

بهینه‌سازی طراحی و ساخت موتور القایی خطی دوطرفه

عباس شیری^۱ سیده دلارام صدر^۲

۱- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی- تهران- ایران

abbas.shiri@sru.ac.ir

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق-دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران- ایران

sadr_s@elec.iust.ac.ir

چکیده: موتورهای القایی خطی دارای دو ساختار یک‌طرفه و دوطرفه هستند که با توجه به مزایا و معایبشان، در کاربردهای خاصی استفاده می‌شوند. با توجه به مزایایی همچون عدم وجود نیروی عمودی در نوع دوطرفه، این نوع موتورها دارای کنترل‌پذیری بهتری نسبت به نوع یک‌طرفه بوده و محبوبیت بیشتری به‌خصوص برای سیستم‌های حمل و نقل ریلی پیدا کرده‌اند. در مقالات، غالباً نوع یک‌طرفه مورد توجه بوده و در خصوص نوع دوطرفه، کارهای کمتری گزارش شده است. در این مقاله، ابتدا روابطی برای محاسبه پارامترهای مدار معادل این موتورها با در نظر گرفتن اثر انتهایی ارائه شده است. در ادامه با توجه به مدار معادل به‌دست آمده، روشی برای طراحی آن‌ها ارائه می‌شود. سپس با استفاده از روش ارائه شده، یک نمونه موتور القایی خطی دوطرفه طراحی شده و با به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات، موتور با هدف کاهش وزن و افزایش ضریب توان و بازده، بهینه‌شده است. یکی از موارد مهم در طراحی که هزینه ساخت را تحت تأثیر قرار می‌دهد، وزن ماشین است. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که وزن اولیه از ۴۴ کیلوگرم در حالت غیربهینه به ۱۸/۳۱ کیلوگرم در حالت بهینه کاهش می‌یابد. برای تأیید نتایج، ابتدا نتایج بهینه‌سازی با نتایج اجزای محدود مقایسه شده و سپس یک نمونه آزمایشگاهی از موتور القایی خطی دوطرفه با طراحی بهینه، ساخته شده و نتایج آن با نتایج تحلیلی مورد مقایسه قرار گرفته است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی به همراه نتایج اجزای محدود با نتایج بهینه‌سازی، نتایج روش پیشنهادی را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: موتور القایی خطی دوطرفه، نیروی خالص خروجی، بهینه‌سازی، الگوریتم گروهی ذرات، اجزای محدود

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.185

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۲۵

نام نویسنده‌ی مسئول: عباس شیری

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - لویزان - خیابان شعبانلو - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - دانشکده‌ی مهندسی برق

۱- مقدمه

در بین انواع مختلف موتورهای خطی، موتورهای القایی خطی به دلیل ساختار ساده و هزینه پایین ساخت، از محبوبیت بیشتری در بین محققان برخوردارند. موتورهای القایی خطی به دو نوع یک‌طرفه و دو طرفه تقسیم می‌شوند [۱]. در موتور القایی خطی یک‌طرفه، نیروی عمودی بین اولیه و ثانویه باعث ایجاد مشکلاتی در کاربردهای مختلف به خصوص در سیستم‌های حمل و نقل ریلی می‌شود. این درحالی است که در نوع دوطرفه با توجه به تقارن موجود در دو طرف، نیروی عمودی حذف می‌شود [۲]. موتورهای القایی خطی دوطرفه با توجه به ساختارشان می‌توانند نیروی رانشی بالا تا چند هزار نیوتن تولید کنند [۲ و ۳].

علی‌رغم داشتن قابلیت‌های مختلف، این موتورها دارای معایبی نیز هستند که شاید مهم‌ترین آن‌ها پدیده "اثر انتهایی" باشد. این پدیده، نیرویی ترمزی در مقابل حرکت موتور ایجاد کرده و عملکرد موتور را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۴]. در برخی از مراجع، این پدیده مورد بررسی قرار گرفته [۵-۷] و با در نظر گرفتن تأثیر آن، مدل‌های مداری برای تحلیل عملکرد ماشین ارائه شده است [۸-۱۲]. در [۱۳]، یک تابع توزیع برای مدل‌سازی اثر انتهایی به منظور پیش‌بینی تغییرات شار فاصله‌هایی با تغییر لغزش، ارائه شده است. در [۱۴]، با استفاده از روابط الکترومغناطیسی و معادلات پایه‌ای مکسول، چگالی شار فاصله‌هایی در موتور، با در نظر گرفتن اثر انتهایی در آن، محاسبه شده است. در [۱۵] به بررسی و تحلیل موتور القایی خطی دوطرفه در کاربردهای حمل و نقل پرسرعت پرداخته شده و از ثانویه ساده آلومینیومی به عنوان ریل استفاده شده است. در [۱۶] ساختار شیار بسته و نیم‌بسته اولیه موتور دوطرفه، به منظور بهبود مشخصه‌های سرعت، جریان، نیرو و چگالی شار بررسی شده است.

موتورهای القایی خطی معایب دیگری همچون وجود نیروی دندانه‌ای دارند؛ به همین علت تحقیقات زیادی برای حل این مشکلات انجام گرفته است. در [۱۷ و ۱۸] برای حذف نیروی دندانه‌ای مزاحم، ساختار خاصی از ثانویه نردبانی پیشنهاد شده است. در [۱۸] روشی بر پایه روابط الکترومغناطیسی برای بررسی موتور القایی خطی دوطرفه ارائه شده که در این روش برای در نظر گرفتن اثر انتهایی تغییراتی در تحلیل میدان الکترومغناطیسی ایجاد کرده است.

در خصوص طراحی و بهینه‌سازی نیز کارهایی انجام شده است. در [۱۹]، طراحی نوع یک‌طرفه موتور القایی خطی با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام گرفته که اثر انتهایی نیز در طراحی بهینه لحاظ شده است. در [۲۰]، بهینه‌سازی موتور القایی خطی یک‌طرفه جهت افزایش بازده و ضریب توان انجام شده است. همچنین در [۲۴] بهینه‌سازی یک نمونه موتور القایی خطی از نقطه نظر نیروی رانش، رپیل نیروی رانش، جریان ورودی، ضریب توان و نیروی عمودی انجام شده است. در [۲۵] به منظور بهبود نیروی رانش و بازده، ساختاری متقاطع برای موتورهای القایی خطی دوطرفه معرفی شده که از روابط

الکترومغناطیسی برای تحلیل آن استفاده شده است. همچنین در [۲۶]، یک نمونه موتور خطی دوطرفه با گام قطبی متغیر و دارای اولیه بلند طراحی شده و به کمک روش‌های مدار معادل و روابط الکترومغناطیسی و امان محدود تحلیل شده است. بیشتر کارهای طراحی انجام شده مربوط به موتور القایی خطی یک طرفه هستند. البته در مورد نوع دو طرفه نیز کارهایی انجام شده است. در [۲ و ۲۱]، روابط کلی برای طراحی موتورهای القایی خطی (یک‌طرفه و دوطرفه) ارائه شده که در آن از روابط و روش مورد استفاده برای طراحی موتورهای القایی دوار استفاده گردیده است. همچنین در [۱۵، ۱۸ و ۲۵] از روابط الکترومغناطیسی برای تحلیل و طراحی موتورهای القایی خطی دوطرفه بهره گرفته شده که با توجه به پیچیدگی روابط و زمان-بر بودن حل آن‌ها برای بهینه‌سازی مناسب نیستند.

با توجه به تفاوت‌های ساختاری و عملکردی که بین دو نوع موتور یک‌طرفه و دوطرفه وجود دارد، لازم است این تفاوت‌ها در طراحی مد نظر قرار گیرد. از آن جمله می‌توان به تفاوت میزان نفوذ میدان مغناطیسی به صفحه ثانویه و به تبع آن تفاوت بازده اشاره کرد. همچنین نیروی تولید شده در این موتورها با توجه به وجود فاصله‌هایی بیشتر، متفاوت از نوع یک‌طرفه هستند. نیز به طوری که اشاره شد، تقارن موجود در نوع دوطرفه باعث حذف نیروی عمودی در آن‌ها می‌شود که وجود آن یکی از معایب موتورهای القایی خطی یک‌طرفه است.

علی‌رغم مزایای زیاد موتورهای القایی دوطرفه، در اکثر تحقیقات تاکنون به طراحی و بهینه‌سازی موتورهای القایی خطی یک طرفه پرداخته شده ولی در این مقاله هدف اصلی تحلیل، طراحی بهینه و ساخت نوع دوطرفه بوده است. در این مقاله، با استفاده از مدل مداری، روشی ساده برای طراحی موتور القایی دوطرفه ارائه می‌شود. با استفاده از روش طراحی ارائه شده، ابعاد موتور به منظور بهبود بازده و ضریب توان و نیز وزن اولیه به روش الگوریتم گروهی ذرات، بهینه‌سازی می‌شود. به منظور تأیید نتایج حاصل از روش ارائه شده، موتور بهینه در آزمایشگاه ساخته شده و نتایج آن با نتایج تئوری و نیز روش اجزاء محدود مقایسه می‌شود.

۲- استخراج روابط و طراحی

ساختار موتور القایی خطی دوطرفه در شکل (۱) نشان داده شده است. به طوری که ملاحظه می‌شود یک صفحه آلومینیومی در بین دو تا اولیه دارای سیم‌پیچی قرار گرفته است. برای مدل‌سازی موتور القایی خطی دوطرفه از مدل مداری دانکن استفاده شده است که در شکل (۲) نشان داده شده است [۲۲].

در رابطه فوق L_s طول اولیه است. لازم به ذکر است که راکتانس پراکندگی ثانویه موتورهای القایی خطی با ثانویه صفحه‌ای قابل صرف-نظر کردن است. همچنین با توجه به کوچک بودن چگالی شار در فاصله هوایی در این ماشین‌ها، می‌توان با تقریب خوبی از تلفات هسته صرف‌نظر کرد.

نیروی خروجی تولید شده کل توسط موتور، نیروی ترمزی کل ناشی از اثر انتهایی، نیروی کل تولید شده، بازده و ضریب توان به ترتیب از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$F_{xo} = \frac{3R_2' I_1^2}{s f_1 \tau} \left[\frac{R_m^2 X_{m1}^2}{\left(\frac{R_2'}{s} + R_m \right)^2 + X_{m1}^2} \right] \quad (6)$$

$$F_{xe} = \frac{3R_m I_m^2}{f_1 \tau} \quad (7)$$

$$F_x = F_{xo} + F_{xe} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{2 f_1 \tau F_x (1-s) + 6(s-1) R_m I_m^2}{2 f_1 \tau F_x + 3 R_1 I^2} \quad (9)$$

$$PF = \frac{2 f_1 \tau F_x + 3 R_1 I^2}{3 V_1 I} \quad (10)$$

در روابط فوق، I جریان کل ورودی به ماشین است که اگر مدار دو اولیه را موازی در نظر بگیریم، دو برابر I_1 خواهد بود. در طراحی موتورهای القایی خطی، هدف طراحی موتوری است که بتواند نیروی رانش مشخصی را تولید نماید. طبق روشی که در [۱۹] ارائه شده ابتدا باید داده‌های ورودی و مطلوب، مانند سرعت و ولتاژ ورودی و نیروی رانش خروجی انتخاب شوند و سپس با استفاده از آن‌ها سرعت سنکرون، به دست آید.

برای طراحی با توجه به این که در ابتدا تعداد دور مجهول است، می‌توان پارامترهای مدار معادل هر طرف را به صورت زیر به عنوان ضریبی از تعداد دور در نظر گرفت:

$$R_2' = K_{R_2'} N_1^2 \quad (11)$$

$$R_m = K_{R_m} N_1^2 \quad (12)$$

$$X_m = K_{X_m} N_1^2 \quad (13)$$

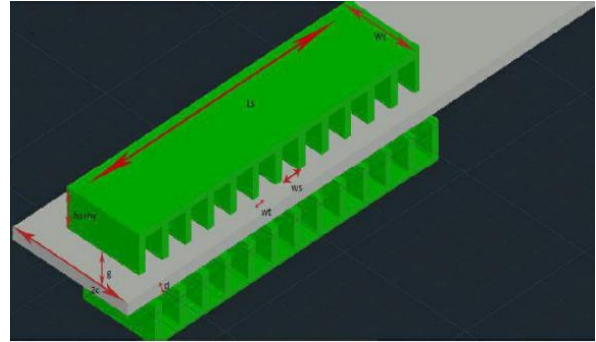
$$X_{m1} = K_{X_{m1}} N_1^2 \quad (14)$$

در روابط فوق، R_m مقاومت شاخه موازی و $K_{R_2'}$ ، K_{R_m} ، K_{X_m} و $K_{X_{m1}}$ ضرایبی هستند که با استفاده از روابط (۳) تا (۵) می‌توان محاسبه کرد. با انتخاب نسبت گام سیم‌پیچی به گام قطبی مناسب و محاسبه ضریب گام و ضریب سیم‌پیچی و توزیع، می‌توان ضریب راکتانس مغناطیس‌کنندگی برای هر فاز را به دست آورد:

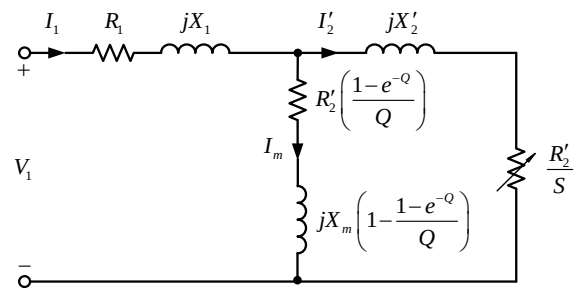
$$K_{X_m} = \frac{6 \mu_0 \omega_1 W_{se} k_w^2 \tau}{\pi^2 p g_{ei}} \quad (15)$$

ضرایب مربوط به شاخه موازی مدار معادل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K_{R_m} = K_{R_2'} \left(\frac{1-e^{-Q}}{Q} \right) \quad (16)$$



شکل (۱): ساختار موتور القایی خطی دوطرفه



شکل (۲): مدار معادل بر فاز ماشین

در مدار معادل شکل (۲)، پارامترهای مختلف از روابط (۱) تا (۴) محاسبه می‌شوند [۱]:

$$R_1 = \frac{2(W_s + I_{ec})}{\sigma_w A_w N_1} N_1^2 \quad (1)$$

$$X_1 = \frac{2 \omega_1 [(\lambda_s (1 + \frac{3}{2p}) + \lambda_d) \frac{W_s}{q} + \lambda_e I_{ec}]}{p} N_1^2 \quad (2)$$

$$X_m = \frac{[6 \mu_0 \omega_1 W_{se} k_w^2 \tau]}{\pi^2 p g_{ei}} N_1^2 \quad (3)$$

$$R_2' = \frac{6 W_{se} k_w^2}{p \tau \sigma_{ei} d} N_1^2 \quad (4)$$

در روابط فوق، R_1 مقاومت اهمی یک‌طرف اولیه، X_1 راکتانس پراکندگی یک‌طرف اولیه، X_m راکتانس مغناطیس‌کنندگی یک‌طرف و R_2' مقاومت یک‌طرف ثانویه از دید اولیه است. همچنین N_1 تعداد دور در هر فاز در هر طرف، ρ_w مقاومت ویژه هادی‌های استفاده شده در سیم‌پیچی اولیه، I_{ec} طول اتصالات انتهایی سیم‌پیچی، W_s عرض اولیه و A_w سطح مقطع هادی است. همچنین p تعداد زوج قطب، q تعداد شیار بر قطب بر فاز و ω_1 فرکانس زاویه‌ای اولیه بوده و λ_s و λ_d و λ_e به ترتیب هدایت مغناطیسی ویژه شیار، دیفرانسیلی و اتصالات انتهایی است که در مرجع [۱] داده شده است. همچنین ضریب Q طول نرمالیزه اولیه ماشین است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q = \frac{L_s R_2' \omega_1}{(X_m + X_2') V_r} \quad (5)$$

(۲۷) تعداد دور که عددی طبیعی خواهد بود محاسبه گردد. الگوریتم طراحی در شکل (۳) نشان داده شده است.

نتایج طراحی موتور که با استفاده از الگوریتم ارائه شده به دست آمده، در جدول (۱) نشان داده شده است. در این جدول هدف، طراحی موتوری بود که بتواند $200N \pm 2/5$ را تولید کند. به طوری که ملاحظه می‌شود، نیروی رانش خالص خروجی ۱۹۹/۵ نیوتن به دست آمده و بازده و ضریب توان به ترتیب $50/2\%$ و $42/0\%$ است.

۳- بهینه‌سازی

در این مقاله، برای بهینه‌سازی طراحی موتور القایی خطی دوطرفه، از الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات استفاده شده است. این الگوریتم از رفتار اجتماعی دسته پرندگان یا ماهی‌ها الهام گرفته است. به این دسته پرندگان، گروه گفته می‌شود و هر یک از اعضای این گروه، ذره نام دارد و هریک از ذرات به صورت تصادفی مقداردهی اولیه می‌شوند. این ذرات ضمن حرکت در فضای D- بعدی، به جستجو پرداخته تا بهترین نقطه را پیدا کنند [۲۳ و ۲۷]. منظور از بهترین نقطه، نقطه‌ای است که در آن مقدار تابع هزینه بهینه گردد.

در الگوریتم تکاملی گروهی ذرات، هر ذره P_i دارای یک بردار مکان و یک بردار سرعت است. همچنین هر یک از ذرات دارای حافظه بوده و می‌تواند بهترین مکان قبلی خود را که تا پیش از این در آن قرار داشته در حافظه‌ی خود ثبت کند. به علاوه بهترین مکان کلی که گروه به آن دست پیدا کرده است در اختیار تمام ذرات قرار می‌گیرد تا در حافظه آن‌ها ثبت شود. در هر تکرار، سرعت هر ذره و مکان آن به صورت زیر بروز رسانی می‌شود [۲۳]:

$$\begin{aligned} V_{i,d}(t) &= \omega V_{i,d}(t-1) + C_1 r_1 (pbest_{i,d}(t) - x_{i,d}(t-1)) \\ &\quad + C_2 r_2 (gbest_d(t) - x_{i,d}(t-1)) \\ x_{i,d}(t) &= x_{i,d}(t-1) + V_{i,d}(t) \end{aligned} \quad (28)$$

در واقع اگر $x_i(t)$ نشان دهنده موقعیت ذره P_i در فضای جستجو در لحظه‌ی t باشد، موقعیت P_i با افزودن سرعت $V_i(t)$ به موقعیت قبلی به شکل معادله‌ی بالا تغییر می‌کند و طبق معادله‌ی بالا $V_i(t)$ مطابق است با مجموع سرعت قبلی و مقداری تصادفی از فاصله‌ی بهترین وضعیت که خود ذره با مکان قبلی داشته و همچنین مقدار تصادفی از فاصله بهترین ذره از کل ذره‌ها با مکان قبلی به دست می‌آید. در معادله (۲۸) ω ضریب اینرسی نامیده می‌شود، C_1 و C_2 ضرایب یادگیری هستند و نهایتاً r_1 و r_2 دو عدد تصادفی هستند که مقدار آن‌ها بین $[0, 1]$ است.

برای خاتمه الگوریتم، دو شرط می‌توان در نظر گرفت. یکی ماکزیمم تعداد تکرار و دیگری مقدار مناسب تابع هدف. بنابراین بعد از اجرای حلقه با دفعات تکرار مشخص شده و یا با رسیدن به مقدار قابل قبول تابع هدف، الگوریتم پایان می‌یابد [۲۳ و ۲۸-۲۹].

$$K_{X_{m1}} = K_{X_m} (1 - \frac{1 - e^{-Q}}{Q}) \quad (17)$$

که در آن از روابط زیر استفاده شده است:

$$K_{R_2} = \frac{6W_{se}k_w^2}{p\tau\sigma_{st}d} \quad (18)$$

$$Q = \frac{L_s k_{R_2} \omega_1}{(K_{X_m})V_r} \quad (19)$$

همچنین ضرایب K_{X_1} و K_{R_1} با توجه به روابط (۱) و (۲) از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$K_{X_1} = \frac{2\mu_0\omega_1[(\lambda_s(1 + \frac{3}{2p}) + \lambda_d)\frac{W_s}{q} + \lambda_e l_{ec}]}{p} \quad (20)$$

$$K_{R_1} = \rho_w \frac{2(W_s + l_{ec})J_1}{MMF_1} \quad (21)$$

که در آن MMF_1 نیروی محرکه یک طرف موتور است که در ادامه محاسبه می‌شود. با جای گذاری پارامترهای موتور (۱۱)، (۱۲) و (۱۴) در رابطه (۶) و انجام پاره‌ای محاسبات ریاضی، نیروی محرکه کل مورد نیاز برای تولید نیروی خروجی دلخواه، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$MMF_1 = \sqrt{\frac{s2f_1F_{x0}(K_{R_2}/s + K_{R_m})^2 + K_{X_{m1}}^2}{3K_{R_2}^2 \frac{K_{R_m}^2 + K_{X_{m1}}^2}{K_{R_m}^2 + K_{X_{m1}}^2}}} \quad (22)$$

$$MMF_1 = N_1 I_1 = \frac{MMF}{2} \quad (23)$$

با توجه به مدار معادل موتور (شکل (۱))، رابطه زیر را می‌توان برای تعداد دور و جریان ورودی هر طرف نوشت:

$$V_1 = K_Z N_1^2 I_1 = K_Z MMF_1 N_1 \quad (24)$$

که در آن $Z = K_Z N_1^2$ امپدانس ورودی است و با توجه به مدار معادل شکل (۱)، ضریب K_Z به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$|K_Z| = |K_{R_1} + jK_{X_1} + (K_{R_m} + jK_{X_{m1}})| |(K_{R_2}/s)| \quad (25)$$

در این مرحله از طراحی، با توجه به این که ولتاژ ورودی از ابتدا مشخص شده است، می‌توان تعداد دور در هر فاز در هر طرف را به صورت زیر به دست آورد:

$$N_1 = \frac{V_1}{|K_Z| MMF_1} \quad (26)$$

ممکن است تعداد دور به دست آمده از رابطه (۲۶) عددی اعشاری باشد طبیعتاً باید به نزدیک‌ترین عدد طبیعی گرد شود و بعد تعداد دور در هر کلاف از رابطه زیر محاسبه شود:

$$n_c = \frac{N_1}{pq} \quad (27)$$

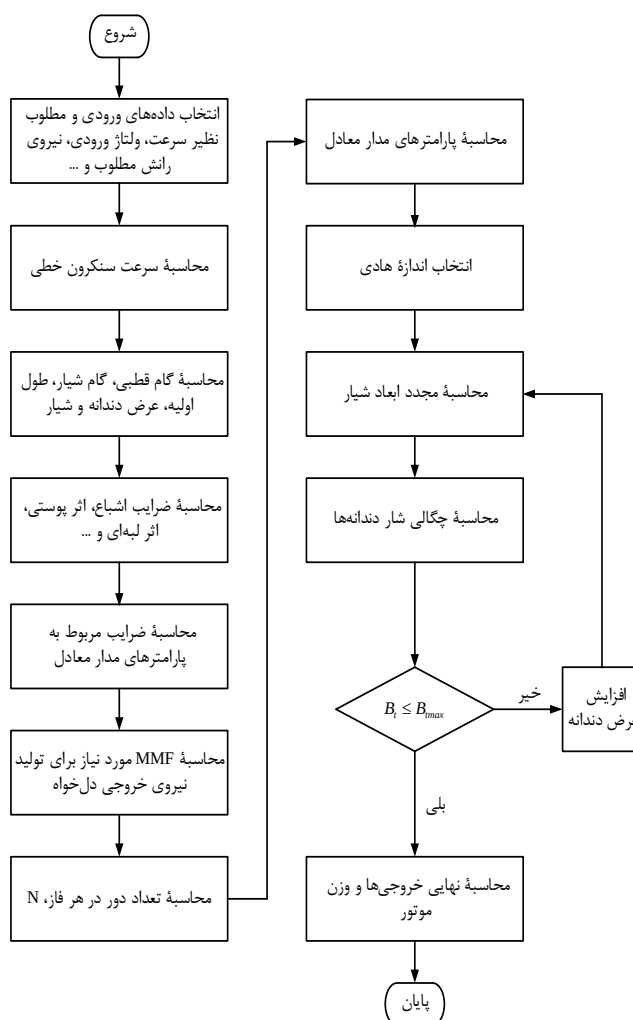
البته بهتر است ابتدا n_c با N_1 به دست آمده از رابطه (۲۶) محاسبه شده و به نزدیک‌ترین عدد طبیعی گرد شود و سپس از رابطه

۰/۹۱	چگالی شار دندانه‌ها (T)	۲/۵	ضخامت آلومینیوم ثانویه (mm)
۱۹۹/۵	نیروی رانش خروجی، (N)	۵	طول فاصله هوایی کل، (mm)
۱۷/۳۷	نیروی ترمزی ناشی از اثر انتهایی، (N)	۰/۲۵	لغزش موتور
۰/۴۲	ضریب توان ورودی	۵	چگالی جریان اولیه (A/mm ²)
۵۰/۰۲	بازده (%)	۵۰	فرکانس ورودی، (Hz)
۴۳/۹۴	وزن کل اولیه (kg)	۳	تعداد زوج قطب

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، متغیرهایی چون فرکانس تغذیه ورودی، تعداد زوج قطب، تعداد شیار در هر فاز در هر قطب، چگالی جریان اولیه، عرض اولیه، ضخامت صفحه ثانویه، لغزش موتور، نسبت عرض شیار به گام شیار و فاصله هوایی تأثیر زیادی بر عملکرد این موتورها دارند که به‌عنوان متغیرهای بهینه‌سازی انتخاب می‌شوند. هدف از بهینه‌سازی، بیشینه نمودن بازده موتور، ضریب توان ورودی و کمینه نمودن وزن اولیه است؛ بنابراین تابع هدف به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(x) = \frac{\eta(x) \times P.F.(x)}{PW(x)} \quad (29)$$

در این مقاله دو موتور با محدودیت‌های مختلف طراحی می‌شود. محدوده متغیرهای طراحی مورد ۱ در جدول (۲) آورده شده است. نتایج بهینه‌سازی با تابع هدف (۲۹) در جدول (۳) نشان داده شده است. به طوری که ملاحظه می‌شود، بازده و ضریب توان به ترتیب ۴۶٪ و ۴۵٪ به‌دست آمده است. همچنین وزن دو اولیه برابر ۱۸/۳۱ کیلوگرم است. ملاحظه می‌شود که هر چند بازده نسبت به حالت بدون بهینه‌سازی کمتر شده ولی ضریب توان از ۰/۴۲ به ۰/۴۵ افزایش یافته و مهم‌تر از آن وزن موتور از مقدار ۴۳/۹۴ کیلوگرم در حالت بدون بهینه‌سازی به مقدار ۱۸/۳۱ کیلوگرم کاهش یافته است که مقدار بسیار خوبی است. در طراحی مورد ۲، حداکثر تعداد زوج قطب به ۲ محدود شده است. همچنین تعداد شیار در هر فاز در هر قطب ۱ انتخاب شده است. محدوده بقیه متغیرهای طراحی، مشابه طراحی مورد ۱ [جدول (۲)] است. نتایج بهینه‌سازی در این حالت در جدول (۴) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که با همان سرعت و ولتاژ ورودی مورد قبل، با توجه به کاهش تعداد قطب به ۴، طول موتور به ۳۰/۱ سانتی‌متر کاهش یافته است. همچنین در این حالت با توجه به کاهش تعداد شیار در هر فاز در هر قطب، عرض دندانه به ۷/۳ میلی-متر افزایش یافته است. همچنین ضریب توان ورودی برابر ۰/۴۰ و بازده برابر ۴۵٪ است؛ این درحالی است که وزن اولیه با توجه به کاهش طول ماشین، به ۱۵/۶۲ کیلوگرم رسیده است. شایان ذکر است که نیروی ترمزی ناشی از اثر انتهایی در این حالت برابر ۹/۹ نیوتن به-دست آمده که نسبت به مورد قبلی (۵/۵ نیوتن) تقریباً دو برابر شده است. این موضوع به دلیل کاهش تعداد قطب و طول اولیه موتور است. در کل باید گفت که با توجه به زیاد بودن فاصله هوایی و ضخامت آلومینیوم ثانویه (که فاصله هوایی مغناطیسی را افزایش می‌دهند) در موتورهای القایی خطی دوطرفه، بازده و ضریب توان نسبت به نوع یک-طرفه کمتر است. در عوض با توجه به نقش هر دو طرف موتور در تولید نیروی محرکه مغناطیسی، می‌توان تولید نیروی بیشتری را در قیاس با نوع یک‌طرفه، انتظار داشت.



شکل (۳): الگوریتم طراحی موتور القایی خطی دوطرفه

جدول (۱): پارامترهای موتور طراحی‌شده

کمیت	مقدار	کمیت	مقدار
ولتاژ فاز ورودی (V)	۲۲۰	عرض دندانه (mm)	۷/۴
سرعت نامی (m/s)	۱۰	عرض شیار (mm)	۷/۴
جریان فاز ورودی (A)	۱۴/۴۴	عمق شیار، (mm)	۱۹/۸
طول اولیه (cm)	۸۰/۷۴	تعداد شیار / فاز / قطب	۳
عرض اولیه، (cm)	۶	تعداد دور در هر فاز	۵۴۹

جدول (۲): محدودیت‌های متغیرهای طراحی موتور ۱

پارامترها	مقادیر کمینه	مقادیر بیشینه
نیروی خالص خروجی (N)	۱۹۵	۲۰۵
چگالی شار دندانه (T)	-	۱/۶
چگالی جریان اولیه (A/mm^2)	۳	۶
عرض اولیه (cm)	۵	۲۰
ضخامت صفحه ثانویه (mm)	۱	۴
لغزش	۰/۱	۰/۵
فاصله هوایی کل (mm)	۵	۲۰
تعداد زوج قطب	۱	۴
نسبت عرض شیار به گام شیار	۰/۴	۰/۷
تعداد شیار در هر فاز در هر قطب	۱	۳
فرکانس ورودی (Hz)	۲۰	۲۵۰

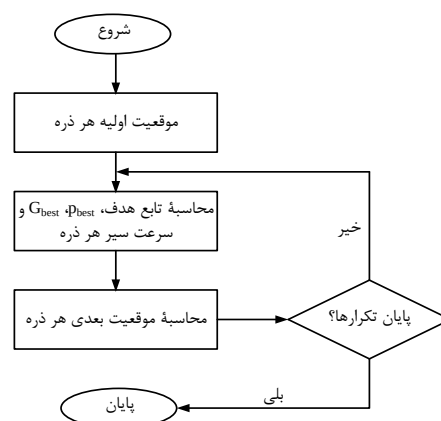
جدول (۴): مشخصات موتور بهینه‌شده ۲

کمیت	مقدار	کمیت	مقدار
ولتاژ فاز ورودی (V)	۲۲۰	عرض دندانه (mm)	۷/۳
سرعت نامی (m/s)	۱۰	عرض شیار (mm)	۱۷/۱
جریان فاز ورودی (A)	۱۶/۷۷	عمق شیار (mm)	۲۳/۱
طول اولیه (cm)	۳۰/۱	تعداد شیار/قطب/فاز	۱
عرض اولیه (cm)	۷/۶	تعداد دور در هر فاز در هر طرف	۳۳۸
ضخامت آلومینیوم ثانویه (mm)	۲/۵	چگالی شار دندانه‌ها (T)	۱/۰۳
طول فاصله هوایی کل (mm)	۵	نیروی رانش خروجی (N)	۱۹۸/۹۵
لغزش	۰/۴۴	نیروی ترمزی ناشی از اثر انتهایی (N)	۹/۸۸
چگالی جریان اولیه (A/mm^2)	۶	ضریب توان ورودی	۰/۴۰
فرکانس ورودی (Hz)	۱۲۱/۸	بازده (%)	۴۴/۹۱
تعداد زوج قطب	۲	وزن کل اولیه (kg)	۱۵/۶۲

۴- تایید نتایج

۴-۱- شبیه‌سازی با اجزاء محدود

برای بررسی و تأیید نتایج از اجزاء محدود دو بعدی و نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است. برای این کار موتور بهینه جدول (۴)، در محیط نرم‌افزار ماکسول شبیه‌سازی شده است. انتخاب موتور جدول (۴) جهت شبیه‌سازی اجزای محدود، به این دلیل انجام شده است که با توجه به تعداد قطب کم و طول کوتاه‌تر این موتور، اثر انتهایی در آن زیاد است و این موضوع ارزیابی روش طراحی ارائه شده را که در آن اثر انتهایی نیز مدل شده است، بهتر انجام می‌دهد. ابتدا شبیه‌سازی راه-اندازی موتور در شرایط بی‌باری انجام گرفته است. شکل (۵) مشخصه نیروی رانش- لغزش موتور را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که این مشخصه شبیه مشخصه موتور القایی دوار است با این تفاوت که در اینجا به دلیل وجود اثر انتهایی، نوسانات نیرو زیاد است [۱]. برای مطالعه و ارزیابی نتایج روش ارائه شده، موتور در بار نامی شبیه‌سازی گردید. شکل (۶) خطوط میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. مسیر شار مغناطیسی، مکان تشکیل قطب‌های مغناطیسی را مشخص کرده است. همچنین در شکل (۷) توزیع چگالی شار مغناطیسی در قسمت‌های مختلف ماشین نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که حداکثر چگالی شار برابر ۱/۵۲ تسلا بوده و در برخی قسمت‌های کوچک دندانه‌ها به دست آمده است. در جدول (۵) نتایج حاصل از اجزاء محدود با نتایج روش ارائه شده مقایسه شده است. به طوری که ملاحظه می‌شود خطای نیرو ۱/۲ درصد است که نشان از دقت بالای مدل‌سازی اثر انتهایی و نیروی ترمزی ناشی از آن دارد. همچنین ضریب توان بدست آمده از اجزای محدود بیشتر از مقدار بدست آمده از روش تحلیلی است. دلیل این موضوع به عدم در نظر گرفتن اثر لبه-



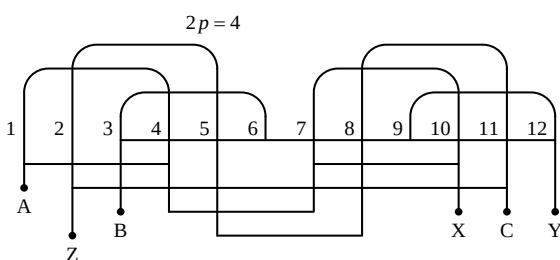
شکل (۴): الگوریتم حرکت ذرات به موقعیت بهینه

جدول (۳): مشخصات موتور بهینه‌شده ۱

کمیت	مقدار	کمیت	مقدار
ولتاژ فاز ورودی (V)	۲۲۰	عرض دندانه (mm)	۲/۱
سرعت نامی (m/s)	۱۰	عرض شیار (mm)	۴/۹
جریان فاز ورودی (A)	۱۴/۶۳	عمق شیار (mm)	۱۸/۳
طول اولیه (cm)	۵۰/۳	تعداد شیار/فاز/قطب	۳
عرض اولیه (cm)	۶/۴	تعداد دور در هر فاز	۵۲۸
ضخامت آلومینیوم ثانویه (mm)	۲	چگالی شار دندانه‌ها (T)	۰/۹۵
طول فاصله هوایی کل (mm)	۵	نیروی رانش خروجی (N)	۲۰۱/۴
لغزش موتور	۰/۴۲	نیروی ترمزی ناشی از اثر انتهایی (N)	۵/۵
چگالی جریان اولیه (A/mm^2)	۶	ضریب توان ورودی	۰/۴۵
فرکانس ورودی (Hz)	۱۳۷/۷	بازده (%)	۴۶/۰
تعداد زوج قطب	۴	وزن کل اولیه (kg)	۱۸/۳۱

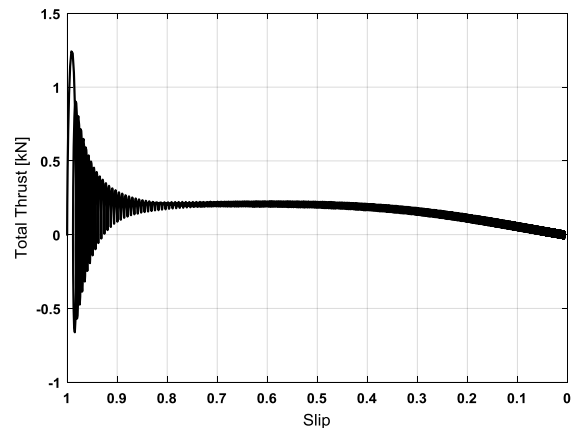
مکانیکی و نیز کاهش هزینه‌های ساخت بوده است. برای اولیه، از سیم پیچی تک لایه استفاده شده است که شامل ۲۴ کلاف ۱۰۰ دوری هستند. هر طرف اولیه ۱۲ کلاف و هر فاز ۴ کلاف که دوتا دوتا به صورت موازی در شیارها قرار گرفته‌اند. این کار برای افزایش قابلیت انعطاف سیم پیچی کلاف‌ها انجام شده است. همچنین برای سیم پیچی از سیم‌های ۰/۸ میلی‌متر استفاده شده است. شکل (۸) نحوه اتصالات سیم پیچی را نشان می‌دهد. همچنین برای اولیه از ورق‌های آهنی با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر استفاده شده است. برای ثانویه ورق آلومینیومی با ضخامت ۳ میلی‌متر (برای استحکام بیشتر) و طول ۲ متر (با توجه به محدودیت محیط آزمایشگاه) در نظر گرفته شد. با توجه به فاصله هوایی به دست آمده در طراحی، دو طرف اولیه به فاصله ۸ میلی‌متر از هم قرار گرفته و به وسیله دو تسمه آهنی با پیچ و مهره به هم متصل شده‌اند. سایر ابعاد و مشخصات موتور ساخته شده در جدول (۶) نشان داده شده است. موتور ساخته شده و اتصالات آن در شکل (۹) ملاحظه می‌شود.

برای آزمایش موتور ساخته شده، به دلیل کوتاه بودن ریل و بالا بودن سرعت موتور، امکان رساندن سرعت به حالت دائمی وجود نداشت ولی جریان ورودی و نیروی رانش موتور در حالت راه‌اندازی با ولتاژهای مختلف و با فرکانس ۵۰ هرتز مورد آزمایش قرار گرفت. برای این منظور از یک اتوترانسفورماتور برای تست استفاده گردید و به ازای ولتاژهای مختلف، جریان ورودی و نیروی رانش تولید شده توسط موتور اندازه‌گیری شد که نتایج در جدول (۷) با نتایج به دست آمده از روابط طراحی در حالت راه‌اندازی مقایسه شده است. برای اندازه‌گیری نیروی رانش راه‌اندازی از نیروسنج دیجیتال با دقت ± 0.1 نیوتن استفاده گردید. همچنین جریان ورودی برای حالت ۲۵ ولتی با آمپر متر دیجیتال و برای سه حالت دیگر با آمپر متر چنگکی اندازه‌گیری شده است. به طوری که ملاحظه می‌شود نتایج آزمایش با نتایج تئوری همخوانی خوبی دارد. بیشترین خطای نیرو به ازای ولتاژ ورودی ۷۵ ولت به دست آمده که برابر ۴/۱ درصد است. همچنین بیشترین خطای جریان ورودی مربوط به حالتی است که ولتاژ ورودی برابر ۵۰ ولت است و برابر ۴/۷ درصد به دست آمده است. شایان ذکر است که دلیل زیاد بودن جریان‌های اندازه‌گیری شده می‌تواند به صرف‌نظر کردن از تلفات هسته در مدل‌سازی تئوری مربوط باشد.

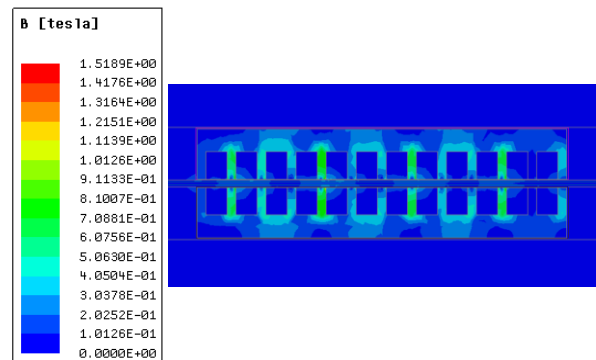
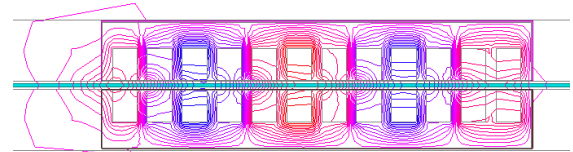


شکل (۸): طرح نوع تک لایه سیم پیچی‌ها

ای در محاسبات اجزای محدود دوبعدی مربوط است. همچنین بازده به دست آمده از اجزای محدود کمتر از مقدار به دست آمده از روش ارائه شده است که دلیل آن می‌تواند به عدم مدل کردن تلفات آهنی در روش تحلیلی مربوط باشد.



شکل (۵): مشخصه نیروی رانش - لغزش در راه‌اندازی بی بار



شکل (۶): خطوط میدان مغناطیسی در قسمت‌های مختلف ماشین

شکل (۷): توزیع چگالی شار مغناطیسی

جدول (۵): مقایسه نتایج روش ارائه شده با نتایج اجزای محدود

خطا (%)	FEM	روش ارائه شده	
+۱/۲	۲۰۱/۳۷	۱۹۸/۹۵	نیروی رانش خروجی (N)
+۴/۸	۰/۴۲	۰/۴۰	ضریب توان ورودی
-۵/۹	۴۲/۴۳	۴۴/۹۱	بازده (%)

۴-۲- ساخت نمونه آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش و ارزیابی نتایج طراحی ارائه شده، موتور بهینه جدول (۴) با اعمال تغییراتی در آزمایشگاه ساخته شده است. دلیل اعمال این تغییرات، محدودیت‌های موجود در بازار قطعات، ملاحظات

۵- نتیجه‌گیری

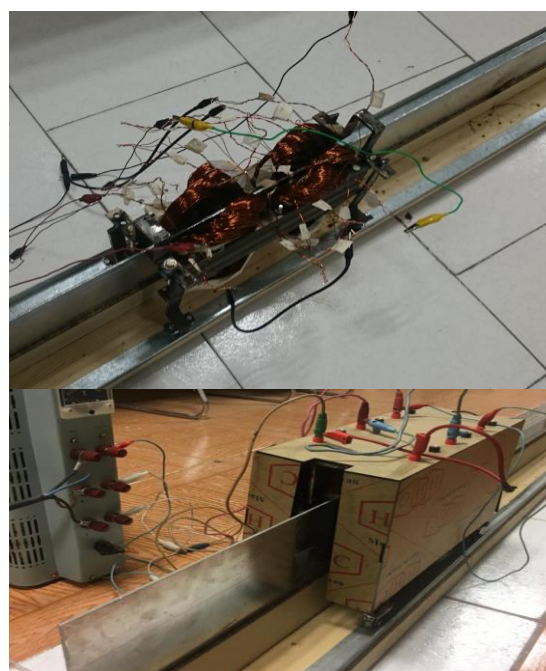
در این مقاله، روشی برای طراحی موتورهای القایی خطی دوطرفه ارائه گردید. اثر انتهایی که یکی از محدودیت‌های این موتورهاست، با ارائه رابطه‌ای مدلسازی و در طراحی اعمال گردید. با انتخاب متغیرهای مناسب، طراحی انجام شده با استفاده از الگوریتم گروهبی ذرات جهت افزایش بازده و ضریب توان ورودی و نیز کاهش وزن اولیه بهینه‌سازی شد. برای تأیید نتایج از اجزای محدود و نتایج آزمایشگاهی استفاده گردید. خطای نیروی رانش، ضریب توان و بازده به‌دست آمده از روش ارائه شده و روش FEM به ترتیب برابر $1/2\%$ ، $4/8\%$ و $5/9\%$ است. همچنین با مقایسه نتایج تست موتور ساخته شده و روش ارائه شده، ملاحظه گردید که بیشترین خطا مربوط به نیروی راه‌اندازی به برابر $4/7\%$ درصد است. بنابراین نتایج حاصل از اجزای محدود و نتایج آزمایشگاهی، نتایج روش ارائه شده را تأیید می‌کنند.

مراجع

- [۱] عباس شیر، شولایی عباس، موتورهای القایی خطی، تحلیل، طراحی و مدلسازی، انتشارات دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، پاییز ۱۳۹۵.
- [2] Ashutosh Chattar, Kunal Nandanwar, Vishal Bharambe, Pratik Borse, Pooja Zurale, "Designing of double sided linear induction motor", International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education, Vol. 3, No. 3, 2017.
- [3] I. Boldea, "Linear electric machines, drivers, and MAGLEVS", CRC Press – Taylor and Francis group, New York, 2013.
- [4] A. Shiri, A. Shoulai, "End effect braking force reduction in high-speed single-sided linear induction machine", Energy Conversion and Management, Vol. 61, pp. 43-50, September 2012.
- [5] J. Jamali, "End effect in linear induction and rotating electrical machines", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 18, no. 3, pp. 440-447, Sep, 2003.
- [6] R. C. Crepe, J. Covolan and J. F. Rodrigues, "Influence of design parameters on linear induction motor end effect", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 23, no. 2, pp. 358-362, Jun, 2008.
- [7] J. F. Gieras, J. Mews, and P. Splawski, "Analytical calculation of electro dynamic levitation forces in a special-purpose linear induction motor", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 48, no. 1, pp. 106-116, Jan./Feb, 2012.
- [8] E. Amiri and E. Mendrela, "A novel equivalent circuit model of linear induction motors considering static and dynamic end effects", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 50, no. 3, pp. 120-128, Mar, 2014.
- [9] W. Xu, J. Zhu, Y. Zhang, D., Y. Li, and Y. Wang, Y. Guo, "An improved equivalent circuit model of a single-sided linear induction motor", IEEE Transaction on Vehicular Technology, Vol. 59, pp. 2277-2289, Feb. 2010.
- [10] X. Wei, S. Guangyong, W. Guilin, W. Zhengwei, and P. K. Chu, "Equivalent circuit derivation and performance analysis of a single-sided linear induction motor based on the winding function theory", IEEE Transaction on

جدول (۶): مشخصات موتور ساخته شده

کمیت	مقدار	کمیت	مقدار
طول اولیه (cm)	۲۹/۵	عرض دندان (mm)	۷
عرض اولیه (cm)	۷/۶	عرض شیار (mm)	۱۷
ضخامت آلومینیوم ثانویه (mm)	۳	عمق شیار (mm)	۲۲
طول فاصله هوایی کل (mm)	۵	تعداد قطب/شیار	۱
تعداد زوج قطب	۲	تعداد دور در هر فاز در هر طرف	۲۰۰
طول آهن پشت اولیه (mm)	۱۸	وزن کل اولیه (kg)	۱۲/۲۷



شکل (۹): موتور ساخته‌شده

جدول (۷): مقایسه نتایج روش ارائه شده با نتایج آزمایشگاهی در راه‌اندازی (فرکانس ۵۰ هرتز)

ولتاژ (V)		مورد			
۱۰۰	۷۵	۵۰	۲۵	روش ارائه شده	نیروی راه‌اندازی (N)
۵۹۵/۲	۳۳۴/۸	۱۴۸/۸	۳۷/۲	روش ارائه شده	نیروی راه‌اندازی (N)
۵۸۲/۷	۳۲۱/۶	۱۴۳/۲	۳۶/۴	آزمایش	نیروی راه‌اندازی (N)
۴۶/۶۵	۳۴/۹۹	۲۳/۳۳	۱۱/۶۶	روش ارائه شده	جریان ورودی (A)
۴۷/۹۲	۳۶/۰۵	۲۴/۴۸	۱۱/۹۴	آزمایش	جریان ورودی (A)

- induction motor", IEEE Access, Vol. 9, pp. 87501–87509, 2021.
- [26] X. Liu, X. Zhu, J. Cai, L. Gao, X. Peng, Z. Cui, "Design on double-sided linear induction motor with varying pole pitch for the electromagnetic catapult", 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA), Wuhan, China, 2021.
- [۲۷] ح. محمد حسین، م. نظامی وطن دوست، ح. رادمنش، "طراحی ماشین شار محوری مغناطیس دائم با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات بهبود یافته"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۳۹۷؛ ۱۵(۱): صفحه ۱۲۳-۱۳۱.
- [28] A. Shiri, M. Allahyari, "Sensitivity analysis and optimization of railguns using circuit model", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 47, pp. 5139–5147, 2019.
- [۲۹] س. قنادی و ع. شیر، "طراحی و بهینه‌سازی موتور القایی خطی جهت بهبود شرایط راه‌اندازی"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۳۹۸؛ ۱۶(۳): صفحه ۲۵-۳۴.
- [۱۶] م. سبحانی، ح. م. چشمه‌بینگی، "مدل‌سازی و طراحی بهینه موتور القایی دوطرفه با استفاده از روش المان محدود"، چهارمین کنفرانس سراسری توسعه محوری، ۱۳۹۵، گرگان.
- [17] Mochammad Rusli, I.N.G. Wardana, Moch Agus Choiron, Muhammad Aziz Muslim, "Study of cogging forces in a ladder-secondary double-sided linear induction motor for asymmetry primary placement", IEEE Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar, Indonesia 2018.
- [18] Jun Di, John Edward Fletcher, Yu Fan, Yajing Liu, Zhengwei Sun, "Design and performance investigation of the double-sided linear induction motor with a ladder-sot secondary", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.34, Issue.3, pp. 1603 – 1612, 2019.
- [19] A. Shiri, A. Shoulaei, "Design optimization and analysis of single-sided linear induction motor, considering all phenomena", IEEE Transactions on energy conversion, vol. 27, no. 2, pp.516 – 525, june 2012.
- [20] Amir ZareBazghaleh, Mohammad Reza Naghashan, and Mohammad Reza Meshkatoddini, "Optimum design single sided linear induction motors for improved motor performance", IEEE Transactions on magnetics, vol.46, no 11, november 2010, Italy.
- [21] N. Govindpure, R. Hipparagi, A. Kumar, D. B. Talange, V. B. Bhole, "Basic design equations of linear electric machines", IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Dec. 2018, India.
- [22] J. Duncan, "Linear induction motor-equivalent-circuit model", IEE Proceedings B-Electric Power Applications., Vol. 130, pp. 51–57, 1983.
- [23] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "Particle swarm optimization", Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, NJ, pp. 1942-1948, 1995.
- [24] S. Wu and Q. Lu, "Multi-objective optimization of the linear induction motor by a hybrid optimal strategy", 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA), Wuhan, China, 2021.
- [25] W. Zhou, Z. Sun, F. Cui, Y. Mao, "Electromagnetic design of high-speed and high-thrust cross-shaped linear Vehicular Technology, Vol. 61, no. 4, pp. 1515–1525, May 2012.
- [11] K. Woronowicz and A. Safaee, "A novel linear induction motor equivalent circuit with optimized end effect model", Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 37, pp. 34–41, 2014.
- [12] A. Zare-Bazghaleh, M. Naghashan and A. Khodadoost, "Derivation of equivalent circuit parameters for single-sided linear induction motors", IEEE Transaction on Plasma Science, Vol. 43, no. 10, pp. 3637-3644, Sep 2015.
- [13] G. Lv, D. Zeng and T. Zhou, "An advanced equivalent circuit model for linear induction motors", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65, pp. 7495–7503, Feb 2018.
- [14] A. Shiri, "Electromagnetic force analysis in linear induction motors, considering end effect", 7th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Feb 2016.
- [15] Seyed Ehsan Abdollahi, Mehran Mirzayee, Mojtaba Mirsalim, "Design and analysis of a double-sided linear induction motor for transportation", IEEE Transactions on Magnetism, Vol. 51, No.7, 2015.

زیر نویس‌ها

¹Particle Swarm Optimization (PSO)