بوده و شار ثابت ۱۰۰۰ W/m<sup>2</sup> به دو صفحه گرمکن کانال وارد می‌شود. تأثیر پارامترهای مختلف از جمله تعداد ردیف بافل‌ها، گام بافل‌ها و ارتفاع بافل‌ها در عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و ضریب عملکرد حرارتی مطالعه شد که نتایج نشان می‌دهد:

- با افزایش تعداد ردیف بافل‌ها از یک به سه و پنج سرعت جریان هوا در اطراف بافل‌ها افزایش یافته و به تبع آن انتقال گرما بیشتر می‌گردد. با افزایش تعداد ردیف بافل از یک ردیف به سه ردیف و پنج ردیف به طور میانگین ضریب عملکرد به ترتیب ۱۱٪ و ۱۲٪ افزایش می‌یابد.
- در تعداد ردیف بافل ثابت با افزایش گام، فاصله بین بافل‌ها افزایش پیدا می‌کند که به تبع آن سرعت هوای عبوری کاهش می‌یابد. در نتیجه انتقال گرما و ضریب عملکرد نیز کاهش خواهد یافت.
- در تعداد ردیف بافل ثابت و گام ثابت، افزایش ارتفاع بافل، با ثابت نگه داشتن سطح انتقال گرمای آن، باعث افزایش سرعت هوای عبوری خواهد شد و در نتیجه انتقال گرما افزایش پیدا می‌کند.

### ۶- فهرست علائم

#### علائم لاتین

A	ناحیه برخورد سیال و جسم جامد (mm <sup>2</sup> )
A <sub>heat</sub>	ناحیه گرم شده (mm <sup>2</sup> )
C <sub>1ε</sub> , C <sub>2ε</sub> , C <sub>μ</sub>	ضریب مدل اغتشاش
C <sub>p</sub>	گرمای ویژه (J/kg.K)
D <sub>h</sub>	قطر هیدرولیکی (mm)
f	ضریب اصطکاک

- experimental study of the heat transfer and hydraulic performance of solar air heaters with different baffle positions, *Renewable Energy*, Vol. 155 pp. 1231-1244, 2020.
- [22] Promvong P., Skullong S., Augmented heat transfer in tubular heat exchanger fitted with V-baffled tapes, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 155, pp.106429, 2020.
- [5] Priyam A., Chand P., Thermal and thermohydraulic performance of wavy finned absorber solar air heater, *Solar Energy*, Vol. 130, pp. 250-259, 2016.
- [6] Kumar K., Prajapati D.R., Samir S., Heat Transfer and Friction Factor Correlations Development for Solar Air Heater Duct Artificially Roughened with 'S' Shape Ribs, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 82, pp. 249-261, 2017.
- [۷] دهقانی راینی ع، گنجعلیخان نسب، س. ع، شبیه‌سازی عددی هواگرمکن های خورشیدی صفحه ای با در نظر گرفتن اثرات تابش گاز مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د ۵۱، ش ۲، ص ۷۲-۶۷، ۱۴۰۰.
- [8] Wang L., Wang S., Wen F., Zhou X., Wang Z., Heat transfer and flow characteristics of U-shaped cooling channels with novel wavy ribs under stationary and rotating conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 126, pp. 312-333, 2018.
- [9] Promvong P., Changcharoen W., Kwankaomeng S., Thianpong C., Numerical heat transfer study of turbulent square-duct flow through inline V-shaped discrete ribs, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 1392-1399, 2011.
- [10] Tongyote P., Promvong P., Skullong S., Thermal behaviors in heat exchanger channel with V-shaped ribs and grooves, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 150, pp. 263-273, 2019.
- [11] Mohammadi K., Sabspooshani M., Comprehensive performance evaluation and parametric studies of single pass solar air heater with fins and baffles attached over the absorber plate, *Energy*, Vol. 57, pp. 741-750, 2013.
- [12] Ho C.D., Chang H., Wang R.C., Lin C.S., Performance improvement of a double-pass solar air heater with fins and baffles under recycling operation, *Applied Energy* 100, pp. 155-163, 2012.
- [13] Kwankaomeng S., Promvong P., Numerical prediction on laminar heat transfer in square duct with 30° angled baffle on one wall, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 857-866, 2010.
- [14] Promvong P., Jedsadaratan-Achai W., Kwankaomeng S., Numerical study of laminar flow and heat transfer in square channel with 30° inline angled baffle turbulators, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, pp. 1292-1303, 2010.
- [15] Jheng-Long L., Hsiang-Wen T., Yang Y.T., Numerical simulation and thermal performance optimization of turbulent flow in a channel with multi-V-shaped baffles, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 92, pp. 39-50, 2018.
- [۱۶] اتحاد ا. و الهامی امیری ع، بررسی عددی تاثیر هندسه بلوک‌های متخلخل بر افزایش انتقال گرمای جابجایی و افت فشار در جریان نانوسیال درون کانال‌ها، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د ۵۱، ش ۴، ص ۳۱-۴۰، ۱۴۰۰.
- [۱۷] فرشاد س.ع. و شیخالاسلامی م، بررسی عددی افزایش انتقال گرما نانوسیال در گردآورنده خورشیدی صفحه تخت با قرار دادن نوار پیچشی چند کاناله در داخل لوله، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د ۵۰، ش ۴، ص ۱۴۱-۱۴۹، ۱۳۹۹.
- [۱۸] میرزاپور م. و بیاتی م، بررسی عددی تأثیر تعداد پره بر نرخ افزایش انتقال گرمای داخل کانال در حضور سیال غیرنیوتنی، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د ۵۰، ش ۳، ص ۲۳۹-۲۴۸، ۱۳۹۹.
- [۱۹] ودیعی ر. و رستم‌زاده خسروشاهی ع، افزایش بازده گرمایی هواگرمکن‌های خورشیدی با استفاده از شیارهای عرضی و تعیین آرایش بهینه شیارها، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، د ۵۰، ش ۱، ص ۲۵۹-۲۶۷، ۱۳۹۹.
- [20] aravanakumar, P.T., Somasundaram, D., Matheswaran, M.M., Exergetic investigation and optimization of Arc Shaped Rib Roughened Solar Air Heater Integrated with Fins and Baffles, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 175, pp. 115316, 2020.
- [21] Bensaci C-E, Moumimi A, Sanchez F.J., Rodriguez J. EA, Rincon-Casado A., Ruiz-Pardo A., Numerical and