

بررسی اثر پارامترهای موتور القایی خطی در بهینه‌سازی طراحی موتور بر اساس روش اجزاء محدود

مهرداد جعفربلند^۱، عبدالامیر نکوبین^۲

۱- استادیار، دانشکده برق دانشگاه صنعتی مالک اشتر، J_mehrdad405@hotmail.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجفآباد، nekoubin@yahoo.com

چکیده

پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد موتور القایی خطی از جمله فاصله هوایی، ضخامت ثانویه و تعداد قطبها باید به گونه‌ای انتخاب و بهینه‌سازی شود تا ضریب توان و عملکرد موتور به طور قابل توجهی افزایش یابد، در این مقاله یک موتور القایی خطی در شرایط مختلف طراحی و سپس به روش اجزای محدود و با استفاده از نرم‌افزار Maxwell مورد تحلیل الکترومغناطیسی قرار گرفته است و برای مقایسه روش عددی و روش تحلیلی در شبیه‌سازی موتور، یک موتور القایی خطی با استفاده از نرم‌افزار Matlab در شرایط متفاوت شبیه‌سازی شده است. از نتایج حاصل مشخص است با تعیین مقدار بهینه پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد موتور القایی خطی، موتور در مدت زمان کوتاهی به حالت ثابت رسیده است و تلفات انرژی در موتور کاهش یافته و راندمان موتور افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی

موتور القایی خطی، اجزای محدود، ضخامت ثانویه، فاصله هوایی، طراحی بهینه، تعداد قطبها

۱- مقدمه

سنکرون خطی و موتور پله‌ای خطی، در میان این موتورها موتور القایی خطی دارای مزایای زیادی از جمله نیروی راه‌انداز زیاد، کم بودن تلفات مکانیکی و عملکرد با سرعت بالا و صدای پایین است [۱ و ۴]. در موتور القایی خطی (LIM) به جای استفاده از رتور قفسه سنجایی یک ورقه هادی (معمولاً آلومینیومی) نقش رتور را ایفا می‌کند. موتورهای القایی خطی را می‌توان به دو گروه موتور خطی یک‌طرفه (اولیه در یک طرفه ثانویه قرار دارد) و موتور خطی دو طرفه (اولیه در دو طرف ثانویه قرار دارد) تقسیم کرد. یکی از کاربردهای موتور القایی خطی دو طرفه در سیستم تست حوضچه انواع شناورها و پرنده‌های دوزیست هوا دریاست. توسط موتور خطی می‌توان وضعیت آیرودینامیک پرنده‌ها و یا

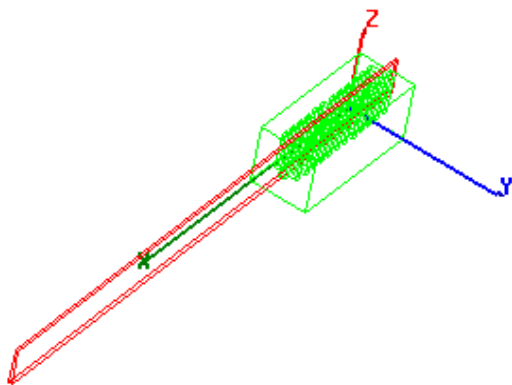
در موتورهای خطی به جای حرکت دورانی با حرکت انتقالی یا خطی مواجه هستیم، اگر یک موتور دوار را برش دهیم و آن را از حالت مدور خارج نمود، تسطیح نمائیم، موتور خطی حاصل می‌شود. برای موتورهای خطی به جای استاتور از لفظ اولیه و به جای رتور از کلمه ثانویه استفاده می‌نمائیم [۱]. در موتور دوار اگر منبع سه فاز به استاتور وصل شود شارگردان در شکاف هوایی بین رتور و استاتور شکل می‌گیرد به طور مشابه اگر منبع سه فاز به اولیه موتورهای خطی وصل گردد. موج چگالی شار سیار شکل گرفته و در طول مسیر اولیه حرکت می‌نماید [۲ و ۳ و ۵]. موتورهای خطی را می‌توان در گروه‌های متفاوت دسته‌بندی کرد که عبارتند از: موتورهای خطی DC، موتورهای القایی خطی، موتورهای

المان‌ها نیز برحسب شکل المان‌ها و مرتبه درون‌یابی چندجمله‌ای تابع آزمون مشخص می‌شوند. یک نوع از این المان‌ها، مثلاً مثلثی مرتبه اول را جهت تحلیل انتخاب می‌کنیم. این نوع المان به‌طور گسترده‌ای در مهندسی برق استفاده می‌شود [۶ و ۹].

۲- تحلیل موتور القائی خطی به‌روش اجزای

محدود

مدل در نظر گرفته شده یک موتور القایی خطی دو طرفه اولیه کوتاه است که ثانویه موتور از ورق آلومینیومی ساخته شده و در مکان خود ثابت نگه داشته شده است و اولیه در طول مسیر آن حرکت می‌کند. در طراحی موتور القایی خطی پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد موتور القایی خطی از جمله فاصله هوایی، ضخامت ثانویه و تعداد قطب‌ها باید به‌گونه‌ای تعیین شوند تا موتور تحت بهترین شرایط عملکرد قرار گیرد. برای بهینه‌سازی عملکرد موتور القایی خطی پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد موتور القایی در مقادیر مختلف برای موتور القایی خطی به‌روش اجزای محدود شبیه‌سازی شده‌اند و مقدار بهینه هر کدام از پارامترها برای طراحی بهینه موتور القایی خطی انتخاب شده است. به‌دلیل اینکه نرم‌افزار Maxwell توانایی حل معادلات الکترومغناطیسی و معادلات دینامیکی، مکانیکی را دارد. از این نرم‌افزار برای طراحی و تحلیل مدل مورد نظر استفاده شده است.



شکل ۱- موتور القائی خطی دو طرفه، اولیه کوتاه

۴- شبیه‌سازی مدل و نتایج

پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد موتور القایی خطی از جمله فاصله هوایی، ضخامت ثانویه و تعداد قطب‌ها مورد تحلیل الکترومغناطیسی قرار گرفته است و مقادیر پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی مطابق جدول (۱) است.

وضعیت هیدرودینامیک شناورهای سطحی و زیرسطحی را شناسایی نمود [۸]. در این مقاله یک موتور القایی خطی دو طرفه، اولیه کوتاه در شرایط متفاوت طراحی و سپس به‌روش اجزای محدود و با استفاده از نرم‌افزار Maxwell مورد تحلیل الکترومغناطیسی قرار گرفته است.

۲- روش تحلیل عددی

طبق قانون نیوتن برای موتور خطی می‌توان معادله نیرو را به‌صورت زیر نوشت [۱ و ۶]:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \quad (1)$$

در اینجا F ، نیروی حاصل از میدان الکترومغناطیسی است. m ، جرم قسمت متحرک و c ، ضریب میرایی و k ، ضریب سختی و x ، موقعیت قسمت متحرک است. مسائل الکترومغناطیسی و مکانیکی از طریق قانون لورنتز به یکدیگر ارتباط داده می‌شوند که نیروی لورنتز حاصل تولید شده از میدان الکتریکی و مغناطیسی است که به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$F_L = P(J \times \nabla \times A - \nabla V) \quad (2)$$

در اینجا V ، اندازه پتانسیل مغناطیسی و p ، چگالی بار است.

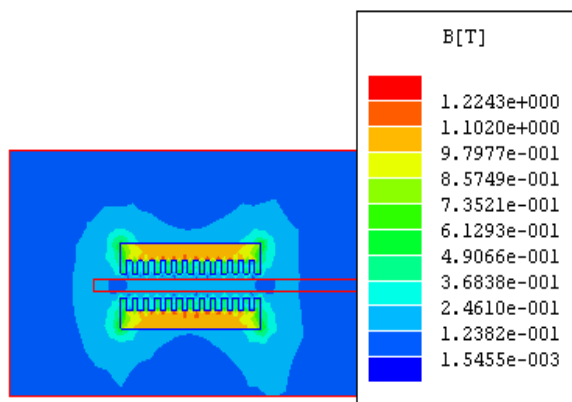
بنابراین معادله نیرو برابر می‌شود با:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_L = P(J \times \nabla \times A - \nabla V) \quad (3)$$

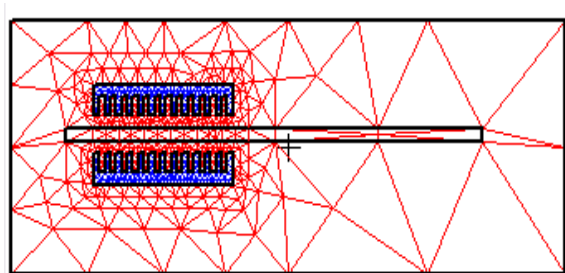
برای بررسی رفتار گذاری موتور الکتریکی معادله (۳) باید حل شود. معادله دیفرانسیلی (۳)، معادله غیرخطی و به هم وابسته است که روش تحلیلی برای حل آنها وجود دارد و برای حل این نوع معادلات به‌روش عددی نیاز است. روش‌های عددی زیادی وجود دارد که می‌توان به‌روش تفاضل محدود (FDM)، روش اجزای محدود (FEM) و روش المان مرزی (BEM) اشاره کرد [۶ و ۷]. که در این مقاله از روش اجزای محدود (FEM) استفاده شده است. اجزاء محدود در ابتدا برای حل مسائل سازه‌ها بکار برده می‌شدند و در اوایل دهه ۱۹۵۰ در مسائل انتقال حرارت و حرکت سیال مورد استفاده قرار گرفتند. اما این روش امروزه به‌طور گسترده در مهندسی برق بکار گرفته می‌شود. در روش اجزاء محدود، مسئله میدان اصلی به تعدادی زیردامنه یا المان تقسیم می‌شود سپس توزیع پتانسیل در هر یک از المان‌ها به‌وسیله یک چندجمله‌به نام (تابع آزمون) تقریب زده می‌شود و سپس از آن یک حل عددی برای مسئله میدان نسبت به یک معیار بهینه بدست می‌آید. شکل‌های مختلفی از المان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که مهم‌ترین آنها عبارتند از: مثلثی، چهارضلعی و شکل‌های منحنی‌الخط، انواع

جدول ۱- پارامترهای موتور القائی خطی

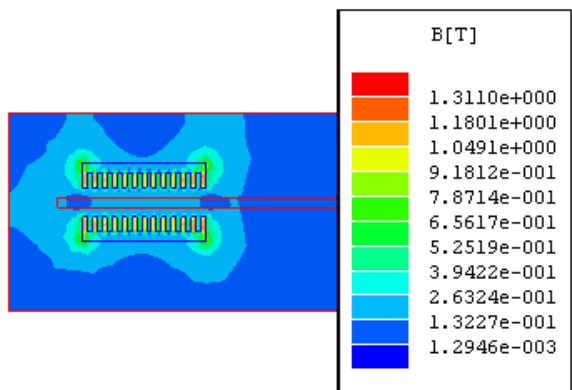
پارامترها	مقادیر
L_p	$0.15m$
L_s	$4m$
d	$0.1m$
P	4
s	12
τ_p	$0.1209m$
V	$15m/s$
f	$50Hz$



شکل ۳- توزیع چگالی شار میدان مغناطیسی در موتور القائی خطی با فاصله هوایی ۵ میلیمتر



شکل ۴- مدل مش گذاری شده از موتور القائی خطی با فاصله هوایی ۱۰ میلیمتر



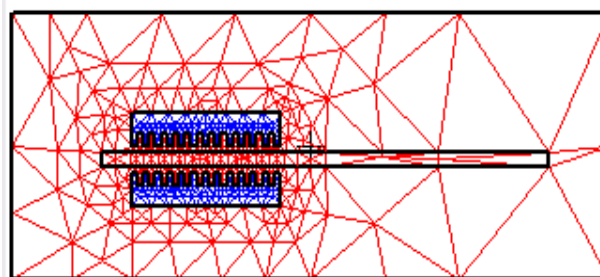
شکل ۵- توزیع چگالی شار میدان مغناطیسی در موتور القائی خطی با فاصله هوایی ۱۰ میلیمتر

حالت سوم: در این حالت موتور القائی خطی دوطرفه با فاصله هوایی ۱۵ میلیمتر شبیه سازی شده است و نتایج حاصل در شکل های (۶) و (۷) نشان داده شده است.

در اینجا L_p و L_s به ترتیب طول اولیه و طول ثانویه موتور هستند. d ، ضخامت ثانویه و P تعداد قطبها و s تعداد شکاف های در اولیه موتور است. τ_p ، گام سیم پیچی موتور القائی خطی است و V ، سرعت خطی است.

۴-۱- بررسی اثر فاصله هوایی

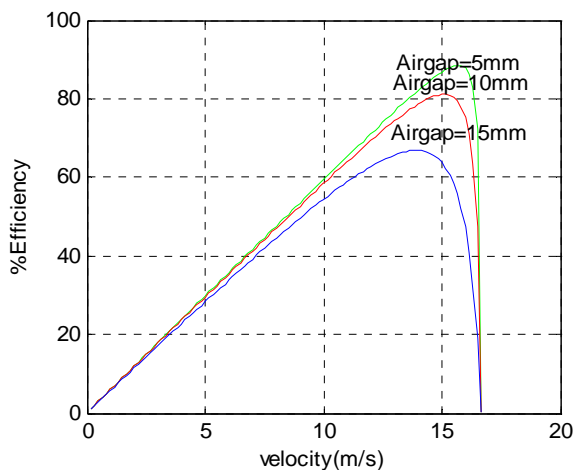
در حالت اول: یک موتور القائی خطی دوطرفه اولیه کوتاه با ۴ قطب و ۱۲ شکاف در اولیه با فاصله هوایی ۵ میلیمتر بین اولیه و ثانویه به روش اجزای محدود شبیه سازی شده است. در شکل های (۲) و (۳) نتایج حاصل نشان داده شده است.



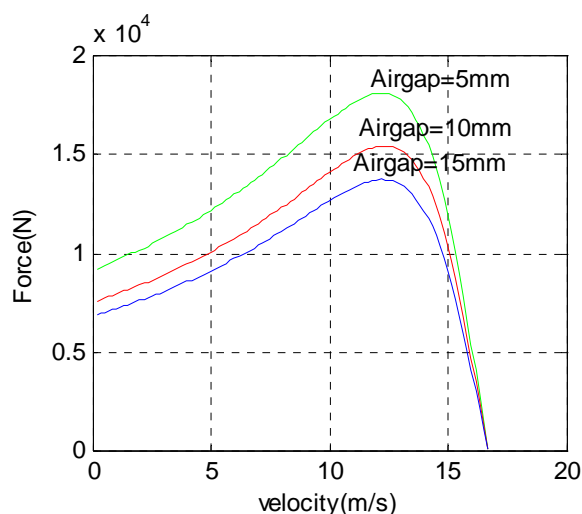
شکل ۲- مدل مش گذاری شده از موتور القائی خطی با فاصله هوایی ۵ میلی متر

در شکل (۳) مشخص است که چگالی شار در شکاف های اولیه موتور بیشترین مقدار را دارد و توزیع چگالی شار در ثانویه موتور کاهش یافته و مقدار کمی دارد.

در حالت دوم: موتور القائی خطی دوطرفه اولیه کوتاه با ۴ قطب و ۱۲ شکاف در اولیه با فاصله هوایی ۱۰ میلیمتر بین اولیه و ثانویه شبیه سازی شده است و در شکل (۴) و (۵) نتایج نشان داده شده است.



شکل ۸- مشخصه راندمان - سرعت

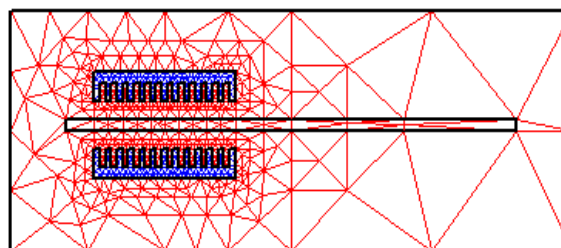


شکل ۹- مشخصه نیرو - سرعت

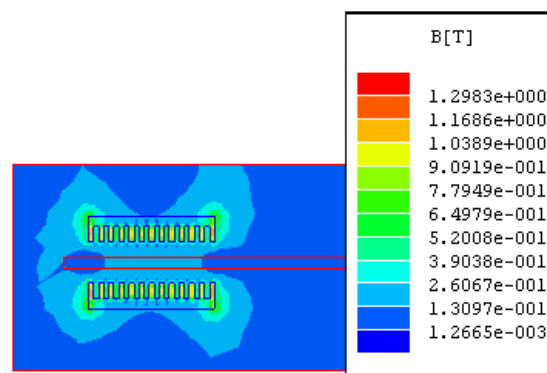
۴-۲- بررسی اثر تعداد قطبها

موتور القائی برای سه حالت متفاوت مورد تحلیل الکترومغناطیسی قرار گرفته است و مقادیر پارامترهای استفاده شده در شبیه سازی مطابق جدول (۱) است.

در حالت اول: یک موتور القائی خطی دوطرفه اولیه کوتاه با ۲ قطب و ۶ شکاف در اولیه با فاصله هوایی ۵ میلیمتر بین اولیه و ثانویه به روش اجزای محدود شبیه سازی شده است. در شکل های (۱۰) و (۱۱) نتایج حاصل نشان داده شده است.



شکل ۶- مدل مش گذاری شده از موتور القائی خطی فاصله هوایی ۱۵ میلیمتر

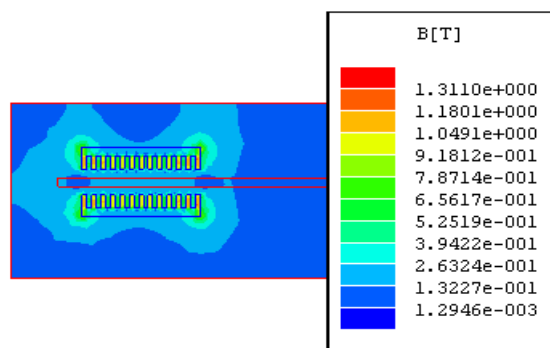


شکل ۷- توزیع چگالی شار میدان مغناطیسی در موتور القائی خطی با فاصله هوایی ۱۵ میلیمتر

موتورهای القایی خطی نسبت به موتورهای دوار دارای شکاف هوایی نسبتاً بزرگی هستند، لذا راکتانس مغناطیس کنندگی در موتورهای القایی خطی کم است و جریان تحریک نسبتاً قابل ملاحظه و زیاد است. فاصله هوایی نقش مهمی در تعیین میزان راندمان موتور القائی خطی دارد.

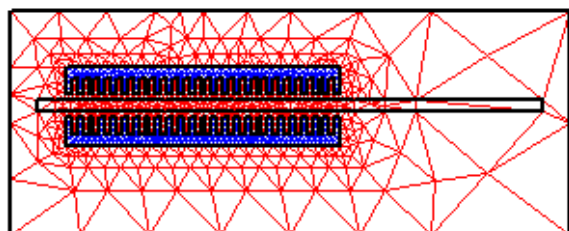
در صورتی که محدودیت ساخت وجود نداشته باشد، فاصله هوایی در موتورهای الکتریکی باید تا حد امکان کوچک انتخاب شود، برای مقایسه روش عددی و روش تحلیلی در شبیه سازی موتور القائی خطی، یک موتور القائی خطی با استفاده از نرم افزار Matlab با فاصله هوایی های ۵ و ۱۰ و ۱۵ میلیمتر شبیه سازی شده است. شکل های (۸) و (۹) نتایج حاصل را نشان می دهند.

از نتایج حاصل مشخص است که با افزایش فاصله هوایی راندمان و نیروی راه اندازی در موتور القائی خطی کاهش یافته است. بنابراین طراحی موتور باید به گونه ای انجام شود که با توجه به محدودیت های موجود بهترین شرایط حاصل شود.

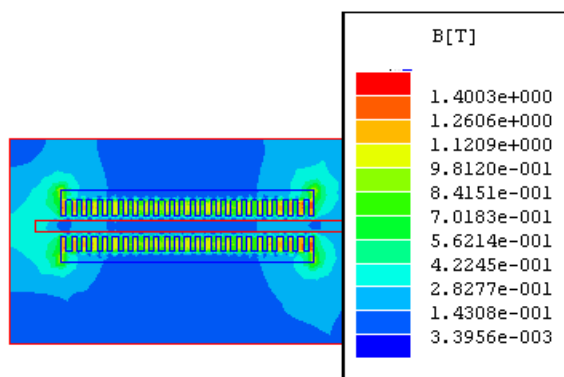


شکل ۱۳- توزیع چگالی شار میدان مغناطیسی در موتور القائی قطب ۴

حالت سوم: موتور القائی خطی دوطرفه اولیه کوتاه با ۸ قطب و ۲۴ شکاف در اولیه با فاصله هوایی ۵ میلیمتر بین اولیه و ثانویه شبیه‌سازی شده است و نتایج حاصل در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است.

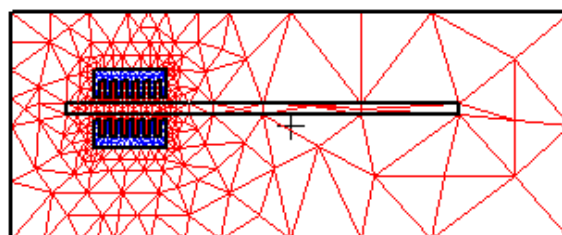


شکل ۱۴- مدل مش‌گذاری شده از موتور القائی خطی ۸ قطب

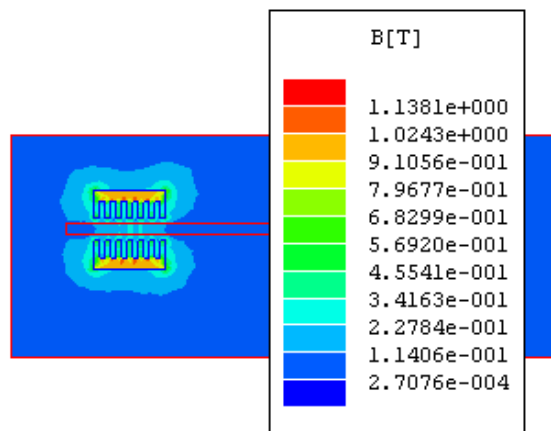


شکل ۱۵- توزیع چگالی شار میدان مغناطیسی در موتور القائی خطی ۸ قطب

از شبیه‌سازی موتور القائی خطی به‌روشنی اجزای محدود مشخص است که تعداد قطب‌ها نقش مهمی در تعیین میزان راندمان موتور القائی خطی دارد. برای مقایسه روش عددی و



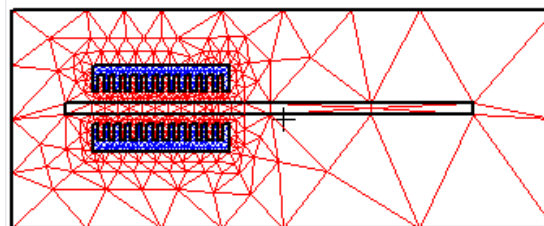
شکل ۱۰- مدل مش‌گذاری شده از موتور القائی خطی ۲ قطب



شکل ۱۱- توزیع چگالی شار میدان مغناطیسی در موتور القائی خطی ۲ قطب

در حالت دوم: موتور القائی خطی دوطرفه اولیه کوتاه با ۴ قطب و ۱۲ شکاف در اولیه با فاصله هوایی ۵ میلیمتر بین اولیه و ثانویه شبیه‌سازی شده است و در شکل (۱۲) و (۱۳) نتایج نشان داده شده است.

از مقایسه دو حالت در نظر گرفته شده مشخص است که با افزایش قطب‌ها چگالی شار در فاصله هوایی موتور القائی افزایش یافته است.



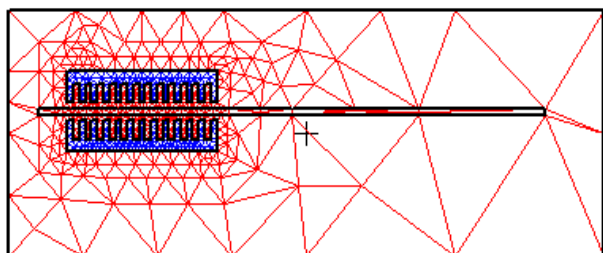
شکل ۱۲- مدل مش‌گذاری شده از موتور القائی خطی ۴ قطب

۳-۴- بررسی اثر ضخامت ثانویه

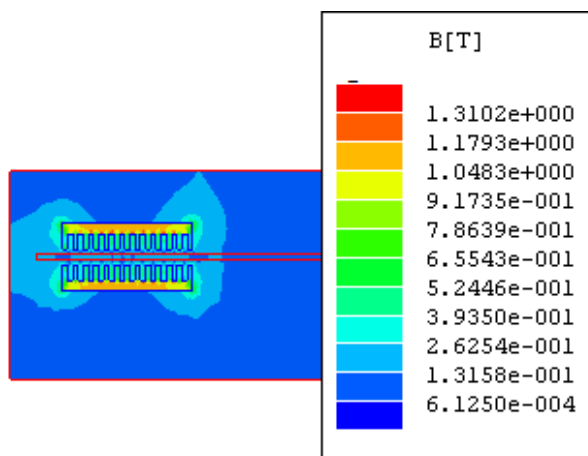
موتور القائی برای سه حالت متفاوت مورد تحلیل الکترومغناطیسی قرار گرفته است و مقادیر پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی مطابق جدول (۱) است.

در حالت اول: یک موتور القائی خطی دوطرفه اولیه

کوتاه با ۴ قطب و ضخامت ثانویه ۵ میلی‌متر به‌روش اجزای محدود شبیه‌سازی شده است. در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نتایج حاصل نشان داده شده است.



شکل ۱۸- مدل مش‌گذاری شده از موتور القائی خطی با ضخامت ثانویه ۵ میلی‌متر



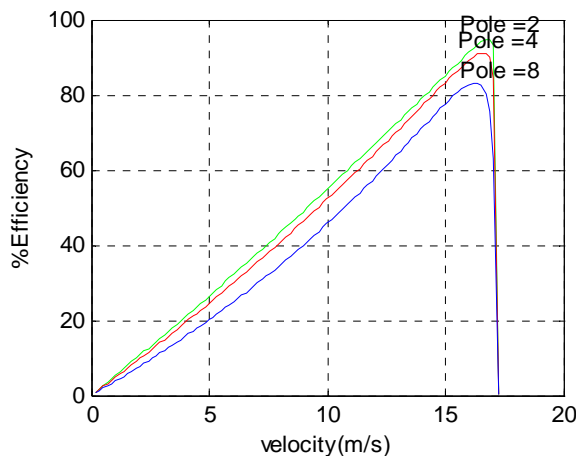
شکل ۱۹- توزیع چگالی شار میدان مغناطیسی در موتور القائی خطی با ضخامت ثانویه ۵ میلی‌متر

در حالت دوم: موتور القائی خطی دوطرفه اولیه کوتاه با

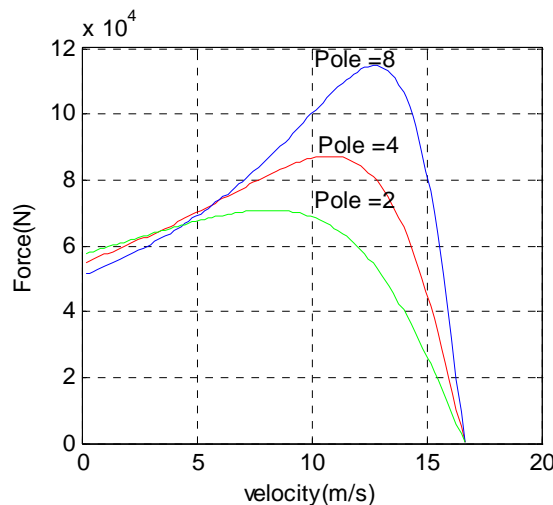
۴ قطب و ضخامت ثانویه ۱۰ میلی‌متر شبیه‌سازی شده است و در شکل (۲۰) و (۲۱) نتایج نشان داده شده است.

از مقایسه دو حالت در نظر گرفته شده مشخص است که با افزایش ضخامت ثانویه چگالی شار در فاصله هوایی موتور القائی افزایش یافته است.

روش تحلیلی در شبیه‌سازی موتور القائی خطی، یک موتور القائی خطی با استفاده از نرم‌افزار Matlab با تعداد قطب ۲ و ۴ و ۸ شبیه‌سازی شده است. شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نتایج حاصل را نشان می‌دهند.



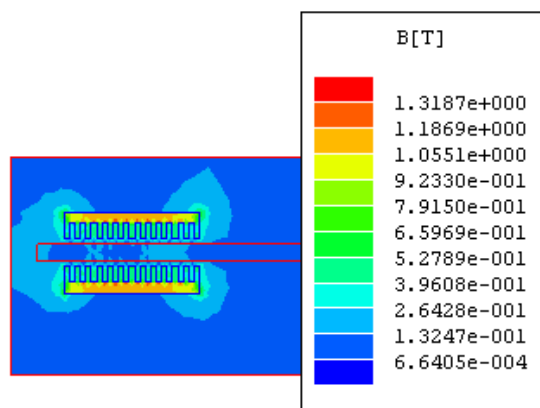
شکل ۱۶- مشخصه راندمان - سرعت



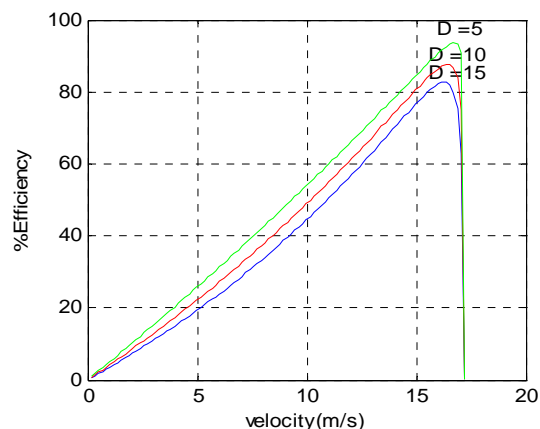
شکل ۱۷- مشخصه نیرو - سرعت

از مقایسه ۳ حالت در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی موتور القائی خطی مشخص است با افزایش تعداد قطب نیروی موتور افزایش پیدا می‌کند اما با افزایش تعداد قطب تلفات توان نیز در موتور افزایش یافته است در نتیجه بازده موتور کاهش خواهد یافت. بنابراین تعداد قطب‌ها باید به‌گونه‌ای تعیین شود که نیروی و بازده موتور در مقدار قابل قبولی قرار داشته باشند همچنین در تعیین تعداد قطب‌ها محدودیت طول اولیه موتور نیز باید در نظر گرفته شود زیرا با افزایش تعداد قطب‌ها طول اولیه نیز افزایش خواهد یافت.

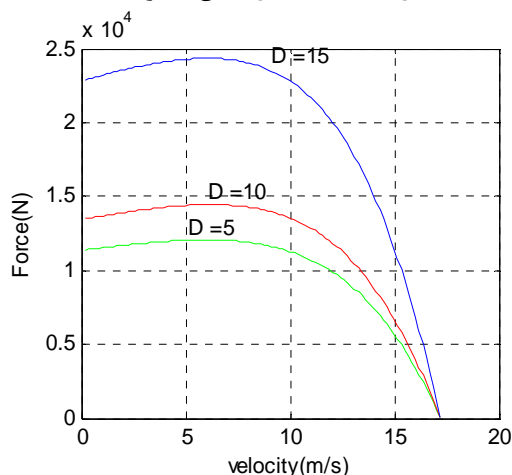
استفاده از نرم افزار Matlab با ضخامت ثانویه ۵ و ۱۰ و ۱۵ میلی متر شبیه سازی شده است. شکل های (۲۴) و (۲۵) نتایج حاصل را نشان می دهند.



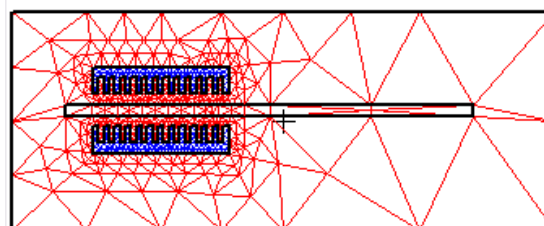
شکل ۲۲- توزیع چگالی شار میدان مغناطیسی در موتور القائی خطی با ضخامت ثانویه ۱۵ میلی متر



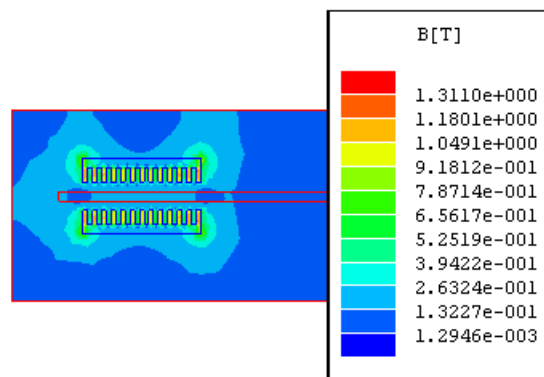
شکل ۲۳- مشخصه راندمان - سرعت



شکل ۲۴- مشخصه نیرو - سرعت

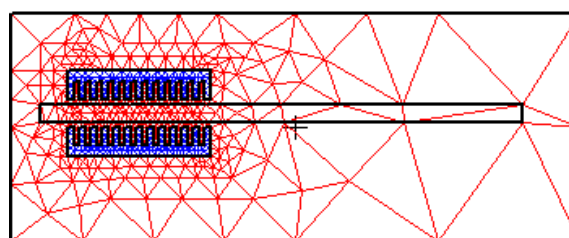


شکل ۲۰- مدل مش گذاری شده از موتور القائی خطی با ضخامت ثانویه ۱۰ میلی متر



شکل ۲۱- توزیع چگالی شار میدان مغناطیسی در موتور القائی با ضخامت ثانویه ۱۰ میلی متر

حالت سوم: موتور القائی خطی دوطرفه اولیه کوتاه با ۴ قطب و ضخامت ثانویه ۱۵ میلی متر شبیه سازی شده است و نتایج حاصل در شکل های (۲۲) و (۲۳) نشان داده شده است.



شکل ۲۲- مدل مش گذاری شده از موتور القائی خطی با ضخامت ثانویه ۱۵ میلی متر

از شبیه سازی به روش اجزای محدود مشخص است ضخامت ثانویه نقش مهمی در تعیین میزان راندمان موتور القائی خطی دارد. برای مقایسه روش عددی و روش تحلیلی در شبیه سازی موتور القائی خطی، یک موتور القائی خطی با

که V_{motor} ، ماکزیمم سرعت اولیه می‌باشد و F_{total} ماکزیمم نیرویی است که موتور باید تأمین کند.

مجموع نیروی تولید شده توسط موتور القایی خطی تقریباً برابر است با مجموع نیروی تولید شده توسط هر کوپل، با فرض اینکه هر کوپل نیروی برابر و مستقل از دیگر کوپل‌ها ایجاد کند تعداد کوپل‌ها را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$N_B(\tilde{R}) = \frac{F_{total}}{F_B(\tilde{R})} \quad (7)$$

که (F_B) نیروی تولید شده توسط یک کوپل است بنابراین تابع هدف در معادله (۶) برحسب معادله (۷) به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$F_{(\tilde{R})} = \frac{F_B(\tilde{R}) \cdot V_m}{N_B \left(\frac{F_B(\tilde{R}) \cdot V_m}{N_B} + P_{loss}(\tilde{R}) \right)} \quad (8)$$

$$= \frac{F_B(\tilde{R}) \cdot V_m}{F_B(\tilde{R}) \cdot V_m + N_B(\tilde{R}) \cdot P_{loss}(\tilde{R})}$$

روش بهینه‌سازی انجام شده مبتنی بر تقریب کوادراتیک تابع هدف می‌باشد. در این روش در ابتدا یک نقطه شروع اولیه در فضای طراحی داده می‌شود (\tilde{R}) ، سپس در دو نقطه دیگر از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\tilde{R}^{new} = \tilde{R}^o + \Delta hi \quad (9)$$

که Δhi تغییرات تأمین متغیر است و متغیرهای دیگر در این مرحله ثابت می‌باشند. در سه نقطه حاصل شده تابع کوادراتیک با تابع هدف متناسب می‌شود و بهترین نقطه متغیر بدست می‌آید. که این مقدار بهینه \tilde{R}^* جایگزین سه نقطه قبلی می‌شود و این پروسه تا زمان همگرایی تابع هدف انجام می‌شود.

برای بدست آوردن نقطه بهینه برای هر کدام از متغیرهای طراحی پروسه توضیح داده شده تکرار می‌شود. این روش بهینه‌سازی موسوم به روش تقریب چندجمله‌ای است.

در شکل (۲۶) مقدار بازده موتور برحسب تعداد مراحل بهینه‌سازی نشان داده شده است همان‌گونه که از شکل (۲۶) مشخص است ماکزیمم بازده تحت شرایط تعیین شده در مقدار ۹۲/۸٪ همگرا می‌شود.

ماکزیمم بازده‌ای که تحت شرایط تعیین شده حاصل شده است ۹۲/۸٪ می‌باشد که مقادیر هریک از متغیرهای طراحی و نیروی کوپل (F_B) در بازده بهینه ۹۲/۸٪ در جدول (۲) نشان داده شده است.

وقتی که ضخامت ثانویه افزایش داده شود اندازه نیرو نیز افزایش خواهد یافت اما با افزایش ضخامت ثانویه تلفات موتور نیز افزایش می‌یابد. در تعیین ضخامت ثانویه محدودیت طول ثانویه موتور نیز باید در نظر گرفته شود.

۴-۴ طراحی بهینه با در نظر گرفتن مجموع عوامل مؤثر در طراحی موتور القایی خطی

به منظور انجام بهینه‌سازی، تابع هدف باید بر مبنای مدل موتور الکتریکی و با در نظر گرفتن شرایط لازم برای طراحی موتور القایی خطی دوطرفه تعریف شود.

متغیرهای انتخاب شده برای بهینه‌سازی موتور از مهمترین پارامترهای الکتریکی و مکانیکی تأثیرگذار در طراحی موتور می‌باشند که عبارتند از:

۱. فاصله هوایی بین اولیه و ثانویه (R_1)

۲. تعداد قطب‌های اولیه (R_2)

۳. ضخامت ثانویه موتور (R_3)

برای هر متغیر طراحی محدوده مناسب باید تعیین شود. اولین شرط لازم این است که هیچ یک از متغیرهای طراحی نباید از صفر کمتر باشد، شرط دیگر این است که تعداد قطب‌ها نباید فرد باشد، شرایط دیگر با توجه به شکل هندسی موتور و محدودیت موجود در ساخت موتور تعیین می‌شوند.

بردار متغیرهای طراحی (\tilde{R}) رابطه صورت زیر تعریف می‌کنیم.

$$\tilde{R} = (R_1, R_2, R_3) \quad (4)$$

و بردار شرط (\tilde{C}) برحسب متغیرهای طراحی به صورت زیر طراحی می‌شود:

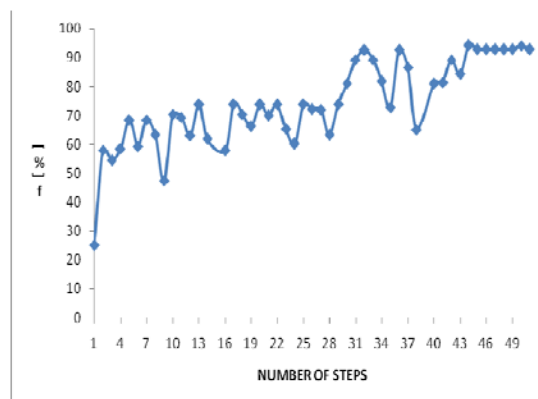
$$\tilde{C} = \begin{cases} 0 < R_1 < 15mm \\ 2 < R_2 < 8 \\ 0 < R_3 < 15mm \end{cases} \quad (5)$$

هدف حداکثر کردن بازده موتور القایی با در نظر گرفتن شرایط خاص موتور القایی است. بنابراین تابع هدف بازده موتور $(F(\tilde{R}))$ می‌باشد. که برحسب نسبت بین توان مکانیکی خروجی (F_{Total}) (V_{motor}) به توان ورودی به موتور تعریف می‌شود. توان ورودی از جمع کردن توان خروجی و مجموع تلفات توان (P_{Loss}) حاصل می‌شود.

$$F(\tilde{R}) = \frac{P_{output}}{P_{input}} = \frac{P_{output}}{P_{output} + P_{loss}} = \frac{F_{total} V_{motor}}{F_{total} V_{motor} + P_{loss}(\tilde{s})} \quad (6)$$

۶- مراجع

- [1] J. Han, Y. Li, Y. Du, W. Xu; “**Dynamic Characteristics Study of Single-Sided Linear Induction Motor with Finite Element Method**”, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Vol. 15, pp. 439 - 444, 2-5 July 2008.
- [2] Ch. I. Huang, L. Ch. Fu; “**Adaptive approach to motion controller of linear induction motor with friction compensation**”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 12, Aug 2007.
- [3] T. S. Ch. Park, W. L, K. M. Kim; “**Analysis of Linear Induction Motors for MAGLEV According to the Secondary Conductor Structure**”, International Conference on Electrical Machines and Systems, pp. 1995–1998, 8-11 Oct. 2007.
- [4] F. J. Lin, L. T. Teng, Ch. K. Chang; “**Adaptive Backstepping Control for Linear Induction Motor Drive Using FPGA**” Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Vol. 6 , pp. 1269 – 1274, Nov 2006.
- [5] R. J. Wai; Ch. Ch. Chu; “**Indirect Field-Oriented Linear Induction Motor Drive with Petri Fuzzy-Neural-Network Control**”, IEEE International Conference on Neural Networks, Vol. 1, 31 July-4, pp. 378 - 383, Aug. 2005.
- [6] E. Médici, D. Serrano; “**Finite Element Simulations of Berdud Linear Motor**”, XIV Congress on Numerical Methods and their Applications, Bariloche, Argentina, November 2004.
- [7] E. F. da Silva, Charles C. dos Santos; “**Field Oriented Control of Linear Induction Motor Taking into Account End Effects**”, The 8th IEEE International Workshop on 25-28 March 2004.
- [8] S. Bala; “**Analysis of a Linear Induction Motor with Double-Sided Primary and Sheet Secondary**”, Electric Machines and Drives Conference, Vol.4, pp. 1912-1917, April 2002.
- [9] W. Kim, B. C. Murphy; “**Design and Construction of a Novel tubular Linear Motor with Controller for Robotics Applications**”, Engineering Congress & Exposition Proceedings of IMECE’03, 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress, November 2003.



شکل ۲۶- همگرایی بازده

جدول ۲- نقاط بهینه

R1	R2	R3	FB	NB	f
۵	۴	۱۰	۳۶	۷۵	۹۲,۸۵
mm	-	mm	N	-	%

۵- نتیجه گیری

موتورهای القایی خطی نسبت به موتورهای دوار دارای فاصله هوایی نسبتاً بزرگی هستند، لذا راکتانس مغناطیس‌کنندگی در موتورهای القایی خطی کم است و جریان تحریک نسبتاً قابل ملاحظه و زیاد است از نتایج حاصل مشخص است که انتخاب بهینه فاصله هوایی نقش مهمی در بهبود عملکرد موتور القایی خطی خواهد داشت. همچنین با افزایش تعداد قطب‌ها نیروی موتور افزایش پیدا می‌کند اما با افزایش تعداد قطب‌ها تلفات توان نیز در موتور افزایش یافته است در نتیجه بازده موتور کاهش خواهد یافت. در تعیین تعداد قطب‌ها محدودیت طول اولیه موتور نیز باید در نظر گرفته شود. وقتی که ضخامت ثانویه افزایش داده شود اندازه نیرو نیز افزایش خواهد یافت اما با افزایش ضخامت ثانویه تلفات موتور نیز افزایش می‌یابد. بنابراین پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد موتور باید به گونه‌ای انتخاب و بهینه‌سازی شود تا ضریب توان و عملکرد موتور به‌طور قابل توجهی افزایش یابد. در طراحی ماشین‌های الکتریکی باید مسائل و محدودیت‌های الکترو مغناطیسی، حرارت و مکانیکی را مورد بررسی قرار داد. بنابراین رسیدن به یک طراحی قابل قبول تکرارهای محاسباتی زیادی را موجب می‌گردد. استفاده از کامپیوترهای جدید همچنین بهره‌گیری از روش محاسباتی پیشرفته این امکان را به وجود می‌آورد که بتوان رفتار ماشین را به دقت مدل نموده و طرح‌های جدید را نیز به سرعت ارزیابی نمود.