

پمپ مگنتوهیدرودینامیک خطی جریان مستقیم

امین میراحمدی^۱، آرمان محسنی^۲

دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک،

گروه مهندسی ساخت و تولید

mirahmadi@iust.ac.ir

چکیده

پمپها و کمپرسورهای مگنتوهیدرودینامیک در مقایسه با انواع مکانیکی دارای ویژگیهایی هستند که از آن جمله می‌توان به ارتعاشات کم و کارکرد آرام، آببندی بسیار خوب، عدم استفاده از قطعات متحرک، عمر زیاد و قابلیت اطمینان بالا اشاره کرد. از موارد کاربرد آنها می‌توان به انتقال سدیم مایع در چرخه خنک‌کاری راکتور در نیروگاههای اتمی، پیش‌رانه سفینه‌های فضایی و به‌صورت ژنراتور، در نیروگاههای حرارتی اشاره کرد. از این جهت در این تحقیق به بررسی و مطالعه کمی پمپ مگنتوهیدرودینامیک جریان مستقیم خطی پرداخته شده و به‌طور خاص کاربرد آن برای انتقال قلع مذاب مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که پمپ برای مصارف صنعتی و نیمه‌صنعتی با بازده خوب قابل استفاده است.

واژه‌های کلیدی: مگنتوهیدرودینامیک - پمپ - فلز مذاب - قلع

مقدمه

اتمی فراهم آورده است. به علت عدم استفاده از قطعات متحرک، آببندی پمپ ام. اچ. دی. به خوبی انجام‌پذیر است و از عمر زیاد و قابلیت اطمینان بالا برخوردار است و به‌هنگام کار ارتعاشات کمتری نسبت به پمپهای مکانیکی تولید می‌کند. همچنین تلفات اهمی باعث گرمایش سیال به‌هنگام عبور از مجرای پمپ می‌گردد که این امر در جلوگیری از انجماد فلز مذاب موثر است. پمپ ام. اچ. دی. جریان مستقیم می‌تواند به‌صورت ژنراتور جریان الکتریسیته به‌کار رود. در این حالت می‌توان از آن برای اندازه‌گیری جریان سیال نیز استفاده کرد ([۱] و [۲]).

هدف از این تحقیق بررسی کمی عملکرد پمپ ام. اچ. دی. خطی جریان مستقیم می‌باشد. شکل ۱ طرح ساده پمپ را نشان می‌دهد. این طرح امکان حل تحلیلی معادلات حاکم (به‌جز معادله انرژی) را به‌دست می‌دهد. در ادامه پس از ارائه و حل معادلات حاکم، نتایج به‌دست آمده و کارکرد پمپ به‌طور خاص برای قلع مذاب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

پمپ مگنتوهیدرودینامیک (ام. اچ. دی.) (Magnetohydrodynamic, MHD) پمپی است که در آن سیال رسانای الکتریسته بر اساس اصل موتور (Motor Principle) در اثر میدان مغناطیسی و جریان الکتریکی به حرکت درمی‌آید. به‌عبارت دیگر، جریان سیال نتیجه تاثیر متقابل جریان الکتریسته و میدان مغناطیسی است که به‌صورت نیروی جرمی باعث انتقال سیال می‌گردند. از نظر الکتریکی، پمپهای ام. اچ. دی. شامل دو دسته جریان متناوب و جریان مستقیم می‌باشند و به‌طور عمده محدوده عملکرد آنها در تولید اختلاف فشار کم و دبی بالا است و دارای انواع خطی، خطی حلقوی (Annular Linear) و مارپیچ (Helical or Spiral) می‌باشند. خصوصیات منحصر به‌فرد این پمپها امکان استفاده از آنها را برای انتقال مذاب فلزات در نیروگاههای

^۱ استادیار

^۲ کارشناس ارشد

محاسبات

به منظور کاهش تلفات مغناطیسی و دستیابی به یک میدان مغناطیسی یکنواخت، باید فاصله قطبهای مغناطیس تا حد امکان کوچک باشد. بنابراین ارتفاع مجرای سیال نسبت به طول و عرض آن کوچک در نظر گرفته شده ($2h \ll \min\{l, w\}$) و چگالی شار مغناطیسی در راستای عمود بر جریان سیال، x_2 ، ثابت فرض می‌شود. همچنین با در نظر گرفتن جریان آرام کاملاً توسعه یافته (Laminar fully developed steady state fluid flow) برای سیال (steady state fluid flow) سرعت آن به صورت یک بعدی تقریب می‌شود. فرض می‌شود که پمپ به صورت افقی نصب شده و جهت بردار شتاب جاذبه در خلاف جهت محور x_2 می‌باشد. به این ترتیب به دست می‌آید [۶]:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= (u_1(x_2), 0, 0) \\ \mathbf{B} &= (B_1(x_2), B_0, 0) \\ \mathbf{g} &= (0, -g, 0) \\ p &= p(x_1, x_2) \\ T &= T(x_1, x_2) \end{aligned} \quad (9)$$

که در آن g اندازه شتاب جاذبه است. با اعمال این روابط به معادلات (۱) تا (۸) و بی‌بعد سازی آنها معادلات حاکم بر جریان به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$-\frac{\partial p^*}{\partial x_1^*} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{d^2 u_1^*}{dx_2^{*2}} + C_1 \frac{dB_1^*}{dx_2^*} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial p^*}{\partial x_2^*} + C_1 B_1^* \frac{dB_1^*}{dx_2^*} + \frac{1}{\text{Fr}} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{du_1^*}{dx_2^*} + \frac{1}{\text{Rm}} \frac{d^2 B_1^*}{dx_2^{*2}} = 0 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} u_1^* \frac{\partial T^*}{\partial x_1^*} &= C_2 \left(\frac{dB_1^*}{dx_2^*} \right)^2 + \frac{\text{Ec}}{\text{Re}} \left(\frac{du_1^*}{dx_2^*} \right)^2 \\ &+ \frac{1}{\text{Pe}} \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial x_1^{*2}} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial x_2^{*2}} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\mathbf{J}^* = (0, 0, J_3^*), \quad J_3^* = -\frac{dB_1^*}{dx_2^*} \quad (14)$$

$$\mathbf{E}^* = (0, 0, E_3^*), \quad E_3^* = \frac{1}{\text{Rm}} J_3^* - u_1^* \quad (15)$$

در این روابط بالانویس ستاره بیانگر کمیت بی‌بعد می‌باشد و داریم:

شکل ۲ مشخصات هندسی مجرای سیال و دستگاه مختصات مورد استفاده در محاسبات را نشان می‌دهد. سیال با سرعت \mathbf{u} و تحت تاثیر میدان مغناطیسی خارجی با شار مغناطیسی ثابت $\mathbf{B}_0 = (0, B_0, 0)$ و جریان الکتریکی با چگالی \mathbf{J} در واحد سطح به حرکت درمی‌آید. فرض می‌شود که سیال همگن و خواص فیزیکی آن مستقل از مکان و زمان می‌باشد و رسانای خوبی برای جریان الکتریسیته است به گونه‌ای که بتوان از انتقال همرفتی بار الکتریکی به وسیله سیال در مقابل انتقال آن از طریق رسانش صرف نظر کرد. به این ترتیب معادلات حاکم به شکل تانسوری عبارتند از ([۳] فصل ۱، [۴] فصل ۵ و [۵]):

$$u_{i,i} = 0 \quad (1)$$

$$B_{i,i} = 0 \quad (2)$$

$$\dot{u}_i + u_j u_{i,j} = f_i - \frac{1}{\rho} p_{,i} + \frac{\eta}{\rho} u_{i,jj} \quad (3)$$

$$\rho C_v (\dot{T} + u_j T_{,j}) = \frac{1}{\sigma} J_j J_j \quad (4)$$

$$+ \kappa T_{,jj} + \eta (u_{i,j} + u_{j,i}) u_{i,j}$$

$$\dot{B}_i = \varepsilon_{ijk} \varepsilon_{kmn} (u_m B_n)_{,j} + \frac{1}{\mu \sigma} B_{i,jj} \quad (5)$$

$$f_i = g_i + \frac{1}{\rho} \varepsilon_{ijk} J_j B_k \quad (6)$$

$$J_i = \frac{1}{\mu} \varepsilon_{ijk} B_{k,j} \quad (7)$$

$$E_i = \frac{1}{\sigma} J_i - \varepsilon_{ijk} u_j B_k \quad (8)$$

در معادلات بالا $\{1, 2, 3\}$ و $\{i, j, k, m, n\}$ و g_i, f_i, u_i به ترتیب مولفه‌های سرعت سیال، نیروی جرمی در واحد جرم، شتاب گرانشی، شار مغناطیسی، و چگالی جریان الکتریکی در واحد سطح می‌باشند. p فشار نسبی، T دمای سیال و $\rho, \eta, C_v, \kappa, \mu, \sigma$ به ترتیب جرم حجمی، لزجت دینامیک، ظرفیت گرمایی ویژه سیال در حجم ثابت، ضریب انتقال حرارت رسانشی، نفوذپذیری مغناطیسی، و رسانایی الکتریکی سیال می‌باشند. همچنین نماد جایگشت (Permutation symbol) می‌باشد

$$\varepsilon_{ijk} \equiv \partial \zeta_i / \partial t \quad \text{و} \quad \zeta_{i,j} \equiv \partial \zeta_i / \partial x_j$$

در این رابطه p_0^* فشار بی‌بعد در ورودی پمپ (مبدأ مختصات) است. از آنجا که سرعت u_i^* و شار مغناطیسی B_1^* تابع متغیر x_2^* هستند، از رابطه (۱۰) تغییرات فشار با x_2^* به صورت خطی به دست می‌آید:

$$\frac{\partial p^*}{\partial x_1^*} = \Gamma^* \quad (21)$$

که در آن $\Gamma^* \equiv \frac{\Gamma}{\rho u_c^2 / h}$ شیب فشار بی‌بعد می‌باشد. از حل معادلات حاکم با شرایط فوق به دست می‌آید:

$$u_1^*(x_2^*) = \frac{\text{Ha} \cdot C_3 \cdot \Lambda^*}{\text{Rm}} (\cosh(\text{Ha}) - \cosh(\text{Ha} \cdot x_2^*)) \quad (22)$$

$$B_1^*(x_2^*) = \frac{\Gamma^* x_2^*}{C_1} + \Lambda^* C_3 \sinh(\text{Ha} \cdot x_2^*) \quad (23)$$

$$p^*(x_1^*, x_2^*) = p_0^* + \Gamma^* x_1^* - \frac{x_2^*}{\text{Fr}} - \frac{(\Gamma^* x_2^*)^2}{2C_1} - \Gamma^* \Lambda^* C_3 x_2^* \sinh(\text{Ha} \cdot x_2^*) \quad (24)$$

$$- \frac{1}{2} C_1 C_3^2 \Lambda^{*2} \sinh^2(\text{Ha} \cdot x_2^*)$$

$$J_3^*(x_2^*) = -\frac{\Gamma^*}{C_1} - \Lambda^* \text{Ha} C_3 \cosh(\text{Ha} \cdot x_2^*) \quad (25)$$

$$E_3^* = -\frac{1}{\text{Rm}} \left(\frac{\Gamma^*}{C_1} + \Lambda^* \text{Ha} C_3 \cosh(\text{Ha}) \right) \quad (26)$$

که در آن ثابت C_3 و دبی حجمی ورودی به مجرای پمپ، $\Lambda^* \equiv \frac{\Lambda}{u_c h^2}$ به صورت زیر می‌باشند:

$$C_3 \equiv \frac{\text{Rm}}{2w^* (\text{Ha} \cdot \cosh(\text{Ha}) - \sinh(\text{Ha}))} \quad (27)$$

$$\Lambda^* = w^* \int_{-1}^1 u_1^* dx_2^* \quad (28)$$

برای حل معادله انرژی (۱۳) از روش اختلاف محدود ای. دی. آی.^۱ [۹]، فصل ۵) با گسسته‌سازی بر شبکه غیر یکنواخت [۱۰]، پیوست ب) استفاده می‌شود.

$$x_i^* \equiv \frac{x_i}{h}, u_i^* \equiv \frac{u_i}{u_c}, p^* \equiv \frac{p}{\rho u_c^2}, \quad T^* \equiv \frac{T}{T_c}, B_i^* \equiv \frac{B_i}{B_0}, J_i^* \equiv \frac{\mu h}{B_0} J_i, \quad (16)$$

$$E_i^* \equiv \frac{E_i}{u_c B_0}$$

که در آن u_c سرعت مشخصه، T_c دمای مشخصه و Re ، Rm ، Fr ، Pe ، Ec و Ha به ترتیب اعداد بی‌بعد رینولدز، رینولدز مغناطیسی، فرود، پکلت، اِکرت، و هارتمن می‌باشند ([۳] فصل ۲، [۷] و [۸]):

$$\text{Re} \equiv \frac{\rho u_c h}{\eta}, \text{Rm} \equiv \mu \sigma u_c h, \text{Fr} \equiv \frac{u_c^2}{hg}, \quad (17)$$

$$\text{Pe} \equiv \frac{\rho u_c h C_v}{\kappa}, \text{Ec} \equiv \frac{u_c^2}{C_v T_c}, \text{Ha} \equiv B_0 h \sqrt{\frac{\sigma}{\eta}}$$

و ثابتهای C_1 و C_2 ترکیب اعداد فوق به صورت زیراند:

$$C_1 \equiv \frac{\text{Ha}^2}{\text{Re} \cdot \text{Rm}}, \quad C_2 \equiv \frac{\text{Ec} \cdot \text{Ha}^2}{\text{Re} \cdot \text{Rm}^2} \quad (18)$$

همه مقادیر مشخصه و اعداد بدون بعد مثبت فرض می‌شوند. با توجه به طرح پمپ، جریان الکتریکی نسبت به صفحه $x_1 x_3$ در شکل ۲ متقارن است، بنابراین از رابطه (۱۴) شار مغناطیسی نسبت به محور x_3 متقارن خواهد بود و با در نظر گرفتن شرط عدم لغزش برای سرعت، شرایط مرزی به صورت زیر به دست می‌آید [۶]:

$$u_1^*(-1) = u_1^*(1) = 0 \quad (19)$$

$$B_1^*(0) = 0, \quad B_1^*(-1) = -B_1^*(1)$$

همچنین فشارمطلق در مبدأ مختصات برابر p_0 و دمای سیال ورودی در صفحه $x_2 x_3$ ثابت و برابر با T_c فرض می‌شود. به طور معمول مجرای پمپ از جنس سرامیک می‌باشد، بنابراین فرض می‌شود دیواره‌های پمپ عایق حرارتی هستند. به این ترتیب:

$$p^*(0,0) = p_0^*$$

$$T^*(0, x_2^*) = 1, \quad x_2^* \in (-1, 1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_2^*} T^*(x_1^*, -1) = \frac{\partial}{\partial x_2^*} T^*(x_1^*, 1) = 0, \quad (20)$$

$$x_1^* \in [0, l^*]$$

¹ Finite difference method: Alternating direction implicit (ADI) scheme.

هیدرولیکی مدار جریان با اختلاف فشار ایجاد شده توسط پمپ برابر شود و تعادل حرارتی نیز برقرار گردد.

جهت مطالعه کمی رفتار حالت پایدار، ابعاد مجرای سیال به صورت $l = 0.3 \text{ m}$ ، $w = 0.4 \text{ m}$ و $h = 0.005 \text{ m}$ در نظر گرفته شده و معادلات جریان در شتاب گرانشی $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ و دمای یکنواخت ورودی $T_0 = 510 \text{ K}$ بررسی شده است. جدول ۱ خواص فیزیکی قلع را نشان می‌دهد.

نمودار تغییرات بازده پمپ، جریان و اختلاف پتانسیل الکتریکی مجرای سیال برحسب دبی حجمی و شار مغناطیسی خارجی برای تولید اختلاف فشار 0.1 bar در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل، بازده پمپ با افزایش دبی حجمی در شار الکتریکی ثابت پس از یک مقدار بیشینه کاهش می‌یابد، در حالی که اختلاف پتانسیل و مقدار مطلق جریان الکتریکی به‌طور یکنوا افزایش می‌یابند. تغییرات بازده با افزایش شار مغناطیسی در دبی حجمی ثابت نیز مشابه حالت قبل است، در حالی که در این حالت پتانسیل الکتریکی افزایش و مقدار مطلق جریان الکتریکی کاهش نشان می‌دهد.

شکل ۴ نمودار تغییرات بازده، توان الکتریکی ورودی (مصرفی) و توان مفید خروجی (تولیدی) را برحسب دبی حجمی و شار مغناطیسی برای تولید اختلاف فشار 0.1 bar نشان می‌دهد. همانطور که در رابطه (۳۳) آمده، توان مفید تولیدی مستقل از شار مغناطیسی خارجی است و با دبی حجمی به‌صورت خطی تغییر می‌کند. در محدوده نشان داده شده، مقدار مطلق توان ورودی در شار مغناطیسی ثابت با افزایش دبی حجمی افزایش می‌یابد در حالی که در دبی حجمی ثابت با افزایش شار مغناطیسی، پس از یک مقدار کمینه افزایش می‌یابد. مقادیر توان بیانگر این است که در محدوده نشان داده شده، پمپ برای استفاده نیمه صنعتی مناسب است.

شکل ۵ پروفیل مولفه‌های سرعت، u_1 ، شار مغناطیسی، B_1 ، چگالی جریان الکتریکی، J_3 ، و میدان الکتریکی، E_3 ، را برای تولید اختلاف فشار 0.1 bar نشان می‌دهد. همچنین مقادیر متغیرها متناظر با این نمودار در جدول ۲ آمده است. با توجه به نمودار، تغییرات شار مغناطیسی B_1 به جز در نزدیکی دیواره مجرا، با تقریب

جریان الکتریکی در مجرای پمپ، I^* ، از رابطه (۲۵) به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$I^* = \int_0^l \int_{-1}^1 J_3^*(x_2^*) dx_2^* dx_1^* \quad (29)$$

$$= -2l^* \left(\frac{\Gamma^*}{C_1} + \Lambda^* C_3 \sinh(\text{Ha}) \right)$$

از رابطه (۲۶)، پتانسیل الکتریکی، V^* ، برای حالت پایدار از رابطه ([۱۱]، صفحه ۴۲۶):

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (30)$$

به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$V^*(x_3^*) = \frac{x_3^*}{C_1 \text{Rm}} \left(\Gamma^* + \Lambda^* \text{Ha} C_1 C_3 \cosh(\text{Ha}) \right) \quad (31)$$

به این ترتیب، توان الکتریکی مصرفی، P_i^* ، عبارت است از:

$$P_i^* = C_1 I^* \Delta V^* \quad (32)$$

$$= C_1 I^* \left(V^* \left(\frac{w^*}{2} \right) - V^* \left(-\frac{w^*}{2} \right) \right)$$

و با توجه به ثابت بودن پروفیل سرعت، توان مفید تولیدی،

$$P_{oe}^* \text{، بر اساس اختلاف فشار ایجاد شده، عبارت است از:} \quad (33)$$

$$P_{oe}^* = \Gamma^* \Lambda^* I^*$$

و بازده پمپ به درصد می‌شود:

$$e = 100 \frac{P_{oe}^*}{-P_i^*} \quad (34)$$

در روابط فوق متغیرهای بی‌بعد I^* ، V^* و توان، P^* ، به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$I^* \equiv \frac{I}{hB_0/\mu}, V^* \equiv \frac{V}{hB_0 u_c}, P^* \equiv \frac{P}{\rho u_c^3 h^2} \quad (35)$$

نتایج

پس از برقراری جریان الکتریسیته، قلع مذاب در اثر نیروی جرمی حاصل از تاثیر متقابل جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی به حرکت درمی‌آید. بخشی از توان الکتریکی ورودی در اثر تلفات اهمی و اصطکاک به گرما تبدیل می‌گردد و افزایش نسبی دمای سیال را در پی دارد. حالت پایدار جریان زمانی حاصل می‌شود که عکس‌العمل مقاومت

فشار بیشتر به کار می‌رود، به راحتی امکان پذیر نیست. با این حال محاسبات انجام شده برای نوع خطی می‌تواند تقریبی از عملکرد انواع دیگر را به دست دهد.

مراجع

- 1- "Altoflux magnetic inductive flowmeters - Product guide 3.1," Krohne-Messtechnik GmbH & Co. KG, 1992.
- 2- "8000 series pulsed dc magnetic flowmeter with remote-mounted transmitter - Styles C and D installation," MI 021-369, Foxboro Co., 1992.
- 3- R. Moreau, "Magnetohydrodynamics," Kluwer Academic Publishers, 1990.
- 4- Dale A. Anderson, John C. Tannehill, & Richard H. Pletcher, "Computational fluid mechanics and heat transfer," Hemisphere, 1984.
- 5- John D. Kraus, & Keith R. Carver, "Electromagnetics," McGraw-Hill, 2nd ed., 1973.
- ۶- آرمان محسنی، "طراحی و محاسبه پمپ MHD جیوه برای توان یک کیلو وات در فشار ۰/۱ بار"، پایان نامه کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۶.
- 7- Robert H. Perry, Don W. Green, & James O. Maloney, "Perry's chemical engineers' handbook," McGraw-Hill, 6th ed., 1984.
- 8- Richard L. Rosa, "Magnetohydrodynamic energy conversion," McGraw-Hill, 1968.
- ۹- ک. ا. هافمن، و اس. تی. چیانگ، "دینامیک سیالات محاسباتی برای مهندسان"، احمدرضا عظیمیان (مترجم)، دانشگاه صنعتی اصفهان، جلد اول، ۱۳۷۶.
- ۱۰- آرمان محسنی، "حل معادلات ناویر-استوکس دوبعدی با استفاده از روش چندبلوکی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ۱۳۷۹.
- 11- P. Lorrain, and D. Corson, "Electromagnetic fields and waves," W. H. Freeman and Co., 1970.

خطی است. همچنین بخش عمده‌ای از جریان الکتریکی از نزدیکی دیواره عبور می‌کند که این امر باعث تاثیر بیشتر نیروی جرمی در این ناحیه شده و با توجه به پروفیل سرعت، باعث کم شدن ارتفاع لایه مرزی گردد. هدایت الکتریکی خوب قلع باعث می‌شود افزایش دمای سیال در اثر تلفات اهمی بسیار ناچیز باشد (جدول ۲).

در شکل ۶ تغییرات حداکثر بازده قابل دستیابی در اختلاف فشار و شار مغناطیسی ثابت به همراه مقادیر دبی حجمی نظیر آن آمده است و شکل ۷ تغییرات جریان و اختلاف پتانسیل الکتریکی و توان مصرفی و توان مفید تولیدی که متناظر با مقادیر دبی حجمی در شکل ۶ می‌باشند را نشان می‌دهد. همانطور که در این نمودار دیده می‌شود، بیشینه بازده قابل دستیابی حدود ۸۶٪ در شار مغناطیسی 1T است و افزایش شار مغناطیسی متناظر با افزایش بازده پمپ می‌باشد.

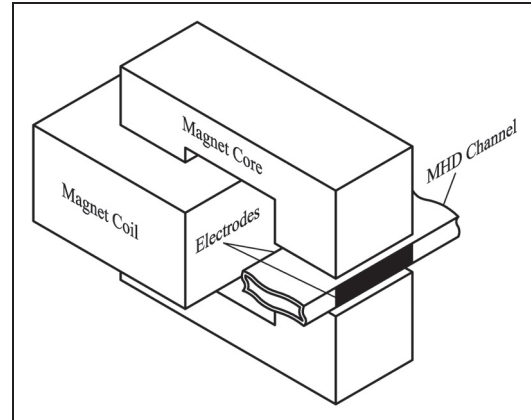
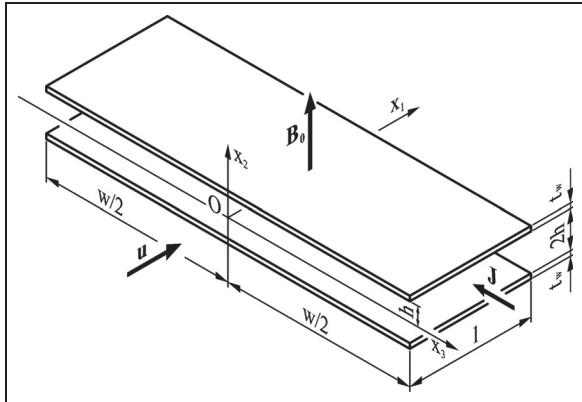
تغییرات بازده، جریان و اختلاف پتانسیل الکتریکی و توانهای مصرفی و تولیدی با اختلاف فشار و دبی حجمی در شار مغناطیسی خارجی ثابت 0.5T و 1T به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹ آمده است. این نمودارها نشان می‌دهند افزایش شار مغناطیسی خارجی تاثیر قابل توجهی بر توانهای مصرفی و تولیدی ندارد (شکل‌های ۸-ب و ۹-ب)، اما با کاهش مقدار جریان الکتریکی و افزایش اختلاف پتانسیل الکتریکی در مجرای سیال (شکل‌های ۸-الف و ۹-الف) همراه است. همچنین اگر تنها بازده به عنوان مشخص کننده محدوده کارکرد پمپ فرض شود، افزایش شار مغناطیسی خارجی، افزایش نسبی بازده و گسترش محدوده کاری پمپ را در پی دارد.

نتیجه گیری

در این تحقیق با حل تحلیلی یک نمونه ساده از پمپ‌های ام. اچ. دی. جریان مستقیم، خصوصیات و عملکرد آن برای ابعاد هندسی و سیال مشخص مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از روابط ارائه شده، محاسبات مشابه برای سیالها و شرایط کاری مختلف انجام پذیر است و می‌توان براساس شرایط طراحی، برخی متغیرهای مشخصه پمپ را بهینه نمود. محاسبه تحلیلی جریان برای ساختارهای پیچیده تر پمپ، مانند نوع مارپیچی که برای دستیابی به اختلاف

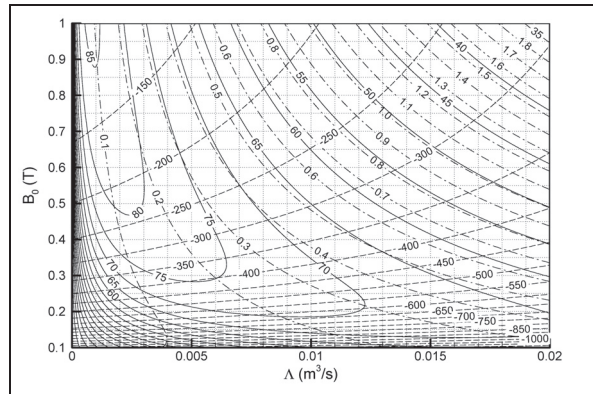
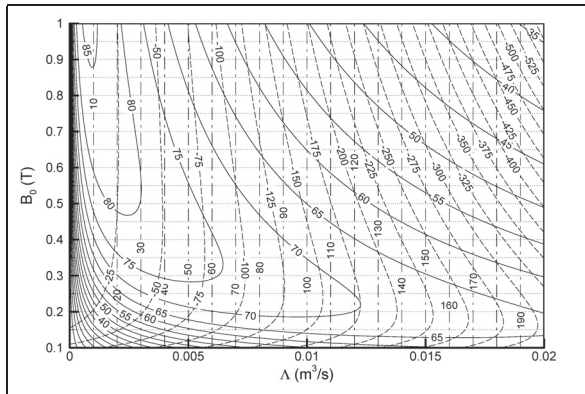
13- R. H. Perry, D. W. Green, and J. O. Maloney, "Perry's chemical engineer's handbook," 6th Ed., McGraw-Hill, 1984.

12- R. E. Kirk, D. F. Othmer, and M. Grayson, "Encyclopedia of chemical technology," 3rd Ed., Vol. 23, John Wiley & Sons, 1983.



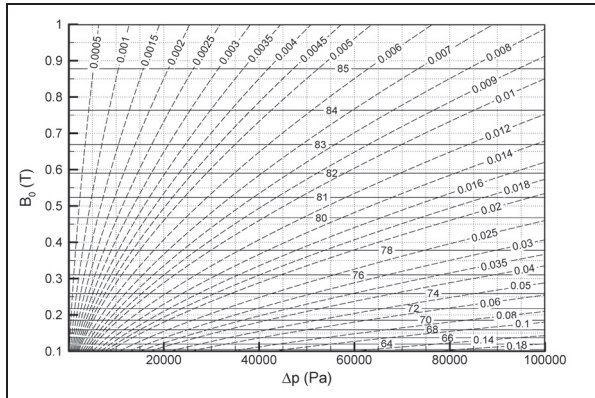
شکل ۲- مشخصات هندسی مجرای جریان و دستگاه مختصات مورد استفاده در محاسبات.

شکل ۱- طرح ساده از پمپ ام. اچ. دی. خطی جریان مستقیم.

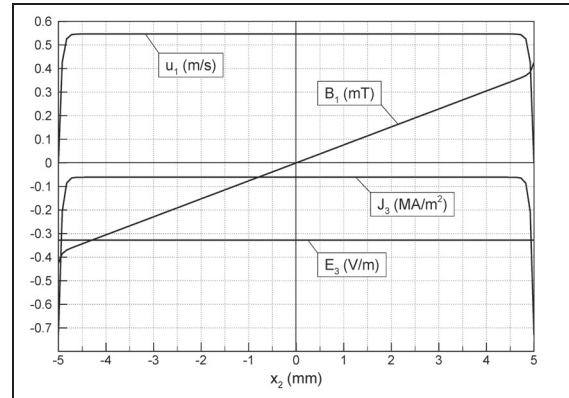


شکل ۴- نمودار تغییرات بازده $e(\%)$ (خط پر)، توان الکتریکی ورودی $P_i (W)$ (خط چین)، و توان مفید خروجی $P_{oe} (W)$ (خط نقطه)، بر حسب دبی حجمی $\Lambda (m^3/s)$ و شار مغناطیسی خارجی $B_0 (T)$ در اختلاف فشار 0.1 bar.

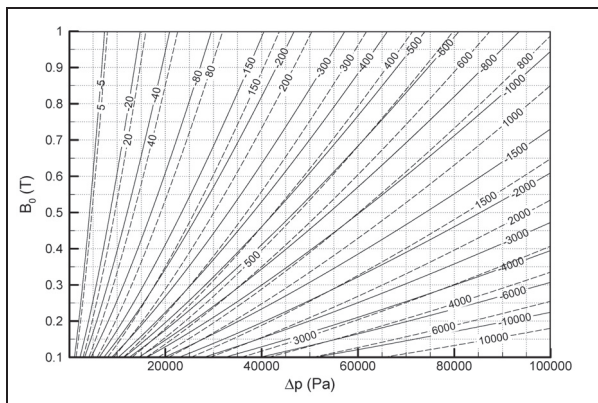
شکل ۳- نمودار تغییرات بازده $e(\%)$ (خط پر)، جریان الکتریکی $I (A)$ (خط چین)، و اختلاف پتانسیل الکتریکی مجرای سیال $\Delta V (V)$ (خط نقطه)، بر حسب دبی حجمی $\Lambda (m^3/s)$ و شار مغناطیسی خارجی $B_0 (T)$ در اختلاف فشار 0.1 bar.



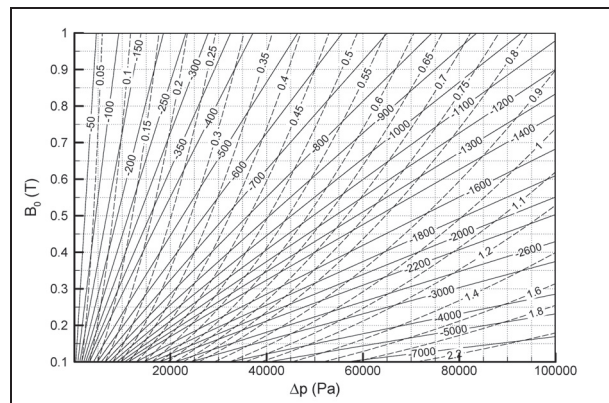
شکل ۶- نمودار تغییرات حداکثر بازده قابل دستیابی e (%) (خط پر)، و دبی حجمی نظیر آن Λ (m^3/s) (خط چین)، در اختلاف فشار Δp (Pa) و شار مغناطیسی ثابت B_0 (T).



شکل ۵- پروفیل مولفه‌های سرعت u_1 ، شار مغناطیسی B_1 ، چگالی جریان الکتریکی J_3 و شدت میدان الکتریکی E_3 در اختلاف فشار 0.1 bar.



(ب)

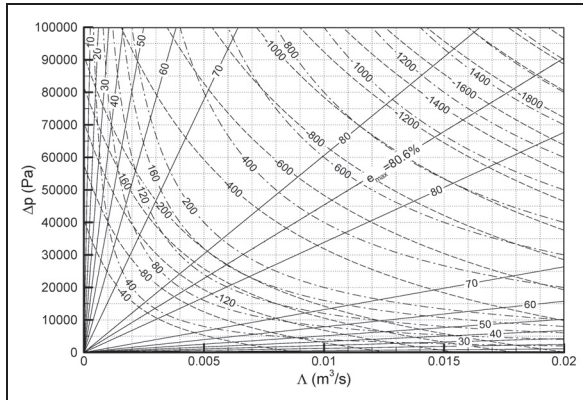


(الف)

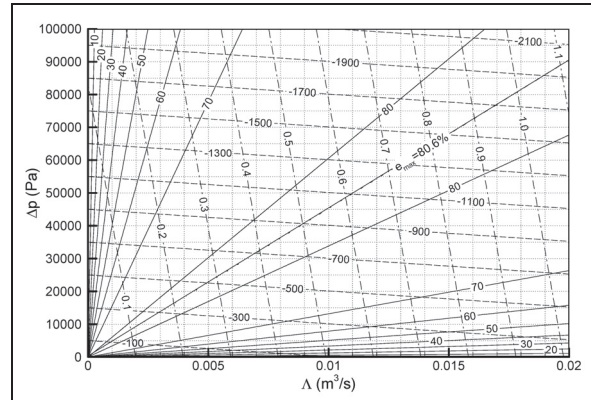
شکل ۷- (الف): نمودار تغییرات جریان الکتریسته I (A) (خط پر)، اختلاف پتانسیل الکتریکی ΔV (V) (خط چین)، و (ب): نمودار تغییرات توان الکتریکی ورودی P_i (W) (خط پر)، و توان مفید خروجی P_{oe} (W) (خط چین)، نظیر مقادیر دبی حجمی در شکل ۶ و بر حسب اختلاف فشار Δp (Pa) و شار مغناطیسی B_0 (T).

جدول ۱- خواص فیزیکی قلع ([۱۲] و [۱۳]).

$232.7 \text{ } \frac{1}{\text{kg}\cdot\text{K}}$	گرمای ویژه (از 504 K تا 1273 K)	231.9° C	دمای ذوب
$45 \mu\Omega\cdot\text{cm}$	مقاومت ویژه در نقطه ذوب (فاز مایع)	2625° C	دمای جوش
$60 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	ضریب هدایت حرارتی در 500 K	6.97	چگالی در نقطه ذوب (فاز مایع)
$\approx 1 \text{ Ha/m}$	نفوذپذیری مغناطیسی	1.85 mPa·s	گرانروی دینامیک در نقطه ذوب

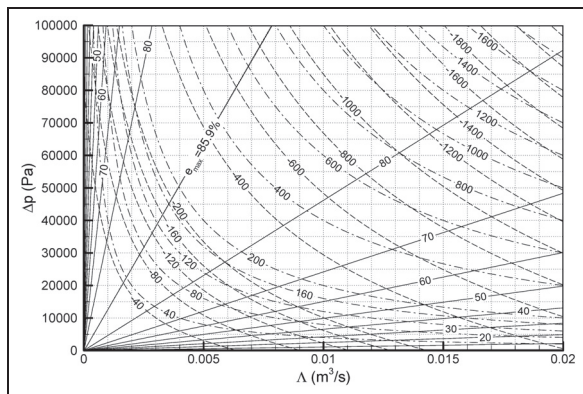


(ب)

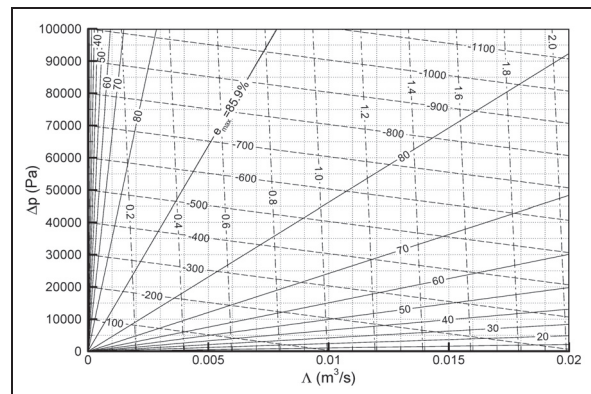


(الف)

شکل ۸- (الف): نمودار تغییرات بازده $e(\%)$ (خط پر)، جریان الکتریکی $I(A)$ (خط چین) و اختلاف پتانسیل مجرای سیال $\Delta V(V)$ (خط نقطه) و (ب): نمودار تغییرات بازده $e(\%)$ (خط پر)، توان الکتریکی مصرفی $P_i(W)$ (خط چین) و توان مفید خروجی $P_{io}(W)$ (خط نقطه) بر حسب اختلاف فشار $\Delta p(Pa)$ و دبی حجمی در شار مغناطیسی خارجی $B_0 = 0.5 T$ در $\Lambda(m^3/s)$



(ب)



(الف)

شکل ۹- (الف): نمودار تغییرات بازده $e(\%)$ (خط پر)، جریان الکتریکی $I(A)$ (خط چین) و اختلاف پتانسیل مجرای سیال $\Delta V(V)$ (خط نقطه) و (ب): نمودار تغییرات بازده $e(\%)$ (خط پر)، توان الکتریکی مصرفی $P_i(W)$ (خط چین) و توان مفید خروجی $P_{io}(W)$ (خط نقطه) بر حسب اختلاف فشار $\Delta p(Pa)$ و دبی حجمی در شار مغناطیسی خارجی $B_0 = 1 T$ در $\Lambda(m^3/s)$

جدول ۲- مقدار متغیرها متناظر با نمودار شکل ۵.

$Ec = 8.4262 \times 10^{-6}$	$Re = 18837.838$	$I = -203.154 A$
$Ha = 95.154$	$Rm = 1.3963 \times 10^{-2}$	$\Delta V = 0.1310 V$
$Pe = 135.160$	$\Lambda = 2.1643 \times 10^{-3} m^3/s$	$P_i = -26.6197 W$
$Fr = 20.387$	$\Delta T_{ave} = 0.0006632 K$	$P_{oe} = 21.6433 W$