



شبیه سازی عددی انتقال حرارت و رفتار جریان نانوسیال در یک مبدل حرارتی مینی کانال ماریچ

محسن بدیع زادگان اصفهانی^۱، داود طغرای^۲،

* داود طغرای : toghraee@iaukhsh.ac.ir

واژه‌های کلیدی

شبیه سازی عددی، مبدل حرارتی مینی
کانال، ماریچ، نانو سیال اکسیدمس / اتیلن
گلیکول آب

چکیده

ایده استفاده از مبدل های حرارتی بسیار کوچک، به دلیل افزایش شار حرارتی، وزن سبک و انتقال حرارت بیشتر و بهتر در مقایسه با مبدل های حرارتی رایج، در حال کسب محبوبیت در بسیاری از صنایع است. در این بررسی، شبیه سازی عددی سه بعدی، انتقال حرارت و ویژگی های جریان در مخلوط آب و اتیلن گلیکول با ترکیب وزنی ۶۰:۴۰ درصد به عنوان سیال پایه و نانوذرات اکسید مس که بخوبی در آن پراکنده شده اند، بر اساس معادلات ناویر استوکس و معادله انرژی، برای جابجایی اجباری مخلوط از طریق یک مبدل حرارتی مینی کانال ماریچ، همراه با گذر هوای سرد که در طول محفظه آزمایش از روی مبدل عبور می کند، انجام شده است. نتایج عددی نشان می دهند، وجود خم ماریچ در مبدل حرارتی مینی کانال باعث افزایش نرخ انتقال حرارت می شود. بررسی نتایج بیانگر آن است که حضور نانوذرات باعث افزایش افت فشار در سیال شده و همچنین به وضوح باعث افزایش انتقال حرارت در مقایسه با سیال پایه می شود و از طرفی افزایش غلظت نانوذرات باعث کاهش دمای سیال، در هنگام خروج از مبدل حرارتی می شود.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

۲- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

۱- مقدمه

امروزه پژوهشگران همواره درباره دو موضوع بسیار مهم، یعنی انرژی و محیط زیست، با چالش های اساسی روبرو هستند. بنابراین تولید و استفاده مناسب از انرژی، رمز توسعه پایدار و همواره مقرون به صرفه است. منابع انرژی، مانند باد، برق آبی، خورشیدی، توده، زمین گرمایی، اورانیوم (انرژی هسته ای)، زغال سنگ و انرژی اقیانوس ها، به وفور در دسترس هستند، اما ذخایر این منابع انرژی، با توجه به کاربردهای مستمر و اجتناب ناپذیری که همیشه از آن ها در بخش های مختلف زندگی روزمره صورت می گیرد، روز به روز دچار کاهش می شوند.

در سالیان اخیر محققان همواره به دلیل کمبود انرژی، هزینه های بالا و استانداردهای سختگیرانه زیست محیطی مجبور به بررسی و شناسایی راه حل های کارآمدتری در زمینه انتقال حرارت هستند.

امروزه افزایش سطح انتقال حرارت در واحد حجم و ضریب انتقال حرارت و همچنین رویکرد کاهش دما و تغییر شکل لوله ها و همچنین جهت گیری آنها، سهم بسزایی در تحقیقات دانشمندان در زمینه های مختلف انتقال حرارت به خود اختصاص داده است.

در حال حاضر در مکانیک سیالات، این پژوهش ها، پیشرفت های بسیاری داشته اند، تا آنجا که ساخت دستگاه های جمع و جور حرارتی، به عنوان یک هدف اساسی، همیشه به عنوان یک چالش اساسی، برای بدست آوردن سطح بهره وری بالاتر و بیشتر و همچنین قابلیت اطمینان در صنایع گوناگون مطرح بوده است.

نانوسیالات، نسل جدیدی از سیالات با پتانسیل بسیار زیاد در کاربردهای صنعتی محسوب می شوند. با توسعه سریع تکنولوژی مدرن در صنایع مختلف، افزایش انتقال حرارت، کاهش مصرف انرژی، کاهش ابعاد مبدل های حرارتی

و نهایتاً افزایش بازده سیستم های انتقال حرارت یک نیاز جدی است.

تحقیقات اخیر روی نانو سیالات، افزایش قابل توجهی در هدایت گرمایی آن ها نسبت به سیالات بدون نانو ذرات و یا همراه با ذرات بزرگتر (ماکرو ذرات) را نشان می دهد. طبقه بندی کانال ها بر اساس قطر هیدرولیکی آنها نیز توسط کاندیلینکار و همکاران [۱]، در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱) دسته بندی کانال ها بر مبنای طبقه بندی کاندیلینکار و همکاران

طول مشخصه	دسته بندی کانال
$> 3 \text{ mm}$	کانال های مرسوم
$3 \text{ mm} > D > 200 \text{ }\mu\text{m}$	مینی کانال ها
$200 \text{ }\mu\text{m} > D > 10 \text{ }\mu\text{m}$	میکرو کانال ها
$10 \text{ }\mu\text{m} > D > 1 \text{ }\mu\text{m}$	میکرو کانال های انتقالی
$1 \text{ }\mu\text{m} > D > 0.1 \text{ }\mu\text{m}$	نانو کانال های انتقالی
$0.1 \text{ }\mu\text{m} > D$	نانو کانال ها

دهقان دخت و همکاران [۲]، به مطالعه عددی جریان سیال و انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی مزو کانال مارپیچ چند راهه پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که مارپیچ آدیاباتیک در ورقه مبدل حرارتی مزو کانال باعث افزایش انتقال حرارت به دلیل ایجاد منطقه ورودی جدید و پروفیل دمای جدید از طریق برگشت جریان و اختلاط جریان در مارپیچ می شود. همچنین نرخ انتقال حرارت برای هر کانال در داخل ورقه، توسط کانال مجاور آن تحت تاثیر قرار می گیرد و در نتیجه برای تمام کانال ها افت دمای آب تقریباً یکنواخت است و به طور کلی، عملکرد انتقال حرارت مزو کانال مارپیچ بهبود می یابد.

محمد اسماعیل و همکاران [۳]، انتقال حرارت و رفتار جریان سیالات لزج در مبدل های حرارتی مینی کانال را به صورت عددی بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که شیب و طول ورودی حرارتی در جریان در حال توسعه در مایعات

پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند ضریب هدایت گرمایی در حدود ۴۰٪ افزایش می یابد.

پورفرهنگ و همکاران [۷] به بررسی افت فشار و عملکرد حرارتی نانو سیال اتیلن گلیکول-اکسیدمس (۶۰٪) و آب (۴۰٪) در رادیاتور ماشین پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که افت فشار در حضور نانوذرات در مقایسه با سیال پایه افزایش می یابد. این روند با افزایش عدد رینولدز و افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش یافته که بدلیل افزایش لزجت است. همچنین به ازای یک دمای ورودی، با افزایش دبی جریان، شاخص عملکرد به سمت بالا می رود که نشان میدهد، استفاده از نانو سیال در دبی جریان بالاتر مقرون به صرفه است.

۲- معادلات حاکم

در این بخش به معرفی معادلات اساسی و فرمول های مورد استفاده می پردازیم.

معادله پیوستگی (بقای جرم):

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

معادله ممنتوم:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial P}{\partial x_k} \quad (2)$$

معادله انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

معادله انرژی جنبشی مغشوش:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

چگالی نانوسیال [۸]:

$$\rho_{nf} = \phi \rho_s + (1 - \phi) \rho_{bf} \quad (5)$$

گرمای ویژه نانوسیال [۹]:

$$C_{p,nf} = \frac{\phi(\rho_s C_{p,s}) + (1 - \phi)(\rho_{bf} C_{p,bf})}{\rho_{nf}} \quad (6)$$

دارای لزجت بالا، در مقایسه با مایعات دارای لزجت پایین، بیشتر است. طول توسعه یافتگی هیدرودینامیکی در ورقه بالایی در مقایسه با ورقه پایینی، کوتاه تر و مسطح تر است. همچنین توزیع دما، دبی جرمی و نرخ انتقال حرارت از طریق هر کانال در سیالات دارای لزجت بالا، در مقایسه با سیالات دارای لزجت پایین، بیشتر است.



شکل (۱) نمونه متداول از مبدل حرارتی مینی کانال مارپیچ

داسگوپتا و همکاران [۴]، انتقال حرارت و خواص جریان برای خنک کننده های جریان متقاطع در مبدل حرارتی مزو کانال را بصورت تجربی بررسی کردند. نتایج آنان نشان دادند که تفاوت بین نرخ هوای منتشر شده توسط هوای گرم و نرخ حرارت حاصل از آب مقطر سرد کمتر از ۴ درصد بود که نشان می دهد، تلفات حرارت با محیط اطراف ناچیز است. همچنین سطوح صاف ورقه ها از طریق ایجاد یک سطح تماس خوب با هوای عبوری، منجر به توزیع یکنواخت دما و افزایش انتقال حرارت شده است.

لئونگ و همکاران [۵] ویژگی های انتقال حرارت در رادیاتور ماشین با نانوسیال مس / اتیلن گلیکول را به عنوان خنک کننده مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که شدت انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی، افزایش می یابد و همچنین افزایش ۲ درصدی نانو سیال مس در مقایسه با سیال پایه، باعث افزایش ۱۲ درصدی در توان پمپاژ شده است.

استمن و همکاران [۶] به بررسی سیال اتیلن گلیکول هنگامی که ۳/۰ درصد، نانوذرات مس درون آن پراکنده می شود

ضریب هدایت گرمایی نانوسیال [۱۰]:

$$k_{nf} = \left[\frac{k_s + 2k_{bf} + 2(k_s - k_{bf})\varphi}{k_s + 2k_{bf} - (k_s - k_{bf})\varphi} \right] k_{bf} \quad (7)$$

ویسکوزیته نانوسیال [۱۱]:

$$\log \mu_{nf} = A e^{-BT} \quad (8)$$

$$A = 1.8375(\varphi)^2 - 29.643(\varphi) + 165.56 \quad (9)$$

$$B = 4 \times 10^{-6}(\varphi)^2 - 0.001(\varphi) + 0.0186 \quad (10)$$

۳- شرح مدل

در این بررسی، شبیه سازی عددی یک مبدل های حرارتی مینی کانال مارپیچ، بررسی می شود.

در بررسی حاضر، تعداد اسلب ها ۴ عدد و تعداد مارپیچ ها ۳ عدد است. بخش مارپیچ با اسلب در ارتباط است و همچنین تعداد ۳ کانال دایره ای به قطر ۱ میلی متر و فاصله ی یکسان، در داخل اسلب طراحی شده اند. جریان سیال از طریق هدر ورودی وارد شده و در نهایت بین ۳ کانال موجود، توزیع می شود.

در مرحله بعد جریان از طریق لوله های موجود در اسلب ها گذر کرده و به بخش منحنی (مارپیچ) وارد می شود و در نهایت در جهت معکوس به مسیر خود ادامه داده و در نهایت پس از عبور از مسیر های صاف و مارپیچی به هدر خروجی شده و تخلیه می شود.

در بین اسلب ها، در سطوح بالا، پایین و میانی، پره هایی وجود دارند که هوای سرد گذرنده از بین آنها عبور می کند.

۴- فرضیات

در حل معادلات ناویر استوکس، انرژی و مدلسازی فرضیات زیر مورد استفاده قرار خواهند گرفت:

(۱) جریان سیال و انتقال حرارت دائم در نظر گرفته می شود.

(۲) جریان سیال تراکم ناپذیر است.

(۳) انتقال حرارت تشعشعی و همچنین انتقال حرارت بین مبدل حرارتی و محیط اطراف به دلیل عایق مناسب حرارتی ناچیز است.

(۴) محفظه آزمون نه گرمایی از دست می دهد و نه از محیط خارج هوایی به آن اضافه می شود.

(۵) خواص ترموفیزیکی سیالات عبوری از داخل کانال ها وابسته به دماست.

(۶) اثرات اغتشاش با استفاده از مدل استاندارد $k-\epsilon$ ؛ مدل می شود.

۵- خواص مواد

در تمام موارد شبیه سازی عددی، از هوا به عنوان گاز گذرنده از روی اسلب و مارپیچ های، مبدل حرارتی استفاده می شود.

از ترکیب وزنی ۶۰:۴۰ درصدی آب-تیلن گلیکول به عنوان سیال پایه استفاده شده است.

از اکسید مس به عنوان نانو ذره در بررسی حاضر استفاده شده است.

ورودی و خروجی منیفولدها، اسلب ها و مارپیچ ها، از جنس آلومینیوم هستند.

دیواره های محفظه آزمایش از جنس پلکسی گلاس با ضریب هدایت گرمایی کم در نظر گرفته شده است.

برای شبیه سازی شرایط، دمای ورودی مخلوط ۳۲۳/۱۵ کلون و دمای جریان هوای سرد عبوری ۲۷۸/۱۵ کلون به عنوان شرایط مرزی در این مطالعه عددی مورد استفاده قرار گرفت.

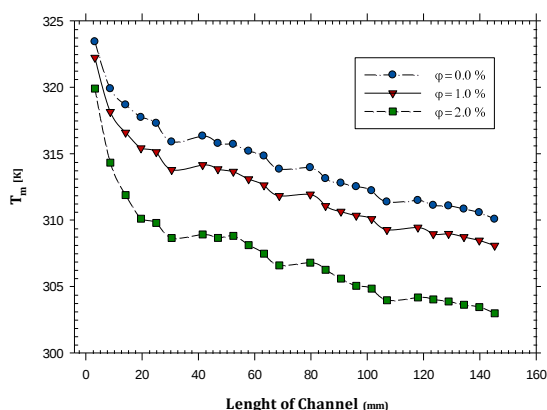
۶- استخراج نتایج

الف) بررسی تغییرات افت فشار

همانطور که انتظار می رود، افت فشار نانوسیال مورد بررسی از افت فشار سیال بالاتر پایه بود.

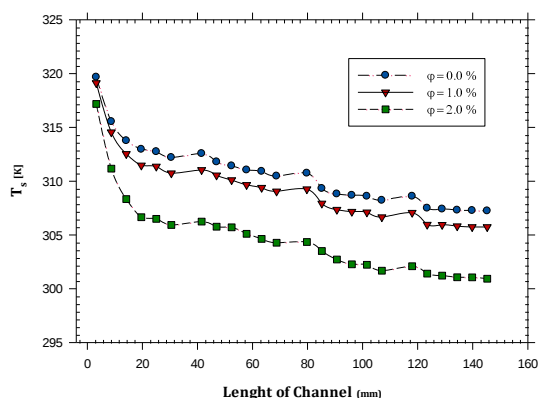
ج) بررسی تغییرات دمای سطح و دمای میانگین در کانال میانی در طول کانال

روند تغییرات دمای سطح و دمای بالک در طول کانال، تقریباً ثابت است. هنگامیکه سیال در طول کانال در حال حرکت است.



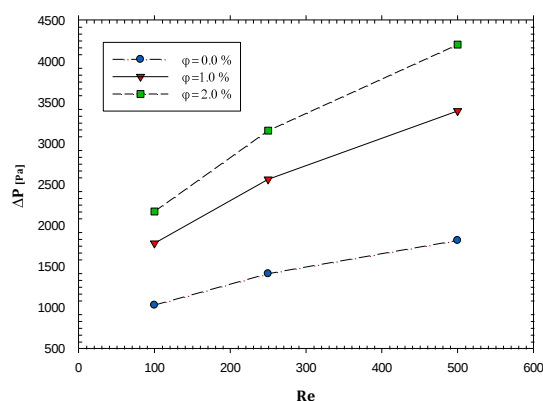
شکل (۴) نمودار تغییرات دمای میانگین در کانال میانی، در امتداد طول کانال در کسر حجمی مختلف در عدد رینولدز ۲۵۰

این تغییرات تقریباً بصورت خطی است و زمانیکه سیال به خم مارپیچ، که خارج از محفظه آزمایش و جریان هوای سرد قرار گرفته است می رسد، به دلیل انباشتگی حرارت در این بخش و همچنین عایق بودن و عدم تماس با هوای سرد، هنگام خروج از خم مارپیچ و ورود سیال به ردیف بعدی کانال، شاهد افزایش در دما هستیم.



شکل (۵) نمودار تغییرات دمای سطح در کانال میانی، در امتداد طول کانال در کسر حجمی مختلف در عدد رینولدز ۲۵۰

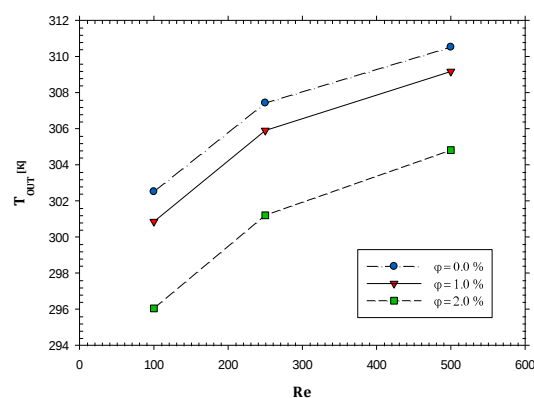
همان گونه که مشاهده می شود افت فشار با افزایش عدد رینولدز و همچنین افزایش غلظت نانوذره، افزایش می یابد.



شکل (۲) نمودار تغییرات افت فشار بر حسب عدد رینولدز در غلظت های حجمی مختلف نانوذره

ب) بررسی دمای خروجی

زمان حضور سیال داخل کانال در میزان جریان های پایین تر بالاتر است. به عنوان یک نتیجه می توان بیان کرد که افت دما، در میزان جریان پایین، بالاتر است.

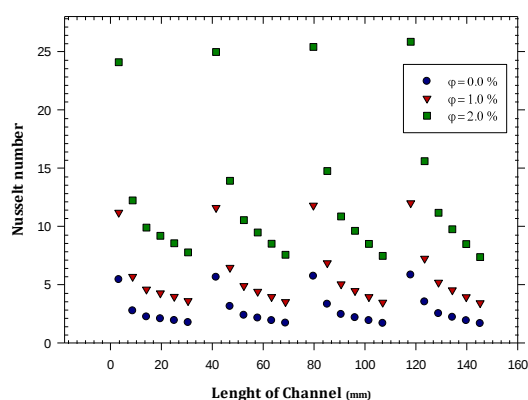


شکل (۳) نمودار تغییرات دمای خروجی در مقابل عدد رینولدز در غلظت های حجمی مختلف نانوذره

از طرفی همانطور که در شکل (۳) مشاهده می شود، اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه باعث کاهش دمای سیال می شود.

از هدر ورودی جریان در حال توسعه وارد کانال های اسلب بالایی شده و بعد از آن با عبور از خم ماریچ، جریان در حال توسعه با یک شرایط ورودی جدید، وارد کانال های اسلب پایینی می شود.

شرایط ورودی جدید ایجاد شده پس از خم ماریچ، همان شرایط ورودی در ابتدای ورود جریان به کانال نیست. به وضوح دیده می شود که عدد ناسلت در اسلب های پایینی، در مقایسه با اسلب های بالایی، بزرگتر است.



شکل (۷) تغییرات عدد ناسلت محلی کانال میانی، در امتداد طول کانال در کسر حجمی مختلف در عدد رینولدز ۲۵۰

۷- نتیجه گیری

افت فشار نانوسیال مورد بررسی بالاتر از افت فشار سیال پایه است و افت فشار با افزایش عدد رینولدز و همچنین افزایش غلظت نانوذره، افزایش می یابد.

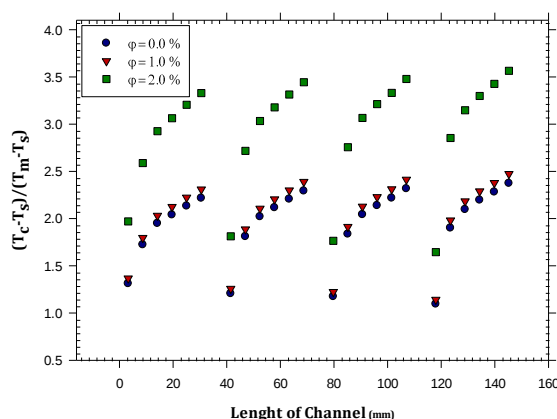
میزان اختلاف دمای ورودی و خروجی در کسر حجمی بالاتر نانوذرات و نیز اعداد رینولدز کوچکتر، بیشتر است. با افزایش کسر حجمی نانو ذره در اعداد رینولدز کوچکتر، دمای میانگین و سطح کاهش می یابد.

وجود ماریچ یکی از مزایای اصلی در مبدل های ماریچ به حساب می آید.

با افزایش کسر حجمی نانو ذره در اعداد رینولدز کوچکتر، دمای میانگین و سطح کاهش می یابد.

(د) بررسی تغییرات دمای بی بعد در طول کانال

اگر چه جریان در برخی از فواصل از هم جدا در کانال از لحاظ هیدرودینامیکی توسعه یافته می شود ولی با این وجود هرگز توسعه یافته حرارتی نمی شود، بلکه همواره در حال توسعه حرارتی می باشد.



شکل (۶) نمودار تغییرات درجه حرارت بی بعد خط مرکزی، در امتداد طول کانال در کسر حجمی مختلف در عدد رینولدز ۲۵۰

دیده می شود که شیب و طول ورودی از جریان در حال توسعه حرارتی در اسلب های بالایی، نسبتاً پایین تر از اسلب های پایینی می باشد و شرایط ورودی جدید ایجاد شده پس از خم ماریچ، همان شرط ورود جریان از هدر ورودی به کانال در آغاز، نیست.

(ه) بررسی تغییرات عدد ناسلت محلی در طول کانال

عدد ناسلت محلی با افزایش عدد رینولدز، افزایش میابد. انتظار می رود عدد ناسلت محلی در امتداد جهت جریان، در حالیکه جریان به تدریج در حال توسعه یافتگی و نزدیک شدن به یک جریان توسعه یافته است، کاهش یابد.

Nanoparticles”, *Applied Physics Letters*, Vol. 78, No. 6, 2001, pp. 718-720.

[7] Pourfarhang, S., Zeinali Heris, S., Shokrgozar, M., Kahani, M., “Pressure Drop and Thermal Performance of CuO/Ethylene Glycol (60%)-Water (40%) Nanofluid in Car Radiator”, *Korean Journal of Chemical Engineering*, Vol. 32, No. 4, 2014, pp. 36-44.

[8] Leong, K.Y., Saidur, R., Kazi, S.N., Mamun, A.H., “Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolants nanofluid as a coolant in a radiator”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, No. 17-18, 2010, pp. 2685-2692.

[9] Peyghambarzadeh, S.M., Hashemabadi, S.H., Jamnani, M.S., Hoseini, S.M. “Improving the cooling performance of automobile radiator with Al₂O₃/water nanofluid”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, 2011, pp. 1833-1838.

[10] Chein R., Huang G., “Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, 2005, pp. 3104-3114.

[11] Namburu, P.K., Kulkarni, D.P., Misra, D., Das, D.K., “Viscosity of copper Oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, 2007, pp. 397-402.

۸- فهرست علائم

Δ	اختلاف
ρ	چگالی، kg/m^3
φ	کسر حجمی
μ	لزجت دینامیکی، Pa.s

مراجع:

[1] Kandlikar, S. G., Joshi, S., Tian, S., “Effect of liquid-vapor phase distribution on the heat transfer mechanisms during flow boiling in minichannels and microchannels”, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 27, No. 1, 2006, pp. 4-13.

[2] Dehghandokht, M., Khan, G., Fartaj, A., Sanaye, S., “Numerical Study of Fluid Flow and Heat Transfer in a Multi Port Serpentine Meso Channel Heat Exchanger”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, 2011, pp. 1588-1599.

[3] Ismail, M., Fartaj, A., Karimi, M., “Numerical Investigation on Heat Transfer And Fluid Flow Behaviors of Viscous Fluids Through Minichannel Heat Exchanger”, *Numerical Heat Transfer*, Vol. 64, 2013, pp. 1-29.

[4] Dasgupta, E., Siddiqui, F.A., Quaiyum, A., Al-Obaidi, S.A., Fartaj, A., “Experimental Study On Air Cooling Via a Multiport Mesochannel Cross-Flow Heat Exchanger”, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 3, No. 2, 2013, pp. 213-222.

[5] Leong, K.Y., Saidur, R., Kazi, S.N., Mamun, A.H., “Performance Investigation of an Automotive Car Radiator Operated with Nanofluid-Based Coolants Nanofluid as a Coolant in a Radiator”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, No. 17, 2010, pp. 2685-2692.

[6] Eastman, J., Choi, S.U.S., Li, S., Yu, W., Thompson, L.J., “Anomalously Increased Effective Thermal Conductivities of Ethylene Glycol Based Nanofluids Containing Copper