



## بررسی عددی انتقال حرارت نانوسیال در میکروکانال‌های همگرا و واگرا به روش دوفازی ترکیبی

فرهاد رضوان‌نژاد، جواد رستمی\*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۹  
بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۲۲  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۳  
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۳/۰۳

### کلمات کلیدی:

نانوسیال  
میکروکانال همگرا و واگرا  
روش دوفازی ترکیبی

**خلاصه:** امروزه استفاده از نانوسیالات در میکروکانال‌ها برای خنک‌کاری قطعات میکروالکترونیکی کاربرد زیادی دارد. در این مطالعه، جریان و انتقال حرارت نانوسیال در یک میکروکانال همگرا و واگرا بررسی شده است. معادلات حاکم به روش المان محدود و مدل مخلوط دوفازی در نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیکیس حل شده‌اند. نتایج این شبیه‌سازی برای اعداد رینولدز (۱۰۰-۷۰۰) و غلظت‌های مختلف نانوذرات (۰/۰۲-۰/۰۵) برای دو میکروکانال واگرا و همگرا با شیب‌های مختلف (۰ تا ۰/۰۵) به دست آمده است. همچنین، اثر دو نانوسیال مختلف آب-مس و اتیلن‌گلیکول-مس در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است. قطر نانوذرات برابر با ۵۰ نانومتر و عرض متوسط میکروکانال‌ها ۵۰ میکرون است. نتایج شامل عدد ناسلت و ضریب عملکرد برای حالات مختلف به دست آمده است. برای نانوسیال آب-مس با کسر حجمی ۱ درصد در میکروکانال همگرا با شیب ۳ درصد و رینولدز ۱۰۰ نسبت به میکروکانال تخت برای میکروکانال همگرا حدود ۱/۶ برابر و برای میکروکانال واگرا ۱/۱ برابر افزایش می‌یابد. در این حالت ضریب عملکرد برای میکروکانال همگرا و واگرا به ترتیب ۱/۳۷ و ۱/۷۴ است. در همین شرایط برای نانوسیال اتیلن‌گلیکول-مس عدد ناسلت برای میکروکانال همگرا نسبت به میکروکانال تخت ۱/۲۲ برابر و برای واگرا ۱/۱۳ برابر می‌شود. در این حالت نیز ضریب عملکرد برای میکروکانال همگرا و واگرا به ترتیب ۱/۱۷ و ۱/۴ است.

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر بحث استفاده از نانوسیال استفاده زیادی در صنعت داشته است. نانوسیالات نسبت به سیال پایه مانند آب خواص ترموفیزیکی متفاوتی همچون هدایت حرارتی، پخش حرارتی، ویسکوزیته و ... دارند. میکروکانال‌ها نیز به دلیل نسبت کم سطح جانبی به حجم و تاثیر آن بر خنک‌کاری قطعات ریز، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف از جمله صنایع پزشکی، فضایی، نفت و پتروشیمی، الکترونیک و غیره دارند و در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌اند. این تحقیقات دربرگیرنده جنبه‌های مختلف موضوع است.

ایستمن و همکاران [۱] با اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیال‌های مختلف که از سیال پایه آب و روغن با نانوذرات مس، اکسید مس و آلومینا، با اضافه کردن ۵ درصد کسر حجمی نانوذرات بهبود حدوداً ۶۰ درصدی در هدایت حرارتی نانوسیال را مشاهده کردند. پاک و چو [۲] انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری نانوسیالات در لوله‌های دایره‌ای به صورت تجربی در ناحیه توسعه‌یافته با افزایش عدد رینولدز و افزایش کسر حجمی برای نانوسیالات

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: jrostami@razi.ac.ir

آب اکسید آلومینیوم با قطر ذرات ۱۳ نانومتر و آب اکسید تیتانیوم با قطر ۲۷ نانومتر را بررسی کردند. نتیجه بررسی آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز میزان انتقال حرارت افزایش قابل توجهی داشته است. داس و همکاران [۳] و نیز پوترا و همکاران [۴] با بررسی تجربی و آزمایشگاهی مخلوط نانوسیال آب و آلومینا مشاهده کردند که با افزایش دمای نانوسیال با وجود افزایش ناچیز در ویسکوزیته، هدایت حرارتی مؤثر به میزان قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. هریس و همکاران [۵] با بررسی نانوذرات اکسید مس و آلومینیوم در سیال پایه آب برای لوله حلقوی با قطر داخلی ۶ میلی‌متر و قطر خارجی ۳۲ میلی‌متر و با مقایسه نتایج تجربی به دست آمده با نتایج مدل همگن (روابط تک فازی با خواص مؤثر نانوسیال) دریافتند که مدل همگن (تک فاز)، بهبود انتقال حرارت به‌ویژه در غلظت حجمی زیاد را به خوبی حدس نمی‌زند. میرمعصومی و بهزادهمهر [۶] و نیز اکبری‌نیا و لائور [۷] با مطالعه اثر اندازه نانوذرات بر نرخ انتقال حرارت آزاد و اجباری در نانوسیال با استفاده از روش دوفازی مخلوط به این نتیجه رسیدند که با کاهش قطر نانوذرات نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

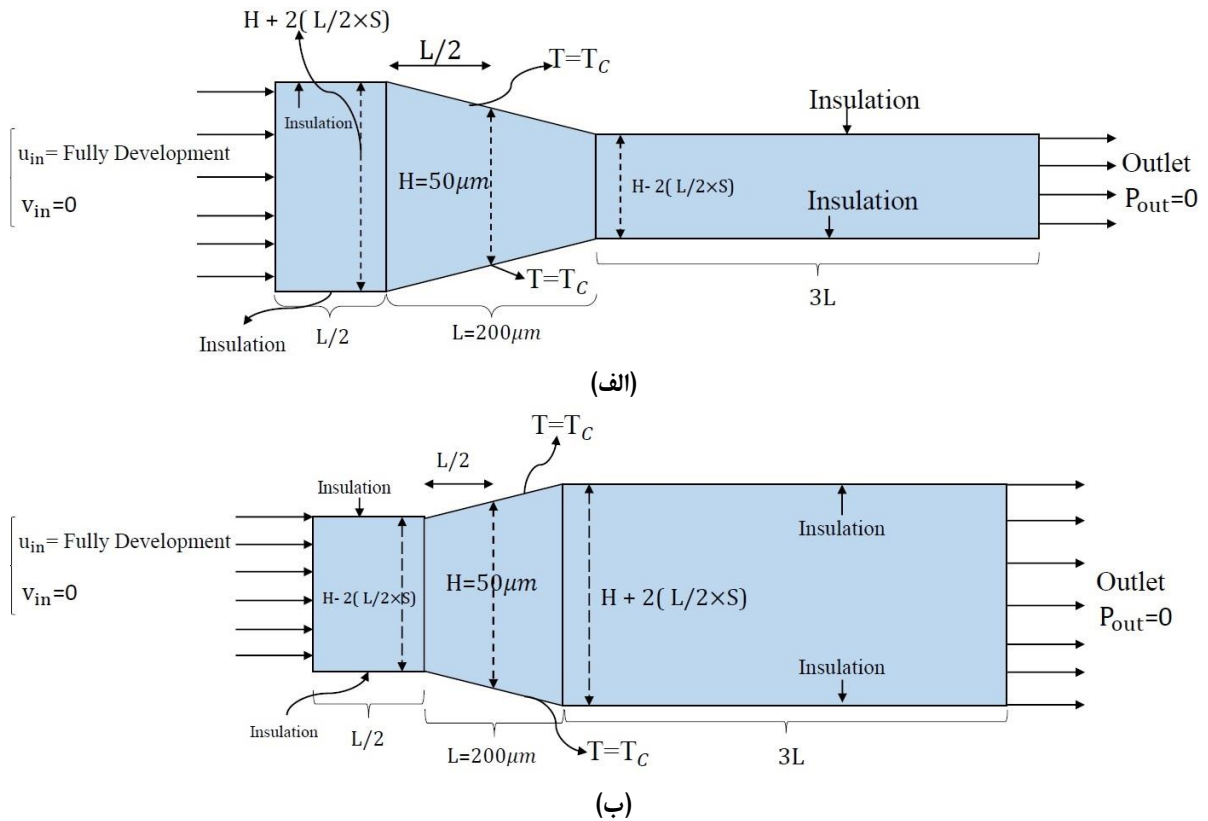


مشخصه دیگر هندسه مورد مطالعه، ابعاد ریز آن در حد میکروکانال می‌باشد. عملکرد و قابلیت اطمینان طولانی مدت دستگاه‌های الکترونیکی تا حد زیادی تحت تأثیر روش‌های مدیریت حرارتی آن‌ها قرار دارد. با پیشرفت فناوری در چند دهه گذشته، استفاده از وسایل الکترونیکی مینیاتوری به شدت افزایش یافته است. این دستگاه‌ها تا ۱۰۰۰ وات بر سانتی‌متر مربع گرما تولید می‌کنند. این گرمای تولید شده دمای قطعه را در حین کار افزایش و در نتیجه عملکرد این دستگاه‌ها را کاهش می‌دهد [۸]. در زمینه جریان و انتقال حرارت در میکروکانال‌ها نیز مطالعات وسیعی انجام شده است. برای اولین بار در سال ۱۹۸۰ میلادی از میکروکانال‌های سیلیکونی با هدف خنک‌کاری نیمه‌هادی‌های استاندارد استفاده شد. در سال ۱۹۸۱ تا کرمن و پیس [۹] برای دفع حرارت از میکروکانال‌های سیلیکونی با استفاده از آب به عنوان سیال عامل استفاده کردند. در مطالعه آن‌ها عرض کانال حدود ۶۰ میکرون و ارتفاع کانال بین ۲۸۷ تا ۳۷۶ میکرون متغیر بود. این میکروکانال‌ها حدود ۷۹۰ وات بر سانتی‌متر مربع شار حرارتی را دفع می‌کردند و دمای تراشه را کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نگه می‌داشتند. وو و چنگ [۱۰] با بررسی آزمایشگاهی ضریب اصطکاک درون میکروکانال‌های دوزنقه‌ای با ضریب شکل‌های مختلف و همچنین در بررسی آزمایشگاهی دیگر به بررسی انتقال حرارت در میکروکانال‌های ذورنق‌ای پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند که عدد ناسلت برای میکروکانال‌هایی که پارامترهای هندسی بزرگتر و ناهمواری سطح بیشتری دارند افزایش می‌یابد. کوهل و همکاران [۱۱] به بررسی آزمایشگاهی جریان درون میکروکانال‌های مستقیم با قطر هیدرولیکی ۲۵ تا ۱۰۰ میکرون و محاسبه افت فشار در آن‌ها پرداختند. چای و همکاران [۱۲] مطالعات عددی بر روی بهبود انتقال حرارت در یک میکروکانال با هندسه پرپودیک را انجام دادند. نتایج حل عددی آن‌ها شامل ضریب اصطکاک ظاهری و عدد ناسلت، با نتایج تجربی، انطباق خوبی را نشان داد. دوریوهان و همکاران [۱۳] با مطالعه تجربی و سه‌بعدی عددی، اثر همگرا یا واگرا بودن میکروکانال در جریان سیال و انتقال حرارت را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در میکروکانال همگرا، شار حرارتی تقریباً ثابت و انتقال حرارت در آن نسبت به میکروکانال واگرا بیشتر است.

در زمینه استفاده از نانوسیالات در خنک‌کاری میکروکانال‌ها نیز مطالعاتی انجام شده است. وینوس و ساکیتانانتان [۱۴] به صورت تجربی به بررسی ویژگی‌های انتقال حرارت و جریان یک سینک حرارتی میکروکانال باله‌دار مورب با مقاطع پنج‌ضلعی و مثلثی پرداختند. نتایج نشان داد که نرخ انتقال حرارت و افت فشار برای سینک حرارتی پنج‌ضلعی در مقایسه با کانال

مثلثی به علت ایجاد جریان ثانویه تولید شده به ترتیب ۱۲/۳ و ۱۶/۵ درصد افزایش یافته است. حیدریان و همکاران [۱۵] به صورت عددی به بررسی انتقال حرارت سه‌بعدی نانوسیالات در میکروکانال با سطوح آبدوست، آبگریز و فوق آبگریز پرداختند. برای این منظور معادلات ناویر استوکس و انرژی با استفاده از روش حجم محدود حل شده‌اند. نتایج نشان داد که استفاده همزمان از سطح آبگریز و افزودن نانوذرات می‌تواند در رینولدز ۴۰۰ ضریب عملکرد را به ۱/۷۵ افزایش دهد و باعث رسیدن دمای بستر به پایین‌ترین دما شود. همچنین استفاده از نانوسیالات به عنوان خنک‌کننده عملکرد حرارتی را بهبود بخشید. یانگ و دو [۱۶] انتقال حرارت اجباری نانوسیال آب - آلومینا در یک میکروکانال مستطیلی را شبیه‌سازی کردند. در این مطالعه سه تکنیک برای افزایش انتقال حرارت استفاده شد. نتایج نشان داد که افزودن نانوسیال به میکروکانال پایه، عدد ناسلت را حداکثر تا ۳/۵ درصد افزایش می‌دهد. رستمی و همکاران [۱۷] با بررسی عددی انتقال حرارت نانوسیالات آب-مس و آب-اکسید آلومینیوم در یک میکروکانال موجی شکل به این نتیجه رسیدند که عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی و کاهش قطر ذرات افزایش می‌یابد. همچنین برای یک نانوسیال در یک میکروکانال موج‌دار در مقایسه با آب در یک میکروکانال مستقیم، عدد ناسلت تقریباً سه برابر بیشتر است. در کار دیگری رستمی و همکاران [۱۸] به بررسی عددی انتقال حرارت مزدوج نانوسیالات آب-مس و آب-اکسید آلومینیوم در میکروکانال‌های موجی شکل با استفاده از مدل تک‌فازی و دوفازی پرداختند و نشان دادند که علت اختلاف در نتایج تک‌فازی و دوفازی عدم توزیع همگن ذرات در جریان است. در این کار، برای هر دو نانوسیال برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی روابطی ارائه شده است. وینس و همکاران [۱۴] مطالعه تجربی رفتار جریان و انتقال حرارت در اثر اختلاط در نانوسیالات در میکروکانال با دو مقطع مثلثی و پنج‌ضلعی را انجام دادند. نتایج نشان داد که نرخ انتقال حرارت و افت فشار برای کانال پنج‌ضلعی در مقایسه با کانال مثلثی در اثر اختلاط در نانوسیال‌ها که می‌تواند به جریان ثانویه تولید شده در میکروکانال پنج‌ضلعی باله‌دار مورب نسبت داده شود، افزایش یافته است. همچنین اثر اختلاط، باعث افزایش نرخ انتقال حرارت برای هر دو نوع نانوسیال آب-مس و آب-اکسید آلومینیوم در میکروکانال پنج‌ضلعی می‌شود.

با توجه به مطالعات انجام شده بر جریان نانوسیالات در میکروکانال‌ها، بررسی ویژگی‌های حرارتی این سیالات با ضریب هدایت حرارتی بیشتر نسبت به سیال پایه دارای اهمیت است. در مطالعات انجام شده می‌توان به اهمیت بالای استفاده از نانوسیالات و پتانسیل آن‌ها در جذب حرارت و



شکل ۱. شماتیکی از هندسه مورد بررسی در شبیه‌سازی (الف) میکروکانال همگرا (ب) میکروکانال واگرا

Fig. 1. Schematic of the a) convergent microchannel b) divergent microchannel

## ۲- معادلات حاکم، شرایط مرزی و روش حل

هندسه مورد مطالعه، یک میکروکانال دوبعدی است که از سه بخش تشکیل شده است. با توجه به شکل ۱، دو بخش ابتدایی و انتهایی، دو میکروکانال مستقیم و عایق و بخش میانی میکروکانال همگرا و یا واگرا و در شرایط دما ثابت هستند.

در این شبیه‌سازی مساله دوبعدی، سیال نیوتنی، جریان آرام، دائمی و تراکم‌ناپذیر فرض شده است. روابط مورد استفاده برای خواص ترموفیزیکی نانوسیال به صورت زیر است.

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

$$(\rho C_p)_{nf} = \frac{(1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p}{\rho_{nf}} \quad (2)$$

همچنین کاربرد میکروکانال برای ایجاد تغییرات در جریان و انتقال حرارت پی‌برد. در مطالعات انجام شده با تغییر پارامترهای مختلف همچون عدد رینولدز، هندسه میکروکانال، غلظت، نوع سیال پایه، نوع ذرات و پارامترهای مختلف دیگر، می‌توان اثر آن‌ها بر جریان و انتقال حرارت را مشاهده نمود. در این پژوهش، علاوه بر بررسی اثرات پارامترهای مهم و تغییرات آن‌ها در جریان و انتقال حرارت، اثر هندسه واگرا و همگرای میکروکانال برای نانوسیال‌های مختلف با شیب‌های مختلف بدنه در رینولدزهای مختلف برای نانوذرات مس و دو نوع سیال پایه شامل آب و اتیلن گلیکول مورد بررسی قرار گرفته است. برای افزایش دقت نسبت به مدل تک‌فازی، از روش مخلوط دوفازی برای شبیه‌سازی مسئله استفاده شده است. زیرا یکی از دلایل عدم پیش‌بینی رفتار نانوسیال در مقایسه با نتایج تجربی این است که در روش یک‌فازی توزیع ذرات در سیال، همگن، فرض می‌شود. درحالی‌که در عمل به علت اختلاف چگالی نانوذرات و سیال پایه، توزیع ذرات حین حرکت و در انحنای مسیر، همگن نخواهد ماند [۱۸]. اما در روش‌های دوفازی از جمله روش مخلوط که در این مقاله استفاده شده است، توزیع ذرات، همگن فرض نمی‌شود و برای آن معادله حل می‌شود.

جدول ۱. خواص ترموفیزیکی سیالات پایه و نانوذرات

Table 1. thermophysical properties of the Nano-particle and base fluids

چگالی	ضریب هدایت حرارتی	ویسکوزیته دینامیکی	ظرفیت گرمایی ویژه	عدد پرانتل
$(\frac{kg}{m^3})$	$(\frac{W}{m.K})$	$(\frac{kg}{m.s})$	$(\frac{J}{kg.K})$	
آب	۰/۶۰۱	۰/۰۰۱۰۰۳	۴۱۸۴	۶/۹۸
اتیلن گلیکول	۰/۲۳۳	۰/۰۱۶۴۸	۲۴۱۱/۶	۱۷۰/۵۷
مس	۳۸۶	-	۳۸۳/۱	-
آلومینیوم اکسید	۳۸	-	۷۶۲	-

مدل مخلوط، یک مدل چندفازی ساده شده است. این مدل، برای مدل کردن جریان‌های چندفازی که فازها با سرعت‌های مختلف حرکت می‌کنند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل مخلوط می‌تواند  $n$  فاز شامل سیال یا ذرات را با حل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای مخلوط، معادله کسر حجمی برای فاز ثانویه و همچنین روابط جبری برای سرعت‌های نسبی مدل کند. فازها در این مدل، به عنوان یک محیط پیوسته پخش شده در هم در نظر گرفته می‌شوند. مدل مخلوط مفهوم سرعت لغزش را با کمک حرکت فازها در سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد. بنابراین، این مدل، یک مدل براساس تعادل نیرویی برای فاز پراکنده برای محاسبه سرعت نسبی است. همچنین، به خاطر اتصال قوی بین فازها، مدل مخلوط برای مخلوط‌های ذره-مایع مناسب‌تر از مخلوط‌های ذره-گاز است. یکی از مشکلات اساسی در مدل‌های چندفازی به سطح مشترک بین فازها و ناپیوستگی‌های مربوط به آن برمی‌گردد. بنابراین، اطلاعات تجربی بخش مهمی از مدل را تشکیل می‌دهد. در مقایسه با مدل تک‌فازی، مدل مخلوط، در عین داشتن دقت مناسب فقط به مقدار کمی محاسبات بیشتری دارد. لازم به ذکر است که فازها می‌توانند با سرعت یکسانی حرکت کنند، که در این صورت مدل مخلوط به مدل چندفازی همگن تبدیل خواهد شد. به این منظور، مخلوطی را که شامل چند فاز است در نظر می‌گیریم و فرض می‌کنیم در آن سیال یک محیط پیوسته را تشکیل داده است و ذرات توزیعی شامل ذرات جامد هستند.

$$k_{nf} = k_f \left[ 1 + \frac{k_p d_f \phi}{k_f d_p (1-\phi)} (1 + 25000Pe) \right] \quad (3)$$

رابطه (۳) رابطه پاتل [۱۹] است و برای نانوسیالات شامل نانوذرات فلزی و اکسید فلزی و سیال پایه آب و اتیلن گلیکول قابل استفاده است و در آن،

$$Pe = \frac{2k_B \theta}{\alpha_f \pi \mu_f d_p}, \quad k_B = 1.3807 \times 10^{-23} \frac{J}{K} \quad (4)$$

در رابطه فوق  $k_B$  ثابت بولتزمن است.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{1 - 34.87 \left( \frac{d_p}{d_f} \right)^{-0.3} \phi^{1.03}} \quad (5)$$

رابطه فوق یک رابطه تجربی برای پیش‌بینی لزجت نانوسیالات و توسط ماسیمو و همکاران ارائه شده است [۲۰]. خواص ترموفیزیکی مواد استفاده شده مطابق با مراجع [۲۱-۲۴] در جدول ۱ ارائه شده است.

در معادلات فوق،  $V_{mk}$  سرعت نفوذ است که به صورت سرعت نسبی فاز  $k$  به سرعت مرکز جرم مخلوط تعریف می‌شود و به شکل زیر است:

$$V_{mk} = V_k - V_m \quad (11)$$

همچنین، فشار مخلوط در معادله مومنتوم با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\nabla p_m = \sum_{k=1}^n \phi_k \nabla p_k \quad (12)$$

### ۲-۳- معادله کسر حجمی

$$\nabla \cdot (\phi_k V_m) = -\nabla \cdot (\phi_k V_{mk}) \quad (13)$$

سرعت نسبی به صورت تفاضل سرعت فاز پراکنده (ذرات نانو) و سرعت فاز پیوسته (سیال پایه) به شکل زیر است.

$$V_{fk} = V_k - V_f \quad (14)$$

همچنین، سرعت نفوذی باید از طریق سرعت نسبی (لغزشی) به دست آید که به صورت اختلاف سرعت فاز پراکنده به سرعت فاز پیوسته تعریف می‌شود.

$$V_{fk} = V_k - V_f \quad (15)$$

سرعت نفوذی فاز پراکنده که به شکل سرعت‌های نسبی نشان داده می‌شود از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_{mp} = V_{pf} - \sum_{k=1}^n \frac{\phi_k \rho_k}{\rho_m} V_{fk} \quad (16)$$

از ویژگی مهم مدل مخلوط تعداد کم متغیرها به نسبت مدل چندفازی کامل است. مدل مخلوط برای دوفاز یا بیشتر طراحی شده است و می‌تواند یک مدل تک سیاله دوفازی باشد که دو فاز با سرعت‌های مختلف حرکت می‌کنند و کسر حجمی هر فاز در هر حجم کنترل با حجم کنترل دیگر متفاوت باشد [۲۵، ۲۶]. در این مساله سیال یک مخلوط دوفازی است که در آن سیال پایه یک محیط پیوسته و ذرات جامد محیط گسسته را تشکیل می‌دهند.

### ۲-۱- معادله بقای جرم

$$\nabla \cdot (\rho_m V_m) = 0 \quad (6)$$

که در آن چگالی متوسط ترکیب است و برای نانو سیالی با دو جزء شامل ذرات و سیال از رابطه (۱) محاسبه می‌شود و  $V_m$  سرعت متوسط ترکیب است از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$V_m = \frac{1}{\rho_m} \sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k V_k \quad (7)$$

در این رابطه  $n$  تعداد فازهای مخلوط و  $V_k$  سرعت هر جزء است.

### ۲-۲- معادله بقای مومنتوم مدل مخلوط

$$\nabla \cdot (\rho_m V_m V_m) = -\nabla p_m + \nabla \cdot \tau_m + \nabla \cdot \tau_{Dm} \quad (8)$$

که در آن تنش‌ها به دو صورت تنش برشی متوسط  $\tau_m$  و تنش نفوذی ناشی از لغزش فازها  $\tau_{Dm}$  هستند و از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\tau_m = \frac{1}{\rho_m} \sum_{k=1}^n \phi_k \tau_k \quad (9)$$

$$\tau_{Dm} = -\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k V_{mk} V_{mk} \quad (10)$$

عدد ناسلت، یک عدد بی‌بعد مهم در مسائل انتقال حرارت جابه‌جایی است و نسبت نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی به هدایت حرارتی در نانوسیال است.

$$Nu = \frac{hH_{avg}}{k_{nf}} \quad (22)$$

که در آن طبق قانون سرمایه‌ش نیوتن و محاسبه شار حرارتی دیواره از قانون هدایت حرارتی فوریه، ضریب جابه‌جایی به‌دست می‌آید:

$$h = \frac{q_w}{T_w - T_b} = \frac{-k_{nf} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_w}{T_w - T_b} \quad (23)$$

و دمای متوسط سیال نیز که در رابطه (۲۳) استفاده شده‌است. طبق قانون بقای انرژی از رابطه (۲۴) محاسبه می‌شود.

$$T_b = \frac{\int u \cdot T dy}{\int u dy} = \frac{\int u \cdot T dy}{U_{b,avg} H_{avg}} \quad (24)$$

مخرج کسر در واقع همان دبی حجمی سیال است.

## ۲-۵- شرایط مرزی

با توجه به اندازه ابعاد کانال و این که سیال پایه مایع است، عدد نادسن به اندازه‌های کوچک هست که برای سرعت و دما روی دیواره‌ها شرط عدم لغزش سرعت و عدم پرش دمایی لحاظ شود. مطابق با شکل ۱، میکروکانال دارای سه ناحیه است. در نواحی ابتدایی و انتهایی که کانال مستقیم است دیواره‌ها عایق و در قسمت میانی که کانال همگرا یا واگرا است دمای دیواره ثابت است. در ورود برای سرعت شرط توسعه‌یافتگی و برای دما شرط دمای یکنواخت و در خروج شرط خروج جریان در نرم‌افزار فعال شده‌است. مقدار سرعت متوسط سیال یا  $U_{b,in}$  نیز از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$u_{in} = 6U_{b,in} \frac{y}{H} \left( 1 - \frac{y}{H} \right) \quad (25)$$

با فرض این که فقط یک فاز پراکنده وجود داشته باشد، معادله سرعت نسبی (لغزشی) بین دو فاز، که حاصل فعل و انفعال بین دو فاز نیز می‌باشد، توسط ماین و همکاران به صورت زیر ارائه شده‌است [۲۷].

$$V_{pf} = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_m)}{18\mu_f f_{drag}} a \quad (17)$$

در رابطه فوق مقدار ضریب درگ<sup>۱</sup>، توسط شیلر و نیومن معرفی شده‌است [۲۸].

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re_p^{0.687}, & Re_p \leq 1000 \\ 0.15 Re_p, & Re_p > 1000 \end{cases} \quad (18)$$

و مقدار شتاب در معادله (۱۷) از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$a = g - (V_m \cdot \nabla) V_m \quad (19)$$

همچنین، معادله رینولدز در رابطه ضریب درگ به‌شکل زیر می‌باشد.

$$Re_p = \frac{\rho_p |V_{pf}| d_p}{\mu_m} \quad (20)$$

## ۲-۴- معادله انرژی

این معادله نیز همان معادله انرژی در مسائل انتقال حرارت جابه‌جایی است. با این تفاوت که سرعت، در جملات سمت چپ با استفاده از سرعت هر دو فاز به‌دست می‌آید و خواص چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه به صورت دقیق برای هر فاز استفاده می‌شود. اما مقدار ضریب هدایت حرارتی از رابطه (۳) به‌دست می‌آید.

$$\nabla \cdot [\phi V_p (\rho_p C_{p,p}) + (1-\phi) V_f (\rho_f C_{p,f})] T = \nabla \cdot (k_{nf} \nabla T) \quad (21)$$



### ۳-۱- بررسی استقلال نتایج از شبکه

برای مطالعه مساله از شبکه بی‌سازمان در نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیکس استفاده شده‌است. به علت شدید بودن گرادیان‌های سرعت و دما در نزدیکی دیواره‌ها، شبکه استفاده شده دارای فشردگی در نزدیک بدنه است. در این بخش، شبیه‌سازی برای میکروکانال همگرا که در آن جنس نانوسیال آب-مس و غلظت ۱ درصد و شیب ۰/۰۵ اجرا شده است. آنالیز شبکه بر مبنای تغییر ناسلت محلی در طول کانال در شکل ۲-الف برای تعداد نقاط مختلف نشان داده شده‌است.

ملاحظه می‌شود هنگامی که تعداد نقاط از حدود ۲۲۰۰۰ نقطه بیشتر می‌شود اثر قابل توجهی بر نتایج ندارد و حداکثر مقدار خطا از ۰/۵ درصد کمتر است. از این رو، مقدار حداکثر ابعاد شبکه در حدود ۲ میکرومتر برای این مسئله کافی است و تعداد ۲۲۰۵۸ نقطه برای شبیه‌سازی استفاده شده‌است. در شکل ۲-ب، نمونه شبکه استفاده شده در بخشی از ناحیه حل نشان داده شده‌است.

### ۳-۲- اعتبارسنجی نتایج

برای اطمینان از درستی نتایج شبیه‌سازی عددی، نتایج حاضر برای نانوسیال آب اکسیدآلومینیوم با قطر نانوذرات ۵۰ نانومتر و شرط مرزی شار ثابت برابر با ۲۳/۸ کیلووات بر مترمربع با کار تجربی ون و دینگ [۲۸] در لوله‌ای به طول ۹۷ سانتیمتر و قطر ۴/۵ میلی‌متر و غلظت نانوذرات ۰/۶ درصد با عدد رینولدز ۱۱۵۰ و کار عددی فایزن و همکاران [۸] در کانال همگرایی به طول یک متر و ارتفاع ورودی ۴/۵ میلی‌متر و ارتفاع خروجی ۲/۷۵ میلی‌متر و غلظت نانوذرات ۴ درصد با عدد رینولدز ۷۰۰ مقایسه شده‌است. در شکل‌های ۳ و ۴، نتایج پژوهش حاضر با دو مقاله نامبرده مقایسه شده‌است. در شکل ۳ مقایسه با مرجع [۸] انجام شده‌است و خطای میانگین در حدود ۴ درصد است، که تطابق نتایج را می‌توان قابل قبول دانست. همچنین، در شکل ۴ مقایسه با کار آزمایشگاهی [۲۹] انجام شده‌است، خطای میانگین در این مقایسه نیز حدود ۵ درصد است.

### ۳-۳- بحث در نتایج کار حاضر

هدف مطالعه، بررسی تاثیر پارامترهایی مانند شیب میکروکانال (شامل مقادیر صفر، ۰/۰۳ و ۰/۰۵)، غلظت نانوذرات (شامل ۱ و ۲ درصد) و عدد رینولدز (شامل ۱۰۰، ۴۰۰ و ۷۰۰) با دو نوع سیال پایه آب و اتیلن گلیکول و نانوذرات مس به قطر ۵۰ نانومتر بر میزان انتقال حرارت، افت فشار و ضریب عملکرد در میکروکانال است. در شکل‌های زیر برای محور طول‌ها واحد بر حسب میکرون می‌باشد.

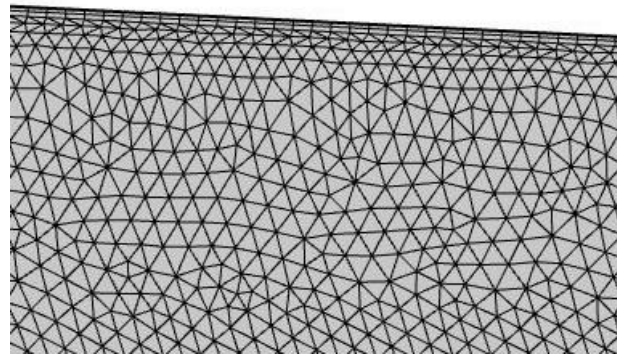
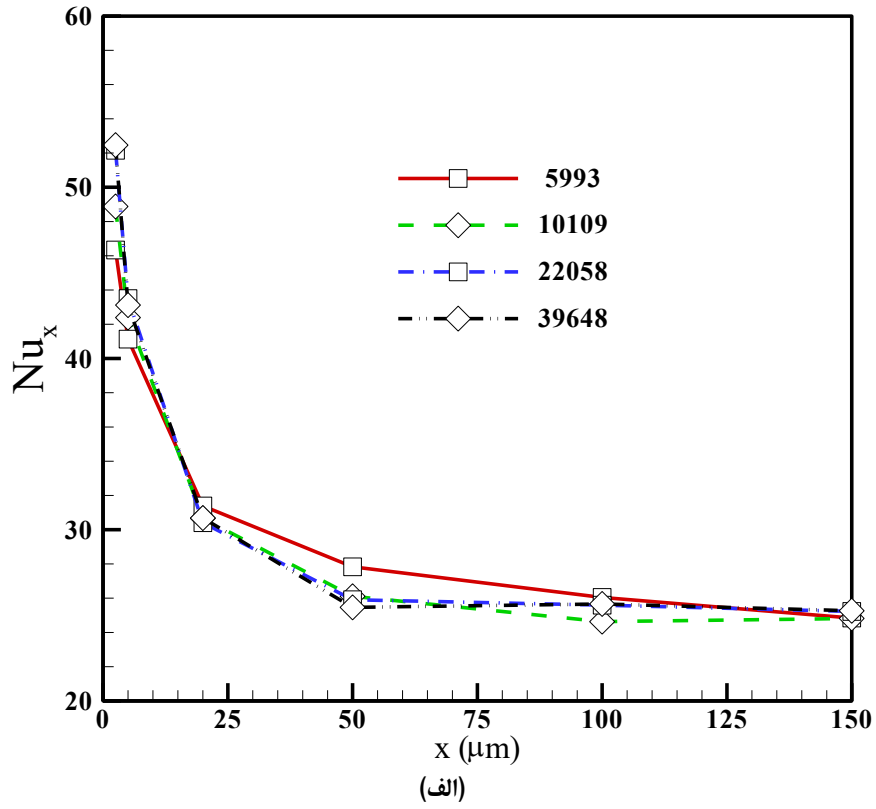
این رابطه، سرعت توسعه یافته است. در واقع فرض بر این است که جریان قبل از رسیدن به ابتدای ناحیه حل توسعه یافته شده‌است.

$$U_{b,in} = \frac{\mu_{nf} Re}{\rho_{nf} H_{in}} \quad (26)$$

معادلات حاکم با استفاده از نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیکس حل شده‌است. شکل کلی معادلات حاکم به صورت جملات جابه‌جایی (سمت چپ معادلات ممتوم و انرژی) و جملات پخش (جملات چسبندگی در ممتوم و هدایت حرارتی در معادله انرژی) و جمله چشمه (گرادیان فشار در معادلات ممتوم) است. معمولاً در مسائل انتقال حرارت جابه‌جایی معادله انرژی بعد از به دست آمدن میدان سرعت حل می‌شود. اما در این روش که روش دوفازی مخلوط است، معادله غلظت حجمی نیز حل می‌شود و در هر تکرار خواص نانوسیال توسط غلظت به دست آمده (روابط ۱-۴) به روز می‌شوند. در نتیجه تمامی معادلات باید با هم حل شوند. به هر حال ابتدا به سراغ حل معادلات ممتوم می‌رویم. اما از آن جا که این معادلات دارای جمله چشمه به صورت گرادیان فشار هستند و فشار خود از مجهولات مساله است. در نتیجه معادلات ممتوم و پیوستگی باید با هم حل شوند. به این معادلات، معادلات به هم پیوسته سرعت و فشار می‌گوییم و مولفه‌های سرعت به دست آمده از آن در معادلات غلظت حجمی و انرژی به کار برده می‌شوند. معیار همگرایی برای تمامی معادلات رسیدن خطای نتایج (اختلاف نتایج هر تکرار با تکرار قبل) به کمتر از  $10^{-5}$  است.

### ۳-۳- بحث در نتایج

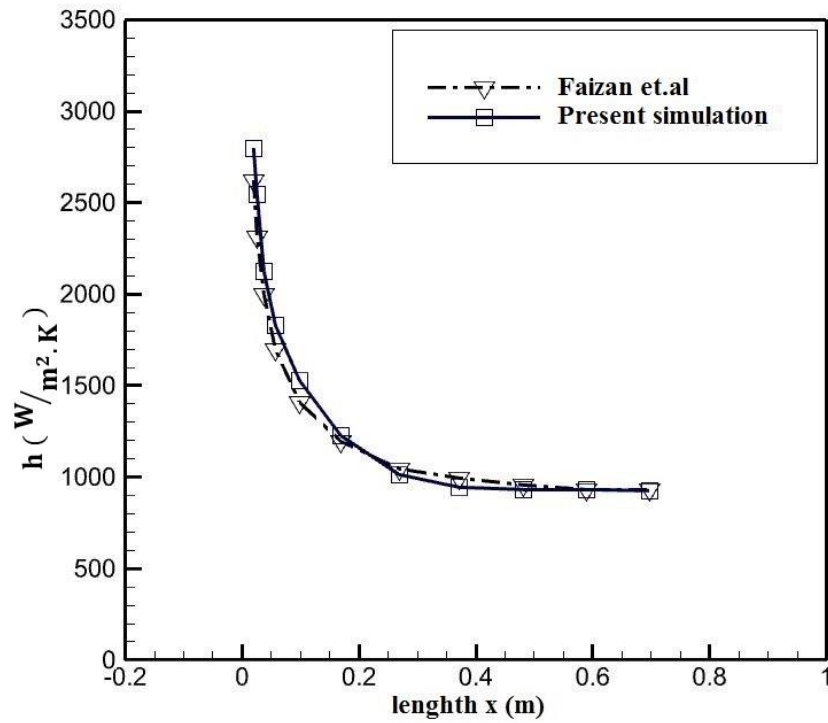
همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، شرایط مرزی و ابعاد هندسه مشخص و میکروکانال از سه بخش تشکیل شده‌است که شامل بخش‌های ابتدایی، میانی و پایانی است و ابعاد هر کدام مشخص هستند. در هندسه‌های فوق مقادیر طول و ارتفاع متوسط کانال به ترتیب ۲۰۰ و ۵۰ میکرون می‌باشد و مقدار شیب نیز از متغیرهای مسئله و دارای سه مقدار ۰، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ است. مقدار دمای ثابت در دیواره بخش میانی میکروکانال‌ها نیز برابر با ۷۰ درجه سانتیگراد است. نانوسیال‌های بررسی شده دو نانوسیال آب-مس و اتیلن گلیکول-مس می‌باشند. قطر ذرات ۵۰ نانومتر است که در شبیه‌سازی ثابت فرض می‌شود. همچنین عدد رینولدز دارای سه مقدار ۱۰۰، ۴۰۰ و ۷۰۰ است.



شکل ۲. الف) استقلال نتایج از تعداد نقاط شبکه ب) نمونه شبکه تولید شده

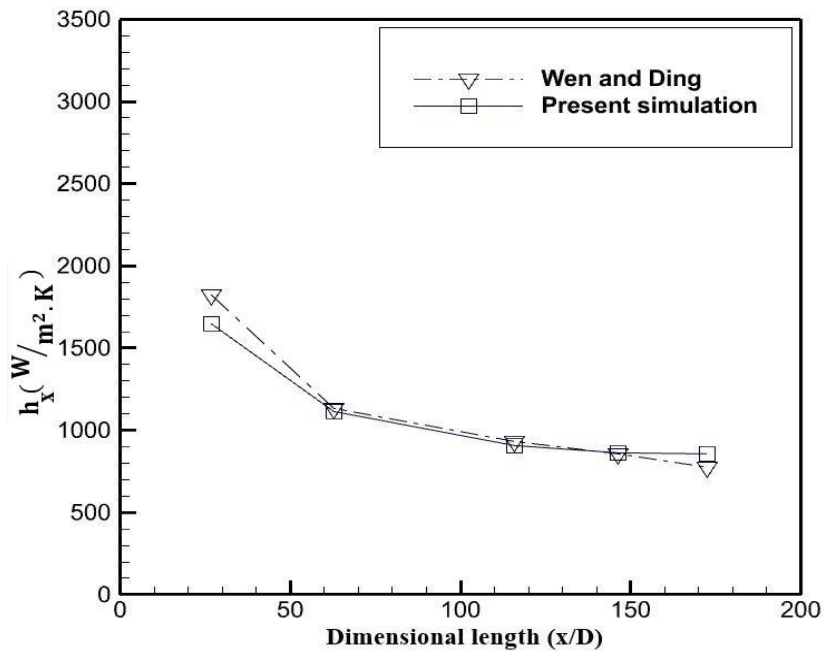
Fig. 2. a) grid independency, b) a sample of the generated grid





شکل ۳. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی برای کار حاضر و مقایسه با کار عددی [۸]

Fig. 3. local convective heat transfer coefficient for present work and comparison it with a numerical work [8]



شکل ۴. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی برای کار حاضر و مقایسه با کار آزمایشگاهی [۲۹]

Fig. 4. local convective heat transfer coefficient for present work and comparison it with an experimental work [20]

### ۳-۳-۱- بررسی اثر شیب بدنه در میکروکانال‌های همگرا و واگرا

شکل ۵، تغییرات ناسلت محلی در راستای طول میکروکانال در اعداد رینولدز مختلف در میکروکانال همگرا با شیب‌های صفر، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ برای نانوسیال آب-مس در کسر حجمی ۰/۰۱ را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در تمامی رینولدزها با دور شدن از ورودی میکروکانال عدد ناسلت محلی کاهش می‌یابد. همچنین در مقاطع مختلف، مقدار عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز و نیز افزایش شیب کانال افزایش می‌یابد. علت افزایش عدد ناسلت با شیب کانال به شتاب گرفتن سیال حین پیشروی در کانال مربوط می‌شود. به عبارتی با کاهش اندازه ارتفاع میکروکانال طبق قانون بقای جرم، سرعت جریان و در نتیجه اینرسی آن افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت باعث تقویت جملات جابه‌جایی (جملات سمت چپ معادله ۲۱) و در نتیجه افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و عدد ناسلت می‌شود.

اگرچه مساله اصلی در این کار افزایش نرخ انتقال حرارت است، اما از آن‌جا که در مسائل انتقال حرارت جابه‌جایی به واسطه جریان سیال هم نرخ انتقال حرارت مهم است و هم افت فشار و هدف مطلوب مهندسی افزایش نرخ انتقال حرارت و کاهش افت فشار است، در نتیجه برای ارزیابی بهتر مساله بهتر است ضریب عملکرد که از رابطه

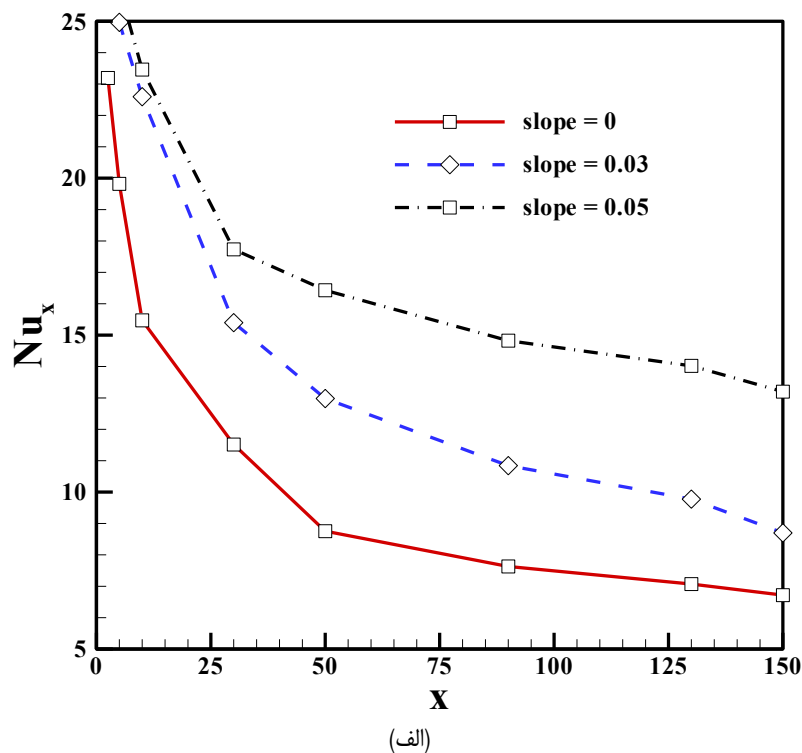
$$PEC = \frac{\left(\frac{Nu}{Nu_0}\right)}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (27)$$

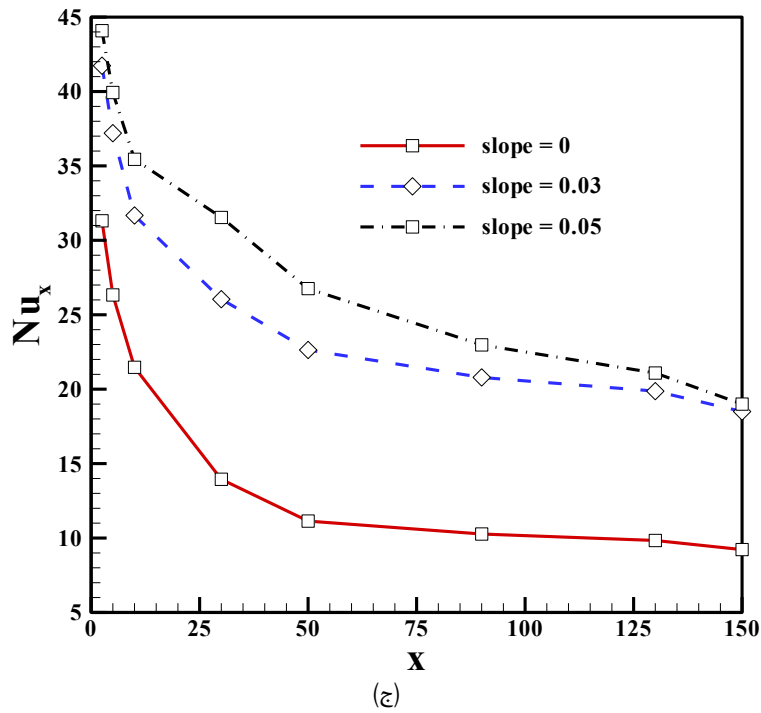
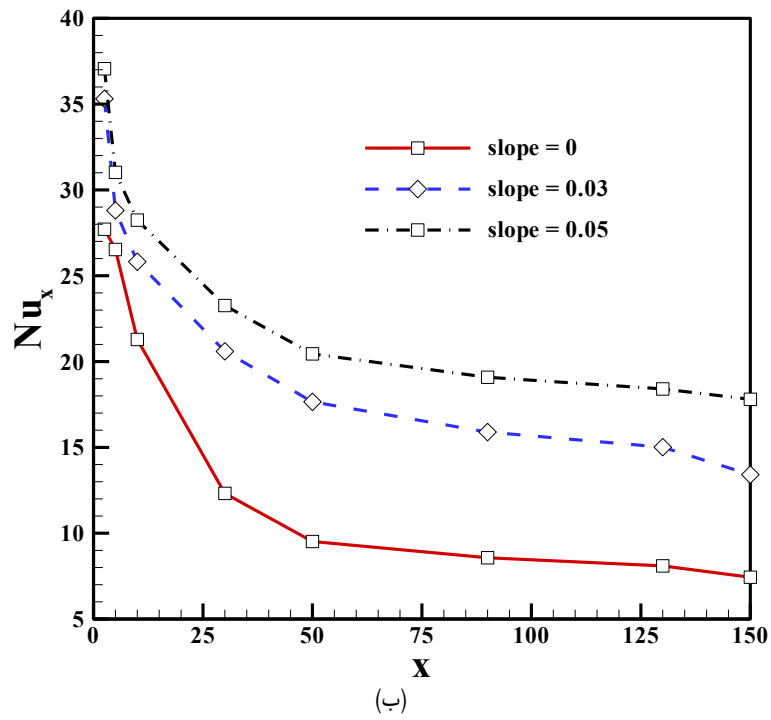
به دست می‌آید، در حالت‌های مختلف مقایسه شود. در این رابطه اندیس 0 برای اشاره به کانال بدون شیب،  $f$  ضریب اصطکاک در دیاگرام مودی است و در رابطه افت هد قرار دارد. از طرفی، برخلاف کانال بدون شیب که افت هد برابر با افت فشار است، در کانال‌های واگرا یا همگرا افت هد طبق شکل انتگرالی معادله انرژی و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\frac{p_{in} - p_{out}}{\rho} + \frac{U_{b,in}^2 - U_{b,out}^2}{2} = e_L = f \frac{L}{H_{avg}} \frac{U_{b,avg}^2}{2} \quad (28)$$

در نتیجه،

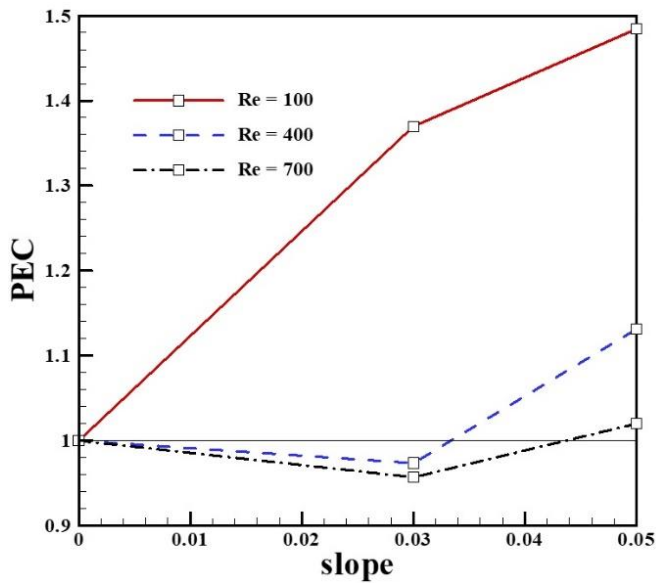
$$f = \frac{2H_{avg}}{LU_{b,avg}^2} \left( \frac{p_{in} - p_{out}}{\rho} + \frac{U_{b,in}^2 - U_{b,out}^2}{2} \right) \quad (29)$$



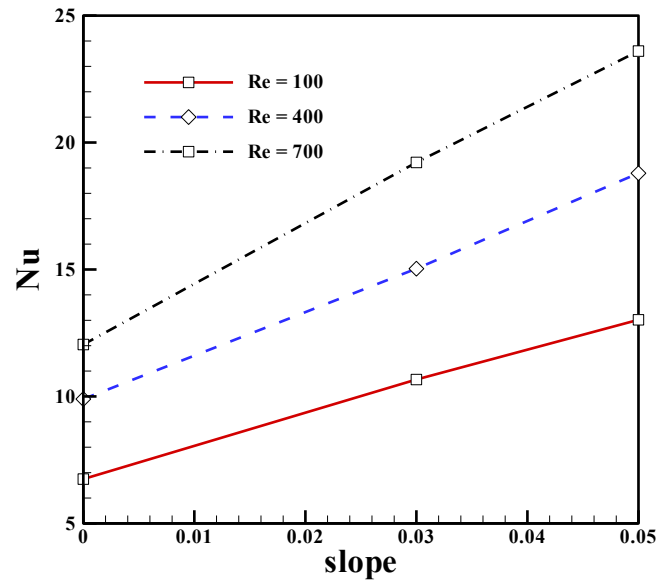


شکل ۵. تاثیر شیب بر عدد ناسلت محلی در میکروکانال همگرا برای نانوسیال آب-مس در کسر حجمی ۱ درصد و (الف) عدد رینولدز ۱۰۰ و (ب) عدد رینولدز ۴۰۰ (ج) عدد رینولدز ۷۰۰

Fig. 5. effect of slope on the local Nusselt number in converge microchannel for 1% Water-Cu nanofluid, a) Re=100, b) Re=400, c) Re=700



ب



الف

شکل ۶. عدد ناسلت متوسط (الف) و ضریب عملکرد (ب) در میکروکانال همگرا برحسب شیب در رینولدزهای مختلف و کسر حجمی ۱ درصد

Fig. 6. a) mean Nusselt number, b) performance coefficient in converge microchannel versus slope in different Reynolds number and 1% volume fraction

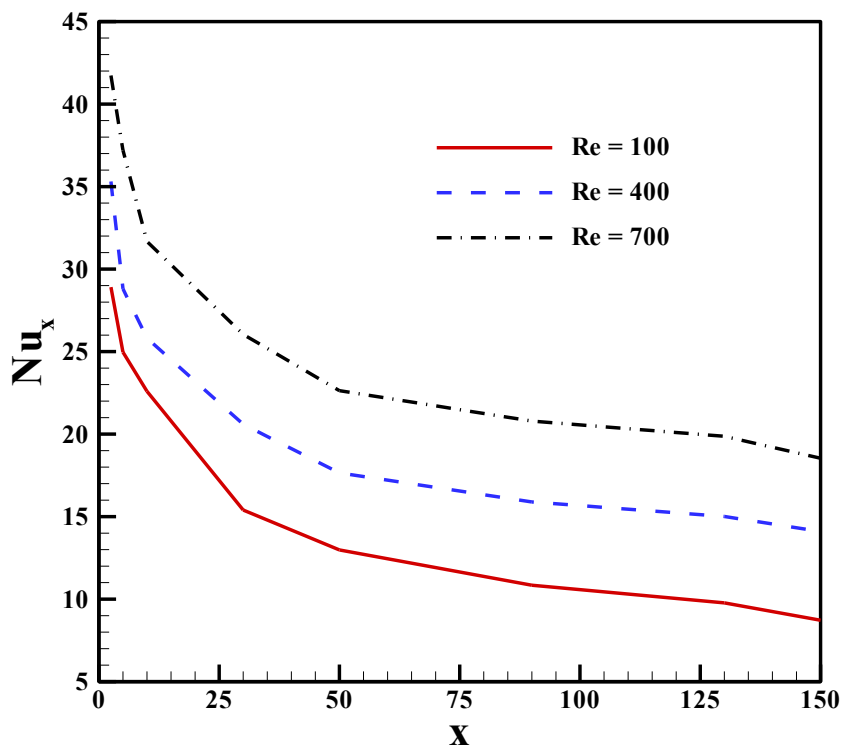
در شکل ۸ تغییرات ناسلت متوسط برحسب عدد رینولدز برای میکروکانال همگرا با میکروکانال واگرا مقایسه شده است. برای هر دو میکروکانال، شیب برابر با ۰/۰۳ برای نانوسیال آب-مس با غلظت حجمی ۱٪ است. ملاحظه می شود که عدد ناسلت برای هر دو شیب با افزایش عدد رینولدز افزایش می یابد. همچنین برای کانال همگرا عدد ناسلت بیشتر از کانال واگرا است. در شکل ۸-ب نیز ضریب عملکرد برای رینولدزهای مختلف در میکروکانال های همگرا و واگرا نشان داده شده است. ملاحظه می شود ضریب عملکرد در رینولدز ۱۰۰ بیشتر است. این ضریب با افزایش عدد رینولدز ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد. ضریب عملکرد برای کانال واگرا بیشتر از کانال همگرا است.

تاثیر هندسه کانال به صورت واگرا و همگرا با شیب ۰/۰۳ و کسر حجمی ۱ درصد بر عدد ناسلت در شکل ۹، نشان داده شده است. ملاحظه می شود که کانال واگرا عدد ناسلت کمتری دارد. این موضوع می تواند به علت کاهش سرعت جریان با پیشروی سیال در کانال باشد. به این ترتیب ضخامت لایه های مرزی جریان و حرارت بیشتر رشد می کنند. این پدیده باعث افزایش مقاومت لایه مرزی حرارتی در مقابل انتقال حرارت می شود.

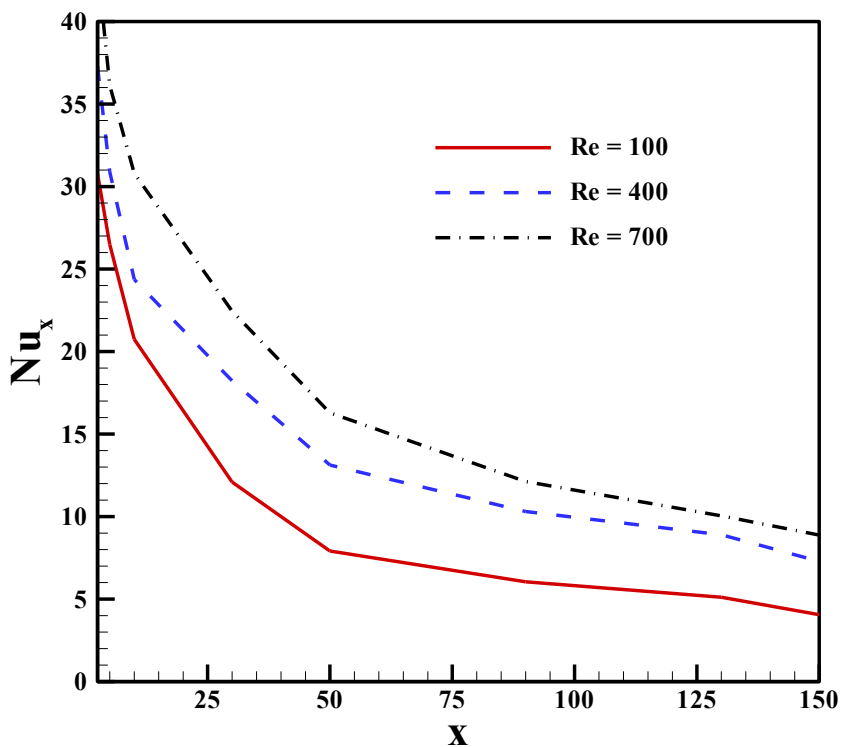
در شکل ۶، عدد ناسلت متوسط و ضریب عملکرد برای مقادیر ناسلت متوسط گزارش شده در شکل ۵ مشاهده می شود. طبق نتایج این شکل، در هر رینولدزی، با افزایش شیب، مقدار عدد ناسلت افزایش می یابد. این افزایش عدد ناسلت در رینولدزهای بیشتر، محسوس تر است. ملاحظه می شود که در تمامی موارد، عدد ناسلت بیشتر از عدد ناسلت برای میکروکانال تخت است و این افزایش عدد ناسلت با افزایش شیب کانال بیشتر می شود. اختلاف نتایج کانال همگرا با کانال تخت با افزایش عدد رینولدز افزایش می یابد.

اما از نظر ضریب عملکرد در رینولدزهای مختلف شاهد رفتار متفاوتی خواهیم بود. به طوری که در رینولدز ۱۰۰ که گرادیان سرعت نزدیک دیواره کمتر و در نتیجه افت فشار کمتری دارد، افزایش عدد ناسلت به گونه ای است که در نهایت ضریب عملکرد بیشتری نسبت به اعداد رینولدز بیشتر دارد.

شکل ۷، عدد ناسلت را در اعداد رینولدز مختلف برای کانال واگرا و همگرا مقایسه می کند. شیب هر دو میکروکانال ۰/۰۳ و کسر حجمی نانوذرات ۱ درصد برای نانوسیال آب-مس است. ملاحظه می شود که عدد ناسلت در میکروکانال همگرا در شرایط یکسان در مقایسه با میکروکانال واگرا، مقادیر بیشتری دارد. دلیل آن همان افزایش سرعت جریان در کانال همگرا است که باعث تقویت جملات جابه جایی در معادله انرژی می شود.



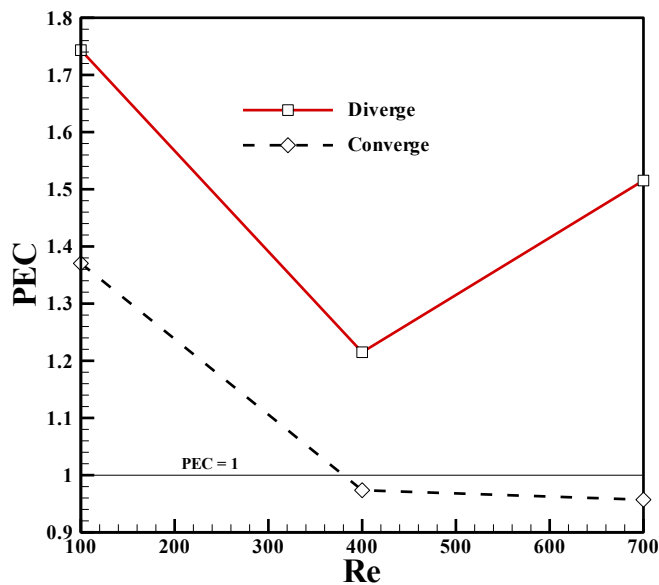
(الف)



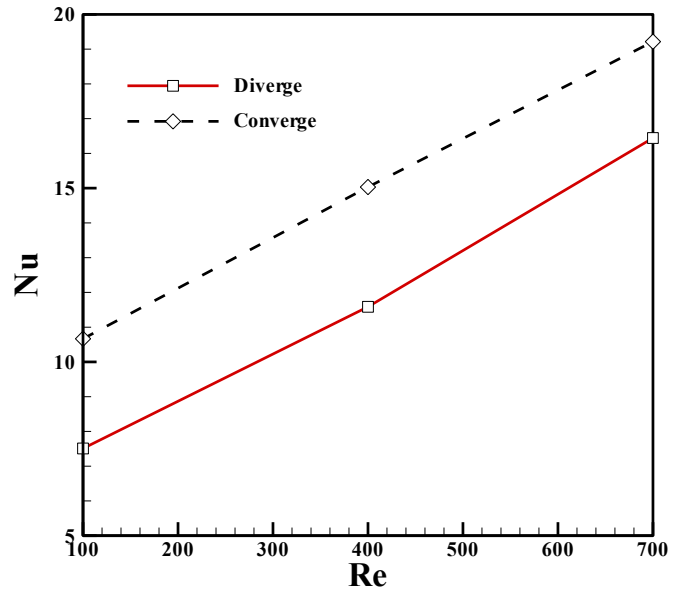
(ب)

شکل ۷. تغییرات عدد ناسلت محلی در میکروکانال (الف همگرا ب) واگرا با شیب ۰/۰۳+ برای نانوسیال آب-مس در کسر حجمی ۱ درصد

Fig. 7. local Nusselt number in microchannel with 0.03 slope for Water-Cu nanofluid with 1% volume fraction  
a) converge b) diverge microchannel



(ب)



(الف)

شکل ۸. تغییرات عدد ناسلت (الف) و ضریب عملکرد (ب) در میکروکانال همگرا و واگرا با شیب ۳ درصد برای نانوسیال آب-مس در کسر حجمی ۱ درصد برحسب عدد رینولدز

Fig. 8. a) mean Nusselt number, b) performance coefficient in converge and diverge microchannel with 3% slope and 1% volume fraction of Water-Cu nanofluid versus Reynolds number

کاهش می‌یابند. در نتیجه جملات جابه‌جایی در این معادله تقویت و باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود. قابل توجه است که در شرایط یکسان، عدد ناسلت در میکروکانال همگرا از میکروکانال واگرا بیشتر است. در شکل ۱۱ نیز مقادیر ناسلت متوسط گزارش شده‌است. ملاحظه می‌شود با افزایش ناچیز در غلظت حجمی نانوذرات تا یک درصد عدد ناسلت برای هر دو نوع کانال حدود ۱/۵ برابر می‌شود. افزایش بیشتر غلظت تا ۲ درصد اگرچه باعث افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود، اما این افزایش زیاد چشمگیر نیست.

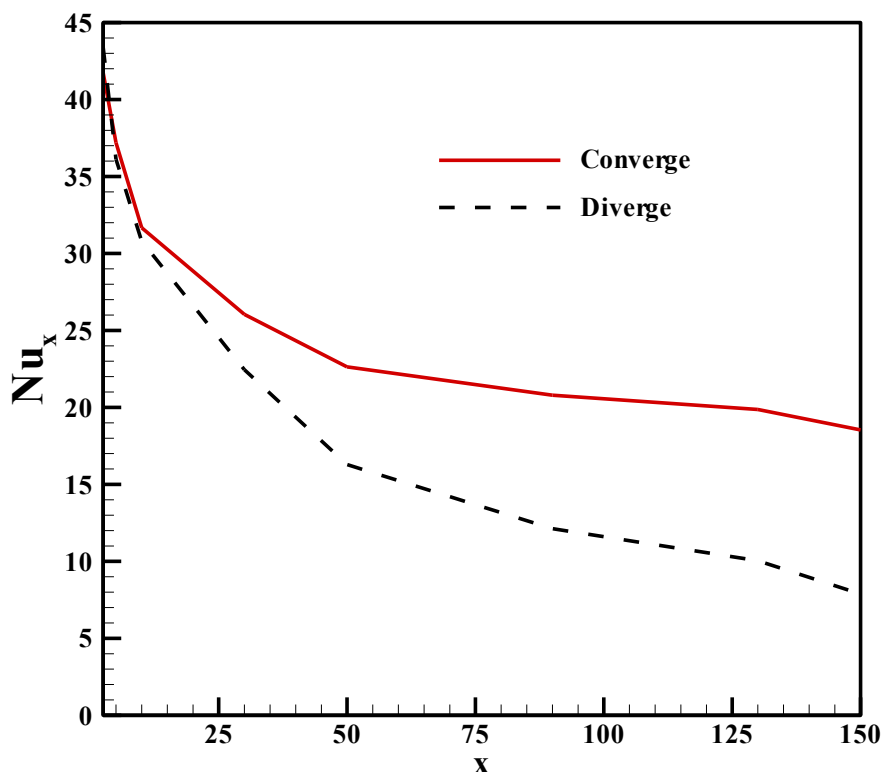
ضریب عملکرد که در آن هم نرخ انتقال حرارت و هم افت فشار مهم است در شکل ۱۱ (ب) نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود برای این سیال پایه نیز، ضریب عملکرد برای کانال واگرا بیشتر از کانال همگرا است. به عبارتی چنانچه برای استفاده‌کننده، انتقال حرارت اهمیت بیشتری داشته باشد، مطابق با نتایج شکل ۱۱ (الف) کانال واگرا مناسب‌تر است. اما اگر هم انتقال حرارت و هم افت فشار هر دو مهم باشند، کانال واگرا به واسطه کم بودن گرادیان سرعت نزدیک بدنه افت فشار کمتری دارد و نسبت نرخ انتقال حرارت به افت فشار برای کانال واگرا بیشتر است. همچنین ملاحظه می‌شود

عدد ناسلت متوسط برای کانال واگرا در شکل ۹ برابر با ۱۶/۴۴ و برای کانال همگرا ۱۹/۲۲ می‌باشد. ضریب عملکرد هم که از رابطه ۲۷ محاسبه می‌شود برای کانال واگرا برابر با ۱/۴۷ و برای کانال همگرا ۰/۹۸ می‌باشد. ملاحظه می‌شود که عدد ناسلت برای کانال واگرا کمتر، اما ضریب عملکرد آن بیشتر است.

۳-۲- بررسی اثر کسر حجمی نانوذرات در میکروکانال‌های همگرا و واگرا

در شکل ۱۰، اثر کسرهای حجمی مختلف بر عدد ناسلت را برای نانوسیال اتیلن‌گلیکول-مس برای دو میکروکانال همگرا و واگرا نشان داده شده‌است. لازم به ذکر است که عدد رینولدز ۱۰۰ و شیب میکروکانال ۰/۰۳ است.

ملاحظه می‌شود که با بیشتر شدن کسر حجمی نانوذرات عدد ناسلت افزایش می‌یابد. علت این افزایش به ضریب هدایت حرارت بیشتر نانوسیال و عدد پرانتل آن برمی‌گردد. زیرا با توجه به روابط و خواص ترموفیزیکی مربوط به نانوسیال، عدد پرانتل با افزایش کسر حجمی نانوذرات، افزایش می‌یابد. با افزایش عدد پرانتل جملات پخش در معادله انرژی (معادله ۲۱)



شکل ۹. تاثیر هندسه کانال بر عدد ناسلت به صورت واگرا و همگرا با شیب ۳ درصد و کسر حجمی ۱ در رینولدز ۷۰۰

Fig. 9. a comparison of the local Nusselt for converge and diverge microchannel with 3% slope and 1% volume fraction in Re=700

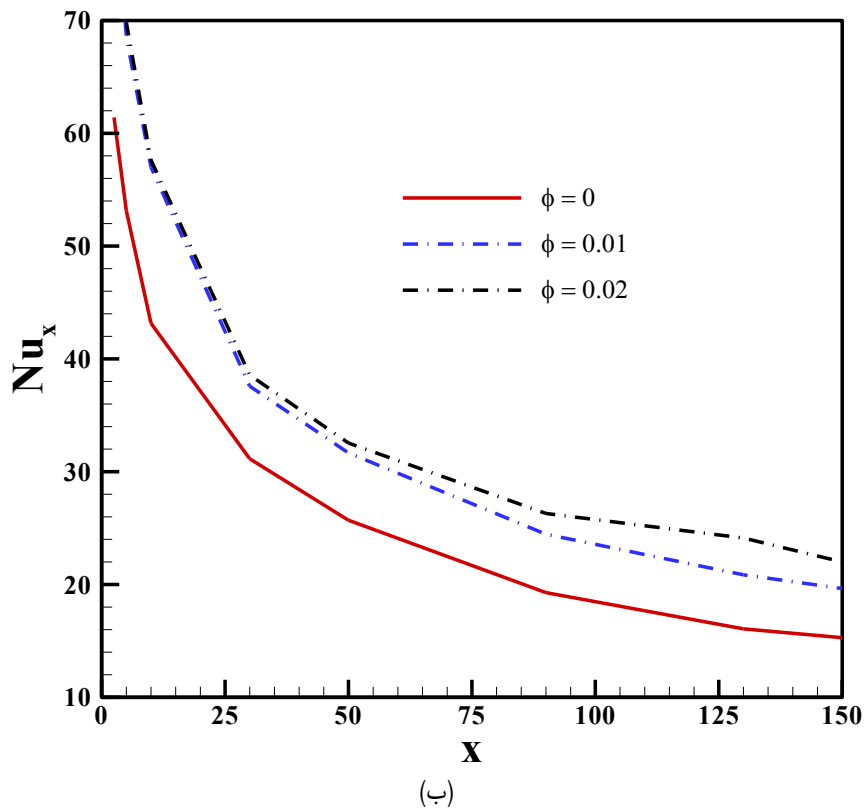
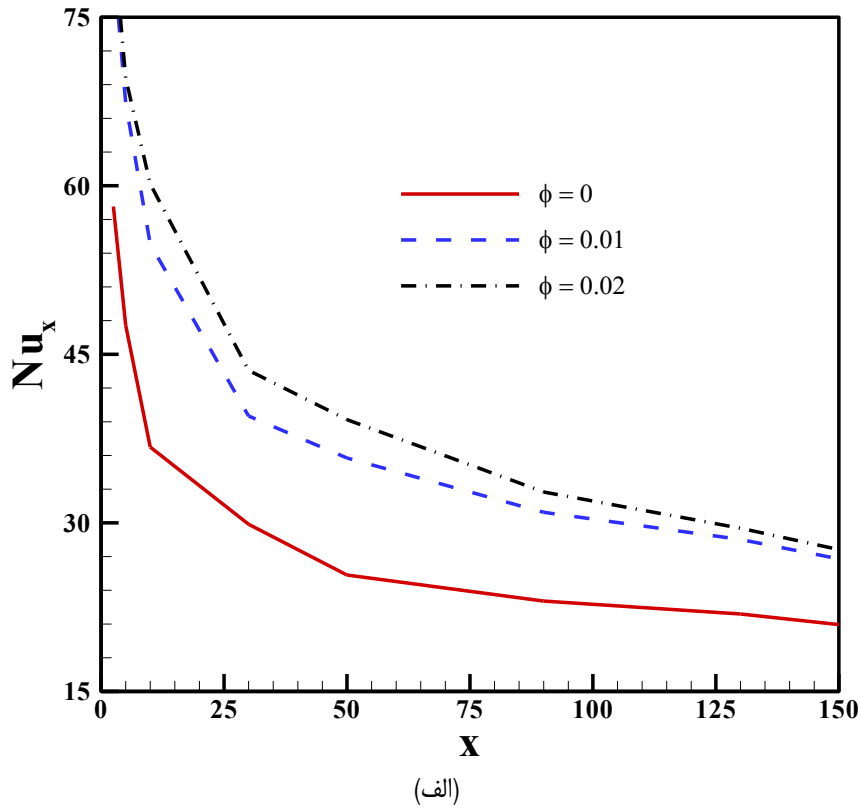
آن به ویژگی‌های ترموفیزیکی سیال اتیلن گلیکول برمی‌گردد. نکته جالب در این زمینه پایین بودن ضریب هدایت حرارتی اتیلن گلیکول در مقایسه با آب (حدود یک سوم) است. اما از آن‌جا که میزان انتقال حرارت غیر از ضریب هدایت حرارت سیال به عدد پرانتل آن نیز وابسته است، عدد پرانتل بالای اتیلن گلیکول باعث می‌شود که در عدد رینولدز یکسان، این سیال نسبت به آب دارای عدد پکلت بیشتری باشد و این باعث بیشتر بودن ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای اتیلن گلیکول با وجود ضریب هدایت حرارتی کمتر است. ناسلت متوسط و ضریب عملکرد در رینولدز ۱۰۰ و شیب ۰/۰۳ و غلظت حجمی ذرات ۰/۰۲ در کانال همگرا برای نانوسیال اتیلن گلیکول-مس برابر با ۴۵ و ۱/۱۳۵ برای نانوسیال آب-مس برابر با ۱۴ و ۱/۲۵، در کانال واگرا برای نانوسیال اتیلن گلیکول-مس برابر با ۴۲ و ۱/۳۹ برای نانوسیال آب-مس برابر با ۱۰/۸ و ۱/۵۵ به‌دست آمد. ملاحظه می‌شود به دلیل خواص ترموفیزیکی (عدد پرانتل) اتیلن گلیکول، این سیال دارای عدد ناسلت حدود ۵ برابر در کانال همگرا و بیش از ۱/۵ برابر در کانال واگرا نسبت به سیال آب می‌باشد.

با وجود این که عدد ناسلت در کانال همگرا بیشتر است اما افت فشار آن نیز به حدی زیاد است که در تمام کسرهای حجمی ضریب عملکرد آن کمتر از واحد است. اما برای کانال واگرا همواره بیشتر از واحد است. از طرفی با افزایش کسر حجمی ضریب عملکرد برای این هندسه کاهش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که اثر وجود نانوذرات بر افت فشار بیشتر اثر آن بر افزایش نرخ انتقال حرارت است.

۳-۳-۳ بررسی اثر نوع سیال پایه در میکروکانال‌های همگرا و واگرا  
جنس نانوسیال از دو نوع سیال پایه آب و اتیلن گلیکول تشکیل شده است و جنس نانوذرات نیز مس می‌باشد. در این بخش، نتایج برای مقادیر عدد رینولدز ۱۰۰، کسر حجمی نانوسیال ۲ درصد و شیب میکروکانال ۰/۰۳ برای هر دو نانوسیال آب-مس و اتیلن گلیکول-مس مطابق با شکل ۱۲ گزارش شده است.

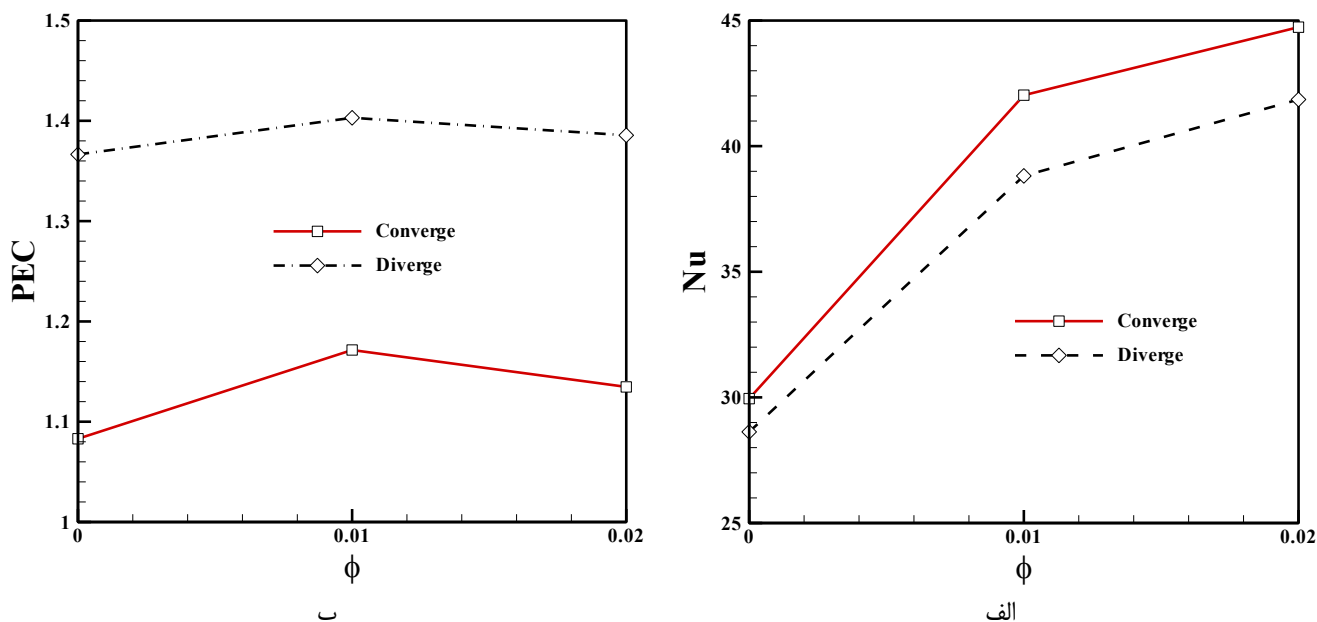
مشاهده می‌شود، استفاده از اتیلن گلیکول به‌عنوان سیال پایه در نانوسیال، باعث افزایش عدد ناسلت نسبت به سیال پایه آب می‌شود. علت





شکل ۱۰. تاثیر تغییرات کسر حجمی بر عدد ناسلت در میکروکانال (الف) همگرا (ب) واگرا با شیب ۳٪ برای نانوسیال اتیلن گلیکول-مس در عدد رینولدز ۱۰۰

Fig. 10. effect of volume fraction variations for ethylene-glycole-Cu nanofluid with  $Re=100$  for a) converge, b) di-  
verge microchannel with 3% slope



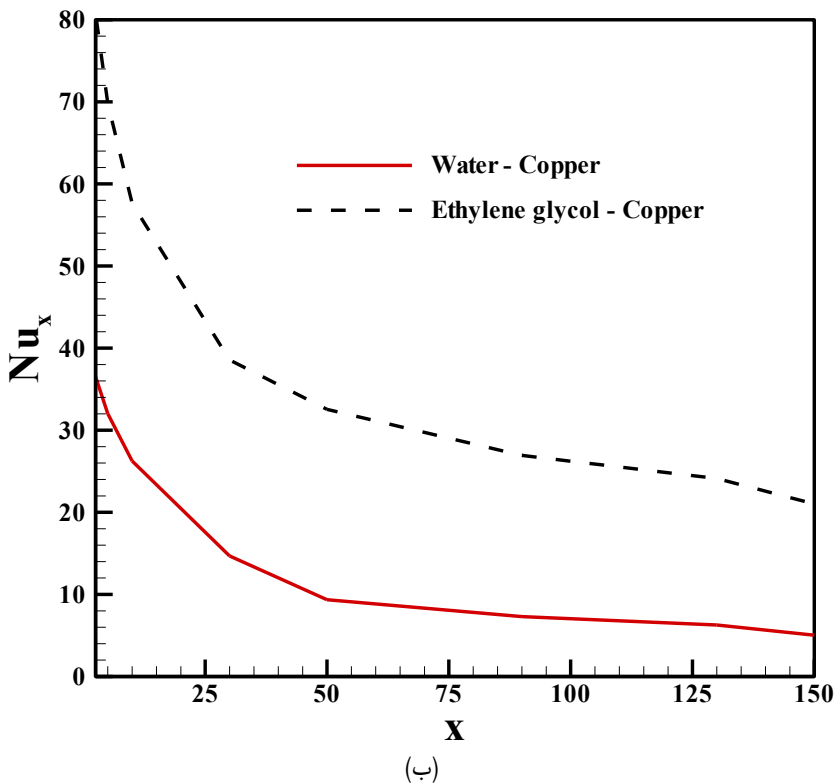
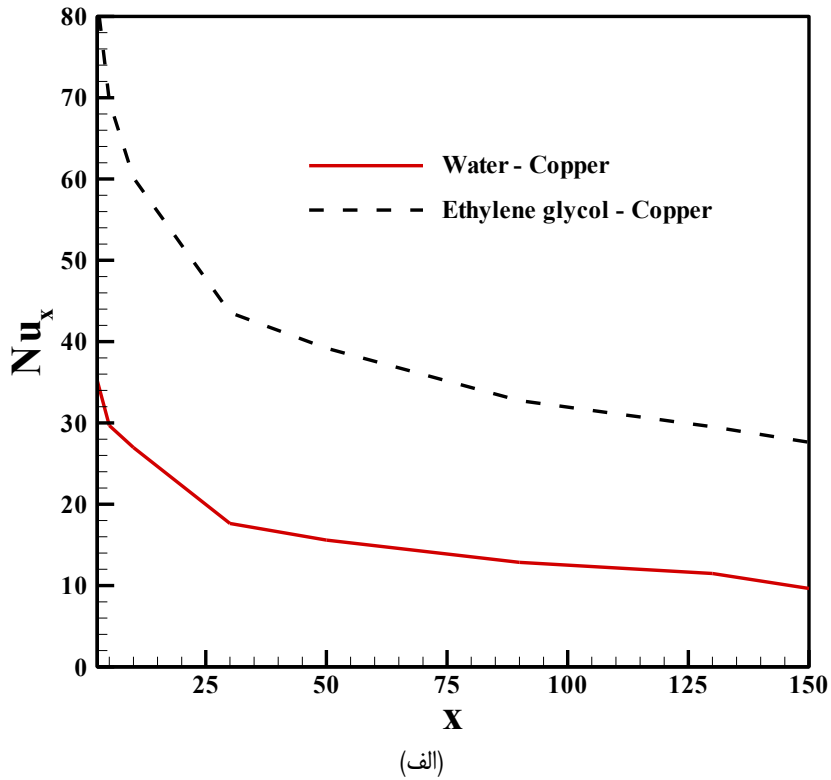
شکل ۱۱. تاثیر هندسه کانال بر (الف) عدد ناسلت متوسط (ب) ضریب عملکرد اتیلن گلیکول - مس در غلظت‌های مختلف با شیب ۳ درصد و در رینولدز ۱۰۰

Fig. 11. effect of the channel type on a) the Nusselt number, b) Performance coefficient for ethylene glycole-Cu in different volume fraction for Re=100 and 3% slope

در این حالت ضریب عملکرد برای میکروکانال همگرا و واگرا به ترتیب ۱/۳۷ و ۱/۷۴ است. در همین شرایط برای نانوسیال اتیلن گلیکول - مس عدد ناسلت برای میکروکانال همگرا نسبت به میکروکانال تخت ۱/۲۲ برابر و برای واگرا ۱/۱۳ برابر می‌شود. در این حالت نیز ضریب عملکرد برای میکروکانال همگرا و واگرا به ترتیب ۱/۱۷ و ۱/۴ است. به عبارتی میکروکانال همگرا دارای عدد ناسلت بیشتری است. دلیل آن به حرکت شتابدار سیال در میکروکانال مربوط می‌شود. اما از طرفی میکروکانال واگرا به علت کاهش گرادیان سرعت نزدیک دیواره و کاهش افت فشار، با وجود کم بودن عدد ناسلت در آن، ضریب عملکرد بیشتری دارد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله جریان و انتقال حرارت نانوسیال در میکروکانال‌های همگرا و واگرا با ارتفاع متوسط ۵۰ میکرون و طول ۲۰۰ میکرون برای دو نوع سیال پایه آب و اتیلن گلیکول و نانوذرات مس با قطر ۵۰ نانومتر برای اعداد رینولدز (۱۰۰-۷۰۰) و غلظت‌های مختلف نانوذرات (۰-۲٪) و شیب‌های مختلف (۰ تا ۰/۰۵) به روش عددی دوفازی مخلوط مطالعه شده است. نتایج شامل عدد ناسلت و ضریب عملکرد برای حالات مختلف به دست آمده است. برای نانوسیال آب - مس با کسر حجمی ۱ درصد در میکروکانال همگرا با شیب ۳ درصد و رینولدز ۱۰۰ نسبت به میکروکانال تخت برای میکروکانال همگرا حدود ۱/۶ برابر و برای میکروکانال واگرا ۱/۱ برابر افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲. مقایسه عدد ناسلت دو نانوسیال آب-مس و اتیلن گلیکول-مس در میکروکانال (الف) همگرا و (ب) واگرا با شیب ۳ درصد در رینولدز ۱۰۰ و کسر حجمی نانوذرات ۲ درصد

Fig. 12. the Nusselt number comparison for Water-Cu and ethylene glycol - Cu in a) converge, b) diverge microchannel with 3% slope for Re=100 and 2% volume fraction

## ۵- فهرست علائم

### منابع

- [1] J. A. Eastman, U. Choi, S. Li, L. Thompson, and S. Lee, Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids, MRS Online Proceedings Library (OPL), 457 (1996) 3-11.
- [2] B. C. Pak and Y. I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, Experimental Heat Transfer an International Journal, 11(2) (1998) 151-170.
- [3] S. K. Das, N. Putra, P. Thiesen, and W. Roetzel, Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids, J. Heat Transfer, 125(4) (2003) 567-574.
- [4] N. Putra, W. Roetzel, and S. K. Das, Natural convection of nano-fluids, Heat and mass transfer, 39 (8-9) (2003) 775-784.
- [5] S. Z. Heris, S. G. Etemad, and M. N. Esfahany, Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer, International communications in heat and mass transfer, 33(4) (2006) 529-535.
- [6] S. Mirmasoumi and A. Behzadmehr, Effect of nanoparticles mean diameter on mixed convection heat transfer of a nanofluid in a horizontal tube, International journal of heat and fluid flow, 29(2) (2008) 557-566.
- [7] A. Akbarinia and R. Laur, Investigating the diameter of solid particles effects on a laminar nanofluid flow in a curved tube using a two phase approach, International Journal of Heat and Fluid Flow, 30(4) (2009) 706-714.
- [8] M. Faizan, S. Pati, and P. R. Randive, Implication of geometrical configuration on heat transfer enhancement in converging minichannel using nanofluid by two phase mixture model: A numerical analysis, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 235(2) (2021) 416-427.
- [9] D. B. Tuckerman and R. F. W. Pease, High-performance heat sinking for VLSI, IEEE Electron device letters, 2(5) (1981) 126-129.
- [10] H. Wu and P. Cheng, An experimental study of

شتاب ( $m.s^{-2}$ )	a
ظرفیت گرمایی ویژه ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )	Cp
قطر (m)	d
ضریب اصطکاک	f
شتاب جاذبه ( $m.s^{-2}$ )	g
ضریب جابه جایی ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )	h
ارتفاع میکروکانال (m)	H
ضریب هدایت حرارتی ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	k
طول میکروکانال (m)	L
عدد ناسلت	Nu
فشار (Pa)	P
ضریب عملکرد	PEC
عدد پکلت	Pe
عدد رینولدز	Re
دما (C)	T
مولفه‌های سرعت ( $m.s^{-1}$ )	U,V
ابعاد در راستای افقی و عمودی	x,y
شیب	S

### حروف یونانی

ضریب پخش ( $m^2.s^{-1}$ )	$\alpha$
ویسکوزیته (Pa.s)	$\mu$
چگالی ( $kg.m^{-3}$ )	$\rho$
تنش برشی (Pa)	$\tau$
غلظت حجمی نانوذرات	$\phi$

### زیرنویس‌ها

متوسط	avg
مقدار حجمی سیال	b
سطح شیب‌دار	C
تنش نفوذی ناشی از لغزش فازها	Dm
نیروی درگ	drag
سیال	F
سرعت نسبی هر فاز با سیال	fk
سرعت نسبی ذره و سیال	fp
ورودی	In
مقدار متوسط	m
اختلاف سرعت هر فاز با مقدار متوسط	mk
اختلاف سرعت ذره با مقدار متوسط	mp

- Das, A micro-convection model for thermal conductivity of nanofluids, in International Heat Transfer Conference: Begel House Inc, 13 (2006).
- [20] M. Corcione, Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids, *Energy conversion and management*, 52(1) (2011) 789-793.
- [21] A. Ghozatloo, M. Shariaty-Niasar, and A. Rashidi, Investigation of Heat Transfer Coefficient of Ethylene Glycol/Graphenenanofluid in Turbulent Flow Regime, *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 10(4) (2014) 237-244 (in Persian).
- [22] R. K. Ibrahim, M. Hayyan, M. A. AlSaadi, S. Ibrahim, A. Hayyan, and M. A. Hashim, Physical properties of ethylene glycol-based deep eutectic solvents, *Journal of Molecular Liquids*, 276 (2019) 794-800.
- [23] M. Sheikholeslami and D. Ganji, Nanofluid convective heat transfer using semi analytical and numerical approaches: a review, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 65 (2016) 43-77.
- [24] M. Sheikholeslami and D. Ganji, Free convection of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-water nanofluid under the influence of an external magnetic source, *Journal of Molecular Liquids*, 229 (2017) 530-540.
- [25] D. A. Drew and R. T. Lahey Jr, Application of general constitutive principles to the derivation of multidimensional two-phase flow equations, *International Journal of Multiphase Flow*, 5(4) (1979) 243-264.
- [26] M. Ishii and K. Mishima, Two-fluid model and hydrodynamic constitutive relations, *Nuclear Engineering and design*, 82(2-3) (1984) 107-126.
- [27] M. Manninen, V. Taivassalo, and S. Kallio, On the mixture model for multiphase flow, 1996.
- [28] Z. Naumann and L. Schiller, A drag coefficient correlation, *Z. Ver. Deutsch. Ing.*, 77(318) (1935) 323.
- [29] D. Wen and Y. Ding, Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions, *International journal of heat and mass transfer*, 47(24) (2004) 5181-5188.
- convective heat transfer in silicon microchannels with different surface conditions, *International journal of heat and mass transfer*, 46(14) (2003) 2547-2556.
- [11] M. Kohl, S. Abdel-Khalik, S. Jeter, and D. Sadowski, An experimental investigation of microchannel flow with internal pressure measurements, *International journal of heat and mass transfer*, 48(8) (2005) 1518-1533.
- [12] L. Chai, G. Xia, L. Wang, M. Zhou, and Z. Cui, Heat transfer enhancement in microchannel heat sinks with periodic expansion-constriction cross-sections, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 62 (2013) 741-751.
- [13] V. Duryodhan, A. Singh, S. G. Singh, and A. Agrawal, Convective heat transfer in diverging and converging microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 80 (2015) 424-438.
- [14] R. Vinoth and B. Sachuthananthan, Flow and heat transfer behavior of hybrid nanofluid through microchannel with two different channels, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 123 (2021) 105194.
- [15] A. Heidarian, R. Rafee, and M. S. Valipour, Effects of wall hydrophobicity on the thermohydraulic performance of the microchannels with nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 117 (2020) 104758.
- [16] L. Yang and K. Du, Numerical simulation of nanofluid flow and heat transfer in a microchannel: the effect of changing the injection layout arrangement, *International Journal of Mechanical Sciences*, 172 (2020) 105415.
- [17] J. Rostami, A. Abbassi, and J. Harting, Heat transfer by nanofluids in wavy microchannels, *Advanced Powder Technology*, 29(4) (2018) 925-933.
- [18] J. Rostami, A. Abbassi, and M. Saffar-Avval, Numerical Heat Transfer by Nanofluids in a wavy walls Microchannel using Dispersion Method, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 51(4) (2019) 121-130 (in Persian).
- [19] H. E. Patel, K. Anoop, T. Sundararajan, and S. K.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*F. Rezvannezhad, J. Rostami, Heat Transfer of Nanofluids in Converging and Diverging Microchannels by Mixture Model, Amirkabir J. Mech Eng., 55(5) (2023) 595-616.*

**DOI:** [10.22060/mej.2023.21977.7551](https://doi.org/10.22060/mej.2023.21977.7551)



