



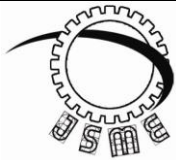
## بررسی عددی انتقال حرارت و جریان آرام نانوسیال آب-اکسید آلومینیم در میکروکانال مستطیلی دنداندار

داود طغرای<sup>۱</sup>، آرش کریمی پور<sup>۲</sup>، امید علی اکبری<sup>۳</sup>، حبیب اله عالی پور<sup>۴</sup>، مجید زرین قلم<sup>۵</sup>

\* نویسنده مسئول: [Toghraee@iau khsh.ac.ir](mailto:Toghraee@iau khsh.ac.ir)

واژه‌های کلیدی	چکیده
میکروکانال دنداندار، نانوسیال، انتقال حرارت، ضریب اصطکاک.	تحقیق حاضر در مورد اثرات ارتفاع دندان در میکروکانال دنداندار دو بعدی، بر روی پارامترهای انتقال حرارت و دینامیک سیالات محاسباتی جریان آرام نانوسیال آب-اکسید آلومینیم است. بررسی‌های این تحقیق به صورت عددی با نرم افزار تجاری فلوئنت ۶/۳ برای اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰، برای چهار حالت مختلف ارتفاع دندان انجام شده است. افزایش ارتفاع دندان‌های داخلی یا مغشوشگرهای جریان، عملکرد انتقال حرارت جابجایی در میکروکانال را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که نرخ انتقال حرارت در میکروکانال با افزایش ارتفاع دندان و افزایش کسر حجمی نانو ذرات، بهبود می‌یابد. اما افزایش ارتفاع دندان، باعث افزایش ضریب اصطکاک بزرگ‌تر در مقایسه با میکروکانال با ارتفاع دندان ثابت است. در این تحقیق برای همه حالات مختلف ارتفاع دندان، تأثیر ارتفاع دندان بر روی پارامترهای جریان سیال بررسی شده است. نتایج در قالب پروفیل‌های سرعت و دما، عدد ناسلت و کانتورهای تابع جریان و خطوط هم دما ترسیم می‌شوند.
تاریخ ارسال: ۹۴/۰۹/۰۸	
تاریخ بازنگری: ۹۴/۱۰/۲۳	
تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۱/۱۸	

- ۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، ایران، اصفهان.
- ۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، ایران، اصفهان.
- ۳- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، ایران، اصفهان.
- ۴- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، ایران، اصفهان.
- ۵- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، ایران، اصفهان.



Journal of  
Solid Mechanics  
in Engineering

## Journal of Solid Mechanics in Engineering

<http://jsme.iaukhsh.ac.ir>



### Numerical investigation of heat transfer and laminar Water- $\text{Al}_2\text{O}_3$ nanofluid flow in a rectangular Rib-Microchannel

Davood Toghraie<sup>1,\*</sup>, Omid Ali Akbari<sup>2</sup>, Arash Karimipour<sup>3</sup>, Habibollah Alipour<sup>4</sup>, Majid zarringalam<sup>5</sup>

\* Corresponding Author: Toghraee@iaukhsh.ac.ir

#### Abstract:

This paper numerically examines the laminar forced convection of a water- $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofluid flowing through a horizontal rib-microchannel. The middle section of the down wall microchannel is Affected by cold temperatures with a constant and uniform temperture  $T_c$ . The middle section is also influenced by a transverse rib array. The effects of height rib in a two dimensional rib-microchannel on flow and heat transfer parameters of laminar water- $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofluid are investigated. The characteristics of this research are numerically investigated by the commercial software Fluent 6.3 in a Reynolds number as  $Re=10$  and  $Re=100$ . Four different states of hight rib are analyzed. Higher conventional internal ribs or increasing the turbulators can significantly improve the performances of the convective heat transfer within a microchannel. It is seen that larger height rib and volume fraction of nanoparticles corresponds more heat transfer rate; however the added high ribs can cause a larger friction factor than that in the corresponding microchannel by constant height rib. At present article the effect of height rib on the fluid flow parameters are also studied for all different states of it. The results show that the microchannel performs better heat transfers at higher values of the Reynolds numbers. For all values of the Reynolds numbers and volume fraction of nanoparticles considered in this study, the average Nusselt number on the middle section surface of the microchannel increases as the solid volume fraction increases. Variations of the solid volume fraction result in changes to the dimensionless temperature along the centreline and the temperature profile at different cross-sections of the microchannel. For all values of the Reynolds and height rib,s, the average Nusselt number on the middle section increases as the solid volume fraction increases. The Results are shown as velocity, temperature and Nusselt number profiles and isotherms and contours of streamlines.

#### Key words:

Rib-microchannel,  
Nanofluid,  
Heat transfer,  
Friction factor.

1- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran

3- MSc, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

4- MSc, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran

5- MSc, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran

## ۱- مقدمه

افزایش انتقال حرارت یکی از زمینه‌های فعال و مهم در تحقیقات مهندسی است. امروزه رشد سریع فعالیت‌های تحقیقاتی و کوچک سازی صنایع در زمینه انتقال حرارت، نیازمند روش‌های جدید با بازده بالا است. بهبود نرخ انتقال حرارت در دستگاه‌های حرارتی و صنایع کاربردی مانند خودروسازی، هوافضا، صنایع الکترونیکی، تبرید، فرآوری مواد، سلول‌های سوختی و راکتورهای هسته‌ای و غیره با انتخاب روش‌های مناسب می‌تواند باعث مزیت‌های فنی مهم و صرفه‌جویی قابل توجهی در کاهش هزینه‌ها و کاهش آلایندگی‌های زیست محیطی شود. اهمیت افزایش انتقال حرارت در صنایع و بهینه‌سازی بهتر اجزای انتقال دهنده گرما باعث شد مطالعات گسترده‌ای توسط محققین در مورد انتقال حرارت در لوله‌ها و کانال‌ها و میکرولوله و میکروکانال‌ها با استفاده از سیالات و نانوسیالات مختلف انجام پذیرد [۱-۳]. از جمله روش‌های غیرفعال موجود که در تحقیقات مهندسی و صنعتی کاربرد فراوان دارند، استفاده از سطوح آج‌دار و افزودنی‌های جامد در سیال عامل است که باعث بهبود ضریب هدایت حرارتی و ضریب انتقال حرارت جابجایی می‌شود [۴]. سطوح آج‌دار و زبری مصنوعی در صنایع و ابزارهای مختلف مانند اوپراتورها، کندانسورها، کانال‌های خنک کننده پره‌های توربین، مبدل‌های حرارتی، گرم کن‌های هوا از نوع خورشیدی کاربرد دارند [۵-۹]. هنگامی که سیال در یک کانال آج‌دار جریان می‌یابد با توجه به جدایی جریان و اتصال مجدد جریان بین دو دندان متوالی، دندان تمایل به شکستن زیر لایه آرام و ایجاد اغتشاش موضعی دارد، در نتیجه باعث تماس بیشتر سیال به سطح می‌شود و در نهایت مقاومت گرمایی در ناحیه نزدیک به سطح کاهش یافته و مکانیزم انتقال حرارت افزایش می‌یابد [۱۰]. وجود زبری باعث افزایش تلفات اصطکاک می‌شود. این امر منجر به بالا بردن اغتشاش در منطقه نزدیک به سطح انتقال حرارت می‌شود.

وانگ و ساندن<sup>۱</sup> [۱۱] تاکید کردند که انتقال حرارت موضعی به شکل دندانه وابسته است. ساها<sup>۲</sup> و همکاران [۱۲] به این نتیجه رسیدند که عدد ناسلت و ضریب اصطکاک با افزایش ارتفاع مغشوش کننده جریان و افزایش عدد رینولدز در کانال‌های مربعی و مستطیلی و دایره‌ای با دندانه‌های نصب شده در دیواره‌های متقابل افزایش می‌یابد. لیو<sup>۳</sup> و همکاران [۱۳] تجزیه و تحلیل عددی و تجربی برای بررسی انتقال حرارت و رفتار جریان سیال در کانال مستطیلی با آرایش دندانه متناوب در جهت جریان و نصب شده در یک طرف دیواره را انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که شتاب جریان و شدت اغتشاش مهم‌ترین عواملی هستند که ضریب انتقال حرارت را تحت تأثیر قرار می‌دهند. رایو<sup>۴</sup> و همکاران [۱۴] در نتایج مطالعاتی و تجربی به بررسی نسبت گام به ارتفاع بهینه دندان پرداختند و تحقیقات آن‌ها نشان داد که نه تنها آرایش هندسه، بلکه شکل مغشوش کننده‌های جریان نقش مهمی در افزایش نرخ انتقال حرارت دارد. مانکا<sup>۵</sup> و همکاران [۱۵] به تجزیه و تحلیل عددی بر روی جریان جابجایی هوا در کانال‌های مربعی، مستطیل، سه گوش و دوزنقه‌ای پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در رژیم مغشوش جریان سیال با افزایش عدد ناسلت و ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. پارک و چو<sup>۶</sup> [۱۶] به بررسی تجربی اثرات اصطکاک و انتقال حرارت جریان مغشوش نانو سیال در یک لوله مدور با نانوذرات اکسید تیتانیوم و اکسید آلومینیم پرداختند. در این پژوهش آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش غلظت نانوذره باعث افزایش عدد ناسلت می‌شود. مایگا<sup>۷</sup> و همکاران [۱۷] مزایای استفاده از نانو سیال را مورد بررسی قرار دادند، در این بررسی مشخص شد که استفاده از نانوذرات جامد باعث اثرات شدید تنش برشی بر روی دیواره است. ایزدی و همکاران [۱۸] جریان همرفت اجباری را در حالت آرام توسعه یافته در بین دو دایره متحدالمركز را مورد

<sup>1</sup> Wang and Sunden

<sup>2</sup> Saha

<sup>3</sup> Liou

<sup>4</sup> Rau

<sup>5</sup> Manca

<sup>6</sup> Park and Cho

<sup>7</sup> Maiga

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذره جامد [۱۹].

Material	Pr	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Cp (J/kgK)	K (W/m.K)
Pure Water	۶/۲	۹۹۷/۱	۴۱۷۹	۰/۶۱۳
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	۳۹۷۰	۷۶۵	۴۰

هر یک از حالت‌های بررسی شده ۱، ۲، ۳ و ۴ با توجه به شکل (۱) بر اساس پارامتر ارتفاع دندانهدار، در جدول (۲) نشان داده شده‌اند.

جدول ۲- حالت‌های بررسی شده ارتفاع دندانهدار در این تحقیق

Case	L(mm)	h(mm)	$\alpha_1$	$\alpha_2$
(۱)			۰/۲	۰/۲
(۲)	۲/۵	$25 \times 10^{-3}$	۰/۳	۰/۳
(۳)			۰/۲	۰/۳
(۴)			۰/۳	۰/۲

در این بررسی جریان دوبعدی، تراکم ناپذیر، نیوتونی، آرام و تک فازی و خواص نانوسیال با دما ثابت فرض می‌شود. سیال در نواحی ورودی میکروکانال با سرعت یکنواخت وارد شده و شکل نانوذرات به طور یکنواخت و کروی شکل فرض می‌شود.

### ۳- فرمول بندی

معادلات بی‌بعد حاکم شامل معادلات پیوستگی، ممتوم و انرژی است که برای حالت دائم و آرام در مختصات کارترین حل می‌شوند.

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f} \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f} \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (3)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \frac{1}{Re Pr} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (4)$$

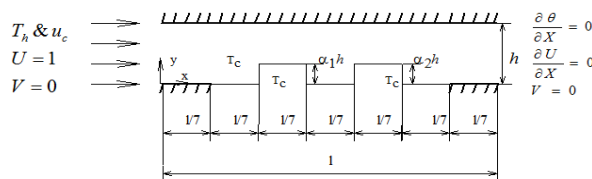
در معادلات فوق از پارامترهای بی‌بعد زیر استفاده می‌شود،

بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که کسر حجمی نانوذرات تأثیر مهمی در پروفیل‌های دمایی دارد و تأثیری بر روی سرعت بی‌بعد ندارد.

### ۲- بیان مسئله

تجزیه و تحلیل انجام شده بر روی یک میکروکانال دو بعدی دندانهدار، با وجود دو دندانهدار مستطیل شکل در سطوح داخلی است. به منظور بررسی انتقال حرارت، دینامیک سیالات محاسباتی جریان نانوسیال، مطالعه میدان سرعت، دما و اثرات اصطکاک، در هر یک از حالت‌های بررسی شده تغییرات پارامتر ارتفاع دندانهدار مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۱) شماتیک میکروکانال دوبعدی بررسی شده در این تحقیق را نمایش می‌دهد. طول میکروکانال  $l=2.5\text{mm}$  و ارتفاع آن  $h=25\mu\text{m}$  است. طول میکروکانال بر روی دیواره پایینی به هفت قسمت مساوی تقسیم شده است.

طول بی‌بعد میکروکانال ( $L=l/h=100$ )، و ارتفاع بی‌بعد آن ( $H=h/h=1$ ) است. طول بی‌بعد هر یک از قسمت‌های دیواره پایینی ( $L/7=(l/7)/h=14.28$ ) است. به دیواره پایینی میکروکانال در نواحی وسط دیواره به طول  $5L/7$  دمای ثابت  $T_c=293\text{K}$  اعمال می‌شود. دیواره بالایی میکروکانال به طول  $L$  و دیواره پایینی به طول  $L/7$  از طرفین چپ و راست عایق است.



شکل ۱- نمای شماتیک مسئله

دمای سیال ورودی به میکروکانال  $T_h=303\text{K}$  است. جریان در حالت آرام برای اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰ بررسی می‌شود. سیال عامل آب و پودر اکسید آلومینیم ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) با کسر حجمی ۲۰ و ۴ درصد است. خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات پودر آلومینیم در جدول (۱) ارائه شده است.

در رابطه (۱۳) مقدار  $k_b=1.3807 \times 10^{-23} \text{J/K}$  ثابت بولتزمن است. برای محاسبه عدد ناسلت موضعی در طول دیواره پایینی از رابطه زیر استفاده می‌کنیم،

$$Nu(X) = \frac{k_{eff}}{k_f} \left( \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)_{Y=0} \quad (14)$$

برای محاسبه عدد ناسلت موضعی در عرض دندانها از رابطه زیر استفاده می‌کنیم،

$$Nu(Y) = \frac{k_{eff}}{k_f} \left( \frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_{X=0} \quad (15)$$

برای محاسبه عدد ناسلت متوسط در طول هر قسمت افقی از دیواره پایینی از رابطه زیر استفاده می‌کنیم،

$$Nu_m / X = \frac{1}{(L/7)} \int_{nL/7}^{(n+1)L/7} Nu(X) dX ; \quad (16)$$

$$n=1,2,3,4,5$$

برای محاسبه عدد ناسلت متوسط در عرض هر یک از دندانها از رابطه زیر استفاده می‌کنیم،

$$Nu_m / Y = \frac{1}{(\alpha_n H)} \int_0^{\alpha_n H} Nu(Y) dY ; \quad n=1,2 \quad (17)$$

عدد ناسلت کل برای بر روی سطح هر دندان برابر است با،

$$Nu_{m_{total}} = Nu_m / X + Nu_m / Y \quad (18)$$

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho u_{ave}^2} ; \quad \mu = \mu_f \text{ \& } \rho = \rho_f \text{ \& } u_{ave} = u_c \quad (19)$$

با جایگذاری پارامترهای بی بعد قسمت (۵) در معادله (۱۹) می‌توان به روابط (۲۰) و (۲۱) رسید.

$$C_f(X) = \frac{2}{Re} \left( \frac{\partial U}{\partial Y} \right)_{Y=0} \quad (20)$$

$$C_f(Y) = \frac{2}{Re} \left( \frac{\partial V}{\partial X} \right)_{X=0} \quad (21)$$

برای محاسبه ضریب اصطکاک متوسط در طول هر قسمت افقی از دیواره پایینی از رابطه زیر استفاده می‌کنیم،

$$C_{f,m} / X = \frac{1}{(L/7)} \int_{nL/7}^{(n+1)L/7} C_f(X) dX ; \quad n=0,1,2,3,4,5,6 \quad (22)$$

برای محاسبه ضریب اصطکاک متوسط در عرض هر یک از دندانها از رابطه زیر استفاده می‌کنیم،

$$C_{f,m} / Y = \frac{1}{(\alpha_n H)} \int_0^{\alpha_n H} C_f(Y) dY ; \quad n=1,2 \quad (23)$$

ضریب اصطکاک موضعی کل برابر است با،

$$C_{f,m_{total}} = C_{f,m} / X + C_{f,m} / Y \quad (24)$$

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{h} & Y &= \frac{y}{h} & V &= \frac{v}{u_c} \\ \theta &= \frac{T - T_c}{T_h - T_c} & U &= \frac{u}{u_c} & H &= \frac{h}{h} = l \\ Re &= \frac{u_c h}{\nu_f} & Pr &= \frac{\nu_f}{\alpha_f} & P &= \frac{\bar{P}}{\rho_{nf} u_c^2} \end{aligned} \quad (5)$$

از رابطه زیر جهت محاسبه چگالی نانوسیال استفاده می‌شود [۲۰]،

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_s \quad (6)$$

از رابطه برینکمن جهت محاسبه لزجت موثر دینامیکی نانوسیال استفاده می‌شود [۲۱]،

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (7)$$

ضریب پخش حرارتی موثر نانوسیال با فرمول زیر محاسبه می‌شود [۲۰]،

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{eff}}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (8)$$

ظرفیت گرمای ویژه نانوسیال با فرمول زیر محاسبه می‌شود [۲۰]،

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad (9)$$

برای محاسبه ضریب هدایت گرمایی موثر نانوسیال برای سوسپانسیون‌هایی که دارای ذرات کروی شکل هستند، از رابطه پاتل و همکاران [۲۲]، استفاده می‌شود،

$$k_{eff} = k_f \left[ 1 + \frac{k_s A_s}{k_f A_f} + c k_s Pe \frac{A_s}{k_f A_f} \right] \quad (10)$$

در رابطه (۱۰) ثابت تجربی  $c=36,000$  است،

$$\frac{A_s}{A_f} = \frac{d_f}{d_s} \frac{\phi}{1 - \phi} \quad (11)$$

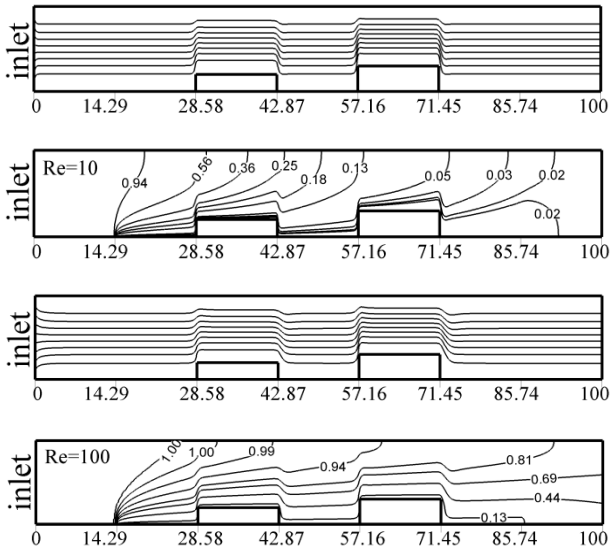
$$Pe = \frac{u_s d_s}{\alpha_f} \quad (12)$$

در روابط (۱۱) و (۱۲) قطر مولکول آب برابر با  $d_f=2\text{\AA}$  و قطر مولکول نانو ذره آلومینیم برابر با  $d_s=50\text{nm}$  است. پارامتر  $u_s$  سرعت براونی ناشی از حرکت تصادفی نانوذرات جامد است و با فرمول زیر محاسبه می‌شود،

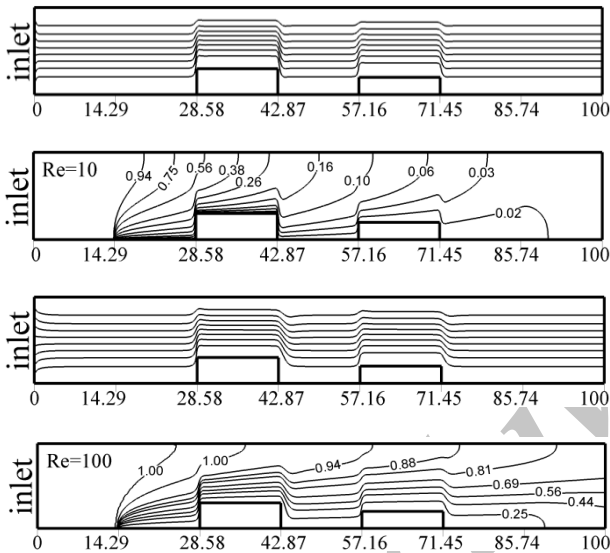
$$u_s = \frac{2 \kappa_b T}{\pi \mu_f d_s^2} \quad (13)$$

۴- نتایج

شکل (۲) خطوط جریان و هم‌دما (ایزوترم) را برای حالات ۱ تا ۴ در اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰ به ازای کسر حجمی ۴ درصد را نشان می‌دهد. جریان پس از ورود به میکروکانال به حالت توسعه‌یافتگی هیدرودینامیکی می‌رسد. تغییرات خطوط جریان در ناحیه طول ورودی برای عدد رینولدز ۱۰۰ بیشتر از عدد رینولدز ۱۰ است. با افزایش ارتفاع دندانه این تغییرات در نواحی دندانه‌دار افزایش می‌یابد. دلیل این رفتار ناشی از تغییراتی سرعت جریان در طول میکروکانال به علت وجود موانع (دندانه‌ها) با ارتفاع متفاوت در مسیر سیال است. یعنی سرعت سیال قبل و بعد از دندانه‌ها به شدت تغییر می‌کند.



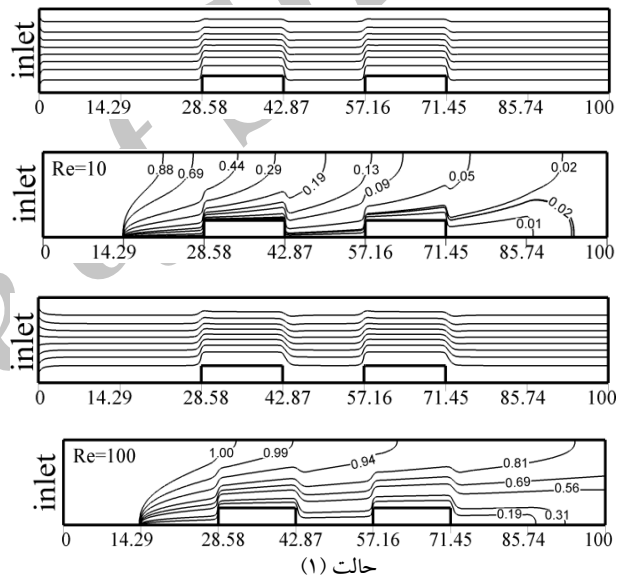
حالت (۳)



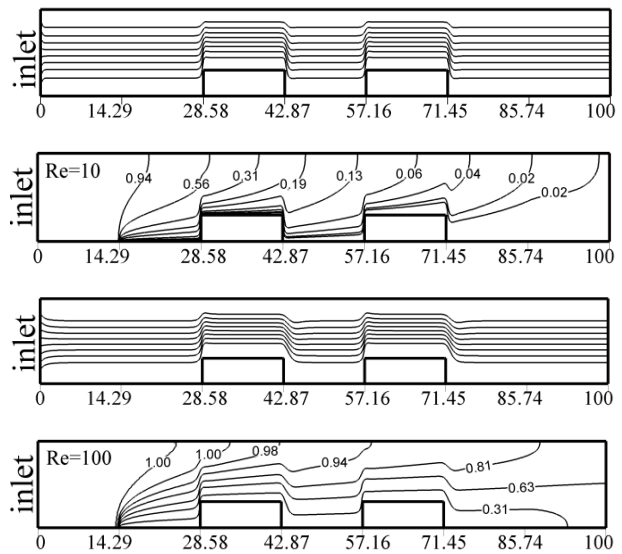
حالت (۴)

شکل ۲- خطوط جریان و دما ثابت برای حالت‌های ۱ تا ۴ در اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰ با کسر حجمی ۴ درصد

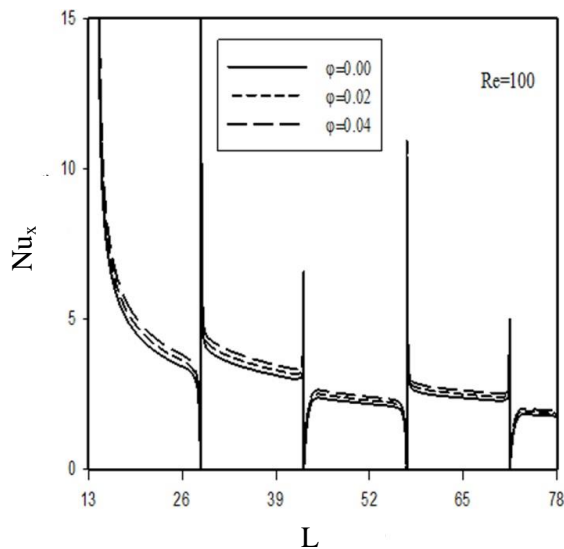
سیال پس از برخورد به دندانه‌ها تغییر مسیر می‌دهد و مؤلفه سرعت عمودی سیال تقویت می‌شود. این موضوع در نمودارهای خطوط جریان مشاهده می‌شود. تغییرات خطوط جریان با افزایش عدد رینولدز و ارتفاع دندانه افزایش می‌یابد. با توجه به شکل (۲) در نمودارهای خطوط دما ثابت در طول میکروکانال، با ورود سیال با دمای  $T_h$  به نواحی دندانه‌دار میکروکانال با دمای  $T_c$ ، دمای سیال گرم‌افت می‌کند و انتقال حرارت بین سیال و سطوح دندانه‌دار اتفاق



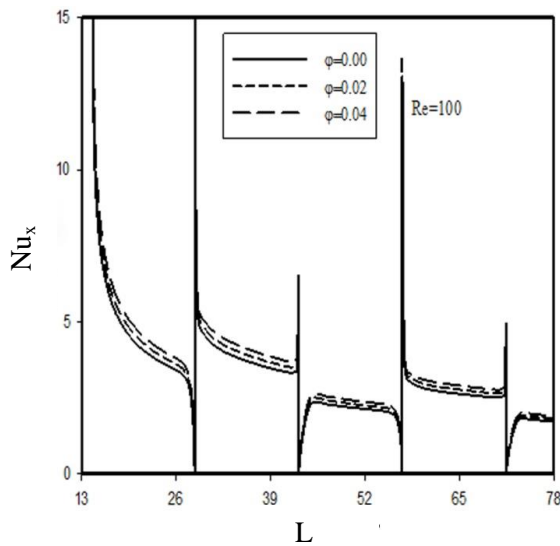
حالت (۱)



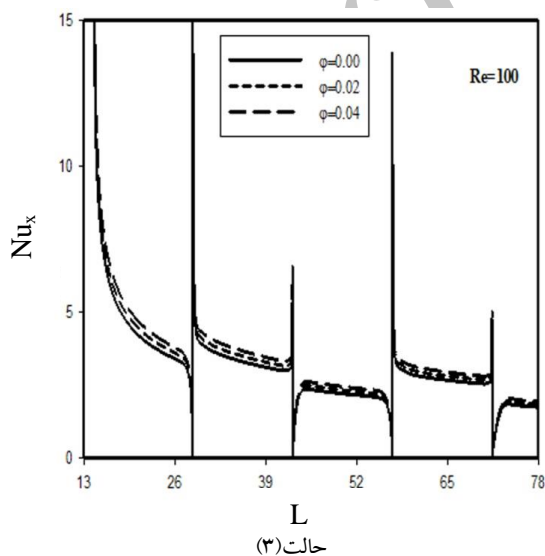
حالت (۲)



حالت (۱)

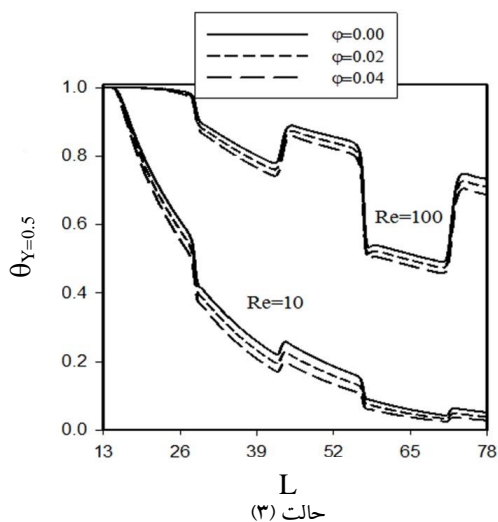


حالت (۲)

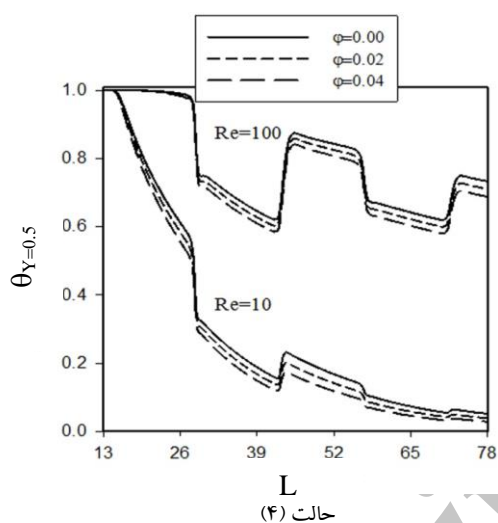


حالت (۳)

می‌افتد. میزان انتقال حرارت بین سیال و سطح دنداندار با کاهش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. دلیل این رفتار ناشی از این است که در عدد رینولدز پایین‌تر، سیال گرم مدت بیشتری با سطح سرد در تماس است. با افزایش ارتفاع دندان، به علت اختلاط بهتر جریان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. وجود دندانها در طول میکروکانال مانند اغتشاش-گر عمل می‌کنند و باعث کاهش گرادیان دما در بین سطح و سیال می‌شود و نهایتاً باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود. در کل با افزایش سطح انتقال حرارت ناشی از افزایش ارتفاع دندان، و افزایش درصد حجمی نانوذره نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. شکل (۳) مقادیر عدد ناسلت موضعی در راستای طول بی‌بعد میکروکانال برای آب خالص و نانو سیال آب-اکسید آلومینیم در کسر حجمی ۲۰ و ۴ درصد بر روی دیواره پایینی میکروکانال نمایش می‌دهد. این نتایج برای اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰ برای حالت‌های ۱ تا ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نانوسیال عدد ناسلت بالاتری نسبت به آب خالص برای اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰ برای کلیه حالت‌های ۱ تا ۴ دارد. دلیل این افزایش ناشی از وجود نانو ذرات با هدایت حرارتی بالاتر و تأثیر حرکت براونی در محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال است. وجود دندان در عدد ناسلت عامل دیگری می‌باشد که در نواحی دنداندار باعث افزایش ناگهانی عدد ناسلت است. عامل اصلی این افزایش ناشی از اختلاط بهتر لایه های سیال بین نواحی سرد و گرم است. با برخورد سیال به دندان لایه مرزی حرارتی در راستای حرکت سیال قبل از برخورد به دندان، از بین می‌رود که خود دلیل دیگر افزایش نرخ انتقال حرارت است.



حالت (۳)

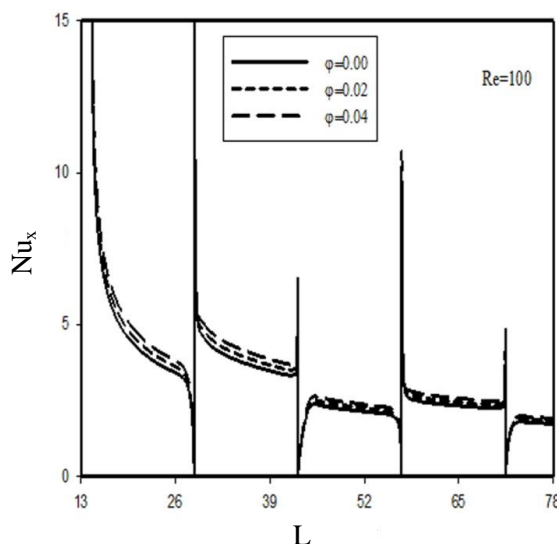


حالت (۴)

شکل ۴- نمودار دمای بی بعد خط مرکزی جریان در طول میکروکانال، در حالت‌های ۱ تا ۴ برای اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰

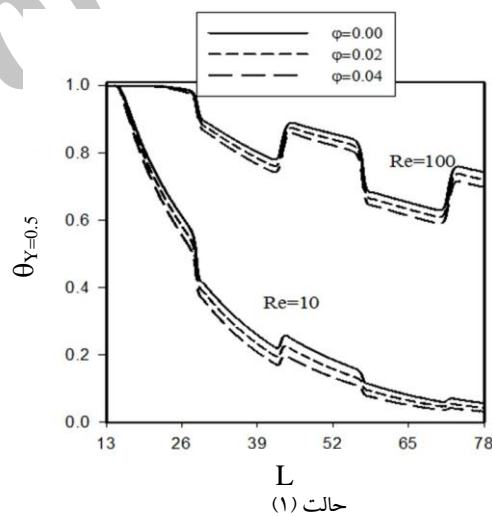
دمای بی بعد در طول میکروکانال به علت کاهش عدد رینولدز، افزایش کسر حجمی نانوذرات و وجود دندانه‌ها در مسیر حرکت سیال کاهش می‌یابد.

شکل (۵) سرعت بی بعد خط مرکزی جریان در طول میکروکانال را نشان می‌دهد. سرعت بی بعد جریان در نواحی دندانه‌دار افزایش می‌یابد. این افزایش ناشی از کوچک شدن مقطع عبور سیال عامل در میکروکانال به علت وجود دندانه است. این تغییرات در عدد رینولدز ۱۰ نسبت به عدد رینولدز ۱۰۰ کمتر است. علت آن ناشی از انطباق پذیری بهتر جریان با سطح دندانه‌دار میکروکانال در اعداد رینولدز پایین است.

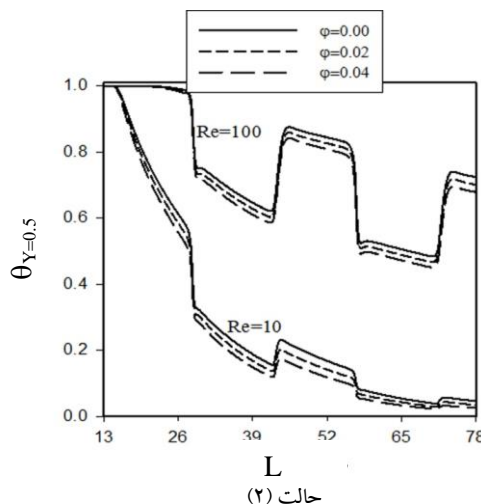


حالت (۴)

شکل ۳- مقادیر عدد ناسلت موضعی بر روی دیواره دندانه‌دار پایینی، در حالت‌های ۱ تا ۴ برای عدد رینولدز ۱۰۰  
شکل (۴) نمودار دمای بی بعد خط مرکزی جریان در طول میکروکانال، در حالت‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ برای اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰ را نشان می‌دهد.

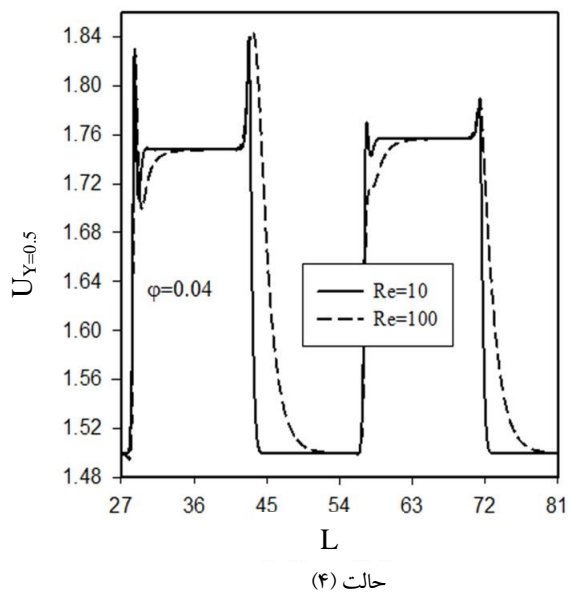


حالت (۱)



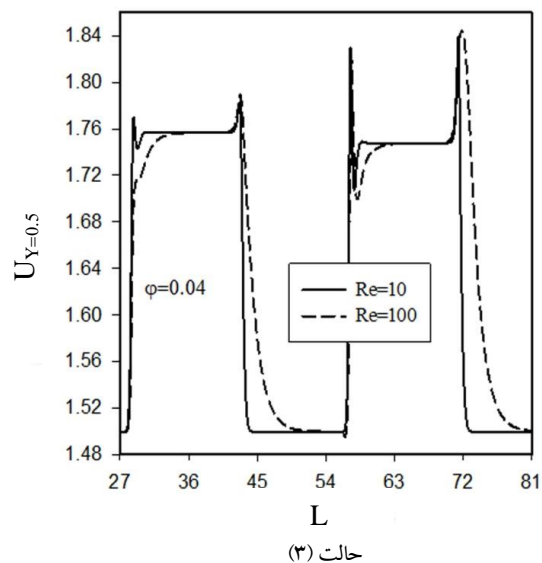
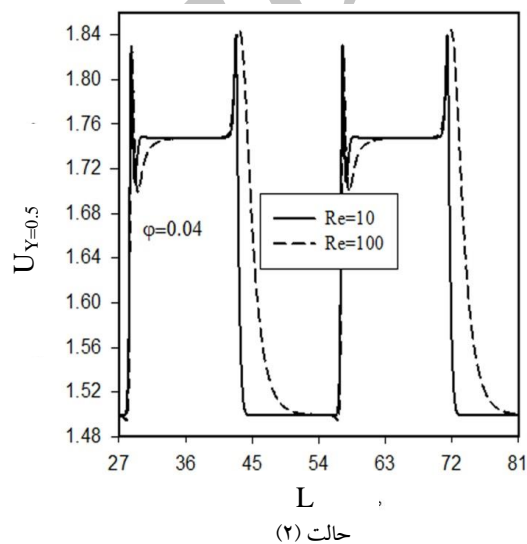
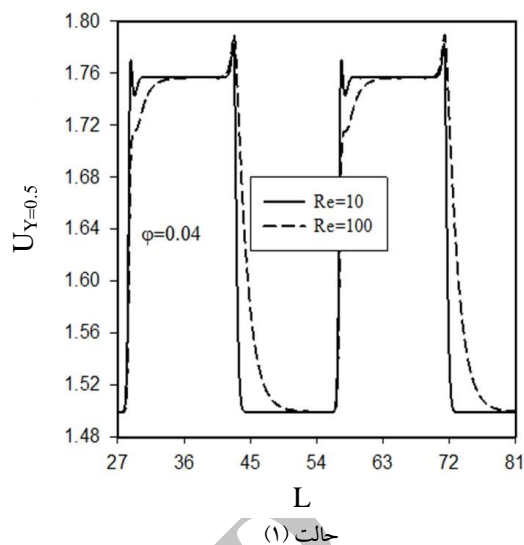
حالت (۲)



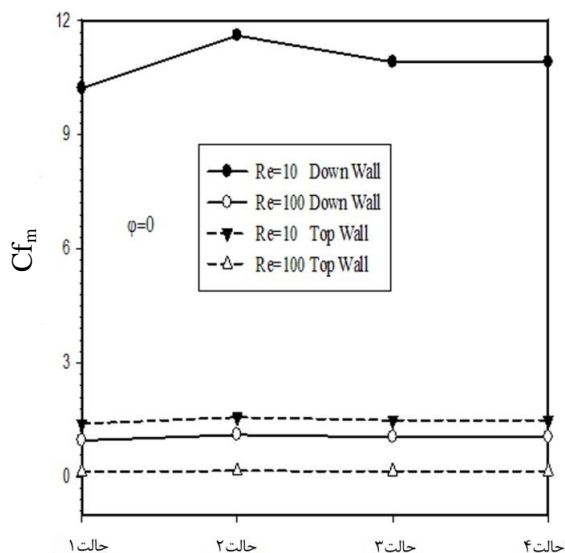


شکل ۵- نمودار سرعت بدون بعد خط مرکزی میکروکانال، در حالت- های ۱ تا ۴ برای اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰

در اعداد رینولدز پایین جریان تمایل دارد، شکل سطح تماس را به خودش بگیرد و مانند یک خط جریان عمل کند. می-توان گفت با کاهش عدد رینولدز سیال فرصت بیشتری در طول میکروکانال جهت انتقال حرارت با سطح دندانه دار دارد. با افزایش کسر حجمی نانوذرات مکانیزم های انتقال حرارت نانوذرات تقویت می شود. وجود دندانه ها در مسیر حرکت سیال و افزایش ارتفاع دندانه ها، باعث از بین رفتن، و تشکیل دوباره لایه مرزی حرارت در نواحی دندانه دار است. پارامترهای فوق باعث کاهش دمای بی بعد در طول میکروکانال و اختلاط بهتر لایه های سیال، و در نهایت باعث افزایش انتقال حرارت می شوند. شکل (۶) نمودار عدد ناسلت متوسط در حالت های ۱ تا ۴ برای اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰ را نشان می دهد.

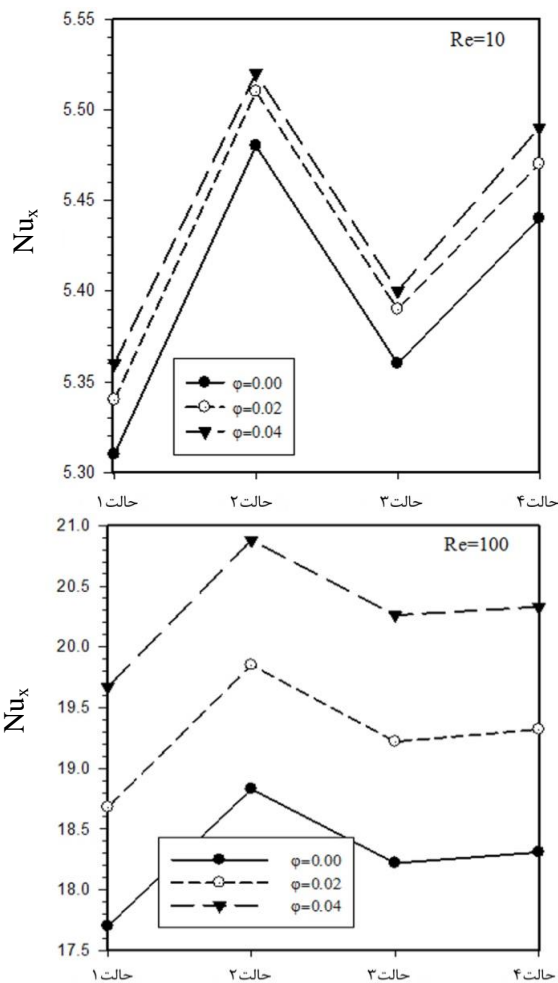


دندانه کاهش می‌یابد. با بزرگ‌تر شدن سطح مقطع جریان به علت کاهش ارتفاع دندانه، مؤلفه‌های سرعت سیال کمتر دچار تغییر می‌شوند، و نهایتاً با توجه به عوامل فوق ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد.



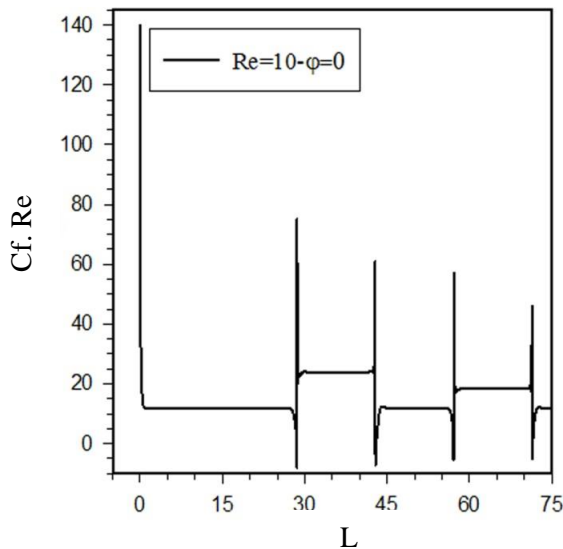
شکل ۷- نمودار ضریب اصطکاک متوسط در حالت‌های ۱ تا ۴ برای اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰

با کاهش ارتفاع دندانه سطح تماس سیال و دندانه کاهش می‌یابد. با بزرگ‌تر شدن سطح مقطع جریان به علت کاهش ارتفاع دندانه، مؤلفه‌های سرعت سیال کمتر دچار تغییر می‌شوند و نهایتاً با توجه به عوامل فوق ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. این موضوع در نمودار شکل (۷) در مقایسه ضریب اصطکاک برای دیواره بالایی (بدون دندانه) و دیواره پایینی (دندانه دار) قابل مشاهده است. شکل (۸) عدد پوزیه در طول میکروکانال، برای کلیه حالت‌های ۱ تا ۴ در عدد رینولدز ۱۰ را نشان می‌دهد. میزان تغییرات عدد پوزیه در نواحی قبل و بعد از دندانه قابل ملاحظه است. دلیل آن ناشی از تغییرات سرعت و ضریب اصطکاک در این نواحی است. با افزایش ارتفاع دندانه تغییرات عدد پوزیه افزایش می‌یابد. تغییرات عدد پوزیه در ناحیه‌ی طول ورودی میکروکانال بدون تغییر می‌باشد. دلیل آن ناشی از این است که در نواحی ورودی میکروکانال، تمام حالت‌ها دارای شرایط یکسان از نظر تماس با سطح میکروکانال هستند.

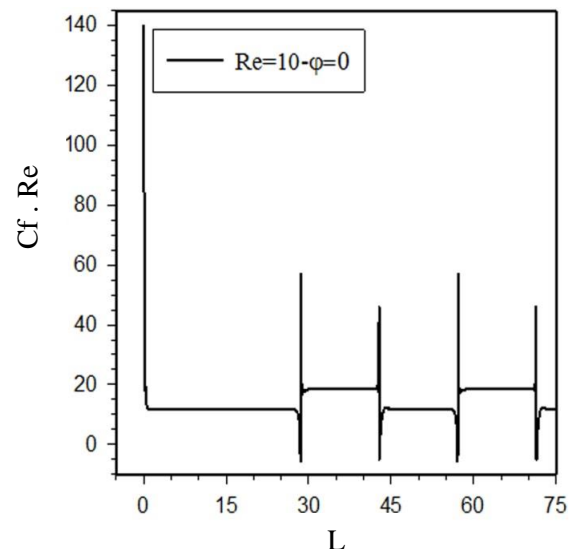


شکل ۶- نمودار مقادیر عدد ناسلت متوسط در حالت‌های ۱ تا ۴ برای اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰

با افزایش عدد رینولدز، کسر حجمی نانوذرات جامد و ارتفاع دندانه میزان عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. میزان افزایش عدد ناسلت در عدد رینولدز ۱۰ نسبت به عدد رینولدز ۱۰۰ برای کلیه حالات ۱ تا ۴ دارای تغییرات بیشتری است. با افزایش عدد رینولدز تغییرات عدد ناسلت کاهش می‌یابد. نمودار شکل (۷) میزان ضریب اصطکاک متوسط در حالت‌های ۱ تا ۴ روی دیواره‌ی بالایی و پایینی میکروکانال را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز و کاهش تعداد دندانه ضریب اصطکاک متوسط کاهش می‌یابد. دلیل آن ناشی از تماس بیشتر سیال با سطوح دندانه‌دار است. همچنین با کاهش عدد رینولدز سیال فرصت بیشتری را برای تماس با سطح دارد و اثرات تنش برشی بین سیال و سطوح دندانه‌دار در لایه‌ی سیال نزدیک به سطح، بیشتر احساس می‌شود. با کاهش ارتفاع دندانه سطح تماس سیال و



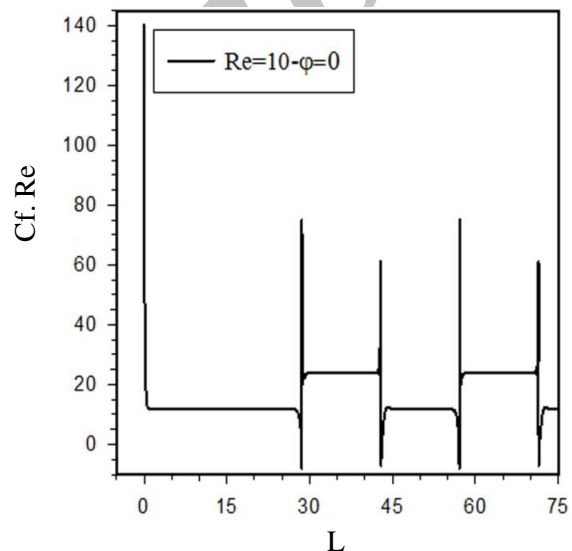
حالت (۴)



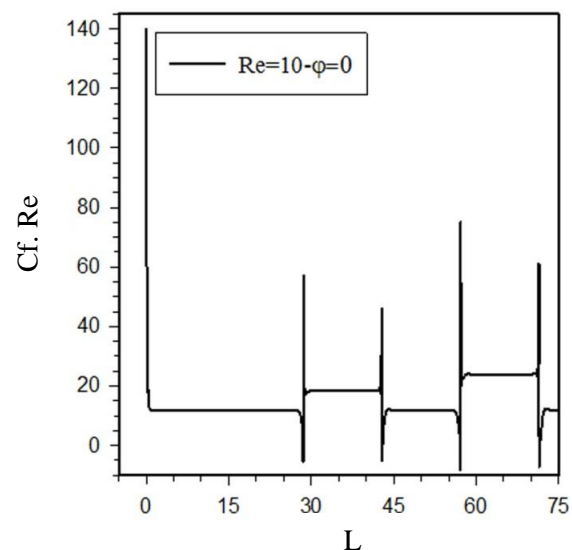
حالت (۱)

شکل ۸- نمودار تغییرات عدد پوازیه در راستای طول بی بعد میکرو کانال میکرو برای حالت‌های ۱ تا ۴ در عدد رینولدز ۱۰

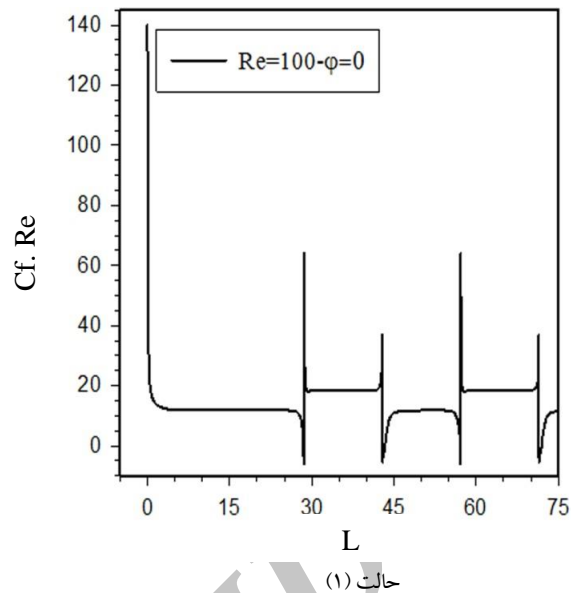
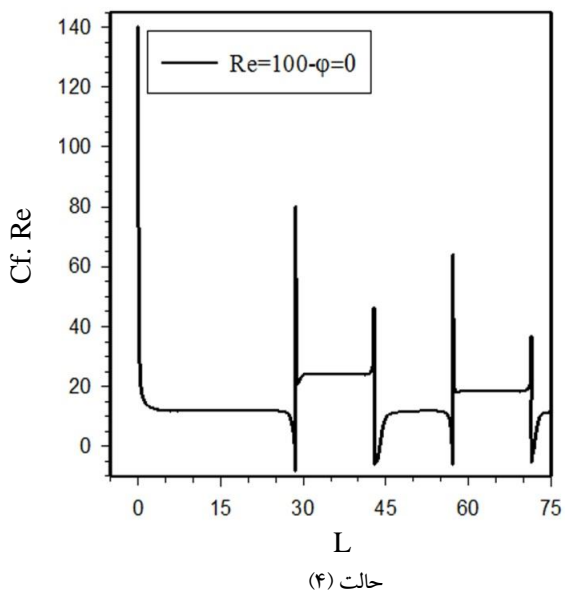
این موضوع در مقایسه ضریب اصطکاک برای دیواره بالایی (بدون دندانه) و دیواره پایینی (دندانه دار) قابل مشاهده است. شکل (۹) نمودار عدد پوازیه در طول میکرو کانال، برای کلیه حالت‌های ۱ تا ۴ در عدد رینولدز ۱۰۰ را نشان می‌دهد. در نواحی بدون دندانه میزان تغییرات عدد پوازیه در عدد رینولدز ۱۰ در مقایسه با عدد رینولدز ۱۰۰ بیشتر است. در نواحی قبل و بعد از دندانه‌ها میزان تغییرات عدد پوازیه در عدد رینولدز ۱۰۰ در مقایسه با عدد رینولدز ۱۰ بیشتر است. دلیل آن ناشی تغییرات سرعت و ضریب اصطکاک در این نواحی است و با افزایش ارتفاع دندانه این تغییرات افزایش می‌یابد. شکل (۱۰) نمودار عدد پوازیه در راستای دیواره بالایی میکرو کانال را نشان می‌دهد. با توجه شکل مشاهده می‌شود مقدار عدد پوازیه در راستای ارتفاع دندانه‌ها با افزایش عدد رینولدز و افزایش ارتفاع دندانه افزایش می‌یابد. این تغییرات عدد پوازیه در راستای طول دیواره بالایی میکرو کانال را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نواحی با گرادیان سرعت بالاتر مثل نواحی قبل و بعد از دندانه این تغییرات در اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰ آشکارتر است.



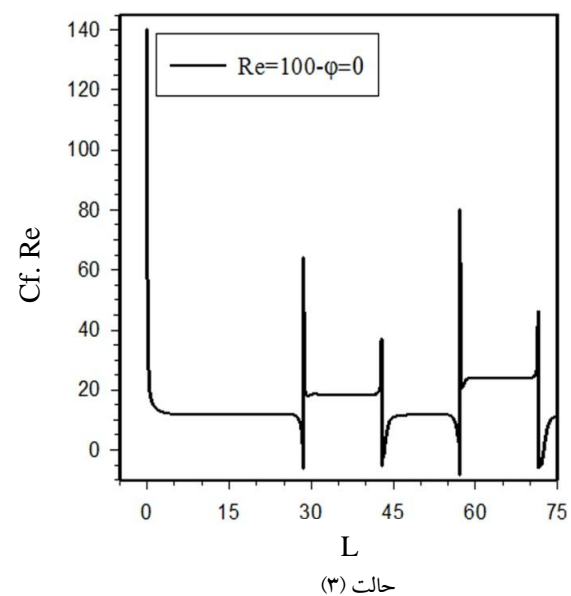
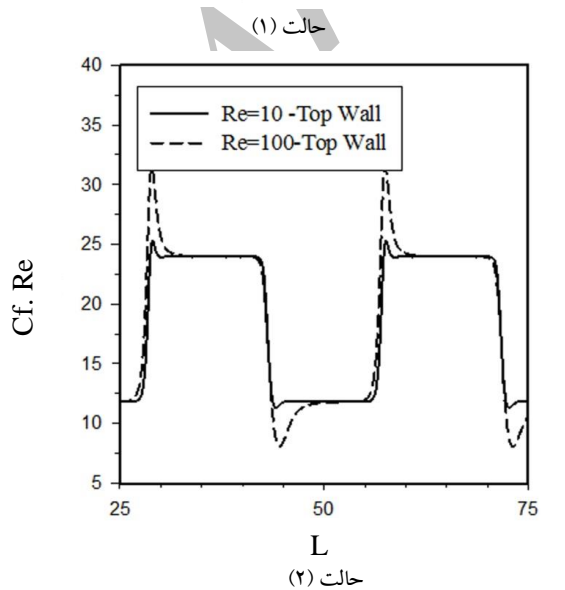
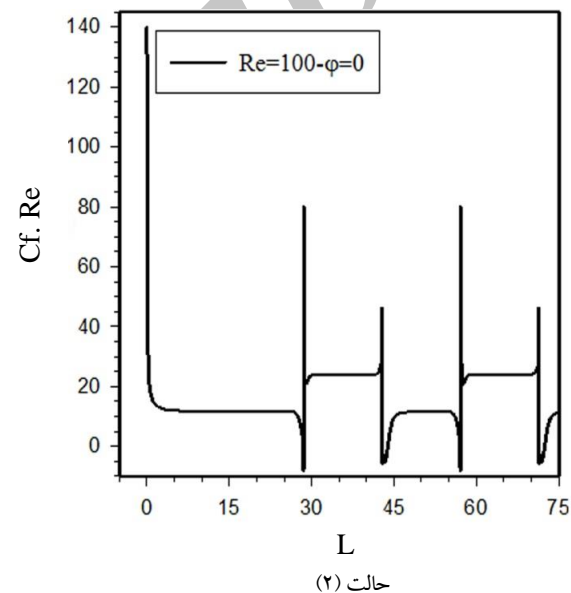
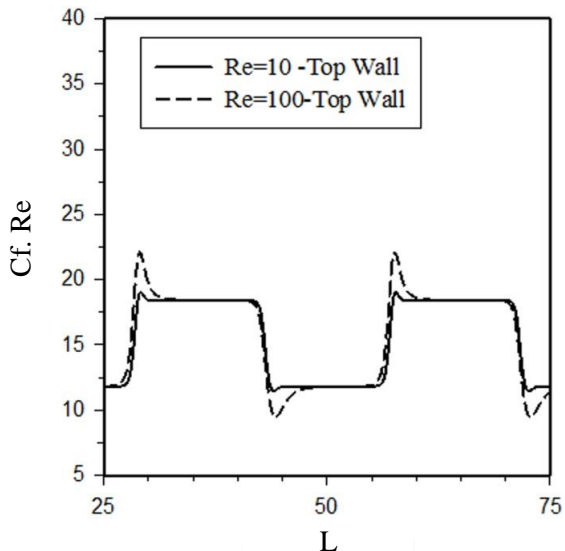
حالت (۲)

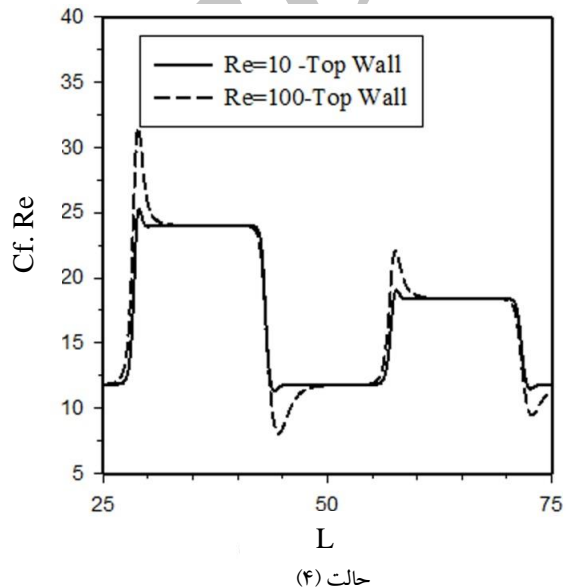
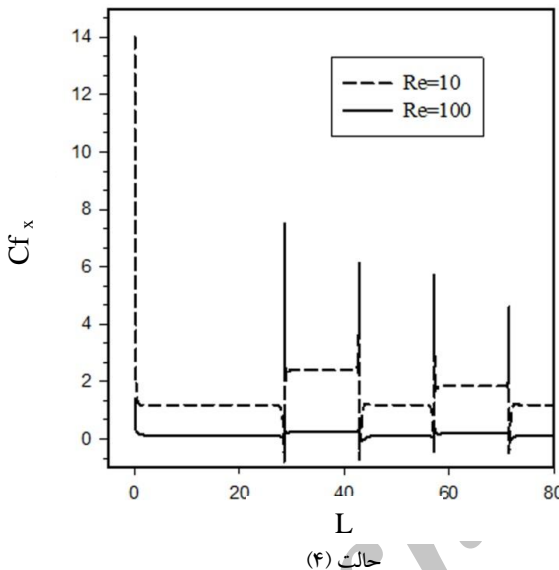
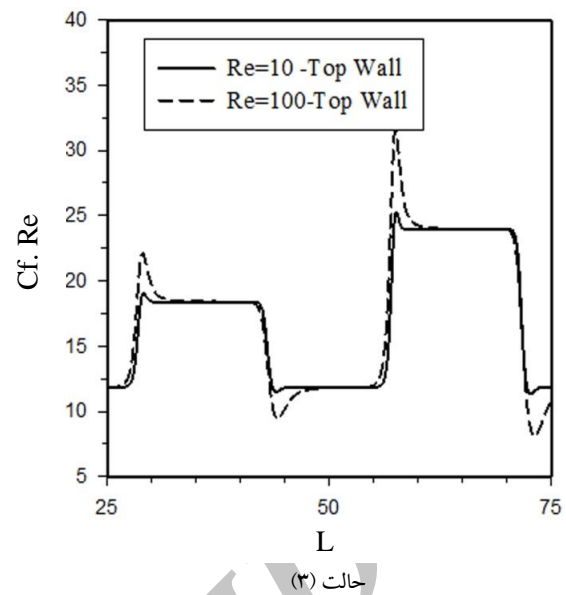
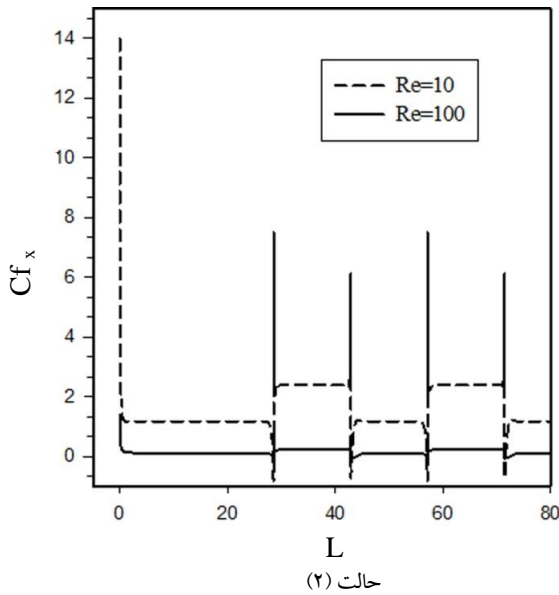


حالت (۳)



شکل ۹- نمودار تغییرات عدد پوازیه در راستای طول میکروکانال برای حالت‌های ۱ تا ۴ در عدد رینولدز ۱۰۰



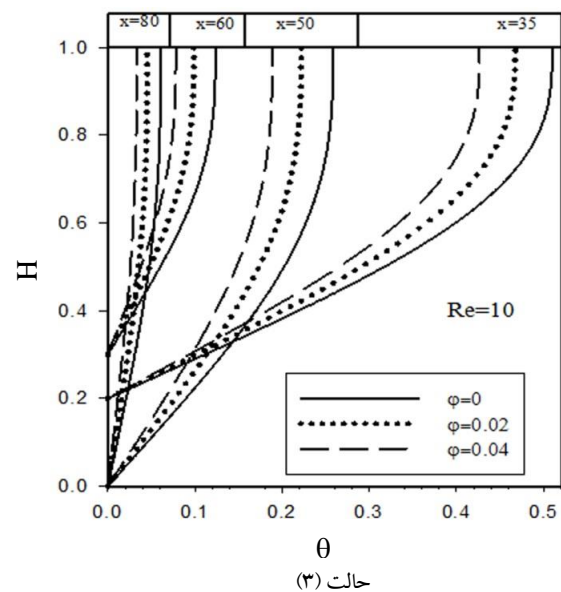
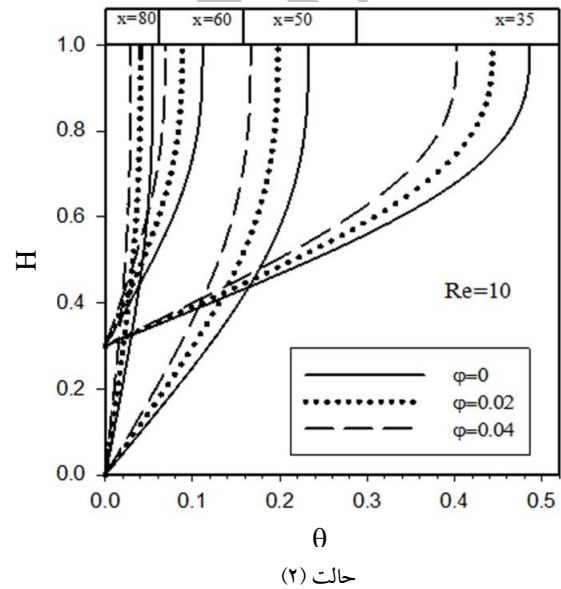
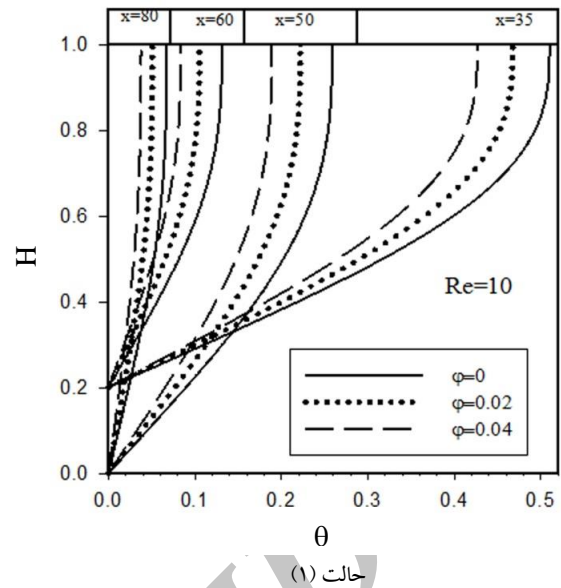
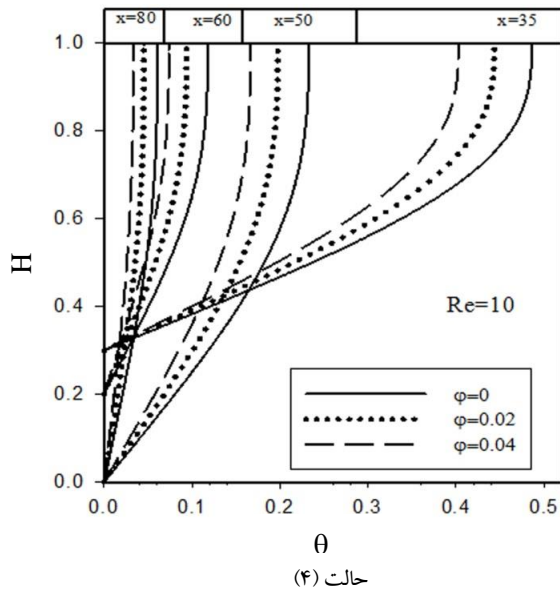


شکل ۱۱- نمودار تغییرات ضریب اصطکاک در راستای طول میکروکانال، در حالات ۴، ۲ برای اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰

شکل ۱۰- نمودار عدد پوازیه در راستای طول بی بعد میکروکانال در دیواره بالایی برای حالات ۱ تا ۴ در اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰

شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نمودار تغییرات دمای بی بعد در راستای طول میکروکانال، در مقاطع مختلف میکروکانال در حالات ۱ تا ۴ برای اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰ نشان می‌دهد. برای کلیه حالت‌ها در عدد رینولدز ۱۰ با مقایسه شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مشاهده می‌شود با کاهش عدد رینولدز و افزایش درصد حجمی نانوذرات و نزدیک شدن به سطح مقطع خروج میکروکانال، میزان دمای بی بعد سیال گرم کاهش می‌یابد.

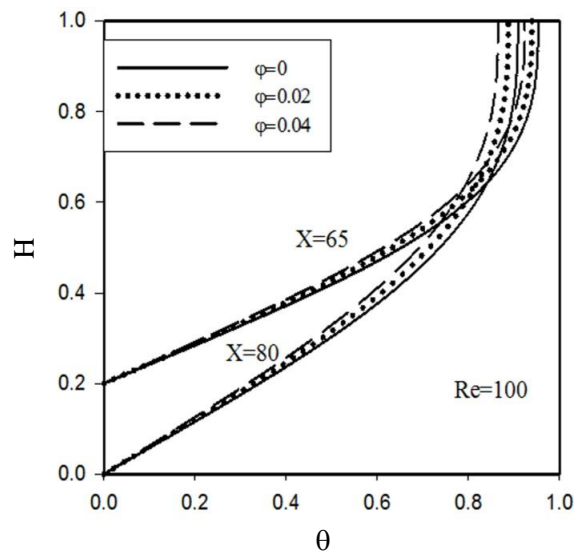
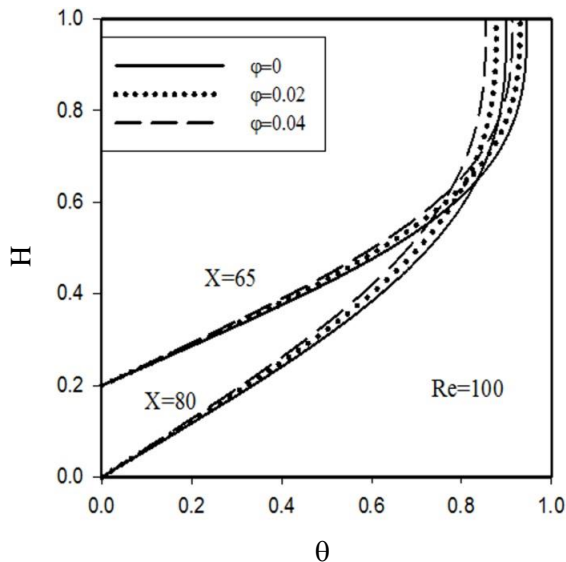
شکل (۱۱) تغییرات ضریب اصطکاک در راستای طول میکروکانال، در حالات ۴، ۲ برای اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع دندان، ضریب اصطکاک افزایش ناگهانی دارد. با افزایش عدد رینولدز این تغییرات به صورت مقطعی بیشتر می‌شود، که علت آن ناشی از افزایش سرعت سیال است. مشاهده می‌شود ضریب اصطکاک در حالات ۲ و ۴ در رینولدزهای پایین‌تر (عدد رینولدز ۱۰) در طول میکروکانال حدود ۱۰ برابر بیشتر از رینولدز بالاتر (عدد رینولدز ۱۰۰) است.



شکل ۱۲- نمودار تغییرات دمای بی‌بعد در راستای طول بی‌بعد میکروکانال در مقاطع مختلف میکروکانال برای حالت‌های ۱ تا ۴ در عدد رینولدز ۱۰

کاهش دمای بی‌بعد سیال در مقاطع مختلف میکروکانال، نشان دهنده هم‌دم شدن سیال با دمای  $T_h$  و سطح با دمای  $T_c$  است. تغییرات دمای بی‌بعد در جریان با عدد رینولدز پایین‌تر آشکارتر است و در جریان با عدد رینولدز بالاتر تغییرات دمای بی‌بعد کمتر است. دلیل آن ناشی از زمان بیشتر مبادله حرارت بین سیال گرم و سطح سرد در جریان با عدد رینولدز پایین‌تر است. جدول (۳) مقادیر عدد ناسلت متوسط برای حالت‌های ۱ تا ۴ برای اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰ با کسر حجمی متفاوت نانو ذره را نشان می‌دهد. این مقادیر برای دیواره پایینی میکروکانال محاسبه شده است.



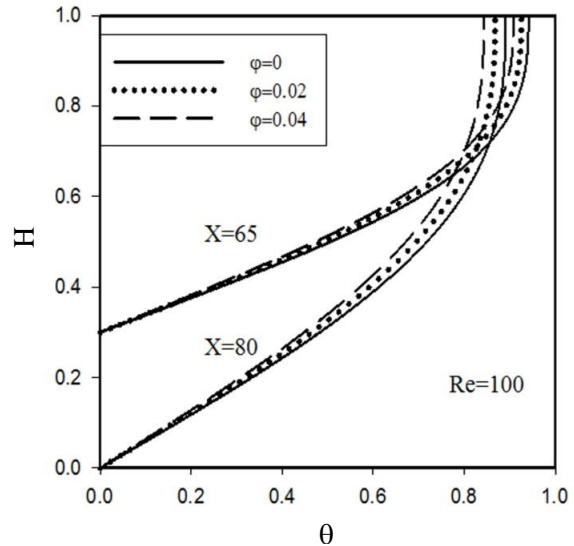


حالت (۱)

شکل ۱۳- نمودار تغییرات دمای بی بعد در راستای طول بی بعد میکرو کانال در مقاطع مختلف میکرو کانال

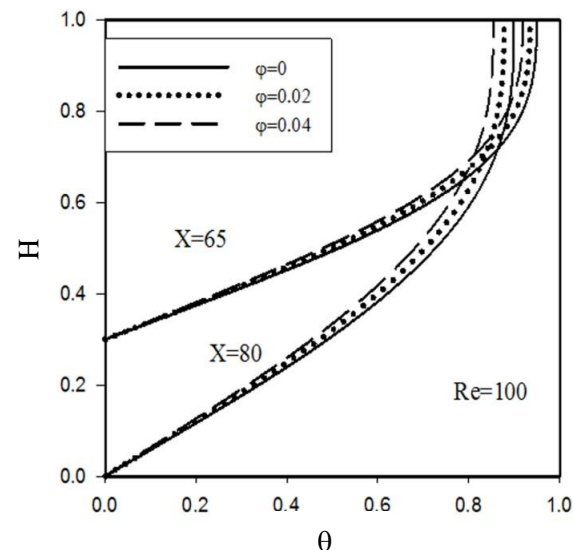
جدول ۳- مقادیر عدد ناسلت متوسط برای حالت های ۱ تا ۴ برای اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰ با کسر حجمی متفاوت نانوذره

Re	Case	Nu <sub>m</sub>		
		φ=۰	φ=۰/۲	φ=۰/۴
۱۰	(۱)	۵/۳۱	۵/۳۴	۵/۳۶
۱۰۰		۱۷/۷۰	۱۸/۶۸	۱۹/۶۷
۱۰	(۲)	۵/۴۸	۵/۵۱	۵/۵۲
۱۰۰		۱۸/۸۳	۱۹/۸۵	۲۰/۸۸
۱۰	(۳)	۵/۳۶	۵/۳۹	۵/۴۰
۱۰۰		۱۸/۲۲	۱۹/۲۲	۲۰/۲۶
۱۰		۵/۴۴	۵/۴۷	۵/۴۹
۱۰۰	(۴)	۱۸/۳۱	۱۹/۳۲	۲۰/۳۳



حالت (۲)

با توجه به مقادیر به دست آمده در جدول میزان عدد ناسلت متوسط در عدد رینولدز ۱۰ برای کلیه حالات مختلف ارتفاع دندانه و کسر حجمی های متفاوت نانوذره، دارای تغییرات کمتری است و این مقدار در عدد رینولدز ۱۰۰ دارای تغییرات بیشتری است که علت آن ناشی از افزایش سرعت سیال در رینولدزهای بالاتر و تقویت مکانیزم های انتقال حرارت نانوذرات با افزایش درصد حجمی نانوذرات معلق در سیال پایه است. جدول (۴) مقادیر ضریب اصطکاک متوسط برای حالت های ۱ تا ۴ برای اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰ در دیواره



حالت (۳)

حالت (۴)

نانوذرات تأثیر چندانی بر روی پارامترهای هیدرودینامیکی مانند سرعت سیال ندارد و فقط تغییراتی در خطوط جریان در نواحی ورودی میکروکانال ایجاد می‌کند. در اعداد رینولدز پایین تر میزان انتقال حرارت بین سطح و سیال افزایش می‌یابد و سیال فرصت بیشتری برای مبادله گرما به سطح دارد. از طرفی تماس بیشتر سیال با سطح، باعث افزایش ضریب اصطکاک می‌شود.

بالایی و پائینی میکروکانال را نشان می‌دهد. این مقدار در عدد رینولدز ۱۰ حدود ۱۰ برابر نسبت به حالت عدد رینولدز ۱۰۰ است. در عدد رینولدز پایین تر به دلیل این که سیال در طول میکروکانال با دیواره بالایی و پائینی مدت بیشتری در تماس است و در رینولدز بالاتر به علت سرعت بالاتر سیال فرصت کافی جهت تماس با سطوح را ندارد مقدار ضریب اصطکاک در عدد رینولدز ۱۰۰ در مقایسه با عدد رینولدز ۱۰ دارای مقدار کمتری است. افزایش ارتفاع دندان نیز باعث افزایش سطح تماس سیال و سطح می‌شود که در نهایت باعث افزایش ضریب اصطکاک متوسط دیواره می‌شود. مقدار ضریب اصطکاک متوسط در دیواره بدون دندان (دیواره بالایی) نسبت به دیواره پائینی به میزان قابل چشمگیری کاهش یافته است که نشان می‌دهد وجود دندان باعث افزایش ضریب اصطکاک در مقایسه با سطوح بدون دندان می‌شود.

### ۶-علائم و اختصارات

A	سطح مقطع (m <sup>2</sup> )
C <sub>f</sub>	ضریب اصطکاک
C <sub>f</sub> Re	عدد پوایزه
C <sub>p</sub>	ظرفیت گرمای ویژه (J/kg K)
D	قطر (m)
G	شتاب گرانش (m/s <sup>2</sup> )
h, l	ارتفاع و طول میکروکانال (m)
H=h/h	ارتفاع بی بعد میکروکانال
L=l/h	طول بی بعد میکروکانال
K	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)
Nu	عدد ناسلت
P	فشار (Pa)
Pe=(u <sub>s</sub> d <sub>s</sub> /α <sub>f</sub> )	عدد پکلت
Pr=ν <sub>f</sub> /α <sub>f</sub>	عدد پرائتل
Re=ρ <sub>f</sub> u <sub>c</sub> h/μ <sub>f</sub>	عدد رینولدز
T	دما (K)
u, v	سرعت طولی و عرضی (m/s)
u <sub>c</sub> (m/s)	سرعت ورودی جریان (m/s)
u <sub>s</sub> (m/s)	سرعت بروانی (m/s)
(U, V)=(u/ U <sub>0</sub> , v/ U <sub>0</sub> )	سرعت بی بعد طولی و عرضی (m/s)
(X, Y) = (x/h, y/h)	طول و عرض بی بعد

### ۶-۱-علائم یونانی

α	ضریب پخش حرارتی (m <sup>2</sup> /s)
---	-------------------------------------

جدول ۴- مقادیر ضریب اصطکاک متوسط برای حالت‌های ۱ تا ۴ برای اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰ در دیواره بالایی و پائینی میکروکانال

Re	Case	C <sub>f m</sub> (φ=۰)	
		Down wall	Top wall
۱۰	(۱)	۱۰/۲۲	۱/۴۰
		۰/۹۶	۰/۱۴
۱۰۰	(۲)	۱۱/۶۱	۱/۵۷
		۱/۱۱	۰/۱۶
۱۰	(۳)	۱۰/۹۱	۱/۴۹
		۱/۰۵	۰/۱۵
۱۰۰	(۴)	۱۰/۹۱	۱/۴۹
		۱/۰۵	۰/۱۵

### ۵-نتیجه گیری

در بررسی‌های انجام شده در این تحقیق می‌توان دریافت، با افزایش ارتفاع دندان و افزایش درصد حجمی نانوذرات و افزایش عدد رینولدز می‌توان نرخ انتقال حرارت را افزایش داد. اما از طرفی وجود دندان در مسیر حرکت جریان باعث به وجود آمدن گرادیان سرعت و افزایش سطح تماس می‌شود، که باعث افزایش ضریب اصطکاک متوسط است. وجود



- [4] Choi, S.U.S., Nanofluids: from vision to reality through research, *J. Heat Transf.* 131 (2009) 1- 9.
- [5] Webb, R.L., Advances in shell side boiling of refrigerants, *J. Inst. Refrig.* 87 (1991) 75-86.
- [6] Webb, R.L., and Robertson, G.F., Shell-side evaporators and condensers used in the refrigeration industry, in: R. K. Shah, E. C. Subbarao, R.A. Mashelkar (Eds.), *Heat Transfer Equipment Design*, Hemisphere Pub. Corp, Washington, 1988, pp.559-570.
- [7] Jaber, M.H., Webb, R.L., Stryker, P., An experimental investigation of enhanced tubes for steam condensers, *ASME Paper*, (1991) 1-8.
- [8] Sunden, B., and Xie, G., Gas turbine blade tip heat transfer and cooling: a literature survey, *Heat Transf. Eng.* 31 (2010) 527-554.
- [9] Karwa, R.S.C., Solanky, J., Saini, S., Thermo-hydraulic performance of solar air heaters having integral chamfered rib roughness on absorber plates, *Energy*, 26 (2001) 161-176.
- [10] Lee, C. K., and Abdel Moneim, S. A., Computational analysis of heat transfer in turbulent flow past a horizontal surface with a 2-D ribs, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 26 (2001) 161-170.
- [11] Wang, L., and Sunden, B., Experimental investigation of local heat transfer in a square duct with various-shaped ribs, *Int. J. Heat Mass Transf.* 43 (2006) 759-766.
- [12] Saha, S. K., Thermal and friction characteristics of turbulent flow through rectangular and square ducts with transverse ribs and wire-coil inserts, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 34 (2010) 575-589.
- [13] Liou, T. M., Hwang, J. J., Chen, S.H., Simulation and measurement of enhanced turbulent heat transfer in a channel with periodic ribs on one principal wall, *Int. J. Heat Mass Transf.* 36 (1993) 507-517.

$\beta$	ضریب ارتفاع دندانان
$\varphi$	کسر حجمی (%)
$\kappa_b$	ثابت بولتزمن (J/K)
$\mu$	ویسکوزیته دینامیکی (Pa. s)
$\theta=(T-T_C)/(T_H-T_C)$	دمای بی‌بعد
$\rho$	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
$\nu$	ویسکوزیته سینماتیکی ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

## ۶-۲-علائم و زیرنویسها

c	سرد
eff	موثر
f	سیال
h	گرم
m	متوسط
nf	نانوسیال
S	نانوذره جامد

## مراجع

- [1] Karimipour, A., Alipour, H., Akbari, O.A., Toghraie Semiromi, D. and Esfe, M.H, Studying the effect of indentation on flow parameters and slow heat transfer of water-silver nanofluid with vrying volume fraction in a rectangular Two-Dimensional microchannel. *Indian Journal of Science and Technology*, Vol 8(15), 5 1 7 07, July (2015).
- [2] Nasiri, M., Etemad, S.Gh., Bagheri, R, Experimental heat transfer of nanofluid through an annular duct. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38 (2011) 958-963.
- [3] Karimipour, A., Nezhad, A.H., D'Orazio, A., Shirani, E, Investigation of the gravity effects on the mixed convection heat transfer in a microchannel using lattice Boltzmann method. *Int. J. Therm. Sci.* 54 (2012) 142-152.

- stretching sheet. *Nuclear Engineering and Design*, 249 (2012): 248-255.
- [20] Aminossadati S. M., Ghasemi B., "Natural Convection Cooling of a Localised Heat Source at the Bottom of a Nanofluid-Filled Enclosure, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, No. 28,2009, pp. 630-640.
- [21] Brinkman, H.C. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solution, *J. Chem. Phys.*, vol. 20, pp. 571-581, 1952.
- [22] Patel, H. E., Sundararajan, T., Pradeep, T., Dasgupta, A., Dasgupta, N., and Das, S.K.A Micro-Convection Model for Thermal Conductivity of Nanofluids, *Pramana — J. Phys.*, vol. 65, no. 5, pp. 863-869, 2005
- [14] Rau, G., Cakan, M., Moeller, D., Arts, T., The effect of periodic ribs on the local aerodynamic and heat transfer performance of a straight cooling channel, *J. Turbomach.* 120 (1998) 368-375.
- [15] Manca, O., Nardini, S., Ricci, D., Numerical investigation of air forced convection in channels with differently shaped transverse ribs, *Int. J. Numer. Method Heat Fluid Flow*, 21 (2010) 618 639.doi:10.1108/09615531111135855.
- [16] Park, B.C., Cho, Y.I., Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Exp. Heat Transf*, 11 (1998) 151-170.
- [17] Maiga, S.E.B., Nguyen, C.T., Galanis, N., Roy, G., Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube, *Superlattices Microstruct.* 35 (2004) 543.
- [18] Izadi, M., Behzadmehr, A., Jalali-Vahida, D., Numerical study of developing laminar forced convection of a nanofluid in an annulus, *Int. J. Therm. Sci.* 48 (2009) 2119-2129.
- [19] Mahdy, A., Unsteady mixed convection boundary layer flow and heat transfer of nanofluids due to

Archive