

مطالعه عددی تأثیر عامل‌های هندسی بر انتقال گرمای نانو سیال آب - Al_2O_3 در یک میکروکانال

هجیر کریمی*⁺، محمد مهدی سبزه میدانی

یاسوج، دانشگاه یاسوج، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

چکیده: این پژوهش به بررسی انتقال گرما و ساختار جریان، نانو سیال آب - آلومینیم اکسید در میکروکانال دو بعدی مستطیلی در جز حجمی ۲٪، ۴٪، ۶٪ و ۸٪ نانو ذره‌ها و عدد رینولدز ۱۰ تا ۵۰ با استفاده از دینامیک سیال‌های محاسباتی (CFD) پرداخته است. مجموعه معادله‌های حاکم، پیوستگی و مونتیم و گرما به روش المان محدود با اعمال شرایط مرزی با کمک نرم افزار کامسول حل شده است. عدد ناسلت محلی پیش بینی شده جریان نانو سیال آب - آلومینیم اکسید در عدد رینولدز ۶٫۹ و $\phi = 5\%$ با داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد. نتیجه‌های شبیه‌سازی نشان دادند افزایش عدد رینولدز موجب افزایش سرعت سیال و افزایش تراکم خطوط جریان لبه تیغه و ایجاد گرداب‌های بزرگ‌تر جریان می‌شود که این پدیده موجب افزایش ناسلت می‌شود. همچنین افزایش تعداد تیغه‌ها موجب تشکیل مناطق چرخش جریان بیشتر می‌شود که این امر به سبب تبادل گرمای بهتر سیال با دیواره کانال و افزایش دمای خروجی میکروکانال می‌شود. به طوری که در رینولدز ۴۰ دما خروجی سیال در میکروکانال شش تیغه ۳۲۲٫۳۵ کلوین و در میکروکانال یک تیغه ۳۱۴٫۹ کلوین می‌باشد. با افزایش ارتفاع تیغه وسعت منطقه چرخش بیشتر شده و در پی آن ضریب انتقال گرما افزایش می‌یابد. برای میکروکانال شش تیغه با افزایش عدد رینولدز از ۱۰ به ۵۰ میزان افت فشار ۱۵ برابر و میزان ناسلت ۲۸ برابر می‌شود. همچنین افزایش جز حجمی نانو ذره، مقدارهای متوسط دمای خروجی میکروکانال را افزایش داده و وسعت گرداب‌ها را با تأثیرگذاری بر گرانشی کاهش می‌دهد. افزایش جز حجمی از ۰٫۲ تا ۰٫۱ برای میکروکانال تک تیغه دما را ۰٫۵۶ درصد افزایش می‌یابد. ولی تأثیر فاصله بین تیغه‌ها، بر دمای متوسط خروجی میکروکانال کم می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: میکروکانال؛ دینامیک سیال‌های محاسباتی؛ انتقال گرما؛ نانو سیال؛ ناسلت.

KEYWORDS: Microchannels; Computational fluid dynamics; Heat transfer; Nanofluid; Nusselt.

مقدمه

میکرومخلوط‌کن‌ها مهم‌ترین جز سامانه‌های میکرو جریان هستند که برای همگن‌سازی واکنشگرها مورد نیاز است [۲]. در سال‌های اخیر در سامانه‌های میکرو جریان به ویژه در دستگاه‌های میکرو الکترونیک به دلیل نسبت سطح به حجم بالا موضوع انتقال گرمای سریع و مؤثر اهمیت زیادی پیدا کرده است. بنابراین

از جمله ویژگی‌های فناوری میکرو جریان‌ها، کاهش هزینه‌ها، پایین آمدن میزان مصرف مواد، امکان تحلیل سریع، بیش‌ترین توانایی عملیاتی در استفاده به صورت موازی از ابزار میکرو جریان‌ها اشاره کرد [۱]. سامانه‌های میکرو جریان شامل میکرو پمپ‌ها، میکروکانال‌ها، میکرو دریچه‌ها و میکرو مخلوط‌کن‌ها می‌باشند.

*عقد دار مکاتبات

+E-mail: hakar@yu.ac.ir

گرانروی دینامیکی نانوسیال انجام شده است [۲۳]. در تعداد چشمگیری از پژوهش‌ها افزایش انتقال گرما با افزایش غلظت نانوذره‌ها به دلیل افزایش هدایت گرمایی نانو سیال گزارش شده است [۲۴، ۲۵].

جریان میکروکانال‌ها، با توجه به سرعت جریان بسیار کم، با عدد رینولدز بسیار پایین مشخص می‌شوند. با توجه به اینکه جریان به طور عمده آرام است، رسیدن به اختلاط مؤثر سیالات، دشوار است. پدیده غالب در اختلاط، مکانیسم نفوذ می‌باشد. از این رو اختلاط میکروسیال‌ها یک مسئله بسیار چالش برانگیز است زیرا نیاز به اختلاط سریع و مؤثر سیال‌ها با نفوذ پایین دارد [۲۶]. در میکرومیکسرهای منفعل، ساختار مانعی شکلی در مسیر میکروکانال قرار داده می‌شود و از طریق تقسیم، کشش، شکستن و تاشو شدن جریان سیال، اثر جابه‌جایی سیال افزایش می‌یابد [۲۷].

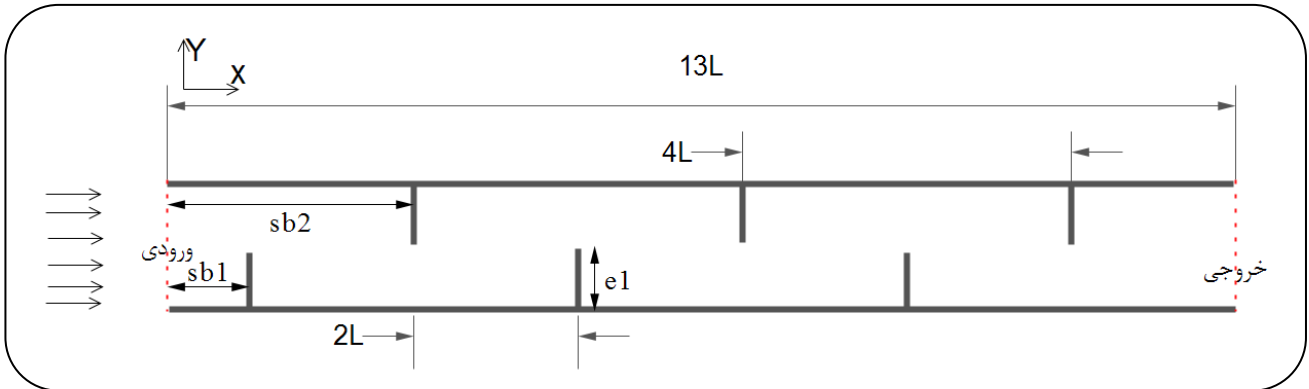
به تازگی، استفاده از نانوسیال [۳۲-۲۸] در میکروکانال‌ها در میان پژوهشگران توجه زیادی را به خود جلب کرده است. چانگ و چوی [۳۳] و چین و هوانگ [۳۴] عملکرد گرمایی جریان نانوسیال در میکروکانال‌ها با نانوسیال‌های گوناگون از جمله آب - مس اکسید و آب - آلومینیم اکسید را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. عملکرد گرمایی در میکروکانال‌ها با استفاده از نانوسیال آب - مس اکسید بر اساس مدل‌های گوناگون برای هدایت گرمایی مؤثر به صورت شبیه سازی عددی توسط لی و همکاران [۳۵] بررسی شده است. در این مطالعه از رژیم جریان بدون لغزش در پژوهش‌های عددی استفاده شده است. ژوان و لی [۲۱] به صورت تجربی انتقال گرمایی جابه‌جایی در رژیم آشفته را در یک جریان تک فاز نانوسیال آب - مس را در لوله ای به قطر داخلی ۱۰ میلی متر و طول ۸۰۰ میلی متر با اعمال شار گرمایی ثابت از روی سطح لوله بررسی کرده است. هان [۳۶] آزمایشی به منظور بررسی اثر شکل زبری کانال در انتقال گرما و ویژگی‌های جریان سیال در لوله مستطیل انجام داده‌اند. یکی از راه‌های افزایش انتقال گرما، تیغه^(۱) می‌باشد. چانگ و همکاران [۳۷] میکرومیکسر منفعل که شامل تیغه‌هایی با آرایش‌های گوناگون را طراحی و ساخته و شبیه سازی کرده‌اند.

اثر تیغه‌ها با توجه به تعداد و فاصله آن و ارتفاع تیغه در میکروکانال‌ها بسیار چشمگیر می‌باشد. به طوری که در پژوهش‌ها همه‌ی این شرایط به طور همزمان بررسی نشده است. هدف این پژوهش، شبیه سازی دو بعدی جریان و انتقال گرمایی

پژوهش‌های زیادی [۶-۳] بر روی انتقال گرما در میکروکانال‌ها متمرکز شده است. یک عامل مهم که در طراحی میکروسیستم‌ها به آن توجه می‌شود میزان توانایی خروج گرما از سامانه با شار بالا است [۷].

ماده سردکننده مایع به طور گسترده برای جلوگیری از گرمایش بیش از حد اجزای الکترونیکی و مدارها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سال‌های اخیر، مدیریت گرمای دستگاه میکروالکترونیک قدرت بالا در فضای و حجم به نسبت کوچک، به یک زمینه پژوهشی برجسته تبدیل شده است. مبادله کننده میکروکانال فشرده یک ابزار مؤثر برای دستیابی به نرخ انتقال گرمایی بالا در این سامانه‌ها به شمار می‌روند [۸-۱۲]. کانال کوچک‌تر به سبب ایجاد سطح به حجم بیشتر، سطح انتقال گرما بیشتر در واحد حجم کانال برای تماس با سیال و همچنین ضریب‌های انتقال گرمایی بالاتری را باعث می‌شوند. اما از سویی کوچک‌تر شدن اندازه‌های کانال سبب افزایش افت فشار می‌شود که پدیده افت فشار به صورت نمایی با قطر هیدرولیک میکروکانال تغییر می‌کند [۱۱]. با این حال، انتقال گرمایی مایع‌های معمولی مانند آب یا اتیلن گلیکول به دلیل ویژگی‌های گرمایی ضعیف، ظرفیت انتقال گرمایی محدودی دارند. لی و همکاران بررسی انتقال گرما را در میکروکانال‌ها با استفاده از مایع‌های معمولی گزارش کرده‌اند [۱۳، ۱۴]. در بیش‌تر پژوهش‌های پیشین [۱۷-۱۵]، سیالاتی با هدایت گرمایی پایین مانند هوا یا آب به منظور مطالعه جریان سیال در میکروکانال‌ها به کار گرفته شده‌اند. انتقال گرمایی جریان سیال محدود به ویژگی‌های گرمایی سیال می‌باشد. با این حال، تقاضا برای افزایش انتقال گرما در میکروکانال‌ها نیازمند بهبود ویژگی‌های گرمایی سیال‌ها می‌باشد. یکی از راه حل‌های ارائه شده برای این مشکل استفاده از نانوسیالاتی با ویژگی هدایت گرمایی بالا مانند Cu و CuO است. در طول دو دهه گذشته، دانشمندان و پژوهشگران تلاش کرده‌اند که نانوسیال‌هایی را توسعه دهند، که می‌توانند کارکرد سرمایشی و گرمایشی بهتری را برای انواع سامانه‌های گرمایی در مقایسه با انتقال گرمایی سیال‌های مرسوم ارائه دهند. تعداد زیادی مطالعه‌های تجربی و نظری [۲۲-۱۸] یافت شده است که نانو سیال‌ها با توانایی و هدایت گرمایی بالا موجب افزایش انتقال گرما می‌شوند. تلاش زیادی برای بررسی هدایت گرمایی مؤثر نانوسیال‌ها و گرانروی دینامیکی مؤثر برای پیش بینی هدایت گرمایی و

(۱) Baffle



شکل ۱- هندسه شبیه‌سازی شده با شش تیغه.

مربوط به درجه گرمای ورودی سیال می‌باشد مورد بررسی قرار گرفته است. با این شرایط معادله‌های حاکم بر فرایند نوشته شده است. فرضیه‌های مدل عبارتند از: جریان به صورت یکنواخت (پایا) و رژیم جریان نانو سیال آرام فرض شده است. جریان سیال ورودی میکروکانال به صورت کاملاً توسعه یافته است. همچنین دما یکنواخت است. معادله پیوستگی، مومنتم در دو بعد (x,y) به صورت بدون بعد عبارتند از [۳۸]:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial X} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re_f} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial X} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re_f} \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (3)$$

که در این جا \vec{u} بردار سرعت (m/s) و ρ چگالی مخلوط سیال مایع و نانوذره (kg/m^3) و p فشار (pa) و μ گرانیوی دینامیکی مخلوط سیال $(kg/m.s)$ می‌باشد. همچنین معادله گرما در میکروکانال به صورت زیر است:

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Re_f Pr_f} \frac{(\rho C_p)_f}{(\rho C_p)_{nf}} \frac{k_{nf}}{k_f} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (4)$$

پارامترهای بدون بعد که در روابط بالا استفاده شده است به صورت $X=x/L$ و $Y=y/L$ و $U=u/u_{in}$ و $V=v/v_{in}$ و $P=p/\rho_f u_{in}^2$ و $\theta=T-T_w/T_{in}-T_w$ پراتنل سیال به $Re_f = \rho_f u_{in} L / \mu_f$ و $Pr_f = \mu_f C_{pf} / k_f$ می‌باشد. معادله‌ها در نرم افزار کامسول به روش المان محدود حل می‌شود. که C_p ظرفیت گرمایی $(kJ/kg.K)$ و T دما (K) و

نانو سیال آب - آلومینیم اکسید در میکروکانال‌ها با استفاده از دینامیک سیال‌های محاسباتی CFD می‌باشد. تأثیر پارامترهای گوناگون هندسی و شرایط جریان از جمله آرایش گوناگون تیغه و ارتفاع و فاصله بین تیغه‌ها و رینولدزجریان و کسر حجمی نانو ذره‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

معادله‌های حاکم

در شکل ۱ پیکربندی هندسی میکروکانال مورد مطالعه نشان داده شده است. میکروکانال با مقطع مربعی $(L \times L)$ شامل دو صفحه موازی با فاصله L و طول $S=13L$ است. تیغه‌ها با ارتفاع e_1 در داخل کانال قرار گرفته است. به ترتیب فاصله تیغه اول و دوم از ابتدا کانال sb_1 و sb_2 می‌باشد. تیغه به صورت آدیاباتیک و با ضخامت صفر در شبیه سازی عددی فرض شده است.

در این پژوهش تأثیر وجود نانو سیال آب - آلومینیم اکسید در انتقال گرمای میکروکانال‌ها بررسی شده است. ساختار و ویژگی‌های ماژول میکروکانال نیز در جدول ۱ آورده شده است. در میکروکانال‌ها که طول مشخصه کانال‌های آن در بازه‌ی میکرومتر است از معادله پیوستگی استفاده می‌شود. سیال در کل فضای مدل پیوسته در نظر گرفته می‌شود. در این مدل، پدیده‌های انتقال توسط مجموعه‌ای از معادله‌های پیوستگی و مومنتم و انرژی قابل توصیف است. پس از حل معادلات، پروفیل‌های سرعت و فشار و دما قابل تعیین هستند. ذره‌ها بسیار ریز (زیر ۱۰۰ نانومتر) و هیچ سرعت لغزشی بین فاز ناپیوسته دارای نانو ذره‌ها و فاز مایع پیوسته نمی‌باشد. مخلوط نانو ذره‌ها - مایع به عنوان مایع خالص تک فاز در نظر گرفته شده است. همچنین، ویژگی‌های فیزیکی نانو سیال ثابت فرض شده است و در حالت مرجع که

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \quad (8)$$

$$1 + 64 \cdot \phi^{0.746} \cdot \left(\frac{d_f}{d_p}\right)^{0.369} \cdot \left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.7476} \cdot Pr_f^{0.985} \cdot Re_f^{1.221}$$

d_f قطر مولکول آب (m) و d_p قطر نانو ذره (m) است. همچنین رینولدز و پرانتل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Pr_f = \frac{\eta}{\rho_f \alpha_f}, \quad Re_f = \frac{\rho_f K_B T}{3 \pi \eta^2 \lambda_f} \quad (9)$$

که K_B ثابت بولتزمن ($K_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$) و λ_f میانگین مسیر آزاد مولکول آب ($\lambda_f = 0.17 \text{ nm}$) است و همچنین η از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = A \times 10^{B/T-C}, \quad A = 2.414 \times 10^{-5} \quad (10)$$

$$B = 247.8, \quad C = 140$$

میزان گرمایی که در سیال در طول لوله از دست می‌دهد برابر میزان گرمایی است که از دیواره‌ها خارج می‌شود. روش محاسبه ضریب انتقال گرما به صورت زیر است:

$$h = \left(\frac{\rho Q C_p (T_{out} - T_{in})}{A (T_{wall} - T)} \right) \quad (11)$$

که Q شدت جریان حجمی مقطع ورودی میکروکانال و A سطح جانبی میکروکانال و T_{in} دمای ورودی کانال و T_{out} دمای خروجی کانال و T_{wall} دمای دیواره است. عدد بی‌عد ناسلت در نزدیک دیواره‌های میکروکانال شبیه سازی شده به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\text{عدد ناسلت} = \frac{hL}{k_f} = \frac{q_w L}{(T_w - T_b) k_f} \quad (12)$$

در این پژوهش از نانو سیال آب و ذره‌های ۳۶ نانومتری Al_2O_3 استفاده شده است. برخی از ویژگی‌های فیزیکی نانو سیال برای استفاده در معادله‌های یاد شده در جدول ۲ نشان داده شده است. قطر نانو ذره‌ها از ۲۰ تا ۱۰۰ نانومتر می‌باشد [۱۹]. دمای توده سیال به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$T_b = \frac{\int_{A_c} \rho u T dA_c}{\int_{A_c} \rho u dA_c} \quad (13)$$

جدول ۱- ویژگی‌های هندسه میکروکانال شش تیغه مدل‌سازی شده.

ویژگی‌ها	اندازه
طول کانال	۱۳L
مقطع ورودی کانال	L
فاصله ورودی کانال تا تیغه اول	sb1=L
فاصله ورودی کانال تا تیغه دوم	sb2=۳L
فاصله تیغه‌ها از هم	۲L
ارتفاع تیغه‌ها	e1=0.66L

جدول ۲- ویژگی‌های ترموفیزیکی نانوذره‌ها و سیال پایه در دمای ۲۷ سلسیوس [۴۱].

ویژگی‌ها	آب	(Al_2O_3) نانو ذره
چگالی (kg/m^3)	۹۹۸.۲	۳۸۹۰
ظرفیت حرارتی ($J/kg \cdot K$)	۴۲۴۰	۸۸۰
هدایت حرارتی (W/mK)	۰.۶۰۸	۳۵

k هدایت گرمایی سیال ($W/m.K$) است. به منظور محاسبه چگالی و ظرفیت گرمایی نانو سیال آب - اکسید آلومینیوم از رابطه‌های زیر استفاده می‌شود [۳۹]:

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (5)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p \quad (6)$$

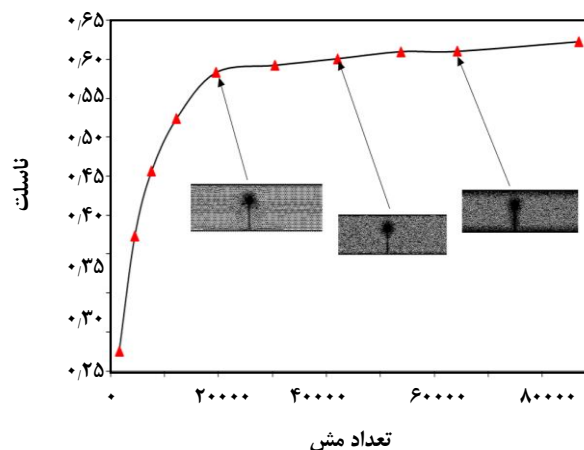
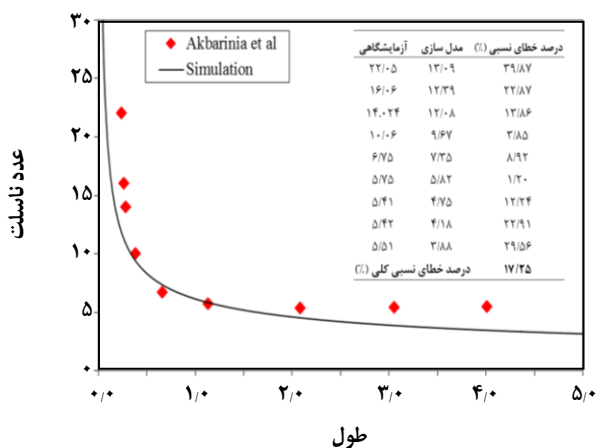
که در این جا ρ_{nf} چگالی نانو سیال آب - اکسید آلومینیوم و ρ_f چگالی آب و ρ_p چگالی نانو ذره Al_2O_3 و ϕ جز حجمی نانو ذره است. برای محاسبه نسبت گرانروی آب و نانو سیال آلومینیوم اکسید از معادله زیر استفاده می‌شود این گرانروی دینامیکی بر اساس نتیجه‌های تجربی مایگا و همکاران [۳۹] برای آب و Al_2O_3 تعیین شده است.

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5\phi + 15.0\phi^2)\mu_f \quad (7)$$

که در اینجا μ_{nf} ویسکوزیته نانو سیال آب ($kg/m.s$) و Al_2O_3 و μ_f گرانروی آب ($kg/m.s$) است. هدایت گرمایی نانو سیال آب و Al_2O_3 توسط چون و همکاران [۴۰] تعیین شده است. که این معادله اثر حرکت براونی و قطر متوسط نانوذره‌ها را در نظر گرفته است که به صورت زیر است:

جدول ۳- شرایط مرزی مدل برای معادله مومنتم و معادله گرما.

شرایط مرزی	معادله مومنتم	معادله گرما
شرط مرزی ورودی	$U=U_0$	$T=T_0$
شرط مرزی خروجی	$P=P_{ref}$	$-nq=0$
شرایط مرزی دیواره	$U=0$	$-nq=0$



شکل ۳- مقایسه‌ی بین مدل و داده‌های آزمایشگاهی اکبری‌نیا و همکاران [۴۱].

شکل ۲- تأثیر اثر تعداد سلول‌ها بر عدد بی بعد ناسلت رد میکروکانال در $Re=10$.

برای رسیدن به دقت کافی در اطراف کانال و تیغه از یک توزیع مش ریزتر استفاده شده است. برای حذف تأثیر سلول‌های شبکه بر روی نتیجه‌ها بررسی شده است. در شکل ۲ اثر تعداد مش‌ها بر میزان عدد ناسلت متوسط دیواره نشان داده شده است. برای استقلال نتیجه‌ها از شبکه‌بندی میکروکانال، تعداد ۸۴۰۰۰ سلول انتخاب شده است.

برای صحت‌سنجی انتقال گرمای عدد بی بعد ناسلت محلی جریان نانو سیال آب - آلومینیوم اکسید با عدد رینولدز ۶/۹ و $\phi = 5\%$ محاسبه شده و نتیجه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است که با داده‌های آزمایشگاهی اکبری‌نیا و همکاران [۴۱] تطابق خوبی دارد و درصد خطای نسبی مدل و داده‌های آزمایشگاهی در درون شکل محاسبه شده است. پس انتظار می‌رود مدل انتخاب شده برای مسئله مناسب باشد.

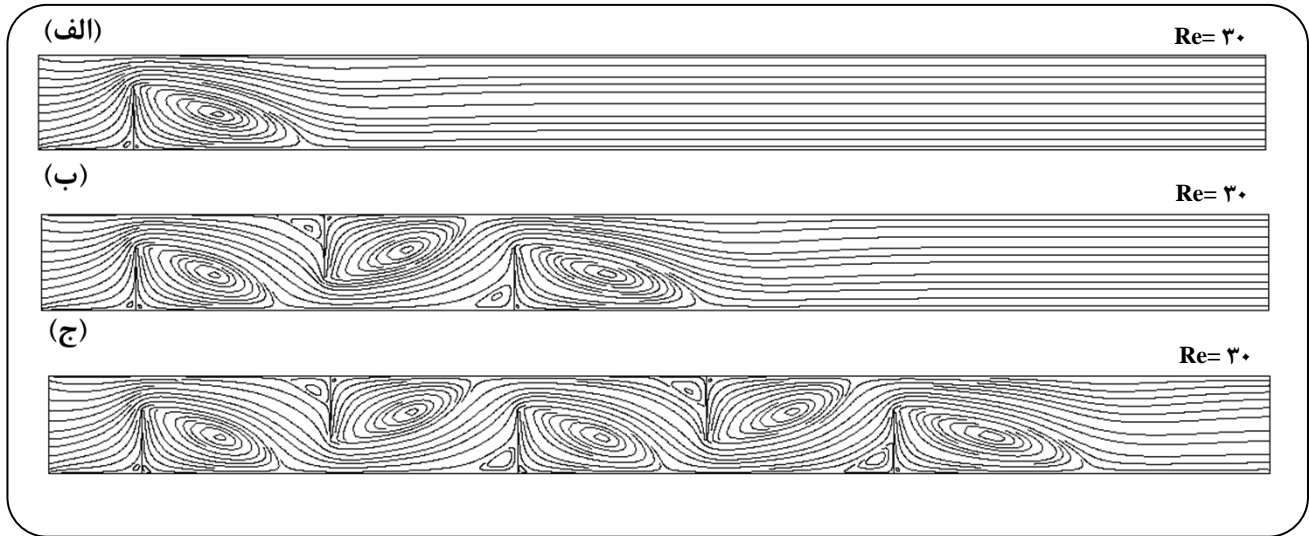
تأثیر تعداد تیغه

تأثیر تعداد تیغه‌ها بر الگوی جریان در عدد رینولدز ۳۰ در شکل ۴ نشان داده شده است. وجود تیغه سبب ایجاد منطقه چرخش جریان

برای میکروکانال شرایط مرزی معادله‌های مومنتم و گرما در جدول ۳ مشخص شده است. شرایط اولیه شامل دمای سیال ورودی ۲۱ درجه سلسیوس (۲۹۴/۱۵ کلوین) و دمای بدنه کانال ۵۷ درجه سلسیوس (۳۳۰ کلوین) و برای صحت‌سنجی عدد رینولدز ۶/۹ و $\phi = 5\%$ می‌باشد.

نتیجه‌ها و بحث

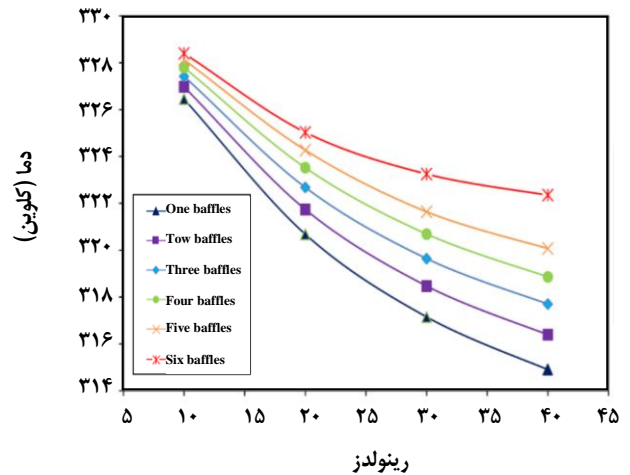
مجموعه معادله‌های پیوستگی و مومنتم و گرما به روش المان محدود حل می‌شود. برای شبکه بندی میکروکانال شبیه سازی شده از المان مثلثی استفاده شده است. برای بهبود دقت حل معادله‌های توزیع مش در نزدیک دیواره جامد - سیال افزایش یافته است. حل عددی به کمک نرم افزار Comsol Multiphysics 5.0 انجام گرفته است. حل معادله‌های حاکم در گره‌های داخلی هر سلول صورت گرفته است. دقت شبیه سازی عددی تابع تعداد سلول‌های موجود در شبکه می‌باشد. به طوری که با افزایش تعداد سلول‌ها دقت محاسبه‌های عددی افزایش می‌یابد. اما قیمت مورد نیاز و زمان محاسبه نیز افزایش می‌یابد. در این محاسبه‌ها



شکل ۴- الگوی جریان در میکروکانال یک تیغه (الف) و سه تیغه (ب) و شش تیغه (ج) در رینولدز ۳۰.

پایین زمان اقامت سیال در کنار دیواره بیشتر می‌شود و تبادل گرمایی بهتری می‌تواند انجام دهد و در نتیجه آن، دما افزایش می‌یابد با توجه به ساختار میکروکانال با افزایش تیغه‌ها دمای خروجی بیشتر می‌شود چون افزایش تیغه‌ها موجب ایجاد خطوط جریان فشرده در لبه تیغه و جریان چرخشی بیشتر در پایین دست جریان می‌شود هر چه تعداد این تیغه‌ها بیشتر باشد اغتشاش بیشتر در مسیر جریان دیده می‌شود و این امر سبب افزایش ضریب انتقال گرما می‌شود به طوری که در رینولدز ۴۰، دمای خروجی سیال در میکروکانال شش تیغه ۳۲۲/۳۵ کلین می‌باشد. همچنین تأثیر افزایش تعداد تیغه‌ها در رینولدز بالاتر چشمگیرتر است. چون در رینولدز بالاتر در میکروکانالی که دارای تیغه بیشتر خطوط جریان بهم نزدیک‌تر و جریان چرخشی بزرگ‌تری شکل می‌گیرد.

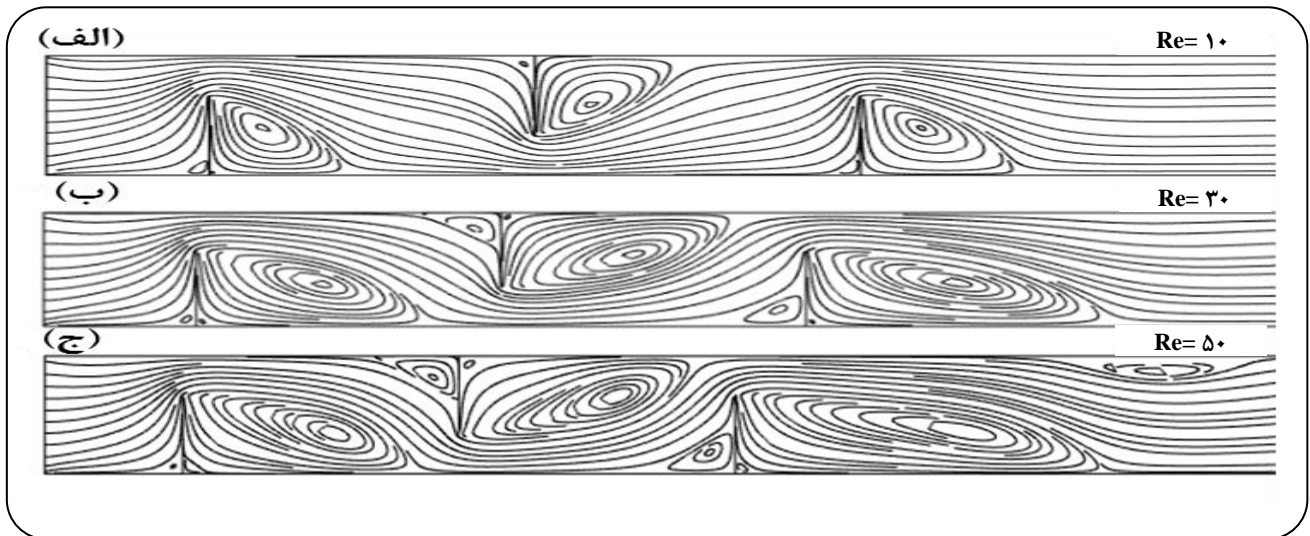
با افزایش عدد رینولدز سرعت نانو سیال در لبه تیغه به شدت زیاد می‌شود و همچنین اندازه مناطق چرخش جریان در پشت تیغه گسترش می‌یابد و این اثر در تیغه‌های پایین دست تیغه مشهود تر می‌باشد. به طوری که گرادیانهای بزرگ‌تر، جریان نانو سیال را بیشتر به سمت دیواره‌ها هل می‌دهند. همان‌گونه که در شکل ۶ (الف) تا (ج) نشان داده است در رینولدز پایین، منطقه چرخش کوچک‌تر و الگوی جریان یکنواخت‌تر می‌شود و خطوط جریان تراکم کمتر نسبت به جریان با رینولدز بالا دارند. روشن است که حضور تیغه‌ها، عدد ناسلت و در پی آن ضریب انتقال گرما و افت فشار (ضریب اصطکاک) را افزایش می‌دهد.



شکل ۵ - دمای متوسط خروجی میکروکانال با رینولدزهای گوناگون در تعداد تیغه‌های متفاوت.

در پایین دست تیغه می‌شود. همان‌گونه که دیده می‌شود از شکل ۴ (الف) تا (ج) افزایش تعداد تیغه موجب افزایش تعداد مناطق چرخش جریان شده است.

تأثیر تیغه‌ها بر الگوی جریان برای اعداد گوناگون رینولدز در شکل ۵ نشان داده شده است. به طوری که با افزایش عدد رینولدز دمای متوسط خروجی نانو سیال آب - آلومینیوم اکسید کاهش می‌یابد. برای میکروکانال تک تیغه در رینولدز ۱۰ میزان دمای خروجی میکروکانال ۳۲۶/۴۵ کلین است و در رینولدز ۴۰ میزان دمای خروجی میکروکانال ۳۱۴/۹ کلین است. چون در سرعت

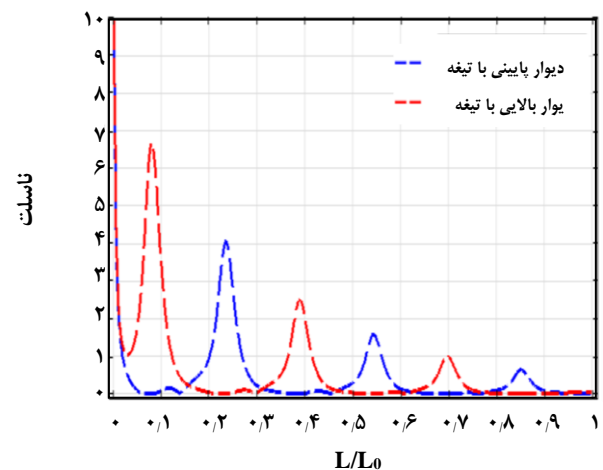


شکل ۶ - الگوی جریان در میکروکانال سه تیغه در رینولدز ۱۰ (الف) و رینولدز ۳۰ (ب) و رینولدز ۵۰ (ج).

در فاصله $3L$ ورودی قرار دارد جریان را به سمت پایین خم می‌کند و سرعت سیال افزایش می‌یابد برآیند اثرها موجب می‌شود تا ضریب انتقال گرما جابه‌جایی و به دنبال آن عدد ناسلت در نزدیکی دیواره بیشینه می‌شود چون اختلاف دمای سیال با محیط به دلیل تبادل گرما کم می‌شود عدد ناسلت در تیغه دوم کم‌تر از تیغه اول می‌باشد. برای تیغه‌های سوم تا ششم به همین صورت می‌باشد.

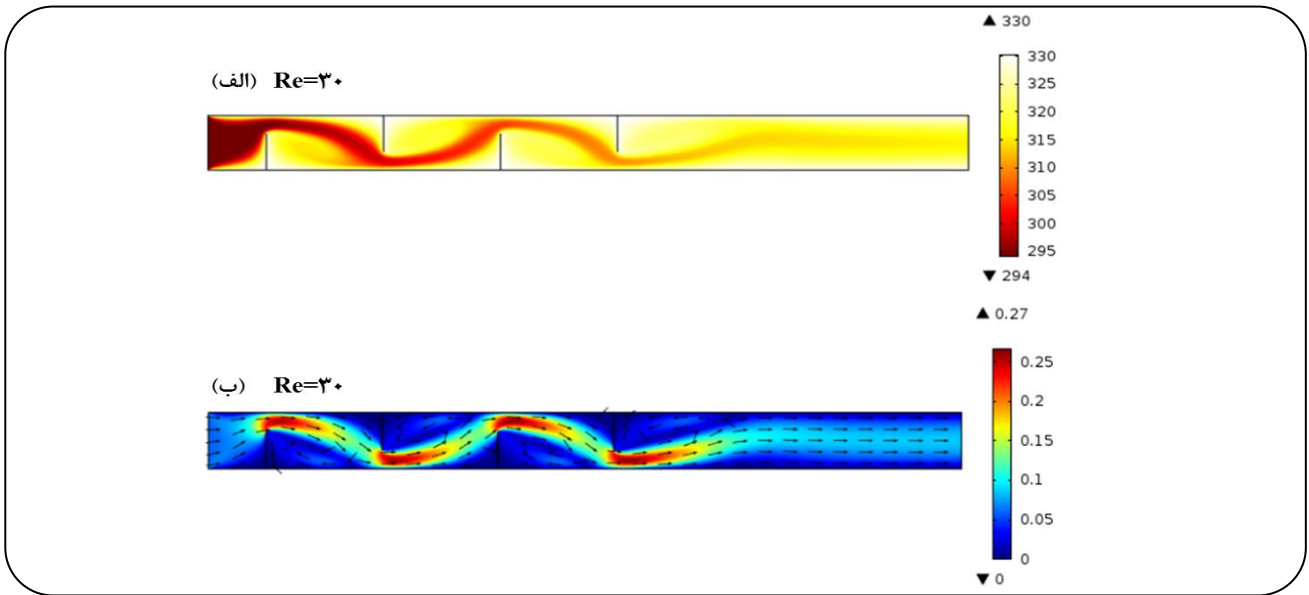
توزیع دما میکروکانال به تعداد تیغه‌ها وابسته است وقتی تعداد تیغه‌ها افزایش داده می‌شود گرمای دیواره‌ها بیش‌تر توسط نانو سیال آب - آلومینیوم اکسید جذب می‌شود. پروفایل توزیع دما و سرعت در میکروکانال چهار تیغه با رینولدز ۳۰ در شکل ۸ (الف) و (ب) نشان داده شده است. متوسط دمای خروجی سیال به 32.69 کلوین رسیده است.

واضح است که حضور تیغه‌ها ضریب اصطکاک را افزایش می‌دهد. این پدیده موجب افزایش افت فشار در طول کانال می‌شود. به طوری که در رینولدز ۵۰ افت فشار میکروکانال شش تیغه نسبت به میکروکانال سه تیغه 56.75 درصد و در رینولدز ۳۰ افت فشار میکروکانال شش تیغه نسبت به میکروکانال سه تیغه 80.64 درصد افزایش پیدا کرده است. در رینولدز پایین حضور تیغه‌ها سبب تغییرهای افت فشار بیش‌تری می‌شود. نتیجه‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است. در کانال شش تیغه با افزایش رینولدز ۱۰ به ۵۰ میزان ناسلت از 38.43 به 580.26 می‌رسد که حدود ۱۵ برابر شده است.

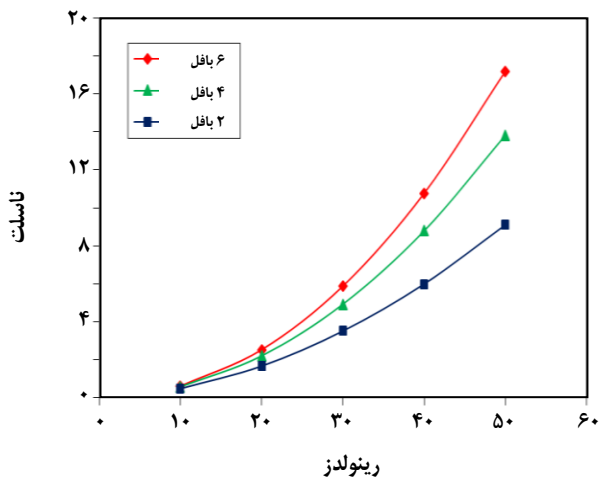


شکل ۷ - عدد ناسلت در طول کانال در نزدیک دیواره بالایی و پایینی در میکروکانال شش تیغه در رینولدز ۱۰.

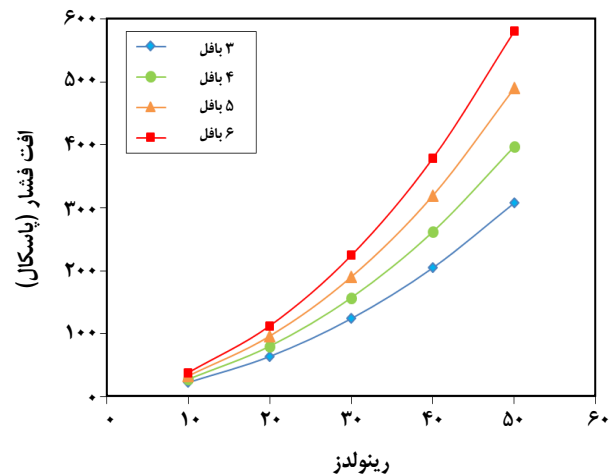
همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده است. افزایش ضریب انتقال گرما موجب افزایش عدد ناسلت می‌شود. به دلیل گرادیان بالای دمایی در ورودی میکروکانال، عدد ناسلت بیش‌ترین میزان است و در جهت جریان کاهش می‌یابد. اولین تیغه که در فاصله L از ورودی قرار دارد سبب خم شدن جریان به سمت بالا می‌شود که موجب افزایش سرعت جریان می‌شود و در معادله‌های (۱۲) و (۱۳) با توجه به افزایش سرعت سیال و اختلاف دمای زیاد دمای ورودی با دیواره ضریب انتقال گرما جابه‌جایی و دنبال آن عدد ناسلت در نزدیکی دیواره بیشینه می‌شود و در تیغه دوم که



شکل ۸ - پروفیل توزیع دما (الف) و سرعت (ب) در میکروکانال چهار تیغه با رینولدز ۳۰



شکل ۱۰ - ناسلت متوسط با رینولدزهای گوناگون در تعداد تیغه‌های متفاوت.



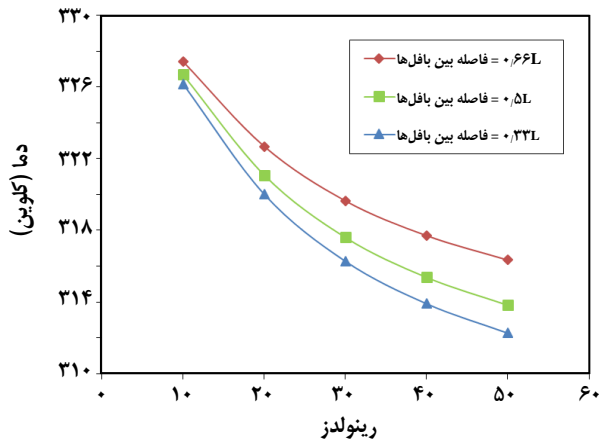
شکل ۹ - افت فشار در طول میکروکانال با رینولدزهای گوناگون در تعداد تیغه‌های متفاوت.

تعداد تیغه‌ها اثر گذاری چشمگیری در میزان افزایش عدد ناسلت دارد. برا میکرو مانال شش تیغه با توجه به تغییرهای افت فشار (۱۵ برابر) میزان تغییرهای ناسلت (۲۸ برابر) بیش تر می‌باشد.

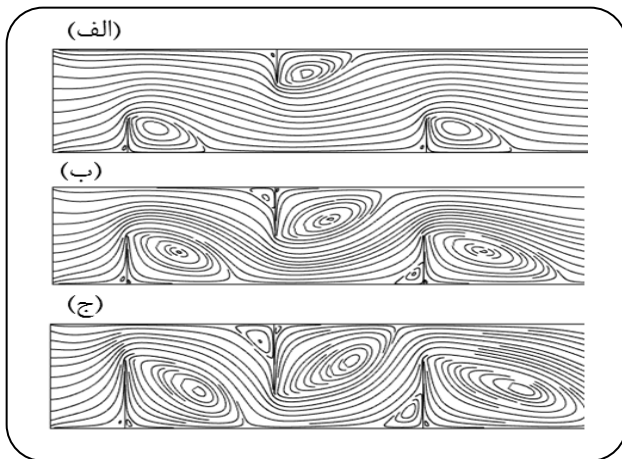
تأثیر ارتفاع تیغه

برای بررسی اثر ارتفاع تیغه‌ها، پیکربندی میکروکانال شامل مکان تیغه ها ثابت فرض شده است. همان گونه که در شکل ۱۱ نشان داده است با افزایش ارتفاع تیغه ناسلت و در پی آن ضریب انتقال گرما افزایش می‌یابد که موجب می‌شود دمای خروجی

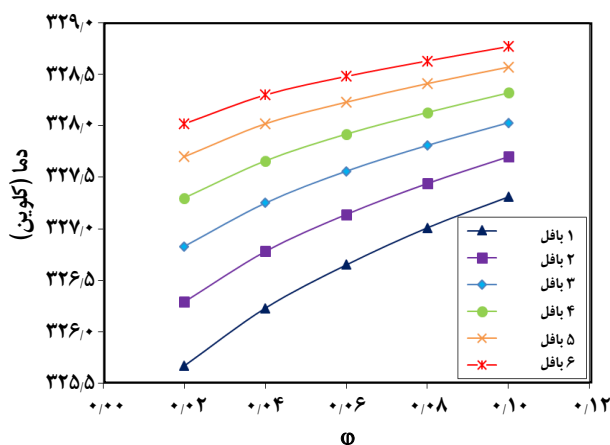
عدد ناسلت پارامتر بی بعد مهمی است که بیانگر نسبت انتقال گرمای جابه‌جایی درون یک سیال را به انتقال گرمای هدایت است که در انتقال گرمای جابه‌جایی مؤثر مورد بررسی قرار می‌دهد. در این پژوهش عدد بی بعد ناسلت متوسط را در کنار دیواره میکروکانال محاسبه شده است. تغییرهای عدد ناسلت بی‌بعد متوسط بر حسب رینولدز در میکروکانال‌های شش و چهار و دو تیغه در شکل ۱۰ نشان داده است. در کانال شش تیغه با افزایش رینولدز ۱۰ به ۵۰ میزان ناسلت از ۰/۶۱ به ۱۷/۱۹ می‌رسد که حدود ۲۸ برابر شده است. همان گونه که دیده می‌شود افزایش



شکل ۱۱ - دمای متوسط خروجی میکروکانال سه تیغه با رینولدزهای گوناگون در ارتفاع متفاوت تیغه‌ها.



شکل ۱۲ - الگوی جریان در میکروکانال سه تیغه در ارتفاع تیغه ۰٫۳۳L (الف) و ۰٫۵L (ب) و ۰٫۶۶L (ج).



شکل ۱۳ - دمای متوسط خروجی میکروکانال با جزء حجمی نانو ذره-های گوناگون در تعداد تیغه‌های متفاوت در $Re=10$.

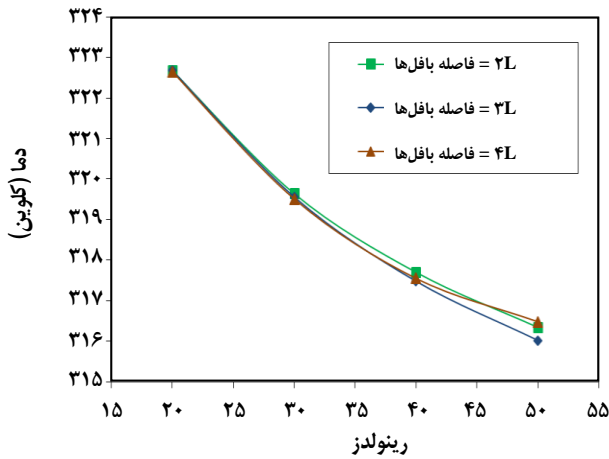
نانو سیال افزایش یابد. همان‌گونه که در شکل نشان داده است. با افزایش عدد رینولدز میزان دما خروجی کاهش می‌یابد به دلیل کاهش زمان اقامت سیال در کنار دیواره و فرصت کمتر آن برای تبادل گرما با دیواره است. به طوری‌که در میکروکانال سه تیغه با تیغه به ارتفاع ۰٫۵ L و در رینولدز ۱۰ دما متوسط خروجی نانو سیال آب Al_2O_3 ، ۳۲۶٫۶۸ کلوین و در رینولدز ۲۰، ۳۲۱٫۰۸ کلوین است. در رینولدز ۳۰، با تیغه به ارتفاع ۰٫۳۳ L دمای خروجی میکروکانال ۳۱۶٫۲۷ کلوین و در تیغه به ارتفاع ۰٫۶۶ L، ۳۱۹٫۶۴ کلوین است. در رینولدز ۵۰ دمای خروجی متوسط در تیغه به ارتفاع ۰٫۶۶ L نسبت به تیغه با ارتفاع ۰٫۳۳ L مقدار ۰٫۳۲ درصد افزایش می‌یابد.

با افزایش ارتفاع تیغه وسعت منطقه چرخش افزایش می‌یابد که افزایش وسعت گرداب‌ها موجب افزایش انتقال گرما می‌شود. این تغییرها در شکل ۱۲(الف) تا (ج) نشان داده است.

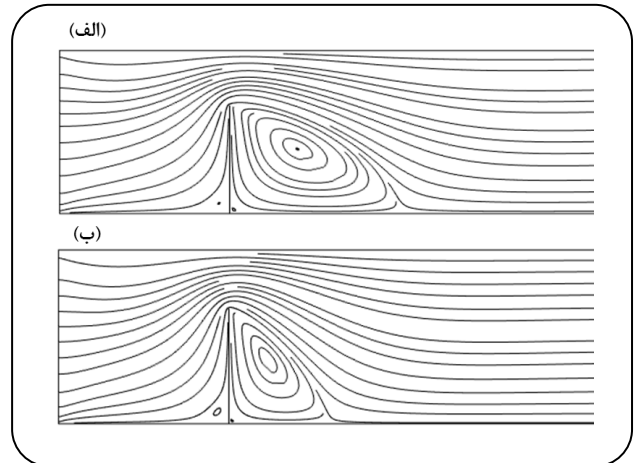
تأثیر جز حجمی نانو ذره‌ها

همان‌گونه که در شکل ۱۳ دیده می‌شود با افزایش جز حجمی نانو ذره میزان متوسط دمای خروجی میکروکانال افزایش می‌یابد. افزودن نانو ذره‌ها سبب افزایش چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه نانو سیال می‌شود. با توجه به معادله (۱۲) میزان ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی که تابعی از چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه است، بنابراین ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی موجب افزایش می‌یابد. افزایش ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی موجب افزایش تبادل گرما با دیواره‌های میکروکانال می‌شود که این پدیده علت افزایش دمای خروجی از میکروکانال می‌باشد. تأثیر افزودن نانو ذره‌ها در میکروکانال تک تیغه بیشتر از میکرو کانال شش تیغه می‌باشد. به طوری که در جز حجمی ۰٫۰۶، دمای متوسط خروجی نانو سیال در میکروکانال تک تیغه، ۳۲۶٫۶۵ کلوین و در میکروکانال شش تیغه، ۳۲۸٫۴۸ کلوین می‌باشد. برای کانال تک تیغه دما از جزء حجمی ۰٫۰۲ به ۰٫۱ تغییرهای دما بر حسب کلوین حدود ۰٫۵۶ درصد افزایش یافت.

گرانروی سیال با افزایش جز حجمی نانو ذره‌ها افزایش می‌یابد و همچنین افزایش گرانروی مقاومت سیال را در برابر نیروی تنش برشی افزایش می‌دهد. به بیان افزایش گرانروی سیال گردابه‌های با وسعت منطقه چرخش کمتر را می‌تواند ایجاد کند. در فرمول ۶ رابطه جز حجمی نانو ذره با گرانروی نانو سیال ذکر شده است. الگو جریان در دو جز حجمی ۰٫۰۲ و ۰٫۱ نانو ذره در شکل ۱۴، این پدیده کاهش منطقه چرخش را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- تأثیر رینولدز در دمای خروجی میکروکانال سه تیغه با فاصله بافل گوناگون.



شکل ۱۴- الگوی جریان در میکروکانال تک تیغه در در جز حجمی ۰/۰۲ (الف) و جز حجمی ۰/۱ (ب).

فاصله بین تیغه‌ها و رینولدز جریان و جزء حجمی نانو ذره بر ویژگی‌های گرمایی نانو سیال و پروفیل دمایی میکروکانال می‌باشد. حل معادله‌های حاکم به روش المان محدود با کمک نرم افزار Comsol Multiphysics 5.0 انجام گرفته است. پس از استقلال مش پارامترهای ناسلت، صحت سنجی مدل با داده‌های آزمایشگاهی تطابق خوبی را نشان می‌دهد. با افزایش تعداد تیغه‌ها موجب افزایش تعداد مناطق چرخش جریان شده است که سبب تبادل گرمایی بهتر سیال با دیواره کانال می‌شود. به طوری که در رینولدز ۴۰ دما خروجی سیال در میکروکانال شش تیغه ۳۲۲/۳۵ کلوین و در میکروکانال یک تیغه ۳۱۴/۹ کلوین می‌باشد. افزایش عدد رینولدز موجب افزایش دمای خروجی میکروکانال می‌شود. با افزایش تعداد تیغه‌ها افت فشار در میکروکانال افزایش می‌یابد در میکروکانال شش تیغه با افزایش عدد رینولدز از ۱۰ تا ۵۰ میزان افت فشار ۱۵ برابر می‌شود. از سوی دیگر تعداد تیغه‌ها بر روی عدد ناسلت متوسط اثر افزایش دارد از این رو در میکروکانال شش تیغه با افزایش عدد رینولدز از ۱۰ به ۵۰ میزان و میزان ناسلت متوسط ۲۸ برابر می‌شود. همین طور با افزایش ارتفاع تیغه گستره منطقه چرخش جریان افزایش یافته که افزایش وسعت گرداب‌ها موجب افزایش انتقال گرما می‌شود. همچنین افزایش جز حجمی نانو ذره، میزان متوسط دمای خروجی میکروکانال افزایش می‌هد. ولی تأثیر فاصله بین تیغه‌ها، بر دمای متوسط خروجی میکروکانال کم می‌باشد.

تأثیر فاصله بین تیغه‌ها

همان‌گونه که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود تأثیر فاصله بین تیغه‌ها، بر دمای متوسط خروجی میکروکانال کم می‌باشد. ولی در رینولدز ۵۰ تیغه‌ها با فاصله ۴L نسبت به تیغه‌ها با فاصله ۳L و ۲L دمای متوسط خروجی افزایش یافته است که نشان دهنده انتقال گرمایی بهتر دیواره با نانو سیال می‌باشد. همان‌گونه که دیده می‌شود در رینولدز زیر ۴۰ فاصله تیغه‌ها عامل بسیار کم تأثیر می‌باشد. به طور کل، حضور تیغه‌ها موجب تشکیل گردابه در پایین دست آن می‌شود و به دلیل مقطع کم میکروکانال زمان زیادی را برای یکنواخت شدن جریان نیاز است. به همین دلیل وقتی جریان به تیغه بعدی می‌رسد هنوز اثرهای چرخش گردابه‌های پیشین را دارد. حتی فاصله ۴L این اثرها را کم نمی‌کند اما در رینولدز ۵۰ انتقال گرما برای تیغه‌ها به فاصله ۴L، ۳L و ۲L بهتر اتفاق می‌افتد. در رینولدز ۵۰ در تیغه‌های ۴L فرصت تشکیل گردابه‌های کامل را می‌دهد اما در ۳L و ۲L به دلیل فاصله بسیار اندک تیغه‌ها ادی‌ها کامل تشکیل نشده و امتداد ادی به تیغه بعدی رسیده و به خوبی امکان تماس با دیواره را فراهم نمی‌آورد.

نتیجه گیری

در مطالعه حاضر، شبیه سازی دو بعدی CFD نانو سیال آب - آلومینیوم اکسید در میکروکانال برای بررسی تأثیر ارتفاع تیغه و

فهرست نمادها

η	گرانروی، Pa.s		
Φ	جزء حجمی	C_p	ظرفیت گرمایی، J/kg K
λ	طول مسیر آزاد متوسط، m	d	قطر، m
ρ	چگالی، kg/m^3	h	ضریب انتقال گرما، W/m^2K
b	توده	k	هدایت گرمایی، $W/m K$
f	سیال اصلی	k_B	ثابت بولتزمن
In	ورودی	Nu	عدد بی بعد ناسلت
nf	نانوسیال	u	سرعت سیال، m/s
Out	خروجی	q''	فلاکس، W/m^2
w	دیوار	p	فشار، Pa
		Re	عدد رینولدز
		T	دما، K
		x	فاصله در طول محور، m

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۴/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۹/۱

مراجع

- [1] Sudarsan A.P., "Multivortex Micromixing: Novel Techniques Using Dean Flows for Passive Microfluidic Mixing", PhD Dissertation, Texas A&M University, (2006).
- [2] Ansari M.A, Kim K.Y., Anwar K., Kim S.M., A Novel Passive Micromixer Based on Unbalanced Splits and Collisions of Fluid Streams, *J Micromechanics Microengineering*, **20**(5):55007 (2010).
- [3] Sohel M.R., Saidur R., Sabri M.F.M., Kamalisarvestani M., Elias M.M., Ijam A., Investigating the Heat Transfer Performance and Thermophysical Properties of Nanofluids in a Circular Micro-Channel, *Int Commun Heat Mass Transf*, **42**:75-81 (2013).
- [4] Kim S.-M., Mudawar I., Review of Databases and Predictive Methods for Heat Transfer in Condensing and Boiling Mini/Micro-Channel Flows, *Int. J. Heat. Mass. Transf.*, **77**:627–52 (2014).
- [5] Dehghan M., Mahmoudi Y., Valipour M.S., Saedodin S., Combined Conduction–Convection–Radiation Heat Transfer of Slip Flow Inside a Micro-Channel Filled with a Porous Material, *Transp. Porous Media*, **108**(2):413–36 (2015).
- [6] Keepaiboon C., Wongwises S., Two-Phase Flow Patterns and Heat Transfer Characteristics of R134a Refrigerant During Flow Boiling in a Single Rectangular Micro-Channel, *Exp. Therm. Fluid. Sci.*, **66**:36–45 (2015).
- [7] Gamrat G., Favre-Marinet M., Asendrych D., Conduction and Entrance Effects on Laminar Liquid Flow and Heat Transfer in Rectangular Microchannels, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **48**(14):2943–54 (2005).

- [8] Bar-Cohen A., [Gen-3 Thermal Management Technology: Role of Microchannels and Nanostructures in an Embedded Cooling Paradigm](#), *J. Nanotechnol. Eng. Med.*, **4**(2):20907 (2013).
- [9] Colgan E.G., Furman B., Gaynes M., Graham W.S., LaBianca N.C., Magerlein J.H., Polastre R.J., Rothwell M.B., Bezama R.J., Choudhary R., Marston K.C., Toy H., Wakil J., Aziz J.A., Schmidt R.R., [A Practical Implementation of Silicon Microchannel Coolers for High Power Chips](#), *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, **30**(2): 218-225 (2007).
- [10] Lee J., Mudawar I., [Low-Temperature Two-Phase Microchannel Cooling for High-Heat-Flux Thermal Management of Defense Electronics](#), *Components Packag Technol. IEEE Trans.*, **32**(2):453-65 (2009).
- [11] Solovitz S.A., Stevanovic L.D., Beaupre R.A. [Micro-Channel Thermal Management of High Power Devices](#), "Appl Power Electron Conf. Expo. 2006 APEC '06 Twenty-First Annu. IEEE", 7 pp. (2006).
- [12] Tuckerman D.B., Pease R.F.W., [High-Performance Heat Sinking for VLSI](#), *Electron Device Lett. IEEE*, **2**(5):126-9 (1981).
- [13] Lee P.-S., Garimella S. V, Liu D., [Investigation of Heat Transfer in Rectangular Microchannels](#), *Int. J. Heat Mass. Transf.*, **48**(9):1688-704 (2005).
- [14] Qu W., Mala G.M., Li D., [Heat Transfer for Water Flow in Trapezoidal Silicon Microchannels](#), *Int. J. Heat Mass Transf.*, **43**(21):3925-36 (2000).
- [15] Qu W., Mudawar I. [Experimental and Numerical Study of Pressure Drop and Heat Transfer in a Single-Phase Micro-Channel Heat Sink](#), *Int. J. Heat Mass Transf.*, **45**(12):2549-65 (2002).
- [16] Lelea D., Nishio S., Takano K. [The Experimental Research on Microtube Heat Transfer and Fluid Flow of Distilled Water](#), *Int. J. Heat Mass Transf.*, **47**(12):2817-30 (2004).
- [17] Naphon P., Khonseur O. [Study on the Convective Heat Transfer and Pressure Drop in the Micro-Channel Heat Sink](#), *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, **36**(1):39-44 (2009).
- [18] Akbarinia A., Behzadmehr A. [Numerical study of Laminar Mixed Convection of a Nanofluid in Horizontal Curved Tubes](#), *Appl. Therm. Eng.*, **27**(8-9):1327-37 (2007).
- [19] Akbarinia A., Laur R., [Investigating the Diameter of Solid Particles Effects on a Laminar Nanofluid Flow in a Curved Tube Using a Two Phase Approach](#), *Int. J. Heat Fluid Flow.*, **30**(4):706-14 (2009).
- [20] Pak B.C., Cho Y.I. [Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron metallic Oxide Particles](#), *Exp. Heat Transf.*, **11**(2):151-70 (1998).
- [21] Xuan Y., Li Q. [Investigation on Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids](#), *J. Heat Transfer.*, **125**(1):151-5 (2003).

[۲۲] نوعی؛ سید حسن، حریری دیبا؛ فرزانه، نوعی؛ سید مصطفی، حسینقلی‌زاده؛ نجمه، زینالی هریس؛ سعید، بررسی تجربی و عملکرد نانو سیال مس اکسید - استون بر بازده گرمایی یک ترمو سیفون دو فاز بسته،

نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳)۳۲: ۳۱ الی ۳۸ (۱۳۹۲).

- [23] Murshed S.M.S., Leong K.C., Yang C., [Thermophysical and Electrokinetic Properties of Nanofluids - A Critical Review](#), *Appl. Therm. Eng.*, **28**(17–18):2109-25 (2008).
- [24] Akbarinia A. [Impacts of Nanofluid Flow on Skin Friction Factor and Nusselt Number in Curved Tubes with Constant Mass Flow](#), *Int. J. Heat Fluid Flow.*, **29**(1):229-41 (2008).
- [25] Nguyen C.T., Desgranges F., Galanis N., Roy G., Maré T., Boucher S., Angue Mintsa H., [Viscosity Data for Al₂O₃–Water Nanofluid—Hysteresis: is Heat Transfer Enhancement Using Nanofluids Reliable?](#), *Int. J. Therm. Sci.*, **47**(2):103–11 (2008).
- [26] Hsieh C.Y., Yang A.S., [Mixing Enhancement of a Passive Micromixer by Applying Boundary Protrusion Structures](#), *Adv. Mater. Res.*, **74**:77–80 (2009).
- [27] Wu N.-T.N., Z. [Micromixers—A Review.](#), *J. Micromechanics Microengineering*, **15**(2):R1 (2005).
- [28] Hosseinzadeh F., Sarhaddi F., Kalhori D.M., [Numerical Investigation of the Nanoparticle Volume Fraction Effect on the Flow, Heat Transfer, and Entropy Generation of the Fe₃O₄ Ferrofluid under a Non-Uniform Magnetic Field](#), *Strojniški Vestnik-Journal Mech. Eng.*, **62**(9):521–33 (2016).
- [29] Sheikholeslami M., Gorji-Bandpy M., Ganji D.D., [Numerical Investigation of MHD Effects on Al₂O₃–Water Nanofluid Flow and Heat Transfer in a Semi-Annulus Enclosure Using LBM](#), *Energy*, **60**:501–10 (2013).
- [30] Hatami M., Ganji D.D. [Thermal and Flow Analysis of Microchannel Heat Sink \(MCHS\) Cooled by Cu–Water Nanofluid Using Porous Media Approach and Least Square Method](#), *Energy Convers. Manag.*, **78**:347–58 (2014).
- [31] Sheikholeslami M., Gorji-Bandpy M., Vajravelu K., [Lattice Boltzmann Simulation of Magnetohydrodynamic Natural Convection Heat Transfer of Al₂O₃–Water Nanofluid in a Horizontal Cylindrical Enclosure with an Inner Triangular Cylinder](#), *Int. J. Heat Mass Transf.*, **80**:16–25 (2015).
- [32] Chabi A.R., Zarrinabadi S., Peyghambarzadeh S.M., Hashemabadi S.H., Salimi M., [Local Convective Heat Transfer Coefficient and Friction Factor of CuO/Water Nanofluid in a Microchannel Heat Sink](#), *Heat Mass Transf.*, 1–11 (2016).
- [33] Jang S.P., Choi S.U.S., [Cooling Performance of a Microchannel Heat Sink with Nanofluids](#), *Appl. Therm. Eng.*, **26**(17–18):2457–63 (2006).
- [34] Chein R., Huang G. [Analysis of Microchannel Heat Sink Performance Using Nanofluids](#), *Appl. Therm. Eng.*, **25**(17–18):3104–14 (2005).
- [35] Li J., Kleinstreuer C., [Thermal Performance of Nanofluid Flow in Microchannels](#), *Int. J. Heat Fluid Flow*, **29**(4):1221–32 (2008).
- [36] Ahn S.W., [The Effects of Roughness Types on Friction Factors and Heat Transfer in Roughened Rectangular Duct](#), *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, **28**(7):933–42 (2001).
- [37] Chung C.K., Wu C.-Y., Shih T.R., Wu C.F., Wu B.H., [Design and Simulation of a Novel Micro-Mixer with Baffles and Side-Wall Injection into the Main Channel](#), “Nano/Micro Eng. Mol. Syst. 2006 NEMS '06 1st IEEE Int. Conf.”, 721–4 (2006).

- [38] ZareNezhad B., Sabzemeidani M.M., [Predicting the Effect of Cell Geometry and Fluid Velocity on Pem Fuel Cell Performance by CFD Simulation](#), *J. Chem. Technol. Metall*, **50**(2):176–82 (2015).
- [39] Maïga S.E.B., Nguyen C.T., Galanis N., Roy G., [Heat Transfer Behaviours of Nanofluids in a Uniformly Heated Tube](#), *Superlattices Microstruct*, **35**(3–6):543–57 (2004).
- [40] 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](#), *Appl. Phys. Lett.*, **87**(15):(2005).
- [41] Akbarinia A., Abdolzadeh M., Laur R. [Critical Investigation of Heat Transfer Enhancement Using Nanofluids in Microchannels with Slip and Non-Slip Flow Regimes](#) *Appl. Therm. Eng.*, **31**(4):556–65 (2011).