

بررسی اثرات میدان الکتروستاتیک (EDL) بر انتقال حرارت در میکروکانالهای مستطیلی

حسین شکوهمند

استاد دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

علیرضا بهرامی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۲/۷/۱۲، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۱۰/۳، تاریخ تصویب ۸۴/۱۱/۱۵)

چکیده

لایه الکتریکی دوگانه (EDL) در جریانهایی که حاوی یون هستند اثرات قابل توجهی بر انتقال حرارت و جریان در سیال داخل کانال می‌گذارد. به طوری که معادلات معمول انتقال حرارت و جریان در کانالها در مورد میکروکانالها اعتبار خود را از دست می‌دهد. شارژ الکتریکی درون دیواره کانال عامل ایجاد یک میدان الکتروستاتیکی در کانال می‌گردد که این میدان با تأثیرگذاری بر یونهای داخل سیال، جریان داخل کانال را تغییر می‌دهد. از این رو گرادین فشار بیشتری در کانال برای به جریان انداختن سیال لازم است. انتقال حرارت در کانال با در نظر گرفتن لایه الکتریکی دوگانه مورد بررسی قرار گرفته است. حضور لایه الکتریکی دوگانه باعث کاهش عدد نوسلت و در نتیجه انتقال حرارت می‌گردد.

واژه های کلیدی: انتقال حرارت، محیط ناپیوسته، میکروکانال، میدان الکتروستاتیک

مقدمه

یون در نزدیکی سطح بیشتر از تمرکز آن در توده سیال می‌باشد در نتیجه لایه‌ای از یونهای راکد روی سطح را فرامی‌گیرد. (شکل ۱). این یونها لایه متراکم را تشکیل می‌دهند. بالاتر از این لایه، لایه‌ای وجود دارد که در آن یونها کمتر تحت تأثیر میدان الکتروستاتیک دیواره قرار دارد و در نتیجه در حرکت هستند. حرکت یونهای داخل کانال که به وسیله گرادین فشار در کانال جریان می‌یابند یک جریان الکتریکی در کانال ایجاد می‌کند. این جریان جریان الکتریکی جریان نامیده می‌شود. جمع شدن یونها در انتهای کانال نیز باعث ایجاد جریان الکتریکی دیگری در کنال می‌شود که جریان هدایتی نامیده می‌شود. وقتی این دو جریان به تعادل می‌رسند یک حالت پایدار در کانال به دست آمده است.

اثرات لایه الکتریکی دوگانه در کانالها وقتی قابل ملاحظه است که مقیاسهای کانال بسیار اندک باشد. به عبارت دیگر وقتی که ضخامت لایه الکتریکی دوگانه در مقایسه با قطر هیدرولیکی کانال قابل ملاحظه باشد.

تعداد زیادی از وسایل الکترونیکی نرخ انتقال حرارت زیادی نیاز دارند. برای کارکرد وسیله الکترونیکی در یک دمای بهینه که کارکرد بهینه را تأمین کند باید روشهای مؤثر دفع حرارت مورد استفاده قرار گیرد. یکی از این روشها استفاده از چاه حرارتی میکروکانال می‌باشد.

بیشتر سطوح جامد دارای شارژ الکتروستاتیکی هستند به خصوص اگر این سطوح بخشهایی از یک وسیله الکترونیکی باشند. به عبارت دیگر در سطح جامد یک پتانسیل الکتروستاتیکی وجود دارد. که طبیعتاً سطح دیواره میکروکانال از این قاعده مستثنا نمی‌باشد. اگر مایع داخل کانال دارای مقدار اندکی یون باشد شارژ الکتروستاتیکی دیواره روی یونهای مخالف اثر می‌گذارد و آنها را جذب می‌کند. قرارگیری شارژ الکتروستاتیکی روی سطح جامد و شارژهای متعادل کننده در مایع لایه‌ای از یون روی سطح ایجاد می‌کند که لایه الکتریکی دوگانه (EDL) نامیده می‌شود.

به خاطر میدان الکتروستاتیک در دیواره تمرکز

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} = K^2 \sinh \Psi \quad (5)$$

با حل عمومی این معادله با شرایط مرزی تقریبی، توزیع Ψ در لایه الکتریکی دوگانه EDL به دست می آید و نیز توزیع محلی دانسیته ρ_e نیز در این صورت با توجه به معادله (۲) قابل محاسبه است.

لازم به ذکر است که پارامتر دیبای - هاکل (مانند والانس الکتروستاتیک و تمرکز یون) به مشخصات سطح بستگی

ندارد و کاملاً به خواص سیال وابسته است. $\frac{1}{\kappa}$ به

طور عادی به عنوان ضخامت ماهیتی EDL خوانده می شود. اثر کلی لایه EDL بر روی جریان سیال باعث کاهش دبی سیال در جهت افت فشار می باشد. اگر دبی کاهش یافته با دبی پیش بینی شده به وسیله معادلات عادی مکانیک سیالات بدون در نظر گرفتن حضور EDL مقایسه شود به نظر می رسد که سیال ویسکوزیته بیشتری دارد. این اثر عموماً به عنوان اثرات الکترو-ویسکوز نامیده می شود.

به خاطر وجود تقارن معادله (۵) در ربع کانال حل می گردد. شرایط مرزی در ربع کانال عبارتند از:

$$\begin{aligned} Y = \frac{H}{D_h}, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial Y} &= 0 \\ Z = \frac{W}{D_h}, \quad \frac{\partial \Psi}{\partial Z} &= 0 \\ Y = 0, \quad \Psi &= \bar{\zeta} \\ Z = 0, \quad \Psi &= \bar{\zeta} \end{aligned} \quad (6)$$

که در اینجا $\bar{\zeta}$ برابر است با:

$\bar{\zeta} = ze\zeta / k_b T$
برای مقادیر کوچک $\bar{\zeta}$ می توان از تقریبات دیبای هاکل استفاده نمود. تقریبات دیبای هاکل بدین معناست که پتانسیل الکتریکی در مقایسه با انرژی گرمایی یونها اندک است به عبارت دیگر:

$|ze\zeta| < k_b T$
در این صورت معادله پواسون - بولتزمن به صورت زیر در می آید.

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} = K^2 \Psi \quad (7)$$

معادله پواسون - بولتزمن

اگر یک سیال شامل یونهای مثبت و منفی را در تماس با یک صفحه با شارژ مثبت در نظر بگیرد. سطح شامل یک پتانسیل الکتروستاتیکی یکنواخت ψ_0 است که با وارد شدن به سیال کاهش می یابد. دور از دیواره تمرکز یونهای مثبت و منفی برابر است. پتانسیل الکتریکی ψ در هر نقطه نزدیک سطح به تعداد خالص شارژهای الکتریکی به واحد حجم (ρ_e) بستگی دارد. با توجه به تئوری الکتروستاتیکی رابطه بین ψ و ρ_e به وسیله معادله پواسون داده شده است. این معادله برای یک کانال مستطیلی مسطح چنین است:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = -\frac{\rho_e}{\epsilon \epsilon_0} \quad (1)$$

که در این رابطه ψ پتانسیل الکتریکی، ρ_e چگالی یون و ϵ_0 ثابت دی الکتریک محلول می باشد. دانسیته خالص شارژ چنین مشخص می شود که:

$$\begin{aligned} \rho_e &= (n^+ - n^-)ze = (n_0 e^{-ze\psi/k_b T} - n_0 e^{+ze\psi/k_b T})ze \\ \rho_e &= -2n_0 zes \sinh(ze\psi/k_b T) \end{aligned} \quad (2)$$

با جای گذاری معادله (۲) در معادله (۱) داریم:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \frac{2zen_0}{\epsilon \epsilon_0} \sinh(ze\psi/k_b T) \quad (3)$$

این معادله معادله پواسون - بولتزمن نامیده می شود. با تعریف پارامتر دیبای هاکل به صورت:

$$\kappa^2 = 2z^2 e^2 n_0 / \epsilon \epsilon_0 k_b T$$

و تعریف قطر هیدرولیکی کانال به شکل زیر:

$$D_h = 4HW / (H + W)$$

و با داشتن گروه بی بعد:

$$\begin{aligned} Y &= \frac{y}{D_h} \\ Z &= \frac{z}{D_h} \\ K &= \kappa D_h \\ \Psi &= ze\psi / k_b T \end{aligned} \quad (4)$$

معادله (۳) به صورت زیر در می آید:

$$\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial Z^2} = \frac{d\bar{P}}{dX} + \bar{G}_2 \bar{E}_x \sinh \Psi \sinh Z \quad (13)$$

شرایط مرزی بی بعد در این حالت :

$$Y = 0 \rightarrow \bar{u}_0 = 0$$

$$Z = 0 \rightarrow \bar{u}_0 = 0$$

$$Y = \frac{H}{D_h} \rightarrow \frac{\partial \bar{u}}{\partial Y} = 0$$

$$Z = \frac{H}{D_h} \rightarrow \frac{\partial \bar{u}}{\partial Z} = 0 \quad (14)$$

می باشند .

با حل معادله (۱۴) تحت شرایط مرزی (۱۵) پروفیل \bar{u} به دست می آید .

میدان الکتروستاتیک در میکروکانالهای مستطیلی

چنان چه گفته شد توزیع سرعت تنها در صورتی قابل محاسبه است که پتانسیل الکتروستاتیک \bar{E}_x مشخص باشد. وقتی که یک سیال در یک میکروکانال جریان می یابد یونهای بخش متحرک لایه الکتریکی دوگانه EDL به سمت انتهای کانال جریان می یابد. این باعث ایجاد یک جریان الکتریکی می شود که جریان الکتریکی جریان نامیده می شود. به وسیله این جریان الکتریکی یک میدان الکتریکی با یک پتانسیل الکتروستاتیک به وجود می آید. که پتانسیل جریان نامیده می شود. این میدان یک جریان الکتریکی ایجاد می کند که جریان الکتریکی هدایتی نامیده می شود و در جهت عکس جریان الکتریکی جریان می باشد. وقتی که این دو جریان الکتریکی برابر شوند حالت پایدار به وجود آمده است. عموماً جریان الکتریکی خالص I که در جهت محور میکروکانال جریان دارد جمع جبری جریان الکتریکی جریان و جریان الکتریکی هدایتی می باشد. در شرایط پایدار این جریان خالص باید صفر باشد.

$$I = I_s + I_c \quad (15)$$

با توجه به تقارن میکروکانال مستطیلی جریان الکتریکی جریان برابر است با :

برای مقادیر بزرگ Ψ تقریب خطی برای تابع \sinh اعتبار ندارد. در این صورت برای به دست آوردن توزیع Ψ معادله (۵) باید حل شود. با توجه به اینکه این معادله یک معادله دیفرانسیل جزئی غیر خطی می باشد تنها با متد های عددی می توان آن را حل نمود .

میدان جریان در میکروکانالهای مستطیلی

معادله مومنوم در یک میکروکانال با توجه به حضور EDL به این صورت بیان می شود

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{\mu_f} \frac{dP}{dx} - \frac{1}{\mu_f} E_x \rho_e(y, z) \quad (8)$$

با تعریف عدد رینولدز به صورت :

$$Re_0 = \rho_f D_h U / \mu_f \quad (9)$$

در این معادله μ_f و ρ_f دانسیته و ویسکوزیته سیال هستند

و بی بعد کردن معادله (۸) با پارامترهای بی بعد زیر :

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \frac{u}{U} \\ \bar{P} &= \frac{P - P_0}{\rho_f U^2} \\ X &= \frac{x}{D_h Re_0} \\ \frac{d\bar{P}}{dX} &= \frac{D_h Re_0}{\rho_f U^2} \frac{dP}{dx} \\ \bar{E}_x &= \frac{E_x D_h Re_0}{\zeta} \end{aligned} \quad (10)$$

به طوری که U سرعت مرجع، P_0 فشار مرجع و ζ_0 پتانسیل الکتریکی مرجع می باشند .

$$\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial Z^2} = \frac{d\bar{P}}{dX} - \frac{\Psi_c}{\rho_f U^2} \bar{E}_x \rho_e(Y, Z) \quad (11)$$

با جای گذاری $\rho_e(Y, Z)$ از معادله (۲) و تعریف عدد بی بعد

$$\bar{G}_2 = 2 z e n_0 \zeta_0 / \rho_f U^2 \quad (12)$$

معادله (۱۲) به صورت زیر بی بعد می شود .

دوباره نوشت . به طوری که :

$$\begin{aligned}\bar{u}_{0ave} &= \frac{1}{A} \int \bar{u}_0 dA = \frac{1}{4HW} \iint \bar{u}_0(Y, Z) dYdZ \\ \bar{Q}_{0v} &= Q_{0v} / 4HWU \\ \bar{Q}_{0v} &= \bar{u}_{0ave}\end{aligned}\quad (23)$$

محاسبه ضریب اصطکاک

ضریب اصطکاک برای جریان در یک کانال مستطیلی در مکانیک سیالات معمولی به صورت زیر است:

$$f = \frac{-\frac{dP}{dx} \frac{D_h}{4}}{\rho_f u_{ave}^2} = \frac{-\frac{d\bar{P}}{dX}}{2 \text{Re}_0 \bar{u}_{ave}^2}\quad (24)$$

بنا بر این پارامتر ضریب اصطکاک و به عبارت دیگر حاصل ضرب عدد رینولدز $(\text{Re} = \frac{\rho_f D_h u_{ave}}{\mu_f})$ و ضریب اصطکاک f خواهد بود :

$$C_f = f \cdot \text{Re} = \frac{-\frac{d\bar{P}}{dX}}{2\bar{u}_{ave}}\quad (25)$$

که با داشتن \bar{u}_{ave} می توان C_f را محاسبه کرد.

اثرات الکترو ویسکوز

از تحلیل های اولیه آشکار شد که حضور EDL نیروهای الکتریکی بر یونهای حاضر در سیال وارد می کند و در نتیجه بر روی رفتار جریان اثر می گذارد . چنان چه شرح داده شد پتانسیل جریان وقتی که یونهای سیال به سوی پایین دست ، جریان می یابند به کار می رود . پتانسیل جریان به نوبه خود یک جریان برگشتی یون ایجاد می کند . (جریان الکتریکی هدایتی) به راحتی می توان فهمید که وقتی یونها در سیال حرکت می کنند مولکولهای سیال را با خود به حرکت در می آورند . بنا بر این پتانسیل جریان ، یک جریان سیال در جهت مخالف جریان رانده شده به وسیله فشار ایجاد می کند . اثر خالص این پدیده کاهش در دبی سیال در جهت جریان

$$I_s = 4D_h^2 U \int_{Y=0}^{H/D_h} \int_{Z=0}^{W/D_h} \bar{u}(Y, Z) \rho_e(Y, Z) dYdZ\quad (16)$$

جریان الکتریکی هدایتی در میکروکانال شامل دو بخش است . یکی مربوط به هدایت توده سیال و دیگری مربوط به هدایت سطح EDL . این جریان هدایتی الکتریکی چنین بیان می شود

$$I_c = I_{bc} + I_{sc} = \lambda_t \bar{E}_x A_c = \frac{4\lambda_t HW}{D_h \text{Re}_0} \bar{E}_x\quad (17)$$

که در آن I_{bc} و I_{sc} به ترتیب هدایت توده سیال و سطح EDL می باشند و λ_t هدایت کلی الکتریکی است .

با جایگذاری معادله (۲) برای $\rho_e(Y, Z)$ در معادله (۱۷) و به کارگیری معادله (۱۶) و (۱۸) و بی بعد سازی خواهیم داشت :

$$\begin{aligned}\bar{E}_x &= \frac{D_h^2}{HW} \bar{G}_1 \text{Re}_0 \\ \int_{Y=0}^{H/D_h} \int_{Z=0}^{W/D_h} \bar{u}(Y, Z) \sinh \Psi(Y, Z) dYdZ\end{aligned}\quad (18)$$

در اینجا عدد بی بعد \bar{G}_1 عبارت است از :

$$\bar{G}_1 = 2z \epsilon n_0 D_h U / \lambda_t \bar{\zeta}_0\quad (19)$$

محاسبه سرعت میانگین و دبی حجمی

چنان چه می دانیم سرعت میانگین در کانال با توجه به معادله زیر قابل محاسبه می باشد :

$$\bar{u}_{ave} = \frac{1}{A} \int \bar{u} dA = \frac{1}{4HW} \iint \bar{u}(Y, Z) dYdZ\quad (20)$$

از آنجا که دبی حجمی بی بعد در میکروکانالها مستطیلی با معادله زیر تعریف می شود :

$$\bar{Q}_v = Q_v / 4HWU\quad (21)$$

با مقایسه معادله های (۲۱) و (۲۲) می توان دید که :

$$\bar{Q}_v = \bar{u}_{ave}\quad (22)$$

طبیعتاً می توان تمام معادلات بالا را برای حالتی که حضور EDL در میکروکانال در نظر گرفته نشده است.

ربع کانال برای حل مسأله کافی می باشد پس دو شرط مرزی روی صفحات تقارن عبارتند از :

$$\begin{aligned} y = H &\rightarrow \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \\ z = W &\rightarrow \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \\ x = 0 &\rightarrow T = T_i \\ x = L &\rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (29)$$

این بار دمایی بی بعد به این صورت تعریف می شود :

$$\theta = \frac{(T - T_i)}{\frac{q'' D_h}{k}} \quad (30)$$

سایر پارامترهای بی بعد همان پارامترهای مورد استفاده در حالت شرط مرزی دما ثابت می باشند .

با استفاده از پارامترهای بی بعد تعریف شده و استفاده از عدد اکرت Ec به صورت

$$Ec = \frac{\rho_f U^2}{C_{pf} q'' D_h} \quad (31)$$

معادله انرژی را بی بعد می نماییم :

$$\begin{aligned} \bar{u} \frac{\partial \theta}{\partial x} &= \frac{1}{\text{Re}_0 \cdot \text{Pr}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \right) + \\ &\frac{Ec}{\text{Re}_0} \left[\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial Y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial Z} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (32)$$

و شرایط مرزی نیز به این صورت بی بعد می گردند :

$$\begin{aligned} Y = 0 &\rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial Y} = -1 \\ Z = 0 &\rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial Z} = -1 \\ Y = \frac{H}{D_h} &\rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \\ Z = \frac{W}{D_h} &\rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial Z} = 0 \\ X = 0 &\rightarrow \theta = 0 \\ X = \frac{L}{D_h} &\rightarrow \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 \end{aligned} \quad (33)$$

می باشد . بنا بر این چنان می نماید که در مقایسه با حالتی که EDL وجود ندارد یک ویسکوزیته اضافی بر سیال وارد می شود .

چنانچه گفته شد دبی بی بعد در میکروکانال با در نظر گرفتن EDL و بدون در نظر گرفتن آن به ترتیب با معادلات (23) و (24) به دست می آید .
با مساوی قرار دادن این دو معادله یعنی :

$$\bar{Q}_v = \bar{Q}_{0v}$$

و استفاده از \bar{u}_{ave} و \bar{u}_{0ave} نسبت ویسکوزیته ظاهری به ویسکوزیته سیال به دست می آید.

معادله انرژی

برای حالت پایدار ، جریان کاملاً توسعه یافته و آرام در یک میکروکانال معادله انرژی با در نظر گرفتن هدایت محوری در جهت جریان و اتلاف ویسکوز برای سیال خنک کننده به این صورت در می آید :

$$\begin{aligned} u \frac{\partial T}{\partial x} &= \alpha_f \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \\ &\frac{\mu_f}{\rho_f C_{pf}} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (26)$$

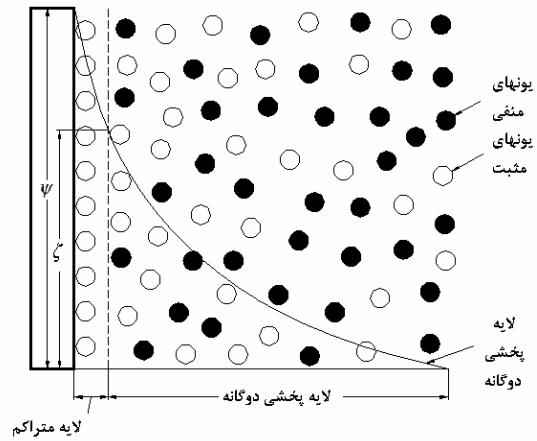
که در آن T و α_f به ترتیب دما و ضریب پخش حرارتی سیال می باشد . و C_{pf} ظرفیت ویژه حرارتی است .
به خاطر تقارن در کانال محاسبات بر روی ربع کانال صورت می گیرد . روی صفحات تقارن شرط آدیاباتیک می تواند در نظر گرفته شود . به عبارت دیگر:

$$\begin{aligned} z = W &\rightarrow \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \\ y = H &\rightarrow \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (27)$$

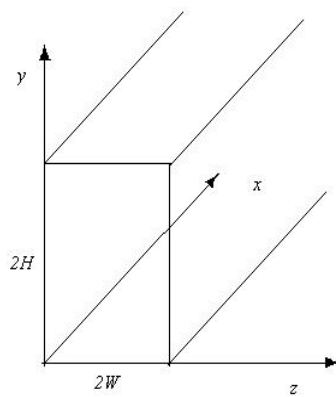
شرایط مرزی شار ثابت بدون در نظر گرفتن پرش دمایی برای معادله انرژی عبارتند از :

$$\begin{aligned} y = 0 &\rightarrow k \frac{\partial T}{\partial y} = q'' \\ z = 0 &\rightarrow k \frac{\partial T}{\partial z} = q'' \end{aligned} \quad (28)$$

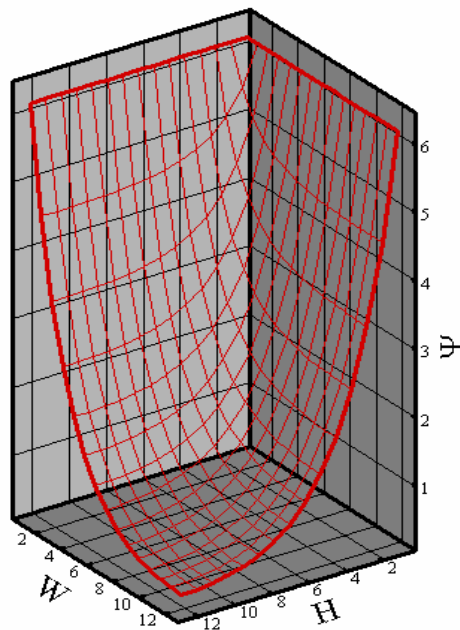
با توجه به این که در این جا نیز به خاطر تقارن تحلیل



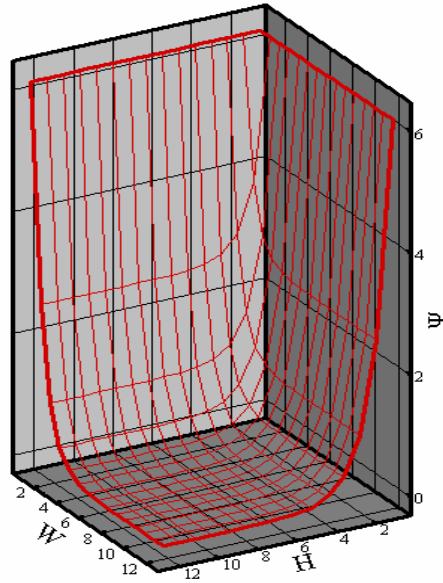
شکل ۱: بیان شماتیک لایه الکتریکی دوگانه در نزدیکی دیواره میکروکانال.



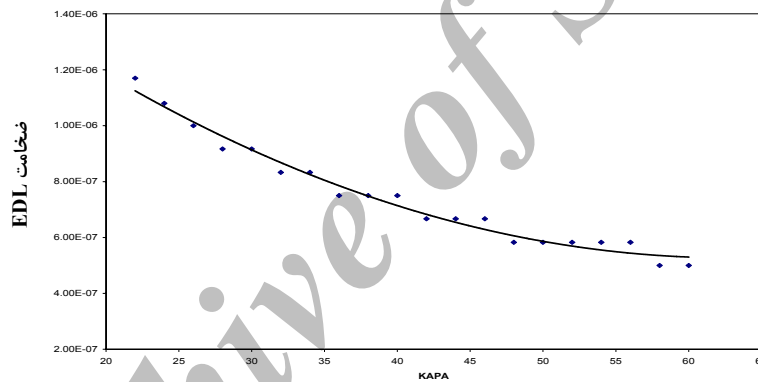
شکل ۲: نمایی از کانال مورد تحلیل.



شکل ۳: توزیع پتانسیل الکتریکی در کانال با پتانسیل دیواره 50 mV (W و H بر حسب میکرون).



شکل ۴: توزیع پتانسیل الکتریکی در کانال با پتانسیل دیواره ۱۰۰ mV (W و H بر حسب میکرون).



شکل ۵: نمودار تغییرات ضخامت EDL بر حسب پارامتر دیبای هاکل.

$$Nu = \frac{hD_h}{k} = \frac{1}{(\theta_w - \theta_m)} \quad (35)$$

که تعریف عدد نوسلت می باشد.

بحث روی نتایج

با در نظر گرفتن آب حاوی اندکی KCl به عنوان سیال عامل داخل میکروکانال معادلات حاکم بر میکروکانالها مورد حل قرار گرفته است. برای این محلول ضریب دی الکتریک برابر ۸۰ و تعداد یون برابر 6.23×10^{23} می باشد. با توجه به این مقادیر و پتانسیل دیواره ۵۰ و ۱۰۰ معادله پواسون بولتزمن جهت

محاسبه عدد نوسلت و ضریب انتقال حرارت جا به جایی

برای حالت شار ثابت بالانس انرژی عبارت است از:

$$q'' = h(T_w - T_m)$$

(۳۴)

که در آن T_w دمای دیواره و T_m دمای میانگین سیال می باشد.

بی بعدسازی این معادله با استفاده از پارامترهای بی بعد تعریف شده در بخش معادله انرژی با شرایط مرزی شار ثابت بدین صورت است:

$$q'' = h \times \frac{q'' D_h}{k} (\theta_w - \theta_m)$$

با ساده سازی و مرتب سازی این معادله داریم:

شکل (۹) نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب پتانسیل الکتریکی دیواره است. همان گونه که قابل پیش بینی نیز بود ملاحظه می شود که افزایش پتانسیل الکتریکی دیواره و به تبع آن شدت میدان الکتروستاتیک باعث افزایش ضریب اصطکاک می گردد. این به آن دلیل است که با افزایش شدت میدان الکتروستاتیک سرعت ناشی از این میدان افزایش یافته و از آنجا که این سرعت اثر کاهنده بر سرعت در کانال دارد ضریب اصطکاک را افزایش می دهد.

شکل (۱۰) نمایش تغییرات نسبت ویسکوزیته ظاهری به ویسکوزیته واقعی با تغییرات پتانسیل دیواره است. همانگونه که در این شکل دیده می شود با افزایش پتانسیل دیواره ویسکوزیته ظاهری افزایش می یابد.

برای نشان دادن اثرات EDL بر میدان دما در کانال، توابع دما برای حالت شرط مرزی شار ثابت حل شده است. در این بخش از پروفیل‌های سرعت با EDL و بدون EDL برای حل معادله انرژی استفاده شده است و اعداد نوسلت به دست آمده با هم مقایسه گردیده است.

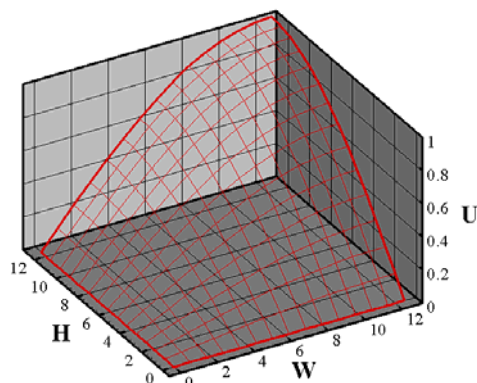
کانتور دمای بی بعد با شرط مرزی شار ثابت برای سیال عامل هوا با در نظر گرفتن EDL در شکل (۱۱) ارائه شده است.

برای ارائه یک تصویر بهتر برای کانتور دما نمایی از برش این کانتور در راستای محور طولی و در مرکز کانال در شکل (۱۲) آمده است و شکل (۱۳) نمودار تغییرات عدد نوسلت در طول کانال می باشد. چنان چه ملاحظه می گردد افزایش پتانسیل الکتریکی دیواره باعث کاهش عدد نوسلت و در نتیجه انتقال حرارت در کانال می گردد.

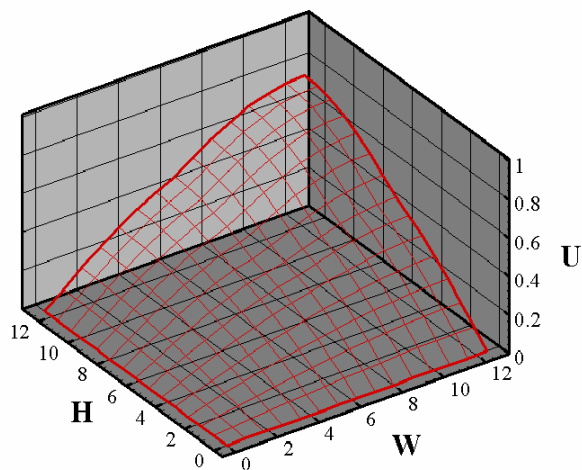
به دست آمدن توزیع پتانسیل الکتریکی در کانال حل شده است. (شکل ۳ و ۴) چنانچه در این شکل ملاحظه می شود پتانسیل الکتریکی بی بعد در روی دیواره کانال دارای مقدار ماکزیمم می باشد. مقدار پتانسیل الکتریکی ماکزیمم همان شرط مرزی اعمال شده بر مسأله می باشد. مقدار پتانسیل الکتریکی در مقطع کانال کاهش می یابد تا در مرکز آن به مقداری بسیار اندک نزدیک صفر می رسد. از مقایسه شکل‌های (۳ و ۴) مشاهده می شود که افزایش پتانسیل الکتریکی دیواره باعث افزایش شیب پروفیل پتانسیل الکتریکی می گردد. افزایش شیب این نمودار به معنای افزایش ضخامت EDL می باشد. در شکل (۵) نمودار تغییرات ضخامت لایه EDL بر حسب ضریب دیبای هاکل می باشد. این شکل تأییدی بر این نکته است که ضخامت لایه EDL با عکس پارامتر دیبای هاکل رابطه دارد.

پروفیل سرعت بدون در نظر گرفتن EDL در شکل (۶) برای ربع کانال ترسیم شده است. همان گونه که ملاحظه می شود این پروفیل شکل پروفیل های سرعت عادی درون کانال را دارد. مقدار سرعت در روی دیواره ها صفر و در مرکز مقدار آن ماکزیمم است. شکل (۷) پروفیل سرعت در ربع کانال را در حالتی که پتانسیل دیواره ۵۰ mV باشد را نمایش میدهد به طوری که در شکل نیز مشاهده می شود وجود پتانسیل الکتریکی اثر کاهنده بر پروفیل سرعت دارد.

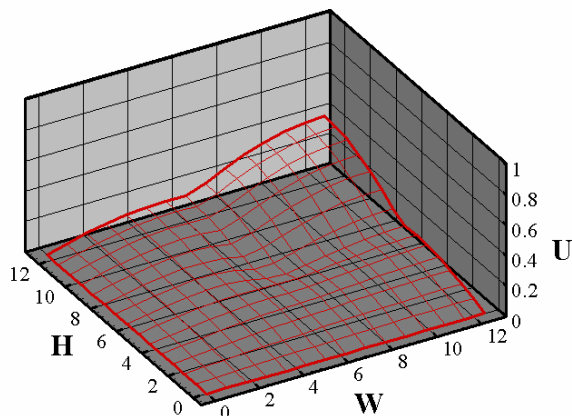
در شکل (۸) پروفیل سرعت برای پتانسیل الکتریکی ۱۰۰ mV نیز ارائه شده است که چنانچه مشاهده می شود افزایش پتانسیل الکتریکی دیواره باعث شده که ماکزیمم سرعت بی بعد کاهش یافته و ضمناً پروفیل در نزدیکی دیواره حالت تخت تری به خود بگیرد.



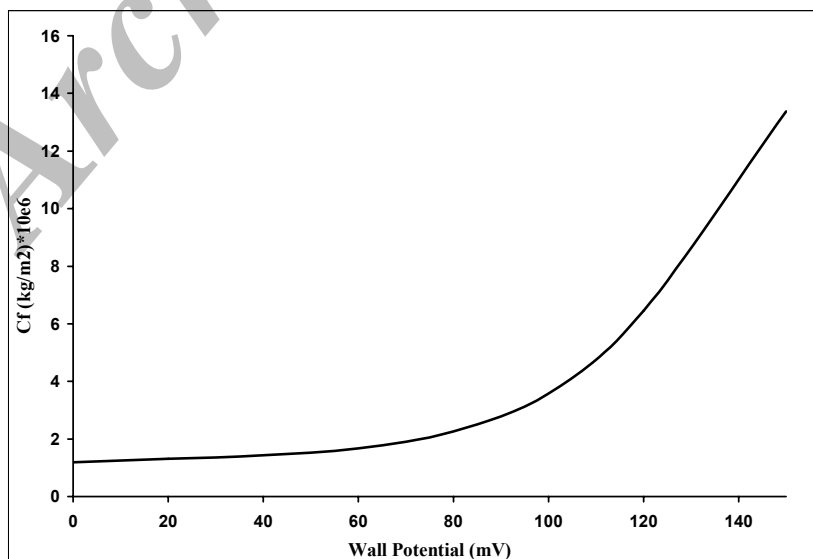
شکل ۶: پروفیل سرعت بی بعد در حالتی که از EDL صرف نظر شود. (W و H بر حسب میکرون).



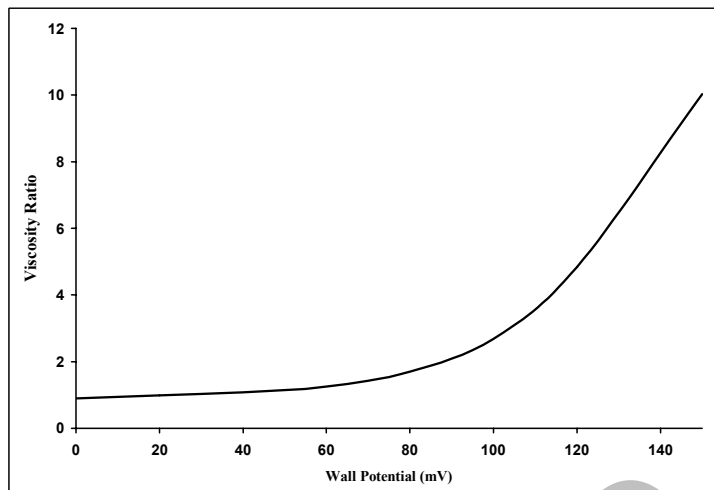
شکل ۷: پروفیل سرعت بی با پتانسیل دیواره 50mV. (W و H بر حسب میکرون).



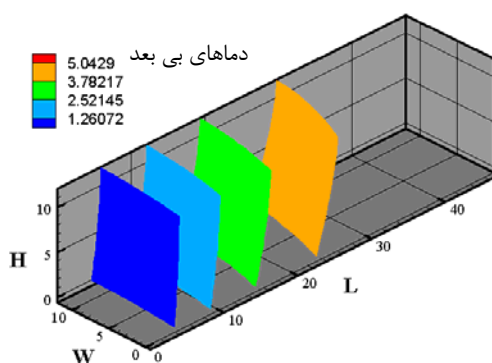
شکل ۸: پروفیل سرعت بی با پتانسیل دیواره 100mV. (W و H بر حسب میکرون).



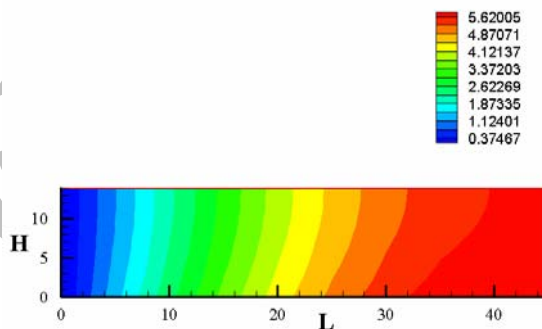
شکل ۹: نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب پتانسیل دیواره.



شکل ۱۰: نمودار تغییرات نسبت ویسکوزیته ظاهری به ویسکوزیته سیال بر حسب پتانسیل دیواره.



شکل ۱۱: کانتور سه بعدی دمای بی بعد در کانال (W و H بر حسب میکرون و L بر حسب میلی متر).



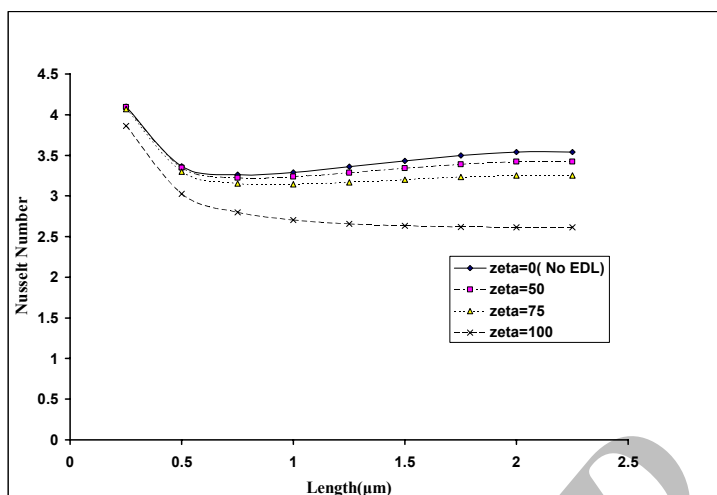
شکل ۱۲: کانتوردو بعدی دمای بی بعد در کانال (H بر حسب میکرون و L بر حسب میلی متر).

هیدرودینامیکی سیال در میکروکانالها تاثیر مهمی دارد. ۳ - لایه دو گانه EDL یک جریان معکوس (در خلاف جهت جریان اصلی) بوجود می آورد بطوریکه اثر خالص آن باعث کاهش دبی جریان می گردد. این کاهش دبی ناشی از افزایش ویسکوزیته سیال تعبیر می گردد. از اینرو در میکروکانالها ویسکوزیته ظاهری سیال اهمیت می یابد. ۴ - گرادیان فشار در اثر حضور لایه EDL در میکروکانالها نسبت به جریان آرام توسعه یافته در کانالها و لوله ها

نتیجه گیری

جریان آرام سیال حاوی یون در داخل میکروکانالها با لایه الکتریکی دوگانه EDL مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می دهد که :
 ۱ - مطالعات ممنتم و انتقال حرارت معمولی که در کانالها و لوله در جریان آرام بکار می روند در میکروکانالها اعتبار خود را از دست می دهند.
 ۲ - شارژ الکتریکی درون دیواره بر خصوصیات

A	I_{sc} : جریان هدایتی EDL	بیشتر است.
$\frac{m}{s}$	u_{ave} : سرعت متوسط	۵ - حضور لایه دوگانه الکتریکی EDL باعث کاهش انتقال حرارت می گردد.
m	L : طول کانال	۶ - عدد نوسلت جریان در میکروکانالها همراه با لایه EDL کمتر از عدد نوسلت در جریانهای آرام توسعه یافته است.
m	x,y,z : ابعاد	
Pa	P : فشار سیال	۷ - با افزایش بیشتر پتانسیل الکتریکی در دیواره میکروکانال، عدد نوسلت کاهش بیشتری پیدا می کنند.
$\frac{m^2}{s}$	α_f : ضریب پخش حرارت	
$\frac{m^3}{s}$	Q_v : دبی حجمی	
	ϵ : ثابت دی الکتریک	
$\frac{m^3}{s}$	Q_{vave} : دبی حجمی متوسط	
$\frac{C}{Vm}$	ϵ_0 : گذر دهی خلا	
K	T : دما	
m^{-1}	κ : پارامتر دیبای هاکل	
K	T_0 : دمای سیال روی دیواره	
	K : پارامتر دیبای هاکل بی بعد	
K	T_i : دمای ورودی	
V	κ : پتانسیل الکتریکی دیواره	
$\frac{m}{s}$	U : سرعت مرجع	
	$\bar{\kappa}$: پتانسیل الکتریکی دیواره بی بعد	
m	W : عرض کانال	
V	ψ : پتانسیل الکتریکی	
	XYZ : ابعاد بی بعد	
	Ψ : پتانسیل الکتریکی بی بعد	
	θ : دمای بی بعد	
$\frac{kg}{m^3}$	ρ_f : چگالی سیال	
$\frac{kg}{m.s}$	μ_f : ویسکوزیته سیال	
	ρ_e : چگالی پتانسیل الکتریکی	
$\frac{kg}{m.s}$	μ_a : ویسکوزیته ظاهری	
	$\frac{\mu_a}{\mu_f}$: نسبت ویسکوزیته	
		۵ - حضور لایه دوگانه الکتریکی EDL باعث کاهش انتقال حرارت می گردد.
		۶ - عدد نوسلت جریان در میکروکانالها همراه با لایه EDL کمتر از عدد نوسلت در جریانهای آرام توسعه یافته است.
		۷ - با افزایش بیشتر پتانسیل الکتریکی در دیواره میکروکانال، عدد نوسلت کاهش بیشتری پیدا می کنند.
		فهرست علائم
m^2	A_c : مساحت	
$\frac{j}{kgK}$	c_{pf} : گرمای ویژه	
C	C_f : پارامتر ضریب اصطکاک	
m	e : شارژ الکترون	
	D_h : قطر هیدرولیکی	
	f : ضریب اصطکاک	
V	E_x : میدان پتانسیل الکتروستاتیک	
$\frac{w}{m^2K}$	h : ضریب انتقال حرارت جابه جایی	
	\bar{E}_x : میدان پتانسیل الکتریکی بی بعد	
$\frac{w}{mK}$	k : ضریب انتقال حرارت هدایتی	
m	H : ارتفاع کانال	
$\frac{j}{molK}$	k_b : عدد بولتزمن	
A	I : جریان الکتریسته	
m^{-3}	n_0 : متوسط تعداد یون در واحد حجم	
A	I_c : جریان الکتریکی هدایتی	
$\frac{w}{m^2}$	q'' : شار حرارتی دیواره	
A	I_s : جریان الکتریکی جریان	
$\frac{m}{s}$	u : سرعت سیال	
A	I_{bc} : جریان هدایتی توده سیال	
	\bar{u} : سرعت بی بعد	



شکل ۱۳: نمودار تغییرات عدد رینولدز در طول کانال با پتانسیل دیواره های مختلف.

مراجع

- 1 - Dongqing, Li, (2001). "Electro viscous effect on pressure driven liquid flow in microchannels." *Colloids and Surfaces*, Vol. 195, PP. 35-57.
- 2 - Mala, G. M. and Yang, C. and Li, D. (1998). "Electrical double layer potential distribution in rectangular microchannel." *Colloids and Surfaces*, Vol. 135, PP. 109-116.
- 3 - Werner, C., Jacobasch, H. Mala, M., Li, D. and Ning, Y. (1997). "Flow characteristics of water through a microchannel between two parallel plates with electrokinetic effects." *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 18, PP. 489-496.
- 4 - Mala, M., Li, D. and Dale, J. (1997). "Heat transfer and fluid flow in microchannels." *Int. Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, No. 13, PP. 3079-3088.
- 5 - Yang, C., Li, D. and Masliyah, J. (1998). "Modeling forced liquid convection in Rectangular microchannels with electrokinetic effects." *Int. Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, PP. 4229-4249.