



## بررسی عددی انتقال حرارت جابجایی جریان نانوسیال بر روی استوانه حرارت دیده و تاثیر نوع مدل انتخابی خواص موثر

سیده بهاره موسوی<sup>1</sup>، محمد مهدی هیهات<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی 14115-111، mmheyhat@modares.ac.ir

### چکیده

یکی از راه‌های افزایش راندمان در مبدل‌های حرارتی استفاده از جریان نانوسیال بر روی لوله‌های مبدل‌کن‌ها است. مساله انتقال حرارت به همراه نیروهای وارده به استوانه در اثر عبور جریان مذتهاست که توجه و علاقه محققان را بخود جلب کرده است. در این مقاله خصوصیات انتقال حرارت جابجایی از استوانه‌ای حرارت دیده برای نانوسیال با سیال پایه آب به صورت عددی در جریان متقاطع با رژیم پایا و برای اعداد رینولدز پایین مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات حاکم شامل: پیوستگی، ممتنم و انرژی حرارتی با روش حجم محدود استاندارد حل شده است. میدان جریان دوبعدی پایا برای سرعت ورودی یکنواخت در محدوده کسر حجمی  $0.01 \leq \phi \leq 0.05$  و برای اعداد رینولدز بین 10 تا 30 شبیه‌سازی شده و ویژگی‌های جریان و انتقال حرارت برای نانوسیال آب/آلومینا مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهند که کسر حجمی نانوذرات، عدد رینولدز سیال پایه و خواص موثر فیزیکی نانوسیال می‌توانند خصوصیات انتقال حرارت را به صورت قابل ملاحظه تحت تاثیر قرار دهند. اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه منجر به کاهش مقدار عدد ناسلت متوسط می‌شود در حالیکه نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

**کلید واژگان:** استوانه ساکن، نانوسیال، ضریب انتقال حرارت، مدل استاتیکی و دینامیکی، مبدل کن حرارتی

## Numerical investigation of convective heat transfer of nanofluid flow over a heated circular cylinder and the effect of thermophysical models

Seyede bahare mousavi, mohammad Mahdi heyhat

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, mmheyhat@modares.ac.ir

### ABSTRACT

One of the ways to increase the efficiency of tube heat exchangers is using nanofluid as working fluid. The heat transfer and exerted forces of flow over a cylindrical tube have been studied widely. In this paper, the convective heat transfer characteristics and fluid flow through a heated circular cylinder, for low Reynolds numbers of water-based nanofluid in the steady cross-flow regime have been investigated numerically. The governing equations include: continuity, momentum and thermal energy have been solved by the standard finite volume method. Two-dimensional steady flow filed computation were carried out for an uniform velocity and volume fractions range of  $0.01 \leq \phi \leq 0.05$  over a range of Reynolds number from 10 to 30 and flow and heat transfer characteristic have been studied for Alumina/water nanofluid. The results indicate that the nanoparticles volume fraction, Reynolds number and effective physical properties of nanofluid can significantly affect the heat transfer characteristics. Adding nanoparticles to the base fluid lead to reduce the mean Nusselt number values while the heat transfer rate enhances.

**Keywords:** Stationary cylinder, nanofluid, heat transfer coefficient, Static and Dynamic models, Heat exchanger

### 1- مقدمه

می‌شوند، (1) جریان خزشی آرام در محدوده اعداد رینولدز  $0 \leq Re \leq 4$ .

(2) جریان آرام با جدایش پایا در محدوده  $4 \leq Re \leq 48$ ، که در این حالت

دو گردابه چرخشی غیرمتقارن در ناحیه ویک شکل می‌گیرد. (3) جریان آرام

همراه با ریزش متناوب گردابه‌ها در محدوده  $48 \leq Re \leq 180$ ، (4) رژیم

جریان گذار در ناحیه ویک در محدوده  $180 \leq Re \leq 400$ .

این مقاله به بررسی جریان در محدوده‌ای اعداد رینولدز بین 10 تا 30،

جایی که گردابه‌ها به صورت متقارن در پشت جسم تشکیل شده‌اند اما ریزش

گردابه‌ها شروع نشده خواهد پرداخت.

در چند دهه‌ای اخیر، مطالعات عددی و تجربی زیادی بر روی میدان

جریان و انتقال حرارت اطراف استوانه ساکن درون کانال انجام شده است اما

اکثر آن‌ها از سیالات مرسوم مانند آب، هوا و یا هرنوع سیال تک فاز دیگر

با توجه به اهمیت جریان عبوری از روی استوانه و همچنین کاربرد آن در بسیاری از فرآیندهای مهندسی، جریان سیالات لزج در اطراف استوانه حرارت دیده هدف مطالعه بسیاری از محققان طی دهه‌های مختلف بوده است. خصوصیات جریان عبوری از روی استوانه حرارت دیده و انتقال حرارت از آن، در بسیاری از فرآیندهای مهندسی و کاربردهای صنعتی از، جریان اطراف مجموعه لوله‌های سوختی نیروگاه‌های اتمی، لوله‌های مبدل‌کن‌های حرارتی، برج‌های خنک کن و سیستم‌های خنک‌کننده‌ی الکترونیکی اهمیت دارد.

ژراکوویچ [1] براساس داده‌های شبیه‌سازی تجربی، تحلیلی و عددی بر جریان عبوری از استوانه، این پدیده‌ی چالش برانگیز را به چهار رژیم متفاوت براساس عدد رینولدز طبقه‌بندی کرده است که به این صورت توصیف

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

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

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

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{eff}}{RePr} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (4)$$

که در این جا  $U, V, \theta$  و  $P$  به ترتیب مولفه های سرعت، دما و فشار بدون بعد هستند.  $\nu_{eff}$  و  $\alpha_{eff}$  نیز به ترتیب چگالی، لزجت سینماتیکی و ضریب نفوذ موثر نانوسیال اند.

میدان محاسباتی به کار رفته در حل عددی در "شکل 1" نشان داده شده است. طول هندسه مسئله 30 برابر قطر استوانه و فاصله از ورودی و خروجی تا مرکز استوانه به ترتیب برابر با 10D و 20D است. ارتفاع کانال نیز برابر با 20D است و استوانه در مرکز قرار دارد. شرط مرزی عدم لغزش و دما ثابت بر روی استوانه و شرط مرزی لغزش-آزاد (تقارن) در دیواره های بالا و پایین حاکم است و دو مرز ورودی و خروجی به اندازه کافی دور از استوانه واقع شده اند. سرعت یکنواخت در مرز ورود و شرط مرزی فشار محیط در مرز خروج در نظر گرفته شده است.

## 2-2- خواص فیزیکی نانوسیالات

همان طور که قبلا ذکر شد، برای محاسبه خواص فیزیکی موثر نانوسیال رابطه هایی انتخاب شده که در زیر آورده شده اند.

در این جا از مدل کورچونه [5] برای محاسبه لزجت دینامیکی موثر نانوسیال استفاده شده است. این مدل به صورت رابطه (5) بیان می شود:

$$\mu_{eff} = \{1 / (1 - 34.87(d_p/d_{bf})^{-0.3} \phi^{1.03})\} \mu_{bf} \quad (5)$$

که  $\phi$  کسر حجمی نانوذرات است و در محدوده 0.2% تا 9% قرار دارد.

چگالی موثر و ظرفیت حرارتی موثر نانوسیال به صورت زیر تخمین زده می شوند [4].

$$\rho_{eff} = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_{bf} \quad (6)$$

$$\rho_{eff} c_{p_{eff}} = \phi \rho_p c_{p_p} + (1 - \phi) \rho_{bf} c_{p_{bf}} \quad (7)$$

در این جا زیر نویس های  $eff$ ،  $p$  و  $bf$  به ترتیب نشانگر خواص موثر نانوسیال، نانوذره و سیال پایه هستند.

هدایت حرارتی موثر نانوسیال اول که از مدل استاتیکی انتخاب شده و به مدل لئونگ و همکاران معروف است به صورت زیر تقریب زده می شود [4].

$$k_{eff} = \frac{(k_p - k_{tr}) \phi k_{tr} (2\varepsilon_1^3 - \varepsilon^3 + 1)}{\varepsilon_1^3 (k_p + 2k_{tr}) - (k_p - k_{tr}) \phi (\varepsilon_1^3 + \varepsilon^3 - 1)} + \frac{(k_p + 2k_{tr}) \varepsilon_1^3 [\phi \varepsilon^3 (k_{tr} - k_{bf}) + k_{bf}]}{\varepsilon_1^3 (k_p + 2k_{tr}) - (k_p - k_{tr}) \phi (\varepsilon_1^3 + \varepsilon^3 - 1)} \quad (8)$$

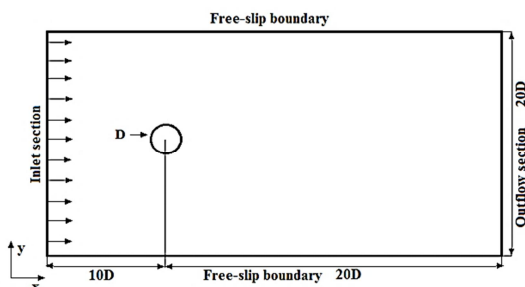


Fig. 1 Schematic of the computational problem

شکل 1 شماتیک میدان محاسباتی مسئله

استفاده کرده اند. سیالات انتقال حرارتی معمول به دلیل هدایت حرارتی پایینی که دارند نرخ انتقال حرارتشان نیز محدود است و این درحالیست که هدایت حرارتی سیالات با ذرات جامد معلق در آن، می تواند به صورت قابل ملاحظه ای افزایش یابد. در دهه ی اخیر تعداد محدودی از کارهای عددی به بررسی این مسئله با نانوسیالات پرداخته اند و در بیشتر کارهای انجام شده از روابط قدیمی برای پیش بینی خواص فیزیکی موثر نانوسیالات جهت محاسبه انتقال حرارت استفاده شده است.

سرکار و همکاران [2] به صورت عددی خصوصیات جابجایی ترکیبی ساختار جریان و انتقال حرارت نانوسیال با سیاله پایه آب عبوری از استوانه حرارت دیده در جریان متقاطع را مورد بررسی قرار دادند. آن ها مشاهده کردند که اعداد ناسلت محلی و متوسط با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات افزایش می یابد و در اعداد رینولدز بالا، بهبود بیشتری دیده می شود. وگاد و همکاران [3] نیز به صورت عددی پدیده انتقال حرارت از استوانه را برای جریان نانوسیال با اعداد رینولدز پایین مورد مطالعه قرار دادند. آن ها مشاهده کردند که ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی و عدد رینولدز افزایش می یابد. همچنین خاطر نشان کردند که برای یک عدد رینولدز ثابت، نانوذرات اثری بر روی نقطه ی جدایش ندارند.

روابطی که برای پیش بینی هدایت حرارتی موثر نانوسیال پیشنهاد شده اند را براساس فرضیات درنظر گرفته جهت مدل سازی، می توان به سه گروه مدل های استاتیکی، دینامیکی و ترکیب این دو مدل طبقه بندی نمود. مدل های استاتیکی براساس فرضیه ی ساکن بودن نانوذرات در سیال پایه و مدل های دینامیکی با این فرضیه که نانوذرات دارای حرکت تصادفی در سیال پایه هستند تعریف شده اند [4].

در این مطالعه، برای پیش بینی هدایت حرارتی نانوسیال، یک مدل استاتیکی و یک مدل دینامیکی و همچنین یک مدل تجربی که از بین روابط موجود به نتایج تجربی نزدیکتر است انتخاب و در نهایت همه این مدل ها با مدل ماکسول که اولین رابطه ی ارائه شده جهت پیش بینی خواص نانوسیال است مقایسه شده اند. همچنین برای پیش بینی لزجت دینامیکی نانوسیال نیز از روابط متعدد ارائه شده، یک مورد که نزدیکی بیشتری با داده های تجربی دارد انتخاب شده است.

در این مطالعه، جریان و انتقال حرارت نانوسیال عبوری از روی استوانه در جریان متقاطع و با استفاده از روش حجم محدود شبیه سازی شده است. در این مسئله نانوسیال آب/آلومینا و در محدوده کسر حجمی 1% تا 5% استفاده شده است. یکی از اهداف مهم مطالعه ی حاضر، یافتن تاثیر کسر حجمی نانوذرات و همچنین نوع مدل انتخابی برای خواص فیزیکی موثر نانوسیال، بر انتقال حرارت اطراف استوانه در اعداد رینولدز مختلف است.

## 2- فرمول بندی مسئله

### 2-1- معادلات حاکم و شرایط مرزی

انتقال حرارت از استوانه ی دما ثابت با فرض جریان دوبعدی نانوسیال غیرقابل تراکم عبوری از روی استوانه بررسی شده است. فرضیاتی که برای نانوذرات در نظر گرفته شده این است که نانوذرات دارای شکل و اندازه یکنواخت هستند و همچنین در یک حالت تعادل حرارتی قرار دارند و همراه با سیال پایه و با یک سرعت یکسان حرکت می کنند. از این رو، مدل تقریب سیال تک فاز در کار حاضر اتخاذ شده و معادلات بدون بعد حاکم شامل: پیوستگی، ممنتوم و انرژی در سیستم مختصات کارتزین به صورت زیر بیان شده است [4]:

جدول 1 آزمون استقلال از شبکه به ازای  $Re=30$  و  $Pr=3.79$

Table 1 Grid independence test at  $Re=30$  and  $Pr=3.79$

	تعداد نقاط	تعداد سلول	$C_d$	Nu
1	16189	26098	1.8077	5.1506
2	24437	38804	1.8084	5.1477
3	35903	56136	1.8093	5.1473

شبکه و همچنین مقادیر عدد استروهال، متوسط ضریب درگ و عدد ناسلت بر روی استوانه را در عدد رینولدز 30 نشان می‌دهد. در نهایت شبکه با تعداد سلول‌های 38804 به عنوان شبکه بهینه انتخاب شده است.

### 3- نتایج و بحث

تغییرات عدد ناسلت متوسط نسبی، ضریب درگ متوسط نسبی و ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط نسبی با عدد رینولدز، کسر حجمی نانوذرات و همچنین نوع مدل انتخابی برای پیش‌بینی خواص فیزیکی موثر نانوسیالات در شکل‌های زیر ارائه شده و مورد بحث قرار گرفته است.

"جدول 2" تغییرات نسبت عدد ناسلت متوسط نانوسیال به سیال پایه آب با عدد رینولدز را به ازای مدل‌های مختلف و در کسر حجمی‌های متفاوت بر روی سطح استوانه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است عدد ناسلت متوسط نسبی با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات کاهش می‌یابد. نسبت ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال به سیال پایه با افزایش  $Re$  و  $\phi$  افزایش می‌یابد، و همچنین هدایت حرارتی موثر نانوسیال سیال پایه نیز افزایش می‌یابد، این افزایش در  $k/k_0$  بیشتر از  $h/h_0$  است و در نتیجه نسبت  $\overline{Nu}/Nu_0$  در مجموع کاهش می‌یابد.

در "شکل 3" تغییرات نسبت ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال به سیال پایه با اعداد رینولدز و به ازای مدل‌ها و کسر حجمی‌های متفاوت آورده شده است. با توجه به شکل‌ها، هرگونه افزایش در کسر حجمی نانوذرات باعث بهبود هدایت حرارتی و در نتیجه افزایش انتقال حرارت می‌شود.

همچنین همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است، مدل‌های کورچیونه، لئونگ و همکاران، قنبرپور و همکاران و مدل ماکسول به ترتیب بیشترین افزایش در انتقال حرارت و برعکس، کمترین مقدار عدد ناسلت متوسط را برای نانوسیال آب/آلومینا پیش‌بینی می‌کنند.

با توجه به تغییرات اعداد ناسلت متوسط نسبی و ضریب انتقال حرارت نسبی که در ادامه خواهید دید، مشاهده می‌شود که عدد ناسلت معیار مناسبی برای سنجش افزایش انتقال حرارت در نانوسیالات محسوب نمی‌شود.

جدول 2 نسبت عدد ناسلت متوسط نانوسیال به آب

Table 2 Ratio of average Nusselt number of nanofluid to the water

Re	10	15	20	25	30
model					
$\phi = 0.01$					
Corcione [5]	0.915	0.914	0.9139	0.913	0.912
Leong [4]	0.955	0.954	0.954	0.953	0.953
Empirical [6]	0.984	0.984	0.984	0.983	0.982
Maxwell [4]	0.986	0.986	0.986	0.985	0.984
$\phi = 0.03$					
Corcione [5]	0.838	0.838	0.837	0.835	0.833
Leong [4]	0.875	0.874	0.873	0.872	0.870
Empirical [6]	0.951	0.950	0.950	0.948	0.946
Maxwell [4]	0.956	0.956	0.955	0.953	0.951
$\phi = 0.05$					
Corcione [5]	0.784	0.783	0.782	0.780	0.777
Leong [4]	0.807	0.806	0.804	0.802	0.799
Empirical [6]	0.916	0.915	0.913	0.911	0.908
Maxwell [4]	0.924	0.923	0.921	0.919	0.915

که  $\varepsilon_1 = 1 + \frac{h}{a}$ ،  $\varepsilon = 1 + \frac{h}{a}$  شعاع ذره،  $h$  ضخامت لایه بین سطحی و نشانگر لایه‌ی بین سطحی بین نانوذره و سیال پایه است.

رابطه دوم که از مدل دینامیکی انتخاب شده، توسط کورچیونه [5] به صورت زیر تقریب زده شده است.

$$\frac{k_{eff}}{k_{bf}} = 1 + 4.4Re_p^{0.4}Pr^{0.66}\left(\frac{T}{T_{fr}}\right)^{10}\left(\frac{k_p}{k_{bf}}\right)^{0.03}\phi^{0.66} \quad (9)$$

که  $T$  دمای نانوسیال و  $T_{fr}$  دمای نقطه انجماد آب است.

عدد رینولدز نانوذرات به صورت رابطه (10) تعریف شده است.

$$Re_p = 2\rho_{bf}k_bT/\pi\mu_f^2d_p \quad (10)$$

که  $k_b$  ثابت بولتزمن و برابر با  $1.3807 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  است. کسر حجمی در محدوده 9% تا 0.2% و دما بین 294 تا 324 کلوین است.

رابطه تجربی توسط قنبرپور و همکاران [6] برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیال آب/آلومینا به صورت رابطه (11) است.

$$\frac{k_{eff}}{k_{bf}} = 1 + 3.5\phi + 2.5\phi^2 \quad (11)$$

مدل آخر که به مدل ماکسول معروف است نیز هدایت حرارتی نانوسیالات را طبق رابطه زیر پیش‌بینی می‌کند [4].

$$\frac{k_{eff}}{k_{bf}} = \frac{k_p + 2k_{bf} + 2\phi(k_p - k_{bf})}{k_p + 2k_{bf} - \phi(k_p - k_{bf})} \quad (12)$$

### 2-3- روش حل عددی

معادلات حاکم به صورت عددی و به روش حجم محدود حل شده‌اند. گسسته-سازی ترم‌های جابجایی، پخش و کمیت‌های دیگر حاصل از معادلات حاکم با الگوریتم بالادست<sup>1</sup> مرتبه دوم انجام شده است. اتصال فشار-سرعت با الگوریتم سیمپل مدل‌سازی شده است. معیار همگرایی برای معادلات پیوستگی و ممنتوم  $10^{-4}$  و برای معادله انرژی  $10^{-6}$  انتخاب شده است.

### 2-4- صحت‌سنجی و استقلال از شبکه

برای ارزیابی عملکرد حل عددی، نتایج عددی به دست آمده با داده‌های عددی و آزمایشگاهی [7] و در محدوده وسیعی از اعداد رینولدز و اعداد پرانتل مقایسه شده است. این مقایسه در "شکل 2" نشان داده شده است.

به منظور نشان دادن استقلال از شبکه حل عددی، محاسبات به ازای سه نوع شبکه‌بندی مختلف انجام شده است. "جدول 1" تعداد نقاط و سلول‌های

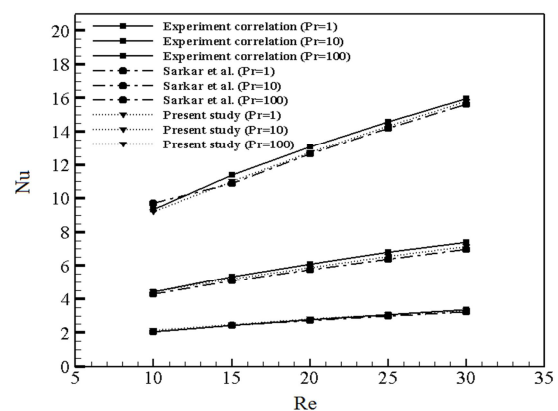


Fig. 2 Comparison of average Nusselt number with experimental and numerical results [7] at different values of  $Re$  and  $Pr$ .

شکل 2 مقایسه عدد ناسلت متوسط با نتایج تجربی و عددی به ازای مقادیر مختلف  $Pr$  و  $Re$

<sup>1</sup> upwind

همان طور که از نمودار مشخص است با افزایش عدد رینولدز ضریب درگ کاهش اما با افزایش کسر حجمی نانوذرات ضریب درگ افزایش می یابد. همچنین از نمودار مشخص است که مدل های مختلف تقریباً ضرایب درگ متوسط یکسانی را برای این نوع جریان پیش بینی می کنند.

جدول 3 تغییرات ضریب درگ متوسط نانوسیال

Table 3 Variation of average drag coefficient of nanofluid

Re model	10	15	20	25	30
$\phi = 0.01$					
Corcione [5]	3.098	2.526	2.206	1.995	1.843
Leong [4]	3.099	2.527	2.206	1.995	1.843
Emprical [6]	3.098	2.527	2.206	1.995	1.843
Maxwell [4]	3.098	2.527	2.206	1.995	1.843
$\phi = 0.03$					
Corcione [5]	3.302	2.680	2.333	2.105	1.941
Leong [4]	3.302	2.680	2.333	2.105	1.942
Emprical [6]	3.302	2.680	2.333	2.105	1.941
Maxwell [4]	3.302	2.680	2.333	2.104	1.942
$\phi = 0.05$					
Corcione [5]	3.616	2.916	2.527	2.273	2.091
Leong [4]	3.617	2.917	2.527	2.273	2.091
Emprical [6]	3.617	2.916	2.527	2.273	2.092
Maxwell [4]	3.617	2.916	2.527	2.273	2.092

با توجه نتایج عددی، در جریان عبوری نانوسیال آب/آلومینا از روی استوانه حرارت دیده مشاهده می شود که مدل دینامیکی به دلیل در نظر گرفتن حرکت براونی نانوذرات در سیال، افزایش انتقال حرارت بیشتری را نسبت به مدل استاتیکی و سایر مدل ها پیش بینی می کند. همچنین مشاهده شد که نسبت ضریب انتقال حرارت متوسط نانوسیال به آب با افزایش  $\phi$  به صورت محسوس افزایش اما با افزایش  $Re$ ، با شیب خیلی ملایمی کاهش یافته و این روند کاهشی با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می یابد.

#### 4- مراجع

- [1] B. Rajani, A. Kandasamy, S. Majumdar, Numerical simulation of laminar flow past a circular cylinder, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 33, No. 3, pp. 1228-1247, 2009.
- [2] S. Sarkar, S. Ganguly, G. Biswas, Mixed convective heat transfer of nanofluids past a circular cylinder in cross flow in unsteady regime, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 17, pp. 4783-4799, 2012.
- [3] M. Vegad, S. Satadia, P. Pradip, P. Chirag, P. Bhargav, Heat Transfer Characteristics of Low Reynolds Number Flow of Nanofluid Around a Heated Circular Cylinder, *Procedia Technology*, Vol. 14, pp. 348-356, //, 2014.
- [4] V. Bianco, O. Manca, S. Nardini, K. Vafai, Heat Transfer Enhancement with Nanofluids, pp. 73\_98, 2015.
- [5] M. Corcione, Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No. 1, pp. 789-793, 2011.
- [6] M. Ghanbarpour, E. B. Haghigi, R. Khodabandeh, Thermal properties and rheological behavior of water based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid as a heat transfer fluid, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 53, pp. 227-235, 2014.
- [7] S. Sarkar, A. Dalal, G. Biswas, Unsteady wake dynamics and heat transfer in forced and mixed convection past a circular cylinder in cross flow for high Prandtl numbers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 15, pp. 3536-3551, 2011.

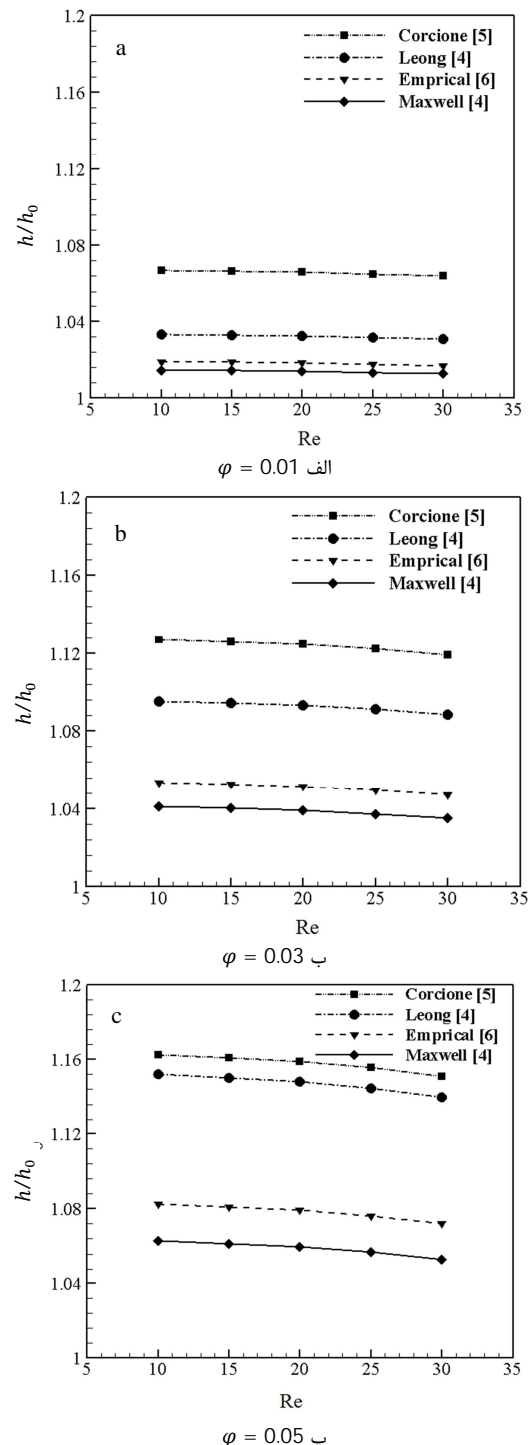


Fig. 3 Ratio of average heat transfer coefficient of nanofluid to the water, (a)  $\phi = 0.01$ , (b)  $\phi = 0.03$ , (c)  $\phi = 0.05$

شکل 3 نسبت ضریب انتقال حرارت متوسط نانوسیال به آب، (الف)  $\phi = 0.01$ ، (ب)  $\phi = 0.03$ ، (پ)  $\phi = 0.05$

در "جدول 3" تغییرات ضریب درگ با اعداد رینولدز و به ازای مدل های مختلف و با کسر حجمی های 1% تا 5% نشان داده شده است.