

بررسی عددی دو بعدی اثر تغییرات شدت میدان مغناطیسی بر جریان مافوق صوت در کانال ام.اچ.دی

محمد پورجعفرقلی^۱، قنبرعلی شیخزاده^۲، رضا مداحیان^۳

۱-۲- دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه حرارت و سیالات

۳- دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مکانیک، گروه تبدیل انرژی

چکیده

با استفاده از این ژنراتورها، می‌توان به بازده عملی تولید برق بالاتر از ۶۰ درصد رسید که در مقایسه با سایر ژنراتورهای موجود تولید برق، مقدار قابل توجهی خواهد بود [۱]. از این رو، اهمیت تولید برق با این روش، در آینده بیشتر خواهد بود. در همین راستا تحقیقات زیادی هم بصورت تجربی و هم به صورت تئوری انجام شده است. از جمله این تلاشها، تحقیقات تجربی باشو و همکاران [۴-۲] برای بررسی تأثیر یک میدان مغناطیسی خارجی بر روی جریان مافوق صوت یک گاز رقیق ضعیف یونیزه شده و مطالعه امکان و ویژگیهای کنترل شاکهای بهم پیوسته در دیفیوژر مافوق صوت در سالهای ۲۰۰۰ و ۲۰۰۳ می‌باشد. آنها آزمایشها را براساس تونل شاک و محاسبات عددی را براساس شبیه سازی ادی بزرگ LES و شبه سه بعدی انجام دادند. محاسبات آنها نشان داد که به ترتیب کانالهای واگرای محدب، تحدب بالا، خطی و مقعر بالاترین عملکرد تبدیل انرژی را دارند.

تور و تاکاهاشی و همکاران [۵] عملکرد تعدادی ژنراتور ام.اچ.دی سه بعدی در مقیاس کوچک را بصورت عددی، بررسی و با هم مقایسه کردند. این ژنراتورها شامل دیواره قطری رسانا، دیواره قطری عایق، دیواره هال رسانا، دیواره هال عایق و ژنراتور فارادی با حالات مختلف الکترودها و سیستمهای اتصال بار بودند. این ژنراتورها بوسیله موتور اسکرم جت رانده می‌شدند. نتایج آنها نشان داد که حداکثر توان خروجی در ژنراتور دیواره قطری رسانا به دست می‌آید. خلیلی و جعفریان [۶]، جریان هیدرودینامیک مغناطیسی فروصوت در ژنراتور ام.اچ.دی را شبیه سازی کرده و اثر آن را بر راندمان و توان الکتریکی سیکل ترکیبی سه گانه بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که نسبت استخراج آنتالپی ژنراتور ام.اچ.دی در ماخ ۰/۳ و شدت میدان مغناطیسی ۶ تسلا به ۱۲/۲۷ می‌رسد که این ژنراتور راندمان بهینه سیکل ترکیبی سه گانه را با افزایش ۲۲/۷ درصدی نسبت به سیکل دو گانه فاقد ژنراتور ام.اچ.دی به ۶۳/۵۹ درصد می‌رساند.

هیدرودینامیک مغناطیسی (ام.اچ.دی)

فرآیند تبدیل ام.اچ.دی در ابتدا توسط مایکل فارادی در سال ۱۸۹۳ شرح داده شد، زیرا در آن زمان دانشمندان به این واقعیت پی بردند که گازها را می‌توان بوسیله یونیزاسیون تبدیل به رسانا نمود.

طبق اثر فارادی اگر یک سیال رسانای برق درون یک میدان مغناطیسی حرکت کند در آن یک جریان الکتریکی برقرار می‌شود. ژنراتور مورد استفاده در این فرایند، ژنراتور ام.اچ.دی نامیده می‌شود. ژنراتور ام.اچ.دی شبیه موتور موشک می‌باشد که با آهنربای بزرگی احاطه شده است و هیچ گونه قطعه متحرک ندارد و رساناهای واقعی با گاز یونیزه شده (پلازما) جایگزین شده‌اند (شکل ۱) [۷]. احتراق در سرعت بیش از سرعت صوت، باعث می‌شود که موتورهای اسکرم جت (موتور رم جتی که عمل احتراق

در کار حاضر، شبیه سازی عددی جریان دو بعدی پایدار و تراکم پذیر هیدرودینامیک مغناطیسی داخل کانال ام.اچ.دی با یک جفت الکتروود مورد مطالعه قرار گرفته و اثر تغییرات شدت میدان مغناطیسی بر جریان مافوق صوت در آن بررسی شده است. مدل محاسباتی متشکل از معادلات ناویر استوکس همراه با جملات چشمه الکترومغناطیسی، معادلات ماکسول و قانون اهم می‌باشد. برای حل معادلات ناویر استوکس از حل کننده بر پایه چگالی به صورت ضمنی و برای حل معادله پواسون، از روش پتانسیل الکتریکی استفاده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، مقدار عدد بی بعد برهم کنش مغناطیسی نیز افزایش یافته و با افزایش آن به مقدار ۰/۰۵، تأثیر نیروی الکترومغناطیسی بر نیروی اینرسی سیال نمایان می‌شود. در نتیجه افزایش عدد بی بعد برهم کنش مغناطیسی، در پایین دست کانال، به تدریج موج ضربه ایجاد می‌شود. با افزایش بیشتر شدت میدان مغناطیسی، موج ضربه ای قائم تولید شده و به سمت بالادست کانال ام.اچ.دی حرکت می‌کند، که این موضوع در کانتورهای عدد ماخ نمایان است. با توجه به رابطه عدد برهم کنش مغناطیسی می‌توان با افزایش رسانایی الکتریکی سیال نیز مقدار آن را افزایش داد که در این حالت فقط مقدار گرمایش ژول افزایش خواهد یافت که نه تنها از نظر تولید جریان الکتریکی فایده ای ندارد، بلکه باعث مشکلات خنک سازی هم خواهد شد. همچنین نتایج، تمرکز چگالی جریان الکتریکی در پایانه های الکترودهای آند و کاتد را نشان داد. با توجه نمودارهای توزیع پتانسیل الکتریکی می‌توان دریافت که مقدار پتانسیل در نزدیکی عایقها (برای حالت شدت میدان مغناطیسی برابر ۰/۵ تسلا و پتانسیل الکترودها برابر ۱۸ \pm ولت و در حالت شدت میدان مغناطیسی برابر ۲/۵ تسلا و پتانسیل الکترودها برابر ۶۳ \pm) بیشتر از الکترودها (برابر ۱۲/۵ \pm ولت) می‌باشد.

واژه های کلیدی: کانال ام.اچ.دی - معادلات ماکسول - عدد بی بعد برهم کنش مغناطیسی - پتانسیل الکتریکی - چگالی جریان الکتریکی

مقدمه

یکی از روشهای نوین تولید انرژی الکتریکی، استفاده از انرژی جنبشی پلازما در ژنراتورهای ام.اچ.دی می‌باشد. استفاده از پلازما به جای قطعات متحرک و وزن نسبتاً کم ژنراتورهای ام.اچ.دی از مزیت‌های اصلی این ژنراتورها در مقایسه با ژنراتورهای متعارف می‌باشد که موجب استقبال از آنها در صنایع هوابیمایی، فضابیمایی به ویژه با موتورهای رم جت و اسکرم جت، موشکی و دریایی شده است.

۱- دانشجوی دکترا

۲- دانشیار

۳- استادیار، maddahian@modares.ac.ir

$$Y : \rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}) = \quad (5)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{4}{3} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1}{3} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} \right] - \sigma B \left(-\frac{\partial \phi}{\partial x} + vB \right)$$

معادله انرژی:

$$\rho c_v (u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \Phi \quad (6)$$

$$+ \sigma \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + B \left(-\frac{\partial \phi}{\partial x} v + \frac{\partial \phi}{\partial y} u \right) \right]$$

$$\Phi = \mu \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

در روابط بالا: μ ویسکوزیته دینامیکی سیال، σ رسانایی الکتریکی، ϕ پتانسیل الکتریکی و λ ضریب هدایت حرارتی هستند. معادله حالت برای گاز ایده آل $p = \rho RT$ می باشد.

معادلات الکترومغناطیسی

این معادلات شامل معادلات ماکسول، معادله پیوستگی جریان الکتریکی و قانون اهم می باشد. معادلات ساده شده ماکسول بصورت $\nabla \times E = 0$ که E میدان الکتریکی را نشان می دهد. معادله پیوستگی جریان الکتریکی هم بصورت $\nabla \cdot J = 0$ تعریف می شود، که طبق آن، J (چگالی جریان الکتریکی) خروجی از آند برابر J ورودی به کاتد می باشد. قانون اهم نیز به شکل زیر داده می شود:

$$J = \sigma(E + vB) \quad (8)$$

با توجه به اینکه در کانال دوبعدی ام.اچ.دی سرعت و میدان الکتریکی شامل مولفه های X و Y و میدان مغناطیسی فقط شامل مولفه Z هستند، مولفه های X و Y چگالی جریان الکتریکی بصورت زیر بدست می آید:

$$j_x = \sigma(E_x + vB) \quad j_y = \sigma(E_y - uB) \quad (9)$$

و بعد از جایگذاری $E = -\nabla \phi$ خواهیم داشت:

$$j_x = \sigma \left(-\frac{\partial \phi}{\partial x} + vB \right) \quad (10)$$

$$j_y = -\sigma \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} + uB \right) \quad (11)$$

از ترکیب معادله 8 و $\nabla \cdot J = 0$ معادله پتانسیل به شکل زیر حاصل می شود:

$$\rightarrow \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = B \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad \text{معادله پتانسیل:} \quad (12)$$

ضریب بار یکی از پارامترهای کارایی ژنراتور ام.اچ.دی بوده و برابر با نسبت ولتاژ خارجی بار به ولتاژ تولیدی در ژنراتور است که از رابطه زیر محاسبه می شود [9]:

$$k = E_y / uB \quad (13)$$

عدد بی بعد برهم کنش مغناطیسی یا پارامتر موثر Q، نسبت نیروهای ام.اچ.دی به نیروهای طولی بوده و برای بررسی اثر الکترومغناطیسی بر جریان هیدرودینامیک در راستای طولی مورد استفاده قرار می گیرد [10]:

$$Q = \sigma B^2 L / (\rho u) \quad (14)$$

در آن در سرعت فراصوت انجام می پذیرد) بتوانند به سرعتهایی بالاتر از رم جتهای متداول برسد. نیروی پیشران این موتورها را می توان با استفاده از ژنراتورهای MHD تقویت نمود. شکل ۲ رژیم های مختلف پرواز با پیشران تقویت شده با MHD برای موتورهای رم جت و اسکرم جت را بر حسب عدد ماخ نشان می دهد [8].

در این تحقیق، جریان دوبعدی مافوق صوت داخل کانال ام.اچ.دی بصورت عددی شبیه سازی می شود و اثر تغییرات شدت میدان مغناطیسی بر آن و جریان پلاسما داخل این کانال بررسی می شود.

هندسه و شرایط مرزی مسئله

هندسه کانال ام.اچ.دی با یک جفت الکتروود، کانالی مربعی شکل به ضلع ۰/۱ متر و با عرض الکتروود برابر ۰/۰۴ متر می باشد (شکل ۳). اندازه شبکه مورد استفاده برای شبکه بندی این کانال به صورت 110×110 می باشد که در نزدیکی دیواره ها، با ضریب رشد $1/0.2$ ریزتر شده است.

شرایط جریان ورودی عبارتند از: $T_0 = 1000k$ ، $p_0 = 1.0 \times 10^5 pa$ و $Ma_0 = 2.16$. رسانایی الکتریکی (σ) سیال مورد استفاده (هوا که گاز کامل در نظر گرفته شده است) و شدت میدان مغناطیسی اعمالی، هر دو بصورت یکنواخت و به ترتیب مساوی $4 s/m$ و 0.5 تسلا فرض شده اند. همچنین دمای دیواره ها روی 1000 کلوین تنظیم شده است. برای معادلات ناویر استوکس، شرط عدم لغزش در روی دیواره ها اتخاذ شده است. مقدار ولتاژ الکتروودها نیز از رابطه $\Delta \phi_y = k u_0 B d_y$ تخمین زده می شود. با تنظیم $k=0.5$ و $B=0.5T$ خواهیم داشت: $\Delta \phi_y = 25V$ (پتانسیل روی آند و کاتد ثابت و به ترتیب $12/5$ و $-12/5$ می باشد). با توجه به داده های مسئله، Q در ابتدای مسئله برابر 2.867×10^{-04} می باشد، که نشان دهنده تاثیر اندک نیروی الکترو-مغناطیسی بر پارامترهای جریان سیال می باشد. روی دیواره های عایق، ورودی و خروجی مولفه عمودی جریان الکتریکی صفر است [6]:

$$\vec{J} \cdot \vec{n} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = (\vec{u} \times \vec{B}) \cdot \vec{n} \quad (2)$$

معادلات حاکم

معادلات حاکم مربوط به ژنراتور ام.اچ.دی شامل معادلات ناویر-استوکس دارای جملات چشمه الکترومغناطیسی، معادلات ماکسول و قانون اهم می باشد.

معادلات هیدرودینامیکی

معادلات ناویر استوکس کوپل شده با جملات چشمه الکترو-مغناطیسی برای جریان تراکم پذیر دوبعدی با عدد رینولدز مغناطیسی کوچک ($Re_m = \mu \sigma u d_y$) بصورت زیر است:

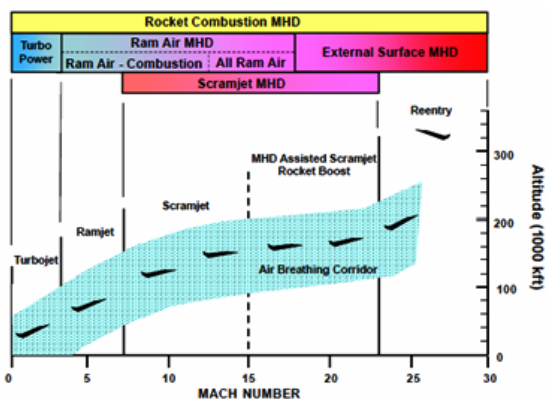
معادله پیوستگی:

$$u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

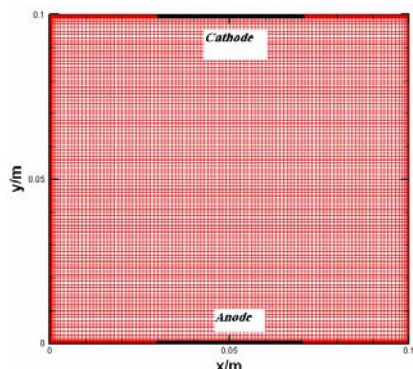
معادلات ممنتوم:

$$X : \rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = \quad (4)$$

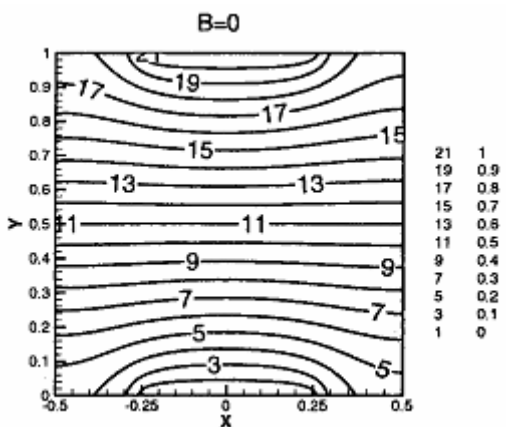
$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{4}{3} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{1}{3} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right] - \sigma B \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} + uB \right)$$



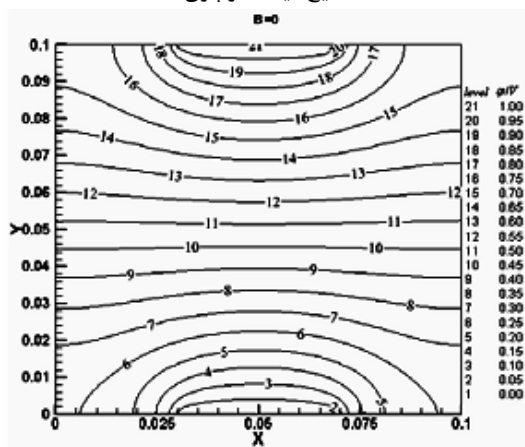
شکل ۲- رژیم‌های پرواز MHD بر حسب عدد ماخ احتراق راکت [۸]



شکل ۳- هندسه و ساختار شبکه کانال ام.اچ.دی با یک جفت الکتروود



الف) نتایج گیتانده و پاژی [۱۱]



ب) نتایج کار حاضر

شکل ۴- کانتورهای پتانسیل الکتریکی ϕ در کانال ام.اچ.دی با $B=0$

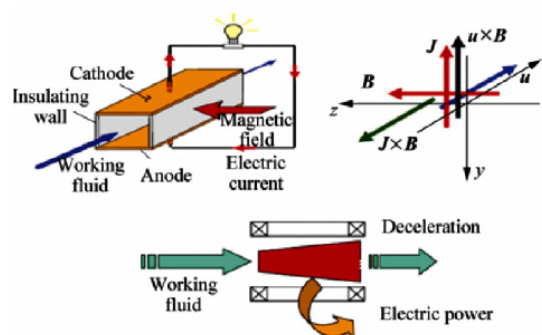
اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی حل عددی در کار حاضر، توزیع پتانسیل برای حالت بدون میدان مغناطیسی و اختلاف پتانسیل ۱ ولت بین دو الکتروود برای کانال ام.اچ.دی به شکل مربع با ضلع ۰/۱ متر، بدست آمده و با نتایج گیتانده و پاژی [۱۱] مقایسه شده است (شکل ۴). با توجه به شکلهای ۴- الف و ۴- ب، سازگاری خوبی بین نتایج مشاهده می‌شود. در هر دو شکل، با توجه به نتایج، در مرکز الکتروود، به غیر از ناحیه نزدیک اتصال عایق با الکتروود، میدان الکتریکی تقریباً یکنواخت بوده و مقدار آن برابر ۱ می‌باشد.

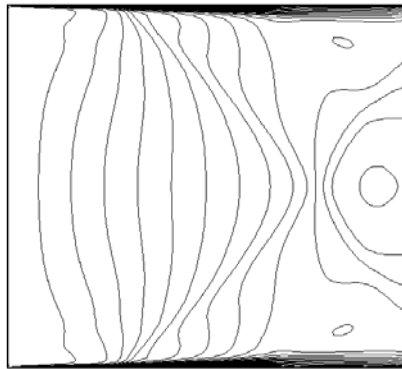
نتایج

در این تحقیق، اثر تغییرات شدت میدان مغناطیسی روی جریان مافوق صوت، داخل کانال ام.اچ.دی بصورت عددی بررسی شده است. با جریان یافتن پلاسما در کانال، و ایجاد نیروی لورنتس در اثر اعمال میدان مغناطیسی، ذرات منفی به سمت دیواره بالا (کاتد) و ذرات مثبت به سمت دیواره پایین (آند) حرکت می‌کنند. همانگونه که در کانتورهای عدد ماخ (شکلهای ۵ و ۸)، دیده می‌شود، در کانال، برای B برابر ۰/۵ جریان فشرده شده و سطح موثر جریان به لایه مرزی کاهش می‌یابد ولی با افزایش B و σ و در نتیجه افزایش Q ، در پایین دست کانال، موج ضربه‌ای مایل و نهایتاً قائم ایجاد شده و در صورت ادامه افزایش آن، موج ضربه‌ای به بالادست کانال انتقال می‌یابد. لازم بذکر است که هر چند با افزایش شدت میدان مغناطیسی و رسانایی الکتریکی، تولید جریان الکتریکی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد، ولی میزان تولید گرمایش ژول نیز که بیشترین مقدار را در پایانه‌های الکتروودها دارد از $4.78 \times 10^5 w / m^3$ به $2.9 \times 10^9 w / m^3$ افزایش یافته و باعث افزایش دما در مرزها تا 1240 کلوین می‌شود که این امر، باعث مشکلات خنک سازی خواهد شد. با توجه نمودارهای توزیع پتانسیل الکتریکی (شکلهای ۶ و ۹) می‌توان دریافت که مقدار پتانسیل در نزدیکی عایقها بیشتر از الکتروودها می‌باشد. اتصال الکتروودها به مدار، باعث آزاد شدن بارهای الکتریکی انباشده می‌شود و در نتیجه ولتاژ بین الکتروودها، کمتر از دیواره‌های عایق می‌شود. همچنین نتایج، تمرکز چگالی جریان الکتریکی در پایانه‌های الکتروودهای آند و کاتد (شکل ۷) را نشان داد که با افزایش B ، تراکم این چگالی در اطراف پایانه‌های نزدیک ورودی نسبت به پایانه‌های نزدیک خروجی الکتروودها (شکل ۱۰) بیشتر می‌شود.

شکل‌ها

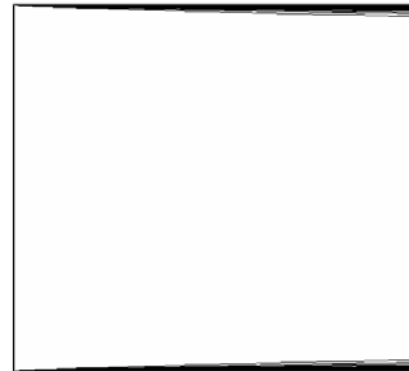


شکل ۷- ۱- ژنراتور ام.اچ.دی [۷]



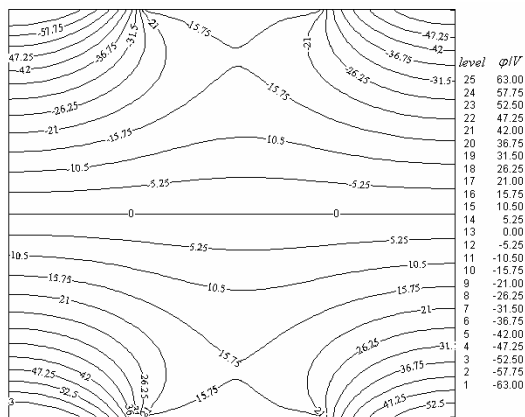
Mach distribution

شکل ۸- توزیع عدد ماخ J برای $B=2.5T$ و $\sigma = 20(s/m)$



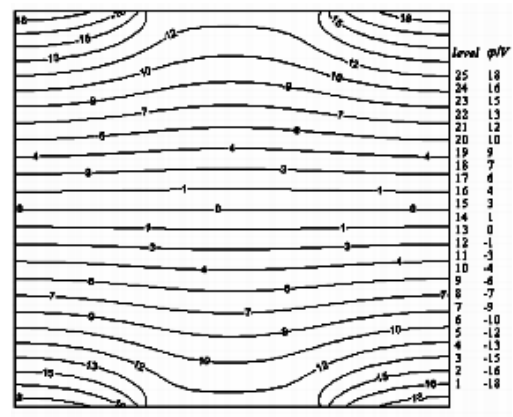
Mach distribution

شکل ۵- توزیع عدد ماخ برای $B=0.5T$ و $\sigma = 4(s/m)$



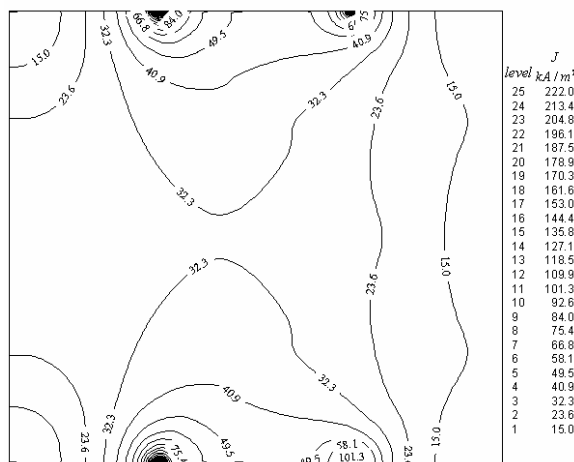
Potential distribution

شکل ۹- توزیع پتانسیل ϕ برای $B=2.5T$ و $\sigma = 20(s/m)$



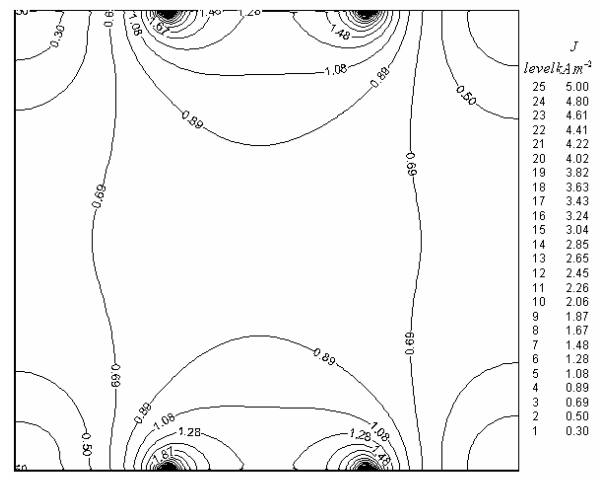
potential distribution

شکل ۶- توزیع پتانسیل ϕ برای $B=0.5T$ و $\sigma = 4(s/m)$



Current density distribution

شکل ۱۰- توزیع چگالی جریان الکتریکی J برای $B=2.5T$ و $\sigma = 20(s/m)$



Current density distribution

شکل ۷- توزیع چگالی جریان الکتریکی J برای $B=0.5T$ و $\sigma = 4(s/m)$

مراجع

- پورجعفرقلی، محمد، و شیخ زاده، قنبرعلی، ژنراتورهای مگنتو هیدرو-دینامیک و چالشهای استفاده از آنها برای کاهش هزینه تولید برق. مجله علمی- ترویجی (دو ماهنامه) انجمن مهندسان مکانیک ایران، تیر ۱۳۹۴، سال بیست و چهارم، شماره پیاپی ۱۰۱، ص ۷۳-۸۸.

2. Bobashev S.V., D' yakonova E. A., Erofeev A. V., Lapushkina T.A., Maslennikov V. G., Poniaev S. A., Sacharov A. A., Vasil'eva R. V., Shock tube facility for MGD supersonic flow control. *American institute of Aeronautics & Astrnautics*, 2000.

3. Bobashev S.V., Erofeev A.V., Lapushkina T.A., et al. Experiments on MHD control of attached shocks in diffuser. *AIAA-2003-169*, 2003.
4. Bobashev S.V., Erofeev A.V., Lapushkina T.A., et al. Recent results on MHD flow control at Ioffe institute. *AIAA-2006-8012*, 2006.
5. Takahashi T. , Fujino T., Ishikawa M., Comparison of Generator Performance of Small-Scale MHD Generators with Different Electrode Dispositions and Load Connection Systems. *Journal of International Council on Electrical Engineering Vol. 4, No.3, 2014, pp.192-198.*
6. خلیلی، صوفیا، و جعفریان، علی، شبیه سازی عددی جریان دوبعدی در ژنراتور هیدرودینامیک مغناطیسی مقطع ثابت فروصوت و بررسی آن بر عملکرد سیکل ترکیبی سه گانه. نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، سال چهارم، شماره دوم، تابستان ۱۳۹۳، ص ۴۰-۵۱.
7. Yiwen L., Yinghong L., Haoyu L., Tao Z., Bailing Z., Feng C., XiaohuZ., Preliminary Experimental Investigation on MHD Power Generation Using Seeded Supersonic Argon Flow as Working Fluid. *Chinese Journal of Aeronautics 24 (2011) pp. 701-708.*
8. Blankson I.B., Schneider S., The MHD controlled turbojet engine: an alternate power plant for access to space. *NASA Glenn Research Center, Cleveland, OH, DOE/NETL MHD Workshop, October 2014.*
9. Golovachev Y.P., Sushchikh S.Y., Influence of Electrode Commutation on Magnetohydrodynamic Flow in a Supersonic Diffuser. *Technical Physic Letter, Vol. 25, No. 5, pp. 337-340, 1999.*
10. Xiaomei Z., Haoyu LU., Dajun XU., CAI G., Numerical Simulation of 2D Supersonic Magnetohydrodynamic Channel and Study on Hall Effect. *Chinese Journal of Aeronautics, v. 24, 2011, pp. 136-144.*
11. D. V. Gaitonde, J. Poggie, Elements of a numerical procedure for a 3-D MGD flow control analysis. *AIAA-2002-0198*, 2002.