

بررسی عددی تأثیر استفاده همزمان از نوسان و نانوذرات در جریان داخل کانالی با موانع متناوب

مسعود ضیائی‌راد*

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

پیمان الیاسی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

چکیده

در این مقاله به نقش نانوذرات در افزایش انتقال حرارت جریان نوسانی آرام سیال در کانالی با موانع متناوب به صورت عددی پرداخته شده است. معادلات حاکم بر جریان نانوسیال به روش حجم محدود روی شبکه جابجاشده حل شده‌اند. سرعت جریان ورودی تابعی سینوسی از زمان در نظر گرفته شده و ویژگی‌های نانوسیال متغیر با دما برحسب خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذره محاسبه می‌شود. تحلیل جامعی بر روی عددنوسلت و افت فشار جریان در محدوده‌هایی از دامنه، فرکانس نوسانات و کسر حجمی انواع مختلف نانوذرات انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد فرکانس نوسانات تأثیر قابل توجهی بر نرخ انتقال حرارت و افت فشار نمی‌گذارد. همچنین با سه برابر شدن دامنه نوسانات، عددنوسلت کلی حدود ۲ درصد افزایش داشته است؛ این در حالی است که افزودن شش درصد نانوذره به سیال پایه، با وجود آنکه افت فشار کمتری هم نسبت به افزایش دامنه بر جریان تحمیل کرده، ولی عدد نوسلت کلی را حدود ۱۶ درصد افزایش داده است. مطالعه نانوذره‌های مختلف نیز نشان داد که عددنوسلت متوسط نوسانی برای نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم از سایر نانوسیال‌های مطالعه شده کمتر است. بطور کلی می‌توان گفت که در کانال مانع‌دار، افزایش کسر حجمی نانوذرات تا ۶ درصد و نوسانی کردن جریان با دامنه ۰/۵ حالت بهینه افزایش انتقال حرارت با افت فشاری قابل قبول خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: جریان نوسانی، نانوسیال، کانال با موانع متناوب، انتقال حرارت، شبیه سازی عددی.

Numerical Investigation on Simultaneous Effects of Pulsation and Nanoparticles in Flow through a Channel with Alternative Blocks

M. Ziaei-Rad

Mechanical Eng. Dept., Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

P. Elyasi

Mechanical Eng. Dept., Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract

The effect of nanoparticles on heat transfer enhancement in laminar pulsating nanofluid flow through a rectangular channel with alternative blocks has been investigated numerically. The governing equations are discretized using a finite volume approach on a staggered grid arrangement. Inflow velocity is set to be sinusoidal in time and temperature-dependent nanofluid properties are computed in terms of the base-fluid and nanoparticles thermophysical properties. A comprehensive discussion is performed on the flow heat transfer and pressure drop in some ranges of pulsation frequency, oscillation amplitude and volume fraction of different nanoparticles. The results show that pulsation frequency has no significant effect on the heat transfer rate and the pressure drop. Moreover increasing the oscillation amplitude by three times adds up the total Nusselt number for about 2 percent, whereas by increasing the volume fraction of nanoparticles by six percent, total Nusselt number increased about 16 percent, with lower pressure drop in comparison with the change of oscillation amplitude. Studying different nanoparticles types also revealed that for water-TiO₂ nanofluid, the average pulsating Nusselt number is less than other assumed nanofluids. As a consequence, we state that in a channel with alternative blocks, the increment of nanoparticles volume fraction by 6 percent and the flow oscillating with the amplitude of 0.5 are the optimum values for heat transfer enhancement with reasonable pressure drop.

Keywords: Pulsating flow, Nanofluid, Channel with alternative blocks, Heat transfer, Numerical Simulation.

۱- مقدمه

هندسه‌ای، اجزای نصب‌شونده روی بورد‌های الکترونیکی است. این بورها از اجزای بسیار کوچکی ساخته می‌شوند که هریک تولید حرارت قابل ملاحظه‌ای دارند. خنک کاری این اجزا با جریان سیال به صورت جابجایی اجباری از میان مجراهای بورد صورت می‌پذیرد. در عمل، نواحی پرخش ایجاد شونده در بین موانع، سبب افزایش مقاومت گرمایی شده و نرخ انتقال حرارت از آن‌ها را پایین می‌آورد. لذا لازم است انتقال حرارت از آن‌ها را به گونه‌ای افزایش داد، یکی از این شیوه‌ها، می‌تواند نوسانی کردن جریان ورودی و ممانعت از توسعه یافتگی جریان باشد [۳]. با این حال، به علت محدودیت‌های موجود در تغییرات هندسی و شرایط مرزی، افزایش قابلیت هدایت حرارتی سیال گزینه بهتری خواهد بود. نانوسیال که مخلوطی از یک سیال پایه و نانوذرات فلزی یا غیرفلزی است، قابلیت هدایت حرارتی و ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال پایه در آن، با افزودن نانوذرات افزایش می‌یابد [۴].

افزایش انتقال حرارت یکی از مهمترین اهداف پیش روی بیشتر کاربردهای عملی جریان در صنایع مختلف است. برای افزایش انتقال حرارت می‌توان از تغییر در رژیم جریان، هندسه، شرایط مرزی و یا افزایش قابلیت هدایت حرارتی سیال استفاده کرد. یکی از راه‌های افزایش انتقال حرارت در جریان، عبور دادن آن از میان محیطی مانع‌دار است که به علت ساختار منحصر به فرد و اهمیت کاربرد آن در زمینه‌های گوناگون مهندسی مکانیک، عمران و آب‌شناسی، مهندسی شیمی و نفت، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی، برخی کاربردها همچون قطعات الکترونیکی و برخی مبدل‌ها و سیستم‌های حرارتی، دارای هندسه‌ای با موانع متناوب هستند که خنک کاری و یا افزایش انتقال حرارت در آنها نیز، مورد توجه بسیاری از محققین بوده است [۱ و ۲]. از متداول‌ترین کاربردهای چنین

به کارگیری نانوسیال بجای سیال خالص موجب دفع بهتر حرارت از قطعات در مسیر جریان می شود. بدیهی است در این صورت می توان، در حجم کمتری از دستگاه، تبادل حرارتی مناسب تری داشت. یکی دیگر از کاربردهای مهم استفاده همزمان از نانوسیالات و جریان های نوسانی، در خنک سازی رآکتورهای هسته ای است. با توجه به اینکه جریان سیال برای خنک کردن رآکتورهای هسته ای به صورت تناوبی در حال نوسان است [۵]، استفاده از نانوسیال ها برای افزایش انتقال حرارت در رآکتورهای هسته ای و صنایع مشابه، اهمیت بسزایی خواهد داشت.

مطالعات متعددی در گذشته بر روی انتقال حرارت جریان های نوسانی، بکارگیری نانوذرات در افزایش انتقال حرارت جریان و بررسی جریان از روی موانع متناوب در مسیر جریان انجام شده است. از آن جمله، رهگشای و همکاران [۶] جریان نانوسیال نوسانی آرام در یک لوله با دمای ثابت را مورد مطالعه عددی قرار دادند. آنها برای حل مساله از روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، افت فشار و انتقال حرارت از لوله افزایش می یابد. همچنین گزارش کردند که با افزایش فرکانس و دامنه نوسانات، انتقال حرارت به میزان کمی افزایش خواهد داشت. جعفری و همکاران [۷] جریان نوسانی آرام در یک کانال موج با دمای ثابت را بدون حضور موانع مورد مطالعه عددی قرار دادند. آنها مطالعات خود را در محدوده فرکانس های ۰/۵ تا ۱ و دامنه های نوسان صفر تا ۰/۲۵ انجام دادند. آنها برای حل مساله از روش شبکه بولتزمن استفاده کرده و دریافتند که پارامترهای موثر بر جریان نوسانی تأثیر مثبتی بر افزایش انتقال حرارت در کانال می گذارد. علاوه بر آن مشاهده کردند که با افزایش دامنه نوسان میزان انتقال حرارت در کانال افزایش می یابد. لائو و همکاران [۸] در یک تحقیق تجربی با قرار دادن موانعی با سوراخ های مربعی در جریان آشفته داخل کانالی عریض توانستند انتقال حرارت را تا ۴/۷ الی ۶/۳ برابر حالتی که این موانع وجود نداشته و جریان کاملاً توسعه یافته بود، افزایش دهند. زو و همکاران [۹] به بررسی جریان جابه جایی طبیعی دوبعدی در محیط مانع دار متخلخل پرداخته و تأثیر اندازه سلولها، تخلخل و آرایش موانع متخلخل را با استفاده از روش بولتزمن بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که نرخ انتقال حرارت با پایین آوردن میزان تخلخل و اندازه سلول ها، افزایش یافته و موانع متخلخل مربعی نسبت به محیط کروی به علت ایجاد اختلاط قوی سیال و سطح تماس بیشتر، عملکرد گرمایی بهتری دارد. مولکاهی و همکاران [۱۰] به صورت عددی تأثیرات جریان نوسانی سیال در یک محیط مانع دار متشکل از سیلندره های مربعی گرمازا، در محدوده اعداد رینولدز ۵۰ تا ۲۰۰ و فرکانس نوسانات صفر تا ۸۰ هرتز را بر افزایش انتقال حرارت و کاهش ضریب درگ مورد مطالعه قرار دادند. جریان در ورودی شامل یک جزء ثابت و یک جزء نوسانی بوده که با زمان به صورت سینوسی تغییر می کند. آنها برای مساله از نرم افزار فلوئنت بهره بردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش فرکانس نوسانات و عدد رینولدز، میزان انتقال حرارت افزایش می یابد. همچنین دریافتند که با افزایش عدد رینولدز، ضریب درگ کاهش می یابد. کاتو و همکاران [۱۱] به صورت تجربی به بررسی تأثیرات جریان نوسانی سیال در یک مبدل حرارتی لوله ای به ازای دامنه های نوسانی بالاتر از ۹۰ میلی متر و در بازه ی زمانی ۸۰۰۰ ثانیه

پرداختند. آنها مطالعات خود را برای حالت های مختلفی از جمله تغییر در دامنه نوسان جریان ورودی، تغییر در ظرفیت نهان حرارتی و بررسی سیال های مختلف انجام دادند. نتایج مطالعات تجربی آنها نیز نشان داد که با افزایش دامنه نوسانات، انتقال حرارت در لوله افزایش می یابد. ضیائی راد و الیاسی [۱۲] به صورت عددی تأثیرات جریان نوسانی نانوسیال در یک کانال ساده بدون مانع بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، فرکانس و دامنه نوسانات، انتقال حرارت به میزان اندکی افزایش خواهد یافت. محمدپور و همکاران [۱۳] تغییر در آهنگ انتقال حرارت جریان جت نوسانی برخوردی به سطح مقعر را به صورت عددی بررسی کردند. نتایج آنها در محدوده فرکانس ۱۰ تا ۵۰ هرتز و اعداد رینولدز ۴۷۴۰ تا ۹۵۹۰ ارائه شد و دیده شد که با افزایش فرکانس نوسانات و عدد رینولدز جت برخوردی، مقدار عدد نوسلت و در نتیجه میزان انتقال حرارت در سطح مقعر افزایش می یابد. نوری و همکاران [۱۴] اثر میدان مغناطیسی را بر انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال آب- مس در یک کانال با هندسه سینوسی شکل تحلیل عددی کردند. برای حل این مساله، آنها از الگوریتم سیمپل و در محاسبه ضریب هدایت حرارتی و لزجت دینامیکی نانوسیال به ترتیب از مدل ماکسول و برینکمن استفاده کردند و چنین نتیجه گرفتند که افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات، موجب افزایش عدد نوسلت می گردد. تیمه و همکاران [۱۵] به صورت عددی جریان جابجایی اجباری سیال عبوری از یک محیط مانع دار متخلخل را مورد مطالعه قرار دادند. آنها مساله را در سه حالت مختلف قرارگیری موانع متخلخل داخل لوله بررسی کرده و نتیجه گرفتند که افزایش شعاع موانع متخلخل، بر عملکرد گرمایی و توان پمپاژ تأثیر منفی می گذارد.

بررسی های انجام شده بر روی تحقیقات گذشته موید این مطلب است که اگرچه مطالعات متعددی بر روی جریان نوسانی سیال در کانال و یا اثر افزودن نانوذرات بر افزایش انتقال حرارت در جریان های غیرنوسانی روی هندسه های مختلف بصورت عددی و تجربی می توان یافت، اما فقدان تحقیقی بر روی تأثیر همزمان نوسانی کردن جریان و افزودن نانوذرات در جریان کاربردی بین موانع مشهود است. با توجه به کاربرد فراوان جریان از روی موانع متناوب در مسیر آن و با توجه به نقش دو عامل مذکور بر افزایش انتقال حرارت در جریان ها، در این مقاله در ادامه مطالعات قبلی نویسندگان مقاله بر روی جریان های نوسانی [۱۲]، تحلیلی عددی و جامع برای محدوده وسیعی از تغییرات عدد رینولدز، دامنه و فرکانس نوسانات، به کارگیری نانوذرات مختلف و تغییر در کسر حجمی آنها، بر روی نرخ انتقال حرارت و افت فشار در جریان بین موانع ارائه شده و نتایج کاربردی بدست آمده به صورت نمودارها و جداولی ارائه گردیده است.

۲- مدل هندسی

یک کانال مستطیلی به صورت دوبعدی با ارتفاع H و طول L با موانع مربعی متناوب در نظر گرفته می شود (شکل ۱). موانع با آرایش 3×3 فاصله بی بعد $X = 1.1$ از ابتدای کانال قرار گرفته اند. فاصله عمودی بی بعد بین موانع برابر با ابعاد آنها منظور گردیده $X_1 = Y_1 = 0.2$ ، در حالیکه فاصله افقی بین موانع برابر با $X_2 = 0.6$ فرض می شود. جریان آرام و غیردائم نانوسیال از سمت چپ کانال با

نانوسیال با دمای یکنواخت T_{in} و با در نظر گرفتن جریان ورودی ارتعاشی با پروفیل سرعتی شامل مجموع یک پروفیل سرعت تخت و یک پروفیل سرعت نوسانی سینوسی، به صورت زیر:

$$u = U_m [1 + A_0 \sin(\omega \cdot t)] \quad \omega = 2\pi\Omega \quad (6)$$

وارد کانال می‌شود. در این معادله، ω فرکانس زاویه‌ای، Ω فرکانس دارای بعد نوسانات، t زمان، U_m میانگین سرعت ورودی و A_0 دامنه نوسانات می‌باشد. فرم بی بعد رابطه سرعت نوسانی ورودی را می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$U = [1 + A_0 \sin(2\pi \cdot St \cdot \tau)] \quad (7)$$

که در آن، $St = \frac{\Omega H}{U_m}$ فرکانس بی‌بعد نوسانات است که عدد استروهال نامیده می‌شود.

برای حل معادلات فوق نیاز به شرایط مرزی و شرط اولیه مناسب داریم. به شکل بی بعد، این شرایط به صورت زیر است:

جریان ورودی: ($X=0$)

$$U = [1 + A_0 \sin(2\pi \cdot St \cdot \tau)], V = 0, \theta = 1 \quad (8)$$

جریان خروجی: ($X = \frac{L}{H}$)

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} = 0, \frac{\partial U}{\partial X} = 0, V = 0 \quad (9)$$

دیواره‌های افقی بالایی و پایینی: ($Y=0, H$)

$$U = V = \theta = 0 \quad (10)$$

همچنین مقدار اولیه دما و سرعت در زمان $\tau = 0$ ، به ترتیب برابر با دمای دیواره (T_W) و صفر در نظر گرفته شده‌اند. در آغاز فرآیند حل عددی معادلات، به کلیه متغیرهای وابسته مقدار صفر به عنوان مقدار اولیه اختصاص داده می‌شود.

۴- محاسبه خواص نانوسیال

برای حل معادلات حاکم بر جریان نانوسیال، نیاز به محاسبه خواص ترموفیزیکی نانوسیال داریم. این ویژگی‌ها شامل ضریب رسانش، لزجت، چگالی، ضریب نفوذ حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه است. مدل‌های مختلفی برای پیش بینی این خواص ارائه شده [۱۷] که در این مقاله سعی بر این بوده است که از جدیدترین و دقیق ترین آنها بهره ببریم.

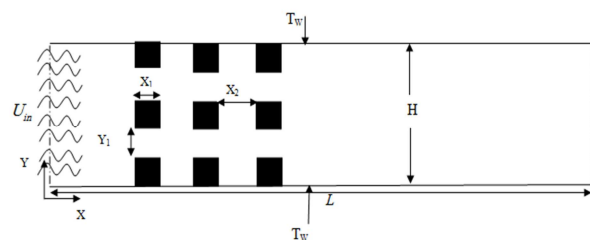
چگالی و گرمای مخصوص نانوسیال‌ها را می‌توان برحسب سیال پایه و خواص نانوذرات به صورت زیر نوشت [۱۷]:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (11)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_p \quad (12)$$

که در این رابطه و روابط بعدی، زیرنویس f ، p و nf به ترتیب برای سیال، نانوذرات و نانوسیال بکار رفته است. ϕ نمایانگر کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه است. برای مدل سازی لزجت موثر

پروفیل سرعتی حاصل مجموع یک پروفیل سرعت تخت و یک پروفیل سرعت نوسانی سینوسی، وارد می‌شود. از اتلاف حرارتی لزج صرف نظر شده و دیواره‌های کانال همدم و موانع مربعی عایق در نظر گرفته شده‌اند. همچنین نانوذرات و سیال پایه دارای تعادل حرارتی می‌باشند و شرط عدم لغزش برای جریان برقرار است. نانوسیال نیز همگن (به معنی پراکندگی یکنواخت نانوذرات در سیال پایه) فرض شده است. در بررسی تاثیر کسر حجمی نانوذرات بر پارامترهای مختلف مساله، با توجه به افزایش احتمال ناپایداری نانوسیال‌ها در کسر حجمی بالاتر از ۰/۰۶ در عمل [۱۶]، حداکثر از این مقدار در شبیه سازی عددی استفاده شده است. ضمناً به منظور رسیدن به حالت توسعه یافتگی در خروجی جریان از کانال، طول آن بعد از موانع به اندازه کافی طویل در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- جریان نوسانی نانوسیال در کانالی با موانع متناوب

۳- معادلات حاکم بر جریان نانوسیال

با انتخاب دستگاه مختصات کارتزین دوبعدی، معادلات بقای حاکم بر جریان اجباری نوسانی نانوسیال عبوری از کانال، شامل معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی، با فرض سیال نیوتنی غیرقابل تراکم به صورت زیر نوشته می شوند:

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

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (3)$$

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

که در بی بعدسازی آنها، از تعریف پارامترهای بی بعد زیر بهره گرفته ایم:

$$X = x/H, \quad Y = y/H, \quad U = u/U_m, \quad V = v/U_m, \\ P = p/\rho_f U_m^2, \quad Pr = \nu_f/\alpha_f, \quad Re = U_m H/\nu_f, \\ \tau = t U_m/H, \quad \theta = (T - T_W)/(T_{in} - T_W) \quad (5)$$

نانوسیال آب-اکسید آلومینیم از رابطه معصومی و همکاران [۱۸] به صورت زیر استفاده می شود:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + \left(\frac{\rho_p V_b d_p^2}{72 N \delta} \right) \quad (۱۳)$$

در رابطه فوق، V_b ، سرعت براونی نانوذرات، برابر است با:

$$V_b = \frac{1}{d_p} \sqrt{\frac{18 k_b T}{\pi \rho_p d_p}} \quad (۱۴)$$

همچنین d_p قطر نانوذرات، $\delta = [(\pi)/(6\phi)]^{1/3} \times d_p$ فاصله بین مراکز نانوذرات و N پارامتری برای تطبیق نتایج با داده های آزمایشگاهی است:

$$N = (c_1 \phi + c_2) d_p + (c_3 \phi + c_4)$$

که ضرایب تجربی آن شامل C_1 ، C_2 ، C_3 و C_4 به ترتیب برابرند با: $-۱/۱۳۳ \times ۱۰^{-۶}$ ، $-۲/۷۷۱ \times ۱۰^{-۶}$ ، $۹/۰ \times ۱۰^{-۸}$ و $-۳/۹۳ \times ۱۰^{-۷}$ [۱۸].

برای محاسبه ضریب هدایت گرمایی نانوسیال آب-اکسید آلومینیم با فرض نانوذرات کروی، رابطه زیر توسط چون و همکارانش [۱۹] پیشنهاد شده است:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 647 \phi^{0.746} \left(\frac{d_f}{d_p} \right)^{0.369} \times \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^{0.747} Pr_f^{0.9955} Re_p^{1.23221} \quad (۱۵)$$

در رابطه فوق Re_p عدد رینولدز نانوذرات است:

$$Re_p = \frac{\rho_f k_b T}{3\pi [A_1 \times 10^{A_2/(T-A_3)}]^2 l_f} \quad (۱۶)$$

$A_1 = 2.414 \times 10^{-5}$ ، $A_2 = 247.8$ ، $A_3 = 140$

همچنین $Pr_f = \mu_f / \rho_f \alpha_f$ عدد پرانتل سیال، d_f قطر مولکول های سیال پایه (برای آب حدود $۲/۸۸$ انگستروم)، d_p قطر مولکول های نانوذرات، k_b ثابت بولتزمن (برابر با $۱/۳۸۰.۷ \times ۱۰^{-۲۳}$) و l_f فاصله آزاد متوسط بین مولکول های آب است که برابر با ۱۷ nm در نظر گرفته می شود [۱۹]. لازم به ذکر است که در برخی مطالعات دیگر، از جمله مقاله ماینتسا و همکاران [۲۰]، دقت بالای مدل فوق تأیید شده است.

برای نانوسیال آب-اکسید تیتانیم، لزجت موثر از رابطه ارائه شده توسط خنافر و وفایی [۱۷] قابل محاسبه است:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + 3.544 \phi + 169.46 \phi^2 \quad (۱۷)$$

قطر نانوذره اکسید تیتانیم در این رابطه ۲۷ nm پیشنهاد شده است. برای نانوذره آب-اکسید مس نیز نگوین و همکارانش [۲۱] رابطه زیر را با در نظر گرفتن قطر ۲۹ nm برای نانوذره اکسید مس ارائه کرده اند:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + 4.75 \phi - 0.319 \phi^2 + 0.051 \phi^3 + 0.009 \phi^4 \quad (۱۸)$$

ضریب هدایت گرمایی برای هر دو نانوسیال آب-اکسید تیتانیم و آب-اکسید مس با فرض نانوذرات کروی شکل از معادله بروگمن [۲۲] قابل محاسبه است:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{1}{4} \left[(3\phi - 1) \frac{k_p}{k_f} + \{3(1 - \phi) - 1\} + \sqrt{A} \right] \quad (۱۹)$$

$$A = \left[(3\phi - 1) \frac{k_p}{k_f} + \{3(1 - \phi) - 1\} \right]^2 + 8 \frac{k_p}{k_f}$$

محاسبات را برای سیال خالص آب و سه نوع نانوذره اکسید مس، اکسید آلومینیم (آلومینا) و اکسید تیتانیم با فرض برقراری شرط عدم لغزش بین آنها انجام خواهیم داد. خصوصیات ترموفیزیکی آب و نانوذرات مختلف در جدول (۱) آمده است [۲۳]:

جدول ۱- خصوصیات ترموفیزیکی سیال پایه آب و نانو ذرات مختلف

ماده	چگالی (kg/m ³)	گرمای ویژه (J/kg.K)	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)
آب خالص	۹۹۷/۱۰	۴۱۷۹/۰	۰/۶۱۳
اکسید آلومینیم	۳۹۷۰/۰	۷۶۵/۰	۴۰/۰
اکسید مس	۳۶۲۰/۰	۵۳۱/۸۰	۷۶/۵۰
اکسید تیتانیم	۴۲۵۰/۰	۶۸۶/۲۰	۸/۹۵۳

۵- محاسبه ضرایب انتقال حرارت و افت فشار

پس از حل عددی معادلات حاکم، برای تعیین نرخ انتقال حرارت، می توان از تعریف عدد نوسلت روی دیواره استفاده کرد. عدد نوسلت موضعی به صورت $Nu = hH / k_f$ نوشته می شود که در آن، h ضریب انتقال حرارت جابجایی بوده و به صورت $h = -k_{nf} (\partial T / \partial y)_w / (T_{in} - T_w)$ قابل بیان است. با استفاده از تعریف دمای بدون بعد θ و جایگذاری h در تعریف عدد نوسلت موضعی، می توان آن را به صورت زیر بازنویسی کرد: [۶ و ۱۴]:

$$Nu = - \frac{k_{nf}}{k_f} \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)_w \quad (۲۰)$$

همچنین اعداد نوسلت متوسط و کلی برابرند با:

$$Nu_m = \frac{1}{L} \int_0^L Nu dx \quad (۲۱)$$

$$Nu_{total} = \frac{1}{\tau_p L} \int_0^{\tau_p} \int_0^L Nu dx d\tau \quad (۲۲)$$

τ_p بیانگر دوره تناوب بی بعد نوسان جریان است که به صورت $\tau_p = 1/St$ تعریف می شود. نسبت عدد نوسلت کلی (برای حالتی که جریان نانوسیال به صورت نوسانی تغییر می کند) به عدد نوسلت در حالت دائم (بدون پالس نوسانی)، به صورت Nu / Nu_S نوشته می شود و از جمله پارامترهایی است که در این مقاله مورد بررسی قرار می گیرد.

برای تعیین میزان افت فشار در جریان داخل کانال نیز می توان از رابطه زیر استفاده کرد [۷]:

۷- بررسی نتایج

برای اثبات عدم وابستگی حل عددی به تعداد نقاط شبکه، پس از تعیین نحوه شبکه بندی میدان حل مساله، بررسی‌هایی برای انتخاب تعداد نقاط محاسباتی شبکه انجام داده‌ایم. تغییرات عدد نوسلت کلی جریان نوسانی نانوسیال در کانال به ازای تعداد نقاط مختلف شبکه در جدول (۲) نشان آورده شده است. در همه محاسبات پیش رو، $H=1m$ و $L=10m$ در نظر گرفته شده است. محاسبات برای همه گام‌های مکانی و زمانی در جهت‌های افقی و عمودی کانال مستطیلی با دمای ثابت انجام شده؛ ولی برای نمونه، عدد نوسلت کلی جریان نانوسیال آب- آلومینا در حالت غیردائم به ازای $\phi=0.02$ ، $Re=100$ و $A_0=St=0.1$ برای تعداد نقاط محاسباتی 20×20 ، 30×40 ، 40×40 ، 40×60 و 60×120 در این جدول جمع آوری شده است.

جدول ۲- بررسی استقلال حل عددی از تعداد نقاط شبکه	
تعداد نقاط شبکه	عدد نوسلت کلی
20×20	۶/۰۸۱
30×20	۷/۴۲۵
30×40	۷/۶۱۲
40×40	۸/۷۱۸ (*)
40×60	۸/۷۲۵
60×60	۸/۷۳۴

همانطور که از جدول (۲) بر می‌آید، با افزایش تعداد نقاط از 20×20 به 40×40 و در نهایت از 40×40 به 60×120 عدد نوسلت کلی به تدریج به حالت ثابتی می‌رسد. با توجه به این که تغییر در عدد نوسلت کلی از تعداد نقاط 40×40 به 60×120 و 80×40 برای محاسبات پیش رو استفاده شده است. اندازه گام مکانی و زمانی در راستای افقی و عمودی به ترتیب برابر با 0.5 و 1 در نظر گرفته شده اند. شکل ۳ نرخ همگرایی را برای متغیر دما (به صورت درصد خطای نسبی برحسب تعداد نقاط شبکه) نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، با افزایش تعداد نقاط و ریزتر شدن شبکه، درصد خطای نسبی کاهش یافته است. با توجه به عدم تغییر قابل توجه در خطا پس از تعداد نقاط 16000 ، در این مقاله از شبکه 40×40 به عنوان شبکه با دقت مناسب و اقتصادی برای انجام محاسبات استفاده شده است.

$$\Delta P_R = 1 - \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (23)$$

۶- روش حل عددی

برای جبری کردن معادلات ۱ تا ۴ به همراه با شرایط مرزی مربوطه، از روش حجم محدود مبتنی بر حجم کنترل استفاده می‌شود. تاثیر خواص نانوذرات بر سیال پایه نیز با بکارگیری معادلات (۱۱) تا (۱۹) طی الگوریتم حل اعمال می‌گردد. با استفاده از روش حجم کنترل، اصل بقاء برای کمیت‌ها در هر گروهی از حجم‌های کنترل و به ازای هر تعداد از گره‌های محاسباتی حتی برای شبکه‌های درشت، ارضا خواهد شد. میدان حل نیز با روش شبکه جابجاشده گسسته شده است. مزیت استفاده از این شیوه، راحتی محاسبه دی‌های جرمی روی سطوح حجم کنترل بدون نیاز به میانبایی است. برای پایداری حل، ترم نفوذ در معادلات مومنتم به روش توان پیرو تخمین زده شده است. همچنین جهت ارتباط بین میدان سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است [۲۴]. برای حل عددی مساله، کدی کامپیوتری به زبان فرترن نوشته شده است.

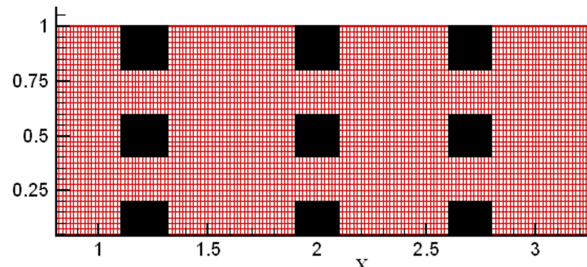
رابطه زیر به عنوان معیار همگرایی حل عددی در مقاله حاضر مورد استفاده قرار گرفته است:

$$\sum_j \sum_I \left| \frac{\zeta^{n+1} - \zeta^n}{\zeta^{n+1}} \right|_{I,j} \leq 10^{-5} \quad (24)$$

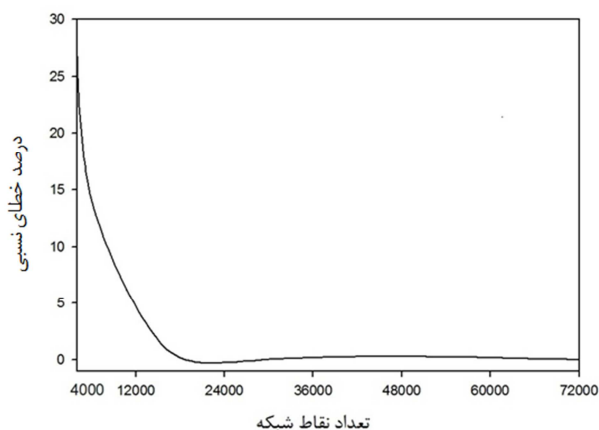
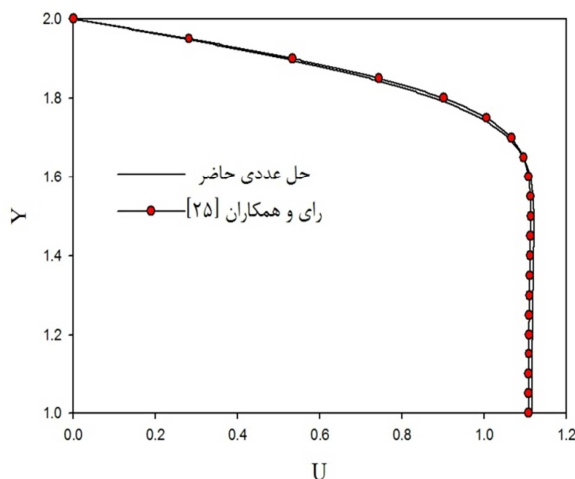
در این رابطه، n تعداد تکرار و ζ معرف متغیر عمومی (U, V, θ) است.

در این مقاله، با توجه به سادگی هندسی و شبیه‌سازی جریان بین موانع مربعی منظم، از شبکه‌بندی باسازمان استفاده شده و انتقال از فضای فیزیکی به محاسباتی با استفاده از روابط جبری مناسب انجام شده است. برای اعمال روش عددی حجم محدود، دامنه‌ی حل به حجم کنترل‌هایی تقسیم می‌شود، به طوری که نقاط شبکه محاسباتی در مرکز حجم کنترل‌ها واقع خواهد شد.

همچنین برای چیدمان گره‌های محاسباتی در دامنه‌ی حل، هر دو توزیع یکنواخت و غیر یکنواخت مورد بررسی قرار گرفت. در شبکه‌بندی غیر یکنواخت، در مجاورت موانع و دیواره‌ها از شبکه‌بندی ریزتری استفاده شد. مقایسه دو روش نشان داد که نتایج حاصل از دو نوع شبکه‌بندی، اختلاف ناچیزی با یکدیگر دارند. لذا استفاده از شبکه‌بندی یکنواخت برای مساله حاضر اقتصادی‌تر تشخیص داده شد. (شکل ۲)



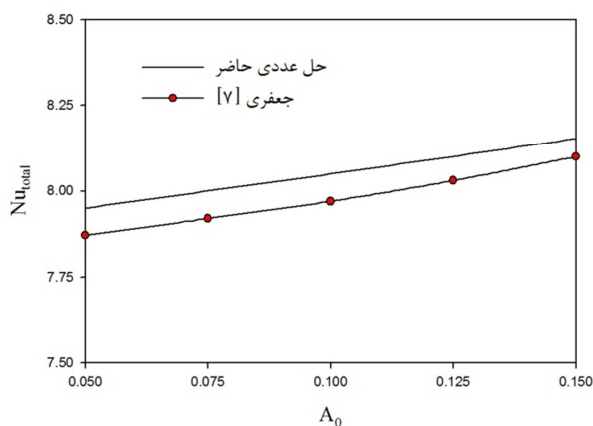
شکل ۲- نمایی از شبکه بندی یکنواخت حوزه محاسباتی



شکل ۳- درصد خطای نسبی محاسبه دما به ازای تعداد نقاط مختلف شبکه محاسباتی

شکل ۴- پروفیل سرعت جریان نوسانی آب خالص در فاصله $X=5$ از ابتدای کانال بدون موانع، $St = 0.1$ ، $A_0 = 0.8$ و $Re=1000$

عدد نوسلت کلی در جریان نوسانی آب خالص در یک کانال به ازای دامنه‌های نوسانی مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل همچنین نتیجه تحقیق جعفری و همکاران [۷] با استفاده از روش شبکه بولتزمن در شرایط مشابه نشان داده شده است. می‌توان دید که عدد نوسلت کلی با افزایش دامنه نوسانی جریان ورودی افزایش قابل توجهی خواهد یافت. همانگونه که در این شکل نیز می‌توان مشاهده کرد، تفاوت بین نتایج دو روش، کمی بیش از یک درصد است.



شکل ۵- تغییرات عدد نوسلت کلی با دامنه نوسان در جریان سیال خالص آب داخل یک کانال؛ $St = 0.1$ و $Re=100$

در شکل ۶ خطوط جریان نوسانی در کانال مانع‌دار در فرکانس‌های نوسانی ۰/۰۱ و ۰/۲۵ نشان داده شده است. با توجه به اینکه افزایش فرکانس نوسانات جریان نانوسیال تأثیری بر دامنه نوسانات سرعت آن نخواهد گذارد، در مقایسه این دو شکل نیز می‌توان دید که افزایش فرکانس نوسانات تغییر محسوسی در شکل خطوط جریان ایجاد نمی‌کند.

جهت اعتبارسنجی عملکرد کد کامپیوتری نوشته شده، در ادامه مقایسه‌هایی با مطالعات مشابه انجام شده توسط جعفری و همکاران [۷]، رای و همکاران [۲۵] و کیهانی و محبی [۲۶] صورت گرفته است. در جدول (۳) تغییرات عدد نوسلت متوسط با بخشی از نتایج کیهانی و محبی [۲۶] که از روش شبکه بولتزمن برای حل جریان سیال بین دو صفحه موازی استفاده کرده اند، در حالت حضور و عدم حضور موانع و به ازای اعداد رینولدز مختلف آورده شده است.

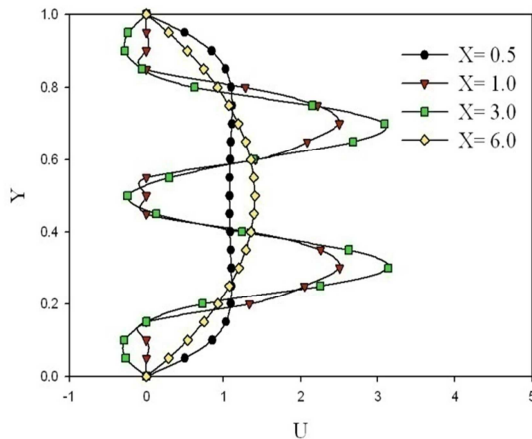
جدول ۳- تغییرات عدد نوسلت متوسط به ازای اعداد رینولدز مختلف

با و بدون حضور موانع			
Nu_m بدون حضور موانع		Nu_m با حضور موانع	
Re=200	Re=200	Re=200	Re=200
۷/۶۳۳	۷/۸۶۰	۸/۸۴۲	۹/۱۹۴
۷/۸۴۴	۸/۹۳۱	۸/۱۴۰	۸/۳۴۰
کیهانی [۲۶]		مطالعه حاضر	

همانگونه که در این جدول می‌توان دید، تطابق مناسبی بین عدد نوسلت متوسط محاسبه شده در تحقیق حاضر و نتایج کیهانی و محبی [۲۶] وجود دارد.

در شکل ۴ پروفیل سرعت سیال خالص آب به ازای $St = 0.1$ ، $Re=1000$ و $A_0 = 0.8$ و در فاصله $X=5$ از ابتدای یک لوله با حل عددی رای و همکاران [۲۵] مقایسه شده است. جریان با یک پروفیل سرعت تخت و یک بخش نوسانی سینوسی بدون مانع در مسیر آن وارد کانال می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود، مطابقت مطلوبی بین نتایج حل عددی حاضر و کار رای و همکارانش [۲۵] وجود دارد. در این شکل می‌توان دید که سرعت در مرکز کانال به ۱/۱ برابر سرعت متوسط ورودی رسیده است که نشان از عدم توسعه یافتگی هیدرولیکی جریان در عدد رینولدز ۱۰۰۰ در این فاصله افقی دارد.

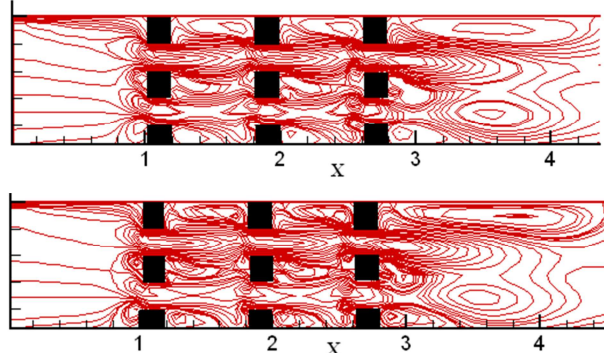
موقعیت‌های $X=1.0$ ، $X=2.5$ و $X=3.0$ که مربوط با موقعیت‌های قبل، بین و بعد از موانع مربعی است، نمودار سرعت بی بعد به علت تأثیر موانع و ایجاد نواحی چرخشی، دچار اعوجاج شده و به تدریج با دور شدن از موانع به شکل اولیه خود باز می گردد. بعد از حدود فاصله $X=6.0$ ، با افزایش سرعت پروفیل آن به شکل سهموی کامل در آمده و لذا به توسعه یافتگی هیدرولیکی رسیده است.



شکل ۸- پروفیل سرعت نانوسیال آب-آلومینا ($\phi=0.02$) در مقاطع مختلف کانال به ازای $Re=100$ و $A_0=St=0.1$

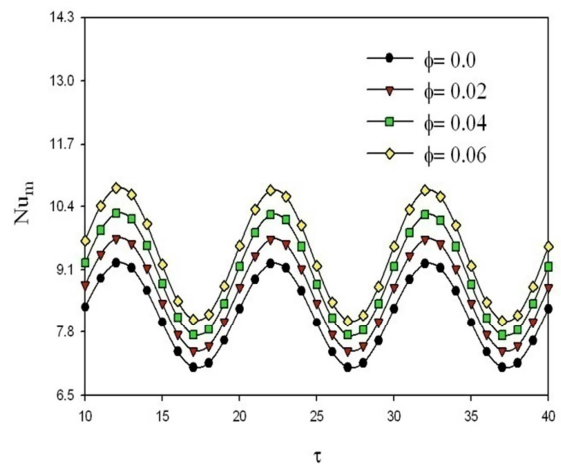
شکل ۹ تغییرات عدد نوسلت متوسط نانوسیال آب-آلومینا ($\phi=0.04$) را نسبت به زمان بی بعد به ازای $Re=100$ و $St=0.1$ در دامنه‌های نوسانی مختلف نشان می دهد. با افزایش دامنه نوسان، مقدار عدد نوسلت افزایش یافته که می توان آن را ناشی از رشد سریعتر لایه مرزی و اختلاط بیشتر در جریان دانست؛ با این حال دامنه نوسانات تأثیری بر دوره تناوب و یا به بیان دیگر، زمان برخورد نانوسیال با دیواره‌ها نگذاشته است. در شکل ۹ همچنین می توان تأثیر نوسانی شدن جریان نانوسیال را بر افزایش عدد نوسلت مشاهده کرد. با در نظر گرفتن اینکه عدد نوسلت در جریان دائم سیال خالص برابر $8/140$ است، در این شکل می توان دید که عدد نوسلت متوسط در بعضی از زمان‌های بی بعد (از جمله: $\tau=12, 22, 32, 42, 52$) به حدود $1/3$ برابر جریان بدون نوسان می رسد.

تغییرات عدد نوسلت کلی نانوسیال آب-آلومینا را با کسر حجمی نانوذره در فرکانس‌های نوسانی مختلف در شکل ۱۰ می توان مشاهده کرد. با بالا رفتن درصد نانوذرات آلومینا در آب، گرادیان دما و ضریب هدایت حرارتی موثر نانوسیال نسبت به سیال پایه بالا می رود که در نتیجه آن، عدد نوسلت کلی افزایش می یابد. با اینحال افزایش فرکانس نوسانات موجب افزایش اندکی در عدد نوسلت شده است. نکته دیگری که می توان از این شکل استنباط کرد آن است که افزایش عدد نوسلت کلی با کسر حجمی نانوذرات در همه فرکانس‌ها بصورت خطی بوده است؛ لذا می توان این ارتباط را به صورت $Nu_{total} = A\phi + B$ نوشت، که مقادیر شیب A برای فرکانس‌های 0.1 ، 0.05 ، 0.01 و 0.15 به ترتیب برابر با $21/4$ ، $21/6$ و $21/8$ بوده و پارامتر B نیز برای هر فرکانس، برابر عرض از مبدا نمودار است.



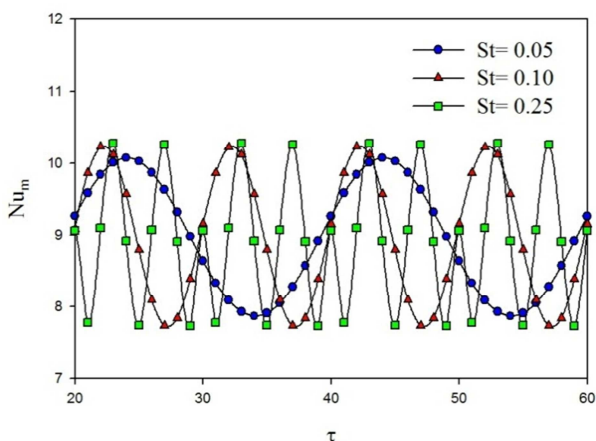
شکل ۶- خطوط جریان نانوسیال آب-آلومینا ($\phi=0.04$) در کانالی موانع دار در فرکانس $St=0.25$ (بالا) و $St=0.01$ (پایین)، به ازای $Re=100$ و $A_0=0.1$

شکل ۷ تغییرات عدد نوسلت متوسط جریان نوسانی نانوسیال آب-آلومینا را با زمان در کسرهای حجمی مختلف نانوذره در آب و به ازای $Re=100$ و $A_0=St=0.1$ نشان می دهد. همانگونه که در شکل مشاهده می شود، افزایش کسر حجمی نانوذرات در همه زمان‌ها منجر به افزایش عدد نوسلت متوسط شده است، چراکه موجب افزایش چگالی نانوسیال آب-آلومینا و در نتیجه افزایش نیروهای اینرسی در جریان شده که این امر موجب افزایش گرادیان دما یا عدد نوسلت می گردد. از طرف دیگر، افزایش ضریب هدایت حرارتی موثر نانوسیال نسبت به سیال پایه نیز عاملی دیگر در افزایش عدد نوسلت است. به عبارت دیگر با افزودن نانوذرات آلومینا به آب، ضخامت لایه مرزی گرمایی در مجاورت دیواره‌های کانال کاهش یافته و ضریب انتقال حرارت جابجایی را بالا می برد.

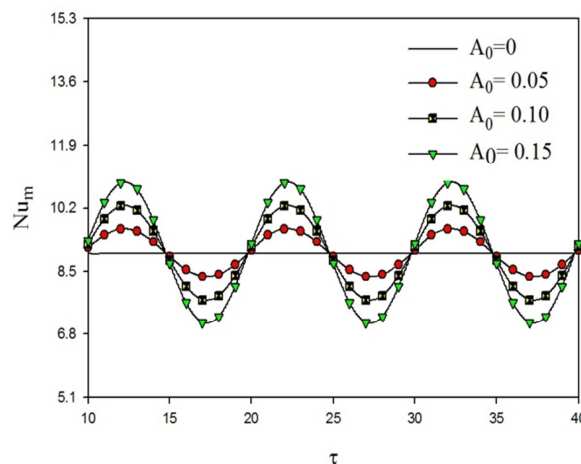


شکل ۷- عدد نوسلت متوسط جریان نوسانی برحسب زمان برای نانوسیال آب-آلومینا در کسرهای حجمی مختلف و به ازای $Re=100$ و $A_0=St=0.1$

پروفیل سرعت نانوسیال آب-آلومینا در فواصل افقی مختلف از ابتدای کانال به $\phi=0.02$ ، $A_0=St=0.1$ و $Re=100$ در شکل ۸ رسم شده است. همانگونه که ملاحظه می شود، با نزدیک شدن جریان نانوسیال به موانع مربعی، نمودار سرعت از حالت سهموی خود خارج می شود. لذا در

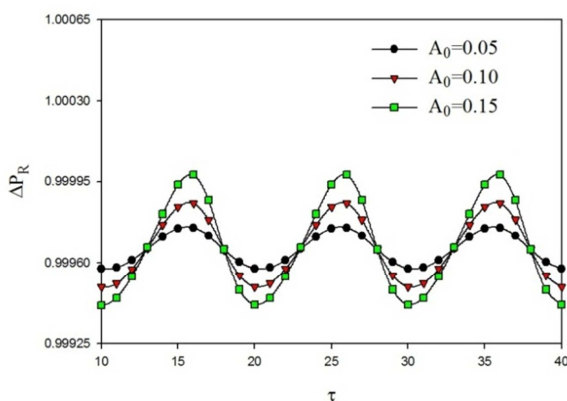


شکل ۱۱- نوسانات عدد نوسلت متوسط نانوسیال آب-آلومینا
($\phi=0.04$) در فرکانس‌های مختلف، به ازای $Re=100$ و $A_0=0.1$



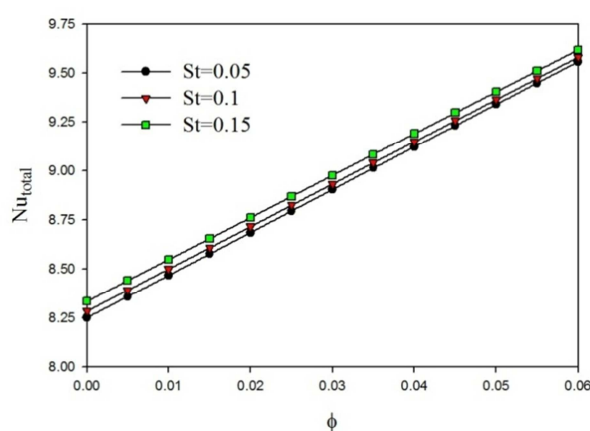
شکل ۹- تغییرات عدد نوسلت متوسط نانوسیال آب-آلومینا
($\phi=0.04$) با زمان در دامنه‌های نوسانی مختلف

افت فشار در جریان نانوسیال آب-آلومینا ($\phi=0.04$) برحسب زمان در چند دامنه نوسانی مختلف در شکل ۱۲ نشان داده شده است. می‌توان دید که تغییرات افت فشار نیز متأثر از تغییرات جریان ورودی، به صورت سینوسی در نوسان است. مشاهده می‌شود که با بالا رفتن دامنه نوسانات، افزایش قابل ملاحظه‌ای در نقاط پیک نمودار ایجاد می‌شود؛ لذا افت فشار در کانال بشدت تحت تأثیر دامنه نوسانات سرعت جریان ورودی خواهد بود.



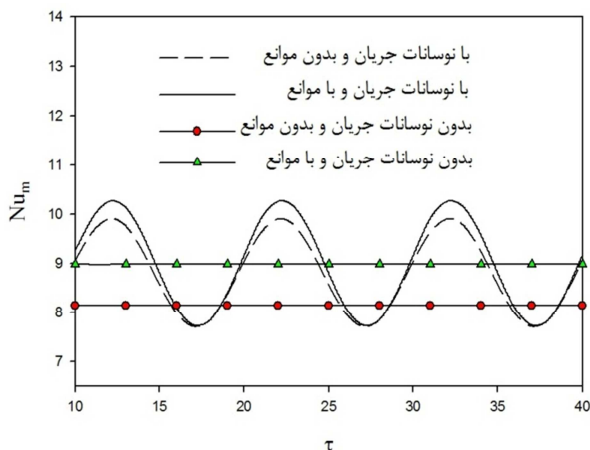
شکل ۱۲- افت فشار نسبت به زمان در جریان نانوسیال آب-آلومینا
($\phi=0.04$) به ازای دامنه‌های نوسانی مختلف، $St=0.1$ و $Re=100$

در شکل ۱۳ اثر کسر حجمی نانوذرات را بر افت فشار در جریان نانوسیال آب-آلومینا می‌توان دید. در این شکل بوضوح می‌توان دید که با بالا رفتن کسر حجمی نانوذرات، افت فشار در کانال افزایش می‌یابد. این افزایش ناشی از تغییر در خواص نانوسیال (لزجت و چگالی) نسبت به سیال پایه است. از طرفی، با افزایش حرکات براونی نانوذرات، لزجت (و اصطکاک) در جریان نانوسیال به واسطه افزایش مومنتم ناشی از این تحرکات افزایش می‌یابد (رابطه ۱۳ نیز این موضوع را تایید می‌کند). افزایش لزجت و متعاقب آن افزایش تنش برشی در نزدیکی دیواره، منجر به افزایش افت فشار خواهد شد.



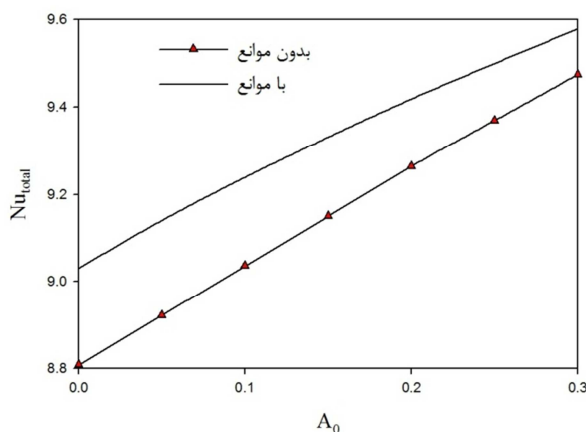
شکل ۱۰- تأثیر کسر حجمی نانوذره بر عدد نوسلت کلی نانوسیال آب-آلومینا در فرکانس‌های مختلف، به ازای $A_0=0.1$ و $Re=100$

در شکل ۱۱ نوسانات عدد نوسلت متوسط نانوسیال آب-آلومینا ($\phi=0.04$) در فرکانس‌های مختلف رسم شده است. با دقت در این نمودار می‌توان دید که با افزایش عدد استروهال، بیشینه عدد نوسلت متوسط که در برخی زمان‌ها حاصل می‌گردد، مقدار کمی بالا رفته است. بنابراین می‌توان گفت که با افزایش فرکانس نوسان، علاوه بر کاهش زمان برخورد نانوسیال با دیواره کانال، تبادل حرارت آن با سطوح نیز افزایش اندکی را تجربه کرده است.



شکل ۱۵- مقایسه تغییرات عدد نوسلت متوسط نانوسیال آب-آلومینا $(\phi=0.04)$ در زمان برای چهار حالت مختلف، به ازای $Re=100$ و $A_0=St=0.1$

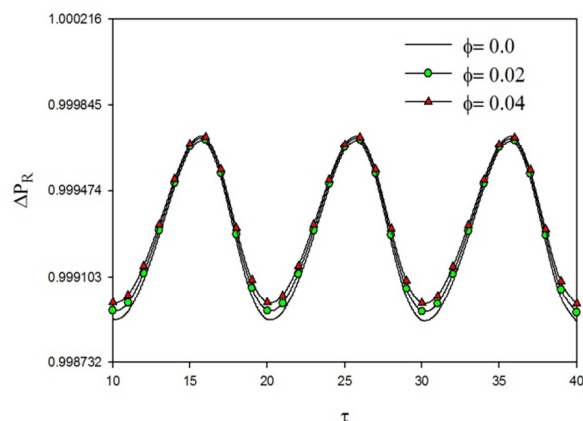
در شکل ۱۶ تأثیر دامنه نوسانات بر عدد نوسلت کلی در دو حالت وجود یا عدم وجود موانع جریانی بررسی شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دامنه نوسانات، میزان عدد نوسلت کلی در هر دو حالت افزایش داشته است. با این حال اگرچه حضور موانع متناوب بطور کلی باعث افزایش عدد نوسلت کلی در همه دامنه نوسانات شده است، ولی در دامنه‌های نوسانی پایین‌تر، تأثیر موانع بر افزایش آن مشهودتر است.



شکل ۱۶- تغییرات عدد نوسلت کلی نانوسیال آب-آلومینا $(\phi=0.04)$ با دامنه نوسانات، برای محیط مانع‌دار و بدون مانع، به ازای $Re=100$ و $St=0.1$

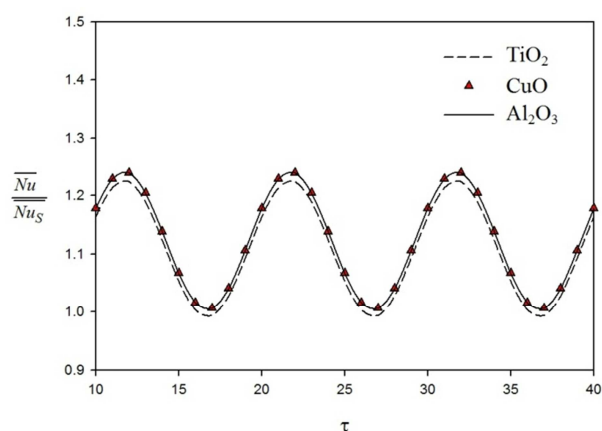
۸- نتیجه‌گیری

آنچه در این مقاله نسبت به تحقیقات مشابه گذشته برتری دارد، بررسی تأثیر همزمان نوسانی کردن جریان و افزودن نانوذرات مختلف به سیال پایه و مطالعه تأثیر آن‌ها بر افزایش انتقال حرارت در جریان غیردائم است. علاوه بر این، مدل انتخاب شده، شامل کانالی با موانع متناوب، یکی از متداول‌ترین هندسه‌ها در کاربردهای مختلف می‌باشد. در این تحقیق همچنین، نقش پارامترهای مختلفی همچون عدد رینولدز، فرکانس نوسانات، دامنه نوسانات و کسر حجمی و نوع نانوذرات بر سرعت جریان، افت فشار، نوسلت متوسط و کلی در کانال بررسی



شکل ۱۳- نوسانات افت فشار نسبی جریان نانوسیال آب-آلومینا در کسرهای حجمی مختلف نانوذر، به ازای $Re=100$ و $A_0=St=0.1$

شکل ۱۴ تأثیر بکارگیری نانوذرات متفاوت (همگی با $\phi=0.04$) را بر تغییرات عدد نوسلت نسبی به ازای $A_0=St=0.1$ و در عدد رینولدز ۱۰۰ نشان می‌دهد. می‌توان دید که مقادیر اکسترم عدد نوسلت نسبی برای نانوسیال با اکسید تیتانیوم کمتر از سایرین است، به طوریکه مقدار ماکزیمم آن برای نانوسیال‌های حاوی نانوذرات آلومینا و اکسید مس به ترتیب برابر با ۱۱/۴۳۴۸ و ۱۱/۴۳۸۳ بوده و برای نانوسیال با اکسید تیتانیوم به ۱۱/۲۹۹۶ رسیده است.



شکل ۱۴- نوسانات عدد نوسلت متوسط نسبی برای نانوذرات مختلف $(\phi=0.04)$ به ازای $Re=100$ و $A_0=St=0.1$

تأثیر حضور یا عدم حضور موانع متناوب در مسیر جریان نانوسیال آب-آلومینا $(\phi=0.04)$ را همزمان با اثر وجود یا عدم وجود نوسان در جریان، می‌توان در شکل ۱۵ دید. از این شکل بوضوح می‌توان دریافت که بیشترین میزان انتقال حرارت برای حالتی است که جریان نوسانی نانوسیال در محیطی مانع‌دار داشته باشیم. این تفاوت انتقال حرارت ناشی از رشد سریع‌تر لایه مرزی و ایجاد اختلاط بیشتر در نانوسیال بدلیل وجود موانع در مسیر و ایجاد نوسان در جریان است.

شده است. محاسبات عددی برای محدوده اعداد رینولدز ۱۰۰ تا ۲۰۰، دامنه نوسانات ۰ تا ۱، فرکانس ۰/۰۱ تا ۰/۲۵، درصدحجمی نانوذرات ۰ تا ۰/۰۶ و برای سه نوع نانوسیال آب- آلومینا، آب-اکسید مس و آب- اکسید تیتانیوم انجام شده است. به طور کلی نتایج بدست آمده در این مقاله را می توان در موارد زیر جمع بندی کرد:

- با افزایش کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه، افزایش عدد رینولدز و همچنین بالا رفتن دامنه نوسانات، انتقال حرارت در کانال بیشتر می شود. بطوریکه با تغییر دامنه نوسانات از ۰/۰۵ به ۰/۱۵، افزایش عدد نوسلت کلی حدود دو درصد، و با افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰ به ۲۰۰ میزان افزایش آن در حدود ۱۱ درصد است. با افزایش کسر حجمی نانوذرات از ۰/۰۱ به ۰/۰۲ نیز، عدد نوسلت کلی حدود سه درصد افزایش یافته است.

- در شکل و اندازه پروفیل سرعت جریان سیال پایه، با افزودن نانوذرات مختلف تا کسر حجمی ۰/۰۶ تغییر محسوسی ایجاد نمی شود.

- تغییر در دامنه نوسانات، بر مقدار پیک نمودار نوسانی فشار تاثیرگذار است؛ بطوریکه با ۰/۱ افزایش در دامنه نوسانات، افزایش افت فشاری در حدود ۰/۵ درصد بوجود آمده است. این در حالیست که افزایش فرکانس نوسانات تأثیر محسوسی بر انتقال حرارت و افت فشار در کانال نمی گذارد.

- عدد نوسلت متوسط نوسانی برای نانوسیال آب- اکسید تیتانیوم از سایر نانوسیال های مورد مطالعه پایین تر است. به عبارتی، میزان افزایش عدد نوسلت به واسطه افزودن نانوذرات اکسید تیتانیوم به آب خالص نسبت به نانوسیال آب- اکسید مس حدود ۱/۵ درصد کمتر است.

- استفاده از محیط مانع دار در دامنه های نوسانی مختلف می تواند باعث افزایش عدد نوسلت کلی و در نتیجه بهبود انتقال حرارت از کانال شود؛ گرچه بدیهی است که موجب افزایش افت فشار از کانال نیز خواهد شد.

- بطور کلی افزودن نانوذرات به سیال پایه و نوسانی کردن جریان، هردو افزایش انتقال حرارت را موجب می شوند. با این حال هر دوی آنها عاملی در جهت بالا رفتن افت فشار در جریان نیز هستند. افزایش درصد حجمی نانوذرات به بیش از ۰/۰۶ از سوی دیگر منجر به ناپایداری در نانوسیال نیز خواهد شد. برای افزودن دامنه نوسانات نیز، نیاز به منبع نوسانی قویتری داریم که این خود مستلزم صرف هزینه بیشتر است. لذا لزوم انتخاب حالتی بهینه به منظور افزایش انتقال حرارت با صرف هزینه کمتر به نظر می رسد که با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه، افزایش کسر حجمی نانوذرات تا ۰/۰۶ و نوسانی کردن جریان نانوسیال با دامنه ۰/۵ مطلوب خواهد بود.

۹- فهرست علائم

A_0	دامنه بی بعد نوسانات
C_p	گرمای ویژه ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
d	قطر مولکول ها (nm)
H	ارتفاع کانال (m)
k	ضریب هدایت حرارتی ($Wm^{-1}K^{-1}$)

L	طول کانال (m)
Nu	عدد نوسلت
P	فشار بی بعد
Pr	عدد پرانتل
Re	عدد رینولدز
St	عدد استروهل (فرکانس بی بعد نوسانات)
t	زمان (s)
T	دما (K)
u	مولفه افقی سرعت (ms^{-1})
U	سرعت افقی بی بعد
v	مولفه عمودی سرعت (ms^{-1})
V	سرعت عمودی بی بعد
x	مختصه افقی (m)
X	مختصه افقی بدون بعد
y	مختصه عمودی (m)
Y	مختصه عمودی بدون بعد

علائم یونانی

α	ضریب نفوذ حرارتی (m^2s^{-1})
Δ	تغییرات (افت)
θ	دمای بدون بعد
μ	لزجت دینامیکی ($Pa.s$)
ν	لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})
ρ	چگالی (Kgm^{-3})
τ	زمان بی بعد
τ_p	دوره تناوب بی بعد ($\tau_p = \frac{1}{St}$)
ϕ	کسر حجمی نانوذرات (%)
ω	فرکانس زاویه ای ($\omega = 2\pi\Omega$)

زیرنویس ها

f	سیال
in	ورودی
m	متوسط
nf	نانوسیال
out	خروجی
p	نانوذرات
R	نسبی
S	دائم
$total$	کلی
W	دیواره

- Physics D: Applied Physics, Vol. 42, pp. 055501–055506, 2009.
- [19] Chon C.H., Kihm K.D., Lee S.P., Choi S.U.S., Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al_2O_3) thermal conductivity enhancement, *Applied Physics Letters*, Vol.87 pp.153107–153110, 2005.
- [20] Mints H.A., Roy G., Nguyen C.T., Doucet D., New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, pp. 363–371, 2009.
- [21] Nguyen C.T., Desgrange F., Roy G., Galanis T., Maré, Boucher S., Mints H.A., Temperature and particle-size dependent viscosity data for waterbased nanofluids–hysteresis phenomenon, *International Journal of Heat Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 1492–1506, 2007.
- [22] Bruggeman D.A.G., Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen substanzen, I. Dielektrizitätskonstanten und leitfähigkeiten der mischkörper aus isotropen substanzen, *Ann. Phys., Leipzig*, Vol. 24, pp. 636–679, 1935.
- [23] Mahdy A., Unsteady mixed convection boundary layer flow and heat transfer of nanofluids due to stretching sheet, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 249, pp.248–255, 2012.
- [24] Patankar S.V., Numerical Heat transfer and fluid flow, Hemisphere Publishing Corporation, Washington D.C., 1980.
- [25] Ray S., Ünsal B., Durst F., Development length of sinusoidally pulsating laminar pipe flows in moderate and high Reynolds number regimes, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 37, pp. 167–176, 2012.
- [26] Kayhani M.M., Mohebi R., Numerical Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer on the Porous Media Between Two Parallel Plates Using the Lattice Boltzmann Method, *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 9, pp.63–73, 2011.
- [1] Matsumoto M., Vortex Shedding of Bluff Bodies A Review, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 13, pp. 791–811, 1999.
- [2] Kaviany M., Principles of Heat Transfer in Porous Media, Springer, 1995.
- [3] Serna J., Velasco F.J.S., Soto Meca A., Application of network simulation method to viscous flows: The nanofluid heated lid cavity under pulsating flow, *International Journal of Computers & Fluids*, Vol. 91, pp.10–20, 2014.
- [4] Eastman J.A., Choi S.U.S., Li S., Yu W., Thomson L.J., Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, *Appl Phys Lett*, 78, February, pp. 718–20, 2001.
- [5] Chang W., Pu-zhen G., Si-chao T., Chao X., Theoretical analysis of phase-lag in low frequency laminar pulsating flow, *Journal of Nuclear Energy*, Vol. 58, pp. 45–51, 2012.
- [6] Rahgoshay M., Ranjbar A.A., Ramiar A., Laminar pulsating flow of nanofluids in a circular tube with isothermal wall, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 463–469, 2012.
- [7] Jafari M., Farhadi M., Sedighi K., Pulsating flow effects on convection heat transfer in a corrugated channel: A LBM approach, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 146–154, 2013.
- [8] Lau S.C., Cervantes J.J., Han C., Rudolph R.J., Flannery K., Measurements of Wall Heat (Mass) Transfer for Flow through Blockages with Round and Square Holes in a Wide Rectangular Channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 3991–4001, 2003.
- [9] Zhao C.Y., Dai L.N., Tang G.H., Qu Z.G., Li Z.Y., Numerical Study of Natural Convection in Porous Media (Metals) Using Lattice Boltzmann Method (LBM), *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 31, No. 5, pp. 925–934, 2010.
- [10] Mulcahey T.I., Pathak M.G., Ghiaasiaan S.M., The effect of flow pulsation on drag and heat transfer in an array of heated square cylinders, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 64, pp. 105–120, 2013.
- [11] Kato S., Okuyama K., T., Ichikawa S., Mori A, single, straight-tube pulsating heat pipe (examination of a mechanism for the enhancement of heat transport)”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 64, pp. 254–262, 2013.
- [12] Ziaei-Rad M., Elyasi P., Investigation of laminar pulsating nanofluid flow and heat transfer in a rectangular channel, *Journal of Nanostructures*, Vol. 3, No. 3, pp. 289–301, 2013.
- [13] Mohamadpour J., Rajabi M., Ahmadi A., Numerical analysis of turbulent flow and heat transfer from pulsating impinging jet to concave surface, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 129–137, 2013.
- [14] Nouri R., Gorji M., Domiri Ganji D., Numerical investigation of magnetic field effect on forced convection heat transfer of nanofluid in a sinusoidal channel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 14, pp. 43–53, 2013.
- [15] Teamah M.A., El-Maghlany W.M., Khairat Dawood M.M., Numerical Simulation of Laminar Forced Convection in Horizontal Pipe Partially or Completely Filled with Porous Material, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, No. 8, pp. 1512–1522, 2011.
- [16] John T., Krishnakumar T. S., Experimental Studies of Thermal Conductivity, Viscosity and Stability of Ethylene Glycol Nanofluids, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, Vol. 2, Special Issue 1, pp.1–7, December 2013.
- [17] Khanafer Kh., Vafai K., A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids, *International Journal of Heat Mass Transfer*, Vol.54, pp. 4410–4428, 2011.
- [18] Masoumi N., Sohrabi N., Behzadmehr A.A., New model for calculating the effective viscosity of nanofluids, *Journal of*