

شبیه سازی عددی دوفازی جریان و انتقال حرارت نانوسیال‌ها در میکرو چاه حرارتی با استفاده از مدل مخلوط همگن

دورنا جمشیداصلی^۱ و عباس عباسی^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی مکانیک

^۲ استاد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی مکانیک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۲/۴/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۱۷

چکیده

در مقاله حاضر، جریان و انتقال حرارت جابجایی آرام نانوسیالها در یک میکروکانال دو بعدی با صفحات موازی بدون و با در نظر گرفتن انتقال حرارت هم بسته به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. دو نوع نانوذرات آلومینوم اکسید و تیتانیوم اکسید به ترتیب با قطرهای ۴۷ و ۲۷ نانومتر برای بررسی انتخاب شده اند. حل عددی در محدوده‌ی اعداد رینولدز کمتر و مساوی ۱۶، غلظت ۱ تا ۴ درصد و برای مقادیر مختلف هدایت گرمایی چاه حرارتی انجام شده است. همچنین، مدل مخلوط دوفازی به صورت همگن برای حل جریان استفاده شده است. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی و کسر حجمی برای فاز ذرات با استفاده از روش حجم محدود حل شده است. نتایج نشان داد که انتقال حرارت نسبت به آب خالص، با افزایش عدد رینولدز، غلظت نانوذرات، هدایت گرمایی چاه حرارتی و استفاده از نانوسیال آلومینا/آب در مقایسه با تیتانیوم اکسید/آب، افزایش می‌یابد. نتایج مدل مخلوط دو فازی همگن، تطابق خوبی با نتایج عددی دیگر محققان دارد.

کلمات کلیدی: نانوسیال؛ چاه حرارتی میکروکانال؛ مدل مخلوط؛ انتقال حرارت؛ میکروکانال.

Two-phase numerical simulation of flow and heat transfer of nanofluids in a microchannel heat sink using homogeneous mixture model

D. Jamshideasli¹ and A. Abbasi^{2,*}

¹ M.Sc. Student of Mech. Eng., Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

² Prof. of Mech. Eng., Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

In this paper, flow and laminar convective heat transfer of nanofluids in two dimensional parallel plate microchannel have been studied without and with considering the conjugate heat transfer numerically. Two types of nanoparticles are considered in this study, the Aluminium oxide and Titanium oxide with the diameters of 47nm and 27 nm, respectively. The simulation is conducted for $Re \leq 16$, 1% to 4% volume concentration range, and for different conductivities of heat sink. Moreover, the two phase homogenous mixture model has been used to study the fluid. Continuity, momentum, energy and volume fraction of nanoparticles equations are solved using a finite volume method. It is observed that the heat transfer rate enhances with an increase in Reynolds number, conductivity of heat sink and the use of the nanofluid Alumina/ water in comparison with Titanium oxide/water. Homogeneous two-phase mixture model results are in good agreement with the numerical results of other researchers.

Keywords: Nanofluid; Microchannel Heat sink; Mixture model; Heat transfer; Microchannel.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۲۱۶۴۵۴۳۴۲۵

آدرس پست الکترونیک: abbassi@aut.ac.ir

۱- مقدمه

تحولات بوجود آمده در زمینه سیستم‌های میکروالکترومکانیک، ساخت دستگاه‌های بسیار کوچک را ممکن کرده است. از سوی دیگر این دستگاه‌ها در مقیاس کوچک، شار گرمایی بالایی تولید می‌کنند. این شار گرمایی، برای تضمین عملکرد مناسب این دستگاه باید توسط یک سیستم خنک کننده گرفته شود و نیز درجه حرارت مجاز برای این دستگاهها نیز باید در یک محدوده مشخصی باشد. یکی از راه‌های ممکن برای سرد کردن این دستگاهها استفاده از نانوسیالات می باشد. نانوسیال یک سوسپانسیون از نانوذرات فلزی یا غیر فلزی در ابعاد ۱۰۰-۱۰ نانومتر در یک مایع خنک کننده معمولی مانند آب، اتیلن گلیکول و یا روغن می باشد.

اولین مشاهدات در خصوص افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال در اثر استفاده از نانوذرات در مایعات توسط ماسودا^۱ و همکاران [۱] گزارش شد و اولین بار اصطلاح نانوسیال برای نانوذرات معلق در مایعات توسط چوی^۲ [۲] پیشنهاد گردید. از آن پس تحقیقات عددی و آزمایشگاهی زیادی در زمینه‌ی نانوسیالات صورت گرفت. پاک^۳ و چو [۳] جریان و انتقال حرارت مغشوش دو نوع نانوسیال آلومینا/آب و تیتانیوم اکسید/آب داخل لوله را مورد آزمایش قرار دادند. بدین منظور آنها شرط مرزی شار حرارتی ثابت را به دیواره‌ی لوله اعمال نمودند. آن‌ها در این بررسی لزجت نانوسیال را اندازه‌گیری کردند و برای ضریب هدایت موثر، نتایج تجربی موجود را مورد استفاده قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که ضریب افت فشار داری برای نانوسیال با دقت خوبی با نتایج بدست آمده از رابطه‌ی کیز^۴ [۴] که برای سیال تک‌فاز ارائه شده است، مطابقت دارد و نیز ضریب انتقال حرارت نانوسیال با افزایش عدد رینولدز و نیز با افزایش غلظت حجمی ذرات، افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آنها نشان داد که در یک سرعت متوسط ثابت، ضریب انتقال حرارت نانوسیال به اندازه ۱۲ درصد کمتر از سیال خالص است. اکبری نیا^۵ و همکاران

[۵] در کار عدد دیگری به مطالعه اثر قطر ذرات در جریان جابجایی ترکیبی در یک لوله خمیده افقی با استفاده از روش مخلوط دوفازی پرداخته‌اند. در این مطالعه ذرات در ابعاد نانومتری و میکرومتری مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل نشان دهنده‌ی افزایش سرعت محوری و کاهش جریان ثانویه و دما، با افزایش قطر ذرات در کسر حجمی ثابت است. همچنین افزایش قطر ذرات باعث افزایش ضریب اصطکاک پوسته‌ای و کاهش عدد ناسلت می‌گردد. همچنین برای ذرات میکرونی نیروی گریز از مرکز باعث کشیده شدن ذرات به سمت دیواره بیرونی می‌شود، در حالیکه برای نانو ذرات چنین اثری مشاهده نمی‌شود. همچنین برای ذرات در مقیاس نانو، افزایش قطر ذرات تاثیر چندانی روی الگوی جریان ندارد. کلت^۶ و همکاران [۶] انتقال حرارت نانوسیال را در میکروکانال با روش دوفازی اویلری-اویلری بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که اختلاف سرعت و دما بین ذرات و سیال ناچیز است و توزیع ذرات هم یکنواخت است، ولی سیال مانند یک سیال همگن غیرنیوتونی رفتار می‌کند. همچنین، با مقایسه‌ی نتایج با نتایج تجربی نشان دادند که مدل دوفازی نتایج دقیق‌تری دارد و انتقال حرارت نانوسیال را بهتر پیش‌بینی می‌کند یانگ^۷ و همکاران [۷] انتقال حرارت نانوسیال آلومینا/آب با قطر ۴۷ نانومتر، در یک میکروکانال با دیواره‌های دما ثابت و در یک چاه حرارتی مستطیلی شکل، برای اعداد رینولدز پایین با روش لاتیس بولتزمن بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که عدد ناسلت با افزایش درصد حجمی ذرات و افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. عباسیان^۸ و امانی^۹ [۸] تاثیر درصد حجمی نانوذرات را بر میزان انتقال حرارت نانوسیال تیتانیوم اکسید/آب در یک جفت لوله‌ی افقی از یک مبدل حرارتی جریان معکوس، مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که ضریب انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز و درصد حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. آنها همچنین نشان دادند که میزان توان موردنیاز برای تامین افت فشار مناسب نانوسیال، در رینولدزهای بالای ۳۰۰۰ نسبت به رینولدزهای پایین‌تر بسیار بیشتر بوده، در

¹ Masuda² Choi³ Pak⁴ Kays⁵ Akbarinia⁶ Kalteh⁷ Yang⁸ Abbasian⁹ Amani

شرط مرزی انتقال حرارت هم بسته در سطح مشترک جامد و مایع به کار می رود (این شرط به دلیل پیوستگی انتقال حرارت و دما محدود می شود)، نقش بسیار مهمی ایفا می کند. در این مقاله روش حجم محدود برای مطالعه انتقال حرارت و جریان نانوسیال آلومینا/آب و تیتانیم اکسید/آب در یک میکروکانال برای دو حالت (الف) زمانیکه دیواره ها در دمای ثابت هستند و (ب) زمانیکه که انتقال حرارت وابسته در دیواره داریم، اعمال شده است. در این مقاله از مدل مخلوط دو فازی همگن، برای شبیه سازی سیال استفاده شده است. این مدل شامل معادله پیوستگی، معادله مومنتوم و معادله انرژی و معادله کسر حجمی برای فاز ذرات می باشد. نظریه های زیادی برای تعیین هدایت الکتریکی و ویسکوزیته دینامیکی سیالات ارائه شده است [۱۲]. در کار حاضر سعی شده است مدل مناسبی برای هر دو نانوسیال انتخاب شود. از نتایج بدست آمده انتظار می رود که اطلاعات تکمیلی در مورد استفاده از آلومینا/آب و تیتانیم اکسید/آب به عنوان نانوسیال خنک کننده در برابر استفاده از آب خالص فراهم آورد و همچنین اعتبار استفاده از مدل مخلوط دو فازی همگن برای کاربردهای مهندسی را تایید نماید.

۲- شبیه سازی عددی

۲-۱- هندسه

دو مورد در این شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفته است؛ شکل ۱. حالت (الف) از دو صفحه موازی همدمای به طول ۶۰۰ میکرومتر و فاصله ۶۰ میکرومتر تشکیل شده است. در حالت (ب)، نانوسیال عبوری از کانالی با ابعاد مشابه برای سرد کردن چاه حرارتی در بالای کانال به کار می رود. این سیال با لایه سیلیکان بالایی خود مبادله گرما می کند، در حالیکه دیواره پایینی، آدیاباتیک در نظر گرفته شده است. هر دو پدیده انتقال حرارت هدایت در لایه و انتقال حرارت جابجایی در سیال در نظر گرفته شده است (انتقال حرارت همزمان). در هر دو مورد نانوسیالهای مورد استفاده با سرعت و دمای یکنواخت وارد می شوند. ابعاد هندسی مربوطه و پارامترهای به کار رفته در این شبیه سازی در جدول ۱ آمده است.

۲-۲ - معادلات حاکم

صورتیکه میزان افزایش در ضریب انتقال حرارت برای آنها یکسان است و لذا، استفاده از نانوسیال در رینولدزهای بالا مقرون به صرفه نخواهد بود. کلتنه و همکاران [۹] جریان و انتقال حرارت آرام نانوسیال آلومینا/آب را در یک میکروکانال به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. یکی از صفحات آدیاباتیک و دیگری تحت شرایط شار ثابت قرار داشت. جریان هم به صورت تکفاز و هم به صورت دوفاز مدل سازی شد. نتایج آنها نشان داد که اختلاف سرعت و دما بین ذرات و سیال ناچیز است و می توان نانوسیال را به عنوان یک مخلوط همگن در نظر گرفت. همچنین، با مقایسه ی نتایج با نتایج تجربی نشان دادند که مدل دوفازی نتایج دقیق تری دارد و انتقال حرارت نانوسیال را بهتر پیش بینی می کند. ضریب انتقال حرارت نیز، با افزایش عدد رینولدز، افزایش غلظت حجمی ذرات و کاهش قطر ذرات افزایش می یابد. کلتنه [۱۰] انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال ها و سیال های پایه مختلف را در یک میکروکانال دو بعدی به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که برای همه نانو ذرات پخش شده در آب، افت فشار تقریباً یکسان می باشد و این در حالی است ضریب انتقال حرارت برای الماس - آب بیشترین و برای سیلیسیم - آب کمترین می باشد. همچنین افت فشار برای نانوسیال های با سیال پایه آب بسیار کمتر از بقیه و ضریب انتقال حرارت برای نانوسیالهای با سیال پایه آب بیشترین می باشد. لیلیا^۱ [۱۱] انتقال حرارت هم بسته^۲ نانوسیال آلومینا/آب با قطرهای مختلف نانو نانو ذره و درصدهای حجمی مختلف، در میکروکانال که به عنوان چاه حرارتی به کار می رود، مورد بررسی قرار داد. شرط مرزی شار گرما ثابت بر این میکرو کانال اعمال شده است. نتایج نشان می داد که بر خلاف نتایج استوار بر رینولدز ثابت، ضریب انتقال حرارت محلی در طول کانال افزایش می یابد.

در میان مطالعات انجام شده، این نیاز دیده می شود که انتقال حرارت هم بسته به منظور درک بهتر دینامیک سیال و ویژگی های حرارتی نانوسیال مورد توجه بیشتری قرار بگیرد. از طرفی دیگر انتقال حرارت هدایتی ذرات جامد زمانیکه

^۱ Lelea

^۲ Conjugate heat transfer

معادله کسر حجمی

$$\nabla \cdot (\phi \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\phi \rho_p \vec{v}_{dr,p}) \quad (5)$$

سرعت متوسط جرمی و سرعت سوق به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\vec{v}_m = \frac{\phi \rho_p \vec{v}_p + (1 - \phi) \rho_f \vec{v}_f}{\rho_m} \quad (6)$$

$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_p - \vec{v}_f = \vec{v}_{pf} \quad (7)$$

۲-۳- تعریف عدد ناسلت

عدد ناسلت محلی و متوسط به ترتیب از روابط زیر بدست می‌آید [۷]:

$$Nu = -\frac{k_{nf}}{k_{bf}} \times \frac{\partial \theta}{\partial y} \quad (8)$$

$$\overline{Nu} = \int_0^1 Nu \cdot dx \quad (9)$$

عدد ناسلت متوسط را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\overline{Nu} = -\frac{k_{nf}}{k_{bf}} \times \frac{H_c}{T_h - T_0} \int_0^{L_c} \frac{dT}{dy} \cdot dx \quad (10)$$

دمای حجمی بدین صورت محاسبه می‌شود [۱۴]:

$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^P \iint (\rho_i v_{xi} C_{pi} T_i dA)}{\sum_{i=1}^P (\rho_i v_{xi} C_{pi} dA)} \quad (11)$$

۳- خواص ترموفیزیکی نانوسیال

چگالی، ویسکوزیته، هدایت گرمایی خواص فیزیکی لازم در این بررسی می‌باشد. مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی این خواص ارائه شده است [۱۲]. بسته به این که از چه مدلی استفاده می‌شود، مقادیر متفاوتی برای عدد ناسلت بدست خواهد آمد. مدل‌های مورد استفاده در این بررسی به قرار زیر می‌باشند:

برای چگالی نانوسیالها داریم:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_{bf} + \phi \rho_p \quad (12)$$

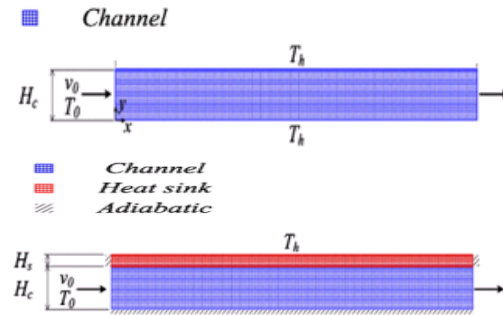
روابط مورد استفاده برای هدایت گرمایی عبارتست از:

$$k_r = \frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1.72\phi + 1.0 \quad (13)$$

این رابطه، یک رابطه تجربی می‌باشد و برای نانوذرات آلومینیوم اکسید با قطر ۴۷ نانومتر به کار می‌رود [۱۶].

$$k_r = \frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_p + 2k_{bf} + 2\phi(k_p - k_{bf})}{k_p + 2k_{bf} - \phi(k_p - k_{bf})} \quad (14)$$

جریان سیال در این بررسی دو بعدی، آرام، پایا، غیر قابل تراکم و ویسکوز در نظر گرفته شده است. شرط عدم لغزش



شکل ۱- محدوده فیزیکی مساله مورد بررسی [۷]

جدول ۱- ابعاد هندسی و پارامترهای به کار رفته

در مساله	
پارامتر	مقدار عددی
L_c (μm)	۶۰۰
H_c (μm)	۶۰
H_s (μm)	۱۵
v_0 (m/s)	۰.۰۲۸ - ۰.۳۳۵
T_0 (K)	۲۹۵
T_h (K)	۳۳۳
Re	۱۶.۸، ۴.۲

در دیواره در نظر گرفته شده است. با توجه به اختلاف اندک سرعت و دما بین ذره و سیال اطراف آن، فرض شده است که دو فاز به دلیل کوچک بودن اندازه و غلظت نانوذرات با سرعت یکسانی حرکت می‌کنند و مدل مخلوط به مدل دو فازی همگن تبدیل می‌شود. با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده معادلات پیوستگی، مومنوم، انرژی و کسر حجمی به صورت زیر خواهند بود [۱۳ و ۱۴]:

معادله پیوستگی

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (1)$$

معادله مومنوم

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_m \nabla \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\phi \rho_p \nabla \vec{v}_{dr,p} \nabla \vec{v}_{dr,p}) \quad (2)$$

معادله انرژی

$$\nabla \cdot [(\phi \rho_p C_{p,p} \vec{v}_p + (1 - \phi) \rho_f C_{p,f} \vec{v}_f) T] = \nabla \cdot (k_m \nabla T) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (k_m \nabla T) = 0 \quad (4)$$

سرعت و دما و کسر حجمی در تمام حجم کنترلها محاسبه شده است. معیار همگرایی در این بررسی به کمتر از 10^{-6} محدود شده است. برای افزایش همگرایی از ضریب تحت آرامش^{۱۲} برای سرعت و فشار استفاده گردید.

جدول ۲ - خواص ترموفیزیکی سیال و نانو ذرات [۷] و [۱۰]

TiO ₂ ۲۷ (d _p =nm)	Al ₂ O ₃ ۴۷ (d _p =nm)	فاز سیال (آب)	خواص فیزیکی
۶۸۶.۲	۷۶۵	۴۱۷۱	C _p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)
۴۲۵۰	۳۸۸۰	۱۰۰۰	ρ(kg m ⁻³)
۸.۹۵۳۸	۴۰	۰.۶۱	K(W m ⁻¹ K ⁻¹)

۴-۲- شرایط مرزی

در مورد حالت (الف) و (ب) برای شرط مرزی هیدرودینامیکی، فرض شد که هر دو فاز با سرعت محوری یکسانی (این سرعت با توجه به عدد رینولدز ورودی تعیین می شود) وارد کانال می شوند. برای خروجی کانال شرط مرزی جریان خروجی^{۱۳} با توجه به توسعه کامل بودن سیال (معادله ۱۷، ۱۸) در خروجی، در نظر گرفته می شود. شرط مرزی عدم لغزش در دیواره ها در نظر گرفته شده است. برای شرایط مرزی گرمایی در حالت (الف)، شرط مرزی دما ثابت برای هر دو دیواره در نظر گرفته شده است و برای حالت (ب) شرط مرزی آدیاباتیک در دیوار پایینی و شرط مرزی انتقال حرارت هم بسته برای دیوار بالایی (معادله ۱۹) در نظر گرفته شده است. همچنین، دیواره بالایی چاه حرارتی در دمای ثابت قرار دارد. برای ضریب هدایت گرمایی لایه بالایی سیلیکان سه مقدار مختلف ۱.۲۲، ۱.۰۱، ۱.۲۲ به ترتیب در نظر گرفته شده است. برای هر دو مورد در ورودی، نانوسیال با دمای ۲۹۵ درجه کلوین وارد می شود و شرط مرزی جریان خروجی دز خروجی برای هر دو فاز اعمال می شود.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (17)$$

$$\left. \frac{\partial(T_s(x) - T(y, x)) / (T_b(x) - T(y, x))}{\partial x} \right|_{x=l} = 0 \quad (18)$$

$$\partial Q_s = \partial Q_f, T_{outer\ face} = T_w, u = 0 \text{ at } y = H \quad (19)$$

این رابطه بر اساس هدایت گرمایی یک مخلوط دو جزئی و برای حالت خاص مدل همیلتن و کراسر^۱ بدست آمده است. هدایت گرمایی نانوذرات تیتانیوم اکسید با قطر ۲۷ نانومتر به طریق فوق محاسبه شده است [۱۲].

روابط مورد استفاده برای ویسکوزیته دینامیکی عبارتند از:

$$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 0.904 e^{14.8 \times \phi} \quad (15)$$

این رابطه، برای نانوذرات آلومینیوم اکسید با قطر ۴۷ نانومتر به کار می رود [۱۷].

$$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 5.45\phi + 108.2\phi^2 \quad (16)$$

این رابطه مدل بونجیورنو^۲ نامیده می شود و در یک کار تجربی توسط پاک و چو برای نانو ذرات تیتانیوم اکسید با قطر ۲۷ نانومتر درستی این مدل تایید شده است [۱۲].

خواص ترموفیزیکی سیال و نانوذرات در جدول ۲ ارائه شده است. خواص در دمای ۳۰۳ کلوین محاسبه شده اند.

۴- روش حل عددی

۴-۱- روش حل

هندسه مسئله در نرم افزار گمبیت^۳ تولید و شبکه بندی شده است. شبکه بندی مورد استفاده در این بررسی ۲۰×۲۰ می باشد. مش بندی یکنواخت دوبعدی سازمان یافته از نوع چهارضلعی^۴ می باشد. معادلات حاکم بر مسئله نیز با استفاده از نرم افزار انسیس فلوئنت^۵ براساس روش حجم محدود^۶ حل شده اند. جهت حل مساله از حل کننده فشار محور^۷ و برای ارتباط فشار و سرعت از طرح ساده^۸ استفاده شده است. برای برای گسسته سازی معادلات مومنتوم و انرژی از روش بالادست مرتبه دوم^۹ و برای معادله کسر حجمی از روش بالادست مرتبه اول^{۱۰} استفاده شده است. برای معیار همگرایی، مقدار باقیمانده نسبی^{۱۱} برای پارامترهای جرم و

¹ Hamilton-Crosser Model

² Buongiorno

³ Gambit

⁴ Quad

⁵ Ansys Fluent

⁶ Finite Volume

⁷ Pressure Based

⁸ Simple Scheme

⁹ Second Order Upwind

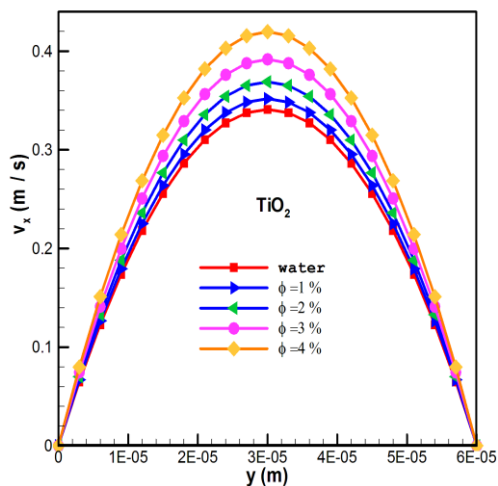
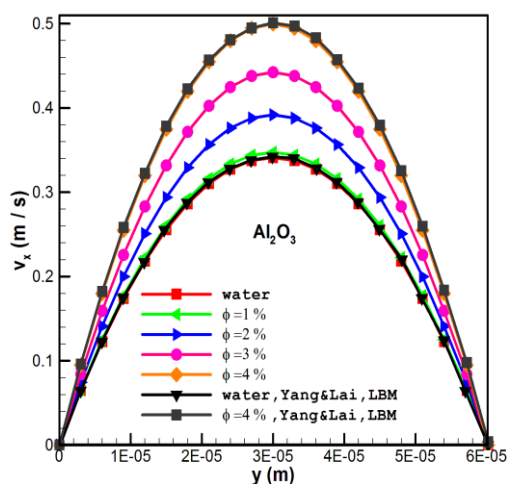
¹⁰ First Order Upwind

¹¹ Relative Residual

¹² Under Relaxation

¹³ Outflow

همانطوری که از شکل ۳-الف و ۳-ب مشاهده می‌شود، با افزایش کسر حجمی، مقدار بیشینه سرعت محوری افزایش می‌یابد. به دلیل اینکه با افزایش کسر حجمی، چگالی و ویسکوزیته نانوسیال در رینولدز ثابت، افزایش می‌یابد، ولی مقدار افزایش ویسکوزیته بیشتر از چگالی بوده و افزایش سرعت این کمبود را جبران می‌کند. افزایش سرعت و چگالی به معنای افزایش دبی جریان و نتیجتاً افزایش انتقال حرارت می‌باشد. با توجه به شکل ۴ پروفیل بی بعد شده سرعت برای همه درصد های حجمی یکسان می باشد



شکل ۳- الف و ب- توزیع سرعت برای حالت های (الف) و (ب)، در $x = 300\mu\text{m}$

و عدم تغییر پروفیل، به دلیل این می باشد که افزودن نانو ذرات به دلیل کوچک بودن ذرات و غلظت تاثیر بر پروفیل

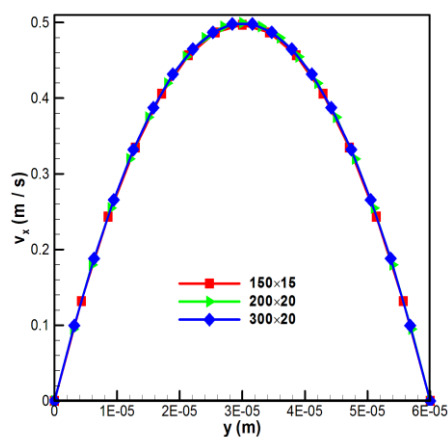
۴-۳- بررسی استقلال از شبکه

برای بررسی استقلال نتایج از تعداد نقاط شبکه بندی، مقدار ناسلت آلومینا/آب نسبت به ناسلت آب و نیز دمای بالک برای شبکه بندی های مختلف در راستای X و Y محاسبه شده است. همچنین پروفیل سرعت برای شبکه بندی های مختلف در شکل ۲ و جدول ۳ ارائه شده است. شبکه بندی مورد بررسی در این مقاله در راستای X و Y، به ترتیب برابر با ۲۰ و ۲۰۰ می باشد.

جدول ۳- نانوسیال آلومینا/آب،

حالت (الف)، $(Re = 16, \phi = 4\%)$

T_b (نانوسیال)	$\frac{\overline{Nu_{nf}}}{\overline{Nu_{bf}}}$	تعداد شبکه بندی در راستای Y	تعداد شبکه بندی در راستای X
۳۱۲.۱۹۰۱	۱.۲۰۸۱۳۳	۵۰	۵۰
۳۱۲.۱۱۹۹	۱.۲۰۷۸۲۳	۲۰	۳۰
۳۱۲.۱۵۷۷	۱.۲۰۷۴۵۷	۲۰	۲۰
۳۱۲.۰۶۷۵	۱.۲۰۶۴۱۳	۱۵	۱۵
۳۱۲.۱۶۰۸	۱.۲۰۸۰۰۸	۳۰	۳۰

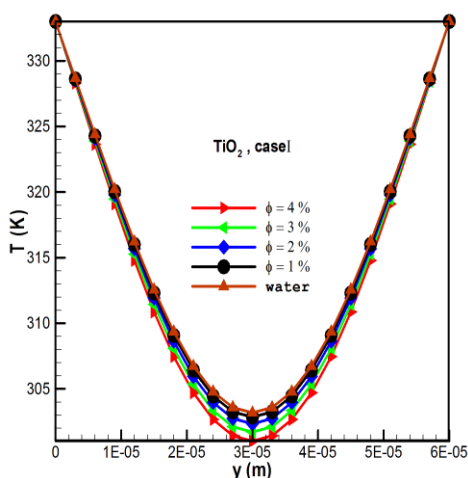


شکل ۲- بررسی استقلال از شبکه، نانوسیال آلومینا/آب، حالت (الف)، $(Re = 16, \phi = 4\%)$

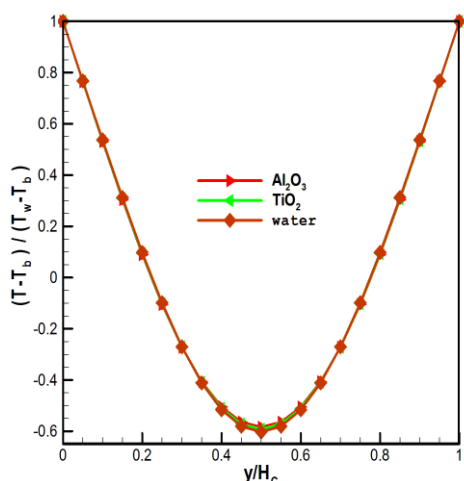
۵- ارائه نتایج و بحث

۵-۱- تاثیرات افزودن نانو ذرات بر پروفیل سرعت

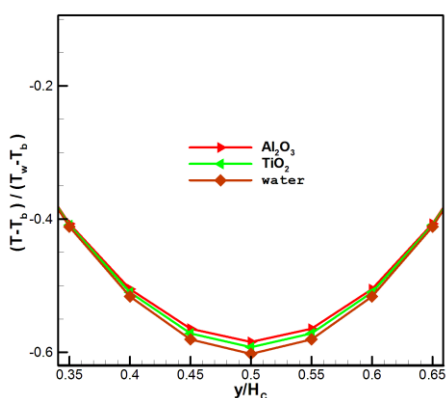
شکل ۵ - الف - توزیع دمایی، $x = 300\mu\text{m}$



شکل ۵ - ب - توزیع دمایی، $x = 300\mu\text{m}$

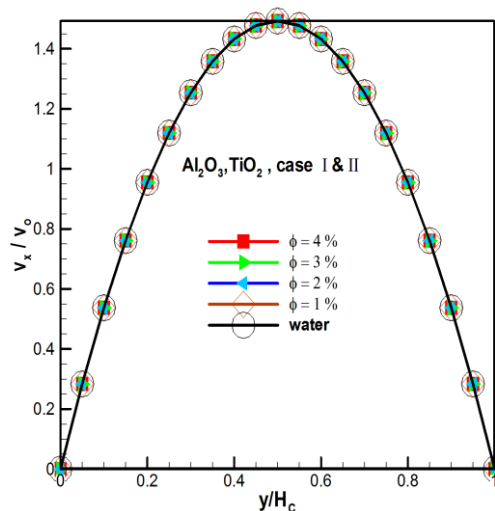


شکل ۶ - الف - توزیع دمایی بی بعد حالت (الف)، $x = 300\mu\text{m}$



شکل ۶ - ب - بزرگنمایی شکل (۶-الف)

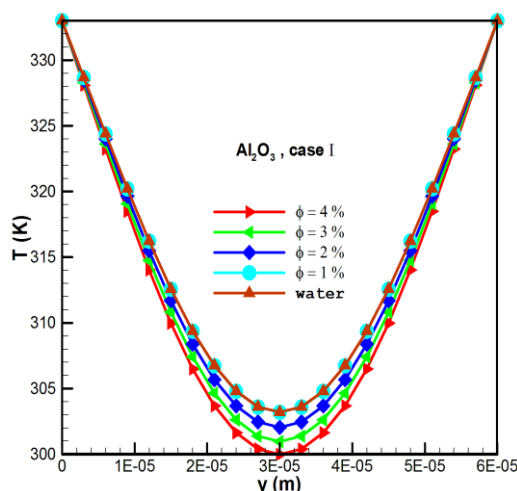
سرعت بی بعد ندارد و در نتیجه جنس نانو ذرات هم تاثیری نخواهد داشت و برای تیتانیم اکسید و آلومینوم اکسید پروفیل یکسانی خواهیم داشت.

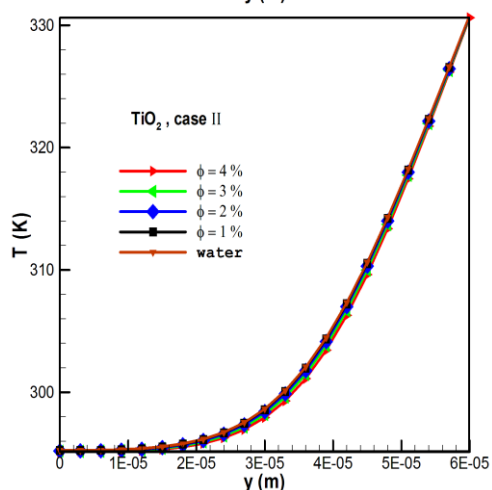
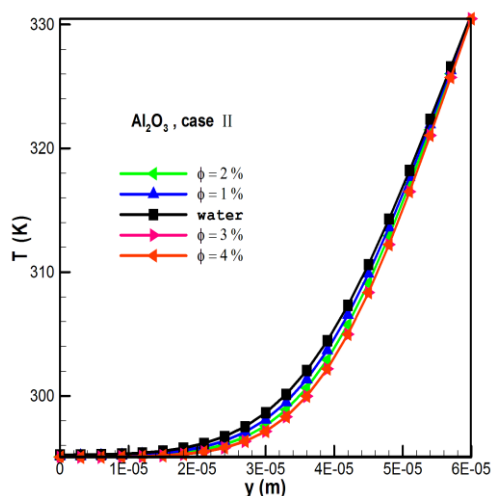
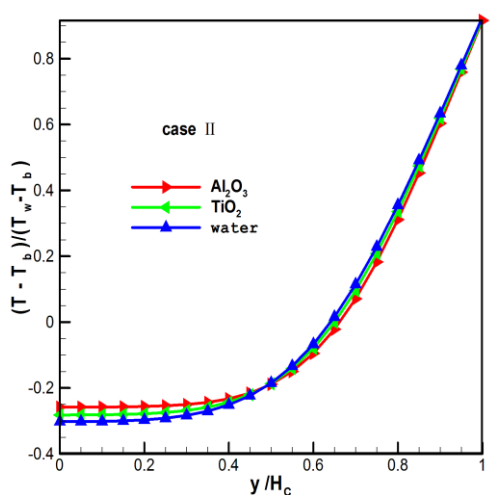


شکل ۴ - پروفیل سرعت بی بعد شده، $x = 300\mu\text{m}$

۵-۲ - تاثیرات افزودن نانوذرات بر پروفیل دمایی

شکل ۵-الف و ب، توزیع دما و شکل ۶-الف و ب پروفیل بی بعد شده دما را برای حالت (الف) نشان می دهد. دمای بالک با افزایش درصد حجمی نانو ذرات کاهش می یابد و این به دلیل افزایش سرعت ورودی و نتیجتاً دبی گرمی بالای تامین شده به دلیل افزودن نانو ذرات، می باشد. توزیع دمای بی بعد شده، وقتی از نانو سیال استفاده می شود، به خصوص در ناحیه $0.4 \leq y/H_c \leq 0.6$ بیشتر از



شکل ۷ - الف و ب - توزیع دمایی، $x = 300\mu\text{m}$ 

شکل ۸ - توزیع دمایی بی بعد شده

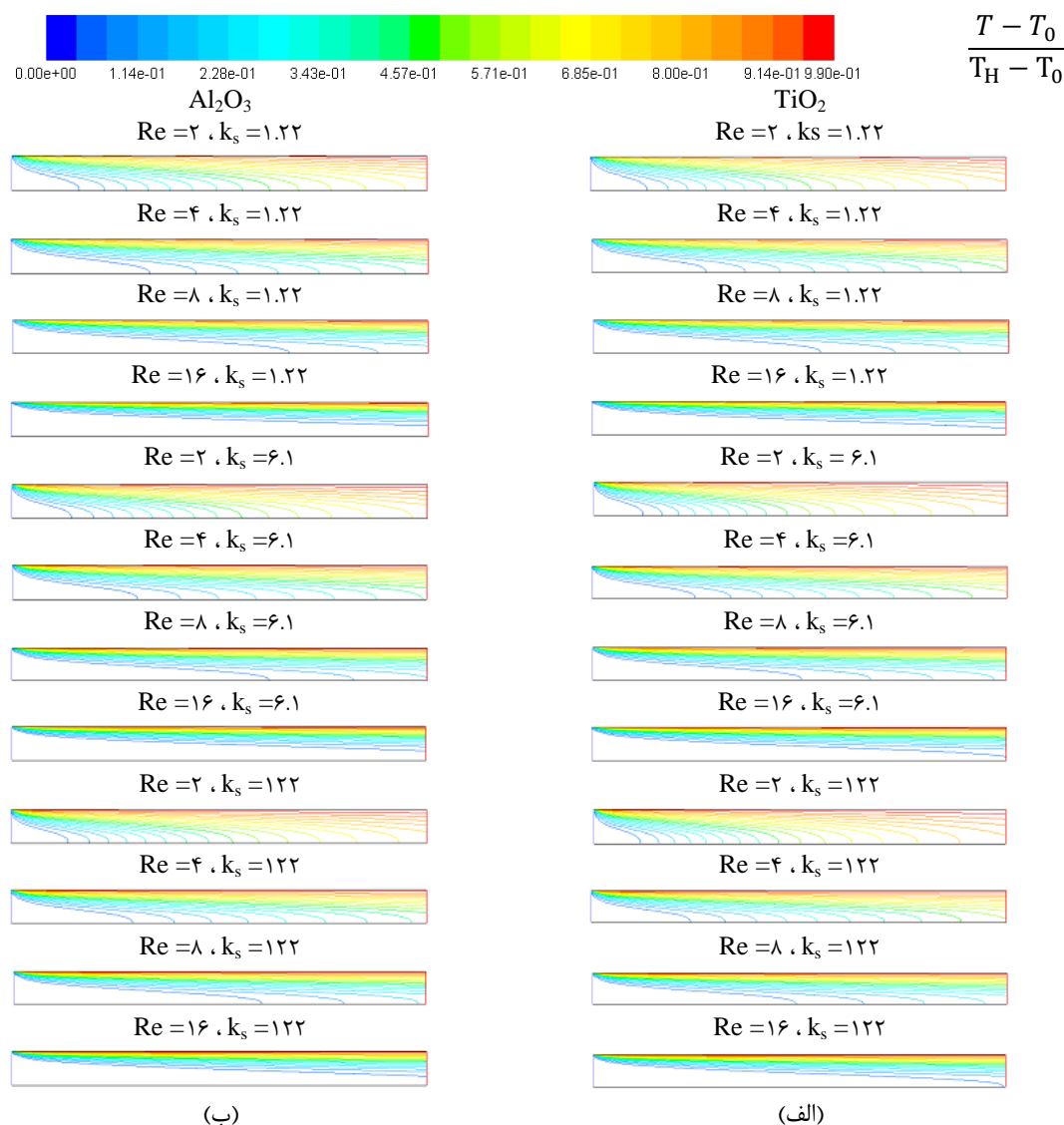
آب می باشد و توزیع دمایی یکنواخت تری خواهیم داشت و این موضوع تاییدکننده این مطلب هست که انرژی بیشتری توسط سیال با اضافه کردن نانو ذرات منتقل می شود. شکل ۷- الف و ۷- ب و شکل ۸ به ترتیب توزیع دما و پروفیل بی بعد شده دما را برای حالت (ب) نشان می دهد. با توجه به توزیع دمایی هنگامی که از نانوسیال استفاده می شود، دمای کمتری در هر نقطه متناظر حاصل می گردد. توزیع دمای بی بعد نانوسیال در نزدیکی دیوار بالایی، مقادیر کمتری از آب دارد، چرا که گرمای دیوار بالایی از طریق جابجایی دفع می شود و بنابراین انباشته نمی شود.

برای $y/H_c \leq 0.47$ ، دمای نانوسیال به دلیل هدایت حرارتی افزایش یافته به دلیل حضور نانو ذرات بیشتر از آب می باشد. میدان دمایی بی بعد شده نشان دهنده این است که، نانوسیال در فاصله کمتری از دیوار بالایی به دمای بالک می رسد. همچنین، دمای ناحیه دما پایین، نسبت به آب، نزدیکتر به دمای بالک می باشد و این به معنای توزیع یکنواخت دمایی به هنگام استفاده از نانوسیال است. نتیجه مشابهی را یانگ و لای [۷] گزارش کردند.

شکل ۹ کانتورهای دمایی بی بعد شده $(\frac{T-T_0}{T_H-T_0})$ را برای هر دو نانوسیال، برای سه مقدار نسبت هدایت گرمایی چاه حرارتی به هدایت گرمایی سیال پایه (۲،۱۰،۱۰۰) نشان می دهد. همانطوری که در شکل ۹ مشاهده می شود، گرادیان دمایی در رینولدزهای بالاتر با اهمیت تر می شود. با افزایش مقدار k_s ، توزیع دمایی در یک رینولدز ثابت یکنواخت تر می شود. همچنین، هدایت گرمایی چاه حرارتی، میدان گرمایی در کانال را تحت تاثیر قرار می دهد. با افزایش هدایت گرمایی جامد، گرما به طور موثرتری از دیوار گرم شده به سطح مشترک جامد و مایع منتقل می شود و گرمای بیشتری به سیال انتقال پیدا می کند و این امر باعث افزایش دمای بالک، علی الخصوص در خروجی می شود.

۵-۳- تاثیر عدد رینولدز و غلظت بر انتقال حرارت

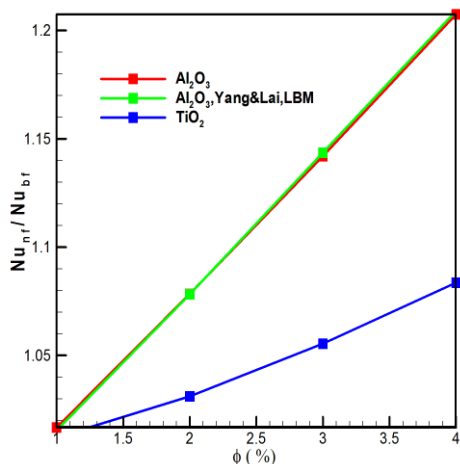
شکل ۱۰ و ۱۱ نسبت تغییرات عدد ناسلت دو نانوسیال آلومینا/آب و تیتانیوم اکسید/آب را به عدد ناسلت آب، در برابر درصد حجمی ذره در عدد رینولدز ۱۶، به ترتیب برای حالت (الف) و (ب) نشان می دهد. نتایج به خوبی نشان می دهند،



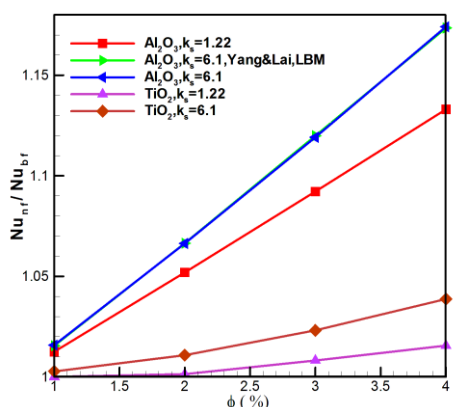
شکل ۹- کانتور دمایی بی بعد شده برای سه نسبت ضریب هدایت گرمایی چاه حرارتی سیلیکان به ضریب هدایت گرمایی سیال پایه (۲، ۱۰، ۲۰۰) برای دو نانوسیال (الف) تیتانیوم اکسید و (ب) آلومینیوم اکسید

در حالی است که در درصد حجمی ۲، برای آلومینا/آب و تیتانیوم اکسید/آب به ترتیب فقط ۸ درصد، ۳ درصد، افزایش انتقال گرما خواهیم داشت. افزایش درصد حجمی از مقدار ۲ به ۴ به ترتیب برای آلومینا/آب و تیتانیوم اکسید/آب، باعث افزایش انتقال حرارت ۱۲ درصد و ۵ درصد، می شود. در مورد دوم ($k_s = 6.1$)، برای آلومینا/آب و تیتانیوم اکسید/آب در عدد رینولدز ۱۶، در درصد حجمی ۴ مقدار انتقال حرارت به ترتیب، به اندازه ۱۷ در صد، ۳ درصد، افزایش می یابد و

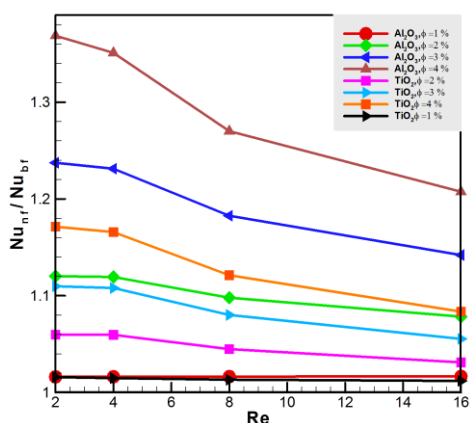
که با افزایش کسر حجمی در عدد رینولدز ثابت برای هر دو نوع از نانو ذرات یعنی آلومینیوم اکسید، تیتانیوم اکسید افزایش عدد ناسلت نسبت به سیال پایه مشاهده می شود. نتایج مربوط به عدد ناسلت نسبی آلومینا/آب دارای توافق خوبی با نتایجی که یانگ و لای [۷] ارائه دادند، می باشند. در حالت (الف)، برای آلومینا/آب و تیتانیوم اکسید/آب در عدد رینولدز ۱۶، در درصد حجمی ۴ مقدار انتقال حرارت به ترتیب، به اندازه ۲۰ در صد، ۸ درصد، افزایش می یابد و این



شکل ۱۰- رابطه عدد ناسلت نسبی با درصد حجمی، حالت (الف)



شکل ۱۱- رابطه عدد ناسلت نسبی با درصد حجمی و ضریب هدایت گرمایی، حالت (ب)



شکل ۱۲- رابطه عدد ناسلت نسبی با عدد رینولدز و درصد حجمی، حالت (الف)

این در حالی است که در درصد حجمی ۲، برای آلومینا/آب و تیتانیوم اکسید/آب به ترتیب فقط ۷ درصد، ۱ درصد، افزایش انتقال گرما خواهیم داشت. افزایش درصد حجمی از مقدار ۲ به ۴ به ترتیب برای آلومینا/آب و تیتانیوم اکسید/آب، باعث افزایش انتقال حرارت به اندازه ۸ درصد و ۱.۹ درصد، می شود. بنابراین با افزایش هدایت گرمایی چاه حرارتی درصد افزایش ناسلت نسبی بیشتر خواهد بود. همانطوری که در شکل مشاهده می شود، افزایش عدد ناسلت نسبت به سیال پایه برای نانوسیال آلومینا/آب بیشتر از نانوسیال تیتانیوم اکسید/آب می باشد و این به دلیل بیشتر بودن هدایت حرارت موثر نانوذرات آلومینیوم اکسید نسبت به نانوذرات تیتانیوم اکسید می باشد و این به دلیل بیشتر بودن هدایت حرارت موثر نانوذرات آلومینیوم اکسید نسبت به نانوذرات تیتانیوم اکسید می باشد. شکل ۱۲ نسبت تغییرات عدد ناسلت دو نانوسیال آلومینا/آب و تیتانیوم اکسید/آب را به عدد ناسلت آب، در برابر درصد حجمی ذره در اعداد رینولدز مختلف، برای حالت (الف) نشان می دهد. شکل ۱۳ و ۱۴ نسبت تغییرات عدد ناسلت نسبی برای حالت (ب) را ($k_s = 6.1, 1.22$)، در برابر درصد حجمی ذره در اعداد رینولدز مختلف، به ترتیب برای نانوسیال آلومینا/آب و تیتانیوم اکسید/آب نشان می دهد. مقدار عدد ناسلت نسبی در یک درصد حجمی ثابت با افزایش عدد رینولدز با شیب کندی کاهش می یابد و این موضوع بیانگر این مطلب است، که برای افزایش انتقال حرارت با افزایش دبی جرمی یا عدد رینولدز با محدودیت مواجه هستیم. دلیل افزایش انتقال حرارت در نانوسیال نسبت به آب با افزایش عدد رینولدز و درصد حجمی به ترتیب به دلیل افزایش انتقال حرارت جابجایی موثر و افزایش هدایت گرمایی موثر نانوسیال به دلیل شرکت بیشتر نانوذرات می باشد. افزایش ناسلت نسبی با افزایش درصد حجمی محسوس تر از تغییرات آن با عدد رینولدز می باشد. همچنین با افزایش مقدار هدایت گرمایی چاه حرارتی، مقدار افزایش انتقال حرارت افزایش می یابد.

یابد. مقدار عدد ناسلت نسبی با افزایش درصد حجمی افزایش می‌یابد، ولی با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد و این موضوع بیانگر این مطلب است که، برای افزایش انتقال حرارت با افزایش دبی جرمی یا عدد رینولدز با محدودیت مواجه هستیم.

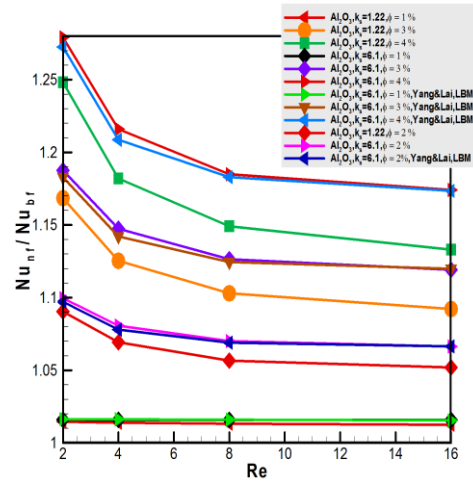
مقدار افزایش ناسلت نسبی برای آلومینا/آب به دلیل هدایت حرارتی موثر بالاتر آن، بیشتر از تیتانیوم/آب می‌باشد. در حالت (ب) با افزایش هدایت گرمایی چاه حرارتی درصد افزایش ناسلت نسبی بیشتر خواهد بود. پروفیل سرعت بی بعد شده در یک عدد رینولدز ثابت برای آب و هر دو نانوسیال یکی می‌باشد، در حالیکه افزودن نانو ذرات، باعث افزایش سرعت می‌شود. پروفیل دمایی بی بعد شده به ترتیب برای نانوسیال آلومینا/آب، تیتانیوم/آب، از آب یکنواخت تر می‌باشد و این نتیجه نشانگر این موضوع هست که انرژی بیشتری به دلیل هدایت گرمایی افزایش یافته به خاطر وجود نانوذرات منتقل می‌شود. برای یک چاه حرارتی مستطیل شکل در ابعاد میکرو، توزیع دمایی بی بعد شده درون چاه حرارتی با استفاده از نانوسیال با افزایش مقدار هدایت گرمایی چاه حرارتی به سیال پایه، به خاطر نرخ هدایت بالاتر در جامد یکنواخت تر می‌شود. با حل این مساله، کارایی مدل مخلوط دوفازی به صورت همگن برای حل مسایل جریان و انتقال حرارت مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در محدوده‌ی پاسخ‌های قابل قبول و فیزیکی بوده است.

تشکر و قدردانی

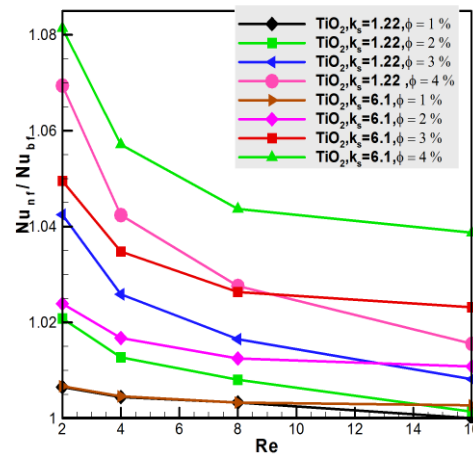
نویسندگان کمال تشکر و قدردانی خود را از سجاد آهنگر زنوزی ابراز میدارند.

علائم و نشانه‌ها

C_p	ظرفیت گرمای ویژه، $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
H_c	ارتفاع کانال، m
H_s	ارتفاع چاه حرارتی، m
K	هدایت گرمایی، $W\ m^{-1}\ K^{-1}$
L_c	طول کانال، m
Nu	عدد ناسلت $\left(-\frac{k_{nf}}{k_{bf}}\right) \times \left(\frac{\partial\theta}{\partial y}\right)$



شکل ۱۳ - رابطه عدد ناسلت نسبی با عدد رینولدز و درصد حجمی و هدایت گرمایی چاه حرارتی، حالت (ب)



شکل ۱۴ - رابطه عدد ناسلت نسبی با عدد رینولدز و درصد حجمی و هدایت گرمایی چاه حرارتی، حالت (ب)

۶- نتیجه گیری

جریان جابجایی اجباری آرام و انتقال حرارت برای دو نانوسیال آلومینا/آب و تیتانیوم/آب درون میکرو کانال با صفحات موازی هم‌دما و درون چاه حرارتی مستطیل شکل در ابعاد میکرو با استفاده از مدل مخلوط دوفازی به صورت همگن مورد بررسی قرار گرفت. بخشی از نتایج حاصل با نتایج حاصل از حل عددی یانگ و لای مقایسه شده است و از تطابق خوبی برخوردار بودند. نتایج نشان می‌دهد که عدد ناسلت با افزایش درصد حجمی و عدد رینولدز افزایش می‌یابد.

Application of non-newtonian flows. D.A. Siginer and H.P. Wangeds., ED, v.231/MD (66): 99–105.

[3] Pak BC, Cho YI (1998) Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Exp Heat Transfer* 11: 151–170.

[4] Kays WM, Crawford ME (1993) Convective heat and mass transfer. 3rd edn. McGraw-Hill, New York.

[5] Akbarinia A, Laur R (2008) Investigating the diameter of solid particles effects on a laminar nano fluid flow in a curved tube using a two phase approach. *Int J Heat Fluid Flow* 29: 706–714.

[6] Kalteh M, Abbassi A, Saffar-Avval M, Harting, J, Darhuber A, Harting J (2011) Eulerian-Eulerian two-phase numerical simulation of nanofluid laminar forced convection in a microchannel. *Int J Heat Fluid Flow* 32: 107–116.

[7] Yang YT, Lai FH (2011) Numerical study of flow and heat transfer characteristics of alumina-water nanofluids in a microchannel using the lattice Boltzmann method. *Int Commun Heat Mass* 38: 607–614.

[8] Abbasian Arani AA, Amani J (2013) Experimental investigation of diameter effect on heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-water nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science* 44: 520–533.

[9] Kalteh M, Abbassi A, Saffar-Avval M, Frijns A, Darhuber A, Harting J (2012) Experimental and numerical investigation of nanofluid forced convection inside a wide microchannel heat sink. *Appl Therm Eng* 36 :260–268.

[10] Kalteh M (2013) Investigating the effect of various nanoparticle and base liquid types on the nanofluid heat and fluid flow in a microchannel. *Appl Math Model* xxx xxx-xxx (ARTICLE IN PRESS).

[11] Lelea D (2011) The performance evaluation of Al₂O₃/water nanofluid flow and heat transfer in microchannel heat sink. *Int J Heat Mass Transfer* 54: 3891–3899.

[12] Khanafer Kh, Vafai K (2011) A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. *Int J Heat Mass Transfer* 54 : 4410–4428.

[13] Aminfar H, Mohammadpourfard M, Zonouzi, SA (2013) Numerical study of the ferrofluid flow and heat transfer through a rectangular duct in the presence of a non-uniform transverse magnetic field. *J Magn Magn Mater* 327: 31–42.

[14] Aminfar H, Mohammadpourfard, M, Kahnemouei YN (2011) A 3D numerical simulation of mixed convection of a magnetic nanofluid in the presence of non-uniform magnetic field in a vertical tube using two phase mixture model. *J Magn Magn Mater* 323: 1963–1972.

$\int_0^1 Nu. dX =$	عدد متوسط ناسلت	\bar{Nu}
$(v_o \times H_C)/\nu =$	عدد رینولدز	Re
$N m^{-2}$	فشار،	P
K	دما،	T
K	دما بالا،	T_h
K	دمای ورودی،	T_o
m/s	سرعت در راستای طولی،	v_x
m/s	سرعت ورودی،	v_o
m	مختصات دکارتی،	x,y
$(Y = \frac{y}{H_C})$	مختصات بی بعد شده	X,Y
$(X = \frac{x}{L_c})$		
m^2	سطح مقطع،	A
m/s	بردار سرعت لغزشی،	\vec{v}_{pf}
m/s	بردار سرعت سوق،	\vec{v}_{dr}
	علائم یونانی	
	کسر حجمی ذره	ϕ
$kg m^{-1} s^{-1}$	ویسکوزیته دینامیکی،	μ
$(\frac{T-T_o}{T_h-T_o})$	دمای بی بعد شده	θ
$kg m^{-3}$	چگالی،	ρ
	زیرنویس‌ها	
	سیال پایه	Bf
	سیال	F
	نانوسیال	Nf
	ذره	P
	جامد	S
	دیوار	W
	مخلوط	M

مراجع

[1] Masuda H, Ebata A, Teramae K., Hishinuma N (1993) Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. *Netsu Bussei* 7: 227–233.

[2] Choi SUS (1995) Enhancing thermal conductivity of fluid with nanoparticles. *Developments and*

- data for water-based nanofluids. *Int J Therm Sci* 48: 363–371.
- [17] Nguyen CT, Desgranges F, Roy G, Galanis N, Maré T, Boucher S, Mints HA (2007) Temperature an particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids-hysteresis phenomenon. *Int J Heat Fluid Flow* 28 :1492–1506.
- [15] Boulet P, Moissette S (2002) Influence of the particle-turbulence modulation modeling in the simulation of a non-isothermal gas–solid flow. *Int J Heat Mass Transfer* 45: 4201–4216.
- [16] Mints HA, Roy G, Nguyen CT, Doucet D (2009) New temperature dependent thermal conductivity