

بررسی تأثیر هندسه و نوع نانو سیال در انتقال حرارت درون میکروکانال به کمک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

حسن بازای، احمد آذری* و مصطفی مشتاق

گروه مهندسی شیمی، دانشکده نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۹/۱۴ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۷/۸/۲۶)

چکیده - هدف این مقاله، مطالعه عددی مشخصه‌های انتقال حرارتی و جریان نانوسیالات درون میکروکانال استوانه‌ای با سطح مقطع‌های مستطیلی، مثلثی و دایره‌ای و همچنین مقایسه سیال پایه آب و دی‌اتیلن گلایکول است. اندازه و شکل این مقطع‌ها تأثیر قابل توجهی روی عملکرد گرمایی و هیدرولیکی مبدل حرارتی میکروکانال دارد. نانوسیالات استفاده شده در این تحقیق شامل آب و دی‌اتیلن گلایکول به عنوان سیال پایه و نانوذرات شامل Cu ، Al_2O_3 ، SiO_2 و CuO است. برای حل مسئله و استخراج داده‌های مورد نیاز یک شبیه‌سازی سه بعدی برای میکروکانال با استفاده از نرم افزار ANSYS FLUENT 15.0 انجام شد و تأثیر شکل سطح مقطع جریان سیال و نوع نانو سیالات استفاده شده، روی پارامترهای انتقال حرارت و جریان سیال بررسی شد. از نتایج به دست آمده در این تحقیق، مشاهده می‌شود که با افزودن نانوذرات به سیال پایه میزان انتقال حرارت و افت فشار افزایش پیدا می‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که کانال‌های مستطیلی بهترین عملکرد را در بین سه هندسه بررسی شده دارا است و بدترین عملکرد مربوط به کانال‌های مثلثی است زیرا میزان ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در کانال‌های مستطیلی و دایره‌ای به ترتیب ۱۹/۲۶ و ۱۰/۸۸ درصد بیشتر از کانال‌های مثلثی گزارش شده است و در پایان، سیال پایه دی‌اتیلن گلایکول به جای آب در یک دبی یکسان استفاده شد و مشخص شد که عملکرد سیال پایه آب به مراتب بهتر از دی‌اتیلن گلایکول است به این ترتیب که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای سیال پایه آب در غلظت سه درصد نانوسیال Al_2O_3 به میزان ۸۰ درصد بیشتر از سیال پایه دی‌اتیلن گلایکول به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت، افت فشار، مبدل حرارتی، میکروکانال، نانوسیال، مدل سازی.

Investigation of the Effect of Geometry and Type of Nanofluids on the Heat Transfer Inside the Microchannel using Computational Fluid Dynamics (CFD)

H. Bazai, A. Azari* and M. Moshtagh

Faculty of Petroleum, Gas and Petrochemical Engineering (FPGPE), Persian Gulf University, Bushehr, Iran.

Abstract: The purpose of this article is the numerical study of flow and heat transfer characteristics of Nanofluids inside a

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: azari.ahmad@pgu.ac.ir

cylindrical microchannel with rectangular, triangular, and circular cross-sections. The size and shape of these sections have a significant impact on the thermal and hydraulic performance of the microchannel heat exchanger. The Nanofluids used in this work include water and De-Ethylene Glycol (DEG) as the base fluids and Al_2O_3 , Cu, SiO_2 and CuO as the nanoparticles. To solve the problem and extract the required data, a 3-D simulation was performed for the microchannel using ANSYS FLUENT 15.0 software and the effect of the cross-sectional shape of the fluid flow and the type of nanoparticles on the thermal transfer and fluid flow parameters was studied. From the obtained results, it can be observed that the addition of nanoparticles to the base fluid increases the heat transfer and pressure drop. The results also show that rectangular channels have the best performance among the three geometries examined as its heat transfer coefficient was 19.26% higher than the triangular cross section which had the worst performance.

Keywords: Heat transfer; Pressure drop; Heat exchanger; Microchannel; Nanofluids; Modeling.

فهرست علائم

خروجی	out	A	مساحت سطح مقطع (m^2)
فشار (Pa)	P	b	بالک سیال
ذره	p	bf	سیال پایه
محیط (m)	P	c	کانال
فلاکس حرارتی (W/m^2)	q''	C_p	ظرفیت گرمایی ویژه ($J/kg \cdot K$)
دما (K)	T	D	قطر (m)
دیوار	w	D_h	قطر هیدرولیک (m)
ویسکوزیته ($N \cdot s/m^3$)	μ	h	ضریب انتقال حرارت جابه جایی ($W/m^2 \cdot K$)
سرعت (m/s)	v	in	ورودی
دانسیته (kg/m^3)	ρ	k	ضریب انتقال حرارت هدایتی ($W/m \cdot K$)
کسر حجمی ذرات	ϕ	nf	نانوسیال

۱- مقدمه

قرار داده‌اند. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت نسبت به سیال پایه به صورت خالص به طور چشمگیری افزایش پیدا می‌کند و شرایط انتقال حرارت بهبود می‌یابد. علاوه بر آن، در منابع تحقیقات زیادی نیز به بررسی تأثیر شکل سطح مقطع کانال‌ها، نحوه قرارگیری کانال‌ها، تعداد کانال‌ها و اندازه و ساختمان میکروکانال پرداخته شده است [۱]. در این بخش نیز مطالعات در دو زمینه عددی و تجربی انجام شده است. هرناندو و همکاران [۸] در یک مطالعه تجربی مشخصه‌های انتقال حرارتی و جریان سیال را درون دو میکرو-مبدل حرارتی با اندازه‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. مهم‌ترین نتیجه‌ای که آنها از این آزمایش گرفتند ارتباط بین افت فشار و میزان انتقال حرارت بود که با کوچک‌تر شدن اندازه همدیگر را ختشی کردند

در دهه‌های اخیر با توسعه دستگاه‌های الکترونیکی در ابعاد بسیار کوچک، نیاز به بهبود شرایط انتقال حرارت با استفاده از دستگاه‌هایی در ابعاد هرچه کوچک‌تر افزایش یافته است. مبدل‌های حرارتی میکروکانال برای این منظور می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. علاوه بر این، به تازگی استفاده از فناوری‌های جدید نظیر فناوری‌های نانو در این زمینه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. به کارگیری نانوذرات و تولید یک سوسپانسیون پایدار که نانوسیال نامیده می‌شود، می‌تواند انتقال حرارت را به صورت قابل توجهی بهبود بخشد [۱]. کارهای تجربی [۲-۴] و عددی [۵-۷] زیادی افزودن نانوذرات به یک سیال پایه و تأثیر آن بر مشخصه‌های انتقال حرارتی و جریان سیال را مورد بررسی

و در کل مشخص شد کوچک‌تر شدن میکروکانال بازدهی را بهبود نمی‌بخشد. این بدان معناست که یک نقطه بهینه بین اندازه میکروکانال، میزان افت فشار و میزان انتقال حرارت وجود دارد. یانگ و همکاران [۹] عملکرد انتقال حرارتی یک میکروکانال با پره‌های سوزنی شکل را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. پنج سطح مقطع متفاوت برای پره‌های سوزنی شکل مورد بررسی قرار گرفت. همچنین از آب دی‌یونیزه به عنوان سیال کاری برای خنک‌کاری استفاده کردند. نتایج کار آنها نشان می‌دهد که شکل پره‌های سوزنی نقش مهمی در انتقال حرارت و افت فشار سیال دارند. از نتایج شبیه‌سازی آنها که مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد نیز بر می‌آید که کمترین مقاومت گرمایی مربوط به هندسه‌ای با مقطع شش ضلعی و کمترین افت فشار نیز مربوط به هندسه دایره‌ای است.

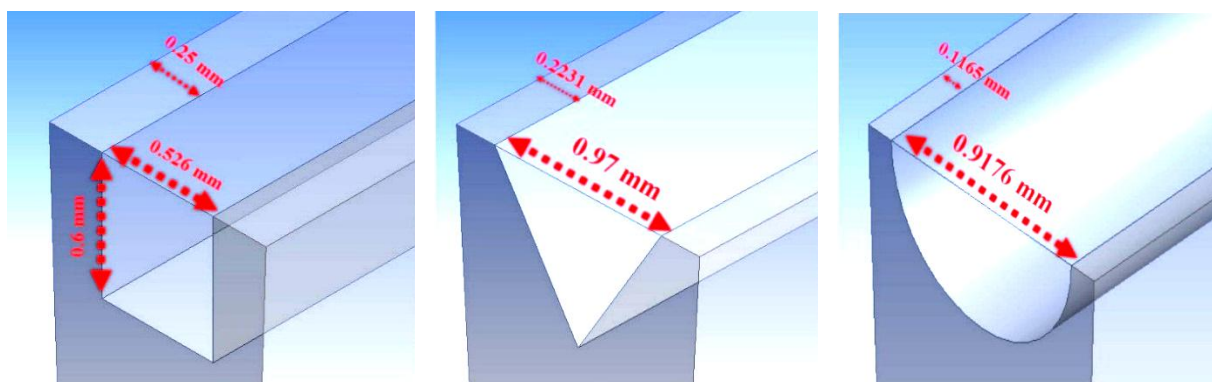
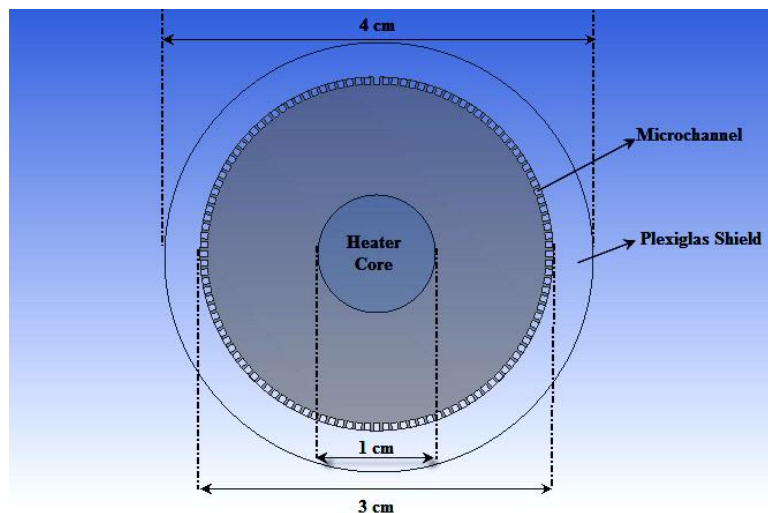
همچنین کارهای زیادی نیز وجود دارد که با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی به حل عددی مسائل مربوط به میکروکانال پرداخته‌اند. وانگ و همکاران [۱۰] به بررسی تأثیر هندسه‌های مستطیلی، دوزنقه‌ای و مثلثی شکل روی مشخصه های جریان و انتقال حرارت پرداختند. پس از انجام آزمایش‌ها پی‌بردند که میکروکانال با سطح مقطع مستطیلی شکل کمترین مقاومت گرمایی و بهترین عملکرد حرارتی را داراست. همچنین آنها به بررسی تأثیر تعداد کانال‌ها در یک سطح مقطع ثابت پرداختند و نتایج نشان می‌دهد که افزایش تعداد کانال‌ها مقاومت گرمایی را کاهش؛ اما افت فشار را افزایش می‌دهد. مشتاق و همکاران [۱۱] در مطالعه دیگری به بررسی شکل‌های مختلف سطح مقطع کانال‌ها برای یک مبدل حرارتی پرداختند. از آنجا که شکل و اندازه کانال‌ها می‌تواند تأثیر زیادی روی عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی جریان درون مبدل حرارتی داشته باشد، یک مبدل حرارتی با جریان مخالف شبیه‌سازی شد تا تأثیر این پارامترها را مورد ارزیابی قرار دهد. آنها نیز دریافتند که سطح مقطع دایره‌ای در بین دیگر هندسه‌های مورد بررسی، بهترین عملکرد را دارد. علاوه بر این پی‌بردند که افزایش تعداد میکروکانال‌ها بازدهی مبدل و افت فشار آن را افزایش می‌دهد.

همچنین چان و همکاران [۱۲] به شبیه‌سازی عددی و سه‌بعدی انتقال حرارت و جریان سیال درون یک میکروکانال با سطح مقطع‌های متفاوت پرداختند. نتایج کار آنها نشان می‌دهد که میکروکانال مثلثی بهترین عملکرد گرمایی را دارا است. بعد از آن مقطع دوزنقه‌ای و در نهایت مقطع مستطیلی است که بدترین عملکرد را دارد. درحالی که نتایج کار گوناسگاری و همکاران [۱۳]، که آنها نیز تأثیر هندسه‌های متفاوت را بر خواص انتقال حرارت و جریان سیال بررسی کردند، نشان می‌دهد که میکروکانال با مقطع مستطیلی بالاترین ضریب انتقال حرارت را ایجاد می‌کند و مثلثی بدترین عملکرد را دارد.

در یک مطالعه که توسط کومار و همکاران [۱۴] انجام شد، به مقایسه دقت مدل تک‌فاز و مدل دوفاز برای نانوسیال‌ها پرداخته شد. نتیجه این مطالعه به این صورت ارائه شد که اگر غلظت نانوذره بیشتر از ۵/۰ درصد باشد، مدل تک‌فاز از دقت بالاتری برخوردار است، اما اگر غلظت نانوذره موجود در نانوسیال کمتر از ۵/۰ درصد باشد، مدل دوفاز با دقت بهتری عمل خواهد کرد.

علاوه بر نانوسیالات، مواد دیگری نیز به منظور بهبود انتقال حرارت درون میکروکانال‌ها به کار برده شده است که دوغاب مواد تغییر فاز نامیده می‌شوند. در این زمینه نیز مطالعات زیادی انجام شده است [۱۵ و ۱۶] که از دوغاب PCM به عنوان سیال کاری درون مبدل‌های حرارتی میکروکانال استفاده کرده‌اند. برای نمونه مشتاق [۱۷] مبدل حرارتی میکروکانال به کار رفته در کار را با سیال کاری دوغاب PCM مدل‌سازی کرد و سپس عملکرد حرارتی این سیال درون میکروکانال را با سیال آب خالص مقایسه و بهبود چشمگیری مشاهده کرد.

با بررسی منابع مشاهده می‌شود که، بیشتر کارهای تجربی و عددی انجام شده روی میکروکانال‌های صفحه‌ای بوده و کمتر به نوع استوانه‌ای آن پرداخته شده است. در این مطالعه بررسی و ارزیابی مشخصه‌های جریان و انتقال حرارت در یک میکروکانال استوانه‌ای با سطح مقطع‌های دایره‌ای، مثلثی و مستطیلی پرداخته شده است. علاوه بر این سیال مورد استفاده



شکل ۱- نمادین کلی میکروکانال‌ها و ابعاد مربوطه از نمای روبه‌رو

فیزیکی آن در جدول (۱) آمده است. در مرکز میکروکانال یک تولیدکننده گرما (هیتر الکتریکی) قرار دارد که شار گرمایی ثابتی را تولید می‌کند و همچنین در اطراف آن استوانه‌ای قرار دارد که سیال درون آن جریان دارد.

در کار حاضر سه شکل دایره، مثلث و مستطیل برای سطح مقطع عبوری جریان در کانال‌ها در نظر گرفته شده است (شکل ۲) که برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از این محاسبات، نتایج با نتایج کار تجربی عزیزی و همکاران [۱۸] مقایسه شدند. برای اینکه حجم ثابتی از تمام هندسه‌های عبوری جریان با سطح مقطع‌های متفاوت وجود داشته باشد، از یک قطر هیدرولیک برای تمام شکل‌های سطح مقطع‌ها استفاده شد، که مقدار آن برابر با 0.5606 میلی‌متر است. در شکل (۲) یک برش شامل یک میکروکانال از کل هندسه انتخاب شده است و

در این پژوهش نانوسیال با پایه آب و نانوذرات متفاوت Cu، Al_2O_3 ، SiO_2 ، CuO است. همچنین به منظور ارزیابی داده‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار، داده‌های شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مربوط به کار عزیزی و همکاران [۱۸] مقایسه می‌شود.

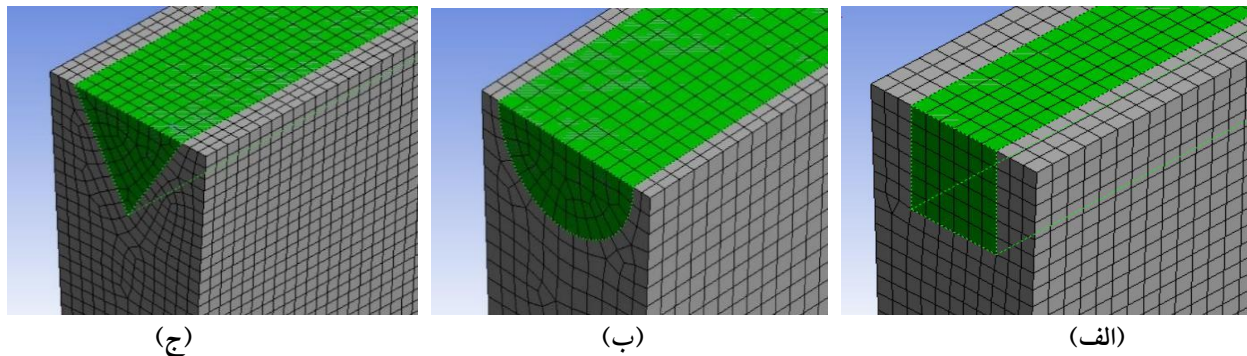
۲- مدل‌سازی ریاضی

۲-۱- توصیف میکرو کانال و مش بندی

در این مطالعه، به مدل‌سازی سه‌بعدی جریان نانوسیال درون یک میکروکانال استوانه‌ای با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) پرداخته شده است. هندسه کلی میکروکانال در شکل (۱) نشان داده شده است که ابعاد در آن مشخص است. گفتنی است که عمق این میکروکانال برابر 50 میلی‌متر و جنس بدنه این میکروکانال از آلیاژ Cu-Be است که مشخصات

جدول ۱- مشخصات فیزیکی آلیاژ بدنه میکروکانال

آلیاژ	Analysis (wt%)	چگالی (kg/m ³)	ضریب هدایت حرارتی (W/mK)
Cu-Be	Co: ۰/۸-۱/۳	۸۸۰۰	۲۱۰
	Ni: ۰/۸-۱/۳		
	Be: ۰/۴-۰/۷		
	Cu: مابقی		



شکل ۲- هندسه مربوط به سطح مقطع‌ها و نوع شبکه‌بندی

جدول ۲- اطلاعات مربوط هر هندسه

پارامترها	مستطیلی	دایروی	مثلثی
تعداد کانال‌ها	۸۶	۸۶	۶۶
نوع شبکه	چهاروجهی	چهاروجهی	چهاروجهی
تعداد اجزا در شبکه	۳۷۰۰۰۰	۴۰۳۵۰۰	۴۶۴۵۰۰

مطالعات روی آن انجام گرفته است. (۱) $\nabla \cdot (\rho_{nf} \mathbf{v}_f) = 0$

هندسه‌های موردنیاز در نرم‌افزار Design Modeler تولید و (۲) $\nabla \cdot (\rho_{nf} \mathbf{v}_f \mathbf{v}_f) = -\nabla p + (\mu_{nf} \cdot \nabla \mathbf{v}_f)$

در نرم‌افزار ANSYS Meshing شبکه‌بندی شدند. هر دو نرم‌افزار (۳) $\rho_f C_{p,f} (\mathbf{v}_f \cdot \nabla T) = k_{nf} (\nabla^2 T)$

از مجموعه ANSYS Workbench 15.0 هستند. اطلاعات مربوط (۴) $k_s (\nabla^2 T) = 0$

به هندسه‌های شبکه‌بندی شده در جدول (۲) ارائه شده است.

شرایط مرزی مورد استفاده برای حل معادلات شرط مرزی عدم لغزش در دیواره‌ها، شرط مرزی سرعت ورودی در مرزهای ورودی میکروکانال و همچنین شرط مرزی فشار اتمسفریک که در مرزهای خروجی میکروکانال هستند در زیر آمده‌اند:

شرط مرزی دیواره‌های بیرونی (عایق و دما ثابت):

$$T = \text{Const.}$$

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

معادلات حاکم بر مسئله شامل: معادله پیوستگی یا موازنه جرم (رابطه ۱)، معادله اندازه حرکت یا موازنه مومنتم (معادله ۲)، معادله انرژی برای ناحیه سیال (رابطه ۳) و معادله انرژی برای ناحیه جامد (رابطه ۴) است.

- ۱- شرایط عملیاتی در حالت پایدار است.
- ۲- جریان آرام است.
- ۳- جریان در طول لوله تغییر فازی ندارد.
- ۴- خواص ترموفیزیکی سیال و ماده سازنده میکروکانال ثابت در نظر گرفته شد.
- ۵- شرط مرزی بدون لغزش (No Slip) درون کانال فرض شد.
- ۶- میکروکانال مورد مطالعه از ۸۶ کانال مشابه تشکیل شده است، که یک کانال از ۸۶ کانال، مورد مطالعه قرار گرفت و از شرط مرزی متناوب برای طرفین کانال استفاده شد؛ همچنین به دلیل اینکه دما و فشار خاصیت‌های شدتی هستند می‌توان آنها را برای قسمتی از سیستم مورد مطالعه بررسی و سپس برای کل سیستم لحاظ کرد.

۲-۴- پردازش داده‌ها و محاسبه ضریب انتقال حرارت

برای بررسی تأثیر نوع نانوذرات و نوع سیال پایه بر انتقال حرارت جابه‌جایی، اثر اضافه کردن چهار نوع نانوذر مختلف Cu ، Al_2O_3 ، SiO_2 و CuO ، یک‌بار به آب مقطر و بار دیگر به دی‌اتیلن گلیکول (به‌عنوان سیال پایه)، به‌صورت جداگانه مورد مطالعه قرار گرفت. خواص فیزیکی مربوط به هرکدام از مواد استفاده شده در جدول (۳) آورده شده است.

همچنین برای محاسبه خواص ترموفیزیکی نانوسیال مانند هدایت حرارتی، چگالی، ظرفیت گرمایی و ویسکوزیته که پارامترهای پایه‌ای مهمی هستند، از روابط (۵) تا (۸) استفاده شده است [۲۱]:

$$k_{nf} = \frac{k_p + \varphi k_{bf} + \varphi(1+\beta)^3 (k_p - k_{bf})}{k_p + \varphi k_{bf} - \varphi(1+\beta)^3 (k_p - k_{bf})} k_{bf} \quad (5)$$

که در آن k_p و k_{bf} به‌ترتیب گرمای هدایتی سیال پایه و نانوذر است. همچنین β معرف نسبت ضخامت نانولایه به شعاع ذره است که می‌توان آن را برابر ۰/۱ در نظر گرفت [۲۲]. چگالی نانوسیال با استفاده از رابطه (۶) به‌دست می‌آید:

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_p + (1-\varphi) \rho_{bf} \quad (6)$$

$$\nabla T = 0$$

$$V(x, r, \theta) = 0$$

شرط مرزی شار ورودی به دیواره میکروکانال:

$$q'' = \text{Const.}$$

$$V(x, r, \theta) = 0$$

شرط مرزی روی سطح ورودی:

$$V(x, r, \theta) = \text{Const.}$$

$$T(x, r, \theta) = \text{Const.}$$

شرط مرزی روی سطح خروجی:

$$P(x, r, \theta) = P_{\text{ATM}}$$

برای حل معادلات حاکم در این مسئله، از روش عددی حجم محدود استفاده شد. مشخصه‌های حل دامنه شامل Quick برای معادلات مومنتم و انرژی، و روش حل SIMPLE برای کوپل معادلات سرعت- فشار انتخاب شدند. همچنین، برای محدوده عدد رینولدز بین ۵۰ تا ۲۱۰۰ مدل جریان آرام و برای رینولدزهای بالاتر از این مقدار از مدل $k-\varepsilon$ استاندارد استفاده شد. محدوده خطای در نظر گرفته شده برای دقت محاسبات برای تمام معادلات 1×10^{-6} بود.

۲-۳- فرضیات حل

مطالعات زیادی روی شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت و رفتار جریان سیال در نانوسیالات انجام شده است. روش‌های متعددی برای انجام شبیه‌سازی استفاده می‌شود که می‌توان آن را در دودسته تک‌فاز و دوفاز دسته‌بندی کرد. که مدل تک‌فاز به دلیل سادگی و بالاتر بودن دقت آن در غلظت‌های بالای ۰/۵ درصد نانوذر و همچنین حجم محاسبات کمتر، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۹]. برای استفاده از این مدل، فرض می‌شود که نانوذرات درون سیال پایه به‌شکل کاملاً یکنواخت توزیع شده است [۲۰]. در این تحقیق، از مدل تک‌فاز استفاده شده است. علاوه بر این برای حل مسئله فرض‌های دیگری نیز به‌ترتیب زیر اعمال شده است:

جدول ۳- خواص فیزیکی نانوذرات مختلف و آب

CuO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cu	DEG	Water	خواص
۶۵۰۰	۲۲۰۰	۳۶۰۰	۸۹۰۰	۱۱۱۸	۹۹۶/۵	ρ (kg / m ^۳)
				۰/۰۳۶	۰/۰۰۱	μ (N.s / m ^۲)
۵۴۰	۷۴۵	۷۶۵	۳۵۸	۲۳۰۲	۴۱۸۱	C_p (j / kg.k)
۱۸	۱/۴	۳۶	۴۰۱	۰/۰۱۳	۰/۶۱۳	k (W / m.k)

۳- استقلال از شبکه، ارزیابی و اعتبارسنجی مدل

برای نمایش استقلال نتایج از شبکه و رسیدن به تعداد جزء بهینه از چهار نوع شبکه با تعداد به ترتیب ۲۵۰۰۰۰، ۳۷۰۰۰۰۰، ۴۶۰۰۰۰۰، ۵۸۵۰۰۰۰ جزء استفاده شد و پارامتر ضریب انتقال حرارت جابه جایی در طول های متفاوت از میکروکانال رسم شد. شکل (۳) نتایج حاصل از استقلال از شبکه را نشان می دهد که بر اساس آن با افزایش تعداد اجزاء از ۳۷۰۰۰۰۰ تغییر در نتایج حاصل نمی شود و بنابراین شبکه با تعداد ۳۷۰۰۰۰۰ جزء به عنوان شبکه بهینه در نظر گرفته شد.

برای صحت سنجی داده های حاصل از شبیه سازی، نتایج حاصل با نتایج کار تجربی عزیزی و همکاران [۱۸] مقایسه شد. برای این منظور سعی شده تا شرایط اعمال شده در کار تجربی برای انجام شبیه سازی نیز تنظیم شود. دو شار حرارتی ثابت ۳۵ کیلووات بر مترمربع و ۵۰ کیلووات بر مترمربع اعمال شد و در مقادیر اعداد رینولدز متفاوت داده های مربوط به دمای ورودی و خروجی میکرو کانال استخراج شد. اختلاف دمای ورودی و خروجی به دست آمده از میکروکانال در هر شار حرارتی برای اعداد رینولدز مختلف رسم شد، که در شکل (۴) ارائه شده است. با توجه به این نمودار مشاهده می شود که نتایج آزمایشگاهی و شبیه سازی رفتار یکسان دارند و خطای متوسط هفت درصد را نشان می دهد که از رابطه (۱۱) محاسبه شد. همچنین این نمودار نشان می دهد که با افزایش عدد رینولدز، اختلاف دمای ورودی و خروجی سیال کاهش می یابد:

$$ARE(\%) = \frac{|X_{CFD} - X_{Exp}|}{X_{Exp}} \times 100 \quad (11)$$

که ρ_p چگال نانوذرات و ρ_{bf} چگالی سیال پایه است. ظرفیت گرمایی نانوسیال با فرض اینکه تعادل گرمایی به نانوذرات و سیال پایه برقرار است به وسیله رابطه (۷) تخمین زده می شود:

$$C_{p,nf} = \frac{\phi \rho_p C_{p,p} + (1-\phi) \rho_{bf} C_{p,bf}}{\rho_{nf}} \quad (7)$$

$C_{p,bf}$ و $C_{p,p}$ به ترتیب نشان دهنده ظرفیت گرمایی نانوذرات و سیال پایه هستند. در نهایت برای محاسبه ویسکوزیته نانوسیالات از رابطه (۸) استفاده می شود:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} (1 + 2.5\phi) \quad (8)$$

ضریب انتقال حرارت محلی با استفاده از قانون سرمایش نیوتن مطابق معادله (۹) به دست می آید:

$$h(x) = \frac{q''}{T_w(x) - T_b(x)} \quad (9)$$

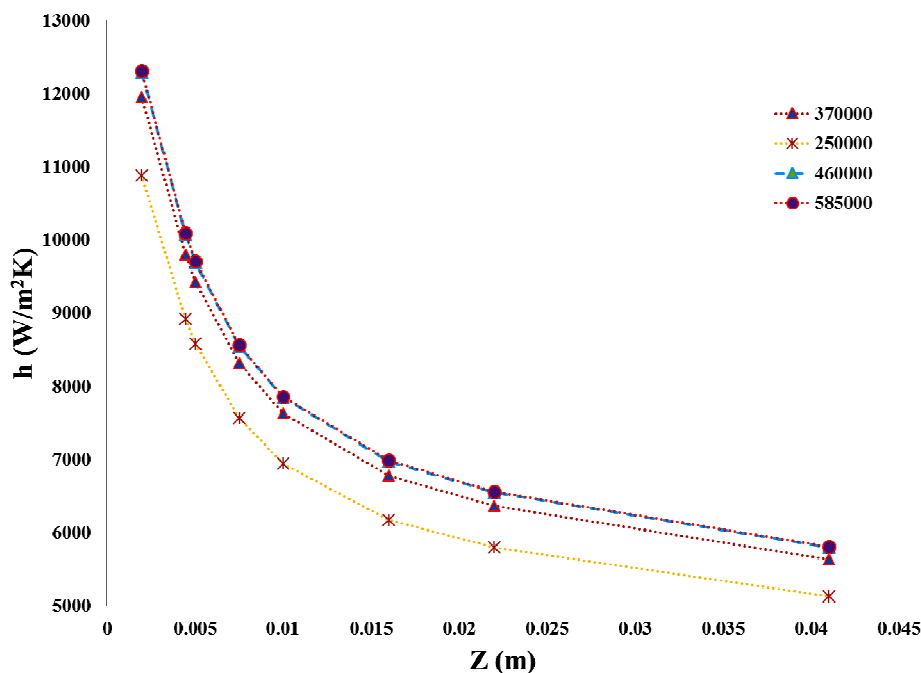
که q'' شار حرارتی ثابت است که از طریق گرماساز درون میکروکانال استوانه ای تولید می شود و به سیال منتقل می شود. $T_w(x)$ و $T_b(x)$ نیز به ترتیب نشان دهنده دمای توده سیال و دمای دیواره میکروکانال در موقعیت های مختلف هستند. همچنین عدد بی بعد رینولدز با رابطه (۱۰) بیان می شود:

$$Re = \frac{\rho_f u_{in} D_h}{\mu_f} \quad (10)$$

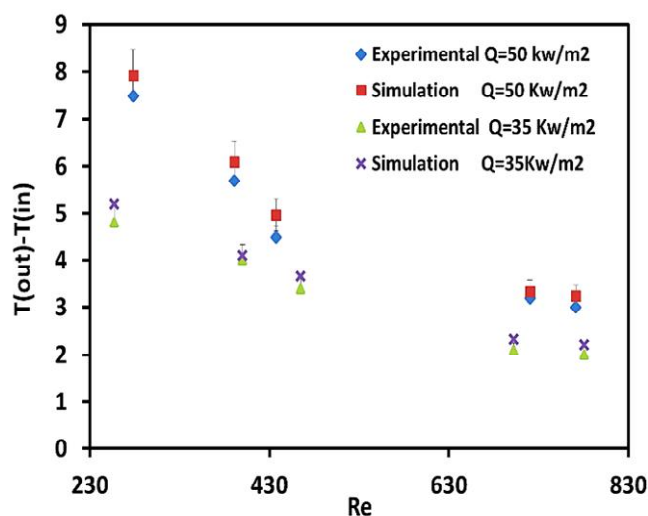
که u_{in} سرعت در جریان ورودی و D_h قطر هیدرولیک است که D_h از رابطه (۱۱) محاسبه می شود:

$$D_h = \frac{4 A_c}{P_c} \quad (11)$$

که در آن A_c و P_c به ترتیب، مساحت سطح مقطع کانال عبور جریان و محیط سطوح خیس شده توسط جریان سیال هستند.



شکل ۳- نتایج استقلال از شبکه در چهار نوع از آنها با تعداد اجزای متفاوت



شکل ۴- مقایسه داده‌های تجربی با نتایج شبیه‌سازی برای آب خالص در میکروکانال

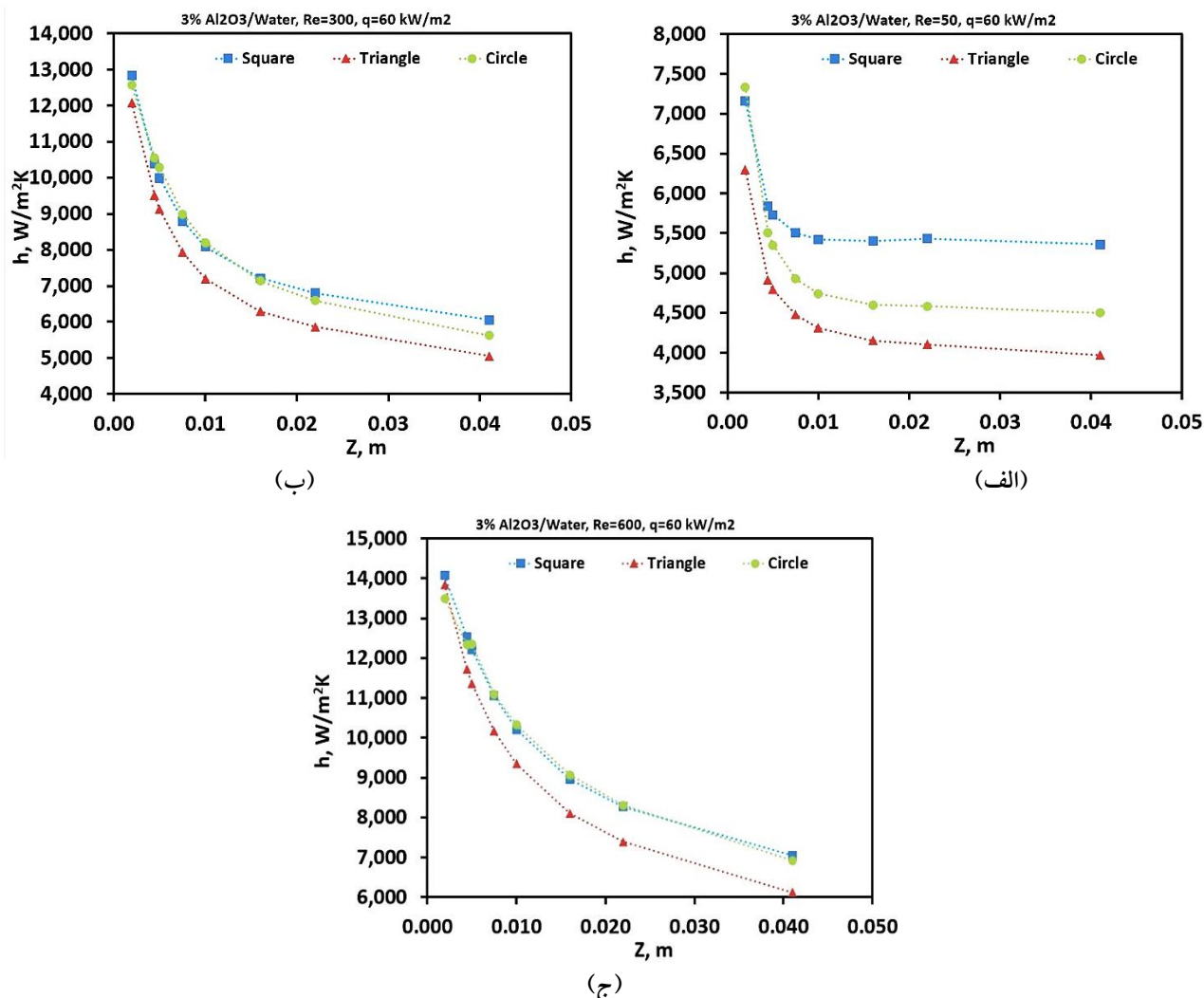
۴- نتایج و بحث

۴-۱- تأثیر هندسه سطح مقطع میکروکانال بر ضریب انتقال

حرارت

شکل‌های (۵-الف)، (۵-ب) و (۵-ج) تأثیر شکل‌های مختلف سطح مقطع میکروکانال‌ها را بر ضریب انتقال حرارت در اعداد رینولدز متفاوت، شرایط ثابت شار حرارتی $q=60 \text{ kw/m}^2$ و کسر

حجمی ۳ درصد نشان می‌دهند. در هر سه حالت نانوسیال استفاده شده $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Water}$ است. همه این سطح مقطع‌ها رفتارهای مشابهی دارند. از این نمودارها مشخص می‌شود که سطح مقطع مربعی دارای بالاترین ضریب انتقال حرارت است. به این صورت که برای عدد رینولدز 50° مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی $19/26$ و $10/88$ درصد به ترتیب برای

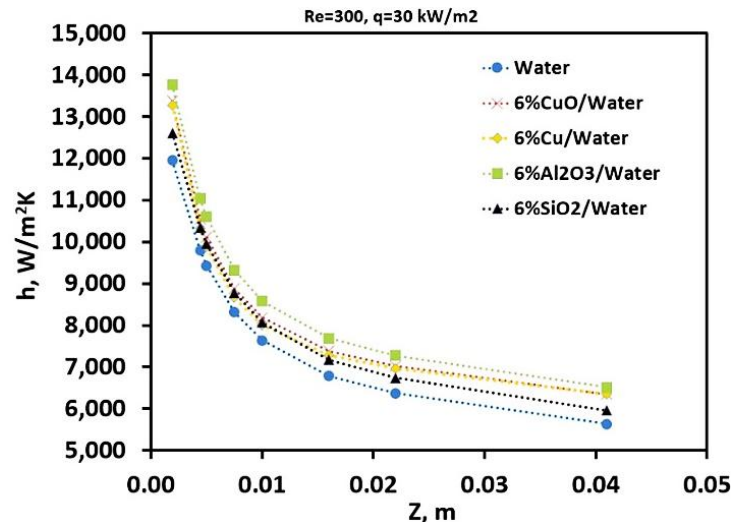


شکل ۵- تأثیر هندسه سطح مقطع میکروکانال بر ضریب انتقال حرارت برای نانوسیال $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{water}$ و $q=60 \text{ kW/m}^2$:
 (الف) عدد رینولدز ۵۰، (ب) عدد رینولدز ۳۰۰ و (ج) عدد رینولدز ۶۰۰

۴-۲- تأثیر نوع نانوذره روی ضریب انتقال حرارت و دمای دیواره

نانوذرات مختلف، خواص فیزیکی متفاوتی دارند و در نتیجه عملکرد حرارتی متفاوتی نیز خواهند داشت. شکل (۶) تأثیر نانوسیالات متفاوت روی ضریب انتقال حرارت و مقایسه آن با آب خالص را در طول کانال نشان می‌دهد. تأثیر این پارامتر در شرایط ثابت $q=30 \text{ kW/m}^2$ ، $Re=300$ و کسر حجمی شش درصد برای نانوسیالات Al_2O_3 ، Cu ، SiO_2 و CuO محاسبه و با آب خالص مقایسه شد. در این نمودار مشاهده می‌شود که

سطح مقطع مستطیلی و دایره‌ای بیشتر از ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در سطح مقطع مثلثی است، این مقدار برای اعداد رینولدز ۳۰۰ و ۶۰۰ نیز برای سطح مقطع مستطیلی به ترتیب ۱۰/۱۸ و ۷/۴۸ درصد بیشتر از سطح مقطع مثلثی به دست آمده است. همچنین مشخص است که هرچه میزان عدد رینولدز بالاتر می‌رود، ضریب انتقال حرارت بیشتر و عملکرد حرارتی سطح مقطع‌های دایره‌ای و مربعی به هم نزدیک‌تر می‌شود. در هر سه حالت بدترین عملکرد را سطح مقطع مثلثی نشان می‌دهد.



شکل ۶- تأثیر نوع نانوذره بر ضریب انتقال حرارت با غلظت‌های یکسان

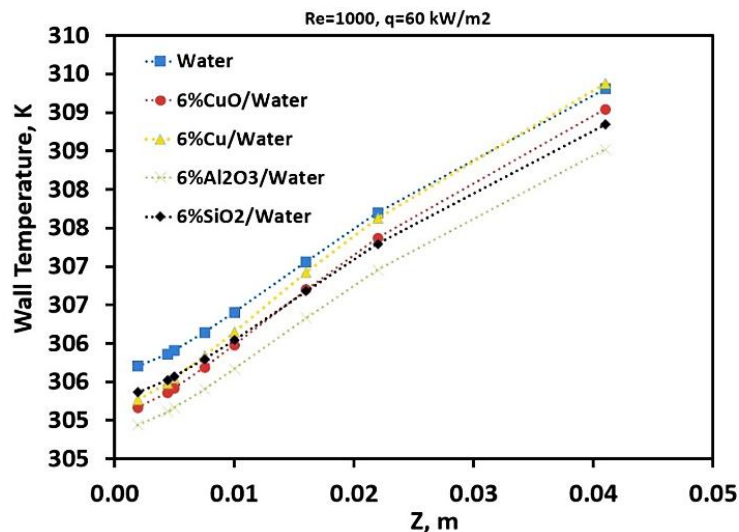
ضریب انتقال حرارت هدایتی این است که مکانیزم غالب در این مدل انتقال حرارت جابه‌جایی است.

همچنین هرچه جریان در جهت محور لوله به سمت جلو حرکت می‌کند به دلیل ثابت بودن مقدار q و بالا رفتن دمای آن ضریب انتقال حرارت کاهش پیدا می‌کند. شکل (۷) نیز تأثیر نانوسیالات مختلف روی دمای دیواره و مقایسه آنها با آب خالصی را نشان می‌دهد، که در آن میزان کاهش دمای دیواره برای نانوسیالات Al_2O_3 ، Cu ، SiO_2 و CuO نسبت به آب خالص به ترتیب $0/24$ ، $0/08$ ، $0/12$ و $0/14$ درصد است. از این نمودار مشخص است که با اضافه کردن نانوسیال دمای سطح دیواره کاهش پیدا می‌کند و نانوسیال Al_2O_3 بیشترین تأثیر را در کاهش دمای دیواره میکروکانال داراست. از نتایج مشخص است که در جهت حرکت جریان دمای دیواره به صورت تقریباً خطی افزایش پیدا می‌کند. دلیل خطی بودن، ثابت بودن مقدار فلاکس حرارتی و خواص فیزیکی سیال است.

۴-۳- مقایسه افت فشار نانوسیالات مختلف

اضافه کردن یک نانوذره به سیال پایه باعث افزایش ویسکوزیته آن می‌شود. افزایش ویسکوزیته، افت فشار جریان سیال را

ضریب انتقال حرارت نانوسیالات از آب خالص بیشتر است و در بین نانوسیالات نیز نانوسیال همراه با ذرات Al_2O_3 بالاترین ضریب انتقال حرارت را دارد. به این صورت که میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای نانوسیالات Cu ، Al_2O_3 ، SiO_2 و CuO نسبت آب خالص به ترتیب $11/85$ ، $6/79$ ، $5/31$ و $8/23$ درصد به دست آمده است. دلیل اینکه نانوسیال آلومینا بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد این است که ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه دو عامل اصلی در تعیین قابلیت انتقال حرارت نانوسیال هستند. آلومینا در بین نانوسیال‌های استفاده شده دارای ظرفیت گرمایی ویژه بسیار بالاتری نسبت به بقیه است، به این صورت که ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال آلومینا 765 (ژول به کیلوگرم، کلوین) است اما این خاصیت برای مس حدود 385 (ژول به کیلوگرم، کلوین) است. بنابراین بالا بودن ظرفیت گرمایی ویژه آلومینا، باعث شده که آلومینا بتواند گرمای بیشتری را در خود ذخیره کند. در مورد ضریب هدایت حرارتی هم این نکته قابل ذکر است که هرچه این ضریب مقدار بیشتری داشته باشد، ماده می‌تواند گرما را بیشتر از خود عبور دهد. اما تأثیر ضریب انتقال حرارت هدایتی به اندازه ظرفیت گرمایی ویژه نخواهد بود، و پایین بودن بیش از حد آن می‌تواند کارایی نانوسیال را کاهش دهد. دلیل تأثیر کم



شکل ۷- تأثیر نوع نانوذره بر روی دمای دیواره با غلظت‌های یکسان

برای پمپ کردن سیال جاری در کانال مورد نیاز باشد. در این بخش تأثیر سطح مقطع کانال‌ها روی افت فشار مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۹) تأثیر این پارامتر را برای سه مقطع مستطیلی، دایره‌ای و مثلثی در شرایط ثابت $q=60 \text{ kW/m}^2$ و غلظت ثابت سه درصد نانوسیال $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Water}$ و در اعداد رینولدز متفاوت نشان می‌دهد. از این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین افت فشار در یک عدد رینولدز مشخص، مربوط به سطح مقطع دایره‌ای و کمترین افت فشار مربوط به سطح مقطع مثلثی است. سطح مقطع دایره‌ای حدود $12/09$ درصد و سطح مقطع مستطیلی حدود $2/94$ درصد بیشتر از سطح مقطع مثلثی باعث افزایش افت فشار می‌شوند.

۴-۵- مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سیال‌های پایه

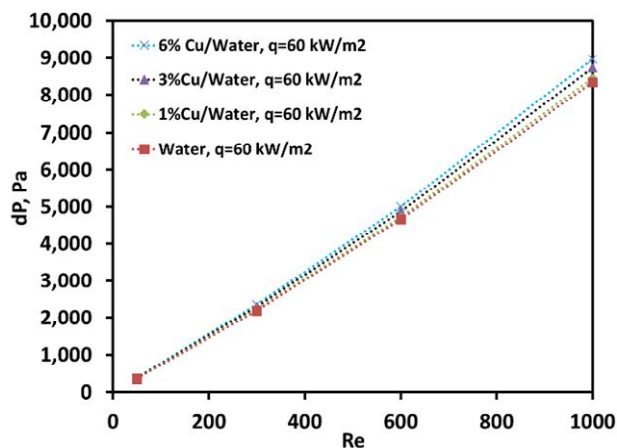
آب و دی‌اتیلن گلایکول برای نانو سیال مس

با مشاهده شکل‌های (۱۰ الف) الی (۱۰ ج) می‌توان نتیجه گرفت که در یک دبی یکسان برای دو سیال پایه آب و دی‌اتیلن گلایکول در مقاطع مختلف میکروکانال، سیال پایه آب در کل می‌تواند مفیدتر از سیال پایه دی‌اتیلن گلایکول باشد. این مقایسه در سه دبی $0/001$ ، $0/005$ و $0/01$ کیلوگرم بر ثانیه و به ترتیب برای هرکدام از این دبی‌ها درصد نانو سیال ۱، ۳ و ۶ انجام

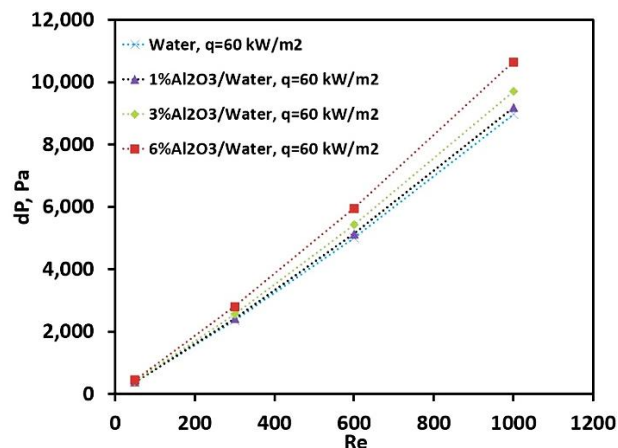
به دنبال خواهد داشت. هرچه کسر حجمی نانو ذره در سیال افزایش پیدا کند میزان ویسکوزیته و به دنبال آن افت فشار نیز بیشتر می‌شود. از طرفی با افزایش سرعت سیال نیز افت فشار افزایش پیدا می‌کند. شکل‌های (۸ الف) و (۸ ب) به ترتیب تأثیر اضافه کردن نانوذرات Al_2O_3 و Cu به آب در کسرهای حجمی مختلف و در رینولدزهای متفاوت را نشان می‌دهد. از این نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که با زیاد شدن کسر حجمی نانوذرات، افت فشار افزایش می‌یابد. به علاوه با زیاد شدن عدد رینولدز نیز افت فشار هرکدام از نانو سیالات افزایش پیدا کرده است، همچنین درصد افزایش افت فشار در نانوسیال Al_2O_3 برای درصدهای نانوذره ۱، ۳ و ۶ درصد به ترتیب $2/45$ ، $7/65$ و $15/83$ درصد است. نتایج نشان می‌دهد که این افزایش افت فشار در رینولدزهای مختلف یکسان است و برای نانوسیال Cu با کسروزی ۱، ۳ و ۶ درصد نانوذره، افزایش افت فشار به ترتیب $2/54$ ، $5/68$ و $6/88$ درصد است که این افزایش هم در رینولدزهای مختلف یکسان است.

۴-۴- تأثیر سطح مقطع‌های مختلف روی افت فشار جریان

افت فشار جریان در یک کانال باعث می‌شود که توان بالاتری

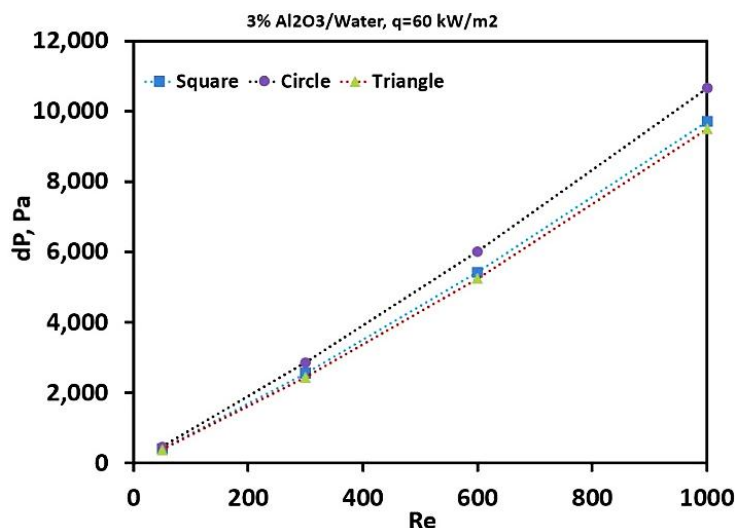


(ب)



(الف)

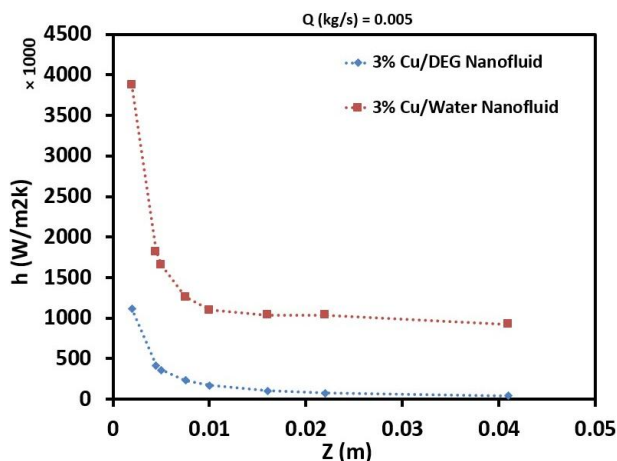
شکل ۸- الف) مقایسه افت فشار نانوسیال : الف) آلومینا/آب با غلظت‌های ۱، ۳ و ۶ درصد در اعداد رینولدز مختلف و ب) مس/آب با غلظت‌های ۱، ۳ و ۶ درصد در اعداد رینولدز مختلف



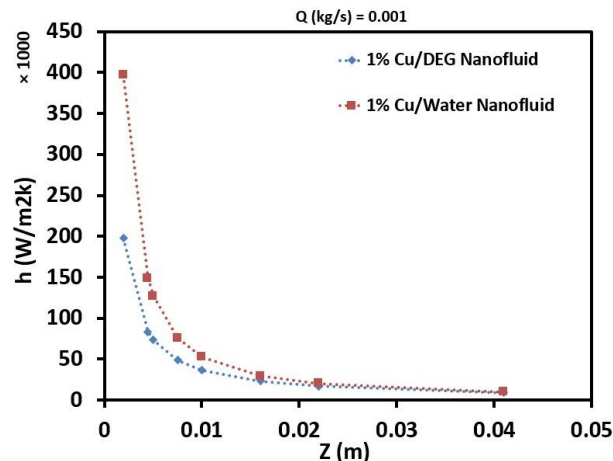
شکل ۹- تأثیر سطح مقطع‌های مختلف بر افت فشار جریان

مختلف جریان و سطح مقطع‌های مختلف میکروکانال و همچنین در غلظت‌های مختلف نانوذره مس با همدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در دبی‌هایی که موجب ایجاد جریان آشفته می‌شود نسبت ضریب انتقال حرارت آب به ضریب انتقال حرارت دی‌اتیلن گلایکول در طول میکروکانال افزایش می‌یابد تا جایی که در مقطع خروجی این مقدار به حدود ۲۵ می‌رسد. دلیل این اتفاق کم بودن ویسکوزیته آب نسبت به دی‌اتیلن گلایکول است که این خود باعث تأثیر بیشتر آشفته‌گی بر آب نسبت به گلایکول می‌شود و در نهایت

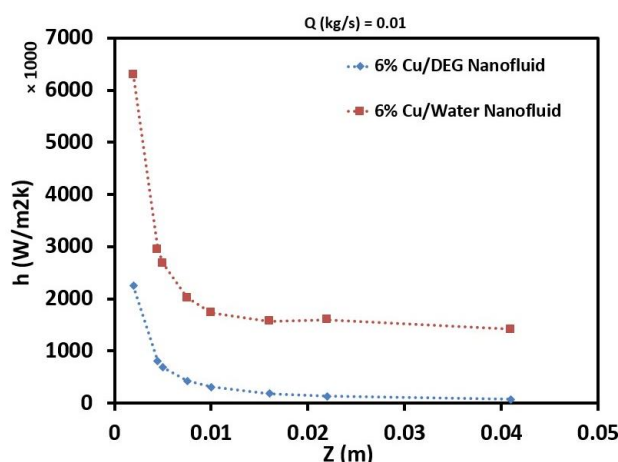
شده است. از نتایج به‌دست آمده آن است که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال با سیال پایه آب نسبت به نانوسیال با سیال پایه دی‌اتیلن گلایکول برای درصدهای ۱، ۳ و ۶ درصد نانوذره به ترتیب به‌میزان ۴۳/۲۵، ۸۰/۳۰ و ۷۶/۱۰ درصد بیشتر است. این نتایج همچنین نشان می‌دهند که کارایی نانوسیال با سیال پایه آب با افزایش کسر جرمی نانوذره دز غلظت‌های بالای شش درصد کاهش می‌یابد. در شکل (۱۱) و جدول (۵) نسبت ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی سیال پایه آب به سیال پایه دی‌اتیلن گلایکول در دبی‌های



(ب)



(الف)



(ج)

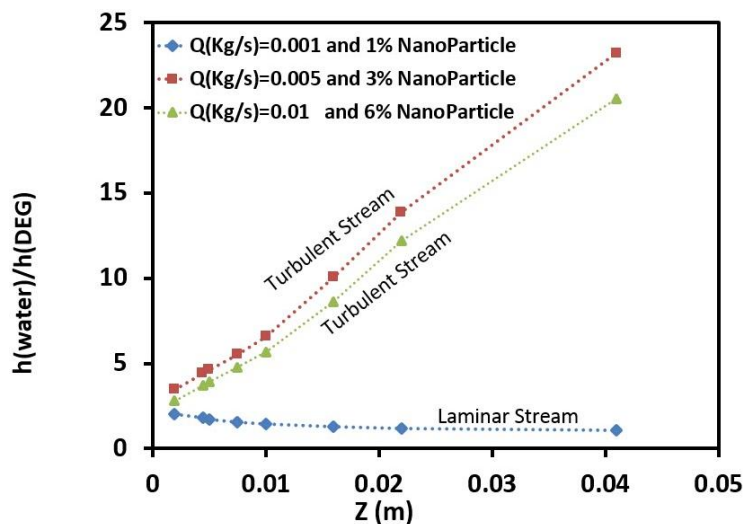
شکل ۱۰- الف) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال‌های مس/آب و مس/گلیکول با غلظت: الف) ۱ درصد در دبی جرمی ۰/۰۰۱ کیلوگرم بر ثانیه، ب) ۳ درصد در دبی جرمی ۰/۰۰۵ کیلوگرم بر ثانیه و ج) ۶ درصد در دبی جرمی ۰/۰۱ کیلوگرم بر ثانیه

معلوم است میزان افت فشار در دی‌اتیلن گلیکول به‌مراتب بالاتر از میزان افت فشار در آب است، به این صورت که میزان افت فشار در نانوسیال با سیال پایه گلیکول در درصدهای ۱، ۳ و ۶ درصد نانوذر به‌ترتیب ۹۵/۸۴، ۹۳/۲۶ و ۷۹/۸۷ درصد بیشتر از نانوسیال با سیال پایه آب است، که دلیل این امر ویسکوزیته بالای دی‌اتیلن گلیکول است. میزان دبی جریان ورودی به میکروکانال در شکل‌های (۱۰-الف)، (۱۰-ب) و (۱۰-ج) به‌ترتیب ۰/۰۰۱، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۱ کیلوگرم بر ثانیه است. به‌طور کلی می‌توان این نتیجه را گرفت که علاوه بر اینکه سیال پایه آب از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه‌تر از دی‌اتیلن گلیکول است، از نظر عملکرد نیز شرایط بهتری را ایجاد می‌کند.

باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی آب نسبت به ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی دی‌اتیلن گلیکول می‌شود. برای اثبات این اتفاق برای هر دبی جریان مقدار عدد رینولدز محاسبه شده که این مقدار برای هرکدام از نانوسیال‌ها در جدول (۴) آورده شده است.

۴-۶- مقایسه افت فشار سیال‌های پایه آب و دی‌اتیلن گلیکول برای نانوسیال مس

در نمودارهای شکل (۱۲) میزان افت فشار در نانوسیال با سیال پایه آب و دی‌اتیلن گلیکول محاسبه شده است. همان‌طور که از نمودارها



شکل ۱۱- نسبت ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال با سیال پایه آب نسبت به نانوسیال با سیال پایه دی‌اتیلن گلیکول

جدول ۴- مقادیر پیشینه، کمینه و میانگین خطای داده‌های شبیه‌سازی در مقایسه با داده‌های تجربی از مرجع [۱۸]

متوسط مقادیر خطا	کمترین مقدار خطا	بیشترین مقدار خطا	
۷/۰	۴/۲	۱۰/۵	آب خالص - $q = 50 \text{ kW}$
۷/۷	۲/۱	۱۰/۸	آب خالص - $q = 30 \text{ kW}$

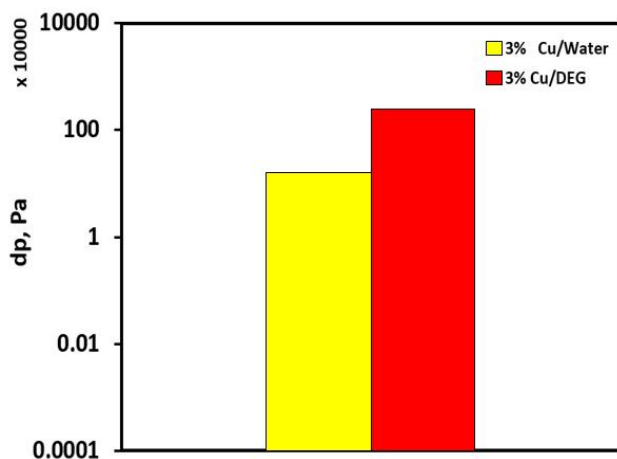
جدول ۵- مقادیر عدد رینولدز برحسب دبی نانوسیالات مختلف

رینولدز	دبی	نانو سیال
۱۷۳۱	۰/۰۰۱	۱% Cu/Water
۴۸	۰/۰۰۱	۱% Cu/DEG
۸۲۱۸	۰/۰۰۵	۳% Cu/water
۲۳۰	۰/۰۰۵	۳% Cu/DEG
۱۵۱۵۱	۰/۰۱	۶% Cu/Water
۴۲۴	۰/۰۱	۶% Cu/DEG

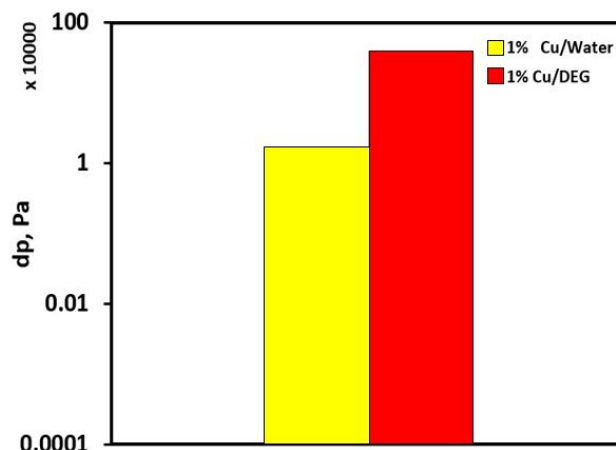
۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مشخصه‌های انتقال حرارت و جریان نانوسیالات CuO ، SiO_2 ، Cu ، Al_2O_3 با سیالات پایه آب مقطر و دی‌اتیلن گلیکول، درون میکروکانال استوانه‌ای با سطح مقطع‌های مستطیلی، مثلثی و دایره‌ای به صورت عددی بررسی شد. برای این کار از نرم‌افزار ANSYS Fluent برای شبیه‌سازی هندسه

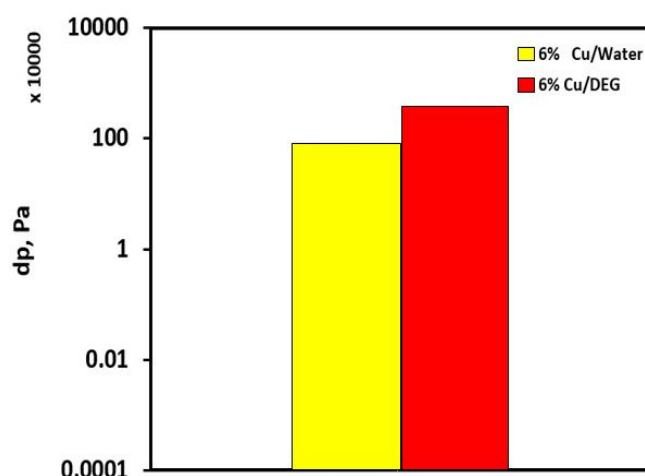
موردنظر و استخراج داده‌ها استفاده شد. به منظور ارزیابی داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی، با داده‌های تجربی موجود مقایسه شدند که مطابقت خوبی با یکدیگر داشتند. نتایج این تحقیق نشان داد که سطح مقطع‌های مختلف میکروکانال عملکردهای حرارتی متفاوتی دارند. به این صورت که در رینولدز ۵۰ سطح مقطع مثلثی دارای کمترین میزان ضریب



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۲- مقایسه میزان افت فشار نانوسیال با سیال پایه آب و دی اتیلن گلیکول

نانوسیالات Cu ، Al_2O_3 ، SiO_2 و CuO نسبت به آب خالص به ترتیب ۱۱/۸۵، ۶/۷۹، ۵/۳۱ و ۸/۲۳ درصد به دست آمده است. همچنین نتایج نشان داد که هرچه غلظت نانوذرات درون سیال پایه افزایش یابد، به واسطه افزایش ویسکوزیته سیال کاری، میزان افت فشار افزایش پیدا می کند. همچنین، نانوسیال با سیال پایه دی اتیلن گلیکول نسبت به آب خالص عملکرد ضعیف تری از خود نشان می دهد، چرا که دارای ویسکوزیته بسیار بالاتری نسبت به آب خالص است و همین امر موجب می شود تا افت فشار زیادی در سیستم به وجود آید.

انتقال حرارتی و سطح مقطع های مستطیلی و دایره ای به ترتیب ۱۹/۲۶ و ۱۰/۸۸ درصد بیشتر از سطح مقطع مثلثی باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی می شوند. بنابراین از سه سطح مقطع مستطیلی، مثلثی و دایره ای، سطح مقطع مستطیلی بیشترین میزان انتقال گرما و سطح مقطع مثلثی کمترین میزان انتقال حرارت را دارد. از بین نانوسیالات متفاوتی که در این کار استفاده شده است بهترین ضریب انتقال حرارت مربوط به Al_2O_3 و بدترین شرایط مربوط به SiO_2 است. به این صورت که میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی برای

1. suspension

مراجع

- Mohammed, H. A., Bhaskaran, G., Shuaib, N. H., and Saidur, R., "Heat Transfer and Fluid Flow Characteristics in Microchannels Heat Exchanger using Nanofluids: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 3, pp. 1502-1512, 2011.
- Heyhat, M. M., Kowsary, F., Rashidi, A. M., Momenpour, M. H., and Amrollahi, A., "Experimental Investigation of Laminar Convective Heat Transfer and Pressure Drop of Water-Based Al_2O_3 Nanofluids in Fully Developed Flow Regime", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, pp. 483-489, 2013.
- Teamah, M. A., Dawood, M., Khairat, M., and Shehata, A., "Numerical and Experimental Investigation of Flow Structure and Behavior of Nanofluids Flow Impingement on Horizontal Flat Plate", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 74, pp. 235-246, 2016.
- Yarmand, H., Gharehkhani, S., Shirazi, S. F., Seyed Amiri, A., Alehashem, M. S., Dahari, M., and Kazi, S. N., "Experimental Investigation of Thermo-Physical Properties, Convective Heat Transfer and Pressure Drop of Functionalized Graphene Nanoplatelets Aqueous Nanofluid in a Square Heated Pipe", *Energy Conversion and Management*, Vol. 114, pp. 38-49, 2016.
- Asmaie, L., Haghshenasfard, M., Mehrabani-Zeinabad, A., and Nasr Esfahany, M., "Thermal Performance Analysis of Nanofluids in a Thermosyphon Heat Pipe using CFD Modeling", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, No. 5, pp. 667-678, 2013.
- Rashmi, W., Ismail, A. F., Khalid, M., and Faridah, Y., "CFD Studies on Natural Convection Heat Transfer of Al_2O_3 -Water Nanofluids", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 10, pp. 1301-1310, 2011.
- Ruan, B., Gao, X., and Meng, H., "Numerical Modeling of Turbulent Heat Transfer of a Nanofluid at Supercritical Pressure", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 113, pp. 994-1003, 2017.
- García-Hernando, N., Acosta-Iborra, A., Ruiz-Rivas, U., and Izquierdo, M., "Experimental Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer in a Single-phase Liquid Flow Micro-heat Exchanger", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 23, pp. 5433-5446, 2009.
- Yang, D., Wang, Y., Ding, G., Jin, Zh., Zhao, J., and Wang, G., "Numerical and Experimental Analysis of Cooling Performance of Single-Phase Array Microchannel Heat Sinks with Different Pin-Fin Configurations", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 112, pp. 1547-1556, 2017.
- Wang, H., Chen, Zh., and Gao, J., "Influence of Geometric Parameters on Flow and Heat Transfer Performance of Micro-Channel Heat Sinks", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 107, pp. 870-879, 2016.
- Hasan Mushtaq, I., Rageb, A. A., Yaghoubi, M., and Homayoni, H., "Influence of Channel Geometry on the Performance of a Counter Flow Microchannel Heat Exchanger", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, No. 8, pp. 1607-1618, 2009.
- Chen, Y., Zhang, Ch., Shi, M., and Wu, J., "Three-Dimensional Numerical Simulation of Heat and Fluid Flow in Noncircular Microchannel Heat Sinks", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No. 9, pp. 917-920, 2009.
- Gunnasegaran, P., Mohammed, H. A., Shuaib, N. H., and Saidur, R., "The Effect of Geometrical Parameters on Heat Transfer Characteristics of Microchannels Heat Sink with Different Shapes", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 8, pp. 1078-1086, 2010.
- Kumar, N., and Puranik, B. P., "Assessment of Single Phase Model of a Nanofluid for Numerical Prediction of Forced Convection Heat Transfer", *Journal of Nanofluids*, Vol. 5, No. 1, pp. 94-100, 2016.
- Alquaity, A. B. S., Al-Dini, S. A., Wang, E. N., and Yilbas, B. S., "Numerical Investigation of Liquid Flow with Phase Change Nanoparticles in Microchannels", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 38, pp. 159-167, 2012.
- Sabbah Rami, F., Mohammad, M., and Al-Hallaj, S., "Micro-Channel Heat Sink with Slurry of Water with Micro-Encapsulated Phase Change Material: 3D-Numerical Study", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 2, pp. 445-454, 2009.
- Hasan Mushtaq, I., "Numerical Investigation of Counter Flow Microchannel Heat Exchanger with MEPCM Suspension", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 6, pp. 1068-1075, 2011.
- Azizi, Z., Alamdari, A., and Malayeri, M. R., "Convective Heat Transfer of Cu-Water Nanofluid in a Cylindrical Microchannel Heat Sink", *Energy Conversion and Management*, Vol. 101, pp. 515-524, 2015.
- Behroyan, I., Vanaki, Sh. M., Ganesan, P., and Saidur, R., "A Comprehensive Comparison of

- Various CFD Models for Convective Heat Transfer of Al_2O_3 Nanofluid Inside a Heated Tube”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 70, pp. 27-37, 2016.
20. Niu, J., Fu, C., and Tan, W., “Slip-flow and Heat Transfer of a Non-Newtonian Nanofluid in a Microtube”, *PloSone*, Vol. 7, No. 5, pp. e37274, 2012.
 21. Azari, A., and Derakhshandeh, M., “An Experimental Comparison of Convective Heat Transfer and Friction Factor of Al_2O_3 Nanofluids in a Tube with and Without Butterfly Tube Inserts”, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol. 52, pp. 31-39, 2015.
 22. Yu, W., and Choi, S. U. S., “The Role of Interfacial Layers in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A Renovated Maxwell Model”, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 5, No. 1-2, pp. 167-171, 2003.