



مطالعه انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم در میکروکانال مثلثی با دندانه نیمه چسبان - نیمه ناقص

موسی حیدری^۱، داود طغرای^{۲*}، امید علی اکبری^۳

* نویسنده مسئول: Toghraee@iaukhsh.ac.ir

چکیده

در پژوهش عددی حاضر انتقال حرارت و جریان آرام نانوسیال در داخل یک میکروکانال سه بعدی با مقطع مثلثی شبیه سازی شده است. به منظور افزایش انتقال حرارت از دیواره‌های کانال، دندانه‌های نیمه چسبان-نیمه ناقص در داخل کانال قرار داده شده و تاثیر هندسه دندانه‌ها و تعداد آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. در مطالعه‌ی حاضر، سیال پایه آب بوده و تاثیر کسر حجمی نانوذره اکسید تیتانیوم بر میزان انتقال حرارت و فیزیک جریان مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج ارائه شده شامل توزیع عدد ناسلت در کانال، ضریب اصطکاک و ضریب عملکرد حرارتی برای هر یک از حالت‌های مختلف می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، وجود دندانه‌ها بر فیزیک جریان تاثیر گذار هستند و میزان تاثیر آن‌ها شدیداً به عدد رینولدز جریان وابسته است. استفاده از دندانه در میکروکانال‌ها باعث افزایش نرخ انتقال حرارت و کاهش گرادیان دمایی در بین لایه‌های سیال خنک کننده می‌شود و هم‌چنین وجود نانوذرات در سیال خنک کننده نیز در افزایش انتقال حرارت موثر است، به طوری که با افزایش عدد رینولدز، میزان اثرگذاری نانوذره نیز در افزایش انتقال حرارت، افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی

دینامیک سیالات محاسباتی، میکروکانال، عدد ناسلت، نانوذره، دندانه‌های نیمه - چسبان-نیمه ناقص.

تاریخ ارسال: ۹۴/۰۹/۰۸

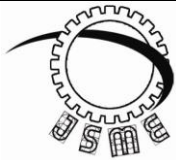
تاریخ بازنگری: ۹۴/۱۰/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۲/۰۵

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، ایران، اصفهان.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، ایران، اصفهان.

۳- 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>



The Numerical Study of Heat Transfer of Water-TiO₂ Nanofluid in the Triangular Microchannels with Semi-attached and Offset Mid-truncated Ribs

Mousa heydari¹, Davood Toghraie ^{*2}, Omid Ali Akbari ³.

* Corresponding Author: Toghrace@iaukhsh.ac.ir

Abstract:

In this numerical study the heat transfer and laminar nanofluid flow in the three-dimensional microchannels with triangular cross-section is simulated. For increase the heat transfer from the walls of the channel, semiattached & offset mid-truncated rib's Placed in the canal, and the tooth geometry and the impact is studied. In this study, the water is base fluid, and the influence of the volume fraction of nanoparticles of titanium oxide on the the heat transfer and the fluid flow physics is studied. The presented results include the distribution of Nusselt number in the channel, The coefficient of friction and the thermal-fluid performance for each of the different states. The results show the existence of is the tooth on the effective flow physics. And their efficacy is highly dependent on Reynolds number. Use indentation in the microchannels, increase the heat transfer rate and the reduce the temperature gradient between the layers of the cooling fluid. Also, the presence of nanoparticles in the fluid cooling is effective and the pain increase the heat transfer by increasing the Reynolds number, the effect of nanoparticles also increase the heat transfer increases.

Key words:

CFD, microchannels,
Nusselt number,
Nanoparticles,
Semiattached
Offset mid-truncated rib.

1- MSc, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran
2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Isfahan,
3- MSc, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran

۱- مقدمه

در سالیان اخیر توجه به مسئله بهبود انتقال حرارت در علوم مهندسی و صنعت، با سرعت افزاینده‌ای در حال رشد است، به طوری که هم اکنون به بخش بسیار مهمی از تحقیقات تجربی و نظری تبدیل شده است. در حال حاضر مقالات منتشر شده مرتبط با بهبود انتقال حرارت در سیستم‌های حرارتی حدود ۱۰٪ کل مقالات مرتبط با مبحث انتقال حرارت را شامل می‌شوند [۱]. بهبود انتقال حرارت با استفاده از روش‌های مرسوم باعث صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه‌ها و منابع انرژی و حفظ محیط زیست شده است. برهم زدن زیر لایه آرام در لایه مرزی جریان مغشوش، ایجاد جریان ثانویه، اتصال دوباره سیال جداشده به سطح، ایجاد تأخیر در توسعه لایه مرزی، تقویت ضریب هدایت گرمایی مؤثر سیال، افزایش اختلاف دما بین سطح و سیال و افزایش دبی جریان سیال به صورت غیرفعال از جمله مهم‌ترین مکانیزم‌هایی هستند که منجر به افزایش انتقال حرارت از طریق جریان سیال منجر می‌شوند [۲].

روش‌های تقویت انتقال حرارت بر اساس یک طبقه‌بندی مرسوم و پذیرفته شده به دو دسته فعال^۱ و غیرفعال^۲ تقسیم می‌شوند [۳]. روش‌های فعال به روش‌هایی گفته می‌شود که در آن بقای مکانیزم تقویت انتقال حرارت وابسته به وجود یک نیروی خارجی است. در حالی که در روش‌های غیرفعال نیازی به وجود چنین نیرویی نیست. محققان زیادی به بررسی رفتار جریان و انتقال حرارت در مجاری میکرو و ماکرو با شکل‌های مختلف و سطح مقطع‌های مختلف پرداخته‌اند. ساکانووا^۳ و همکاران [۴] به بررسی عملکرد انتقال حرارت نانوسیال در کانال موجی و مقایسه آن با کانال مستطیلی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از دیواره‌های موج در میکروکانال، در صورتی که مایع سیال آب خالص باشد انتقال حرارت به طور چشمگیری نسبت به دیواره‌های صاف بهبود پیدا می‌کند. ریمبالت^۴ و همکاران [۵] با بررسی

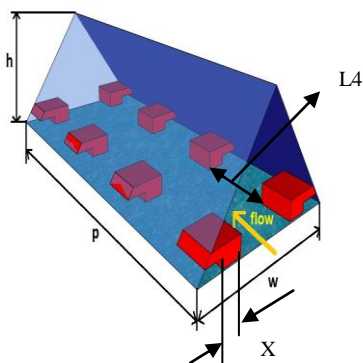
آزمایشگاهی و تاثیر نانوسیال آب-اکسید مس بر انتقال حرارت درون میکروکانال پرداختند و به این نتیجه رسیدند که، افزایش انتقال حرارت در کسر حجمی کم، افزایش قابل توجه ضریب اصطکاک و افت فشار در استفاده از نانوسیال نسبت به آب خالص دارد. لی^۵ و همکاران [۶] تحلیل جریان انتقال حرارت نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم در میکروکانال با گودی و برآمدگی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد، تقویت انتقال حرارت و درجه حرارت دیوارها با افزایش کسر حجمی کاهش می‌یابد. لیو و وانگ^۶ [۷] عملکرد انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری در کانال دنداندار با دندان‌های نیمه چسبان را مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که طراحی دندان‌های مسقیم و بدون شیب باعث افزایش انتقال حرارت، افت فشار و اصطکاک می‌شود که با طراحی دندان‌های نیمه چسبان مسئله افت فشار و اصطکاک و به وجود آمدن نواحی با انتقال حرارت پایین‌تر در پشت دندان‌ها تا حدودی مرتفع می‌شود دندان‌ها زاویه‌دار با زاویه ۴۵ درجه و نسبت $I/W = 0.125$ برای رسیدن به اهداف فوق توصیه می‌شود. حاتمی و گنجی [۸] تحلیل جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید مس در میکروکانال با چشمه حرارتی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش نسبت منظری در میکروکانال باعث افزایش عدد ناسلت، کاهش حداکثر سرعت بی‌بعد و کاهش ضخامت لایه مرزی می‌شود. افزایش قطر نانوذرات باعث افزایش اختلاف دما بین سیال و دیواره‌ها و تقویت عدد ناسلت می‌شود.

۲- بیان مسئله

در مطالعه حاضر، یک میکروکانال با وجود موانع نیمه چسبان-نیمه ناقص با وجود کسر حجمی مختلف نانوذره اکسید تیتانیوم در سیال پایه آب، تحت شار ثابت مورد مطالعه عددی قرار گرفته است. در مطالعات انجام شده پیرامون موضوع انتقال حرارت در میکروکانال‌ها تاکنون روش‌هایی مانند استفاده از دندان‌ها به منظور افزایش انتقال حرارت در

1. active
2. Passive
3. Sakanova
4. Rimbault

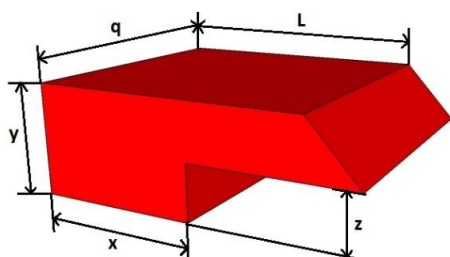
5. Li
6. Liu and Wang



شکل ۱- شماتیک هندسه مورد بررسی در این پژوهش

جدول ۲- معرفی ابعاد بررسی شده میکروکانال

case	طول ورودی (mm)	طول خروجی (mm)	X (μm)	P (mm)	H (μm)	W (μm)	L4 (μm)
A	۲	۱/۵	۱۰	۴	۷۵	۸۶/۶	۰/۵
B	۴	۱/۵	۲۰	۲	۷۵	۸۶/۶	۰/۵



شکل ۲- شماتیک و ابعاد موانع به کار رفته در داخل کانال

جدول ۳- معرفی حالت‌های بررسی شده در مطالعه حاضر

case	y (μm)	z (μm)	X (μm)	q (μm)	L (μm)
A	۲۰	۱۰	۱۰	۵۰	۲۸/۴
B	۲۰	۱۰	۲۰	۵۰	۱۸/۴

۳- شرایط مرزی

جهت شبیه‌سازی جریان داخل کانال از شرط مرزی سرعت ورودی ثابت برای ورودی کانال و از شرط مرزی فشار

سطوح آن‌ها انجام شده است. از طرفی وجود دندان در میکروکانال باعث افزایش ضریب اصطکاک، افت فشار، قدرت پمپاژ و به وجود آمدن نواحی با انتقال حرارت کمتر در پشت دندان می‌شود. در این تحقیق به منظور بهره‌مندی از مزایای استفاده از دندان در میکروکانال و حذف معایب استفاده از دندان، از فرم خاص ابداعی از دندان با فرم نیمه ناقص-نیمه چسبان به نام (SAOMT)^۱ استفاده شده است. این مزیت که سیال می‌تواند از سطوح بین دو دندان و نواحی غیر متصل به سطح عبور کند. در این طرح به خصوص نه تنها از مزایای استفاده از دندان در میکروکانال می‌توان بهره برد، بلکه معایب وجود دندان و زبری در مسیر جریان سیال تا حدودی برطرف می‌شوند. هدف اصلی بررسی انتقال حرارت از یک میکروکانال با طول ۷/۵ میلی‌متر و مقطع مثلثی متساوی الاضلاع به طول ضلع ۸۶ میکرون است، بررسی تاثیر چیدمان موانع در داخل میکروکانال با مقطع مثلثی تحت شار ثابت، با وجود نانوذره اکسید تیتانیوم با کسر حجمی ۲ و ۴ در سیال پایه‌ی آب است. لذا شرایط بررسی شده در جدول (۱) نشان داده شده است در ادامه هندسه کانال و موانع به کار رفته در آن تشریح شده است. به این منظور، هندسه بررسی شده و موانع مربوط به آن‌ها در شکل (۱-۲) و جداول (۲-۳) نشان داده شده و تشریح شده است.

جدول ۱- معرفی حالت‌های بررسی شده در مطالعه حاضر

Case	تعداد دندان / طول دندان	کسر حجمی نانوذره %	اعداد رینولدز Re
Case A4	۴ دندان / ۱۰ میکرومتر		۱۰۰
Case A5	۵ دندان / ۱۰ میکرومتر		۲۰۰
Case B4	۴ دندان / ۲۰ میکرومتر	۴-۲-۰	۴۰۰
Case B5	۵ دندان / ۲۰ میکرومتر		

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

معادلات ممنتوم:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_f \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_f \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) \right) \quad (3)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu_f \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) \right) \quad (4)$$

معادله انرژی:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{C_p \rho_f} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) \quad (5)$$

برای بی‌بعد سازی معادلات فوق از پارامترهای زیر استفاده می‌شود،

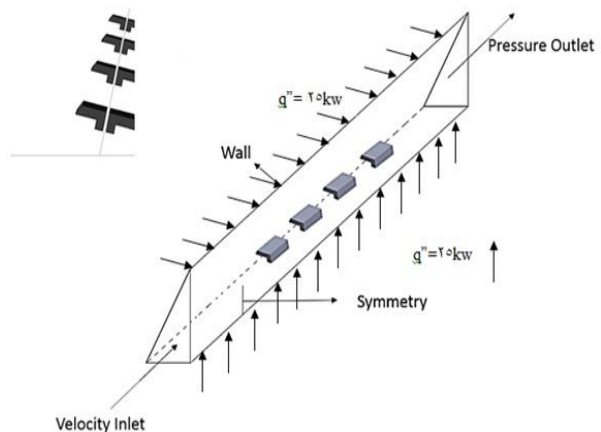
$$X = \frac{x}{D_h}, Y = \frac{y}{D_h}, Z = \frac{z}{D_h}, U = \frac{u}{u_c}, V = \frac{v}{u_c}, W = \frac{w}{u_c}, D_h = \frac{4A}{p} \Delta T = \frac{q'' D_h}{k_f}, P = \frac{\bar{P}}{\rho_{nf} u_c^2}, Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f} \quad (6)$$

معادلات (۱-۵) با استفاده از پارامترهای بی‌بعد در معادله (۶)

به معادلات بی‌بعد به صورت زیر تبدیل می‌شوند [۹]،

معادله پیوستگی:

خروجی برای خروجی کانال استفاده شده است. در بررسی شرط مرزی در دیواره‌های کانال، از شرط مرزی عدم لغزش استفاده شده است. با توجه به تقارن کانال، نصف آن مدل-سازی شده و از شرط مرزی تقارن برای صفحه‌ی وسطی استفاده شده است. مطابق شکل ۳، دندانه استفاده شده از مرکز کانال فاصله دارد و با استفاده از شرط مرزی تقارن، فاصله‌ی برای عبور سیال عامل بین دو دندانه وجود دارد، از این رو دندانه‌های استفاده شده در پژوهش حاضر، به صورت نیمه چسبان نیمه ناقص می‌باشد. دیواره میکروکانال تحت شار ثابت ۲۵۰۰۰ وات بر متر مربع قرار دارد و جریان آرام با عدد رینولدز ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ برای نانوسیال با کسر حجمی مختلف نانوذره شبیه‌سازی شده است. خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات اکسید تیتانیوم در جدول (۴) ارائه شده است.



شکل ۳- شرایط مرزی در شبیه سازی حاضر

جدول ۴- خواص نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم

ϕ (%)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kgK)	K (W/m.k)	μ (Pa.s)
Water	۹۹۷/۱	۴۱۷۹	۰/۶۱۳۳	۰/۰۰۰۸۹۰۹
٪۲	۱۰۵۳/۹۵۸	۳۹۲۶/۲۲	۰/۶۵۶۵	۰/۰۰۰۹۳۷
٪۴	۱۱۱۰/۸۱۶	۳۶۹۹/۳۱۸	۰/۷۰۳۳	۰/۰۰۰۹۸۷

۴- فرمول بندی

معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی هستند که برای حالت دائم و آرام در مختصات کارترین حل می‌شوند.

ظرفیت گرمای ویژه نانوسیال با رابطه زیر محاسبه می‌شود
[۱۲]

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad (۱۵)$$

برای محاسبه ضریب هدایت گرمایی موثر نانوسیال برای سوسپانسیون‌هایی که دارای ذرات کروی شکل هستند، از رابطه پاتل و همکاران [۱۳] استفاده می‌شود،

$$k_{eff} = k_f \left[1 + \frac{k_s A_s}{k_f A_f} + ck_s Pe \frac{A_s}{k_f A_f} \right] \quad (۱۶)$$

که در رابطه (۱۶) ثابت تجربی $c=36,000$ است،

$$\frac{A_s}{A_f} = \frac{d_f}{d_s} \frac{\phi}{1 - \phi} \quad (۱۷)$$

$$Pe = \frac{u_s d_s}{\alpha_f} \quad (۱۸)$$

در روابط (۱۷) و (۱۸) قطر مولکول آب برابر با $d_f=2\text{\AA}$ و قطر مولکول نانوذره تیتانیوم برابر با $d_s=50\text{nm}$ است. مقدار u_s سرعت حرکت براونی نانوذرات است و با فرمول زیر محاسبه می‌شود،

$$u_s = \frac{2 \kappa_b T}{\pi \mu_f d_s^2} \quad (۱۹)$$

در رابطه (۱۹) مقدار $k_b=1.3807 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ثابت بولتزمن است.

۴-۲- روابط پارامترهای اندازه‌گیری شده در

جریان آرام سه بعدی

توان پمپاژ P_p یکی از پارامترهای تعیین عملکرد میکروکانال بوده و عبارتست از توان لازم برای پمپ کردن سیال درون کانال، و ارتباط بین این پارامتر و افت فشار ΔP در طول میکروکانال از معادله زیر به دست می‌آید [۱۴]

$$P_p = u_{in} A_c \Delta P \quad (۲۰)$$

که در رابطه بالا، u_{in} سرعت ورودی در میکروکانال و A_c مساحت سطح مقطع میکروکانال است. قطر هیدرولیکی میکروکانال نیز یکی از مشخصات فیزیکی میکروکانال است و به صورت زیر تعریف می‌شود،

$$D_h = \frac{4A_c}{p} \quad (۲۱)$$

که A_c ، مساحت سطح مقطع میکروکانال و p محیط خیس شده میکروکانال است. عدد رینولدز در تعیین آرام یا

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (۷)$$

معادلات ممتوم:

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} + W \frac{\partial U}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\rho_{nf} \nu_f} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial}{\partial X} \left(\mu_{nf} \frac{\partial U}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\mu_{nf} \frac{\partial U}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\mu_{nf} \frac{\partial U}{\partial Z} \right) \right) \quad (۸)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + W \frac{\partial V}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\rho_{nf} \nu_f} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial}{\partial X} \left(\mu_{nf} \frac{\partial V}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\mu_{nf} \frac{\partial V}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\mu_{nf} \frac{\partial V}{\partial Z} \right) \right) \quad (۹)$$

$$U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} + W \frac{\partial W}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{1}{\rho_{nf} \nu_f} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial}{\partial X} \left(\mu_{nf} \frac{\partial W}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\mu_{nf} \frac{\partial W}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\mu_{nf} \frac{\partial W}{\partial Z} \right) \right) \quad (۱۰)$$

معادله انرژی:

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} + W \frac{\partial \theta}{\partial Z} = \frac{1}{\alpha_f (C_p \rho)_{nf}} \frac{1}{Re Pr} \left(\frac{\partial}{\partial X} \left(K_{nf} \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(K_{nf} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(K_{nf} \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) \right) \quad (۱۱)$$

۴-۱- روابط حاکم برای محاسبه خواص نانوسیال

در جریان آرام از رابطه زیر [۱۰] برای محاسبه لزجت موثر دینامیکی نانوسیال استفاده می‌شود،

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (۱۲)$$

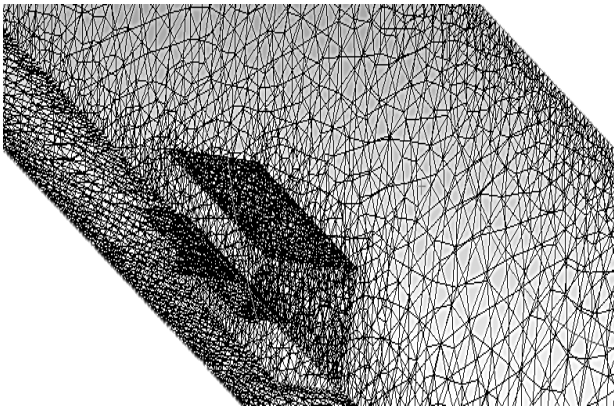
از رابطه زیر برای محاسبه چگالی نانوسیال استفاده می‌شود
[۱۱]

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (۱۳)$$

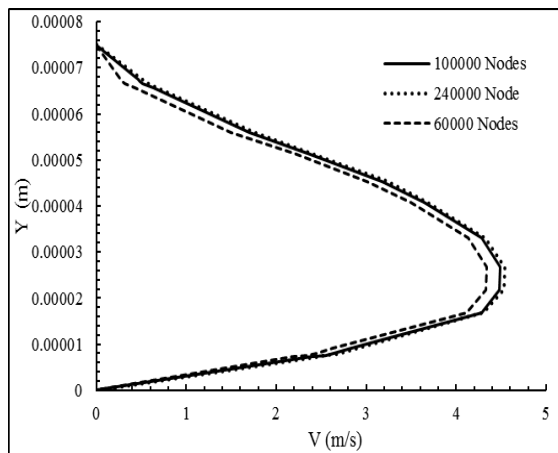
ضریب پخش حرارتی موثر نانوسیال با فرمول زیر محاسبه می‌شود [۱۲]،

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{eff}}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (۱۴)$$

با ارائه پروفیل سرعت در فاصله‌ی ۲ میلی‌متری از ورودی کانال، بررسی شده است. مطابق این شکل، در تعداد سلول محاسباتی ۱۰۰۰۰۰ نتایج بدست آمده مستقل از تعداد المان‌ها است که برای همه شبیه‌سازی‌های انجام شده از این تعداد المان استفاده شود. تا تعداد المان‌ها تاثیری در پاسخ‌های بدست آمده نداشته باشد.



شکل ۴- شبکه‌بندی میکروکانال



شکل ۵- استقلال حل از شبکه- پروفیل سرعت در فاصله‌ی ۲ میلی‌متری از ورودی کانال

۵- نتایج

۱-۵- اعتبارسنجی

به منظور حصول اطمینان از درستی نتایج عددی، جریان داخل یک میکروکانال شبیه‌سازی شده است و نتایج بدست آمده با نتایج ارائه شده در مرجع [۱۸] مقایسه شده اند. در شکل (۶) عدد ناسلت بدست آمده از شبیه‌سازی جریان با اعداد رینولدز مختلف در محدوده‌ی جریان آرام برای سیال

مغشوش بودن جریان سیال مهم است. هم‌چنین این عدد برای دو جریان متفاوت، یک پارامتر تشابهی نیز به حساب می‌آید [۱۵]،

$$Re = \frac{u_{ave} D_h}{\nu} \quad (22)$$

از دیگر پارامترهای بررسی عملکرد میکروکانال، ضریب اصطکاک است که به پارامترهای هندسه کانال بستگی داشته و از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۵]،

$$f = 2\Delta P \frac{D_h}{L} \frac{1}{\rho u_{in}^2} \quad (23)$$

عدد ناسلت متوسط نیز از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵]،

$$Nu_{ave} = \frac{q'' D_h}{k_f (T_w - T_m)} \quad (24)$$

در رابطه فوق T_w دمای دیواره میکروکانال و T_m دمای متوسط بالک است. برای ارزیابی کلی عملکرد حرارتی و سیالاتی میکروکانال سه بعدی دنداندار، پارامتر (PEC) را به عنوان کارایی حرارتی به صورت زیر تعریف می‌کنیم [۱۵]،

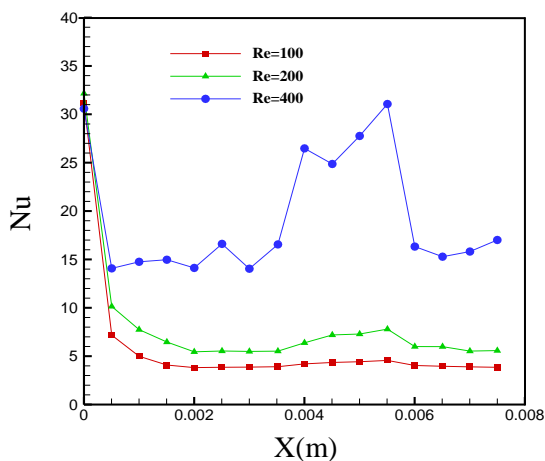
$$PEC = \frac{\left(\frac{Nu_{ave}}{Nu_{ave,s}} \right)}{\left(\frac{f}{f_s} \right)^{(1/3)}} \quad (25)$$

عدد پوزیه از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۶ و ۱۷]،

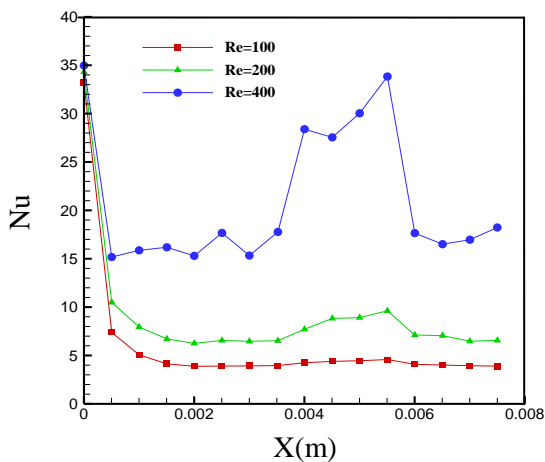
$$C_f = f Re \quad (26)$$

۴- هندسه، شبکه‌بندی و شرایط مرزی

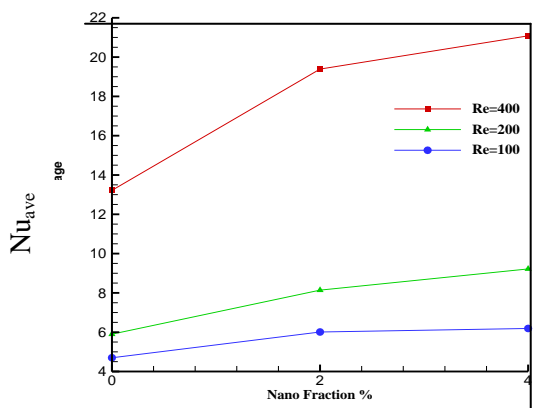
در تحقیق حاضر، جریان و انتقال حرارت داخل یک میکروکانال با طول ۷/۵ میلی‌متر با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت ۱۶ مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۴) شبکه-بندی اعمال شده را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۴) از شبکه بی‌سازمان مثلثی استفاده شده است. جهت شبیه‌سازی جریان داخل کانال از شرط مرزی سرعت ورودی برای ورودی کانال و از شرط مرزی فشار خروجی برای خروجی کانال استفاده شده است. بررسی دیواره‌های کانال نیز، اصل عدم لغزش در نظر گرفته شده است. با توجه به تقارن کانال، نصف آن مدل‌سازی شده و از شرط مرزی تقارن برای صفحه‌ی وسطی استفاده شده است. در شکل (۵) استقلال حل از شبکه



شکل ۷. توزیع عدد ناسلت موضعی کسر حجمی ۲٪ نانوذره در سیال پایه در حالت (Case A4)



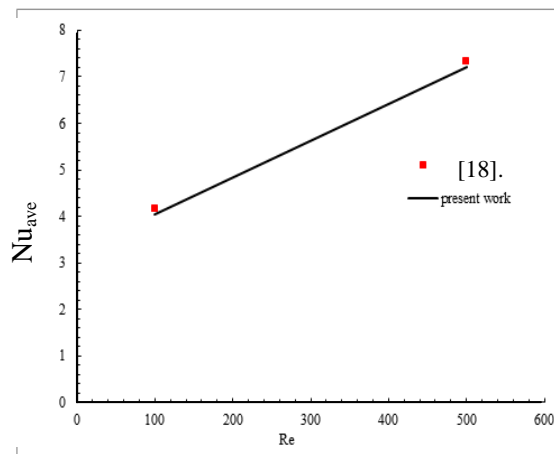
شکل ۸. توزیع عدد ناسلت موضعی ۴٪ کسر نانوذره در سیال پایه برای حالت (Case A4)



شکل ۹. عدد ناسلت میانگین برای حالت (Case A4)

مطابق این شکل، با افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰ تا ۴۰۰ در کسر حجمی نانوذره ۴ درصد، عدد ناسلت میانگین بیش از

اب به همراه اکسید آلومینیوم با ۰/۵٪ کسر حجمی در سیال پایه آب خالص، با نتایج ارائه شده در مرجع مذکور مقایسه شده است. تطابق نتایج، نشان می‌دهد روش حل عددی استفاده شده از دقت خوبی برخوردار می‌باشد.

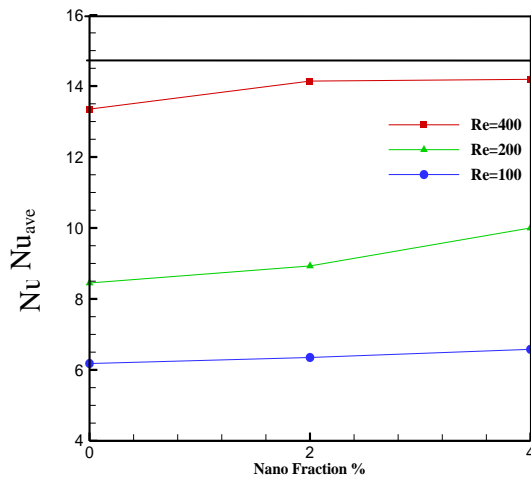


شکل ۶- اعتبارسنجی نتایج عددی

نتایج ارائه شده شامل توزیع عدد ناسلت موضعی و متوسط، ضریب اصطکاک، و ضریب عملکرد حرارتی سیالاتی است. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی عددی جریان و انتقال حرارت آرام در میکروکانال مثلثی سه بعدی، برای وجود ۴ و ۵ دندانه‌ی نیمه چسبان- نیمه ناقص چسبیده به کف کانال که دارای طول‌هایی معادل ۱۰ و ۲۰ میکرون ارائه شده است. در این پژوهش همچنین تاثیر کسر حجمی نانوذرات جامد بر روی رفتار انتقال حرارت و جریان آرام نانوسیال بررسی می‌شود. نتایج این تحقیق برای کسر حجمی های صفر، ۲ و ۴ درصد نانوذره اکسید تیتانیوم محاسبه شده است.

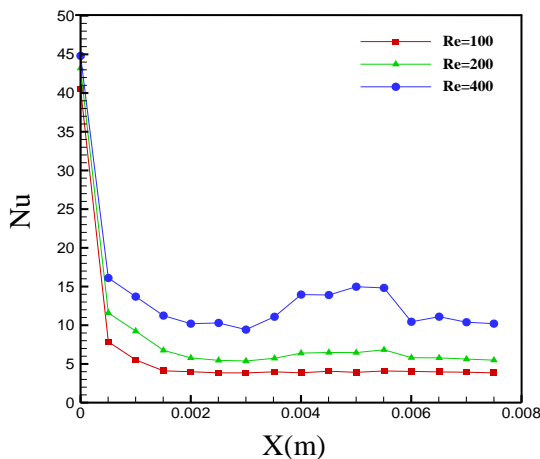
در شکل ۷ و ۸ توزیع عدد ناسلت در اعداد رینولدز ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ در کسر حجمی ۲ و ۴ درصد نانوذره ارائه شده است. مطابق این شکل‌ها نیز، حداکثر تاثیر وجود دندانه‌ها در جریان با عدد رینولدز ۴۰۰ حاصل می‌شود و همچنین حداکثر عدد ناسلت در کسر حجمی ۴ درصد حاصل شده است. در شکل ۹ عدد ناسلت میانگین برای شرایطی که چهار دندانه‌ی نیمه چسبان- نیمه ناقص با طول قسمت چسبان ۱۰ میکرون (Case A4) در سه عدد رینولدز بررسی شده برای کسر حجمی مختلف نانوذره ارائه شده است.

با افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰ تا ۴۰۰ در کسر حجمی نانوذره ۴ درصد، عدد ناسلت میانگین بیش از ۲ برابر افزایش پیدا می کند.



شکل ۱۲. عدد ناسلت میانگین برای حالت (Case B4)

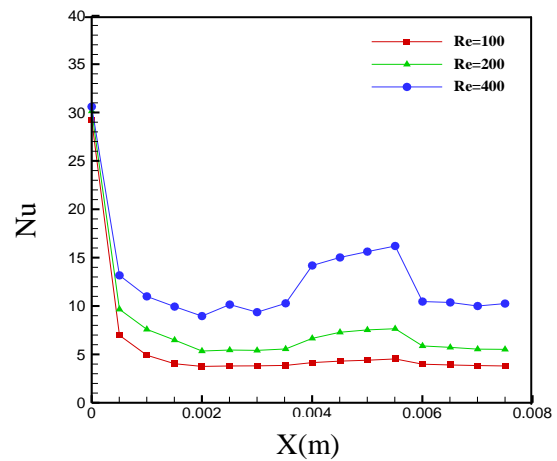
در شکل ۱۳ به بررسی تاثیر عدد رینولدز با کسر حجمی ۴ درصد نانوذره پرداخته شده است. با بررسی این شکل ها نیز مشخص می شود، با افزایش عدد رینولدز وجود دندانه ها در جریان تاثیر بیشتری می گذارد و با افزایش کسر حجمی نانوذره، میزان انتقال حرارت و در پی آن عدد ناسلت افزایش می یابد.



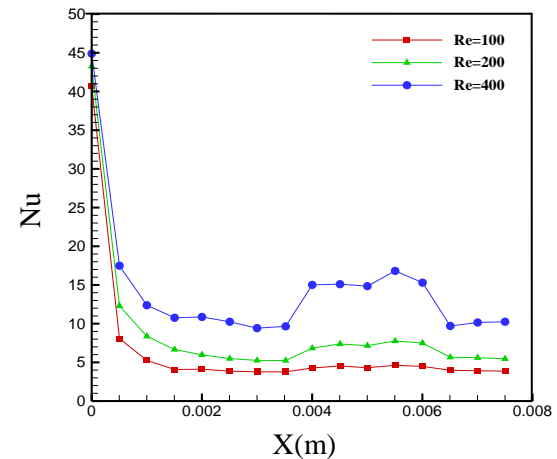
شکل ۱۳- توزیع عدد ناسلت موضعی کسر حجمی ۴٪ نانوذره در سیال پایه برای حالت (Case B5)

در شکل های ۱۴ و ۱۵ ضریب اصطکاک در کسر حجمی مختلف نانوذره در جریان با عدد رینولدز ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰

برابر افزایش پیدا می کند. در شکل های ۱۰ و ۱۱ به بررسی تاثیر عدد رینولدز با کسر حجمی نانوذره صفر و ۴ درصد پرداخته شده است. با بررسی این شکل ها مشخص می شود، با افزایش عدد رینولدز وجود دندانه ها در جریان تاثیر بیشتری می گذارد و با افزایش کسر حجمی نانوذره، میزان انتقال حرارت و در پی آن عدد ناسلت افزایش می یابد.



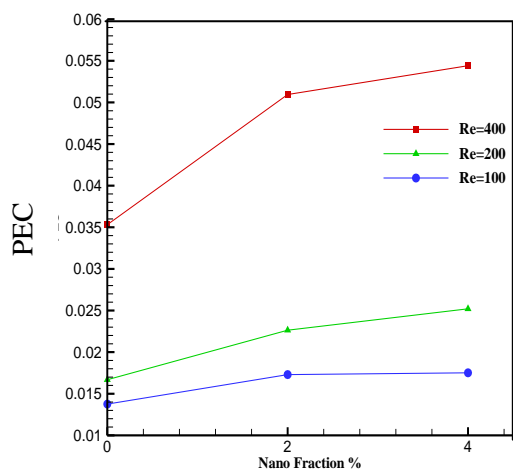
شکل ۱۰. توزیع عدد ناسلت موضعی بدون نانوذره در سیال پایه برای حالت (Case A5)



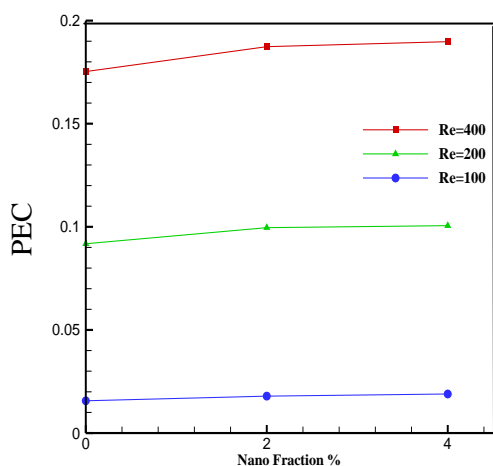
شکل ۱۱. توزیع عدد ناسلت موضعی کسر حجمی ۴٪ نانوذره در سیال پایه برای حالت (Case A5)

در شکل ۱۲ عدد ناسلت میانگین برای شرایطی که چهار دندانه ای نیمه چسبان با طول قسمت چسبان ۱۰ میکرون (Case B4) در سه عدد رینولدز بررسی شده برای کسر حجمی مختلف نانوذره ارائه شده است. مطابق این شکل،

افزایش انتقال حرارت ناشی بیش از افزایش افت فشار ناشی از آن می‌باشد.



شکل ۱۶. ضریب عملکرد حرارتی برای حالت (Case A4)

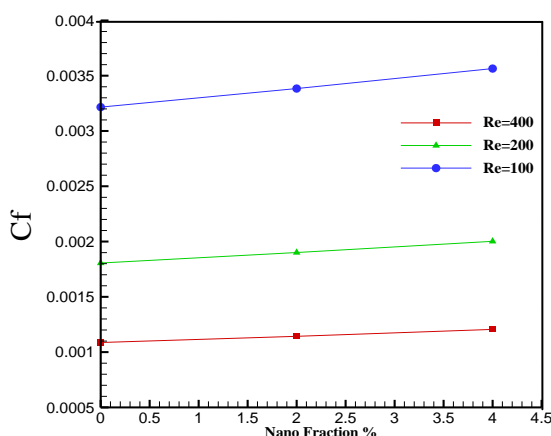


شکل ۱۷. ضریب عملکرد حرارتی برای حالت (Case A5)

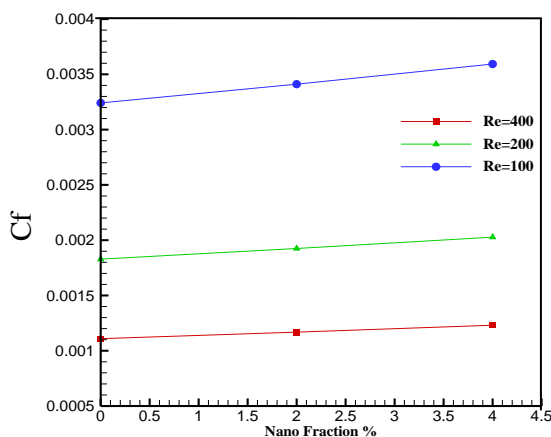
۶- نتیجه گیری

در این تحقیق انتقال حرارت جریان آرام نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم در میکروکانال سه بعدی دنداندار با مقطع مثلثی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل، با نتایج مربوط به میکروکانال بدون دندان در شرایط هندسی و مرزی یکسان مقایسه شد. از نتایج به دست آمده در این تحقیق می‌توان دریافت که، استفاده از دندانان در میکروکانال‌ها باعث افزایش نرخ انتقال حرارت و کاهش گرادیان دمایی در بین لایه‌های سیال خنک کننده می‌شود و هم‌چنین وجود نانوذرات در سیال خنک کننده نیز در افزایش انتقال حرارت دارد موثر می‌باشد، به طوری که با

برای Case B5 و Case A4 یعنی برای شرایطی که ۴ و ۵ دندانان با طول قسمت چسبان ۱۰ و ۲۰ میکرون در میکروکانال وجود دارد، ارائه شده است. مطابق این شکل-ها، با افزایش عدد رینولدز، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد و با افزایش کسر حجمی نانوذره، ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد.



شکل ۱۴. ضریب اصطکاک در کسر حجمی‌های مختلف در حالت (Case A4)



شکل ۱۵- ضریب اصطکاک در کسر حجمی‌های مختلف برای (Case B5)

ضریب عملکرد حرارتی-سیالاتی برای حالتی که به ترتیب ۴ و ۵ دندانان با طول قسمت چسبان به کف کانال ۱۰ میکرون (Case A5-Case A4)، در شکل های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است. مطابق این دو شکل، بیشترین ضریب عملکرد برای کانال با پنج دندان ایجاد شده است. مفهوم این رفتار بدین معنی است که تاثیر دندانان پنجم در میزان

	۶-۱-علائم یونانی
α	ضریب پخش حرارتی (m^2/s)
φ	کسر حجمی (%)
K_b	ثابت بولتزمن (J/K)
μ	لزجت دینامیکی (Pa. s)
ρ	چگالی (kg/m^3)
ν	لزجت سینماتیکی (m^2/s)
	۶-۲-علائم و زیرنویسها
c	سرد
eff	موثر
f	سیال
H	گرم
m	متوسط
nf	نانوسیال
s	نانوذره جامد

افزایش عدد رینولدز، میزان اثرگذاری نانوذره نیز در افزایش انتقال حرارت، افزایش می‌یابد. اما از طرفی وجود دندان در میکروکانال باعث ایجاد افت فشار به علت انسداد ایجاد شده، در مقایسه با کانال صاف می‌شود، که باعث افزایش ضریب اصطکاک و قدرت پمپاژ است. اگرچه استفاده از نانوسیال باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود، اما از طرفی وجود نانوذرات در سیال خنک کننده باعث افزایش چگالی و لزجت است، که باعث افزایش نرخ برش در دیواره ها و ضریب اصطکاک می‌شود. همچنین قدرت پمپاژ را افزایش می‌دهد. در کل کارایی استفاده از دندان و نانوسیال در میکروکانال باید توسط پارامتر عملکرد حرارتی-سیالاتی (PEC) مورد ارزیابی قرار گیرد. ارزیابی این پارامتر در شبیه‌سازی حاضر نشان می‌دهد در محدوده‌ی اعداد رینولدز مورد مطالعه، افزایش افت فشار ناشی از وجود دندان‌های نیمه چسبان بیش از تاثیر آن‌ها در میزان انتقال حرارت است.

مراجع

- [1] Bergles, A.E., Some perspectives on enhanced heat transfer, second-generation heat transfer technology, *J. Heat Transf.* 110 (2000) 1082.
- [2] Siddique M., Khaled, A.R.A., Abdulhafiz, N. I., Boukhary A. Y., "Recent advances in heat transfer enhancements": A review report, *International Journal of Chemical Engineering*, Vol. 2010, pp. 1-28.
- [3] Bergles, A. E., The implication and challenges of enhanced heat transfer for the chemical process industries, *ICHemE*, Vol. 79, 2001, pp. 437- 444.
- [4] Sakanova, A., Chan Chun Keian, Jiyun Zhao Performance improvements of microchannel heat sink using wavy channel and nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 89, 2015, pp. 59 -74.
- [5] Rimbault, B., N, C.T., Galanis, N, Experimental investigation of CuO-water nanofluid flow and heat transfer inside a microchannel heat sink,

۶-علائم و اختصارات

A	سطح مقطع (m^2)
C_f	ضریب اصطکاک
C_p	ظرفیت گرمای ویژه (J/kg K)
d	قطر (m)
g	شتاب گرانش (m/s^2)
h, l	ارتفاع و طول میکروکانال (m)
k	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)
Nu	عدد ناسلت
P	فشار (Pa)
$Pr = \nu_f / \alpha_f$	عدد پرانتل
$Re = \rho_f u_c h / \mu_f$	عدد رینولدز
T	دما (K)
u, v	سرعت طولی و عرضی (m/s)
u_c (m/s)	سرعت ورودی جریان (m/s)
u_s (m/s)	سرعت بروانی (m/s)
$(U, V) = (u / U_0, v / U_0)$	سرعت بی بعد طولی و عرضی (m/s)

- performances of fluid flow and heat transfer of semiattached rib-channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, 2011, pp. 575–583
- [15] Mital, M., Analytical analysis of heat transfer and pumping power of laminar nanofluid developing flow in microchannels, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 50, 2013, pp. 429–436.
- [16] Lewis, F. M., Princeton, N. J., Friction factors for pipe flow, *Transaction of the A.S.M.E.* Vol. 1, 1944, pp. 671- 684
- [17] Papautsky, I., Gale, B. K., Mohanty, S., Ameen, T. A., Frazier, A. B., Effects of rectangular microchannel aspect ratio on laminar friction constant, *Proc. SPIE, Microfluidic Devices and Systems*, Vol. 11, 1999, pp. 147-158.
- [18] Aminossadati, S. M., Raisi, A., Ghasemi, B., “Effects of magnetic field on nanofluid forced convection in a partially heated microchannel”, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 46, 2011, pp. 1373–1382.
- International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 84, 2014, pp. 275–292.
- [6] Li, P., D. Zhang, Yonghui Xie. Heat transfer and flow analysis of Al₂O₃–water nanofluids in microchannel with dimple and protrusion, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 73, 2014, pp. 456–467.
- [7] Huichun Liu, H., Wang J., “Numerical investigation on synthetical performances of fluid flow and heattransfer of semiattached rib-channels”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 55, 2012, pp. 234-243.
- [8] Hatami M., Ganji, D. D., Thermal and flow analysis of microchannel heat sink (MCHS) cooled by Cu–water nanofluid using porous media approach and least square method, *Energy Convers. Manag.* Vol. 78, 2014, pp. 347–358.
- [9] Sheikhzadeh, G. A., Ebrahim Qomi, M., Hajialigol N., Fattahi A., “Effect of Al₂O₃-water nanofluid on heat transfer and pressure drop in a three-dimensional microchannel”, *Int. J. Nano Dimens*, Vol. 3, 2013, pp. 281–288.
- [10] Abu-Nada, E., Masoud, Z., Hijazi, A., Natural Convection Heat Transfer Enhancement in Horizontal Concentric Annuli using Nanofluids, *Int. Comm. in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, 2008, pp. 657–665
- [11] Brinkman, H.C. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solution, *J. Chem. Phys.*, vol. 20, pp. 571–581, 1952.
- [12] 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.
- [13] 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] Liu, H., Wang, J., Numerical investigation on synthetical