

تحلیل المان محدود پیشران مگنتوهیدرودینامیک و تأثیر جریان الکتریکی انتهایی کانال بر بازده

مرتضی حق پرست^۱، محمدرضا علیزاده پهلوانی^{۲*}، دیاکو عزیزی^۳

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر ۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب

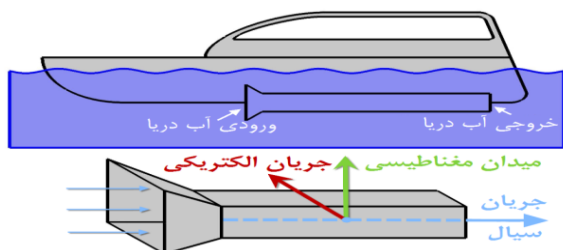
(دریافت: ۹۶/۰۲/۲۶، پذیرش: ۹۶/۱۰/۲۳)

چکیده: در این مقاله، یک پیشرانه مگنتوهیدرودینامیکی دریایی برای اولین بار به صورت کاملاً سه بعدی شبیه‌سازی شده و پارامترهای عملکردی آن مورد بررسی قرار گرفته است. در این شبیه‌سازی میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی و سرعت سیال به صورت سه‌بعدی در نظر گرفته شده و اثر ناهمسانی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر جریان انتهایی و عملکرد پیشرانه تحلیل شده است. به این منظور، یک موتور مگنتوهیدرودینامیکی نوعی با سیم‌پیچ‌های زینی شکل و ابعاد مشخص انتخاب شده و ساختار هندسی آن در محیط نرم‌افزار پیاده‌سازی گردیده است. جریان سیم‌پیچ‌های این موتور با روش سعی و خطا به نحوی تنظیم شده که چگالی شار مغناطیسی در فضای بین دو الکتروود دارای مقدار متوسط 15 T باشد و سپس موتور با اعمال ولتاژهای مختلف بین الکتروودهای آن شبیه‌سازی شده است. همچنین یک مدل تحلیلی ساده برای پیشرانه‌های MHD دریایی ارائه شده و نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از مدل عددی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که برخی از پارامترهای عملکردی موتور تحت تأثیر جریان‌های انتهایی کانال قرار نمی‌گیرند. این پارامترها که مهم‌ترین آنها سرعت سیال درون کانال است، تابعی از جریان الکتریکی مؤثر موتور هستند و می‌توان آنها را با استفاده از یک مدل تحلیلی ساده محاسبه نمود. در مقابل برخی از پارامترها موتور مانند بازده، تابعی از جریان الکتریکی واقعی موتور هستند و برای محاسبه آنها لازم است از یک شبیه‌سازی عددی دقیق و قابل اطمینان استفاده شود.

کلیدواژه‌ها: پیشرانه مگنتوهیدرودینامیکی، شبیه‌سازی سه‌بعدی، پارامترهای عملکردی، اثرات انتهایی، میدان مغناطیسی ناهمسان

۱- مقدمه

میدان الکتریکی ایجاد می‌شود. با اعمال پتانسیل الکتریکی به الکتروودهای تعبیه شده در دو طرف کانال، یون‌های سدیم و کلر موجود در آب دریا در راستای عمود بر خطوط میدان مغناطیسی حاصل از آهنربا شروع به حرکت می‌کنند. بنابراین مطابق قانون لورنتس، نیرویی در راستای متعامد بر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و در جهت مسیر کانال به یون‌ها وارد می‌شود. به علت وجود پیوندهای قطبی میان مولکول‌های آب و یون‌ها، مولکول‌های آب نیز در پی یون‌ها کشیده شده و موجب حرکت آب دریا می‌گردند. آب از درون کانال با فشار زیاد تخلیه شده و طبق قانون سوم نیوتن، شناور درخلاف جهت جابجایی آب به حرکت درمی‌آید.



شکل (۱): استفاده از قانون لورنتس در رانش دریایی [۱]

مبنای عملکرد سامانه رانش الکترومغناطیسی، قانون نیروی لورنتس است [۱]. نیرویی که از تلاقی میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی حاصل می‌شود. در سیستم رانش مغناطیسی، برهم‌کنش جریان ذرات باردار با میدان مغناطیسی، نیروی پیشران مورد نیاز برای حرکت را ایجاد می‌کند. این روش پیشران اصطلاحاً پیشران مگنتوهیدرودینامیکی (MHD) نیز نامیده می‌شود؛ زیرا در این نوع پیشران، علاوه بر پدیده‌های الکترومغناطیسی، پدیده‌های هیدرودینامیکی نیز به وقوع می‌پیوندد [۱]. برای استفاده از سیستم رانش مغناطیسی می‌توان از فلزات مایع و یا محلول‌های رسانای الکتریکی مانند آب دریا به عنوان سیال متحرک استفاده نمود. همانند پمپ‌ها [۲-۳] و ژنراتورهای مگنتوهیدرودینامیکی [۴-۶]، سیستم پیشران MHD نیز دارای یک کانال است. همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود، یک میدان الکتریکی توسط دو الکتروود در طرفین کانال و یک میدان مغناطیسی توسط یک آهنربای الکتریکی در راستای عمود بر

در سال ۲۰۰۵، مؤسسه مهندسی برق (IEE) در دانشکده علوم چین به شبیه‌سازی سه بعدی پیش‌رانه‌های MHD با کانال حلزونی پرداخت و نتایج شبیه‌سازی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمود. در این شبیه‌سازی نیز از مدل‌سازی تغییرات میدان مغناطیسی تولید شده توسط سیم‌پیچ ابررسانا صرف‌نظر شده و از یک پروفیل ثابت برای تعیین چگالی گشتاور درون کانال استفاده شده بود [۱۳].

در سال‌های اخیر عبدالله‌زاده و همکاران وی به حل تحلیلی معادلات دیفرانسیل جریان سیال درون کانال موتورها و پمپ‌های MHD در حالت گذرا پرداختند [۱۴، ۱۵]. در این مطالعات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی یکنواخت در نظر گرفته شده بود و امکان بررسی اثرات انتهایی کانال موتور وجود نداشت. علاوه بر این، در همه این تحلیل‌ها، جریان سیال درون کانال کاملاً توسعه‌یافته فرض شده و پروفیل سرعت به صورت سهموی در نظر گرفته شده بود. با این فرض، اعتبار این مدل به شناورهای دارای کانال طولانی (بزرگ‌تر از ۱۰۰ m) محدود شده امکان استفاده از آن برای تحلیل موتورهای منفرد، پمپ‌ها و شناورهای کوچک و متوسط وجود نداشت.

در مطالعات انجام شده توسط سایر محققین نیز اثر واقعی غیریکنواخت بودن میدان مغناطیسی بر عملکرد پیش‌رانه MHD دریایی در نظر گرفته نشده است و بنابراین، نیاز به یک مدل عددی دقیق و قابل اطمینان برای استخراج پارامترهای عملکردی این پیش‌رانه احساس می‌شود. در این مقاله، یک پیش‌رانه MHD دریایی نوعی به صورت عددی شبیه‌سازی شده و پارامترهای عملکردی آن مورد بررسی قرار گرفته است. در این شبیه‌سازی برای اولین بار میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی و سرعت سیال به صورت کاملاً سه بعدی تحلیل شده و اثر ناهمسانی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر عملکرد پیش‌رانه مد نظر قرار گرفته است. استفاده از این روش، بررسی دقیق اثر انتهایی کانال بر بازده و سایر پارامترهای عملکردی پیش‌رانه را امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین یک مدل تحلیلی ساده برای پیش‌رانه‌های MHD دریایی ارائه شده و نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از مدل عددی مقایسه شده است که در ادامه ابتدا این مدل تحلیلی معرفی شده و سپس نتایج شبیه‌سازی عددی ارائه می‌گردد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- معادلات تحلیلی موتور MHD دریایی

مدل تحلیلی ارائه‌شده در این قسمت تقریباً مشابه با مدل‌های مورد استفاده توسط دوراگ [۹] و هومرت [۸] است. در این

پیش‌رانش دریایی MHD دارای مزایای بسیاری نسبت به سیستم پروانه‌ای سنتی است. از جمله این مزایا، می‌توان به عملکرد انعطاف‌پذیرتر و هزینه سوخت کمتر اشاره کرد [۷]. پیش‌رانه‌های MHD دارای اصول عملکردی متفاوت از سیستم‌های پیش‌رانش پروانه‌ای هستند و به همین علت محدودیت‌های فیزیکی آنها نیز متفاوت است [۷]. به‌عنوان مثال، سرعت پروانه‌های مکانیکی توسط پدیده کاویتاسیون کاهش می‌یابد؛ اما پیش‌رانه MHD برخلاف پیش‌رانه‌های سنتی و جت‌های آبی، به هیچ قسمت گردانی نیاز ندارد و در نتیجه کمتر توسط پدیده کاویتاسیون تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۹-۸]. بنابراین، این پتانسیل وجود دارد که با استفاده از این سیستم، کشتی‌ها و زیردریایی‌ها با سرعت بیش‌تری حرکت کنند و به سطح بازدهی بالاتری دست یابند [۷ و ۹]. همچنین عدم وجود پروانه‌ی مکانیکی باعث کاهش میزان لرزش کشتی یا زیردریایی شده و بنابراین نویزهای مکانیکی تولید شده کاهش می‌یابد؛ پس انتظار می‌رود که این سیستم یک وسیله پیش‌رانشی مناسب با عملکرد کم‌صدا درون کشتی‌ها باشد [۷ و ۹]. به دلایل آشکاری می‌توان گفت که کشتی‌ها و زیردریایی‌های سریع و کم‌صدا مطلوب‌تر هستند و پیش‌رانش MHD دریایی می‌تواند در یک بازده زیاد به این اهداف دست یابد [۹].

برای تحلیل پدیده‌های فیزیکی درون کانال پیش‌رانه‌های MHD لازم است معادلات دینامیک سیال، معادلات ماکسول، قانون اهم و حتی معادلات مربوط به الکترولیز آب دریا به صورت همزمان تحلیل گردد. در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری برای حل همزمان این معادلات انجام شده است. فری‌آف، فیلیپس و هومرت با استفاده از مدل‌های تحلیلی یک بعدی به بررسی عملکرد پیش‌رانش MHD پرداختند. تمامی این مطالعات به این نتیجه انجامید که تنها با استفاده از یک آهنربا با میدان مغناطیسی بسیار بالا (۲۰ تا ۳۰ تسلا) می‌توان به یک بازده مناسب برای پیش‌رانه MHD دست یافت. لذا دوراگ در سال ۱۹۶۳ پیشنهاد داد که از آهنرباهای ابررسانا برای تولید میدان مغناطیسی در کشتی‌های الکترومغناطیسی استفاده شود [۱۱].

در خلال سال‌های ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۲، دوس و همکاران او با ارائه یک مدل سه بعدی از جریان سیال درون کانال MHD، اثر میدان‌های مغناطیسی قوی بر جریان سیال درون کانال MHD را به همراه اثرات دیواره‌ها و لایه‌های مرزی مورد مطالعه قرار دادند [۱۰-۱۱]. در این مدل، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی یک بعدی در نظر گرفته شده بود و امکان بررسی اثرات انتهایی کانال وجود نداشت. برای رفع این مشکل، این گروه یک مدل یک بعدی از جریان سیال را با یک مدل دو بعدی از میدان الکتریکی ترکیب کردند و به این وسیله اثر انتهایی کانال موتور MHD را مورد تحلیل قرار دادند [۹ و ۱۲].

ضریب افت جزئی ناشی از انقباض تدریجی نازل و K_{tot} ضریب افت معادل کانال است. بنابراین، فشار خالص ایجاد شده در دو طرف کانال موتور MHD برابر است با:

$$\Delta p = \Delta p_e - \Delta p_{loss} \quad (۶)$$

از طرف دیگر اگر دیواره نازل بدون اصطکاک فرض شود، افت فشار ایجاد شده در طول نازل با استفاده از قانون بقای انرژی و به صورت رابطه برنولی نمایش داده می شود:

$$\Delta p_{nozz} = \frac{1}{2} \rho (v_{ex}^2 - v_{in}^2) \quad (۷)$$

که در این رابطه، v_{in} سرعت سیال در ورودی نازل است. از آنجایی که انبساط آب دریا در اثر افزایش دمای ناشی از وقوع تلفات اهمی بسیار ناچیز است، می توان آن را تراکم ناپذیر در نظر گرفت و با استفاده از قانون بقای جرم، دبی ورودی و خروجی کانال را برابر فرض کرد.

$$Q = v_{in} A_{in} = v_{ex} A_{ex} \rightarrow \alpha = \frac{v_{ex}}{v_{in}} = \frac{A_{in}}{A_{ex}} \quad (۸)$$

که در این رابطه، α نسبت سطح مقطع ورودی به سطح مقطع خروجی نازل است. در این حالت با جایگذاری مقدار v_{in} از رابطه فوق، معادله (۷) به صورت زیر بازنویسی می شود:

$$\Delta p_{nozz} = \frac{1}{2} \rho v_{ex}^2 \left(1 - \frac{1}{\alpha^2} \right) \quad (۹)$$

با برابر قرار دادن اختلاف فشار دو سر کانال MHD و اختلاف فشار دو سر نازل می توان سرعت حرکت آب درون کانال موتور MHD را محاسبه نمود. با مشخص شدن v_{ex} ، سایر متغیرهای موتور نیز قابل محاسبه هستند.

اکنون می توان به بررسی مکانیزم تبدیل انرژی و وقوع تلفات در موتورهای MHD پرداخت. توان الکتریکی ورودی در یک موتور MHD، توان خالصی است که از منبع تغذیه الکتریکی دریافت می شود و مقدار آن در حالت دائم از رابطه ی زیر به دست می آید:

$$P_{in} = U_0 I \quad (۱۰)$$

در این رابطه، U_0 و I به ترتیب ولتاژ و جریان منبع تغذیه الکترودها هستند.

تحلیل تمام مشخصات الکترومغناطیسی و سیالاتی آب دریا ثابت فرض می شود. شکل (۱)، کانال یک پیشرانه MHD با میدان مغناطیسی و جریان الکتریکی یکنواخت را نمایش می دهد. برای این موتور، نیروی لورنتز در واحد حجم از رابطه زیر به دست می آید:

$$\vec{F}_V = \vec{J} \times \vec{B} \quad (۱)$$

که در این رابطه، J چگالی جریان و B میدان مغناطیسی اعمالی است. با اعمال این نیرو، آب درون کانال موتور شروع به حرکت می کند. این حرکت باعث القای یک ولتاژ در راستای عمود بر جهت سرعت و جهت میدان الکتریکی درون کانال می گردد. بنابراین، چگالی جریان الکتریکی (J) درون سیال از رابطه (۲) محاسبه می گردد:

$$J = \sigma E = \sigma (E_0 - E_t - v_{ex} B) \quad (۲)$$

که در این رابطه، در این رابطه، E_0 میدان الکتریکی خارجی اعمال شده به الکترودها، E_t افت میدان ناشی از اثرات الکتروشیمیایی، E میدان الکتریکی معادل، v_{ex} سرعت آب درون کانال و σ رسانایی الکتریکی سیال است.

اکنون با استفاده از روابط (۱) و (۲) می توان چگالی نیروی الکترومغناطیسی را به صورت زیر نوشت:

$$F = \sigma (E_0 - E_t - v_{ex} B) B \quad (۳)$$

بنابراین، فشار الکترومغناطیسی که توسط موتور MHD ایجاد می شود برابر است با:

$$\Delta p_e = FL_1 = \sigma (E_0 - E_t - v_{ex} B) BL_1 \quad (۴)$$

که در این رابطه، L_1 طول الکترودهای موتور است. بخشی از فشار ایجاد شده توسط نیروی لورنتس به دلیل وجود اصطکاک بر روی دیواره ی کانال موتور و بخش دیگر در هنگام ورود سیال به کانال و خروج از آن تلف می شود. مقدار افت فشار ناشی از اصطکاک دیواره (Δp_{loss}) را می توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\Delta p_{loss} = \left(f_{eq} \frac{L}{D_H} + K \right) \frac{\rho v_{ex}^2}{2} = K_{tot} \frac{\rho v_{ex}^2}{2} \quad (۵)$$

که در این رابطه، f_{eq} ضریب اصطکاک دارسی معادل الکترودها و دیواره کانال، L طول کانال، D_H قطر هیدرولیکی کانال، K

جزئی درون کانال موتور MHD است و از حاصل ضرب افت فشار درون کانال در دبی جریان سیال به دست می‌آید:

$$P_h = \Delta p_{loss} Q = K_{tot} \frac{\rho}{2} A_{ex} v_{ex}^3 \quad (13)$$

توان خروجی (P_{ex})، توان خالصی است که در موتور به کار مفید تبدیل می‌شود و مقدار آن به نوع بار مکانیکی موتور بستگی دارد. مقدار این توان را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$P_{ex} = P_{in} - (P_c + P_o + P_h) \quad (14)$$

اکنون می‌توان سه نوع بازده برای پیشرانه MHD تعریف نمود: بازده الکتروشیمیایی، بازده الکتریکی و بازده کلی. این سه نوع بازده به ترتیب از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\eta_{elec-chem} = \frac{P_{in} - P_c}{P_{in}} \quad (15)$$

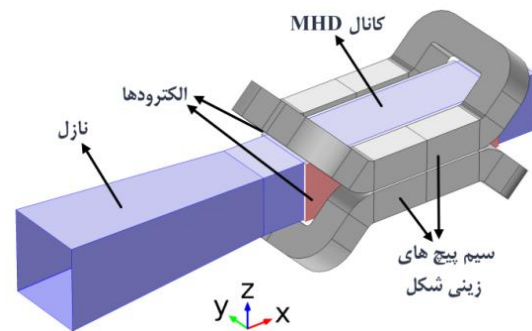
$$\eta_{elec} = \frac{P_{in} - (P_c + P_o)}{P_{in}} \quad (16)$$

$$\eta_{tot} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (17)$$

۲-۲- مشخصات مدل

در شکل (۲)، ساختار هندسی موتور MHD شبیه‌سازی شده در این مقاله نمایش داده شده است. این موتور که اصطلاحاً موتور مرجع نامیده می‌شود، دارای چهار قسمت اصلی است: زوج سیم‌پیچ زمین‌اسی شکل، الکترودها، کانال عبور جریان آب و نازل ورودی. سطح مقطع کانال این موتور $34 \times 34 \text{ cm}^2$ ، طول الکترودهای آن 125 cm و طول کانال آن 176 cm است. طول نازل موتور برابر 125 cm و نسبت ورودی به خروجی آن برابر ۲ در نظر گرفته شده است. در شکل ۲، مبدأ مختصات بر روی مرکز کانال قرار دارد. سایر مشخصات مدل نیز در جدول (۱) آورده شده است. در این شبیه‌سازی، جریان سیم‌پیچ میدان با روش سعی و خطا به نحوی تنظیم شده که چگالی شار مغناطیسی در فضای بین دو الکترودها دارای مقدار متوسط 15 T باشد. فرض می‌شود که سیم‌پیچ ابررسانا قابلیت تحمل جریان الکتریکی لازم برای ایجاد این میدان مغناطیسی را دارا باشد. توجه به این نکته ضروری است که ساختار نمایش داده شده در شکل (۲) یک ساختار فرضی بوده و به هیچ عنوان نشان دهنده یک طرح بهینه برای پیشرانه MHD دریایی نیست.

شبیه‌سازی عددی موتور مرجع در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics 5.2 و با استفاده از 189353 مش حجمی انجام شده است. در این شبیه‌سازی معادلات ماکسول، قانون اهم و معادلات ناوییر-استوکس با عدد رینولدز میانگین به صورت همزمان تحلیل شده و به منظور مدل‌سازی تلاطم سیال درون



شکل (۲): ساختار هندسی پیاده‌سازی شده در نرم‌افزار کامسول برای موتور MHD مرجع

جدول (۱): مشخصات عملکردی موتور MHD مرجع

مقدار	پارامتر
۳۰۰	دمای شبیه‌سازی (K)
۱/۵	فشار محیط (atm)
۳	افت ولتاژ الکتروشیمیایی (V)
۵/۵	رسانایی الکتریکی آب دریا ($S.m^{-1}$)
۱	نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آب دریا
۱۰۲۴	چگالی آب دریا ($kg.m^{-3}$)
۰/۰۰۱	ویسکوزیته آب دریا (Pa.s)
۰/۱۵	زبری نسبی الکترودها (mm)
۰/۰۰۱۵	زبری نسبی دیواره‌ها (mm)

تلفات توان الکتروشیمیایی در سطح الکترودها (P_c) از وقوع پدیده‌ی الکترولیز بین الکترودها و آب دریا ناشی می‌شود. برای آغاز حرکت ذرات باردار درون محلول یونی، لازم است ولتاژ از ولتاژ آستانه هدایت الکترودها بیشتر گردد. اگر این ولتاژ با U_t نمایش داده شود، مقدار تلفات ناشی از آن را می‌توان از رابطه زیر استخراج نمود:

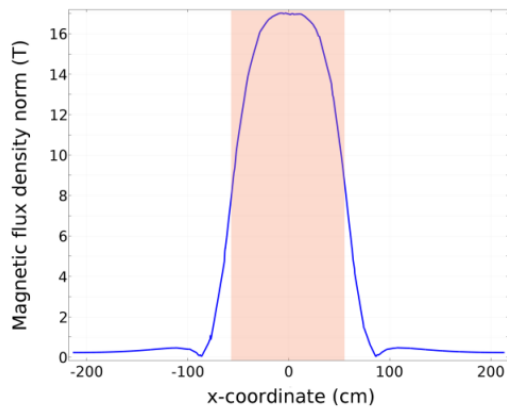
$$P_c = U_t I \quad (11)$$

تلفات اهمی (P_o) در موتور MHD دریایی به دلیل مقاومت الکتریکی آب دریا در برابر عبور جریان الکتریکی اتفاق می‌افتد. رسانایی الکتریکی آب دریا بسیار کم‌تر از فلزات است. به همین دلیل تلفات اهمی بخش عمده تلفات در موتور MHD دریایی را تشکیل می‌دهد. مقدار این تلفات از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

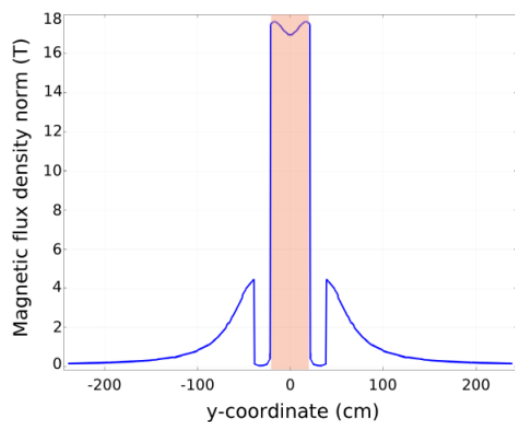
$$P_o = \int_{V_{MHD}} \frac{J^2}{\sigma} dV \quad (12)$$

که در این رابطه، VMHD حجم ناحیه فعال کانال موتور MHD دریایی است.

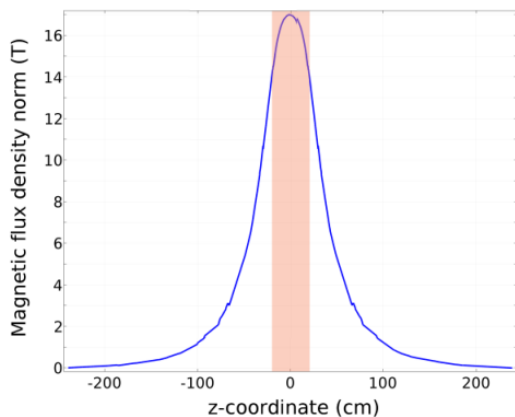
تلفات هیدرولیکی (P_h) برابر مجموع تلفات اصطکاک و تلفات



شکل (۴): پروفیل اندازه چگالی شار مغناطیسی بر روی محور x



شکل (۵): پروفیل اندازه چگالی شار مغناطیسی بر روی محور y



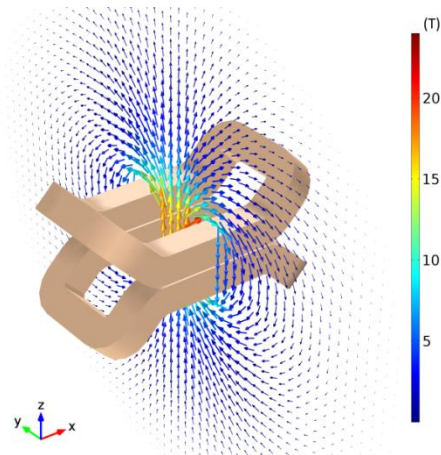
شکل (۶): پروفیل اندازه چگالی شار مغناطیسی بر روی محور z

در شکل (۷) توزیع پتانسیل الکتریکی در کانال موتور MHD مرجع به همراه خطوط هم‌پتانسیل نشان داده شده است که از ولتاژ خارجی اعمال شده به الکترودها ناشی می‌شود و ولتاژ القایی درون کانال را نمایش نمی‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، پتانسیل الکتریکی اعمال شده به کاتد و آند به ترتیب برابر صفر و ۵۰۰ V است. البته پتانسیل آند به اندازه ۳ V از مقدار ۵۰۰ V کمتر است که از افت ولتاژ الکتروشیمیایی ناشی می‌شود.

کانال، مدل آشفته k-ε مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به ورودی‌های داده شده به برنامه و حل آنها توسط نرم‌افزار، در این قسمت نتایج خروجی از نرم‌افزار ارائه می‌شود. هدف نهایی از شبیه‌سازی موتور MHD دریایی، مشاهده‌ی پارامترهای الکتریکی، مغناطیسی و سیالاتی موتور در یک ولتاژ ثابت و استخراج پارامترهای عملکردی آن است. این پارامترهای عملکردی شامل نمودارهای توان، تلفات، بازده، فشار، نیرو و ... بر حسب سرعت سیال و ولتاژ اعمال شده به الکترودها هستند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳- نتایج و بحث

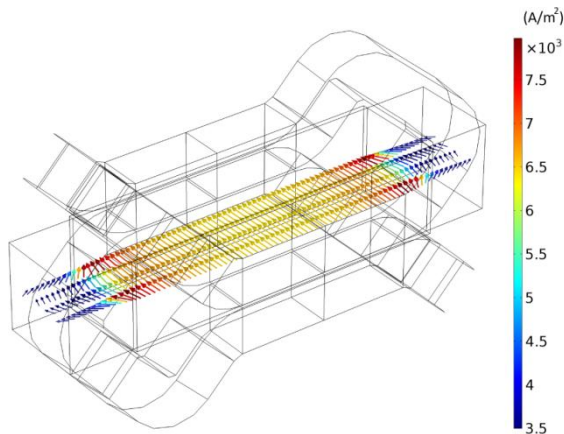
در شکل (۳)، توزیع برداری شار مغناطیسی در صفحه yz نمایش داده شده است. در این شکل طول هر بردار متناسب با لگاریتم اندازه چگالی شار مغناطیسی بوده و رنگ هر بردار اندازه چگالی شار مغناطیسی را تعیین می‌کند. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، جهت میدان مغناطیسی در مرکز سیم‌پیچ به سمت بالا و اندازه چگالی شار مغناطیسی در مرکز سیم‌پیچ تقریباً ثابت است. این میدان مغناطیسی با اعمال یک جریان DC برابر با ۶۶۰۰ kA.t به هر یک از دو سیم‌پیچ زینی شکل به دست می‌آید.



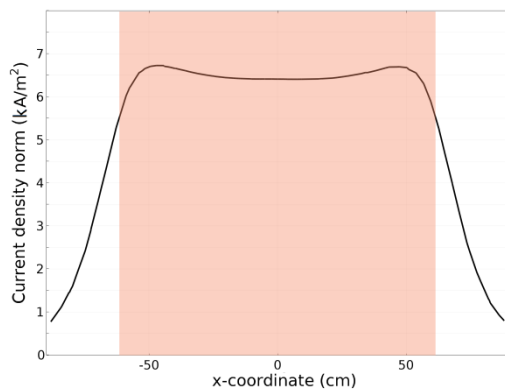
شکل (۳): چگالی شار مغناطیسی سیم‌پیچ ابرسانا در صفحه‌ی yz

شکل‌های (۴-۶)، پروفیل اندازه چگالی شار مغناطیسی را به ترتیب بر روی محورهای x، y و z نمایش می‌دهند. بر روی این سه شکل، بخشی از منحنی که درون کانال موتور قرار می‌گیرد سایه زده شده است. با توجه به این سه شکل می‌توان میدان مغناطیسی درون کانال در راستای محورهای y و z را با تقریب خوبی یکنواخت در نظر گرفت. ملاحظه می‌شود که میدان مغناطیسی با حرکت از مرکز کانال به سمت الکترودها به مقدار جزئی افزایش (شکل (۵)) و با حرکت به سمت دیواره‌های غیرالکترودی (شکل (۶)) به مقدار جزئی کاهش می‌یابد.

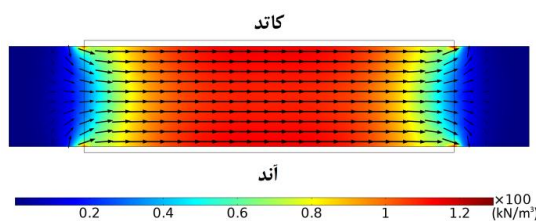
ثابت باشد. بنابراین، سرعت سیال درون نازل موتور با کاهش سطح مقطع نازل افزایش می‌یابد. این مسئله به خوبی در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود؛ مثلاً از آنجایی که سطح مقطع ورودی نازل دو برابر سطح مقطع خروجی آن است، سرعت در خروجی نازل دو برابر سرعت ورودی آن می‌شود.



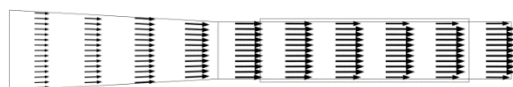
شکل (۸): چگالی جریان الکتریکی درون کانال موتور MHD مرجع



شکل (۹): پروفیل چگالی جریان الکتریکی درون کانال موتور MHD مرجع در راستای محور کانال

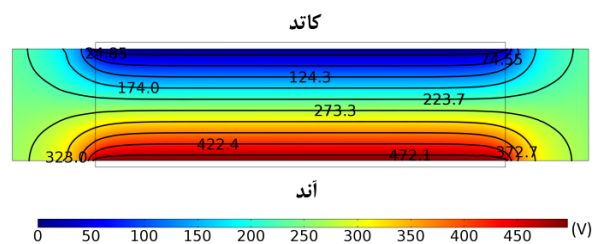


شکل (۱۰): چگالی نیروی الکترومغناطیسی بر روی صفحه XY درون کانال موتور MHD مرجع



شکل (۱۱): میدان سرعت سیال درون کانال و نازل موتور MHD مرجع

در شکل (۸)، توزیع برداری چگالی جریان الکتریکی درون کانال موتور MHD مرجع نمایش داده شده است. در این شکل، طول هر بردار متناسب با لگاریتم اندازه چگالی جریان الکتریکی است. همان‌طور که دیده می‌شود، جهت بردارهای چگالی جریان الکتریکی درون کانال از آند به سمت کاتد بوده و اندازه آن در قسمت میانی کانال تقریباً ثابت است. علاوه بر این، چگالی جریان الکتریکی با نزدیک شدن به انتهای الکترودها اندکی افزایش می‌یابد. این پدیده اصطلاحاً اثر انتهایی نامیده می‌شود که علت آن کاهش میدان مغناطیسی در ورودی و خروجی کانال است. با کم شدن میدان مغناطیسی در ورودی و خروجی کانال، ولتاژ ضد محرکه الکتریکی در این نواحی کاهش یافته و باعث افزایش جریان می‌شود. در شکل (۹) می‌توان این پدیده را به وضوح مشاهده کرد. در این شکل که پروفیل چگالی جریان الکتریکی درون کانال موتور MHD مرجع در راستای محور کانال نشان داده شده است، چگالی جریان با نزدیک شدن به انتهای کانال ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در این شکل ناحیه سایه زده شده محدوده‌ای از کانال را نشان می‌دهد که بین الکترودها قرار می‌گیرد.

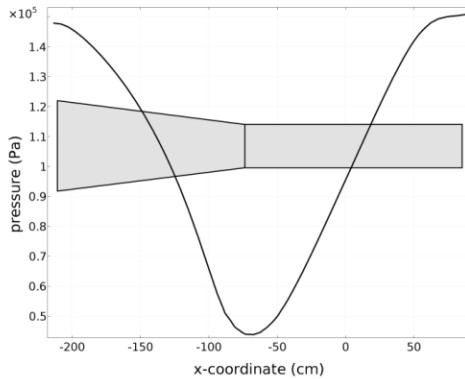


شکل (۷): توزیع پتانسیل الکتریکی در کانال موتور MHD مرجع به همراه خطوط هم‌پتانسیل

در شکل (۱۰)، توزیع چگالی نیروی الکترومغناطیسی درون کانال موتور MHD مرجع در صفحه XY و با اعمال ولتاژ ۵۰۰ V به الکترودهای آن نمایش داده شده است. در این شکل، طول هر بردار متناسب با لگاریتم اندازه چگالی نیروی الکترومغناطیسی است. همان‌طور که دیده می‌شود، جهت بردارهای چگالی نیرو درون کانال در راستای محور X یعنی از ورودی به سمت خروجی است و اندازه آن در قسمت میانی کانال تقریباً ثابت است. این نیرو که از ضرب چگالی جریان الکتریکی در چگالی شار مغناطیسی به دست می‌آید، باعث حرکت سیال درون کانال موتور MHD می‌گردد.

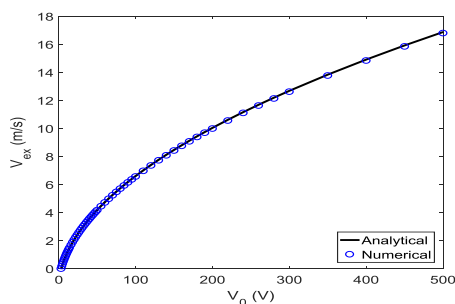
مهم‌ترین پارامتر سیالاتی موتور MHD دریایی، میدان سرعت سیال درون کانال و نازل موتور است. توزیع برداری این پارامتر در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. با توجه به ثابت بودن چگالی آب دریا، لازم است دبی سیال نیز در تمام مقاطع کانال و نازل

می‌شود، فشار در ورودی و خروجی کانال با فشار محیط (atm) برابر بوده و حداقل فشار در مجموعه کانال و نازل موتور حدود ۴۰ kPa است. این حداقل فشار که در ورودی کانال موتور روی می‌دهد، از فشاربخار سیال در دمای کار بسیار بیشتر است و بنابراین احتمال وقوع پدیده حفره‌زایی منتفی است.



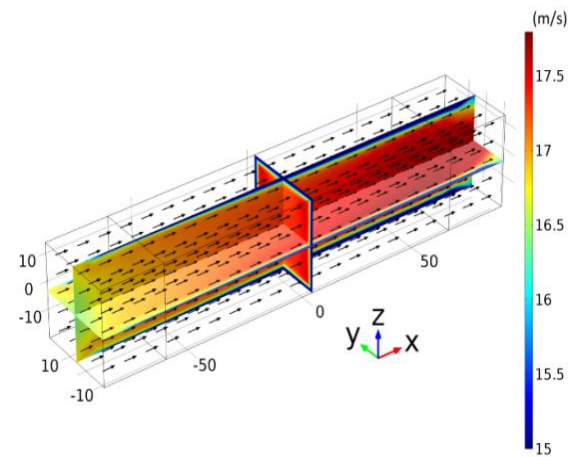
شکل (۱۳): پروفیل فشار بر روی محور کانال و نازل موتور MHD مرجع (محور x)

در شکل (۱۴)، نمودارهای سرعت متوسط سیال در کانال موتور MHD مرجع که با استفاده از دو مدل تحلیلی و عددی به دست آمده‌اند، به عنوان تابعی از ولتاژ اعمال شده به الکترودهای موتور نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، نتایج حاصل از دو مدل تطابق بسیار خوبی با یکدیگر دارند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که اولاً مدل‌های عددی و تحلیلی استخراج شده برای موتور MHD صحیح بوده و عملکرد موتور را به درستی مدل‌سازی می‌نمایند. ثانیاً می‌توان مشاهده نمود که سرعت موتور تابعی رادیکالی از ولتاژ اعمال شده به الکترودها است. این مسئله را می‌توان از برابر قرار دادن روابط (۶) و (۷) نیز پیش‌بینی نمود. اکنون این سوال مطرح می‌شود که با وجود این تطابق دقیق میان سرعت به دست آمده از مدل‌های عددی تحلیلی، آیا همچنان نیازی به اجرای شبیه‌سازی‌های عددی پیچیده و زمان‌بر وجود دارد؟ برای پاسخ به این سوال لازم است جریان الکتریکی موتور نیز مورد بررسی قرار گیرد.



شکل (۱۴): سرعت موتور MHD مرجع به عنوان تابعی از ولتاژ اعمال شده به الکترودهای آن

شکل (۱۲) نیز توزیع برداری سرعت سیال و اندازه میدان سرعت را درون کانال موتور MHD مرجع و با اعمال ولتاژ ۵۰۰ V به الکترودهای آن نمایش می‌دهند. همان‌طور که در این شکل به وضوح دیده می‌شود، سرعت سیال در کنار دیواره کانال از سرعت سیال در قسمت میانی کانال کمتر است. این اثر اصطلاحاً اثر دیواره نامیده می‌شود که از وجود نیروی ویسکوز بین دیواره کانال و سیال جاری درون آن ناشی می‌گردد. وجود این نیرو باعث می‌شود که در شرایط عملی، سرعت متوسط سیال در کنار دیواره کانال برابر صفر شود. همچنین ملاحظه می‌شود که با حرکت از ابتدای کانال به سمت انتهایی آن، سرعت در قسمت میانی کانال افزایش و در کنار دیواره‌های کانال کاهش می‌یابد.

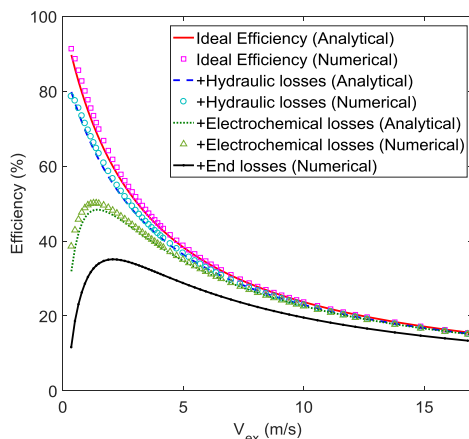


شکل (۱۲): توزیع برداری سرعت سیال و اندازه میدان سرعت درون کانال موتور MHD مرجع

پس از سرعت، مهم‌ترین پارامتر در تحلیل سیالاتی فشار است. در جریان‌های با سرعت کم، مانند جریان آب دریا در کانال موتور MHD دریایی، اندازه واقعی فشار مورد توجه قرار نمی‌گیرد، مگر آن‌که افت فشار آنقدر زیاد باشد که باعث وقوع پدیده حفره‌زایی و تشکیل حباب گردد. اگر فشار یک سیال از فشار بخار آن کمتر گردد، حباب‌های بخار در سیال ظاهر می‌شود و حفره‌زایی روی می‌دهد. در این مقاله، دمای آب برابر ۳۰۰ K در نظر گرفته شده است. در این دما فشاربخار آب حدود ۲ kPa است. پس باید توجه شود که در کانال موتور MHD دریایی، فشار از ۲ kPa کمتر نگردد؛ در غیر این صورت، پدیده حفره‌زایی روی داده و حباب‌های بخار در درون سیال تولید می‌شود. وقتی این حباب‌ها وارد یک ناحیه‌ی پرفشار می‌شوند، با سر و صدا گسیخته شده و ضمن ایجاد نویزهای صوتی، الکترودهای فلزی را تخریب می‌نمایند.

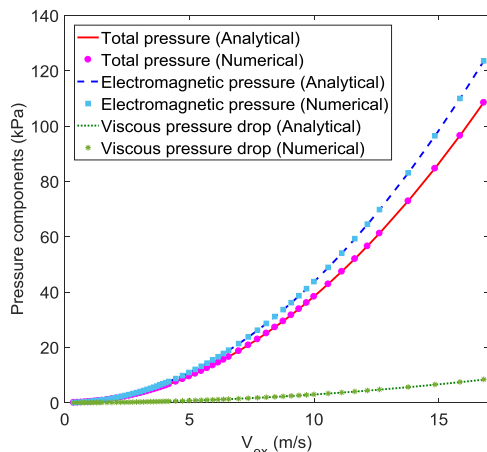
شکل (۱۳) پروفیل فشار بر روی محور کانال و نازل موتور MHD مرجع را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده

نمودارهای به‌دست‌آمده از مدل عددی مقایسه کرد. همان‌طور که دیده می‌شود، چنانچه در محاسبه بازده با استفاده از مدل عددی، تلفات انتهایی کانال در نظر گرفته نشود، بازده مستخرج از مدل عددی و مدل تحلیلی با تقریب خوبی بر هم منطبق خواهند بود. اما چنانچه تلفات انتهایی کانال در محاسبه بازده به حساب آورده شود، بازده موتور به میزان قابل توجهی کاهش خواهد یافت. علت این مسئله وابستگی بازده موتور MHD به جریان واقعی موتور است.



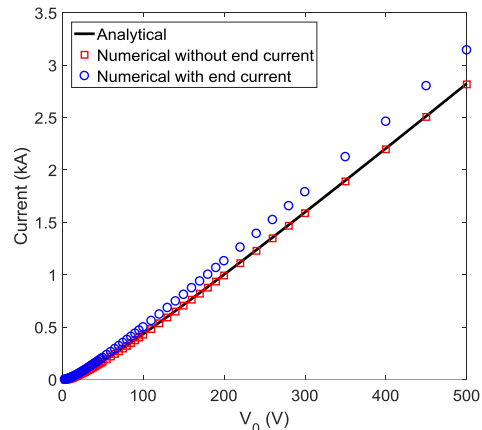
شکل (۱۶): نمودار بازده موتور MHD مرجع به عنوان تابعی از سرعت سیال درون کانال موتور

در مقابل، شکل (۱۷) مؤلفه‌های فشار در کانال موتور MHD مرجع را نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌شود که نتایج حاصل از مدل‌های عددی و تحلیلی کاملاً بر هم منطبق هستند که علت آن وابستگی فشار به جریان الکتریکی مؤثر موتور است که جریان‌های انتهایی کانال نقشی در تعیین آن ندارند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که اثرات انتهایی کانال تأثیری بر فشار درون کانال موتور MHD نخواهد داشت.



شکل (۱۷): نمودار مؤلفه‌های مختلف فشار در کانال موتور MHD مرجع به عنوان تابعی از سرعت سیال درون کانال موتور

شکل (۱۵)، جریان الکتریکی را به عنوان تابعی از ولتاژ اعمال شده به الکترودها و سرعت سیال درون کانال نمایش می‌دهد. با توجه به این‌که در مدل تحلیلی اثر انتهایی کانال در نظر گرفته نمی‌شود، نمودار به‌دست‌آمده از این مدل بر آن نموداری از مدل عددی منطبق می‌شود که در آن جریان انتهایی کانال در نظر گرفته نشده است. این جریان اصطلاحاً جریان مؤثر موتور نامیده می‌شود.



شکل (۱۵): جریان الکتریکی موتور MHD مرجع به عنوان تابعی از ولتاژ اعمال شده به الکترودها

با مقایسه شکل‌های (۱۵-۱۴) این نکته بسیار مهم به دست می‌آید که اگرچه جریان انتهایی کانال موتور باعث بیشتر شدن جریان مستخرج از مدل عددی نسبت به جریان مستخرج از مدل تحلیلی می‌شود، اما سرعت به‌دست‌آمده از هر دو مدل تقریباً برابر است. پس می‌توان نتیجه گرفت که جریان انتهایی تأثیر چندانی بر توان خروجی موتور نداشته و تنها باعث افزایش تلفات آن می‌شود. بنابراین، برای محاسبه دقیق سرعت یک پیش‌رانه MHD دریایی می‌توان از مدل تحلیلی استفاده نمود، اما این مدل نمی‌تواند برای تخمین دقیق بازده موتور مورد استفاده قرار گیرد. در نتیجه برای محاسبه بازده پیش‌رانه، لازم است یک تحلیل عددی دقیق اجرا گردد. علاوه بر این می‌توان بیان داشت که برای محاسبه پارامترهایی از موتور که تابعی از سرعت و یا جریان الکتریکی مؤثر آن هستند، می‌توان از یک مدل تحلیلی ساده استفاده نمود. از جمله این پارامترها می‌توان به تلفات هیدرولیکی، توان خروجی، نیروی الکترومغناطیسی، نیروی ویسکوز و افزایش فشار درون کانال موتور اشاره کرد. اما برای محاسبه پارامترهایی مانند توان ورودی، تلفات الکتروشیمیایی، تلفات اهمی و بازده که تابعی از جریان واقعی موتور هستند، لازم است از یک مدل عددی دقیق و قابل اطمینان استفاده نمود.

برای اثبات این ادعا، در شکل (۱۶)، بازده موتور MHD مرجع به عنوان تابعی از سرعت سیال درون کانال نمایش داده شده است. در این شکل می‌توان نمودارهای به‌دست‌آمده از مدل تحلیلی را با

- [5] Y. Haiqi and Z. Miaoyong, "Three-dimensional magnetohydrodynamic calculation for coupling multiphase flow in round billet continuous casting mold with electromagnetic stirring," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 46, no. 1, pp. 82-86, 2010.
- [6] G. Yoshikawa, K. Hirata, and F. Miyasaka, "Numerical analysis of electromagnetic levitation of molten metal employing MPS method and FEM," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, no. 5, pp. 1394-1397, 2011.
- [7] D. Mitchell and D. Gubser, "Magnetohydrodynamic ship propulsion with superconducting magnets," Journal of Superconductivity, vol. 1, no. 4, pp. 349-364, 1988.
- [8] K. Nishigaki et al., "Elementary study on superconducting electromagnetic ships with helical insulation wall," Cryogenics, vol. 40, no. 6, pp. 353-359, 2000.
- [9] E. Doss and H. Geyer, "The need for superconducting magnets for MHD seawater propulsion," 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1990.
- [10] E. Doss and G. Roy, "Effects of strong magnetic field on flow characteristics of MHD seawater propulsion system," Argonne National Lab., IL (USA), 1989.
- [11] E. Doss and G. ROY, "Flow characteristics inside MHD seawater thrusters," Journal of Propulsion and Power, vol. 7, no. 4, pp. 635-641, 1991.
- [12] E. Doss and H. Geyer, "Effects of friction and end losses on MHD thruster efficiency," proceedings of the 28th engineering aspects of magnetohydrodynamic, 1990.
- [13] H. Jiang, Y. Peng, L. Zhao, C. Sha, Z. Lin, and R. Li, "Three-dimensional numerical simulation on helical channel MHD thruster," IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008.
- [14] M. A. Jamalabadi, "Analytical study of magnetohydrodynamic propulsion stability," Journal of Marine Science and Application, vol. 13, no. 3, pp. 281-290, 2014.
- [15] M. A. Jamalabadi, "Effects of Micro-and Macro-Scale Viscous Dissipations with Heat Generation and Local Thermal Non-Equilibrium on Thermal Developing Forced Convection in Saturated Porous Media," Journal of Porous Media, vol. 18, no. 9, 2015.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، یک پیشرانه مگنتوهیدرودینامیکی دریایی برای اولین بار به صورت کاملاً سه بعدی شبیه سازی شد و پارامترهای عملکردی آن مورد بررسی قرار گرفت. در این شبیه سازی میدان های الکتریکی، مغناطیسی و سرعت سیال به صورت سه بعدی در نظر گرفته شد و اثر ناهمسانی میدان های الکتریکی و مغناطیسی بر جریان انتهایی و عملکرد پیشرانه تحلیل گردید. همچنین اثر کنترلر آب دریا با در نظر گرفتن یک افت ولتاژ ثابت مد نظر قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهند که برخی از پارامترهای عملکردی موتور تحت تأثیر جریان های انتهایی کانال قرار نمی گیرند. این پارامترها که مهم ترین آنها سرعت سیال درون کانال است، تابعی از جریان الکتریکی مؤثر موتور هستند و می توان آنها را با استفاده از یک مدل تحلیلی ساده محاسبه نمود. در مقابل برخی از پارامترها موتور مانند بازده، تابعی از جریان الکتریکی واقعی موتور هستند و برای محاسبه آنها لازم است از یک شبیه سازی عددی دقیق و قابل اطمینان استفاده شود. پس می توان نتیجه گرفت که جریان انتهایی تأثیر چندانی بر توان خروجی موتور نداشته و تنها باعث افزایش تلفات آن می شود. بنابراین، می توان بیان داشت که چنانچه در محاسبه بازده با استفاده از مدل عددی، تلفات انتهایی کانال در نظر گرفته نشود، بازده مستخرج از مدل عددی و مدل تحلیلی با تقریب خوبی بر هم منطبق خواهند بود. اما چنانچه تلفات انتهایی کانال در محاسبه بازده به حساب آورده شود، بازده موتور به میزان قابل توجهی کاهش خواهد یافت. این کاهش که در سرعت های کم بیشتر خود را نشان می دهد، از وابستگی بازده موتور MHD به جریان واقعی موتور ناشی می شود.

۵- مراجع

- [1] M. Haghparast, "Transient Analysis of magnetohydrodynamic seawater thrusters with decaying magnetic field," Ships and Offshore Structures, vol. 12, no. 5, pp. 591-598, 2017.
- [2] I. Kirillov and D. Obukhov, "Two dimensional model for analysis of cylindrical linear induction pump characteristics: model description and numerical analysis," Energy conversion and management, vol. 44, no. 17, pp. 2687-2697, 2003.
- [3] S. S. Katsnelson and G. A. Pozdnyakov, "Experimental study of a centrifugal conductive MHD pump," IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 40, no. 12, pp. 3528-3532, 2012.
- [4] M. Mesurole, Y. Lefèvre, and C. Casteras, "Electric vector potential formulation to model a magnetohydrodynamic inertial actuator," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 52, no. 3, pp. 1-4, 2016.

Finite Element Analysis of Magnetohydrodynamic Propulsion and the Effect of End Electric Current on the Efficiency

M. Haghparast, M. R. Alizadeh Pahlavani*, D. Azizi

Malek-Ashtar University of Technology

(Received: 15/05/2017, Accepted: 13/01/2018)

Abstract

In this paper, a marine magnetohydrodynamic thruster is simulated three dimensionally and its operating parameters are obtained. In this simulation, both electromagnetic and fluid flow fields are considered in three dimensions and the effects of magnetic field non-uniformity on the operating parameters of the thruster are investigated. To do this, a typical saddle shaped MHD thruster with specific dimensions is selected and its geometry is implemented in the software environment. The electric current of superconducting coils is selected using a trial-and-error method, in such a way that the average magnetic flux density in the channel becomes 15 T. An analytical model is used to validate the numerical results. It is shown that some of the operating parameters of MHD thruster, such as fluid velocity, are not affected by the end current of the channel. These parameters are functions of the effective electric current of the thruster and can be calculated analytically. On the contrary, other parameters, such as efficiency, are strongly influenced by the end effects of the channel. These operating parameters are functions of the overall electric current of the thruster and should be calculated numerically.

Keywords: Magnetohydrodynamic Thruster, Three Dimensional Simulations, Operating Parameters, End Effects, Non-Uniform Magnetic Field

* Corresponding author E-mail: Mr_Alizadehp@mut.ac.ir