

بررسی عددی جریان نوسانی نانوسیال در کانال مستطیلی شکل در حالت غیر دائم

مسعود ضیائی راد^۱ و پیمان الیاسی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: جریان نوسانی، نانوسیال، کانال مستطیلی، حالت غیر دائم، حل عددی.</p>	<p>در این مقاله جریان آرام نوسانی نانوسیال عبوری از یک کانال مستطیلی با دیواره‌های دما ثابت را در حالت غیردائم به صورت عددی مورد مطالعه قرار داده ایم. برای این منظور دستگاه معادلات دیفرانسیل حاکم بر مدل دوبعدی جریان نانوسیال و انتقال حرارت در کانال به صورت جبری گسسته سازی شده و با استفاده از الگوریتم سیمپل حل شده است. تاثیر پارامترهای مختلفی از جمله فرکانس نوسانات، عدد رینولدز، دامنه نوسانات و همچنین اثر کسر حجمی نانوذرات را بر روی سرعت افقی، افت فشار و عدد ناسلت در کانال بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دامنه نوسان تاثیری بر روی دوره تناوب نوسانات و مدت زمان برخورد نانوسیال با دیواره نمی‌گذارد و موجب افزایش عدد ناسلت می‌شود. همچنین با افزایش فرکانس نوسانات، تعداد نوسانات افزایش یافته، دوره تناوب نوسانات کاهش یافته و مدت زمان برخورد نانوسیال با دیواره کاهش یافته است، ولی تاثیر محسوسی بر افزایش عدد ناسلت نمی‌گذارد. علاوه بر آن، با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات، میزان انتقال حرارت از نانوسیال نیز افزایش می‌یابد. همچنین با بررسی اثر جریان نوسانی بر روی نانوذرات مختلف، مشخص شد که بیشینه عدد ناسلت برای سیال حاوی نانوذرات نقره از دیگر سیالها بیشتر است.</p>

۱- مقدمه

سیستم‌های سرمایشی و گرمایشی نظیر مبدل‌های حرارتی و برج‌های خنک کننده به حداکثر خود برسند. برای افزایش انتقال حرارت می‌توان از تغییرات هندسه جریان، شرایط مرزی و یا افزایش قابلیت هدایت حرارتی سیال استفاده کرد. به علت محدودیت‌های موجود در تغییرات هندسه و شرایط مرزی، بهترین گزینه برای محققان افزایش قابلیت هدایت حرارتی سیال می‌باشد. این مساله از طریق افزودنی‌هایی نظیر نانوساختارها به سیال پایه و پدیده نوسان در نانوسیال به عنوان یک ایده جدید در زمینه مکانیک سیالات و انتقال حرارت، امکان پذیر است که در ادامه به توضیح و چگونگی این مساله می‌پردازیم.

یکی از مسائلی که امروزه در فرآیندهای انتقال حرارت مطرح می‌شود لزوم افزایش قابل توجه شار حرارتی و کوچک‌سازی تجهیزات انتقال حرارت است. از آنجا که افزایش انتقال حرارت یکی از چالش‌های پیش روی بیشتر صنایع می‌باشد و با توجه به پایان‌پذیری منابع انرژی فسیلی، ضروری است که تا حد ممکن راندمان انرژی

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: paymanelyasi@gmail.com

۱. استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اصفهان

۲. کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهرکرد

یکی از مزایای پدیده نوسان در نانوسیال، ایجاد تاخیر در فرایند ته‌نشینی نانوذرات است. در مقایسه با میکروذرات، نانوذرات دارای سطح نسبی بزرگتر، مومنتم ذره کمتر، تحرک بالاتر، پایداری بهتر هستند و مهم تر از همه، اینکه ضریب هدایتی مخلوط را به شدت افزایش می‌دهند. این موارد سبب می‌شود که نانوسیالات کاربردهای وسیعی در خنک کننده‌ها، روانکارها، سیالات هیدرولیکی و سیالات برش‌دهنده فلزات داشته باشند. علاوه بر این، افت فشار و سایش مکانیکی ناچیز، محققین را به استفاده از نانوسیالات برای توسعه نسل آینده مبدل‌های حرارتی مینیاتوری تشویق می‌کند. جریان‌های ارتعاشی نیز با کاهش ضخامت لایه مرزی موجب افزایش انتقال حرارت می‌شوند و لذا حضور نانوذرات در جریان‌های نوسانی می‌تواند باعث افزایش قابل توجهی در میزان انتقال حرارت شود.

انتقال حرارت در جریان ورودی نوسانی نانوسیال در محدوده وسیعی از مسائل مهندسی همچون سیستم‌های بیوسیالی گردش خون، دستگاه تنفسی انسان، پمپ‌های رفت و برگشتی یا جریان مثبت، در موتورهای اشتعال جرقه ای به عنوان نوسانگر و مدیریت حرارتی سیستم‌های الکترونیکی کاربرد و اهمیت دارند. یکی از مهمترین کاربردهای همزمان نانوسیالات و جریان‌های نوسانی برای خنک‌سازی رآکتورهای هسته‌ای است. با توجه به اینکه جریان سیال برای خنک کردن رآکتورهای هسته‌ای به صورت تناوبی در حال نوسان می‌باشد؛ ضرورت استفاده از جریان‌های نوسانی سینوسی نانوسیال برای افزایش انتقال حرارت در رآکتورهای هسته‌ای دو چندان افزایش می‌یابد [۱]. برای برقراری جریان نوسانی سینوسی در ورودی کانال می‌توان از منبع مولد نوسان و یا اثر حرکت موانع متحرک بر یکدیگر استفاده کرد.

مطالعات زیادی بر روی جریان‌های ارتعاشی و تاثیرات آن بر روی انتقال حرارت به صورت تجربی و عددی انجام شده است، اما تعداد محدودی از محققان بر روی جریان نوسانی نانوسیال مطالعه کرده‌اند. رهگشای و همکاران [۲]

به صورت عددی جریان نانوسیال نوسانی آرام در یک لوله با دمای ثابت را مورد مطالعه قرار دادند. جریان در ورودی شامل یک جزء ثابت و یک جزء نوسانی بوده که با زمان به صورت سینوسی تغییر می‌کند. آنها برای حل مساله از روش عددی حجم محدود و الگوریتم سیمپل استفاده کردند و دریافتند که افزایش کسر حجمی نانوذرات تغییرات محسوسی در افت فشار نداشته و انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. همچنین مشاهده کردند که افزایش فرکانس نوسانات تاثیری بر افزایش انتقال حرارت ندارد و عدد ناسلت نسبی نیز به ازای فرکانس و دامنه مشخص، با گذشت زمان به صورت نوسانی تغییر می‌کند. اکدج [۳] مطالعات خود را بر روی جریان نوسانی در کانالی که بخشی از دیواره پایین آن تحت شار حرارتی و بخشی آدیاباتیک بود، با عدد رینولدز ۱۲۵ و عدد پرانتل ۰/۷۱ انجام داد. وی به این نتیجه رسید که میزان انتقال حرارت به شدت تحت تاثیر تغییرات اندازه دامنه و شدت فرکانس بوده و بیشترین میزان انتقال حرارت در فرکانس های کم و دامنه‌های ارتعاشی بالا اتفاق می‌افتد. ایلساید و همکارانش [۴] مطالعات خود را بر روی جریان نوسانی مغشوش در لوله به صورت تجربی انجام دادند و متوجه شدند که با قرار دادن منبع نوسانی در ورودی جریان، مقدار عدد ناسلت متوسط در فرکانس ثابت با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. همچنین دریافتند که با افزایش فرکانس جریان ورودی، تغییرات عدد ناسلت متوسط متغیر خواهد بود. مهتا و خاندکا [۵] جریان نوسانی آرام در یک لوله با دمای ثابت و بین دو صفحه موازی با شار حرارتی ثابت را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. آنها برای گسسته سازی معادلات از الگوریتم سیمپل و برای حل آنها از نرم‌افزار فلونت بهره بردند و به این نتیجه رسیدند که در فرکانس‌های ۱ تا ۱۰ هرتز و دامنه ۰/۲ تا ۰/۴، عدد ناسلت در حال توسعه برای جریان ورودی نوسانی، تفاوت چندانی با حالت دائم ندارد. آنها همچنین اشاره کردند که افزایش فرکانس نوسانات، دامنه نوسانات و همچنین عدد رینولدز، تاثیر قابل توجهی بر روی انتقال

حرارت ندارد. چاتوپادهای و همکاران [۶] جریان نوسانی آرام در یک لوله با دمای ثابت را مورد مطالعه عددی قرار دادند. جریان در ورودی شامل یک جزء ثابت و یک جزء نوسانی بوده که با زمان به صورت سینوسی تغییر می‌کرد. آن‌ها برای حل مساله از الگوریتم سیمپل استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که در فرکانس‌های صفر تا ۲۰ هرتز و دامنه صفر تا یک، جریان نوسانی هیچ اثری بر روی انتقال حرارت ندارد. رای و همکاران [۷] به صورت عددی جریان نوسانی سیال در یک لوله با دمای ثابت را در محدوده اعداد رینولدز ۱۰ تا ۲۰۰۰ در حالت غیردائم مورد مطالعه قرار دادند. نرخ جریان جرمی در ورودی شامل یک جزء ثابت و یک جزء نوسانی بوده که با زمان به صورت سینوسی تغییر می‌کرد. آن‌ها برای حل معادلات ناویر-استوکس و انرژی، از شبکه همجا و از تکنیک درونیابی مومنتم رای و چو^۱ در الگوریتم سیمپل استفاده کردند. نتایج حل آن‌ها نشان می‌داد که پروفیل سرعت در نواحی ورودی لوله همانند حالتی است که مساله را در حالت دائم بررسی کنیم اما در نواحی دور از جریان پایین دست پروفیل سرعت دچار تغییرات قابل ملاحظه‌ای نسبت به حالت دائم می‌شود. همچنین آن‌ها متوجه شدند که طول ناحیه توسعه یافتگی جریان به ازای اعداد رینولدز، فرکانس و دامنه‌ی نوسانات بالا تغییر عمده‌ای با یکدیگر دارند. جعفری و همکاران [۸] اثر دیواره‌ی موجی شکل را بر انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در یک محفظه با درب متحرک، با استفاده از روش شبکه بولتزنم مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش دامنه دیواره موجی باعث کاهش مقدار متوسط عدد ناسلت در عدد ریچاردسون‌های بالا می‌شود. همچنین اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه تاثیرات قابل توجهی بر میدان جریان و دما در جابجایی ترکیبی می‌گذارد که این تاثیرات در عددهای ریچاردسون کم بیشتر است. کاتو و همکاران [۹] به صورت تجربی به بررسی تاثیرات جریان

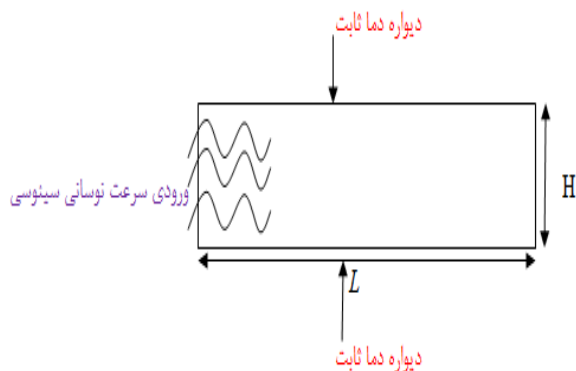
نوسانی سیال در یک مبدل حرارتی لوله ای به ازای دامنه‌های نوسانی بالاتر از ۹۰ میلی متر و در بازه‌ی زمانی ۸۰۰۰ ثانیه پرداختند. نتایج حاصل از مطالعات تجربی نشان می‌داد که با افزایش دامنه نوسان میزان انتقال حرارت از لوله افزایش می‌یابد. چانگ و همکاران [۱۰] به صورت تحلیلی جریان نوسانی آرام در لوله‌های دایره‌ای و کانال‌های موازی را مورد مطالعه قرار دادند. جمله گرادیان فشار شامل یک جزء ثابت و یک جزء نوسانی بود که با زمان به صورت سینوسی تغییر می‌کرد. آن‌ها به بررسی تغییرات تاخیر فاز در فرکانس‌های پایین تر از ۰/۵ هرتز پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش فرکانس نوسانات، تاخیر فاز در هر دو هندسه مورد مطالعه افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها متوجه شدند که با افزایش ویسکوزیته سیال، تاخیر فاز کاهش می‌یابد. علاوه بر آن، آن‌ها نشان دادند که تغییر در فرکانس نوسانات تاثیری بر روی تغییرات سرعت در راستای شعاعی ندارد. یان و همکاران [۱۱] به صورت عددی جریان نوسانی مغشوش در یک لوله را در محدوده وسیعی از اعداد رینولدز در حالت غیردائم مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها برای حل مساله از مدل اغتشاشی تنش رینولدز و نرم افزار فلونت استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که نتایج به دست آمده مطابقت مناسبی با یافته‌های تجربی دارد. همچنین آن‌ها متوجه شدند که تاثیر عدد رینولدز بر افزایش انتقال حرارت به مراتب بیشتر از تاثیر دوره نوسانی سرعت ورودی است. جعفری و همکاران [۱۲] به صورت عددی جریان نوسانی آرام در یک کانال موج با دمای ثابت را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها مطالعات خود را در محدوده فرکانس‌های ۰/۵ تا ۱ و دامنه‌های نوسان صفر تا ۰/۲۵ انجام دادند و برای حل مساله از روش شبکه بولتزنم استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش دامنه نوسانات، میزان انتقال حرارت از کانال افزایش می‌یابد.

علاوه بر بررسی جریان نوسانی نانوسیال در تحقیقات قبل، مطالعاتی نیز در زمینه محاسبه انتقال حرارت در جریانهای نوسانی آرام و مغشوش در برخی مقالات گذشته

¹ Rhie and Chow

۲- مدل فیزیکی

یک کانال مستطیلی به صورت دو بعدی با ارتفاع H و طول L حاوی جریان نانوسیال نوسانی مطابق شکل ۱ در نظر گرفته می‌شود. جریان از یک سمت بصورت نوسانی وارد شده و از سمت دیگر محدوده فیزیکی خارج می‌شود. دمای دیواره‌ها را ثابت فرض می‌کنیم و شرط عدم لغزش برای جریان نانوسیال روی دیواره‌ها صادق است. نانوذرات و سیال پایه دارای تعادل حرارتی می‌باشند و شرط عدم لغزش بین آن‌ها صادق است. نانوسیال نیز همگن (پراکندگی یکنواخت ذرات نانو در سیال پایه) در نظر گرفته شده است. همچنین برای حل مساله، جریان نانوسیال آرام، تراکم‌ناپذیر و غیردائم فرض شده و از اتلافات حرارتی لزجت صرف‌نظر می‌گردد. در شبیه‌سازی انجام شده به منظور رسیدن به حالت توسعه یافتگی، طول کانال به اندازه کافی طویل در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است، جهت حل معادلات حاکم بر مساله، یک کد کامپیوتری به زبان برنامه نویسی فترن نوشته شده است.



شکل ۱- نمای دو بعدی کانال مستطیلی شکل با جریان ورودی نوسانی

نانوسیال با دمای یکنواخت T_0 و جریان ورودی ارتعاشی با پروفیل سرعت شامل مجموع یک پروفیل سرعت تخت و پروفیل سرعت نوسانی سینوسی وارد کانال می‌شود. پروفیل سرعت ورودی به کانال را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$u = U_m [1 + A_0 \sin(\omega t)] \quad (1)$$

انجام شده است [۱۳-۱۶]. در مقالات اشاره شده و دیگر تحقیقات گذشته، نتایج متناقضی از رفتار جریان نوسانی همراه با انتقال حرارت ارائه شده است. لذا می‌توان تاثیرات پارامترهای موثر بر جریان نوسانی (دامنه و فرکانس نوسانات) را بر تغییرات نرخ انتقال حرارت به صورت زیر طبقه‌بندی کرد:

الف) تاثیر دامنه یا فرکانس نوسانات بر افزایش انتقال حرارت [۲، ۳ و ۱۲] بی‌تاثیر بودن پارامترهای موثر بر جریان نوسانی بر افزایش انتقال حرارت [۵ و ۶] ج) تاثیر دامنه یا فرکانس نوسانات بر کاهش انتقال حرارت [۱۴] د) پارامترهای نوسانی می‌تواند باعث افزایش یا کاهش انتقال حرارت شود. (در برخی از فرکانس‌ها یا دامنه‌های نوسانی میزان انتقال حرارت کاهش و در بعضی دیگر افزایش می‌یابد) [۴ و ۱۳]. این تناقضات موید این مطلب است که در زمینه جریانهای نوسانی، نیازمند مطالعات گسترده‌تری هستیم.

همانطور که ذکر شد، در بسیاری از مقالات جریان نوسانی سیال در کانال بررسی شده است. همچنین مطالعات متعددی بر روی جریان نانوسیال در کانالها انجام شده است. با این وجود تحقیق مشخصی با در نظر گرفتن اثر همزمان جریان نوسانی ورودی و حضور نانوذرات در سیال در تحقیقات گذشته مورد بررسی در کانال نمی‌توان یافت. با توجه به اهمیت این موضوع، در مقاله حاضر تحلیل جامعی بر روی جریان نوسانی نانوسیال در کانال مستطیلی در حالت غیردائم و برای محدوده وسیعی از عدد رینولدز، دامنه نوسانات، کسر حجمی نانوذرات، فرکانس نوسانات و برای نانوذرات مختلف به صورت عددی انجام شده است. نتایج بدست آمده در موارد مشابه با مطالعات قبلی مقایسه شده و برای حالت‌های دیگر، نمودارها و جداولی از نتایج بدست آمده ارائه می‌شود.

با توجه به پارامترهای بی بعد در نظر گرفته شده جریان نانوسیال به صورت $U = [1 + A_0 \sin(2\pi \cdot St \cdot \tau)]$ وارد کانال می شود.

ضریب هدایت گرمایی نانوسیال با فرض نانوذرات کروی از معادله ماکسول [۱۸] قابل محاسبه است:

$$k_{nf} = k_f \left[\frac{(k_p + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_p)}{(k_p + 2k_f) + \phi(k_f - k_p)} \right] \quad (۷)$$

ضریب نفوذ حرارتی و لزجت موثر نانوسیال نیز با استفاده از معادله برینکمن [۱۹] به صورت زیر تعریف می شود:

$$\alpha_{nf} = k_{nf} / (\rho c_p)_{nf}, \quad \mu_{nf} = \mu_f / (1 - \phi)^{2.5} \quad (۸)$$

که در آنها چگالی و گرمای مخصوص $(c_p)_{nf}$ را می توان به صورت زیر تعریف کرد [۲۰]:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (۹)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_p \quad (۱۰)$$

در روابط فوق ϕ نمایانگر کسر حجمی نانوذرات و زیرنویس f ، p و nf به ترتیب برای سیال، نانوذرات و نانوسیال بکار رفته است.

برای حل معادلات فوق نیاز به شرایط مرزی مناسب داریم. شرایط مرزی مساله به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

ورودی:

$$U = [1 + A_0 \sin(2\pi \cdot St \cdot \tau)], V = 0, \theta = 1 \quad (۱۱)$$

خروجی:

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} = 0, \frac{\partial U}{\partial X} = 0, V = 0 \quad (۱۲)$$

دیواره ها:

$$Y = 0, H \Rightarrow U = 0, V = 0, \theta = 0 \quad (۱۳)$$

که ω فرکانس زاویه ای نوسانات می باشد که به صورت $\omega = 2\pi\theta$ تعریف می گردد. θ فرکانس دارای بعد نوسانات، t زمان، U_m میانگین سرعت ورودی و A_0 دامنه نوسانات می باشد.

۳- معادلات حاکم

معادلات بقای حاکم بر جریان نوسانی سیال شامل معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی در حالت دو بعدی با استفاده از پارامترهای بی بعد [۱۷]:

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{H}, \quad Y = \frac{y}{H}, \quad P = \frac{p}{\rho U_m^2}, \quad U = \frac{u}{U_m}, \\ V &= \frac{v}{U_m}, \quad \theta = \frac{T - T_w}{T_0 - T_w}, \quad \tau = \frac{t U_m}{H}, \quad \text{Re} = \frac{U_m H}{\nu_f}, \\ St &= \frac{g H}{U_m}, \quad \text{Pr} = \frac{\nu_f}{\alpha_f} \end{aligned} \quad (۲)$$

به شکل بدون بعد زیر نوشته می شوند:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (۳)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = \\ \left[-\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (۴)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = \\ \left[-\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (۵)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (۶)$$

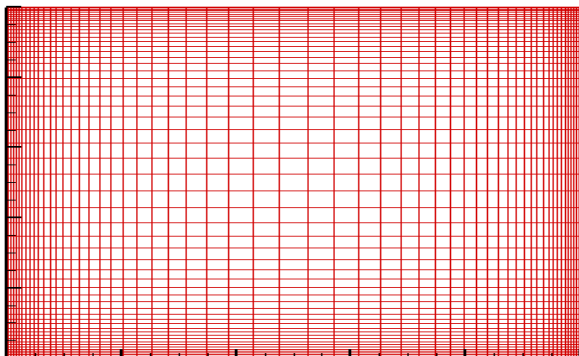
که در روابط فوق U و V سرعت بی بعد در راستای افقی و عمودی، H ارتفاع کانال، X و Y مختصه افقی و عمودی بدون بعد، Re عدد رینولدز، Pr عدد پرانتل، θ دمای بی بعد، St فرکانس بدون بعد نوسانات، τ زمان بی بعد، P فشار بی بعد، T_w دمای دیواره کانال، α_f ، μ_f و ν_f به ترتیب ضریب نفوذ حرارتی، لزجت موثر، ویسکوزیته سینماتیکی و چگالی مربوط به سیال می باشد؛ در صورتی که زیرنویس f به nf تغییر یابد خواص ترموفیزیکی فوق مرتبط به نانوسیال می شود.

جدول ۱- خصوصیات ترموفیزیکی سیال پایه آب و نانو ذرات مختلف در دمای ۲۹۳ کلونین

ضرب هدایت حرارتی (W/m.K)	گرمای ویژه (J/kg.K)	چگالی (kg/m ³)	نانوذرات
۴۰۱	۳۸۵/۱	۸۹۳۳	مس
۴۰	۷۶۵	۳۹۷۰	آلومینا
۰/۶۱۳	۴۱۷۹	۹۹۷/۱	آب خالص
۴۲۹/۱	۲۳۵	۱۰۵۰۰	نقره
۷۶/۵	۵۳۱/۸	۳۶۲۰	اکسید مس
۸/۹۵۳	۶۸۶/۲	۴۲۵۰	اکسید تیتانیوم

۴- روش حل عددی

برای شبکه بندی ناحیه حل، از یک شبکه با ساختار با قابلیت تراکم در نواحی با گرادیان بالا و برای گسسته سازی معادلات حاکم روی این شبکه، از روش حجم محدود با شبکه جابجا شده استفاده شده است. برای پایداری حل، ترم نفوذ در معادلات مومنتم به روش توان پیرو تخمین زده شده است. همچنین برای ارتباط بین میدان سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است [۲۱]. الگوریتم سیمپل نمایانگر روش نیمه ضمنی برای معادلاتی است که توسط فشار به هم مرتبط می باشند به این ترتیب که ابتدا مقادیر فشار را حدس زده و به کمک آن معادلات سرعت را حل می کنیم. پس از حل، سرعت های بدست آمده باید به گونه ای اصلاح شوند تا معادلات پیوستگی ارضا گردد. نمونه ای از شبکه بندی حوزه حل در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نمونه شبکه بندی حوزه حل

پس از طی فرآیند حل معادلات، برای محاسبه انتقال حرارت، عدد ناسلت روی دیواره را می توان به صورت زیر نوشت:

$$Nu = - \frac{k_{nf}}{k_f} \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)_{Wall} \quad (14)$$

همچنین اعداد ناسلت متوسط سیکلی (زمانی)، متوسط فضایی، ناسلت نسبی فضایی و ناسلت کلی به ترتیب به صورت زیر تعریف می شوند [۲]:

$$Nu_{ca} = \frac{1}{\tau_p} \int_0^{\tau_p} Nu d\tau \quad (15)$$

$$Nu_{sa} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu dX \quad (16)$$

$$Nu_{r,sa} = \int_0^L Nu dX / \int_0^L Nu_s dX \quad (17)$$

$$Nu_{total} = \frac{1}{\tau_p L} \int_0^{\tau_p} \int_0^L Nu dX d\tau \quad (18)$$

عدد ناسلت کلی نسبی نیز به صورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$Nu_{total,relative} = \frac{1}{\tau_p L} \int_0^{\tau_p} \int_0^L Nu dX d\tau / \frac{1}{L} \int_0^L Nu_s dX \quad (19)$$

که در روابط فوق زیر نویس s بیانگر حالت دائم و τ_p دوره تناوب نوسان جریان ورودی می باشد. افت فشار نسبی در کانال نیز به صورت زیر در نظر گرفته می شود [۱۲]:

$$\Delta P_{relative} = \frac{P_{in} - P_{out}}{P_{in}} \quad (20)$$

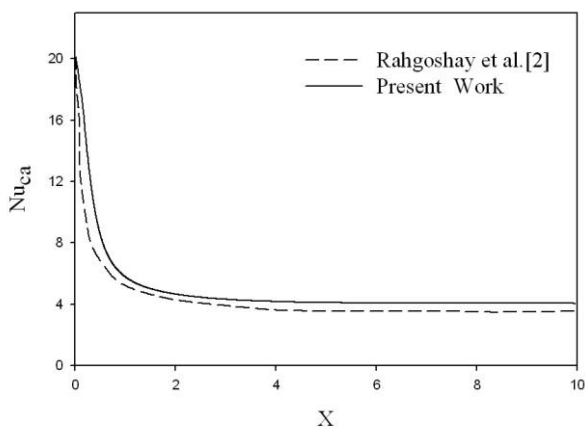
محاسبات را برای سیال خالص آب و پنج نوع نانو ذره مس، آلومینا، نقره، اکسید مس و اکسید تیتانیوم با فرض برقراری شرط عدم لغزش بین آنها انجام می دهیم. خصوصیات ترموفیزیکی آب و نانوذرات مذکور در جدول ۱ آورده شده است [۲۰]:

شده در این تحقیق دقت خوبی در مقایسه با کار مشابه رهگشای و همکاران [۲] دارد.

جدول ۳- تغییرات عدد ناسلت کلی نانوذرات Al_2O_3 (آلومینا) برای مقادیر ثابت $Re=100$ ، $St=1$ و $A_0=0.5$

کسر حجمی نانوذرات (ϕ)	عدد ناسلت کلی Nu_{total}		خطای متوسط بین دو تحقیق %
	مقاله حاضر	رهگشای و همکاران [۲]	
۰/۰۰	۴/۳۴۰۲	۴/۲۹۹۶	۰/۱۹
۰/۰۱	۴/۵۳۱۲	۴/۴۹۲۱	۰/۱۸
۰/۰۲	۴/۷۰۰۰	۴/۶۷۲۰	۰/۱۶
۰/۰۴	۴/۹۳۶۱	۴/۹۱۰۴	۰/۱۵

همچنین از بررسی شکل ۳ می‌توان دریافت که عدد ناسلت متوسط زمانی در ابتدای دیواره به دلیل کوچک بودن ضخامت لایه مرزی و متناسب با آن، بزرگ بودن ضریب انتقال حرارت جابجایی، بیشترین میزان خود را دارد که طبق انتظار با پیشروی در طول کانال، گرادیان دما کاهش یافته و در نتیجه عدد ناسلت متوسط سیکلی کاهش می‌یابد و در نهایت به حالت توسعه یافته می‌رسد.



شکل ۳- تغییرات عدد ناسلت متوسط سیکلی در طول کانال به منظور مقایسه با حل عددی رهگشای و همکاران [۲]

شکل ۴ تغییرات عدد ناسلت نسبی متوسط فضایی نانوسیال آب - آلومینا را به ازای اعداد استروهل مختلف، $\phi = 0.02$ ، $A_0 = 0.2$ و $Re = 100$ نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود با کاهش فرکانس نوسانات از $St = 0.1$ به $St = 0.01$ ، تعداد

به دلیل گرادیان بالای دما و سرعت در نزدیکی دیواره‌ها و در ابتدای کانال، شبکه در این نواحی نسبت به بقیه قسمت‌های کانال متراکم‌تر شده است. تاثیر خواص نانوذرات بر سیال پایه نیز با بکارگیری معادلات (۷) تا (۱۰) در طی الگوریتم حل اعمال می‌گردد.

۵- بررسی نتایج

برای بررسی استقلال حل از شبکه در عدد رینولدز ۱۰۰ و به ازای $\phi = 0.02$ ، چندین شبکه با تعداد نقاط مختلف در راستاهای طولی و عرضی استفاده شده و نتایج بررسی در جدول ۲ جمع آوری شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، با اضافه کردن تعداد نقاط در جهت‌های طولی و عرضی کانال، تغییرات سرعت ماکزیمم افقی در کانال کاهش می‌یابد و در نهایت این سرعت از تغییر تعداد نقاط شبکه از 40×60 به 40×70 تغییر محسوسی نخواهد داشت. از این رو محاسبات را برای تعداد نقاط شبکه 40×60 انجام می‌دهیم.

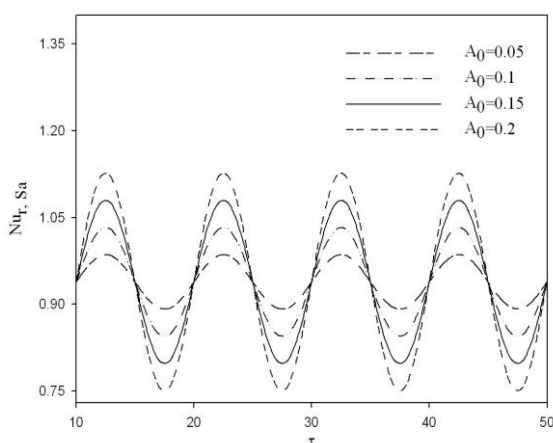
جدول ۲- بررسی استقلال حل عددی از تعداد نقاط شبکه

تعداد نقاط شبکه	سرعت افقی ماکزیمم
40×20	۱/۴۲۰۲۰
50×20	۱/۴۲۰۳۱
60×20	۱/۴۲۰۶
70×20	۱/۴۲۰۶
60×40	۱/۴۲۱۴
70×40	۱/۴۲۱۴

در جدول ۳ عدد ناسلت کلی نانوسیال آب - آلومینا برای مقادیر ثابت $Re=100$ ، $St=1$ و $A_0=0.5$ با حل عددی مشابه رهگشای [۲] مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تطابق مناسبی بین نتیجه دو تحقیق وجود دارد. تفاوت اندک موجود می‌تواند ناشی از روش حل معادلات و یا تفاوت در معیار همگرایی باشد.

در شکل ۳ تغییرات عدد ناسلت متوسط سیکلی نانوسیال آب - آلومینا در طول کانال به ازای $St=0.1$ و $A_0=0.5$ آمده است. نتایج به منظور اعتبارسنجی حل عددی، مجدداً با حل عددی رهگشای و همکاران [۲] مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، محاسبه انجام

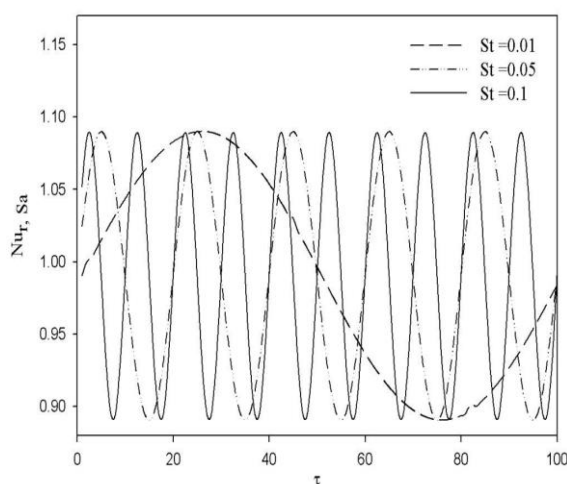
در شکل ۵ تغییرات عدد ناسلت نسبی متوسط فضایی نانوسیال آب-آلومینا نسبت به زمان به ازای $\phi = 0.04$ ، $St = 0.1$ و $Re = 100$ در دامنه‌های نوسانی مختلف نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزایش دامنه نوسانات، مقدار عدد ناسلت نسبی افزایش می‌یابد؛ اما افزایش دامنه تأثیری بر روی دوره تناوب نوسانات، تعداد نوسانات و همچنین مدت زمان برخورد نانوسیال با دیواره نمی‌گذارد. همچنین از بررسی دقیق شکل ۵ می‌توان به تأثیر افزایش عدد ناسلت و در نتیجه آن افزایش انتقال حرارت توسط نوسانی کردن جریان سیال رسید به طوری که میزان افزایش عدد ناسلت متوسط فضایی در زمان‌های مشخصی به حدود $1/10$ برابر حالتی که جریان در حالت دائم (بدون جزء نوسانی) بررسی شود، رسیده است.



شکل ۵- تغییرات عدد ناسلت نسبی متوسط فضایی سیال آب-آلومینا نسبت به زمان به ازای دامنه‌های نوسانی مختلف

شکل ۶ تغییرات عدد ناسلت متوسط سیکلی نانوسیال آب-آلومینا را در طول کانال به ازای کسرهای حجمی مختلف برای $A_0 = 0.2$ و $St = 0$ در کانال نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۶ مشاهده می‌شود با افزایش کسر حجمی نانوذرات، میزان عدد ناسلت متوسط سیکلی و در نتیجه انتقال حرارت روی دیواره کانال افزایش می‌یابد. همچنین دیده می‌شود که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، توسعه یافتگی حرارتی بدلیل افزایش عدد پرانتل، دیرتر اتفاق می‌افتد. علاوه بر آن، به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی موثر نانوسیال نسبت به

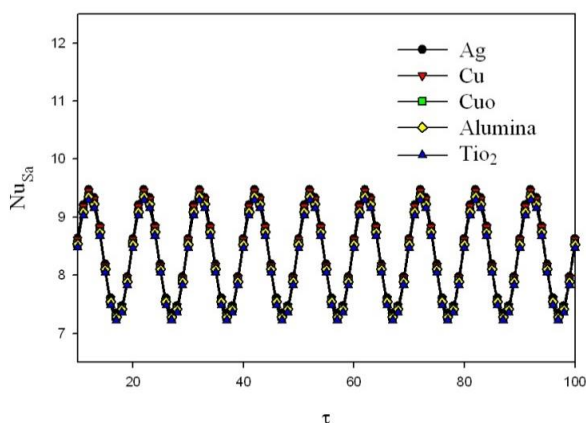
نوسانات کاهش یافته است؛ به طوری که با کاهش فرکانس نوسانی (عدد استروهال) از 0.1 به 0.05 و نهایتاً به 0.01 ، مجموع تعداد قله‌های ماکزیمم و مینیمم شکل موج مربوط به عدد ناسلت نانوسیال آب-آلومینا از تعداد بیست به ده و در نهایت به دو بار در طول بازه زمانی 100 کاهش می‌یابد؛ که این مساله منجر به افزایش ناچیز دامنه ناسلت متوسط فضایی شده است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس نوسانات، دوره تناوب نوسانات و مدت زمان برخورد سیال با دیواره کاهش یافته است. (دوره تناوب نوسانات فاصله‌ی بین دو قله ماکزیمم یا مینیمم متوالی از نوسانات می‌باشد). علاوه بر آن می‌توان ملاحظه نمود که با افزایش عدد استروهال از 0.1 به 0.05 و نهایتاً به مقدار 0.1 ، ناسلت نسبی از $1/0.917$ به $1/0.915$ و در نهایت به $1/0.888$ می‌رسد که این مقدار کاهش، ناچیز است. همچنین از بررسی شکل موج عدد ناسلت نسبی متوسط فضایی نانوسیال آب-آلومینا در فرکانس‌های مختلف می‌توان به رابطه‌ی بین فرکانس نوسانات، تعداد قله‌های ماکزیمم نوسانی و بازه زمانی رسید؛ به طوری که تعداد قله‌های ماکزیمم نوسانی از حاصلضرب بازه زمانی در فرکانس نوسانات (عدد استروهال) بدست می‌آید. به عبارت دیگر از این رابطه به راحتی می‌توان مناطقی را که بیشینه مقدار عدد ناسلت و در نتیجه بیشینه میزان انتقال حرارت در یک سیکل زمانی با یک فرکانس نوسانی مشخص را دارند، محاسبه کرد.



شکل ۴- تغییرات عدد ناسلت نسبی متوسط فضایی نانوسیال آب-آلومینا نسبت به زمان بی‌بعد در فرکانسهای نوسانی مختلف، $Re = 100$ و $A_0 = 0.2$

سیال کاهش می‌یابد. هر چند که دمای متوسط سیال تا حدی کاهش یافته است، ولی این کاهش با افزایش دبی جریان جبران می‌شود که اثر کلی آن، افزایش عدد ناسلت کلی و در نتیجه افزایش انتقال حرارت بر اثر افزایش عدد رینولدز است. همچنین می‌توان از بررسی شکل ۷ دریافت که در همه اعداد رینولدز، افزایش کسر حجمی نانوذرات باعث افزایش انتقال حرارت می‌گردد که این افزایش انتقال حرارت در رینولدزهای بالا، بیشتر به چشم می‌آید؛ به طوری که میزان افزایش ناسلت کلی به ازای افزایش کسر حجمی نانوذرات از مقدار صفر تا ۰/۰۴ در رینولدز ۲۰۰، برابر با ۰/۶۰۱۳، در رینولدز ۲۵۰ برابر با ۰/۶۲۱۵ و در رینولدز ۳۰۰ مقدار ۰/۶۳۵۳ می‌شود. این موضوع نشان از این مطلب دارد که در رینولدزهای پایین به دلیل سرعت پایین جریان نانوسیال، گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره‌ها کاهش یافته، افت فشار افزایش یافته و در نتیجه آن مدت زمان بیشتری صرف تبادل حرارت بین جریان نوسانی نانوسیال و دیواره کانال شده، به همین دلیل عدد ناسلت کلی مقدار کمتری را از خود نشان می‌دهد.

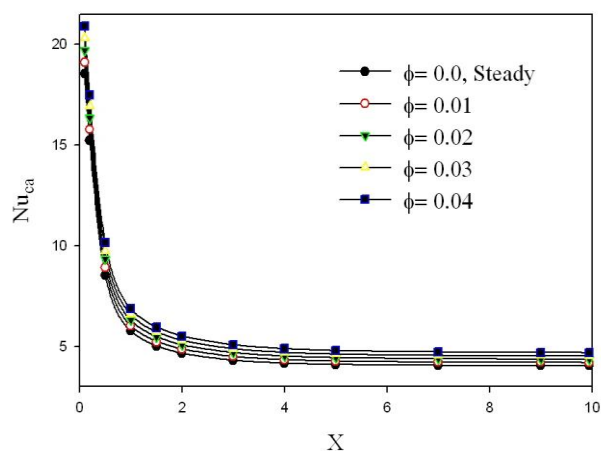
در شکل ۸ تغییرات عدد ناسلت متوسط فضایی نانوذرات مختلف نسبت به زمان به ازای $St = 0.1$ ، $\phi = 0.02$ ، $Re = 100$ و $A_0 = 0.2$ نشان داده شده است.



شکل ۸- عدد ناسلت متوسط فضایی نانوذرات مختلف برحسب زمان بی‌بعد؛ $St = 0.1$ ، $\phi = 0.02$ ، $Re = 100$ و $A_0 = 0.2$

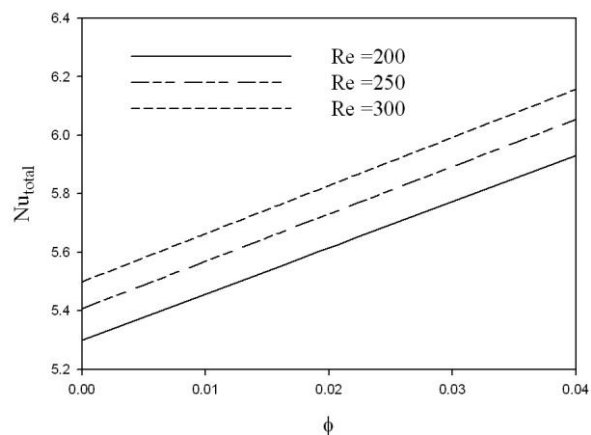
همانطور که مشاهده می‌شود میزان ماکزیمم ناسلت متوسط برای نانوذرات نقره بیشترین مقدار و برای نانوذرات اکسید تیتانیوم کمترین مقدار می‌باشد. به

سیال پایه، افزایش درصد حجمی نانوذرات موجب افزایش عدد ناسلت شده است.



شکل ۶- تاثیر کسر حجمی نانوذرات بر عدد ناسلت متوسط سیکلی نانوسیال آب- آلومینا در طول کانال

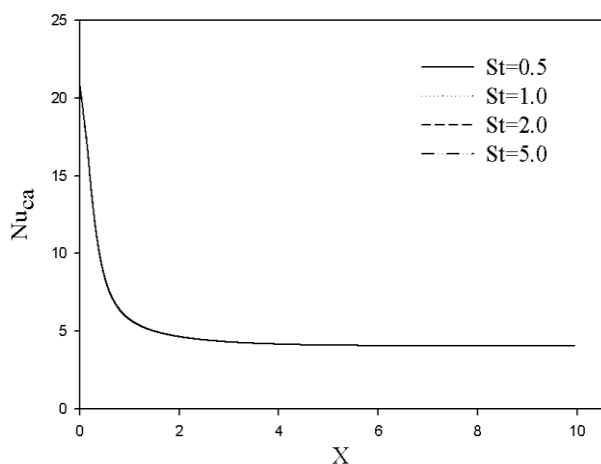
در شکل ۷ عدد ناسلت کلی نانوسیال حاوی نانوذرات آلومینا به ازای $A_0 = 0.2$ و $St = 0$ در رینولدزهای مختلف ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ نسبت به کسر حجمی نانوذرات رسم شده است.



شکل ۷- عدد ناسلت کلی نانوسیال آب- آلومینا برحسب کسر حجمی نانوذرات به ازای $A_0 = 0.2$ و $St = 0.1$ در اعداد رینولدز مختلف

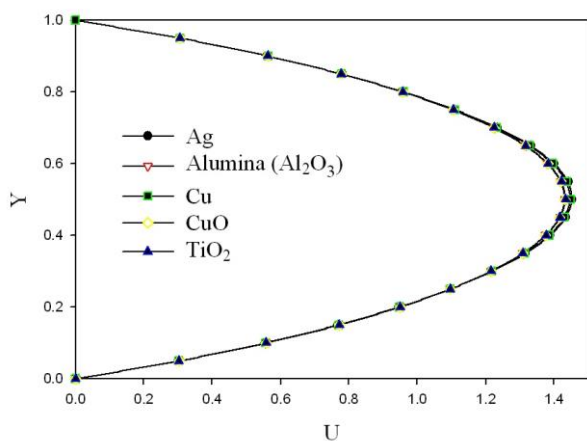
همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز از مقدار ۲۰۰ به ۳۰۰، مقدار عدد ناسلت کلی به ازای $\phi = 0.04$ به میزان ۱۰٪ افزایش می‌یابد. با افزایش عدد رینولدز، زمان اقامت و تبادل حرارت ذرات سیال با دیواره کانال کم شده و در نتیجه دمای متوسط

دلالت بر عدم تاثیرپذیری عدد ناسلت از فرکانس نوسانات خواهد داشت.



شکل ۱۰- تغییرات عدد ناسلت متوسط سیکلی نانوسیال آب-آلومینا به ازای فرکانس‌های نوسانی مختلف برای $A_0 = 0.2$ ، $Re = 100$ و $\phi = 0.02$

تغییرات سرعت افقی نانوسیال در حالت دائم، برای شرایط توسعه‌یافته به ازای $Re = 100$ و $\phi = 0.02$ و برای پنج نانو ذرات مس، نقره، آلومینا، اکسید مس و اکسید تیتانیوم در شکل ۱۱ رسم شده است.

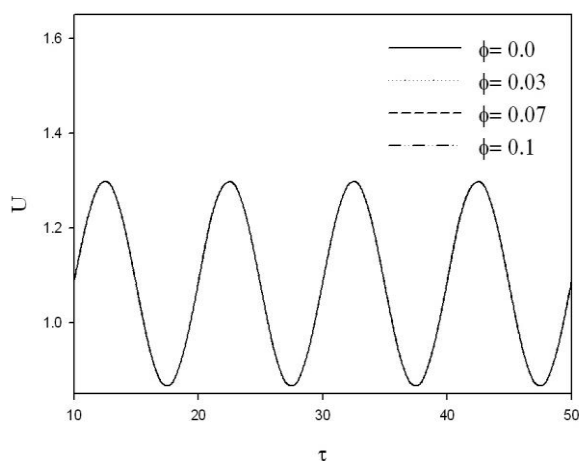


شکل ۱۱- تغییرات سرعت افقی نانوسیال به ازای پنج نانو ذرات مس، نقره، آلومینا، اکسید مس و اکسید تیتانیوم

همانطور که از شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، پروفیل سرعت تقریباً در تمام سطح مقطع کانال به صورت یکنواخت است؛ با توجه به این که بیشترین مقدار نرخ برشی در کنار دیواره و کمترین مقدار آن در مرکز اتفاق می‌افتد، ضخامت لایه مرزی کاهش یافته و با استنباط از

طوری‌که بیشترین مقدار عدد ناسلت فضایی برای نانوذرات نقره به $9/4767$ ، مس به $9/4514$ ، اکسید مس به $9/3636$ ، آلومینا (اکسید آلومینیم) به $9/3572$ و برای نانوذره اکسید تیتانیوم به $9/2873$ رسیده است.

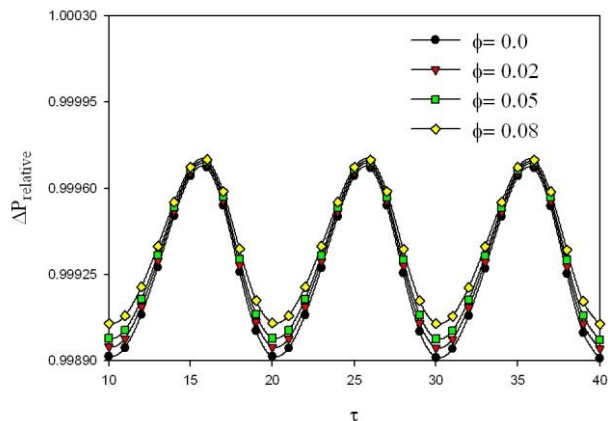
در شکل ۹ تغییرات سرعت افقی نانوسیال آب-آلومینا در حالت توسعه‌یافته نسبت به زمان برای $St = 0.1$ ، $Re = 100$ ، $A_0 = 0.2$ و به ازای کسرهای حجمی مختلف نانوذره رسم شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با توجه به سینوسی بودن تغییرات سرعت در ورود، پروفیل سرعت افقی در کانال نیز به شکل سینوسی در حال نوسان است. انطباق خطوط رسم شده بر یکدیگر موید این مطلب است که افزایش کسر حجمی نانوذرات، تاثیری بر پروفیل سرعت افقی نانوسیال نمی‌گذارد. همچنین پروفیل سرعت افقی نیز پس از هر دوره تناوب، به صورت سینوسی تکرار شده است.



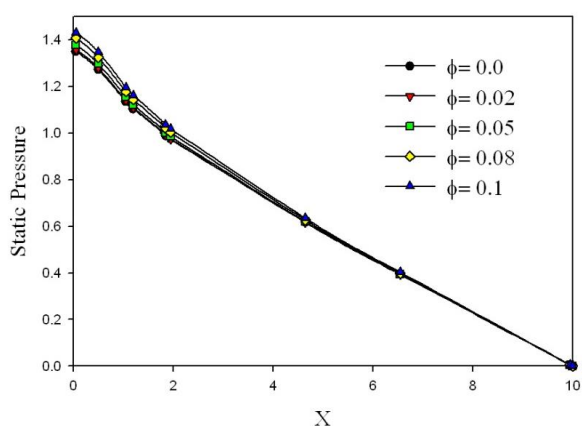
شکل ۹- سرعت افقی نانوسیال آب-آلومینا بر حسب زمان در کسرهای حجمی مختلف؛ $St = 0.1$ ، $Re = 100$ و $A_0 = 0.2$

تغییرات عدد ناسلت متوسط سیکلی نانوسیال آب-آلومینا در اعداد استروهال مختلف، به ازای $A_0 = 0.2$ ، $Re = 100$ و $\phi = 0.02$ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش فرکانس نوسانات از $St = 0.1$ به $St = 5.0$ ، تغییری در عدد ناسلت مشاهده نمی‌شود که این مطلب

سرعت از سایر نواحی کانال بیشتر است. با انتشار اجباری جریان نانوسیال از میزان فشار استاتیکی جریان به دلیل تبادل انرژی با سایر نقاط کانال کاسته می‌شود و در نهایت مقدار آن در انتهای کانال به صفر می‌رسد.



شکل ۱۳- تغییرات افت فشار نسبی نانوسیال آب-آلومینا نسبت به زمان بی‌بعد به ازای کسر حجمی‌های مختلف نانوذره

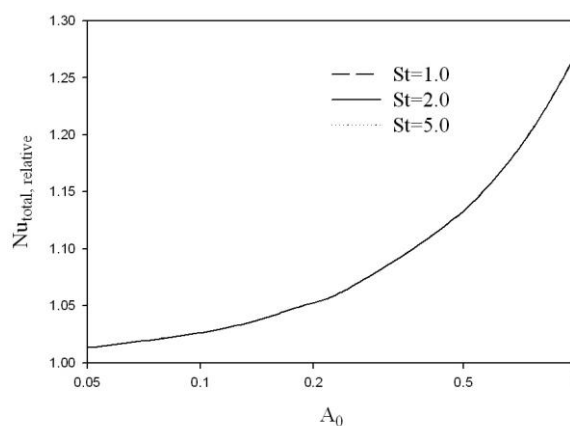


شکل ۱۴- تغییرات فشار استاتیکی جریان نانوسیال آب-آلومینا به ازای کسر حجمی‌های مختلف در حالت دائم

همچنین از بررسی شکل ۱۴ می‌توان دریافت با افزایش کسر حجمی نانوذرات آب-آلومینا، به مقدار ناچیزی، فشار استاتیکی در ناحیه‌ای که جریان نانوسیال به حالت کاملاً توسعه یافته نرسیده است، افزایش می‌یابد (جریان نانوسیال در حدود فاصله $X = 5.8$ به حالت کاملاً توسعه یافته می‌رسد). اما وقتی جریان نانوسیال به حالت توسعه یافته می‌رسد، افزایش کسر حجمی نانوذرات تاثیری بر روی فشار استاتیکی جریان نانوسیال به دلیل اینکه لایه‌های مرزی به هم رسیده‌اند و توزیع سرعت دیگر تابعی از جهت جریان نانوسیال نمی‌باشد، نمی‌گذارد.

معادله پیوستگی، سرعت در مرکز کانال به بیشترین مقدار خود رسیده است. همچنین مشاهده می‌شود تغییر در نوع نانوذرات تاثیر محسوسی بر پروفیل سرعت افقی کانال نمی‌گذارد.

شکل ۱۲ نیز نشان دهنده تغییرات عدد ناسلت کلی نسبی سیال خالص آب در فرکانسهای نوسانی مختلف به ازای $\phi = 0.0$ و $Re = 100$ است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش فرکانس نوسانات از $St = 1.0$ به $St = 5.0$ ، مقدار ناسلت کلی نسبی تغییر محسوسی نمی‌کند. همچنین با افزایش دامنه نوسان از مقدار 0.05 تا 1 ، مقدار ناسلت کلی به میزان 21% افزایش یافته است.



شکل ۱۲- تغییرات عدد ناسلت کلی نسبی سیال خالص آب در فرکانس‌های نوسانی مختلف به ازای $\phi = 0.0$ و $Re = 100$

در شکل ۱۳ تغییرات افت فشار نسبی نانوسیال آب-آلومینا در حالت توسعه یافته نسبت به زمان برای فرکانس‌های نوسانی مختلف به ازای $Re = 100$ ، $St = 0.1$ و $A_0 = 0.2$ و به ازای کسرهای حجمی مختلف نانوذره رسم شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، با توجه به سینوسی بودن تغییرات سرعت در ورود، تغییرات افت فشار در کانال نیز به شکل سینوسی در حال نوسان است. همچنین، به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی موثر نانوسیال نسبت به سیال پایه، با افزایش درصد حجمی نانوذرات از مقدار صفر به 0.08 ، افت فشار نسبی در کانال افزایش یافته است.

شکل ۱۴ تغییرات فشار استاتیکی جریان نانوسیال آب-آلومینا، به ازای کسر حجمی‌های مختلف برای $Re = 100$ در فاصله $Y = 0.95$ از کانال را در حالت دائم نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر فشار در نواحی ابتدایی کانال به دلیل گرادیان بالای دما و

است بطوریکه با بررسی نتایج بدست آمده می‌توان دریافت که تاثیر افزایش انتقال حرارت توسط افزایش دامنه نوسانات از سایر موارد بیشتر است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، جریان نوسانی دوبعدی نانوسیال عبوری از یک کانال مستطیلی با دیواره‌های دما ثابت در حالت غیردائم به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. تاثیر پارامترهای مختلفی از جمله فرکانس و دامنه نوسانات، کسر حجمی نانوذرات مختلف و همچنین اثر عدد رینولدز بر روی سرعت افقی و عدد ناسلت در کانال بررسی شده است. نتایج بدست آمده از این تحقیق را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی نمود:

- افزایش دامنه نوسان تاثیری بر روی دوره تناوب نوسانات و همچنین مدت زمان برخورد نانوسیال با دیواره کانال، عدد ناسلت فضایی نمی‌گذارد.

- با افزایش فرکانس نوسانات، دوره تناوب نوسانات و مدت زمان برخورد نانوسیال با دیواره کاهش یافته است.

- با کاهش فرکانس نوسانات عدد ناسلت نسبی متوسط فضایی افزایش ناچیزی پیدا می‌کند اما تغییر محسوسی بر افزایش انتقال حرارت مشاهده نمی‌شود.

- حضور نانوسیال در کانال با کسرهای حجمی مختلف تاثیری بر شکل پروفیل‌های سرعت افقی نمی‌گذارد.

- در همه مقادیر کسر حجمی نانوذرات مختلف، با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت کلی افزایش می‌یابد.

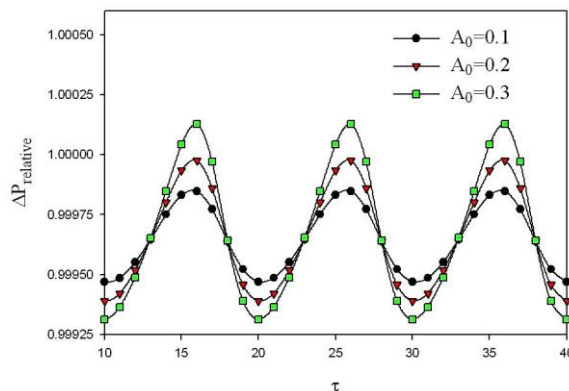
- با افزایش کسر حجمی نانوذرات در جریان نوسانی، میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد که این افزایش انتقال حرارت در رینولدزهای بالا، بیشتر به چشم می‌آید.

- مقدار ماکزیمم ناسلت متوسط برای نانوذرات نقره از سایر نانوذرات مطالعه شده بیشتر و برای اکسید تیتانیوم کمتر از سایرین است.

- با افزایش دامنه نوسان از مقدار ۰/۰۵ تا ۱، عدد ناسلت کلی نسبی به میزان ۲۱٪ افزایش خواهد داشت.

- با افزایش کسر حجمی نانوذرات و دامنه نوسانات افت فشار در کانال افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۵ افت فشار نسبی جریان نانوسیال آب-آلومینا بر روی دیواره بالایی کانال، نسبت به زمان بی‌بعد برای $Re = 100$ ، $\phi = 0.02$ ، $St = 0.1$ و به ازای دامنه‌های نوسانی مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دامنه نوسانات، دامنه تغییرات افت فشار در کانال افزایش می‌یابد؛ اما افزایش دامنه تاثیری بر روی دوره تناوب نوسانات و تعداد نوسانات نمی‌گذارد.



شکل ۱۵- تغییرات افت فشار نسبی جریان نانوسیال آب-آلومینا بر روی دیواره بالایی کانال، نسبت به زمان بی‌بعد برای $Re = 100$ ، $\phi = 0.02$ ، $St = 0.1$ به ازای دامنه‌های نوسانی مختلف

جدول ۴ درصد افزایش عدد ناسلت کلی نسبت به حالت دائم (عدد ناسلت کلی نسبی) به ازای اعداد رینولدز، دامنه‌ها و کسر حجمی‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۴- درصد افزایش عدد ناسلت کلی نسبت به حالت دائم به ازای اعداد رینولدز، دامنه‌ها و کسر حجمی‌های مختلف به ازای $St = 0.1$

دامنه‌ها	Re = 100		Re = 200	
	$\phi = 0.0$	$\phi = 0.1$	$\phi = 0.0$	$\phi = 0.1$
۰/۵	۱۱/۸۱	۳۳/۱۶	۱۷/۲۹	۳۷/۷۷
۱/۰	۲۱/۳۶	۴۰/۵۱	۲۸/۷۲	۴۶/۵۹
۱/۵	۲۸/۹۸	۴۶/۲۶	۳۶/۸۷	۵۲/۳۹
۲/۰	۳۵/۰۹	۵۰/۷۲	۴۲/۸۵	۵۶/۷۰

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰ تا ۲۰۰، دامنه نوسانات از ۰/۵ تا ۲ و کسر حجمی نانوذرات از صفر تا ۰/۱ درصد افزایش انتقال حرارت متغیر

۷- مراجع

- [1] Chang, W. G., Pu-zhen, Si-chao T., Chao X. (2012). "Theoretical analysis of phase-lag in low frequency laminar pulsating flow". *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 58, pp. 45–51.
- [2] Rahgoshay, M., Ranjbar, A.A, Ramiar, A. (2012). "Laminar pulsating flow of nanofluids in a circular tube with isothermal wall". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp.463–469.
- [3] Akdag, U. (2010). "Numerical investigation of pulsating flow around a discrete heater in a channel". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 881–889.
- [4] Elsayed, A.M. Elshafei, M. Safwat, M., Mansour, H., Sakr, M. (2008). "Experimental study of heat transfer in pulsating turbulent flow in a pipe". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.29, pp. 1029–1038.
- [5] Mehta, B., Khandekar, S. (2010). "Effect of Periodic Pulsations on Heat transfer in simulataneously Developing Laminar Flows ". *International Communications in Heat Transfer*, Washington, Dc, USA, August 8-13.
- [6] Chattopadhyay, H., Durst, F., Ray, S. (2006). "Analysis of heat transfer in simultaneously developing pulsating". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.33, pp. 475–481.
- [7] Ray, S. , Ünsal, B., Durst, F. (2012). "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.
- [8] Jafari, M., Farhadi, M., Fattahi, E. (2012). "Effect of wavy wall on convection heat transfer of water-al2o3 nanofluid in a lid-driven cavity using lattice boltzmann method". *International Journal of Engineering*, Vol.25, pp.165-176.
- [9] Kato, S., Okuyama, K., Ichikawa, T., Mori, S. (2013). "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.
- [10] Chang, W., Pu-zhen, G., Si-chao, T., Chao, X. (2012). "Theoretical analysis of phase-lag in low frequency laminar pulsating flow". *Progress in Nuclear Energy*, Vol.58, pp.45-51.
- [11] Yan, B.H., Gu, H.Y., Yua, L., (2012). "Heat transfer of pulsating turbulent pipe flow in rolling motion", *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 59, pp. 59-65.
- [12] Jafari, M., Farhadi, M., Sedighi, K. (2013). "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.
- [13] Guo, Z., Sung, H. (1997). "Analysis of the Nusselt number in pulsating pipe flow". *International Journal in Heat Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 2486-2489.
- [14] Hemida, H.N., Sabry, M.N., Abbel-Rahim, A., Mansour, H. (2002). " Theoretical Analysis of the Nusselt Number in Pulsating Pipe Flow". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 2486-2489.
- [15] Valencia, A., (1997). "Effect of pulsating inlet on the turbulent flow". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 24, pp. 1009-1018.
- [16] Wang, X. Zhang,N. (2005) "Numerical analysis of heat transfer in pulsating turbulent flow in a pipe ". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.48,pp. 3957–3970.
- [17] Karimipour, A., Afrand M., M. Bazofti M. (2010). "Periodic Mixed Convection of a Nanofluid in a Cavity with Top Lid Sinusoidal Motion". *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*.
- [18] Maxwell, J.C. (1904). "A treatise on electricity and magnetism", Oxford University P,Cambridge, pp. 435–441.

- [19] Brinkman H.C. (1952). "The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solution". International Journal of Chem. Phys, Vol. 20, pp. 571–581.
- [20] Mahdy, A. (2012). "Unsteady mixed convection boundary layer flow and heat transfer of nanofluids due to stretching sheet" Nuclear Engineering and Design, Vol.249, pp.248-255.
- [21] Patankar, S.V. (1980). "Numerical Heat transfer and fluid flow". Hemisphere Publishing Corporation, WASHINGTON D.C.