ماهنامه علمی پژوهشی



mme.modares.ac.ir



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

مرتضى دلاكه نژاد'، سىيد على ميربزرگى'*

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

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

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

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این مقاله اثر تغییرات همزمان طولهای دو میدان الکترومغناطیس با لحاظ نواحی نفوذ جانبی بر توزیع دما و سرعت جریان در یک ریزپمپ ام اچ دی بهطور عددی شبیهسازی 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 با لالا تی باک سر می این می است الا سالات نیال می شود.	مقاله پژوهشی کامل دریافت: ۶- مهر ۱۳۹۲ پذیرش: ۹۰ آذر ۱۳۹۲ ارائه در سایت: ۲۲ تیر ۱۳۹۳
— است.معادات کا مربر تو میدان جریان سیال و اندرومعنطیس به روس عدای عجم معدود عل سده و یک عل کتربیک بامع سامل توریع سرعت، فشار و دما برای یک حالت خاص ارائه شده است. نتایج عددی نشان می دهد که با تغییر طولمیدانهای الکترومغناطیس و لحاظ تابعیت دمایی خواص سیال (آب)، برای جریان در یک مجرا به مقطع مستطیلی ۱۰۰۰ میلیمتر مربع، شدت شار مغناطیسی ۲۰۲۵، تسلا و قدرت میدان الکتریکی ۲۰ ولت بر میلیمتر، دبی عبوری به ۲۵۰ میلی لیتر بر ثانیه و دمای میانگین کاسهای 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 بهترتیب ۷۰ میلی لیتر بر ثانیه و ۶۰ درجه سانتی گراد در خروج از مجرا می رسد. این در حالی است که با ثابت بودن خواص، حداکثر دبی و دمای میانگین بهترتیب ۷۰ میلی لیتر بر ثانیه و ۶۰ درجه سانتی گراد می به می است.	<i>کلید واژگان:</i> ریزیمپ ام اچ دی نیروی لورنتز جریان کاملاً توسعه یافته طول میدان الکتریکی طول میدان مغناطیسی

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	ABSTRACT		
Original Research Paper Received 28 September 2013 Accepted 30 November 2013 Available Online 13 July 2014	In this paper the effect of electromagnetic field lengths to change simultaneously s 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,		
Keywords: MHD Micropump Lorentz Force Fully Developed Flow Electrode- Field Length Magnetic-Field Length	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 filed distributions has been derived for an 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 mm ² cross-section channel, magnetic field intensity 0.025 Tesla and electric field strength 20 volt/mm, the flow rate reaches 250mLit/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 reach70mLit/s and more than 60°C respectively.		

میشوند: ریزپمپهای مکانیکی و غیرمکانیکی [۱]. در ریزپمپهای مکانیکی اغلب از یک غشای متحرک برای تولید حرکت سیال استفاده میشود. تحریک این غشاء به وسیله مکانیزمهای مختلفی از جمله: الکترواستاتیک^۲، پیزوالکتریک^۵ و الکترومغناطیس² انجام میشود [۲]. یکی از مزیتهای اصلی

۱ - مقدمه

ریزپمپها یکی از قسمتهای مهم در سیستمهای ریزالکترومکانیکی زیستی ^۲ و سیستمهای ریزسیالی^۲ هستند که کاربرد آنها در سه دهه گذشته گسترش قابل توجهی پیدا کرده است. این ریزپمپها عمدتاً به دو دسته طبقهبندی

4- Electrostatical 5- Pizoelectrical

6- Electromagnetical

Please cite this article using:

1- Micropumps

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

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

این ریزپمپها قابلیت اعتماد به سیستم و عدم وابستگی مکانیزم تولید فشار در آنها به سیالهای خاص می باشد. با این حال نیاز به ولتاژ بالا (بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ 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)^۲[۵] و دیناموهیدرومغناطیسی (ام اچ دی)^۳ [۶] اشاره کرد. از طرف دیگر هدایت الکتریکی سیال در ریزپمپهای الکترواسموزی و الکتروهیدرودینامیکی در محدوده ^{۵۱-} ۱ تا ۱ زیمنس بر متر^۴ است. در حالی که در ریزپمپهای دیناموهیدرومغناطیسی مقدار هدایت الکتریکی سیال در محدوده ^{۲-} ۱ تا ^۹ ۱۰^۹ و ۱ 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.

یدیده 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 ریزیمپهای ام اچ دی با جریان مستقیم مطالعاتی را به طور تجربی انجام دادند. وينوويچ و همكارانش [۱۱] و راموس و وينوويچ [۱۲]، هر دو روش اجزا محدود و اختلاف محدود را برای تحلیل جریان ام اچ دی و تعیین تأثیر اعداد رينولدز و هارتمن بكار بردند. ليموف و همكارانش [١٣] و ليموف و لي [١۴] 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 مستقيم باشد، پديده مخرب حبابزايي به علت الكتروليز شدن سيال درون کانال، بر اثر عبور جریان الکتریکی رخ میدهد. اما با بکار بردن میدانهای متناوب مشاهده شد که این حبابزایی کمتر می شود. 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 ۰ تا ۱۲ ولت و شدت شار مغناطیسی کمتر از ۰/۰۴ 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 هَو [۳]، اثرات حرارتي و الکترواسموزي جريان در ريزپمپ ام اچ دي را بررسي کرد. او نشان داد که مقاطع با هندسههای مختلف تاثیر 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 طول های عایق

ورودی و خروجی، جریان در سراسر طول مجرا و حتی در محل اتصال طول های 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 ۲۰۱۰، پرانتل بین ۲/۱۰ تا ۵، اکرت بین ۲/۱۰ تا ۵/۱۰، استن تون بین ۴ تا ۸ و نسبت منظری بین ۲/۱ تا ولتاژ اعمالی بین ۱۰ تا ۶۰ ولت نیز بررسی شده است. با این وجود اثرات تغییر طول میدان های الکتریکی و مغناطیسی روی مشخصات حرارتی و دینامیکی جریان کمتر بررسی شده است. به نظر می سد که تغییرات طول میدان های الکتریکی و مغناطیسی روی طرح جریان، دمای سیال و دبی عبوری از پمپ تاثیر قابل توجهی داشته باشد. در این مقاله اثر تغییر همزمان طول های دو میدان الکتریکی و مغناطیسی همراه با نواحی نفوذ جانبی آنها روی گرمایش ژول، توزیع دما و توزیع سرعت با جزئیات بیشتری بررسی می شود.

۲- فيزيك 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 2 با طول L_{p} و عرض ثابت h نصب شده است. بعلاوه در همین منطقه روی دو دیواره بالا و پایین، الکترودهایی به طول و عمق ثابت b برای اعمال میدان الکتریکی قرار داده شده است. دیوارههای L_e ريزمجرا به جز در قسمت الكترودها عايق مىباشند. اگر هدايت الكتريكى سيال عبوری از مجرا به قدر کافی بزرگ باشد، میدان الکتریکی بین دو الکترود، باعث برقراری یک جریان الکتریکی از درون سیال می شود. همان طور که مشاهده می شود میدان مغناطیسی اعمال شده توسط آهنربای دائمی عمود بر راستای ميدان الكتريكي بين دو الكترود ميباشد. طبق تئوري الكترومغناطيس در اين 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 می شود.



6- Permanent Magnet

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-08

¹⁻ Electroosmosis (EO)

²⁻ Electrohydrodynamic (EHD)

 ³⁻ Magnetohydrodynamic (MHD)
 4- Siemens/meter

^{5-.} BiologicalApplications

مهندسی مکانیک مدرس، مرداد ۱۳۹۳، دوره ۱٤، شماره ۶



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

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 میدان های الکتریکی و مغناطیسی همواره بر بخش میانی طول مجرا اعمال می شود، طول های طرفین این دو میدان که با L_1 و L_2 مشخص شدهاند، طولهای عایق ورودی و خروجی نامیده می شوند. در پژوهش حاضر همواره است. بنابراین با توجه به $L = 1 \cdot k$ و $h = 1 \, \mathrm{mm}$ همواره h است. ما توجه به متغير بودن L_e در پژوهش حاضر همواره 2 $/(L_e)$ جواهد بود. L_e خواهد بود.

٣- معادلات حاكم

معادلات دیناموهیدرومغناطیسی 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 (q) و معادله حاکم بر میدان القای مغناطیسی (B) میباشد [۲۱].

(۱) کہ در آن
$$\vec{V} = 0$$
 بردار سرعت جریان در حالت دو بعدی با واحد $\vec{V} = \vec{u} \cdot \vec{v}$ میباشد.
(m/s) میباشد.

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

که در آن $\vec{J} imes \vec{B}$ نیروی حجمی لورنتز با واحد (N/m^3)، \vec{f} بردار شدت جریان الکتریکی با واحد آمپر بر متر مربع، $ec{B}$ بردار شدت شار مغناطیسی با واحد μ و (N/m²)، ρ چگالی سیال با واحد (kg/m³)، P فشار با واحد (N/m²) و لزجت دینامیکی سیال با واحد (Ns/m²)، است.

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T + \frac{J^2}{\sigma} \tag{(7)}$$

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

$$\vec{I} = \sigma \left(-\nabla \varphi + \vec{V} \times \vec{B} \right) \tag{F}$$

که در آن
$$arphi$$
میدان الکتریکی بر حسب ولت است.

$$\nabla^2 \varphi = \nabla \cdot \left(V \times B \right) \tag{(a)}$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times \left(\vec{V} \times \vec{B}\right) + \frac{1}{\sigma \mu_m} \nabla^2 \vec{B} \otimes \nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{(5)}$$

که در آن μ_m نفوذ پذیری مغناطیسی بر حسب نیوتن بر مربع آمپر است. در مقیاسهای آزمایشگاهی (پایین بودن عدد هارتمن) جمله $(ec{V} imesec{B}) imes
abla$ 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 $d\vec{B}/\partial t = 0$ اتخاذ شده [است، معادله القاء مغناطیسی (۶) به صورت رابطه (۷) خلاصه می شود.

 $\nabla^2 B = 0 \& \nabla \cdot \overrightarrow{B} = 0$ (γ) در کار حاضر $\vec{B} = B_x \vec{i} + B_z \vec{k}$ در کار حاضر $\vec{B} = B_x \vec{i} + B_z \vec{k}$ در کار د 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 $0 = B_{y}$ است. برای استخراج حل B_{z} و B_{z} تابعی از x، میتوان معادلات $0=\nabla^2 B_x=0$ و $\nabla^2 B_x=0$ را جداگانه حل نمود که پاسخی بدیهی از معادله (۷) میباشند.

۳-۱- بیبعد سازی معادلات حاکم

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

$$y^{*} = \frac{y}{h}, x^{*} = \frac{x}{h}, \overline{B}^{*} = \frac{\overline{B}}{B_{0}}, \varphi^{*} = \frac{\varphi}{\varphi_{0}}, P^{*} = \frac{P}{\rho U_{0}^{2}},$$
$$\vec{V}^{*} = \frac{\vec{V}}{U_{0}}, \theta = \frac{T - T_{i}}{T_{\text{out},0} - T_{i}}, \vec{J}^{*} = \frac{\vec{J}}{\left(\frac{\sigma_{0}\varphi_{0}}{h}\right)}$$
(A)

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، الکترودها، شدت شار μ_0 ، B_0 ، φ_0 μ_0 ، B_0 ، φ_0 مغناطیسی، لزجت دینامیکی سیال و هدایت الکتریکی سیال میباشد. لازم به ذکر است که با اجرای یک حل تحلیلی برای مسألهای 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 دمای سیال در خروج است که متناسب با L_e تغییر مینماید و $T_{out} = T_i + (J^2 L_e / \sigma_0 \rho C_P U)$ قاعدتاً بایستی مرجع هر سرعت و دما در حوزه حل باشد امّا با توجه به اینکه اغلب، مرجع هر کمیتی ثابت فرض می شود، در این مقاله سرعت و دما برای حداکثر L_e (یعنی وقتی $L_e = L$)، به عنوان سرعت و دمای مرجع در نظر L_e $T_{\rm out} = T_i + (J^2 L / \sigma_0 \rho C_P U)$ و $U = \sigma_0 \varphi_0 B_0 h / \mu_0$ گرفته شده است. يعنى در نتیجه میتوان روابط زیر را نوشت:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \tag{9}$$

$$(V \cdot V)V = -VP + \frac{1}{\operatorname{Re}_{h}}V^{2}V + \frac{1}{\operatorname{Re}_{h}}J \times B$$
(1.1)

$$\left(V \cdot \nabla\right)\theta = \frac{1}{\text{Pe}}\nabla^2\theta + \frac{1}{\text{Ha}^2\text{Re}_{h}}J^2 \tag{11}$$

$$\vec{J} = -\nabla \phi + \mathrm{Ha}^2 \vec{V} \times \vec{B} \tag{11}$$

$$\nabla^2 \varphi = \mathrm{Ha}^2 \nabla \cdot \left(\vec{V} \times \vec{B} \right) \tag{17}$$

$$\nabla^2 B = 0 \& \nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{14}$$

که در آنها به منظور اختصارنویسی از علامت * چشم پوشی شده است و عدد رینولدز حداکثر در مسأله، (نسبت نیروی اینرسی به Re_h = $ho U_0 h/\mu_0$ لزجت)، لزجت الدرفي الرائح العدد هارتمن السبت نيروى لورنتز به لزجت)، لزجت عدد اکرت و Pe = Re_h · Pr عدد اکرت Ec = $U_0^2/C_P T_{out,0}$ بیبعد حاکم بر مسأله میباشند. بعلاوه در این پژوهش هدایت الکتریکی و $\sigma = \sigma_0 [1 + 0.025(T - T_0)]$ لزجت ديناميكي سيال به ترتيب با روابط و $\ln(\mu/\mu_0) = -1.704 - 5.306(273/T) + 7.01(273/T)^2$ و ابسته به دما تعریف شدهاند [۳]. که در آن $T_0 = T$ ۹۸K دمای مرجع و T بر حسب کلوین میباشد. همان طور که از این روابط مشاهده می شود، افزایش دما موجب كاهش نمايي لزجت و افزايش خطى هدايت الكتريكي خواهد شد. كاهش 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

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

۲-۲- شرایط مرزی، و خواص ترموفیزیکی مسأله

در مسأله مورد نظر شرایط مرزی به شرح زیر می باشد. در ورودی مجرا فشار و دما معلوم امّا سرعت و میدان الکتریکی به صورت شرط مرزی نیومن^۱ می باشد. در خروجی مجرا فشار معلوم ولی سرعت، دما و میدان الکتریکی به صورت مشتقی می باشد. در سرتاسر دیواره های 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 به طور خلاصه طبق جدول ۱ گزارش شده اند.

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

تقابل ذکر است که شرایط مرزی برای میدان مغناطیسی در صفحه xzاستفاده 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 7/d = zجاری است، فقط از مؤلفههای میدان مغناطیسی در راستای z که حداکثر تابعی از x است، استفاده شده است. بعلاوه اگرچه معادله $0 = x^2B_x$ حل میشود امّا پاسخ آن در صفحه 7/d = z کاملاً صفر است. خواص ترموفیزیکی بکار رفته در مسأله حاضر به طور 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

ورودى	خروجى	ديوار عايق	ديوار الكترود			
P = 0 $\partial u / \partial x = 0$ $\partial v / \partial x = 0$ $T = T_i$ $\partial \varphi / \partial x = 0$	P = 0 $\partial u / \partial x = 0$ $\partial v / \partial x = 0$ $\partial T / \partial x = 0$ $\partial \varphi / \partial x = 0$	$\partial^2 p / \partial y^2 = 0$ u = 0 v = 0 $\partial T / \partial y = 0$ $\partial \varphi / \partial y = 0$	$\partial^2 p / \partial y^2 = 0$ u = 0 v = 0 $\partial T / \partial y = 0$ $\varphi(x, h) = -\varphi_0$ $\varphi(x, 0) = +\varphi_0$			
جدول ۲ شرایط مرزی میدان مغناطیسی						
ج از آهنربا	وار در محدوده خار	ه آهنربا ديو	دیوار در محدود			
$\begin{array}{l} B_x(L_1 + L_P, y, b) = -B_0 \\ B_x(J_1, y, 0) = -B_0 \\ B_x(L_1, y, 0) = -B_0 \\ B_x(L_1, y, 0) = -B_0 \\ B_x(L_1, y, 0) = +B_0 \\ B_z(x, y, 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_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + L_P, y, b) = 0 \\ B_x(L_1 < x < L_1 + $						
محاما بالمحرب فيرتب والمخرام تراث المحر						

واحد	مقدار		مشخصه		
$rac{Siemens}{m}$ يا $rac{1}{\Omega m}$ يا $rac{A}{m V}$	۱/۵	σ_0	هدایت الکتریکی سیال،		
N s/m ²	•/•• ١	μ_0	لزجت دینامیکی سیال،		
kg/m ³	۱۰۰۰	ρ	چگالی سیال،		
V(Volts)	۱.	φ_0	پتانسیل الکتریکی،		
Tesla يا <u>V s</u> يا N	۰/۰۲۵	B_0	شدت شار مغناطیسی،		
W/m K	۰/۶۱۳	k	هدایت حرارتی سیال،		
kJ/kg K	۴/۱۸۱	C_p	ظرفیت گرمایی سیال،		
К	۲۹۸	T_i	دمای سیال ورودی،		

1- Neumann Boundary Condition



شکل ۳ یک نمونه شبکه غیر یکنواخت تولید شده به روش جبری به ابعاد ۲۵×۲۵

مشاهده می شود که اختلاف پتانسیل الکتریکی روی صفحه در الکترودها $\Delta \varphi = \varphi(x,0) - \varphi(x,h)$

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 درمحل وجوه از طرح قاعده توانی[†] استفاده شده است. سیستم معادلات جبری با استفاده از الگوريتم ماتريس سه قطرى⁶به روش ضمنى جايگزينى جهات⁵ حل شده ونتايج ونتایج تا دقت ^{۱۰-۱۰} گزارش گردیده است. نتایج ارائه شده در این پژوهش با $\cdot < L_e/L \le 1$ و Pr =۶/۸۲ ،Ha = ۰/۰۰۱ و Pr =۶/۸۲ و r = ۶/۸۲ و r استخراج شده است. که در این صورت با تغییر Le رینولدز و پکلت جریان بین صفر و حداکثر خودشان يعني (۴۰۰≥ Reh < ۲۷۲۸) و (۲۷۲۸ ≥ e<) متغيّر 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 ۲۵۰×۱۰۰ و ریزتر از آن، سرعت متوسط جریان سیال به عدد ⁻⁻۱۰×۳/۳۵ 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 ۱/۰۶ = f 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 به طور غیرفیزیکی از اثرات نفوذ جانبی میدان الکتریکی و مغناطیسی در خارج از فاصله های L_{p} و L_{p} صرفنظر شده و خواص سیال، μ_{0} و σ_{0} ثابت فرض شده است. به علاوه تغییر طول های L_{p} و L_{p} به نحوی است که همواره $L_{p} = L_{p}$ می باشد. در این صورت پاسخ میدان های الکتریکی و

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-08

²⁻ SIMPLE

³⁻ Rhie-Chow

⁴⁻Power Law

⁵⁻ Tridiagonal Matrix Algorithm (TDMA) 6- Alternative Direction Implicit (ADI)

مهندسی مکانیک مدرس، مرداد ۱۳۹۳، دوره ۱٤، شماره ۶

مغناطیسی به ترتیب $\Psi = -E \times g$ 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].

$$u(y) = -\left(\frac{\sigma_0 B_0 E}{\mu_0}\right) \left(\frac{h}{Ha}\right)^2 \times \left[1 - \frac{1}{1 + e^{Ha\sqrt{\frac{L_e}{L}}}} \left(e^{\frac{Ha}{h}y\sqrt{\frac{L_e}{L}}} + e^{Ha\left(1 - \frac{y}{h}\right)\sqrt{\frac{L_e}{L}}}\right)\right]$$
(۱۵)
که در آن $E = \Delta \varphi/h$ قدرت میدان الکتریکی است.

$$P(x) = \begin{cases} -Mx & , \ 0 \le x < L_1 \\ (\frac{1}{L_e} - 1)M(x - L_1) - ML_1 & , \ L_1 \le x \le L_1 + L_e \\ -Mx + ML & , \ L_1 + L_e < x \le L \end{cases}$$
 (19)

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

$$\theta(x) = \begin{cases} \left(\frac{1}{\gamma}\right) \left[1 - e^{-\gamma}\right] e^{X\gamma} & , \ 0 \le x < L_1 \\ X + \left(\frac{1}{\gamma}\right) \left[1 - e^{-\gamma \left[1 - X\right]}\right] & , \ L_1 \le x \le L_1 + L_e \\ 1 & , \ L_1 + L_e < x \le L \end{cases}$$
(19)

 $\theta(x) = X = (x - L_1)/L_e$, $\gamma = U_{ave}L_e/\alpha$, $\alpha = k/\rho C_P$ و $X = (x - L_1)/L_e$, $\gamma = U_{ave}L_e/\alpha$, $\alpha = k/\rho C_P$ و (10) (10) (10) (10) $(T(x) - T_i)/(J^2 L_e/\sigma_0 \rho C_P U_{ave})$ مشاهده می شود، 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 $L_p = L_e = -1$ مقایسه می کند. مشاهده می شود 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 می-دهد. مشاهده می شود 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 می کند. مشاهده می شود که انطباق نتایج برای این وضعیت قابل قبول است.

۲-۴- نتایج عددی تغییر طول میدان الکترومغناطیسی

در این قسمت بهخلاف بخش صحتسنجی، اثرات نواحی نفوذ جانبی میدان-های الکترومغناطیس حذف نمی شود تا نتایج منطقی تری به دست آید. به منظور نشان دادن اثرات وابستگی دمایی خواص سیال ($\mu \in \sigma$) نتایج حاصل از تغییر طول میدان های الکترومغناطیس در دو بخش مجزا بررسی و بیان می شود. در بخش اول مشابه بخش صحتسنجی از وابستگی دمایی خواص به طور غیرفیزیکی صرفنظر می شود، حال آنکه در بخش دوم این وابستگی دمایی ابقا می شود. بعلاوه در گزارش حاضر، طول دو میدان الکتریکی و مغناطیسی در راستای جریان همواره برابر فرض می شود ($L_p = L_e$)، اگرچه نسبت به طول کل مجرا (L) می توانند تغییر نمایند ($l \ge L_e/L \ge 1$). این در حالی است که با توجه به شکل ۱ عمق میدان الکتریکی و عرض میدان مغناطیسی همواره ثابت می باشد.



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



۴-۲-۱- بخش اول (خواص ثابت)

شکل ۲ نتایج حل عددی میدان مغناطیسی را در L $L_p = L_e = \cdot/\Delta$ نشان میدهد. همان طور که قبلاً نیز بیان شد، میدان مغناطیسی در راستای z اعمال شده است و خطوط آن از صفحه xz عبور می نماید، در حالی که جریان

دوبعدی در صفحه xy و با شرایط در موقعیت z = b/t مورد نظر است. همان طور که شکل ۲- الف نشان می دهد در موقعیت z = b/r، مؤلفه B_x موافه -Y میدان مغناطیسی صفر است و تنها مؤلفه B_z آن مقدار دارد که در شکل ۲-ب توزیع B_z بر حسب x نشان داده شده است.

شکل ۸ توزیع میدان الکتریکی، فشار، سرعت و دما را برای وضعیت L نشان میدهد. شکل ۸- الف خطوط همتراز میدان الکتریکی $L_P = L_e = \cdot/\Delta$ 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. همان طور که در قسمت الف، از شکلهای ۷ و ۸ مشاهده می شود، اثرات میدان الکتریکی و مغناطیسی در خارج از طول های L_{e} و L_{p} نیز به طور جانبی نفوذنموده است، به به اندازه عرض مجرا h در h در می توان حداقل به اندازه عرض مجرا h در نظر گرفت. نتایج عددی نشان میدهند که از این فاصله به بعد اثرات ميدانهاي الكتريكي و مغناطيسي تا دقت خوبي قابل چشم پوشي هستند. در شکل ۸-ب مشاهده می شود 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 نایافته 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 شدهاست.

شکل ۹ دبی جریان به ازای تغییرات طول میدان مغناطیسی و میدان الكتريكي را نشان مىدهد. دبى جريان از رابطه $Q = \int u(y) b \, dy$ محاسبه شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش طول های 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 می شود که با افزایش L_e/L پروفیل های سرعت بزرگتری حاصل می شود. علت این امر با توجه به معادله مومنتم که در آن نیروی لورنتز عامل حرکت میباشد، قابل تفسیر است. طبق این معادله $\int (J imes J)$ نيروی لورنتز در ناحيه اثر ميدانهای الکترومغناطيس به صورت لفزايش مى ابد. بعلاوه طبق $d \forall d \forall d$ المرابث الفزايش L_e/L المرابث $d \forall d$ معادله قانون اهم (۴)، *J* نیز زیاد می شود. بنابراین JdA∫ 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 می شود در تمام حالات اختلاف دمای قابل توجهی از ابتدا تا انتها مجرا رخ میدهد. بهطوریکه با افزایشL_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 توليد حرارت بيشتر مىشود اما عبور سريعتر جريان فرصت دريافت حرارت توسط سیال را از بین میبرد و در نتیجه سیال با دمای کمتری از مجرا خارج می شود. این موضوع با توجه به اینکه در هر حالت پکلی (Pe) با افزایش سرعت رشد می کند نیز قابل توجیه است. اختلاف دمای حاصل از گرمایش ژول میتواند مقادیر خواص فیزیکی سیال مانند μ و σ را تحت تاثیر قرار دهد. همان طور که در ابتدا این بخش بیان شد چشم پوشی از تابعیت دمایی خواص، نتایجی غیرفیزیکی خواهد داد. لذا در ادامه با ابقاء تابعیت دمایی خواص μ و σ نتایج واقعی تری گزارش می شود.



 B_z شکل V نتایج عددی، الف) خطوط میدان مغناطیسی در صفحه xz، ب) تغییرات z = b/7 در z = b/7



ب) میدان فشار، ج) میدان سرعت، د) میدان دما

۲-۲-۴ بخش دوم (خواص وابسته به دما)

در این بخش اگرچه خواص ترموفیزیکی سیال یعنی μ و σ تابع دما می باشند، امآ پاسخ طرح کلی میدانهای سرعت، فشار، دما، پتانسیل الکتریکی و مغناطیسی نظیر شکل ۷ و ۸ در بخش اول می باشد. در اینجا به منظور اختصار بیشتر، از ارائه آنها صرف نظر شده است.

مهندسی مکانیک مدرس، مرداد ۱۳۹۳، دوره ۱٤، شماره ۶

٩۶

دبی را میتوان به کمک شکل ۱۳ که در آن رشد پروفیلهای سرعت نمایش L_e/L داده شده است، توجیه نمود. در این شکل مشاهده می شود که با افزایش پروفیل های سرعت بزرگتری نسبت به حالت قبل (ثابت بودن خواص) حاصل می شود. به عبارت دیگر در این شکل حداکثر پروفیل های بی بعد سرعت حداکثر از ۰/۲ تا ۰/۹ افزایش می ابند در حالی که با توجه به شکل ۱۰ حداکثر پروفیل های بیبعد سرعت از ۰/۰۵ تا ۰/۲۵ افزایش می یابند. علت این امر را میتوان به لزجت دینامیکی سیال مربوط ساخت که عاملی مقاوم در برابر حرکت سیال میباشد. همان طور 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 $T_m = \left[\int u(x,y)T(x,y)dA\right] / \left[\int u(x,y)dA\right]$ میانگین کاسهای از رابطه $\int u(x,y)dA$ محاسبه شده است که در آن $dA = b \, dy$ میباشد. مشاهده می شود که با افزایش طول های میدان الکتریکی و مغناطیسی دمای میانگین کاسهای در طول مجرا کاهش مییابد. به عبارت دیگر اگرچه در هر نقطه از سیال در منطقه الكترودها با ابقاء وابستكى دمايى حرارت بيشترى توليد مىشود امّا به دليل افزایش سرعت جریان، دمای سیال خروجی کمتر می شود. لذا همان طور که در این شکل مشاهده می شود با اعمال وابستگی دمایی خواص حداکثر دما میانگین به حدود ۴۰ درجه سانتی گراد، درحالی که در حالت ثابت بودن خواص (مطابق شکل ۱۱) حداکثر دمای میانگین به حدود ۶۰ درجه سانتی گراد میرسد.



شکل ۱۳ توزیع سرعت به ازای تغییر طولمیدان 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 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 ۲۰ میلیلیتر بر ثانیه است، در حالی که در شکل ۱۲ حداکثر دبی نزدیک به ۲۵۰ 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.l. 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, Departmentto Electronically Electromagnetisms. Universidad de Sevilla, 2007.
- [8] W. Ritchie, Experimental researches in electro-magneticand magnetoelectricity, *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 App. lications 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 finiteelement 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 magnetohydrodynamic 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 amagnetohydrodynamic 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 twodimensional 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 with2-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.l. 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 heatexchangers with Magnetohydrodynamic 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- نتیجه گیری

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 ارائه شده است. بعلاوه توزیع عددی میدانهای سرعت، فشار، دما و $L_P = L_e$ الكترومغناطيس با حل معادلات مربوطه بهدست آمده و گزارش شده است. نتايج نشان داد كه با افزايش طول ميدان هاى الكترومغناطيس مقدار جريان الکتریکی عبوری از درون سیال افزایش مییابد، که در نتیجه، موجب تولید بیشتر حرارت و دبی می شود. 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. بعلاوه 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 سانتی گراد ورودی به ۴۰ درجه سانتی-گراد در خروج از مجرا میرسد. این در حالی است که با ثابت بودن خواص، حداکثر دبی و دمای میانگین به ترتیب ۷۰ میلیلیتر بر ثانیه و ۶۰ درجه سانتی گراد میباشد.

8-مراجع

- 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.