

# شبیه سازی دو بعدی تراسترهای مگنتوپلاسمادینامیکی در مصارف فضایی

روح الله خوشخو<sup>۱</sup>، محمود عدمی<sup>۲</sup>، احمد صداقت<sup>۳</sup>

۱- شاهین شهر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده مهندسی مکانیک و هوا فضا

۲- اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک

E-mail: mahdi.khoshkhoo@gmail.com

## چکیده

مدل سازی دو بعدی برای تحلیل و بررسی شتاب دهنده های الکترو مگنتوپلاسمای صورت گرفته که تراسترهای مگنتوپلاسمادینامیکی نامیده می شوند. معادلات حاکم بکاربرده شده معادلات MHD می باشد که در آن گاز به صورت یونیزه کامل پلاسمای آدیباتیک در نظر گرفته شده است. اثر هال مغناطیسی (هدایت الکتریکی غیر عادی) و برهم کنش جریان سیال و میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات به صورت اختلاف محدود و به روش TVD گسسته سازی شده است. نتایج حاصل از حل عددی MHD برای نرخ جرم  $\dot{m} = 2.25 \frac{g}{s}$  برای گاز آرگون و جریان های الکتریکی ۴KA, ۵KA, ۶KA و ۷KA ارائه می شوند.

واژه های کلیدی: تراستر مگنتوپلاسمادینامیکی - گاز آرگون - روش عددی MHD - TVD - اثر هال مغناطیسی

## مقدمه

در اهداف فضایی، موتور های فضاپیماها به دودسته تقسیم می شوند: ۱- موتورهایی با قدرت تراست بالا، ۲- موتورهایی با بازده بالا. موتور هایی با قدرت تراست بالا برای پرتاب فضاپیما به فضا و موتورهایی با بازدهی بالا برای حرکت در فضای بین سیاره ای مورد استفاده قرار می گیرند. به هر حال، انرژی شیمیایی متعلق به نوع قدرت تراست بالا، برای هر دو نوع استفاده می شود. اما برای کارهای فضایی آینده نیاز به موتورهایی با بازدهی بالا می باشد [۱].

پیشرانده های الکتریکی به علت خروج ذرات با سرعت بسیار بالا از نازل به منظور کاهش سوخت مصرفی برای حمل و نقل های فضایی مورد استفاده قرار می گیرند و شامل سه گروه می شوند: ۱- پیشرانده های الکتروگرمایی، ۲- پیشرانده های الکترواستاتیکی، ۳- پیشرانده های الکترومغناطیسی [۲].

تراسترهای مگنتوپلاسمادینامیکی (MPD) یک نوع از تراسترهای الکترومغناطیسی است که برای موتورهای فضاپیماها برای اهداف بین سیاره ای، حمل و نقل های فضایی ایجاد شده است. زیرا این نوع تراسترها MPD می توانند نیروی پیشرانده بالاتری را نسبت به سایر تراسترهای الکتریکی تولید کنند [۳]. این نوع تراسترها دارای سرعت ذرات خروجی

بالا ( $10^4 \frac{m}{s}$ )، دارای چگالی تراست (تراست بر واحد سطح خروجی) خیلی کمتری نسبت به سایر سیستم ها هستند. اما

۱- دانشجو

۲- دانشیار

۳- استادیار

طول عمر و مدت زمان پرواز آنها بسیار زیاد است و دارای قابلیت اطمینان بالایی هستند. این نوع سیستم ها قدرت الکتریکی حمل شده همراه با جرم ویژه کم نیاز دارند [۲]. سوخت مورد استفاده از نوع گاز است که شامل گازهای  $H_2, NH_3, CH_4, O_2, Ne, Ar$ ، دوتریم و زنون می باشد [۴]. شکل نوعی از تراستر مگنتوپلاسمادینامیکی در شکل ۱ نشان داده شده است

### تاریخچه از کارهای انجام گرفته

محققین محاسباتی برای به دست آوردن فیزیک مسئله برای تراسترهای مگنتوپلاسمادینامیکی خودالقائی، تلاش بسیاری انجام داده اند. از جمله لاپینت [۵]، اسلیزینا و دیگران [۶] با استفاده از مدل دو بعدی، وابسته به زمان، مدلی محاسباتی را برای گاز آرگون به دست آوردند که لاپینت [۵] برای حل معادلات MPD<sup>1</sup> یونیزه شده با استفاده از معادله حالت گاز ایده ال روش اختلاف محدود را برای محاسبه خصوصیات سرعت، فشار، دمای یون و الکترون و حل میدان جریان استفاده کرد. تحقیقات خود را بر روی اندازه های مختلفی از تراسترهای MPD انجام داد.

اسلیزینا و دیگران [۶] از روش حجم محدود برای حل معادلات ناویر استوکس استفاده کرد و معادله القای الکترومغناطیس را با استفاده از روش گوس سایدل حل کرد و سپس نتایج خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمود و متوجه شدند که ماکزیمم میدان مغناطیسی در اطراف کاتد مشاهده می شود و اثر هال مغناطیسی در نوک آند و در ریشه کاتد مشاهده می شود.

ساساکی و کاواچوچی [۱] معادلات اوپلر را به صورت TVD<sup>2</sup> به صورت سیال تک حل کرده اند و معادلات الکترومغناطیس را به صورت جداگانه به روش SOR حل کرده و معادلات را با هم کوپل کرده اند و نشان داده اند که نیروی الکترومغناطیسی وابسته به شکل تراستر نیست و افزایش سرعت به علت وجود میدان مغناطیسی القائی در بالای سطح کاتد است و سرعت در پایین دست جریان پلازما به علت اصل بقای جرم کاهش می یابد و نتایج کار حاضر نیز با کار آنها مقایسه شده است.

چنتی و مارتینز [۷] به حل دو بعدی معادلات اوپلر برای تحلیل جریان در تراسترهای مگنتوپلاسمادینامیکی به صورت تک سیال پرداخته اند و در آن اثر هال را مورد بررسی قرار داده اند و معادلات را به صورت حجم محدود و به روش نیوتن-رافسون حل کرده اند و پی برده اند که سیال شتاب زیادی در سطح کاتد به علت وجود نیروی لورنتس می گیرد و افت چگالی در ابتدای صفحه ای عایق ورودی بطور ناگهانی صورت می گیرد.

بری وسابراتا روی [۸]، به حل دو بعدی معادلات ناویراستوکس برای تراسترهای مگنتوپلاسمادینامیکی به صورت تک سیال پرداخته اند و در آن اثر هال را مورد بررسی قرار داده اند و معادلات را به روش المان محدود حل کرده اند و نتیجه گرفته اند که نیروهای الکترو مغناطیسی بر روی ناحیه بالا دست جریان، نسبت به پایین دست جریان تاثیر بسیار بیشتری می گذارد و افزایش چگالی باعث افزایش نیروی تراست محوری و شعاعی می شود و افزایش چگالی باعث افزایش دما می گردد. به همین علت اهمیت اتلاف توان الکتریکی در الکترودها، کسر بزرگی از توان کل تراستر را در بر می گیرد و به همین دلیل بازدهی تراستر اندازه گیری شده با تست های آزمایشگاهی کمتر خواهد بود. برای نرخ جرم ثابت افزایش جریان باعث افزایش سرعت خروجی می شود و نتایج حاصل از تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته است.

### اصول عملکرد تراسترهای مگنتوپلاسمادینامیکی

تراسترهای مگنتوپلاسمادینامیکی دارای یک هندسه لایه لایه ای (تودرتو) هستند که از یک کاتد مرکزی و یک آند به صورت استوانه ای شکل در اطراف کاتد تشکیل شده است. و صفحه پستی آن از جنس برم نیتريد می باشد [۲]. پیشرا نه های گازی

<sup>1</sup> - Magneto Plasma Dynamic

<sup>2</sup> - Total Variation Dimensioning

به صورت جریان بالادست از کانال وارد می شوند و گاز با عبور از یک قوس الکتریکی ثابت (به صورت شعاعی در راستای محور  $\Gamma$ ) که در فاصله بین الکترودها قرار گرفته است، یونیزه می شود. اگر جریان قوس الکتریکی به اندازه کافی شدید باشد، تولید میدان مغناطیسی سمتی (در راستای  $\theta$ ) می کند و برای تولید نیروی محوری و شعاعی بر جریان پیشران مناسب می باشد. این نیرو از رابطه  $F = J \times B$  به دست می آید که به آن نیروی لورنتس گفته می شود و به جریان پایین دست به طور مستقیم شتاب می دهد. شتاب جریان به سمت جلو و در راستای محوری (خط مرکزی) می باشد. پلاسمای گرم به مقدار زیادی بعد از نوک کاتد وجود دارد و انبساط این پلازما در راستای محوری، سرعت خروجی بالایی را تولید می کند [۹]. شکل ۲ نشان دهنده عملکرد تراستر MPD می باشد.

تحلیل تانسور الکترومغناطیسی موجب رابطه تراست کلی زیر می شود:

$$\tau = \frac{\mu I^2}{4\pi} \left( \ln \left( \frac{r_a}{r_c} \right) + A \right) \quad (1)$$

پارامتر  $A$  عددی کمتر از یک می باشد که وابسته به کیفیت و چگونگی اتصال جریان روی الکترودها می باشد. این رابطه با آزمایشات مطابقت دارد و مستقل از جریان جرم و دیگر پارامترهای پیشرانسی است و سرعت ذرات خروجی باید با نسبت  $\frac{I^2}{m}$  تنظیم شود [۲].

### روش عددی

روش های عددی TVD یا تغییرات کل از بین رونده، به روش هایی گفته می شوند که در آن تغییرات کل حل هر جواب فیزیکی قابل قبول با افزایش زمان در فضای حل بتدریج کم و محو می شود. لکس و وندروف [۱۰] مفهوم تغییرات کل از بین رونده را بر مبنای یک خاصیت مهم از قانون بقای اسکالر (معادله ۲) ارائه دادند:

$$u_t + f_x = 0 \quad (2)$$

آنها بیان کردند که تغییرات کل هر حل قابل قبول فیزیکی که توسط رابطه زیر مشخص می شود با افزایش زمان تغییر نمی کند.

$$TV = \int \left| \frac{\partial u}{\partial x} \right| dx \quad (3)$$

تغییرات کل یک حل گسسته از قانون بقای اسکالر بصورت زیر است.

$$TV(u) = \sum_i |u_{i+1} - u_i| \quad (4)$$

اگر رابطه زیر برای یک روش عددی صادق باشد گفته می شود که آن روش دارای تغییرات کل از بین رونده است.

$$TV(u^{n+1}) \leq TV(u^n) \quad (5)$$

### معادلات حاکم بر سیال

در اینجا معادلات بدون بعد هیدرومغناطیسی استفاده شده است. با لحاظ کردن اثر میدان مغناطیسی، شکل بدون بعد معادلات ناویر استوکس در مختصات کارتزین به شکل بقایی برای جریان دو بعدی تراکم پذیر زیر است.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} + H(U) = S \quad (6)$$

که  $U$  برداری از متغیرهای بقائی به صورت زیر می باشد.

$$U = [\rho \quad \rho u \quad \rho v \quad e \quad B]^T \quad (7)$$

که  $u$  و  $v$  مولفه های کارتیزین سرعت و  $\rho$  دانسیته و  $e$  انرژی کل به ازای واحد حجم است که بصورت زیر با فشار در ارتباط می باشد.

$$P = (\gamma - 1) \left[ e - \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) \right] \quad (8)$$

که  $\gamma$  نسبت گرمای ویژه است.

فلاکس های  $F$  و  $G$  و  $H$  را می توان به دو بخش تقسیم کرد. اندیس  $I$  بیانگر جمله های غیرلزج و اندیس  $V$  بیانگر جمله های لزج است و  $S$  جمله منبع می باشد.

$$\begin{aligned} F &= F^I + F^V \\ G &= G^I + G^V \\ H &= H^I + H^V \end{aligned} \quad (9)$$

که می توان آنها را به صورت زیر نشان داد.

$$\begin{aligned} F^I &= \begin{bmatrix} \rho u \\ P + \rho u^2 \\ \rho uv \\ eu + \frac{U_\infty^2}{C_V T_\infty} pu \\ -\frac{1}{LU_\infty \sigma_\infty \mu_\infty} \frac{1}{\sigma} \frac{\partial B}{\partial x} + uB \end{bmatrix}, F^V = \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau_{xx} \\ -\tau_{xy} \\ -\frac{U_\infty^2}{C_V T_\infty} (u\tau_{xx} + v\tau_{xy}) + q_x \end{bmatrix} \\ G^I &= \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ P + \rho v^2 \\ ev + \frac{U_\infty^2}{C_V T_\infty} pv \\ -\frac{1}{LU_\infty \sigma_\infty \mu_\infty} \frac{1}{\sigma} \frac{\partial B}{\partial y} + vB \end{bmatrix}, G^V = \begin{bmatrix} 0 \\ -\tau_{xy} \\ -\tau_{yy} \\ -\frac{U_\infty^2}{C_V T_\infty} (u\tau_{xy} + v\tau_{yy}) + q_y \end{bmatrix} \\ H^I &= \frac{1}{y(i, j)} \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 \\ ev + \frac{U_\infty^2}{C_V T_\infty} pv \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

$$H^V = \frac{1}{y(i, j)} \left[ \begin{array}{c} 0 \\ -\tau_{xy} + \frac{2}{3} \frac{y(i, j)}{\text{Re}} \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{v}{y(i, j)} \right) \\ -\tau_{yy} + \tau_{\theta\theta} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{\text{Re}} \left( \frac{v}{y(i, j)} \right) + \frac{2}{3} \frac{y(i, j)}{\text{Re}} \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{v}{y(i, j)} \right) \\ \frac{U_\infty^2}{C_V T_\infty} (-u\tau_{xy} - v\tau_{yy} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{\text{Re}} \left( \frac{v^2}{y(i, j)} \right) + \frac{2}{3} \frac{y(i, j)}{\text{Re}} \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{v^2}{y(i, j)} \right) - \frac{2}{3} \frac{y(i, j)}{\text{Re}} \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{vu}{y(i, j)} \right)) + q_y \\ - \frac{1}{LU_\infty \sigma_\infty \mu_\infty} \frac{2}{\sigma_\infty y(i, j)} \frac{\partial B}{\partial y} + \frac{v B_\infty}{y(i, j)} - \frac{I_m B_\infty}{LU_\infty e \rho_\infty \mu_\infty} \frac{B}{y(i, j)} \frac{\partial B}{\partial x} \end{array} \right]$$

$$S = \left[ \begin{array}{c} 0 \\ \frac{B_\infty^2}{\rho_\infty U_\infty^2 \mu_\infty} \frac{\partial B}{\partial x} B \\ \frac{B_\infty^2}{\rho_\infty U_\infty^2 \mu_\infty} \left( \frac{B^2}{y(i, j)} + \frac{\partial B}{\partial y} B \right) \\ \frac{B_\infty}{\rho_\infty C_V T_\infty U_\infty \mu_\infty} \left( E_y \frac{\partial B}{\partial x} - E_x \left( \frac{B}{y(i, j)} + \frac{\partial B}{\partial y} \right) \right) \\ 0 \end{array} \right]$$

که  $U_\infty$  سرعت اولیه،  $C_V$  ضریب گرمای ویژه در حجم ثابت،  $T_\infty$  دمای اولیه گاز،  $B$  میدان مغناطیسی،  $y(i, j)$  فاصله شعاعی از محور تقارن،  $I_m$  جرم یون،  $B_\infty$  میدان مغناطیسی اولیه،  $\text{Re}$  عدد رینولدز،  $\text{Pr}$  عدد پرانتل و  $R$  ثابت گاز می باشد. که بالانویس \* نشانگر کمیت های بعد دار و زیر نویس  $\infty$  بیانگر کمیت های جریان آزاد می باشد.  $L$  طول مرجع را نشان می دهد. در این پروژه این طول برابر طول الکتروودها در نظر گرفته شده است.  $\mu_\bullet$  ضریب نفوذپذیری الکتریکی خلا می باشد. مولفه های تانسور تنش برشی و بردار شار حرارتی را می توان بصورت زیر نوشت.

$$\tau_{xx} = \frac{\mu}{\text{Re}} \left( \frac{4}{3} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

$$\tau_{yy} = \frac{\mu}{\text{Re}} \left( \frac{4}{3} \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (11)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\mu}{\text{Re}} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$q_x = - \frac{\gamma U_\infty^2 \mu}{\text{Pr Re } T_\infty R} \frac{\partial \left( \frac{P}{\rho} \right)}{\partial x} \quad (12)$$

$$q_y = - \frac{\gamma U_\infty^2 \mu}{\text{Pr Re } T_\infty R} \frac{\partial \left( \frac{P}{\rho} \right)}{\partial y}$$

میدان های الکتریکی در راستای محور  $x$  و  $y$  ( $E_x, E_y$ ) به صورت زیر می باشد.

$$E_x = \frac{B_\infty}{\sigma_\infty \mu_\infty L} \frac{1}{\sigma} \left( \frac{\partial B}{\partial y} + \frac{B}{y(i, j)} \right) - U_\infty B_\infty (vB) - \frac{B_\infty^2 I_m}{\mu_\infty L \rho_\infty e} \left( \frac{\partial B}{\partial x} B \right) \quad (13)$$

$$E_y = -\frac{B_\infty}{\sigma_\infty \mu_\infty L} \frac{1}{\sigma} \left( \frac{\partial B}{\partial x} \right) - U_\infty B_\infty (uB) - \frac{B_\infty^2 I_m}{\mu_\infty L \rho_\infty e} \left( \frac{\partial B}{\partial y} B + \frac{B^2}{y(i, j)} \right)$$

$\sigma$  ضریب هدایت الکتریکی می باشد که بصورت زیر نوشته می شود.

$$\sigma = \frac{\sigma^*}{\sigma_\infty} = \left( \frac{T^*}{T_\infty} \right)^{3/2} \frac{\Lambda(T_\infty, P_{n\bullet})}{\Lambda(T^*, P_n)}$$

$$\Lambda(T^*, P_n) = 23 - \text{Ln} \left[ \frac{1.22 \times 10^3 P_n^{0.5}}{(T^*)^{3/2}} \right] \quad (14)$$

$$P_n(\rho^*) = \frac{\rho^* \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{6.63 \times 10^{-26} \text{ kg}}$$

ضریب هدایت گرمایی،  $K$ ، که بصورت زیر نوشته می شود.

$$K = \left( \frac{T^*}{T_\infty} \right)^{5/2} \frac{\Lambda(T_\infty, P_{n\bullet})}{\Lambda(T^*, P_n)} \quad (15)$$

### شرایط هندسی و شرایط مرزی

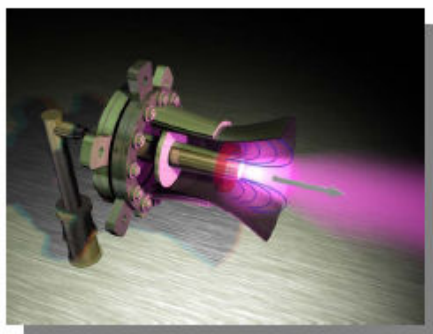
در شکل ۳ شرایط گرمایی تراستر MPD را نشان می دهد که الکترودها آدیاباتیک در نظر گرفته شده اند و دمای اولیه گاز پلاسما ۵۰۰۰ درجه کلوین در نظر گرفته شده است و عدد پرناتل برای گاز آرگون ۰/۶۶۷ می باشد. شکل ۴ شرایط مرزی سرعت در تراسترهای MPD را نشان می دهد. شکل ۵ شرایط مرزی الکترومغناطیسی تراستر را نشان می دهد. در نقاط دور از الکترودها میدان مغناطیسی صفر در نظر گرفته شده است و در محور تقارن نیز میدان مغناطیسی صفر در نظر گرفته شده است. اندازه شبکه عددی  $154 \times 101$  می باشد و که الکترودها را نیز شامل می شود. شکل ۶ شکل هندسی شبکه را نشان می دهد. روش عددی حل معادلات به روش TVD در اکبری [۱۲]، صداقت [۱۳، ۱۴] ارائه شده است.

### نتیجه گیری

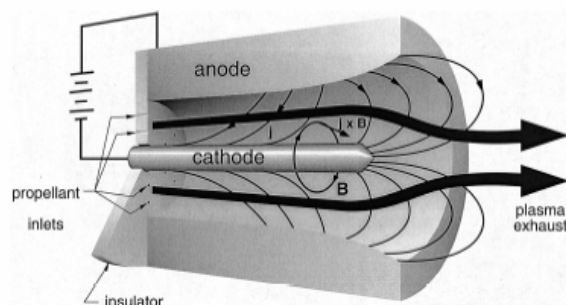
در کار حاضر سعی بر آن شده است که تاثیر نیروی لورنتس ناشی از میدان مغناطیسی بر روی جریان سیال مورد بررسی قرار گیرد. این نیرو باعث افزایش سرعت سیال پلاسما می شود و بر روی جریان بالادست نسبت به جریان پایین دست تاثیر بیشتری می گذارد.

مدلسازی جریان پلاسما به صورت تراکم پذیر و مستقل از زمان با عدد ماخ ورودی ۱ و عدد رینولدز ۲۷۰ بر سطح دو استوانه هم محور انجام شده است و طول الکترودها ۱۰ سانتیمتر در نظر گرفته شده است. سپس با مراجع [۱، ۶، ۸، ۱۱] از نظر کمی و کیفی مورد بررسی قرار گرفته است. مهمترین نتایج به دست آمده حاکی از این است که چگالی جریان سیال دچار افزایش ناگهانی در ابتدای ورود می شود و بر روی سطح کاتد نیز افزایش می یابد که در شکل ۷ نشان داده شده است و دما نیز بر روی سطح کاتد افزایش می یابد. اثر حال مغناطیسی نیز در ریشه کاتد و نوک آن مشاهده می شود که در شکل ۸ قابل مشاهده می باشد و نیروی مغناطیسی باعث تمایل مسیر حرکت سیال به سمت کاتد می شود که بردار سرعت در شکل ۹ نشان داده شده است. افزایش جریان الکتریکی باعث افزایش سرعت سیال خروجی می شود و کانتور سرعت در  $I_\infty = 4kA$  شکل ۱۰ نشان داده شده است و باعث افزایش تراست حاصل از میدان مغناطیسی می شود. شکل های ۱۱، ۱۲، ۱۳ به ترتیب نشان دهنده کانتورهای سرعت در جریان های الکتریکی ۵ KA، ۶ KA و ۷ KA می باشند. با افزایش

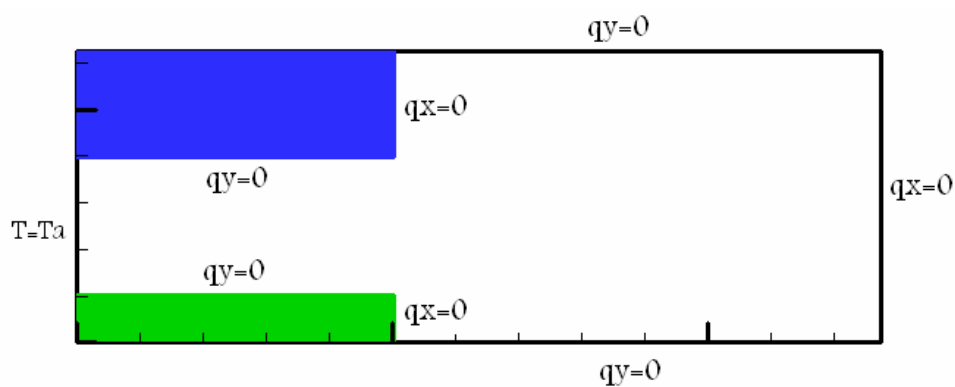
جریان الکتریکی تولید میدان مغناطیسی قوی تر و در نتیجه تولید سرعت خروجی بالاتری از تراستر می کند و تولید تراستر بالاتری می کند.



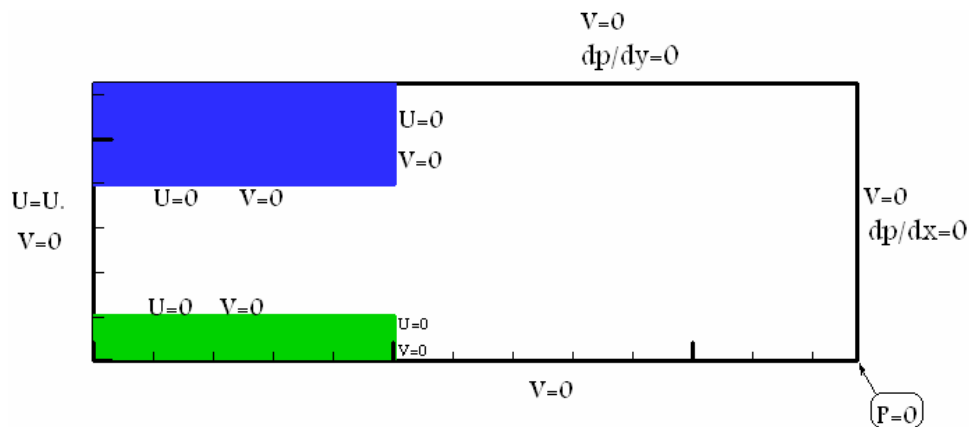
شکل ۱- یک نمونه تراستر مگنتو پلازما دینامیکی



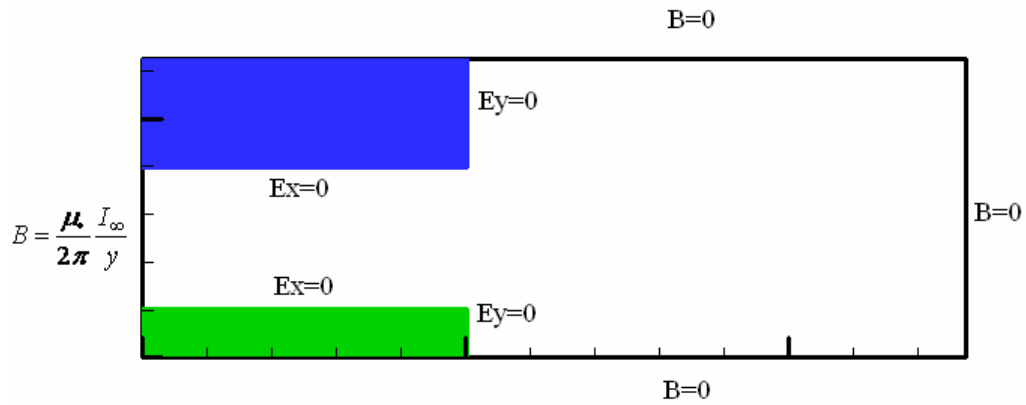
شکل ۲- نمایش عملکرد تراستر مگنتو پلازما دینامیکی



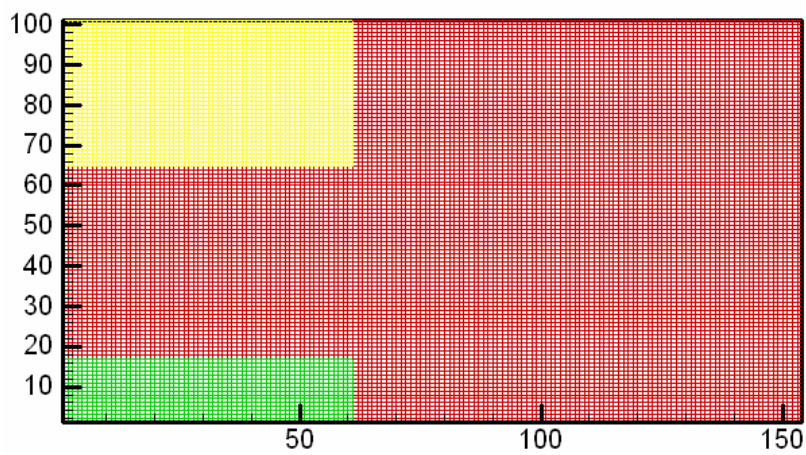
شکل ۳- شرایط مرزی احتراق در تراستر MPD



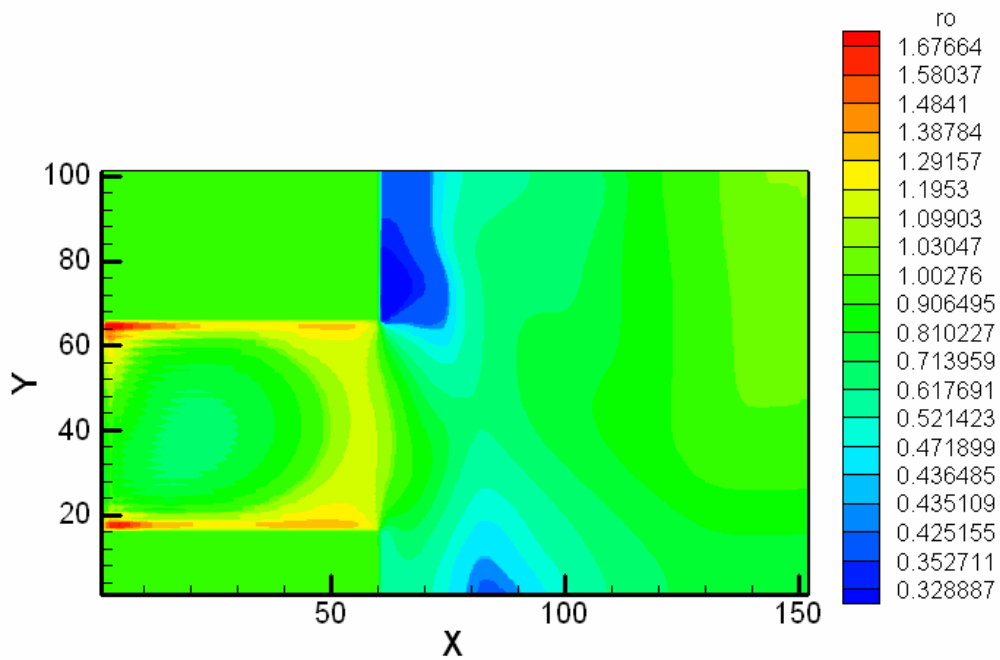
شکل ۴- شرایط مرزی سرعت در تراستر MPD



شکل ۵: شرایط مرزی میدان مغناطیسی در تراستر MPD

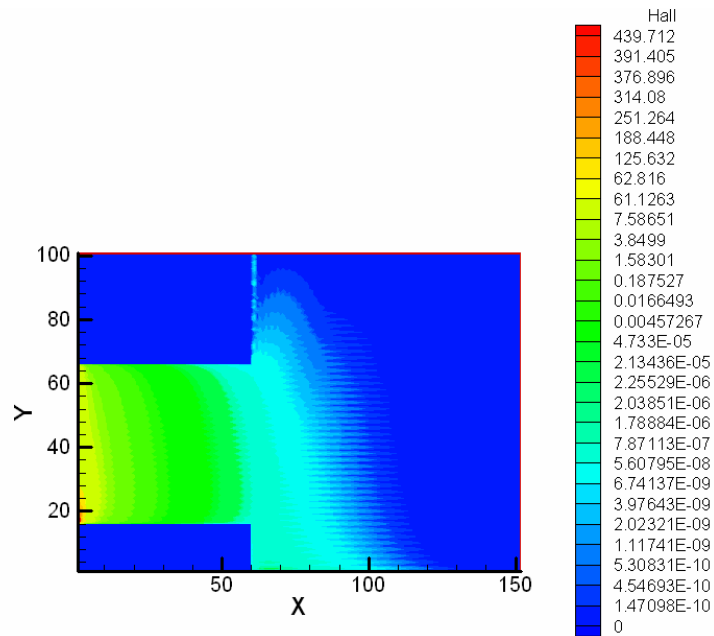


شکل ۶- شبکه سازمان یافته ایجاد شده در اندازه  $154 \times 101$

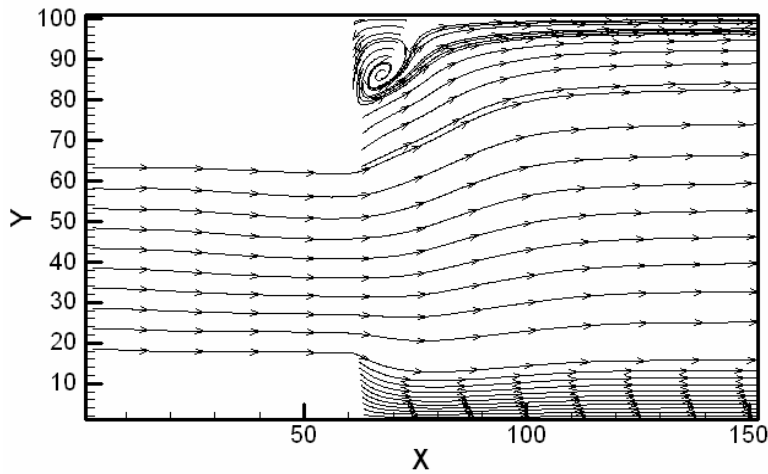


شکل ۷- کانتور چگالی در  $I_{\infty} = 4kA$

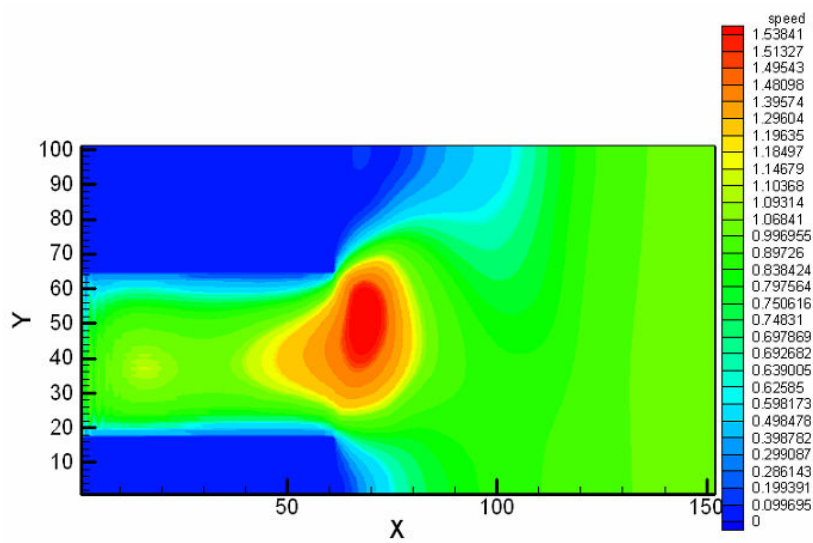




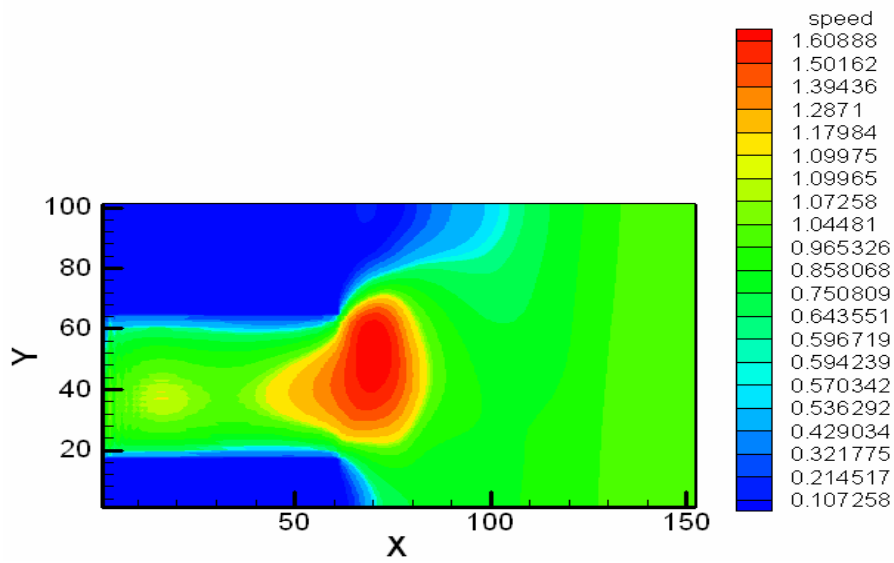
شکل ۸- کانتور اثر هال مغناطیسی در  $I_{\infty} = 4kA$



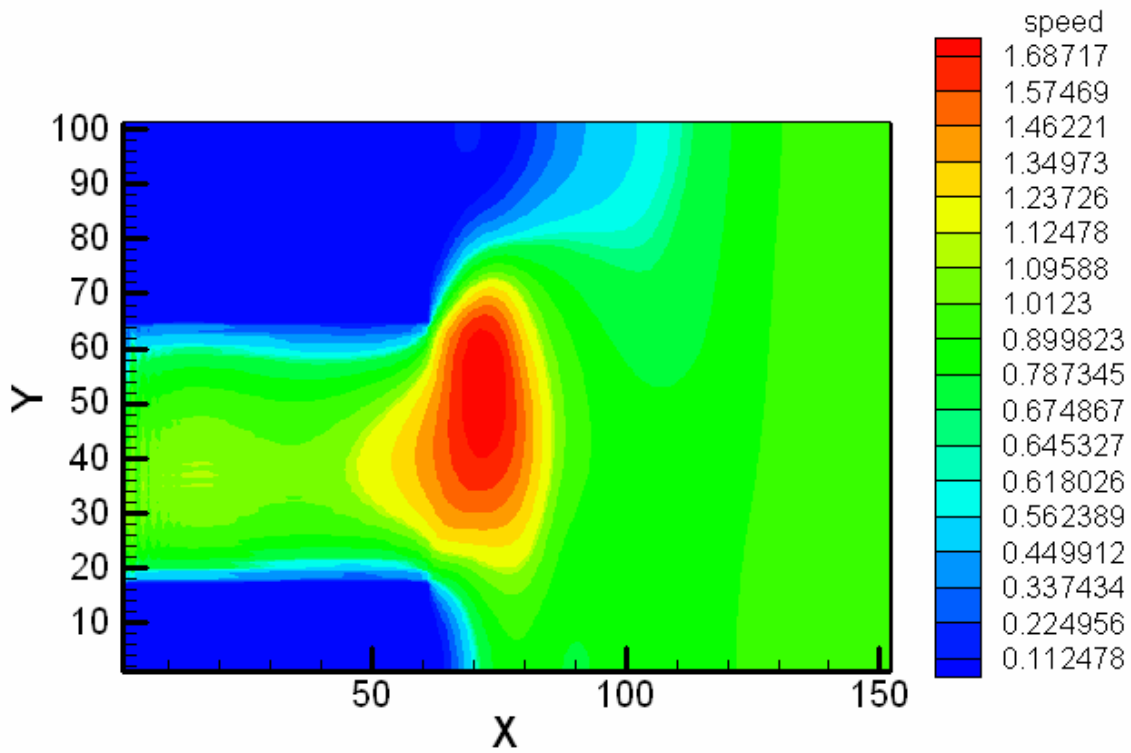
شکل ۹- بردار سرعت در  $I_{\infty} = 4kA$



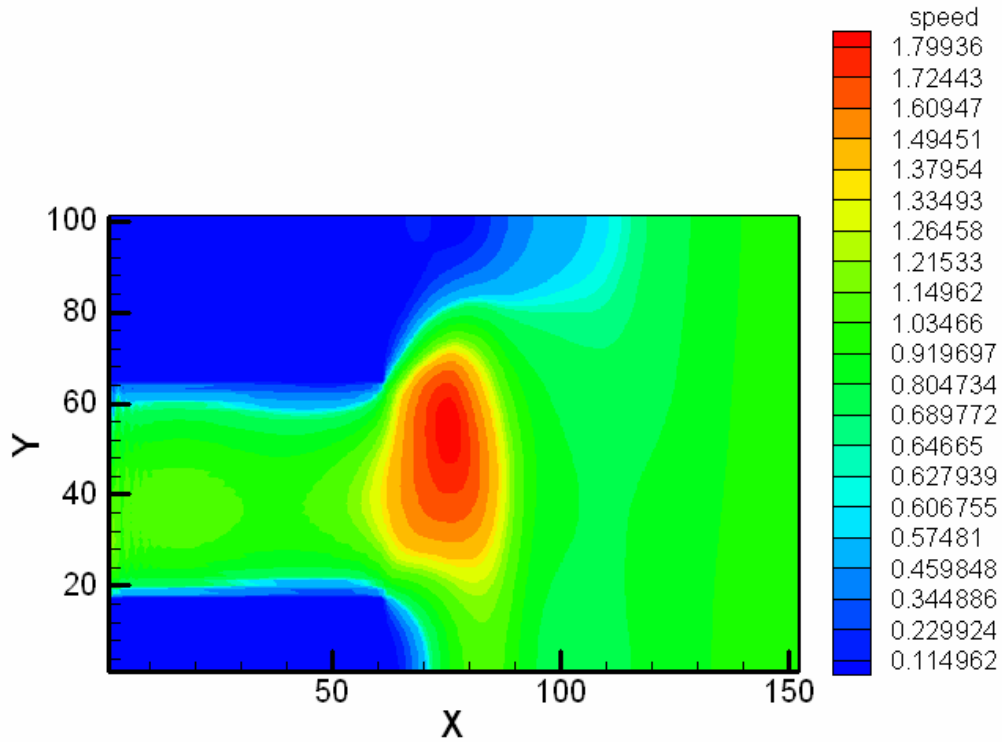
شکل ۱۰- کانتور سرعت در  $I_{\infty} = 4kA$



شکل ۱۱- کانتور سرعت در  $I_{\infty} = 5kA$ .



شکل ۱۲- کانتور سرعت در  $I_{\infty} = 6kA$ .



شکل ۱۳- کانتور سرعت در  $I_{\infty} = 7kA$

مراجع

- 1- Kawaguchi.H, Sasaki.K,Itoh.H,"Numerical study of the thrust mechanism in a two-dimensional MPD thruster," Int. J. Applied electromagnetics and Mechanics,Vol. 6, 1995, pp. 351-365.
- 2- Jahn, Edgar Y. Choueiri, Electric Propulsion,"Encyclopedia of Physical Science and Technology,"Third Edition.Volume 5.
- 3- Michael R.,LaPointe.M,"High Power MPD Thruster Development"at the NASA GLENN RESEARCH CENTER, NASA/CR\_ 2001-211114.
- 4- NASA Fact," Magnetoplasmadynamic Thrusters", Glenn Research Center Cleveland, Ohio 44135-3191.
- 5- Lapoite.M," Numerical simulation of self-fild mpdhrusters,"AIAA Paper , No.91-2341, 1991.
- 6- Sleziona P.C. , M.Auweter-Kurtz and Schrade. H.O.,,"Computation of MPD flows and comparison with experimental results," Int. Journal for Numerical Methods in Engineering,Vol.34,1992,pp.759-771.
- 7- Martinez-Sanchez . M andChanty. J.M.G,"Two-Dimensional Numerical Simulation Of MPD Flows,"AIAA Paper. No.87-1090, 1987.
- 8- Berry K.J. and Subrata Roy,"Finite element based algorithm for self-induced magnetic field applications," AIAA Paper, No.2001-0200, 2001.
- 9- Michael R.Lapointe,"High Power MPD Thruster Performance Measurements," NASA TM -2004-213226, AIAA-2004 -3467.
- 10- H.C.Yee,"Implicit Implicit Total Variation Diminishing (TVD) schemes for steady-state cclulations ," J. Comp. Phys. 57, 1985, pp. 327-360.
- 11- Kameshwaran Sankaran,"Simulation of MPD Flows Using a Flux-Limited Numerical Method for the MHD Equations," Disseration of Princeton University. 2001.

12- S.A.Akbari, A.Sedaghat and A.R.Azimian," Computational flow Separation Control Using Electromagnetic Fields," 14<sup>th</sup> Annual (International) Mechanical Engineering Conference, Isfahan. Iran. May 2006.

13- A.Sedaghat," A Finite Volume TVD Approach to Transonic Flow Computation," PHD Thesis, the university of Manchester, 1997.

14- A.Sedaghat, A.R.Azimian and S.A.Akbari," Computational Stall Prevention Using Electromagnetic Fields," European Conference on Computational Fluid Dynamics, TUD Delft, the Netherland, 2006.