

## طراحی و بهینه‌سازی موتور القایی خطی جهت بهبود شرایط راه‌اندازی

سجاد قنادی<sup>۱</sup> عباس شیری<sup>۲</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی- تهران- ایران

[sajadghanadi@sru.ac.ir](mailto:sajadghanadi@sru.ac.ir)

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران- ایران

[abbas.shiri@sru.ac.ir](mailto:abbas.shiri@sru.ac.ir)

**چکیده:** امروزه موتورهای الکتریکی خطی در صنایع مختلف و در کاربردهایی که نیاز به حرکت خطی دارند، به عنوان یک وسیله تبدیل انرژی الکتریکی به کار مکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دسته‌بندی‌های مختلفی می‌توان برای موتورهای خطی در نظر گرفت که یکی از آن‌ها، دسته‌بندی بر اساس ثانویه این موتورها است. موتورهای الکتریکی خطی دارای دو نوع ثانویه هستند: صفحه‌ای و نردبانی. در این مقاله ابتدا به تحلیل و مدل‌سازی موتور القایی خطی با ثانویه صفحه‌ای و نردبانی پرداخته شده و روابط مربوط به آن‌ها بیان شده است. سپس این دو نوع موتور با در نظر گرفتن تأثیر پدیده اثر انتهایی، طراحی شده و با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات و با انتخاب بازده، ضریب توان، وزن موتور و نیروی ناشی از اثر انتهایی به عنوان تابع هدف، بهینه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تابع هدف، بهبود قابل توجهی یافته است. برای تأیید نتایج حاصل از طراحی از روش اجزای محدود استفاده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده می‌شود که موتور القایی خطی با ثانویه نردبانی، نیروی بیشتری نسبت به موتور با ثانویه صفحه‌ای تولید می‌کند که از آن برای بهبود شرایط راه‌اندازی و عملکرد بهتر موتور استفاده شده است.

**کلمات کلیدی:** موتور القایی خطی، پدیده اثر انتهایی، بهینه‌سازی طراحی، ثانویه صفحه‌ای، ثانویه نردبانی، راه‌اندازی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۲/۳۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۲/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر عباس شیری

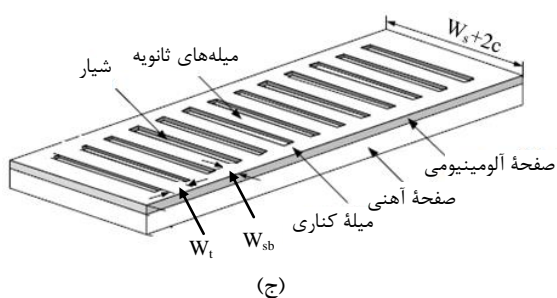
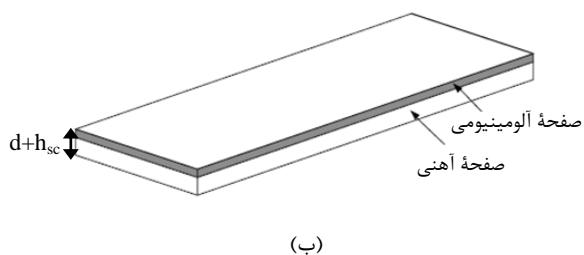
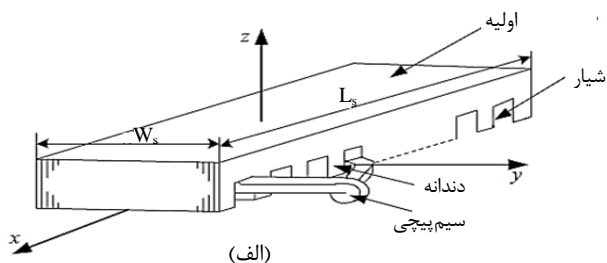
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - لویزان - خیابان شعبان‌لو - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

با توجه به مطالب گفته شده، تا کنون در مورد بهبود نیروی راه‌اندازی در موتورهای القایی خطی کمتر بحث شده است. در این مقاله با طراحی و بهینه‌سازی موتور القایی خطی با ثانویه نردبانی و مقایسه آن با ثانویه صفحه‌ای، با توجه به پارامترهای مختلف طراحی، میزان نیروی راه‌اندازی موتور افزایش داده شده است.

۲- مدل‌سازی موتور القایی خطی

در شکل ۱- (الف) شمای کلی اولیه موتور القایی خطی یک‌طرفه آورده شده است. همچنین در شکل‌های ۱- (ب) و ۱- (ج) به ترتیب ثانویه صفحه‌ای و نردبانی نشان داده شده است. در شکل ۱- (الف)،  $L_s$  طول موتور و  $W_s$  عرض اولیه است. همچنین در شکل ۱- (ب)،  $d+h_{sc}$  مجموع عرض آلومینیوم و آهن ثانویه است. در شکل ۱- (ج) نیز  $W_t$  عرض میله‌های ثانویه و  $W_{sb}$  عرض میله کناری در ثانویه است.



شکل (۱): شماتیک موتور القایی خطی یک‌طرفه: (الف) اولیه، (ب) ثانویه صفحه‌ای، (ج) ثانویه نردبانی

مقاومت و راکتانس اولیه از روابط زیر به دست می‌آید [۲۷]:

$$R_1 = \rho_w \frac{N \cdot 2(W_s I_{ec})}{A_w} \quad (1)$$

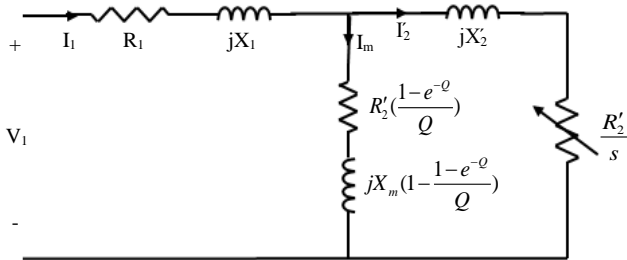
موتورهای خطی زیرمجموعه‌ای از ماشین‌های الکتریکی هستند که در چهار دهه اخیر مورد توجه محققان و طراحان ماشین‌های الکتریکی و ماشین‌آلات صنعتی قرار گرفته‌اند. در این نوع موتورها نیرو و حرکت خطی به طور مستقیم توسط میدان‌های مغناطیسی و بدون نیاز به مبدل‌ها و ادوات مکانیکی تولید می‌شود. امروزه در صنعت از موتورهای خطی استفاده‌های فراوانی می‌شود که یکی از مهم‌ترین آن‌ها استفاده در قطارهای مغناطیسی است.

تاکنون مقالات زیادی بر روی پدیده‌های خاص موتورهای خطی شده است. اثر انتهایی مهم‌ترین پدیده موجود در این موتورها است که می‌تواند عملکرد موتور را تحت تأثیر قرار دهد. در [۷-۱] این پدیده مورد بررسی قرار گرفته و با در نظر گرفتن تأثیر این پدیده، مدارهای معادلی برای موتور ارائه شده است [۳] و [۸-۱۲]. در [۱۳]، با ارائه یک مدار معادل  $\pi$  شکل، پارامترهای مختلف طراحی، محاسبه شده‌اند. در [۱۴]، یک تابع توزیع برای مدل‌سازی اثر انتهایی به منظور پیش‌بینی تغییرات شار فاصله‌ی هوایی با تغییر لغزش، ارائه شده است. در [۱۵]، با استفاده از قوانین آمپر و معادلات پایه‌ای مکسول، چگالی شار فاصله‌ی هوایی در موتور، با در نظر گرفتن اثر انتهایی در آن، محاسبه شده است. اکثر این مقالات بر پایه مدار معادل ارائه شده توسط دانکن [۱۶] است. گروه دیگری از مقالات بر روی طراحی موتور خطی تمرکز کرده و با در نظر گرفتن توابع هدف مختلف، طراحی‌های انجام شده را از نقطه‌نظرات مختلف بهینه‌سازی کرده‌اند [۱۷-۲۰].

مقالات اشاره شده بر روی موتور خطی با ثانویه صفحه‌ای تمرکز کرده‌اند، در حالی که موتور با ثانویه نردبانی در کاربردهای مختلف، می‌تواند عملکرد بهتری نسبت به نوع صفحه‌ای داشته باشد. در [۲۱]، روشی برای بهبود نیروی خروجی ارائه شده است. در این مقاله شکل خاصی از میله‌های ثانویه در نظر گرفته شده است که باعث بهبود در عملکرد موتور و همچنین میزان نیروی خروجی آن شده است. در [۲۲]، به بررسی اثر انتهایی در موتورهای القایی خطی با ثانویه نردبانی پرداخته شده است. در [۲۳]، به منظور بهبود عملکرد موتورهای خطی در سیستم حمل و نقل شهری، موتور القایی خطی با ثانویه صفحه‌ای و نردبانی باهم مقایسه شده است. عرض هادی‌های ثانویه و میله‌های کناری، مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر آن بر روی نیروی عمودی موتور بررسی شده است. در [۲۴]، با در نظر گرفتن اثر انتهایی، موتور القایی خطی بهینه‌سازی شده و با مورب کردن میله‌های ثانویه، رپیل چگالی شار کاهش داده شده است. در [۲۵]، تکنیک جدیدی برای مدل‌سازی موتور القایی خطی با ثانویه نردبانی ارائه شده است. این تکنیک بر پایه مدار معادل مغناطیسی با قابلیت تنظیم دقت آن است. در [۲۶]، با نردبانی کردن ثانویه، نیروی جانبی تولید شده کاهش داده شده است.

درحالی که شار موجود در طرف خروجی در حال کاهش است. این تولید و کاهش ناگهانی شار، باعث به وجود آمدن جریان‌های گردابی<sup>۱</sup> در ثانویه می‌شود. این جریان‌های گردابی بر مشخصات شار فاصله‌ی هوایی در جهت طولی تاثیر گذاشته و باعث ایجاد تلفات و همچنین تضعیف شار می‌شود. چنین پدیده‌ای را اثر انتهایی می‌نامند. اثر انتهایی به طور فزاینده‌ای وابسته به سرعت نسبی بین اولیه و ثانویه است. بنابراین اثر انتهایی به عنوان تابعی از سرعت مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۶].

مدار معادل موتور القایی خطی با در نظر گرفتن اثر انتهایی در شکل (۲) دیده می‌شود.



شکل (۲): مدار معادل موتور القایی خطی [۱۶]

نیروی خروجی تولید شده توسط موتور، نیروی ترمزی ناشی از اثر انتهایی، بازده و ضریب توان به ترتیب از روابط زیر به دست می‌آید [۲۰] و [۲۷]:

$$F_{xo} = \frac{3 R_2' I_2^2}{2 f_1 \tau} \quad (8)$$

$$F_{xe} = \frac{3 R_m I_m^2}{2 f_1 \tau} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{F_{xo} V_r}{2 f_1 \tau (F_{xe} + F_{xo}) + 3 R_1 I_1^2} \quad (10)$$

$$PF = \frac{P_{in}}{S_m} = \frac{2 f_1 \tau (F_{xe} + F_{xo}) + 3 R_1 I_1^2}{3 V_1 I_1} \quad (11)$$

در رابطه (۹)،  $R_m$  مقاومت شاخه مغناطیس‌کنندگی است که توان تلفاتی ناشی از اثر انتهایی را نشان می‌دهد و مقدار آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$R_m = \frac{R_2' [1 - e^{-Q}]}{Q} \quad (12)$$

که در آن  $Q$  طول نرمالیزه شده موتور بوده که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q = \frac{L_s R_2'}{V_r (L_m + L_2')} \quad (13)$$

در رابطه فوق،  $L_m$  و  $L_2'$  به ترتیب اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی و اندوکتانس پراکندگی ثانویه است.

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

در روابط فوق  $N$  تعداد دور در هر فاز،  $\rho_w$  مقاومت ویژه هادی‌های استفاده شده در سیم‌پیچی اولیه،  $l_{ec}$  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  $\omega_1$  فرکانس زاویه‌ای اولیه بوده و  $\lambda_s$  و  $\lambda_d$  و  $\lambda_e$  به ترتیب هدایت مغناطیسی ویژه شیار، دیفرانسیلی و اتصالات انتهایی است که در مرجع [۲۷] داده شده است. برای محاسبه راکتانس مغناطیس‌کنندگی برای هر فاز داریم:

$$X_m = \frac{6 \mu_0 \omega_1 W_{se} K_w^2 N^2 \tau}{\pi^2 p g_{ei}} \quad (3)$$

پارامترهای فوق برای هر دو نوع موتور (ثانویه صفحه‌ای و ثانویه نردبانی) صادق است. مقاومت معادل ثانویه، برای موتور با ثانویه صفحه‌ای از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_2' = \frac{X_m}{G_{ei}} = \frac{6 W_{se} K_w^2 N^2}{p \tau \sigma_{ei} d} \quad (4)$$

مقاومت معادل ثانویه برای موتور با ثانویه نردبانی نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_2' = \frac{W_{se} (N_1 K_w)^2}{p \tau d \frac{b_{s2}}{\tau_{s2}} (\sigma_{AL} / K_{skin})} (1 + K_{end}) \quad (5)$$

که در آن  $b_{s2}$  و  $\tau_{s2}$  به ترتیب عرض شیار ثانویه و گام شیار ثانویه است.

همچنین  $K_{end}$  ضریب مربوط به مقاومت بین میله‌های ثانویه است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$K_{end} = \frac{R_r}{2 R_b \sin^2 (\pi p / N_{s2})} \quad (6)$$

در رابطه فوق،  $R_r$  و  $R_b$  و  $N_{s2}$  به ترتیب مقاومت مربوط به اتصالات انتهایی میله‌ها، مقاومت میله‌ها و تعداد میله‌های ثانویه است. در موتورهای القایی خطی با ثانویه صفحه‌ای، از راکتانس پراکندگی ثانویه صرف‌نظر می‌شود؛ بنابراین داریم  $X_2' \approx 0$ . ولی موتورهای القایی خطی با ثانویه نردبانی دارای راکتانس پراکندگی ثانویه هستند که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$X_2' = \frac{2 \mu_0 W_{se} 12 (N_1 K_w)^2 \omega_1}{N_{s2}} (\lambda_{s2} + \lambda_{d2} + \lambda_{e2}) \quad (7)$$

$\lambda_{s2}$  و  $\lambda_{d2}$  و  $\lambda_{e2}$  به ترتیب هدایت مغناطیسی ویژه شیار، دیفرانسیلی و اتصالات انتهایی ثانویه است.

یکی از پدیده‌های مهمی که در موتورهای القایی خطی وجود دارد، پدیده اثر انتهایی است. در موتورهای القایی خطی، با حرکت موتور، شار به طور پیوسته در ورودی یوغ اولیه افزایش می‌یابد،

### ۳- طراحی و بهینه‌سازی

با توجه به این مقادیر و با استفاده از الگوریتم ارائه شده، موتور طراحی شده و مشخصات مربوط به پارامترهای مختلف آن در جدول (۲) آورده شده است.

به منظور مقایسه بین موتور القایی با ثانویه صفحه‌ای و نردبانی، پارامترهای به دست آمده از طراحی مربوط به اولیه موتور با ثانویه صفحه‌ای، برای موتور با ثانویه نردبانی نیز در نظر گرفته شده و نیرو، بازده، ضریب توان و سایر پارامترها به دست آمده که نتایج در جدول (۳) نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از طراحی، مشاهده می‌شود که نیروی تولید شده توسط موتور القایی خطی با ثانویه نردبانی بیشتر از نیروی تولید شده توسط موتور با ثانویه صفحه‌ای است.

جدول (۲): پارامترهای به دست آمده از طراحی موتور با ثانویه

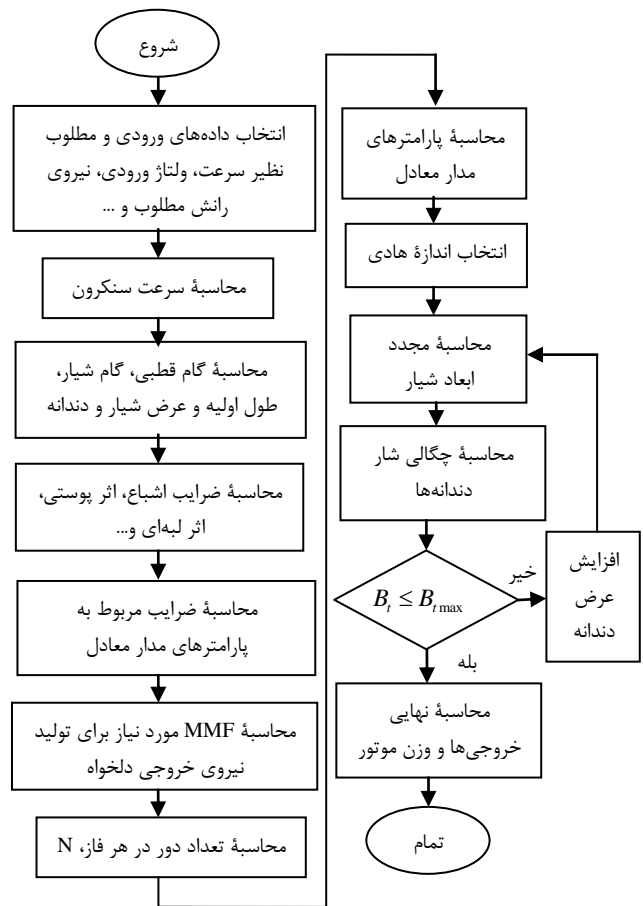
صفحه‌ای			
مقادیر	مشخصات	مقادیر	مشخصات
۱۸۲	نفوذپذیری نسبی آهن پشت	۱۳,۳۳	سرعت سنکرون (m/s)
۷,۹	فاصله هوایی مؤثر (mm)	۱۴,۸	گام شیار (mm)
۲۳,۵	عمق شیار (mm)	۰,۵۳۳۳	طول موتور (m)
۵۶,۸	بازده (%)	۱۱,۸	عرض شیار (mm)
۰,۴۱۷	ضریب توان	۲۶۴	تعداد دور در هر فاز
۲۹۳,۳۵	نیروی رانش خروجی (N)	۳۳۳,۳۸	نیروی رانش تولید شده (N)
۲۶,۸	وزن اولیه (Kg)	۳۸,۰۲	نیروی ترمزی ناشی از اثر انتهایی (N)

جدول (۳): پارامترهای به دست آمده از طراحی موتور با ثانویه نردبانی

مقادیر	مشخصات	مقادیر	مشخصات
۱۸۲	نفوذپذیری نسبی آهن پشت	۱۳,۳۳	سرعت سنکرون (m/s)
۷,۹	فاصله هوایی مؤثر (mm)	۱۴,۸	گام شیار (mm)
۲۳,۵	عمق شیار (mm)	۰,۵۳۳۳	طول موتور (m)
۵۸,۳۸	بازده (%)	۱۱,۸	عرض شیار (mm)
۰,۴۹۱	ضریب توان	۲۶۴	تعداد دور در هر فاز
۴۲۱,۵۷	نیروی رانش خروجی (N)	۴۶۳,۰۳	نیروی رانش تولید شده (N)
۲۶,۸	وزن اولیه (Kg)	۴۱,۴۵	نیروی ترمزی ناشی از اثر انتهایی (N)
۱۲	عرض شیار ثانویه (mm)	۳۰	تعداد میله‌های ثانویه

برای بهینه‌سازی طراحی، متغیرهای متعددی می‌توان در نظر گرفت. با توجه به بررسی‌های انجام شده، متغیرهایی که تأثیر زیادی بر عملکرد این موتورها دارند عبارتند از: فرکانس تغذیه ورودی ( $f_1$ )، تعداد زوج قطب ( $p$ )، تعداد شیار در هر فاز در هر قطب ( $q$ )، چگالی جریان اولیه ( $J_1$ )، عرض اولیه ( $W_p$ )، ضخامت صفحه ثانویه ( $d$ )، لغزش

طراحی بر اساس دیاگرام بلوکی نشان داده شده در شکل (۳) انجام شده است. بر اساس دیاگرام ارائه شده، ابتدا پارامترهای ورودی مانند سرعت، ولتاژ ورودی، نیروی رانش مطلوب و... انتخاب شده و در ادامه با توجه به روابط موتور القایی خطی، محاسبات مربوط به سرعت سنکرون، طول اولیه، ضرایب اشباع، ضرایب مربوط به پارامترهای مدار معادل، نیروی محرکه مغناطیسی، تعداد دور در هر فاز و... انجام شده و در نهایت با محاسبه چگالی شار دندانه‌ها و بررسی محدوده مجاز آن، محاسبه نهایی خروجی‌ها و وزن موتور انجام می‌شود.



شکل (۳): دیاگرام بلوکی طراحی موتور القایی خطی [۲۰]

در جدول (۱) مشخصات در نظر گرفته شده برای طراحی موتور القایی با ثانویه صفحه‌ای و نردبانی آورده شده است.

جدول (۱): مشخصات در نظر گرفته شده برای طراحی

مقادیر	مشخصات
۲۲۰	ولتاژ فاز ورودی (V)
۳۰۰	نیروی رانش (N)
۵۰	فرکانس تغذیه (Hz)
۱۰	سرعت (m/s)
۰,۲۵	لغزش نامی

نتایج حاصل از بهینه‌سازی موتور القایی خطی با ثانویه صفحه‌ای در جداول (۵) و (۶) آورده شده است. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود با بهینه‌سازی طراحی موتور القایی خطی با ثانویه صفحه‌ای، در جدول ۵، هرچند که بازده موتور از ۵۶/۸٪ در حالت بدون بهینه‌سازی، به مقدار ۵۴/۲٪ کاهش یافته، ولی ضریب توان ورودی از مقدار ۰/۴۱ به مقدار ۰/۴۶ افزایش یافته و همچنین وزن اولیه نیز از مقدار ۲۶/۸ کیلوگرم به مقدار ۱۲/۹ کیلوگرم کاهش یافته است. همچنین در جدول (۶) نیز بازده از ۵۶/۸٪ به ۴۲/۳۴٪ کاهش یافته و ضریب توان ورودی از ۰/۴۱ به مقدار ۰/۶۱ افزایش یافته و وزن اولیه موتور از مقدار ۲۶/۸ به ۲۰/۳۸ رسیده است. با توجه به در نظر گرفتن نیروی ترمزی ناشی از اثر انتهایی در تابع هدف، ملاحظه می‌شود که این نیرو به میزان قابل توجهی کاهش یافته و از مقدار ۳۸/۰۲ نیوتن به مقدار ۳/۰۸ نیوتن رسیده است.

نتایج حاصل از بهینه‌سازی موتور القایی خطی با ثانویه نردبانی در جداول (۷) و (۸) آورده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی، در جدول (۷)، ملاحظه می‌شود که بازده از مقدار ۵۸/۳٪ در حالت بدون بهینه‌سازی به مقدار ۶۵/۸٪ افزایش یافته است. همچنین ضریب توان و وزن موتور نیز به ترتیب از مقادیر ۰/۴۹ و ۲۶/۸ کیلوگرم به مقادیر ۰/۵۲ و ۹/۵۲ کیلوگرم رسیده اند. در جدول (۸)، بازده از مقدار ۵۸/۳٪ به مقدار ۴۳/۷٪ کاهش یافته و ضریب توان ورودی و وزن موتور به ترتیب از مقادیر ۰/۴۹ و ۲۶/۸ کیلوگرم به مقادیر ۰/۷ و ۲۴/۲۳ کیلوگرم رسیده اند. همچنین با توجه به در نظر گرفتن نیروی ترمزی ناشی از اثر انتهایی در تابع هدف، ملاحظه می‌شود که مقدار این نیرو از ۲۵/۳۶ نیوتن به ۱/۱۸ نیوتن کاهش یافته است.

جدول (۵): مشخصات موتور القایی خطی بهینه با ثانویه صفحه‌ای و با

تابع هدف  $f_1$

مقادیر	مشخصات	مقادیر	مشخصات
۳	عرض دندان (mm)	۶	چگالی جریان اولیه (A/mm <sup>2</sup> )
۶۷	عرض شیار (mm)	۶۱،۴۸	عرض اولیه (mm)
۳۲،۳	عمق شیار (mm)	۲	ضخامت صفحه ثانویه (mm)
۰،۶۹۱۴	نسبت عرض شیار به گام شیار	۲،۵	فاصله هوایی فیزیکی (mm)
۱،۲۴	چگالی شار دندانها (T)	۰،۳۵۶۸	لغزش
۵۴،۲	بازده (%)	۲	تعداد زوج قطب
۰،۴۶۳۲	ضریب توان ورودی	۳	تعداد شیار در هر فاز در هر قطب
۱۲،۹۶	وزن اولیه (kg)	۸۸،۸۴	فرکانس ورودی (Hz)
۱۸،۱۶۷	نیروی ترمزی ناشی از اثر انتهایی (N)	۲۵۸	تعداد دور در هر فاز
۳۰،۲۴۸	نیروی رانش خروجی (N)	۱۸،۲۵	جریان فاز ورودی (A)
۱۵،۹	ضخامت آهن پشت اولیه (mm)	۰،۳۵۲۲	طول موتور (m)

موتور (S)، نسبت عرض شیار به گام شیار ( $\frac{W_s}{\tau_s}$ ) و فاصله هوایی (g). همچنین چگالی شار در دندان را می‌توان به عنوان قید به بهینه‌سازی اعمال نمود:

$$B_f \leq B_{f_{max}} \quad (14)$$

همچنین کمیت‌های خروجی مختلفی را می‌توان به عنوان تابع هدف در نظر گرفت. به عنوان مثال بازده، ضریب توان ورودی، وزن اولیه موتور، نسبت توان خروجی به وزن اولیه، نیروی ترمزی ناشی از اثر انتهایی، نیروی عمودی و یا تجمیع دو یا چند مورد از آن‌ها را می‌توان انتخاب کرد.

در این بهینه‌سازی ابتدا، هدف بیشینه نمودن حاصل‌ضرب بازده موتور، ضریب توان ورودی و کمینه کردن وزن اولیه است. در حالتی دیگر، کاهش نیروی ترمزی ناشی از اثر انتهایی نیز در تابع هدف لحاظ می‌گردد. بنابراین توابع هدف به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$f_1(x) = \frac{\eta(x).PF(x)}{PW(x)} \quad (15)$$

$$f_2(x) = \frac{\eta(x).PF(x)}{PW(x).F_{xe}} \quad (16)$$

بهینه‌سازی با استفاده از روش بهینه‌سازی گروه ذرات<sup>۲</sup> انجام شده است. این الگوریتم از رفتار دسته‌جمعی پرندگان در طبیعت الهام گرفته شده و با توجه به داشتن مزایایی همچون مفهوم ساده، پیاده‌سازی آسان و همگرایی سریع نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی، توجه زیادی را به خود جلب کرده و کاربردهای وسیعی در زمینه‌های مختلف پیدا کرده است [۲۸]. در [۲۹]، به بررسی و ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های فرا ابتکاری از جمله الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات، پرداخته شده است. همچنین از این روش استفاده‌های زیادی برای بهینه‌سازی طراحی موتور شده است. در [۳۰]، به منظور بهینه‌سازی طراحی ماشین شار محوری مغناطیس دائم، از این الگوریتم استفاده شده است. با توجه به واقعیت‌های طراحی، محدودیت‌هایی نیز برای پارامترهای انتخاب شده اعمال می‌شود. جدول (۴) این پارامترها و محدوده آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول (۴): محدودیت‌های متغیرهای طراحی موتور القایی خطی

پارامترها	مقادیر کمینه	مقادیر بیشینه
چگالی جریان اولیه (A/mm <sup>2</sup> )	۳	۶
عرض اولیه (mm)	۵۰	۳۰۰
ضخامت صفحه ثانویه (mm)	۲	۶
لغزش	۰/۱	۰/۵
فاصله هوایی فیزیکی (mm)	۲،۵	۱۰
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)	۱۰	۲۰۰

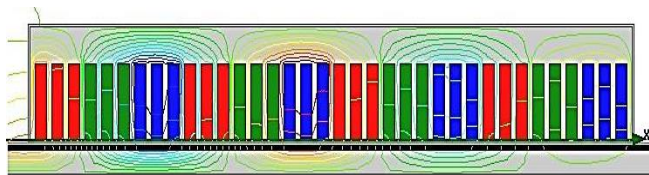
بازده و ضریب توان آن بیشتر از موتور القایی خطی با ثانویه صفحه‌ای است.

جدول (۸): مشخصات موتور القایی خطی بهینه با ثانویه نردبانی و تابع هدف  $f_2$

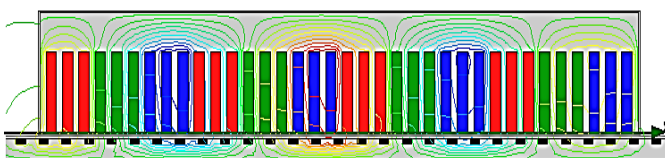
مقادیر	مشخصات	مقادیر	مشخصات
۳٫۱	عرض دندانۀ اولیه (mm)	۵٫۹	چگالی جریان اولیه ( $A/mm^2$ )
۷٫۳	عرض شیار اولیه (mm)	۱۳۹٫۸	عرض اولیه (mm)
۶	عرض دندانۀ ثانویه (mm)	۲	ضخامت میلۀ آلومینیومی ثانویه (mm)
۴	عرض شیار ثانویه (mm)	۲٫۵	فاصلۀ هوایی فیزیکی (mm)
۱۷٫۷	عمق شیار اولیه (mm)	۰٫۴۸۱۴	لغزش
۰٫۷	نسبت عرض شیار به گام شیار	۴	تعداد زوج قطب
۰٫۳	چگالی شار دندانۀ‌ها (T)	۳	تعداد شیار در هر فاز در هر قطب
۴۳٫۷	بازده (%)	۱۰۳٫۰۱	فرکانس ورودی (Hz)
۰٫۷	ضریب توان ورودی	۳۸۴	تعداد دور در هر فاز
۲۴٫۲۲	وزن اولیه (Kg)	۱۴٫۲۲	جریان فاز ورودی (A)
۱٫۱۸	نیروی ترمزی ناشی از اثر انتهایی (N)	۰٫۷۵	طول موتور (m)
۲۹۰٫۷۱	نیروی رانش خروجی (N)	۷۵	تعداد میله‌های ثانویه

#### ۴- شبیه‌سازی اجزای محدود

در این بخش به منظور تأیید نتایج، هر دو نوع موتور القایی خطی بهینه شده با تابع هدف  $f_1$  (ثانویه صفحه‌ای و نردبانی)، توسط نرم‌افزار اجزای محدود شبیه‌سازی و نتایج آن بررسی شده است. در شکل‌های (۴) و (۵) به ترتیب مسیر عبور شار و توزیع چگالی شار در قسمت‌های مختلف موتور برای موتور با ثانویه صفحه‌ای و نردبانی آورده شده است.



(الف)



شکل (۴): مسیر عبور شار در موتور القایی خطی: (الف) ثانویه صفحه‌ای، (ب) ثانویه نردبانی

جدول (۶): مشخصات موتور القایی خطی بهینه با ثانویه صفحه‌ای و تابع هدف  $f_2$

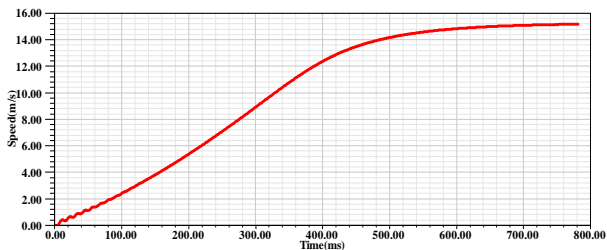
مقادیر	مشخصات	مقادیر	مشخصات
۳٫۴	عرض دندانۀ (mm)	۵٫۹	چگالی جریان اولیه ( $A/mm^2$ )
۸	عرض شیار (mm)	۷۴٫۷	عرض اولیه (mm)
۱۹٫۹	عمق شیار (mm)	۲	ضخامت صفحه ثانویه (mm)
۰٫۷	نسبت عرض شیار به گام شیار	۲٫۵	فاصلۀ هوایی فیزیکی (mm)
۰٫۵۱	چگالی شار دندانۀ‌ها (T)	۰٫۵	لغزش
۴۲٫۳۴	بازده (%)	۴	تعداد زوج قطب
۰٫۶۱۱۴	ضریب توان ورودی	۳	تعداد شیار در هر فاز در هر قطب
۲۰٫۳۸	وزن اولیه (Kg)	۹۷٫۷۲	فرکانس ورودی (Hz)
۳٫۰۸	نیروی ترمزی ناشی از اثر انتهایی (N)	۳۹۶	تعداد دور در هر فاز
۲۹۰٫۹۷	نیروی رانش خروجی (N)	۱۷۰٫۳	جریان فاز ورودی (A)
۱۹٫۹	ضخامت آهن پشت اولیه (mm)	۰٫۸۱۸	طول موتور (m)

جدول (۷): مشخصات موتور القایی خطی بهینه با ثانویه نردبانی و تابع هدف  $f_1$

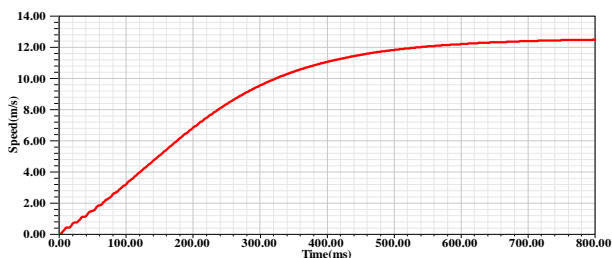
مقادیر	مشخصات	مقادیر	مشخصات
۳	عرض دندانۀ اولیه (mm)	۶	چگالی جریان اولیه ( $A/mm^2$ )
۵٫۲	عرض شیار اولیه (mm)	۶۲	عرض اولیه (mm)
۸٫۳	عرض دندانۀ ثانویه (mm)	۲	ضخامت میلۀ آلومینیومی ثانویه (mm)
۵٫۵	عرض شیار ثانویه (mm)	۲٫۵	فاصلۀ هوایی فیزیکی (mm)
۳۴٫۴	عمق شیار اولیه (mm)	۰٫۲۰۷	لغزش
۰٫۶۳۶۵	نسبت عرض شیار به گام شیار	۲	تعداد زوج قطب
۱٫۳۶	چگالی شار دندانۀ‌ها (T)	۳	تعداد شیار در هر فاز در هر قطب
۶۵٫۸	بازده (%)	۸۵٫۱۱	فرکانس ورودی (Hz)
۰٫۵۲۷	ضریب توان ورودی	۳۰۰	تعداد دور در هر فاز
۹٫۵۲	وزن اولیه (Kg)	۱۲٫۸۳	جریان فاز ورودی (A)
۲۵٫۳۶	نیروی ترمزی ناشی از اثر انتهایی (N)	۰٫۲۹۹۴	طول موتور (m)
۲۹۴٫۲۱	نیروی رانش خروجی (N)	۲۲	تعداد میله‌های ثانویه

با دقت در نتایج به دست آمده برای هر دو موتور (ثانویه صفحه‌ای و نردبانی) ملاحظه می‌شود که موتور القایی خطی با ثانویه نردبانی در مقایسه با موتور القایی خطی با ثانویه صفحه‌ای، تقریباً نیروی رانش خروجی یکسانی را تولید می‌کند ولی ابعاد و وزن موتور کمتر شده و



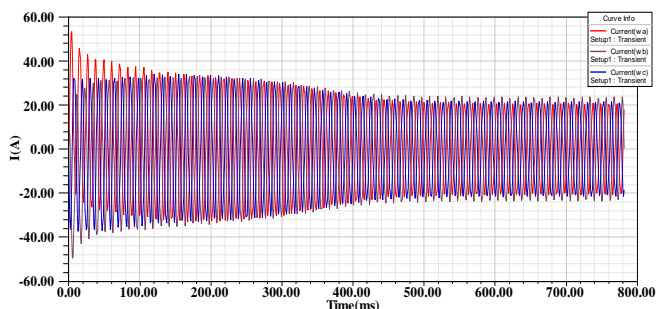


(الف)

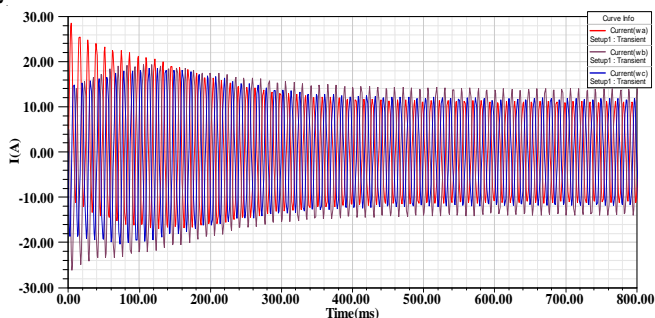


(ب)

شکل (۶): نمودار سرعت-زمان در راه اندازی بی بار:  
(الف) ثانویه صفحه‌ای، (ب) ثانویه نردبانی



(الف)

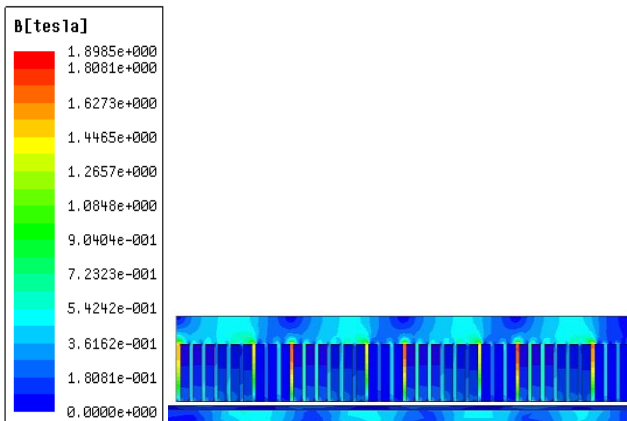


(ب)

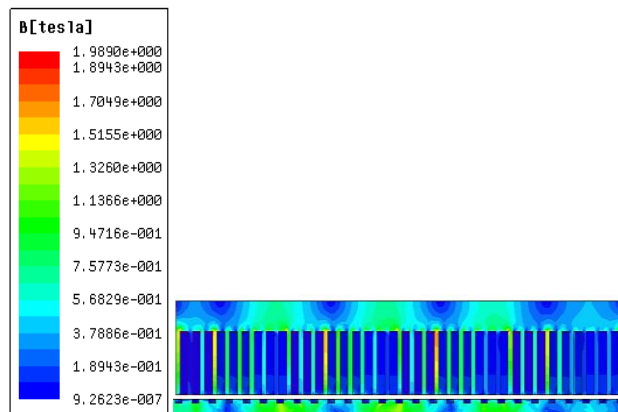
شکل (۷): نمودار جریان - زمان: (الف) ثانویه صفحه‌ای، (ب) ثانویه نردبانی

#### ۴-۱- مقایسه موتور القایی خطی با ثانویه صفحه‌ای و نردبانی در حالت راه اندازی

در این بخش به مقایسه موتور القایی خطی با ثانویه صفحه‌ای و نردبانی پرداخته شده است. به منظور مقایسه بهتر بین این دو نوع موتور،



(الف)



(ب)

شکل (۵): توزیع چگالی شار در قسمت‌های مختلف موتور:  
(الف) ثانویه صفحه‌ای، (ب) ثانویه نردبانی

با توجه به نتایج حاصل از بهینه‌سازی، سرعت سنکرون مربوط به دو موتور برابر است با:

$$V_s = 2 \times 18,84 \times 0,873 = 15,52 (m/s) \quad \text{(ثانویه صفحه‌ای)} \quad (17)$$

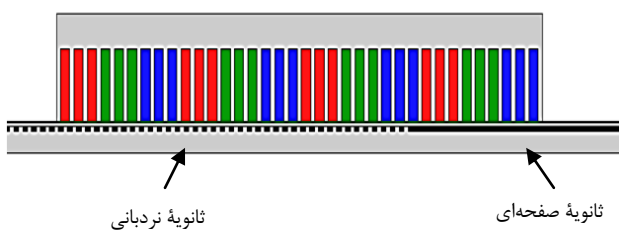
$$V_s = 2 \times 15,11 \times 0,738 = 12,56 (m/s) \quad \text{(ثانویه نردبانی)} \quad (18)$$

در شکل (۶) نمودارهای سرعت مربوط به هر دو موتور نشان داده شده است. همان طوری که در شکل (۶) دیده می‌شود، با توجه به این که موتورها در حالت بی‌بار راه‌اندازی شده، سرعت به سرعت سنکرون خود رسیده است.

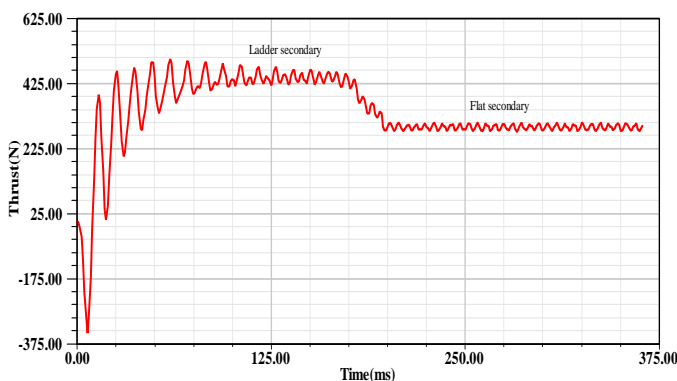
همچنین در شکل (۷)، نمودارهای جریان هر دو موتور نشان داده شده است. در شکل (۷) وجود نامتعادلی در جریان‌ها به دلیل وجود اثر انتهایی است که به دلیل عدم تقارن در مدار مغناطیسی در طول مسیر حرکت به وجود آمده است.

آلومینیوم مصرفی کمتر از ثانویه صفحه‌ای است، این‌گونه به نظر می‌رسد که هزینه کمتری هم نسبت به ثانویه صفحه‌ای داشته باشد؛ ولی هزینه ساخت ثانویه نردبانی یا به عبارتی دیگر، هزینه ایجاد شیار در ثانویه صفحه‌ای در مقایسه با قیمت آلومینیوم صرفه‌جویی شده، بیشتر است. بنابراین از نظر اقتصادی، قرار دادن ثانویه نردبانی در تمام طول مسیر به صرفه نیست. با توجه به مطالب گفته‌شده، پیشنهاد می‌شود که در ایستگاه‌ها که قطار در ابتدای حرکت خود بوده و به نیروی بیشتری برای راه‌اندازی و حرکت نیاز دارد، از ثانویه نردبانی استفاده شود و در سایر قسمت‌های مسیر ثانویه صفحه‌ای قرار داده شود.

برای تأیید مطالب گفته‌شده، در شکل (۱۰)، در ابتدای مسیر، ثانویه نردبانی قرار داده‌شده و پس از راه‌اندازی موتور از ثانویه صفحه‌ای استفاده شده است. در شکل (۱۱) نمودار نیرو - زمان مربوط به آن آورده شده است. به منظور مشاهده نیروی خروجی نامی موتور، سرعت نامی آن که در طراحی  $V_r = 10(m/s)$  در نظر گرفته شده بود، به آن اعمال شده است.



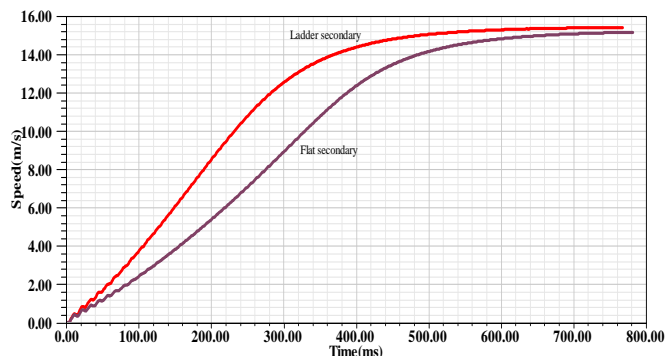
شکل (۱۰): شماتیک مربوط به موتور القایی خطی راه‌اندازی شده با ثانویه نردبانی



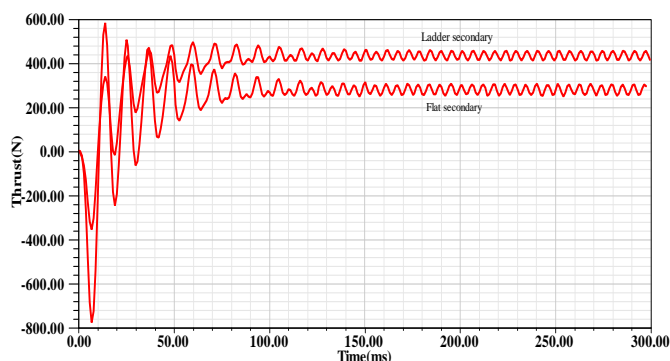
شکل (۱۱): نمودار نیرو - زمان موتور القایی خطی راه‌اندازی شده با ثانویه نردبانی

همچنین در شکل (۱۲)، بار ۲۰۰ نیوتن به دو موتور (ثانویه اولیه صفحه‌ای و ثانویه دومی در ابتدای مسیر نردبانی و سپس صفحه‌ای) در لحظه راه‌اندازی اعمال شده است. ملاحظه می‌شود که موتوری که در ابتدای مسیر ثانویه نردبانی دارد، با اعمال این بار، راه‌اندازی شده است ولی موتور با ثانویه صفحه‌ای نتوانسته بار را به حرکت در آورد.

پارامترهای طراحی مربوط به اولیه هر دو موتور یکسان در نظر گرفته شده و فقط ثانویه آن‌ها باهم تفاوت دارد؛ به طوری که صفحه آلومینیومی موتور القایی خطی با ثانویه صفحه‌ای با میله‌های آلومینیومی جایگزین شده است. با توجه به این که جریان در میله‌های آلومینیومی در مسیرهای مشخص تری نسبت به صفحه آلومینیومی جاری می‌شود، بنابراین نیروی بیشتری تولید می‌کند. در شکل‌های (۸) و (۹)، به ترتیب سرعت موتورها و نیروی خروجی تولید شده توسط هر دو، از لحظه راه‌اندازی نشان داده شده است.



شکل (۸): نمودار سرعت - زمان موتور القایی خطی با ثانویه صفحه‌ای و نردبانی



شکل (۹): نمودار نیروی خروجی تولید شده با ثانویه صفحه‌ای و نردبانی

همان طوری که در شکل (۸) دیده می‌شود، موتور القایی خطی با ثانویه نردبانی در حالت راه‌اندازی زودتر به سرعت سنکرون می‌رسد. این موضوع، به دلیل تولید نیروی بیشتر در ثانویه نردبانی است (شکل (۹) ملاحظه شود) که در نتایج تحلیل هم به دست آمده بود. تولید نیروهای بیشتر در موتورهای با ثانویه نردبانی نسبت به موتورهای با ثانویه صفحه‌ای، فرصتی ایجاد می‌کند که از آن‌ها در کاربردهای مختلفی استفاده نمود. همان طوری که قبلاً هم اشاره شد، یکی از کاربردهای مهم موتور القایی خطی، استفاده از آن در قطارهای مغناطیسی است. بنابراین می‌توان در قطارهای مغناطیسی از ثانویه نردبانی استفاده کرد. با توجه به این که در ثانویه نردبانی میزان



مراجع

[1] K. Yamazaki, "Modification of 2D nonlinear time-stepping analysis by limited 3D analysis for induction machines", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 33, no. 2, pp. 1694–1697, Mar, 1997.

[2] R. C. Creppe, J. Covelan 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.

[3] 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.

[4] A. Z. Bazghaleh, M. R. Naghashan, and M. R. Meshkatoddini, "Optimum design of single-sided linear induction motors for improved motor performance", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 46, no. 11, pp. 3939–3947, Nov. 2010.

[5] H. Yu and B. Fahimi, "Effects of air gap length variation in frictionless linear induction transportation systems", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007, pp. 377–382.

[6] 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.

[7] 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.

[8] J. Gieras, G. Dawson, and A. Eastham, "A new longitudinal end effect factor for linear induction motors", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. EC-2, pp. 152–159, Mar. 1987.

[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 Vehicular Technology, Vol. 61, no. 4, pp. 1515–1525, May 2012.

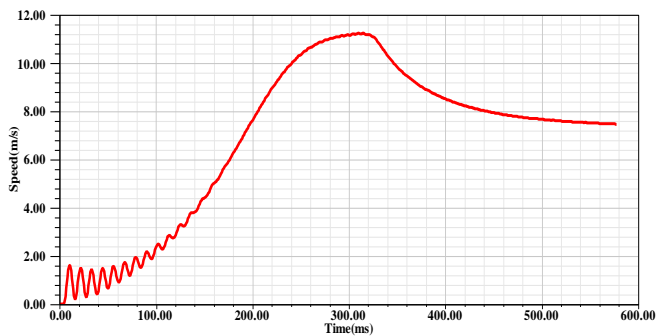
[11] K. Woronowicz and A. Safaee, "A novel linear induction motor equivalent circuit with optimized end effect model", Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, Vol. 37, pp. 34–41, 2014.

[12] F. Sarapulov, S. Sarapulov and I. Smolyanov, "Compensated linear induction motor characteristics research by detailed magnetic equivalent circuit", International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017.

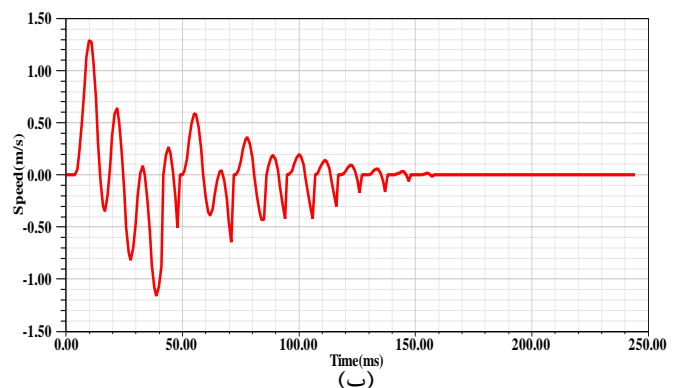
[13] A. Zare-Bazghaleh, M. Naghashan and A. Khodadoost, "Derivation of equivalent circuit parameters for single-sided linear induction motors", IEEE Transaction on Plasma Science, Vol. 43, no. 10, pp. 3637–3644, Sep 2015.

[14] 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.

[15] A. Shiri, "Electromagnetic force analysis in linear induction motors, considering end effect", 7th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference



(الف)



(ب)

شکل (۱۲): نمودار سرعت - زمان موتور القایی خطی در راه‌اندازی با بار ۲۰۰ نیوتنی: (الف) ثانویه نردبانی، (ب) ثانویه صفحه‌ای

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی، مقایسه و طراحی موتور القایی خطی با ثانویه صفحه‌ای و نردبانی پرداخته شد. در ادامه، بهینه‌سازی طراحی هر دو موتور با استفاده از روش بهینه‌سازی گروه ذرات انجام گرفت و برای اعتبارسنجی از تحلیل اجزای محدود استفاده گردید. با توجه به این حقیقت که جریان القایی در ثانویه نردبانی از مسیرهای مشخص‌تری نسبت به ثانویه صفحه‌ای عبور می‌کند، موتور القایی خطی با ثانویه نردبانی نیروی بیشتری تولید می‌کند که از این مشخصه می‌توان برای بهبود شرایط راه‌اندازی و عملکرد بهتر سیستم استفاده کرد. توجه به این نکته نیز ضروری است که ایجاد شیار در تمام طول ثانویه، مخصوصاً در کاربردهایی مانند قطار مغناطیسی که طول ثانویه در آن‌ها زیاد است، از نظر اقتصادی به صرفه نیست. به همین دلیل در این مقاله، این پیشنهاد مطرح و مورد بررسی قرار گرفت که در ابتدای مسیر حرکت که نیاز به نیروی بیشتری جهت راه‌اندازی است، از ثانویه نردبانی استفاده شود و پس از راه‌اندازی موتور، ثانویه صفحه‌ای قرار گیرد. نتایج نشان می‌دهد که با این کار، می‌توان بدون نیاز به هزینه بالا برای ساخت ریل ثانیه در طول مسیر، شرایط راه‌اندازی را بهبود داد. این موضوع راه‌اندازی موتور در زیر بارهای سنگین را نیز امکان‌پذیر می‌کند.

## زیر نویس ها

<sup>1</sup> Eddy current  
<sup>2</sup> PSO

- (PEDSTC), Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Feb 2016.
- [16] J. Duncan, "Linear induction motor-equivalent-circuit model", IEE Proceedings B-Electric Power Applications, Vol. 130, pp. 51-57, 1983.
- [17] B. Laporte and N. Takorabet, "An approach to optimize winding design in linear induction motors", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 33, no. 2, pp. 1844-1847, Mar. 1997.
- [18] M. Hofmann, A. Binder and R. Pfeiffer, "Investigations on a linear induction machine for railway applications", Electric Machines and Drives Conference, Cambridge, MA, USA, 2001.
- [19] A. H. Isfahani, H. Lesani, and B. Ebrahimi, "Design optimization of a low-speed single-side linear induction motor for improved efficiency and power factor", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 44, pp. 266-272, Jan. 2008.
- [20] A. Shiri and A. Shoulaie, "Design optimization and analysis of single-sided linear induction motor, considering all phenomena", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 27, No. 2, June 2012.
- [21] T. Yamaguchi, M. Ito and K. Matsui, "Improvement of thrust of linear induction motor using modified ladder slits", IEEE Power Conversion Conference. Vol. 2, pp. 563-566, 1997.
- [22] N. Fujii and T. Harada, "A new viewpoint of end effect of linear induction motor from secondary side in ladder type model", IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 35, No. 5, Sep 1999.
- [23] G. Lv, T. Zhou, D. Zeng and Z. Liu, "Design of ladder-slit secondaries and performance improvement of linear induction motors for urban rail transit", IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 65, pp. 1187-1195, 2017.
- [24] M. Ravanji and Z. Nasiri-Gheidari, "Design optimization of a ladder secondary single-sided linear induction motor for improved performance", IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 30, pp. 1595-1603, 2015.
- [25] P. Naderi and A. Shiri, "Modeling of ladder-secondary linear induction machine using magnetic equivalent circuit", IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018.
- [26] G. Lv, T. Zhou and D. Zeng, "Influence of the ladder-slit secondary on reducing the edge effect and transverse forces in the linear induction mot", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65, pp. 7516-7525, Sep 2018.
- [۲۷] عباس شیری و عباس شولایی، موتور القایی خطی، تحلیل، طراحی و مدل سازی، انتشارات دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، پاییز ۹۵.
- [28] J. Kennedy and R. C. Eberhart, "Particle Swarm Optimization", Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Piscataway, NJ, pp. 1942-1948, 1995.
- [۲۹] م. تقی پور گرچی کلایی، م. فرشاد، م. رضوی. ارزیابی عملکرد الگوریتم های فراابتکاری در تخمین پارامترهای ساختاری موتور القایی قفسه سنجایی، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۶؛ ۱۴(۱): صفحه ۹۳-۱۰۱.
- [۳۰] ح. محمد حسین، م. نظامی وطن دوست، ح. رادمنش، طراحی ماشین شار محوری مغناطیس دائم با استفاده از الگوریتم بهینه سازی تجمع ذرات بهبود یافته. مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۱۳۹۷؛ ۱۵(۱): صفحه ۱۲۳-۱۳۱.