



تحلیل عددی رفتار ترمودینامیکی یک ریزپمپ ام اچ دی با تغییر همزمان طول های دو میدان الکتریکی و مغناطیسی

مرتضی دلاکه نژاد^۱، سید علی میربزرگی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

* بیرجند، صندوق پستی ۹۷۱۷۵/۶۱۵، samirbozorgi@birjand.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۶ مهر ۱۳۹۲

پذیرش: ۰۹ آذر ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۲ تیر ۱۳۹۳

کلید واژگان:

ریزپمپ ام اچ دی

نیروی لورنتز

جریان کاملاً توسعه یافته

طول میدان الکتریکی

طول میدان مغناطیسی

در این مقاله اثر تغییرات همزمان طول های دو میدان الکترومغناطیس با لحاظ نواحی نفوذ جانبی بر توزیع دما و سرعت جریان در یک ریزپمپ ام اچ دی به طور عددی شبیه سازی شده است. هندسه جریان یک مجرای دو بعدی بین دو صفحه موازی است و جریان مورد نظر تراکم ناپذیر، پایدار و آرام فرض شده است. بعلاوه دو خاصیت ترموفیزیکی سیال یعنی لزجت دینامیکی و هدایت الکتریکی تابع دما در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم بر دو میدان جریان سیال و الکترومغناطیس به روش عددی حجم محدود حل شده و یک حل تحلیلی جامع شامل توزیع سرعت، فشار و دما برای یک حالت خاص ارائه شده است. نتایج عددی نشان می دهد که با تغییر طول میدان های الکترومغناطیس و لحاظ تابعیت دمایی خواص سیال (آب)، برای جریان در یک مجرا به مقطع مستطیلی ۱۰۰۰ میلی متر مربع، شدت شار مغناطیسی ۰/۰۲۵ تسلا و قدرت میدان الکتریکی ۲۰ ولت بر میلی متر، دبی عبوری به ۲۵۰ میلی لیتر بر ثانیه و دمای میانگین کاسه ای از ۲۵ درجه سانتی گراد ورودی به ۴۰ درجه سانتی گراد در خروج از مجرا می رسد. این در حالی است که با ثابت بودن خواص، حداکثر دبی و دمای میانگین به ترتیب ۷۰ میلی لیتر بر ثانیه و ۶۰ درجه سانتی گراد می باشد.

Numerical analysis of thermodynamic behavior of an MHD micropump by simultaneously changing the length of electric and magnetic fields

Morteza Dallakehnezhad, Sayed Ali Mirbozorgi*

Mechanical Engineering, Birjand University, Birjand, Iran

* P.O.B. 97175/615, Birjand, Iran. samirbozorgi@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 28 September 2013
Accepted 30 November 2013
Available Online 13 July 2014

Keywords:

MHD Micropump
Lorentz Force
Fully Developed Flow
Electrode-Field Length
Magnetic-Field Length

ABSTRACT

In this paper the effect of electromagnetic field lengths to change simultaneously is simulated on the temperature distribution and flow velocity of a MHD micro pump considering the lateral electromagnetic diffusive regions. The geometry of flow is a two-dimensional channel between two parallel plates and the flow is assumed to be incompressible, steady and laminar. In addition, thermophysical properties such as the dynamic viscosity and electric conductivity of fluid are considered to be the function of temperature. The governing equations of both flow and electromagnetic fields have been solved using the finite volume numerical method a comprehensive analytical solution including velocity, pressure and temperature field distributions has been derived for a special case. The numerical results show that by changing the length of electromagnetic fields and considering the fluid (water) properties as a function of temperature, for flow in a 1000 mm² cross-section channel, magnetic field intensity 0.025 Tesla and electric field strength 20 volt/mm, the flow rate reaches 250 mL/s and the mean cup temperature from 25 °C at entrance reaches to 40 °C at the exit of channel. However for constant properties, the flow rate and the mean cup temperature reach 70 mL/s and more than 60 °C respectively.

۱- مقدمه

می شوند: ریزپمپ های مکانیکی و غیرمکانیکی [۱]. در ریزپمپ های مکانیکی اغلب از یک غشای متحرک برای تولید حرکت سیال استفاده می شود. تحریک این غشاء به وسیله مکانیزم های مختلفی از جمله: الکترواستاتیکی^۴، پیزوالکتریکی^۵ و الکترومغناطیس^۶ انجام می شود [۲]. یکی از مزیت های اصلی

ریزپمپ ها^۱ یکی از قسمت های مهم در سیستم های ریزالکترومکانیکی زیستی^۲ و سیستم های ریزسیالی^۳ هستند که کاربرد آنها در سه دهه گذشته گسترش قابل توجهی پیدا کرده است. این ریزپمپ ها عمدتاً به دو دسته طبقه بندی

4- Electrostatical
5- Piezoelectrical
6- Electromagnetical

1- Micropumps
2- Bio- MEMS (Bio-Micro Electro Mechanical System)
3- Microfluidics

Please cite this article using:

M. Dallakehnezhad, S.A. Mirbozorgi, Numerical analysis of thermodynamic behavior of an MHD micropump by simultaneously changing the length of electric and magnetic fields, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 91-98, 2014 (In Persian)

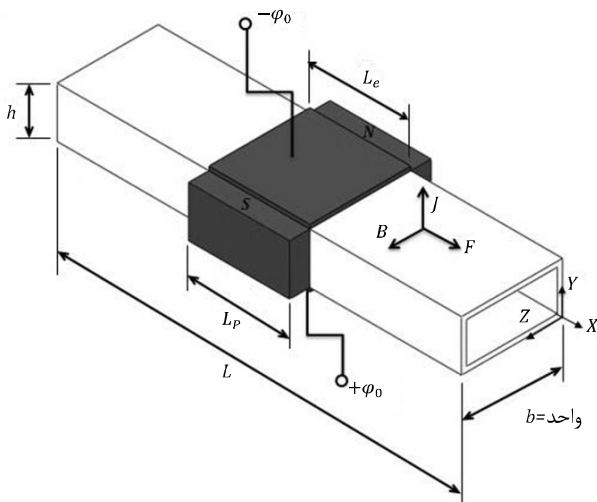
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ورودی و خروجی، جریان در سراسر طول مجرا و حتی در محل اتصال طول‌های عایق با الکترودها کاملاً توسعه یافته است.

در اغلب مقالات یاد شده، تغییرات پارامترهای مهم این جریان بررسی شده است و به عنوان مثال، اثر تغییرات اعداد بی بعد نظیر هارتمن بین 10^0 تا 10^1 ، پرانتل بین 0.1 تا 5 ، اکرت بین 0.1 تا 0.5 ، استن‌تون بین 4 تا 8 و نسبت منظری بین 0.2 تا 1 مطالعه شده است. بعلاوه اثرات شدت شار مغناطیسی بین 0.19 تا 0.44 تسلا و ولتاژ اعمالی بین 10 تا 60 ولت نیز بررسی شده است. با این وجود اثرات تغییر طول میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی روی مشخصات حرارتی و دینامیکی جریان کمتر بررسی شده است. به نظر می‌رسد که تغییرات طول میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی روی طرح جریان، دمای سیال و دبی عبوری از پمپ تاثیر قابل توجهی داشته باشد. در این مقاله اثر تغییر همزمان طول‌های دو میدان الکتریکی و مغناطیسی همراه با نواحی نفوذ جانبی آنها روی گرمایش ژول، توزیع دما و توزیع سرعت با جزئیات بیشتری بررسی می‌شود.

۲- فیزیک مسأله

در شکل ۱ طرح شماتیک یک ریزپمپ ام اچ دی نشان داده شده است که شامل یک ریزمجرای با مقطع مستطیلی ($h \times b$) برای عبور جریان سیال است. به منظور اجرای یک تحلیل دو بعدی برای جریان در صفحه xy ، عرض h مجرا بسیار کمتر از عمق b (واحد) در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور اعمال نیروی الکترومغناطیسی بر سیال، به دلخواه روی دیواره‌های جانبی مجرا در منطقه میانی، یک آهن‌ربای دائمی^۶ با طول L_p و عرض ثابت h نصب شده است. بعلاوه در همین منطقه روی دو دیواره بالا و پایین، الکترودهایی به طول L_e و عمق ثابت b برای اعمال میدان الکتریکی قرار داده شده است. دیواره‌های ریزمجرا به جز در قسمت الکترودها عایق می‌باشند. اگر هدایت الکتریکی سیال عبوری از مجرا به قدر کافی بزرگ باشد، میدان الکتریکی بین دو الکترودها باعث برقراری یک جریان الکتریکی از درون سیال می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود میدان مغناطیسی اعمال شده توسط آهن‌ربای دائمی عمود بر راستای میدان الکتریکی بین دو الکترودها می‌باشد. طبق تئوری الکترومغناطیس در این حالت نیرویی در راستای عمود بر هر دو جهت میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی بر سیال اعمال می‌شود که این نیرو به نام نیروی حجمی لورنتز شناخته می‌شود.



شکل ۱ طرح شماتیک یک ریزپمپ ام اچ دی با جریان سیال در راستای x
(L_p طول میدان مغناطیسی، L_e طول میدان الکتریکی)

این ریزپمپ‌ها قابلیت اعتماد به سیستم و عدم وابستگی مکانیزم تولید فشار در آنها به سیال‌های خاص می‌باشد. با این حال نیاز به ولتاژ بالا (بین 100 تا 200 ولت) برای تحریک غشا یکی از معایب این ریزپمپ‌ها است [۳]. بعلاوه جریان ایجاد شده در این نوع ریزپمپ‌ها پیوسته نبوده و اغلب متناوب است.

از سوی دیگر، ریزپمپ‌های غیرمکانیکی فاقد اجزای متحرک بوده و مشکلات فرسایش و خستگی قطعات را ندارند. این ریزپمپ‌ها به وسیله مکانیزم‌های مختلفی بسته به کاربردشان عمل می‌کنند. برای مثال، می‌توان به مکانیزم‌های الکترواسموزی (ای او) [۴]، الکتروهیدرودینامیک (ای اچ دی) [۵] و دیناموهیدرومغناطیسی (ام اچ دی) [۶] اشاره کرد. از طرف دیگر هدایت الکتریکی سیال در ریزپمپ‌های الکترواسموزی و الکتروهیدرودینامیکی در محدوده 10^{-15} تا 1 زیمنس بر متر^۴ است. در حالی که در ریزپمپ‌های دیناموهیدرومغناطیسی مقدار هدایت الکتریکی سیال در محدوده 10^{-3} تا 10^9 زیمنس بر متر قرار دارد. با این وجود، سیالاتی با هدایت الکتریکی در محدوده 10^{-3} و 10^{-2} زیمنس بر متر، می‌تواند توسط هر سه مکانیزم مورد اشاره پمپ شود [۷]. ریزپمپ‌های دیناموهیدرومغناطیسی (ام اچ دی) اخیراً توجه محققین در حوزه ریزسیالی را نیز به خود جلب نموده است. این ریزپمپ‌ها برای کاربردهای زیستی^۵ مناسب هستند. عامل تحریک جریان در این نوع از ریزپمپ‌ها نیروی لورنتز حاصل از اعمال دو میدان الکتریکی و مغناطیسی متعامد است.

پدیده ام اچ دی ابتدا توسط ریچه [۸]، مشاهده شد. در سال ۱۹۴۰ آلفن [۹]، اصول کلی این پدیده را فرمول‌بندی کرد و بواسطه آن در سال ۱۹۷۰ جایزه نوبل را دریافت نمود. جانگ و لی [۱۰]، از اولین کسانی بودند که در زمینه ریزپمپ‌های ام اچ دی با جریان مستقیم مطالعاتی را به طور تجربی انجام دادند. وینوویچ و همکارانش [۱۱] و راموس و وینوویچ [۱۲]، هر دو روش اجزا محدود و اختلاف محدود را برای تحلیل جریان ام اچ دی و تعیین تأثیر اعداد رینولدز و هارتمن بکار بردند. لیموف و همکارانش [۱۳] و لیموف و لی [۱۴] دو ریز پمپ ام اچ دی از نوع متناوب و مستقیم ساخته و مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشاهده کردند که چنانچه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بکار رفته از نوع مستقیم باشد، پدیده مخرب حباب‌زایی به علت الکترولیز شدن سیال درون کانال، بر اثر عبور جریان الکتریکی رخ می‌دهد. اما با بکار بردن میدان‌های متناوب مشاهده شد که این حباب‌زایی کمتر می‌شود. ژانگ و همکارانش [۱۵]، جریان‌ام اچ دی درون ریزمجرای ساخته شده از سرامیک را مطالعه کردند. جی ای هو [۱۶]، مشخصات یک ریزپمپ ام اچ دی در حوزه پزشکی را مطالعه کرد. او نشان داد محدوده ولتاژ بین 10 تا 12 ولت و شدت شار مغناطیسی کمتر از 0.4 تسلا برای عملکرد این ریز پمپ‌ها کاملاً مناسب است و حباب‌زایی داخل کانال کاهش می‌یابد. دوویری و عبدالله [۱۷-۱۹]، جریان آرام، گذرا، کاملاً توسعه یافته در ریزپمپ‌های دیناموهیدرومغناطیسی را مطالعه و توزیع دمای داخل ریزمجرای آن را گزارش کردند. آنها اثر پارامترهای مختلف نظیر اعداد هارتمن، پرانتل، اکرت، استن‌تون و نسبت منظری مقطع ریزمجرا را بر افزایش دما و سرعت جریان مطالعه نمودند. مطالعه آنها در دو حالت جریان متناوب و جریان مستقیم به طور عددی و تحلیلی صورت گرفته است. ویب هو [۳]، اثرات حرارتی و الکترواسموزی جریان در ریزپمپ ام اچ دی را بررسی کرد. او نشان داد که مقاطع با هندسه‌های مختلف تأثیر به سزایی روی دما و دبی جریان در ریزمجرا دارد. بهره‌مندی و میربزرگی [۲۰]، نشان دادند که برای یک نیروی حجمی یکنواخت در عرض مجرا، نظیر نیروی لورنتز در حضور طول‌های عایق

- 1- Electroosmosis (EO)
- 2- Electrohydrodynamic (EHD)
- 3- Magnetohydrodynamic (MHD)
- 4- Siemens/meter
- 5- Biological Applications

$$\nabla^2 B = 0 \text{ \& } \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (7)$$

در کار حاضر $\vec{B} = B_x \vec{i} + B_z \vec{k}$ است، یعنی $B_y = 0$ می‌باشد. چرا که تغییر طول میدان مغناطیسی در راستای جریان مورد نظر است و عرض میدان مغناطیسی در راستای y همواره برابر عرض مجرا h است و در ناحیه عرضی مجرا همواره $B_y = 0$ است. برای استخراج حل B_x و B_z تابعی از x می‌توان معادلات $\nabla^2 B_x = 0$ و $\nabla^2 B_z = 0$ را جداگانه حل نمود که پاسخی بدیهی از معادله (7) می‌باشند.

۳-۱- بی‌بعد سازی معادلات حاکم

متغیرهای موجود در مسئله را می‌توان با تعریف مرجع‌های مناسبی، بدون بعد نمود و با علامت بالانویس * نمایش داد.

$$y^* = \frac{y}{h}, \quad x^* = \frac{x}{h}, \quad \vec{B}^* = \frac{\vec{B}}{B_0}, \quad \varphi^* = \frac{\varphi}{\varphi_0}, \quad P^* = \frac{P}{\rho U_0^2},$$

$$\vec{V}^* = \frac{\vec{V}}{U_0}, \quad \theta = \frac{T - T_i}{T_{out,0} - T_i}, \quad \vec{J}^* = \frac{\vec{J}}{\left(\frac{\sigma_0 \varphi_0}{h}\right)} \quad (8)$$

که در آن U_0 سرعت مرجع است و معمولاً از یک حل تحلیلی قابل استخراج می‌باشد. T_i دمای سیال در ورودی، $T_{out,0}$ دمای حداکثر سیال در خروجی، B_0 ، μ_0 و σ_0 به ترتیب مقادیر مرجع برای ولتاژ الکترودها، شدت شار مغناطیسی، لزجت دینامیکی سیال و هدایت الکتریکی سیال می‌باشد. لازم به ذکر است که با اجرای یک حل تحلیلی برای مسئله‌ای که $L_e/L \neq 1$ است، سرعت جریان در مجرا $U = \sigma_0 \varphi_0 B_0 h L_e / \mu_0 L$ و $T_{out} = T_i + (J^2 L_e / \sigma_0 \rho C_p U)$ متناسب با L_e تغییر می‌نماید و قاعده‌تاً بیست‌مرتبه مرجع هر سرعت و دما در حوزه حل باشد اما با توجه به اینکه اغلب، مرجع هر کمیتی ثابت فرض می‌شود، در این مقاله سرعت و دما برای حداکثر L_e (یعنی وقتی $L_e = L$)، به عنوان سرعت و دمای مرجع در نظر گرفته شده است. یعنی $U = \sigma_0 \varphi_0 B_0 h / \mu_0$ و $T_{out} = T_i + (J^2 L / \sigma_0 \rho C_p U)$ در نتیجه می‌توان روابط زیر را نوشت:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (9)$$

$$(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \frac{1}{Re_h} \nabla^2 \vec{V} + \frac{1}{Re_h} \vec{J} \times \vec{B} \quad (10)$$

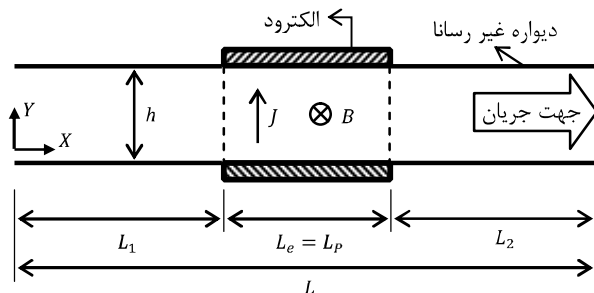
$$(\vec{V} \cdot \nabla) \theta = \frac{1}{Pe} \nabla^2 \theta + \frac{Ec}{Ha^2 Re_h} \vec{J}^2 \quad (11)$$

$$\vec{J} = -\nabla \varphi + Ha^2 \vec{V} \times \vec{B} \quad (12)$$

$$\nabla^2 \varphi = Ha^2 \nabla \cdot (\vec{V} \times \vec{B}) \quad (13)$$

$$\nabla^2 B = 0 \text{ \& } \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (14)$$

که در آنها به منظور اختصارنویسی از علامت * چشم‌پوشی شده است و $Re_h = \rho U_0 h / \mu_0$ عدد رینولدز حداکثر در مسئله، (نسبت نیروی اینرسی به لزجتی) $Ha = B_0 h \sqrt{\sigma_0 / \mu_0}$ عدد هارتمن (نسبت نیروی لورنتز به لزجت)، $Ec = U_0^2 / C_p T_{out,0}$ عدد اکرت و $Pe = Re_h \cdot Pr$ عدد پکلت، پارامترهای بی‌بعد حاکم بر مسئله می‌باشند. بعلاوه در این پژوهش هدایت الکتریکی و لزجت دینامیکی سیال به ترتیب با روابط $\sigma = \sigma_0 [1 + 0.025(T - T_0)]$ و $\ln(\mu / \mu_0) = -1.704 - 5.306(273/T) + 7.01(273/T)^2$ تعریف شده‌اند [۳]. که در آن $T_0 = 298K$ دمای مرجع و T بر حسب کلوین می‌باشد. همان‌طور که از این روابط مشاهده می‌شود، افزایش دما موجب کاهش نمایی لزجت و افزایش خطی هدایت الکتریکی خواهد شد. کاهش لزجت با افزایش دما در سیالات مایع امری بدیهی است. کاهش لزجت یکی از عوامل افزایش سرعت در ریزمجرا می‌باشد و افزایش هدایت الکتریکی باعث



شکل ۲ طرح شماتیک دو بعدی از یک ریزپمپ ام اچ دی با طول‌های عایق ورودی L_1 و خروجی L_2

نمای راست شکل ۱ را می‌توان به صورت یک طرح شماتیک دو بعدی، در شکل ۲ نمایش داد، که در آن عمق مجرا b عمود بر صفحه کاغذ است. با توجه به اینکه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی همواره بر بخش میانی طول مجرا اعمال می‌شود، طول‌های طرفین این دو میدان که با L_1 و L_2 مشخص شده‌اند، طول‌های عایق ورودی و خروجی نامیده می‌شوند. در پژوهش حاضر همواره $h = 1 \text{ mm}$ و $L = 10 \times h$ در نظر گرفته شده است. بنابراین با توجه به متغیر بودن L_e در پژوهش حاضر همواره $L_1 = L_2 = (L - L_e)/2$ خواهد بود.

۳-۲ معادلات حاکم

معادلات دینامویدرومغناطیسی حاکم بر جریان تراکم‌ناپذیر یک سیال نیوتنی با خواص ترموفیزیکی تابع دما در حالت دائم، به‌ترتیب شامل پیوستگی، اندازه حرکت خطی، انرژی، قانون اهم، معادله حاکم بر میدان الکتریکی (φ) و معادله حاکم بر میدان القای مغناطیسی (B) می‌باشد [۲۱].

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

که در آن $\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j}$ بردار سرعت جریان در حالت دو بعدی با واحد (m/s) می‌باشد.

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{J} \times \vec{B} \quad (2)$$

که در آن $\vec{J} \times \vec{B}$ نیروی حجمی لورنتز با واحد (N/m^3)، $\vec{J}$ بردار شدت جریان الکتریکی با واحد آمپر بر متر مربع، $\vec{B}$ بردار شدت شار مغناطیسی با واحد (Vs/m^2)، ρ چگالی سیال با واحد (kg/m^3)، P فشار با واحد (N/m^2) و μ لزجت دینامیکی سیال با واحد (Ns/m^2) است.

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T + \frac{J^2}{\sigma} \quad (3)$$

که در آن C_p ظرفیت گرمایی سیال با واحد ($kJ/kg \cdot K$)، k هدایت حرارتی سیال با واحد ($W/m \cdot K$)، T دما بر حسب کلوین، σ هدایت الکتریکی سیال با واحد ($1/\Omega \cdot m$) و J^2/σ جمله مربوط به گرمایش ژول است که به علت عبور جریان الکتریکی از درون سیال بوجود می‌آید.

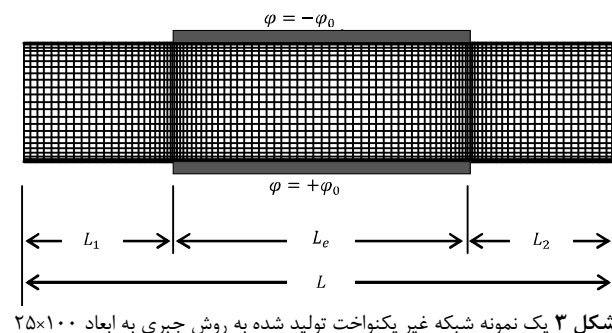
$$\vec{J} = \sigma(-\nabla \varphi + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (4)$$

که در آن φ میدان الکتریکی بر حسب ولت است.

$$\nabla^2 \varphi = \nabla \cdot (\vec{V} \times \vec{B}) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{V} \times \vec{B}) + \frac{1}{\sigma_m} \nabla^2 \vec{B} \text{ \& } \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (6)$$

که در آن σ_m نفوذ پذیری مغناطیسی بر حسب نیوتن بر متر مربع است. در مقیاس‌های آزمایشگاهی (پایین بودن عدد هارتمن) جمله $\nabla \times (\vec{V} \times \vec{B})$ در مقایسه با دو جمله دیگر معادله ناچیز بوده و قابل صرف‌نظر کردن است [۲۲]. از طرف دیگر، با توجه به اینکه در این پژوهش $\partial \vec{B} / \partial t = 0$ اتخاذ شده است، معادله القاء مغناطیسی (۶) به صورت رابطه (۷) خلاصه می‌شود.



مشاهده می‌شود که اختلاف پتانسیل الکتریکی روی صفحه در الکترودها $\Delta\varphi = \varphi(x, 0) - \varphi(x, h)$ همواره ثابت و برابر ۲۰ ولت اختیار شده است.

۳-۳- روش حل عددی

در این پژوهش، برای حل عددی معادلات جریان ام اچ دی با شرایط مرزی و مشخصات هندسی بیان شده در بخش ۳-۲ از روش حجم محدود استفاده شده است. ارتباط بین میدان‌های سرعت و فشار از طریق الگوریتم سیمپل^۲ برقرار شده است. برای پرهیز از اثرات احتمالی شطرنجی در میدان‌های فشار و سرعت از شبکه هم مکان با میان‌یابی رای-چو^۳ [۲۳]، برای مقادیر سرعت روی وجوه استفاده شده است. برای ارزیابی توأم جملات پخش و جابجایی در محل وجوه از طرح قاعده توانی^۴ استفاده شده است. سیستم معادلات جبری با استفاده از الگوریتم ماتریس سه قطری^۵ به روش ضمنی جایگزینی جهات^۶ حل شده و نتایج و نتایج تا دقت 10^{-16} گزارش گردیده است. نتایج ارائه شده در این پژوهش با توجه به مقادیر ثابت جدول ۳، برای $0.01 < \text{Ha}$ ، $0.82 < \text{Pr}$ و $1 \leq L_e/L$ استخراج شده است. که در این صورت با تغییر L_e رینولدز و پکلت جریان بین صفر و حداکثر خودشان یعنی ($0 < \text{Re}_h \leq 400$) و ($0 < \text{Pe} \leq 2728$) متغیر خواهد بود. یک نمونه از شبکه جبری تولید شده برای حل مسأله حاضر در شکل ۳ نشان داده شده است. بعلاوه برای نشان دادن استقلال نتایج مهم جریان از ابعاد شبکه (مانند سرعت متوسط در مقطع) مسأله مورد نظر در بخش صحت‌سنجی برای شبکه‌های مختلف حل شده است. نتایج حاکی از آن است که برای شبکه 250×10 و ریزتر از آن، سرعت متوسط جریان سیال به عدد $10^{-2} \times 3/35$ متر بر ثانیه همگرا شده و تا رقم چهارم اعشار ثابت باقی می‌ماند.

قابل ذکر است، در شکل ۳ به منظور وضوح بیشتر از تعداد گره‌های کمتری استفاده شده و در نواحی ابتدایی و انتهایی الکترودها بعلاوه کنار دیواره‌ها شبکه ریزتر شده است و نسبت تراکم برای این نواحی $f = 1/0.6$ می‌باشد.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- صحت‌سنجی نتایج عددی

اعتبارسنجی برنامه عددی نوشته شده با مقایسه نتایج حل عددی جریان ام اچ دی بین دو صفحه موازی و یک حل تحلیلی انجام شده است. در این حل تحلیلی خاص به‌طور غیرفیزیکی از اثرات نفوذ جانبی میدان الکتریکی و مغناطیسی در خارج از فاصله‌های L_e و L_p صرف‌نظر شده و خواص سیال، μ_0 و σ_0 ثابت فرض شده است. به‌علاوه تغییر طول‌های L_e و L_p به نحوی است که همواره $L_p = L_e$ می‌باشد. در این صورت پاسخ میدان‌های الکتریکی و

افزایش شدت جریان الکتریکی، نیروی حجمی لورنتز و تولید گرمای ژول می‌شود. قابل ذکر است که C_p ، k و ρ سیال عامل مورد نظر، در محدوده تغییرات دمایی پژوهش حاضر، تغییرات ناچیزی دارند و لذا از تابعیت دمایی آنها صرف‌نظر شده است.

۳-۲- شرایط مرزی، و خواص ترموفیزیکی مسأله

در مسأله مورد نظر شرایط مرزی به شرح زیر می‌باشد. در ورودی مجرا فشار و دما معلوم اما سرعت و میدان الکتریکی به صورت شرط مرزی نیومن^۱ می‌باشد. در خروجی مجرا فشار معلوم ولی سرعت، دما و میدان الکتریکی به صورت مشتقی می‌باشد. در سرتاسر دیواره‌های بالا و پایین مجرا برای سرعت شرط عدم لغزش بکار رفته ولی برای میدان الکتریکی در خارج از محدوده الکترودها شرط مرزی مشتقی و در محدوده الکترودها شرط مرزی میدان الکتریکی معلوم بکار رفته است که به‌طور خلاصه طبق جدول ۱ گزارش شده‌اند.

با توجه به اینکه شرایط مرزی حل معادلات میدان مغناطیسی بایستی در راستای z نیز بیان شود، مطابق جدول ۲ شرایط مرزی ناحیه دیوار به‌طور جداگانه گزارش شده است. در ورودی و خروجی شرط مرزی هنوز از نوع مشتقی است.

قابل ذکر است که شرایط مرزی برای میدان مغناطیسی در صفحه xz استفاده می‌شود و با توجه به وضعیت دو بعدی مورد نظر در این پژوهش که در آن جریان در صفحه xy و با شرایط در موقعیت $z = b/2$ جاری است، فقط از مؤلفه‌های میدان مغناطیسی در راستای z که حداکثر تابعی از x است، استفاده شده است. بعلاوه اگرچه معادله $\nabla^2 B_x = 0$ حل می‌شود اما پاسخ آن در صفحه $z = b/2$ کاملاً صفر است. خواص ترموفیزیکی بکار رفته در مسأله حاضر به‌طور خلاصه در جدول ۳ بیان شده است. این مشخصات ترموفیزیکی مربوط به یک الکترولیت (آب دریا) است.

جدول ۱ شرایط مرزی سرعت، فشار، دما و میدان الکتریکی

دیوار الکتروود	دیوار عایق	خروجی	ورودی
$\partial^2 p / \partial y^2 = 0$ $u = 0$ $v = 0$ $\partial T / \partial y = 0$ $\varphi(x, h) = -\varphi_0$ $\varphi(x, 0) = +\varphi_0$	$\partial^2 p / \partial y^2 = 0$ $u = 0$ $v = 0$ $\partial T / \partial y = 0$ $\varphi(x, h) = -\varphi_0$ $\varphi(x, 0) = +\varphi_0$	$P = 0$ $\partial u / \partial x = 0$ $\partial v / \partial x = 0$ $T = T_i$ $\partial \varphi / \partial x = 0$	$P = 0$ $\partial u / \partial x = 0$ $\partial v / \partial x = 0$ $\partial T / \partial x = 0$ $\partial \varphi / \partial x = 0$

جدول ۲ شرایط مرزی میدان مغناطیسی

دیوار در محدوده آهن‌ربا	دیوار در محدوده خارج از آهن‌ربا
$B_x(L_1 + L_p, y, b) = -B_0$ $B_x(L_1, y, 0) = -B_0$ $B_x(L_1 + L_p, y, 0) = +B_0$ $B_x(L_1, y, b) = +B_0$ $B_x(L_1 < x < L_1 + L_p, y, 0) = 0$ $B_x(L_1 < x < L_1 + L_p, y, b) = 0$ $B_z(x, y, 0) = B_z(x, y, b) = B_0$	$\partial B_x / \partial z = 0$ $B_z(x, y, 0) = 0$ $B_z(x, y, b) = 0$

جدول ۳ ثابت‌ها و خواص ترموفیزیکی جریان ام اچ دی

مشخصه	مقدار	واحد
هدایت الکتریکی سیال،	σ_0	$\frac{\text{Siemens}}{\text{m}}$ یا $\frac{1}{\Omega \cdot \text{m}}$ یا $\frac{\text{A}}{\text{m} \cdot \text{V}}$
لزجت دینامیکی سیال،	μ_0	N s/m^2
چگالی سیال،	ρ	kg/m^3
پتانسیل الکتریکی،	φ_0	V (Volts)
شدت شار مغناطیسی،	B_0	Tesla یا $\frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$ یا $\frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$
هدایت حرارتی سیال،	k	W/m K
ظرفیت گرمایی سیال،	C_p	kJ/kg K
دمای سیال ورودی،	T_i	K

1- Neumann Boundary Condition

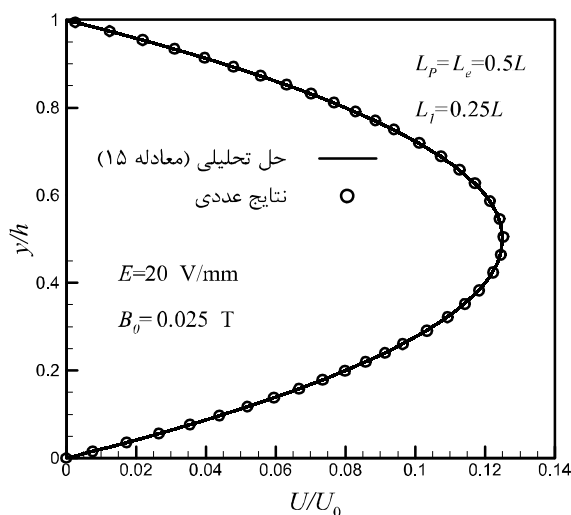
2- SIMPLE

3- Rhie-Chow

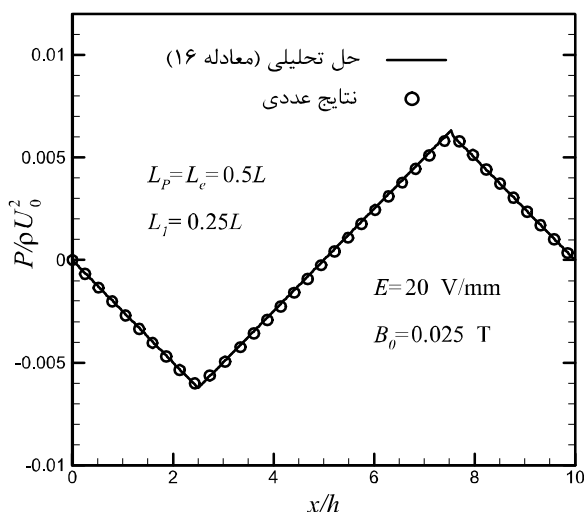
4- Power Law

5- Tridiagonal Matrix Algorithm (TDMA)

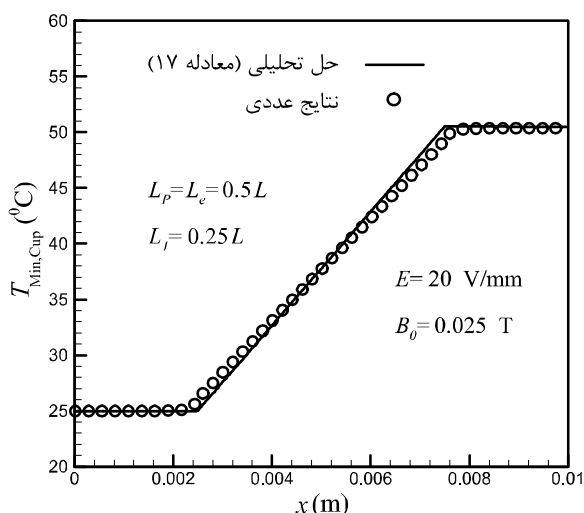
6- Alternative Direction Implicit (ADI)



شکل ۴ مقایسه پروفیل سرعت عددی در یک مقطع دلخواه با نظیرش در حل تحلیلی



شکل ۵ مقایسه توزیع فشار بدست آمده از نتایج عددی و حل تحلیلی



شکل ۶ مقایسه توزیع دمای میانگین بدست آمده از نتایج عددی و حل تحلیلی

۴-۲-۱- بخش اول (خواص ثابت)

شکل ۷ نتایج حل عددی میدان مغناطیسی را در $L_p = L_e = 0.5L$ نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، میدان مغناطیسی در راستای z اعمال شده است و خطوط آن از صفحه xz عبور می‌نماید، در حالی که جریان

مغناطیسی به ترتیب $\varphi = -E \times y$ و $B_z = B_0$ می‌باشد. معادلات (۱۵) تا (۱۷) به ترتیب توزیع سرعت، فشار و دمای میانگین را برای این حل تحلیلی نشان می‌دهد [۲۴، ۲۵].

$$u(y) = -\left(\frac{\sigma_0 B_0 E}{\mu_0}\right) \left(\frac{h}{Ha}\right)^2 \times \left[1 - \frac{1}{1 + e^{\frac{Ha}{h} \sqrt{\frac{L_e}{L}}}} \left(e^{\frac{Ha}{h} \gamma \sqrt{\frac{L_e}{L}}} + e^{Ha \left(1 - \frac{\gamma}{h}\right) \sqrt{\frac{L_e}{L}}} \right) \right] \quad (15)$$

که در آن $E = \Delta\varphi/h$ قدرت میدان الکتریکی است.

$$P(x) = \begin{cases} -Mx & , 0 \leq x < L_1 \\ \left(\frac{1}{L_e} - 1\right)M(x - L_1) - ML_1 & , L_1 \leq x \leq L_1 + L_e \\ \frac{L_e}{L} & \\ -Mx + ML & , L_1 + L_e < x \leq L \end{cases} \quad (16)$$

که در آن $M = (8\sigma_0 B_0 E / Ha^2) \left[1 - \left[2e^{(Ha/2)\sqrt{L_e/L}} / (1 + e^{Ha\sqrt{L_e/L}}) \right] \right]$ می‌باشد.

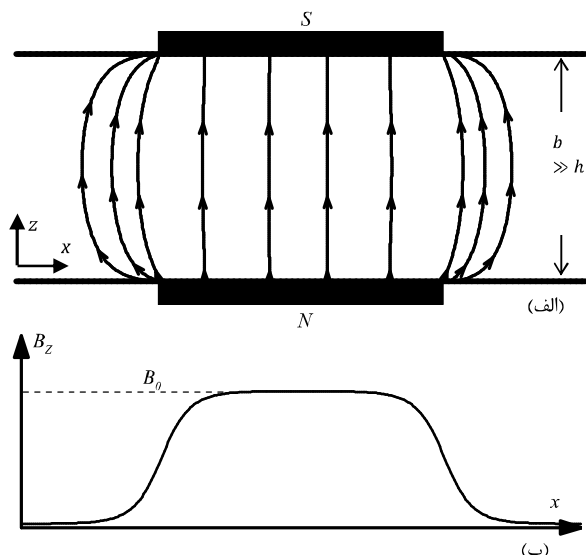
$$\theta(x) = \begin{cases} \left(\frac{1}{\gamma}\right) [1 - e^{-\gamma}] e^{x\gamma} & , 0 \leq x < L_1 \\ X + \left(\frac{1}{\gamma}\right) [1 - e^{-\gamma(1-X)}] & , L_1 \leq x \leq L_1 + L_e \\ 1 & , L_1 + L_e < x \leq L \end{cases} \quad (17)$$

که در آن: $X = (x - L_1)/L_e$, $\gamma = U_{ave} L_e / \alpha$, $\alpha = k / \rho C_p$. همان‌طور که از معادله (۱۵) مشاهده می‌شود، پروفیل سرعت فقط تابعی از y است و این پروفیل در سراسر مجرا یکسان است.

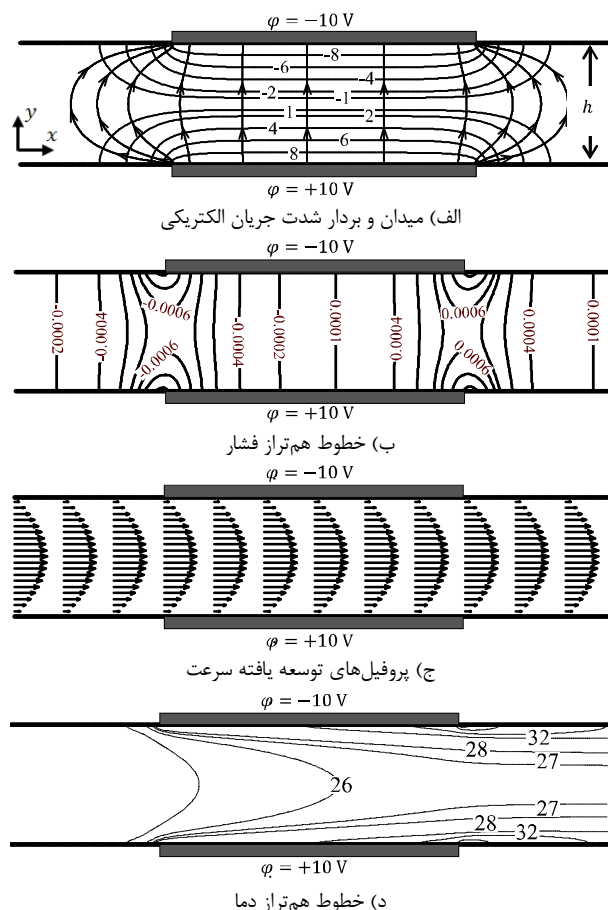
شکل ۴ نتایج عددی یک پروفیل سرعت در مقطعی دلخواه از مجرا را با حل تحلیلی معادله (۱۵) برای $L_p = L_e = 0.5L$ مقایسه می‌کند. مشاهده می‌شود که انطباق نتایج برای این وضعیت کاملاً قابل قبول است. شکل ۵ توزیع فشار القایی در سراسر حوزه حل روی خط مرکزی مجرا را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که انطباق کاملی بین نتایج عددی و حل تحلیلی معادله (۱۶) وجود دارد. شکل ۶ توزیع دمای میانگین در سراسر مجرا را با حل تحلیلی (۱۷) مقایسه می‌کند. مشاهده می‌شود که انطباق نتایج برای این وضعیت قابل قبول است.

۴-۲-۲- نتایج عددی تغییر طول میدان الکترومغناطیسی

در این قسمت به‌خلاف بخش صحت‌سنجی، اثرات نواحی نفوذ جانبی میدان‌های الکترومغناطیس حذف نمی‌شود تا نتایج منطقی‌تری به‌دست آید. به منظور نشان دادن اثرات وابستگی دمایی خواص سیال (μ و σ) نتایج حاصل از تغییر طول میدان‌های الکترومغناطیس در دو بخش مجزا بررسی و بیان می‌شود. در بخش اول مشابه بخش صحت‌سنجی از وابستگی دمایی خواص به‌طور غیرفیزیکی صرف‌نظر می‌شود، حال آنکه در بخش دوم این وابستگی دمایی ابقا می‌شود. علاوه بر گزارش حاضر، طول دو میدان الکتریکی و مغناطیسی در راستای جریان همواره برابر فرض می‌شود ($L_p = L_e$)، اگرچه نسبت به طول کل مجرا (L) می‌توانند تغییر نمایند ($0 \leq L_e/L \leq 1$). این در حالی است که با توجه به شکل ۱ عمق میدان الکتریکی و عرض میدان مغناطیسی همواره ثابت می‌باشد.



شکل ۷ نتایج عددی، (الف) خطوط میدان مغناطیسی در صفحه xz ، (ب) تغییرات B_z در راستای x در $z = b/2$



شکل ۸ نتایج عددی در $z = b/2$ ، (الف) خطوط میدان و بردار شدت جریان الکتریکی، (ب) میدان فشار، (ج) میدان سرعت، (د) میدان دما

۴-۲-۲- بخش دوم (خواص وابسته به دما)

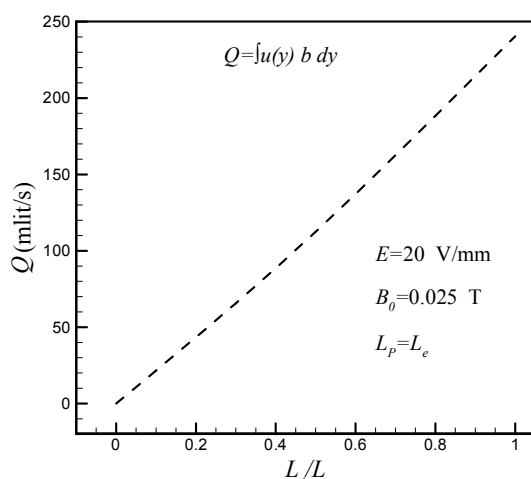
در این بخش اگرچه خواص ترموفیزیکی سیال یعنی μ و σ تابع دما می‌باشند، اما پاسخ طرح کلی میدان‌های سرعت، فشار، دما، پتانسیل الکتریکی و مغناطیسی نظیر شکل ۷ و ۸ در بخش اول می‌باشد. در اینجا به منظور اختصار بیشتر، از ارائه آنها صرف‌نظر شده است.

دو بعدی در صفحه xy و با شرایط در موقعیت $z = b/2$ مورد نظر است. همان‌طور که شکل ۷-الف نشان می‌دهد در موقعیت $z = b/2$ مؤلفه B_x میدان مغناطیسی صفر است و تنها مؤلفه B_z آن مقدار دارد که در شکل ۷-ب توزیع B_z بر حسب x نشان داده شده است.

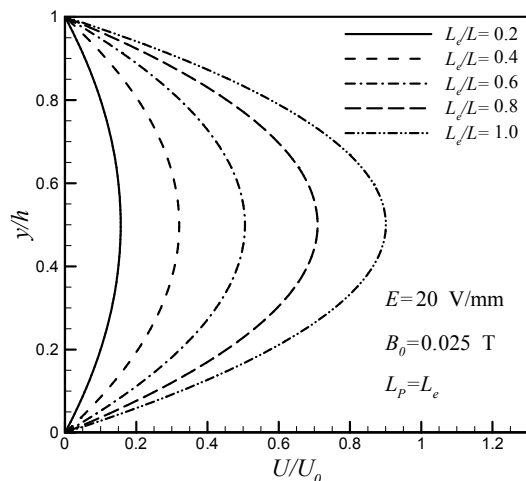
شکل ۸ توزیع میدان الکتریکی، فشار، سرعت و دما را برای وضعیت $L_p = L_e = 0.5$ نشان می‌دهد. شکل ۸-الف خطوط هم‌تراز میدان الکتریکی و بردار شدت جریان الکتریکی را نشان می‌دهد که در آن میدان الکتریکی به ویژه در منطقه میانی الکترودها کاملاً خطی می‌باشد. و خطوط شدت جریان الکتریکی کاملاً در منطقه نفوذ جانبی مقدار غیر صفر دارد. همان‌طور که در قسمت الف، از شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، اثرات میدان الکتریکی و مغناطیسی در خارج از طول‌های L_p و L_e نیز به‌طور جانبی نفوذ نموده است، به‌طوری‌که عمق این نفوذ طولی را می‌توان حداقل به اندازه عرض مجرا h در نظر گرفت. نتایج عددی نشان می‌دهند که از این فاصله به بعد اثرات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تا دقت خوبی قابل چشم‌پوشی هستند. در شکل ۸-ب مشاهده می‌شود که میدان فشار، در عرض مجرا یکنواخت نیست به ویژه در ناحیه اتصال دیواره‌های عایق با الکترودها طرح کاملاً متفاوتی دارد که اثر مستقیم نفوذ دو میدان الکتریکی و مغناطیسی در این نواحی است. با این وجود در شکل ۸-ج پروفیل‌های سرعت در سراسر حوزه کاملاً یکسان می‌باشند. نتایج عددی نشان می‌دهند که به ازای L_e کمتر از طول ناحیه نفوذ جانبی پروفیل‌های سرعت اندکی توسعه نیافته می‌شوند. از شکل ۸-د مشاهده می‌شود که حرارت تولیدی ناشی از گرمایش ژول به دلیل عبور جریان سیال کاملاً به سمت پایین دست کشیده شده است.

شکل ۹ دبی جریان به ازای تغییرات طول میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی را نشان می‌دهد. دبی جریان از رابطه $Q = \int u(y) b \, dy$ محاسبه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش طول‌های دو میدان دبی جریان در مجرا به صورت خطی افزایش می‌یابد. این افزایش دبی را می‌توان به کمک شکل ۱۰ که در آن رشد پروفیل‌های سرعت نمایش داده شده است، توجیه نمود. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش L_e/L پروفیل‌های سرعت بزرگ‌تری حاصل می‌شود. علت این امر با توجه به معادله مومنتم که در آن نیروی لورنتز عامل حرکت می‌باشد، قابل تفسیر است. طبق این معادله نیروی لورنتز در ناحیه اثر میدان‌های الکترومغناطیس به صورت $(J \times B) \, dV$ است. لذا با افزایش L_e/L ، انتگرال $\int dV$ افزایش می‌یابد. بعلاوه طبق معادله قانون اهم (۴)، J نیز زیاد می‌شود. بنابراین $\int J \, dA$ با افزایش L_e/L در کل زیاد می‌شود و در نتیجه با افزایش نیرو، دبی جریان افزایش می‌یابد. در شکل ۱۱ توزیع دمای میانگین کاسه‌ای سیال در سراسر مجرا به ازای تغییرات L_e/L نشان داده شده است. مشاهده می‌شود در تمام حالات اختلاف دمای قابل توجهی از ابتدا تا انتها مجرا رخ می‌دهد. به‌طوری‌که با افزایش L_e/L شیب تغییرات دما کاهش پیدا می‌کند، علت این امر در افزایش سرعت جریان است به این معنا که اگرچه با افزایش L_e/L گرمایش ژول و تولید حرارت بیشتر می‌شود اما عبور سریع‌تر جریان فرصت دریافت حرارت توسط سیال را از بین می‌برد و در نتیجه سیال با دمای کمتری از مجرا خارج می‌شود. این موضوع با توجه به اینکه در هر حالت پکلی (Pe) با افزایش سرعت رشد می‌کند نیز قابل توجیه است. اختلاف دمای حاصل از گرمایش ژول می‌تواند مقادیر خواص فیزیکی سیال مانند μ و σ را تحت تاثیر قرار دهد. همان‌طور که در ابتدا این بخش بیان شد چشم‌پوشی از تابعیت دمایی خواص، نتایجی غیرفیزیکی خواهد داد. لذا در ادامه با ابقاء تابعیت دمایی خواص μ و σ نتایج واقعی‌تری گزارش می‌شود.

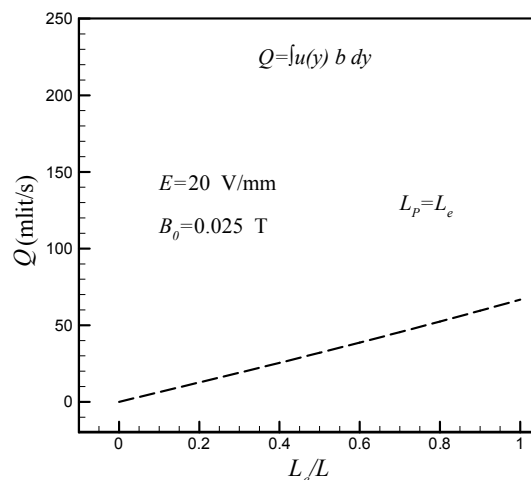
دبی را می‌توان به کمک شکل ۱۳ که در آن رشد پروفیل‌های سرعت نمایش داده شده است، توجیه نمود. در این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش L_e/L پروفیل‌های سرعت بزرگتری نسبت به حالت قبل (ثابت بودن خواص) حاصل می‌شود. به عبارت دیگر در این شکل حداکثر پروفیل‌های بی‌بعد سرعت حداکثر از 0.2 تا 0.9 افزایش می‌یابند درحالی‌که با توجه به شکل ۱۰ حداکثر پروفیل‌های بی‌بعد سرعت از 0.05 تا 0.25 افزایش می‌یابند. علت این امر را می‌توان به لزجت دینامیکی سیال مربوط ساخت که عاملی مقاوم در برابر حرکت سیال می‌باشد. همان‌طور که در انتهای بخش ۳-۱ بیان گردید، لزجت با افزایش دما کاهش می‌یابد و لذا با کاهش لزجت سرعت جریان در مجرا افزایش می‌یابد. شکل ۱۴ توزیع دمای میانگین کاسه‌ای را در سراسر مجرا به ازای تغییر طول میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی نشان می‌دهد. دمای میانگین کاسه‌ای از رابطه $T_m = [\int u(x,y)T(x,y)dA] / [\int u(x,y)dA]$ محاسبه شده است که در آن $dy = b$ می‌باشد. مشاهده می‌شود که با افزایش طول‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی دمای میانگین کاسه‌ای در طول مجرا کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر اگرچه در هر نقطه از سیال در منطقه الکترودها با ابقاء وابستگی دمایی حرارت بیشتری تولید می‌شود اما به دلیل افزایش سرعت جریان، دمای سیال خروجی کمتر می‌شود. لذا همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود با اعمال وابستگی دمایی خواص حداکثر دمای میانگین به حدود 40 درجه سانتی‌گراد، درحالی‌که در حالت ثابت بودن خواص (مطابق شکل ۱۱) حداکثر دمای میانگین به حدود 60 درجه سانتی‌گراد می‌رسد.



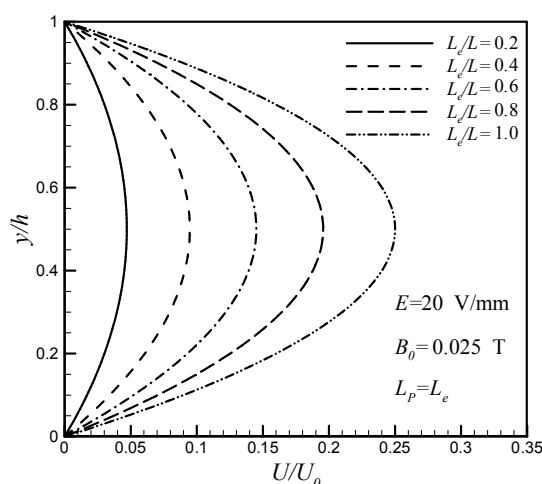
شکل ۱۲ دبی جریان به ازای تغییر طول میدان الکتریکی و مغناطیسی (خواص تابع دما)



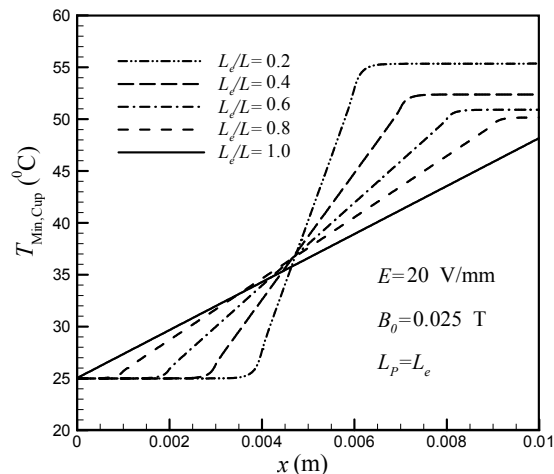
شکل ۱۳ توزیع سرعت به ازای تغییر طول میدان الکتریکی و مغناطیسی (خواص تابع دما)



شکل ۹ دبی جریان به ازای تغییر طول میدان الکتریکی و مغناطیسی (خواص ثابت)



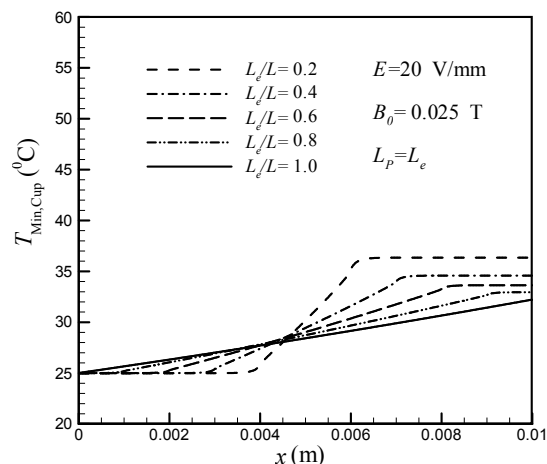
شکل ۱۰ توزیع سرعت به ازای تغییر طول میدان الکتریکی و مغناطیسی (خواص ثابت)



شکل ۱۱ توزیع دمای میانگین کاسه‌ای به ازای تغییر طول میدان الکتریکی و مغناطیسی (خواص ثابت)

شکل ۱۲ دبی جریان به ازای تغییر طول میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با اعمال وابستگی دمایی دبی جریان به ازای افزایش طول دو میدان الکتریکی و مغناطیسی نسبت به حالت ثابت بودن خواص با شیب بسیار بیشتری افزایش می‌یابد. مطابق شکل ۹ در حالت ثابت بودن خواص حداکثر دبی حدود 70 میلی‌لیتر بر ثانیه است، در حالی که در شکل ۱۲ حداکثر دبی نزدیک به 250 میلی‌لیتر بر ثانیه می‌باشد. این افزایش

- [4] S.A. Mirbozorgi, H. Niazmand, M. Renksizbulut, Electro-Osmotic Flow in Reservoir-Connected Flat Microchannels With Non-Uniform Zeta Potential, *Journal of Fluid Engineering*, Vol. 128, pp. 1133-1143, 2006.
- [5] V. Singhal, S. Garimella, A. Raman, Microscale pumping technologies for microchannel cooling systems, *American Society of Mechanical Engineers, App.I. Mech. Rev.*, Vol. 57, No. 3, 2004.
- [6] M.W. Ashraf, S. Tayyaba, N. Afzulpurkar, Micro Electromechanical Systems (MEMS) Based Microfluidic Devices for Biomedical Applications, *International Journal of Molecular Sciences* 12, pp. 3648-3704, 2011.
- [7] R. Antonio, *Electrohydrodynamic and Magnetohydrodynamic Micropumps*, Microfluidic Technologies for Miniaturized Analysis Systems, Departmento Electronically Electromagnetisms. Universidad de Sevilla, 2007.
- [8] W. Ritchie, Experimental researches in electro-magnetic and magneto-electricity, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 123, pp. 313-321, 1833.
- [9] A. Homsy, *Design, Microfabrication, and Characterization of MHD Pumps and their Applications in NMR Environments*, PhD. Thesis, Institute of Micro technology University of Neuchatel Rue Jaquet-Droz 1, CH-2002 Neuchatel Switzerland, 2006.
- [10] J. Jang, S.S. Lee, Theoretical and experimental study of MHD micropump, *Sensors and Actuators* 80, pp.84-89, 2000.
- [11] N.S. Winowich, W.F. Hughes, J.I. Ramos, Numerical simulation of electromagnetic pump flow, *Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow* 5, pp. 1228-1240, 1987.
- [12] J. I. Ramos, N. S. Winowich, Finite difference and finite element methods for MHD channel flows, *Int. J. Num. Methods Fluids*, Vol. 11, pp. 907-934, 1990.
- [13] A. V. Lemoff, A. P. Lee, R. Miles, C. McConaghy, An AC magneto-hydrodynamic micro-pump, towards a true integrated micro-fluidic system, *Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators Transducers*, 99, pp. 1126-1129, 1999.
- [14] A.V. Lemoff, A.P. Lee, An AC magnetohydrodynamic micropump, *Sensors and Actuators B* 63, pp.178-185, 2000.
- [15] J. Zhong, M. Yi, H. Bau, Magneto-hydrodynamic (MHD) pump fabricated with ceramic tapes, *Sensors and Actuators* 96, pp. 59-66, 2002.
- [16] E.H. Je, Characteristic study of MHD Minipump, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 16, No. 3, pp. 234-237, 2008.
- [17] H.M. Duwairi, M. Abdullah, Thermal and flow analysis of a magneto-hydrodynamic micropump, *Microsyst Technol*, 13, pp. 33-39, 2007.
- [18] H.M. Duwairi, M. Abdullah, Numerical computation of fluid flow in a magnetohydro-dynamic micropump, *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, No. 32, pp. 1-5, 2008.
- [19] M. Abdullah, H.M. Duwairi, Thermal and flow analysis of two-dimensional fully developed flow in an AC magneto-hydrodynamic micropump, *Micro. Syst. Technol*, 14, pp. 1117-1123, 2008.
- [20] M. Bahremandi, S. A. Mirbozorgi, Numerical simulation of fluid flow in magneto-hydrodynamic micropumps with 2-DCross section flow, *The 19th Annual Conference on Mechanical Engineering (ISME)*. The University of Birjand, Birjand, IRAN, 2011. (In Persian)
- [21] M. S. Tillack, N. B. Morley, *Magnetohydrodynamics*, Standard Handbook for Electrical Engineers, 14th Edition, 1998.
- [22] M. Hughes, K. A. Perilous, M. Cross, The numerical modeling of DC electromagnetic pump and brake flow, *App.I. Math. Modelling*, Vol. 19, pp. 713-724, 1995.
- [23] C. M. Rhie, W. L. Chow, Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation, *AIAA Journal*, Vol. 21, No. 11, pp. 1525-1532, 1983.
- [24] C. Y. Chang, *Analysis of meso-scale heat exchangers with Magneto-hydrodynamic pump*, PhD. thesis, Department of Power Mechanical Engineering, Sing Hua University, 2004.
- [25] M. Dallakehnezhad, *Numerical simulation of joule heating effects in Magneto-Hydrodynamic (MHD) flow through a flat micro channel*, Masters of Science Thesis, Department of Mechanical Engineering, The University of Birjand, 2013. (In Persian)



شکل ۱۴ توزیع دمای میانگین کاسه‌ای به ازای تغییر طول میدان مغناطیسی و الکتریکی (خواص تابع دما)

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثرات تغییر طول همزمان دو میدان الکتریکی و مغناطیسی با اعمال وابستگی دمایی خواص سیال و لحاظ نواحی نفوذ جانبی بررسی و یک حل تحلیلی جامع شامل توزیع سرعت، فشار و دما برای وضعیت خاص $L_p = L_e$ ارائه شده است. علاوه بر توزیع عددی میدان‌های سرعت، فشار، دما و الکترومغناطیس با حل معادلات مربوطه به دست آمده و گزارش شده است. نتایج نشان داد که با افزایش طول میدان‌های الکترومغناطیس مقدار جریان الکتریکی عبوری از درون سیال افزایش می‌یابد، که در نتیجه، موجب تولید بیشتر حرارت و دبی می‌شود. افزایش دما خواص ترموفیزیکی سیال را تحت تأثیر قرار می‌دهد به گونه‌ای که لزجت به صورت نمایی کاهش یافته در حالی که هدایت الکتریکی سیال به طور خطی افزایش می‌یابد. علاوه بر نتایج عددی نشان داد که با تغییر طول همزمان دو میدان الکتریکی و مغناطیسی و لحاظ تابعیت دمایی خواص سیال (آب)، برای جریان در یک مجرا به مقطع مستطیلی ۱۰۰۰ میلی متر مربع، شدت شار مغناطیسی ۰/۰۲۵ تسلا و قدرت میدان الکتریکی ۲۰ ولت بر میلی متر، دبی عبوری به ۲۵۰ میلی لیتر بر ثانیه و دمای میانگین کاسه‌ای از ۲۵ درجه سانتی‌گراد ورودی به ۴۰ درجه سانتی‌گراد در خروج از مجرا می‌رسد. این در حالی است که با ثابت بودن خواص، حداکثر دبی و دمای میانگین به ترتیب ۷۰ میلی لیتر بر ثانیه و ۶۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

۶- مراجع

- [1] D.J. Laser, J.G. Santiago, A review of micropumps, *Journal of Micromechanics and Micro engineering*, Vol. 14, R. pp. 35-64, 2004.
- [2] A. Nisar, N. Afzulpurkar, B. Mahaisavariya, A. Tuantranont, *MEMS-based micropumps in drug delivery and biomedical*, applications Sensors and Actuators B 130, pp.917-942, 2008.
- [3] D.P. Vaibhav, *Electroosmosis and Thermal Effects in Magnetohydrodynamic (MHD) Micropumps Using 3D MHD Equations*, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Masters of Science thesis, Department of Mechanical Engineering, San Diego State University, 2007.