

بررسی عددی انتقال حرارت در میکروکانال ماریپیچی با نانو سیالات آب-اکسید آلومینیوم و آب-اکسید مس

امروزه به دلیل استفاده از ابزارها و اجزای ریز مقیاس در صنایعی مانند صنایع الکترونیک، صنایع هوایی، صنایع پزشکی و آزمایشگاهی و...، نیازمند به وجود آمدن و به کارگیری روش های جدید و پر بازده در بحث انتقال حرارت در این ابزارها است. علاوه بر استفاده مستقیم از روش های جدید معرفی شده، عملکرد انتقال حرارتی این روش ها را نیز می توان با استفاده از روش هایی مانند استفاده از دندانه در میکروکانال ها و تغییرات در ابعاد و پارامترها و نوع دندانه ها به میزان قابل توجهی افزایش داد. در این تحقیق میکروکانال های گرماگیر مورد بررسی قرار گرفته است. برای بهبود کارایی انتقال حرارت باید هدایت حرارتی سیال، افزایش یابد. در این پژوهش، به مطالعه عددی انتقال حرارت جابجایی اجباری، در میکروکانال گرماگیر ماریپیچی، با استفاده از نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم و آب-اکسید مس و به تاثیر پارامترهایی نظیر قطر هیدرولیکی، عدد رینولدز و کسر حجمی نانو ذرات بر روی عدد ناسلت پرداخته شده است؛ که نتایج حاصل از این پژوهش نشان می دهد که با افزایش رینولدز، افت فشار برای نانوسیال اکسید مس افزایش داشته است.

سعید باقری^۱

دانشجوی دکترا

سجاد رستاد^۲

دانشجوی دکترا

سیدامیرعباس علومی^۳

استادیار

امیرحسین نگهی^۴

کارشناسی ارشد

مهدي آشتيان ملاير^۵

کارشناسی

واژه های راهنما: میکروکانال، نانو سیال، جابجایی اجباری، عدد ناسلت.

۱- مقدمه

نانو سیال از توزیع ذرات با ابعاد نانو در سیال معمولی حاصل می شود؛ که نسل جدیدی از سیال با پتانسیل بسیار زیاد در کاربردهای صنعتی می باشد. نانو ذرات از جنس ذرات فلزی نظیر ذرات اکسید مس (CuO)، ذرات اکسید آلومینیوم (Al₂O₃)، ذرات اکسید فلزاتی مانند نقره و غیره هستند. نانو ذرات به دلیل داشتن ضریب هدایت حرارتی بالا، با توزیع در سیال پایه باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی موثر سیال می گردد؛ که یکی از پارامترهای اساسی در انتقال حرارت محسوب می شود.

^۱ دانشجوی دکترا، گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران Saeed1369.bgh@gmail.com

^۲ دانشجوی دکترا، گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران H_rastad@yahoo.com

^۳ نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران Amiroloomi@iauyazd.ac.ir

^۴ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران Amir_ne69@yahoo.com

^۵ کارشناسی، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران Mahdiashtian@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۴/۳۱، تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۰۹

استفاده از نانو سیال گرماگیر باعث بهبود انتقال حرارت در تجهیزات الکترونیکی می گردد. هدف از این تحقیق، بررسی عددی انتقال حرارت جابجایی اجباری، در میکروکانال گرماگیر ماریپیچی شکل است که در آن دو نانو سیال آب-آلومینیوم اکسید و آب-اکسید مس از درون میکرو کانال عبور داده می شود و با استفاده از معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت در میکروکانال، رفتار هیدرولیکی و حرارتی نانو سیال های مذکور، بررسی می گردد. در این پژوهش تغییرات ضریب اصطکاک و ضریب انتقال حرارت جابجایی برحسب عدد رینولدز، در غلظت های مختلفی از نانوسیال های نامبرده ارائه می شود؛ و بهترین حالت انتقال حرارت، با استفاده از دو نانوسیال تعیین می گردد.

بنجامین و همکارانش [۱]، در یک پژوهش عملی بر روی جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید مس به این نتیجه رسیدند که استفاده از نانوسیال در مقایسه با آب خالص، یک افت فشار اجتناب ناپذیری را بر جریان سیال اعمال می کند؛ که ناشی از اصطکاک حجمی نانو ذرات است. رستمی و همکاران [۲]، انتقال حرارت در میکروکانال موج دار را مورد مطالعه قرار دادند؛ و هندسه میکروکانال را برای بدست آوردن ناسلت حداکثر بهینه سازی کردند و دریافتند که شدت جریان های ثانویه و اندازه ناحیه گردش سیال به پارامتر های هندسی بستگی دارد؛ به طوری که هندسه بهینه دارای ناسلت حداکثر نیز می باشد.

عزیزی و همکاران [۳]، در مطالعه تجربی انتقال حرارت جابجایی در یک میکروکانال گرماگیر استوانه ای، با استفاده از نانو سیال آب-مس اکسید، که حاوی نانو ذرات مس با قطر ۲۵ نانومتر می باشد؛ به این نتیجه رسیدند که افزایش قابل ملاحظه ای از ضریب انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال با پایه آب در ۳ درصد کسر جرمی نیز حاصل می گردد؛ و همچنین نتیجه گرفتند که افزایش عدد رینولدز در یک نقطه خاص منجر به کاهش اثر حرارتی می شود. هو و همکاران [۴]، یک بررسی عملی در خصوص عملکرد خنک کاری جابجایی اجباری نانو سیال آب-آلومینیوم اکسید در میکروکانال گرماگیر انجام دادند؛ و نشان دادند که میانگین انتقال حرارت در میکروکانال گرماگیر که با این نانوسیال خنک می شود؛ در مقایسه با میکروکانال گرماگیری که با آب خنک می شود به شکل قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. مشتاق [۵]، با مطالعه بر روی جریان و انتقال حرارت نانو سیال ها در میکرو فینی گرماگیر اثبات کرد؛ که استفاده از نانوسیال به جای سیال خالص منجر به افزایش انتقال حرارت می شود؛ اما این افزایش با رشد افت فشار جریان نانوسیال نیز همراه است.

چن و همکاران [۶]، نشان دادند که رفتار حرارتی و کارایی خنک کاری یک نانوسیال در میکروکانالی گرماگیر، به پارامتر هایی نظیر اینرسی سیال، مقاومت حرارتی کل، اختلاف دمای بین دیواره میکروکانال و فاز سیال وابسته است. دورین [۷]، با بررسی جریان و انتقال حرارت آب-آلومینیوم اکسید در یک میکروکانال گرماگیر نشان داد؛ که بر خلاف تحلیلی که بر پایه ثابت بودن عدد رینولدز انجام گرفت، انتقال حرارت، در حین عبور نانو سیال از میکروکانال گرماگیر افزایش می یابد. او همچنین ثابت کرد که با افزایش قطر نانوذرات، روند افزایش انتقال حرارت کاهش می یابد. یانگ و همکاران [۸]، در یک مطالعه عددی بر روی جریان و انتقال حرارت نانو سیال آب-آلومینیوم اکسید در یک میکروکانال با استفاده از روش بولتزمن ثابت کردند؛ که میانگین عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز و غلظت نانوسیال افزایش می یابد.

رستمی و همکاران [۹]، انتقال حرارت در یک میکروکانال ماریپیچی با استفاده از دو نانوسیال آب-اکسید مس و آب-آلومینیوم اکسید با استفاده از شبیه سازی مدل دو فازی اویلرین و لاگرانژین مورد مطالعه قرار دادند

و نشان دادند که استفاده از نانو سیالات یک راه حل خوب برای افزایش نرخ انتقال حرارت در میکروکانال ها بدون افزایش قابل توجه افت فشار می باشد. کلتی و همکاران [۱۰]، در یک بررسی عملی و عددی بر روی جابجایی اجباری نانو سیال های دوفازی و همگن در میکروکانال گرماگیر عریض دریافتند که برای جریان نانو سیال مدل دوفازی بهتر می باشد. همچنین نشان دادند که با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت افزایش می یابد. پیغمبرزاده و همکاران [۱۱]، کارایی نانو سیال های آب-آلومینیوم اکسید و آب-اکسید مس را در خنک کاری یک میکروکانال گرماگیر مستطیلی بررسی کردند و نتایج نشان داد که نانو سیال آب-اکسید مس با $0.2/0$ درصد حجمی نانوسیال و نانوسیال آب-آلومینیوم اکسید با 1 درصد حجمی به ترتیب 27 درصد و 49 درصد ضریب انتقال حرارت را افزایش می دهد. محمد و همکاران [۱۲]، در یک شبیه سازی عددی، افزایش انتقال حرارت در میکروکانال گرماگیر موجدار نشان دادند؛ که کارایی انتقال حرارت در میکروکانال های موجدار از میکروکانال های مستقیم با سطح مقطع یکسان بیشتر می باشد. وازی و همکاران [۱۳]، در یک مطالعه عددی، بر روی جابجایی اجباری نانوسیال در یک میکروکانال گرماگیر، نشان دادند که افزایش انتقال حرارت برای جریان آرام با افزایش درصد حجمی نانو ذرات Al_2O_3 حاصل می شود؛ اما برای جریان آشفته افزایشی در انتقال حرارت مشاهده نشد و افزایش درصد حجمی نانو ذرات فقط به افزایش حداکثر دمای لایه های نیز منجر می گردد.

با توجه به تاثیر نانو سیالات بر بهبود کارایی انتقال حرارت میکروکانال ها، در تحقیق حاضر، با مطالعه عددی و استفاده از مدل دوفازی، به بررسی انتقال حرارت جابجایی اجباری، در میکروکانال گرماگیر مارپیچی، با استفاده از نانو سیال آب-آلومینیوم اکسید و آب-اکسید مس پرداخته می شود و نتایج حاصل با بیان تجربی مقایسه و اعتبار سنجی می شود و سپس نتایج برای کسر حجمی های متفاوت در قطر های هیدرولیکی مختلف، نیز تعمیم داده می شود؛ که این کار با استفاده از روش تجربی به دلیل محدودیت هایی نظیر، تعداد دماسنج و حتی محل نصب آنها، بسیار دشوار می باشد.

در این مقاله میکروکانال در نظر گرفته شده که در اینجا جهت افزایش نرخ انتقال حرارت، پره هایی بروی سطح بالایی میکرو کانال قرار گرفته، که تاکنون میکرو کانال با در نظر گرفتن پره مورد مطالعه واقع نشده است. با استفاده از انتگرال گیری حجمی میانگین سلول های محاسباتی درون دامنه جریان به جای میان گیری از دماهای ورودی و خروجی میکروکانال، برای محاسبه دمای بالک، استفاده شده است و رابطه ای برای ضریب جابجایی حرارتی حاصل از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم، نیز ارائه شده است و در نهایت به تاثیر پارامتر هایی نظیر قطر هیدرولیکی، عدد رینولدز و کسر حجمی نانو ذرات بر روی عدد ناسلت پرداخته می شود.

۲- معادلات حاکم و معرفی اعداد بی بعد

معادلات حاکم بر جریان سیال همان معادلات ناویر استوکس رایج می باشند؛ و به دلیل اینکه در این پژوهش از ذرات معلق در سیال پایه به عنوان یک عامل در افزایش انتقال حرارت استفاده شده است؛ بنابراین، باید از مدل دوفازی برای حل معادلات سیال و انرژی استفاده شود.

۲-۱- مدل دوفازی

در این روش سیال با دو فاز در نظر گرفته می‌شود که این دوفاز اختلاف سرعتی با هم دارند. پس از اعمال روابط بصورت مجزا برای هر فاز و جفت کردن این معادلات با نسبت حجمی در حجم کنترل حل می‌شوند. مدل‌های دوفازی عبارتند از:

۱- مدل حجم سیال^۱ (VOF)

۲- مدل مخلوط^۲

۳- مدل اویلرین^۳

که در این پژوهش از مدل مخلوط استفاده شده است. روابط ریاضی مدل مخلوط به صورت زیر می‌باشد [۱۴]:

معادله بقا جرم:

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

معادله بقا ممنتوم:

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m \vec{V}_m) = -\nabla P_m + \nabla \cdot (\mu_m \nabla \vec{V}_m) + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k \vec{V}_{dr,k} \vec{V}_{dr,k} \right) \quad (2)$$

که در آن $\vec{V}_{dr,k}$ سرعت رانش برای k امین فاز می‌باشد.

معادله کسر حجمی:

$$\nabla \cdot (\varphi_p \rho_p \vec{V}_m) = -\nabla \cdot (\varphi_p \rho_p \vec{V}_{dr,p}) \quad (3)$$

معادله بقا انرژی:

$$\nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \rho_k C_{pk} \varphi_k \vec{V}_k T \right) = -\nabla \cdot (k_m \nabla T) \quad (4)$$

که در این روابط $\vec{V}_{dr,k}$ سرعت رانش برای فاز دوم (که در اینجا ذرات نانو هستند) می‌باشد؛ و \vec{V}_m نیز سرعت متوسط جرمی می‌باشد که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{V}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \varphi_k \rho_k \vec{V}_k}{\rho_m} \quad (5)$$

همچنین سرعت نسبی بین فاز سیال و ذرات جامد از روابط زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$\vec{V}_{pf} = \vec{V}_p - \vec{V}_f \quad (6)$$

$$\vec{V}_{dr,p} = \vec{V}_{pf} - \sum_{k=1}^n \left(\frac{\varphi_k \rho_k}{\rho_m} \right) \vec{V}_{fk} \quad (7)$$

$$\vec{V}_{pf} = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_f f_{drag}} \left(\frac{\rho_p - \rho_m}{\rho_g} \right) \vec{a} \quad (8)$$

¹ Volume of fluid

² Mixture

³ Eulerian

در رابطه ی بالا f_{drag} همان نیروی درگ می باشد که توسط شیلر و نیومن [۱۷] ارائه شده است.

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re_p^{0.687} & Re_p \leq 1000 \\ 0.0183 Re_p & Re_p \geq 1000 \end{cases} \quad (9)$$

$$\vec{a} = \vec{g} - (V_m \cdot \nabla) \vec{V}_m \quad (10)$$

۲-۲- روابط حاکم بر خواص ترموفیزیکی نانوسیال

از آنجایی که در این پژوهش، از نانو سیال به عنوان سیال عامل استفاده می شود؛ جهت از بین بردن خواص ترموفیزیکی و حرارتی در معادلات حاکم از روابط زیر استفاده خواهد شد [۱۸]:
چگالی:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_p \quad (11)$$

ظرفیت حرارتی:

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

هدایت حرارتی:

$$k_{nf} = \left[\frac{k_p + 2k_{bf} + 2(k_p - k_{bf})\varphi}{k_p + 2k_{bf} - 2(k_p - k_{bf})\varphi} \right] k_{bf} \quad (13)$$

لزجت:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2.5\varphi) \quad (14)$$

۲-۳- اعداد بی بعد حاکم

عدد رینولدز به طریق مرسوم آن تعریف شده است، یعنی به صورت $Re = \rho v d / \mu$ می باشد. در اینجا سرعت نیز بر اساس نرخ جریان سطح مقطع عرضی کانال محاسبه شده است. همچنین سرعت با استفاده از نرخ دبی جرمی و قطر معادل محاسبه شده است. قطر معادل در اینجا همان قطر هیدرولیک کانال می باشد و برای یک میکرو کانال با عرض W و عمق H بصورت زیر تعریف می شود.

$$D_h = \frac{2WH}{W + H} \quad (15)$$

نرخ دبی جرمی نیز بر اساس چگالی در شرط ورودی ارزیابی شده است. موازنه میان انرژی تولید شده توسط هیتر و انرژی جذب شده توسط سیال خنک کننده به کمک معادلات پیشرو بدست خواهد آمد:

$$Q = m C_{p,nf} (T_{out} - T_{in})_{nf} \quad (16)$$

ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت برای نانو سیال از معادلات زیر محاسبه خواهد شد :

$$h = \frac{Q}{A(T_w - T_m)} \quad (17)$$

$$Nu = \frac{h \cdot D_h}{k_{nf}} \quad (18)$$

در اینجا T_m دمای مرجع مایع می باشد که میانگین دمای ورودی و خروجی را محاسبه می کند:

$$T_m = \frac{T_{out} + T_{in}}{2} \quad (19)$$

طول کلی میکرو کانال با n گذر عمودی و $(n-1)$ گذر جانبی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$L_{CH} = nl + (n - 1)(2\pi r) + 2r \quad (20)$$

عملکرد هیدرولیکی گرماگیر نیز توسط ضریب اصطکاکی میانگین تعریف شده توسط هو و همکارانش [۱۹] محاسبه می شود:

$$f = \frac{2\Delta p}{\rho_{nf}} \cdot \frac{D_h}{u_m^2 L_{CH}} \quad (21)$$

ضریب اصطکاکی بدست آمده از رابطه بالا با مقادیر نظری بدست آمده از معادلات هاگن-پواسل مقایسه شده است:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (22)$$

عدد رینولدز:

$$Re = \frac{\rho_{nf} u_m D_h}{\mu_{nf}} \quad (23)$$

عدد پراندل:

$$Pr_{nf} = \frac{\mu_{nf} C_{p,nf}}{k_{nf}} \quad (24)$$

ضریب انتقال حرارت بدست آمده از معادلات فوق با مقادیر ضریب انتقال حرارت نظری بدست آمده از Dittus-Boelter که توسط هو و همکارانش [۴] معرفی شده است، مقایسه خواهد شد:

$$Nu_{(th)} = 0.024(Re)^{0.8} \cdot (Pr)^{0.4} \quad (25)$$

همچنین مقاومت حرارتی نیز به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$R = \frac{T_w - T_m}{q} \quad (26)$$

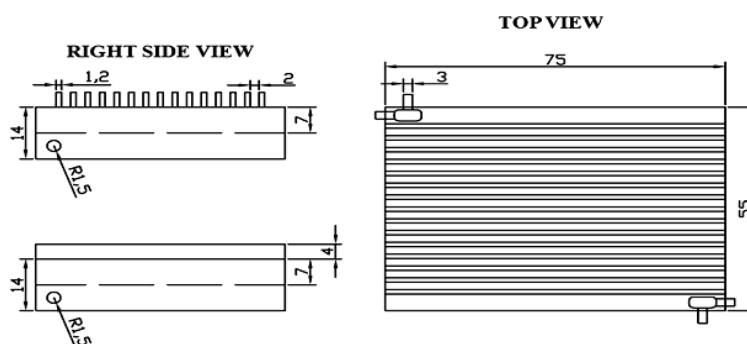
۳-مدلسازی میکروکانال

۳-۱-هندسه میکروکانال

میکروکانال در نظر گرفته در این پژوهش همانند [۲۰, ۲۱] انتخاب شده است. جنس میکروکانال مس می باشد؛ که این ماده به دلیل سختی بالا، هدایت حرارتی و پرداخت سطوح هموارش انتخاب شده است. در شکل (۱)، می توان شکل میکروکانال را مشاهده نمود. ابعاد میکروکانال $75\text{mm} \times 55\text{mm}$ می باشد؛ و همچنین جهت افزایش نرخ انتقال حرارت، پره هایی بر روی سطح بالایی میکروکانال قرار گرفته است. نانو ذرات کروی قطری در حدود 15 میلیمتر دارند و خواص ترموفیزیکی نانو ذره (اکسید آلومینیوم) Al_2O_3 ، (اکسید مس) CuO و سیال پایه برای نانو ذره در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی

خواص	سیال پایه (آب)	اکسید مس	اکسید آلومینیوم
$\rho(\text{kg/m}^3)$	۹۹۸/۲	۶۵۰۰	۳۹۷۰
$C_p(\text{J/kg.K})$	۴۱۸۲	۵۳۵/۶	۷۶۵
$k(\text{J/kg.K})$	۰/۶	۷۶/۵	۳۶
$\mu(\text{N/m}^2)$	۰/۰۰۱۰۰۳	-	-



شکل ۱- مدل هندسی میکروکانال

۳-۲- روش عددی

در تحقیق حاضر، محاسبات با استفاده از نرم افزار تجاری انسیس فلونت انجام شده است. در اینجا فرض می شود که جریان آرام، تراکم ناپذیر و نیوتنی با پروفیل سرعت یکنواخت، با سرعت و دمای ثابت u_m و T_i وارد میکروکانال می شود. سیال عامل در نظر گرفته شده جهت شبیه سازی، نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم و آب/اکسید مس می باشد. معادلات حاکم در حالت پایا در روابط (۱) تا (۶) آورده شده است. جهت گسسته سازی معادلات از روش اویلر پیشرو مرتبه اول و برای ایجاد کوپلینگ بین فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل استفاده می شود. در اینجا جهت شبیه سازی جریان دوفازی از مدل مخلوط استفاده شده است که یک سرعت لغزشی بین نانوذرات و سیال پایه در نظر می گیرد. همچنین جهت حل میدان جریان و میدان دما از رویکرد حجم محدود در حالت ضمنی استفاده شده است. فرض می شود که از کف میکروکانال شار حرارتی ثابتی معادل با 7 W/mm^2 وارد می شود؛ و مرزهای باقیمانده نیز دیواره با شرط جابجایی آزاد با محیط اطراف می باشد.

۴- نتایج

در این بخش اثر مارپیچی کردن کانال و همچنین تاثیر اضافی کردن نانو سیال بر مشخصات هیدرولیکی و حرارتی میکروکانال بررسی شده است و نتایج آن با نتایج بدست آمده از سیال پایه مقایسه شده است. ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری و عدد ناسلت بدست آمده از روش عددی حاضر با داده های آزمایشگاهی سیواکومار و همکارانش [۲۰, ۲۱] مقایسه می شود.

۴-۱- اثر هندسه ماریپیچی میکروکانال

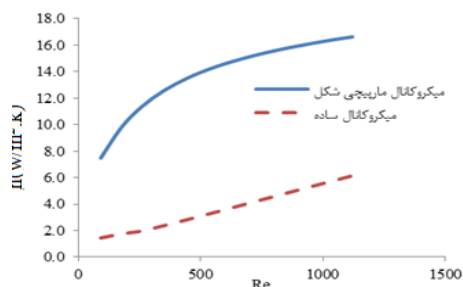
در این بخش به بررسی ماریپیچی کردن میکروکانال پرداخته می شود. بدین منظور دو شبیه سازی در یک قطر هیدرولیکی ثابت انجام شده است، یکی از این دو میکروکانال ساده و مستقیم الخط و دیگری مربوط به میکروکانال ماریپیچی شکل می باشد. در اینجا فرض می شود که هر دو میکرو کانال در یک حجم ثابت قرار دارند، یعنی مساحت صفحه پایه میکروکانال برابر با $75\text{mm} \times 55\text{mm}$ بوده و برای هر دو یکسان می باشد. سیال عامل بکار رفته نیز برای هر دو شبیه سازی آب خالص می باشد. ابتدا به تاثیر هندسه ماریپیچی میکروکانال بر روی افت فشار در اعداد رینولدز مختلف پرداخته می شود.

در شکل (۲)، نمودار افت فشار بر حسب عدد رینولدز نشان داده شده است. با توجه به نمودار افت فشار در میکروکانال ماریپیچی شکل، نسبت به میکروکانال ساده بیشتر می باشد و این اختلاف در اعداد رینولدز بالاتر نیز بیشتر خواهد شد. افت فشار در میکرو کانال ماریپیچی شکل، به دلیل عبور سیال از تعدادی گذر خمیده و عمودی نیز بیشتر می باشد؛ در حالی که در میکرو کانال ساده، چنین وضعیتی را نخواهیم داشت؛ بنابراین، می توان نتیجه گرفت که با ماریپیچی کردن میکروکانال، افت فشار هم زیاد خواهد شد. سپس به تاثیر ماریپیچی کردن میکروکانال بر عملکرد حرارتی آن خواهیم پرداخت.

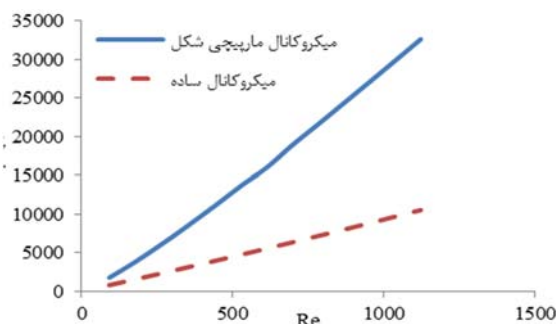
در شکل (۳) نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت با عدد رینولدز نشان داده شده است. با توجه به شکل با ماریپیچی کردن کانال، به دلیل افزایش طول موثر آن در یک حجم ثابت، ضریب انتقال حرارت جابه جایی نیز افزایش قابل توجهی خواهد داشت؛ و در نتیجه انتقال حرارت بیشتری صورت خواهد گرفت. بنابراین می توان نتیجه گرفت که با ماریپیچی نمودن میکروکانال، هر چند که افت فشار افزایش می یابد ولی ضریب انتقال حرارت در کانال نیز افزایش خواهد یافت. همچنین با مقایسه نمودارهای فوق در خواهیم یافت که در اعداد رینولدز پایین، ضریب انتقال حرارت بشدت افزایش یافته ولی افت فشار افزایش قابل توجهی ندارد؛ در نتیجه، ماریپیچی نمودن میکروکانال در اعداد رینولدز پایین می تواند کارایی بهتری داشته باشد. در بخش بعدی به نتایج عددی نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم و آب/اکسید مس در میکروکانال گرماگیر ماریپیچی شکل پرداخته شده است؛ و نتایج عددی تحلیل انتقال حرارت و افت فشار بدست آمده را با داده های آزمایشگاهی [۲۰، ۲۱] و معادلات بدست آمده از روابط نظری مقایسه شده است.

۴-۲- اثر نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم و آب/اکسید مس

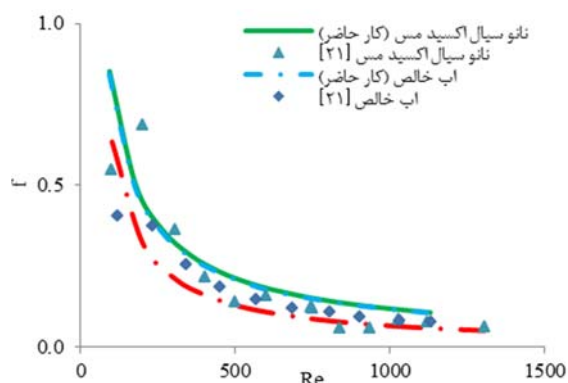
افت فشار نانو سیالات آب/اکسید آلومینیوم و آب/اکسید مس در گذر از میکروکانال ماریپیچی شکل بطور عددی بدست آمده است. قطر هیدرولیکی و کسر حجمی نانو ذرات بکاررفته در تمامی شبیه سازی های ارائه شده در این بخش به ترتیب برابر با $D_h = 0.81\text{mm}$ و $\phi = 0.3$ می باشد. شبیه سازی ها در محدوده اعداد رینولدز مختلفی انجام شده است. در شکل (۴) و (۵) می توان تغییرات ضریب اصطکاک پوسته ای را بر حسب عدد رینولدز، به ترتیب برای نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم، آب/اکسید مس و همچنین آب خالص مشاهده کرد. همانگونه که مشخص نتایج عددی از موافقت قابل قبولی با داده های تجربی [۲۱] دارد و اختلاف میان حل عددی و نمودار حاصل از روابط نظری به دلیل فرضیات در حل عددی می باشد.



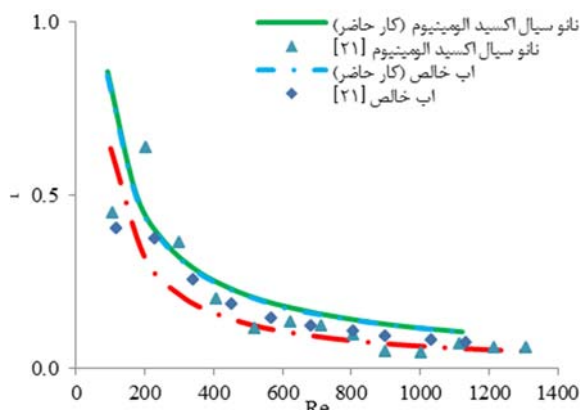
شکل ۳- تاثیر میکروکانال مارپیچی شکل بر ضریب انتقال حرارت جابجایی



شکل ۲- تاثیر میکروکانال مارپیچی شکل بر افت فشار



شکل ۵- تغییرات ضریب اصطکاک پوسته ای نانو سیال بر حسب عدد رینولدز برای نانو سیال آب/ اکسید مس



شکل ۴- تغییرات ضریب اصطکاک پوسته ای نانو سیال بر حسب عدد رینولدز برای نانو سیال آب/ اکسید آلومینیوم

نتایج شکل (۵)، نشان می دهد که با افزایش عدد رینولدز ضریب اصطکاک پوسته ای نیز کاهش می یابد. این رفتار در نانو سیال آب/ اکسید آلومینیوم، آب/ اکسید مس و همچنین آب خالص نیز مشاهده شده است. مقایسه میان شبیه سازی عددی ضریب اصطکاک پوسته ای نانو سیال آب/ اکسید آلومینیوم با آب/ اکسید مس نشان داد که مقدار ضریب اصطکاک در نانوسیال آب/ اکسید مس، اندکی از ضریب اصطکاک نانو سیال آب/ اکسید آلومینیوم، بیشتر می باشد. بطور کلی نتایج شبیه سازی های صورت گرفته در این بخش نشان دادند که با افزایش عدد رینولدز، ضریب اصطکاک برای تمامی موارد کاهش می یابد؛ و ضریب اصطکاک نانو سیال آب/ اکسید مس، اندکی از آب/ اکسید آلومینیوم، نیز بیشتر می باشد. در بخش بعدی، به تحلیل حرارتی میکروکانال با نانوسیال پرداخته می شود. حال به بررسی اثر نانو سیال آب/ اکسید آلومینیوم و آب/ اکسید مس بر ضریب انتقال حرارت جابجایی، عدد ناسلت و سایر پارامترهای حرارتی نظیر مقاومت حرارتی پرداخته و نتایج عددی با داده های تجربی مرجع [۲۱] مقایسه می شوند. در شبیه سازی های انجام شده در این بخش قطر هیدرولیکی و کسر حجمی نانو ذرات به ترتیب برابر با $D_h=0.81\text{mm}$ ، $\phi=0.3$ می باشد. البته لازم به ذکر است؛ که در گزارش نتایج عددی در این پژوهش برای محاسبه دمای بالک بجای میان گیری از دماهای ورودی و خروجی میکروکانال، از انتگرال حجمی میانگین سلول های محاسباتی درون دامنه جریان، استفاده شده است؛ که معیاری دقیق تر نسبت به میان گیری حسابی می باشد.

البته این قابلیت مختص روش‌های عددی بوده و به نوعی برتری و مزیت روش‌های عددی در مقایسه با روش‌های تجربی در این موضوع می‌باشد. محدودیت پژوهش‌های تجربی، تعداد لوازم آزمایشگاهی می‌باشد، به عنوان مثال محدودیت‌هایی نظیر تعداد دما سنج و حتی محل نصب آن نیز وجود دارد.

در شکل (۶)، نمودار نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و تجربی مرجع [۲۱]، تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم و آب خالص آورده شده است. همانگونه که در شکل نشان داده شده است، تزریق نانوسیال، ضریب انتقال حرارت را نسبت به سیال پایه بدون نانو ذرات، نیز افزایش داده است؛ و این پدیده در نتایج عددی و نتایج تجربی مشاهده می‌شود. همچنین با افزایش عدد رینولدز، یا عبارتی دیگر، با افزایش نرخ دبی جریان عبوری از میکروکانال می‌توان ضریب انتقال حرارت را افزایش داد. ولی یک اختلاف قابل ملاحظه‌ای میان نتایج عددی و تجربی مشاهده می‌شود.

این اختلاف نیز به دلیل تفاوت در اندازه‌گیری دمای روی دیواره میکروکانال می‌باشد. همان‌طور که قبلاً نیز به این موضوع اشاره شده است؛ در روش تجربی در به کارگیری تعداد دما سنج‌ها محدودیت وجود دارد و حتی دما سنج‌ها نیز در گزارش دما دارای خطا می‌باشد؛ ولی در روش‌های عددی کمیت‌های فیزیکی نظیر دما و فشار در مراکز سلول‌های محاسباتی بیشماری ذخیره می‌شوند و بنابراین، دمای گزارش شده در این روش‌ها دقیق‌تر می‌باشد. جهت مقایسه کمی، در معادلات زیر تابع برازش شده از نتایج شبیه‌سازی عددی و داده‌های تجربی گزارش شده در [۱۵]، آورده شده است.

تابع برازش شده از نتایج عددی حاصل از نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم:

$$h = 3.9846 \ln(\text{Re}) - 10.155 \quad (27)$$

تابع برازش شده از داده‌های تجربی [۲۱] حاصل از نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم:

$$h = 8 \times 10^{-6} \text{Re}^2 - 0.004 \text{Re} + 1.5433 \quad (28)$$

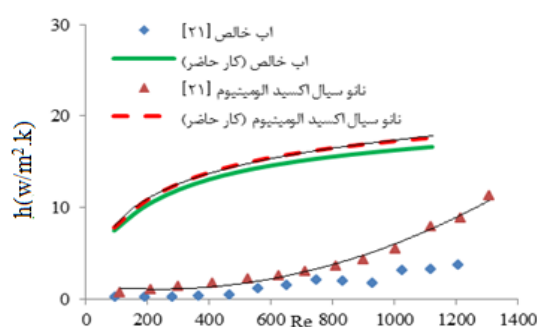
نتایج نشان می‌دهد که تابع لگاریتمی جهت برازش نتایج عددی حاصل از نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم مناسب می‌باشد، در حالی که برای برازش داده‌های تجربی [۲۱] از تابع چند جمله‌ای استفاده شده است. با مقایسه این دو تابع در خواهیم یافت که شیب تغییرات هر نیز دو مثبت می‌باشد ولی تابع مربوط به نتایج عددی کاهنده و تابع مربوط به داده‌های تجربی [۲۱] افزایش‌دهنده می‌باشد.

در شکل (۷)، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و تجربی [۲۱] تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری نانو سیال آب/اکسید مس و آب خالص نشان داده شده است. در اینجا نیز رفتار نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم مشاهده می‌شود؛ با این تفاوت، که مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی حاصل از شبیه‌سازی نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم، اندکی از نانو سیال آب/اکسید مس، بیشتر می‌باشد. همان‌گونه که قبلاً نیز به آن اشاره شده است؛ این اختلاف به این دلیل می‌باشد که ضریب هدایت حرارتی نانو ذرات اکسید مس اندکی از ضریب هدایت حرارتی نانو ذرات اکسید آلومینیوم بیشتر می‌باشد.

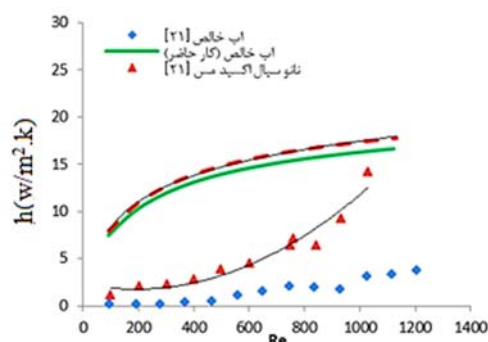
اکنون جهت مقایسه بدون بعد عملکرد حرارتی دو نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم و آب/اکسید مس، از عدد بی بعد ناسلت استفاده خواهیم کرد. در جدول (۲)، تغییرات عدد ناسلت بر حسب اعداد رینولدز مختلف را برای دو نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم، آب/اکسید مس و آب خالص گردآوری شده است.

با مقایسه اعداد ناسلت در خواهیم یافت که اضافه کردن نانو ذرات اکسید آلومینیوم و اکسید مس به سیال پایه، منجر به افزایش قابل توجه عدد ناسلت می شود. علت این امر در اینست که، نانو ذرات منجر به بهبود خواص ترموفیزیکی سیال پایه می شوند و همچنین دلیل دیگر نیز اثر براونی نانو ذرات می باشد. هر دو این عوامل باعث افزایش عدد ناسلت و به طور کلی بهبود عملکرد حرارتی میکروکانال می گردد.

همچنین با مقایسه میان نتایج حاصل از شبیه سازی نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم با نانو سیال آب/اکسید مس در خواهیم یافت که عدد ناسلت نانو سیال آب/اکسید مس اندکی از نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم بیشتر می باشد؛ هر چند که این مقدار افزایش کم می باشد؛ ولی افزایش اندک در عدد ناسلت منجر به انتقال حرارت بالاتر در میکروکانال خواهد شد. بنابراین، اضافی نمودن نانو ذرات موجب افزایش عدد ناسلت می گردد و از میان دو نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم و آب/اکسید مس، نانو سیال آب/اکسید مس نیز کارایی بهتری خواهد داشت.



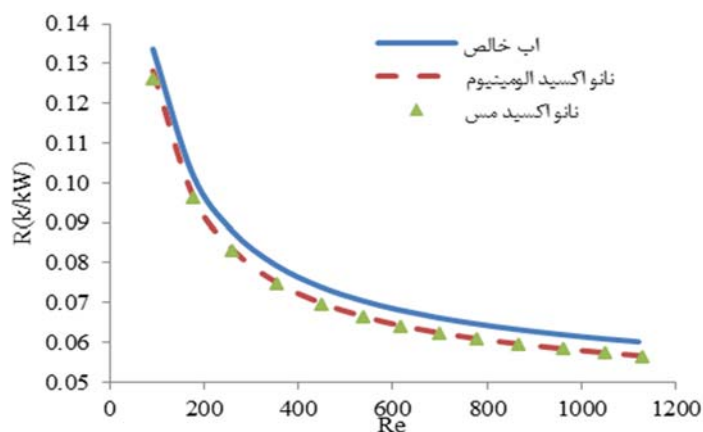
شکل ۶- تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی نتایج عددی کار حاضر و تجربی [۲۱] اجباری نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم



شکل ۷- تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی نتایج عددی کار حاضر و تجربی [۲۱] اجباری نانو سیال آب/اکسید مس

جدول ۲- تغییرات عدد ناسلت با عدد رینولدز برای دو نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم، آب/اکسید مس و آب خالص.

شماره	عدد رینولدز	آب خالص	نانو سیال آب/اکسید مس	نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم
۱	۹۱/۸۲	۹/۸۳۲۳	۱۰/۶۴۲۷	۱۰/۴۷۶۵
۲	۱۷۵/۷۷	۱۲/۸۵۶۵	۱۳/۹۴۴۳	۱۳/۸۴۳۸
۳	۲۵۸/۶۶	۱۴/۹۱۱۱	۱۶/۱۸۱۲	۱۶/۰۷۱۸
۴	۳۵۰/۸۸	۱۶/۵۳۳۴	۱۷/۹۶۴۹	۱۷/۸۴۵۲
۵	۴۴۷/۰۸	۱۷/۷۷۲۷	۱۹/۳۱۹۵	۱۹/۲۰۸۱
۶	۵۳۳/۳۸	۱۸/۶۳۵۲	۲۰/۲۷۴۲	۲۰/۱۴۷۴
۷	۶۱۲/۷۹	۱۹/۲۸۳۵	۲۰/۹۸۸۹	۲۰/۸۹۰۲
۸	۶۹۲/۶۰	۱۹/۸۳۶۶	۲۱/۶۰۵۵	۲۱/۴۸۵۴
۹	۷۷۱/۶۸	۲۰/۳۱	۲۲/۱۲۵۱	۲۲/۰۰۸
۱۰	۸۵۹/۵۲	۲۰/۷۶۶۳	۲۲/۶۳۱۵	۲۲/۵۰۴۲
۱۱	۹۵۴/۲۶	۲۱/۱۹۹۹	۲۳/۱۱۲۷	۲۲/۹۸۲۸
۱۲	۱۰۴۳/۲۴	۲۱/۵۷۱۷	۲۳/۵۱۵۸	۲۳/۳۸۲۴
۱۳	۱۱۲۱/۳۵	۲۱/۸۵۸۵	۲۳/۸۳۳	۲۳/۷۰۸۸



شکل ۸- مقاومت حرارتی بر حسب عدد رینولدز. قطر هیدرولیکی 0.81 mm و کسر حجمی 0.3%

در شکل (۸)، نمودار تغییرات مقاومت حرارتی بر حسب عدد رینولدز آورده شده است. با توجه به نمودار، با تزریق نانو ذرات می توان مقاومت حرارتی میکروکانال را کاهش داد؛ و نانو سیال آب/اکسید مس نسبت به نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم مقاومت حرارتی کمتری دارد. سیکومار و همکارانش [۲۱] نیز نتیجه گرفتند که از میان دو نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم و آب/اکسید مس، مقاومت حرارتی نانو سیال آب/اکسید مس کمتر می باشد. در ادامه به بررسی تاثیر قطر هیدرولیکی و کسر حجمی نانو ذرات بر عملکرد هیدرولیکی و حرارتی میکروکانال خواهیم پرداخت.

۴-۳- اثر قطر هیدرولیکی

در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی دو میکروکانال از جنس مس با قطرهای هیدرولیکی $D_h=0.81\text{mm}$ و 0.86mm در کسر حجمی ثابت $\phi=0.3$ ، برای یک محدوده وسیعی از اعداد رینولدز آورده شده است (جدول ۳). نتایج عددی برای هر دو نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم و آب/اکسید مس نشان می‌دهد که با کاهش قطر هیدرولیکی افت فشار در میکرو کانال افزایش می‌یابد؛ که سیواکومار و همکارانش [۲۰] نتیجه مشابهی گرفتند. همچنین با مقایسه مقادیر افت فشار برای دو نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم و آب/اکسید مس در جدول (۳)، در خواهیم یافت که، افت فشار برای نانو سیال آب/اکسید مس در قطر هیدرولیکی ثابت ($D_h=0.86$)، نسبت به نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم بیشتر می‌باشد.

در شکل (۹) و (۱۰)، به ترتیب نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی، بر حسب اعداد رینولدز مختلف رسم شده است. همان‌طور که مشخص است با کاهش قطر هیدرولیکی، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد. سیواکومار و همکارانش [۲۰] نیز، نتیجه گرفتند که با کاهش قطر هیدرولیکی، افت فشار در طول میکروکانال افزایش می‌یابد؛ و ضریب انتقال حرارت، از ۲ تا ۳ درصد افزایش خواهد یافت، که در پژوهش حاضر نیز نتیجه مشابهی گرفته شده است. همچنین، با مقایسه ضریب انتقال حرارت دو نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم و آب/اکسید مس، در خواهیم یافت که، در یک قطر هیدرولیکی ثابت، ضریب انتقال حرارت جابجایی نانو سیال اکسید مس از نانو سیال اکسید آلومینیوم بیشتر می‌باشد.

۴-۴- اثر کسر حجمی

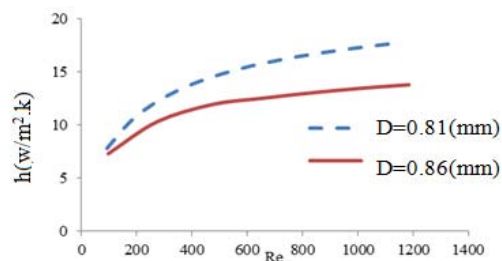
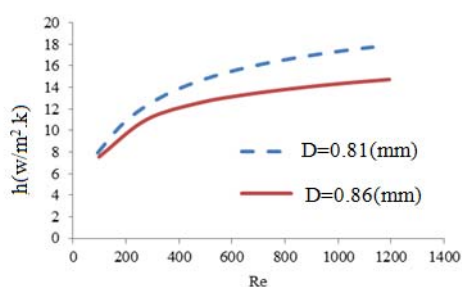
در این بخش، به بررسی تاثیر کسر حجمی نانو ذرات در قطر هیدرولیکی ثابت $D_h=0.81\text{mm}$ خواهیم پرداخت. ابتدا به بررسی تاثیر کسر حجمی نانو ذرات بر روی افت فشار میکروکانال خواهیم پرداخت. در جدول (۴)، می‌توان تاثیر کسر حجمی را بر روی افت فشار برای نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم برای دو کسر حجمی ۰.۳٪ و ۰.۱٪ مشاهده کرد. همان‌طور که نشان داده شده است؛ با افزایش کسر حجمی نانو ذرات، انسداد جریان بیشتر شده و افت فشار در میکرو کانال نیز افزایش می‌یابد. در شکل (۱۱) نمودار نتایج عددی و داده‌های تجربی [۲۱] تغییرات ضریب اصطکاک پوسته‌ای بر حسب عدد رینولدز آورده شده است. نتایج عددی نشان می‌دهند که با افزایش کسر حجمی ضریب اصطکاک پوسته‌ای افزایش کمی خواهد داشت.

داده‌های آزمایشگاهی نیز بطور کیفی چنین نتیجه‌ای را پیش‌بینی نموده‌اند و همچنین نتیجه مشابهی برای نانو سیال آب/اکسید مس بدست آمده است که در اینجا آورده نشده است. در ادامه به بررسی تاثیر کسر حجمی بر روی عملکرد حرارتی میکروکانال، خواهیم پرداخت. در نمودار شکل (۱۲)، تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی، بر حسب عدد رینولدز برای دو کسر حجمی ۰.۳٪ و ۰.۱٪ برای میکروکانال با قطر هیدرولیکی $D_h=0.81\text{mm}$ رسم شده است. با توجه به شکل، با افزایش کسر حجمی، ضریب انتقال حرارت جابجایی میکروکانال افزایش می‌یابد. بعبارت دیگر با افزایش کسر حجمی، غلظت نانو ذرات افزایش یافته و موجب بهبود بیشتر خواص ترموفیزیکی نانو سیال می‌شود؛ و همچنین نتیجه مشابهی برای نانو سیال آب/اکسید مس بدست آمده است. سیواکومار و همکارانش [۲۰] نیز نتیجه گرفتند که با افزایش غلظت نانو ذرات ضریب انتقال حرارت جابجایی در میکروکانال افزایش می‌یابد.

جدول ۳- مقایسه افت فشار برای دنانوسیال آب/اکسید آلومینیوم و آب/اکسید مس در قطرهیدرولیکی

$D_h=0.86\text{mm}$

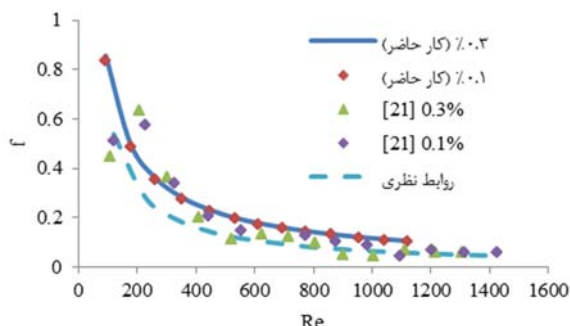
شماره	عدد رینولدز	Δp نانوسیال آب/اکسید مس (kpa)	Δp نانوسیال آب/اکسید آلومینیوم (kpa)
۱	۹۷/۰۳	۱/۷۷	۱/۷۳
۲	۲۷۳/۳۴	۶/۰۱	۵/۸۶
۳	۷۴۲/۴۴	۱۱/۳۰	۱۱/۱۰
۴	۶۴۷/۵۵	۱۶/۱۰	۱۵/۷۰
۵	۸۱۵/۴۶	۲۰/۸۰	۲۰/۳۰
۶	۱۰۰۸/۴۰	۲۶/۳۰	۲۵/۷۰
۷	۱۱۸۴/۹۷	۳۱/۴۰	۳۰/۶۰



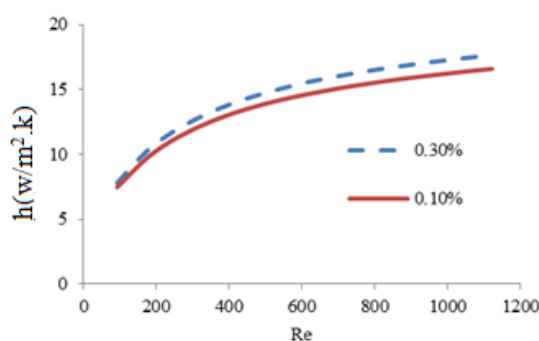
شکل ۹- تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری بر حسب عدد رینولدز برای نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم
شکل ۱۰- تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری بر حسب عدد رینولدز برای نانو سیال آب/اکسید مس

جدول ۴- تاثیر کسر حجمی بر روی افت فشار نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم در قطر هیدرولیکی $D_h=0.81\text{mm}$

شماره	عدد رینولدز	$\varphi=0.1\%$	$\varphi=0.3\%$
۱	۹۱/۹۵	۱/۷۶	۱/۸۰
۲	۱۷۶/۰۲	۳/۷۷	۳/۸۶
۳	۲۵۹/۰۳	۵/۹۳	۶/۰۷
۴	۳۵۱/۳۹۰	۸/۴۸	۸/۶۷
۵	۴۴۷/۷۲	۱۱/۲	۱۱/۵
۶	۵۳۴/۱۵	۱۳/۸	۱۴/۱
۷	۶۱۳/۶۷	۱۶/۲	۱۶/۶
۸	۶۹۳/۶	۱۸/۷	۱۹/۲
۹	۷۷۲/۷۹	۲۱/۱	۲۱/۷
۱۰	۸۶۰/۷۶	۲۳/۹	۲۴/۵
۱۱	۹۵۵/۶۴	۲۶/۹	۲۷/۵
۱۲	۱۰۴۴/۷۴	۲۹/۸	۳۰/۵



شکل ۱۱- تاثیر کسر حجمی بر تغییرات ضریب اصطکاک پوسته ای بر حسب عدد رینولدز برای نانو سیال آب/ اکسید آلومینیوم



شکل ۱۲- تاثیر کسر حجمی بر تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری بر حسب عدد رینولدز برای نانو سیال آب/ اکسید آلومینیوم

۵- نتیجه گیری

میکروکانال‌ها وسایلی برای زدودن شار حرارتی بالا از سطوح کوچک می باشند. در این مقاله عملکرد هیدرولیکی و حرارتی نانو سیال آب/ اکسید آلومینیوم و آب/ اکسید مس بطور عددی در میکروکانال مارپیچی شکل مقایسه شده است. نانو ذرات خواص مهم سیال نظیر هدایت حرارتی را در مقایسه با سیال پایه بطور قابل توجهی افزایش می دهد. روش عددی مورد استفاده بر اساس روش حجم محدود میباشد؛ و برای ردیابی نانو ذرات در سیال پایه از مدل دوفازی مخلوط استفاده شده است. نتایج بدست آمده بشرح زیر است:

۱- سطح انتقال حرارت یک فاکتور مهم در افزایش انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی میکروکانال است. نتایج نشان داد که با مارپیچی کردن میکروکانال در یک حجم ثابت از میکروکانال می توان سطح تبادل حرارتی را زیاد کرد.

۲- با مارپیچی کردن میکروکانال هر دوی افت فشار و ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد.

۳- علاوه بر تغییر در پارامتر هندسی (منظور مارپیچی کردن میکروکانال)، حرکت براونی نانو ذرات نیز یکی از مکانیزم‌های مهم در افزایش انتقال حرارت می باشد.

۴- نتایج نشان داد که ضریب انتقال حرارت نانو سیال آب/ اکسید آلومینیوم و آب/ اکسید مس در مقایسه با سیال پایه (آب) بیشتر می باشد.

- ۵- مقادیر آزمایشگاهی [۲۰،۲۱] و روابط نظری ضریب اصطکاک داری با داده‌های عددی مقایسه شده بودند. نتایج نشان داد که سازگاری خوبی میان نتایج عددی و آزمایشگاهی با روابط نظری وجود دارد.
- ۶- ضریب انتقال حرارت نانو سیال آب/ اکسید مس نیز بعلاوه هدایت حرارتی بالاتر نانو ذره اکسید مس نسبت به نانو سیال آب/ اکسید آلومینیوم بیشتر می‌باشد.
- ۷- استفاده از نانو سیال موجب خواهد شد که مقاومت حرارتی میکروکانال نیز کاهش یابد.
- ۸- از بررسی‌ها می‌توان نتیجه گرفت که وقتی که قطر هیدرولیکی کاهش می‌یابد، افت فشار در طول میکروکانال افزایش می‌یابد و همچنین ضریب انتقال حرارت نیز افزایش خواهد یافت.
- ۹- زمانی که کسر حجمی نانو ذرات افزایش یابد، ضریب انتقال حرارت افزایش خواهد یافت ولی چون نانو ذرات باعث انسداد جریان میشوند، افت فشار نیز در طول میکروکانال افزایش خواهد یافت.

مراجع

- [1] Rimbault, B., Nguyen, C. T., and Galanis, N., "Experimental Investigation of CuO–water Nanofluid Flow and Heat Transfer Inside a Microchannel Heat Sink", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 84, pp. 275-292, (2014).
- [2] Rostami, J., Abbassi, A., and Saffar-Avval, M., "Optimization of Conjugate Heat Transfer in Wavy Walls Micro Channels", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 82, pp. 318-328, (2015).
- [3] Azizi, Z., Alamdari, A., and Malayeri, M., "Convective Heat Transfer of Cu–water Nanofluid in a Cylindrical Microchannel Heat Sink", *Energy Conversion and Management*, Vol. 101, pp. 515-524, (2015).
- [4] Ho, C. J., Wei, L., and Li, Z., "An Experimental Investigation of Forced Convective Cooling Performance of a Microchannel Heat Sink with Al₂O₃/Water Nanofluid", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, No. 2-3, pp. 96-103, (2010).
- [5] Hasan, M. I., "Investigation of Flow and Heat Transfer Characteristics in Micro Pin Fin Heat Sink with Nanofluid", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 63, No. 2, pp. 598-607, (2014).
- [6] Chen, C. H., and Ding, C. Y., "Study on the Thermal Behavior and Cooling Performance of a Nanofluid-cooled Microchannel Heat Sink", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, No. 3, pp. 378-384, (2011).
- [7] Lelea, D., "The Performance Evaluation of Al₂O₃/Water Nanofluid Flow and Heat Transfer in Microchannel Heat Sink", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 17-18, pp. 3891-3899, (2012).
- [8] Yang, Y. T., and Lai, F. H., "Numerical Study of Flow and Heat Transfer Characteristics of Alumina-water Nanofluids in a Microchannel using the Lattice Boltzmann Method", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 5, pp. 607-614, (2013).

- [9] Rostami, J., Abbassi, A., and Harting, J., "Heat Transfer by Nanofluids in Wavy Micro Channels", *Advanced Powder Technology*, Vol. 29, No. 4, pp. 925-933, (2018).
- [10] Kalteh, M., Abbassi, A., Saffar-Avval, M., Frijns, A., Darhuber, A., and Harting, J., "Experimental and Numerical Investigation of Nanofluid Forced Convection Inside a Wide Microchannel Heat Sink", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 36, pp. 260-268, (2012).
- [11] Peyghambarzadeh, S., Hashemabadi, S., Chabi, A., and Salimi, M., "Performance of Water Based CuO and Al₂O₃ Nanofluids in a Cu-Be Alloy Heat Sink with Rectangular Micro Channels", *Energy Conversion and Management*, Vol. 86, pp. 28-38, (2014).
- [12] Mohammed, H., Gunnasegaran, P., and Shuaib, N., "Numerical Simulation of Heat Transfer Enhancement in Wavy Microchannel Heat Sink", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 1, pp. 63-68, (2011).
- [13] Vaziee, P., and Abouali, O., "Numerical Study of Forced Convection of Nanofluids in a Microchannel Heat Sink", *ASME 2008 6th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*, American Society of Mechanical Engineers, Darmstadt, Germany, pp. 1077-1083, (2013).
- [14] Behzadmehr, A., Saffar-Avval, M., and 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 and Fluid Flow*, Vol. 28, No. 2, pp. 211-219, (2009).
- [15] Rashidi, M., Hosseini, A., Pop, I., Kumar, S., and Freidoonimehr, N., "Comparative Numerical Study of Single and Two-phase Models of Nanofluid Heat Transfer in Wavy Channel", *Applied Mathematics and Mechanics*, Vol. 35, No. 7, pp. 831-848, (2014).
- [16] Manninen, M., Taivassalo, V., and Kallio, S., "On the Mixture Model for Multiphase Flow", *Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, Report, VTT Publications*, No. 288, (1996).
- [17] Schiller, L., "Über die grundlegenden Berechnungen bei der Schwerkraftaufbereitung", *Z. Vereines Deutscher Inge.*, Vol. 77, pp. 318-321, (1933).
- [18] Hwang, K. S., Jang, S. P., and Choi, S. U., "Flow and Convective Heat Transfer Characteristics of Water-based Al₂O₃ Nanofluids in Fully Developed Laminar Flow Regime", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 1-2, pp. 193-199, (2009).
- [19] Zhao, Z. h., and Yu, J. z., "Single-phase Forced Convection Heat Transfer in Micro Rectangular Channels", *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 16, No. 1, pp. 7-11, (2003).
- [20] Alagumurthi, N., and Senthilvelan, T., "Investigation of Heat Transfer in Serpentine Shaped Microchannel using Al₂O₃/Water Nanofluid", *Heat Transfer Asian Research*, Vol. 45, pp. 424-433, (2014).
- [21] Sivakumar, A., Alagumurthi, N., and Senthilvelan, T., "Investigation of Heat Transfer in Serpentine Shaped Microchannel using Al₂O₃/Water Nanofluid", *Heat Transfer Asian Research*, Vol. 45, No. 5, pp. 424-433, (2016).

فهرست نمادهای انگلیسی

A	مساحت (m^2)
a	شتاب (m/s^2)
b	طول چشمه (m)
C	طول فین (m)
C_p	گرمای ویژه ($J/kg.K$)
d	قطر (m)
f_{drag}	ضریب درگ
Gr	عدد گراشف
g	شتاب گرانش (m/s^2)
h	ضریب جابه‌جایی حرارتی ($W/m^2.K$)
K	ضریب هدایت حرارتی ($W/m.K$)
K_B	ثابت بولتزمن
Nu	عدد ناسلت
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
V	سرعت (m/s)

نمادهای یونانی

β	ضریب انبساط حرارتی ($1/K$)
μ	لزجت ($kg/m.s$)
θ	دما بی بعد
ρ	چگالی (kg/m^3)
ϕ	کسر حجمی ذره

زیرنویس‌ها

dr	رانشی
eff	موثر یا معادل
eq	معادل
f	سیال
max	ماکزیمم
m	مخلوط و متوسط
nf	نانوسیال
p	ذره و فاز ثانویه
q	فاز اولیه

Abstract

Nanofluids, a new class of thermo-fluids engineered by the stable suspension of Nano-sized metallic and nonmetallic entities (particles, fibers, tubes, droplets) in base fluids with optimized thermal conductivity, demonstrate the advantages of efficient thermal management with miniaturization. Micro-channel heat exchanger is very small and efficient by integrating some features such as high heat transfer coefficient, low fluid volume requirements, weight and small size, is a very efficient tool in the field of heat transfer purposes.

In this research, heat sink microchannel will be investigated. in order to improve the efficiency of heat transfer should be increased the fluid thermal conductivity. in this study, Numerical Investigation of the forced convection heat transfer in Serpentine heat sink microchannel with water- Al_2O_3 and Water-CuO has been studied, and the effect of hydraulic diameter, the Reynolds number and volume fraction of nanoparticles on heat transfer is discussed. The results of this study showed by spiraling the microchannel, both the pressure drop and the thermal conductivity are increased and with the increase of Reynolds the pressure drop for nanoparticles of CuO is increased and it also the hydraulic diameter decreasing, the pressure drop and the thermal conductivity are increased over the microchannel.