Mechanics of Advanced and Smart Materials Journal

http://masm.araku.ac.ir

ISSN: 2783-4220

Investigation, sensitivity analysis and optimization of effective parameters of roughness geometry of absorber plates of solar air heaters with repeating V-shaped geometry on Nusselt number

Saeed Tahmasbi [a*], Abdolreza Moghadassi [b], Hamed Safikhani [a]

[a] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.
[a] Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran.

Original Article

Use your device to scan and read the article online

Citation: Jalilian T H, Ghafouri A. Numerical Investigation of the Effect of Linear, Parabolic, and Radial Fin Geometries on the Melting Performance of RT35 Phase Change Material in a Triple-Tube Heat Exchanger. Mechanics of Advanced and Smart Materials. 2026;5(4):482-503.

10.66224/masm.2026.2087180.1186

KEYWORDS

Solar air heaters,
Sensitivity analysis,
Absorber plate geometry,
Artificial roughness.

ABSTRACT

Solar air heaters are widely used to save energy, especially in cases where high temperatures are not required. Among its applications are space heating, water desalination, and drying a range of products, including marine products that are used continuously. Since the thermal efficiency of solar air heaters is low, most research in investigating the types of roughness in terms of shape, size, and orientation concerning the flow direction tries to achieve an optimal arrangement and geometry of the roughness.

This article attempts to make the Nusselt number in a rectangular channel with artificial roughness and a V-shaped arrangement repeatable.

In addition, this air heater and the method of changing the parameters are investigated and optimized to the geometry of the roughness and operating parameters.

In this article, while examining solar air heaters and the roughness geometry of their absorber plates, a systematic analysis using statistical modeling method, Sobel sensitivity analysis, for important process input parameters including Reynolds number, relative groove height, relative groove pitch and angle of incidence in the geometry of artificial roughness of the absorber plate of the solar air heater, has been carried out on the behavior of the Nusselt number output responses. This article also discusses single-objective optimization to achieve the highest Nusselt number using the Deringer statistical algorithm.

Extended Abstract

1. Introduction

Energy as one of the most significant elements of the development of society has great importance. With the end of fossil fuels such as oil and gas, humanity must try to replace them with new energies and use non-fossil fuels [1]. It can be said that the main source of the most different forms of energy is the sun. The sun creates its energy in a thermonuclear process by converting about six hundred and fifty million tons of hydrogen into helium gas per second.

This process produces heat and electromagnetic radiation. The heat from this process stays in the sun and helps to continue this thermonuclear reaction. Electromagnetic waves in the infrared, visible light, and ultraviolet ranges are emitted in space in different directions. Only a small part of this electromagnetic radiation reaches the earth. In other words, this electromagnetic radiation is indirectly the source of almost all types of energy used today.

* Corresponding author.
E-mail address: saeid.tahmasbi6800@gmail.com
DOI: 10.66224/masm.2026.2087180.1186
Received: April 29, 2026; Received in revised form: September 04, 2026; Accepted: September 18, 2026.
© Author

Among various energy sources, solar energy is an accessible, very low-cost, clean and pollution-free source. And considering the long-term nature of this energy source, it can be called the brightest energy. Roughening (artificial roughness) is generally used to enhance heat transfer by a forced convection mechanism that requires turbulent flow on the heat transfer surface.

In short, roughening or artificial roughness is used to enhance heat transfer and consequently improve thermo-hydraulic performance, [2].

Solar air heaters are a system that, while absorbing thermal energy from the sun, heats the air, which is the working fluid. Solar air heaters are widely used to save energy, especially in cases where low temperatures are required. Among its applications are space heating, water desalination, and drying of a range of products, including marine products that are used continuously.

Solar heaters have many advantages compared to liquid-based heaters. Because the absence of liquids eliminates problems such as freezing, leakage, and personal and environmental risks in the environment where heat transfer takes place [3].

The general structure of solar air heaters mainly consists of an air flow channel and an absorber plate. To minimize heat loss, thermal insulation with low thermal conductivity is used to cover the bottom and side walls. The upper part of the air heater is also covered with a glass cover with high transmission and low absorption. This glass coating is usually used as a single or double layer. Due to the wide range of solar air heaters in different experimental shapes and structures, it is not easy to classify them. Norton and Akuchiba conducted a detailed study on the different designs, construction and operating principles of a wide range of solar air heaters for drying purposes. Research has been conducted on the classification of air heaters. In general, solar air heaters can be classified into three models based on the model: active, passive, and combined [4].

Various methods have been investigated to improve the performance of solar air heaters and to increase the heat transfer in solar heaters. Using fins (expanded surfaces), heat storage materials, increasing surface roughness, which has a great impact on the performance of air heaters, are among these methods. Creating roughness (artificial roughness) is generally used to increase heat transfer by a forced convection mechanism that requires turbulent flow on the heat transfer surface.

In summary, to increase heat transfer and consequently improve thermo-hydraulic performance, creating roughness or artificial roughness is used. An example of created roughness can be seen in Figure [5].



Figure 1. Sample of generated roughness

Akpinar and Koygit studied the performance of solar air heaters based on the type of their absorber plate and examined four types of absorber plates in triangular, serrated, rectangular, and flat shapes [6].

Bayrak et al. also studied the performance of five types of solar air heaters using baffles made of aluminum synthetic foams.

The baffles were placed on the absorber plate in two irregular and regular positions [7].

Paisaran presented a mathematical model to predict the effects of height and number of fins on the heat transfer characteristics, performance and entropy production of a two-pass air heater with longitudinal fins.

The results showed that with increasing height and number of fins, efficiency increases, and entropy production is proportional to the number and height of fins. The effect of air mass flow rate was not considered in this model [8].

Bagouri et al. designed a solar air heater using CFD, in which equilateral triangular grooves were used on the absorber plate to create roughness [9].

This study is related to the effect of three parameters on the thermal hydraulic performance of the air heater with roughness, which include: relative roughness area, relative roughness height, and Reynolds number.

Their research results showed that the average Nusselt number tends to increase with the increasing number of Reynolds in all cases, but the friction factor decreases on average. On the other hand, the average Nusselt number decreases with increasing relative roughness pitch at a constant value of relative roughness height and increases with increasing relative roughness height at a constant value of relative roughness pitch.

Langour et al. have experimentally studied the effect of using W-shaped grooves on heat transfer, friction characteristics, and thermal-hydraulic performance.

The absorber plate had a relative pitch of 10, a roughness height of 0.018, a channel aspect ratio of 8, a rib height of 0.8 mm, and an impact angle in the range of 30–60°. Compared to the flat channel without roughness, the increase in Nusselt number was 32–92%, 31–81%, and 9–56% for 60°, 45°, and 30°, respectively. Similarly, the friction ratios were 1.57–1.39, 1.32–1.43, respectively. The best performance was obtained at an impact angle of 60° [10].

As can be seen, researchers have different opinions about the geometry of roughness and the degree of influence of each parameter affecting the Nusselt number.

In this article, for the first time, using statistical mathematical modeling, while presenting a second-order linear regression equation, the precise behavior of the geometric parameters of solar air heaters in the behavior of the Nusselt number responses of the absorber plates has been investigated.

In this research, using single-objective statistical optimization, the quantitative effect of each of the geometric input parameters of solar air heaters on the most important output responses has been studied.

2. Modeling

2.1. Experimental conditions

The article Reynolds number (Re), relative pitch (P/e), relative elevation (e/D), relative width (W/w), and angle of incidence (α) are variables that are considered as input factors to investigate the behavior of the Nusselt number in the studied roughness geometry.

Because the changes in the Nusselt number according to the formulas related to the geometry in question have a strong dependence on the mentioned variables.

Also, the value of the Nusselt number (Nu) has been investigated and analyzed as the output response.

In this problem, an attempt is made to achieve a ideal state of the geometry that includes the highest amount of the Nusselt number.

In this study, by examining the types of grooves, it was concluded that inclined grooves increase the heat transfer rate more than horizontal grooves.

What can be obtained from the total work done in this field is that the use of diagonal and V-shaped roughness can increase heat transfer while keeping the friction coefficient low. Based on the research conducted and the articles mentioned in this study, the use of V-shaped grooves helps to increase the heat transfer rate compared to simply inclined blades.

Diagonal blades improve the heat transfer coefficient by creating turbulence in the flow and producing vortices upstream and downstream of the blade by directing the vortices along the blade and creating a strong secondary flow.

V-shaping the blades helps to strengthen this by creating two secondary flows and increasing the heat transfer rate compared to simply inclined blades. The use of V-shaped blades in a repetitive manner across the width of the plate will improve the heat transfer rate by increasing the number of secondary flows.

Therefore, the geometric arrangement studied in this study is V-shaped blades that are placed repetitively or multiply across the width of the plate.

A view of the geometry can be seen in the figure below.

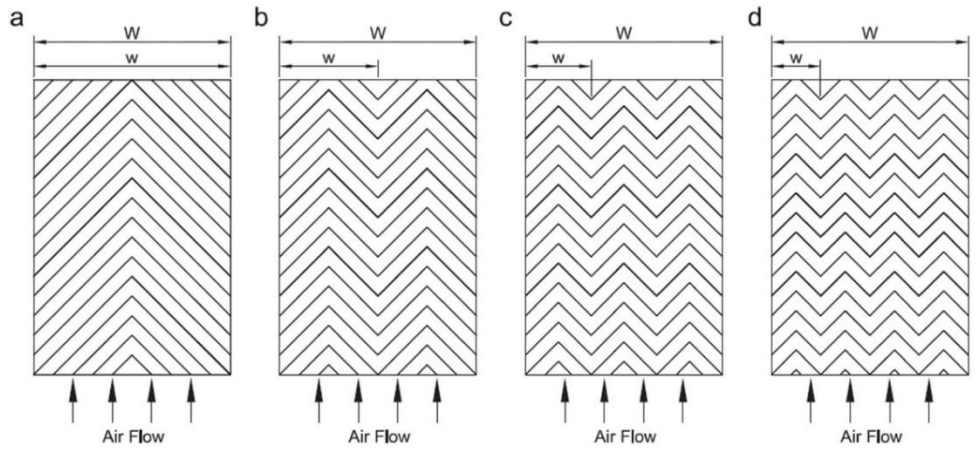


Figure 2. View of the roughness geometry of the solar air heater absorber plate with multiple V-shaped arrangement [11]

2.2. Analysis

In this study, considering the Reynolds number, relative pitch, relative height and angle of incidence as input variables, it has been modeled according to the number and response surface method and in the form of second-order linear regression equations.

The amount of the sum of squares error of the model fitted to the data figures out the accuracy of the type of regression equation governing the model and is significant in the design of experiments.

Considering the lowest amount of the sum of squares error for the second-order linear model equal to 130278, the second-order linear regression equation governing the process temperature is in the form of equation (1):

$$\begin{aligned} Nu = {} & -343.21 + 0.007379\ Re + 1804\ e/D + 9.979\ W/w + 2.598\ a + 53.595\ P/e - 0.000000\ Re*Re \\ & - 6960\ e/D*e/D - 0.9578\ W/w*W/w - 0.021137\ a*a - 2.8724\ P/e*P/e + 0.25903\ Re*e/D \\ & + 0.000230\ Re*W/w - 0.000053\ Re*a - 0.000312\ Re*P/e + 62.16\ e/D*W/w - 15.97\ e/D*a \\ & - 75.19\ e/D*P/e - 0.00780\ W/w*a - 0.1164\ W/w*P/e + 0.01600\ a*P/e \end{aligned} \quad (1)$$

3. Results

3.1. Effect of the Reynolds number on the Nusselt number

According to the graphs in Figure 3, by increasing Reynolds number, the amount of turbulence in the flow increases, which causes an increase in the Nusselt number. In addition, increasing the velocity or hydraulic diameter will cause an increase in the Nusselt.

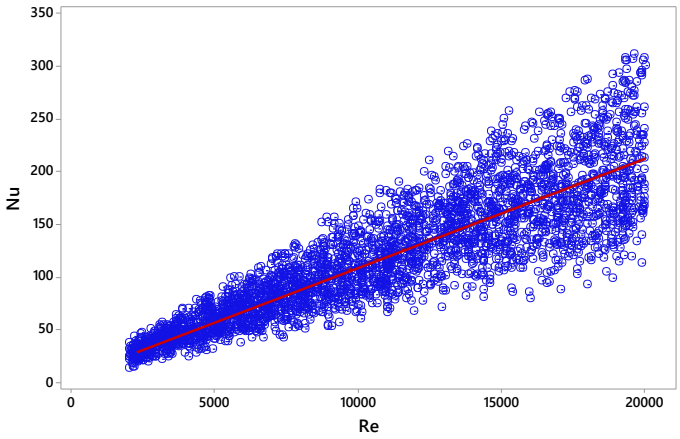


Figure 3 .Effect of Reynolds number on Nusselt number

3.2. Effect of relative roughness height on the Nusselt number

The graphs in Figure 4 show that by increasing the relative height, the Nusselt number increases.

As the relative height increases, the amount of turbulence in the flow boosts, which causes the Nusselt number to increase.

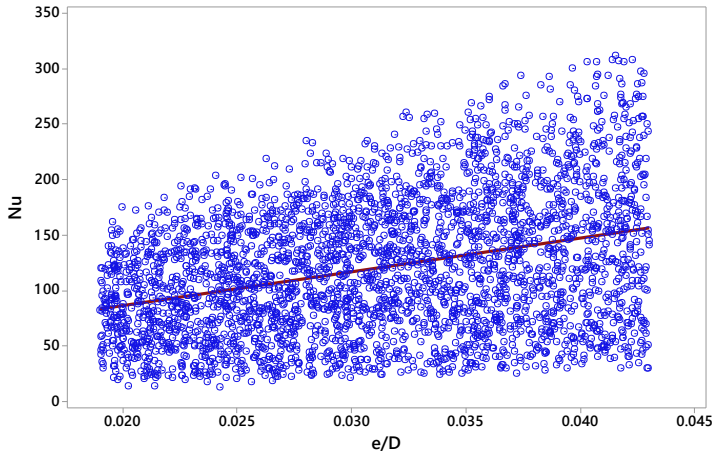


Figure 4. Effect of relative roughness height on the Nusselt number

3.3. Effect of relative roughness width on Nusselt number

The results of Figure 5 show that the best case is for a relative width close to 7.

From a relative width of 1 to approximately 7, the Nusselt number increases and then decreases again. Therefore, an excessive rise in relative width will decline heat transfer.

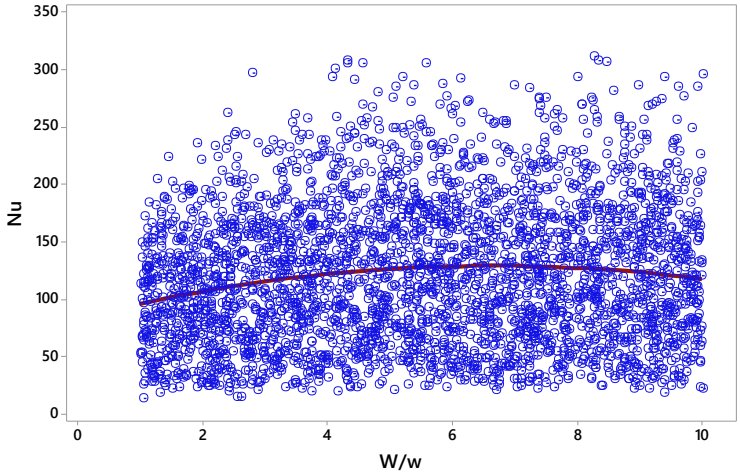


Figure 5. Effect of relative roughness width on Nusselt number

3.4. Effect of angle of incidence on Nusselt number

Figure 6 shows that the optimal angle is close to 40 degrees. As the angle moves away from this value, the Nusselt number decreases.

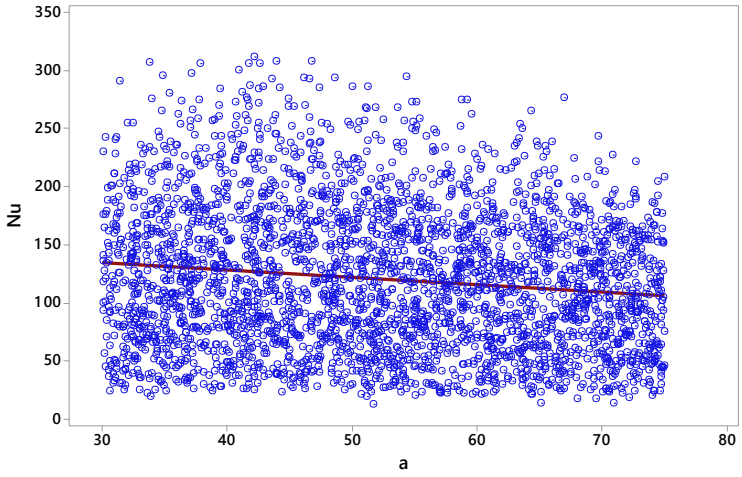


Figure 6. Effect of angle of incidence on Nusselt number

3.5. Effect of relative pitch on Nusselt number

As can be seen in Figure 7, the relative pitch has a significant effect on the Nusselt number. The results show that the best relative pitch for increasing the Nusselt number is 8. By decreasing the pitch, the flow reconnection will not be possible, which will diminish heat transfer.

On the other hand, increasing the pitch excessively will lead to the re-formation of the laminar sublayer in a large part of the flow.

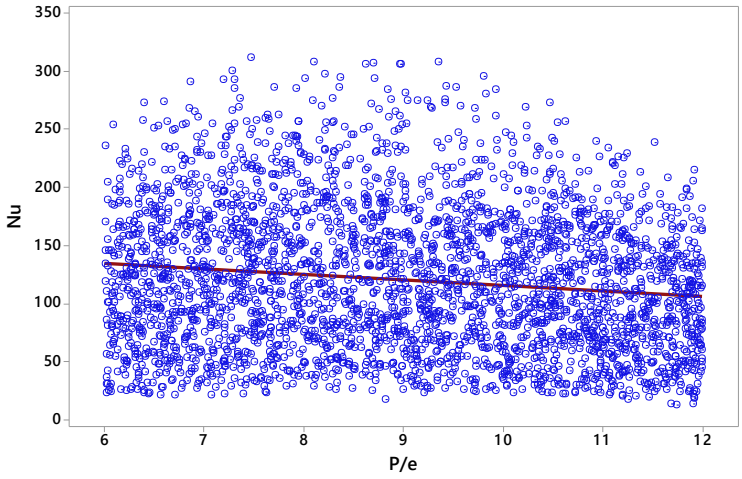


Figure 7. Effect of relative pitch on Nusselt number

3.6. Results of parameter sensitivity analysis

Figure 7 shows the results of the sensitivity analysis of parameters using the Sobel method, and the accuracy of the results obtained is also confirmed.

The results show that among the input parameters, according to the percentages obtained from the Sobel statistical sensitivity analysis method and using the Simlab software, which changes the input parameters simultaneously with the Sobel sensitivity analysis algorithm and examines its effect on the output parameter.

In general, in examining the sensitivity of the Nusselt number behavior in this process, the Reynolds number (Re) is 75.9%, the relative height (e/D) is 14.4%, the relative pitch (P/e) is 1.4%, the angle of incidence (α) is 1.3%, and the relative width (W/w) is 2.6%.

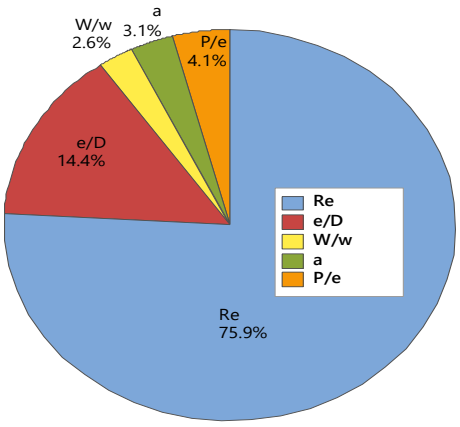


Figure 7. The percentage effect of input parameters on the Nusselt number

3.7. Single-objective Nusselt number optimization using Deringer algorithm.

In this section, Considering the issues raised in the analysis of process input parameters, single-objective optimization of the process has been conducted to achieve the maximum value in the process using the Deringer statistical algorithm. Considering the largest limit of the model adapted to the process and considering the utility limit of 1, the result obtained from the optimization is presented in Figure 8:

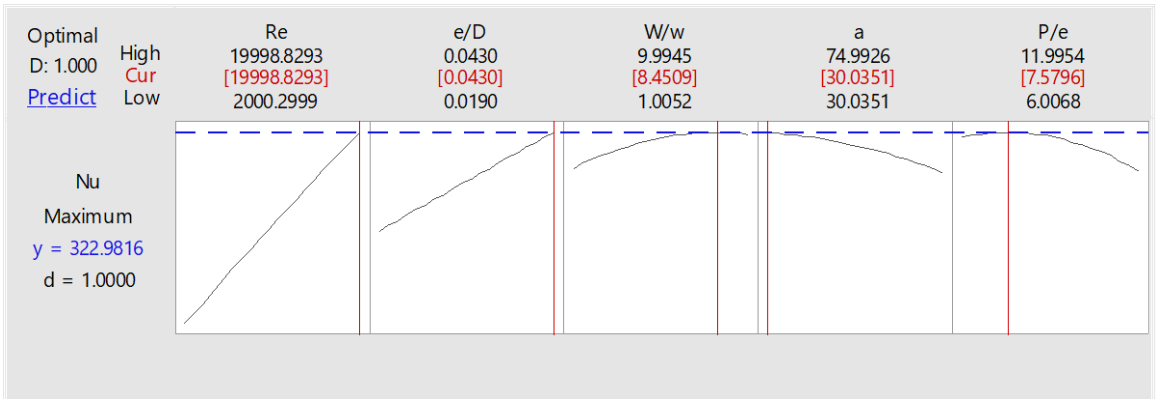


Figure 8. Optimization performed to achieve maximum Nusselt number (statistical modeling)

5. Conclusion

In this paper, solar air heaters were introduced and studied in terms of structure and performance. The effect of various parameters, including Reynolds number, relative width, relative pitch, angle of attack, and relative height, was studied.

The main purpose of this paper is single-objective optimization of the effective parameters on the roughness geometry of the absorber plates to increase the efficiency of solar air heaters. In this research, for the first time, statistical mathematical modeling has been used, while presenting a second-order linear regression equation, the precise behavior of the geometric parameters of solar air heaters in the response behavior of the Nusselt number of the absorber plates was investigated.

In this research, using the statistical optimization method and multi-objective optimization, a method for achieving the best geometry of the absorbed plates was presented for the first time. Sobel sensitivity analysis was presented for the first time to quantitatively figure out the effect of changes in each of the input parameters on the input changes. Furthermore, we consider that inclined grooves increase the heat transfer rate more than horizontal grooves. Also, using V-shaped grooves helps to increase the heat transfer rate compared to inclined blades. Considering that using V-shaped grooves repeatedly across the width of the plate will improve the heat transfer rate by increasing the number of secondary flows many times.

Therefore, the geometry under study and optimization of V-shaped grooves repeatedly across the width of the plate was selected. Next, using the design of experiments method, mathematical modeling, and the Sobel sensitivity analysis method, the effect of each of the important geometric and non-geometric parameters of the air heater on the behavior of the problem responses, including the Reynolds number and the friction coefficient, was carefully examined. Also, using the Sobel statistical sensitivity analysis method, the quantitative effect of each of the input parameters of the problem on the responses was presented. Also, using the neural network method and the Deringer algorithm, multi-objective optimization was performed on the behavior of the parameters, and its results were presented in detail.

The detailed experimental analysis was carried out using the design of experiments method, statistical modeling, and process sensitivity analysis, important input parameters including Reynolds number, relative groove height, relative groove pitch, and angle of incidence in the geometry of artificial irregularities of the solar air heater absorber plate on the behavior of the Nusselt number output response was carried out.

In this research, single-objective and multi-objective optimization was also conducted to achieve the highest value of the Nusselt number using the Deringer statistical algorithm. Utilizing Sobel analysis, in examining the sensitivity of the effective parameters in examining the sensitivity of the Nusselt number in this process, Reynolds number (Re) 9.75%, relative elevation (e/D) 4.14%, relative pitch (P/e) 1.4%, angle of incidence (α) 1.3% and relative width (W/w) 6.2%. Also, the highest Nusselt number was obtained at the highest Reynolds number (20,000), the highest relative height (0.043), the lowest angle of attack (30 degrees), and the ideal relative width was 8.45 and the relative pitch was 7.58.

مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند
مجله علمی مکانیک مواد پیشرفته و هوشمند
شاپا: ۴۲۲۰-۲۷۸۳
۱۳۵۰

بررسی، تحلیل حساسیت و بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر هندسه زبری صفحات جاذب هواگرمکن‌های خورشیدی با هندسه v شکل تکرار شونده بر روی عدد ناسلت

سعید طهماسبی [الف*]، عبدالرضا مقدسی [ب]، حامد صفی‌خانی [ج]

[الف] کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، saeid.tahmasbi6800@gmail.com
[ب] استاد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، a-moghadassi@araku.ac.ir
[ج] استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران، h-safikhani@araku.ac.ir

واژگان کلیدی

هواگرمکن‌های خورشیدی، تحلیل حساسیت، هندسه صفحه جاذب، ناهمواری مصنوعی.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۹
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۷

چکیده

هواگرمکن‌های خورشیدی در محدوده وسیعی برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی به‌ویژه در مواردی که به دماهای زیادی نیاز نیست، استفاده می‌شوند. ازجمله کاربردهای آن می‌توان به گرمایش فضا، شیرین سازی آب و خشک‌کردن طیفی از محصولات؛ ازجمله محصول‌های دریایی که به طور مستمر مورد استفاده قرار می‌گیرد نام برد. ازآنجایی‌که بازدهی حرارتی هواگرمکن‌های خورشیدی پایین می‌باشد، لذا عمده تحقیقات در بررسی انواع زبری‌ها ازنظر شکل، اندازه و جهت‌گیری با توجه به جهت جریان سعی در رسیدن به یک آرایش و هندسه بهینه از زبری‌ها را دارند.

در این مقاله سعی گردیده تا مقدار عدد ناسلت در کانال مستطیلی شکل و دارای زبری مصنوعی با آرایش v شکل به‌صورت تکرار شونده یک هواگرم‌کن و نحوه تغییر این پارامترها با توجه به هندسه زبری‌ها و پارامترهای عملیاتی مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گیرد، در این مقاله ضمن بررسی هواگرمکن‌های خورشیدی و هندسه زبری صفحات جاذب آن‌ها، یک تحلیل روشمند با بهره‌گیری از روش مدل‌سازی آماری، تحلیل حساسیت سوبل با توجه به پارامترهای مهم ورودی فرایند شامل عدد رینولدز، ارتفاع نسبی شیار، گام نسبی شیار و زاویه برخورد در هندسه ناهمواری‌های مصنوعی صفحه جاذب هواگرمکن خورشیدی بر روی رفتار پاسخ‌های خروجی عدد ناسلت صورت پذیرفته است.در این مقاله همچنین از بهینه‌سازی تک هدفه به‌منظور دستیابی به بیشترین مقدار عدد ناسلت به روش الگوریتم آماری درینگر پرداخته شده است.

۱- مقدمه

انرژی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عناصر پیشرفت جامعه از اهمیت بسزایی برخوردار است. با به پایان رسیدن سوخت‌های فصیلی نظیر نفت و گاز، بشر می‌بایست تمام سعی خود را به‌منظور جایگزین نمودن انرژی‌های نو و بهره‌گیری از سوخت‌های غیر فسیلی به کار بندد [۱]. می‌توان گفت منبع اصلی اکثر صورت‌های مختلف انرژی خورشید است. خورشید انرژی خود را در یک فرآیند ترموهسته‌ای با تبدیل حدود ششصد و پنجاه میلیون تن هیدروژن در هر ثانیه به گاز هلیوم به وجود می‌آورد. این فرآیند، حرارت و تشعشعات الکترومغناطیس تولید می‌کند. گرمای حاصل از این فرآیند در خورشید باقی مانده و به ادامه این واکنش ترموهسته‌ایی کمک می‌نماید. امواج الکترومغناطیسی در محدوده فروسرخ، نور مرئی و فرابنفش در جهات مختلف در فضا منتشر

* نویسنده مسئول؛
آدرس پست الکترونیک: saeid.tahmasbi6800@gmail.com

می‌شود. بدیهی است تنها قسمت اندکی از این تابش الکترومغناطیس به زمین می‌رسد. به عبارتی این تابش الکترومغناطیس به‌طور غیرمستقیم منبع قریب به اتفاق همه انواع انرژی مورد استفاده کنونی است. در بین منابع گوناگون انرژی، انرژی خورشیدی یک منبع قابل‌دسترس، بسیار کم‌هزینه، پاک و بدون آلودگی می‌باشد. و با توجه به بلندمدت بودن این منبع انرژی می‌توان آن را به‌عنوان درخشان‌ترین انرژی نام برد. ایجاد کردن زبری (ناهمواری مصنوعی) به‌طورکلی برای افزایش انتقال حرارت با مکانیزم جابجایی اجباری که به جریان آشفته در سطح انتقال حرارت نیاز دارد استفاده می‌شود. به‌طور خلاصه برای افزایش انتقال حرارت و درنتیجه بهبود عملکرد حرارتی-هیدرولیکی از ایجاد ناهمواری یا همان زبری مصنوعی استفاده می‌شود، [۲]. هواگرمکن خورشیدی سیستمی است که در عین جذب انرژی حرارتی از خورشید، باعث گرم کردن هوا که سیال عامل است، می‌شود. هواگرمکن‌های خورشیدی در محدوده وسیعی برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی به‌ویژه در مواردی که به دماهای نه‌چندان زیاد نیاز است استفاده می‌شود. ازجمله کاربردهای آن می‌توان به گرمایش فضا، شیرین سازی آب و خشک‌کردن طیفی از محصولات؛ ازجمله محصول‌های دریایی که به‌طور مستمر مورد استفاده قرار می‌گیرد نام برد. گرم‌کن‌های خورشیدی مزایای بسیاری در مقایسه با گرم‌کن‌هایی که بر مبنا وجود مایعات در آن‌ها ساخته‌شده‌اند دارا می‌باشند. زیرا به دلیل عاری بودن از مایعات مشکلاتی مثل یخزدگی، نشتی و خطرات فردی و محیط زیستی را در محیطی که انتقال حرارت صورت می‌پذیرد را از بین می‌برد [۳]. ساختار کلی هواگرم کن‌های خورشیدی عمدتاً از کانال جریان هوا و صفحه جاذب تشکیل‌شده‌اند. برای به حداقل رساندن تلفات گرما از عایق حرارتی با هدایت حرارتی کم به‌منظور پوشاندن دیوارهای پایینی و دیوارهای جانبی استفاده می‌شود. قسمت بالایی هواگرمکن هم با یک پوشش شیشه‌ایی با قابلیت انتقال بالا و جذب کم پوشانده می‌شود. که این پوشش شیشه‌ایی معمولاً به‌صورت تک لایه و یا دولایه به کار می‌رود. با توجه به طیف گسترده‌ایی از هواگرمکن‌های خورشیدی در اشکال و ساختارهای تجربی مختلف طبقه‌بندی آن‌ها کار آسانی نمی‌باشد. نورتون[1] و اکوچیبا[2] [۴] یک بررسی دقیق در مورد طرح‌های مختلف، ساخت‌وساز و اصول عملکرد طیف گسترده‌ای از هواگرمکن‌های خورشیدی به‌منظور هدف خشک‌کردن انجام دادند. پژوهش‌هایی در خصوص طبقه‌بندی هواگرمکن‌های صورت گرفته است. به‌طورکلی می‌توان هواگرمکن‌های خورشیدی را بر اساس مدل، به سه مدل فعال و غیرفعال و ترکیبی طبقه‌بندی کرد. برای بهبود عملکرد هواگرمکن‌های خورشیدی و درواقع برای افزایش انتقال حرارت در گرم‌کن‌های خورشیدی روش‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. به کار بردن پره ها (سطوح گسترش‌یافته)، مواد ذخیره کننده گرما، افزایش زبری سطح که تأثیر بسیار زیادی در عملکرد هوا گرم‌کن‌ها دارد، ازجمله این روش‌ها می‌باشد. ایجاد کردن زبری (ناهمواری مصنوعی) به‌طورکلی برای افزایش انتقال حرارت با مکانیزم جابجایی اجباری که به جریان آشفته در سطح انتقال حرارت نیاز دارد استفاده می‌شود. به‌طور خلاصه برای افزایش انتقال حرارت و درنتیجه بهبود عملکرد حرارتی-هیدرولیکی از ایجاد ناهمواری یا همان زبری مصنوعی استفاده می‌شود، نمونه‌ایی از زبری ایجاد شده در شکل قابل مشاهده است [۵].



شکل۱ نمونه زبری ایجاد شده

[1] Norton B
[2] Ekechukwn OV

آکپینار[1] و کوئیگیت[2] [۶] به عملکرد هواگرم‌کن‌های خورشیدی با توجه به نوع صفحه جاذب آن‌ها پرداختند و چهار نوع صفحه جاذب به شکل‌های موانع مثلثی و دندانه شکل؛ مستطیل و صفحه صاف را مورد بررسی قرار دادند. بایراک[3] و همکارانش [۷] نیز عملکرد پنج نوع از هواگرم‌کن خورشیدی را که با استفاده از بافل‌ها که از فوم‌های مصنوعی آلومینیومی ساخته شده بود مورد بررسی قرار دادند. بافل‌ها به دو حالت نامنظم و منظم بر روی صفحه جاذب قرار گرفتند.

پایسارن[4] [۸] مدل ریاضی را برای پیش‌بینی اثرات ارتفاع و تعداد پره‌ها بر روی ویژگی‌های انتقال حرارت، عملکرد و تولید آنتروپی یک هواگرم‌کن دوپاس با پره‌های طولی ارائه داد. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع و تعداد پره‌ها، کارایی افزایش می‌یابد و تولید آنتروپی با تعداد و ارتفاع پره‌ها متناسب است. اثر دبی جرمی هوا در این مدل نظر گرفته نشد. باگوری[5] و همکاران [۹] یک هواگرم‌کن خورشیدی به‌وسیله CFD طراحی کردند که بر روی صفحه جاذب آن شیارهای مثلثی شکل به‌صورت متساوی‌الاضلاع به‌منظور ایجاد زبری به‌کاررفته است. این بررسی مربوط به تأثیر سه پارامتر بر عملکرد هیدرولیکی حرارتی هواگرم‌کن با وجود زبری می‌باشد که این پارامترها شامل: سطح نسبی زبری، ارتفاع نسبی زبری و عدد رینولدز می‌باشد. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که میانگین عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز در همه موارد تمایل به افزایش دارد اما عامل اصطکاک به‌طور متوسط کاهش میابد. از طرف دیگر به‌طور متوسط عدد ناسلت با افزایش گام نسبی زبری در مقدار ثابت ارتفاع نسبی زبری کاهش میابد و با افزایش ارتفاع نسبی زبری در مقدار ثابت گام نسبی زبری افزایش می‌یابد. لنجور[6] و همکاران [۱۰] به طور تجربی تأثیر استفاده از زبری شیارهایی به شکل W بر انتقال گرما، خصوصیات اصطکاک و عملکرد حرارتی - هیدرولیکی را مطالعه کرد. صفحه جاذب دارای گام نسبی ۱۰، ارتفاع زبری ۰/۰۱۸، نسبت ابعاد مجرا ۸، ارتفاع دنده ۰/۸ میلی‌متر و زاویه برخورد در محدوده ۳۰-۶۰ درجه بود.در مقایسه با کانال تخت و بدون زبری، افزایش عدد ناسلت به ترتیب ۳۲-۹۲٪، ۳۱-۸۱٪ و ۹-۵۶٪ برای ۶۰ درجه ، ۴۵ درجه و ۳۰ درجه بود. به ترتیب مشابه، نسبت‌های اصطکاک ۱/۳۹-۱/۵۷ ، ۱/۳۲-۱/۴۳ بود. بهترین عملکرد در زاویه برخورد ۶۰ درجه به دست آمد.

همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد محققین درباره شکل هندسه زبری و همچنین میزان تأثیرگذاری هرکدام از پارامترهای تأثیرگذار بر عدد ناسلت دارای اختلاف‌نظر هستند در این مقاله برای نخستین بار با بهره‌گیری از مدل‌سازی ریاضی آماری، ضمن ارائه یک معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم به بررسی رفتار دقیق پارامترهای هندسی هواگرمکن‌های خورشیدی در رفتار پاسخ‌های عدد ناسلت صفحات جاذب پرداخته شده است. در این پژوهش با بهره‌گیری از بهینه‌سازی آماری تک هدفه، تأثیر کمی هریک از پارامترهای ورودی هندسی هواگرمکن‌های خورشیدی بر روی مهم‌ترین پاسخ‌های خروجی پرداخته شده است.

۲- مدل‌سازی

۲-۱- خصوصیات و شرایط آزمایش

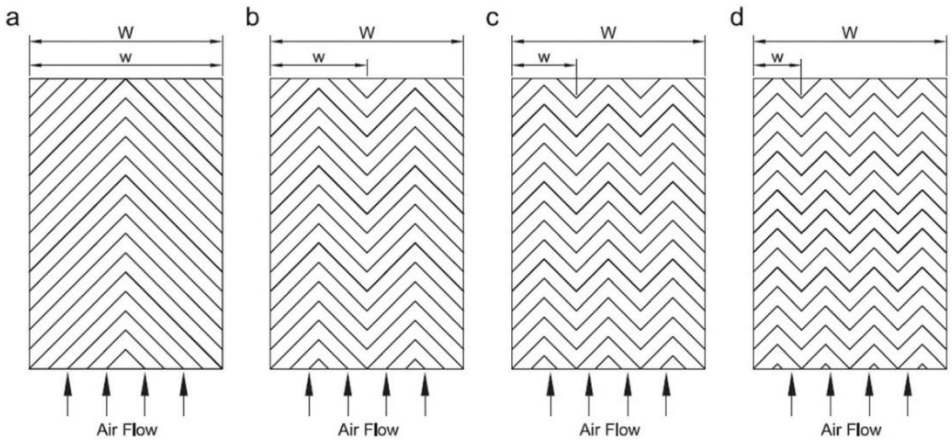
در بررسی رفتار عدد ناسلت در هندسه ناهمواری مورد بررسی، متغیرهای عدد رینولدز (Re)، گام نسبی (P/e)، ارتقاع نسبی (e/D)، عرض نسبی (W/w) و زاویه برخورد (α) عنوان فاکتورهای ورودی در نظر گرفته شده است. زیرا تغییرات عدد ناسلت طبق فرمول‌های مربوط به هندسه مورد نظر وابستگی شدیدی به متغیرهای ذکر شده دارد. همچنین مقدار عدد ناسلت (Nu) به‌عنوان پاسخ خروجی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در این مسئله سعی بر آن است که به حالت بهینه‌ایی از هندسه دست یافت که بیشترین میزان عدد ناسلت را شامل می‌شود.

[1] Ebru Akpinar
[2] Fathi Kocyigit
[3] Bayrak
[4] Paisarn Naphon
[5] Bhagoria JL
[6] Lanjewar AM

۲-۲- انتخاب هندسه و رابطه عدد ناسلت هندسه مورد پژوهش

بازدهی حرارتی گرم‌کن‌های خورشیدی هوا پایین می‌باشد، تحقیقات بسیاری در بالا بردن ضریب انتقال حرارت در آن‌ها انجام گرفته است. یکی از راهکارهای افزایش بازدهی، زبر کردن صفحه‌ی در معرض شار خورشیدی از داخل که در تماس با جریان هوا است می‌باشد. در این پژوهش مقادیر عدد ناسلت در کانال مستطیلی شکل هوا گرم‌کن و نحوه تغییر این پارامترها با توجه به هندسه زبری‌ها و پارامترهای عملیاتی مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفت.

در هوا گرم‌کن‌های خورشیدی عمده اتلاف حرارتی از صفحه جاذب می‌باشد چرا که دیواره‌های جانبی و پایینی کانال عایق گردیده‌اند. در فرآیند انتقال حرارت پس از تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی حرارتی، عمده مقاومت حرارتی به خاطر شکل‌گیری لایه مرزی حرارتی روی سطح در حال انتقال حرارت با هوای در حال عبور از داخل کانال می‌باشد. در بحث افزایش انتقال حرارت در تجهیزات مذکور تمامی تلاش‌ها در راستای از بین بردن و یا شکستن این لایه‌مرزی است. ایجاد زبری در سمتی از صفحه جاذب که در تماس با جریان هوای عبوری از داخل کانال می‌باشد، یکی از راه‌های بهبود عملکرد هوا گرم‌کن‌های خورشیدی است. استفاده از زبری‌ها یک گام مؤثر در بهبود عملکرد حرارتی هوا گرم‌کن‌های خورشیدی با کانال‌های مستطیلی شکل می‌باشد. درنتیجه بیشتر پژوهش‌ها در بررسی انواع زبری‌ها ازنظر شکل، اندازه و جهت‌گیری با توجه به جهت جریان سعی دررسیدن به یک آرایش و هندسه بهینه از زبری‌ها را دارند، البته باید این نکته را مد نظر داشت که ایجاد آشفتگی برای شکستن زیر لایه آرام نباید روی هسته جریان اثر نامطلوبی بگذارد. چون در غیر این صورت افت فشار به نحو چشم‌گیری افزایش خواهد یافت. این امر با تنظیم ارتفاع زبری‌ها به صورتی که زبری‌ها درون هسته جریان قرار نگیرند ولی ارتفاع آن‌ها از ضخامت زیر لایه آرام بیشتر شود، قابل حصول است. در این پژوهش با بررسی انواع شیارها به این نتیجه رسیده شد که شیارهای شیب‌دار میزان انتقال حرارت را بیشتر از شیارهای افقی افزایش می‌دهد. آنچه از مجموع کارهای انجام شده در این زمینه می‌توان دریافت کرد، استفاده از زبری‌های مورب و v شکل می‌تواند ضمن پایین نگه‌داشتن ضریب اصطکاک، انتقال حرارت را افزایش داد. بر اساس پژوهش صورت گرفته و مقالات عنوان شده در این تحقیق استفاده از شیارهای V شکل کمک می‌کند تا نرخ انتقال حرارت در مقایسه با تیغه‌های صرفاً شیب‌دار بیشتر گردد. تیغه‌های مورب با ایجاد اغتشاش در جریان و تولید گردابه در بالادست و پایین‌دست تیغه با هدایت کردن گردابه‌ها در طول تیغه و ایجاد یک جریان ثانویه قوی ضریب انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. Vشکل کردن تیغه‌ها کمک می‌کند تا با ایجاد دو جریان ثانویه این امر قوت گرفته و نرخ انتقال حرارت در مقایسه با تیغه‌های صرفاً شیب‌دار بیشتر گردد. بکار گیری تیغه‌های v-شکل به‌صورت تکرار شونده در عرض صفحه، با افزایش چند برابری تعداد جریانات ثانویه باعث بهبود نرخ انتقال حرارت خواهد گردید. لذا آرایش هندسه مورد بررسی در این پژوهش تیغه‌های v شکل است که به‌صورت تکرارشونده یا چندگانه در عرض صفحه قرارگرفته‌اند. در شکل زیر نمایی از هندسه قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲ نمایی از هندسه زبری صفحه جاذب هواگرم کن خورشیدی با آرایش vشکل چندگانه [۱۱]

به وسیله آزمایش‌ها و مقایسات و بی‌بعد سازی روابط تجربی و مشاهدات آزمایشگاهی روابطه عدد ناسلت برحسب متغیرهای

بی‌بعد، برای هندسه زبری با تیغه‌های v - شکل و به‌صورت تکرار شونده توسط هانس[1]وساینی[2]به‌صورت معادله ۹ می‌باشد:

$$Nu = 3.35 \times 10^{-5} Re^{0.92} \left(\frac{e}{D}\right)^{0.77} \left(\frac{W}{w}\right)^{0.43} \left(\frac{\alpha}{90}\right)^{-0.49} \times exp\left\{-0.1177\left(Ln\left(W/w\right)\right)^2\right\} exp\left\{-0.61\left(Ln\left(\alpha/90\right)\right)^2\right\} \left(\frac{P}{e}\right)^{8.24} \times exp\left\{-2.0407\left(Ln\left(P/e\right)\right)^2\right\} \quad (۹)$$

نمونه‌ای از نحوه انجام آزمایش‌ها در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳ نحوه انجام آزمایش‌ها در بهینه‌سازی هندسه ناهمواری

۲-۳- مدل‌سازی ریاضی و شیوه انجام آزمایش‌ها

در این پژوهش با در نظر داشتن عدد رینولدز، گام نسبی، ارتفاع نسبی و زاویه برخورد به‌عنوان متغیرهای ورودی، با توجه به تعداد و به روش سطح پاسخ و به‌صورت معادلات رگرسیون خطی مرتبه دوم مدل‌سازی شده است. در جدول ۱ زیر متغیرهای ورودی فرایند و بازه تغییرات آن با توجه به نمایش داده شده است.

جدول ۱ متغیرهای ورودی فرآیند و بازه تغییرات آن‌ها

فاکتور ورودی	کمینه	بیشینه
عدد رینولدز (Re)	۲۰۰۰	۲۰۰۰۰
ارتفاع نسبی تیغه (e/D)	۰/۰۱۹	۰/۰۴۳
عرض نسبی تیغه (W/w)	۱	۹
زاویه برخورد (α)	۳۰	۷۵
گام نسبی تیغه (P/e)	۶	۱۲

۲-۴- تحلیل داده‌ها و تفسیر مدل‌سازی فرآیند

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل آماری رفتار عدد ناسلت، نتایج حاصل از آنالیز واریانس[3] در جدول زیر آمده است. با توجه به قابلیت اطمینان ۹۵ درصد در آزمایش‌های مهندسی، مقدار Pvalue کمتر از ۰/۰۵ به‌منظور تعیین اثر مؤلفه‌های مدل در نظر گرفته می‌شود. مقدار خطای مجموع مربعات[4] مدل منطبق شده بر داده‌ها میزان دقت نوع معادله رگرسیون حاکم بر مدل را مشخص نموده و در مبحث طراحی آزمایش‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. با در نظر گرفتن کمترین مقدار خطای مجموع

[1] Hans V
[2] Saini R
[3] ANOVA
[4] PRESS

مربعات برای مدل مرتبه دوم خطی برابر ۱۳۰۲۷۸، معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم حاکم بر دمای فرآیند به‌صورت معادله ۱۰ است:

$$\begin{aligned} Nu = {} & -343.21 + 0.007379\ Re + 1804\ e/D + 9.979\ W/w + 2.598\ a + 53.595\ P/e - 0.000000\ Re*Re \\ & - 6960\ e/D*e/D - 0.9578\ W/w*W/w - 0.021137\ a*a - 2.8724\ P/e*P/e + 0.25903\ Re*e/D \\ & + 0.000230\ Re*W/w - 0.000053\ Re*a - 0.000312\ Re*P/e + 62.16\ e/D*W/w - 15.97\ e/D*a \\ & - 75.19\ e/D*P/e - 0.00780\ W/w*a - 0.1164\ W/w*P/e + 0.01600\ a*P/e \end{aligned} \quad (۱۰)$$

با در نظر داشتن مقادیر *R-sq*= 98.87% ، *R-sq (pred)*= 98.85% و *R-sq (adj)*= 98.87% می‌توان گفت که مدل‌سازی صورت گرفته از دقت بسیار خوب و مناسبی برخوردار است.

جدول ۲ تحلیل واریانس عدد ناسلت برحسب ترم‌های مهم در هندسه هواگرمکن‌های خورشیدی

P-Value	F-Value	Adj MS	Adj SS	DF	Source
۰/۰۰۰	۱۳۳۹۷/۹۹	۵۶۱۲۲۴	۱۱۲۲۴۴۷۹	۲۰	Model
۰/۰۰۰	۴۹۰۸۹/۸۵	۲۰۵۶۳۰۹	۱۰۲۸۱۵۴۵	۵	Linear
۰/۰۰۰	۲۰۴۳۸۱/۰۶	۸۵۶۱۲۵۲	۸۵۶۱۲۵۲	۱	Re
۰/۰۰۰	۳۱۲۱۶/۶۱	۱۳۰۷۶۲۳	۱۳۰۷۶۲۳	۱	e/D
۰/۰۰۰	۲۹۰۹/۶۷	۱۲۱۸۸۲	۱۲۱۸۸۲	۱	W/w
۰/۰۰۰	۴۳۰۱/۵۰	۱۸۰۱۸۴	۱۸۰۱۸۴	۱	A
۰/۰۰۰	۳۰۰۲/۶۵	۱۲۵۷۷۷	۱۲۵۷۷۷	۱	P/e
۰/۰۰۰	۱۵۴۷/۰۶	۶۴۸۰۴	۳۲۴۰۲۲	۵	Square
۰/۰۰۰	۷۱/۲۰	۲۹۸۲	۲۹۸۲	۱	Re*Re
۰/۰۱۲	۶/۳۷	۲۶۷	۲۶۷	۱	e/D*e/D
۰/۰۰۰	۲۴۴۳/۸۸	۱۰۲۳۷۱	۱۰۲۳۷۱	۱	W/w*W/w
۰/۰۰۰	۷۲۶/۶۱	۳۰۴۳۷	۳۰۴۳۷	۱	a*a
۰/۰۰۰	۲۳/۴۳۳۸	۱۸۱۷۲۳	۱۸۱۷۲۳	۱	P/e*P/e
۰/۰۰۰	۹۰۲/۱۶	۳۷۷۹۰	۳۷۷۹۰۳	۱۰	2-Way Interaction
۰/۰۰۰	۵۹۹۸/۹۸	۲۵۱۲۸۹	۲۵۱۲۸۹	۱	Re*e/D
۰/۰۰۰	۶۸۶/۹۳	۲۸۷۷۵	۲۸۷۷۵	۱	Re*W/w
۰/۰۰۰	۸۹۳/۸۰	۳۷۴۴۰	۳۷۴۴۰	۱	Re*a
۰/۰۰۰	۶۰۱/۵۶	۲۵۱۹۹	۲۵۱۹۹	۱	Re*P/e
۰/۰۰۰	۸۷/۱۱	۳۶۴۹	۳۶۴۹	۱	e/D*W/w
۰/۰۰۰	۱۳۶/۹۷	۵۷۳۷	۵۷۳۷	۱	e/D*a
۰/۰۰۰	۵۷/۴۵	۲۴۰۷	۲۴۰۷	۱	e/D*P/e
۰/۰۲۶	۴/۹۳	۲۰۷	۲۰۷	۱	W/w*a
۰/۰۰۰	۲۰/۱۲	۸۴۳	۸۴۳	۱	W/w*P/e
۰/۰۰۲	۷۹/۶۵	۴۰۴	۴۰۴	۱	a*P/e

در مبحث طراحی آزمایش‌ها یکی از مواردی که دقت مدل حاکم بر آزمایش را تعیین می‌کند مقدار R-sq مدل می‌باشد. و مقدار آن با استفاده از معادله (۱۱) محاسبه است همچنین دیگر روابط ارائه شده از روابط آماری (۱۲) و (۱۳) و (۱۴) محاسبه می‌گردد:

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_{Res}}{SS_T} \quad (۱۱)$$

$$R^2{}_{Adj} = \frac{SS_{Res}/(n-p)}{SS_T/(n-1)} = 1 - \frac{MS_{Res}}{MS_T} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p}\right)(1 - R^2), \quad (۱۲)$$

$$R^2{}_{Pred} = 1 - \frac{PRESS}{SS_T} \quad (۱۳)$$

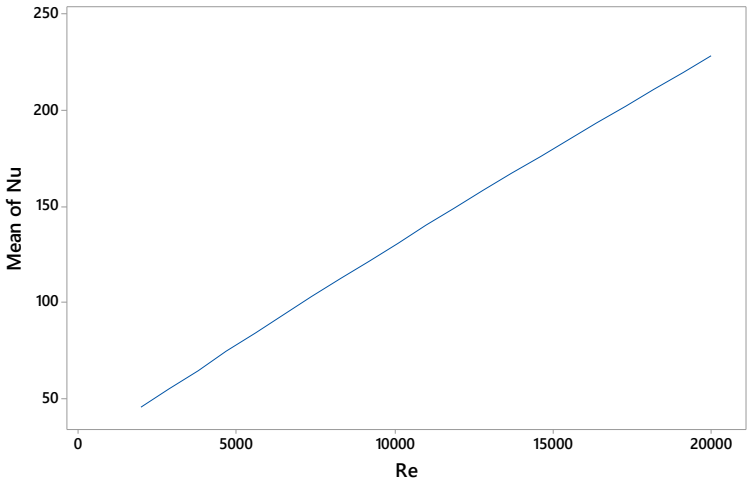
$$PRESS = \sum_{i=1}^{n} e_{(i)}^2 = \sum_{i=1}^{n} \left[y_i - \hat{y}_{(i)}\right]^2 \quad (۱۴)$$

هرچه مقدار این مؤلفه به عدد ۱ و یا ٪۱۰۰ نزدیک باشد، دقت انطباق مدل بالاتر و پیش‌بینی مدل آماری رگرسیون منطبق شده بر داده‌ها دقیق‌تر خواهد بود.

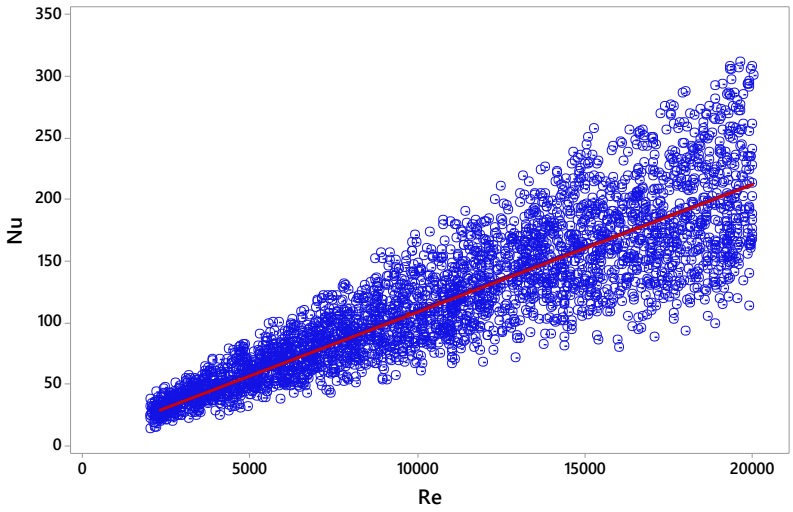
۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر رفتار عدد رینولدز در رفتار عدد ناسلت

با توجه به نمودارهای شکل ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. با افزایش رینولدز، میزان آشفتگی جریان بیشتر می‌شود که باعث افزایش عدد ناسلت می‌شود. علاوه بر این، افزایش سرعت یا قطر هیدرولیکی باعث افزایش ناسلت خواهد شد.



الف- مدل‌سازی آماری



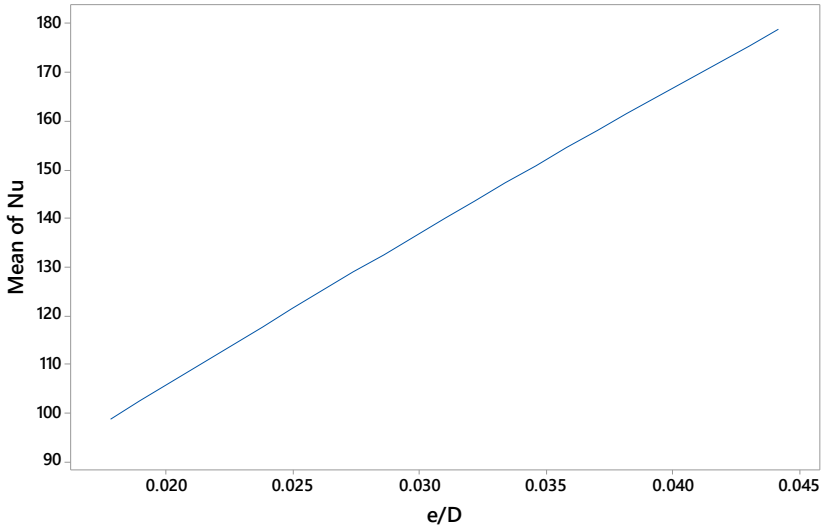
ب- تحلیل حساسیت

شکل ۴ رفتار فاکتور اصلی عدد رینولدز بر عدد ناسلت

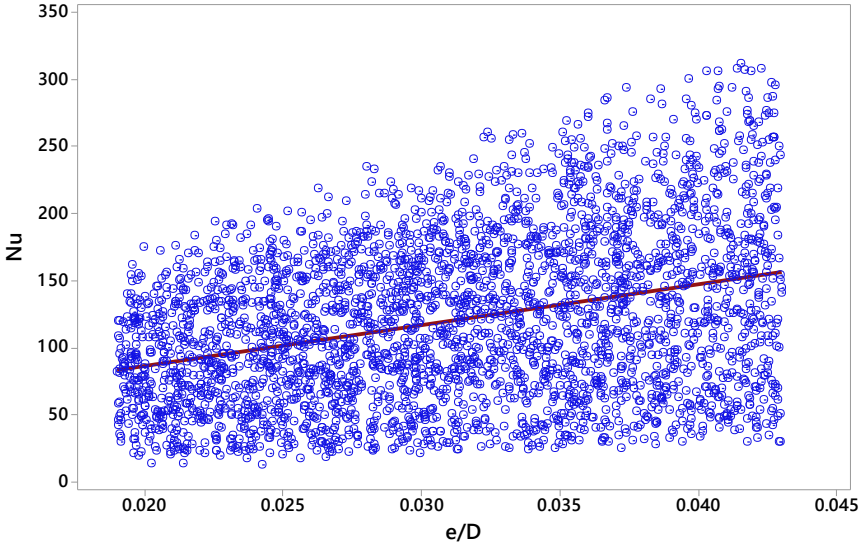
۳-۲- اثر ارتفاع نسبی زبری بر عدد ناسلت

نمودارهای شکل ۵ نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع نسبی، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. با افزایش ارتفاع نسبی، میزان آشفتگی جریان بیشتر می‌شود که این امر باعث افزایش عدد ناسلت می‌شود.

شکل ۶ نیز نشان می‌دهد که افزایش همزمان رینولدز و ارتفاع زبری نسبی باعث افزایش عدد ناسلت می‌شود. البته نتایج نشان می‌دهد که در محدوده متغیرهای مورد بررسی، محدوده رینولدز در مقایسه با محدوده ارتفاع نسبی زبری تأثیر بیشتری بر عدد ناسلت خواهد داشت.

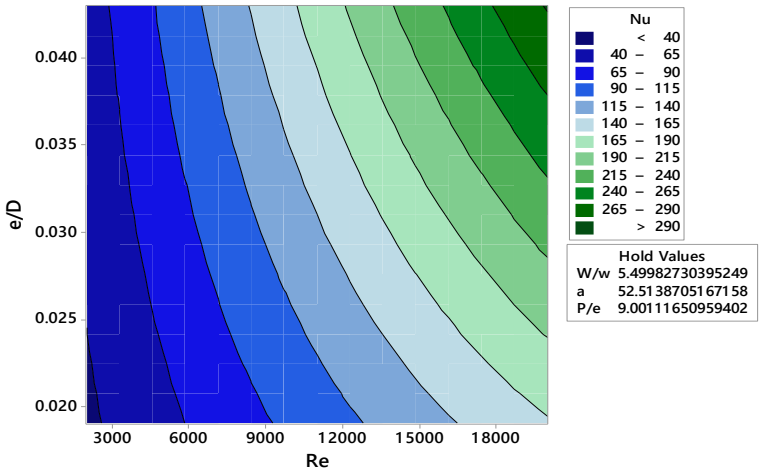


الف- مدل‌سازی آماری

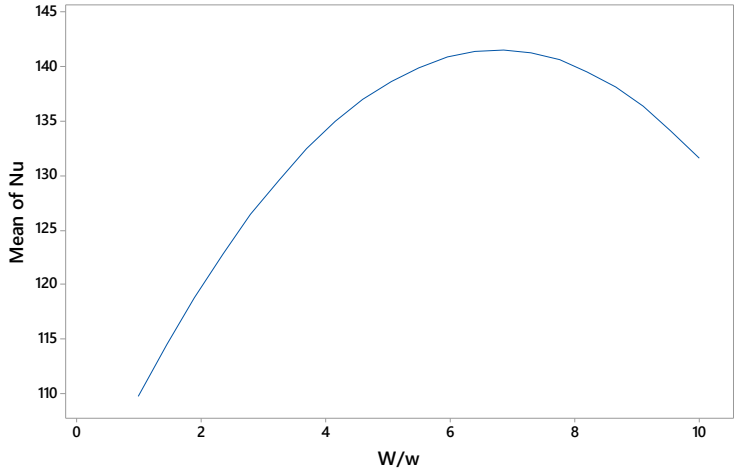


ب- تحلیل حساسیت

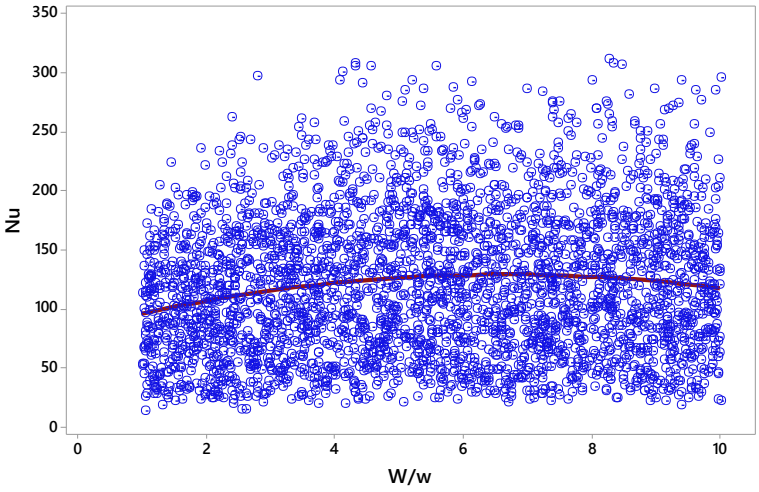
شکل۵ رفتار فاکتور اصلی ارتفاع نسبی بر عدد ناسلت



شکل ۶ رفتار برهم‌کنش فاکتور عدد رینولدز و ارتفاع نسبی بر عدد ناسلت



الف- مدل‌سازی آماری



ب- تحلیل حساسیت

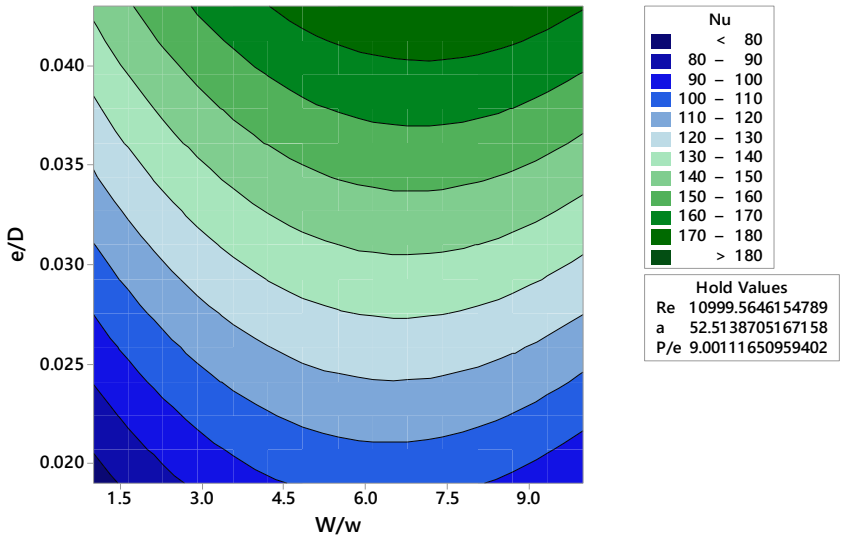
شکل ۷ رفتار فاکتور اصلی عرض نسبی بر عدد ناسلت

۳-۳- اثر عرض نسبی زبری بر عدد ناسلت

نتایج شکل ۷ نشان می‌دهد که بهترین حالت برای عرض نسبی نزدیک به ۷ می‌باشد. از عرض نسبی ۱ تا تقریباً ۷، عدد ناسلت افزایش می‌یابد و بعدازآن دوباره کاهش می‌یابد. بنابراین افزایش بیش‌ازحد عرض نسبی تأثیر منفی بر انتقال حرارت خواهد داشت.

در کانتور شکل ۸ تأثیر هم‌زمان هر دو پارامتر عرض نسبی و ارتفاع نسبی زبری نشان داده شده است.

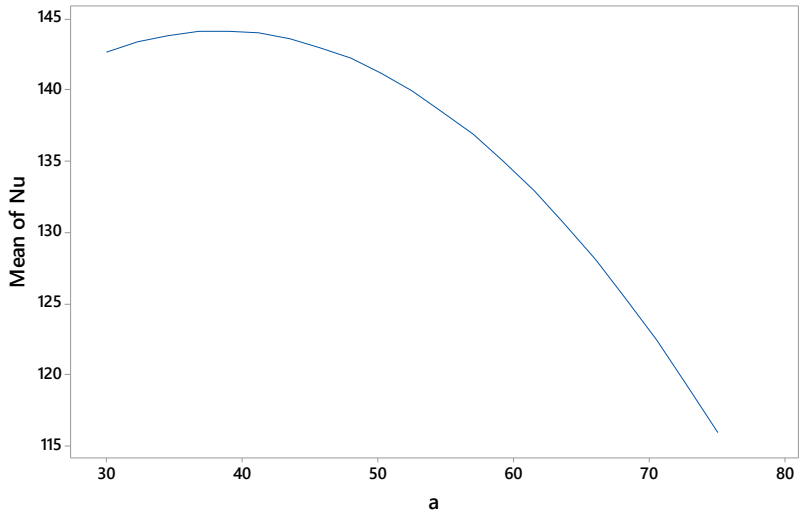
علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که در محدوده متغیرهای مورد بررسی، محدوده ارتفاع نسبی زبری در مقایسه با محدوده عرض نسبی زبری تأثیر بیشتری بر عدد ناسلت خواهد داشت.



شکل ۸ رفتار برهم‌کنش عرض نسبی و ارتفاع نسبی در عددناسلت

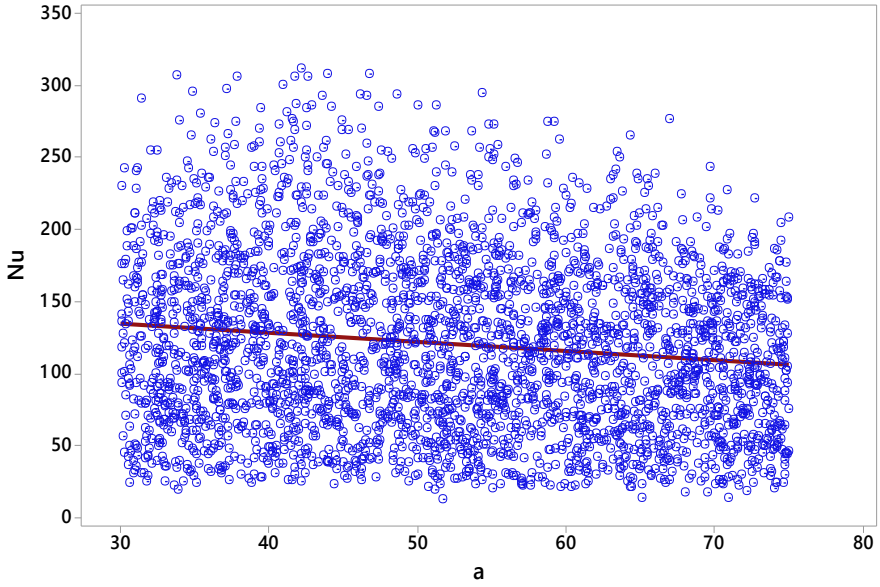
۳-٤- اثر زاویه برخورد بر عدد ناسلت

نتایج شکل ۹ نشان می‌دهد که زاویه بهینه نزدیک ۴۰ درجه می‌باشد و با دور شدن از این زاویه عدد ناسلت کاهش می‌یابد.



الف- مدل‌سازی آماری

شکل ۹ رفتار فاکتور اصلی زاویه برخورد بر عدد ناسلت

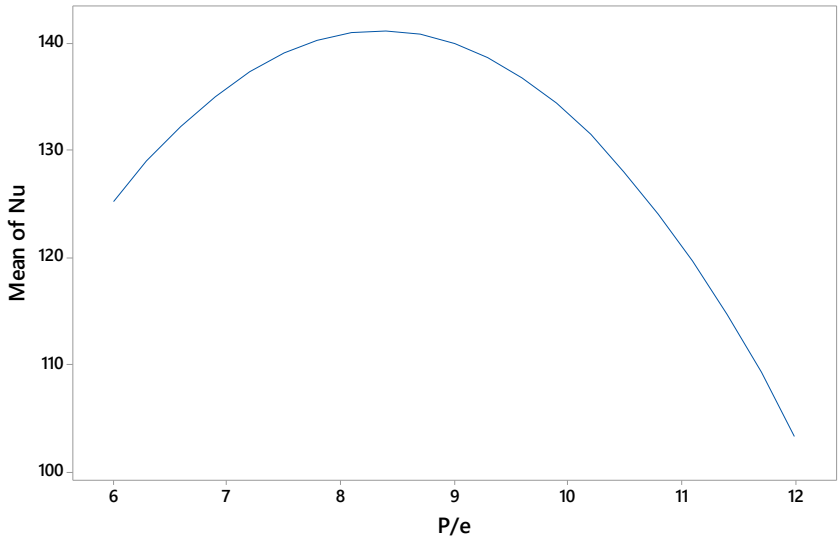


ب- تحلیل حساسیت

شکل ۹ رفتار فاکتور اصلی زاویه برخورد بر عدد ناسلت

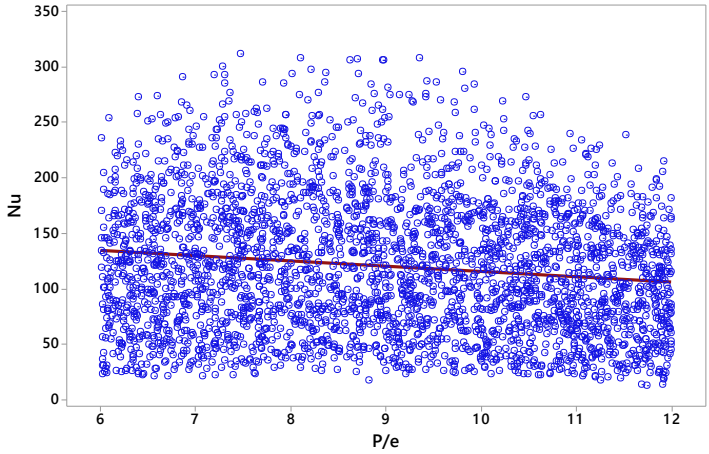
۳-۵- اثر گام نسبی در هندسه زبری بر عدد ناسلت

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، گام نسبی تأثیر زیادی بر عدد ناسلت دارد. نتایج نشان می‌دهد که گام نسبی بهینه برای افزایش عدد ناسلت برابر ۸ می‌باشد. با کم شدن گام، امکان اتصال مجدد جریان فراهم نخواهد شد که تأثیر منفی بر انتقال حرارت خواهد داشت. از طرفی، افزایش بیش‌ازحد گام منجر به تشکیل مجدد زیرلایه آرام در بخش زیادی از جریان خواهد شد.



الف- مدل‌سازی آماری

شکل۱۰ رفتار فاکتور اصلی گام نسبی بر عدد ناسلت



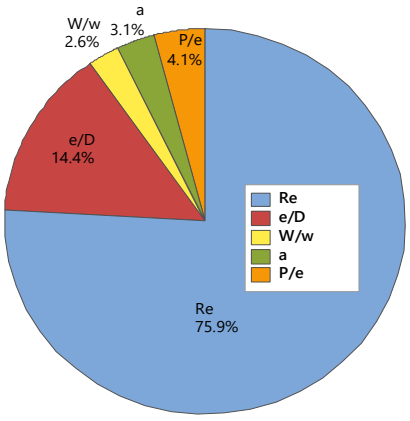
ب- تحلیل حساسیت

شکل۱۰ رفتار فاکتور اصلی گام نسبی بر عدد ناسلت (ادامه)

۳-۶- آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر در عدد ناسلت در هندسه صفحات زبری هواگرمکن خورشیدی

با توجه به نتایج موجود در شکل‌های ۴، ۵؛ ۷؛ ۸؛ ۹ و ۱۰ در تحلیل حساسیت عدد ناسلت در هندسه صفحات جاذب هواگرم کن‌ها و تحلیل آنالیز واریانس روش سطح پاسخ، مشخص می‌گردد که در بازه‌های در نظر گرفته شده برای پارامترهای ورودی در این مقاله (متغیرهای عدد رینولدز (Re)، گام نسبی (P/e)، ارتفاع نسبی (e/D)، عرض نسبی (W/w) و زاویه برخورد (α)) به‌طورکلی و با در نظر تغییرات هم‌زمان همه پارامترها در رفتار عدد ناسلت در فرآیند، به ترتیب متغیرهای عدد رینولدز(Re)، ارتفاع نسبی (e/D)، گام نسبی (P/e)، زاویه برخورد (α) و عرض نسبی (W/w) به ترتیب بیشترین اثر را داشته زیرا در بازه‌ی تغییرات مورد بررسی برای این‌ها شیب کلی تغییرات منحنی گرافیکی در این نمودارها نشان‌دهنده میزان تأثیر هریک از پارامترهاست و البته همگی دارای اثر محسوس در رفتار فرآیند هستند.

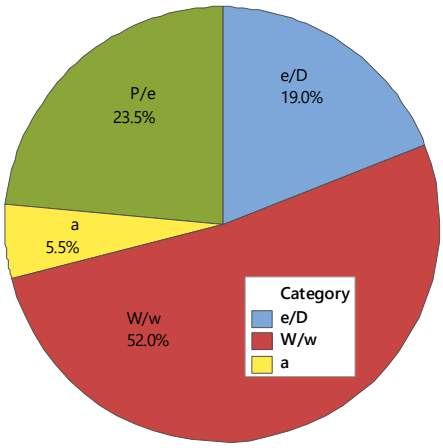
شکل ۱۱ که نتایج آنالیز حساسیت پارامترها به روش سوبل را نشان می‌دهند نیز صحت نتایج به‌دست‌آمده تأیید می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که در بین پارامتر ورودی، با توجه به درصدهای به‌دست‌آمده از روش آنالیز حساسیت آماری سوبل و با استفاده از نرم‌افزار سیملب که با الگوریتم تحلیل حساسیت سوبل پارامترهای ورودی را به‌طور هم‌زمان تغییر داده و اثر آن را بر پارامتر خروجی بررسی می‌نماید [۱۶]، به‌طورکلی در بررسی حساسیت رفتار عدد ناسلت در این فرآیند، عدد رینولدز(Re) ۷۵/۰۹٪، ارتفاع نسبی (e/D) ۱۴/۴٪، گام نسبی (P/e) ۴/۱٪، زاویه برخورد (α) ۳/۱٪ و عرض نسبی (W/w) ۲/۶٪ تأثیرگذار می‌باشند.



شکل ۱۱ نمودار میزان اثر کمی حساسیت پارامترهای ورودی بر تغییرات عدد ناسلت بر اساس تحلیل حساسیت سوبل

لازم به ذکر است می‌توان در یک عدد رینولدز ثابت مدل‌سازی آماری حاکم بر معادله عدد ناسلت را اصلاح کرده و مراحل

تحلیل حساسیت سایر پارامترها را مورد بررسی قرار داد. به‌عنوان‌مثال شکل ۱۲ میزان حساسیت پارامترهای حاکم بر عدد ناسلت در میزان عدد رینولدز ثابت ۱۰۰۰۰ را نشان می‌دهد.

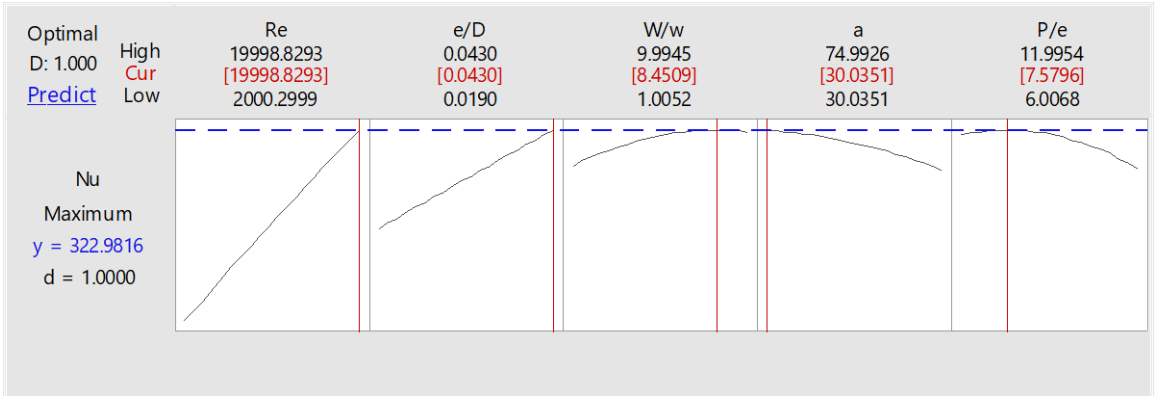


شکل ۱۲ نمودار تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی بر تغییرات عدد ناسلت بر اساس تحلیل حساسیت سوبل در یک عدد رینولدز ثابت

روش آماری آنالیز حساسیت سوبل، نسبت به آنالیز واریانس این برتری را دارد که علاوه بر مشاهده‌ی تأثیر کیفی پارامترهای ورودی بر پارامتر خروجی، می‌توان تأثیر کمی و دقیق این پارامترها را به‌طور هم‌زمان به دست آورده و پارامترهای مهم با تأثیرگذاری بالا و پارامترهای کم اثر را به‌طور دقیق شناسایی نمود. البته در تحلیل اثر برهم‌کنش رفتار پارامترها و تحلیل دقیق رفتارهای پیچیده روش سطح پاسخ تحلیلی کامل‌تر را ارائه می‌نماید.

۳-۷- بهینه‌سازی تک هدفه عدد ناسلت با استفاده از الگوریتم درینگر

با توجه به موارد مطرح شده در تحلیل پارامترهای ورودی فرآیند، در این بخش بهینه‌سازی تک هدفه فرآیند به منظور دستیابی به بیشترین مقدار در فرآیند به روش الگوریتم آماری درینگر صورت گرفته است. با در نظر گرفتن حد بیشینه مدل منطبق شده بر فرایند و لحاظ نمودن حد مطلوبیت[1] ۱، نتیجه به‌دست‌آمده از بهینه‌سازی در شکل ۱۳ ارائه شده است:

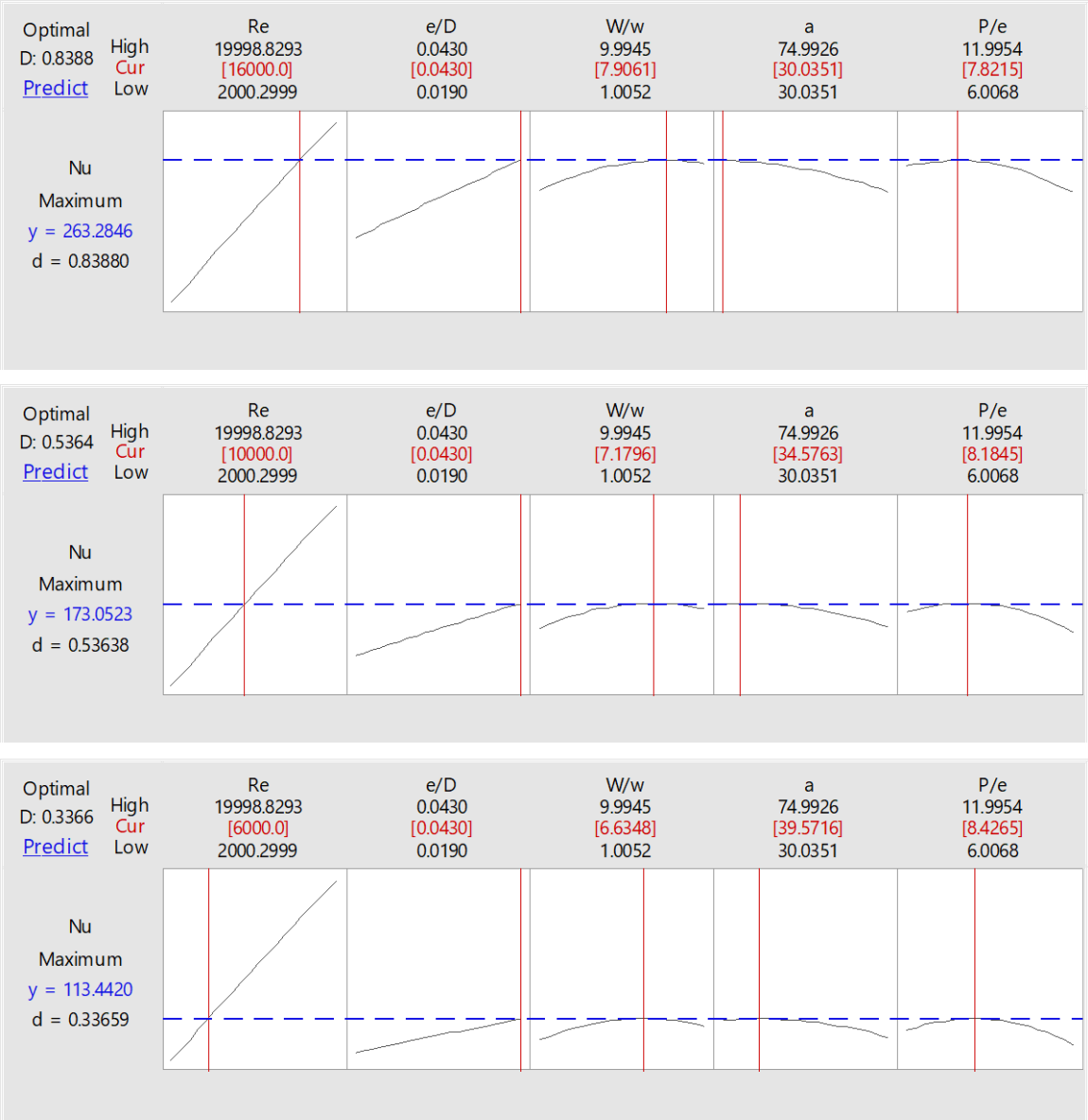


شکل ۱۳ بهینه‌سازی انجام شده به‌منظور دستیابی به بیشینه عدد ناسلت (مدل‌سازی آماری)

با توجه به شکل بیشترین مقدار عدد ناسلت در بیشترین مقدار عدد رینولدز (۲۰۰۰۰)، بیشترین مقدار ارتفاع نسبی (۰/۰۴۳) کمترین مقدار زاویه حمله (۳۰ درجه) و مقدار بهینه عرض نسبی ۸/۴۵ و گام نسبی ۷/۵۸ به دست می‌آید.

[1] Desirability

همچنین مطابق شکل ۱۴می‌توان برای اعداد رینولدز ۱۶۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ می‌توان مقادیر بهینه زیر را پیشنهاد داد.



شکل ۱۴ هندسه بهینه با توجه به اعداد رینولدز مختلف

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد. بهینه‌سازی صورت گرفته از دقت خوب برخوردار بوده است و قابل اطمینان است. با توجه به شکل بیشترین مقدار عدد ناسلت در بیشترین مقدار عدد رینولدز (۲۰۰۰۰)، بیشترین مقدار ارتفاع نسبی (۰/۰۴۳) کمترین مقدار زاویه حمله (۳۰ درجه) و مقدار بهینه عرض نسبی ۸/۴۵ و گام نسبی ۷/۵۸ به دست می‌آید.

٤- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر هوا گرم‌کن‌های خورشیدی معرفی و ازنظر ساختار و عملکرد مورد بررسی قرار گرفت. و تأثیر پارامترهای مختلف آن شامل عدد رینولدز، عرض نسبی، گام نسبی، زاویه حمله و ارتفاع نسبی مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی این مقاله بهینه‌سازی تک هدفه پارامترهای مؤثر در هندسه زبری صفحات جاذب به‌منظور افزایش بهره‌وری هواگرم‌کن‌های خورشیدی می‌باشد. در این پژوهش برای نخستین بار با بهره‌گیری از مدل‌سازی ریاضی آماری، ضمن ارائه یک معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم به بررسی رفتار دقیق پارامترهای هندسی هواگرمکن‌های خورشیدی در رفتار پاسخ عدد ناسلت صفحات جاذب پرداخته شد. در این پژوهش با بهره‌گیری از روش بهینه‌سازی آماری و بهینه‌سازی‌های چندمنظوره، روشی برای دستیابی به هندسه بهینه صفحات جاذب برای نخستین بار ارائه گردید.

تحلیل حساسیت سوبل برای نخستین بار به‌منظور تعیین کمی میزان اثر تغییرات هریک از پارامترهای ورودی بر روی تغییرات ورودی ارائه گردید.

در این مقاله با توجه به اینکه شیارهای شیب‌دار میزان انتقال حرارت را بیشتر از شیارهای افقی افزایش می‌دهد. و همچنین استفاده از شیارهای V شکل کمک می‌کند تا نرخ انتقال حرارت در مقایسه با تیغه‌های صرفاً شیب‌دار بیشتر گردد. و با توجه به اینکه بکار گیری شیارهای v شکل به‌صورت تکرارشونده در عرض صفحه، با افزایش چند برابری تعداد جریانات ثانویه باعث بهبود نرخ انتقال حرارت خواهد گردید. لذا هندسه مورد بررسی و بهینه‌سازی شیارهای v شکل به‌صورت تکرارشونده در عرض صفحه انتخاب شد.

در ادامه ابتدا با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش‌ها، مدل‌سازی ریاضی و روش تحلیل حساسیت سوبل اثر هریک از پارامترهای مهم هندسی و غیر هندسی هواگرم‌کن بر روی رفتار پاسخ های مسئله شامل عدد رینولدز و عدد ناسلت مورد بررسی دقیق قرار گرفت. و همچنین با بهره‌گیری از روش تحلیل حساسیت آماری سوبل میزان تأثیر کمی هریک از پارامترهای ورودی مسئله بر روی پاسخ‌ها ارائه شد. همچنین با بهره‌گیری از روش شبکه عصبی و الگوریتم درینگر بهینه‌سازی چند منظوره بر روی رفتار پارامترها انجام شد و نتایج آن به‌طور مبسوط ارائه گردید. در این تحقیق تحلیلی با بهره‌گیری روشمند از روش طراحی آزمایش‌ها، مدل‌سازی آماری و تحلیل حساسیت فرآیند، پارامترهای مهم ورودی شامل عدد رینولدز، ارتفاع نسبی شیار، گام نسبی شیار و زاویه برخورد در هندسه ناهمواری‌های مصنوعی صفحه جاذب هواگرم‌کن خورشیدی بر روی رفتار پاسخ خروجی عدد ناسلت صورت پذیرفت. در این پژوهش همچنین از بهینه‌سازی تک هدفه به‌منظور دستیابی به بیشترین مقدار عدد ناسلت به روش الگوریتم آماری درینگر پرداخته شده است. به وسیله آنالیز سوبل در بررسی حساسیت پارامترهای مؤثر در بررسی حساسیت رفتار عدد ناسلت در این فرآیند، عدد رینولدز (Re) ۹/۷۵٪، ارتفاع نسبی (e/D) ۴/۱۴٪، گام نسبی (P/e) ۱/۴٪، زاویه برخورد (α) ۱/۳٪ و عرض نسبی (W/w) ۶/۲٪ تأثیرگذار بودند. همچنین بیشترین مقدار عدد ناسلت در بیشترین مقدار عدد رینولدز (۲۰۰۰۰)، بیشترین مقدار ارتفاع نسبی (۰/۰۴۳) کمترین مقدار زاویه حمله (۳۰ درجه) و مقدار بهینه عرض نسبی ۸/۴۵ و گام نسبی ۷/۵۸ به دست آمد.

Authorship Contribution Statement

Saeed Tahmasbi



Biography: M.Sc. in Chemical Engineering

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Software, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Dr. Abdoreza Moghadassi



Biography: Professor of Chemical Engineering at Arak University, Iran.

Contribution Statement: Conceptualization, Resources, Supervision, Project administration, Investigation

Dr. Hamed Safikhani



Biography: Professor of Mechanical Engineering at Arak University, Iran.

Contribution Statement: Conceptualization, Resources, Supervision, Project administration, Investigation

۵- مراجع

[1] Ravi RK, Saini RP, Saini JS. A review on different techniques used for performance enhancement of double pass solar air heaters. Renew Sustain Energy Rev. 2016;56:941–52.

[2] Pottler K, et al. Optimized finned absorber geometries for solar air heating collectors. Sol Energy. 1999;67(1–3):35–52.

[3] Suman S, Khan MK, Pathak M. Performance enhancement of solar collectors—A review. Renew Sustain Energy Rev. 2015;49:192–210.

[4] Senthil R, Cheralathan M. Solar integrated collector storage using Fresnel lens for domestic hot water. Int J Eng Res Dev. 2012;2(12):53–7.

[5] Pottler K, et al. Optimized finned absorber geometries for solar air heating collectors. Sol Energy. 1999;67(1–3):35–52.

[6] Akpinar EK, Koçyiğit F. Energy and exergy analysis of a new flat-plate solar air heater having different obstacles on absorber plates. Appl Energy. 2010;87(11):3438–50.

[7] Srivastava RK, Rai AK. A review on solar air heater technology. Int J Mech Eng Technol. 2017;8(7):1122–31.

[8] Naphon P. On the performance and entropy generation of the double-pass solar air heater with longitudinal fins. Renew Energy. 2005;30(9):1345–57.

[9] Yadav AS, Bhagoria JL. A CFD based thermo-hydraulic performance analysis of an artificially roughened solar air heater having equilateral triangular sectioned rib roughness on the absorber plate. Int J Heat Mass Transf. 2014;70:1016–39.

[10] Lalji MK, Sarviya R, Bhagoria J. Heat transfer enhancement in packed bed solar air heater. Indian J Sci Technol. 2011;4(7):747–9.

[11] Hans VS, Saini RP, Saini JS. Heat transfer and friction factor correlations for a solar air heater duct roughened artificially with multiple V-ribs. Sol Energy. 2010;84(6):898–911.