

## بررسی عددی اثر اعداد رینولدز و گراشف در انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانوسیال با مدل مخلوط دو فازی در مبدل حرارتی دو لوله‌ای

امین کابلی<sup>۱</sup>، نادر نبهانی<sup>۲</sup>

۱- گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول، ایران

۲- گروه مکانیک، دانشگاه صنعت نفت، دانشکده نفت اهواز، اهواز، ایران  
(amin.kaboli@yahoo.com)

### چکیده

انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانوسیال<sup>۳</sup> آب-کاربید سیلیسیوم با جریان آرام به صورت عددی مطالعه شده است. مدل مخلوط دوفازی برای بررسی تأثیر اعداد رینولدز و گراشف روی رفتار حرارتی نانوسیال‌های مذکور در مجرای بین دو لوله هم‌مرکز استفاده شده است. معادلات به کار رفته در این تحقیق بیضوی بوده و برای ارتباط بین ترم‌های سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل<sup>۴</sup> استفاده شده درحالی‌که شبکه مورد استفاده هم‌جای<sup>۵</sup> می‌باشد. نتایج این پژوهش با توسعه یک کد محاسباتی فرترن بدست آمده‌اند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که افزایش عدد گراشف و کاهش عدد رینولدز با تسریع شروع جریان ثانویه، افزایش عدد ناسلت و بهبود انتقال حرارت همراه است. همچنین مقایسه این تغییرات در دو نوع نانوسیال آب-کاربید سیلیسیوم و آب-اکسید سیلیسیوم نشان می‌دهد که استفاده از نانوذره کاربید سیلیسیوم تأثیر چشمگیری در بهبود انتقال حرارت جابجایی ترکیبی دارد و این بدلیل ضریب هدایت حرارتی چند برابری کاربید سیلیسیوم نسبت به اکسید سیلیسیوم می‌باشد.

واژگان کلیدی: انتقال حرارت ترکیبی، نانوسیال، مبدل دولوله‌ای، مدل مخلوط دوفازی

### مقدمه

<sup>۱</sup> - کارشناسی ارشد

<sup>۲</sup> - استادیار

<sup>۳</sup> Two phase mixture model

<sup>۴</sup> Semi-Implicit Method for pressure-linked Equation (SIMPLE)

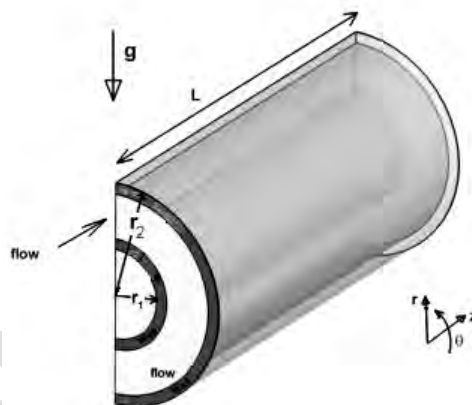
<sup>۵</sup> Collocated

تقاضای صنعت برای مبدل حرارتی با اندازه کوچکتر، وزن کمتر و عملکرد بهتر روز به روز بیشتر می‌شود. ضریب هدایت حرارتی پایین سیالات مرسوم انتقال مانند آب، روغن و مخلوط اتیلن گلیکول یک محدودیت جدی در اصلاح عملکرد و کوچک‌سازی این تجهیزات مهندسی بحساب می‌آید. یکی از راههای غلبه بر این مشکل، افزودن ذرات جامد ریز به سیال است. ایده اصلی این روش به مطالعات ماکسول در سال ۱۸۷۳ [۱] برمی‌گردد. وی امکان افزایش ضریب هدایت حرارتی مخلوط سیال-جامد را بوسیله ی بالا بردن کسر حجمی ذرات جامد نشان داد. ذرات مورد استفاده در ابعاد میکرومتر یا میلی متر بودند. این ذرات مشکلاتی از قبیل سائیدگی، لخته شدن و مسدود کردن مسیر و افت فشار بوجود می‌آوردند. با پیشرفت تکنولوژی و خلق ذرات در ابعاد نانومتر، نسل جدیدی از مخلوط جامد-مایع تحت عنوان نانوسیال ظاهر شد. نانو سیال ها نوع جدیدی از سیال انتقال حرارت، حاوی مقدار کمی ذرات با سایز نانو (معمولاً کوچکتر از ۱۰۰ nm) که بصورت یکنواخت و پایدار در مایع معلق شده است، می‌باشند. پراکندگی مقدار کمی از نانو ذرات جامد در سیالات مرسوم با تغییر قابل توجهی در ضریب هدایت حرارتی آنها همراه است. چون [۲] بعضی از منافع نانوسیالات برای افزایش انتقال حرارت و کاهش سایز، وزن و قیمت تجهیزات حرارتی با کاهش مضرات یا عدم افت فشار را بررسی کرد. پژوهشگران نشان داده‌اند که نانوسیالات شامل نانوذرات اکسید مس یا اکسید آلومینیوم در آب یا اتیلن گلیکول دارای ضریب هدایت حرارتی بالا هستند [۳]. مطالعات نشان می‌دهد که ضریب گرمایی اندازه گیری شده نانوسیال بطور چشمگیری بیشتر از پیش‌بینی‌های تئوری موجود است [۴]. کوشش‌های فراوان منجر به فرمول‌بندی مدل‌های تئوری کارآمد برای پیش بینی ضریب هدایت حرارتی مؤثر شده است [۵-۸]. چون و همکاران [۸] رابطه تجربی بصورت تابعی از اندازه (قطر متوسط ذرات) و دمای سیال برای هدایت حرارتی آب-اکسید آلومینیوم ارائه کردند. آنها نشان دادند که حرکت براونی نانو ذرات، مکانیزم کلیدی را در افزایش هدایت حرارتی با افزایش دما و کاهش اندازه نانوذرات دارد. پاک و چو [۹] و ژوان ولی [۱۰، ۱۱] نتایج تجربی راجع به انتقال حرارت جابجایی برای جریان آرام و مغشوش نانوسیال درون یک لوله بدست آوردند. آنها اولین رابطه تجربی برای عدد ناسلت نانوسیال‌های آب-مس، آب-اکسید تیتانیوم و آب-اکسید آلومینیوم را ارائه کردند. نتایج، افزایش چشمگیری در کارایی انتقال حرارت سیال پایه برای عدد رینولدز یکسان نمایان ساخت. انتقال حرارت جابجایی نانوسیال با استفاده از مدل دو فازی یا تک فازی می‌تواند تقریب‌زده شود. مدل دوفازی امکان فهمیدن عملکرد فرآیند انتقال حرارت در هر دو فاز پیوسته و فاز ثانویه را فراهم می‌کند. در مدل تک‌فازی فرض می‌شود که فاز سیال و ذرات در تعادل گرمایی به سر می‌برند و با سرعت یکسان حرکت می‌کنند بنابراین این مدل در چندین مطالعه تئوری انتقال حرارت جابجایی نانو سیال‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [۱۲-۱۶]. بدلیل این واقعیت که ویژگی‌های مؤثر نانوسیال‌ها بطور صریح شناخته شده نیستند، پیش بینی‌های این تقریب، تطابق خوبی با نتایج تجربی ندارند. چندین عامل از قبیل: جاذبه، اصطکاک بین سیال و ذرات جامد و نیروهای براونی، پدیده انتشار براونی، ته نشینی و پراکندگی، امکان تأثیر روی جریان نانوسیال و تبعاً احتمال عدم صفر شدن سرعت لغزش بین سیال و ذرات را بوجود می‌آورند [۱۱]. بنابراین به نظر می‌رسد که تقریب دوفازی بهترین مدل برای اعمال کردن بر نانوسیال است. اخیراً بهزادهمر و همکاران [۱۷] جابجایی اجباری مغشوش نانو سیال در لوله ای با سطح مقطع دایره با استفاده از تقریب دوفازی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها اولین بار مدل مخلوط دو فازی را برای مطالعه نانوسیال بکار بردند. مقایسه نتایج آنها با نتایج تجربی نشان داد که مدل مخلوط بسیار دقیق تر از مدل تک‌فازی می‌باشد. مجاری دو لوله‌ای یکی از رایج‌ترین و مهم ترین هندسه‌ها برای جریان سیال و تجهیزات انتقال حرارت می‌باشد. هندسه مذکور کاربردهای مهندسی بسیار ی از جمله مبدلهای حرارتی دو لوله‌ای، توربین‌های گازی، راکتورهای هسته‌ای، توربو ماشین، سیستم تهویه هوا، خنک‌سازی تجهیزات الکترونیک و ... دارد. بنابراین بررسی افزایش انتقال حرارت مجاری دولوله‌ای اساسی می‌باشد. کاربردهای نانوسیال درون مجرای دولوله‌ای توسط برخی پژوهشگران مطرح شده است [۱۸، ۱۹]. ابو-نادا [۱۸] نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را در یک مجرای دو لوله‌ای با روش تک‌فازی مورد مطالعه قرار داده است. وی از مدل ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی متغیر برای ارزیابی افزایش انتقال حرارت استفاده کرد. ایزدی و همکاران [۱۹] جابجایی اجباری آرام نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم را بصورت عددی در یک لوله حلقوی مورد مطالعه قرار دادند و برای مدل کردن از رویکرد تک‌فاز استفاده کردند. مختاری و همکاران [۲۰] جریان آرام همراه با انتقال حرارت توأم (اجباری- آزاد) نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را در مجرای دولوله‌ای با شرایط مرزی شار ثابت با مدل مخلوط دوفازی بررسی

کردند و اثرات مربوط به تغییر نسبت شار حرارتی دیوار داخلی به خارجی، تغییر عدد گراشف و اثر افزایش کسر حجمی نانوذرات بر روی پارامترهای گرمایی و هیدرودینامیکی را گزارش نمودند و نشان دادند که با افزایش کسر حجمی و کاهش نسبت شار حرارتی عدد ناسلت داخلی و خارجی افزایش می یابد. در این مقاله انتقال حرارت جابجایی ترکیبی جریان آرام نانوسیال با استفاده از مدل مخلوط دوفازی بررسی شده است.

## تعریف مسئله

جابجایی ترکیبی حاوی آب-کاربید سیلیسیم در مجرای دو لوله ای افقی با شار حرارتی یکنواخت مورد بررسی قرار گرفته است. همانگونه که در شکل (۱) مشاهده می شود هندسه مورد نظر، دو لوله تو در تو با سطح مقطع دایروی و هم مرکز با طول  $L=200d_2$  و شعاع های نمایش داده شده، می باشد. حل میدان جریان و حرارت بصورت سه بعدی و در مختصات استوانه ای صورت می گیرد. مجرای دولوله ای بصورت افقی بوده و به دلیل تقارن جریان درون مبدل حرارتی، نیمه راست مبدل حرارتی برای انجام محاسبات در نظر گرفته شده است و نتایج از توسعه یک کد محاسباتی فرترن [۲۱] حاصل شده است. طول مجرا  $L$  برابر قطر هیدرولیکی انتخاب شده است تا از رسیدن ناحیه توسعه یافته به خروجی اطمینان حاصل شود. جریان نانوسیال آرام، دائم و تراکم ناپذیر فرض شده است و سیال عامل رفتار نیوتنی دارد در حالیکه از اتلاف و کار فشاری صرف نظر شده است. کلیه خواص فیزیکی بجز چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه که تابعی از کسر حجمی در نظر گرفته شده اند، ثابت فرض می شود.



شکل ۱- هندسه مربوط به مبدل حرارتی دو لوله ای و مشخصات جریان

## مدل مخلوط

مدل مخلوط دوفازی با فرض اتصال قوی بین فازها و پیروی نزدیک ذرات از سیال برای شبیه سازی بکار برده می شود. هر دو فاز گذرا فرض شده اند بدین معنی که هر فاز میدان بردار سرعت خودش را دارد و درون یک حجم کنترل، کسر حجمی فاز اولیه و هم چنین کسر حجمی فاز ثانویه وجود دارد. بجای بکارگیری معادلات حاکم بر هر فاز بطور جداگانه معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای مخلوط در نظر گرفته می شود. معادلات حاکم حالت دائم جریان سیال مخلوط و انتقال حرارت در مجرای دو لوله ای را مطابق با پژوهش های پیشین به شرح زیر می باشد:

معادله پیوستگی :

$$\nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم :

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m \vec{V}_m) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_m \nabla \vec{V}_m) + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k \vec{V}_{mk} \vec{V}_{mk} \right) - \rho_m \beta_m g (T - T_1) \quad (2)$$

$\rho_m$  چگالی مخلوط می باشد :

$$\rho_m = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_p \quad (3)$$

که  $\phi$  کسر حجمی فازهای جامد یا مایع است .  
معادله انرژی :

$$\nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\rho_k c_{pk} \phi_k \vec{V}_k T) = \nabla \cdot (k_m \nabla T) \quad (4)$$

معادله ی کسر حجمی :

$$\nabla \cdot (\phi \vec{V}_m) = -\nabla \cdot (\phi (1 - x_p) \vec{V}_{cp}) \quad (5)$$

$\vec{V}_m$  سرعت میانگین :

$$\vec{V}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k \vec{V}_k}{\rho_m} = \sum_{k=1}^n x_k \vec{V}_k \quad (6)$$

$x_k$  کسر جرمی :

$$x_k = \frac{\phi_k \rho_k}{\rho_m} \quad (7)$$

$\vec{V}_{mk}$  در معادله (2) به عنوان سرعت انتشار برای فاز ثانویه می باشد .  
اگر  $p$  یکی از فازهای ثانویه باشد آنگاه :

$$\vec{V}_{Mp} = \vec{V}_{cp} - \sum_{k=1}^n x_k \vec{V}_{ck} \quad (8)$$

سرعت لغزشی (سرعت نسبی) به صورت سرعت فاز ثانویه نسبت به سرعت فاز اولیه تعریف می شود :

$$\vec{V}_{cp} = \vec{V}_c - \vec{V}_f \quad (9)$$

سرعت نسبی از معادله (10) محاسبه می شود که توسط ماننین همکاران [22] پیشنهاد شده است . در حالیکه معادله (11) توسط شیلر و نومان برای محاسبه ی ضریب درگ بصورت زیر استفاده شده است :

$$\vec{V}_{cp} = \frac{4d_p}{3C_D} \frac{1}{|\vec{V}_{cp}|} \frac{\rho_p - \rho_m}{\rho_f} [g - (\vec{V}_m \cdot \nabla) \vec{V}_m] \quad (10)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \quad Re_p < 1000 \quad (11)$$

$$= 0.44 \quad Re_p > 1000$$

خواص فیزیکی در معادلات فوق عبارتند از :

ویسکوزیته موثر از رابطه (۱۲) وانگ و همکاران [۲۳] که بر اساس داده های تجربی بدست آمده و برای کسر حجمی های کمتر از 0.06 مؤثر است بدست می آید .

$$\mu_{eff} = \mu_f (1 + 7.3\phi + 123\phi^2) \quad (12)$$

رابطه چون و همکاران (۱۳) که حرکت براونی و قطر نانو ذرات در آن لحاظ شده است برای محاسبه ی ضریب هدایت حرارتی موثر مورد استفاده قرار گرفته است :

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + 64.7 \times \phi^{0.746} \left( \frac{d_f}{d_p} \right)^{0.369} \left( \frac{k_p}{k_f} \right)^{0.746} \times pr_f^{0.9955} \times Re_f^{1.2321} \quad (13)$$

که در رابطه ی (۱۳) بصورت زیر تعریف می شود :

$$pr_f = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha_f} \quad (14)$$

$$Re_f = \frac{\rho_f k_b T}{3\pi\mu^2 l_{bf}} \quad (15)$$

که  $l_{bf}$  طول مسیر آزاد مولکولی آب ( $= 0.17 \text{ nm}$ ) نامیده می شود و  $k_b$  ثابت بولتزمن ( $K_b = 1.3807 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ) و  $\mu$  با معادله ی زیر محاسبه می شود:

$$\mu = A \times 10^{\frac{B}{T-C}}, \quad C=140, \quad B=247, \quad A=2.414e-5, \quad k_b=1.3807e-23 \quad (16)$$

ظرفیت حرارتی و ضریب انبساط حجمی بصورت خطی با تغییر کسر حجمی تغییر می کنند و به شکل زیر تعریف می شوند :

$$C_p = \left[ \frac{(1-\phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p}{(1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p} \right] \quad (17)$$

$$\beta = \frac{\phi\rho_p\beta_p + (1-\phi)\rho_f\beta_f}{(1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p} \quad (18)$$

ضریب نفوذ حرارتی :

$$\alpha = \frac{k}{(\rho C_p)} \quad (19)$$

## شرایط مرزی

دستگاه معادلات بیضوی غیرخطی حاکم با شرایط مرزی زیر حل شده است :

شرایط مرزی بر روی جداره های مبدل :

$$at(r = r_1 \text{ and } r = r_2, z = (0, L), \theta = (0, \pi)) \quad (20)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial r} = q'' \quad , \quad u, v, w = 0$$

شرط مرزی تقارن (گرادیان دما و تنش برشی در مرز تقارن برابر صفر هستند):

$$at(\theta = 0 \text{ and } \theta = \pi, r = (r_1, r_2), z = (0, L))$$

$$\frac{\partial u}{\partial \theta}, \frac{\partial w}{\partial \theta}, \frac{\partial T}{\partial \theta}, v = 0 \quad (21)$$

شرط مرزی ورودی:

$$at(z = 0, \theta = (0, \pi), r = (r_1, r_2))$$

$$u, v = 0, \quad w = w_{inlet}, \quad T = T_{inlet} \quad (22)$$

شرط مرزی خروجی:

$$at((z = L), \theta = (0, \pi), r = (r_1, r_2))$$

$$\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}, \frac{\partial w}{\partial z}, \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (23)$$

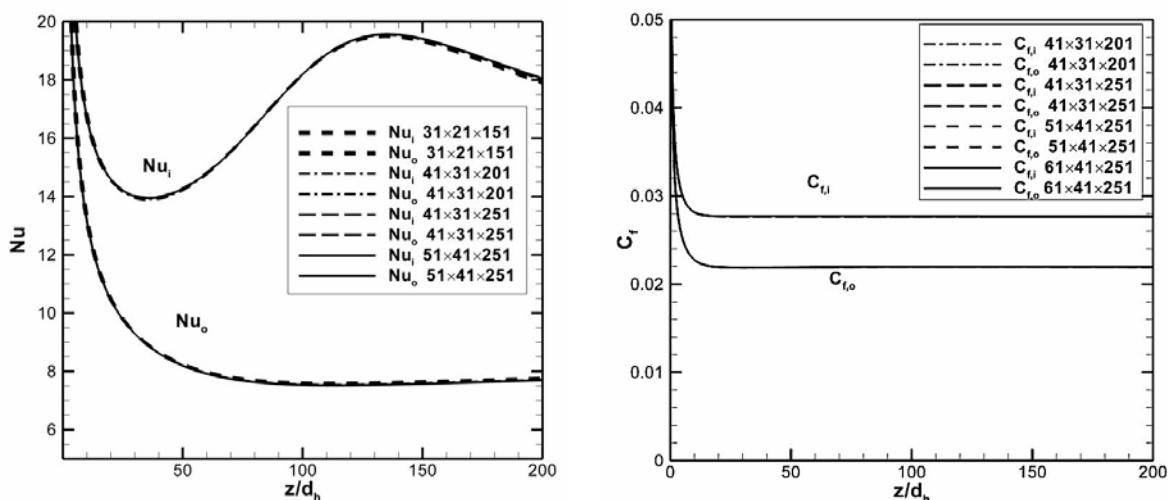
در مرز خروجی نیز شار جرمی خروجی بر اساس شار جرمی ورودی تصحیح می شود. با توجه به اینکه معادله تصحیح فشار از روی معادله پیوستگی برای نانوسیال و معادله کسر حجمی از روی معادله پیوستگی برای فاز ثانویه بدست آمده است شار جرمی برای معادله تصحیح فشار و شار جرمی فاز ثانویه برای معادله کسر حجمی به عنوان مرز عمل میکنند. مقادیر فشار نسبی بر روی مرز که در معادله مومنوم مورد نیاز است نیز از طریق برونیابی مرتبه دو محاسبه و اعمال می شود.

## روش عددی

دستگاه معادلات بیضوی با استفاده از روش حجم محدود گسسته شده است و برای ارتباط بین ترمهای سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. معادلات مومنوم و انرژی با دقت مرتبه دوم و معادله کسر حجمی با دقت مرتبه اول حل شده است. کلیه برونیابی ها نیز با دقت مرتبه دوم انجام شده است.

بعد از حل معادلات حاکم برای سرعت، فشار، کسر حجمی و دما دیگر مقادیر مفید مانند عدد بی بعد ناسلت و ضریب اصطکاک می توانند محاسبه شوند. شبکه بندی مورد استفاده با سازمان و غیر یکنواخت بوده و از المانهای استوانه‌ای استفاده می کند. توزیع شبکه در نزدیکی ناحیه ورودی مجرا و جداره های لوله با توجه به بزرگ بودن گرادیان های سرعت و دما ریزتر است.

برای بررسی دقیق استقلال شبکه، پارامترهای هیدروپنایمیکی و گرمایی یعنی نمودارهای ناسلت موضعی  $(Nu_i, Nu_o)$  و همچنین ضریب اصطکاک جریان  $C_{f,i}, C_{f,o}$  بر اساس تعداد گره های مورد استفاده مقایسه شده اند. طول مبدل حرارتی برابر  $L = 200d_h$  می باشد. بررسی شبکه برای سیال آب خالص با  $Re = 1000, Gr = 10^5, r_o / r_i = 2, q_o / q_i = 1$  درون مجرای دو لوله ای و براساس تعداد گره ها در سه جهت طولی  $Z$ ، محیطی  $\theta$ ، و شعاعی  $r$  انجام شده است. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می شود با افزایش تعداد گره ها از  $n_r = 40, n_\theta = 30, n_z = 200$  به بعد تغییری در نمودارهای  $C_f$  و  $Nu$  مشاهده نمی شود و در این شرایط می توان گفت که با افزایش بیشتر گره ها تغییرات قابل توجه و محسوسی در نتایج به وجود نخواهد آمد. به عبارتی مساله حساسیتی به تعداد گره ها ندارد و اصطلاحاً جوابها مستقل از اندازه شبکه است. بنابراین با توجه به نمودارهای  $(C_{f,i}, C_{f,o})$  و  $(Nu_i, Nu_o)$  شبکه  $40 \times 30 \times 200$  به عنوان شبکه نهایی انتخاب شده است.



شکل ۲- بررسی استقلال شبکه بر اساس  $C_f$  و  $Nu$  برای شرایط  $Re = 1000, Gr = 10^5, r_o / r_i = 2, q_o / q_i = 1$

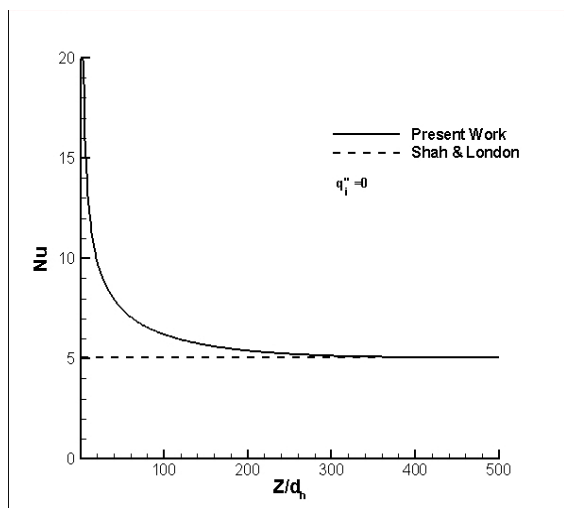
### اعتبار سنجی

قبل از بررسی تحلیل عددی میدان دما و سرعت در حوزه حل باید اعتبار روش عددی مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور نتایج با کارهای عددی و تجربی موجود مقایسه شده است. برای بررسی صحت کد محاسباتی بکار رفته در حل مسئله، نتایج عددی بعد ناسلت متوسط محیطی بر روی دیواره داخلی و خارجی ( $Nu_o, Nu_i$ ) در ناحیه توسعه یافته در جابجایی اجباری، بدست آمده در  $Re=800$  و نسبت شعاعی  $(r_o/r_i)=2$  با نتایج کار شاه و لندن<sup>۱</sup> [۲۸] و همچنین نتایج کار مختاری و همکاران [۲۰] برای شار حرارتی ثابت در دیواره‌های لوله‌های داخلی و خارجی در شکل (۲) مقایسه شده است.

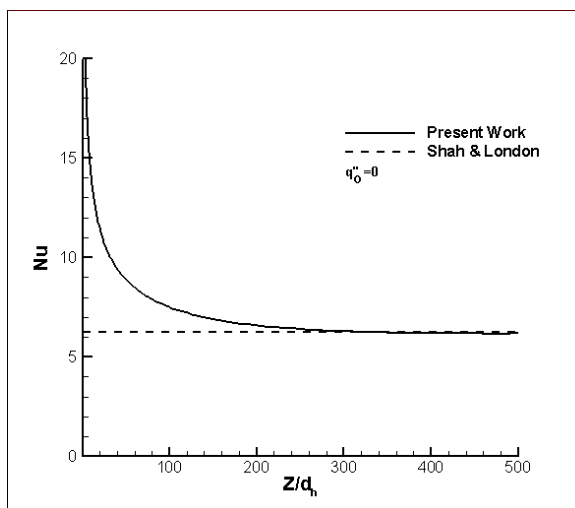
جدول ۱- عدد ناسلت توسعه یافته حاصل کار عددی انجام شده توسط شاه و لندن [۲۸] و همچنین مختاری و همکاران [۲۰]

| $\frac{q_{w,i}''}{q_{w,o}''}$ | نتایج حاصل از کار مختاری و همکاران (۲۰۱۱) |        | نتایج حاصل از کار شاه و لندن (۱۹۸۷) |        |
|-------------------------------|---|--------|-------------------------------------|--------|
|                               | $Nu_i$                                    | $Nu_o$ | $Nu_i$                              | $Nu_o$ |
| $\infty$                      | ۶,۲۴۷۵                                    | ۰      | ۶,۴۱۱۵۶                             | ۰      |
| ۰                             | ۰   | ۵,۰۳۹  | ۰                                   | ۵,۱۰۲۴ |

<sup>1</sup> Shah and London



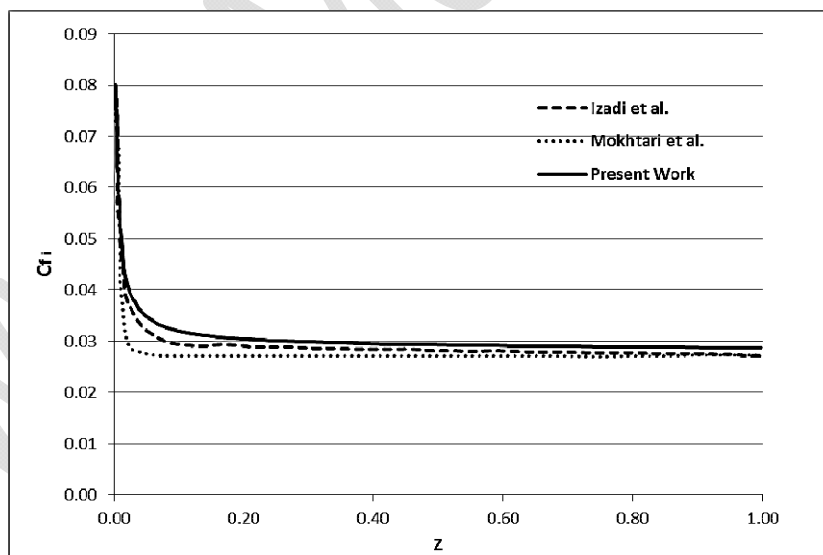
(ب)



(الف)

شکل ۳- مقایسه عدد ناسلت توسعه یافته با نتایج کار عددی انجام شده توسط شاه و لندن برای حالت‌های  $0, \infty$   $\frac{q_{w,i}''}{q_{w,o}''}$

همچنین برای دقت بیشتر و بررسی درستی استفاده از فرمول های خصوصیات نانوسیال با کار ایزدی و همکاران [۱۹] و همچنین کار مختاری و همکاران [۲۰] در شکل (۴) مقایسه شده است. این محققین به بررسی جریان اجباری<sup>۱</sup> در درون لوله حلقوی پرداختند در حالیکه نانوسیال مورد استفاده برای خنک کاری بین دو لوله آب- $Al_2O_3$  بود. این مقایسه برای بررسی ضریب اصطکاک بر روی لوله داخلی و خارجی  $(C_{f,i}, C_{f,o})$  و  $\frac{r_i}{r_o} = 0.8$  و  $Re = 900$  و کسر حجمی  $\phi = 0.05$  انجام شده است.



شکل ۴- مقایسه نتایج ضریب اصطکاک نانو سیال با کار عددی انجام شده توسط ایزدی و همکاران [۱۹] و مختاری و همکاران [۲۰]

همانطور که مشاهده می‌شود بین نتایج حاصل از کار پژوهشگران پیشین در این زمینه با نتایج حاصل از این پژوهش در حالات مختلف برای عدد ناسلت داخلی و خارجی و همچنین ضریب اصطکاک نانوسیال تطابق خوبی وجود دارد. لذا از صحت کد محاسباتی نوشته شده اطمینان حاصل می‌شود.

<sup>۱</sup>. Forced convection

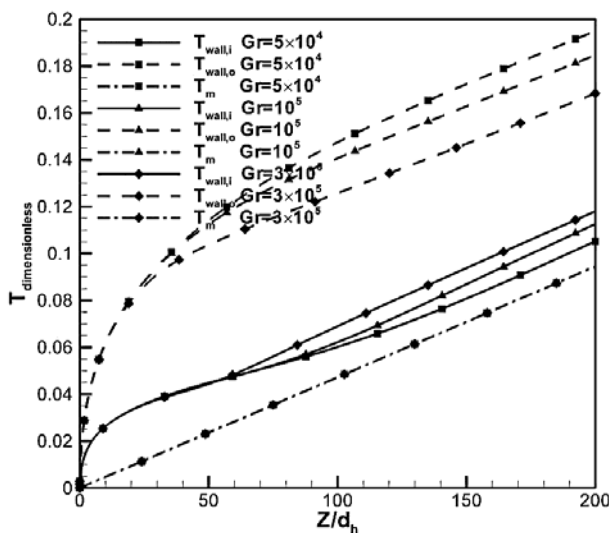


## بحث و بررسی نتایج

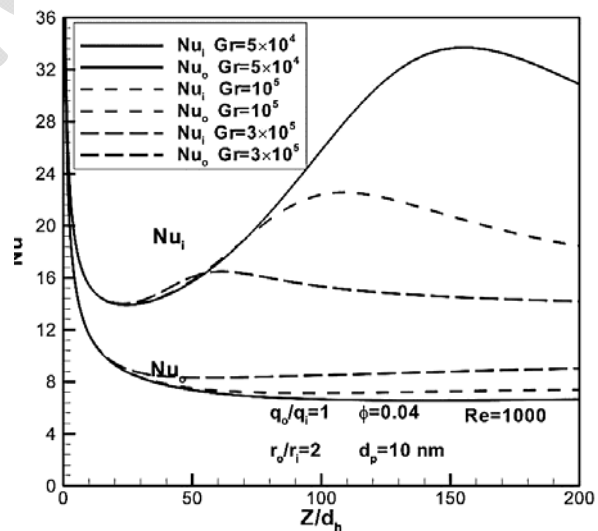
در این مقاله تأثیر عدد گراشف و عدد رینولدز روی رفتار حرارتی جریان نانو سیال آب-کاربید سیلیسیوم و در مجرای دولوله‌ای ارائه و بحث شده است. شبیه‌سازی عددی با نسبت شعاعی  $r_o/r_i=2$  و نسبت شار حرارتی  $q_o/q_i=1$  برای کسر حجمی  $\phi=0.04$  و  $d_p=10\text{ nm}$  برای مقادیر مختلف عدد گراشف و عدد رینولدز انجام شده است. نانوذرات کروی و یک اندازه فرض شده اند. بدلیل رفتار مشابه و کمبود فضا نتایج برای سه مقدار متفاوت عدد گراشف  $5 \times 10^4$ ،  $10^5$  و  $3 \times 10^5$  و عدد رینولدز  $500$ ،  $1000$  و  $1500$  ارائه شده است.

### اثر عدد گراشف در انتقال حرارت نانوسیال آب-کاربید سیلیسیوم

برای مقایسه اندازه‌های مختلف عدد گراشف باید دیگر پارامترهای مؤثر همچون کسر حجمی، قطر نانودره، عدد رینولدز، نسبت شعاع و شار ثابت حرارتی خارجی به داخلی ثابت و در  $Re=1000$  بدست آمده است. کانتور سرعت و جریان ثانویه و همچنین نمودارهای ناسلت و دما برای نیمه سمت راست لوله (به دلیل تقارن) نشان داده شده است. می توان گفت که مشخصات انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در مجرای دو لوله ای وابستگی شدیدی به رفتار جریان ثانویه دارد. در شکل (۵) نمودارهای ناسلت داخلی و خارجی را برای اعداد گراشف مختلف در طول لوله نشان می‌دهد که در ابتدای لوله به دلیل نزدیکی دمای دیواره به دمای سیال عدد ناسلت با شیب تندی نزول می کند و بعد از رسیدن به یک مقدار مینیمم با یک شیب ملایم شروع به افزایش می کند که این به دلیل اثر گذاری جریان های ثانویه بر روی لایه مرزی حرارتی می باشد و در قسمت توسعه یافتگی حرارتی به سمت مقادیر بیشتر میل می کند. همچنین افزایش عدد گراشف باعث افزایش نیروی شناوری و در نتیجه تقویت سرعت های ثانویه می شود. این امر منجر به افزایش نسبت انتقال حرارت جابجایی به انتقال حرارت هدایت شده و میانگین عدد ناسلت افزایش می یابد.

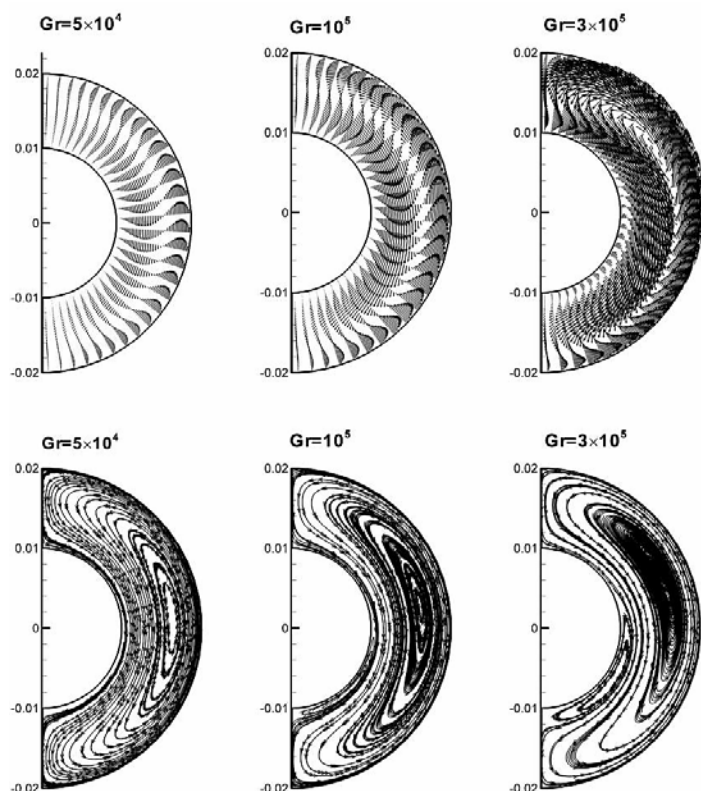


شکل ۶- مقایسه دمای دیواره داخلی و خارجی برای گراشف های مختلف نانوسیال کاربید سیلیسیوم



شکل ۵- مقایسه اعداد ناسلت داخلی و خارجی برای گراشف های مختلف نانوسیال کاربید سیلیسیوم

شکل (۶) مقایسه دمای دیواره داخلی و خارجی و میانی برای گراشف های مختلف نانوسیال کاربید سیلیسیوم را نشان می‌دهد و مشاهده می‌شود که با افزایش گراشف دمای بی‌بعد دیواره خارجی کاهش و دمای دیواره داخلی افزایش می‌یابد و این در حالی است که دمای میانی تغییر محسوسی ندارد.

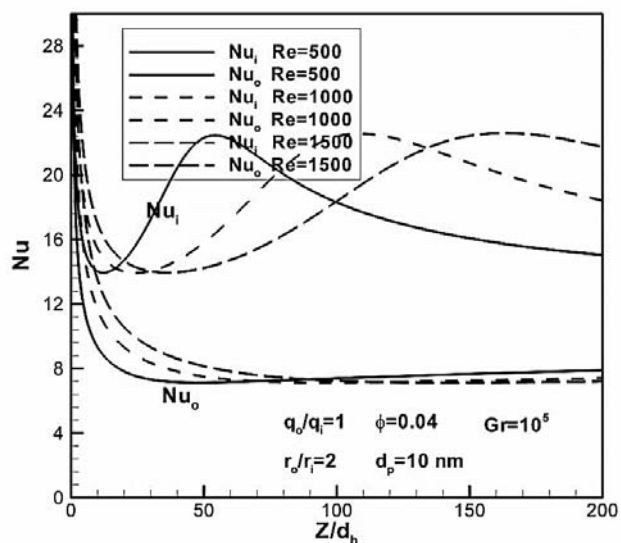


شکل ۷- مقایسه کانتورهای سرعت و جریان ثانویه برای گرافش‌های مختلف نانوسیال کاربرد سیلیسیوم

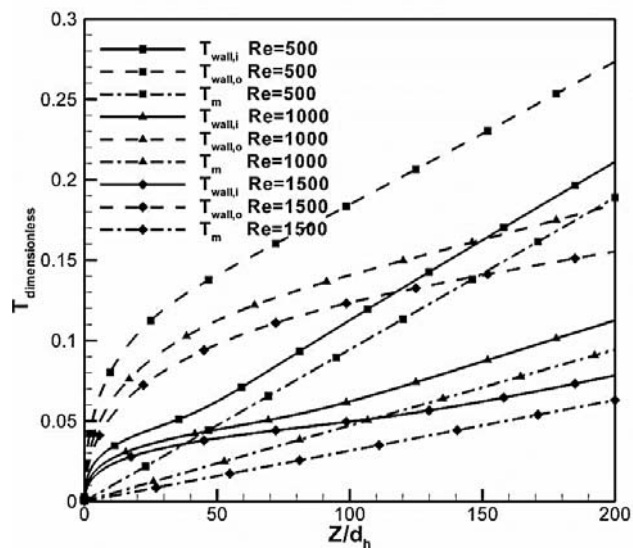
مقایسه کانتورهای سرعت و جریان ثانویه برای گرافش‌های مختلف نانوسیال کاربرد سیلیسیوم در شکل (۷) نشان می‌دهد که با افزایش عدد گرافش، جریان ثانویه در یک مقطع لوله افزایش قابل توجهی دارد.

#### اثر عدد رینولدز بر انتقال حرارت نانوسیال کاربرد سیلیسیوم

اثر عدد رینولدز بر روی انتقال حرارت نانوسیال کاربرد سیلیسیوم برای سه مقدار  $Re=1500$  و  $Re=1000$  و  $Re=500$  توسط نمودارها و کانتورها برای عدد ناسلت و کانتورهای سرعت و جریان ثانویه و بردارهای سرعت ثانویه و همچنین نمودارهای دمای دیواره‌ها نشان داده می‌شود. این نتایج با نسبت شعاعی  $r_o/r_i=2$  و نسبت شار حرارتی یک  $q_o/q_i=1$  و کسر حجمی  $\phi=0.04$  برای  $Gr=10^5$  و  $d_p=10\text{ nm}$  بدست آمده است و مقایسه اعداد ناسلت داخلی و خارجی برای عدد رینولدزهای مختلف نانوسیال کاربرد سیلیسیوم در شکل (۸) نشان می‌دهد که با کاهش عدد بی‌بعد رینولدز، نمودار ناسلت زودتر به یک مقدار ثابت میل می‌کند و بعد از ناحیه توسعه‌یافته انتقال حرارت بهتری صورت می‌گیرد.

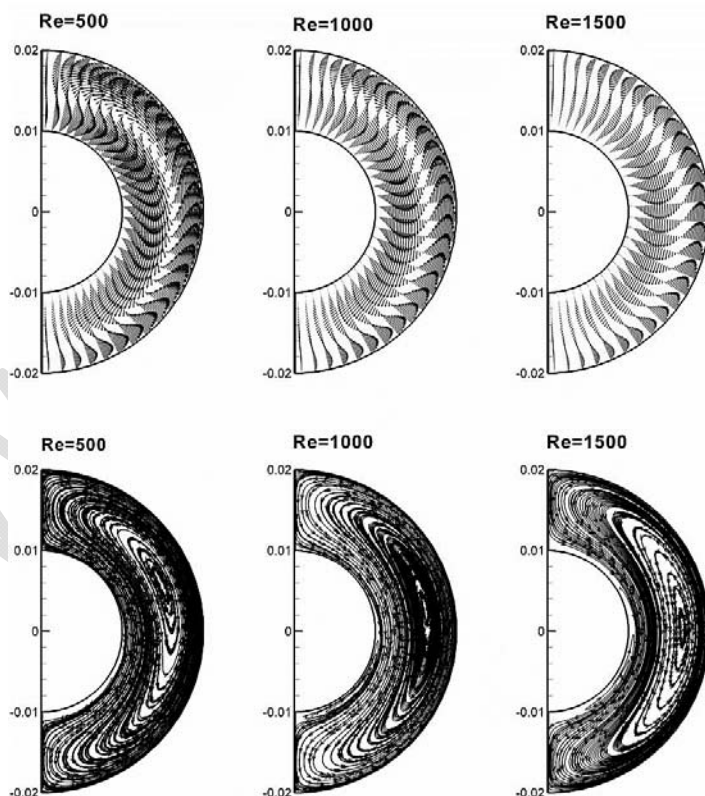


شکل ۹- مقایسه اعداد ناسلت داخلی و خارجی برای عدد رینولدزهای مختلف نانوسیال کاربید سیلیسیوم



شکل ۸- مقایسه دمای دیواره داخلی و خارجی برای عدد رینولدزهای مختلف نانوسیال کاربید سیلیسیوم

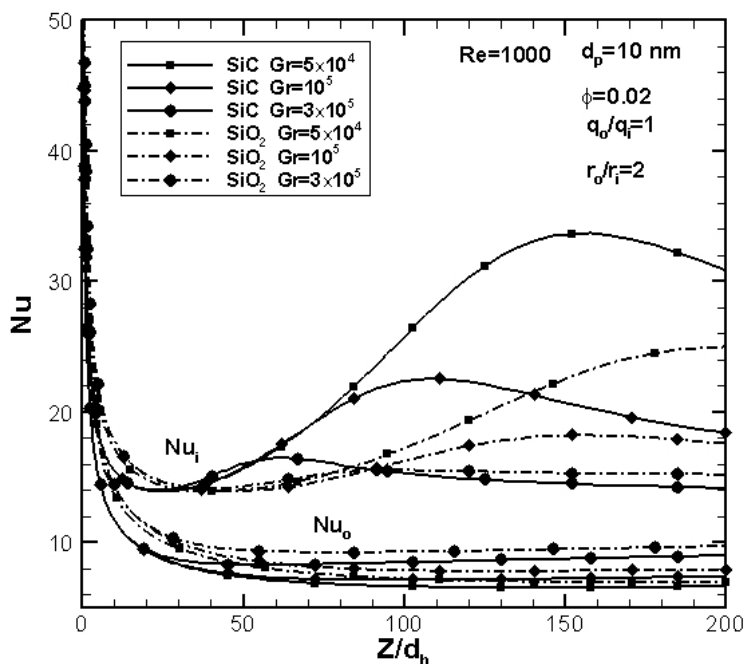
مقایسه دمای میانی و دمای دیواره داخلی و خارجی برای عدد رینولدزهای مختلف نانوسیال کاربید سیلیسیوم در شکل (۱۰) نشان می‌دهد که با کاهش رینولدز، دمای بی‌بعد در طول مسیر لوله افزایش می‌یابد.



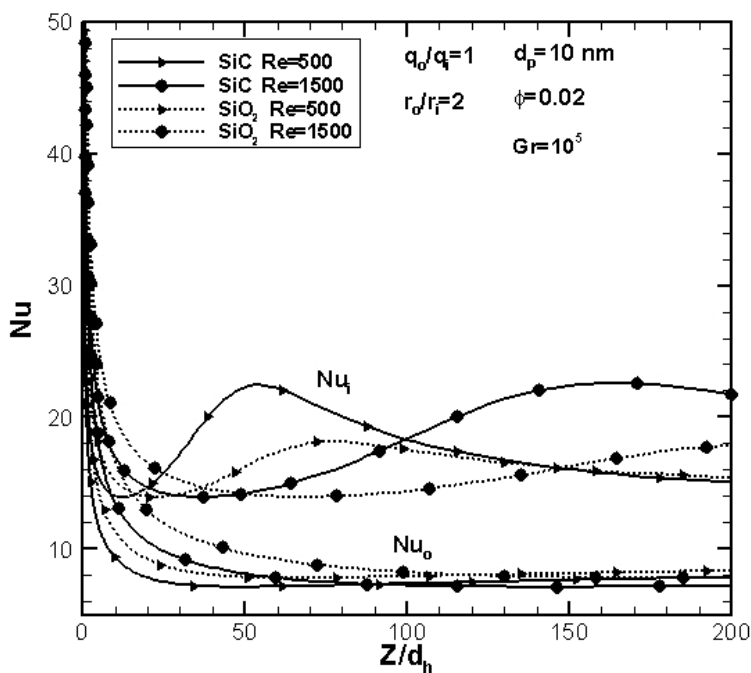
شکل ۱۰- مقایسه کانتورهای سرعت و جریان ثانویه برای عدد رینولدزهای مختلف نانوسیال کاربید سیلیسیوم

مقایسه کانتورهای سرعت و جریان ثانویه برای عدد رینولدزهای مختلف نانوسیال کاربید سیلیسیوم در شکل (۱۰) بخوبی نشان می‌دهد که با کاهش رینولدز در یک مقطع یکسان، جریان ثانویه افزایش می‌یابد.

همچنین در این پژوهش نمودارهای ناسلت با اعداد مختلف گراش و رینولدز در نانوسیال‌های کاربید سیلیسیوم و اکسید سیلیسیوم در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) با یکدیگر مقایسه شده‌اند و نتایج خوبی نشان داد که تأثیر تغییرات گراش و رینولدز در انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب-کاربید سیلیسیوم به مراتب بیشتر از آب-اکسید سیلیسیوم می‌باشد و این بدلیل ضریب هدایت حرارتی چند برابری کاربید سیلیسیوم نسبت به اکسید سیلیسیوم می‌باشد.



شکل ۱۱- مقایسه ناسلت برای اعداد مختلف گراش در نانوسیال‌های کاربید سیلیسیوم و اکسید سیلیسیوم



شکل ۱۲- مقایسه ناسلت برای اعداد مختلف رینولدز در نانوسیال‌های کاربید سیلیسیوم و اکسید سیلیسیوم

## جمع بندی

انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانوسیال آب-کاربید سیلیسیوم با جریان آرام به صورت عددی مطالعه شده است. مدل مخلوط دوفازی برای بررسی تأثیر اعداد رینولدز و گراشف روی رفتار حرارتی نانوسیال‌های مذکور در مجرای بین دو لوله هم‌مرکز استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که افزایش عدد گراشف و کاهش عدد رینولدز با تسریع شروع جریان ثانویه، افزایش عدد ناسلت و بهبود انتقال حرارت همراه است. همچنین مقایسه این تغییرات در دو نوع نانوسیال آب-کاربید سیلیسیوم و آب-اکسید سیلیسیوم نشان می‌دهد که استفاده از نانوذره کاربید سیلیسیوم تأثیر چشمگیری در بهبود انتقال حرارت جابجایی ترکیبی دارد. تأثیر تغییرات گراشف و رینولدز در انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب-کاربید سیلیسیوم به مراتب بیشتر از آب-اکسید سیلیسیوم می‌باشد.

## فهرست علائم

|           |   |              |   |
|-----------|---|--------------|---|
| $A$       | سطح ( $m^2$ )   | $pr$         | عدد پرائتل ( $\frac{\mu}{\rho\alpha}$ ) |
| $C$       | ظرفیت حرارتی ( $kJ / K$ )   | $q''$        | شار حرارتی ( $W / m^2 s^2$ )            |
| $C_f$     | ضریب اصطکاک سطحی  | $r$          | شعاع، جهت مختصاتی شعاعی ( $m$ )         |
| $c_p$     | ظرفیت حرارتی ویژه ( $J / Kg.K$ )  | $Ri$         | عدد ریچاردسون ( $Gr / Re^2$ )           |
| $d$       | قطر ( $m$ )   | $T$          | دما ( $K$ )                             |
| $d_h$     | قطر هیدرولیکی ( $m$ )   | $u$          | مولفه سرعت در جهت $r$ ( $m / s$ )       |
| $d_p$     | قطر نانو ذره ( $nm$ )   | $v$          | مولفه سرعت در جهت $\theta$ ( $m / s$ )  |
| $g$       | شتاب جاذبه ( $m / s^2$ )  | $V$          | سرعت ( $m / s$ )                        |
| $Gr$      | عددگراشف ( $\frac{g\beta(T_{h,inlet} - T_{c,inlet})d_h^3}{\nu^2}$ )           | $w$          | مولفه سرعت در جهت $z$ ( $m / s$ )       |
| $h$       | ضریب انتقال حرارت جابجایی ( $W / m^2.K$ )                                     | $x$          | کسر جرمی                                |
| $k$       | ضریب هدایت حرارتی ( $W / m.K$ )   | $z$          | جهت مختصاتی محوری                       |
| $k_b$     | ثابت بولتزمن ( $1.3807 \times 10^{-23}$ )                                     | $\forall$    | حجم ( $m^3$ )                           |
| $L$       | طول ( $m$ )   | علائم یونانی |   |
| $l_{bf}$  | طول مسیر آزاد سیال پایه ( $0.17nm$ )  | $\alpha$     | ضریب نفوذ گرمایی ( $m^2 / s$ )          |
| $\dot{m}$ | دبی جرمی ( $kg / s$ )   | $\varphi$    | کسر حجمی                                |
| $Nu$      | عدد ناسلت ( $\frac{(\partial T / \partial r)_{wall} d_h}{(T_{wall} - T_b)}$ ) | $\mu$        | ویسکوزیته دینامیک ( $N.s / m^2$ )       |
| $P$       | فشار ( $Pa$ )   | $\nu$        | ویسکوزیته سینماتیک ( $m^2 / s$ )        |
| $Pe$      | عدد پکلت ( $Re.Pr$ )  | $\rho$       | چگالی ( $kg / m^3$ )                    |
|           |   | $\beta$      | ضریب انبساط حجمی ( $K^{-1}$ )           |



- [1] J.C. Maxwell, Electricity and Magnetism, Clarendon Press, Oxford, UK, 1873
- [2] S.U.S. Choi, Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles, Developments and Applications of Non – Newtonian Flow, ASME, FED231/MD 66(1995)99-105.
- [3] S. Lee, S.U. Choi, S. Li, J.A. Eastman, Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, J. Heat Transfer 121(1999)280-289
- [4] S.U.S. Choi, Z.G. Zhang, W. Yu, F.E. Lockwood, E.A. Grulke, Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions, Appl. Phys. Lett. 79(2001)2252-2254
- [5] Q.Z. Xue, Model for effective thermal conductivity of nanofluids, Phys. Lett. A 307(2003)313-317.
- [6] Y.M. Xuan, Q. Li, W. Hu, Aggregation structure and thermal conducting of nanofluids, AIChE J. 49 (2004)1038 -1043
- [7] S.P. Jang, S. Choi, Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids, Appl. Phys. Lett. 84 (2004)4316-4318
- [8] C.H. Chon, K.D. Kihm, S.P. Lee, S.U.S. Choi, Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) thermal conductivity enhancement, Appl. Phys. Lett. 87(2005)1-3
- [9] B.C. Pak, Y.I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, Exp. Heat Transfer 11 (1998)151-170.
- [10] Y.M. Xuan, Q. Li, Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluid, J. Heat Transfer 125(2003)151-155
- [11] Y.M. Xuan, Q. Li, Heat transfer enhancement of nanofluids, Int. J. Heat Fluid Flow 21(2000)58-64
- [12] S.E. Maiga, C.T. Nguyen, N. Galanis, G. Roy, Heat Transfer behaviors of nanofluid in a uniformly heated tube, Super Lattices Microstruct. 35 (2004)543-557
- [13] K. Khanafer, K. Vafai, M. Lightstone, Buoyancy-driven heat Transfer enhancement in a two dimensional enclosure utilizing nanofluid, Int. J. Heat Mass Transfer 46(2003)3639-3653.
- [14] J. Koo, C. Kleinstrouer, Laminar nanofluid flow in microheat – sinks, Int. J. Heat Mass Transfer 48(2005)2625-2661.
- [15] M. Akbari, A. Behzadmehr, Developing laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube with uniform heat flux, Int. J. Num. Meth. Heat Fluid Flow, in press.
- [16] A. Akbarinia, A. Behzadmehr, Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal curved tube, Appl. Therm. Eng. 27(2007)1327-1337
- [17] A. Behzadmehr, M. Saffar-Avval, N. Galanis, Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two – phase approach, Int. J. Heat Fluid Flow 28 (2007)211-219.
- [18] Abu – Nada, E. Effects of variable and thermal conductivity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid on heat transfer enhancement in natural convection, Int. J. Heat Fluid Flow 30(2009)679-690.
- [19] 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.
- [20] R. Mokhtari Moghari, A. Akbarinia, M. Shariat, F. Talebi, R. Laur, Two phase mixed convection Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid flow in an annulus, Int. J. Multiphase Flow 37(2011)585-595.
- [21] M. Peric, <http://springer.de/cd/pub/technik/peric/pcol.f>
- [22] Bianco, V., Manca, O., Nardini, S., Numerical investigation on nanofluids Turbulent convection heat transfer inside a circular tube, Int. J. Therm. Sci. 29(17-18)(2009).3632-3642.
- [23] Akbarinia, A., Laur, R. Investigation the diameter of solid particles affects on a laminar nanofluids FLOW in a curved tube using a two phase approach, Int. J. Heat Fluid Flow 30(4)(2009)706-714.
- [24] Mirmasoumi, S., Behzadmehr, A. Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube using two – phase mixture model, Appl. Therm. Eng. 28(2008a).717-727.
- [25] Mirmasoumi, S., Behzadmehr, A. Effect of nanoparticles mean diameter on mixed convection heat transfer of a nanofluid in a horizontal tube, Int. J. Heat Fluid Flow 29(2008b)557-566
- [26] Manninen, M., Taivassalo, V., Kallio, S. On the Mixture Model for multiphase Flow, VTT Publications 288(1996), Technical Research Center of Finland.
- [27] Wang, B.X., Zhou, L.P., Peng, X.F. A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles, Int. J. Heat Mass Trans. 46(2003)2665-2672
- [28] R. K. Shah, and A. L. London. Laminar flow forced convection in ducts, Advances in Heat Transfer. eds. T. F. Irvine and J. P. Hartnett(1978) Academic Press, New York.