

انتقال گرما در یک میکرو کولر سه بعدی با نانوسیال عامل تحت تاثیر میدان مغناطیسی

امیر فتحاحی

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

مازیار دهقان

استادیار، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

محمد صادق ولی پور*

دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

در مطالعه حاضر جریان و انتقال گرمای سه بعدی نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم در یک میکرو کولر با سطح مقطع مستطیلی در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت به صورت عددی مورد بررسی قرار می گیرد. میدان مغناطیسی به صورت عرضی یعنی در جهت عمود بر جهت جریان نانوسیال اعمال می شود. تمام شبیه سازی ها برای اعداد هارتمن ۰ تا ۳۰ و برای عدد رینولدز (Re) برابر ۱۰۰ و کسر حجمی ϕ برابر ۰۰۲ درصد صورت می گیرد. نتایج میدان جریان و انتقال گرما در قالب کمیت های موثر اعم از عدد پوازیه ($f.Re_{Dh}$)، حداکثر سرعت محوری بدون بعد (U_{max}) و عدد ناسلت به همراه کانتورهای سرعت و دما ارائه می شوند. نتایج نشان می دهد که با افزایش عدد هارتمن افت فشار و انتقال گرما افزایش می یابد. همچنین علاوه بر داشتن پروفیل دمای یکنواخت تر در قسمت سیال، اعمال میدان مغناطیسی توزیع دما در قسمت جامد میکروکانال را نیز یکنواخت تر می کند. لذا می توان شار گرمایی بالاتری توسط میکروکولر دفع کرد بدون اینکه حداکثر دمای کانال از محدوده مجاز تخطی نماید.

واژه های کلیدی: میکرو کولر، نانو سیال، میدان مغناطیسی، انتقال گرمای جابجایی.

Heat transfer in a three-dimensional nanofluid-cooled microcooler under the influence of magnetic field

A. Fattahi
M. Dehghan
M. S. Valipour

Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
Energy Department, Materials and Energy Research Center (MERC), Karaj, Iran
Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Abstract

In the present study, the fluid flow and heat transfer of water- Al_2O_3 nanofluid through a three-dimensional microcooler with rectangular flow passages are investigated numerically in the presence of a uniform magnetic field. The magnetic field is applied in the transverse direction (i.e. normal to the flow direction). All simulations are performed for Hartman numbers within the range of 0 to 30 for a fixed Reynolds number of $Re=100$ and the volume fraction of $\phi=0.02$. The results are presented in terms of the Poiseuille number ($f.Re_{Dh}$), the dimensionless maximum axial velocity (U_{max}), and the Nusselt number (Nu) as well as contours of velocity and temperature fields. The results reveal that the pressure drop and heat transfer increase with the increase of the Hartman number. In addition to having a uniform temperature distribution in the fluid part, the presence of the magnetic field makes the temperature distribution within the solid part of the micro-channel more uniform which enables removing higher heat fluxes within the safe temperature limit.

Keywords: Microcooler, Nanofluid, Magnetic field, Convective heat transfer.

۱- مقدمه

با پیشرفت صنایع الکترونیک در دو دهه اخیر و خلق دستگاه هایی با ابعاد کوچک، موضوع تولید گرمای بالا در واحد حجم/ سطح در تراشه های الکترونیک به دلیل تراکم بالا ایجاد شد. در پی آن تحقیقات گسترده ای در این زمینه شروع و میکروکانال ها به دلیل داشتن چندین مزیت از قبیل ابعاد کوچک هندسی، نسبت سطح به حجم بالا، رسانایی گرمایی بالا در قسمت جامد، و نیاز به مقدار حجم کم از سیال خنک کننده، به عنوان یک راه حل عملی برای دفع گرما از مدارهای مجتمع الکترونیک معرفی شدند. میکروکانال عبارتست از تعداد زیاد کانال با ابعاد میکرو که در سطح غیر فعال الکتریکی ریزپردازنده قرار داده می شود که برای دفع گرمای منتشر شده کاربرد دارد. تاکنون و پیز [۱-۲] برای اولین بار میکروکانال های آب-خنک را مورد بررسی قرار داند و گزارش کردند که میکروکانال های آب-خنک می توانند W/cm^2

۷۹۰ شار گرمایی را بدون تغییر فاز و با افزایش حداکثر ۷۱ درجه سلسیوس دفع کند. فالر و ماکیهارا [۳-۴] اعتبار معادلات ناویر-استوکس را بررسی و تایید کردند. لی و همکارانش [۵] با شبیه سازی سه بعدی میکروکانال های چاه گرمایی، جریان کاملاً توسعه یافته و انتقال گرما در میکروکانال ها را با نسبت منظرهای مختلف مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که در کانال های مستطیلی با افزایش نسبت منظر کانال، عدد ناسلت نیز افزایش می یابد. توچای و هان [۶] اثرات کانال های همگرا را روی عملکرد حرارتی میکروکانال های چاه گرمایی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که کانال های که در جهت عرضی همگرا می شوند نسبت به کانال های مستقیم و کانال های که در جهت ارتفاع کانال همگرا می شوند از عملکرد حرارتی مطلوب تری برخوردار هستند.

چو و همکارانش [۷] دریافتند ایجاد یک سیال پایه با غلظت های کوچک نانو ذرات موجب افزایش انتقال گرما می شود. افزایش زیاد

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: msvalipour@semnan.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۸/۱۸

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۴/۲۴

رسانایی گرمایی سیال بسیاری از محققان را تشویق به بررسی مزایای بالقوه مخلوط نانو ذرات با سیال عامل در حالت مایع (به عبارت دیگر نانو-سیال) در کاربردی انتقال گرما کرد. از این رو اخیراً در بسیاری از مطالعات مشخصات انتقال گرمایی همرفتی نانو سیال را در میکروکانال‌ها، مورد بررسی قرار دادند. تراسکشری و ونگوایز [۸]، ون و دینگ [۹] و گائو و همکارانش [۱۰] انتقال گرما و جریان نانو سیال آب-اکسید مس را در میکروکانال مستطیلی برای کسر حجمی های مختلف مورد بررسی قرار دادند و افزایش آهنگ انتقال گرما را به همراه افزایش نسبتاً کم افت فشار گزارش کردند.

لی و کلاینسترو [۱۱] به صورت عددی جریان نانو سیال آب-مس را در میکروکانال ذوزنقه‌ای مورد بررسی قرار دادند و غلظت بهینه نانو سیال را با به حداقل رساندن آنتروپی بدست آوردند. تیووی و همکارانش [۱۲] رسانایی گرمایی محوری را، روی عملکرد حرارتی نانو سیال در یک میکروکانال چاه گرمایی مورد مطالعه قرار دادند. آنها گزارش کردند اثر رسانایی گرمایی محوری در نانو سیال با کسر حجمی بالا و اعداد پکله کم نسبت به مایع بسیار قابل توجه می‌باشد و نمی‌توان از آن صرفنظر کرد. ریزیت و همکارانش [۱۳] به صورتی عددی انتقال گرمایی اجباری، جریان لایه‌ای نانو سیال را در یک میکروکولر در دو حالت لغزش و بدون لغزش بررسی کردند. آنها گزارش کردند که استفاده از نانو سیال باعث افزایش انتقال گرما می‌شود. رشیدی و همکارانش [۱۴] نقش نانو ذرات را در بهرووری سیستم‌های آب شیرین‌کن مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند انجام مدل‌های عددی و ریاضی و به دست آوردن برخی از همبستگی‌ها برای برآوردن ضریب بهره‌وری و انتقال گرما در پیش بینی عملکرد این سیستم‌ها بسیار مفید است. آنها کاربرد نانو سیال‌ها را در سیستم‌های تقطیر و تبخیر مورد بررسی قرار دادند [۱۵] و نشان دادند استفاده از نانو سیال باعث افزایش ضریب انتقال گرما می‌شود [۱۶].

با توجه به مزیت بکارگیری میدان مغناطیسی در یکنواخت کردن پروفیل جریان و به تبع آن افزایش ضریب انتقال گرمایی جابجایی، در سال‌های اخیر جریان و انتقال گرمایی تحت تاثیر میدان مغناطیسی مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است [۱۷]. امین‌فر و همکارانش [۱۸-۱۹] اثر میدان مغناطیسی یکنواخت و غیر یکنواخت را روی رفتار هیدروگرمایی یک سیال دوفاز در یک لوله مربعی عمودی مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند میدان‌های مثبت باعث افزایش ضریب اصطکاک و عدد ناسلت می‌شود و میدان‌های منفی این دویارمتر را کاهش می‌دهد. ساوادا و همکاران [۲۰] رفتار جریان را بین دو صفحه موازی برای هر دو میدان مغناطیسی عرضی و طولی به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. رشیدی و همکارانش [۲۱] استفاده از میدان مغناطیسی را در کاربردهای بیولوژیکی مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند استفاده از میدان مغناطیسی روی جریان خون در هنگام جراحی که نیاز است دمای بافت‌ها کاهش یابد می‌تواند بسیار مهم باشد.

گیلرمو و همکارانش [۲۲] اثرات ترکیبی شامل لغزش، میدان مغناطیسی، کسر حجمی، تابش گرمایی، مکش و تزریق را روی آنتروپی تولیدی در یک میکروکانال با صفحات نفوذپذیر مورد بررسی قرار دادند و گزارش کردند اثرات فوق منجر به کاهش آنتروپی کل می‌شوند. سلیملی و همکارانش [۲۳] اثرات میدان مغناطیسی را روی جریان لیتیوم

مایع در حالت پایا در یک کانال سه بعدی مورد بررسی قرار دادند و گزارش کردند با اعمال میدان مغناطیسی می‌توان خواص هیدرودینامیکی سیال‌های هادی الکتریکی را کنترل کرد. حاج علی گل و همکارانش [۲۴] به صورت عددی، انتقال گرمایی همرفتی مختلط و آنتروپی تولیدی آن را روی نانو سیال آلومینیوم در یک میکروکانال سه بعدی مورد بررسی قرار دادند و افزایش آهنگ انتقال گرما از دیواره کانال به سیال را با افزایش میدان مغناطیسی گزارش کردند. همچنین کاهش آنتروپی کل را با افزایش کسر حجمی، نسبت منظر کانال و افزایش میدان مغناطیسی گزارش کردند. که البته برخی از نتایج ایشان با فیزیک حاکم بر مساله و پیش‌بینی‌های علمی همخوانی ندارد و نشان می‌دهد که مساله مورد بحث نیاز به بررسی بیشتری دارد.

در کار حاضر جریان و انتقال گرمایی همرفتی همبسته نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم در یک میکرو کولر از نوع میکروکانال سه بعدی که قسمت تحتانی آن تحت تاثیر میدان مغناطیسی می‌باشد به صورت عددی توسط نرم افزار Fluent مورد بررسی می‌گیرد. معادلات حاکم برای کسر حجمی ۲ درصد و عدد رینولدز ۱۰۰ حل می‌شوند. مدل استفاده شد شامل بخش جامد و سیال می‌باشد و مسئله برای دو حالت حل شده است: حالت اول بدون میدان مغناطیسی و حالت دوم در حضور میدان مغناطیسی. همچنین تحلیل‌های صورت گرفته شامل دو بخش می‌باشند بخش اول مربوط به مشخصه‌های جریان و محاسبه کمیت‌های مربوط به آن می‌باشد و بخش دوم مربوط به مشخصه‌های انتقال گرما می‌باشد که در ادامه ارائه می‌شوند.

۲- صورت مسئله و مدل سازی ریاضی:

طرحواره میکروکانال در شکل ۱ نشان داده شده است. شار گرمایی وارد شده توسط پره‌ها و کف میکروکانال، به سیال عبوری در داخل کانال‌ها منتقل و دفع می‌شود. قسمت تحتانی کانال به طول L_1 به صورت عرضی تحت تاثیر میدان مغناطیسی یکنواخت قرار دارد. ذرات Al_2O_3 با قطر موثر $38/4$ نانومتر و کسر حجمی ۲ درصد استفاده شده است. عرض و ارتفاع هر کانال به ترتیب W و H هستند. همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود طول کانال‌ها L و ضخامت پره‌ها برابر W_c خواهد بود و ضخامت لایه کف برابر t می‌باشد. ابعاد کانال و خواص نانو سیال در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

به دلیل اینکه حجم محاسبات برای تمامی کانال‌ها زیاد خواهد بود بنابراین یکی از کانال‌های میانی انتخاب و با توجه به تقارن موجود، نیمی از این کانال برای محاسبات انتخاب شده است. لذا محدوده محاسباتی مانند شکل ۱ می‌باشد که بر روی دیواره‌های سمت چپ و راست شرط مرزی متقارن اعمال می‌شود.

$$K_S \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial^2 X} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial^2 Y} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial^2 Z} \right) = 0 \quad (6)$$

در روابط فوق ρ_{nf} چگالی نانو سیال، α_{bf} پخشندگی گرمایی سیال پایه، $Re = u_{in} D_h / \nu_{bf}$ عدد رینولدز، $Pr = \nu_{bf} / \alpha_{bf}$ عدد پرانتل، Ha عدد بدون بعد هارتمن می باشد که در قسمت نمادها تعریف شده است.

۳- شیوه حل عددی

شار گرمایی برابر با 200 W/cm^2 به سطح زیرین کف کانال اعمال می شود. گرمایی که از سطح بالای کانال منتقل می شود ناچیز می باشد. زیرا در واقعیت انتقال گرما از این سطح با مکانیزم انتقال گرمای جابجایی طبیعی صورت می گیرد که در برابر آهنگ انتقال گرما جابجایی اجباری درون کانال قابل صرف نظر و سطح عایق فرض می شود. به دلیل تقارن، دیواره های سمت راست و چپ متقارن فرض می شوند و گرادیان دما و سرعت نرمال در صفحه های متقارن صفر در نظر گرفته می شود. سیال در ورودی با دمای 293 K و سرعت یکنواخت وارد کانال می شود.

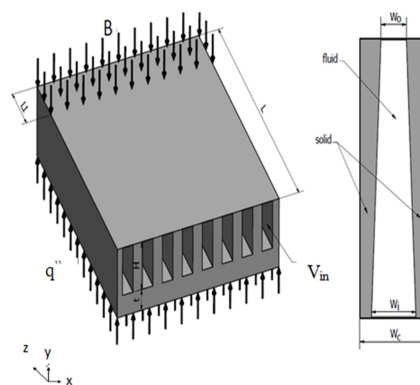
در خروجی فشار ثابت در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه طول کانال به اندازه کافی بلند می باشد بنابراین سیال در خروجی کاملاً توسعه یافته فرض می شود و از این رو گرادیان محوری $(\frac{\partial}{\partial x})$ برابر صفر در نظر گرفته می شود. به منظور بررسی وضعیت کاملاً توسعه یافته، طول کانال افزایش داده شد که به تبع آن تغییرات قابل توجهی در سرعت در موقعیت محوری $Z=L$ دیده نشد. در خط اتصال جامد و سیال شرط عدم لغزش سرعت و عدم پخش دما صادق است:

$$\begin{aligned} \vec{V} &= 0 \\ T_{nf} &= T_S \\ K_{nf} \frac{\partial T_{nf}}{\partial n} &= K_S \frac{\partial T_S}{\partial n} \end{aligned} \quad (7)$$

K_S و K_{nf} به ترتیب رسانایی گرمایی نانو سیال و قسمت جامد می باشند.

۴- شرایط مرزی

معادلات حاکم غیر خطی با شرایط مرزی بیان شده به صورت عددی با استفاده از روش حجم محدود و الگوریتم SIMPLE در حالت پایا گسسته سازی و حل می شوند. جمله جابجایی با استفاده از روش بالا دست مرتبه دوم گسسته سازی می گردد. تفاوت کلی بین سرعت و دمای میانگین در دو مرحله از حل، مبنای همگرایی می باشد و تفاوت بدون بعد کمتر از 0.001 به عنوان معیار همگرایی در نظر گرفته شده است. برای بدست آوردن تعداد شبکه های مناسب با توجه به زمان حل، مسئله با تعداد شبکه های متفاوت حل شده و دمای خروجی کانال در هر مرحله اندازه گیری شد و در نهایت تعداد شبکه های با ریزتر کردن شبکه ها یا به عبارتی برای تعداد شبکه های $50 \times 100 \times 150$ $x \times y \times z$ به عنوان شبکه نهایی انتخاب شد زیرا با ریزتر کردن شبکه ها یا به عبارتی برای تعداد شبکه های $75 \times 150 \times 200$ Z ، اختلاف دمای خروجی کانال برای دو شبکه کمتر از 0.1 می باشد. المان های استفاده شده برای شبکه بندی به صورت مکعب مستطیل می باشند.



شکل ۱- طرحواره میکرو کولر کننده (میکرو کانال چاه گرمایی)

جدول ۱- ابعاد میکرو کولر کننده (میکرو متر)

W	W _c	H	L	L ₁	T
200	400	1000	12000	3000	500

جدول ۲- خواص نانو ذرات آب و آلومینیوم [۲۵]

(W/m)K	C _p (J/kgK)	ρ(kg/m ³)	Pr	
0.613	4179	997/1	6/2	آب خالص
40	765	3970		آلومینیوم (Al ₂ O ₃)

۲-۱- معادلات حاکم

معادلات حاکم با فرض جریان تراکم ناپذیر و پایا به صورت زیر می باشند [۲۶]:

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

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} + W \frac{\partial U}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \times \alpha_f} \frac{1}{Re Pr} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial^2 X} + \frac{\partial^2 U}{\partial^2 Y} + \frac{\partial^2 U}{\partial^2 Z} \right) - \frac{Ha^2}{Re} U \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + W \frac{\partial V}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \times \alpha_f} \frac{1}{Re Pr} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial^2 X} + \frac{\partial^2 V}{\partial^2 Y} + \frac{\partial^2 V}{\partial^2 Z} \right) \quad (3)$$

$$U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} + W \frac{\partial W}{\partial Z} = -\frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \times \alpha_f} \frac{1}{Re Pr} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial^2 X} + \frac{\partial^2 W}{\partial^2 Y} + \frac{\partial^2 W}{\partial^2 Z} \right) - \frac{Ha^2}{Re} W \quad (4)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} + W \frac{\partial \theta}{\partial Z} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \frac{1}{Re Pr} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial^2 X} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial^2 Y} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial^2 Z} \right) \quad (5)$$

معادله بقای انرژی برای قسمت جامد حل می شود:

۵- خواص نانو سیال

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (8)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_{bf} + \phi(\rho C_p)_p \quad (9)$$

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (10)$$

در روابط بالا ρ چگالی سیال، ϕ کسر حجمی نانو سیال، C_p ظرفیت گرمایی سیال و σ رسانایی الکتریکی سیال می باشد.

رسانایی گرمایی موثر برای نانو سیال توسط لی و کلیسترویر [۲۷] به صورت زیر معرفی می شود:

$$K_{nf} = K_{static} + K_{Brownian} \quad (11)$$

$$\frac{k_{static}}{K_{bf}} = 1 + \frac{3(\frac{K_p}{K_{bf}} - 1)\phi}{(\frac{K_p}{K_{bf}} + 2) - (\frac{K_p}{K_{bf}} - 1)\phi} \quad (12)$$

$$K_{Brownian} = 5 \times 10^4 \beta \phi \rho C_p \sqrt{\frac{KT}{\rho_p d_p}} f(T, \phi) \quad (13)$$

که f و β در مرجع [۲۷] معرفی شده اند. ویسکوزیته موثر نیز توسط مرجع [۲۵] به صورت زیر پیشنهاد شده است.

$$\mu_{nf} = \mu_{static} + \mu_{Brownian} \quad (14)$$

$$\mu_{Brownian} = \frac{K_{Brownian}}{K_{bf}} \times \frac{\mu_{bf}}{Pr_{bf}} \quad (15)$$

۶- نتایج و بحث

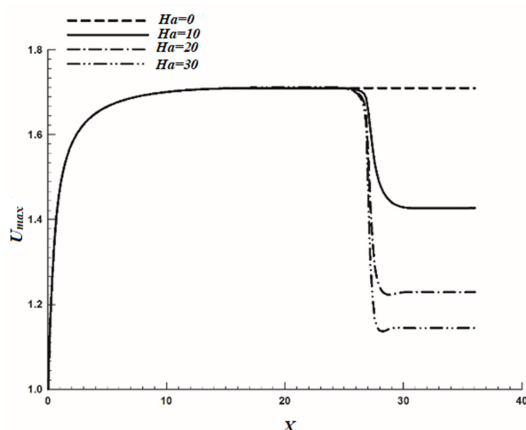
نتایج شامل دو بخش می باشند: در بخش اول، مسئله از لحاظ هیدرودینامیکی نظیر تغییرات عدد پوازیه در طول کانال و سرعت سیال و در بخش دوم پارامترهای حرارتی مورد بررسی قرار می گیرد.

۶-۱- هیدرودینامیک

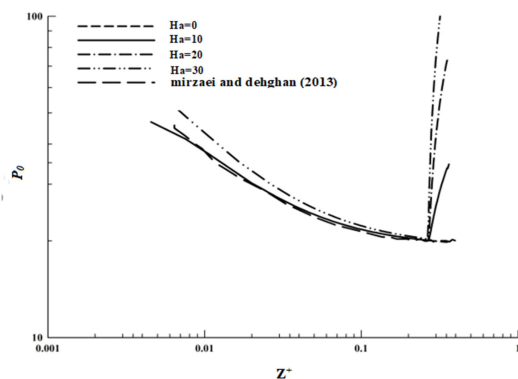
شکل ۲ حداکثر سرعت افقی بدون بعد (U_{max}) را در طول خط مرکزی کانال برای چهار عدد هارتمن (Ha) برابر ۱۰، ۲۰، ۳۰ و برای عدد رینولدز (Re) ۱۰۰ و درصد حجمی ذرات (ϕ) برابر ۰/۲ نشان می دهد. از آنجا که مقدار حداکثر سرعت بدون بعد، به نسبت سرعت روی خط مرکزی و سرعت ثابت ورودی، وابسته می باشد بنابراین در

ابتدای کانال جریان روی خط مرکزی به دلیل رشد لایه مرزی ها شتاب می گیرد و مقدار آن افزایش می یابد تا به حالت توسعه یافته خود می رسد. از این رو در ناحیه توسعه یافته هیدرودینامیکی، مقدار U_{max} در طول کانال ثابت می شود. در قسمت تحتانی کانال ($z=9$ mm) با اعمال میدان مغناطیسی و با توجه به معادله مومنوم دیده می شود که نیروی میدان مغناطیسی بر سیال عامل متناسب است با سرعت به دست آمده در هر ناحیه، از طرفی بیشینه سرعت در مرکز کانال اتفاق می افتد. لذا نیروی مغناطیسی مخالف جریان سیال در مرکز کانال دارای حداکثر مقدار خود می باشد. بنابراین برای ارضای بقای جرم، سرعت در مرکز کاهش و در نزدیکی دیواره کانال افزایش می یابد که باعث یکنواختی هرچه بیشتر جریان می شود.

شکل ۳ (الف) کانتور سرعت را در ناحیه ورودی کانال نشان می دهد با توجه به اینکه در شرایط مرزی سرعت ورودی را یکنواخت فرض کردیم بنابراین در ابتدای ناحیه ورودی به دلیل کوچک بودن ضخامت لایه مرزی ها پروفیل سرعت تقریباً یکنواخت می باشد. شکل ۳ (ب) کانتور سرعت را در ناحیه کاملاً توسعه یافته نشان می دهد در این ناحیه با رشد لایه مرزی تا مرکز کانال بیشینه سرعت در حداکثر فاصله از دیواره (در مرکز کانال) اتفاق می افتد. با اعمال میدان مغناطیسی در قسمت تحتانی کانال، پروفیل سرعت سیال تحت تاثیر نیروی لورنتس ($Ha=30$) نزدیک به پروفیل سرعت ورودی کانال می شود در واقع می توان گفت تاثیر دیواره ها را روی جریان سیال می توان کاهش داد یا به عبارتی توزیع سرعت جریان را می توان کنترل نمود.



شکل ۲- تغییرات حداکثر سرعت جریان در مرکز کانال ($Y=3$ mm).



شکل ۴- تغییرات ضریب انتقال گرمای جابجایی محلی در طول کانال برای اعداد هارتمن مختلف

در ابتدای کانال با توجه به اینکه تغییرات فشار به دلیل رشد لایه مرزی‌ها زیاد می‌باشد لذا نیروی اختلاف فشار اعمالی در این ناحیه داری مقدار زیادی می‌باشد. و از آنجا که نیروی اصطکاکی با توجه به ثابت بودن مقطع کانال ثابت می‌باشد بنابراین عدد پوازیه از یک مقدار خیلی زیاد شروع شده و بعد از ناحیه توسعه یافته به مقدار حدی ثابتی می‌رسد. با اعمال میدان مغناطیسی با توجه به اینکه نیروی میدان مغناطیسی خلاف جهت جریان می‌باشد، لذا برای حفظ دبی جریان و به تبع آن ثابت ماندن سرعت متوسط، گرادیان فشار در طول کانال به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد. این امر باعث افزایش ناگهانی عدد پوازیه در طول کانال می‌شود. همچنین از مشاهد شکل ۴ دیده می‌شود که هماهنگی بسیار خوبی بین نتایج کار حاضر در نمودار هارتمن صفر با نتایج مطالعه میرزایی و دهقان [۲۸] دیده می‌شود که به صورت ضمنی به اعتبار سنجی نتایج مطالعه حاضر اشاره دارد.

۲-۶- انتقال گرما

یکی از سوالات اساسی که در رابطه با انتقال گرما در جریان‌های داخلی صورت می‌گیرد رابطه بین تغییر درجه حرارت دیواره کانال و آهنگ انتقال گرما به سیال در طول کانال می‌باشد. بنابراین پارامتر مهمی به عنوان ضریب انتقال گرمای جابجایی محلی در طول کانال تعریف می‌کنند:

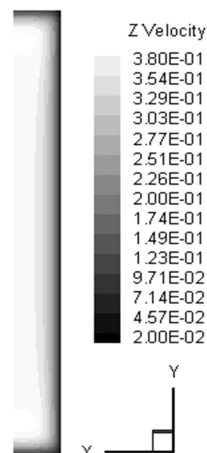
$$h_z = \frac{q_w(z)}{T_w(z) - T_b(z)} \quad (17)$$

$q_w(z)$ شار گرمایی میانگین در هر مقطع می‌باشد که از میانگین حجمی شارهای اعمالی از مرز جامد به سیال در دیواره‌های جانبی و تحتانی بدست می‌آید، $T_w(z)$ دمای متوسط دیوار می‌باشد و $T_b(z)$ دمای متوسط حجمی سیال می‌باشد و توسط رابطه زیر تعریف می‌شود:

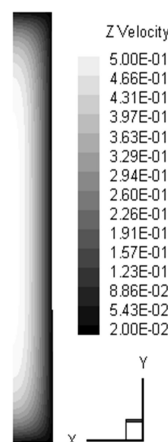
$$T_b(z) = \frac{\int_{AC} \rho u c_p T_f dA}{\int_{AC} \rho u c_p dA} \quad (18)$$

ضریب انتقال گرمای جابجایی محلی (رابطه ۱۷) در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است. در ابتدای کانال به دلیل اختلاف دمای زیاد

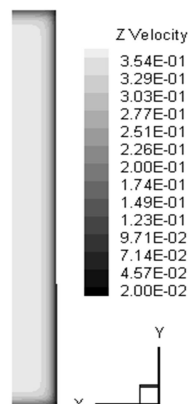
(الف)



(ب)



(ج)

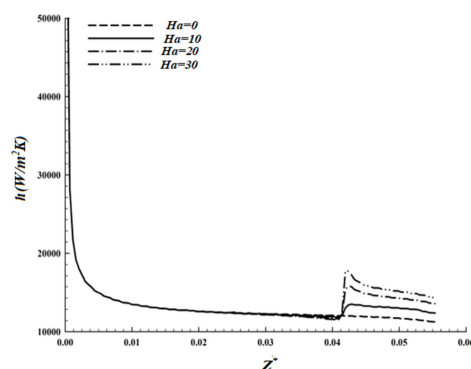


شکل ۳- (الف) کانتور سرعت در سه مقطع مختلف (اعم از ورودی، مرکز و انتهایی): (الف) $z=0\text{mm}$; (ب) $z=6\text{mm}$; (ج) $z=10\text{mm}$

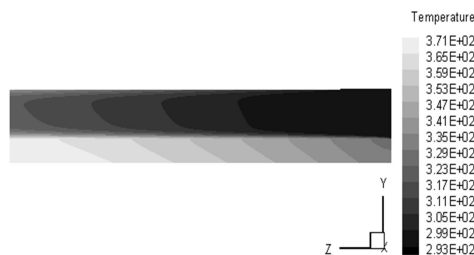
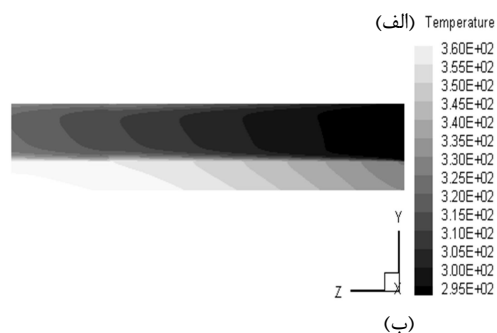
شکل ۴ عدد پوازیه ($P_o = f \times Re_{Dh}$) را در مقابل طول بدون بعد کانال ($Z^+ = z Re^{-1} D_h^{-1}$) نشان می‌دهد. عدد پوازیه (P_o) عددی هست که فقط به هندسه بستگی دارد و نشان دهنده تعادل بین دو نیرو یعنی نیروی اختلاف فشار اعمالی و اصطکاک است.

$$P_o \sim \frac{\nabla p / L}{\mu U / D_h} \quad (16)$$

بین دیواره و توده سیال ورودی، یکنواخت بودن پروفیل سرعت و همچنین کوچک بودن ضخامت لایه مرزی، آهنگ انتقال گرما بسیار بالا می‌باشد. بنابراین ضریب انتقال گرما از یک مقدار زیاد شروع شده و در طول کانال با کاهش گرادیان دما و افزایش ضخامت لایه‌های مرزی کاهش می‌یابد تا به یک مقدار ثابت در جریان توسعه یافته میل می‌کند. با اعمال میدان مغناطیسی در انتهای کانال، پروفیل سرعت در اثر نیروی لورنتس مجدداً مانند پروفیل سرعت دهانه ورودی یکنواخت می‌شود و با افزایش گرادیان سرعت در نزدیک دیواره و کاهش ضخامت لایه مرزی هیدرو دینامیکی، میزان انتقال گرما افزایش می‌یابد. متعاقباً اختلاف دمای بین سیال و دیواره کاهش می‌یابد. در نتیجه ضریب انتقال گرما در این ناحیه مجدداً افزایش می‌یابد. در این واقع در این ناحیه توزیع دما در کانال یکنواخت‌تر می‌شود بنابراین می‌توان گفت اختلاف دمای متوسط سیال (T_b) و دیواره کاهش می‌یابد از این رو ضریب انتقال گرما افزایش می‌یابد.



شکل ۵ - تغییرات ضریب انتقال گرما جابجایی محلی در طول کانال برای اعداد هارتمن مختلف



شکل ۶- کانطور دما برای (الف) $Ha=0$ و (ب) $Ha=30$

شکل ۶ (الف) و ۶ (ب) به ترتیب کانطور های دما را برای $Ha=0$ و $Ha=30$ نشان می‌دهند. در حالت بدون حضور میدان مغناطیسی (شکل ۶ (الف)) در ابتدای کانال به دلیل ضریب انتقال گرمای جابجایی محلی بالا، دمای قسمت جامد در ابتدای کانال تقریباً نزدیک به دمای سیال می‌باشد. در قسمت انتهایی کانال دمای توده سیال خنک کننده افزایش یافته بنابراین برای انتقال شار گرمایی یکنواخت وارد شده از کف، دمای قسمت تحتانی کانال افزایش می‌یابد. شکل ۶ (ب) کانطور دما را برای حالتی که قسمت تحتانی کانال تحت تاثیر میدان مغناطیسی قرار دارد نشان می‌دهد که به دلیل افزایش ضریب انتقال گرمای جابجایی (مطابق شکل ۵)، شار گرمایی نسبت به حالت بدون حضور میدان مغناطیسی در اختلاف دمای پایین‌تری منتقل شده و به عبارت دیگر در این حالت دمای قسمت جامد پایین‌تر خواهد بود در نتیجه توزیع دما یکنواخت‌تر خواهد شد. به طور کلی ضریب انتقال گرما در حالت بدون بعد (عدد ناسلت) توسط رابطه (۱۹) تعریف می‌شود:

$$Nu_z = \frac{h_z D_h}{K_Z} \quad (19)$$

D_h قطر هیدرولیکی کانال می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D_h = \frac{2WH}{W+H} \quad (20)$$

W و H به ترتیب عرض و ارتفاع کانال می‌باشند و K_Z متوسط رسانایی گرمایی در مقطع z می‌باشد. طول بدون بعد گرمایی توسط رابطه (۲۱) تعریف می‌شود:

$$z^* = z / (D_h Pr Re) \quad (21)$$

شکل ۷ تغییرات عدد ناسلت را در مقابل طول بدون بعد گرمایی برای هارتمن های مختلف در مقایسه با نتایج کار لی و همکارانش [۲۹] نشان می‌دهد (معادله ۲۲).

$$Nu_z = \frac{1}{C_1 (z^*)^2 + C_2 + C_3} + C_4$$

$$C_1 = -3.122 \times 10^{-3} \alpha^3 + 2.435 \times 10^{-2} \alpha^2 + 2.143 \times 10^{-1} \alpha + 7.325 \quad 0 < \alpha < 1$$

$$C_2 = 6.412 \times 10^{-1}$$

$$C_3 = 1.589 \times 10^{-4} \alpha^2 - 26.3 \times 10^{-3} \alpha + 2.444 \times 10^{-2}$$

$$C_4 = 7.148 - 1328 \times 10 / \alpha + 1515 \times 10 / \alpha^2 - 5.936 / \alpha^3 \quad (22)$$

تفاوت بین نتایج مطالعه لی و همکاران [۲۹] و کار حاضر به دلیل شرایط مرزی متفاوت و مدل های متفاوت می‌باشد از قرار زیر می‌باشد:

۱- مدل لی و همکاران [۲۹] جریان را از لحاظ هیدرو دینامیکی کاملاً توسعه یافته در نظر گرفته در صورتی که در مدل حاضر جریان با صورت یکنواخت وارد کانال می‌شود و سپس توسعه یافتگی رخ می‌دهد.

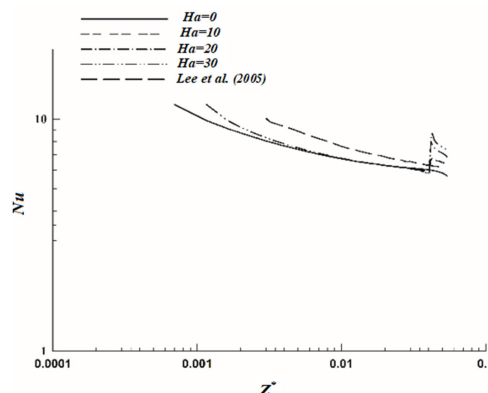
۲- مدل لی و همکاران [۲۹] فقط قسمت سیال را شامل می‌شود در صورتی که مدل حاضر شامل انتقال گرمای سه بعدی در هر دو قسمت جامد و سیال می‌باشد.

۳- تفاوت قسمت انتهایی نمودار در مدل لی و همکاران [۲۹] و کار حاضر در اثر اعمال میدان مغناطیسی بر جریان سیال می‌باشد. انتقال گرمای سه بعدی در قسمت جامد همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود منجر به گرادیان دما در جهت Z می‌شود. بنابراین رسانش گرمای محوری در قسمت جامد را نمی‌توان نادیده گرفت. مورینی [۳۰] مارانانا [۳۱] به ترتیب نشان دادند که از رسانش گرمای محوری در قسمت جامد نمی‌توان صرف نظر کرد وقتی که:

$$M = \frac{K_s A_s / L}{\rho C_p A_s V} = \frac{K_s [(H+t)W_c - HW]}{\rho C_p HWL} > 0.01 \quad (23)$$

$$N = \frac{K_s D_h}{K_f L} \left(\frac{(H+t)W_c}{HW} - 1 \right) \frac{1}{Re_{pr}} > \frac{1}{Re_{Pr}} > 0.02 \quad (24)$$

((K_s / (w / (m.k)) و V (m/s) به ترتیب رسانایی گرمایی قسمت جامد و سرعت متوسط می‌باشند. همچنین N و M پارامترهای هستند که اهمیت رسانش گرمایی محوری را در مقایسه با انتقال گرمای جابجایی را برآورد می‌کنند که در مطالعه حاضر به ترتیب برابر 0.0053 و 0.0075 می‌باشند. در واقع در رینولدزهای پایین بخشی از گرمای وارد شده از کف کانال، به جای حرکت به سمت مایع از طریق قسمت جامد به دلیل اختلاف دما به سمت ورودی کانال که دمای کمتری دار منتقل می‌شود. با اعمال میدان مغناطیسی تا حد زیادی می‌توان توزیع دما را در میکروکانال یکنواخت نمود به طوری که از اهمیت رسانش گرمای محوری در طول کانال کاسته می‌شود.



شکل ۷- نمودار ناسلت بر حسب طول بدون بعد: مقایسه عدد ناسلت با معادله لی [۲۹] برای اعداد هارتمن مختلف

۷- جمع‌بندی

در مطالعه حاضر تأثیرات حضور / عدم حضور میدان مغناطیسی بر جریان و انتقال گرمای یک نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در درون یک میکرو کولر کننده حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن به صورت خلاصه به شرح ذیل ارائه می‌شود:

۱- نیروی لورنتس با سرعت سیال رابطه مستقیم دارد بنابراین بیشترین تأثیر این نیروی مخالف جریان در ناحیه مرکزی کانال است که بیشینه سرعت در آن رخ می‌دهد. بنابراین توزیع جریان سیال را در

کانال یکنواخت‌تر می‌کند.

۲- با توجه به شکل ۳ می‌توان به این نتیجه رسید که تأثیر نیروی لورنتس روی پروفیل سرعت با افزایش عدد هارتمن از ۲۰ به ۳۰ نسبت به افزایش از ۰ تا ۱۰ کمتر است. به عبارت دیگر هنگامی که پروفیل سرعت تقریباً یکنواخت گردد، دیگر میدان مغناطیسی تأثیری روی پروفیل سرعت و یا انتقال گرما نخواهد داشت و فقط میزان افت فشار را افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر افزایش بیشتر میدان مغناطیسی مزیت و توجیهی نخواهد داشت.

۳- همانطور که بیان شد، با اعمال میدان مغناطیسی سرعت سیال در نزدیکی دیوار به دلیل یکنواختی پروفیل سرعت افزایش می‌یابد که این مساله به مکانیزم انتقال گرمای جابجایی کمک شایانی می‌نماید. به عبارت دیگر با بهبود مکانیزم انتقال گرمای جابجایی، حرارت از سطح دیواره تحت اختلاف دمای کمتری با سیال خنک کننده منتقل خواهد شد که به کنترل دمای سطح برای جلوگیری از پدیده بیش-گرم‌شدن منجر خواهد شد.

۴- با توجه به شکل ۶ می‌توان نتیجه گرفت که با اعمال میدان مغناطیسی می‌توان توزیع دما را در قسمت جامد یکنواخت‌تر نمود و هم از تنش‌های حرارتی در میکرو کولر کننده کاست و هم دمای سطح تماس میکرو کولر کننده با منبع گرمایی را کاهش داد. به عبارت دیگر شار گرمایی بالاتری را تحت یک حداکثر دمای تحمل مشخص دفع نمود.

۸- نمادها

B	میدان مغناطیسی (T)
D_h	قطر هیدرولیکی (m)
H	ارتفاع کانال (m)
Ha	عدد هارتمن $(B_0 D_h \sqrt{\frac{\sigma_{nf}}{\rho_{nf} \nu_{bf}}})$
P	فشار (Pa)
q''	شار گرمایی (W/m^2)
pr	عدد پرانتل $(\frac{\nu_{mf}}{\alpha_{mf}})$
Re	عدد رینولدز $(\frac{u_{in} D_h}{\nu_{bf}})$
T	دما (K)
T_b	دمای متوسط حجمی سیال (K)
T_w	دمای متوسط دیواره (K)
u, v, w	مولفه‌های سرعت (m/s)
U	سرعت بدون بعد (u/u_{in})
V	سرعت بدون بعد (v/u_{in})
W	سرعت بدون بعد (w/u_{in})
x, y, z	مختصات دکارتی
X	مختصات دکارتی بدون بعد (x/D_h)
Y	مختصات دکارتی بدون بعد (y/D_h)
Z	مختصات دکارتی بدون بعد (z/D_h)

علامه یونانی

θ	دمای بدون بعد $(\frac{T-T_{in}}{q \frac{D_h}{k_f}})$
μ	لزجت دینامیکی kg/m.s
ρ	چگالی $(kg.m^{-3})$
ϕ	کسر حجمی

زیر نویس ها

ave	متوسط
app	ظاهری
b	توده
bf	سیال پایه
Brownian	براونی
c	سطح مقطع
eff	موثر
f	سیال
h	هیدرولیک
nf	نانو سیال
p	ذرات
s	جامد
w	دیوار

۹- مراجع

- [10] Gao P., Le Person S. and Favre-Marinet, M., Scale effects on hydrodynamics and heat transfer in two-dimensional mini and microchannels. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 41, No. 11, pp. 1017-1027, 2002.
- [11] Li J and Kleinstreuer C., Entropy generation analysis for nanofluid flow in microchannels. *Journal of Heat Transfer*, Vol. 132, No. 12, pp.122401, 2010.
- [12] Ting T. W., Hung Y. M. and Guo N., Effects of streamwise conduction on thermal performance of nanofluid flow in microchannel heat sinks. *Energy conversion and management*, Vol. 78, pp. 14-23. 2014.
- [13] Raisi A., Ghasemi B. and Aminossadati S. M., A numerical study on the forced convection of laminar nanofluid in a microchannel with both slip and no-slip conditions. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 59, No. 2, pp. 114-129, 2011.
- [14] Rashidi S., Karimi N., Mahian O. and Esfahani, J. A., A concise review on the role of nanoparticles upon the productivity of solar desalination systems. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 135, No. 2, pp. 1145-1159, 2019.
- [15] Rashidi S., Mahian O. and Languri E. M., Applications of nanofluids in condensing and evaporating systems. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 131, No. 3, pp. 2027-2039. 2018.
- [16] Rashidi S., Eskandarian M., Mahian, O. and Poncet S., Combination of nanofluid and inserts for heat transfer enhancement. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 135, No. 1, pp. 437-460, 2019.
- [17] Nakatsuka K., Jeyadevan B., Neveu S. and Koganezawa, H., The magnetic fluid for heat transfer applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 252, pp. 360-362, 2002.
- [18] Aminfar H., Mohammadpourfard M. and Kahnamouei Y. N., A 3D numerical simulation of mixed convection of a magnetic nanofluid in the presence of non-uniform magnetic field in a vertical tube using two phase mixture model. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 323 No. 15, pp. 1963-1972, 2011.
- [19] Aminfar H., Mohammadpourfard M. and Mohseni, F. Two-phase mixture model simulation of the hydro-thermal behavior of an electrical conductive ferrofluid in the presence of magnetic fields. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 324, No. 5, pp. 830-842, 2012.
- [20] Sawada T., Tanahashi T and Ando, T., Two-dimensional flow of magnetic fluid between two parallel plates. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 65 No. 2-3, pp. 327-329, 1987.
- [21] Rashidi S., Esfahani J. A. and Maskaniyan M., Applications of magnetohydrodynamics in biological systems-a review on the numerical studies. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 439, pp. 358-372, 2017.
- [22] Ibáñez G., López A., Pantoja J. and Moreira, J. Entropy generation analysis of a nanofluid flow in MHD porous microchannel with hydrodynamic slip and thermal radiation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 100, pp. 89-97, 2016.
- [23] Selimli S., Recebli Z. and Arcaklioglu E., MHD numerical analyses of hydrodynamically developing laminar liquid lithium duct flow. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, pp. 44, pp. 15358-15364, 2015.
- [24] Hajjaligol N., Fattahi A., Ahmadi M. H., Qomi M. E. and Kakoli E., MHD mixed convection and entropy generation in a 3-D microchannel using Al₂O₃-water nanofluid. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol. 46, pp. 30-42, 2015.
- [25] Abu-Nada E., Masoud Z. and Hijazi A., Natural convection heat transfer enhancement in horizontal concentric annuli using nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, No. 5, pp. 657-665, 2008.
- [1] Tuckerman D. B. and Pease R. F. W., High-performance heat sinking for VLSI. *IEEE Electron device letters*, Vol. 2, No.5, pp. 126-129, 1981.
- [2] Tuckerman D. B., Optimized convective cooling using micromachined structures. *J. Electrochem. Soc.: Reviews and News*, Vol. 129, No. 3, 1982.
- [3] Pfahler J., Harley J., Bau H. and Zemel J., Liquid transport in micron and submicron channels. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 22, No.1-3, pp. 431-434, 1990.
- [4] Makihara M., Sasakura K. and Nagayama, A. The flow of liquids in micro-capillary tubes-consideration to application of the Navier-Stokes equations. *JOURNAL-JAPAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING*, Vol. 59, pp. 399-399, 1993.
- [5] Lee P. S. and Garimella, S. V., Thermally developing flow and heat transfer in rectangular microchannels of different aspect ratios. *international journal of heat and mass transfer*, Vol. 49, No. 17-18, pp. 3060-3067, 2006.
- [6] Hung T. C. and Yan, W. M., Effects of tapered-channel design on thermal performance of microchannel heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No.9, pp. 1342-1347, 2012.
- [7] Choi S. U. and Eastman J. A., *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles*. No. ANL/MSD/CP-84938; CONF-951135-29. Argonne National Lab., IL (United States), 1995.
- [8] Trisaksri V. and Wongwises S., Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids. *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 11, No. 3, pp. 512-523, 2007.
- [9] Wen D and Ding, Y., Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions. *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 47, No. 24, pp. 5181-5188, 2004.

- [26] Aminossadati S. M., Raisi A. and Ghasemi B. Effects of magnetic field on nanofluid forced convection in a partially heated microchannel. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol.46, No.10, 1373-1382, 2011.
- [27] Li J. and Kleinstreuer, C., Thermal performance of nanofluid flow in microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, No. 4, pp. 1221-1232, 2008.
- [28] Mirzaei M. and Dehghan, M., Investigation of flow and heat transfer of nanofluid in microchannel with variable property approach. *Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, No.12, pp. 1803-1811, 2013.
- [29] Lee P. S., Garimella S. V. and Liu, D. Investigation of heat transfer in rectangular microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 9, 1688-1704, 2005.
- [30] Morini G., LScaling effects for liquid flows in microchannels. *Heat Transfer Engineering*, Vol. 27, No. 4, pp. 64-73, 2006.
- [31] Maranzana G., Perry I., and Maillet, D., Mini-and micro-channels: influence of axial conduction in the walls. *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 47, No. 17-18, pp. 3993-4004, 2204.