

ISME2015-10102340292

## انتقال حرارت جابجایی اجباری جریان لغزشی نانوسیال درون میکروکانال با شار حرارتی نوسانی

زهرا نیکخواه اردکانی<sup>۱</sup>، آرش کریمی پور<sup>۲</sup>، گودرز احمدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، zahra.nikkhah4860@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران، arashkarimipour@gmail.com

<sup>۳</sup> استاد دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا دانشگاه کلارکسون- آمریکا ahmadi@clarkson.edu

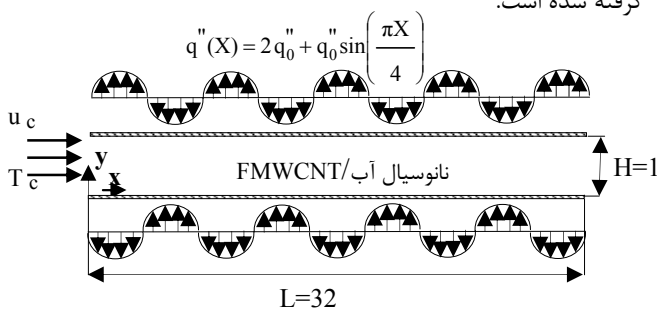
### چکیده

نانوسیالات درون وسیله‌هایی با ابعاد میکرو و نانو نیاز به توجه بیشتری توسط محققان دارد [۶، ۷].

در پژوهش حاضر، انتقال حرارت جابجایی اجباری جریان آرام نانوسیال آب / FMWCNT در یک میکروکانال تحت اثر شارحرارتی نوسانی، به صورت عددی مطالعه شده است. در این مطالعه عملکرد حرارتی نانوسیال تحت تأثیر نیروی برشی، غلظت ذرات نانو، ضریب لغزش سرعت و شار حرارتی نوسانی بررسی شده است. نتیجه‌های بدست آمده از حل عددی مسئله‌ی مفروض، با استفاده از پروفیل‌های سرعت و مقادیر عدد نوسلت موضعی و متوسط ارائه شده‌اند.

### بیان مسأله

مسئله مورد بررسی یک میکروکانال دو بعدی طبق شکل ۱ می‌باشد. نانوسیال در نظر گرفته شده شامل آب و نانوذرات جامد FMWCNT می‌باشد. نانوذرات FMWCNT همگی کروی و دارای قطر مساوی  $d_p=30\pm 5\text{nm}$  می‌باشند. نانوسیال سرد با دمای  $T_c=306\text{K}$  و سرعت ثابت  $u_c$  وارد میکروکانال شده و پس از خنک سازی دیواره‌های میکروکانال، از انتهای آن خارج می‌شود. جریان نانوسیال درون میکروکانال به صورت آرام، دائم، نیوتنی و غیر قابل تراکم در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: مدل فیزیکی میکروکانال

خواص ترموفیزیکی نانوسیال آب / FMWCNT در دمای ثابت  $T=33^\circ\text{C}$  مطابق جدول ۱ ارائه شده‌اند. دیواره‌های میکروکانال تحت شار حرارتی نوسانی  $q''$  قرار گرفته‌اند. شرط لغزش سرعت نیز روی دیواره‌ها در نظر گرفته شده است. عدد رینولدز برای نانوسیال ورودی مقادیر  $Re=1$ ،  $Re=10$ ،  $Re=100$  در نظر گرفته شده است. تغییر مقادیر ضریب لغزش سرعت به صورت  $B=0.1$ ،  $B=0.01$ ،  $B=0.001$  می‌باشد و مقادیر درصد وزنی نانو ذرات جامد  $\phi=0\%$ ،  $\phi=0.12\%$ ،  $\phi=0.25\%$  می‌باشند.

در این مقاله انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال آب / FMWCNT در یک میکروکانال افقی به صورت عددی بررسی شده است. دیواره‌های میکروکانال تحت اثر شار حرارتی نوسانی قرار گرفته‌اند و شرط مرزی سرعت لغزشی نیز بر دیواره‌ها حاکم است. معادلات ناویر استوکس حاکم بر مسئله به روش حجم کنترل حل شده‌اند. تأثیرات مقادیر مختلف عدد رینولدز، غلظت ذرات نانو و ضریب لغزش سرعت بر عدد نوسلت بررسی شده است. نتایج به صورت پروفیل‌های سرعت و نمودارهای عدد نوسلت ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهند که، عدد نوسلت تحت تأثیر شار حرارتی نوسانی، با افزایش عدد رینولدز، در طول میکروکانال به صورت نوسانی افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که، عدد نوسلت با افزایش ضریب لغزش سرعت و درصد وزنی نانوذرات جامد افزایش می‌یابد و نرخ این افزایش در مقادیر بالای عدد رینولدز بیشتر می‌باشد.

### واژه‌های کلیدی

انتقال حرارت- میکروکانال- نانوسیال- سرعت لغزشی- شار حرارتی

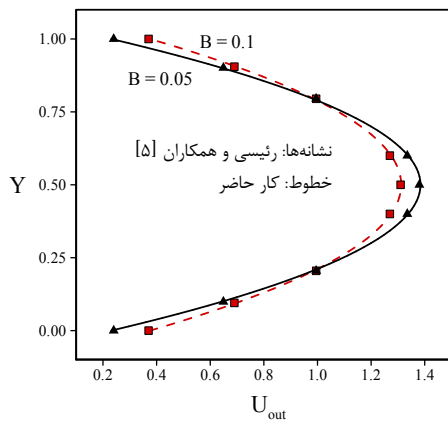
### مقدمه

در سالهای اخیر جریان در ابعاد کوچک بسیار مورد توجه قرار گرفته است و تلاشهای زیادی جهت کوچک کردن ابعاد دستگاهها و افزایش راندمان آنها انجام شده است [۱]. چوی<sup>۲</sup> اولین کسی بود که سوسپانسیون حاوی ذرات نانو در سیال پایه را نانوسیال نامید و افزایش فوق العاده در ضریب انتقال حرارت این سیالات را نشان داد [۲]. نانولوله‌های کربنی اخیراً به دلیل ویژگیهای مکانیکی، الکتریکی و گرمایی قابل توجهی که دارند، مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. این ذرات، استوانه‌ای شکل هستند و نسبت طول به عرض بزرگی دارند و به خوبی درون آب پراکنده می‌شوند [۳، ۴].

پژوهشگران زیادی عملکرد حرارتی نانوسیالات را با در نظر گرفتن شرط مرزی سرعت لغزشی بررسی کرده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که، با افزایش ضریب لغزش، عملکرد حرارتی جریان افزایش خواهد یافت [۵]. با مروری بر تحقیقات ارائه شده، متوجه کاربرد مفید نانوسیالات جهت خنک سازی می‌شویم. اما بررسی عملکرد حرارتی

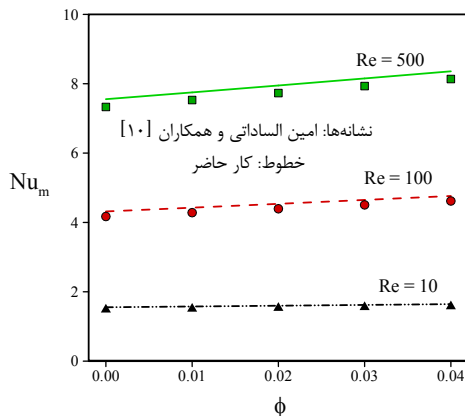
جدول ۱: خواص ترموفیزیکی نانوسیال در دمای  $T=33^{\circ}\text{C}$  [۳].

Wt.% (FMWCNT/ water)	$\rho$ ( $\text{kgm}^{-3}$ )	$\mu$ (Pas)	K (W/m k)	$C_p$ (J/kg k)
۰	۹۹۵/۸	$7/65 \times 10^{-4}$	۰/۶۲	۴۱۷۸
۰/۱۲	۱۰۰۳	$7/۸۰ \times 10^{-4}$	۰/۶۸	۴۱۷۸
۰/۲۵	۱۰۰۸	$7/۹۵ \times 10^{-4}$	۰/۷۵	۴۱۷۸



شکل ۲: اعتبارسنجی حل با مقایسه پروفیل‌های سرعت توسعه یافته برای مقادیر مختلف ضریب لغزش سرعت

همچنین عدد نوسلت متوسط نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در یک میکروکانال برای مقادیر مختلف کسر حجمی و عدد رینولدز با نتایج امین الساداتی و همکاران [۱۰] در شکل ۳ مقایسه شده است.



شکل ۳: اعتبار سنجی حل با مقایسه عدد نوسلت متوسط برای مقادیر مختلف عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات جامد

### استقلال نتایج از شبکه

مقادیر عدد نوسلت متوسط و دمای بدون بعد نانوسیال روی دیواره‌های میکروکانال در شبکه‌های مختلف  $400 \times 40$ ,  $500 \times 50$ ,  $600 \times 60$  برای  $Re=10$ ,  $Re=1$  در  $B=0.001$ ,  $\phi=0.12\%$  محاسبه شده است. مشاهده شده است که، اختلاف بین شبکه‌های  $500 \times 50$ ,  $600 \times 60$  کم می‌باشد. در نتیجه، شبکه  $500 \times 50$  برای ادامه محاسبات انتخاب شده است.

### نتایج

انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال آب/FMWCNT در یک میکروکانال دو بعدی افقی به صورت عددی مطالعه شده است. دیواره‌های میکروکانال همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، تحت اثر شار حرارتی نوسانی سینوسی  $q''$  قرار گرفته‌اند. شرط مرزی سرعت لغزشی در طول دیواره‌های میکروکانال، برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در نظر گرفته شده است.

شکل ۴ تأثیرات مقادیر مختلف ضریب لغزش سرعت بر پروفیل

### معادلات

معادلات ناویراستوکس بدون بعد حاکم بر مسأله [۸]:

معادله پیوستگی بدون بعد:

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

معادله اندازه حرکت بدون بعد در جهت X:

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\text{PrRe}} \frac{\nu_{nf}}{\alpha_f} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

معادله اندازه حرکت بدون بعد در جهت Y:

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\text{PrRe}} \frac{\nu_{nf}}{\alpha_f} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (3)$$

معادله انرژی بدون بعد:

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

سرعت لغزشی بدون بعد نانوسیال ( $U_s$ ) روی دیوار متحرک [۹]:

$$U_s = \pm B \left. \frac{\partial U}{\partial Y} \right|_{y=0,1} \quad (5)$$

شار حرارتی نوسانی روی کل طول دیواره‌های بالا و پایین میکروکانال:

$$q''(X) = 2q_0'' + q_0'' \sin\left(\frac{\pi X}{4}\right) \quad (6)$$

عدد نوسلت موضعی نانوسیال [۱۰]:

$$\text{Nu}_x(X) = \frac{1}{\theta_s(X)} \quad (7)$$

عدد نوسلت متوسط در طول سطح گرم شده میکروکانال:

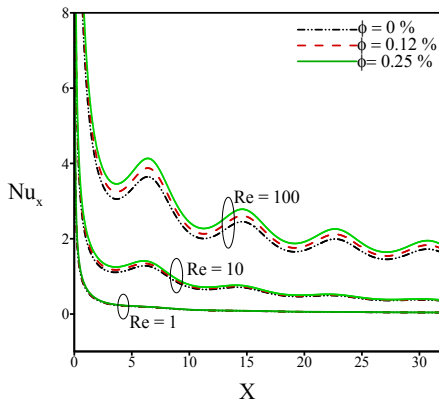
$$\text{Nu}_m = \frac{1}{L} \int_0^L \text{Nu}_x(X) dX \quad (8)$$

### حل عددی

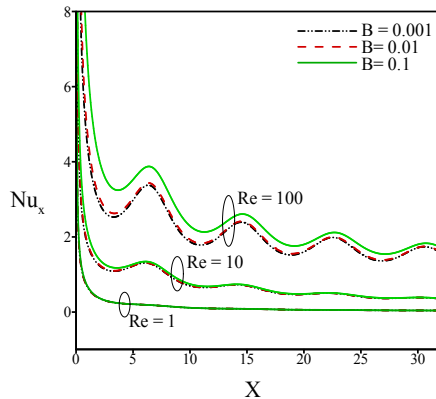
مسئله حاضر با نرم افزار تجاری فلونت حل شده است و برای گسسته‌سازی معادلات حاکم از روش حجم محدود استفاده شده است. برای ارتباط بین میدان سرعت و فشار الگوریتم سیمپل به کار برده شده است.

### اعتبارسنجی حل عددی

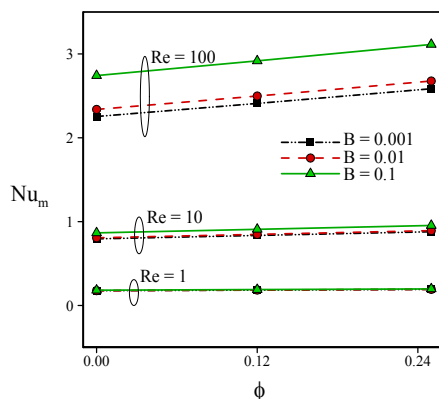
برای اعتبارسنجی مسئله، پروفیل‌های سرعت توسعه یافته نانوسیال آب-اکسید مس درون یک میکروکانال برای مقادیر مختلف ضریب لغزش، با نتایج رئیسی و همکاران [۵] در شکل ۲ مقایسه شده است.



شکل ۵: تغییرات عدد نوسلت موضعی در طول دیواره میکروکانال، برای مقادیر مختلف عدد رینولدز و درصد وزنی نانوذرات جامد، ( $B=0.1$ )



شکل ۶: تغییرات عدد نوسلت موضعی در طول دیواره میکروکانال، برای مقادیر مختلف عدد رینولدز و ضریب لغزش سرعت،  $\phi=0.12\%$

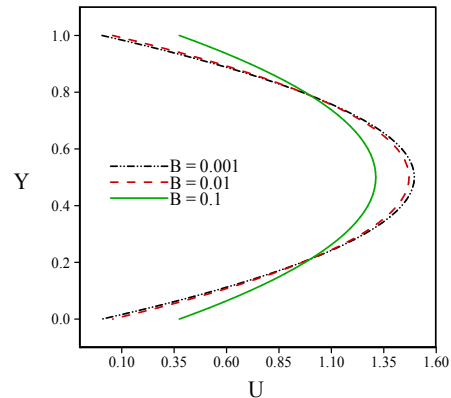


شکل ۷: تغییرات عدد نوسلت متوسط با درصد وزنی نانوذرات جامد برای مقادیر مختلف عدد رینولدز و ضریب لغزش سرعت

### نتیجه گیری و جمع بندی

در این تحقیق، انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال آب/ FMWCNT در یک میکروکانال تحت اثر شار حرارتی نوسانی، به روش عددی بررسی شده است. شرط مرزی سرعت لغزشی در طول دیواره‌های میکروکانال برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در نظر گرفته شده است. تأثیرات غلظت ذرات نانو، نیروی برشی، ضریب لغزش سرعت و شار حرارتی نوسانی بر روی میدان جریان و نرخ انتقال حرارت بررسی شده است. نتایج کلی زیر از تحلیل نمودارها بدست آمده است:

سرعت ( $U$ ) را در طول خط عمودی وسط میکروکانال ( $X=L/2$ )، در  $\phi=0.12, Re=10$  نشان می‌دهد. به دلیل وجود شرط مرزی لغزش سرعت روی دیواره‌های میکروکانال، سرعت نانوسیال روی دیواره‌های میکروکانال دارای مقدار غیر صفر می‌باشد و هر چه ضریب لغزش افزایش می‌یابد، مقدار سرعت نانوسیال روی دیواره‌ها بیشتر می‌شود. مقدار ماکزیمم سرعت روی خط عمودی وسط میکروکانال نیز با افزایش ضریب لغزش کاهش می‌یابد.



شکل ۴: تغییرات سرعت نانوسیال روی خط عمودی وسط میکروکانال ( $X=L/2$ )، برای مقادیر مختلف ضریب لغزش، ( $\phi=0.12, Re=10$ )

شکل ۵ تأثیرات مقادیر مختلف درصد وزنی نانوذرات جامد بر عدد نوسلت موضعی را برای مقادیر مختلف عدد رینولدز در طول دیواره میکروکانال در  $B=0.1$  نشان می‌دهد. در اعداد رینولدز مختلف با افزایش درصد وزنی نانوذرات، عدد نوسلت موضعی افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش درصد وزنی نانوذرات، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش می‌یابد و در نتیجه، عملکرد حرارتی نانوسیال افزایش می‌یابد. شکل ۶ تأثیرات مقادیر مختلف ضریب لغزش سرعت بر عدد نوسلت موضعی را برای مقادیر مختلف عدد رینولدز در طول دیواره میکروکانال در  $\phi=0.12\%$  نشان می‌دهد. در  $Re=1$ ، عدد نوسلت موضعی تابعی از ضریب لغزشی نمی‌باشد و با افزایش ضریب لغزشی عدد نوسلت موضعی در طول دیواره میکروکانال تغییری نمی‌کند و ثابت می‌ماند. اما در عددهای رینولدز بالاتر، عدد نوسلت موضعی با افزایش ضریب لغزش افزایش می‌یابد زیرا گرادیان دما در طول دیوار گرم شده میکروکانال افزایش می‌یابد.

مقادیر عدد نوسلت متوسط نانوسیال روی دیوار میکروکانال برای مقادیر مختلف عدد رینولدز، درصد وزنی نانوذرات جامد و ضریب لغزش سرعت در شکل ۷ ارائه شده است. برای تمام مقادیر اعداد رینولدز، عدد نوسلت متوسط با افزایش درصد وزنی نانوذرات جامد افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش درصد وزنی نانوذرات جامد، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش می‌یابد. با افزایش عدد رینولدز و در نتیجه افزایش سرعت نانوسیال، اختلاف دمای نانوسیال و دیواره میکروکانال افزایش می‌یابد بنابراین عدد نوسلت متوسط در طول دیواره میکروکانال افزایش می‌یابد. عدد نوسلت در  $Re=1$  تحت تأثیر ضریب لغزش تغییری نمی‌کند اما در رینولدزهای بالاتر، عدد نوسلت متوسط در طول میکروکانال با افزایش ضریب لغزش افزایش می‌یابد.

$\theta$	دمای بدون بعد، $\theta = (T - T_c) / \Delta T$
$\rho$	دانسیتته، $\text{kgm}^{-3}$
$\nu$	لزجت سینماتیکی، $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
<b>زیر نویس ها</b>	
$f$	سیال
$nf$	نانوسیال

### مراجع

- [1] Driker, J., Liu, W., Van Wyk, D., Meyer, J. P., and Malan, A. G., 2005. "Embedded solid state heat extraction in integrated power electronic modules". *IEEE Trans. Power Electron*, pp. 694-703.
- [2] Choi, S. U. S., 1995. "Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles". *ASME Fluids Eng. Division*, 231, pp. 99-105.
- [3] Amrollahi, A., Rashidi, A. M., Lotfi, R., Emami Meibodi, M., and Kashefi, K., 2010. "Convection heat transfer of functionalized MWNT in aqueous fluids in laminar and turbulent flow at the entrance region". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, pp. 717-723.
- [4] NuimLabib, M., Nin, Md. J., Afrianto, H., Chung, H., and Jeong, H., 2013. "Numerical investigation on effect of base fluids and hybrid nanofluid in forced convective heat transfer". *International Journal of Thermal Sciences*, 71, pp. 163-171.
- [5] Raisi, A., Ghasemi, B., and Aminossadati, S. M., 2011. "A Numerical Study on the Forced Convection of Laminar Nanofluid in a Microchannel with Both Slip and No-Slip Conditions". *Numerical Heat Transfer, Part A*, 59, pp. 114-129.
- [6] Safaei, M. R., Togun, H., Vafai, K., Kazi, S. N., and Badarudin, A., 2014. "Investigation of Heat Transfer Enhancement in a Forward-Facing Contracting Channel using FMWCNT Nanofluids". *Numerical Heat Transfer, Part A*, 66, pp. 1321-1340.
- [7] Karimipour, A., Esfe, M. H., Safaei, M. R., Semiromi, D. T., and Kazi, S. N., 2014. "Mixed convection of Copper-Water nanofluid in a shallow inclined lid driven cavity using lattice Boltzmann method". *Physica A*, 402, pp. 150-168.
- [8] Mahmoudi, A. H., Pop, I., and Shahi, M., 2012. "Effect of magnetic field on natural convection in a triangular enclosure filled with nanofluid". *International Journal of Thermal Sciences*, 59, pp. 126-140.
- [9] Ngoma, G. D., and Erchiqui, F., 2007. "Heat flux and slip effects on liquid flow in a microchannel". *International Journal of Thermal Sciences*, 46, pp. 1076-1083.
- [10] Aminossadati, S. M., Raisi, A., and Ghasemi, B., 2011. "Effects of magnetic field on nanofluid forced convection in a partially heated microchannel". *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 46, pp. 1373-1382.

- ۱- سرعت نانوسیال روی دیواره های میکروکانال با افزایش ضریب لغزش افزایش می یابد.
- ۲- شار حرارتی نوسانی روی دیواره ها باعث می شود که، عدد نوسلت موضعی در طول دیواره های میکروکانال به صورت نوسانی تغییر کند.
- ۳- عدد نوسلت در ورودی میکروکانال، مقدار ماکزیمم می باشد و در طول میکروکانال با افزایش  $X$ ، کاهش می یابد.
- ۴- عدد نوسلت با افزایش عدد رینولدز، درصد وزنی نانوذرات جامد و ضریب لغزش سرعت افزایش می یابد و بیشترین مقدار عدد نوسلت در  $B=0.1, Re=100, \phi=0.25\%$  می باشد.
- ۵- عدد نوسلت در اعداد رینولدز پایین، تحت تأثیر ضریب لغزش تغییر نمی کند و ثابت می باشد.

### فهرست علائم

$B$	ضریب لغزش سرعت بدون بعد، $B = \beta/h$
$C_p$	گرمای ویژه، $\text{J/kgK}$
$h$	عرض میکروکانال، $\text{m}$
$H$	عرض بدون بعد میکروکانال، $H = h/h = 1$
$K$	ضریب هدایت حرارتی، $\text{W/mk}$
$l$	طول میکروکانال، $\text{m}$
$L$	طول بدون بعد میکروکانال، $L = l/h$
$Nu_x$	عدد نوسلت موضعی
$Nu_m$	عدد نوسلت متوسط
$P$	فشار سیال، $\text{pa}$
$Pr$	عدد پرانتل، $Pr = \nu_f / \alpha_f$
$q''$	شار حرارتی نوسانی، $\text{W/m}^2$
$q_0''$	دامنه شار حرارتی نوسانی، $\text{W/m}^2$
$Re$	عدد رینولدز، $Re = u_c h / \nu_f$
$T$	دما، $\text{k}$
$\Delta T$	اختلاف دما، $\Delta T = q_0'' h / k_f$
$u$	سرعت افقی، $\text{m s}^{-1}$
$U$	سرعت افقی بدون بعد، $U = u/u_c$
$u_s$	سرعت لغزشی، $\text{m s}^{-1}$
$v$	سرعت عمودی، $\text{m s}^{-1}$
$V$	سرعت عمودی بدون بعد، $V = v/u_c$
$x$	مختصه افقی، $\text{m}$
$X$	مختصه افقی بدون بعد، $X = x/h$
$y$	مختصه عمودی، $\text{m}$
$Y$	مختصه عمودی بدون بعد، $Y = y/h$
<b>علائم یونانی</b>	
$\alpha$	ضریب پخش حرارتی، $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$\beta$	ضریب لغزش سرعت، $\text{m s}^{-1}$
$\phi$	درصد وزنی نانوذرات جامد
$\mu$	لزجت دینامیکی، $\text{pa s}$