

طراحی بهینه میکرو مبدل‌های حرارتی مستطیلی

محمد مهدی درویشی^۱ و حسن خالقی^۲ مهرداد رئیسی دهکردی^۳ مهرداد کوبی^۴

دانشکده مهندسی مکانیک دانشکده مهندسی مکانیک دانشکده مهندسی شیمی
دانشگاه تربیت مدرس دانشگاه تهران دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۳/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۷/۰۵)

چکیده

در این تحقیق یک میکرومبدل حرارتی مستطیلی با قطر هیدرولیکی ثابت و نسبت منظرهای مختلف در نظر گرفته شده و تغییرات افت فشار و مقاومت حرارتی میکرومبدل در جریان آرام بر حسب توان مصرفی پمپاژ در شار حرارتی ثابت ۰/۳ مگاوات بر مترمربع تحلیل و مقایسه شده است. همچنین، تأثیر خواص وابسته به دمای سیال (گرانروی و ضریب رسانایی) بر افت فشار و مقاومت حرارتی میکرومبدل مطالعه شده‌اند. در نهایت، معیار جدیدی براساس توان مصرفی پمپاژ سیال عامل و میزان گرمای انتقالی بر واحد اختلاف دما به عنوان ابزاری برای بهینه‌سازی میکرومبدل حرارتی مذکور پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: میکرومبدل، نسبت منظری، قطر هیدرولیکی، توان مصرفی پمپاژ

Optimum Design of Rectangular Micro Heat Exchangers

M.M. Darvishi and H. Khaleghi
Mech. Eng. Dep't.
Tarbiat Modares Univ.

M. Raeisi-dehkordi
Mech. Eng. Dep't.
Tehran Univ.

M. Kokabi
Chemistry Eng. Dep't.
Tarbiat Modares Univ.

ABSTRACT

In this work a rectangular micro-heat exchanger with constant hydraulic diameter at various aspect ratios was considered and its pressure drop and thermal parameters versus pumping power in laminar flow at constant heat flux of 0.3 MW/m² were analyzed and compared. Also, the effect of temperature-dependent fluid properties (viscosity and conductivity coefficient) on the pressure drop and thermal resistance of micro heat exchanger were investigated. Finally, a new criterion, based on pumping power and transmitted heat per temperature gradient, was proposed as a tool to optimize the aforementioned micro-heat exchanger.

Keywords: Micro Exchanger, Aspect Ratio, Hydraulic Diameter, Pumping Power

۱- دانشجوی دکتری (نویسنده پاسخگو): mohammadmehdidarvishi@yahoo.com

۲- دانشیار: khaleghi@modares.ac.ir

۳- دانشیار: mraeisi@ut.ac.ir

۴- استاد: mehrir@modares.ac.ir

فهرست علائم

D_h	قطر هیدرولیکی میکروکانال
L	طول میکروکانال
n	تعداد میکروکانالها
\dot{m}	دبی جرمی
\dot{V}	دبی حجمی
ρ	چگالی
μ	گرانروی
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه
k	ضریب رسانایی گرمایی
ΔP	افت فشار
f	ضریب اصطکاک
Re	عدد رینولدز
Po	عدد پوی سوله
ΔT	اختلاف دما
q''	شار حرارتی
\dot{q}	شار حرارتی ویژه
q	میزان انتقال حرارت
EER	نسبت بازده انرژی
w	کار پمپ

پنگ^۳ و همکاران ۱۹۹۴، پنگ و پترسون^۴ ۱۹۹۶، خو^۵ و همکاران ۱۹۹۹ گروه اول از محققانی هستند که عمدتاً به مقایسه ضریب اصطکاک و گرادیان فشار سیال در میکرو و ماکروکانالها پرداخته‌اند و ناپایداری‌های مکرر در نتایج تحقیقات خود را گزارش کرده‌اند.

گروه دوم فالر^۶ و همکاران ۱۹۹۱، یوربانک^۷ و همکاران ۱۹۹۳، مالا و لی^۸ ۱۹۹۹، کیو^۹ ۲۰۰۰ و رن^{۱۰} ۲۰۰۱ هستند که عمده تفاوت‌های رفتاری سیال در میکرو و ماکروکانالها را ناشی از پدیده‌های سطحی از قبیل صافی سطح، نیروهای الکتروستاتیک، تأثیرات دمایی و میکروگردابه‌های نزدیک دیواره که عامل افزایش ضریب اصطکاک در میکروکانالها نسبت به نظریه ماکروکانالها است، دانسته‌اند.

خو و همکاران ۲۰۰۰، شارپ^{۱۱} ۲۰۰۱ و جودی^{۱۲} و همکاران ۲۰۰۲ گروه سوم محققان هستند که تطابق مقدار ضریب اصطکاک در میکروکانالها را با نظریه ماکروکانالها گزارش نموده‌اند.

در دهه اخیر تحقیقاتی به شرح زیر انجام شده است: لو و زائو^{۱۳} در سال ۲۰۰۲ به بررسی تحلیلی انتقال حرارت جریان سیال آب در میکروکانال مستطیلی با ضریب تخلخل متفاوت پرداخته است. آن‌ها افزایش عدد ناسلت با افزایش تخلخل را گزارش کرده‌اند [۳].

پارک^{۱۴} و همکاران در سال ۲۰۰۳ به بررسی تجربی انتقال حرارت و جریان سیال در میکروکانال مستطیلی پرداخته‌اند. تأثیر قابل توجه تغییرات خواص مواد با دما بر افت فشار از نتایج ارائه شده آن‌ها است [۴].

کو و کلینستریور^{۱۵} در سال ۲۰۰۴، اتلاف لزج در میکروکانال مستطیلی را مطالعه نموده‌اند. موضوع مورد بررسی آن‌ها تأثیر نسبت منظری بر اتلاف لزج بوده است [۵].

۱- مقدمه

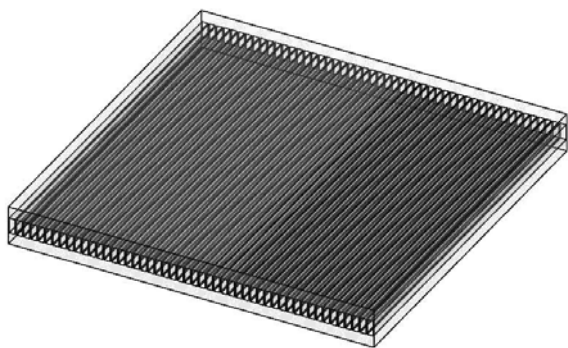
پیشرفت علوم و فناوری مستلزم محاسبات حجیم‌تر، دقیق‌تر و سریع‌تر است. به این علت مهندسان الکترونیک و رایانه با دستیابی به علوم میکرو و نانو فناوری هر روزه پردازنده‌های سریع‌تر، قوی‌تر و کوچک‌تری را روانه بازار می‌کنند. افزایش سرعت پردازش و قدرت محاسباتی و از طرف دیگر کاهش ابعاد آن‌ها موجب افزایش شارحرارتی و بحرانی شدن مسأله دفع حرارت از پردازنده‌ها شده است.

استفاده از میکروکانالها، یکی از ایده‌های جذاب برای غلبه بر مشکل دفع حرارت از سطوح شارحرارتی بالا توسط تاکرمین و پیژه^۱ در سال ۱۹۸۱ ارائه شد که پس از آن تحقیقات زیادی در این زمینه صورت پذیرفته است [۱]. وانگ و ایز^۲ اهمیت تحقیقات انجام شده تاکنون در زمینه جریان سیال درون میکروکانال را به سه گروه به شرح زیر تقسیم کرده است [۲]:

- 3- Peng
- 4- Peterson
- 5- Xu
- 6- Faller
- 7- Yurbanek
- 8- Lee
- 9- Qu
- 10- Ren
- 11- Sharp
- 12- Judi
- 13- Lu & Zhao
- 14- Park
- 15- Koo & Kleinstreuer

- 1 -Tuckerman & Pease
- 2-Wongwises

با توجه به ابعاد این ریزپردازنده، برای دفع حرارت تولیدی آن، میکرومبدلی برای شارحرارتی $0/3$ مگا وات بر مترمربع با سطح مقطع مستطیلی به ابعاد $40 \times 20 \times 0/5$ میلی متر با قطر هیدرولیکی ۷۵ میکرون، که در شکل ۱ به نمایش درآمده، در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): نمایی از میکرومبدل طراحی شده.

فرضیات حاکم بر این تحقیق عبارتند از:

- دمای آب ورودی برابر ۲۹۳ درجه کلوین است.
- حداکثر دمای مجاز در میکروکانال، برای جلوگیری از دوفازی شدن سیال مذکور برابر ۳۷۲ درجه کلوین است.
- رژیم جریان آرام در شش سطح از اعداد رینولدز (۴۵۰ و ۳۰۰، ۲۲۵، ۱۵۰، ۱۰۰، ۵۰) اختیار شده است.
- نسبت منطری‌های میکروکانال (نسبت عرض به طول) در شش سطح (در محدوده ۱-۰/۱) انتخاب شده است.
- چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه سیال عامل ثابت فرض شده است، زیرا تغییرات چگالی سیال عامل با دما در محدوده دمای کاری (از ۳۷۲-۲۹۳ درجه کلوین) حدود ۲/۳ درصد و تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه حدود ۰/۲ درصد است که تأثیر چندانی بر نتایج ندارند [۱۱].
- گرانشی سیال عامل نسبت به دما متغیر اختیار شده، زیرا گرانشی سیال در محدوده دمای کاری میکرومبدل حدود ۶۰ درصد تغییرات نشان می‌دهد که ثابت فرض کردن آن خطای بزرگی در نتایج ایجاد می‌کند.

در شکل ۲، نمودار تغییرات گرانشی با دما آورده شده است که از معادله درجه سوم درونیابی شده ذیل با حداکثر خطای ۰/۴ درصد تبعیت می‌کند [۳]:

ژانگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۵ یک میکرومبدل حرارتی را برای تراشه الکترونیکی به صورت تجربی آزمودند. افت فشار و مقاومت حرارتی از پارامترهای مطالعه شده در این تحقیق است [۶].

حل تحلیلی میکروکانال‌های مستطیلی با نسبت منطری-های مختلف و خواص مواد سیال ثابت، موضوع تحقیق لی و گاریمالا^۲ در سال ۲۰۰۶ بوده است [۷].

لی و پترسون^۳ در سال ۲۰۰۷ به حل عددی سه‌بعدی میکرومبدل حرارتی مستطیلی پرداخته و ۲۰ درصد اختلاف با نتایج تجربی پیزه و تاکرمن را عنوان کرده‌اند [۸].

در سال ۲۰۰۸، جاستین^۴ و همکاران، حل عددی میکروکانال سه‌بعدی مستطیلی با نسبت منطری‌های مختلف در رژیم آرام را انجام داده‌اند. افزایش افت فشار با افزایش رینولدز از نتایج گزارش شده توسط آنان است. در این کار نیز خواص مواد ثابت در نظر گرفته شده است [۹].

چن^۵ و همکاران در سال ۲۰۰۹، به شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان سیال و انتقال حرارت در میکروکانال‌های غیردایره‌ای پرداخته‌اند. مقایسه افت فشار و عدد ناسلت در هندسه‌های مختلف در این کار ارائه شده است [۱۰].

به طور کلی در تحقیقات انجام شده تاکنون، تأثیر هم‌زمان تغییر نسبت منطری و تغییر خواص مواد با دما بر پارامترهای جریان و حرارتی میکرومبدل حرارتی مورد بررسی قرار نگرفته که موضوع تحقیق حاضر است.

در این تحقیق، با تغییر نسبت منطری در شش سطح در حالت تغییر خواص مواد با دما (در مقایسه با خواص ثابت مواد) در اعداد رینولدز مختلف (۴۵۰-۵۰) در رژیم آرام (شش سطح)، چگونگی تغییرات افت فشار، مقاومت گرمایی و عدد ناسلت مطالعه شده است.

۲- صورت مسأله و فرضیات

دفع حداکثری حرارت از سطح ریزپردازنده‌های پیشرفته امروزی که حداکثر ۲۵۰-۷۰ وات اتلاف حرارت دارند، مسأله اصلی این تحقیق است.

1- Zhang
2- Lee & Garimella
3- Li & Peterson
4- Justin
5- Chen

۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت در میکروکانال، معادله پیوستگی، بقای اندازه حرکت (ناویر-استوکس) و انرژی بوده که به ترتیب در روابط (۳-۵) آمده است [۴]:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (3)$$

معادله اندازه حرکت:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + s_i, \quad (4)$$

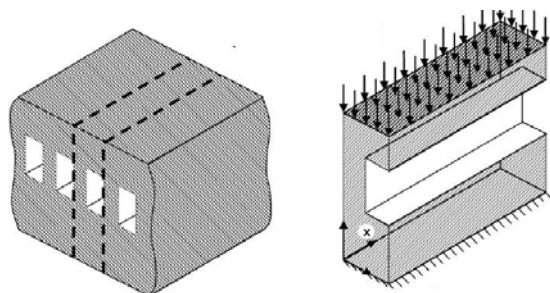
معادله انرژی:

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho C_p u_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + s_i. \quad (5)$$

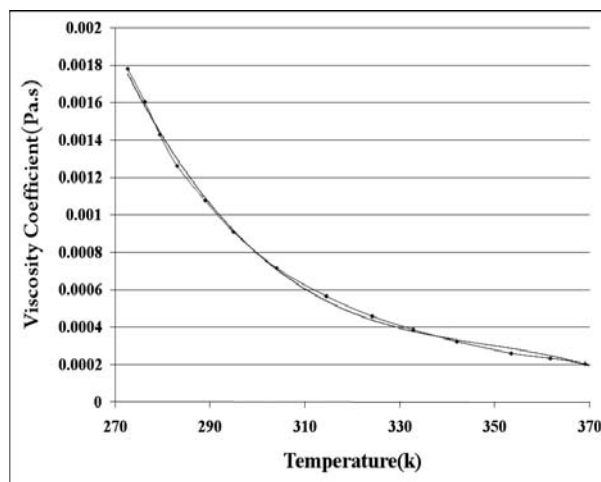
معادلات فوق، به روش حجم محدود، منفصل شده و با استفاده از الگوریتم سیمپل^۱ حل شده‌اند. در انفصال معادلات از تقریب پسر^۲ مرتبه دوم برای جمله‌های جابه‌جایی و از تقریب مرکزی مرتبه دوم برای جمله‌های نفوذ استفاده شده است.

۴- تحلیل عددی مسأله

در این تحقیق، میکرومبدل‌های مختلف با مقطع مستطیلی با نسبت منظری‌های مختلف مش‌بندی شده و نتایج تحلیل‌های عددی انجام گرفته به صورت مستقل از شبکه استخراج شده است. در شکل ۴ نمونه میدان هندسی استفاده شده در تحلیل عددی آورده شده است.



شکل (۴): نمایی از میدان هندسی حل شده.

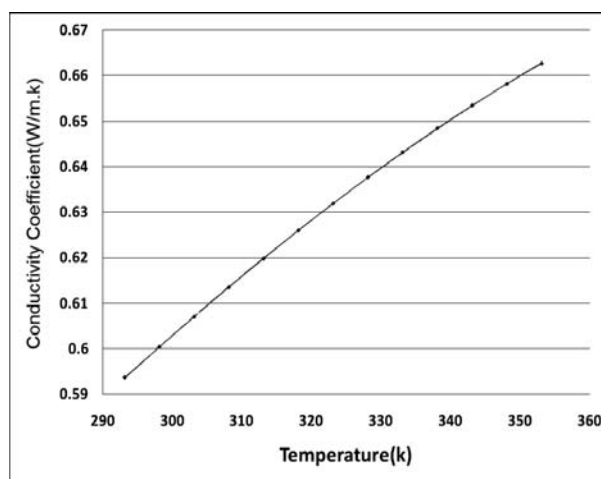


شکل (۲): تغییرات گرانیوی آب-دما و منحنی منطبق شده [۳].

$$\mu(T) = -2.703e - 9 \times T^3 + 2.821e - 6 \times T^2 - 9.853e - 4 \times T + 0.115485. \quad (1)$$

ضریب رسانایی سیال عامل، تابع دماست و در بازه دمای کاری، حدود ۱۵ درصد تغییرات را نشان می‌دهد. در ضمن فرض کردن آن خطای ملموسی در نتایج ایجاد می‌کند. معادله درجه دوم درونیابی شده برای آن با حداکثر خطای ۰/۱ درصد مطابق شکل ۳ عبارت است از:

$$k(T) = 4.161838e - 7 \times T^2 - 3.846472e - 4 \times T + 1.7656953e - 2. \quad (2)$$



شکل (۳): تغییرات ضریب رسانایی آب-دما و منحنی منطبق شده [۱۱].

1- SIMPLE
2- Upwind

۴-۱- شرایط مرزی

در مرز ورودی میکروکانال از شرط مرزی دبی جرمی و دما ثابت، در مرز خروجی آن از شرط جریان توسعه یافته ($\frac{\partial}{\partial x} = 0$)، در کف میکروکانال از شرط مرزی شار حرارتی ثابت، در دیواره بالایی میکروکانال از شرط مرزی عایق (با توجه به ناچیز بودن انتقال حرارت آزاد نسبت به شار حرارتی کف، از آن صرف نظر شده است) و در دیواره‌های جانبی از شرط مرزی تقارن به صورت زیر استفاده شده است.

$$\dot{m} = 8.11e-6 \text{ kg / Sec}$$

$$T = 293 \text{ K}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = 0$$

$$\dot{q} = 0.3 \frac{MW}{m^2}$$

$$\dot{q} = 0 \frac{W}{m^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = 0$$

Channel Inlet

Channel Outlet

Channel Bottom

Top Wall

Side Wall

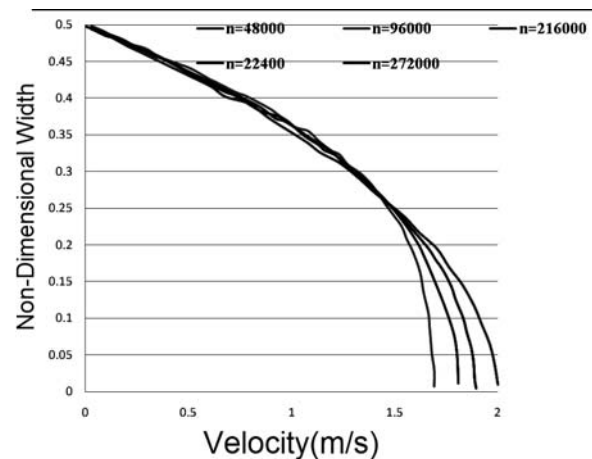
۴-۲- الگوریتم حل و اعتباریابی

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، روش حل دستگاه معادلات حاکم مبتنی بر الگوریتم سیمپل بوده است. برای منفصل‌سازی جمله‌های جابه‌جایی و نفوذ به ترتیب از تقریب‌های پسر و مرتبه دوم و مرکزی مرتبه دوم استفاده شده است. حل دستگاه معادلات غیرخطی هم با استفاده از روش خطی‌سازی نیوتن و با استفاده از روش مبتنی بر الگوریتم توماس صورت پذیرفته است [۴].

قبل از تحلیل و بررسی نتایج حل، باید از صحت آن‌ها اطمینان حاصل شود، بنابراین، میزان تطابق نتایج عددی این تحقیق با نتایج تحلیل عددی جاستین و همکاران در شکل ۷ مقایسه شده است [۹]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عدد پوی سوله^۱ در میکروکانال با نتیجه عددی پیش‌بینی شده تطابق خوبی دارد.

در شکل ۸ میزان تطابق نتایج عددی این تحقیق با نتایج تحلیل عددی چن و همکاران در مورد عدد ناسلت مقایسه شده است [۱۰].

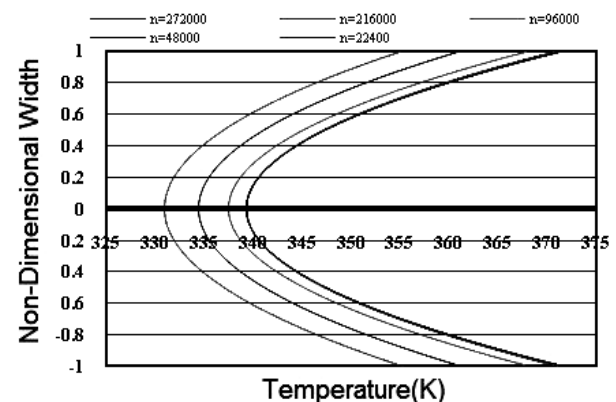
در شکل ۵ نمودار استقلال از شبکه برای پروفیل سرعت در میکروکانال مستطیلی با نسبت منظری ۰/۸۶۵ در رینولدز ۱۰۰ به نمایش در آمده است.



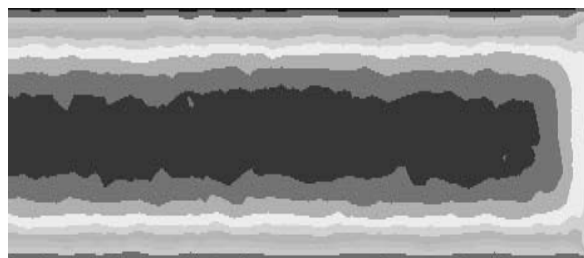
شکل (۵): نمودار استقلال از شبکه برای پروفیل سرعت.

در شکل ۶ نمودار استقلال از شبکه برای پروفیل دما در میکروکانال مستطیلی با نسبت منظری ۰/۸۶۵ در رینولدز ۱۰۰ به نمایش در آمده است.

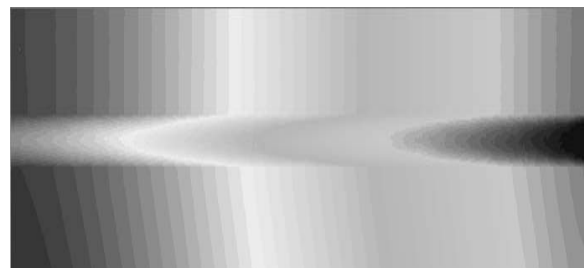
میکروکانال با تعداد نقاط شبکه ۲۲,۴۰۰، ۴۸,۰۰۰، ۹۶,۰۰۰، ۲۱۶,۰۰۰ و ۲۷۲,۰۰۰ به صورت عددی حل شده که با تغییر تعداد نقاط شبکه از ۲۱۶,۰۰۰ به ۲۷۲,۰۰۰ تنها ۰/۰۵ درصد در حداکثر مقدار سرعت و ۰/۱۲ درصد در حداکثر اختلاف دما تغییر مشاهده شده است، بنابراین، تحلیل‌های عددی، بر پایه ۲۷۲,۰۰۰ نقطه بنا نهاده شده است.



شکل (۶): نمودار استقلال از شبکه برای پروفیل دما.



(الف)



(ب)

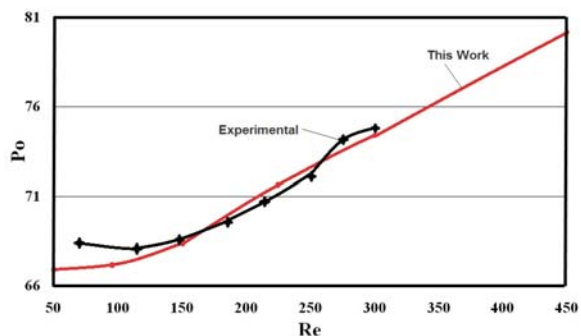
شکل (۹): (الف) کانتور سرعت میکروکانال
(ب) کانتور دمای میکروکانال.

۵-۲- حالت خواص مواد ثابت و وابسته به دما

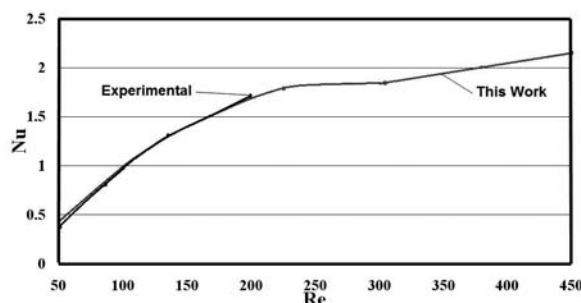
تغییرات افت فشار، مقاومت گرمایی و ناسلت بر حسب تغییرات رینولدز مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۲-۱- افت فشار بر حسب رینولدز

در شکل ۱۰، افت فشار بر حسب تغییرات عدد رینولدز در میکروکانال با نسبت منطری ۰/۸۶۵ در سه حالت خواص مواد ثابت، گرانی و وابسته به دما و گرانی و ضریب رسانایی وابسته به دما بر حسب عدد رینولدز نمایش داده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افت فشار در میکروکانال برای حالت خواص مواد وابسته به دما (گرانی و ضریب رسانایی سیال عامل) به مقدار قابل توجهی کمتر از حالت خواص مواد مستقل از دما است که علت آن کاهش گرانی و سیال عامل با افزایش دما به دلیل جذب حرارت است، بنابراین، افت فشار دوسر میکرومبدل در حالت واقعی (خواص مواد وابسته به دما) کمتر از حالت خواص مواد مستقل از دما است. مشاهده می‌شود که در رینولدز ۵۰ مقدار تفاوت برابر ۳۰ درصد است در حالی که در رینولدز ۴۵۰ میزان این اختلاف برابر ۱۲ درصد است. توجه شود که کاهش عدد رینولدز یعنی افزایش دمای سیال و در نتیجه کاهش گرانی و آن در طول



شکل (۷): عدد پوی سوله [۹] در مقایسه با نتایج تحقیق.



شکل (۸): عدد ناسلت [۱۰] در مقایسه با نتایج تحقیق.

همانطور که مشاهده می‌شود، عدد ناسلت نیز مانند عدد پوی سوله در میکروکانال با نتیجه عددی پیش‌بینی شده تطابق خوبی دارد.

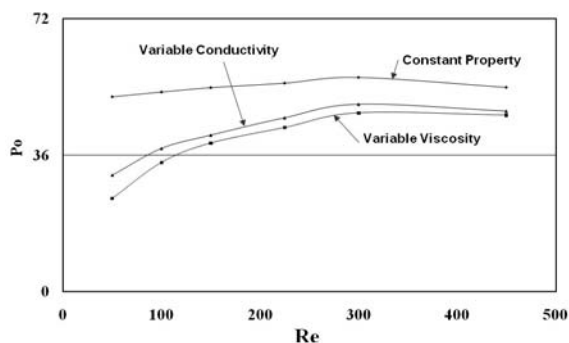
۵- نتایج و بحث

در این بخش، پس از اثبات تطابق نتایج به دست آمده از حل عددی با فیزیک مسأله، از طریق ارائه کانتورهای دما و سرعت در یک میکروکانال نمونه، نتایج مربوط به تغییرات افت فشار، مقاومت گرمایی و عدد ناسلت بر حسب مصرفی پمپاژ در نسبت منطری‌های مختلف مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۱- کانتورهای دما و سرعت

نتایج استخراج شده از میکروکانال‌ها، در شکل ۹ آمده است. در این شکل کانتورهای سرعت و دما برای میکروکانال با نسبت منطری ۰/۸۶۵ در عدد رینولدز ۱۰۰ آورده شده است. همانطور که دیده می‌شود، افزایش سرعت از سمت دیواره تا مرکز کانال و خطوط هم‌دما که بر مرز بالایی میکروکانال عمودند، مؤید تطابق نتایج عددی با فیزیک مسأله است.

مقدار این عدد از ۲۴-۹ برای کانال مستطیلی در نسبت منطری‌های بین ۱-۰ تغییر می‌کند [۱۲]. در شکل ۱۲، مقدار عدد پوی‌سوله بر حسب عدد رینولدز در هر سه حالت مورد بررسی ارائه شده است. از آنجا که میزان افت فشار در اعداد رینولدز مشابه در حالت خواص مواد وابسته به دما کمتر از حالت خواص مواد مستقل از دما است، بنابراین، عدد پوی-سوله در حالت اول به طور چشم‌گیری کمتر از حالت دوم است، ولی تفاوت ملموسی بین ضریب رسانایی در دو حالت مشاهده نمی‌شود.

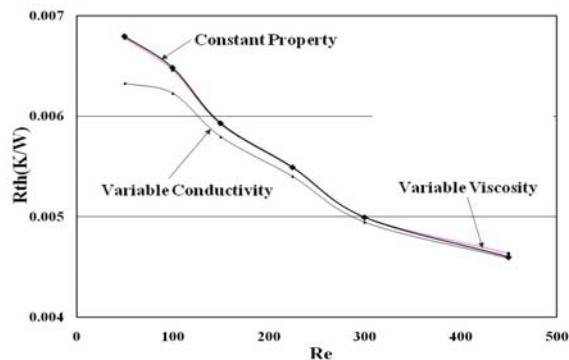


شکل (۱۲): نمودار پوی‌سوله-رینولدز.

۵-۲-۲- مقاومت گرمایی بر حسب رینولدز
در طراحی میکرومبدل‌ها، مقاومت حرارتی (رابطه ۸) به عنوان معیار مقایسه استفاده می‌شود.

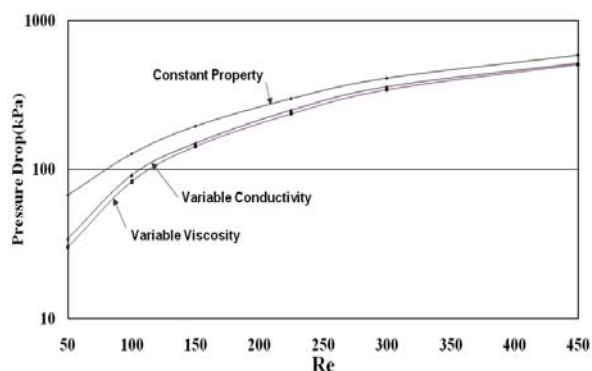
$$R_{th} = \frac{T_f - T_b}{q} \quad (۸)$$

در شکل ۱۳ مقدار این پارامتر بر حسب عدد رینولدز برای میکروکانال با نسبت منطری ۰/۸۶۵ در هر سه حالت مورد بررسی آورده شده است.



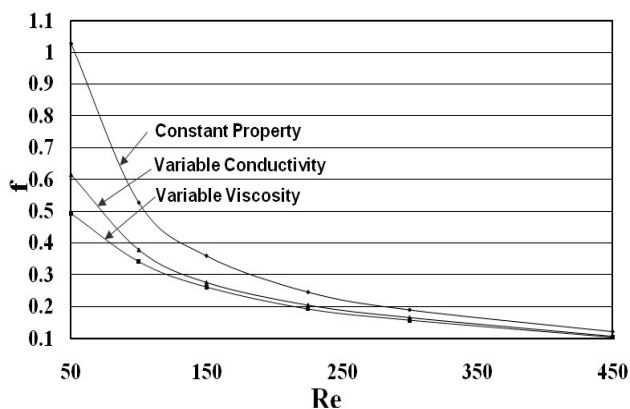
شکل (۱۳): نمودار مقاومت حرارتی-رینولدز.

میکروکانال که خود موجب افزایش اختلاف افت فشار در سه حالت خواص مواد مستقل از دما و وابسته به آن می‌شود.



شکل (۱۰): نمودار افت فشار-رینولدز در سه حالت مورد بررسی.

برای مقایسه بهتر نتایج در سه حالت ذکر شده، در شکل ۱۱ نمودار ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز آورده شده است.



شکل (۱۱): نمودار ضریب اصطکاک-رینولدز.

ضریب اصطکاک از رابطه (۶) محاسبه شده است.

$$f = \frac{8\Delta P}{\rho u_m^2 L/D} \quad (۶)$$

همانطور که در شکل ۱۱ مشخص است، ضریب اصطکاک در حالت خواص مواد وابسته به دما کمتر از حالت خواص مواد مستقل از دماست.

یکی دیگر از معیارهای مقایسه هیدرودینامیکی میکرو-کانال‌ها عدد پوی‌سوله است. از نظریه ماکروکانال‌ها برای جریان آرام در لوله‌ها داریم [۱۲]:

$$Po = f \cdot Re = 64. \quad (۷)$$

با توجه به ثابت بودن شار حرارتی و دبی ورودی، در حالت خواص مواد ثابت و گرانیوی وابسته به دما، عدد ناسلت تغییر ویژه‌ای ندارد، اما در حالت ضریب رسانایی وابسته به دما به دلیل کاهش مقاومت حرارتی، افزایش ناسلت مشاهده می‌شود.

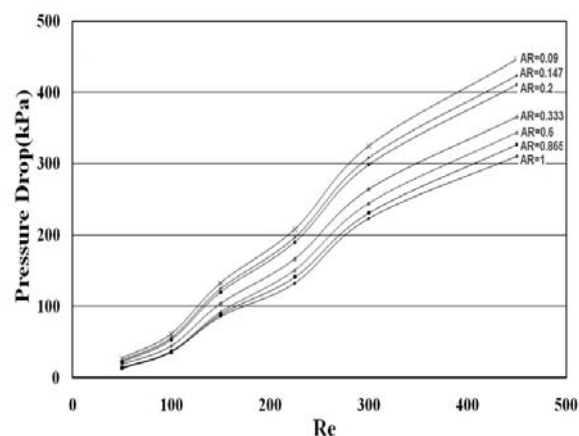
در این تحقیق، به علت تأثیر زیاد تغییرات خواص مواد با دما بر روی پارامترهای هیدرولیکی و حرارتی میکرومبدل حرارتی کلیه نتایج بر اساس خواص مواد وابسته به دما ارائه، تحلیل و مقایسه شده است. بدیهی است که کارهای عددی انجام شده با فرض خواص مواد ثابت به هیچ عنوان از دقت مناسبی برخوردار نیستند و استفاده از روش دمای متوسط ورودی و خروجی برای محاسبه خواص مواد، علیرغم بهبود دقت محاسبات، خطای زیادی نسبت به حالت واقعی دارد. بدین ترتیب با توجه به مشخص شدن نحوه تغییرات پارامترهای عملکردی، امکان طراحی میکرومبدل حرارتی و بهینه سازی نسبت منظری فراهم می‌شود.

۳-۵- نسبت منظری

در ادامه اثر نسبت منظری بر افت فشار و مقاومت گرمایی نیز بررسی گردیده است.

۳-۵-۱- اثر نسبت منظری بر افت فشار

در نمودار شکل ۱۵ افت فشار بر حسب رینولدز در نسبت منظری‌های مختلف از ۰/۱-۱ به نمایش درآمده است.



شکل (۱۵): نمودار افت فشار-رینولدز در نسبت منظری‌های مختلف.

افزایش عدد رینولدز، به مفهوم افزایش نیروهای اینرسی در تقابل با نیروهای لزجی است. انتقال حرارت از بدنه میکروکانال به سیال عامل از طریق سازوکار جابه‌جایی، مطابق رابطه (۹) صورت می‌گیرد:

$$q = hA\Delta T. \quad (9)$$

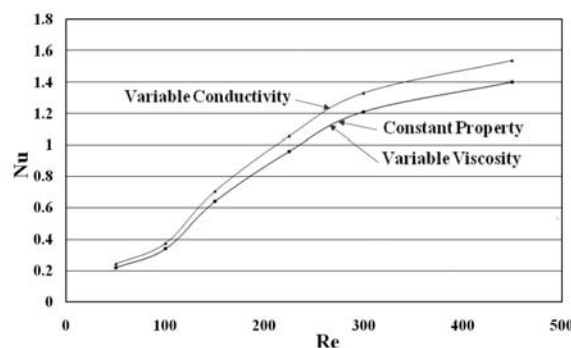
با افزایش عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به دلیل غالب شدن نیروهای اینرسی، زیاد می‌شود و لذا با افزایش عدد رینولدز، اختلاف دمای سیال بالک و سطح میکروکانال و در نتیجه، مقاومت گرمایی کاهش می‌یابد. توجه شود که چون مقدار شار حرارتی در هر سه حالت یکسان بوده و اختلاف دبی سیال در حالت‌های مورد بررسی ناچیز است، بنابراین، مقدار مقاومت حرارتی در حالت خواص مواد مستقل از دما و گرانیوی وابسته به دما تفاوتی ناچیزی با یکدیگر دارند و در حالت ضریب رسانایی وابسته به دما کاهش میزان مقاومت حرارتی ملموس‌تر است.

۳-۲-۵- ناسلت بر حسب عدد رینولدز

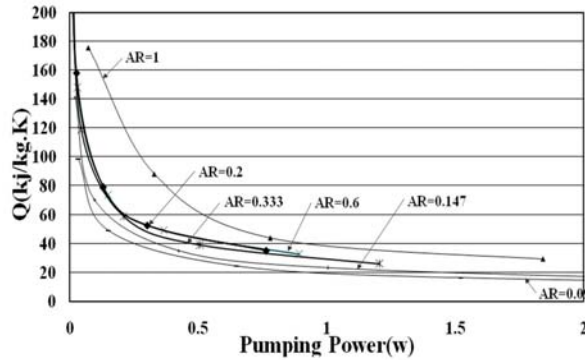
در طراحی حرارتی میکرومبدل، عدد ناسلت (رابطه ۱۰) بر حسب عدد رینولدز مورد بررسی قرار گرفته است:

$$Nu = \frac{hD}{k}. \quad (10)$$

در شکل ۱۴ مقدار این پارامتر بر حسب عدد رینولدز برای میکروکانال با نسبت منظری ۰/۸۶۵ در هر سه حالت مورد بررسی آورده شده است. با افزایش عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به دلیل غالب شدن نیروهای اینرسی، زیاد می‌شود، بنابراین، با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت افزایش می‌یابد.



شکل (۱۴): نمودار ناسلت-رینولدز.

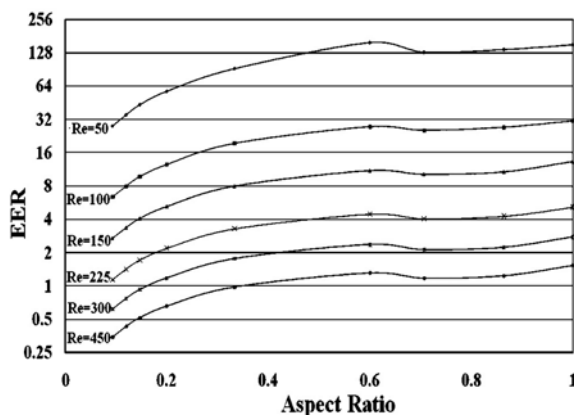


شکل (۱۷): نمودار انتقال حرارت ویژه - توان پمپاژ در نسبت منظری های مختلف.

فشار در اثر کاهش نسبت منظری به دلیل نزدیک شدن دیواره میکروکانال، در توان پمپاژ ثابت، دبی نانوسیال با کاهش نسبت منظری کم می شود. لذا با شارحرارتی ثابت از کف و کاهش دبی نانوسیال، نرخ انتقال حرارت ویژه در توان پمپاژ ثابت با افزایش نسبت منظری زیاد می گردد. همان طور که در قسمت نتایج دیده شد، با افزایش عدد رینولدز میزان دمای متوسط سیال عامل، کاهش و میزان افت فشار نامطلوب می یابد که اثر اول مطلوب ولی ازدیاد افت فشار نامطلوب است، بنابراین، انتخاب مقدار بهینه نسبت منظری ضروری است. پارامتر EER به صورت زیر تعریف می شود:

$$EER = \frac{\dot{q}}{W} \quad (12)$$

در شکل ۱۸، نمودار EER بر حسب نسبت منظری در رینولدزهای مختلف آورده شده است.

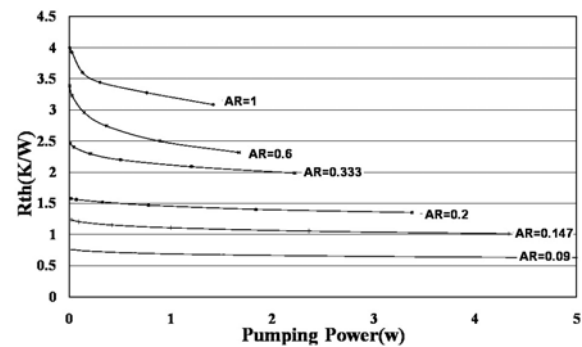


شکل (۱۸): نمودار EER - نسبت منظری در رینولدزهای مختلف.

مشاهده می شود که در رینولدز ثابت با کاهش نسبت منظری، افت فشار افزایش پیدا می کند؛ با توجه این که با کاهش نسبت منظری، دیواره های کانال به یکدیگر نزدیک می گردد و از آنجائی که سرعت در نسبت منظری های مختلف ثابت است، لذا گرادیان سرعت زیاد شده و در نتیجه تنش برشی دیواره و افت فشار دوسر میکروکانال افزایش می یابد.

۵-۳-۲- اثر نسبت منظری بر مقاومت گرمایی

در شکل ۱۶ مقاومت گرمایی بر حسب توان مصرفی پمپاژ در نسبت منظری های مختلف از ۱-۰/۱ به نمایش درآمده است. مشاهده می شود که در توان پمپاژ ثابت با کاهش نسبت منظری، مقاومت گرمایی کاهش می یابد، زیرا با کاهش نسبت منظری، سطح انتقال حرارت افزایش و بنابراین، اختلاف دمای بدنه و سیال و در نتیجه مقاومت حرارتی کاهش می یابد.



شکل (۱۶): نمودار مقاومت گرمایی - توان پمپاژ در نسبت منظری های مختلف.

۵-۴- معیار مقایسه میکرومبدل

معمولاً برای مقایسه عملکرد حرارتی میکرومبدل از نرخ انتقال حرارت ویژه به صورت نسبت میزان حرارت منتقل شده بر واحد جرم استفاده می گردد، رابطه (۱۱):

$$\dot{q} = \frac{q}{\dot{m}} \quad (11)$$

در این صورت، نمودار نرخ انتقال حرارت ویژه بر حسب توان مصرفی پمپاژ در نسبت منظری های مختلف در این تحقیق، مطابق شکل ۱۷ قابل نمایش است. همانطور که مشاهده می شود در توان پمپاژ ثابت، کاهش نسبت منظری با کاهش نرخ انتقال حرارت ویژه همراه است. با توجه به افزایش افت

3. Zhao, C.Y. and Lu, T.J., "Analysis of Microchannel Heat Sinks for Electronics Cooling", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, No. 24, pp. 4857-4869, 2002.
4. Park, H., Pak, J.J., Young Son, S., Lim, G., and Song, I., "Fabrication of a Microchannel Integrated with Inner Sensors and Analysis of its Laminar Flow Characteristic", *Sensors and Actuators A: physica*, Vol. 103, No. 3, pp. 317-329, 2003.
5. Koo, J. and Kleinstreuer, C., "Viscous Dissipation Effects in Microtubes and Microchannels", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 14-16, pp. 3159-3169, 2004.
6. Zhang, H.Y., "Single-Phase Liquid Cooled Microchannel Heat Sink for Electronics Packages", *Appl. Thermal Eng.*, Vol. 25, No. 10, pp. 1472-1487, 2005.
7. Lee, P.S. and Garimella, S.V., "Thermally Developing Flow and Heat Transfer in Rectangular Microchannels of Different Aspect Ratios", *Int. J. Heat and mass transfer*, Vol. 49, No. 17-18, pp. 3060-3073, 2006.
8. Li, J. and Peterson, G.P., "Three-dimensional Numerical Optimization of Silicon-Based High Performance Parallel Microchannel Heat Sink with Liquid Flow", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 50, No. 15-16, pp. 2895-2904, 2007.
9. Mleak, J.D., Anand, N.K., and Rightley, M.J., "Three-dimensional Laminar Flow and Heat Transfer in a Parallel Array of Microchannels Etched on a Substrate", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, No. 21-22, pp. 5182-5191, 2008.
10. Chen, Y., "Three-dimensional Numerical Simulation of Heat and Fluid Flow in Noncircular Microchannel Heat Sinks", *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No. 9, pp. 917-920, 2009.
11. Tsai, T.H. and Chein, R., "Performance Analysis of Nanofluid-Cooled Microchannel Heat Sinks", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, No. 5, pp. 1013-1026, 2007.
12. White, F.M., "Viscous Fluid Flow", McGraw Hill, New York, 1991.

۶ - نتیجه گیری

در این مقاله، ضمن ارائه اهم دستاوردهای تحقیق، معیاری برای طراحی و مقایسه کارآیی میکرومبدل‌ها پیشنهاد می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود که اثر تغییر گرانروی با دما بر پارامترهای جریان (افت فشار، عدد پوی‌سوله، ضریب اصطکاک و ...) بسیار زیاد است و ثابت در نظر گرفتن آن خطای زیادی ایجاد می‌کند.

در حالت ضریب رسانایی متغیر، پارامترهای تأثیرگذار در میکرومبدل‌ها در مقایسه با حالت ضریب رسانایی ثابت، تفاوت بسیار کمی دارند، زیرا در این محدوده از اعداد رینولدز، سازوکار جابه‌جایی بر انتقال حرارت حاکم است؛ در صورتی که اعداد رینولدز خیلی کوچک شوند با توجه به افزایش سهم رسانایی در سازوکار انتقال حرارت در تقابل با جابه‌جایی، اختلاف بین این دو حالت بارزتر می‌شود.

توجه شود که کاهش نسبت منظری منجر به افزایش سطح انتقال حرارت جابه‌جایی مطلوب می‌گردد؛ اما از طرفی با توجه به ثابت بودن سرعت ورودی، کاهش نسبت منظری که به منزله نزدیک شدن دیواره میکروکانال و افزایش تنش برشی و در نتیجه افزایش افت فشار که نامطلوب است می‌شود، پس نسبت منظری بهینه‌ای وجود دارد که نسبت حرارت منتقل شده به توان پمپاژ در آن بیشینه است.

در این تحقیق، معیار جدیدی با عنوان EER جهت مقایسه عملکرد میکرومبدل حرارتی ارائه شده است. بالاترین نقطه نمودار در نسبت منظری‌های مورد بررسی، بهترین نقطه طراحی میکرومبدل است. همان‌طور که دیدیم کاهش رینولدز منجر به افزایش EER شده است بنابراین میکرومبدل با نسبت منظری ۰/۶ در رینولدز ۵۰، میکرومبدل بهینه در محدوده مورد بررسی است.

مراجع

1. Tuckerman, D.B. and Pease, R.F.W., "High-Performance Heat Sinking for VLSI", *IEEE Electronic Devices Letters EDL-2*, Vol. 2, No. 5, pp. 126-129, 1981.
2. Trisaksri, V. and Wongwises, S., "Critical Review of Heat Transfer Characteristics of Nanofluids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, No. 3, pp. 512-523, 2007.