

شبیه‌سازی عددی جریان نانوسیال آب - اکسید آلومینیم در یک میکروکانال دوبعدی با در نظر گرفتن هدایت در ناحیه جامد

عباس رامیار
دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

علی اکبر رنجبر
دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

سید فرید حسینی‌زاده
استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

چکیده

جریان و انتقال حرارت دوبعدی نانوسیال اکسید آلومینیم - آب با در نظر گرفتن هدایت حرارتی در ناحیه جامد در کنار ناحیه سیال مورد بررسی قرار گرفته است. خصوصیات نانوسیال متغیر با دما و قطر نانوذرات در نظر گرفته شده است. نتایج، بیانگر بهبود کارایی میکروکانال‌ها با اضافه کردن نانوذراتی با ضریب هدایت حرارتی بالا به سیال، می‌باشد. با کاهش قطر نانوذرات، عدد ناسلت افزایش می‌یابد و شدت این افزایش در قطرهای پایین بیشتر است. با وجود آنکه نانوذرات باعث افزایش تنش برشی نیز می‌شوند، اما این افزایش در مقابل بهبود عملکرد حرارتی، قابل صرف نظر است. با بررسی اثر هدایت توأمان در ناحیه جامد، با استفاده از معیار "عدد رسانش"، مشخص شد که افزایش غلظت نانوسیال باعث تشدید این اثر می‌شود.

کلمات کلیدی: میکروکانال - نانوسیال - انتقال حرارت توأمان - عدد گراتز.

Numerical Simulation of Two Dimensional Conjugate Heat Transfer of Al₂O₃-Water Nanofluid in Microchannels

A. Ramiar PHD Student, Babol University of Technology, Faculty of
Mechanical Engineering

A. A. Ranjbar Associate Professor, Babol University of Technology, Faculty of
Mechanical Engineering

S.F. Hosseinizadeh Assistant Professor, Babol University of Technology, Faculty of
Mechanical Engineering

Abstract

Laminar two dimensional forced convective heat transfer of Al₂O₃-water nanofluids in a horizontal microchannel has been studied numerically, considering axial conduction effects in both solid and liquid regions. Thermal conductivity and dynamic viscosity of the nanofluid are considered variable with temperature and diameter of nanoparticles. The transport equations are solved numerically using the finite-volume approach and a collocated grid arrangement is utilized. The results show that using nanoparticles with higher thermal conductivities will intensify enhancement of heat transfer characteristics of microchannels but on the other hand will slightly increase shear stress on the walls. The obtained results show more steep changes in Nusselt number for lower diameters and also higher values of Nusselt number by decreasing diameter of nanoparticles. Also, considering the effect of volume fraction on axial conduction using "Conduction number" showed that using nanofluid will strengthen this effect.

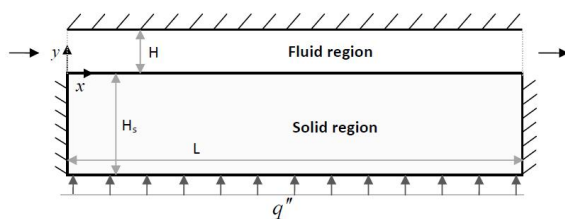
Keywords: Microchannel, Nanofluid, Variable properties, Axial conduction

۱- مقدمه

هو و همکارانش [۱۱] بهبود انتقال حرارت اجباری را در یک میکروکانال چاه گرمایی با نانوسیال اکسید آلومینیم- آب با کسرهای حجمی ۱ و ۲٪ و رینولدزهای بین ۲۲۶ تا ۱۶۷۶ بررسی کردند و افزایش چشمگیری را در ضریب متوسط انتقال حرارت مشاهده کردند. در این مقاله، اثر غلظت نانوذرات ۳۶ نانومتری آلومینا (اکسید آلومینیم) در آب از دیدگاه هیدرودینامیکی و انتقال حرارتی مورد مطالعه قرار گرفته است. اثر ناحیه جامد با استفاده از عدد رسانش (Conduction number) مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت تأثیر قطر و جنس نانوذرات بر میزان کارایی گرمایی سیال مطالعه شده است.

۲- هندسه و شرایط مرزی

مسئله مورد بررسی، شامل انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیالی است که در درون یک میکروکانال جریان دارد. هندسه و شرایط مرزی یک میکروکانال دوبعدی در شکل ۱ نشان داده شده است. ارتفاع کانال $H = 90 \mu\text{m}$ برابر و طول آن $L = 6 \text{ cm}$ است. نانوسیال آب- اکسید آلومینیم در دمای ثابت 303 K و سرعت ثابت، از سمت چپ وارد کانال می‌شود. رژیم جریان، آرام است و محدوده وسیعی از اعداد رینولدز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. ناحیه جامد از جنس سیلیکون ($k_s = 120 \text{ W/mK}$) با ارتفاع‌های مختلف می‌باشد و نسبت ارتفاع‌های $b = H_s/H = 5$ تا ۱۰۰ مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱ - هندسه مورد بررسی، ناحیه سیال و ناحیه جامد زیرین.

۳- معادلات حاکم

از روش حجم محدود در آرایش شبکه همجا برای گسسته‌سازی معادلات و برای کوپلینگ سرعت و فشار نیز از مدل شناخته شده رای و چو [۱۲] استفاده شده است. با در نظر گرفتن مخلوط معلق ذرات جامد در سیال بصورت یک سیال تک فاز با خصوصیات تغییر یافته [۱۳]، معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی نانوسیال در حالت پایا بصورت زیر خواهد بود:

در دنیای امروز با پیشرفت تکنولوژی، خصوصاً در زمینه الکترونیک، ابزار مورد استفاده، کوچکتر شده‌اند. سرعت بالای قطعات الکترونیکی، منجر به تولید گرمای بیشتر در ابعاد کوچک شده و بنابراین سیستم سنتی سرمایش این قطعات با هوا، دیگر جوابگو نخواهد بود. استفاده از مایع در میکروکانال‌های سیستم سرمایش پردازشگرها ابتدا توسط تاكرمن و پیس [۱] معرفی گردید و سپس توسط محققان متعدد مورد بررسی قرار گرفت. یکی از راه‌های بهبود انتقال حرارت در سیال‌ها، اضافه کردن نانوذرات جامد فلزی یا اکسید فلزی به آن‌ها است که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

آزمایشات اخیر در زمینه نانوسیال‌ها بیانگر افزایش چشمگیر ضریب هدایت حرارتی و کارایی حرارتی نانوسیال در مقایسه با سیال خالص بوده است. محققان مختلفی به بررسی جریان و انتقال حرارت نانوسیال در کانال‌هایی با اشکال مختلف پرداخته‌اند [۲-۵]، اما در زمینه میکروکانال‌ها این تحقیقات، انگشت شمار است.

کو و کلینستروتر [۶] اثر غلظت نانوسیال بر پارامترهای مختلف میکروکانال چاه گرمایی را بررسی کردند. آنها دو ترکیب اکسید مس - آب و اتیلن گلیکول را در نظر گرفته و از مدل ابداعی خود برای محاسبه ضریب انتقال حرارت هدایتی و لزجت دینامیکی استفاده کردند. نتایج آنها بیانگر قابلیت نانوسیال برای بهبود کارایی چاه‌های گرمایی بود.

جنگ و چوی [۷] با استفاده از مدل خود برای تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال [۸] اثر حضور نانوذرات بر خصوصیات گرمایی میکروکانال چاه گرمایی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها، بهبود ۱۰ درصدی را در نانوسیال‌هایی با سیال پایه آب و نانوذرات الماس با کسر حجمی ۱ درصد و قطر ۲ نانومتر، در یک توان پمپ ثابت نشان داد. سای و چین [۹] به صورت تحلیلی به بررسی اثر افزودن نانوذرات مس و نانولوله‌های کربن به آب پرداختند. آنها مجموعه‌ای از میکروکانال‌ها را بصورت ناحیه‌ای با تخلخل معین مدل کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از نانوسیال تنها زمانی مفید خواهد بود که تخلخل میکروکانال‌ها و نسبت منظر آنها از مقدار بهینه‌ی محاسبه شده کمتر باشد. باتچاریا و همکارانش [۱۰] انتقال حرارت توأمان نانوسیال آب- اکسید آلومینیم را در یک میکروکانال چاه گرمایی سیلیکونی بصورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که بهبود کارایی میکروکانال با افزایش غلظت نانوسیال افزایش می‌یابد. علاوه بر این، آنها نشان دادند که ضریب انتقال حرارت در ناحیه توسعه یافته، حتی در رژیم جریان آرام، با عدد رینولدز افزایش می‌یابد.

$$(T_s)_{solid} = (T_f)_{nanofluid} \quad ; \quad y = 0 \quad (9)$$

برای حل معادلات فوق یک کد عددی دوبعدی به زبان فرترن نوشته شد و شرایط مرزی حاکم بر مسئله و خصوصیات نانوسیال به نحو مطلوبی در آن اعمال گردید.

۴- خصوصیات نانوسیال

برای محاسبه خصوصیات نانوسیال روابط متعددی پیشنهاد شده است، اما در این مقاله برای اختصار تنها به معادلات استفاده شده در حل معادلات اشاره خواهد شد. برای اطلاعات بیشتر در مورد این خصوصیات می‌توان به مقالات دوره‌ای در این زمینه مراجعه نمود.

روابط شناخته شده برای چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال که توسط منابع مختلف تأیید شده‌اند عبارتند از:

$$(\rho)_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (10)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_p \quad (11)$$

که در این معادلات، ϕ کسر حجمی نانوذرات و زیرنویس‌های f و nf به ترتیب بیانگر خصوصیات مربوط به سیال، نانوسیال و نانوذرات هستند. مدل استفاده شده برای ضریب هدایت حرارتی برگرفته از کار چون و همکارانش [۱۴] است که توسط برخی مقالات مورد تأیید قرار گرفته است [۱۵]:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 64.7 \phi^{0.746} \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{0.369} \times \left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.7476} \text{Pr}^{0.9955} \text{Re}^{1.2321} \quad (12)$$

در معادلات فوق، d_p و d_f قطر ملکول‌های سیال پایه و قطر متوسط نانوذرات هستند. $\text{Pr} = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha_f}$ و $\text{Re} = \frac{\rho_f k_b T}{3\pi \mu_f^2 l_f}$ به ترتیب اعداد پرانتل و رینولدز بوده و α_f ضریب پخش حرارتی، k_b ثابت بولتزمن و l_f مسافت آزاد میانگین ملکول‌های آب است که در این مقاله طبق پیشنهاد چون و همکارانش [۱۴]، ۱۷ nm در نظر گرفته می‌شود.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \nabla p + \frac{1}{\rho_{nf}} \nabla \cdot (\mu_{nf} \nabla \vec{V}) \quad (2)$$

$$(\vec{V} \cdot \nabla) T = \frac{1}{(\rho c_p)_{nf}} \nabla \cdot (k_{nf} \nabla T) \quad (3)$$

و معادله انرژی برای ناحیه جامد:

$$\nabla^2 T = 0 \quad (4)$$

و با توجه به شکل ۱ شرایط مرزی عبارتند از:
عدم لغزش در دیواره‌ها و سرعت و دمای یکنواخت ورودی:

$$u = v = 0; \quad y = 0 \quad \text{و} \quad y = H$$

$$u = u_{in}, T = T_{in} \quad ; \quad 0 \leq y \leq H \quad (5)$$

جریان توسعه یافته در انتهای کانال:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad \text{و} \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad ; \quad 0 \leq y \leq H \quad (6)$$

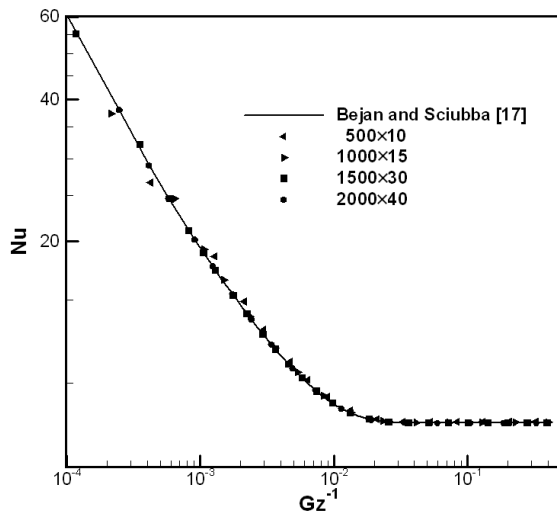
و علاوه بر این، دیواره بالا آدیاباتیک در نظر گرفته شده است. برای ناحیه جامد، یک شار حرارتی ثابت از زیر اعمال شده است و دیواره‌های کناری آدیاباتیک هستند:

$$-K_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = q'' \quad ; \quad y = -H_s \quad (7)$$

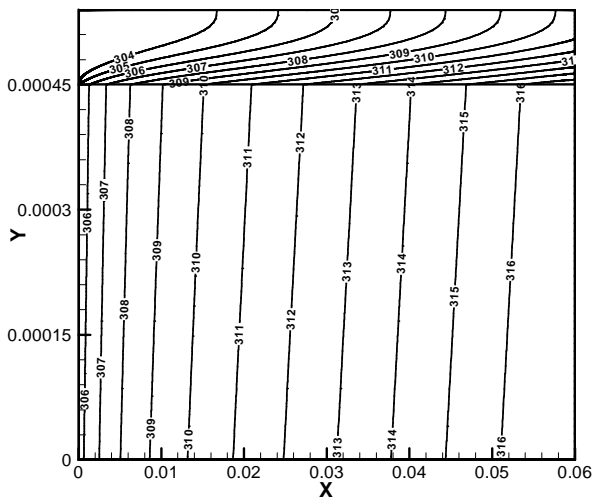
$$\frac{\partial T_s}{\partial x} = 0 \quad ; \quad x = 0 \quad \text{و} \quad x = L \quad (8)$$

و برای محل تماس نواحی جامد و سیال، از شرط هدایت توأمان استفاده می‌شود:

$$K_s \left(\frac{\partial T_s}{\partial y} \right)_{solid} = K_{nf} \left(\frac{\partial T_f}{\partial y} \right)_{nanofluid} \quad ; \quad y = 0$$



شکل ۲ - بررسی صحت حل و استقلال از شبکه



شکل ۳- کانتورهای دمای نواحی سیال و جامد در حالت

$$b = 5 \text{ و } Re_f = 400, \varphi = 0.25$$

میزان بهبود کارایی حرارتی سیال با بکارگیری نانوذرات در شکل ۴ مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط در نظر گرفته شده، $Re_f = 1000$ و نسبت ارتفاع ناحیه جامد به سیال $b = 5$ است. عدد ناسلت نانوسیال در مجاورت دیواره پایین طبق تعریف زیر محاسبه می‌شود:

$$Nu = \frac{k_{nf}}{k_f} \frac{2}{(T_w - T_b)} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (14)$$

برای لزجت دینامیکی از مدل معصومی و همکارانش [۱۶] استفاده می‌شود که وابستگی این خاصیت به حرکت براونی، دما و قطر نانوذرات را در نظر گرفته است:

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = 1 + \frac{\rho_p V_B d_p^2}{72 N \delta} \quad (13)$$

که در آن $\delta = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6\phi}} d_p$ ، فاصله بین مراکز نانوذرات و

$V_b = \frac{1}{d_p} \sqrt{\frac{18k_b T}{\pi \rho_p d_p}}$ سرعت براونی آنهاست. و N که با رابطه

$N = (c_1 \phi + c_2) d_p + (c_3 \phi + c_4)$ بیان می‌شود با قطر و کسر حجمی نانوذرات مربوط می‌شود. یک پارامتر برای تطبیق رابطه با نتایج تجربی است که مقادیر پیشنهادی مؤلف عبارتند از: $c_1 = -1/123e^{-6}$ ، $c_2 = -2/771e^{-6}$ ، $c_3 = 9e^{-8}$ و $c_4 = -3/93e^{-7}$.

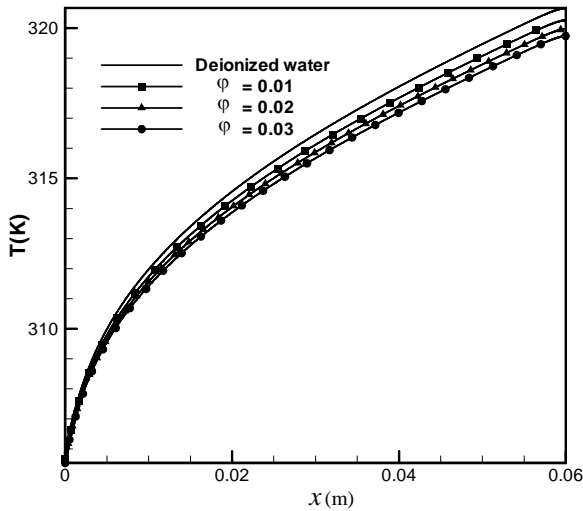
۵- نتایج

برای بررسی صحت کد نوشته شده، برای حالت بدون ناحیه جامد و با در نظر گرفتن شار ثابت حرارتی از بالا و پایین ناحیه سیال، نتایج بدست آمده با رابطه ارائه شده توسط بیان و اسکویبا [۱۷] مقایسه شده است. شکل ۲ توزیع عدد ناسلت را روی دیواره پایین ناحیه سیال، برای سیالی با $Pr = 0.7$ نشان می‌دهد. ابعاد کانال، طول 0.06 m و ارتفاع $H = 90 \mu\text{m}$ است و سیال با سرعت یکنواخت ($Re = 800$) وارد کانال می‌شود. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، دامنه حل در آرایش شبکه‌های 10×500 ، 15×1000 ، 30×1500 و 40×2000 حل شده و نتایج حاصله بیانگر این است که دقت جواب‌ها با مش 30×1500 در حد مطلوب می‌باشد.

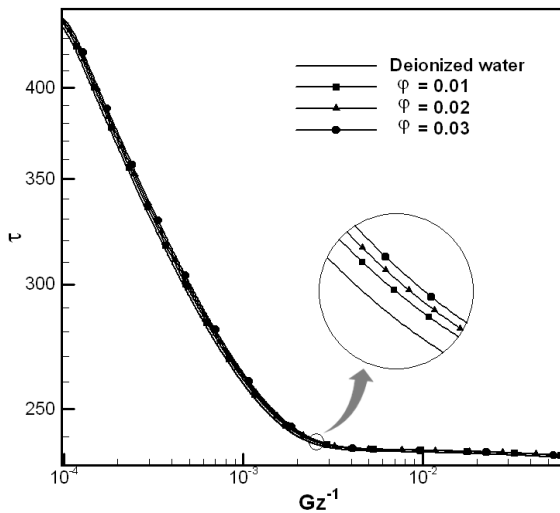
شکل ۳ کانتورهای دما را در ناحیه سیال بالایی و ناحیه جامد زیر نشان می‌دهد. نتایج نشان داده شده برای نانوسیال آب - اکسیدآلومینیم با کسر حجمی $\varphi = 0.25$ ، رینولدز سیال $Re_f = \frac{\rho_f u_{ave} H}{\mu_f} = 400$ ، شار حرارتی ثابت دیواره

$q_w = 200000 \text{ W/m}^2$ و نسبت ارتفاع ناحیه جامد به سیال $b = 5$ است. برای نمایش بهتر کانتورها مقیاس دو محور افقی و عمودی یکسان در نظر گرفته نشده‌اند.

افزایش ناچیز به نظر می‌رسد. در واقع، در یک سرعت ورودی ثابت، حضور نانوذرات باعث افزایش لزجت دینامیکی و در نتیجه افزایش کمی در تنش برشی در کناره دیواره می‌شود.



شکل ۵- تغییرات دمای دیواره پایینی نانوسیال در کسر حجمی‌های مختلف نانوسیال آب-اکسید آلومینیم



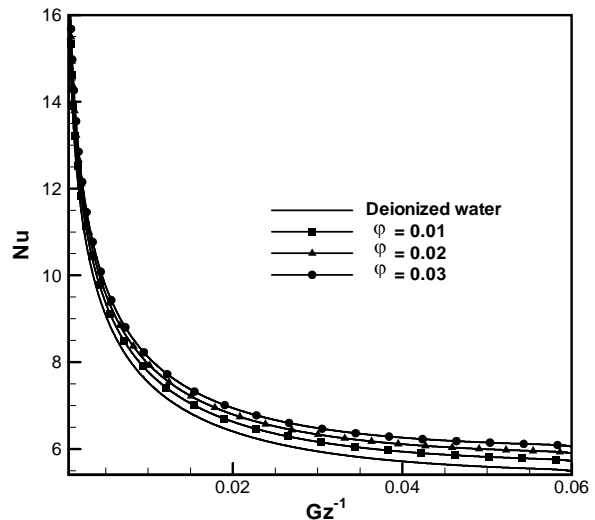
شکل ۶- توزیع تنش برشی در دیواره پایین ناحیه سیال در کسر حجمی‌های مختلف نانوسیال آب-اکسید آلومینیم

اثر تغییرات سرعت ثابت ورودی یا عدد رینولدز در توزیع ناسلت دیواره پایینی برای نانوسیالی با کسر حجمی $\phi = 0.25$ و شار گرمایی $q_w = 10000 \text{ W/m}^2$ و $b=5$ در شکل ۷ نشان داده شده است. با افزایش سرعت ورودی یا عدد رینولدز، طول ناحیه ورودی افزایش یافته و از مقدار کمتر از 0.1 m در رینولدز ۱۰۰ به مقدار بیشتر از 0.4 m برای رینولدز ۱۰۰۰ می‌رسد. این به معنی عدد ناسلت متوسط بزرگتر در سرعت‌های بالاتر است.

که در آن T_w دمای دیواره پایین بوده و دمای توده سیال مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T_b = \frac{\int_0^1 uT dy}{\int_0^1 u dy} \quad (15)$$

همانطور که در شکل مشاهده می‌کنید، افزایش غلظت نانوسیال باعث افزایش عدد ناسلت در مجاورت دیواره و بهبود فرآیند انتقال حرارت می‌شود. بخشی از این تأثیر، به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی و بخشی دیگر به دلیل تغییرات در پروفیل دماست. میزان این بهبود برای کسر حجمی ۰.۳ حدود ۱۰ درصد می‌باشد که برای کاربرد در مبدل‌های حرارتی مقدار قابل توجهی می‌باشد.



شکل ۴- تغییرات عدد ناسلت در دیواره پایینی ناحیه سیال در کسر حجمی‌های مختلف نانوسیال آب-اکسید آلومینیم

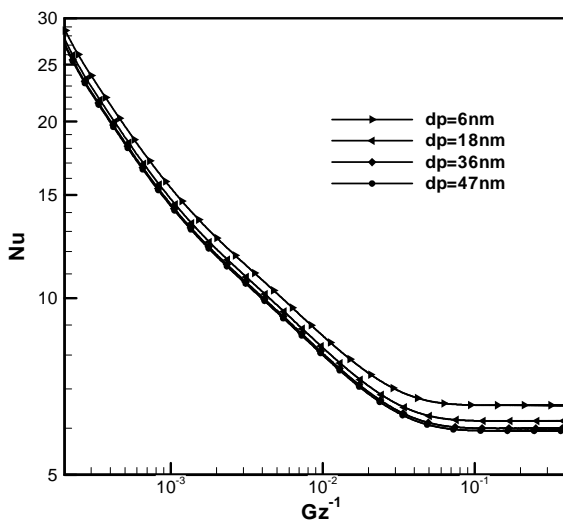
شکل ۵ توزیع دما را برای کانالی با شرایط توضیح داده شده در شکل قبل و $q_w = 20000 \text{ W/m}^2$ نشان می‌دهد. افزایش کسر حجمی نانوسیال، باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و در نتیجه کاهش دمای خروجی نانوسیال می‌شود. بنابراین نانوسیال توانایی دفع گرمای بیشتری را خواهد داشت.

با وجود فواید فراوانی که با استفاده از نانوسیال از دیدگاه انتقال حرارت به آنها دست می‌یابیم، حضور نانوذرات باعث افزایش تنش برشی در دیواره‌ها و افزایش میزان لازم برای پمپ سیال در کانال خواهد شد. شکل ۶ توزیع تنش برشی در دیواره پایینی را به‌ازای مقادیر مختلف کسر حجمی نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، میزان افزایش تنش برشی در ناحیه ورودی بیشتر از ناحیه توسعه یافته است ولی با این وجود، مقدار این

۶- اثر قطر نانوذرات

با توجه به اینکه مدل‌های ضریب هدایت حرارتی و لزجت دینامیکی که برای نانوسیال انتخاب شده‌اند، توانایی در نظر گرفتن اثر قطر نانوذره را دارند، در این بخش به بررسی تأثیر این پارامتر می‌پردازیم. شکل ۹ منحنی تغییرات عدد ناسلت دیواره پایین نانوسیال را با دما نشان می‌دهد. این نتایج در کسر حجمی $\phi = 0.03$ ، رینولدز سیال $Re_f = 400$ ، طول کانال $L = 0.3m$ و نسبت ارتفاع $b = 10$ بدست آمده‌اند.

همانطور که ملاحظه می‌شود، با کاهش قطر نانوذرات، ناسلت افزایش می‌یابد و شدت میزان افزایش عدد ناسلت، در قطرهای پایین بیشتر است. به عبارت دیگر، در حالیکه با کاهش قطر نانوذرات از $47nm$ به $36nm$ ، عدد ناسلت به اندازه نسبی کمتر از 1% افزایش می‌یابد، این مقدار، در حالت کاهش قطر از $18nm$ به $6nm$ به مقدار نسبی حدود $6/4\%$ درصد می‌رسد که مقدار قابل توجهی است.



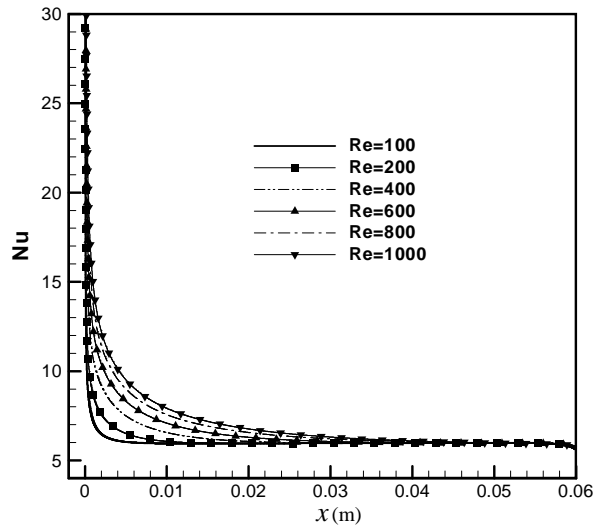
شکل ۹- تأثیر قطر نانوذرات بر توزیع ناسلت در مجاورت دیواره سیال

۷- بررسی اثر هدایت در ناحیه جامد

چیو [۱۸] برای بررسی اثر هدایت محوری دیواره جامد بر انتقال حرارت سیال، "عدد ضریب رسانش" را بصورت زیر تعریف کرد:

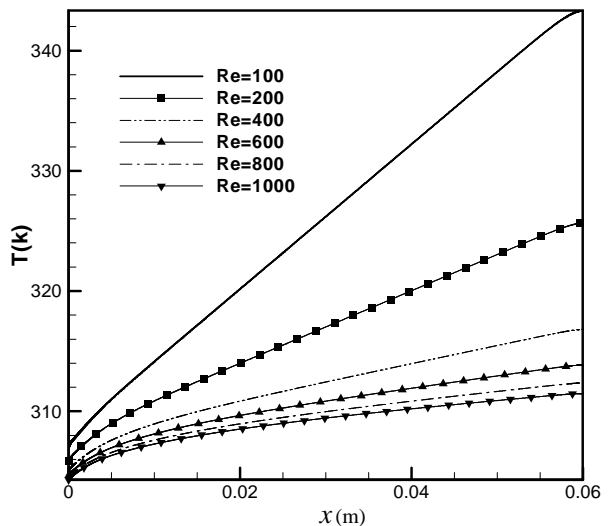
$$C = \frac{k_s A_s D_h}{k_f A_f L RePr} \quad (16)$$

که زیرنویس‌های s و f بیانگر نواحی جامد و سیال هستند. او پیشنهاد کرد که تنها در صورتی می‌توان از اثر هدایت حرارتی محوری در ناحیه جامد صرف‌نظر کرد که این عدد کمتر از 0.05 باشد. محققان دیگر، اعداد دیگری را نیز پیشنهاد داده‌اند. ما در

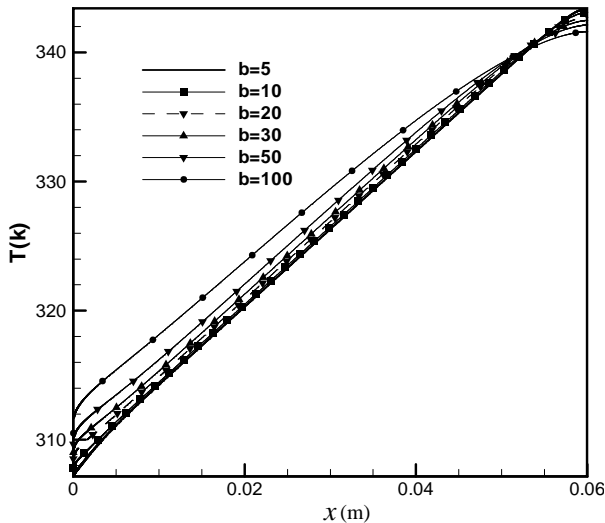


شکل ۷- توزیع عدد ناسلت در دیواره پایین ناحیه سیال در کسر حجمی $\phi = 0.025$ - اکسید آلومینیم به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز

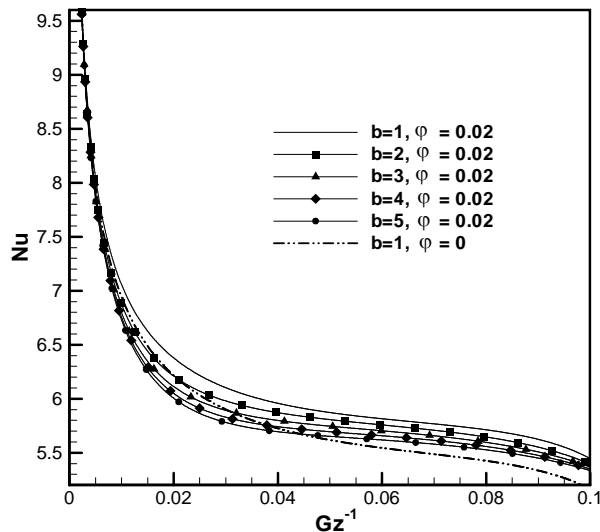
شکل ۸ توزیع دمای دیواره را به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز سیال خالص نشان می‌دهد. همانطور که اشاره شد، در اعداد رینولدز پایین، بدلیل سرعت پایین‌تر سیال، سیال فرصت بیشتری برای جذب گرما از دیواره دارد، بنابراین شدت تغییرات دما بیشتر بوده و این منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی و عدد ناسلت در انتهای کانال می‌شود.



شکل ۸- توزیع دمای دیواره پایین ناحیه سیال در کسر حجمی $\phi = 0.025$ - اکسید آلومینیم به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز



شکل ۱۱ - توزیع دمای دیواره پایین ناحیه سیال در کسر حجمی ۱/۵ درصد و $Re_f=100$

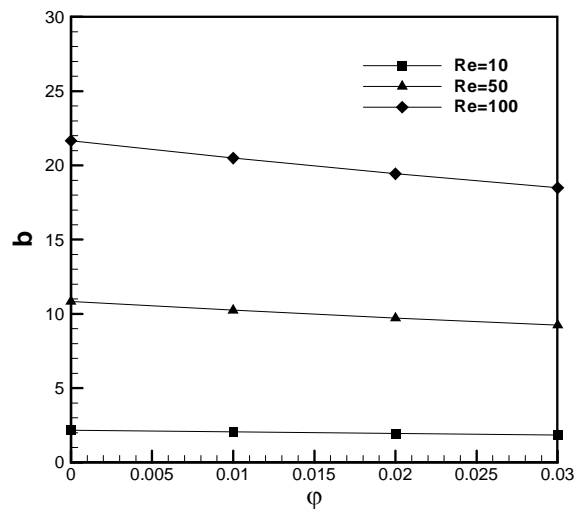


شکل ۱۲ - تأثیر نسبت ارتفاع بر توزیع عدد ناسلت برای حالت $Re_f=50$

شکل ۱۲ تأثیر انتقال حرارت در ناحیه جامد را از دیدگاه دیگر مورد بررسی قرار می دهد. انتقال حرارت هدایتی در ناحیه جامد باعث می شود تا بخشی از گرما که باید به سیال منتقل می شود، بدین ترتیب تلف شده و عدد ناسلت در کناره دیواره محل تماس دو ناحیه جامد و سیال کاهش پیدا کند. همانطور که در شکل ملاحظه می کنید، با افزایش نسبت ارتفاع، عدد ناسلت کاهش یافته و در واقع گرمای کمتری به ناحیه سیال می رسد. این نتیجه اخیراً توسط محققان دیگری نیز گزارش شده است [۲۰]. خط غیرممتد در شکل، بیانگر حالت $\phi = 0$ بوده و بقیه حالات برای $\phi = 0.02$ و $Re_f=50$ بدست آمده‌اند.

این مقاله از مقدار پیشنهادی مورینی [۱۹] یعنی عدد ضریب هدایت حرارتی ۰/۰۲ استفاده خواهیم کرد. برای یک کانال دوبعدی، رابطه فوق بصورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$C = \frac{k_s H_s 2H}{k_f H L Re Pr} \quad (17)$$



شکل ۱۰ - نسبت ارتفاع بحرانی نانوسیال آب-اکسید آلومینیم در اعداد رینولدز مختلف

با استفاده از این معیار می توان به ازای یک عدد رینولدز معین، مقدار حداقل نسبت ارتفاعی (نسبت ارتفاع بحرانی) که اثر هدایت محوری در ناحیه جامد باید در نظر گرفته شود، را تعیین کرد. شکل ۱۰ مقادیر بحرانی نسبت ارتفاع را به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز و کسر حجمی های بین ۰ تا ۱۰ درصد نشان می دهد. بعنوان مثال این عدد برای عدد رینولدز ۱۰۰ از مقداری در حدود $b=22$ در $\phi = 0$ تا مقدار حدود $b=18$ در $\phi = 0.03$ کاهش می یابد. این بدان معنی است که حضور نانوذرات، باعث تشدید اثر ناحیه جامد شده و در نسبت ارتفاع کمتری باید این اثر را در نظر گرفت.

شکل ۱۱ توزیع دما را در دیواره پایین ناحیه سیال، در مقادیر مختلف نسبت ارتفاع ناحیه جامد به سیال، برای $Re_f=100$ و $\phi = 0.015$ نشان می دهد. همانطور که توضیح داده شد، در این رینولدز، مقدار b بحرانی حدود ۲۰ است. ملاحظه می کنید که با افزایش b به مقادیری بالاتر از این مقدار، پروفیل دما از حالت خطی خارج شده و هدایت محوری ناحیه جامد روی توزیع دما تأثیر می گذارد.

۸- نتیجه‌گیری

جریان دوبعدی نانوسیال آب-اکسید آلومینیم در یک میکروکانال، در مجاورت ناحیه جامد، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده را می‌توان بصورت زیر دسته‌بندی کرد:

- ۱- اضافه کردن نانوذرات باعث بهبود فرآیند انتقال حرارت در میکروکانال‌ها شده و اختلاف دمای ایجاد شده در سیال از ورودی تا خروجی را کاهش می‌دهد.
- ۲- افزایش عدد رینولدز باعث افزایش طول ورودی می‌شود.
- ۳- انتقال حرارت هدایتی محوری در ناحیه جامد باعث کاهش عدد ناسلت در دیواره سیال شده و با افزایش کسر حجمی، شدت اثر ناحیه جامد تشدید می‌شود.
- ۴- کاهش قطر نانوذرات باعث افزایش کارایی حرارتی آنها و افزایش عدد ناسلت می‌شود. شدت این افزایش در قطرهای کمتر، تشدید می‌شود.

مراجع

- [1] Tuckerman, D.B., Pease, R.F.W., "High performance heat sink for VLSI", IEEE Electron Device Letters, Vol.2, pp. 126-129, 1981.
- [2] Li, Z., He, Y.L., Tang, G.H., Tao, W.Q., "Experimental and numerical studies of liquid flow and heat transfer in microtubes", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, pp. 3447-3460, 2007.
- [3] Gamrat, G., Favre-Marinet M., Person, S. L., "Modelling of roughness effects on heat transfer in thermally fully-developed laminar flows through microchannels", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 48, pp. 2203-2214, 2009 .
- [4] Xie, X.L., Liu, Z.J., He, Y.L., Tao, W.Q., "Numerical study of laminar heat transfer and pressure drop characteristics in a water-cooled minichannel heat sink", Applied Thermal Engineering, Vol. 29, pp. 64-74, 2009 .
- [5] Santra, A. K., Sen, S., Chakraborty, N., "Study of heat transfer due to laminar flow of copper-water nanofluid through two isothermally heated parallel plates", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 48, pp. 391-400, 2009.
- [6] Koo, J., Kleinstreuer, C., "Laminar nanofluid flow in microheat-sinks", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp. 2652-2661, 2005.
- [7] Jang, S.P., Choi, S.U.S., "Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids", Applied Thermal Engineering, Vol. 26, pp. 2457-2463, 2006.
- [8] Jang, S.P., Choi, S.U.S., "Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids", Applied Physics Letters Vol. 84, pp. 4316-4318, 2004.
- [9] Tsai, T.H., Chein, R., "Performance analysis of nanofluid-cooled microchannel heat sinks", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 28, pp. 1013-1026, 2007.
- [10] Bhattacharya, P., Samanta, A.N., Chakraborty, S., "Numerical study of conjugate heat transfer in rectangular microchannel heat sink with Al₂O₃/H₂O nanofluid", Heat and Mass Transfer, Vol. 45, pp. 1323-1333, 2009.
- [11] Ho, C.J., Wei, L.C., Li, Z.W., "An experimental investigation of forced convective cooling performance of a microchannel heat sink with Al₂O₃/water nanofluid", Applied Thermal Engineering, Vol. 30, pp. 96-103, 2010.
- [12] Ferziger, J.H., Peric, M., "Computational Methods for Fluid Dynamics", third ed., Springer, New York, 2002, pp. 200-202.
- [13] Xuan, Y., Roetzel, W., "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43, pp. 3701-3707, 2000 .

نمادها

b	نسبت ارتفاع ناحیه جامد به سیال، H_s/H
C	عدد ضریب رسانش
C_p	ضریب گرمای ویژه فشار ثابت، J/kgK
D_h	قطر هیدرولیکی، νH
Gz	عدد گراتز، $Re Pr D_h/x$
H	ارتفاع کانال
Nu	عدد ناسلت، hd/k
P	فشار، N/m^2
Pr	عدد پرانتل
q_w	شار گرمایی، W/m^2
Re	عدد رینولدز
T	دما، K
Tb	دمای توده سیال، K
V	سرعت، m/s

علائم یونانی

φ	کسر حجمی نانوذرات
μ	لزجت دینامیکی، Pa.s
ρ	چگالی، kg/m^3

زیر نویس‌ها

ave	متوسط
f	سیال
nf	نانوسیال
s	ناحیه جامد
p	نانوذرات

- [14] Chon, C.H., Kihm, K.D., Lee, S.P., Choi, S.U.S., "Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al₂O₃) thermal conductivity enhancement, Applied Physics Letters 87 (15) (2005) 153107–153110.
- [15] H.A. Mints, G. Roy, C.T. Nguyen, D. Doucet, "New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 48, pp. 363–371, 2009.
- [16] Masoumi, N., Sohrabi, N., Behzadmehr, A., "A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 42, pp. 055501-055506, 2009 .
- [17] Bejan, A., Sciubba, E., "The optimal spacing of parallel plates cooled by forced convection", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 35, no. 12, pp. 3259-3264, 1992.
- [18] Chiou, J.P., "The advancement of compact heat exchanger theory considering the effects of longitudinal heat conduction and flow non-uniformity", Symposium on Compact Heat Exchangers, ASME HTD, vol. 10, pp. 101-121, 1980.
- [19] Morini, G. L., "Scaling effects for liquid flows in microchannels", Heat Transfer Engineering, Vol. 27, no. 4, pp. 64–73, 2006.
- [20] Nonino, C., Savino, S., Giudice, S.D., Mansutti, L., "Conjugate forced convection and heat conduction in circular microchannels", International Journal of Heat and Fluid Flow, 2009 , doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2009.03.009