



## بررسی انتقال حرارت نانوسیال در کانال با مقطع مثلثی با دو وجه شار ثابت و یک وجه دما ثابت

محمدامیر آقاجنفی<sup>۱</sup>، بابک مهماندوست<sup>۲\*</sup>

\* نویسنده مسئول: mehmandoust@iaukhsh.ac.ir

### چکیده

### واژه‌های کلیدی

ضریب انتقال حرارت جابجایی، نانوسیال، عدد ناسلت، جریان آرام

مساله بررسی عددی انتقال حرارت در کانال با مقطع مثلث متساوی الاضلاع با قطر هیدرولیکی ۸ میلی‌متر، طول ۱ متر با استفاده از نانوسیال آب-اکسیدمس، در ۲ قطر ۲۰ و ۸۰ نانومتری و کسر حجمی ۱، ۲ و ۴ درصد، ابتدا در حالت شار ثابت در هر ۳ وجه کانال و سپس حالت شار ثابت بر روی ۲ وجه و دمای ثابت بر روی وجه کف (صفحه داغ) می‌باشد. نانوسیال بصورت تکفازی در نظر گرفته می‌شود. در تکنولوژی نانو، اولین اثر کاهش اندازه ذرات، افزایش سطح است. افزایش نسبت سطح به حجم نانوذرات باعث می‌شود که اتم‌های واقع در سطح، اثر بسیار بیشتری نسبت به اتم‌های درون حجم ذرات، بر خواص فیزیکی ذرات داشته باشند. همچنین ترکیب نانوذرات با سیال، بواسطه حرکت براونی نانوذرات و اثر خوشه‌ای آنها، موجب افزایش ضریب هدایت گرمایی و ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال می‌شود. از آنجا که در بحث انتقال حرارت، افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی به تنهایی کافی نبوده و عدد ناسلت نیز باید بررسی شود. در این پایان‌نامه سعی کردیم هر دو پارامتر را در کنار هم بررسی کنیم. رژیم جریان آرام در نظر گرفته شده است. ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت، تاثیر قطر نانوذرات بر میزان انتقال حرارت، تاثیر کسر حجمی نانوذرات بر ماکزیمم سرعت در مقطع عرضی بررسی شده است.

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی خمینی شهر، اصفهان، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی خمینی شهر، اصفهان، ایران.

## ۱- مقدمه

به طور کلی به مخلوطی از نانوذرات فلزی یا غیرفلزی با قطر کمتر از صد نانومتر که در یک سیال پایه معلق شده باشند، نانو سیال اطلاق می‌شود. نمونه‌های فراوانی از نانو سیال‌ها در طبیعت وجود دارند. به عنوان مثال خون یک نانو سیال زیستی پیچیده است که نانو ذرات مختلف در ابعاد مولکولی نقش‌های متفاوتی را ایفا می‌کنند. با توجه به نوع سیال پایه مورد استفاده (آلی یا غیر آلی) و همچنین نوع نانو ذرات مورد نظر، انواع مختلفی از نانو سیال‌ها به وجود می‌آیند که می‌توان به نانو سیال‌های استخراجی، زیست‌محیطی (کنترل‌گر آلودگی محیط‌زیست)، زیستی و دارویی اشاره کرد. نانو سیال‌ها جنبه‌های ویژه‌ای دارند که آن‌ها را کاملاً از مخلوط سیالات دو فاز می‌کنند [۱]. مخلوط سیالات دو فاز مرسوم به دلیل درشت‌تر بودن ذرات، باعث انسداد کانال‌های جریان می‌شوند. علاوه بر آن سرعت ته‌نشینی ذرات در آن‌ها بالاتر بوده و افت فشار بیشتری را ایجاد می‌کنند. خوردگی خطوط لوله نیز در این موارد بسیار مشاهده می‌شود. قدرت مورد نیاز برای پمپ کردن این سیالات بیشتر است. حال آنکه در نانو سیال‌ها به دلیل حرکت براونی و نیز برهم کنش‌های بین ذرات و سطح بالا این آثار کاهش می‌یابد [۲]. اولین بار چو [۳] در آزمایشگاه آرگون در ایالات متحده نانو سیالات را تولید کرد. بعد از او محققین زیادی در مورد خواص نانو سیالات به تحقیق و پژوهش پرداختند. طبق تحقیقات صورت گرفته عوامل گوناگونی همچون سایز، جنس، شکل و غلظت ذره، دما، نوع سیال پایه، نوع رژیم جریان (آرام یا متلاطم بودن)، ترکیبات نگه‌دارنده نانو سیال و بسیاری از عوامل دیگر در تعیین خواص نانو سیال و میزان انتقال حرارت آن‌ها موثرند. تاکنون رابطه دقیق و جامعی برای پیش‌بینی و تعیین ویژگی‌های فیزیکی نانو سیالات به دست نیامده است و روابط تجربی موجود از نانو سیالی به نانو سیال دیگر، از غلظتی به غلظت دیگر و حتی از سایز ذره‌ای به سایز ذره دیگر از

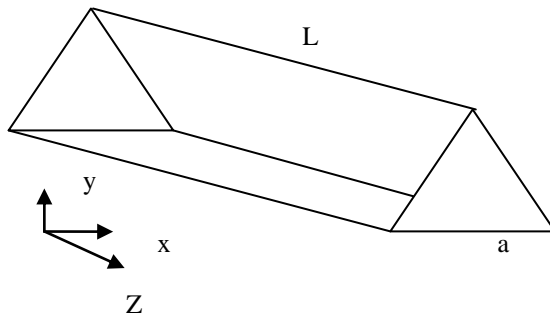
همان جنس ذره، متفاوت می‌باشد. به عنوان مثال انتخاب نانوذرات با ضریب هدایت بالاتر، مثلاً مس به جای اکسید آلومینیم موجب افزایش انتقال حرارت در نانو سیال می‌گردد. خالد و همکاران [۴] میزان افزایش انتقال حرارت جریان کاملاً توسعه‌یافته‌ی آرام در یک کانال دو بعدی را با کنترل اثرات پخش گرمایی داخل سیال ارائه دادند. در این مطالعه، معادلات انرژی برای رژیم‌های جریان مختلف با شرط مرزی شار حرارتی ثابت به صورت تحلیلی و عددی با چشم‌پوشی از اتلافات گرما و هدایت محوری حل شدند. نانوسیال نیوتنی فرض شد. هریس و همکاران [۵] با استفاده از مدل همگن که فرض می‌کند معادلات انرژی و جریان، در اثر وجود ذرات تغییر نمی‌کنند، انتقال حرارت جابجایی آرام نانوسیال در یک لوله با شرط مرزی دمای سطح ثابت را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. با چشم‌پوشی از نفوذ و پخش محوری، معادله‌ی انرژی برای جریان آرام کاملاً توسعه‌یافته در یک لوله‌ی دایروی در اعداد پکلت مختلف (۶۵۰۰-۲۵۰۰) برای نانو سیالات آب-اکسید آلومینیم، آب-مس و آب-اکسید مس حل شده و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که اضافه کردن نانو ذرات به مایع به طرز بارزی ضریب انتقال حرارت جابجایی را افزایش می‌دهد، همچنین ضریب انتقال حرارت با افزایش غلظت و با کاهش اندازه‌ی نانو ذرات، افزایش می‌یابد. بهزاد مهر [۶] به بررسی جریان مغشوش نانوسیال پرداخت و از معادلات حالت دوفازی برای حل نانوسیال استفاده کرد که از نظر بررسی توزیع جریان ورودی نانوسیال، اولین تحقیق عددی در این زمینه است. همچنین نشان داد که اضافه کردن ۱٪ مس به سیال پایه آب موجب افزایش ۱۵٪ عدد ناسلت و افزایش ملایم ضریب اصطکاک پوسته‌ای می‌شود. لی و همکاران [۷] به بررسی ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیال با ذرات اکسید شده بوسیله حل عددی و با در نظر گرفتن نانوسیال به صورت تک فاز پرداختند. آرش کریمی‌پور و همکاران [۸] در زمینه شبیه‌سازی جریان سیال و انتقال حرارت در محفظه شیبدار با دیواره متحرک تحقیق کردند و مقادیر بسیار

رینولدز ۸۰۰ و کسر حجمی ۶٪، عدد ناسلت حدود ۵۰٪ بیشتر از حالت رینولدز برابر ۱۰۰ است. بنگ و هو [۱۳] در تحقیقی متفاوت به بررسی پارامترهای مطرح در طراحی یک سیستم با استفاده از نانوسیال پرداختند. آن‌ها با اشاره به روابط حاکم بر مشخصات ترمو فیزیکی نانو سیالات گوناگون، بیان کردند که مطالعات و آزمایش‌های بیشتری نیاز است تا بتوان از عملکرد سیستمی که بر اساس استفاده از نانو سیال طراحی شده است مطمئن گردید. شریعت و همکاران [۱۴] جریان آرام جابجایی مختلط نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را در لوله افقی با سطح مقطع بیضوی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها برای تحلیل خود از روش دو فاز ترکیبی بهره بردند و به اثر تغییرات پارامترهای مختلف از جمله درصد حجمی نانو ذرات و عدد ریچاردسون بر روی تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک پوسته‌ای پرداختند. وانگ پنگ و همکاران [۱۵] به بررسی روش‌های تحلیل عددی و دقت آن‌ها پرداختند. آن‌ها تحلیل خود را با سه روش تکفاز همگن، دو فاز اوایلر-اوایلر و دو فاز اوایلر-لاگرانژ انجام داده و با نتایج تجربی مشابه مقایسه کردند. نهایتاً دریافتند که از بین مدل‌های مورد استفاده، مدل اوایلر-لاگرانژ دقیق‌ترین تحلیل را ارائه می‌دهد، درحالی‌که مدل تکفاز از کمترین دقت برخوردار است. پنتزلی و همکاران [۱۶] عملکرد نانوسیال آب-اکسید مس را در مبادله کن گرمایی صفحه‌ای به صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند. داده‌های آن‌ها نشان می‌داد که علاوه بر خواص فیزیکی، نوع جریان داخل مبادله کن هم تأثیر به سزایی در میزان انتقال گرما دارد. برگمن [۱۷] اثرات کاهش ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال را در جریان جابجایی اجباری آرام و تک فاز به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داد. او نشان داد که با وجود کاهش در ظرفیت گرمایی ویژه، انتقال حرارت برای نانوسیال در مقایسه با آب بهتر است. دانگتونگ سوک و ونگوسز [۱۸] مشخصه‌های میدان جریان و انتقال گرمای نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم با غلظت ۰/۲ درصد را در انتقال حرارت جابجایی اجباری در یک مبدل گرمایی جریان مخالف دو لوله‌ای به صورت

نزدیک به اعداد آزمایشگاهی برای عدد ناسلت بدست آوردند. ون ودینگ [۹] انتقال حرارت نانو سیال آب واکسید آلومینیوم را در جریان آرام تحت شار حرارتی ثابت دیواره بررسی کرده و دریافتند که افزایش ضریب انتقال حرارت نانو سیال، با تغییرات عدد رینولدز و غلظت نانو ذرات خصوصاً در ناحیه ورودی، رابطه مستقیم دارند. آنها همچنین به بررسی انتقال حرارت در نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم درون لوله مسی در رژیم جریان آرام پرداختند. این آزمایش نشان داد زمانی که ۱/۶٪ حجمی اکسید آلومینیوم به آب اضافه شود عدد ناسلت به میزان ۴۷٪ افزایش می‌یابد. لطفی و همکاران [۱۰] انتقال حرارت جابجایی نانو سیالات را با نگرش‌های مختلف به صورت عددی حل کرده و با هم مقایسه کردند. از مدل ترکیبی دو فازی و مدل اوایلری و همچنین از حل به روش تک فاز در این مطالعه استفاده و مقایسه شدند. اثر غلظت نانو ذرات بر روی پارامترهای حرارتی ارزیابی شد. با مقایسه‌ی نتایج با کارهای آزمایشگاهی، مشخص شد که مدل ترکیبی، جواب‌های بهتری در مقایسه با حل‌های دیگر ارائه می‌دهد. نانوسیال مورد استفاده آب-اکسید آلومینیوم بود. رستمی و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۰ مطالعه‌ای عددی بر روی جریان اجباری و در حالت مغشوش در کانال طویل با شار حرارتی ثابت و با بررسی متغیرهای مختلف انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش کسر حجمی نانو ذرات، تنش برشی دیواره و نیز نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. آنها همچنین دریافتند که در یک عدد رینولدز و کسر حجمی مشخص، نانو ذرات اکسید مس نسبت به نانو ذرات اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم موجب افزایش بیشتری در عدد ناسلت خواهند شد. در مقاله ای که توسط احمد و همکاران [۱۲] انجام شد، بررسی عددی انتقال حرارت در نانوسیال با ذرات اکسید آلومینیوم، اکسید مس و اکسید سیلیسیم و سیال پایه اتیلن گلیکول در کانال با مقطع مثلثی در حالت جریان آرام، در حضور مولد گرما، با عدد رینولدز در محدوده ۱۰۰-۸۰۰ انجام شد و مشاهده شد که برای نانوسیال اتیلن گلیکول-اکسید سیلیسیم در عدد

آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. ضریب انتقال حرارت جابجایی و ضریب اصطکاک در رژیم جریان توربولانی به دست آمد. ذرات ۲۱ نانومتری در این مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفتند. افزایش ۶ تا ۱۱ درصدی در ضریب انتقال حرارت در مقایسه با مایع پایه حاصل شد. ضریب انتقال گرما با افزایش دبی جرمی آب داغ و نانوسیال افزایش می‌یافت. افت فشار نانوسیال به میزان کمی در مقایسه با مایع پایه افزایش یافت. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که معادله ی نیلینسکی قادر به پیش‌بینی صحیح ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال نیست. انگوین و همکاران [۱۹] به صورت آزمایشگاهی، انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را در خنک کاری ریزپردازنده‌ها و سایر قطعات الکترونیکی بررسی کردند. رژیم جریان آشفته در نظر گرفته شد. داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که اضافه کردن نانوذرات به مایع، انتقال حرارت را به میزان زیادی افزایش می‌دهد. برای غلظت  $6/8$  درصد از نانوذرات، ضریب انتقال حرارت، ۴۰ درصد در مقایسه با آب افزایش یافت. همچنین مشخص شد که ذرات ۳۶ نانومتری، ضریب انتقال حرارت را در مقایسه با ذرات ۴۷ نانومتری، بیشتر افزایش می‌دهند. زینلی هریس [۲۰] به بررسی آزمایشگاهی انتقال حرارت جابجایی آرام در نانوسیال آب-اکسیدمس و آب-اکسید آلومینیوم درون لوله با شرط دمای ثابت دیواره پرداخت. او دریافت که ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش عدد پکله افزایش می‌یابد و این افزایش در نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم بیشتر از نانوسیال آب-اکسیدمس است. در تحقیق دیگری که توسط این فرد [۲۱] در سال ۲۰۰۷ انجام گرفت، مشخص شد که اضافه کردن ذرات اکسید آلومینیوم با کسر حجمی  $2/5\%$  منجر به افزایش  $40\%$  در ضریب انتقال حرارت میانگین از دیواره می‌شود. همچنین تحقیق آزمایشگاهی دیگری توسط زینلی هریس [۲۲] با موضوع بررسی انتقال حرارت جابجایی اجباری در حالت جریان آرام و با استفاده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در کانالی با مقطع مثلث متساوی الاضلاع و در حالت شار ثابت در دیواره انجام شد و معلوم شد که

ضریب انتقال حرارت آزمایشگاهی نانوسیال بیشتر از ضریب انتقال حرارتی آزمایشگاهی آب خالص است و نیز این ضریب انتقال حرارت بیشتر از حالت محاسبه شده در تئوری است. همچنین این آزمایش نشان داد که میزان نرخ انتقال حرارت با افزایش درصد حجمی ذرات نانوسیال و افزایش عدد پکله، افزایش می‌یابد. وفایی و ون [۲۳] در یک کار جدید انتقال حرارت جابجایی نانو سیال آب-آلومینا را در میکرو کانال تحت بررسی قرار دادند. آن‌ها مقدار کاهش انتقال حرارت را در ناحیه ورودی مشاهده کردند، اما عمده افزایش انتقال حرارت در ناحیه کاملاً توسعه یافته بدست آمد. کیم و همکاران [۲۴] در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی، مشخصه‌های انتقال حرارت نانو سیالات در جریان آرام و آشفته داخل لوله با شرط مرزی شار حرارتی ثابت را بررسی کردند. نانو ذرات مورد استفاده، اکسید آلومینیوم و نانو ذرات کربنی در آب بودند. در نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با غلظت ۳ درصد، افزایش ضریب هدایت حرارتی و ضریب انتقال حرارت جابجایی به ترتیب ۸ و ۲۰ درصد بود. برای نانو ذرات کربنی، ضریب هدایت حرارتی مشابه با آب بود در حالی که ضریب انتقال حرارت آن در حالت جریان آرام، ۸ درصد افزایش نشان می‌داد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که افزایش در ضریب انتقال حرارت جابجایی خیلی بیشتر از افزایش در ضریب هدایت حرارتی است. لای و همکاران [۲۵] انتقال حرارت جابجایی آب-اکسید آلومینیوم را در لوله‌ای به قطر  $1/02$  میلی‌متر به صورت آزمایشگاهی برای نواحی در حال توسعه و کاملاً توسعه یافته مطالعه کردند. شرط مرزی در این مطالعه، شار حرارتی ثابت بود. افت فشار نیز اندازه‌گیری شد. طول ورودی گرمایی با افزایش غلظت، افزایش یافت. همچنین ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش دبی جرمی افزایش می‌یابد. نصرافهانی و فتوکیان [۲۶] به بررسی تجربی انتقال حرارت جابجایی اجباری در جریان مغشوش و میزان افت فشار توسط نانوسیال اکسیدمس-آب درون لوله پرداختند. در آزمایشی مشابه، دانگ سوک و ونگ وایز [۲۷] نیز به بررسی تجربی انتقال حرارت جابجایی



شکل (۱) هندسه مساله

معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای جریان دائم و تکفاز نانوسیال درون کانال بصورت زیر می‌باشند:

$$\nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla v) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\rho c_p v T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

خواص ترموفیزیکی نانوسیال شامل چگالی، ضریب انتقال حرارت رسانایی، ظرفیت گرمایی ویژه و لزجت از روابط موجود در مقاله مرجع و بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\rho_{eff} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (4)$$

$$c_{p,eff} = (1 - \phi)c_{p,f} + \phi c_{p,p} \quad (5)$$

$$\mu_{eff} = (123\phi^2 + 7.3\phi + 1)\mu_f \quad (6)$$

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = (1 + 64.7\phi^{0.7460}(\frac{d_f}{d_p})^{3.690}(\frac{k_s}{k_f})^{0.7476}Pr^{0.995}Re^{1.232}) \quad (7)$$

که در رابطه (۷) برای عدد پرانتل داریم:

$$Pr = \frac{\mu}{\rho_f \alpha_f} \quad (8)$$

ویسکوزیته و ضریب پخش حرارتی در رابطه (۸) به ترتیب با استفاده از روابط (۹) و (۱۰) بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\mu = a * 10^{b/(T-c)} \quad a = 2.414e - 5, b = 247, c = 140 \quad (9)$$

اجباری در جریان مغشوش و میزان افت فشار توسط نانوسیال اکسید تیتانیوم-آب پرداختند. بن منصور و همکاران [۲۸] جریان آرام جابجایی مختلط نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را در لوله مایل به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده و به بررسی اثر غلظت نانو ذرات و توان ورودی جهت تولید شار حرارتی ثابت پرداختند. همچنین آن‌ها توانستند جهت محاسبه عدد ناسلت در لوله افقی و قائم روابطی را ارائه کنند. ذیحی و همکاران [۲۹] در سال ۲۰۱۳ مطالعه همزمان آزمایشگاهی و عددی برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در حالت جریان آرام در کانال با مقطع مثلث متساوی الاضلاع و شار حرارتی ثابت در دیواره را انجام دادند که نتیجه آن افزایش نرخ انتقال حرارت با افزایش غلظت حجمی نانو ذرات بود.

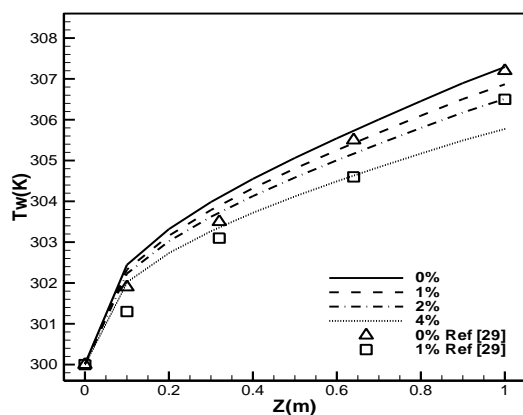
## ۲- هندسه مساله و معادلات حاکم

مقاطع غیر مدور بدلیل افت فشار کمتری که در مقایسه با مقاطع دایره‌ای ایجاد می‌کنند در مواردی که افت فشار سیال پارامتر مهمی باشد بسیار مورد توجه قرار می‌گیرند. البته مقدار حرارت منتقل شده در این کانالها نسبت به لوله های مدور کمتر است. در میان کانال های غیر دایره ای، کانال های مثلثی افت فشار کمتری نشان می‌دهند. در اینجا انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید مس در کانال با مقطع مثلث متساوی الاضلاع به صورت عددی بررسی می‌شود. علت انتخاب کانالی با سطح مقطع مثلث متساوی الاضلاع این است که طبق نتایج بدست آمده، این پروفیل نسبت به تمامی مقاطع دایروی و غیردایروی و همچنین انواع مختلف مثلث، افت فشار کمتری در مسیر جریان ایجاد کرده و از آنجا که بحث افت فشار در نانوسیالات از اهمیت بالایی برخوردار است اهمیت انتخاب این پروفیل مشخص می‌شود. کانال با مقطع عرضی مثلث متساوی الاضلاع به ضلع ۱۴ میلیمتر، قطر هیدرولیکی ۸ میلیمتر و عمق ۱۰۰۰ میلیمتر مفروض است. هندسه مساله به صورت شکل ۱ می‌باشد.

$$\overline{Nu} = \frac{hD_h}{k_{eff}} \quad (15)$$

### ۳- بررسی صحت عملکرد برنامه کامپیوتری

جهت اطمینان از صحت برنامه کامپیوتری در یک حالت مشخص نتایج حاصل با نتایج مقاله مرجع [۲۹] مقایسه شده است. به دلیل ذکر نشدن میزان شار اعمالی بر روی وجوه در مقاله مذکور، با استفاده از صحیح و خطا هر بار میزان شارهای مختلفی را بر روی وجوه اعمال کردیم تا سرانجام با شار ثابت ۱۲۰۰ وات بر مترمربع (هر وجه مقدار یکسان ۴۰۰ وات بر مترمربع)، و با سیال پایه آب، دمای دیواره در خروجی به دمای ۳۰۷،۲۹ کلوین رسید. (دمای بدست آمده در شکل ۵ صفحه ۶۰۵ مقاله مرجع [۲۹]). سپس توزیع دما روی دیواره در راستای طولی کانال و نیز ضریب انتقال حرارت جابجایی بر روی سطوح شار ثابت به منظور مقایسه با مقاله مرجع آورده شده است. در فرایند حل از شبکه با تعداد گره  $1000 \times 15 \times 17$  در راستای X, Y, Z و سائز المان  $0.8$  میلی متر استفاده شده است. در این حالت سرعت روند همگرایی مساله بالا است و نیز اختلاف بسیار کمی بین نتایج کار حاضر و نتایج مقاله مرجع [۲۹] با ریزتر کردن شبکه- بندی حاصل شده است. شکل (۲) توزیع دمای روی دیواره در حالت شار ثابت ۳ وجه برای نتایج حاصل و نتایج مقاله مرجع [۲۹] را نشان می دهد و نیز شکل (۳)، ضریب انتقال حرارت جابجایی روی دیواره در حالت شار ثابت ۳ وجه برای نتایج حاصل و نتایج مقاله مرجع [۲۹] را نشان می دهد.



شکل (۲) مقایسه توزیع دما بر روی دیواره کانال در راستای طولی به ازای کسر حجمی- های متفاوت

$$\alpha_f = k_f / \rho_f c_{p,f} \quad (10)$$

و برای محاسبه عدد رینولدز و قطر ذرات سیال پایه در رابطه (۷) به ترتیب داریم:

$$Re = (\rho_f \beta_c T) / (3\pi \mu^2 L_{bf}) \quad (11)$$

$$d_f = .1 \left( \frac{6M}{N\pi\rho_f} \right)^{1/3} \quad (12)$$

که در رابطه (۱۱)، ثابت بولتزمن و پایش آزاد مولکولی آب برابر اعداد ثابت زیر می باشد:

$$\beta_c = 1.3807E - 23$$

$$L_{bf} = 0.17 \text{ nm}$$

و در رابطه (۱۲)، جرم مولکولی آب و عدد آووگادرو برابر اعداد ثابت زیر است:

$$M = 18 \frac{\text{g}^T}{\text{mol}}$$

$$N = 6.022E23 \text{ mol}^{-1}$$

خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱) خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات

خواص ترموفیزیکی	آب	اکسیدمس
چگالی (Kg/m <sup>3</sup> )	۹۹۷	۶۳۰۰
گرمای ویژه (J/Kgk)	۴۱۸۱/۷	۵۳۷
لزجت (Pa.s)	۰/۰۰۰۸۹	
ضریب هدایت حرارتی (W/mk)	۰/۶۰۶۹	۱۷/۶۵

دو وجه کانال در حالت شار ثابت و وجه کف کانال در حالت دمای ثابت ۳۲۰ کلوین قرار دارد (صفحه داغ). ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط برای صفحه دما ثابت (صفحه داغ) به صورت زیر تعریف می شود:

$$\bar{h} = \frac{\dot{m} c_p (T_{m,o} - T_{m,i})}{A_s \Delta T_{lm}} \quad (13)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_s - T_{m,o}) - (T_s - T_{m,i})}{\ln[(T_s - T_{m,o}) / (T_s - T_{m,i})]} \quad (14)$$

ناسلت میانگین برای صفحه دما ثابت (صفحه داغ) به صورت زیر تعریف می شود:

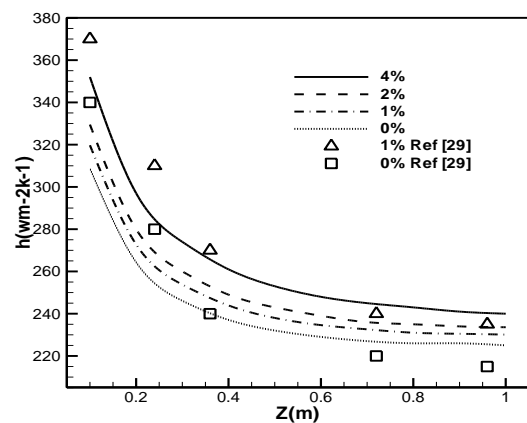
دمای متوسط سیال آب در خروجی کانال برای ۳ شبکه-بندی با سایز المان متفاوت محاسبه و نتایج در جدول (۳) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود دما در حالت دوم و سوم اختلاف بسیار کمی داشته (خطایی در حدود ۰/۰۲٪)، به منظور کاهش میزان زمان محاسبات و نیز با توجه به دقت کافی، از سایز المان ۰/۸ میلی‌متر برای مش-ریزی استفاده می‌کنیم. تعداد گره در راستای محورهای X,Y,Z به‌ازای سایزهای شبکه متفاوت نیز بیان شده است.

### ۵-نتایج و بحث

در کار حاضر جابجایی اجباری در یک کانال با مقطع مثلث متساوی الاضلاع با نانوسیال آب-اکسید مس در کسرحجمی‌های متفاوت و ۲ قطر ذره ۲۰ و ۸۰ نانومتر بررسی شده است. با تعریف نسبتی تحت عنوان نسبت شار که نشان‌دهنده تغییرات نسبت شار در دو وجه کانال است به ادامه مساله می‌پردازیم. شار اعمالی بر یکی از وجوه همواره ثابت و مقدار آن ۶۰۰ وات بر مترمربع است. شار اعمالی بر وجه دیگر را برای حالات ۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ وات بر مترمربع، بررسی می‌کنیم. یا به عبارتی نسبت شار ۰، ۰/۵ و ۱. در ضمن وجه کف کانال (صفحه داغ) در حالت دمای ثابت ۳۲۰ کلوین قرار دارد. در این قسمت از مساله نحوه تغییرات نسبت شار با عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین بر روی صفحه داغ (وجه با دمای ثابت ۳۲۰ کلوین)، میزان تاثیر قطر و کسرحجمی نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط و ناسلت میانگین صفحه داغ و میزان تاثیر نانوذرات بر میزان افت فشار در طول کانال بررسی می‌شود. در تمامی محاسبات عدد رینولدز ثابت و مقدار آن برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شده است و جریان در حالت آرام قرار دارد. کلیه اعداد بدست آمده برای ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط و عدد ناسلت میانگین بر روی صفحه داغ (وجه افقی دما ثابت) به‌دست آمده است.

در جدول (۳) دمای متوسط آب در خروجی به‌ازای سایزهای شبکه متفاوت مقایسه می‌شود. نحوه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین با تغییر نسبت شار

همانگونه که در شکل (۲) مشاهده می‌شود با پیشروی در راستای طولی کانال مقادیر بدست آمده برای دمای دیواره کانال در کار حاضر و نتایج مقاله مرجع [۲۹] به یکدیگر نزدیکتر شده و از اواسط کانال تقریباً با یکدیگر برابر می‌شوند. همچنین در شکل ۳ مقادیر ضریب انتقال حرارت جابجایی برای نتایج حاصل و نتایج مقاله مرجع [۲۹] در حالت شار ثابت و یکنواخت بر روی هر ۳ وجه برای سیال آب خالص و نانوسیال با کسرحجمی ۱٪ نشان داده شده است که تطابق قابل قبولی بین داده‌ها وجود دارد. همچنین جدول ۲ اعداد به‌دست آمده برای ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت برای نتایج حاصل و نتایج مقاله مرجع [۲۹] در حالت شار ثابت و یکنواخت بر روی وجه‌ها برای آب خالص را نشان می‌دهد و همانگونه که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج حاصل و نتایج مقاله مرجع [۲۹] به‌دست آمده است.



شکل (۳) مقایسه نحوه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی بر روی سطوح شار ثابت

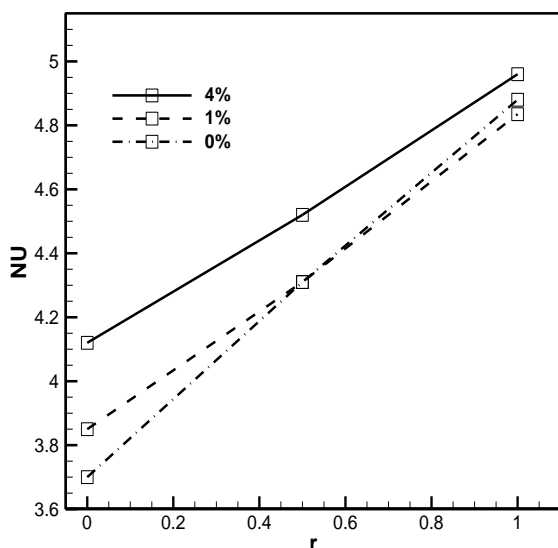
جدول (۲) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجایی و ناسلت در کار

حاضر و مقاله مرجع			
h (W/m <sup>2</sup> K)	Nu	h <sub>ref</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	Nu <sub>ref</sub>
۲۳۳/۶	۳/۰۸	۲۲۵	۳/۰۱

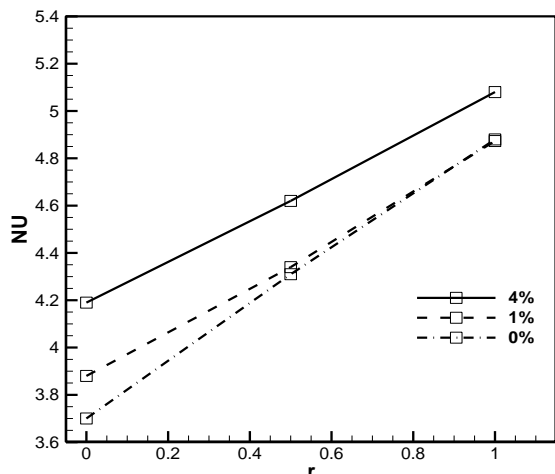
### ۴- بررسی استقلال نتایج از شبکه

به منظور یافتن یک شبکه مناسب در فرایند حل و مطالعه جریان سیال و انتقال حرارت درون کانال با مقطع مثلث متساوی الاضلاع در حالت (۳) شار ثابت روی وجه‌ها،

جابجایی میانگین با نسبت شار دیواره‌ها در قطر ۸۰ نانومتر ذرات، مشاهده می‌شود.



شکل (۵) نحوه تغییرات عدد ناسلت میانگین با نسبت شارها در قطر ۲۰ نانومتر



شکل (۶) نحوه تغییرات عدد ناسلت میانگین با نسبت شارها در قطر ۸۰ نانومتر

بنابراین در حالت استفاده از آب خالص به ازای نسبت شارهای متفاوت روی دو وجه کانال، تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی و ناسلت میانگین با نسبت شارها بر روی صفحه داغ (وجه دما ثابت افقی)، بر اساس جدول (۴) بدست می‌آید.

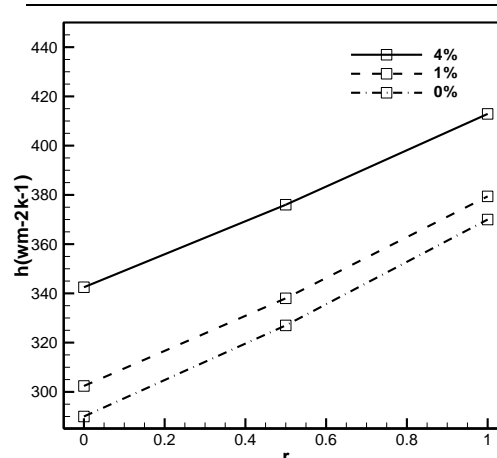
جدول (۴) تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین و ناسلت

نسبت شار	$\bar{h}$ (W/m <sup>2</sup> K)	$\overline{Nu}$
۰	۲۹۰	۳/۷۰
۰/۵	۳۲۷	۴/۳۱
۱	۳۷۰	۴/۸۸

برای نانوسیال با کسر حجمی‌های متفاوت و قطر نانوذرات ۲۰ نانومتر و همچنین سیال آب خالص به صورت شکل (۴) بیان و مقایسه می‌شود.

جدول (۳) مقایسه دمای متوسط آب در خروجی به ازای سایزهای شبکه

متفاوت	تعداد گره	دما (کلوین)
سایز المان (میلی متر)	۱۴*۱۲*۱۰۰۰	۳۰۶/۰۱۲
۱	۱۷*۱۵*۱۰۰۰	۳۰۵/۵۴۳
۰/۸	۲۳*۲۰*۱۰۰۰	۳۰۵/۴۹۰



شکل (۴) نحوه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین با نسبت شارها در قطر ذرات ۲۰ نانومتر

همانگونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین با نسبت شار دیواره‌ها بصورت خطی تغییر می‌کند و با افزایش نسبت شار از ۱-۰ ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین نیز افزایش پیدا می‌کند. این تغییرات برای عدد ناسلت میانگین با نسبت شار دیواره‌ها نیز بصورت خطی است که در شکل (۵) مشاهده می‌شود. در واقع به این دلیل که ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین و عدد ناسلت میانگین رابطه‌ای خطی با یکدیگر دارند، با خطی شدن تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین با نسبت شار دیواره‌ها، عدد ناسلت میانگین نیز با نسبت شار دیواره‌ها بصورت خطی تغییر می‌کند. نحوه تغییرات عدد ناسلت میانگین با تغییر نسبت شار برای حالات مختلف و قطر ذرات ۲۰ نانومتر به صورت شکل ۵ حاصل می‌شود. شکل (۶) نحوه تغییرات عدد ناسلت میانگین با نسبت شارها در قطر ۸۰ نانومتر را نشان می‌دهد. همچنین در شکل (۷) نحوه تغییرات ضریب انتقال حرارت



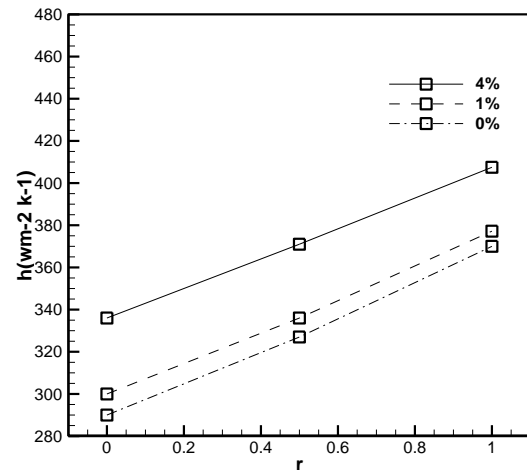
شود، با افزایش کسر حجمی نانوذرات ضریب انتقال حرارت جابجایی و ناسلت میانگین در تمامی حالات افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که با افزایش نسبت شار اعمالی بر روی وجوه، ضریب انتقال حرارت جابجایی و ناسلت میانگین در یک کسر حجمی ثابت، افزایش می‌یابد. در جدول ۵ در صورت استفاده از نانوسیال با کسر حجمی ۴٪ و نسبت شار ۰، در مقایسه با حالت استفاده از نانوسیال با کسر حجمی ۱٪ و نسبت شار ۰، افزایشی در حدود ۱۲٪ در میزان ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین حاصل می‌شود ولی در صورت استفاده از نانوسیال با کسر حجمی ۴٪ و نسبت شار ۰، در مقایسه با حالت استفاده از نانوسیال با کسر حجمی ۱٪ و نسبت شار ۰، افزایشی در حدود ۸٪ در میزان عدد ناسلت میانگین بدست می‌آید و در نتیجه میزان افزایش عدد ناسلت میانگین، به میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین بدست نیامده است.

جدول (۵) تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی و ناسلت میانگین با نسبت شارها در قطر ۸۰ نانومتر با کسر حجمی ۱٪ و ۴٪

کسر حجمی %	نسبت شار	$\bar{h}$ (W/m <sup>2</sup> K)	$Nu$
۱	۰	۳۰۰	۳/۸۸
۱	۰/۵	۳۳۶	۴/۳۴
۱	۱	۳۷۷/۲	۴/۸۷۳
۴	۰	۳۳۶	۴/۱۹
۴	۰/۵	۳۷۱	۴/۶۲
۴	۱	۴۰۷/۵	۵/۰۸

جدول (۶) تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی و ناسلت میانگین با نسبت شارها در قطر ۲۰ نانومتر با کسر حجمی ۱٪ و ۴٪

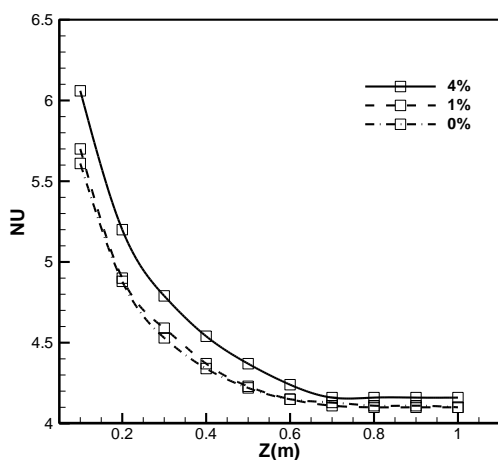
کسر حجمی %	نسبت شار	$\bar{h}$ (W/m <sup>2</sup> K)	$Nu$
۱	۰	۳۰۲/۴	۳/۸۵
۱	۰/۵	۳۳۸	۴/۳۱
۱	۱	۳۷۹/۴	۴/۸۳۵
۴	۰	۳۴۲/۵	۴/۱۲
۴	۰/۵	۳۷۶	۴/۵۲
۴	۱	۴۱۲/۹	۴/۹۶



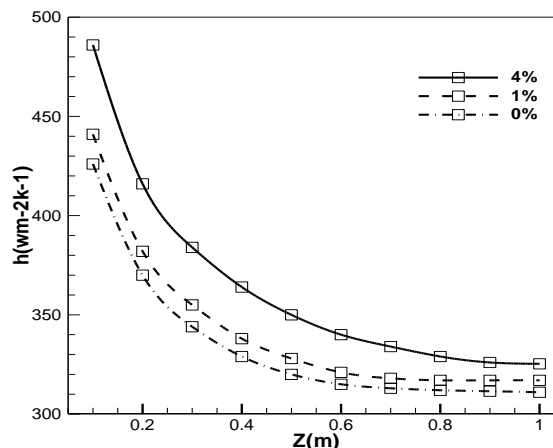
شکل (۷) نحوه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین با نسبت شارها در قطر ۸۰ نانومتر

در حالت استفاده از نانوسیال با کسر حجمی ۱٪ و ۴٪ و نانوذرات با قطر ۸۰ نانومتر به ازای نسبت شارهای متفاوت روی دو وجه، تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی و ناسلت میانگین با نسبت شارها برای صفحه داغ (وجه دما ثابت افقی)، بر اساس جدول ۵ حاصل می‌شود. در مجموع، کاهش قطر نانوذرات منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین شده اما از طرفی به دلیل افزایش ضریب رسانایی با کاهش قطر، ناسلت میانگین مقدار کمی کاهش یافته است. در نتیجه تغییر قطر نانوذرات تاثیر چندانی بر بهبود میزان انتقال حرارت ندارد. در یک قطر ثابت، با کاهش نسبت شارها از ۱ به ۰، اختلاف ناسلت میانگین برای کسر حجمی‌های متفاوت، به شدت افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در قطر ذرات ۸۰ نانومتر، نسبت شار ۱، میزان افزایش عدد ناسلت میانگین نانوسیال با کسر حجمی ۴٪ نسبت به آب خالص ۱/۶۴٪ می‌باشد. در صورتیکه با نسبت شار ۰/۵، میزان افزایش ناسلت میانگین نسبت به آب خالص ۷/۱۹٪ می‌باشد. و با نسبت شار ۰، میزان افزایش ناسلت میانگین نسبت به آب خالص ۹/۶۹٪ است. در حالت استفاده از نانوسیال با کسر حجمی ۴٪ و نانوذرات با قطر ۲۰ نانومتر به ازای نسبت شارهای متفاوت روی دو وجه، برای صفحه داغ (وجه دما ثابت افقی)، تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی و ناسلت میانگین بصورت جدول (۶) بدست می‌آید. همانطور که در جدول (۵) و جدول (۶) مشاهده می‌

برای نانوسیال با کسر حجمی‌های مختلف، برای ۱۰ نقطه مختلف در راستای طولی کانال در شکل ۸ آورده شده است. همچنین ناسلت موضعی بر روی صفحه داغ، برای ۱۰ نقطه مختلف در راستای طولی کانال، در حالت نسبت شار ۱ در دو وجه و قطر ذرات ۸۰ نانومتر برای نمونه در شکل (۹) آورده شده است. همانگونه که از شکل (۸) و شکل (۹) مشخص است از ناحیه ای حدود نقطه ۶۰۰ میلیمتر به بعد در راستای طولی، ضرایب انتقال حرارت جابجایی موضعی و نیز عدد ناسلت موضعی، بر روی صفحه داغ تغییرات زیادی ندارند. همانگونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود در ورودی کانال بر روی صفحه داغ، ضرایب انتقال حرارت جابجایی برای نانوسیال با کسر حجمی‌های مختلف، اختلاف زیادی داشته و با پیشروی در راستای طولی کانال از این اختلاف کاسته می‌شود. همانگونه که در شکل ۹ نیز مشاهده می‌شود در ورودی کانال بر روی صفحه داغ، عدد ناسلت برای نانوسیال با کسر حجمی‌های مختلف، اختلاف زیادی داشته و با پیشروی در راستای طولی کانال از این اختلاف کاسته می‌شود. نمودار توزیع سرعت در مقطع عرضی بصورت شکل (۱۰) بدست می‌آید. همانگونه که در نمودار توزیع سرعت شکل (۱۰) مشاهده می‌شود با افزایش در میزان کسر حجمی نانوذرات، در یک عدد رینولدز ثابت، مقدار سرعت ماکزیمم در ناحیه توسعه یافته و در مقطع عرضی، افزایش می‌یابد علت آن نیز تاثیر بیشتر افزایش لزجت در مقایسه با افزایش چگالی نانوسیال می‌باشد.



شکل (۹) توزیع عدد ناسلت موضعی بر روی صفحه داغ در حالت نسبت شار ۱ و قطر ذرات ۸۰ نانومتر



شکل (۸) توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی موضعی بر روی صفحه داغ در حالت نسبت شار ۱ و قطر ذرات ۸۰ نانومتر

با کاهش قطر نانوذرات از ۸۰ به ۲۰ نانومتر، ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین، افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین نانوسیال با کسر حجمی ۴٪، نسبت شار ۱، قطر ذرات ۲۰ نانومتر، نسبت به آب خالص ۱۱/۶٪ افزایش یافته در حالیکه این میزان افزایش برای قطر ذرات ۸۰ نانومتر، نسبت به آب خالص ۱۰٪ است. و یا در مثالی دیگر میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین نانوسیال با کسر حجمی ۴٪، نسبت شار ۰، قطر ذرات ۲۰ نانومتر، نسبت به آب خالص ۱۸٪ افزایش یافته در حالیکه این میزان افزایش برای قطر ذرات ۸۰ نانومتر، نسبت به آب خالص ۱۶٪ است. با کاهش قطر نانوذرات از ۸۰ به ۲۰ نانومتر، عدد ناسلت کاهش می‌یابد که دلیل آن افزایش ضریب رسانش با کاهش قطر نانوذره و در نتیجه کاهش عدد ناسلت است. به‌عنوان مثال میزان افزایش ناسلت میانگین نانوسیال با کسر حجمی ۴٪، نسبت شار ۱، قطر ذرات ۲۰ نانومتر، نسبت به آب خالص ۱/۶۴٪ است در حالیکه این میزان افزایش برای قطر ذرات ۸۰ نانومتر، نسبت به آب خالص ۴/۱٪ است. و یا در مثالی دیگر میزان افزایش ناسلت میانگین نانوسیال با کسر حجمی ۴٪، نسبت شار ۰، قطر ذرات ۲۰ نانومتر، نسبت به آب خالص ۷/۸٪ است در حالیکه این میزان افزایش برای قطر ذرات ۸۰ نانومتر، نسبت به آب خالص ۹/۶۹٪ است. ضرایب انتقال حرارت جابجایی موضعی بر روی صفحه داغ در حالت نسبت شار ۱ در دو وجه و قطر ذرات ۸۰ نانومتر،

میزان ۱/۲٪ نسبت به حالت استفاده از آب خالص، افزایش می‌یابد. در واقع ضریب انتقال حرارت جابجایی به میزان ۷٪ افزایش داشته است ولی ضریب رسانایی گرمایی نیز به میزان ۵/۷۳٪ افزایش داشته که در کل، افزایش ناسلت ۱/۲٪ حاصل شده است. هر میزان از تقارن شرایط مرزی سطوح کانال کاسته شود تاثیر استفاده از نانوسیال در بهبود انتقال حرارت بیشتر می‌شود بعنوان مثال در صورتیکه نسبت شار برابر صفر باشد یا به عبارتی یک وجه در حالت آدیاباتیک، یک وجه در حالت شار ثابت و وجه کف در حالت دما ثابت باشد به نسبت حالت شار ثابت برای ۳ وجه میزان ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت افزایش می‌یابد. از آنجا که در بحث انتقال حرارت افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین به تنهایی کافی نبوده و عدد ناسلت نیز باید بررسی شود، در این مقاله سعی کردیم هر دو پارامتر را در کنار هم بررسی کنیم که به نتایج قابل توجه و قابل تاملی نیز دست پیدا کردیم. استفاده از نانوسیال موجب افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین شده اما از طرفی به دلیل افزایش ضریب رسانایی توسط نانو ذرات، ناسلت میانگین به میزان بسیار کمی افزایش می‌یابد که دور از انتظار است.

#### ۷- فهرست علائم

$c_p$  ظرفیت گرمایی ویژه ( $\text{Jkg}^{-1}\text{k}^{-1}$ )

$h$  ضریب انتقال حرارت جابجایی ( $\text{wm}^{-2}\text{k}^{-1}$ )

$K$  رسانش هدایتی ( $\text{wm}^{-1}\text{k}^{-1}$ )

$L$  طول (m)

$Nu$  عدد ناسلت

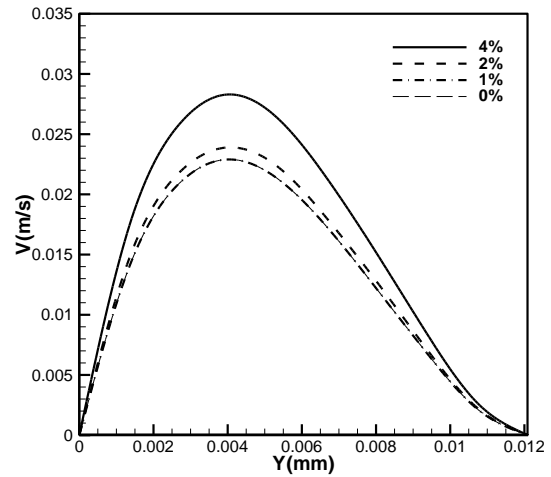
$p$  فشار ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )

$pr$  عدد پرانتل

$r$  نسبت شار

$Re$  عدد رینولدز

$T$  دما (K)



شکل (۱۰) توزیع سرعت در مقطع عرضی و ناحیه توسعه یافته به ازای کسر حجمی‌های متفاوت

#### ۶- جمع بندی و نتیجه گیری

نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد هرچه اندازه‌ی ذرات استفاده شده کوچکتر باشد، مدل تک فاز جواب‌های دقیق‌تری را به دست می‌دهد همچنین مدل تک فاز برای ذرات با اندازه‌ی بزرگتر از ۱۰۰ نانومتر قابل استفاده نمی‌باشد. با افزایش قطر نانو ذرات، رفتار نانوسیال به سمت عدم یکنواختی پیش می‌رود و برای بدست آوردن جواب‌های دقیق لازم است که از معادلات و روابط مربوط به حالت ۲فازی استفاده شود. در مجموع، کاهش قطر نانو ذرات منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی میانگین شده اما از طرفی به دلیل افزایش ضریب رسانایی با کاهش قطر، ناسلت میانگین مقدار کمی کاهش یافته است. در نتیجه تغییر قطر نانو ذرات تاثیر چندانی بر بهبود میزان انتقال حرارت ندارد. با افزایش کسر حجمی، به دلیل افزایش پرانتل، طول ناحیه در حال توسعه حرارتی نیز افزایش می‌یابد و نیز دمای سطح دیواره کانال کاهش می‌یابد که نشان دهنده افزایش میزان انتقال حرارت توسط نانو ذرات است. در حالت شار ثابت در هر ۳ وجه کانال، افزودن نانو ذرات اکسید مس به سیال پایه آب، موجب افزایش ناچیزی در عدد ناسلت ناحیه توسعه یافته می‌شود. در صورت استفاده از نانو ذرات اکسید مس با کسر حجمی ۴٪، عدد ناسلت تنها به

- [7] Lee S.W., Park S.D., Kang S., Bang I.C., Kim J.H., Investigation of viscosity and thermal conductivity of SiC nanofluids for heat transfer applications, *International journal of heat and mass Transfer*, vol. 54, 2011, pp. 433-8.
- [8] Karimipour A., Afrand M., Akbari M., Safaei M.R., Simulation of fluid flow and heat transfer in the inclined enclosure, in: *Int. Conf. Fluid Dyn. Thermodyn. (ICFDT 2012)*, 2012, Zurich Switzerland.
- [9] Wen D., Ding Y., Experimental Investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions, *International Journal of Heat Mass Transfer*, vol. 47, 2004, pp. 5181-5188.
- [10] Lotfi R., Saboohi Y., Rashidi A.M., Numerical study of forced convective heat transfer of Nanofluids: Comparison of different approaches, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, vol. 37, pp. 74-78.
- [11] Rostamani M., Hosseinizadeh S.F., Gorji M., Khodadadi J.M., Numerical study of turbulent forced convection flow of nanofluids in a long horizontal duct considering variable properties, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, 2010, pp. 1426-1431.
- [12] Ahmed H.E., Mohammed H.A., Yusoff M.Z., Heat transfer enhancement of laminar nanofluids flow in a triangular duct using vortex generator, *Superlattices and Microstructures*, vol. 52, 2012, pp. 398-415.
- [13] Bang I.C., Heo G., An axiomatic design approach in development of nanofluid coolants, *Applied Thermal Engineering*, no. 1, vol. 29, 2009, pp. 75-90.
- [14] Shariat M., Akbarinia A., Hossein A., Behzadmehr A., Laur R., Numerical study of two phase laminar mixed convection nano fluid in elliptic ducts, *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, 2011, pp. 2348-2359.
- [15] Peng W., Minli B., Jizu L., Liang Z., Wenzheng C., Guojie L., Comparison of Multidimensional Simulation Models for Nanofluids Flow Characteristics, *Numerical Heat Transfer Part B Fundam.*, vol. 63, 2013, pp. 62-83.

#### علائم یونانی

$\alpha$  ضریب پخش حرارتی ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )

$\mu$  لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )

$\rho$  چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )

#### زیر نویس ها

ave مقدار متوسط

bf پایش آزاد مولکولی

eff نانو سیال

f سیال پایه

#### مراجع:

- [1] Singh A.K., Thermal Conductivity of Nanofluids, *Defence Science Journal*, vol. 58, no. 5, 2008, pp. 600-607.
- [2] Maxwell J.C., *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 3rd edition. Oxford, UK: Clarendon Press, 1891.
- [3] Das S.K., Choi S.U.S., Patel H.E., Heat Transfer in Nanofluids- A Review, *Heat Transfer Engineering*, vol. 27, 2006, pp. 3-19.
- [4] Khaled A.R.A., Vafai K., Heat transfer enhancement through control of thermal dispersion effects, *International Journal of Heat Transfer*, vol. 48, 2005, pp. 2172-2185.
- [5] Heris S.Z., Esfahany M.N., Etemad G., Numerical Investigation of Nanofluid Laminar Convective Heat Transfer through a Circular Tube, *Numerical Heat Transfer Part A*, vol. 52, Sep. 2007, pp. 1043-1058.
- [6] Behzadmehr A., Saffar-Avval M., Galanis N., Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two phase approach, *International Journal of Heat Fluid Flow*, vol. 28, 2007, pp. 211-219.

- Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, vol. 11, 2008, pp. 970–978.
- [26] Fotukian S.M., Nasr Esfahany M., Experimental study of turbulent convective heat transfer and pressure drop of dilute CuO/water nanofluid inside a circular tube, *International Communications in Heat and Mass Transfer* vol. 37, 2010, pp. 214-219.
- [27] Duangthongsuk W., Wongwises S., An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, 2010, pp. 334-344.
- [28] Ben Mansour R., Galanis N., Nguyen C.T., International Journal of Thermal Sciences Experimental study of mixed convection with water e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid in inclined tube with uniform wall heat flux,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, 2010, pp. 403–410.
- [29] Zabihi K., Gholamian F., Vasefi S.I., Experimental and Numerical Investigation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Water Nanofluid Inside a Triangular Tube, *World Applied Sciences Journal*, vol. 22, 2013, pp. 601-607.
- [16] Pantzali M.N., Mouza A.A., Paras S.V., c (PHE), *Chemical Engineering Science*, vol. 64, No. 14, 2009, pp. 3290–3300.
- [17] Bergman T.L., Effect of reduced specific heats of nanofluids on single phase, laminar internal forced convection, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, 2009, pp. 1240–1244.
- [18] Duangthongsuk W., Wongwises S., Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO<sub>2</sub>-water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, 2009, pp. 2059–2067.
- [19] Nguyen C.T., Roy G., Gauthier C., Galanis N., Heat transfer enhancement using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid for an electronic liquid cooling system,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, 2007, pp. 1501–1506.
- [20] Zeinali Heris S., Etemad S.Gh., Nasr Esfahany M., Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer, *International communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 33, 2006, pp. 529-535.
- [21] Zeinali Heris S., Nasr Esfahany M., Etemad S.Gh., Experimental investigation of convective heat transfer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid in circular tube, *International journal of Heat Fluid Flow*, vol. 28, 2007, pp. 203-210.
- [22] Zeinali heris S., Edalati Z., Noei H., Experimental investigation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid through equilateral triangular duct with constant wall heat flux in laminar flow, *Heat transfer engineering*, vol.35, No. 13, 2014, pp. 321-334.
- [23] Vafaei S., Dongsheng Wen Convective Heat Transfer Of Alumina Nanofluid in a Microchannel, IHTC14-22206.
- [24] Kim D., Kwon Y., Cho Y., Li C., Cheong S., Hwang Y., Lee J., Hong D., Moon S., Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions, *Current Applied Physics*, vol. 9, 2009. pp. 119–123.
- [25] Lai W.Y., Phelan P.E., Vinod S., Prasher R., Convective heat transfer for water-based alumina nanofluids in a single 1.02-mm tube, *Intersociety Conference on*



