



مقایسه عملکرد خنک‌کاری در یک میکروکانال با منابع حرارتی گسسته تحت محرک گرادیان فشار و الکترواسمتیکی

امین هادیزاده^۱، سعید جمشیدی^۱ و امین حقیقی پشتیری^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

^{۲*} دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

^۳ مرکز تحقیقات انرژی‌های نو و ایمنی انرژی دانشگاه گیلان، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۹

چکیده

دستگاه‌های الکترونیکی و تجهیزات پیشرفته در حوزه مختلف، بخش‌هایی دارند که تولید گرما یک ویژگی مشترک بین آن‌ها است و گاهی اوقات آن قدر شدید است که نیاز به طراحی یک ساختار جدید دارد که بتواند به خنک کردن آن‌ها کمک کند. با این حال، چالش زمانی پیچیده‌تر می‌شود که مقیاس دستگاه در اندازه میکرو یا نانو باشد، جایی که پمپ‌های معمولی با قطعات الکتریکی نمی‌توانند عمل کنند. در مطالعه حاضر با استفاده از میکروپمپ‌های الکترواسمتیک به این مساله پرداخته می‌شود و اثر زاویه میکروکانال و جاذبه بر نرخ انتقال حرارت بررسی می‌شود. زاویه میکروکانال در محدوده ۰ تا ۷۵ درجه و عدد گراشوف بین ۰ و ۱۰۰ متغیر است. برای درک بهتر، نتایج حاصل از یک جریان تحت گرادیان فشار خالص با یک جریان الکترواسمتیک خالص مقایسه می‌شود، در حالی که نرخ جریان ثابت است. شاخص عملکرد حرارتی برای اندازه‌گیری کارایی الگوهای جریان در هر دو مورد به کار گرفته می‌شود. تغییرات محاسبه شده از حدود ۱۱٪ تا بیش از ۴۴٪ متغیر است که نشان می‌دهد دو عامل افزایش زاویه میکروکانال نسبت به سطح افقی و کاهش عدد گراشوف، رفتار مشابهی دارند و بازده حرارتی را افزایش می‌دهند.

کلمات کلیدی: خنک‌کننده الکترونیکی؛ الکترواسمتیک؛ میکروکانال؛ انتقال حرارت؛ عدد ناسلت.

Comparison of cooling performance in a microchannel with discrete heat sources under pressure gradient and electroosmotic driven

Amin Hadizade¹, Saeed Jamshidi¹, Amin Haghghi Poshtiri^{2*,3}

¹ M.Sc., Mech. Eng., Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

^{2,*} Assoc. Prof., Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

³ Research Center for Renewable Energy and Energy Safety, University of Guilan, Rasht, Iran

Abstract

Electronic devices and advanced equipments have various sections that generated heat is a common feature among them, and sometimes it becomes so intense that it requires the design of a new structure to help cool them. However, the challenge becomes more complex when the device is in micro or nano size, where ordinary pumps with electrical components cannot function. This study addresses this issue using electroosmotic micro-pumps and examines the effect of microchannel angle and gravity on heat transfer rate. The microchannel angle ranges from 0 to 75 degrees, and the Grashof number varies between 0 and 100. For better understanding, the results obtained from a pressure-driven flow are compared with those from a purely electroosmotic flow while maintaining a constant flow rate. Thermal performance index is employed to measure the efficiency of flow patterns in both cases. The calculated variations range from approximately 11% to over 44%, indicating that two factors, increasing the microchannel angle relative to the horizontal plane and decreasing the Grashof number, exhibit similar behavior and enhance the heat transfer efficiency.

Keywords: Electronics Cooling; Electroosmotic; Microchannel; Heat transfer; Nusselt Number.

۱- مقدمه

پیشرفت تکنولوژی بشر را مجبور به مطالعه پدیده‌های فیزیکی در مقیاس‌های میکرو و نانو کرده است. شناخت و کاربرد این پدیده‌ها که عموماً با انتقال گرما و جرم سر و کار دارند، منجر به بهره‌وری بیشتر تجهیزات مدرن می‌شود. الکتروکینتیک یکی از پدیده‌های شناخته شده برای تحریک سیالات به حرکت در این محیط‌ها است که در آن استفاده از پتانسیل الکتریکی باعث حرکت سیال و ایجاد جریان پلاگ^۱ می‌شود. علاوه بر این، دستگاه‌های الکترونیکی که مرجعی برای استفاده از پمپ‌ها هستند، معمولاً مقدار زیادی گرما تولید می‌کنند [۱]. در سال‌های اخیر پمپ‌های الکترواستمیک در مقایسه با سایر میکروپمپ‌ها مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. از جمله مزایای آن‌ها ایجاد جریان‌های بدون پالس و حذف قطعات متحرک است [۲].

ماخوادیای و همکاران [۳] جریان ترکیبی الکترواستمیک را با اختلاف فشار هیدرودینامیکی و حرارتی کاملاً توسعه یافته در یک میکروکانال با شرایط مرزی نامتقارن برای سرعت و دما تجزیه و تحلیل کردند. معادله پواسون-بولتزمن برای مدل‌سازی لایه‌های الکتریکی استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که عدد ناسلت با افزایش ضخامت دو لایه الکتریکی کاهش می‌یابد و شرایط مرزی نامتقارن حساسیت بالایی در پروفیل‌های سرعت و دما و عدد ناسلت ایجاد می‌کند. کرنی و همکاران [۴] عملکرد یک سیستم خنک‌کننده مایع را مورد مطالعه قرار دادند که در آن خنک‌کننده از لایه‌های پایین به بالا در یک آبیسی^۲ سه بعدی توسط جریان الکتروکینتیک در میکروکانال‌ها هدایت می‌شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش سرعت توده‌ای سیال در محدوده $13 < U_{avg} < 1.3$ میلی‌متر بر ثانیه می‌تواند مساحت ناحیه خنک را تغییر دهد، که انتقال حرارت را افزایش می‌دهد و دمای توده قالب را بدون تغییر دما در سراسر پکیج کاهش می‌دهد.

پرامود و همکاران [۵] مطالعه نظری و عددی جریان سیال و انتقال حرارت را در یک میکروپمپ الکترواستمیک برای خنک‌سازی یک تراشه اینتل نسل پنجم^۲ با حداکثر گرمای ۹۵ وات تولید شده در مساحت 3.75×3.75 سانتی‌متر مربع انجام دادند. آن‌ها طرحی را برای میکروپمپ پیشنهاد کردند تا دمای

۳۱۰/۶۳ کلوین را برای تراشه با حداکثر نرخ جریان ۱۴/۱۶ میلی لیتر بر دقیقه و حداکثر فشار برگشت ۵۷۲/۵ پاسکال حفظ کند. شاملو و همکاران [۶] جریان‌های الکترواستمیک مبتنی بر فشار ثابت دوبعدی تولید شده توسط پتانسیل الکتریکی جریان مستقیم با توزیع‌های پتانسیل زتا نامتقارن و متقارن در طول دیواره میکروکانال را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، دو شرایط مختلف با قرار دادن پتانسیل‌های الکتریکی مثبت و منفی بر روی دیواره میکروکانال در نظر گرفته شد. آن‌ها نتیجه گرفتند که نوسانات در عدد ناسلت در جایی که پتانسیل‌های الکتریکی مثبت و منفی قرار دارند، مشاهده می‌شوند. علاوه بر این، استفاده از پتانسیل الکتریکی مثبت در دیواره میکروکانال به جریان‌های دایره‌ای موضعی کمک می‌کند، و اندازه گردابه‌ها به طور قابل توجهی با بزرگی پتانسیل زتا تغییر می‌کند. الرجوب و همکاران [۷] از جریان الکترواستمیک برای خنک‌سازی و مدیریت حرارتی مبدل‌های حرارتی چندکاناله در مقیاس میکرو در دستگاه‌های الکترونیکی با نقاط داغ استفاده کردند. یک هیتر شار ثابت برای شبیه‌سازی انتقال حرارت تولید شده توسط دستگاه‌های الکترونیکی مورد استفاده قرار گرفت. آن‌ها از مایعات مختلفی مانند آب دی-یونیزه، آب مقطر، بافر بوراکس و محلولی از نانو ذرات اکسید آلومینیوم برای خنک‌سازی استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که در میان تمام مایعات خنک‌کننده، محلول نانوذرات اکسید آلومینیوم با افزایش ۶۹ درصدی در مقایسه با آب مقطر، بیشترین انرژی گرمایی خاص را دارد. آن‌ها همچنین به این نتیجه رسیدند که افزایش نرخ جریان، انتقال حرارت از نقاط داغ‌تر دستگاه‌های میکروالکترونیک را بدون نیاز به سیستم‌های پمپاژ فشار بالا افزایش می‌دهد.

قادری و همکاران [۸] جریان ترکیبی الکترواستمیک با گرادیان فشار را در یک میکروکانال با موانع مثلثی و پتانسیل زتا ناهمگن شبیه‌سازی کردند. آن‌ها میدان الکتریکی و معادلات نرست-پلانک^۴ را برای میدان تمرکز حل کردند تا معادلات مومنتم حالت پایدار را شبیه‌سازی کنند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در میکروکانال‌های همگن مستقیم، گرادیان فشار نامطلوب بالاتر باعث اختلاط بیشتر جریان می‌شود. همچنین، میکروکانال‌های دارای موانع یا پتانسیل زتای

³ Intel® Core™i5

⁴ Nernst-Planck

¹ Plug flow

² Integrated Circuit (IC)

کردند. در این کار معادلات ناویر استوکس، انرژی و پواسون برای شبیه‌سازی جریان سیال نیوتنی بکار گرفته شد. آنها اثرات پتانسیل مدوله شده و لایه پلی‌الکترولیت را بر روی سرعت و دما هدف قرار دادند. مطالعه آن‌ها توزیع سرعت نوسانی و تشکیل گردابه را به دلیل پتانسیل مدوله شده نشان داد. همچنین، مشاهده کردند که وجود لایه پلی‌الکترولیت دینامیک جریان در میکروکانال را تغییر می‌دهد و دمای سیال به دلیل اثر گرمایش ژول تحت تاثیر میدان الکتریکی اعمال شده تغییر می‌کند. سققیان و همکاران [۱۴] ویژگی‌های هیدرودینامیکی و انتقال حرارت جریان الکترواسمتیک درون یک میکروکانال مستطیلی را با استفاده از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بررسی کردند. در این مطالعه برای مدل‌سازی پتانسیل الکتریکی در الکترولیت در مجاورت دیواره‌ها، از معادله پواسون-بولتزمن با تقریب دیبای هاکل^۳ استفاده شد. آنها دریافتند که پس از یک مقدار مشخص از عدد هارتمن، افزایش میدان مغناطیسی منجر به افزایش عدد ناسلت می‌شود. همچنین در میدان‌های الکتریکی جانبی ضعیف، با افزایش عدد هارتمن، عدد ناسلت به طور پیوسته افزایش می‌یابد.

تحقیقات انجام شده توسط نویسندگان نشان می‌دهد که در خنک‌سازی الکترونیک، میکروپمپ‌های الکترواسمتیک جایگزین بهتری برای پمپ‌هایی است که بر پایه گرادیان فشار کار می‌کنند. با این حال، هیچ مطالعه‌ای در رابطه با اثر زاویه بر عملکرد آن‌ها در خنک‌کاری وجود ندارد. مطالعه حاضر مزیت استفاده از میکروپمپ الکترواسمتیک را در شرایطی نشان می‌دهد که نیروی جاذبه گرادیان فشار معکوس بر روی جریان سیال ایجاد می‌کند. این عمل امکان استفاده از چنین میکروپمپی را در خنک‌سازی الکترونیک در یک شرایط فیزیکی واقعی را معرفی می‌کند. برای تجزیه و تحلیل این موضوع، عملکرد حرارتی جریان سیال با محرک الکترواسمتیک خالص و یکبار هم با گرادیان فشار خالص مورد بررسی قرار می‌گیرند. این مقایسه با معرفی یک ضریب بی‌بعد که افزایش انتقال حرارت نسبی را نشان می‌دهد، انجام خواهد شد. در مطالعه حاضر شرط مرزی جدیدی برای فشار در نظر گرفته شده است که تاثیر زاویه تمایل میکروکانال نسبت به افق را در جهت افزایش انتقال حرارت نمایان می‌کند. همچنین مقایسه

ناهمگن عملکرد بسیار خوبی در اختلاط نشان می‌دهند، به طوری که بازده اختلاط در میکروکانال‌های دارای موانع و پتانسیل زتای ناهمگن به ترتیب ۱۵/۴٪ و ۴۸/۱٪ افزایش می‌یابد. سلیل و همکاران [۹] جریان ترکیبی الکترواسمتیک با گرادیان فشار را به صورت عددی در یک میکروکانال منقبض شده با یک مانع مستطیلی با استفاده از روش مرز غوطه‌ور اصلاح شده^۱ شبیه‌سازی کردند. آن‌ها معادله ناویر-استوکس را به معادلات نرست-پلانک و پواسون متصل کردند تا جریان الکترواسمتیک، میدان الکتریکی و انتقال یون را شبیه‌سازی کنند. آن‌ها حداکثر بازده ۵۱/۳٪ را برای عدد رینولدز ۰/۰۵ و عدد پکلت ۴۵۰ در ارتفاع مانع ۰/۷۵ برای میکروکانال بدست آوردند. چانگ و هانگ [۱۰] بصورت عددی اثرات متقابل نیروهای الکترواسمتیک و گرانش را بر گردش سیال عامل در داخل یک میکرولوله‌ی حرارتی شیبدار که توسط جریان الکترواسمتیک هدایت می‌شد را بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که اعمال نیروهای الکترواسمتیک و گرانش بر روی یک میکرولوله‌ی حرارتی، عملکرد حرارتی آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بنابراین، تعادل بین نیروهای الکترواسمتیک و گرانش از اهمیت حیاتی برخوردار است. نجاران و همکاران [۱۱] به صورت عددی تاثیر بار القایی الکتروکینتیک را بر تشدید نرخ انتقال حرارت همرفتی در یک میکروکانال مورد مطالعه قرار دادند. برای این منظور، آن‌ها از موانع رسانای الکتریکی بر روی سطح میکروکانال برای افزایش اختلاط سیال و در نتیجه افزایش انتقال حرارت با ایجاد گردابه‌ها استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نصب موانع در ورودی میکروکانال بالاترین نرخ انتقال حرارت را ایجاد می‌کند. حیدری و همکاران [۱۲]، بصورت عددی عملکرد محرک الکترواسمتیک/فشاری در خنک‌کاری یک میکروکانال پر شده با نانوسیال ریزقطبی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش میکروپلاریته و نسبت طول مشخصه ریزساختارها به طول مشخصه جریان، باعث کاهش نرخ جریان و افزایش انتقال حرارت می‌شود. همچنین، با افزایش غلظت نانوسیال، دما و ضریب هدایت افزایش می‌یابد. ونگ و لی [۱۳] جریان الکترواسمتیک و انتقال حرارت درون یک میکروکانال با لایه‌ی پلی‌الکترولیت و صفحات باردار مدوله شده^۲ را بررسی

³ Debye-Huckel

¹ Modified Immersed Boundary Method

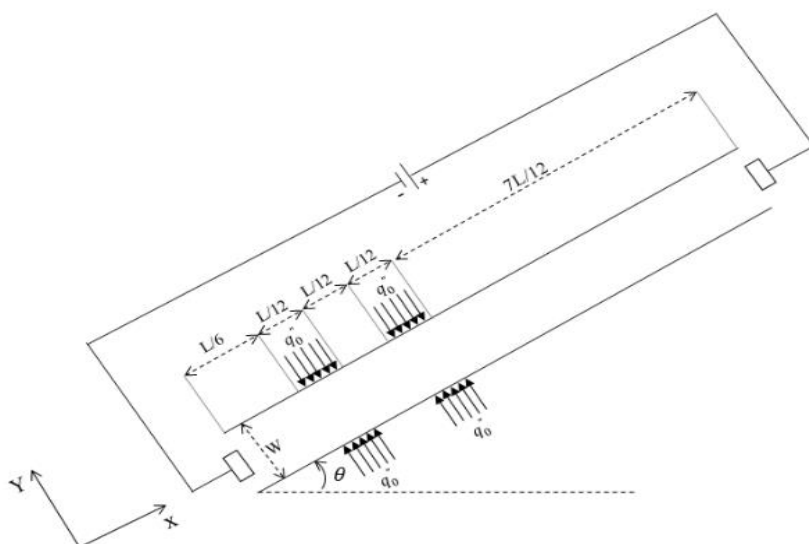
² Modulated Charged Surfaces

۲- هندسه مساله

شکل ۱ تصویر یک میکروکانال مجهز به دو هیتر شار ثابت را نشان می‌دهد که در دو طرف میکروکانال در مقابل یکدیگر قرار گرفته‌اند. بقیه دیواره کانال شامل صفحات باردار است که از آند و کاتد در دو انتهای میکروکانال برای سیال استفاده می‌کنند. در این مطالعه فرض شده است که طول کانال در مقایسه با عرض آن خیلی بزرگتر است ($L/W=12$) و عدد رینولدز ۱۰ در نظر گرفته شده است. همچنین جریان از نظر حرارتی و هیدرودینامیکی توسعه یافته فرض می‌شود. همچنین جریان سیال تراکم ناپذیر و عدد پرانتل ۷ (آب) است.

نتایج حاصل از هر دو حالت جریان رویکرد جدیدی برای توصیف کارایی این دستگاه‌ها است. نوآوری‌ها به صورت زیر خلاصه شده‌اند:

- مدل‌سازی عددی جریان سیال در یک میکروکانال مایل با منابع حرارتی گسسته تحت محرک الکترواستاتیکی و گرادیان فشاری؛
- مقایسه کارایی میکروپمپ الکترواستاتیک و پمپ با محرک گرادیان فشاری در خنک‌سازی الکترونیکی.



شکل ۱- هندسه میکروکانال مجهز به میکروپمپ الکترواستاتیک

مقایسه با گرمای تولید شده توسط گرم‌کن‌ها ناچیز است، محاسبه این مقدار در این مطالعه نادیده گرفته می‌شود. شکل بدون بعد معادلات همراه با عوامل غیر بعدی به صورت زیر توصیف می‌شود [۱۱]:

۳- معادلات حاکم و شرایط مرزی

معادلات حاکم بر جریان، شامل پیوستگی، اندازه حرکت، انرژی، پواسون-بولتزمن و لاپلاس، برای مدل‌سازی جریان در حالت دو بعدی در نظر گرفته شدند. بعلاوه تاثیر شناوری بر حرکت سیال با استفاده از تقریب بوسینسک^۱ اعمال می‌شود. همچنین، از آنجا که گرمایش ژول (در ولتاژهای پایین) در

^۱ Boussinesq scheme

با در نظر گرفتن عبارت غیر خطی در معادله پواسون- بولتزمن، بسط تیلور برای خطی کردن این معادله استفاده شده است.

$$\sinh(\alpha\psi^{j+1}) = \sinh(\alpha\psi^j) + \alpha(\psi^j)^{+1} - \psi^j \cosh(\alpha\psi^j) \quad (۸)$$

شرایط مرزی برای معادلات بی بعد در جدول ۱ ارایه شده- اند. جریان در معرض فشار ورودی و خروجی ثابت قرار می گیرد و شرایط فشار متناوب در این مناطق اعمال می شود. برای این منظور، فشاری برابر با وزن سیال ($L \sin \theta$) در ورودی کانال اعمال می شود و فشار خروجی روی صفر تنظیم شده است. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، چهار منبع حرارتی در دو طرف کانال وجود دارند و بقیه دیواره کانال عایق است. علاوه بر این، برای ایجاد جریان الکترواسمتیک، همان سطوح عایق دارای بار الکتریکی هستند.

جدول ۱- شرایط مرزی حاکم بر مسئله

پارامتر	ورودی	خروجی	دیواره بالا	دیواره پایین
U	$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial u}{\partial x} = 0$	•	•
V	•	$\frac{\partial v}{\partial x} = 0$	•	•
P	$L \sin \theta$	•	-	-
ψ	$\frac{\partial \psi}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \psi}{\partial x} = 0$	$L/6 \leq x < L/4$ & $L/3 \leq x < 5L/12$	$L/6 \leq x < L/4$ & $L/3 \leq x < 5L/12$
ψ	بقیه دیواره کانال	بقیه دیواره کانال	بقیه دیواره کانال	بقیه دیواره کانال
ψ	$\psi = 1$	$\psi = 1$	$\psi = 1$	$\psi = 1$
ϕ	•	۱	$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$
T	•	$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$	$L/6 \leq x < L/4$ & $L/3 \leq x < 5L/12$	$L/6 \leq x < L/4$ & $L/3 \leq x < 5L/12$
T	بقیه دیواره کانال	بقیه دیواره کانال	بقیه دیواره کانال	بقیه دیواره کانال
T	$q'' = 0$	$q'' = 0$	$q'' = 0$	$q'' = 0$

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) = 0 \quad (۱)$$

$$\left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{1}{Re}\right) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \quad (۲)$$

$$+ \frac{\beta L}{D Re} \sinh(\alpha\psi) \left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right) + \frac{Gr}{Re^2} T \sin \theta \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{1}{Re}\right) \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \quad (۳)$$

$$+ \frac{\beta L}{D Re} \sinh(\alpha\psi) \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right) + \frac{Gr}{Re^2} T \cos \theta \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}\right) = \frac{1}{(Re Pr)} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \quad (۴)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2}\right) = \beta \sinh(\alpha\psi) \quad (۵)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}\right) = 0 \quad (۶)$$

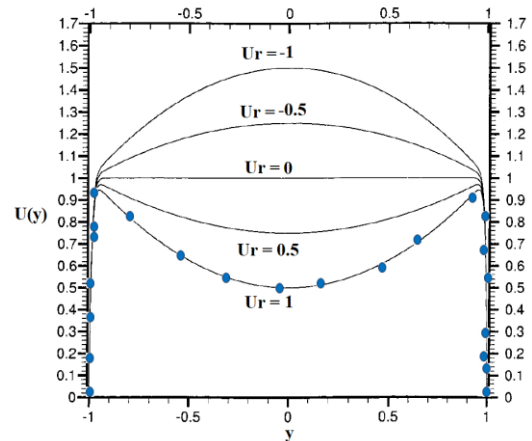
عدد ناسلت محلی بر روی سطح منبع حرارتی $Nu_s(x) = hx/k$ است و عدد ناسلت متوسط با ادغام $Nu_s(x)$ در طول منبع حرارتی $Nu_{Avg} = \frac{1}{(L/12)} \int_0^{L/12} Nu_s(x) dx$ تعیین می شود.

در معادلات بالا از پارامترهای زیر جهت بی بعدسازی استفاده شده است [۱۵]:

$$\begin{aligned} x &= x^*/D, \quad y = y^*/D, \quad \phi = \phi^*/\phi_0, \\ \psi &= \psi^*/\xi, \quad u = u^*/u_{ref}, \quad v = v^*/u_{ref}, \\ Gr &= \frac{g\beta T(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^2}, \quad p = (p^*)/\rho u_{ref}^2, \\ u_{ref} &= \varepsilon \xi \phi / L \mu, \quad Pr = \frac{\mu c_p}{k}, \\ Re &= \frac{\rho u_{ref} D}{\mu}, \quad \alpha = ze\xi / (K_b T), \\ \beta &= 2n_0 z e D^2 / (\varepsilon \varepsilon_0 \xi) \end{aligned} \quad (۷)$$

۴- روش حل عددی

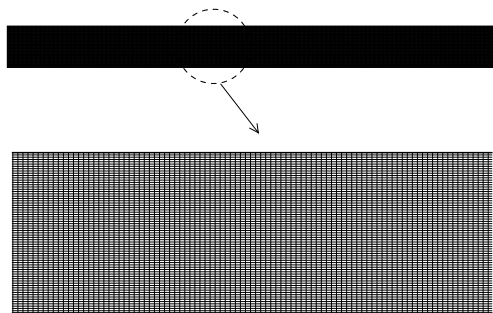
برای حل معادلات (۱) - (۶)، یک کد فترن توسط روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل^۱ با یک طرح ترکیبی استفاده شده است. معیار همگرایی این است که باقیمانده‌ها به زیر 10^{-7} کاهش یابند. نتایج در مرجع [۱۶] برای اعتبارسنجی کار حاضر استفاده شدند و حداکثر خطای $4/61\%$ بدست آمد. برای این کار از پروفیل توزیع سرعت در داخل کانال برای $Ur=1$ بهره گرفته شد. لازم به ذکر است که Ur نشان دهنده نسبت سرعت در جریان با محرک گرادیان فشار به جریان با محرک الکترواستاتیک است. با توجه به شکل ۲ مشاهده می‌شود که توافق خوبی بین نتایج حاصل از این کار و مرجع [۱۶] وجود دارد. جزئیات کامل این کار در شکل ۲ ارایه شده است.



شکل ۲- مقایسه بین نتایج پژوهش حاضر و مرجع [۱۶] برای اعتبارسنجی پروفیل سرعت در $Ur=1$

جدول ۲- مطالعه استقلال شبکه براساس سرعت مرکزی و عدد ناسلت در $\alpha=1, \beta=10^4, \theta=75^\circ, Re=10$

شبکه	تعداد سلول‌ها	عدد ناسلت	سرعت افقی مرکزی
180×80	۱۴۴۰۰	۴,۰۷۰	-۰,۰۵۳
240×80	۱۹۲۰۰	۳,۹۹۲	-۰,۰۷۰
80×300	۲۴۰۰۰	۳,۹۴۴	-۰,۰۸۰
360×80	۲۸۸۰۰	۳,۹۲۸	-۰,۰۹۲
240×120	۲۸۸۰۰	۴,۱۳۲	-۰,۰۴۴
120×300	۳۶۰۰۰	۳,۹۶۳	-۰,۰۷۷



شکل ۳- شبکه دامنه محاسباتی و وضوح شبکه زوم شده برای یک ناحیه خاص

با توجه به نتیجه جدول ۲، یک شبکه 80×300 پس از بررسی نتایج به دست آمده، با در نظر گرفتن زمان اجرا و دقت پاسخ‌ها انتخاب شد. شکل ۳ شبکه انتخاب شده و نمای دو بعدی حوزه محاسباتی و نمای نزدیک از شبکه یکنواخت مستطیلی منظم در ناحیه مشخص شده را نشان می‌دهد.

۵- نتایج و بحث

برای بررسی کارایی به دست آمده هنگامی که پمپ از الکترواستاتیک خالص به جریان با گرادیان فشار خالص تغییر می‌کند، یک مقایسه در جدول ۳ برای عدد ناسلت میانگین هیتر پایینی در میکروکانال با اعداد گراشف و زوایای مختلف انجام شده است.

برای این منظور، نرخ جریان در یک عدد گراشف و زاویه صفر محاسبه شده و سپس اختلاف فشار معادل بدست می‌آید و به عنوان شرط مرزی فشار در ابتدای میکروکانال اضافه می‌شود. برای نشان دادن افزایش در بازده انتقال حرارت، شاخص عملکرد حرارتی معرفی می‌شود که نشان دهنده درصد افزایش در عدد ناسلت میانگین برای دو حالت ارائه شده است. همانطور که از نتایج جدول مشخص است، استفاده از پمپ‌های الکترواستاتیک $44-11\%$ در افزایش عدد ناسلت میانگین موثر است. علاوه بر این، این عمل با افزایش زاویه و کاهش عدد گراشف افزایش می‌یابد.

^۱ SIMPLE

جدول ۳- مقادیر عدد ناسلت میانگین بر روی دو هیتر پایینی در $\alpha=1$ و $\beta=10^4$

Gr					θ	
۱۰۰	۵۰	۲۰	۱۰	۰		
5,815	5,816	5,816	5,817	5,817		الکترواسمتیک خالص
5,195	5,196	5,196	5,196	5,196	۰°	گرادیان فشار خالص
11,935	11,932	11,932	11,952	11,952		شاخص عملکرد حرارتی(%)
5,433	5,366	5,323	5,308	5,292		الکترواسمتیک خالص
4,791	4,715	4,665	4,648	4,630	۱۵°	گرادیان فشار خالص
13,400	13,807	14,105	14,200	14,298		شاخص عملکرد حرارتی(%)
5,082	4,901	4,763	4,710	4,650		الکترواسمتیک خالص
4,420	4,214	4,056	3,993	3,925	۳۰°	گرادیان فشار خالص
14,977	16,303	17,431	17,956	18,471		شاخص عملکرد حرارتی(%)
4,808	4,484	4,171	4,016	3,797		الکترواسمتیک خالص
4,132	3,769	3,422	3,252	3,016	۴۵°	گرادیان فشار خالص
16,360	18,971	21,888	23,493	25,895		شاخص عملکرد حرارتی(%)
4,627	4,178	3,651	3,305	2,471		الکترواسمتیک خالص
3,944	3,451	2,898	2,554	1,709	۶۰°	گرادیان فشار خالص
17,317	21,066	25,983	29,405	44,587		شاخص عملکرد حرارتی(%)
جریان برگشتی					۷۵°	

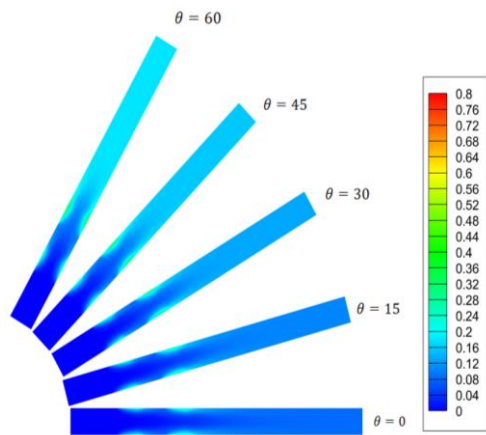


شکل ۴- خطوط جریان درون میکروکانال در $\theta=75^\circ$ در $Gr=0$ $Re=10$

زاویه‌های بالاتر نیز مورد بررسی قرار گرفتند؛ نتایج نشان دهنده نرخ جریان منفی است و زاویه بحرانی در حدود $74/59^\circ$ درجه محاسبه شد. از آنجا که هدف این مطالعه

بررسی یک پمپ برای خنک‌سازی است، نرخ جریان منفی برای نتایج این مطالعه قابل استفاده نیست. برای این منظور، خطوط جریان در میکروکانال با گرادیان فشار خالص در $\theta=75^\circ$ و $Gr=0$ در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، جریان کاملاً معکوس است و نرخ جریان منفی است.

با توجه به جدول ۳، برای یک عدد گرافش ثابت، افزایش زاویه میکروکانال نسبت به محور افقی، میانگین عدد ناسلت را کاهش می‌دهد. این امر با توجه به شرط مرزی‌ای که برای فشار

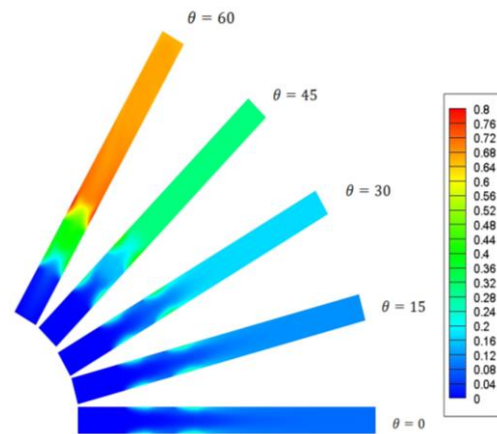


شکل ۶- کانتور دمای جریان درون میکروکانال در زوایای مختلف و $Re=100$, $Gr=100$

شکل های ۷ و ۸ میدان سرعت سیال را در کمترین و بیشترین اعداد گراش نشان می دهند. همان طور که مشخص است سرعت سیال در برخی از مناطق مرکزی میکروکانال منفی می شود که در آن جرم سیال توسط نیروی خالص القا شده در دولایه ای الکتریکی^۱ حرکت می کند. جریان های برگشتی به دلیل نبود صفحات باردار در سراسر میکروکانال و همچنین شرایط مرزی در ورودی میکروکانال (ناشی از اثر وزن سیال) ایجاد می شوند. با این حال، باید توجه داشت که نرخ جریان پمپ در این شرایط مثبت باقی می ماند. با افزایش عدد گراش، افزایش سرعت ناشی از شناوری به پمپ کمک می کند و جریان های برگشتی کاملاً ناپدید می شوند. نکته جالب دیگر در این نتایج، دمای بالاتر سیالی است که میکروکانال را ترک می کند در حالی که میانگین عدد ناسلت در منابع به حداکثر مقدار خود می رسد. این پدیده را می توان به دلیل افزایش نرخ جریان سیال در اعداد گراش بالاتر توجیه کرد.

تعریف شده است، قابل توجیه است. در حقیقت، با افزایش زاویه میکروکانال مقدار گرادیان فشار معکوس در ورودی کانال بیشتر شده و نهایتاً منجر به کاهش انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت می شود. همچنین برای یک زاویه ثابت نسبت به محور افقی، نسبت شناوری به اینرسی با افزایش عدد گراش افزایش می یابد و در نتیجه انتقال حرارت در داخل میکروکانال افزایش می یابد.

شکل های ۵ و ۶ کانتورهای مربوط به دمای جریان سیال درون یک میکروکانال با یک هیتر شار ثابت در زوایای مختلف را نشان می دهند. همان طور که مشاهده می شود، افزایش زاویه میکروکانال در یک عدد گراش ثابت (۰ و ۱۰۰) دمای جریان سیال را افزایش می دهد. علاوه بر این، با توجه به موارد بالا و جدول ۱، کانتورهای دما در شکل های ۵ و ۶ نشان می دهند که افزایش عدد گراش در یک زاویه ثابت از صفر تا صد به طور قابل توجهی دمای جریان سیال را کاهش می دهد.



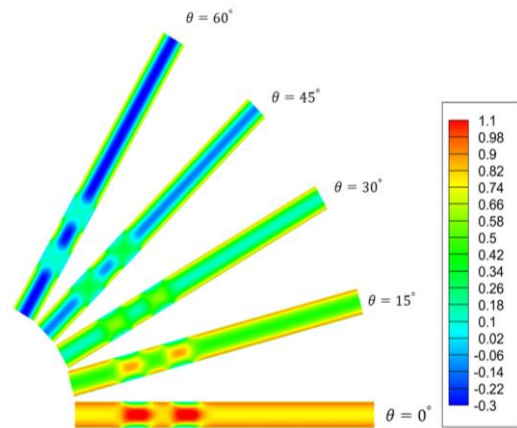
شکل ۵- کانتور دمای جریان درون میکروکانال در زوایای مختلف و $Re=100$, $Gr=0$

^۱ Electric Double Layer

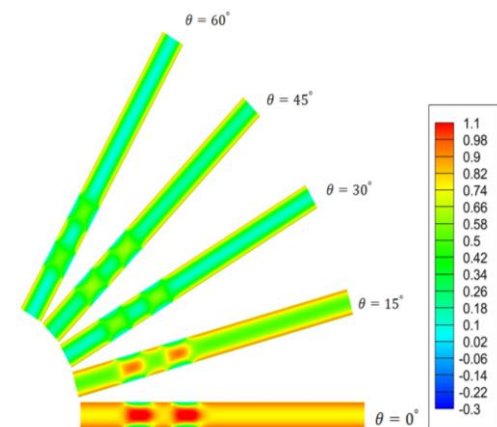
درجه منفی مشاهده شد. دو عامل افزایش زاویه میکروکانال نسبت به سطح و کاهش عدد گراشف، رفتار مشابهی دارند و بازده حرارتی را افزایش می‌دهند. این مطالعه نشان داد که استفاده از میکروپمپ‌های الکترواسمتیک برای اهداف خنک-سازی الکترونیک هنگامی که میکروکانال دارای زاویه نسبت به محور افقی است، یک روش عملی است که انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. این پدیده بیشتر به دلیل دینامیک جریان الکترواسمتیک، به خصوص در مجاورت دیواره‌های میکروکانال است.

۵- علائم، نشانه‌ها و ارقام

D	قطر هیدرولیکی، m
E	قدرت میدان الکتریکی، -
g	شتاب جاذبه، m/s^2
Gr	عدد گراشف، -
K	هدایت حرارتی سیال، $Wm^{-1}K^{-1}$
p	فشار بی‌بعد، -
p^*	فشار، pa
Pr	عدد پرانتل، -
Re	عدد رینولدز، -
T	دمای بی‌بعد، -
T_s	دمای سطح، $^{\circ}C$
T_{∞}	دمای بالک، $^{\circ}C$
\bar{U}	سرعت متوسط، ms^{-1}
u	سرعت افقی بی‌بعد، -
u^*	سرعت افقی، m/s^2
v	سرعت عمودی بی‌بعد، -
v^*	سرعت عمودی، m/s^2
z	عدد والانس، -
β_T	ضریب انبساط حرارتی، -
u^*	سرعت افقی، m/s^2
v^*	سرعت عمودی، m/s^2
μ	ویسکوزیته دینامیکی، $kg.m^{-1}s^{-1}$
ν	ویسکوزیته سینماتیکی، m^2s^{-1}
ρ	چگالی سیال، $kg.m^{-3}$
ρ_e	چگالی شارژ الکتریکی خالص، -
ϕ	پتانسیل الکتریکی، v



شکل ۷- کانتور سرعت جریان درون میکروکانال در زوایای مختلف و $Re=10, Gr=0$



شکل ۸- کانتور سرعت جریان درون میکروکانال در زوایای مختلف و $Re=10, Gr=100$

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، تاثیر استفاده از میکروکانال‌های مجهز به پمپ‌های الکترواسمتیک مورد بررسی قرار گرفت و نتایج گواه بر آن بود که بازده انتقال حرارت در میکروکانال افزایش می‌یابد. برای این منظور، شاخص عملکرد حرارتی معرفی شد که درصد افزایش در میانگین عدد ناسلت در لایه پایین میکروکانال را نشان می‌دهد. تغییرات محاسبه شده از حدود ۱۱٪ تا ۴۴٪ با اعداد گراشف از ۱۰ تا ۱۰۰ و زاویه‌ها از ۰ تا ۶۰ درجه متغیر است. زوایای بالاتر نادیده گرفته شدند زیرا نرخ کلی جریان در ۷۵

- [8] Qaderi A, Jamaati J, Bahiraei M (2019) CFD simulation of combined electroosmotic-pressure driven micro-mixing in a microchannel equipped with triangular hurdle and zeta-potential heterogeneity. *Chem Eng Sci* 199: 463–477.
- [9] Saleel C A, Algahtani A, Badruddin I A, Khan T M Y, Kamangar S, Abdelmohimen M A H (2019) Pressure-driven electro-osmotic flow and mass transport in constricted mixing micro-channels. *J Appl Fluid Mech* 13(2): 429–441.
- [10] Chang F L, Hung Y M (2020) Gravitational effects on electroosmotic flow in micro heat pipes. *Int J of Numer Methods for Heat & Fluid Flow* 30(2) 535–556.
- [11] Najjaran S, Rashidi S, Valipour M S (2020) Heat transfer intensification in microchannel by induced-charge electrokinetic phenomenon: a numerical study. *J Therm Anal Calorim* 145: 1849–1861.
- [۱۲] حیدری سجاد، حقیقی پشتیری امین، هادیزاده امین، (۱۴۰۰)، شبیه‌سازی عددی فرایند خنک‌کاری یک میکروکانال شامل نانوسیال ریز قطبی و مجهز به پمپ الکترواسموتیک، ششمین کنفرانس ملی مهندسی مکانیک و هوافضا، تهران. <https://civilica.com/doc/1299207>
- [13] Wang J, Li F (2023) Electroosmotic flow and heat transfer through a polyelectrolyte-grafted microchannel with modulated charged surfaces. *Int. J. Heat Mass Trans.* 216: 0017-9310.
- [14] Saghafian M, Seyedzadeh H, Moradmand A (2023) Numerical simulation of electroosmotic flow in a rectangular microchannel with use of magnetic and electric fields. *Scientia Iranica* 1026-3098.
- [15] Aminossadati S M, Raisi A, Ghasemi B (2011) Effects of magnetic field on nanofluid forced convection in a partially heated microchannel. *Int J Non Linear Mech* 46(10):1373–1382.
- [16] Dutta P, Beskok A (2001) Analytical solution of combined electroosmotic/pressure driven flows in two-dimensional straight channels: finite Debye layer effects. *Anal Chem.*, 73(9): 1979-86.

ضخامت لایه الکتروود، -	λ
پتانسیل لایه الکتروود، -	ψ
پتانسیل زتا، -	ξ
ثابت الکترونیکی محلول الکترولیتی، -	ε

مراجع

- [1] Upadhyaya G, Zhou P, Horn J, Goodson K, Munch M (2004) Electro-kinetic microchannel cooling system for servers. *Therm Thermomech Phenom Electron Syst* 1: 367–371.
- [2] Wang X, Cheng C, Wang S, Liu S (2009) Electroosmotic pumps and their applications in microfluidic systems. *Microfluid Nanofluidics* 6(2): 145–162.
- [3] Mukhopadhyay A, Banerjee S, Gupta C (2009) Fully developed hydrodynamic and thermal transport in combined pressure and electrokinetically driven flow in a microchannel with asymmetric boundary conditions. *Int J of Heat and Mass Transf* 52: 2145–2154.
- [4] Kearney D, Hilt T, Pham P (2012) A liquid cooling solution for temperature redistribution in 3D IC architectures. *Microelectronics J* 43(9): 602–610.
- [5] Pramod K, Sen A K (2014) Flow and heat transfer analysis of an electro-osmotic flow micropump for chip cooling. *J Electron Packag Trans ASME* 136(3): 1–14.
- [6] Shamloo A, Merdasi A, Vatankhah P (2016) Numerical simulation of heat transfer in mixed electroosmotic pressure-driven flow in straight microchannels. *J Therm Sci Eng Appl* 8(2): 1–13.
- [7] Al-Rjoub M F, Roy A K, Ganguli S, Banerjee R K (2015) Enhanced heat transfer in a micro-scale heat exchanger using nano-particle laden electro-osmotic flow. *Int Commun Heat Mass Transf* 68: 228–235.