



مطالعه عددی انتقال حرارت جابجایی جریان نانوسیال از روی استوانه مدور با نوسان زاویه‌ای

بنفشه نادری¹، محمد مهدی هیهات^{2*}

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

* تهران، صندوق پستی 14115-143، mmheyhat@modares.ac.ir

چکیده

جریان حول استوانه در زمینه‌های مختلف مهندسی نمود دارد. در این مقاله جریان آرام، دو بعدی، تراکم‌ناپذیر و لزج نانوسیال آب-اکسید مس حول استوانه مدور تحت نوسان زاویه‌ای در شرایط ناپایا در اعداد رینولدز 100، 150 و 200 به طور عددی به ازای دامنه‌های نوسان $\theta_A = \pi/4, \pi/2$ ، نسبت فرکانس‌های مختلف نوسان $F=0.5, 1, 2$ و کسرهای حجمی نانوذرات در محدوده $0 \leq \varphi \leq 0.03$ شبیه‌سازی شده است. معادلات حاکم شامل پیوستگی، مومنتم و انرژی با استفاده از روش حجم‌محدود در یک شبکه‌بندی ترکیبی به طور عددی حل شده‌اند. ضریب هدایت‌حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی موثر نانوسیال به کمک مدل تجربی کورچیونه تخمین زده شده است. اثرات کسر حجمی نانوذرات و پارامترهای نوسان بر ضریب انتقال حرارت متوسط بررسی شد و مشاهده شد که در محدوده قفل‌شدگی گردابه‌ها، مقدار ضریب انتقال حرارت به طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. هدف اصلی مقاله، تعیین ارجحیت دو مکانیزم افزایشی انتقال حرارت شامل افزودن نانوذرات به سیال پایه و اعمال نوسان بر استوانه است. ارزیابی این دو مکانیزم حاکی از اینست که استفاده از نانوسیال در مقایسه با اعمال نوسان زاویه‌ای به استوانه، سبب افزایش بیشتر نرخ انتقال حرارت می‌شود. نتایج، نشان می‌دهد که مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت در اثر اعمال نوسان زاویه‌ای در $\theta_A = \pi/4$ و $F=1$ نسبت به استوانه ساکن در جریان سیال آب بین 4.25 تا 15.83 درصد، مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت در اثر افزودن نانوذرات اکسید مس در $\varphi = 0.03$ به سیال پایه در استوانه ساکن، بین 20.49 تا 31.26 درصد و مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت در اثر ترکیب دو مکانیزم بین 70.76 تا 113.56 درصد است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 17 بهمن 1396

پذیرش: 21 اسفند 1396

ارائه در سایت: 21 اردیبهشت 1397

کلید واژگان:

نانوسیال

استوانه با نوسان زاویه‌ای

افزایش انتقال حرارت

ضریب انتقال حرارت متوسط

Numerical study of convective heat transfer of nanofluid flow over an angular oscillating circular cylinder

Banafshe Naderi, Mohammad Mahdi Heyhat *

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

* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, mmheyhat@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 06 February 2018

Accepted 12 March 2018

Available Online 11 May 2018

Keywords:

Nanofluid

Angular Oscillating Cylinder

Heat Transfer Enhancement

Average Heat Transfer Coefficient

ABSTRACT

Fluid flow over a cylinder is appeared in differenet engineering fields. In this article, laminar, two-dimensional, incompressible and viscous CuO-water nanofluid flow around a circular cylinder with angular oscillation in unsteady regime at Reynolds numbers of 100,150 and 200 in amplitudes of $\theta_A = \pi/4, \pi/2$ and different oscillation frequency ratios of $F=0.5, 1, 2$ and volume fractions of nanoparticles in the range of $0 \leq \varphi \leq 0.03$ is simulated numerically. Governing equations include continuity, momentum and energy equations have been solved numerically for a combined grid via finite volume method. Effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluid were estimated by Corcione empirical model. The effects of volume fraction of nanoparticles and oscillation parameters on the average heat transfer coefficient were investigated and concluded that at vortex Lock-on region, the amount of heat transfer coefficient increased significantly. The main target of this article is to determine the preference of two mechanisms of heat transfer enhancement include adding nanoparticles to the base fluid and applying oscillation to the cylinder surface. Evaluation of this two mechanisms indicates that using nanofluid in compared with applying rotational oscillation to the cylinder, leads to more heat transfer enhancement rate. Results show that heat transfer coefficient enhancement due to rotational oscillation of the cylinder at $\theta_A = \pi/4$ and $F=1$ compared with the stationary cylinder in water flow is between 4.25 and 15.83%. Moreover, the amount of heat transfer enhancement of nanofluid at $\varphi = 0.03$ compared with the base fluid in stationary cylinder is between 20.49 and 31.26%.

همانند مهندسی عمران و سازه‌های دریایی، طراحی میدل‌های حرارتی،

میله‌های سوختی راکتورهای هسته‌ای و کابل‌های فلزی پل‌های معلق کاربرد

1- مقدمه

جریان و انتقال حرارت عبوری از استوانه مدور در زمینه‌های مختلف مهندسی

دارد [1].

استوانه مدور همواره یک مدل مفید برای مطالعه جنبه‌های مهم انتقال-حرارت و هیدرودینامیک مرتبط با جریان‌های ناپایا بوده است. در جریان عبوری از استوانه مدور ساکن، با افزایش مقدار عدد رینولدز جریان تا حدود 40، گردابه‌ها به صورت پریودیک از سطح استوانه ریزش می‌کنند و در پائین دست جریان سبب ایجاد خیابان گردابه‌ای فون کارمن¹ می‌شوند. این فرآیند ریزش گردابه سبب رفتار ناپایای جریان در نزدیکی سطح استوانه و افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود [2].

افزایش انتقال حرارت تحت فرآیند طبیعی ریزش گردابه‌ها، علاقه محققان را برای مطالعه روش‌های افزایش انتقال حرارت جابجایی با بهره‌گیری از تحریک‌های ناپایا² به خود جلب کرده است. یکی از این روش‌ها، اعمال نوسانات اجباری به استوانه است که خود شامل سه نوع نوسان طولی، عرضی و زاویه‌ای است. نوسان حول محور استوانه، نوسان زاویه‌ای نامیده می‌شود. در نوسان زاویه‌ای، هنگامی که فرکانس ریزش گردابه‌ها از استوانه هماهنگ با فرکانس نوسانات اعمالی به استوانه باشد، پدیده قفل‌شدگی گردابه‌ها³ روی می‌دهد [2].

برهم‌کنش لایه مرزی، لایه‌های برشی جدا شده از سطح استوانه و ویک⁴، منجر به تولید الگوهای پیچیده جریان می‌شوند. ویژگی‌های آیرودینامیکی مانند ضرایب درگ و لیفت وابسته به پدیده ریزش گردابه‌ها هستند. به‌طور مشخص در ناحیه قفل‌شدگی، تشکیل و ریزش گردابه‌ها با حرکت نوسانی استوانه کاملاً هماهنگ می‌شود. بنابراین ساختار جریان ویک و ویژگی‌های ریزش گردابه می‌توانند توسط نوسان استوانه کنترل شوند [3].

تاکنون جریان و انتقال حرارت عبوری از استوانه نوسانی به طور عددی و تجربی توسط تعدادی از محققان بررسی شده است. در سال 2002، چوی و همکاران [4] به طور عددی جریان آرام ناپایا عبوری از استوانه مدور تحت نوسان زاویه‌ای را در عدد رینولدز ثابت 100 و $0.02 \leq St_f \leq 0.8$ و $0.2 \leq \Omega \leq 2.5$ بررسی کردند که Ω به ترتیب بیشینه سرعت چرخشی و فرکانس نوسان اعمالی هستند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که نوسان زاویه‌ای استوانه اثرات مهمی بر جریان دارد و با افزایش سرعت چرخش، محدوده فرکانس‌های قفل‌شدگی بزرگتر می‌شوند. همچنین آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که ضریب درگ متوسط و دامنه نوسانات ضریب لیفت نزدیک مرز بین ناحیه قفل‌شدگی و خارج از آن، به طور موضعی کاهش می‌یابند.

در سال 2006، نویری و نادران [5] الگوهای جریان متقاطع اطراف استوانه با نوسان طولی و عرضی را مطالعه کردند و اثرات نوسان را بر ضریب درگ، میدان جریان، پدیده قفل‌شدگی گردابه‌ها و الگوهای ناحیه ویک بررسی کردند. بر اساس مشاهدات آن‌ها و مقایسه با نتایج تجربی تا عدد رینولدز 300، تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای بین شبیه‌سازی‌های دو بعدی و داده‌های تجربی وجود ندارد و از آن به بعد، اثرات سه بعدی شدن بروز پیدا می‌کند. آن‌ها همچنین اثرات پارامترهای نوسان را بر ضریب درگ متوسط مطالعه کردند.

در سال 2007، دنگ جیان و همکاران [6] جریان سه بعدی حول استوانه مدور با نوسان زاویه‌ای را به طور عددی مطالعه کردند. آن‌ها محاسبات خود را در عدد رینولدز 260 انجام دادند که به ازاء آن ویک پشت استوانه به حالت سه بعدی تبدیل می‌شود. آن‌ها همچنین اثرات دامنه چرخش را بر روی ناحیه ویک بررسی کردند و مشاهده کردند که چرخش در دامنه‌های بالا، سبب

تبدیل ناحیه ویک به حالت دو بعدی می‌گردد و مقادیر ضرایب درگ و لیفت برای استوانه با نوسان زاویه‌ای، بیشتر از مقدار آن برای استوانه ساکن است. در سال 2008، سنگ لی و جانگ لی [7] ویک پشت استوانه مدور تحت نوسان زاویه‌ای را به طور تجربی در محدوده $0 \leq F_R \leq 1.6$ و دامنه نوسان $\theta_A = 30^\circ$ و عدد رینولدز ثابت $Re = 4.14 \times 10^3$ بررسی کردند. ویک پشت استوانه براساس نسبت فرکانس بدون‌بعد نوسان، به سه ناحیه خارج از محدوده قفل‌شدگی، ناحیه انتقال و محدوده قفل‌شدگی گردابه‌ها تقسیم‌بندی می‌شود که در هر ناحیه، الگوهای جریان کاملاً متفاوت هستند. مشاهدات آن‌ها نشان می‌دهد که در نسبت فرکانس نوسان $F_R = 1.6$ به دلیل بالا بودن فرکانس نوسان استوانه، گردابه‌های بزرگ مقیاس⁵ کوچکتر می‌شوند، همچنین آن‌ها مشاهده کردند که در این ناحیه، تعاملات بین گردابه‌هایی که از دو سمت استوانه ریزش می‌کنند به اندازه کافی قوی نبوده است.

در سال 2009، غضنفریان و نویری [8] به طور عددی انتقال حرارت جابجایی از استوانه مدور چرخشی با نوسانات عرضی را در اعداد رینولدز 100 و 200 با سرعت چرخشی در محدوده $0 \leq \alpha \leq 2.5$ در دامنه‌ها و فرکانس‌های مختلف شبیه‌سازی کردند. آن‌ها همچنین اثرات نوسان و چرخش استوانه را بر میدان جریان و دما، قفل‌شدگی گردابه‌ها، عدد ناسلت متوسط و الگوهای ریزش گردابه بررسی کردند و با در نظر گرفتن شرایط مرزی دما ثابت و شارحرارتی ثابت بر روی سطح استوانه، نتیجه گرفتند که مشابه با استوانه ساکن، هنگامی که سرعت چرخشی از حد بحرانی آن بیشتر شود، ریزش گردابه‌ها سرکوب می‌شود.

در سال 2013، کومار و همکاران [9] به طور تجربی جریان عبوری از استوانه مدور تحت نوسان زاویه‌ای حول محور استوانه را در عدد رینولدز ثابت 185 و دامنه نوسان $\theta_A \leq \pi$ و نسبت فرکانس بدون‌بعد نوسان در محدوده $0 \leq F \leq 5$ مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که ساختارهای ویک پشت استوانه مرتبط با طیف سرعت هستند. آن‌ها همچنین مشاهده کردند که پدیده قفل‌شدگی گردابه‌ها در محدوده فرکانسی رخ می‌دهد که فقط وابسته به دامنه نوسان نیست بلکه به موقعیت پائین‌دست استوانه نیز بستگی دارد.

در سال 2013، دو و دالتون [10] جریان مغشوش عبوری از استوانه مدور تحت نوسان زاویه‌ای را به طور عددی در حالت دو بعدی در عدد رینولدز ثابت 150 و در حالت سه بعدی در عدد رینولدز ثابت 1.5×10^4 در دامنه‌های نوسان $\Omega = 0.5, 2$ و به ازاء محدوده وسیعی از فرکانس‌های نوسان شبیه‌سازی کردند. به منظور مطالعه ویک جریان آشفته حول استوانه، از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ⁶ استفاده کردند. آن‌ها مشاهده کردند که ضریب درگ متوسط در محدوده قفل‌شدگی گردابه‌ها، به طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یافته و سپس به طور پیوسته کاهش یافته می‌یابد.

در سال 2014، سلاپان و پوتباتوم [11] تشکیل ویک و انتقال حرارت از استوانه مدور تحت نوسان زاویه‌ای در جریان متقاطع را به طور عددی و در عدد رینولدز ثابت 750 مطالعه کردند. شبیه‌سازی‌های آن‌ها به ازاء $0.09 \leq \theta_{pp} \leq 2.09$ و $0.7 \leq F_R \leq 3.16$ بوده است، به گونه‌ای که θ_{pp} نشان‌دهنده دامنه نوسان از یک قله به قله‌ای دیگر⁷ است و F_R بیانگر نسبت فرکانس نوسان اعمالی به استوانه به فرکانس طبیعی ریزش گردابه‌ها از سطح استوانه است. آن‌ها به منظور مشاهده ساختار ویک، از سرعت‌سنجی تصویری

⁵ Large-Scale Vortices

⁶ Large Eddy Simulation (LES)

⁷ Peak to Peak Oscillation Amplitude

¹ Von Karman Vortex Street

² Unsteady Excitations

³ Lock-on Phenomenon

⁴ Wake

بدون بعد نوسان به صورت $F = f/f_0$ تعریف می‌شود به طوری که f بیانگر فرکانس نوسان اعمالی به استوانه و f_0 فرکانس ریزش گردابه‌ها از استوانه ساکن است. یکی از اهداف مقاله حاضر، یافتن اثرات کسر حجمی نانوذرات و پارامترهای نوسان، بر ویژگی‌های انتقال حرارت اطراف استوانه است. در ادامه منحنی چگالی طیف توان در محدوده قفل‌شدگی گردابه‌ها و خارج از آن بررسی شد. همچنین دو مکانیسم افزایش انتقال حرارت شامل افزودن نانوذرات به سیال پایه و اعمال نوسان زاویه‌ای به استوانه و ترکیب آن‌ها با هم، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است.

2- فرمول‌بندی مسئله

2-1- مسئله مورد بررسی و معادلات حاکم

هندسه مورد استفاده در این مقاله، شامل یک استوانه مدور است که بین دو مرز افقی بالا و پائین با شرط مرزی لغزش قرار گرفته است. استوانه تحت نوسان زاویه‌ای حول تنها محور خود قرار دارد. شتاب جاذبه در امتداد محور z (محور استوانه) فرض شده است که از اثرات آن صرف‌نظر می‌شود. جریان ناپایای عبوری از استوانه نوسانی را از این جهت که نسبت طول به قطر استوانه زیاد است می‌توان به صورت دو بعدی در نظر گرفت و می‌توان از تغییرات در امتداد محور z صرف‌نظر کرد. همانطور که در "شکل 1" نشان داده شده است سرعت جریان آزاد U_∞ در جهت مثبت محور x است. فاصله ورودی تا مرکز استوانه $x_H = 10D$ و فاصله مرکز استوانه تا خروجی $x_D = 20D$ است و طول کانال $L = 30D$ است (قطر استوانه). مرزهای بالا و پائین نسبت به مرکز استوانه دارای فواصل یکسانی هستند و فاصله بین آن‌ها $H=20D$ است. از شرط مرزی دما ثابت بر روی سطح استوانه استفاده شده است. مرزهای بالا و پائین متقارن و بدون اصطکاک فرض شده‌اند و شارحرارتی آن‌ها صفر است. دو مرز ورودی و خروجی به اندازه کافی دور از استوانه واقع شده‌اند تا تأثیری بر جریان اطراف استوانه نداشته باشند. فرض شده است که نانوذرات دارای شکل و اندازه یکسان هستند و با سرعت‌های یکسان همراه با سیال پایه در حال حرکت هستند. همچنین فرض شده است که نانوذرات و سیال پایه در حال تعادل حرارتی هستند و از لغزش بین آن‌ها صرف‌نظر شده است. خواص ترموفیزیکی نانوسیال به صورت خواص وابسته به دما⁴ در نظر گرفته شده است و برای اعمال آن‌ها از توابع تعریف شده توسط کاربر⁵ استفاده شده است. این توابع خواص، به زبان برنامه نویسی C نوشته شده‌اند. خواص نانوذرات اکسیدمس به صورت ثابت در نظر گرفته شده است که مقادیر آن در جدول 1 ارائه شده است.

جهت اعمال نوسان زاویه‌ای به استوانه، از رابطه (1) استفاده شده است:

$$\theta = -\theta_A \times \cos(2\pi f t) \quad (1)$$

در رابطه (1)، θ جابجایی زاویه‌ای و t زمان نوسان است و θ_A و f به ترتیب دامنه و فرکانس نوسان هستند. برای محاسبه سرعت زاویه‌ای، از رابطه (1) نسبت به زمان مشتق گرفته می‌شود و رابطه (2) حاصل می‌شود:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \theta_A \times 2\pi f \times \sin(2\pi f t) \quad (2)$$

معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، ناویر-استوکس و انرژی در دستگاه مختصات دکارتی برای جریان دو بعدی، تراکم‌ناپذیر و لزج حول استوانه مدور تحت نوسان زاویه‌ای است. از آنجا که مسئله مورد نظر دو بعدی است و از اثرات نیروهای حجمی مانند ثقل صرف‌نظر شده است، از اینرو معادلات حاکم

دیجیتال¹ استفاده کردند و مشاهده کردند که در جریان حول استوانه مدور حرارت دیده، اعمال نوسان به استوانه، نرخ انتقال حرارت جابجایی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که سرعت مماسی استوانه²، سبب تغییر نرخ انتقال حرارت از استوانه می‌شود.

در سال 2015، آلیس روزا داسیلوا و همکاران [12] جریان دو بعدی حول استوانه مدور با نوسان زاویه‌ای را به طور عددی در عدد رینولدز ثابت 1000 و به ازاء سه دامنه نوسان $A = 1, 2, 3$ و فرکانس نوسان اعمالی به استوانه در محدوده $2 \leq f \leq 6$ شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که ساختار جریان در ناحیه ویک، به شدت تحت تأثیر فرکانس نوسان است. همچنین آن‌ها اثرات پارامترهای نوسان را بر روی ضرایب لیفت و درگ و توزیع فشار در اطراف استوانه بررسی کردند و مشاهده کردند که توزیع فشار حول استوانه، تحت تأثیر فرکانس نوسان است که خود نیروی درگ حول استوانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به بیان دیگر با اعمال نوسان زاویه‌ای به استوانه، می‌توان نیروی درگ حول استوانه را کنترل نمود.

در سال 2017، میتال و همکاران [13] به طور عددی جریان دو بعدی ناپایا حول استوانه مدور تحت نوسان زاویه‌ای را در عدد رینولدز ثابت 200 شبیه‌سازی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که میدان جریان تحت تأثیر عدد رینولدز، مقدار ماکزیمم سرعت زاویه‌ای (α_m) و نسبت فرکانس بدون بعد نوسان (F_R) است، به گونه‌ای که در مطالعه آن‌ها مقادیر این پارامترها $0.5 \leq F_R \leq 3$ و $\alpha_m \leq 6$ بوده است. آن‌ها همچنین حالت‌های تشکیل گردابه و پدیده قفل‌شدگی گردابه‌ها را در پشت استوانه مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که به ازاء مقادیر بالای α_m ، مقدار ضریب درگ به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

در سال 2017، نیک و همکاران [14] به طور عددی جریان دوبعدی و تراکم‌ناپذیر عبوری از استوانه بیضوی را به ازاء سرعت‌های چرخش بدون بعد مختلف 0.5، 1 و 1.5 مطالعه کردند. در مطالعات آن‌ها، عدد رینولدز بر اساس محیط استوانه بیضوی ثابت و برابر 100 فرض شده است. آن‌ها همچنین الگوهای جریان حول استوانه بیضوی را مشاهده کردند و پس از مقایسه با حالت جریان حول استوانه مدور ساکن، نتیجه‌گیری کردند که الگوهای جریان بسیار متفاوت بوده است. بعلاوه تعاملات بین استوانه و گردابه‌هایی که از سطح استوانه ریزش می‌کنند، سبب ایجاد گردابه‌های شناور³ می‌شود. آن‌ها همچنین پارامترهای موثر بر تشکیل گردابه‌های شناور و مکانیسم حاکم بر آن‌ها را تحلیل کردند.

در مقالاتی که در بالا به آن‌ها اشاره شد از سیالات رایج مانند آب و هوا استفاده شده است که ضریب هدایت حرارتی پائینی دارند. نانوسیالات کلوئیدهایی شامل سیال پایه و نانوذرات (1-100 nm) هستند. از آنجا که ضریب هدایت حرارتی ذرات جامد بیشتر از سیالات است، انتظار می‌رود افزودن این ذرات جامد موجب افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال پایه گردد. با بررسی پیشینه پژوهش مشاهده گردید که تاکنون جریان نانوسیال حول استوانه با نوسان زاویه‌ای مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این مقاله جریان دو بعدی، آرام، ناپایا، لزج و تراکم‌ناپذیر نانوسیال آب-اکسید مس حول استوانه با نوسان زاویه‌ای به طور عددی در اعداد رینولدز متوسط و در محدوده کسرهای حجمی $0 \leq \varphi \leq 0.03$ و پارامترهای نوسان در محدوده $F=0.5, 1, 2$ و $\theta_A = \pi/4, \pi/2$

⁴ Temperature Dependent
⁵ User Defined Function (UDF)

¹ Digital Image Velocimetry (DIV)

² Cylinder Tangential Velocity

³ Hovering Vortex

جدول 1 خواص ترموفیزیکی نانوذرات اکسید مس [15]

Table 1 Thermophysical properties of CuO nanoparticles [15]

نانوذره	قطر نانوذره (nm)	هدایت حرارتی (W/m K)	ظرفیت حرارتی (J/kg K)	دانسیته (kg/m ³)
CuO	33	76.5	535.6	6320

به شکل زیر ساده می‌شوند:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

2-2- خواص ترموفیزیکی نانوسیال

انتخاب مدلی با دقت بالا جهت پیش‌بینی ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی موثر نانوسیال امر مهمی است. از مدل کورچیونه [16] که نسبت به مدل‌های ارائه شده توسط سایر محققین از جامعیت بیشتری برخوردار است و نسبت به داده‌های تجربی موجود با درصد خطای کم، دارای دقت خوب و قابل قبولی است جهت محاسبه ضریب هدایت حرارتی و لزجت دینامیکی موثر نانوسیال استفاده شده است که روابط آن در ادامه ارائه شده است:

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = 1 + 4.4 \text{Re}^{0.4} \text{Pr}^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}} \right)^{10} \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^{0.03} \varphi^{0.66} \quad (7)$$

در رابطه (7)، عدد رینولدز نانوذره و عدد پرانتل سیال پایه، T دمای نانوسیال، T_{fr} دمای انجماد آب، k_p ضریب هدایت حرارتی نانوذره و φ کسر حجمی نانوذرات معلق است. عدد رینولدز نانوذرات به صورت رابطه (8) تعریف می‌شود:

$$\text{Re} = \frac{\rho_f u_B d_p}{\mu_f} \quad (8)$$

در رابطه (8)، μ_f, ρ_f به ترتیب دانسیته و ویسکوزیته دینامیکی سیال پایه هستند و u_B, d_p به ترتیب قطر نانوذره و سرعت حرکت براونی نانوذرات هستند. سرعت حرکت براونی نانوذرات به صورت رابطه (9) تعریف می‌شود [16]:

$$u_B = \frac{d_p}{\tau_D} \quad (9)$$

در رابطه (9)، τ_D بیانگر زمان لازم برای پویش فاصله بین نانوذرات است که براساس یافته‌های کلیسنکی و همکاران [17] به صورت رابطه (10) بیان می‌شود:

$$\tau_D = \frac{d_p^2}{6E} \quad (10)$$

در رابطه (10)، E ضریب انتشار انیشتین است که به صورت رابطه (11) محاسبه می‌شود:

$$E = \frac{k_b T}{3\pi \mu_f d_p} \quad (11)$$

با جایگذاری رابطه (11) در رابطه (10)، زمان لازم برای پویش فاصله بین نانوذرات به صورت رابطه (12) قابل محاسبه است:

$$\tau_D = \frac{\pi \mu_f d_p^3}{2k_b T} \quad (12)$$

در رابطه (12)، k_b ثابت بولتزمن است و مقدار آن برابر $1.38066 \times 10^{-23} \text{ (J K}^{-1}\text{)}$ است. با جایگذاری رابطه (12) در رابطه (9)، سرعت حرکت براونی نانوذرات به صورت رابطه (13) محاسبه می‌شود [16]:

$$u_B = \frac{2 k_b T}{\pi \mu_f d_p^2} \quad (13)$$

پس از جایگذاری رابطه (13) در رابطه (8)، عدد رینولدز نانوذره به رابطه (14) تبدیل می‌شود [17]:

$$\text{Re} = \frac{2 \rho_f k_b T}{\pi \mu_f^2 d_p} \quad (14)$$

در ادامه، رابطه کورچیونه [16] جهت پیش‌بینی لزجت دینامیکی موثر نانوسیال ارائه شده است:

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_f} = \frac{1}{1 - 34.87 \left(\frac{d_p}{d_f} \right)^{-0.3} \varphi^{1.03}} \quad (15)$$

در رابطه (15)، d_p قطر نانوذره و d_f قطر معادل مولکول‌های سیال پایه است که به صورت رابطه (16) تعریف می‌شود [16]:

$$d_f = 0.1 \left(\frac{6M}{N\pi\rho_{f0}} \right)^{1/3} \quad (16)$$

در رابطه (16)، M جرم مولکولی سیال پایه و N عدد آووگادرو است و مقدار آن برابر $6.022 \times 10^{23} \text{ (mol}^{-1}\text{)}$ است و ρ_{f0} دانسیته سیال پایه است که در دمای $T_0 = 293 \text{ (K)}$ محاسبه شده است.

جهت محاسبه دانسیته موثر نانوسیال، از مدل مخلوط ارائه شده توسط پک و چو [18] استفاده شده است که در رابطه (17) ارائه شده است:

$$\rho_{eff} = \varphi \rho_p + (1 - \varphi) \rho_f \quad (17)$$

در رابطه (17)، φ نشانگر کسر حجمی نانوذرات، ρ_p و ρ_f به ترتیب نشان دهنده دانسیته سیال پایه و نانوذرات هستند.

جهت محاسبه ظرفیت حرارتی موثر نانوسیال از مدل ارائه شده توسط ژوان و روتزل [19] استفاده شده است که در رابطه (18) ارائه شده است:

$$(\rho c_p)_{eff} = \varphi (\rho c_p)_p + (1 - \varphi) (\rho c_p)_f \quad (18)$$

در رابطه (18)، φ بیانگر کسر حجمی نانوذرات است و $(c_p)_p$ و $(c_p)_f$ به ترتیب ظرفیت حرارتی نانوذرات و سیال پایه هستند.

3-2- روش حل عددی

در این مقاله جهت بررسی انتقال حرارت جابجایی جریان ناپایای نانوسیال حول استوانه با نوسان زاویه‌ای، از نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است. جهت گسسته‌سازی معادلات حاکم از روش حجم محدود استفاده شده است که در

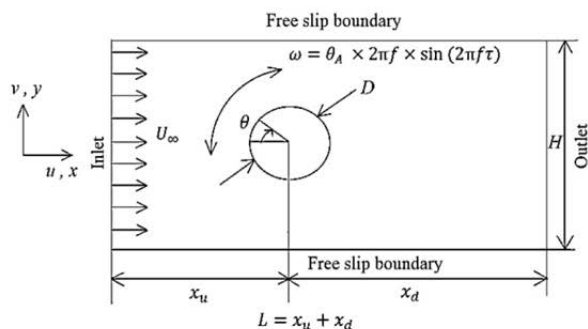


Fig. 1 Schematic of the problem geometry

شکل 1 شماتیک هندسه مسئله

شده‌اند. در نهایت عدد کورانت 0.7 به عنوان عدد کورانت بهینه جهت ادامه روند شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است.

5-2- صحت‌سنجی نتایج

از آنجا که جریان نانوسیال حول استوانه با نوسان زاویه‌ای تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است، به منظور صحت‌سنجی عدد ناسلت در جریان حول استوانه با نوسان زاویه‌ای، مورد خاصی از جریان هوا در پرانتل 0.7 و در عدد رینولدز 100 و به ازای دامنه و نسبت فرکانس‌های مختلف نوسان شبیه‌سازی شده و با نتایج محفوظ و بدر [2] مقایسه شده است و مقدار قدر مطلق درصد خطا نیز محاسبه شده است. همان‌طور که در جدول 4 مشاهده می‌شود، نتایج حاصل تطابق خوبی با نتایج محفوظ و بدر دارند و قدر مطلق درصد خطا در هر سه مورد کمتر از 1٪ است.

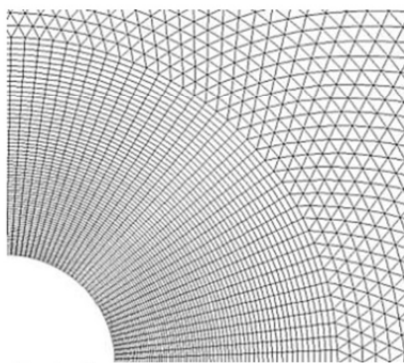


Fig. 2 Combined grid of the problem geometry

شکل 2 شبکه‌بندی ترکیبی هندسه مسئله

جدول 2 آزمون استقلال از شبکه به ازاء $Re = 100$ و $Pr = 4.63$ برای جریان ناپایایی آب حول استوانه

Table 2 Grid independence test at $Re = 100$, $Pr = 4.63$ for unsteady water flow over a cylinder

شماره	شماره	$\overline{C_{l,rms}}$	St	$\overline{C_d}$	\overline{Nu}	شماره
1	18167	0.237	0.169	1.39	11.12	1
2	24244	0.242	0.169	1.402	10.93	2
3	38208	0.242	0.169	1.41	10.86	3

جدول 3 آزمون استقلال از گام زمانی برای جریان آب حول استوانه با نوسان زاویه‌ای

به ازاء $Re = 200$, $Pr = 4.63$, $\theta_A = \pi/8$ و $F=1$

Table 3 Time step size independence test for water flow over a cylinder with angular oscillation at $Re = 200$, $Pr = 4.63$, $\theta_A = \pi/8$ and $F=1$

عدد کورانت	\overline{Nu}	$\overline{C_{l,rms}}$	$\overline{C_d}$
0.3	16.52	1.0122	1.764
0.5	16.41	1.0119	1.759
0.7	16.39	1.0118	1.7582

جدول 4 صحت‌سنجی عدد ناسلت در جریان هوا حول استوانه با نوسان زاویه‌ای در

$Pr = 0.7$

Table 4 Validation of Nusselt number for air flow around a cylinder with angular oscillation at $Pr = 0.7$

Re	θ_A	F	\overline{Nu}	محمفوظ و بدر [2]	قدر مطلق درصد خطا
100	$\pi/8$	1	5.3964	5.4	0.067 %
100	$\pi/4$	2	5.282	5.31	0.528 %
100	$\pi/2$	1.5	5.481	5.43	0.94 %

آن نرخ جرم، مومنتم و انرژی که به حجم کنترل وارد یا خارج می‌شود، محاسبه می‌شود. همچنین همبستگی¹ بین معادلات سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم پیزو² در حالت ناپایا برقرار شده است.

شبکه‌بندی مورد استفاده در این پژوهش، شبکه‌بندی ترکیبی است، از آنجا که شبکه باسازمان³ در نواحی لایه‌مرزی دارای دقت بالاتری است و به دلیل سرعت بالای همگرا شدن این نوع شبکه، در نواحی نزدیک به استوانه از شبکه‌بندی باسازمان و در نواحی دورتر از شبکه‌بندی بی‌سازمان⁴ استفاده شده است. شبکه‌بندی هندسه مسئله در "شکل 2" نشان داده شده است. به منظور اعمال نوسان زاویه‌ای به استوانه در نرم‌افزار فلونت، از روش شبکه‌بندی متحرک⁵ استفاده شده است.

حال به بررسی روش محاسبه ضریب انتقال حرارت متوسط می‌پردازیم. عدد ناسلت موضعی بر روی سطح استوانه به‌صورت رابطه (19) محاسبه می‌شود [20]:

$$Nu_{\theta}(\theta, t) = \frac{-D}{T_w - T_{\infty}} \frac{\partial T}{\partial n} \quad (19)$$

در رابطه (19)، D بیانگر قطر استوانه، T_w دمای سطح استوانه، T_{∞} دمای سیال و n در جهت عمود بر سطح استوانه است. متوسط مکانی عدد ناسلت نیز با انتگرال‌گیری بر روی سطح استوانه و به‌صورت رابطه (20) بدست می‌آید [20]:

$$Nu(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} Nu_{\theta} d\theta \quad (20)$$

متوسط مکانی و زمانی عدد ناسلت نیز با انتگرال‌گیری از متوسط مکانی عدد ناسلت در یک دوره کامل نوسان استوانه، به‌صورت رابطه (21) تعریف می‌شود:

$$\overline{Nu} = \frac{1}{T} \int_0^T Nu dt \quad (21)$$

بنابراین ضریب انتقال حرارت متوسط برحسب عدد ناسلت متوسط به‌صورت رابطه (22) قابل محاسبه است:

$$h_{ave} = \frac{\overline{Nu} \times k}{D} \quad (22)$$

4-2- بررسی استقلال از شبکه و زمان

جهت بررسی استقلال نتایج از ابعاد شبکه، سه شبکه با ابعاد متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته است به طوری که شبکه اول درشت، شبکه دوم استاندارد و شبکه سوم ریز بوده است که نتایج آن در جدول 2 ارائه شده است. استقلال از شبکه در حالت جریان آرام سیال آب اطراف استوانه در حالت ناپایا در عدد رینولدز 100 و عدد پرانتل 4.63 بررسی شده است. برای مقایسه نتایج از متوسط عدد ناسلت، متوسط ضرایب لیفت و درگ و عدد استروهال استفاده شده است. همان‌طور که در جدول 2 مشاهده می‌شود، با ریزتر کردن ابعاد شبکه تغییر قابل‌ملاحظه‌ای در نتایج حاصل نمی‌شود. در نهایت شبکه 2 با تعداد کل سلول‌های 43108 به عنوان شبکه بهینه انتخاب شده است.

در جدول 3 استقلال جواب‌ها از گام زمانی در جریان سیال آب حول استوانه با نوسان زاویه‌ای در دامنه و نسبت فرکانس بدون بعد نوسان به ترتیب برابر با $\pi/8$ و 1 و در حالت ناپایا به ازای سه مقدار عدد کورانت 0.3، 0.5 و 0.7 ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار متوسط ضرایب لیفت و درگ و مقدار متوسط عدد ناسلت در عدد رینولدز 200 و پرانتل 4.63 به ازاء سه عدد کورانت مذکور محاسبه شده و با هم مقایسه

¹ Coupling
² PISO Algorithm
³ Structured Grid
⁴ Un-structured Grid
⁵ Dynamic Mesh Method

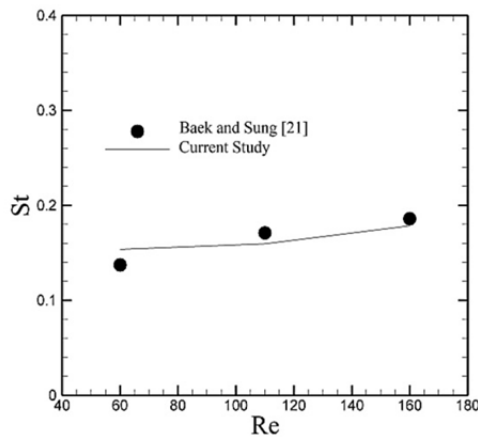


Fig.3 Variation of Strouhal number versus Reynolds number and comparison with numerical results

شکل 3 تغییرات عدد استروهل بر حسب عدد رینولدز و مقایسه با نتایج عددی

ناحیه، این گونه نیست و از یک دوره زمانی به دوره زمانی بعد، الگوی ریزش گردابه‌ها تغییر می‌کند. به علاوه در "شکل 6" که در آن پدیده قفل‌شدگی گردابه‌ها رخ می‌دهد، نرخ ریزش گردابه‌ها از پشت استوانه افزایش یافته است که خود سبب افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. در حالی که در خارج از محدوده قفل‌شدگی، نرخ ریزش گردابه‌ها کمتر است.

در "شکل 7" میدان دما در چهار زمان یکسان از یک دوره کامل نوسان به ازای جریان آب و نانوسیال در کسر حجمی $\phi = 0.03$ و در $Re = 200$ ، $\theta_A = \pi/2$ و $F=1$ نشان داده شده است. با دقت در "شکل 7" می‌توان دریافت که در جریان نانوسیال حول استوانه با نوسان زاویه‌ای، گردابه‌های جدا شده از سطح استوانه، دمای بیشتری داشته و از این رو حامل مقدار انرژی حرارتی بیشتری هستند که این انرژی به درون ناحیه کم فشار پشت استوانه برده شده و در تعامل با سیال سرد اطراف، حرارت بیشتری به سیال اطراف انتقال می‌یابد.

حال به بررسی اثر افزودن نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت متوسط اطراف استوانه با نوسان زاویه‌ای می‌پردازیم. در "شکل‌های 8 و 9" اثر افزودن نانوذرات بر افزایش نرخ انتقال حرارت در دامنه بدون بعد $\theta_A = \pi/4$ و نسبت فرکانس‌های نوسان $F=1, 2$ بررسی شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش کسر حجمی نانوذرات در هر دو نسبت فرکانس، ضریب انتقال حرارت متوسط به طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یافته است به گونه‌ای که در $\phi = 0.03$ به بیشترین مقدار خود رسیده است. همچنین با افزایش مقدار عدد رینولدز جریان، سرعت حرکت سیال در نزدیکی سطح استوانه افزایش می‌یابد که خود سبب افزایش مقدار ضریب انتقال حرارت می‌شود.

در "شکل 10" به بررسی تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط با فرکانس بدون بعد نوسان و به ازاء مقادیر مختلف دامنه نوسان و کسرهای حجمی 0، 0.01 و 0.02 و به ازاء عدد رینولدز ثابت 100 پرداخته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در تمامی حالات، به ازای نسبت فرکانس نوسان $F=1$ که در آن پدیده قفل‌شدگی گردابه‌ها رخ می‌دهد، مقدار ضریب انتقال حرارت متوسط به طور چشمگیری افزایش یافته است و در خارج از محدوده قفل‌شدگی، مقدار ضریب انتقال حرارت نسبت به محدوده قفل‌شدگی گردابه‌ها، کاهش یافته است اما مقدار ضریب انتقال حرارت متوسط در نسبت فرکانس نوسان $F=2$ بیشتر از $F=0.5$ است زیرا با افزایش نسبت فرکانس

به منظور بررسی دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان آب حول استوانه با نوسان زاویه‌ای، مقادیر عدد استروهل در اعداد رینولدز مختلف محاسبه شده و با نتایج عددی در دسترس مقایسه شده است. با توجه به "شکل 3" تطابق خوبی بین نتایج عددی حاضر و نتایج بانگ و سانگ [21] مشاهده می‌شود.

3- نتایج

با مطالعه جریان حول استوانه می‌توان دریافت که تغییرات عدد رینولدز، خواص ترموفیزیکی سیال و اعمال نوسان به استوانه، اثرات قابل توجهی بر مشخصه‌های جریان و انتقال حرارت در پشت استوانه دارند. در این مقاله به بررسی جریان ناپایای نانوسیال حول استوانه مدور با نوسان زاویه‌ای در اعداد رینولدز 100، 150 و 200 و در گستره کسرهای حجمی $0 \leq \phi \leq 0.03$ پرداخته شده است. اثرات نسبت فرکانس بدون بعد نوسان بر میدان چرخش¹ در اطراف استوانه بررسی شده است و سپس تاثیر افزودن نانوذرات و نسبت فرکانس بدون بعد نوسان بر میدان دما در اطراف استوانه مطالعه شده است. در ادامه به مطالعه و مقایسه اثرات همزمان افزودن نانوذرات به سیال پایه و تاثیر پارامترهای نوسان بر افزایش نرخ انتقال حرارت از استوانه پرداخته شده است و در انتها دو مکانیسم افزایش انتقال حرارت و سهم هر کدام در افزایش نرخ انتقال حرارت از استوانه ارزیابی شده‌اند.

بررسی میدان چرخش در اطراف استوانه، به درک مخاطب از فیزیک جریان، ساز و کار ریزش گردابه‌ها در محدوده قفل‌شدگی و خارج از آن، کمک خواهد کرد. حال به بررسی اثرات نسبت فرکانس نوسان بدون بعد بر میدان چرخش در اطراف استوانه در جریان نانوسیال و در 4 زمان یکسان از یک دوره کامل نوسان و در محدوده‌ای که جریان به حالت شبه‌پایا رسیده است، می‌پردازیم. در "شکل 4" عدد رینولدز جریان، دامنه نوسان و کسر حجمی نانوذرات ثابت در نظر گرفته شده است و تنها نسبت فرکانس بدون بعد نوسان متغیر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نسبت فرکانس $F=0.5$ ، ریزش گردابه‌ها از استوانه با نوسان زاویه‌ای، مشابه با ریزش گردابه‌ها از استوانه ساکن است و با افزایش نسبت فرکانس بدون بعد نوسان، اعوجاج در ناحیه کم‌فشار پشت استوانه افزایش یافته است.

همان‌طور که قبلاً نیز به آن اشاره شد در نسبت فرکانس $F=1$ پدیده قفل‌شدگی گردابه‌ها رخ می‌دهد که در این محدوده، فرکانس نوسان استوانه با فرکانس ریزش گردابه‌ها از سطح استوانه همگام می‌شود. در نوسان استوانه در خارج از محدوده قفل‌شدگی، به دلیل متفاوت بودن فرکانس نوسان استوانه و فرکانس ریزش گردابه‌ها از استوانه، در ناحیه کم‌فشار پشت استوانه بی‌نظمی‌هایی به وجود می‌آیند که خود مانع رشد و تکامل گردابه‌ها می‌شوند. مشابه این نتایج در مطالعات مرجع [8] نیز مشاهده شده است.

در "شکل‌های 5 و 6" میدان دما در اطراف استوانه با نوسان زاویه‌ای در جریان نانوسیال در محدوده قفل‌شدگی و خارج از آن و در سه سیکل متوالی و در زمانی یکسان از هر سیکل، نشان داده شده است. در "شکل 5" نسبت فرکانس بدون بعد نوسان برابر با 0.5 است که خارج از محدوده قفل‌شدگی گردابه‌ها است و "شکل 6" مربوط به نوسان در $F=1$ است که در آن پدیده قفل‌شدگی گردابه‌ها رخ می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در محدوده قفل‌شدگی، گردابه‌ها به‌طور منظم از سطح استوانه ریزش می‌کنند و در زمانی یکسان از سه سیکل متوالی، شکل‌های یکسانی دارند اما در خارج از این

¹ Vorticity Field

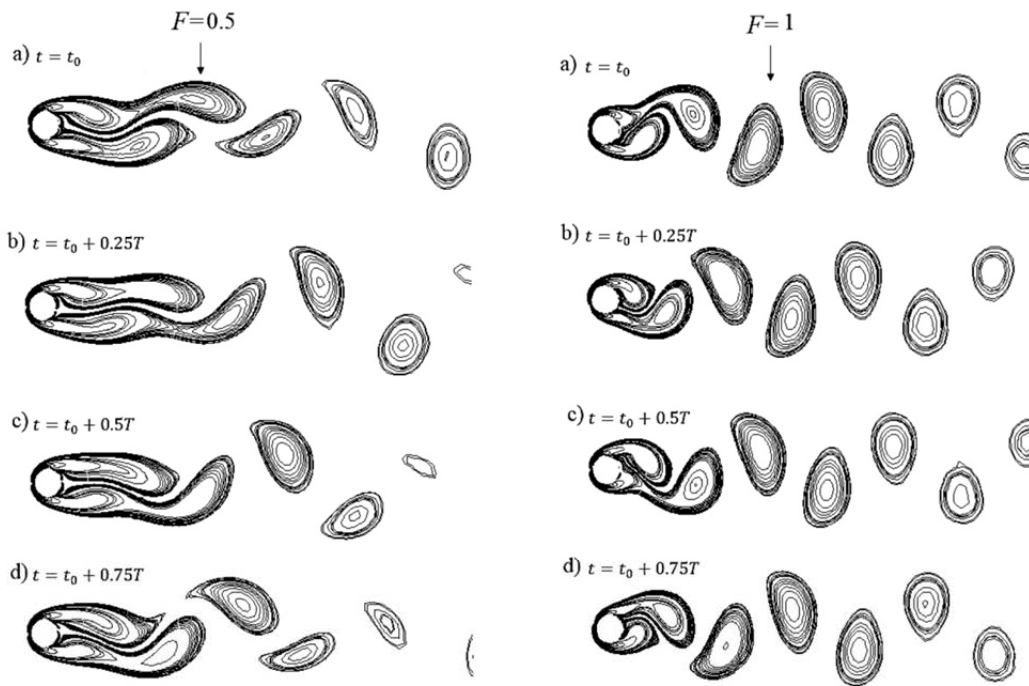


Fig. 4 Vorticity field around the cylinder with angular oscillation at $Re = 100$, $\theta_A = \pi/4$, $\varphi = 0.03$ at the four same time of one complete cycle of oscillation, left column at $F=0.5$ and right column at $F=1$

شکل 4 میدان چرخش اطراف استوانه با نوسان زاویه‌ای در $Re = 100$, $\theta_A = \pi/4$, $\varphi = 0.03$ و در چهار زمان یکسان از یک دوره کامل نوسان، ستون سمت چپ $F=0.5$ و ستون سمت راست $F=1$

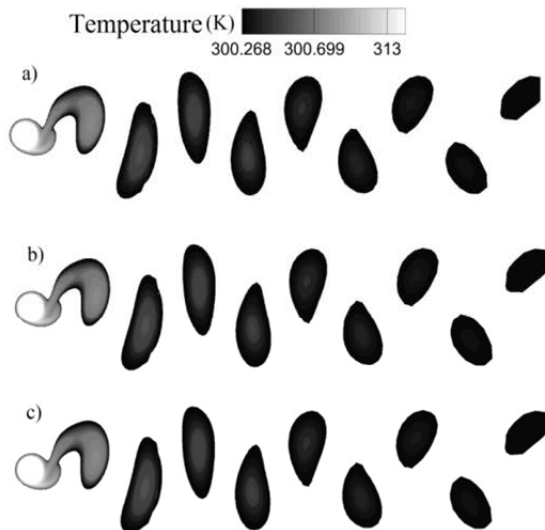


Fig. 6 Temperature field around the cylinder with angular oscillation at $Re = 200$, $\theta_A = \pi/2$, $F=1$ and $\varphi = 0.03$ at the same time of three consecutive cycles

شکل 6 میدان دما در اطراف استوانه با نوسان زاویه‌ای در $Re = 200$, $\theta_A = \pi/2$ و $F=1$ و $\varphi = 0.03$ در زمانی یکسان از سه دوره زمانی متوالی

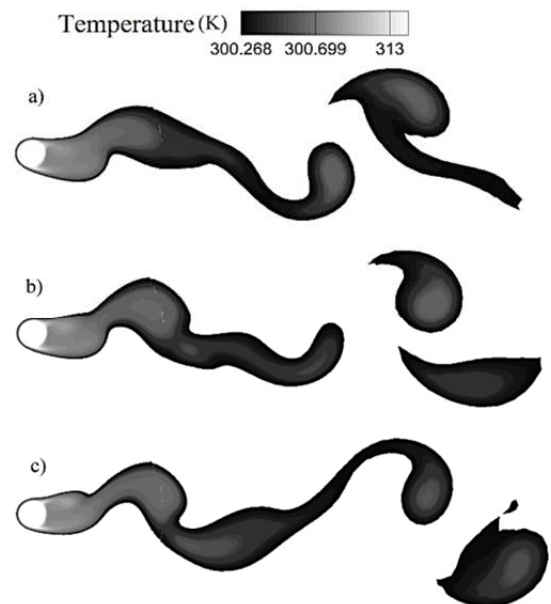


Fig. 5 Temperature field around the cylinder with angular oscillation at $Re = 200$, $\theta_A = \pi/2$, $F=0.5$ and $\varphi = 0.03$ at the same time of three consecutive cycles

شکل 5 میدان دما در اطراف استوانه با نوسان زاویه‌ای در $Re = 200$, $\theta_A = \pi/2$ و $F=0.5$ و $\varphi = 0.03$ در زمانی یکسان از سه دوره زمانی متوالی

مقدار ضریب انتقال حرارت متوسط افزایش یافته است، زیرا با افزایش دامنه نوسان، گردابه‌هایی که از سطح استوانه ریزش می‌کنند بزرگتر شده‌اند که خود موجب نفوذ بیشتر گردابه‌ها در سیال سرد مجاور شده و سبب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. از طرف دیگر میزان افزایش ضریب انتقال حرارت در اثر افزایش کسر حجمی نانوذرات، بیشتر از افزایش ضریب انتقال

بدون بعد نوسان ($F \geq 1$)، نرخ ریزش گردابه‌ها از سطح استوانه افزایش می‌یابد که خود منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. با مشاهده "شکل 10" می‌توان دریافت که در یک کسر حجمی ثابت با افزایش دامنه نوسان،

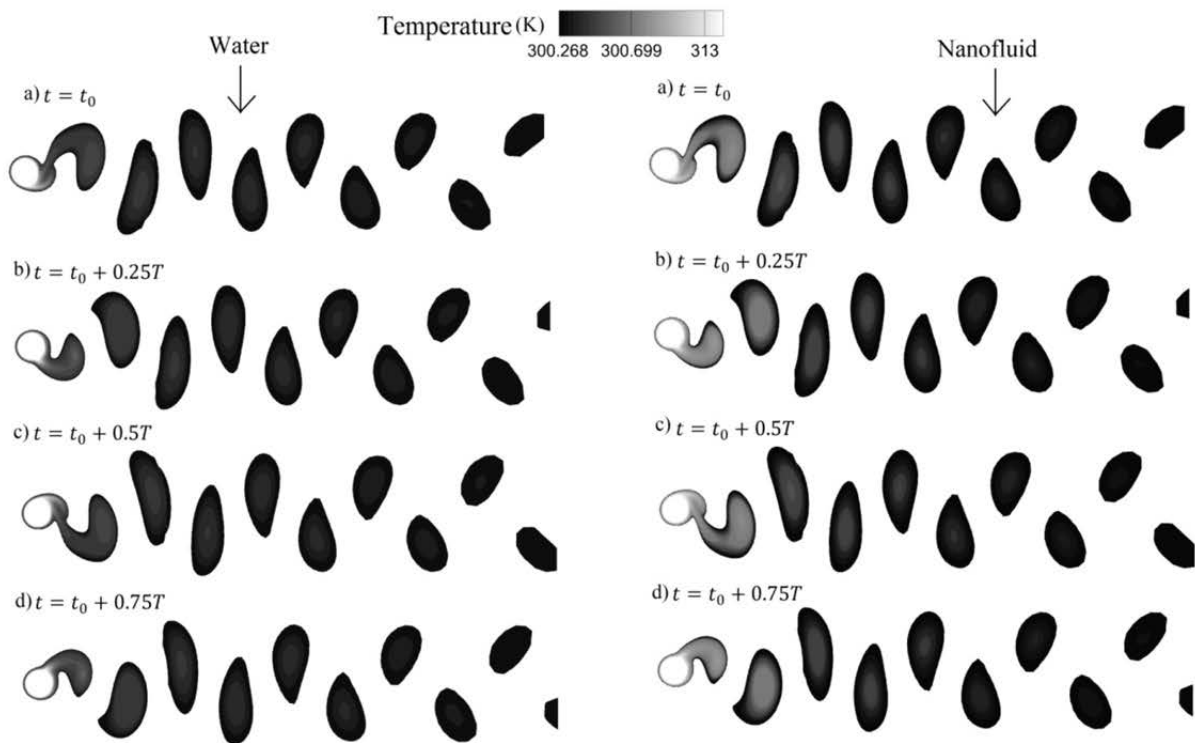


Fig. 7 Temperature field around the cylinder with angular oscillation at four same time of one complete cycle of oscillation at $Re = 200$, $\theta_A = \pi/2$, $F=1$, left column belongs to water flow and the right column belongs to nanofluid flow at $\phi = 0.03$

شکل 7 میدان دما اطراف استوانه با نوسان زاویه‌ای در چهار زمان یکسان از یک دوره کامل نوسان به ازاء $Re = 200$, $\theta_A = \pi/2$, $F=1$, ستون سمت چپ جریان آب و ستون سمت راست جریان نانوسیال در $\phi = 0.03$

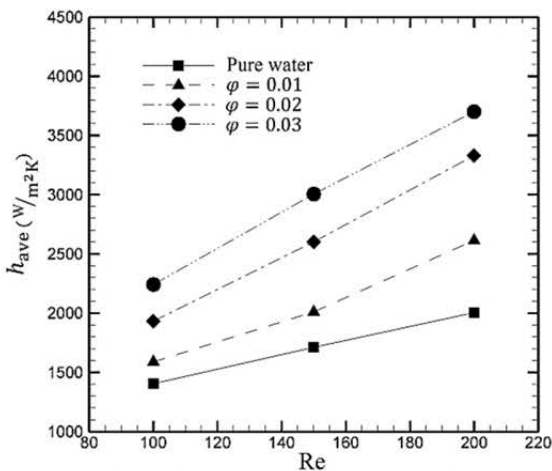


Fig. 9 Variation of average heat transfer coefficient versus Reynolds number at $\theta_A = \pi/4$ and $F=2$

شکل 9 تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط با عدد رینولدز در $\theta_A = \pi/4$ و $F=2$

مشاهده می‌شود در ابتدا مقدار متوسط مکانی ضریب انتقال حرارت بسیار زیاد است زیرا در زمان شروع به حرکت سیال، ضخامت لایه مرزی حرارتی کوچک بوده و این ضخامت با گذر زمان افزایش می‌یابد. در نتیجه با گذشت زمان، گرادیان دما کاهش یافته و در نهایت سبب کاهش مقدار متوسط مکانی ضریب انتقال حرارت می‌شود. از مشاهده "شکل 11" می‌توان دریافت که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، مقدار متوسط مکانی ضریب انتقال حرارت، به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است.

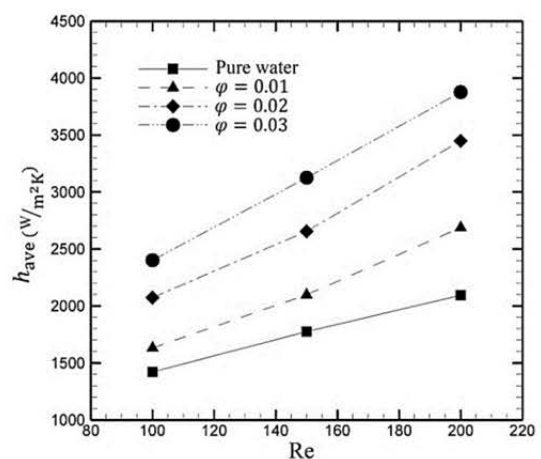


Fig. 8 Variation of average heat transfer coefficient versus Reynolds number at $\theta_A = \pi/4$ and $F=1$

شکل 8 تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط با عدد رینولدز در $\theta_A = \pi/4$ و $F=1$

حرارت ناشی از افزایش دامنه نوسان بوده است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که مقدار ضریب انتقال حرارت متوسط در $\theta_A = \pi/2$ و $\phi = 0.02$ هر نسبت فرکانس به بیشترین مقدار خود رسیده است. در "شکل 11" تغییرات متوسط مکانی ضریب انتقال حرارت با زمان بدون بعد در $Re = 100$, $\theta_A = \pi/4$ و نسبت فرکانس نوسان $F=1$ به ازای سیال آب و نانوسیال در کسرهای حجمی مختلف نشان داده شده است. زمان بی‌بعد به صورت $t^* = u \times t/D$ تعریف شده است. همان‌طور که در "شکل 11"

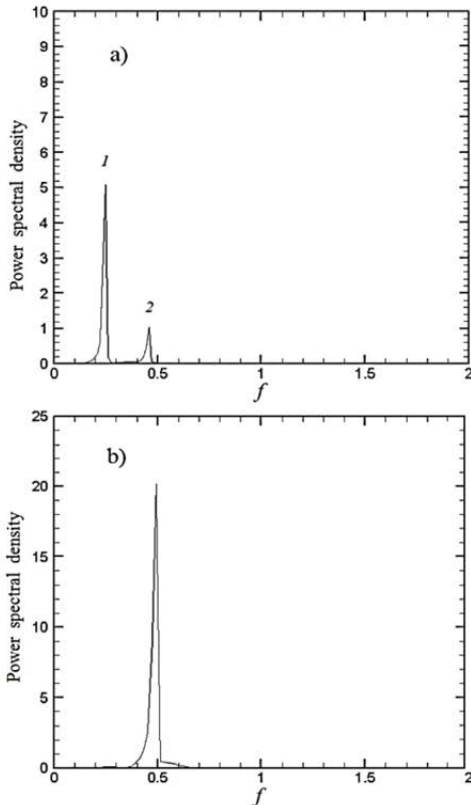


Fig. 12 Power spectral density diagram at $Re = 100$, $\theta_A = \pi/4$ and $\varphi = 0.01$ at a) $F=0.5$ and b) $F=1$

شکل 12 منحنی چگالی طیف توان در $Re = 100$ و $\theta_A = \pi/4$ و $\varphi = 0.01$ در $F=0.5$ و $F=1$

طیف توان تنها یک قله مشاهده می‌شود. به علاوه مقدار منحنی چگالی طیف توان در ناحیه قفل‌شدگی، افزایش قابل‌ملاحظه‌ای داشته است و مقدار آن به 20 رسیده است زیرا گردابه‌هایی که در این محدوده از سطح استوانه ریزش می‌کنند، قوی‌تر هستند و سرعت سیال در نزدیکی سطح استوانه افزایش می‌یابد.

در "شکل‌های 13 و 14" به تفکیک، تاثیر هر یک از روش‌های به کار رفته در این تحقیق جهت افزایش نرخ انتقال حرارت (افزودن نانوذرات به سیال پایه و اعمال نوسان زاویه‌ای به استوانه) و مقایسه با ترکیب آن‌ها با هم و همچنین مقایسه آن‌ها با استوانه ساکن در جریان سیال آب مورد بررسی قرار گرفته است.

در "شکل 13" نوسان با دامنه بدون بعد $\theta_A = \pi/4$ و نسبت فرکانس $F=0.5$ و در کسر حجمی ثابت نانوذرات $\varphi = 0.02$ مورد بررسی قرار گرفته است و در "شکل 14" دامنه و نسبت فرکانس بدون بعد نوسان به ترتیب برابر با $\pi/4$ و 1 است و کسر حجمی نانوذرات ثابت و برابر با 0.03 است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزودن نانوذرات به سیال پایه به تنهایی، در مقایسه با اعمال نوسان زاویه‌ای به استوانه، تاثیر بیشتری در افزایش ضریب انتقال حرارت دارد و در نتیجه ترکیب آن دو با هم سبب افزایش بیشتر ضریب انتقال حرارت شده است. به‌عنوان مثال مقدار افزایش ضریب انتقال-حرارت در اثر اعمال نوسان زاویه‌ای در $\theta_A = \pi/4$ و $F=0.5$ (نوسان در خارج از محدوده قفل‌شدگی گردابه‌ها) نسبت به استوانه ساکن در جریان سیال آب بین 1.06 تا 7.66 درصد بوده است و مقدار افزایش ضریب انتقال

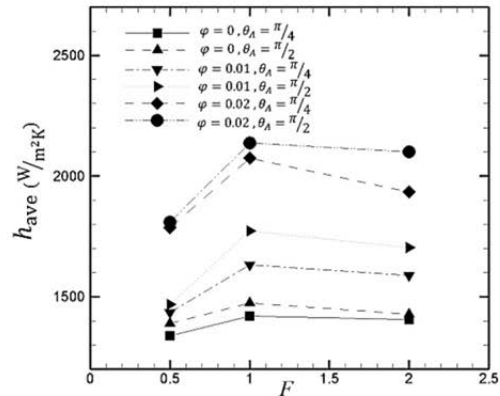


Fig. 10 Variation of average heat transfer coefficient versus oscillation frequency ratio for different amplitudes and volume fractions of nanoparticles at constant Reynolds number of 100

شکل 10 تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط با نسبت فرکانس نوسان به ازای مقادیر مختلف دامنه و کسرهای حجمی نانوذرات در عدد رینولدز ثابت 100

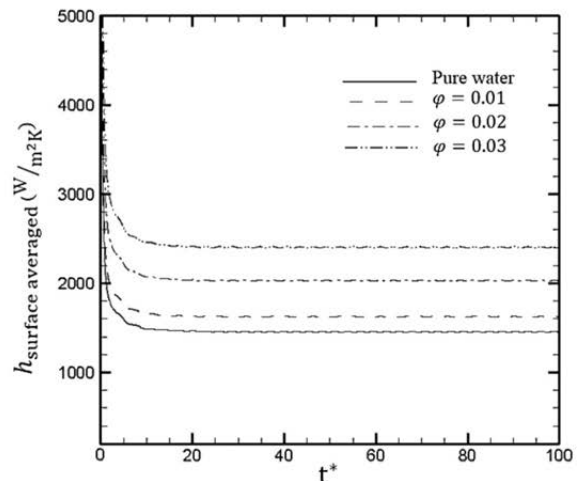


Fig. 11 Variation of surface averaged heat transfer coefficient versus non-dimensional time at $Re = 100$, $\theta_A = \pi/4$ and $F=1$ for water and nanofluid flow at different volume fractions

شکل 11 تغییرات متوسط مکانی ضریب انتقال حرارت با زمان بدون بعد در $Re = 100$ و $\theta_A = \pi/4$ و $F=1$ به ازاء آب و نانوسیال در کسرهای حجمی مختلف

تحلیل طیفی، نحوه توزیع توان کل برحسب فرکانس را به ازای داده‌های یک دنباله نشان می‌دهد. به بیان دیگر چگالی طیف توان، قدرت سیگنال را به‌عنوان تابعی از فرکانس نشان می‌دهد و ابزاری مفید برای تشخیص آن است که در چه فرکانسی، متغیرها دارای قدرت بیشتری هستند. برای مطالعه روابط ریاضی حاکم، به مرجع [22] مراجعه شود. تحلیل طیفی تغییرات ضریب لیفت، به درک درستی از وقوع پدیده قفل‌شدگی گردابه‌ها کمک خواهد کرد. در "شکل 12" منحنی چگالی طیف توان در $Re = 100$ و $\theta_A = \pi/4$ و $\varphi = 0.01$ در نسبت فرکانس‌های 1، 0.5 نشان داده شده است. با توجه به "شکل 12" در نسبت فرکانس نوسان $F=0.5$ ، دو قله مجزا وجود دارد که قله اول متعلق به فرکانس نوسان استوانه و قله دوم بیانگر فرکانس استروهاال است که نسبت بین آن‌ها برابر 0.5 است. در نسبت فرکانس نوسان $F=1$ ، پدیده قفل‌شدگی گردابه‌ها رخ می‌دهد و فرکانس نوسان استوانه با فرکانس ریزش گردابه‌ها از سطح استوانه همگام می‌شود و در منحنی چگالی

¹ Power Spectral Density

فوق بین 70.76 تا 113.56 درصد است. بنابراین افزودن نانوذرات به سیال پایه نسبت به اعمال نوسان زاویه‌ای به استوانه، سهم بیشتری در افزایش ضریب انتقال حرارت دارد و ترکیب دو مکانیسم فوق سبب افزایش قابل - ملاحظه ضریب انتقال حرارت شده است.

از مقایسه "شکل‌های 13 و 14" می‌توان دریافت که مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت در حالت‌های مختلف با تغییر پارامترهای نوسان و کسر حجمی نانوذرات، متغیر است به گونه‌ای که در محدوده قفل‌شدگی و در کسرهای حجمی بالاتر، مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت بسیار بیشتر است.

4- جمع‌بندی

در پژوهش حاضر، جریان ناپایا، لزج، دوبعدی و تراکم‌ناپذیر حول استوانه با نوسان زاویه‌ای در جریان نانوسیال به‌طور عددی به ازاء رینولدزهای 100، 150 و 200 در $F=0.5$ ، $\theta_A = \pi/4$ ، $\pi/2$ و $F=1$ ، $\theta_A = \pi/4$ و کسرهای حجمی مختلف در محدوده $0 \leq \varphi \leq 0.03$ انجام شده است. با اعمال نوسان زاویه‌ای به استوانه، اثرات این نوع نوسان بر میدان چرخش و ریزش گردابه‌ها از سطح استوانه و میدان دما در محدوده قفل‌شدگی و خارج از آن بررسی شد، سپس با افزودن نانوذرات به سیال پایه، اثرات استفاده از نانوسیال بر مشخصه‌های انتقال حرارت اطراف استوانه با نوسان زاویه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مهم این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- 1- اثر اعمال نوسان زاویه‌ای به استوانه در $\theta_A = \pi/4$ و $F=0.5$ بر روی افزایش ضریب انتقال حرارت نسبت به استوانه ساکن در جریان سیال پایه، بین 1.06 تا 7.66 درصد بوده است.
- 2- ترکیب دو مکانیسم فوق در $\theta_A = \pi/4$ ، $F=0.5$ و $\varphi = 0.02$ سبب بهبود انتقال حرارت به میزان 41.30 تا 91.78 درصد شده است.
- 3- با توجه به آنچه در بالا بدان اشاره شد، استفاده از نانوسیال نسبت به اعمال نوسان زاویه‌ای به استوانه، تاثیر بیشتری در افزایش نرخ انتقال-حرارت از سطح استوانه دارد و ترکیب دو مکانیسم فوق، سبب افزایش هرچه بیشتر ضریب انتقال حرارت می‌شود. بنابراین توسعه سیالات جدید با شاخص‌های حرارتی بالا نسبت به اعمال نوسان به استوانه، سبب افزایش راندمان و صرفه‌جویی بیشتر در هزینه‌ها خواهد شد.
- 4- در محدوده قفل‌شدگی گردابه‌ها که فرکانس نوسان اعمالی به استوانه با فرکانس ریزش گردابه‌ها از سطح استوانه همگام می‌شود، ضریب انتقال حرارت به طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

5- فهرست علائم

ضریب درگ متوسط	\bar{C}_d
ضریب لیفت متوسط	\bar{C}_l
ظرفیت حرارتی ($J kg^{-1} K^{-1}$)	c_p
قطر استوانه (m)	D
قطر نانوذره (mm)	d_p
ضریب انتشار انیشتین ($m^2 sec^{-1}$)	E
فرکانس بدون بعد نوسان	$F = f/f_0$
فرکانس نوسان اعمالی (sec^{-1})	f
فرکانس ریزش گردابه‌ها از استوانه (sec^{-1})	f_0
ضریب انتقال حرارت متوسط ($W m^{-2} K^{-1}$)	h_{ave}
متوسط مکانی ضریب انتقال حرارت ($W m^{-2} K^{-1}$)	$h_{surface averaged}$
ضریب هدایت حرارتی ($W m^{-1} K^{-1}$)	k

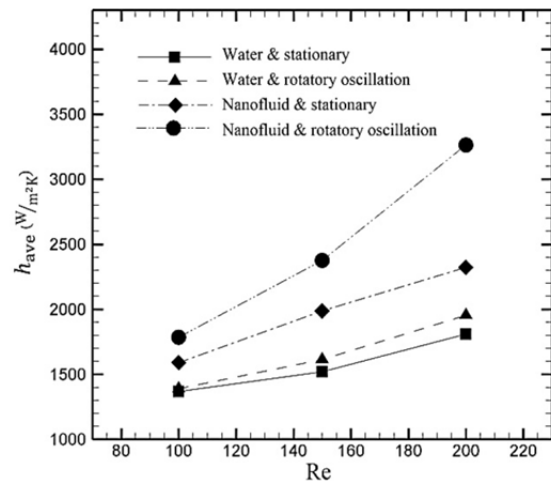


Fig. 13 Variation of average heat transfer coefficient versus Reynolds number and comparison of the effects of heat transfer enhancement methods at $\theta_A = \pi/4$, $F=0.5$ and $\varphi = 0.02$

شکل 13 تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط با عدد رینولدز و مقایسه تاثیر روش-های افزایش انتقال حرارت در $\theta_A = \pi/4$ ، $F=0.5$ و $\varphi = 0.02$

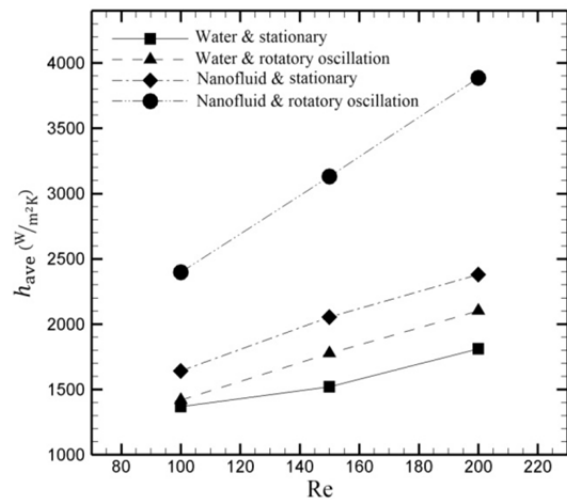


Fig. 14 Variation of average heat transfer coefficient versus Reynolds number and comparison of the effects of heat transfer enhancement methods at $\theta_A = \pi/4$, $F=1$ and $\varphi = 0.03$

شکل 14 تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط با عدد رینولدز و مقایسه تاثیر روش-های افزایش انتقال حرارت در $\theta_A = \pi/4$ ، $F=1$ و $\varphi = 0.03$

حرارت در اثر افزودن نانوذرات اکسید مس در کسر حجمی $\varphi = 0.02$ به سیال پایه در استوانه ساکن، بین 16.01 تا 27.79 درصد بوده است. این موضوع خود بیانگر تاثیر غالب افزودن نانوذرات نسبت به اعمال نوسان زاویه-ایی در افزایش ضریب انتقال حرارت از استوانه است. همچنین مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت در اثر ترکیب دو مکانیسم فوق بین 30.41 تا 78.91 درصد است. همچنین مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت در اثر اعمال نوسان زاویه‌ای در $\theta_A = \pi/4$ و $F=1$ (نوسان در محدوده قفل‌شدگی گردابه‌ها) نسبت به استوانه ساکن در جریان سیال آب بین 4.25 تا 15.83 درصد، مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت در اثر افزودن نانوذرات اکسید مس در کسر حجمی $\varphi = 0.03$ به سیال پایه در استوانه ساکن، بین 20.49 تا 31.26 درصد و مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت در اثر ترکیب دو مکانیسم

[2] F. M. Mahfouz, H. M. Badr, Forced convection from a rotationally oscillating cylinder placed in a uniform stream. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 17, pp. 3093-3104, 2000.

[3] S. J. Lee, J. Y. Lee, Temporal evolution of wake behind a rotationally oscillating circular cylinder, *Physics of Fluids*, Vol. 19, No. 10, pp. 105104-105113, 2007.

[4] S. Choi, H. Choi, S. Kang, Characteristics of flow over a rotationally oscillating cylinder at low Reynolds number, *Physics of Fluids*, Vol. 14, No. 8, pp. 2767-2777, 2002.

[5] M. R. H. Nobari, H. Naderan, A numerical study of flow past a cylinder with cross flow and inline oscillation, *Computers & Fluids*, Vol. 35, No. 4, pp. 393-415, 2006.

[6] J. Deng, X. Shao, A. Ren, Vanishing of three-dimensionality in the wake behind a rotationally oscillating circular cylinder, *Journal of Hydrodynamics Series B-English Edition*, Vol. 19, No. 6, pp. 751-755, 2007.

[7] S. J. Lee, J. Y. Lee, PIV measurements of the wake behind a rotationally oscillating circular cylinder, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 24, No. 1, pp. 2-17, 2008.

[8] M. R. H. Nobari, J. Ghazanfarian, A numerical investigation of fluid flow over a rotating cylinder with cross flow oscillation, *Computers & Fluids*, Vol. 38, No. 10, pp. 2026-2036, 2009.

[9] S. Kumar, C. Lopez, O. Probst, G. Francisco, D. Askari, Y. Yang, Flow past a rotationally oscillating cylinder, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 735, No. 1, pp. 307-346, 2013.

[10] L. Du, C. Dalton, LES calculation for uniform flow past a rotationally oscillating cylinder, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 42, No. 1, pp. 40-54, 2013.

[11] P. Sellappan, T. Pottebaum, Vortex shedding and heat transfer in rotationally oscillating cylinders, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 748, No. 1, pp. 549-579, 2014.

[12] A. R. Da Silva, A. Da Silveira-Neto, A. M. G. De Lima, Rotational oscillation effect on flow characteristics of a circular cylinder at low Reynolds number, *World Journal of Mechanics*, Vol. 5, No. 10, pp. 195-209, 2015.

[13] H. V. R. Mittal, Q. M. Al-Mdallal, R. K. Ray, Locked-on vortex shedding modes from a rotationally oscillating circular cylinder, *Ocean Engineering*, Vol. 146, No. 1, pp. 324-338, 2017.

[14] S. N. Naik, S. Vengadesan, K. A. Prakash, Numerical study of fluid flow past a rotating elliptic cylinder, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 68, No. 1, pp. 15-31, 2017.

[15] Y. Hwang, J. K. Lee, C. H. Lee, Y. M. Jung, S. I. Cheong, C. G. Lee, B. C. Ku, S. P. Jang, Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids, *Thermochimica Acta*, Vol. 455, No. 1, pp. 70-74, 2007.

[16] 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.

[17] P. Keblinski, S. R. Phillpot, S. U. S. Choi, J. A. Eastman, Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, No. 4, pp. 855-863, 2002.

[18] B. C. Pak, Y. I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer an International Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 151-170, 1998.

[19] Y. Xuan, W. Roetzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 19, pp. 3701-3707, 2000.

[20] H. Chen, Z. Zheng, Z. Chen, X. T. Bi, Simulation of flow and heat transfer around a heated stationary circular cylinder by lattice gas automata, *Powder Technology*, Vol. 290, No. 1, pp. 72-82, 2016.

[21] S. J. Baek, H. J. Sung, Numerical simulation of the flow behind a rotary oscillating circular cylinder, *Physics of Fluids*, Vol. 10, No. 4, pp. 869-876, 1998.

[22] P. Stoica, R. L. Moses, *Spectral Analysis of Signals*, pp. 1-11, New Jersey: Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, 2005.

ثابت بولتزمن ($J K^{-1}$)	k_b
جرم مولکولی سیال پایه ($kg mol^{-1}$)	M
عدد آووگادرو (mol^{-1})	N
عدد ناسلت متوسط	\overline{Nu}
فشار ($N m^{-2}$)	p
عدد پراتل	Pr
عدد رینولدز	Re
عدد استروهال	St
زمان بی‌بعد	$t^* = u \times t/D$
دما (K)	T
دمای انجماد سیال پایه (K)	T_{fr}
سرعت در جهت افقی ($m sec^{-1}$)	u
سرعت حرکت براونی نانوذرات ($m sec^{-1}$)	u_B
سرعت در جهت عمودی ($m sec^{-1}$)	v
علائم یونانی	
ضریب نفوذ حرارت ($m^2 sec^{-1}$)	α
جابجایی زاویه‌ای (rad)	θ
دامنه نوسان (rad)	θ_A
ویسکوزیته دینامیکی ($kg m^{-1} sec^{-1}$)	μ
ویسکوزیته سینماتیکی ($m^2 sec^{-1}$)	ν
چگالی ($kg m^{-3}$)	ρ
زمان نوسان (sec)	τ
کسر حجمی نانوذرات	φ
سرعت زاویه‌ای ($rad sec^{-1}$)	ω
زیر نویس‌ها	
متوسط	ave
موثر	eff
سیال پایه	f
نانوذره	p
ریشه دوم میانگین مربعات	rms

6- مراجع

[1] M. R. H. Nobari, J. Ghazanfarian, Convective heat transfer from a rotating cylinder with inline oscillation, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, No. 10, pp. 2026-2036, 2010.