

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک قدرت و ماشین های الکتریکی

طراحی بهینه ساختار ثانویه و آزمایش عملکرد یک شتاب دهنده الکترومغناطیسی دو طرفه

نگارنده: مرتضی صمیمی

استاد راهنما:

دکتر امیر حسن نیا

دی ۱۳۹۹

تقدیم بہ

رفیق و ہمراہ مسیر زندگی، ہمسر عزیزم

امیدواری زندگیم، مادر بی نہایت مہربانم

الکوی صبر و تلاش، پدر بزرگوارم

کہ ہموارہ مایہ آرامش من بودہ اند۔

خواہرا و برادرہای عزیزم۔

روح دوست و ہنگلاسی عزیزمان امید اقدسی، محبتی عباس نژاد از شہدای

پرواز او کراین و کاد محترم دمان

تشکر و قدردانی

سپاس خدای آموزگار، که مشتی خاک برگزید و در آن از روح خویش دمید، خدایی که آفرید و جان بخشید و زمین را مسخر کرد، تا هر تکه از پازل هستی‌اش فرصتی یابد برای آموختن. در مدرسه با شکوه خدا، نان و نور، عشق و خشم، تردید و اطمینان و هزارها مفهوم دیگر همه گامیست به سمت رسیدن، همه توشه‌ای است که بال و پرت می‌دهند اگر اصل باشند و پرت می‌شکنند اگر بیراهه باشند. هرچه هست قانون دست‌های قدرتمند خداست. خدای حکیم، خالق مفهوم‌ها آموزگاری تو را سپاس.

از زحمات استاد راهنمای گرامی جناب آقای دکتر امیر حسن نیا که در تمامی مراحل انجام پایان‌نامه از راهنمایی‌های ایشان بهره‌مند شدم و کمک‌های بی دریغشان شامل حال بنده شده کمال تشکر و سپاس‌گزاری را دارم. انشاءالله که قدردان زحمات همه عزیزان باشم.

تعمدنامه

- اینجانب مرتضی صمیمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق- الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه طراحی بهینه ساختار ثانویه و آزمایش عملکرد یک شتاب‌دهنده الکترومغناطیسی دوطرفه تحت راهنمایی دکتر امیر حسن‌نیا متعهد می‌شوم.
- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

تولید مستقیم نیروی خطی دارای مزایای بسیاری از جمله حذف مبدل‌ها و کاهش هزینه نگهداری سیستم است. سیستم‌های مکانیکی، آیرودینامیکی و پنوماتیکی در حال جایگزینی با سیستم‌های الکترومغناطیسی هستند که از جمله این سیستم‌ها، شتاب‌دهنده‌ها هستند. در این پایان‌نامه از یک موتور القائی خطی دوطرفه (DSLIM)^۱ به عنوان شتاب‌دهنده الکترومغناطیسی استفاده شده است. هدف، بهینه‌سازی ساختار ثانویه موتور مورد نظر است. ابتدا شبیه‌سازی این موتور با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود Jmag-Designer انجام شده است. پس از تایید عملکرد مدل مورد نظر، ساختارهای مختلف ثانویه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شبیه‌سازی‌های انجام شده به صورت زیر است: نخستین ساختار، حالت یکپارچه با استفاده ورق مس بوده است. ضخامت بهینه ورق ثانویه با جنس مس بدست آمده و سپس ضخامت بهینه در استفاده از ورق آلومینیومی تحقیق شده است، که نشان دهنده افزایش ۱/۴ درصدی سرعت بوده است. در مرحله بعد با بهینه‌سازی بیرون‌زدگی ثانویه، مدل پایه طراحی شده است. سپس با روش‌های بهینه‌سازی معرفی شده در مراجع، تکنیک‌های بهینه‌سازی مرسوم انجام شده است. در پایان، روش‌های بهینه‌سازی پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با استفاده از روش‌های مرسوم از جمله ثانویه نردبانی و چند شیاره، بیشینه سرعت ۳۶/۲۱ درصد و سرعت میانگین ۴۵/۸۳ درصد افزایش یافته است. با استفاده از روش‌های پیشنهادی ۵/۶۸ درصد افزایش در سرعت نهایی و ۳/۳۵ درصد افزایش در سرعت میانگین حاصل شده است. با آزمایش عملکرد ساختار بهینه و ساختار پایه، داده‌های آزمایشگاهی نیز جمع‌آوری شده‌اند که این داده‌ها نیز با نتایج شبیه‌سازی موافقت دارند.

کلمات کلیدی: شتاب‌دهنده الکترومغناطیسی، موتور القائی خطی، ثانویه چند لایه، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی اجزاء

محدود

^۱ Double Sided Linear Induction Motor

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- 1- M. Samimi and A. Hassannia “Investigation of Multi-layer Secondary Concept of an Electromagnetic Launcher, ” in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, under review

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه و کلیات تحقیق	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۱-۲ موتورهای القائی خطی	۳
۱-۲-۱ کاربردهای موتور القائی خطی	۴
۲-۲-۱ مزایای موتور القائی خطی	۴
۳-۲-۱ معایب موتورهای القائی خطی	۵
۴-۲-۱ معرفی انواع موتور خطی	۵
۵-۲-۱ معرفی چند نوع ثانویه	۸
۶-۲-۱ تفاوت‌های موتورهای القائی دوار (RIM) و القائی خطی (LIM)	۸
۳-۱ بیان مسئله و ضرورت انجام تحقیق	۹
۴-۱ اهداف پایان‌نامه	۹
فصل ۲: مروری بر پیشینه پژوهش	۱۱
۱-۲ مقدمه	۱۲

۲-۲	مروری بر بهینه‌سازی ثانویه.....	۱۳
۱-۲-۲	بهینه‌سازی با ایجاد شیار در ثانویه.....	۱۳
۲-۲-۲	بهینه‌سازی توسط تغییر در شکل کلی ثانویه.....	۲۰
۳-۲	خلاصه فصل.....	۲۳
فصل ۳	شبیه‌سازی و بهینه‌سازی توسط نرم افزار	۲۵
۱-۳	مقدمه.....	۲۶
۲-۳	معرفی موتور مورد بررسی.....	۲۶
۱-۲-۳	بررسی صحت عملکرد مدل اجزاء محدود موتور.....	۲۸
۳-۳	بررسی تحلیلی بهینه‌سازی پیشنهادی.....	۲۹
۱-۳-۳	مدار معادل موتور.....	۳۱
۲-۳-۳	تأثیر مقاومت ثانویه در منحنی نیرو-سرعت.....	۳۲
۳-۳-۳	استفاده از عمق نفوذ مغناطیسی در تغییر مقاومت ثانویه.....	۳۳
۴-۳	شبیه‌سازی.....	۳۴
۱-۴-۳	بهینه‌سازی توسط روش‌های مرسوم.....	۳۵
۲-۴-۳	بهینه‌سازی توسط روش‌های پیشنهادی.....	۴۳
فصل ۴	ساخت نمونه عملی و آزمایش عملکرد	۴۹
۱-۴	مقدمه.....	۵۰

۵۲	۲-۴ معرفی محیط آزمایش
۵۲	۱-۲-۴ نگهدارنده‌های مکانیکی
۵۳	۲-۲-۴ لوازم اندازه‌گیری
۵۴	۳-۲-۴ منابع تغذیه
۵۵	۴-۲-۴ بار
۵۵	۳-۴ آزمایش عملکرد
۵۵	۱-۳-۴ آزمایش عملکرد مدل پایه
۵۷	۲-۳-۴ آزمایش عملکرد مدل پیشنهادی
۵۸	۳-۳-۴ مقایسه نتایج
۵۸	۴-۴ مقایسه نتایج شبیه‌سازی و نتایج عملی
۶۱	فصل ۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادهای ادامه کار
۶۲	۱-۵ جمع‌بندی
۶۳	۲-۵ نتیجه‌گیری
۶۳	۳-۵ پیشنهادهای ادامه کار
۶۴	مراجع

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: مقایسه عملکرد ساختارهای دو شیار منظم، نامنظم و V شکل با ساختار یکپارچه..... ۱۸
- جدول ۱-۳: مشخصات موتور تحت آزمایش..... ۲۸
- جدول ۲-۳: روند عددی پیشرفت بهینه‌سازی نسبت به ثانویه یکپارچه مسی..... ۴۷
- جدول ۱-۴: نتایج آزمایش عملی..... ۵۸

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: مقایسه یک LIM و RIM..... ۳
- شکل ۲-۱: نحوه ارتباط LIM و RIM..... ۳
- شکل ۳-۱: تشکیل جریان گردابی در ثانویه LIM..... ۴
- شکل ۴-۱: شماتیک کلی SLIM اولیه کوتاه..... ۷
- شکل ۵-۱: شماتیک کلی DSLIM..... ۷
- شکل ۱-۲: تاثیر تولید شیار بر جهت‌گیری جریان ادی در ثانویه LIM..... ۱۴
- شکل ۲-۲: نمونه‌هایی از ساختارهای ثانویه مطالعه شده..... ۱۵
- شکل ۳-۲: مسیر جریان گردابی القائی در ثانویه‌های مختلف..... ۱۶
- شکل ۴-۲: متغیرهای مورد نیاز ثانویه V شکل..... ۱۶
- شکل ۵-۲: منحنی نیروی پیشران و عمودی بر حسب عرض شیارهای ثانویه در ثانویه V شکل..... ۱۷
- شکل ۶-۲: منحنی نیروی پیشران و عمودی بر حسب طول شیار در ساختارهای یکپارچه، دو شیار منظم، دو شیار نامنظم، V شکل..... ۱۷
- شکل ۷-۲: شتاب ثانویه بر حسب لغزش در ساختارهای یکپارچه و نردبانی..... ۱۹
- شکل ۸-۲: نیروی پیشران بر حسب لغزش در ساختارهای یکپارچه و نردبانی..... ۱۹
- شکل ۹-۲: ضریب توان بر حسب لغزش در ساختارهای یکپارچه و نردبانی..... ۱۹
- شکل ۱۰-۲: نمونه‌هایی از ساختارهای مستطیلی و غیرمستطیلی..... ۲۱
- شکل ۱۱-۲: نیروی پیشران، ریپل نیرو و نسبت ریپل در ساختارهای مستطیل، متوازی‌الاضلاع، دمپرستویی و شاتل..... ۲۱
- شکل ۱۲-۲: میانگین نیروی پیشران، ریپل نیرو و نسبت ریپل در ساختارهای غیرمستطیلی..... ۲۲
- شکل ۱۳-۲: مقایسه نیرو به ازای w های مختلف در ساختار شاتل..... ۲۳

- شکل ۲-۱۴: مقایسه نیرو و ریپل ساختار شاتل به ازای عرض‌های مختلف..... ۲۳
- شکل ۳-۱: شماتیک DSLIM مورد مطالعه..... ۲۷
- شکل ۳-۲: توزیع رنگی چگالی شار یک طرف DSLIM مورد مطالعه در $t=2\text{ms}$ ۲۷
- شکل ۳-۳: توزیع رنگی چگالی جریان یک طرف DSLIM مورد مطالعه در $t=2\text{ms}$ ۲۷
- شکل ۳-۴: چگالی شار فاصله هوایی بدون حضور ثانویه در مدل مورد آزمایش در پله اول..... ۲۹
- شکل ۳-۵: نمودار نیرو-سرعت DSLIM دست آمده از FEM..... ۲۹
- شکل ۳-۶: منحنی‌های سرعت و نیرو بر حسب زمان، بدست آمده از FEM..... ۳۰
- شکل ۳-۷: شکل موج ولتاژ فاز بر حسب زمان، بدست آمده از FEM..... ۳۰
- شکل ۳-۸: شکل موج جریان فاز بر حسب زمان، بدست آمده از FEM..... ۳۰
- شکل ۳-۹: مدار معادل موتور القایی..... ۳۱
- شکل ۳-۱۰: مشخصه نیرو-سرعت LIM به ازای مقادیر کاهشی مقاومت ثانویه..... ۳۳
- شکل ۳-۱۱: مشخصه نیرو-سرعت LIM به ازای مقادیر افزایشی مقاومت ثانویه..... ۳۴
- شکل ۳-۱۲: بیشینه سرعت پرتابه بر حسب ضخامت صفحه ثانویه مسی..... ۳۶
- شکل ۳-۱۳: بیشینه سرعت پرتابه بر حسب ضخامت صفحه ثانویه آلومینیومی..... ۳۶
- شکل ۳-۱۴: شکل موج نیروی پیشران بر حسب زمان در ثانویه آلومینیومی با ضخامت بهینه..... ۳۷
- شکل ۳-۱۵: جریان گردابی در ثانویه یکپارچه بدست آمده از FEM..... ۳۷
- شکل ۳-۱۶: چگالی جریان گردابی القایی در ثانویه نردبانی بدست آمده از FEM..... ۳۸
- شکل ۳-۱۷: بیشینه سرعت پرتابه بر حسب LSR..... ۳۹
- شکل ۳-۱۸: بیشینه سرعت پرتابه بر حسب طول (L) و عرض ($w1$)..... ۴۰
- شکل ۳-۱۹: نمودار نیروی پیشران بر حسب زمان برای ثانویه نردبانی، بدست آمده از FEM..... ۴۰
- شکل ۳-۲۰: جریان گردابی ورق ثانویه در ساختار شیار دوگانه..... ۴۱
- شکل ۳-۲۱: بیشینه سرعت پرتابه بر حسب فاصله محوری (LD)..... ۴۱

- شکل ۳-۲۲: بیشینه سرعت پرتابه بر حسب زاویه شیار (α)..... ۴۲
- شکل ۳-۲۳: ثانویه بهینه شده با استفاده از روشهای متداول..... ۴۲
- شکل ۳-۲۴: نیروی پیشران بر حسب زمان در ثانویه آلومینیومی با ضخامت 5mm با شیار دوگانه، بدست آمده از FEM..... ۴۳
- شکل ۳-۲۵: برش گوشه‌های ثانویه به منظور کاهش وزن..... ۴۴
- شکل ۳-۲۶: بیشینه سرعت پرتابه بر حسب قاعده برش (α)..... ۴۴
- شکل ۳-۲۷: جریان گردابی ورق ثانویه پس از برش گوشه‌های ثانویه..... ۴۴
- شکل ۳-۲۸: بیشینه سرعت پرتابه بر حسب ضخامت آلومینیوم و مس در ثانویه لایه‌ای..... ۴۵
- شکل ۳-۲۹: ثانویه پیشنهادی، بهینه‌سازی شده توسط روشهای متداول و پیشنهادی..... ۴۶
- شکل ۳-۳۰: نمودار نیروی پیشران بر حسب زمان برای ثانویه پیشنهادی، بدست آمده از FEM..... ۴۶
- شکل ۳-۳۱: نمودار میله‌ای روند بهینه‌سازی انجام شده توسط روش‌های مرسوم و پیشنهادی..... ۴۷
- شکل ۴-۱: هسته سیم‌پیچی شده یک LIM..... ۵۰
- شکل ۴-۲: ساختار یک طرف DSLIM..... ۵۱
- شکل ۴-۳: ثانویه‌های مورد آزمایش..... ۵۲
- شکل ۴-۴: محیط آزمایش..... ۵۳
- شکل ۴-۵: شماتیک ثانویه پیشنهادی مورد آزمایش..... ۵۴
- شکل ۴-۶: مدار بایاس حسگر مادون قرمز استفاده شده جهت تشخیص سرعت..... ۵۴
- شکل ۴-۷: سیگنال حسگرهای مادون قرمز جهت محاسبه $\Delta t1$ مدل پایه..... ۵۶
- شکل ۴-۸: سیگنال حسگرهای مادون قرمز جهت محاسبه $\Delta t2$ مدل پایه..... ۵۶
- شکل ۴-۹: سیگنال حسگرهای مادون قرمز جهت محاسبه $\Delta t1$ مدل پیشنهادی..... ۵۷
- شکل ۴-۱۰: سیگنال حسگرهای مادون قرمز جهت محاسبه $\Delta t2$ مدل پیشنهادی..... ۵۸
- شکل ۴-۱۱: مقایسه سرعت میانگین مدل پایه و مدل پیشنهادی در آزمایش عملی و شبیه‌سازی..... ۵۹

شکل ۴-۱۲: مقایسه سرعت میانگین مدل پایه و مدل پیشنهادی در آزمایش عملی و شبیه‌سازی ۵۹

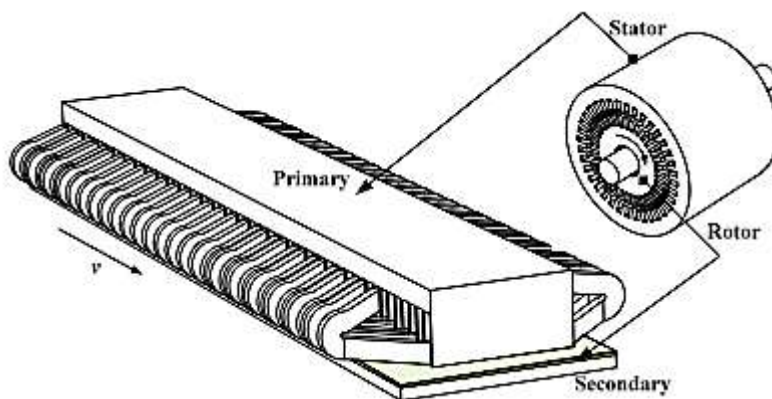
فصل ۱: مقدمه و کلیات تحقیق

۱-۱ مقدمه

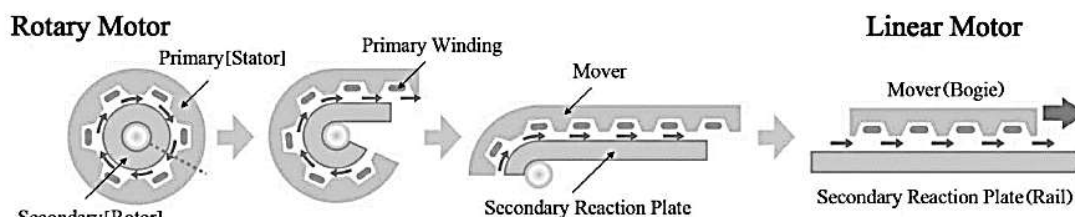
هدف از شتاب‌دهنده‌ها ایجاد نیروی خطی و در نتیجه، رساندن یک جسم به سرعتی خاص، در طول و احتمالاً انرژی ورودی محدود است. برای رسیدن به این هدف، از شتاب‌دهنده‌های انفجاری، هیدرولیکی، پنوماتیکی و ... نیز استفاده می‌شود. اما استفاده از شتاب‌دهنده‌های الکترومغناطیسی به علت سادگی مورد توجه قرار گرفته است. این شتاب‌دهنده‌ها که امروزه به علت عدم نیاز به مبدل نیرو، بسیار پرکاربرد هستند، اساساً مبتنی بر یک موتور خطی هستند [۱]. البته با استفاده از یک موتور دوار و چرخ‌دنده‌های مکانیکی، می‌توان نیروی خطی تولید کرد، اما همواره مناسب است مبدل‌ها در حد امکان کاهش یابند. موتورهای خطی دسته‌ای خاص از ماشین‌های الکتریکی هستند که انرژی الکتریکی را مستقیماً به حرکت انتقالی مکانیکی تبدیل می‌کنند [۲]. از انواع ماشین خطی می‌توان به سنکرون خطی، القائی خطی [۳]، DC خطی [۴] و پله‌ای خطی [۵] اشاره کرد. استفاده از موتورهای القائی خطی (LIM)^۱ به علت مزایای بسیار زیاد از قبیل قابلیت ساختار ساده [۶]، انتقال بار مناسب، لرزش کم، صرفه اقتصادی و ... [۷] قابل توجه بوده و با پیشرفت تکنولوژی در صنایع نظامی و عمومی رشد بسیاری داشته است [۸]. LIMها اساساً اقتباس شده از موتورهای القائی دوار (RIM)^۲ها هستند، مطابق شکل ۱-۱ و ۲-۱ با بریدن یک RIM از یال و مسطح کردن آن، به جای استاتور که میدان دوار تولید می‌کند، قطعه‌ای به نام "اولیه" پدید می‌آید که میدان متحرک تولید می‌کند، قطعه "ثانویه" نیز با روتور مسطح شده RIM، قابل همانندسازی است که به صورت یک ورقه هادی است.

^۱ Linear Induction Motor

^۲ Rotary Induction Motor



شکل ۱-۱: مقایسه یک LIM و RIM [۹]

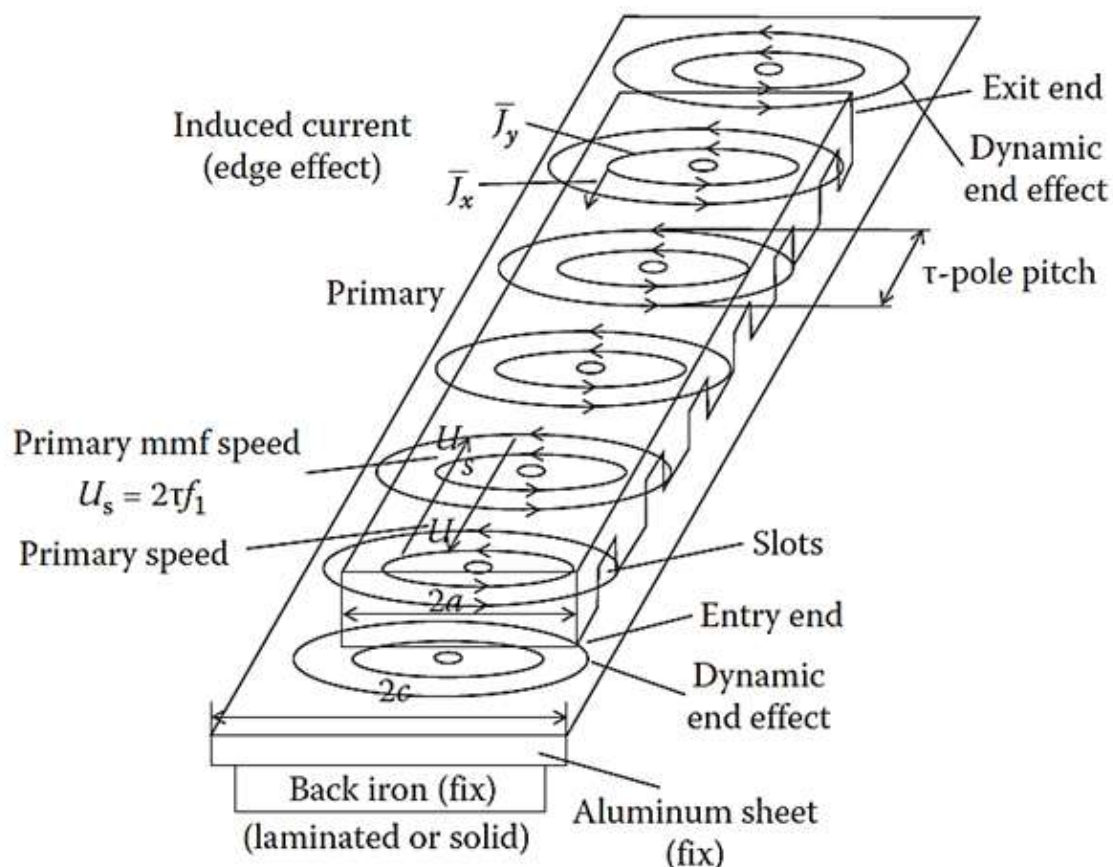


شکل ۲-۱: نحوه ارتباط LIM و RIM [۱۰]

۲-۱ موتورهای القائی خطی

استفاده از LIM ها به بیش از یک قرن پیش برمی گردد [۱۱]، ولی سالیان اخیر به علت کاربرد فراوان، بیشتر مطرح شده اند [۱۲]. در LIM ها نیروی مورد نظر توسط چگالی شار فاصله هوایی و جریان گردابی^۱ القا شده در ثانویه تولید می شود [۱]. به این صورت که میدان متحرک متغیر با زمان، تولید شده توسط اولیه، مطابق شکل ۳-۱ در صفحه رسانای ثانویه تولید جریان گردابی می کند، این جریان دارای دو مؤلفه است، یکی در راستای جهت حرکت و دیگری عمود بر آن است. طبق قانون دست راست، مؤلفه عمود بر حرکت جریان و میدان اولیه، تولید نیروی پیشران خواهد داشت. در صورتی که اولیه ثابت باشد، صفحه ثانویه حرکت خواهد کرد و بالعکس در صورتی که ثانویه ثابت نگه داشته شود، اولیه حرکت می کند. در ادامه انواع LIM از نظر نسبت طول ثانویه و اولیه بررسی خواهد شد.

^۱ Eddy Current



شکل ۳-۱: تشکیل جریان گردابی در ثانویه LIM [۱۳]

۱-۲-۱ کاربردهای موتور القائی خطی

همانطور که اشاره شد LIMها از جمله موتورهای پر کاربرد هستند، وسیع ترین کاربرد LIM سیستم حمل و نقل، شتاب دهنده های خطی [۱۴]، آزمایش های صنعتی مانند شتاب دهی به هواپیماها و فرایند ساخت، مانند ابزار ماشینی است [۲]. از کاربردهای دیگر این موتورها می توان به ابزار نساجی، اره ها، جدا کننده ها، برش گر ها [۱۵]، هدایت جریان فلزات مذاب [۱۶]، روبات های متحرک، درب های کشویی [۱۷]، پمپ های فلزات مایع [۱] و مهندسی هوافضا [۱۸] نام برد.

۲-۲-۱ مزایای موتور القائی خطی

بزرگترین مزیت LIM عدم وجود چرخ دنده های مکانیکی و سیستم های انتقال قدرت است، که منجر به کارایی، عملکرد دینامیکی و قابلیت اطمینان بالاتر می شود [۱۷] و [۱۹]. همچنین عدم سایش با ریل در برخی از این موتورها، به کاهش نویز حرکتی و افزایش کارایی مکانیکی می انجامد [۱۴]. در کاربرد قطار، توانایی چرخیدن در پیچ های با شعاع کمتر ممکن می شود، که در این صورت، تعداد تونل، طول

ریل و هزینه کمتر خواهد بود [۱۷]. از سویی عملکرد مناسب در شیب، لرزش و آلودگی کم، امنیت بیشتر [۷]، گستره سرعت بالا و عملکرد مناسب در سرعت‌های بسیار کم تا زیاد [۲۰] از جمله مزایای این موتورها است.

۳-۲-۱ معایب موتورهای القائی خطی

یک LIM دارای راندمان و ضریب توان پایین است که باعث افزایش جریان ورودی می‌شود [۱۷] در این موتورها در حالت کار دائمی، لغزش زیاد است [۲۱]، همچنین به علت اثر انتهایی که از خصوصیات یک موتور خطی است و در بخش‌های بعد معرفی می‌گردد، با اینکه سیم‌پیچی هر کدام از فازها متقارن است حالت کاری موتور، نامتقارن است [۲۲]. همچنین این اثر، باعث غیرخطی شدن شدید در مدل LIM [۱۹]، پیچیدگی مدل موتور [۲۳] و پیچیدگی روش‌های کنترلی نسبت به RIM ها [۲۴] می‌شود و حتی ممکن است بر کنترل دقیق موتور خطی تاثیر بگذارد [۱۴].

۴-۲-۱ معرفی انواع موتور خطی

دسته‌بندی اجمالی ارزشمندی از ساختارهای مختلف LIM آورده شده است [۲۵]. در بخش‌های بعد برخی از دسته‌بندی‌ها به صورت مفصل‌تر بیان خواهد شد:

بر اساس نوع اولیه:

- یک طرفه
- دو طرفه
- لوله‌ای
- دیسکی
- دایره‌ای^۱

بر اساس نوع ثانویه:

- استیل

^۱ Arc

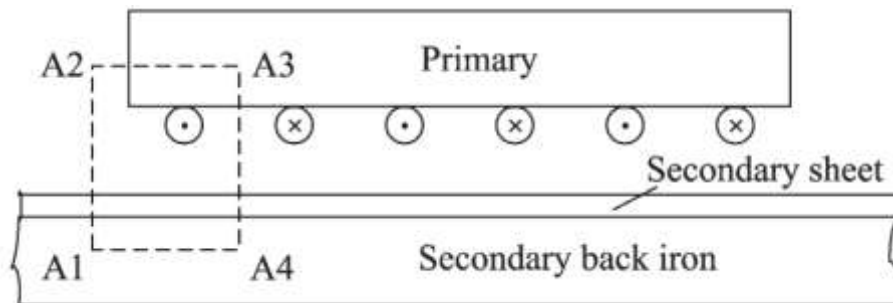
- غیر فرو مغناطیس
- ترکیبی
- قفس سنجابی
- بر اساس طول اولیه و ثانویه
- اولیه کوتاه
- ثانویه کوتاه
- بر اساس داشتن یا نداشتن شیار
- شیاردار
- بی شیار
- نحوه خنک سازی
- طبیعی
- با هوا
- با آب

۱-۴-۲-۱ انواع LIM بر اساس تعداد اولیه

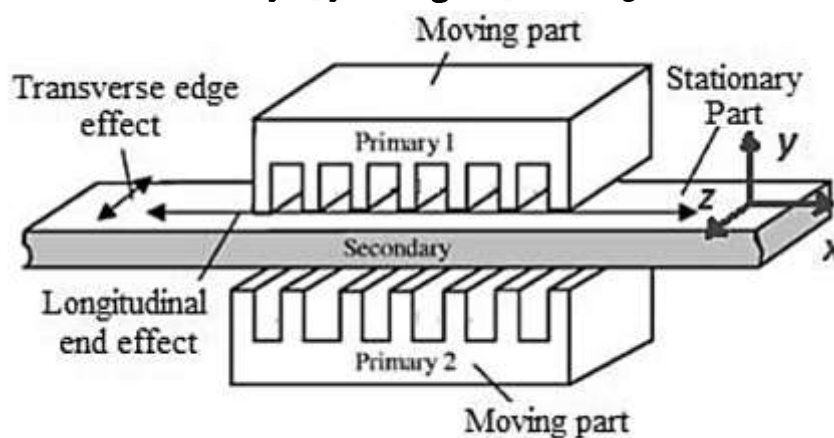
یک LIM می‌تواند یک یا دو اولیه داشته باشد، LIM با یک اولیه موتور القایی خطی یک طرفه (SLIM)^۱ نامیده می‌شود. که از کاربردهای آن می‌توان به استفاده در مترو، شناورهای مغناطیسی و آسانسورها نام برد [۲۶]. SLIM جهت بسته شدن مسیر شار مغناطیسی نیازمند یوغ آهنی در پشت اولیه است، شماتیک این موتورها در شکل ۱-۴ قابل مشاهده است. در سوی دیگر موتورهای القایی خطی دوطرفه (DSLIM) با استفاده از دو اولیه موازی مانند شکل ۱-۵ از چگالی نیروی بیشتر بهره می‌برد. بنابراین، به ویژه برای ضربه‌های کوتاه، بار زیاد، و موقعیت‌های شتاب بالا مناسب هستند. در این موتورها، یک ثانویه در میان دو اولیه قرار می‌گیرد [۸]. بالا رفتن ضریب توان به علت کم شدن فاصله

^۱ Single Sided Linear Induction Motor

هوایی معادل و بسته شدن مدار مغناطیسی بدون نیاز به یوغ آهنی ثانویه، از جمله مزایای DSLIM نسبت به SLIM است [۲۷].



شکل ۴-۱: شماتیک کلی SLIM اولیه کوتاه [۲۸]



شکل ۵-۱: شماتیک کلی DSLIM [۲۹]

۲-۴-۲-۱ دسته‌بندی LIM بر اساس نسبت طول اولیه و ثانویه

پیشتر بیان شد که در یک LIM نیروی متقابل اولیه و ثانویه باعث حرکت می‌شود. انتخاب بخش ساکن و متحرک منجر به دسته‌بندی دیگری با نام اولیه کوتاه و ثانویه کوتاه می‌شود، که در ساختار اولیه کوتاه، ثانویه ثابت و طولانی‌تر از اولیه است و به عبارتی، بخش تغذیه‌شونده بر روی ریل رسانای ثانویه حرکت می‌کند. ساختار ثانویه کوتاه به این گونه است که ثانویه‌ای کوچک‌تر از اولیه به صورت متحرک در نظر گرفته می‌شود و قسمت تغذیه‌شونده ثابت است. این ساختار در کاربرد LIMها به عنوان شتاب‌دهنده‌های مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرد، چرا که به دلیل تغذیه بخش ساکن، نیاز به جاروبک یا کابل‌های متحرک از بین می‌رود [۳۰] و [۳۱] همچنین با استفاده از این ساختار، اثر انتهایی از حالت اولیه کوتاه کمتر است [۳۲].

۵-۲-۱ معرفی چند نوع ثانویه

در ساده‌ترین حالت، ثانویه یک LIM می‌تواند هادی یکپارچه باشد اما ثانویه قفس سنجابی، قفس سنجابی دوبل [۱۵] ثانویه صاف^۱، کلاهی^۲ [۲۶] از دیگر انواع ثانویه‌های این موتور هستند. یکی از ساختارهای رایج در LIM، ثانویه صاف-یکپارچه^۳ در ریل‌های راه‌آهن با قیمت مناسب است که در آن از ثانویه هادی بر روی آهن استفاده می‌شود، ساختارهای نردبانی نیز در این کاربرد استفاده می‌شود، که باعث کاهش اثر لبه می‌شود، البته ممکن است به طبع آن، نیروی پیشران نیز کاهش یابد اما به حفظ تعادل محوری کمک می‌کند [۳۳].

۶-۲-۱ تفاوت‌های موتورهای القائی دوار (RIM) و القائی خطی (LIM)

به علت تقارن تقریباً کامل RIMها، اندوکتانس متقابل فازها در این موتورها برابر است، اما در LIM اندوکتانس متقابل به علت ساختار خطی و غیرمتقارن بین فازها، برابر نیست [۲۸]، LIMها از جمله موتورهای با فاصله هوایی زیاد محسوب می‌شوند و شار نشتی آنها نسبت به موتور دوار بیشتر است، در LIMها به علت طول محدود و حرکت متقابل ثانویه و اولیه اثر جدیدی نسبت به RIM دیده می‌شود که اثر انتهایی نامیده می‌شود [۱۲]. اثر انتهایی که از مشخصات مهم موتورهای خطی است، در بخش بعد مورد بررسی قرار می‌گیرد. از سویی بر خلاف RIMها در LIMها می‌توان از ثانویه یکپارچه استفاده کرد [۳۴]، همچنین اندازه ماشین در LIMها از همتای RIM خود به نسبت کوچکتر است [۳۵].

۱-۶-۲-۱ اثر انتهایی

پیشتر بیان شد که علت حرکت LIM، جریان القا شده در آن به علت وجود میدان متغیر با زمان اولیه است، حال با حرکت صفحه ثانویه، جریان گردابی در ورود هادی ثانویه القا می‌شود و در انتها از بین می‌رود که باعث غیرعادی شدن خواص الکترومغناطیسی می‌شود و اثر انتهایی طولی نامیده می‌شود

^۱ Flat

^۲ Cap

^۳ Flat Solid

[۲۶]. در مقایسه با ماشین‌های دوار، اثر انتهایی باعث غیرخطی شدن شدید در مدل LIM می‌شود [۱۹]، البته در مدل‌سازی LIM با اضافه کردن اثر انتهایی به مدل RIM می‌توان به مدل LIM رسید [۳۶]، اثر انتهایی به دو بخش استاتیکی و دینامیکی تقسیم می‌شوند. اثر انتهایی استاتیکی به دلیل ماهیت مدار باز مدار معادل مغناطیسی در LIM است و زمانی که تعداد قطب‌ها بزرگ‌تر از شش باشد، این مقدار ناچیز است. اثر انتهایی دینامیکی ناشی از حرکت نسبی بین اولیه و ثانویه است. این اثر را می‌توان در سرعت‌های پایین نادیده گرفت اما در طراحی موتورهای سرعت بالا باید در نظر گرفته شود [۲۲].

۱-۲-۶-۲ اثر لبه

حضور مؤلفه جریان گردابی ثانویه در راستای حرکت که باعث نیروی محوری می‌شود، اثر لبه نامیده می‌شود. از سوی دیگر تفاوت عرض اولیه و ورقه ثانویه می‌تواند باعث غیریکنواختی چگالی شار شود که این اثر، اثر لبه عرضی نامیده می‌شود [۱].

۳-۱ بیان مسئله و ضرورت انجام تحقیق

سیستم‌های مکانیکی، هیدرولیکی، آیرودینامیکی و پنوماتیکی در حال جایگزینی با سیستم‌های الکترومغناطیسی هستند. از جمله این سیستم‌ها شتابدهنده‌ها هستند. از این رو استفاده از شتاب‌دهنده‌های مغناطیسی به دلایل مزایای زیاد و کاربردهای فراوان در صنعت و کاربردهای نظامی به صورت روزافزون در حال افزایش است. مسئله افزایش چگالی توان در حالت دوطرفه به خصوص در دیسک القایی قبلاً مورد بررسی قرار گرفته است. اما این حوزه قابلیت اجرای کارهای تحقیقاتی جدید از جمله تحقیق بر روی اثر انتهایی، اثر لبه، طراحی مدل‌های مختلف ثانویه و از این قبیل را دارد.

۱-۴ اهداف پایان‌نامه

در این پایان‌نامه، استفاده از یک DSLIM به عنوان شتاب‌دهنده مورد بررسی قرار گرفته است و با بهینه‌سازی ساختار ثانویه، بیشینه سرعت و میانگین افزایش یافته، همچنین دو روش نوین بهینه‌سازی با استفاده از شبیه‌سازی و آزمایش عملی، مورد بررسی قرار گرفته است. به صورت خلاصه هدف این

پایان نامه، ارائه یک ثانویه جدید با مواد و شکل ظاهری متفاوت، جهت استفاده در یک DSLIM به

عنوان شتاب‌دهنده است.

فصل ۲ : مروری بر پیشینه پژوهش

۱-۲ مقدمه

استفاده از LIM ها به بیش از یک قرن پیش برمی گردد [۱۱]، اما سالیان اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. جان و همکاران در سال ۱۹۳۴، استفاده از LIM در کاربرد درهای برقی و همچنین به عنوان یک موتور کاربردی بدون اصطکاک را مورد بررسی قرار داده‌اند [۳۷]. ایسام و همکاران در سال ۱۹۷۴ استفاده از LIM به عنوان معلق مغناطیسی را معرفی نموده و با بررسی سیستم PM دوار و یک دیسک، به یک سیستم LIM دست یافته‌اند. تا سال ۱۹۷۴ هزینه‌های زیادی برای وسایل نقلیه بدون اصطکاک شده است که یکی از این مخارج برای موتورهای القائی خطی بوده است [۳]. لثوایت و همکاران در سال ۱۹۹۵ استفاده از موتور القائی خطی به عنوان شتاب‌دهنده جسم‌های بزرگ به سرعت‌های بالا را مورد بررسی قرار داده‌اند، در این مطالعه از یک DSLIM به عنوان شتاب‌دهنده استفاده شده است و صرفه اقتصادی حالت ثانویه کوتاه در این کاربرد بیان شده است و در قسمت عملی، جسمی ۲۰۰ کیلوگرمی در مسافت ۱۵۰۰ متر به سرعت ۱۲۰۰ متر بر ساعت رسیده است [۳۸]. عبداللهی و همکاران در سال ۲۰۱۵ ساختارهای مختلفی برای تولید نیروی خطی در حالت‌های یک طرفه و دو طرفه مطرح نموده که حالت دو طرفه به علت مسیر ساده حرکت و مقدار بیشتر چگالی انرژی، ترجیح داده شده است [۲۹]. پاترسون و همکاران در سال ۲۰۱۱ طراحی استفاده از LIM دو طرفه به عنوان سیستم شتاب‌دهنده هواپیما (EMAL) را مطالعه کرده‌اند، اصلاح و شبیه‌سازی با روش‌های اجزاء محدود و شبیه‌سازی عملیاتی با استفاده از بستر تست مجازی (VTB)^۱ انجام شده است و از چند DSLIM با سیم‌پیچی کابلی برای آزمایش استفاده شده است [۳۹]. برتولا و همکاران در سال ۲۰۱۲ جهت کاهش سوخت مصرفی، استفاده از شتاب‌دهنده الکترومغناطیسی جهت استفاده در فرایند شتاب‌گیری هواپیمای مسافبری را پیشنهاد داده‌اند [۴۰]. اونکی و همکاران در سال ۱۹۷۱ اثبات نموده‌اند که برای کاربرد عملی این شتاب‌دهنده، استفاده از موتوری با سرعت‌های میدان متفاوت، بسیار بهتر از استفاده از موتوری با تغییرات پیوسته است [۳۲]. لیو و همکاران در سال ۲۰۱۹ اینطور بیان نموده‌اند که مقدار زیادی

^۱ Virtual Test Bench

هارمونیک در میدان مغناطیسی فاصله هوایی وجود دارد که می‌تواند به لرزش مکانیکی منجر شود. همچنین تاثیر ضخامت ثانویه بر THD چگالی شار فاصله هوایی، تاثیر آن بر نیروی پیشران و رپیل آن تحقیق شده است [۹].

۲-۲ مروری بر بهینه‌سازی ثانویه

ساختار ثانویه در عملکرد LIM از جمله نیرو، سرعت، شتاب همچنین رپیل آنها تاثیر بسیار زیادی دارد. در این بخش بهینه‌سازی‌های مختلفی بررسی شده است، بهینه‌سازی ابعاد شیارها و بررسی ثانویه غیرمستطیلی از جمله موارد ذکر شده در ادامه پایان‌نامه است.

۲-۲-۱ بهینه‌سازی با ایجاد شیار در ثانویه

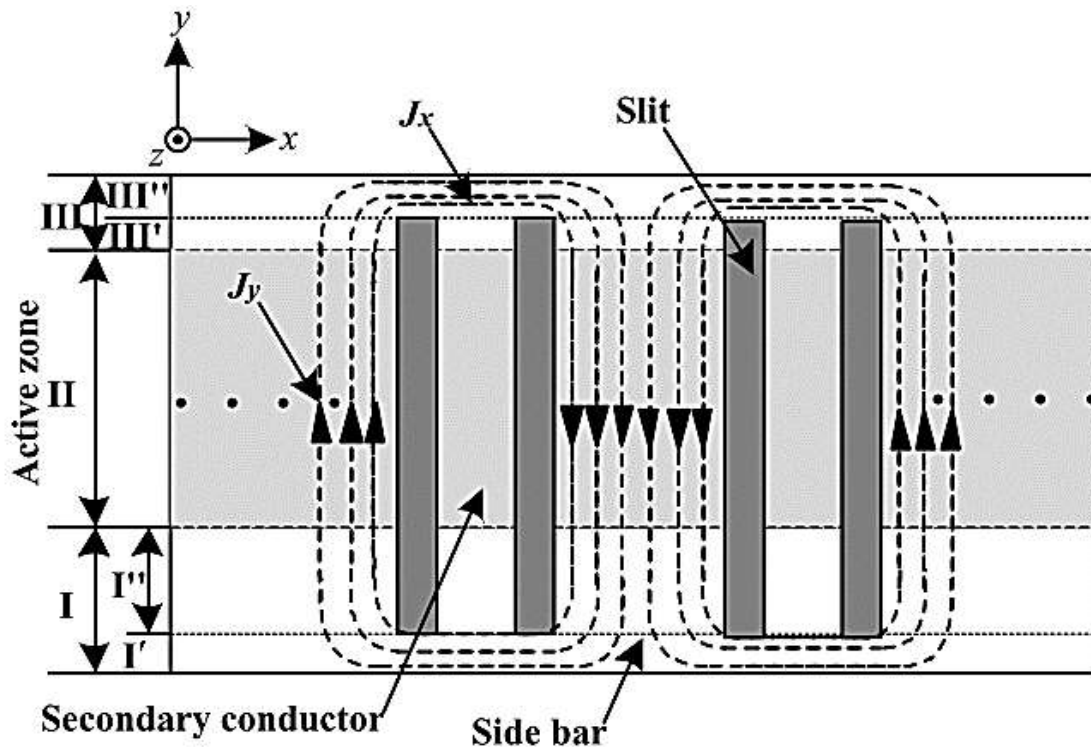
ژان و همکاران در سال ۲۰۱۸، ثانویه‌های یکپارچه کلاهی با شیار دوگانه به سه صورت شیار منظم^۱، نامنظم^۲ و V شکل^۳ را برای SLIM در کاربرد قطار مطالعه نموده و نشان داده‌اند که در حالت V شکل بیشترین نیروی پیشران، بیشترین سرعت و کمترین اثر انتهای موجود است، که البته این ساختار از لحاظ ساخت پیچیده‌تر است. نخست، یک ساختار کلی برای اولیه در نظر گرفته شده و مدل سه بعدی آن ساخته شده است. سپس با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی تک متغیره، متغیرهای مورد نیاز از قبیل طول و عرض و فاصله بین دو شیار بهینه شده است. در انتها، نیروی پیشران، جریان گردابی و چگالی شار مغناطیسی برای مدل مورد نظر بدست آمده و با مقایسه مدل ارائه شده با مدل‌های معمول، بهینه بودن ساختار شیار دوگانه V شکل مورد تایید قرار گرفته است. در فصل ۱ بیان شد که نیروی پیشران توسط مؤلفه جریان گردابی عمود بر راستای حرکت، تولید میشود. با ایجاد شیار در ثانویه به صورت شکل ۲-۱ جریان گردابی مجبور به جهت‌گیری در راستای مورد نظر می‌شود که البته تولید شیار یگانه، به دلیل طول زیاد شیار، می‌تواند باعث کم شدن رسانایی صفحه ثانویه شود و به همین دلیل تئوری تولید شیار دوگانه مورد بررسی قرار گرفته است، این ساختار به جهت‌دهی صحیح جریان گردابی

^۱ Symmetry

^۲ Asymmetry

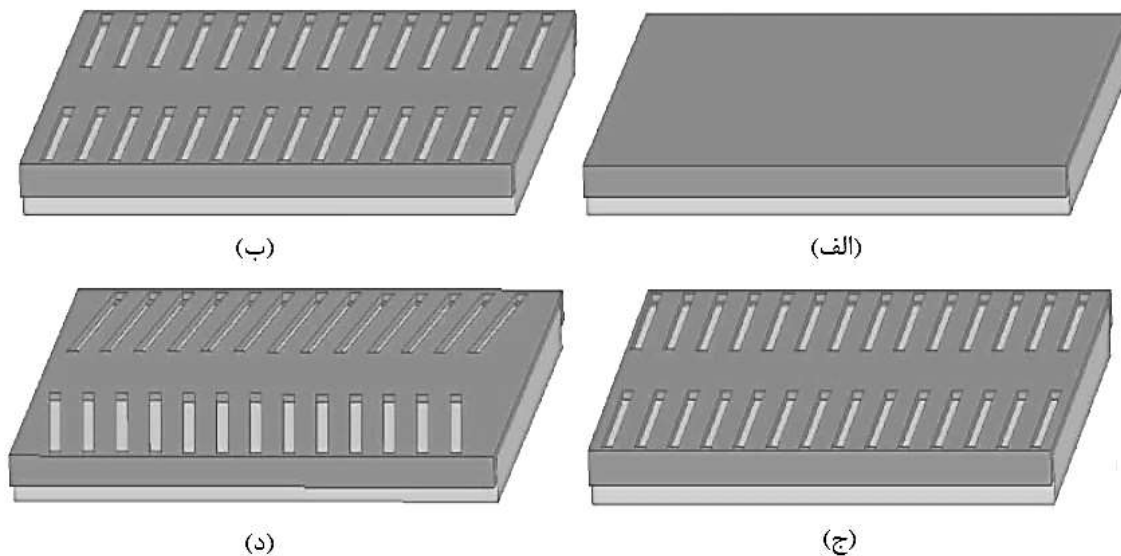
^۳ V-shaped

ثانویه کمک می کند و نیز باعث بهبود بازدهی نیرو می شود [۴۱].



شکل ۱-۲: تاثیر تولید شیار بر جهت گیری جریان ادی در ثانویه LIM [۳۳]

همانطور که در فصل ۱ بیان شد، در LIM یک طرفه، جهت بستن مسیر شار مغناطیسی، نیاز به یوغ آهنی در پشت ثانویه دیده می شود. در شکل ۲-۲ ساختارهای یکپارچه، دو شیاره منظم، نامنظم و V شکل با یوغ آهنی قابل مشاهده است. همچنین شکل ۳-۲ نمایش ساده ای از مسیر جریان گردابی در هر چهار ساختار ثانویه شکل ۱-۲ را نشان می دهد. در ساختار شیار دوگانه نامنظم و منظم، مشاهده می شود که حلقه جریانی در وسط شکل وجود دارد، از آنجا که هدف بیشینه کردن مؤلفه عمود بر راستای حرکت جریان است، ساختار V شکل بررسی می گردد.

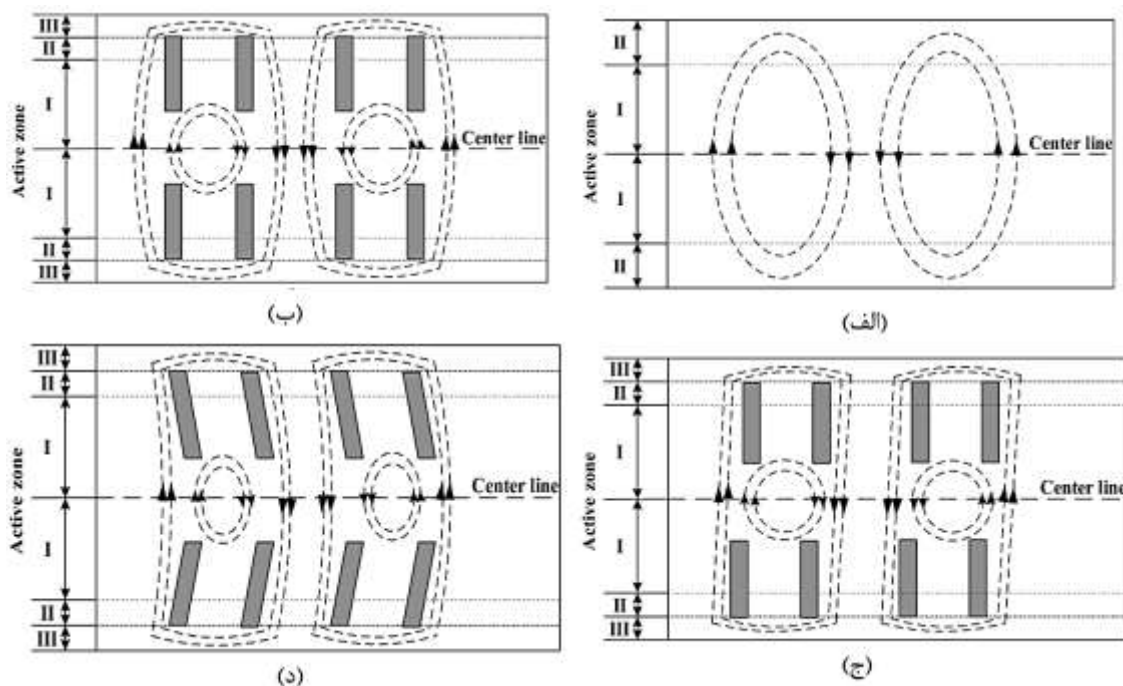


شکل ۲-۲: نمونه‌هایی از ساختارهای ثانویه مطالعه شده الف- ساختار یکپارچه، ب- ساختار دو شیار منظم، ج- ساختار دو شیار نامنظم، د- ساختار V شکل [۴۱]

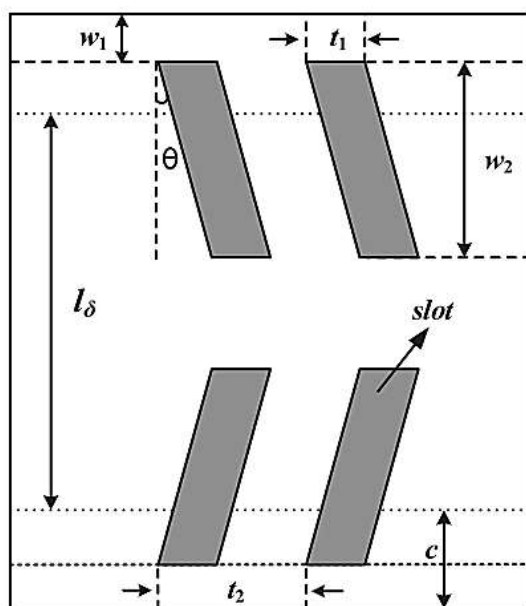
تحلیل ساختار V شکل بدین گونه است که در این ساختار، جریان گردابی در فاصله محوری دو شیار، در حد امکان مجبور به حرکت در مسیر عمود بر جهت حرکت می‌شود. جهت بررسی عملکرد ساختارهای معرفی شده و مقایسه آنها، از یک SLIM سه فاز با ۸۰ شیار، گام قطب ۲۲۵ میلی‌متر، ضریب بیرون زدگی ۱/۰۴۵ با استفاده از یک آلومینیوم با ضخامت ۴ میلی‌متر و یوغ آهنی ۲۵ میلی‌متری بهره برده شده است. سیم‌پیچی موتور دو طبقه با شیارهای انتهایی نیمه پر انجام شده است. در این مطالعه، رابطه ۱-۲ جهت محاسبه تقریبی تعداد شیار بهینه در ثانویه بر حسب تعداد شیارهای اولیه، گام سیم‌پیچی، تعداد فاز و تعداد شیار بر قطب بر فاز بیان شده است.

$$Q'_1 = Q_1 - \beta m_1 \quad (۱-۲)$$

که در آن Q'_1 تعداد شیار معادل اولیه، β گام سیم‌پیچی، m_1 و q تعداد شیار بر قطب بر فاز است. تعداد شیار بهینه Q_1 بهتر است نزدیک به تعداد شیار معادل اولیه باشد. جهت بیشینه کردن نیروی پیشران و کمینه کردن نیروی محوری و عمودی، بهینه‌سازی توسط اجزاء محدود سه بعدی با فرضیات اولیه شروع می‌شود. بهینه‌سازی با جریان و لغزش ثابت انجام شده است. هدف، بهینه‌سازی ارتفاع شیار، عرض میله کناری، فاصله محوری شیار ثانویه، زاویه شیار و عرض ثانویه است. متغیرهای مورد بررسی در شکل ۲-۴ نمایش داده شده‌اند.



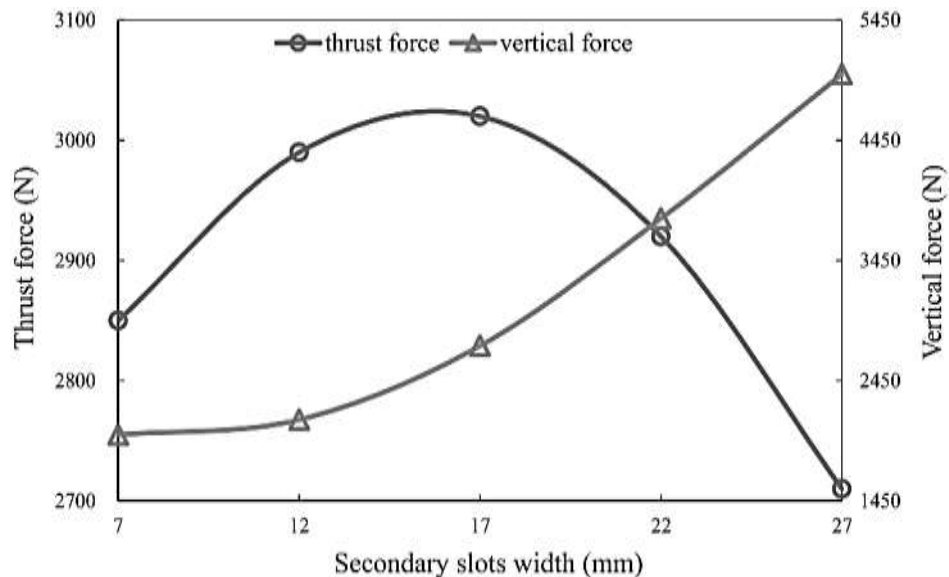
شکل ۳-۲: مسیر جریان گردابی القائی در ثانویه‌های مختلف الف-یکپارچه ب-دو شیار منظم ج-دو شیار نامنظم د-
شکل ۷ [۴۱]



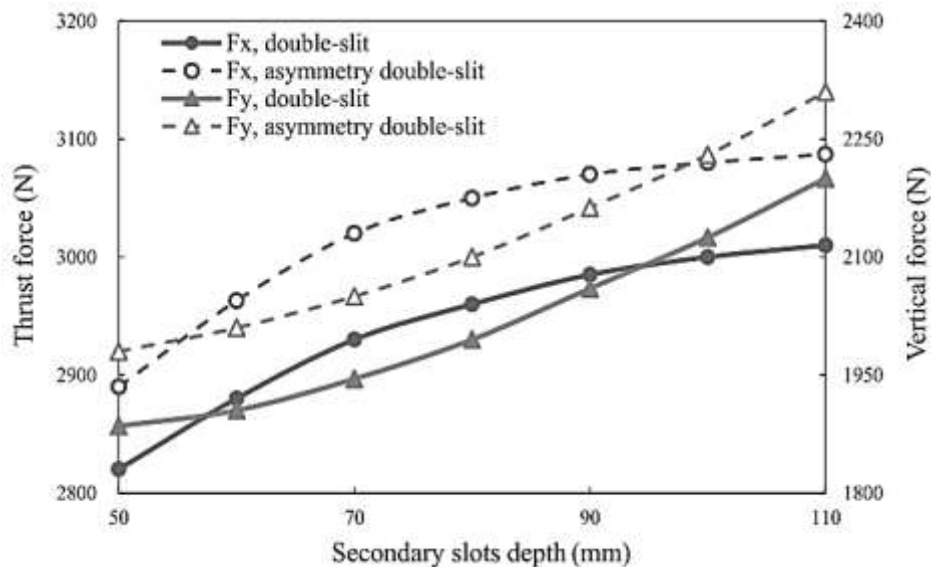
شکل ۴-۲: متغیرهای مورد نیاز ثانویه V شکل [۴۱]

ترتیب بهینه‌سازی بدین گونه است که نخست عرض میله کناری w_1 بهینه شده است، سپس عرض شیارهای ثانویه t_1 که در شکل ۵-۲ مشاهده می‌شود تا نقطه ای نیروی پیشران در حال افزایش است و با وجود افزایش دائمی نیروی عمودی، نقطه بهینه عرض شیارها با در نظر گرفتن نیروی محوری و

پیشران ۱۷ میلی متر انتخاب شده است. در گام بعد w_2 ، طول شیار بهینه شده است، شکل ۲-۶ نشان -
 دهنده ارتباط نیروی پیشران و عمودی با این متغیر در ۴ ساختار معرفی شده در شکل ۲-۲ است.



شکل ۲-۵: منحنی نیروی پیشران و عمودی بر حسب عرض شیارهای ثانویه در ثانویه V شکل [۴۱]



شکل ۲-۶: منحنی نیروی پیشران و عمودی بر حسب طول شیار در ساختارهای یکپارچه، دو شیار منظم، دو شیار نامنظم، شکل [۴۱]

مرحله بعد، انتخاب مقدار مناسب فاصله محوری بین دو شیار است و پس از آن مرحله آخر انتخاب زاویه θ در شکل ۲-۳ است. با اعمال زاویه به شیارها، به حالت V شکل حاصل می شود. در این مطالعه، رابطه ۲-۲ جهت انتخاب θ معرفی شده است.

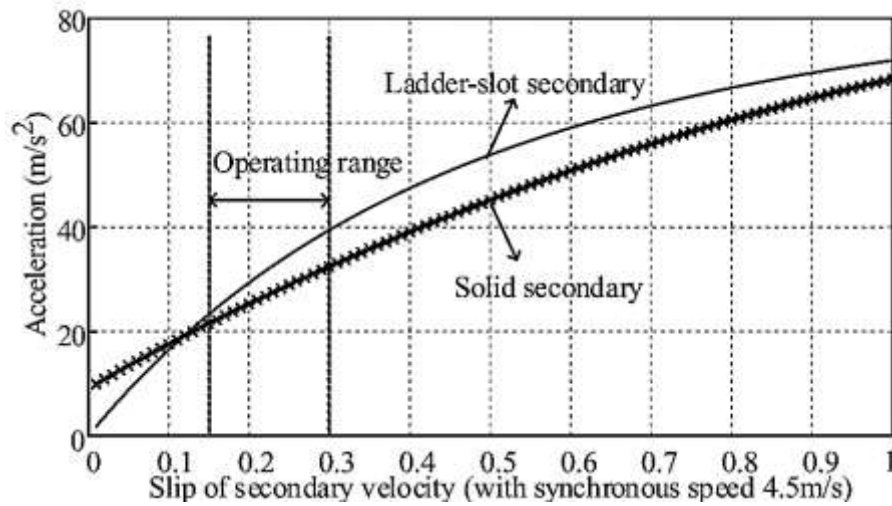
$$\tan \theta = \frac{d_s}{a + 2c - 2(w_1 + w_2)} \quad (2-2)$$

در این معادله d_s ، a و c به ترتیب فاصله محوری شیارهای دوگانه، عرض اولیه و طول بیرون زدگی ثانویه نسبت به اولیه است. این مقدار ۱۲٫۸ درجه بدست آمده است. در پایان با مقایسه چگالی شار فاصله هوایی، خطوط جریان گردابی بر روی ثانویه، نیروی پیشران، نیروی عمودی و سرعت در هر سه ساختار معرفی شده، نتیجه کلی به صورت درصد افزایش نسبت به ثانویه یکپارچه به صورت جدول ۲-۱ قابل مشاهده است [۴۱]:

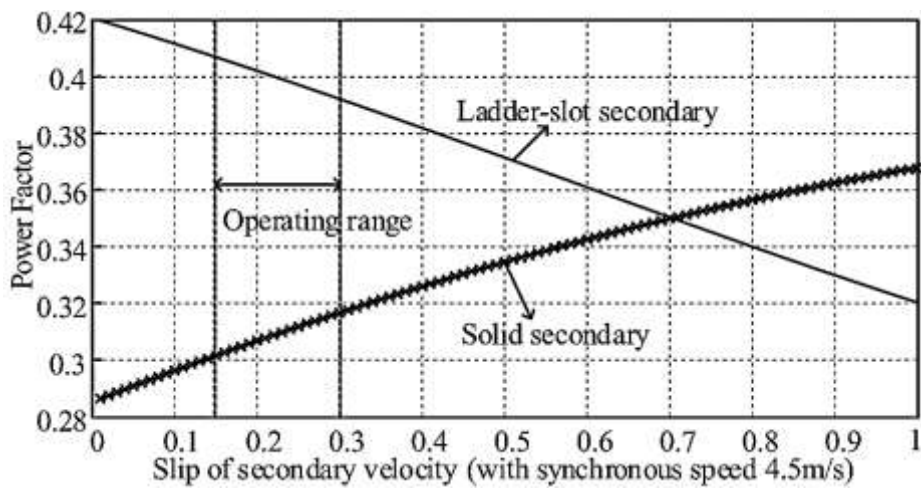
جدول ۲-۱: مقایسه عملکرد ساختارهای دو شیار منظم، نامنظم و V شکل با ساختار یکپارچه [۴۱]

متغیر	دو شیار منظم	دو شیار نامنظم	دو شیار V شکل
سرعت شروع	٪ ۸/۹۶	٪ ۱۳/۴۳	٪ ۱۶/۴۲
سرعت در بیشینه نیرو	٪ ۹/۲۹	٪ ۱۵/۷۱	٪ ۱۷/۱۴
سرعت بیشینه	٪ ۱۰/۶۴	٪ ۱۵/۴۳	٪ ۲۰/۲۱

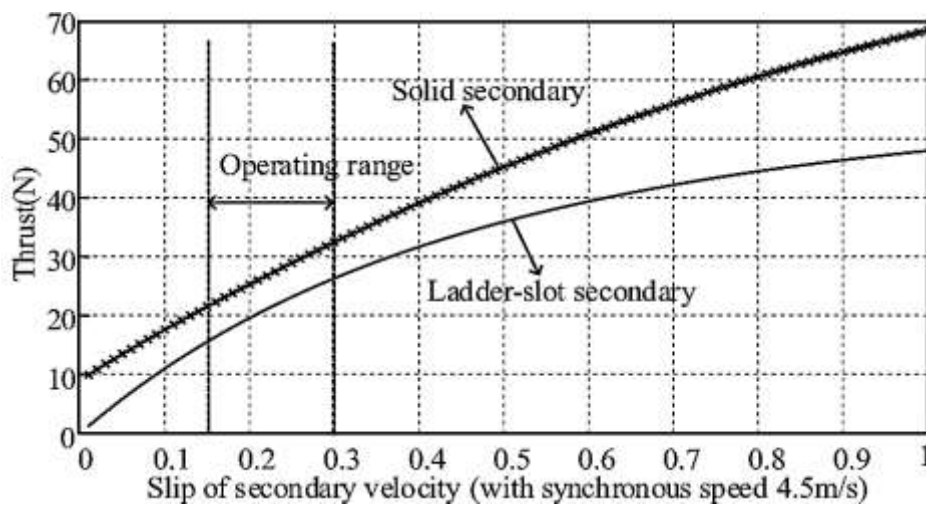
لو و همکاران در سال ۲۰۱۹ این پژوهش را برای ثانویه شیار دوگانه منظم و نامنظم در حالت اولیه کوتاه یک SLIM انجام داده‌اند و نتایجی مشابه با نتایج جدول ۲-۱ بدست آمده است [۴۲]. دی و همکاران در سال ۲۰۱۹ با استفاده از ثانویه نردبانی ضریب توان DSLIM را بهبود بخشیده‌اند. همچنین، شتاب و نیروی پیشران بر حسب لغزش بین دو حالت ثانویه یکپارچه و نردبانی مقایسه شده است. شکل ۲-۷ نشان‌دهنده شتاب DSLIM مطالعه شده بر حسب سرعت است. همچنین نمودارهای نیروی پیشران و ضریب توان در این دو ساختار، در شکل‌های ۲-۸ و ۲-۹ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود تاثیر ساختار نردبانی بر شتاب و نیروی پیشران، تقریباً در تمام گستره لغزش صعودی است، در حالی که تاثیر آن بر روی ضریب توان در ساختار نردبانی نزولی و در ساختار یکپارچه صعودی بوده است. به صورت خلاصه می‌توان بیان نمود که در حالت نردبانی با وجود کاهش نیروی پیشران، ضریب توان و شتاب افزایش یافته است [۲۷].



شکل ۷-۲: شتاب ثانویه بر حسب لغزش در ساختارهای یکپارچه و نردبانی [۲۷]



شکل ۸-۲: نیروی پیشران بر حسب لغزش در ساختارهای یکپارچه و نردبانی [۲۷]



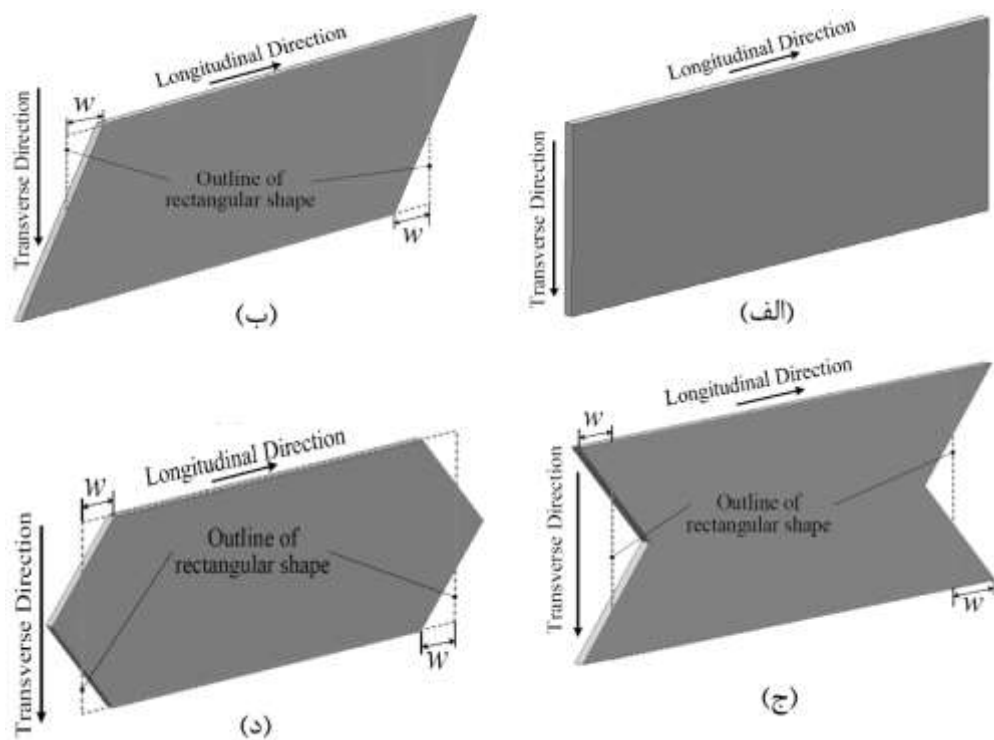
شکل ۹-۲: ضریب توان بر حسب لغزش در ساختارهای یکپارچه و نردبانی [۲۷]

۲-۲-۲ بهینه‌سازی توسط تغییر در شکل کلی ثانویه

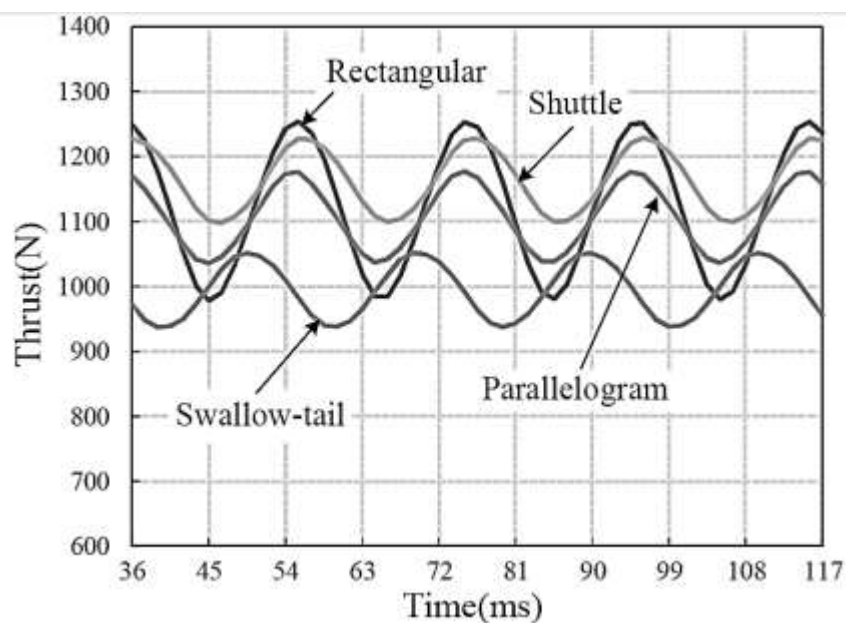
ونگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ بیان می‌دارند که جریان گردابی القائی در ورقه ثانویه یک DSLIM ثانویه کوتاه، به دلیل اثر انتهایی طولی دینامیک به صورت غیرمنظم توزیع می‌شود که یکی از دلایل رپل نیروی پیشران همین موضوع است. در این پژوهش سه ساختار مختلف یکپارچه غیرمستطیلی، با ثانویه مستطیلی مقایسه شده است. در شکل ۲-۱۰، ۴ ساختار مختلف قابل مشاهده است. شکل ۲-۱۰-الف نشان‌دهنده ساختار مستطیلی مرسوم است. شکل ۲-۱۰-ب، در جهت حرکت، زاویه‌دار شده است. به دلیل برابر بودن زاویه‌ها در هر دو جهت، شکل به صورت متوازی‌الاضلاع خواهد بود. شکل ۲-۱۱-ج زاویه‌دار کردن در دو جهت به صورت همزمان را نشان می‌دهد و ساختار دم‌پرستویی^۱ ایجاد می‌شود. در انتها در ساختار ۲-۱۱-د که شاتل نامیده می‌شود، در جهت حرکت، رو به بیرون زاویه‌دار شده‌اند. این چهار ساختار توسط FEM شبیه‌سازی شده و نیز به صورت ساخت اولیه تولید شده‌اند. طول ثانویه معمول مستطیلی، معادل ۵ گام قطب در نظر گرفته شده است، نسبت عرض به طول آن ۰/۴۱ و ضخامت ثانویه ۲ میلی‌متر انتخاب شده است. جهت مقایسه صحیح حالت‌های مختلف، فاصله زاویه‌دار کردن w در همه حالات برابر با نصف یک گام قطب است. عرض و ضخامت در همه موارد ثابت نگه داشته شده است. نیروی پیشران هر چهار ساختار در حالت ماندگار در شکل ۲-۱۱ قابل مشاهده است. میانگین نیروی پیشران، رپل نیرو و نسبت رپل نیز در شکل ۲-۱۲ محاسبه و نمایش داده شده است. طبق نتایج نمایش داده شده در این دو شکل، رپل نیرو بدون کاهش چشمگیر در نیروی پیشران، از ۲۷۵N در حالت پایه به ۱۴۲N در حالت متوازی‌الاضلاع رسیده است. ساختار متوازی-الاضلاع نسبت به جهت حرکت متقارن نیست و این عدم تقارن باعث عدم تقارن در جریان گردابی القا شده مخصوصاً در ابتدا و انتهای ثانویه می‌شود، که باعث تولید نیروی عمودی به بالا^۲ و حرکت نامطلوب در سرعت بالا می‌شود.

^۱ Swallow-Tail

^۲ Pitching Force



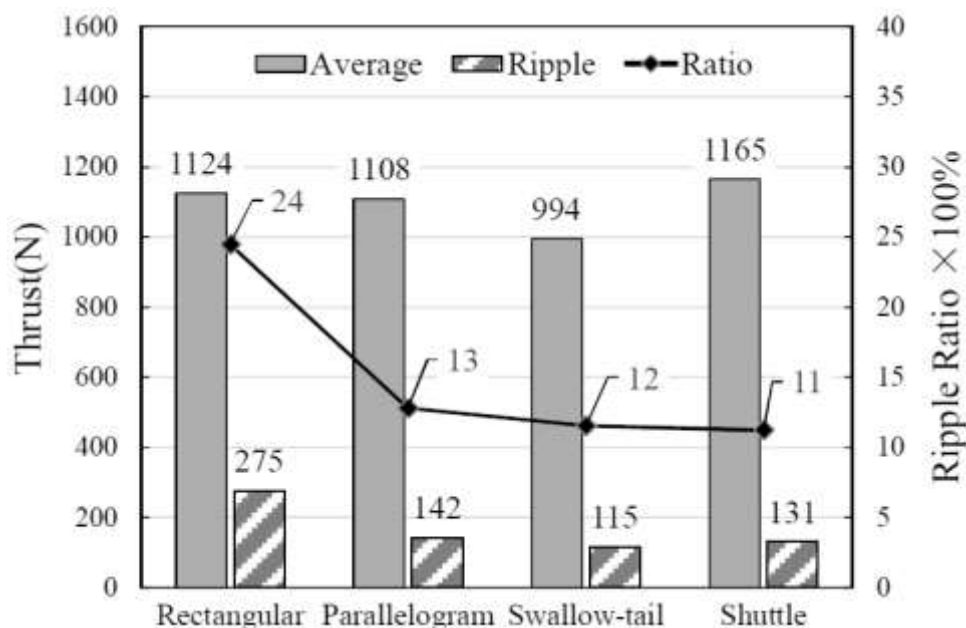
شکل ۲-۱۰: نمونه‌هایی از ساختارهای مستطیلی و غیرمستطیلی الف- ثانویه مستطیلی یکپارچه متداول، ب- ثانویه متوازی‌الاضلاع، ج- ثانویه دم‌پرستویی^۱ و د- ثانویه شاتل^۲ [۴۳]



شکل ۲-۱۱: نیروی پیشران، رپیل نیرو و نسبت رپیل در ساختارهای مستطیل، متوازی‌الاضلاع، دم‌پرستویی و شاتل [۴۳]

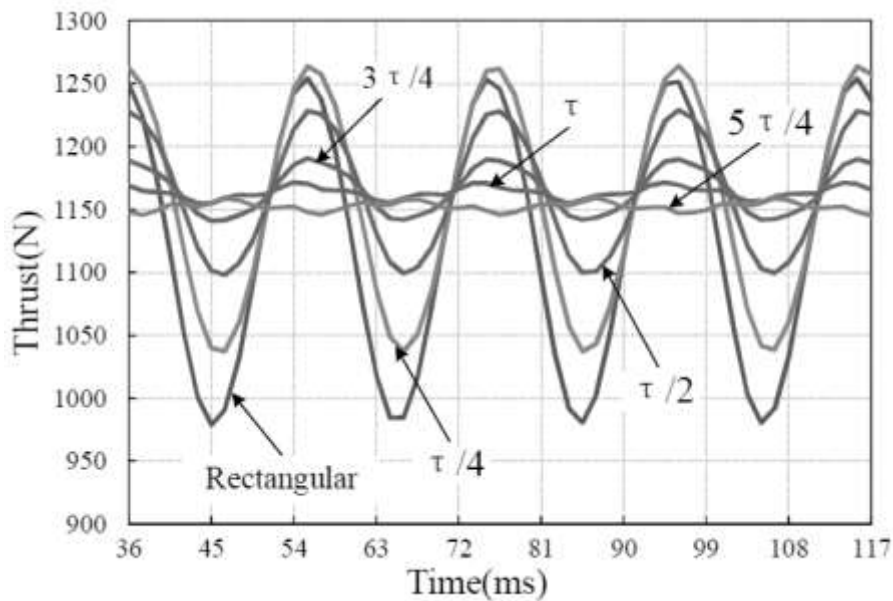
^۱ Swallow-tail

^۲ Shuttle

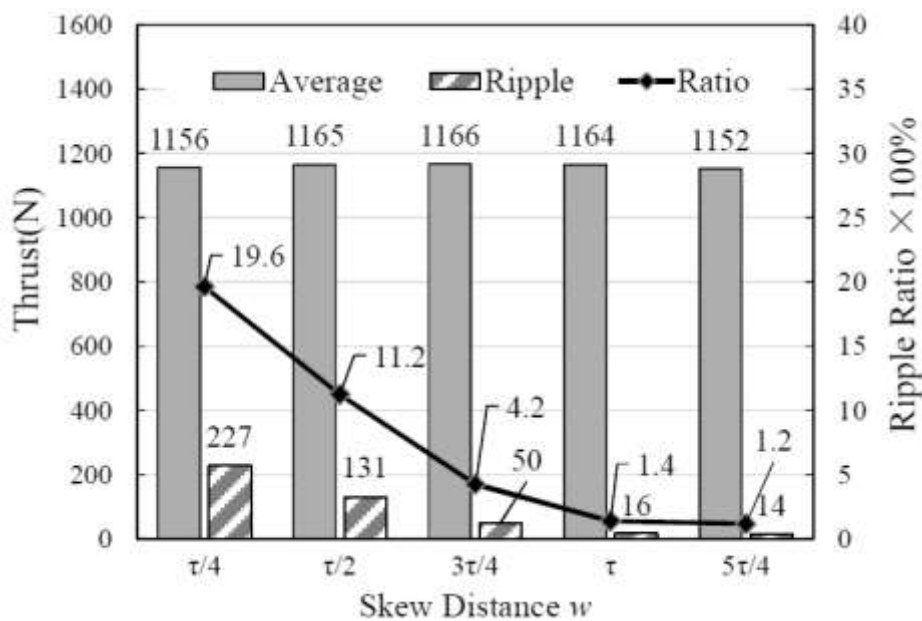


شکل ۲-۱۲: میانگین نیروی پیشران، رپل نیرو و نسبت رپل در ساختارهای غیرمستطیلی [۴۳]

سپس ساختار متقارن با نام دم‌پرستویی و شاتل مطرح و ارائه شده است. در این صورت نیروی عمودی به بالای تولیدی در حالت غیرمقارن به صورت محسوسی کاهش می‌یابد. همچنین همانطور که در شکل ۲-۱۲ مشاهده می‌شود، رپل نیروی پیشران بسیار واضح کاهش و نیز در ساختار شاتل، نیروی پیشران افزایش قابل توجهی داشته است، در صورتی که در ساختار دم‌پرستویی، این مقدار به علت کاهش کوپلینگ بین اولیه و ثانویه، کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است. به عنوان یک نتیجه، یک DSLIM ثانویه کوتاه با ثانویه شاتل، میانگین نیروی بیشتر و رپل نیروی کمتر را در ساختارهای معرفی شده داشته است. پس از بررسی بهینه بودن ساختار شاتل نسبت به مابقی ساختارها، تاثیر ابعاد بر عملکرد این ساختار مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۲-۱۰-د، هدف بهینه‌سازی w در حالتی است که مساحت ثانویه نسبت به حالات قبل ثابت بماند. برای دستیابی به این هدف، با استفاده از FEM سه بعدی، عملکرد نیروی پیشران در حالات مختلف w از یک چهارم گام قطب تا یک و یک چهارم گام قطب با شرط ثابت بودن مساحت، مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج در شکل‌های ۲-۱۳ و ۲-۱۴ قابل مشاهده است. واضح است که نسبت رپل با افزایش w به صورت محسوسی کاهش می‌یابد اما میانگین نیرو تا جایی افزایشی سپس کاهشی است.



شکل ۲-۱۳: مقایسه نیرو به ازای w های مختلف در ساختار شاتل [۴۳]



شکل ۲-۱۴: مقایسه نیرو و ریبل ساختار شاتل به ازای عرض های مختلف [۴۳]

در این بین حالت زاویه دار کردن به اندازه یک گام قطب به عنوان حالت بهینه انتخاب شده است و

در آخر ساختار شاتل به عنوان ثانویه بهینه معرفی شده است. [۴۳].

۳-۲ خلاصه فصل

ساختارهای متفاوتی از مراجع پیشین مورد بررسی قرار گرفته است. در تمامی مراجع از یک ماده

برای ساخت ثانویه استفاده شده است و تغییر مقاومت ثانویه در نیروی پیشران و سرعت نهایی را مورد

بررسی قرار نداده‌اند. در حالی که با استفاده از چند ماده با مقاومت الکتریکی متفاوت، می‌توان با استفاده از تغییر عمق نفوذ مغناطیسی که به علت تغییر در فرکانس لغزش پیش می‌آید، تغییر در مقاومت ثانویه را مورد استفاده قرارداد که به لحاظ تحلیلی می‌تواند باعث تغییر در نیروی پیشران و بیشینه سرعت شود. در مراجع بررسی شده، استفاده از شیارهای دوگانه در SLIM بوده است و استفاده از آن در DSLIMها می‌تواند بهینه‌سازی جدیدی باشد. در مرجع [۴۳] از یک ثانویه یکپارچه استفاده شده است و با ارائه ثانویه غیرمستطیلی سعی در افزایش نیروی پیشران و کاهش رپل آن شده است. در حالی که با ایجاد شکاف هوایی در ثانویه، عدم تقارن جریان گردابی القا شده بسیار بیشتر خواهد بود، بنابراین می‌توان با بریدن گوشه‌های ثانویه، هم از عملکرد ساختار شاتل برخوردار بود، همچنین با کاهش مساحت و ثابت ماندن مساحت "معادل" با سبک شدن، حتی در صورت ثابت ماندن نیرو، بیشینه سرعت بیشتری دریافت کرد. سه موضوع بیان شده که زاویه شیارهای دوگانه، استفاده از ثانویه چندلایه و بریدن گوشه‌های ثانویه بدون حفظ مساحت می‌باشد، در فصل بعد مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

فصل ۳ شییه سازی و هیینه سازی توسط نرم افزار

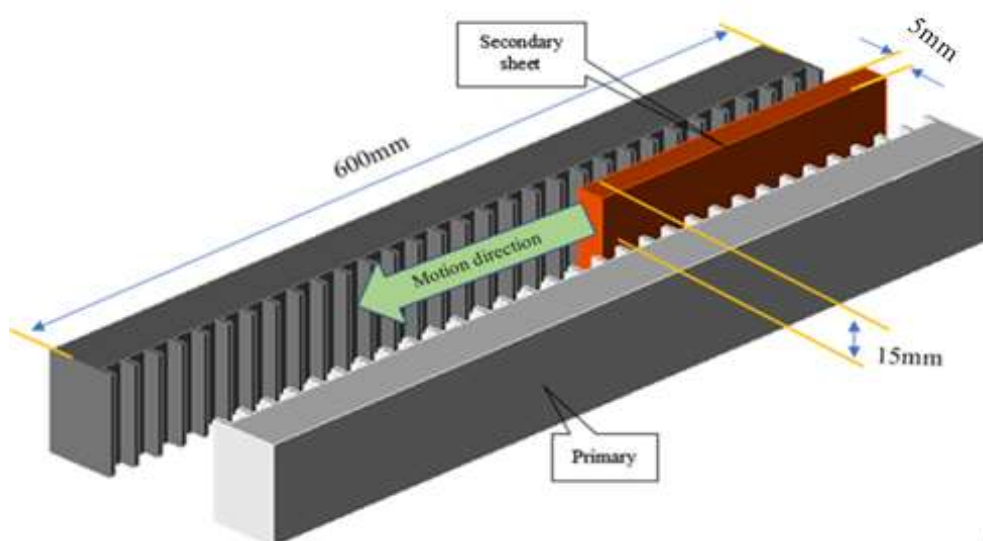
۱-۳ مقدمه

در فصل ۲ ساختارهای مختلف موجود جهت افزایش نیروی پیشران و سرعت نهایی LIM مورد بررسی قرار گرفت، این ساختارها یا در DSLIM مورد بررسی قرار گرفته‌اند یا امکان بررسی در DSLIM را دارا هستند. بنابراین، در این فصل ابتدا موتور مورد نظر معرفی می‌گردد، سپس مدل موتور مورد نظر در نرم‌افزار اجزا شده است. در گام بعد، با بدست آوردن نمودار چگالی شار فاصله هوایی نسبت به مکان در حالت سکون و همچنین یافتن نمودار سرعت-نیرو و مطابقت آن با رابطه سرعت سنکرون و نمودار گشتاور-سرعت موتور القائی دوار، صحت عملکرد مدل تایید می‌گردد. با استفاده از روابط تحلیلی یا آزمون و خطا، نقطه شروع تقریبی برای آزمون خطا در بهینه‌سازی‌های مختلف بدست آمده است. از این پس ثانویه‌های مختلف حول نقاط بهینه احتمالی، توسط نرم‌افزار بررسی می‌شوند، حالت بهینه هر مرحله در بهینه‌سازی مرحله بعد مورد استفاده قرار گرفته و در آخر مدل بهینه نهایی معرفی شده است. با یافتن نقطه بهینه طول و عرض ورق ثانویه و انتخاب رسانا، مدل پایه طراحی شده است. با استفاده از روش‌های مرسوم بهینه‌سازی مستخرج از مراجع و دو روش پیشنهادی، مدل نهایی طراحی می‌شود. با بررسی بیشینه سرعت و سرعت میانگین، عملکرد شتاب‌دهنده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

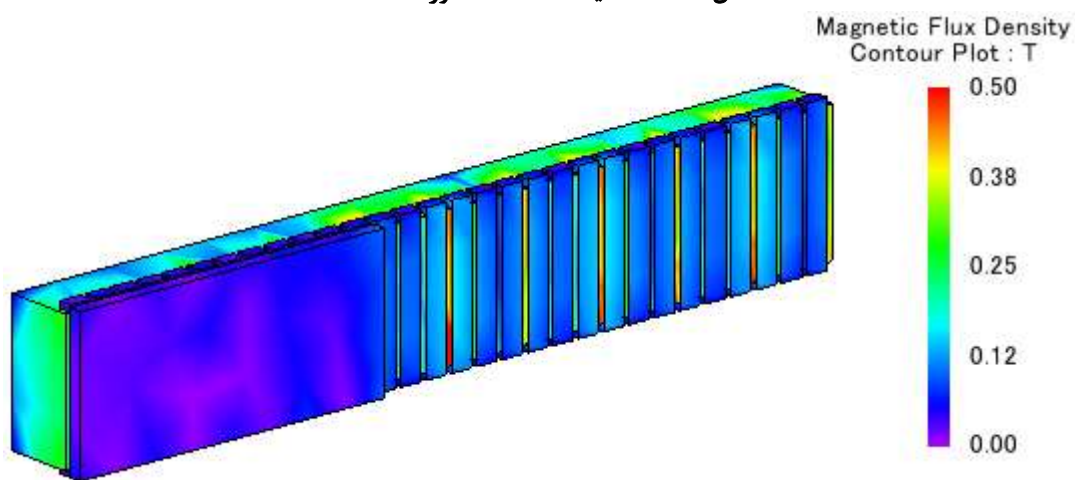
۲-۳ معرفی موتور مورد بررسی

موتور مورد نظر، یک DSLIM سه فاز با ۳۰ شیار در هر طرف و سیم‌پیچی یک طبقه است. مشخصات کلی و ابعاد این ماشین به صورت شکل ۱-۳ و جدول ۱-۳ است. در شکل‌های ۲-۳ و ۳-۳ که برای نمایش بهتر، یک طرف موتور نمایش داده شده است، به ترتیب توزیع^۱ رنگی چگالی شار و چگالی جریان کلی موتور آورده شده است. از آنجا که عملکرد موتور در حالت گذرا است، به علاوه، ثانویه با هیچ قسمتی از موتور در تماس نیست و نیازی به عایق ندارد، مقدار زیاد چگالی جریان مشکلی در عملکرد موتور در حالت عملی ایجاد نمی‌کند.

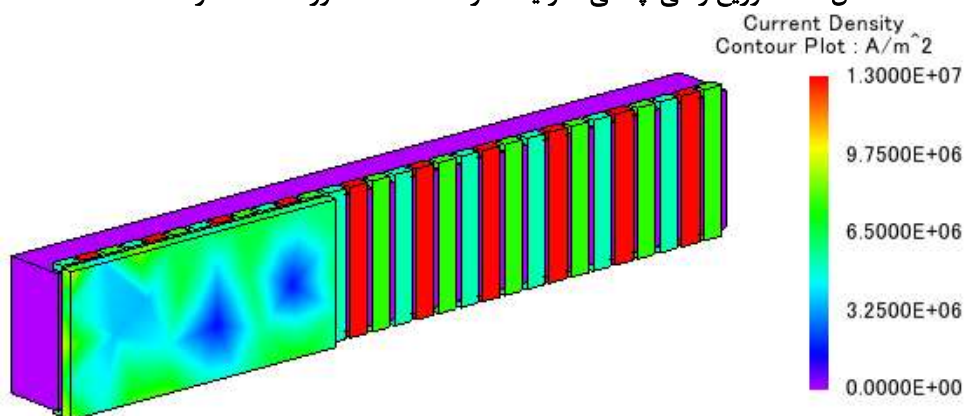
^۱ Contour



شکل ۱-۳: شماتیک DSLIM مورد مطالعه



شکل ۲-۳: توزیع رنگی چگالی شار یک طرف DSLIM مورد مطالعه در $t=2\text{ms}$



شکل ۳-۳: توزیع رنگی چگالی جریان یک طرف DSLIM مورد مطالعه در $t=2\text{ms}$

جدول ۱-۳ مشخصات موتور تحت آزمایش

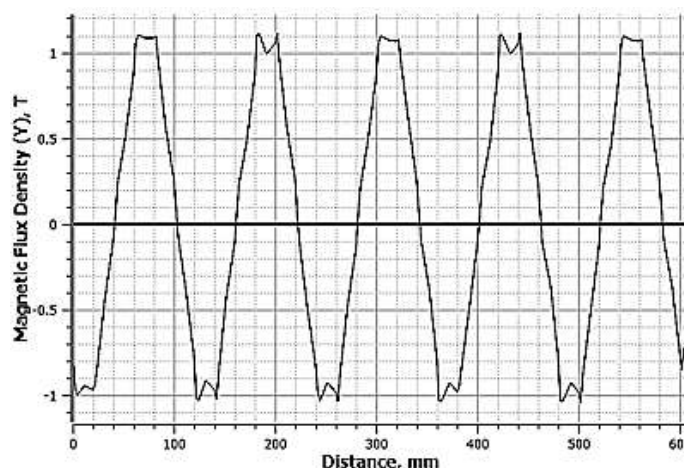
متغیر	نماد	مقدار
توان نامی	P_n	4 kW
ولتاژ ورودی	V_t	100 V
فرکانس ورودی	f	50 Hz
سرعت سنکرون	n_s	6 m/s
تعداد جفت قطب	p	5
چگالی جریان سیم پیچ ها	j	13 A/mm ²
طول اولیه	l_c	600 mm
عرض اولیه	w_c	100 mm
ضخامت ورق ثانویه	t_s	5 mm
بیرون زدگی	w_s	15 mm
جرم بار	m	4 kg

۱-۲-۳ بررسی صحت عملکرد مدل اجزاء محدود موتور

ابتدا موتور بدون حرکت مورد بررسی قرار می گیرد. چگالی شار فاصله هوایی نسبت به مکان به صورت شکل ۳-۴ از نرم افزار بدست می آید، مشاهده می شود که چگالی شار یک سینوسی هارمونیک است. از آنجا که هارمونیک های مزاحم جزو عادی موتورهای الکتریکی و به صورت خاص موتورهای خطی هستند، بنابراین عملکرد مدل به لحاظ شار فاصله هوایی قابل قبول است. در مرحله بعد با ثابت قرار دادن همه شرایط و صرفاً تغییر در سرعت، با ثبت نیرو در سرعت های ثابت مختلف، نمودار نیرو-سرعت DSLIM مورد نظر بدست می آید که در شکل ۳-۵ نمایش داده شده است. مشاهده می شود که این نمودار شباهت قابل قبولی با نمودار گشتاور-سرعت موتور القائی دوار دارد. از سویی دیگر با صفر شدن نیرو در حدود 6m/s، این نمودار سرعت سنکرون موتور مورد بررسی را حدود این عدد نمایش می دهد. رابطه تحلیلی سرعت سنکرون به صورت (۱-۳) است.

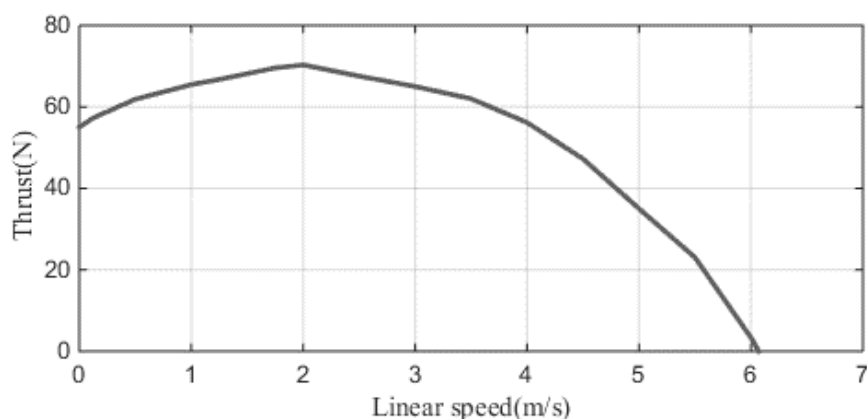
$$v = 2\tau f = 2 * 0.12 * 50 = 6m/s \quad (1-3)$$

مشاهده می شود که مطابقت قابل قبولی بین سرعت سنکرون شبیه سازی شده و سرعت سنکرون تحلیلی وجود دارد و این تاییدی بر صحیح بودن مدل مورد استفاده است.



شکل ۳-۴: چگالی شار فاصله هوایی بدون حضور ثانویه در مدل مورد آزمایش در پله اول

با کنار هم گذاشتن نمودارهای نیرو و سرعت بر حسب زمان، تاییدی دیگر بر عملکرد صحیح مدل مورد استفاده، صورت می‌گیرد. همانطور که در شکل ۳-۶ مشاهده می‌شود، زمانی که سرعت ثانویه ثابت شده است، نیرو به صفر رسیده است. از سوی دیگر مشاهده می‌شود که با اتصال منبع جریان در مدار، شکل موج ولتاژ به صورت شکل ۳-۷ خواهد بود که نشان دهنده ولتاژ سینوسی در فازهای موتور است، از طرف دیگر با اتصال منبع ولتاژ در مدار، شکل جریان فازها به صورت ۳-۸ حاصل می‌شود که پس از یک سیکل حالت گذرا، موج سینوسی خواهد بود و این نیز نشان دهنده عملکرد صحیح مدل است.

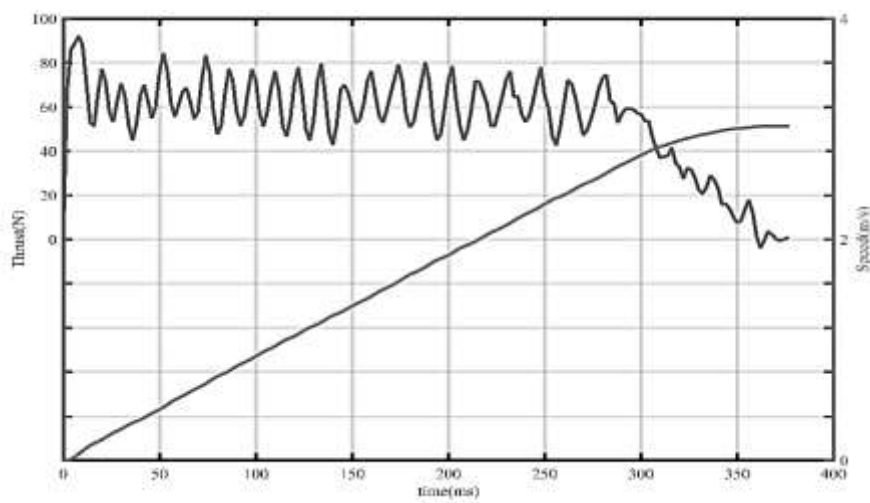


شکل ۳-۵: نمودار نیرو-سرعت DSLIM دست آمده از FEM

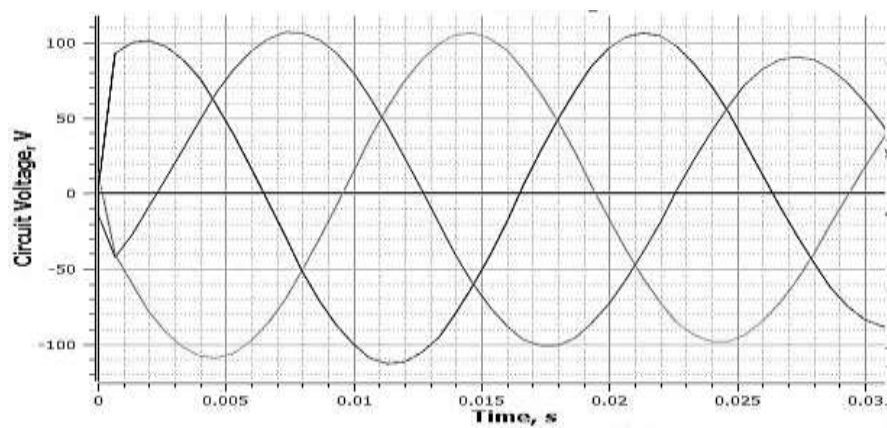
۳-۳ بررسی تحلیلی بهینه‌سازی پیشنهادی

جهت بررسی تحلیلی بهینه‌سازی پیشنهادی، به مدار معادل DSLIM نیاز می‌باشد. از این رو در این بخش مدار معادل موتور با استفاده از روابط مدار معادل RIM محاسبه می‌شود، سپس بر اساس آن،

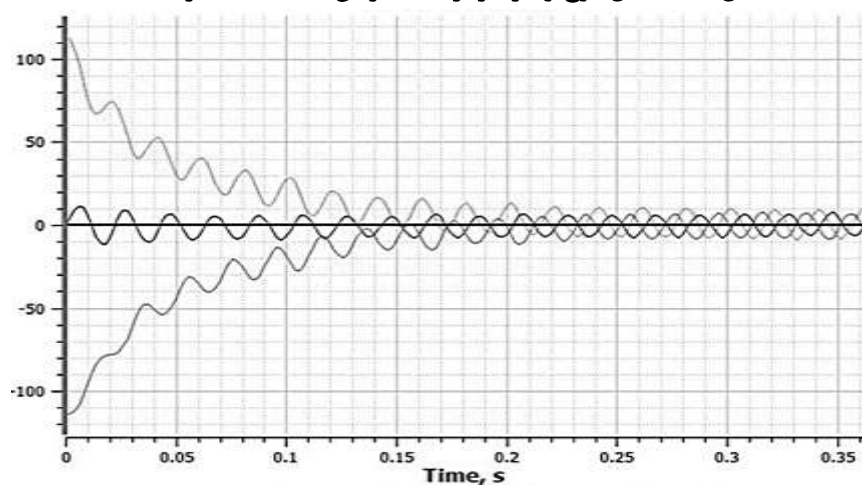
ثانویه لایه‌ای معرفی خواهد شد.



شکل ۳-۶: منحنی‌های سرعت و نیرو بر حسب زمان، بدست آمده از FEM



شکل ۳-۷: شکل موج ولتاژ فاز بر حسب زمان، بدست آمده از FEM



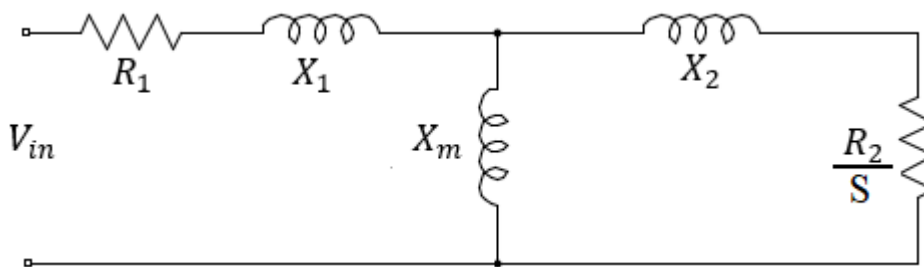
۰ شکل ۳-۸: شکل موج جریان فاز بر حسب زمان، بدست آمده از FEM

۳-۳-۱ مدار معادل موتور

همواره جهت بررسی و تحلیل بهتر یک سیستم، نیاز به مدار معادل آن دیده می‌شود. مدار معادل موتور مورد بررسی به صورت شکل ۳-۹ می‌باشد. با استفاده از مشخصات موتور و همچنین خروجی نرم‌افزار، مقادیر مدار معادل محاسبه می‌گردد.

تمامی سیم‌پیچی‌های اولیه به صورت سری با یکدیگر قرار گرفته‌اند، از این رو با استفاده از طول سیم-پیچی l_{ph} ، سطح مقطع سیم A_w و رسانایی مخصوص σ_{cu} طبق (۳-۱) مقاومت سیم‌پیچی‌های یک فاز بدست می‌آید.

$$R_1 = \frac{l_{ph}}{\sigma_{cu} A_w} = \frac{294}{5.83 \times 10^7 \times 0.78 \times 10^{-6}} = 6.46 \, \Omega \quad (۳-۱)$$



شکل ۳-۹: مدار معادل موتور القایی

راکتانس ناشی اولیه در موتور القایی خطی قابل محاسبه از رابطه مورد نظر در موتور القایی دوار است، مقدار X_1 از (۳-۲) محاسبه می‌گردد:

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{8\pi f \mu_0 N_{ph}^2 W_c K_s P_s}{q P} \\ &= \frac{8\pi \times 50 \times 4\pi \times 10^{-7} \times (600)^2 (0.1) (0.95) (2.94)}{1 \times 10} \\ &= j15.86 \, \Omega \end{aligned} \quad (۳-۲)$$

که در این رابطه، f فرکانس ورودی، μ_0 ضریب گذردهی خلاء، N_{ph} تعداد دور سیم‌پیچی به ازای هر فاز، W_c عرض محوری موثر موتور، P_s ضریب نشت شار، q ضریب کیفیت و P تعداد قطب موتور است. راکتانس مغناطیس‌کنندگی X_m با صرف‌نظر از اشباع هسته و غیریکنواختی فاصله هوایی معادل به صورت (۳-۳)

تعریف و محاسبه می‌شود.

$$X_m = \frac{24 f N_{ph}^2 \mu_0 L_c W_c}{\pi p^2 g} = \frac{24 \times 50 \times (600)^2 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 0.6 \times 0.1}{100\pi \times 0.005} \quad (3-3)$$

$$= j20.74\Omega$$

که در آن L_c طول محوری LIM است و g فاصله هوایی محسوب می‌شود. با در نظر گرفتن X_2 تنها مجهول، مقاومت ثانویه خواهد بود که با استفاده از خروجی‌های نرم افزار، تفاوت توان ورودی و خروجی که در ثانویه اتلاف شده است به محاسبه مقاومت ثانویه می‌انجامد.

$$X_2 = j15.86\Omega \quad (3-4)$$

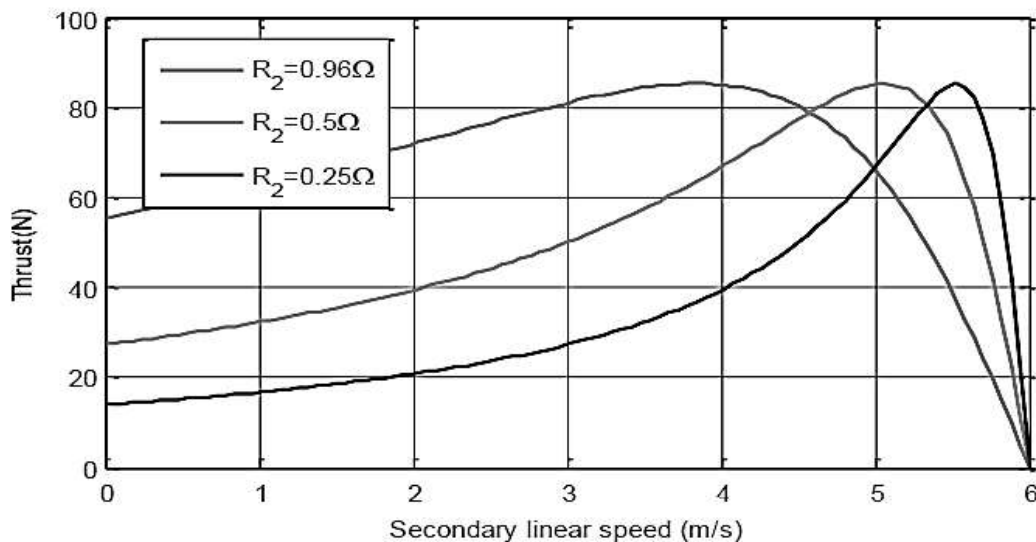
با صرف نظر از تلفات فوکو و مکانیکی در صورتی که P_{l2} میانگین اتلاف ثانویه و I_{in} جریان موثر سیم‌پیچ اولیه باشد داریم :

$$R_2 = \frac{P_{l2}}{3 I_{in}^2} = \frac{368.54}{3 \times 11.31^2} = 0.96\Omega \quad (3-5)$$

۳-۳-۲ تاثیر مقاومت ثانویه در منحنی نیرو-سرعت

با رسم منحنی نیرو-سرعت موتور بر مبنای اطلاعات مدار معادل، منحنی آبی رنگ شکل ۳-۱۰ بدست آمده است. در صورتی که R_2 مقادیر کمتری داشته باشد، منحنی آبی رنگ به ترتیب به منحنی قرمز و مشکی تغییر پیدا خواهد یافت. که در این دو حالت موتور عملکرد بهتری خواهد داشت، چرا که در لغزش کمتر، نیروی بیشتری دارد و بنابراین از طول اولیه استفاده کاملی شده است. اما از آنجا که ثانویه DSLIM فرومغناطیس نیست، کاهش مقاومت ثانویه که مستلزم افزایش ضخامت آن است به علت محدودیت در فاصله هوایی امکان‌پذیر نیست. بنابراین راه حل دیگر، کاهش فرکانس جهت افزایش عمق نفوذ مغناطیسی است که این موضوع نیز طبق رابطه (۳-۱) ممکن نیست چرا که باعث کم شدن سرعت سنکرون خواهد شد. تاثیر فرکانس بر عمق نفوذ مغناطیسی در بخش بعد معرفی خواهد شد. همانطور که بیان شد، کم کردن مقاومت ثانویه راه حل بهبود نمودار نیرو-سرعت بدست آمده نمی‌باشد. در منحنی‌های شکل ۳-۱۱ تاثیر افزایش مقاومت ثانویه بر منحنی نیرو-سرعت مشاهده می‌شود. منحنی آبی رنگ نشان دهنده حالت فعلی موتور است، با زیاد کردن مقاومت ثانویه به ترتیب، منحنی قرمز و نیلی بدست می‌آید، در صورتی که توانایی تغییر مقاومت در لغزش‌های متفاوت وجود داشته باشد،

منحنی خط‌چین بدست می‌آید، که در این حالت نمودار نیرو-سرعت در گستره بیشتری از لغزش در حالت بیشینه قرار دارد. در ادامه در مورد امکان تغییر مقاومت با استفاده از مفهوم نفوذ مغناطیسی و تغییر فرکانس بخش متحرک در حین فرایند شتاب‌گیری صحبت خواهد شد و تحلیل مفهومی مدل پیشنهادی معرفی خواهد شد.

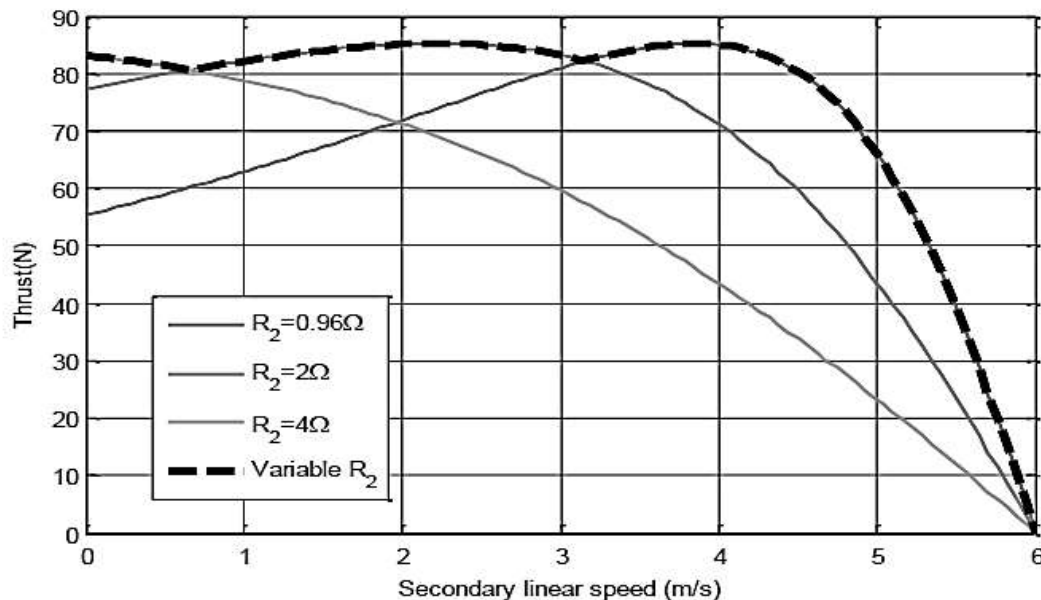


شکل ۳-۱۰: مشخصه نیرو-سرعت LIM به ازای مقادیر کاهشی مقاومت ثانویه

۳-۳-۳ استفاده از عمق نفوذ مغناطیسی در تغییر مقاومت ثانویه

مفهوم عمق نفوذ مغناطیسی که پیشتر بیان شده است طبق رابطه (۳-۶) بیان می‌دارد که مقدار نفوذ موثر یک موج مغناطیسی در رسانا با جذر فرکانس و رسانایی آن رسانا رابطه معکوس دارد. از سویی فرکانس بخش متحرک موتور القایی، روتور در RIM و ثانویه در LIM طبق رابطه (۳-۷) با لغزش رابطه مستقیم دارد. بنابراین با افزایش سرعت موتور، کاهش فرکانس و به طبع آن افزایش عمق نفوذ مغناطیسی رخ می‌دهد. مقدار رسانایی ویژه مس 5.96×10^7 و در آلومینیوم 3.5×10^7 می‌باشد. بنابراین عمق نفوذ در حالت لغزش ۱ در فرکانس برق ایران، ۹/۲۲ میلی‌متر و برای آلومینیوم ۱۲/۰۴ میلی‌متر است که این مقدار با کاهش لغزش افزایش می‌یابد. بنابراین با قرار دادن مواد با مقاومت بیشتر در لایه‌های بیرونی و مقاومت کمتر در لایه‌های داخلی، با کاهش لغزش، مقاومت دیده شده کاهش خواهد یافت. به عبارتی در لغزش زیاد، مقاومت زیاد که باعث افزایش نیروی راه اندازی می‌شود دیده خواهد شد و در لغزش‌های کمتر، مقاومت کمتر که باعث اصلاح نمودار سرعت-نیرو در لغزش کمتر

می‌شود، دیده می‌شود که با این استدلال می‌توان منحنی خط چین نمودار نیرو-سرعت شکل ۱۱-۳ را بدست آورد که در گستره وسیعی از سرعت در حداکثر نیرو است.



شکل ۱۱-۳: مشخصه نیرو-سرعت LIM به ازای مقادیر افزایشی مقاومت ثانویه

در مراجع، توانایی تغییر مقاومت در سرعت‌های مختلف، در ماشین‌های دوار مورد بررسی و معرفی قرار گرفته است و به صورت لایه سازی میله‌های روتور از مواد با مقاومت‌های مختلف ارائه شده است. در این پایان‌نامه سعی بر بررسی این رفتار در ثانویه لایه‌ای است.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma}} \quad (۳-۶)$$

$$f = S f_{\text{supply}} \quad (۳-۷)$$

این موضوع در فصل ۳ مورد شبیه‌سازی و تایید توسط نرم‌افزار و در فصل ۴ مورد بررسی عملی قرار خواهد گرفت.

۴-۳ شبیه‌سازی

روش شبیه‌سازی مد نظر به این گونه است که، نخست با استفاده از روش‌های معرفی شده در مراجع، سرعت موتور به حداکثر رسیده است. سپس با استفاده از روش‌های پیشنهادی در پایان‌نامه، باز هم سعی در افزایش سرعت خواهد شد. پس از انتخاب ضخامت ثانویه از جنس مس، پس از هر بخش

بهینه‌سازی، بیشینه سرعت و سرعت میانگین با حالت قبل از خود مقایسه خواهد شد. جمع‌بندی این مقادیر در آخر فصل آورده شده است.

۳-۴-۱ بهینه‌سازی توسط روش‌های مرسوم

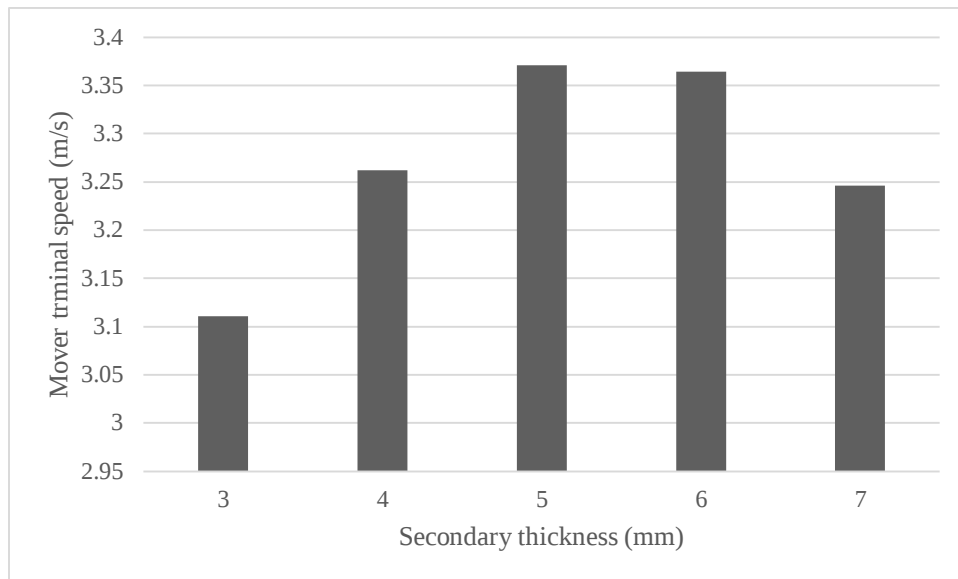
در این بخش، روش‌های بررسی شده در پیشینه تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد و پس از رساندن سرعت ثانویه به مقدار حداکثری از طریق روش‌های مرسوم، مدل بهینه در بخش بهینه‌سازی پیشنهادی استفاده خواهد شد.

۳-۴-۱-۱ بهینه‌سازی ضخامت ثانویه از جنس مس

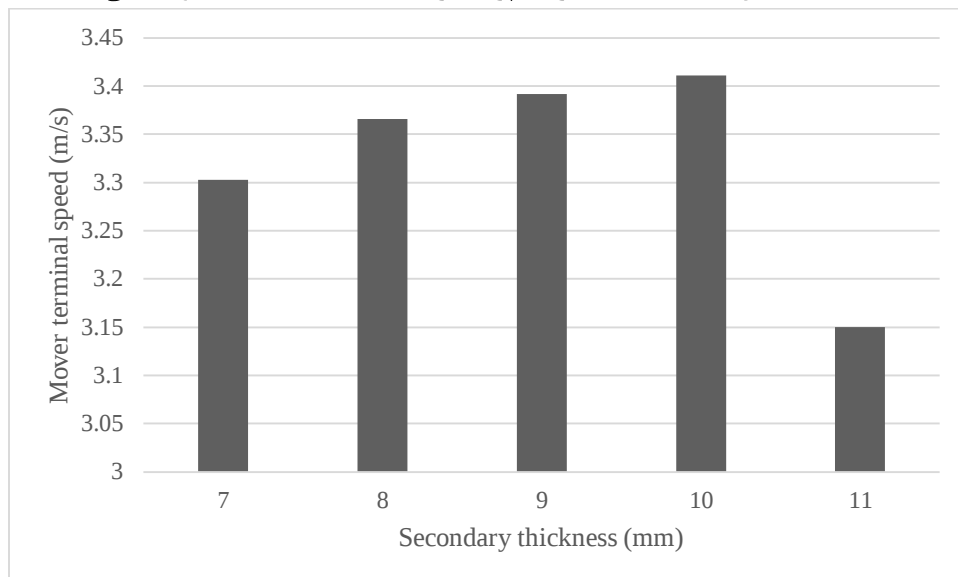
در نخستین بخش بهینه‌سازی با ثابت قراردادن شرایط، از جمله فاصله هوایی مکانیکی بین اولیه و ثانویه و تغییر در ضخامت ثانویه نمودار شکل ۳-۱۲ حاصل می‌شود که مشخص‌کننده ضخامت بهینه ثانویه با جنس مس است.

۳-۴-۱-۲ ضخامت ثانویه از جنس آلومینیوم

به دلیل سنگین بودن مس و علاوه بر آن قیمت زیاد آن، از سویی دیگر مقاومت بیشتر آلومینیوم، جایگزینی آلومینیوم و مس مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۳-۱۳ مشاهده می‌شود که با جایگزینی مس با آلومینیوم، بیشینه سرعت مناسبتری ارائه خواهد شد. بنابراین ثانویه مس با ضخامت ۵ میلی‌متر با آلومینیوم با ضخامت ۱۰ میلی‌متر جایگزین می‌شود. شکل موج نیروی پیشران بر حسب زمان در این حالت در شکل ۳-۱۴ قابل مشاهده است. مقدار موثر نیروی پیشران 47.91N بوده است.



شکل ۳-۱۲: بیشینه سرعت پرتابه بر حسب ضخامت صفحه ثانویه مسی

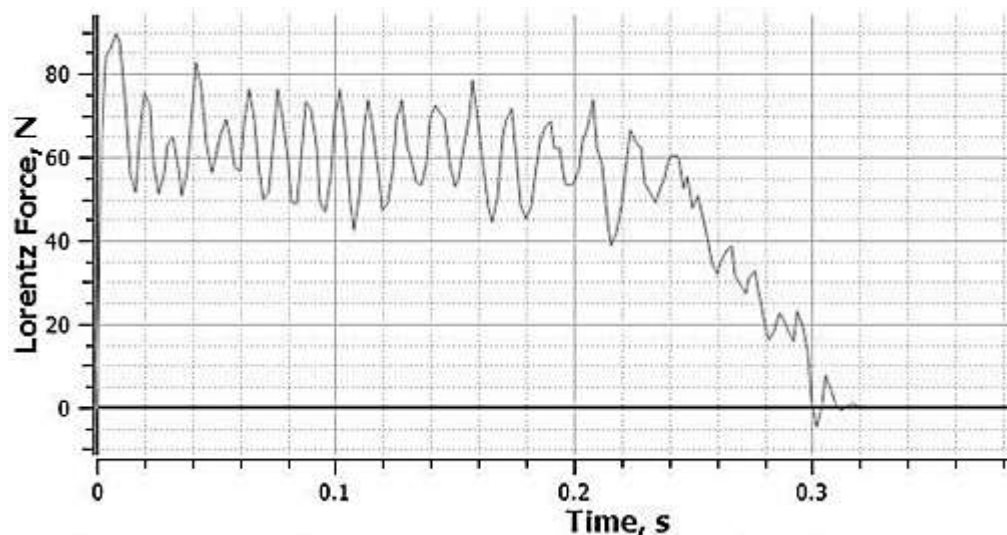


شکل ۳-۱۳: بیشینه سرعت پرتابه بر حسب ضخامت صفحه ثانویه آلومینیومی

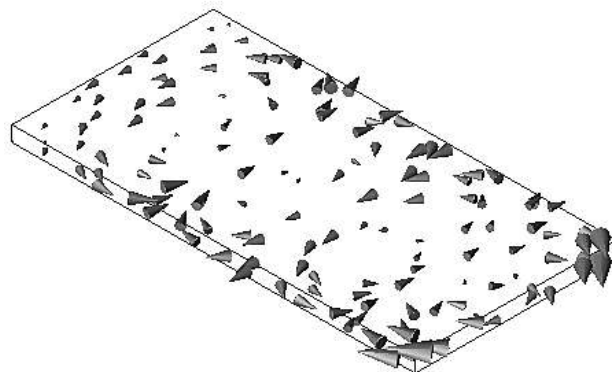
۳-۱-۴-۳ بیرون زدگی ثانویه

در مرجع [۱۴] ضریب بیرون زدگی $1/0.5$ انتخاب شده است. در این پژوهش با اعمال این ضریب، بیرون زدگی ۵ میلی متر در هر طرف بدست می آید، که در این مطالعه با تحقیق از مقدار ۰ تا ۲۰ دو نقطه بهینه حاصل می شود که به علت صرفه جویی در مصرف ورق ثانویه، مقدار کوچکتر انتخاب می گردد. این تفاوت عجیب نیست و می تواند به علت استفاده از ضریب بیرون زدگی SLIM در محاسبات DSLIM باشد. تا به این جا، یک ثانویه یکپارچه با جنس، ضخامت و بیرون زدگی بهینه بدست آمده است. این

ثانویه به عنوان مبنای مقایسه در نظر گرفته می‌شود. چگالی جریان گردابی بر روی این ثانویه در شکل ۱۵-۳ قابل مشاهده است. عدم جهت‌گیری جریان گردابی در جهت عمود بر حرکت، در این شکل قابل مشاهده است. توسط ایجاد شیار، سعی بر شکل‌گیری صحیح این جریان خواهد شد.



شکل ۳-۱۴: شکل موج نیروی پیشران بر حسب زمان در ثانویه آلومینیومی با ضخامت بهینه

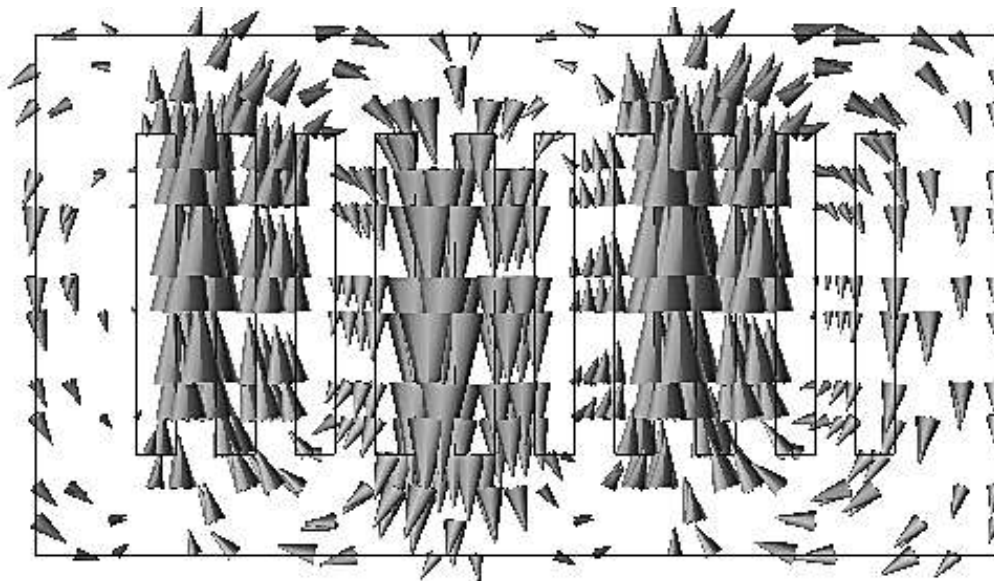


شکل ۳-۱۵: جریان گردابی در ثانویه یکپارچه بدست آمده از FEM

۴-۱-۴-۳ نسبت عرض شیار به عرض میله

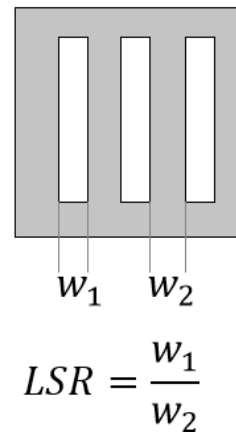
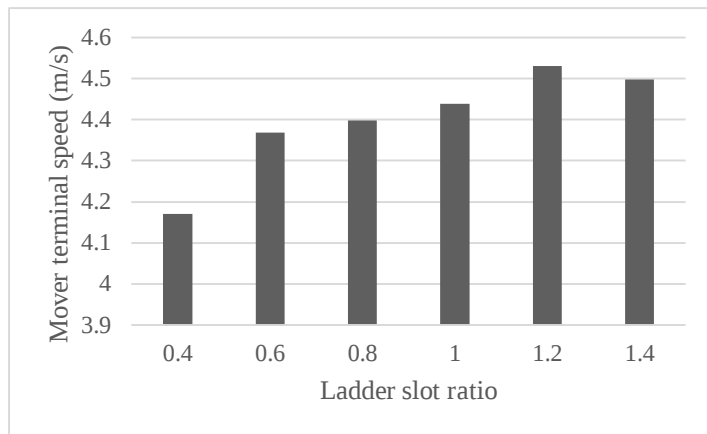
شکل ۳-۱۵ نشان‌دهنده جریان گردابی ثانویه در ساختار یکپارچه است. حلقه‌های جریانی در این شکل دیده می‌شوند که قابل تقسیم به دو مؤلفه عمود بر راستای حرکت و هم‌راستای حرکت هستند. جریان عمود بر راستای حرکت، تولید نیروی پیشران و جریان هم‌جهت با حرکت تولید نیروی محوری می‌کند. ایجاد شیار هوایی یا به عبارتی ساختار نردبانی، روشی برای مجبور کردن جریان ثانویه به حرکت

در راستای عمود بر حرکت است. برای بهینه کردن نسبت نردبان-شیار^۱، در تحقیقات پیشین در مرجع [۲۷] به کار رفته است و تعریف آن نسبت عرض شیار به عرض میله‌های ثانویه است، با ثابت گرفتن عرض شیار به اندازه ۱۰ میلی‌متر و تغییر عرض میله داده‌های خروجی به صورت نمودار شکل ۳-۱۷ خواهد بود. در این پایان‌نامه این مقدار ۱/۱ بوده است در حالی که این مقدار در مرجع مورد نظر که موتور مورد بررسی یک SLIM بوده مقدار ۲ است. شکل ۳-۱۶ نشانگر جریان گردابی در ثانویه نردبانی شده است. مشاهده می‌شود که جریان گردابی مجبور به حرکت در مسیر عمود بر مسیر حرکت شده است. بنابراین نیروی تولید شده بیشتر به صورت پیشران و کمتر به صورت محوری خواهد بود. و این نشان دهنده صحیح بودن مسیر بهینه‌سازی است. علاوه بر این شکل ۳-۱۷ نشان می‌دهد که، بیشینه سرعت به اندازه ۲۴/۸۹ و سرعت میانگین به اندازه ۳۲/۱۳ درصد نسبت به حالت پایه (حالت قبل) افزایش داشته است.



شکل ۳-۱۶: چگالی جریان گردابی القایی در ثانویه نردبانی بدست آمده از FEM

^۱ Ladder-Slot Ratio



شکل ۳-۱۷: بیشینه سرعت پرتابه بر حسب LSR

۳-۴-۱-۵ بهینه‌سازی همزمان طول و عرض شیارها

در این بخش با مفروض بودن نسبت عرض شیار و میله، با تغییر عرض شیار و میله و به طبع آن تعداد شیارهای موجود، به صورت همزمان طول، عرض و تعداد شیارهای ثانویه به صورت بهینه بدست می‌آیند. همانطور که در شکل ۳-۱۸ مشاهده می‌شود، عرض شیار از ۱۰ میلی‌متر تا ۱ میلی‌متر مورد تحقیق قرار گرفته است، در حالتی که عرض ۲ میلی‌متر باشد، سرعت بالاتری قابل دسترسی است اما به دلیل محدودیت در فرایند ساخت $w_1 = 4mm$ به عنوان نقطه بهینه جهت ادامه روند بهینه‌سازی انتخاب می‌شود. همچنین بیشینه سرعت نسبت به حالت قبل $1/65$ و سرعت میانگین مقدار $1/81$ درصد بهبود داشته است. نمودار نیروی پیشران بر حسب زمان در شکل ۳-۱۹ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که نمودار نسبت به ثانویه یکپارچه آلومینیومی رشد قابل توجهی داشته است، به علاوه مقدار موثر آن از 47.91N در مدل پایه به 100.85N در ثانویه نردبانی رسیده است.

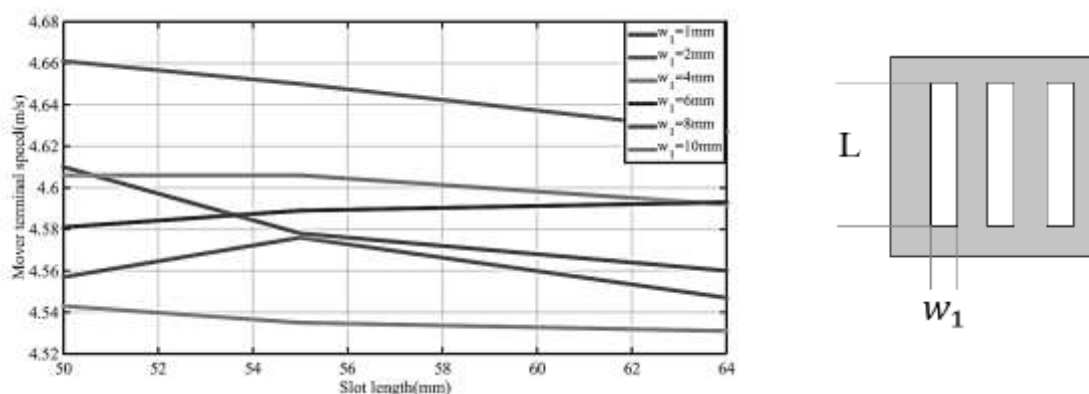
۳-۴-۱-۶ شیار دوگانه

در فصل دوم اثبات تحلیلی ایجاد شیار دوگانه مورد بررسی قرار گرفته است. در اینجا مانند مرجع [۴۱]، با ایجاد شیار دوگانه، بهینه‌سازی فاصله محوری شیار و زاویه آنها مورد توجه قرار خواهد گرفت. جریان گردابی تولید شده در این ثانویه در شکل ۳-۲۰ قابل مشاهده است.

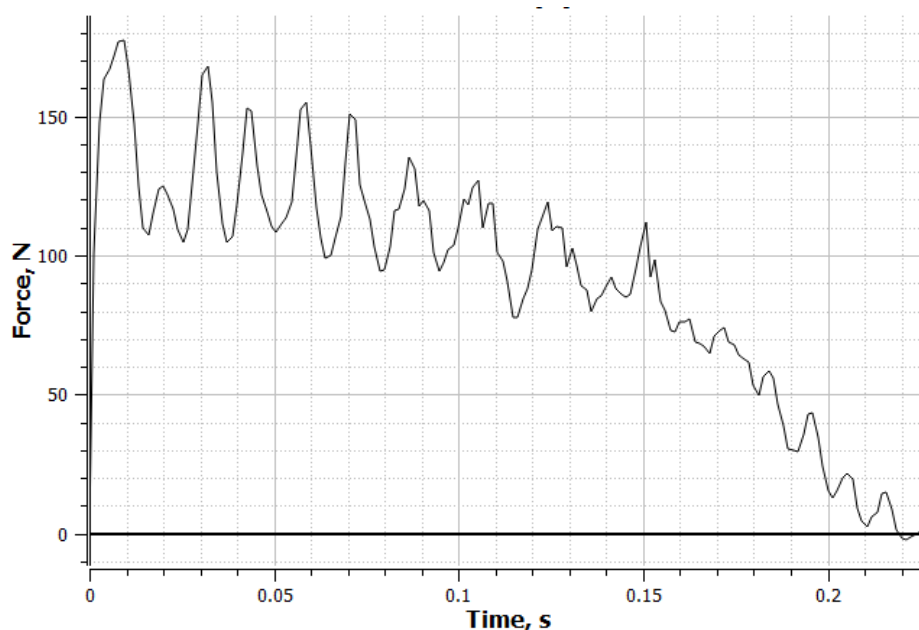
الف- بهینه‌سازی فاصله محوری شیارها

با ثابت قرار دادن فاصله محوری شیار تا گوشه ثانویه، با تغییر متقارن طول شیارها که به طبع آن

فاصله محوری بین شیارها تغییر می‌کند، شکل ۳-۲۱ حاصل خواهد شد. ۱/۹۱ درصد بهبود بیشینه سرعت نسبت به مدل قبل و ۱/۴۰ درصد در سرعت میانگین قابل دسترسی بوده است. خروجی‌های نرم‌افزار افزایش ۶/۱ نیوتونی در نیروی موثر نسبت به ثانویه نردبانی نشان داده است.



شکل ۳-۱۸: بیشینه سرعت پرتابه بر حسب طول (L) و عرض (w_1)

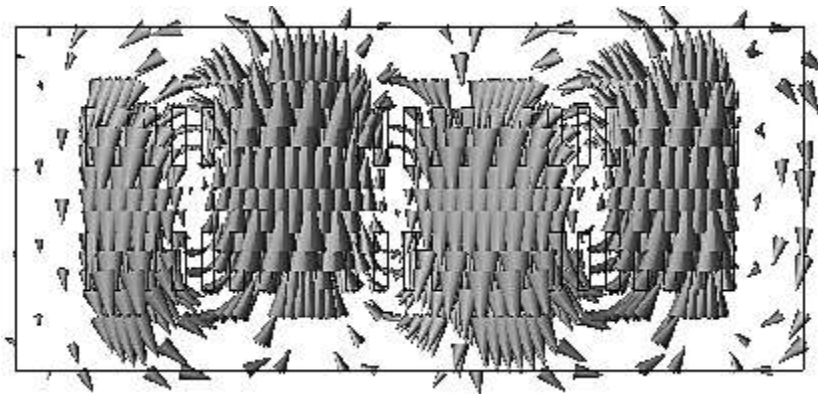


شکل ۳-۱۹: نمودار نیروی پیشران بر حسب زمان برای ثانویه نردبانی، بدست آمده از FEM

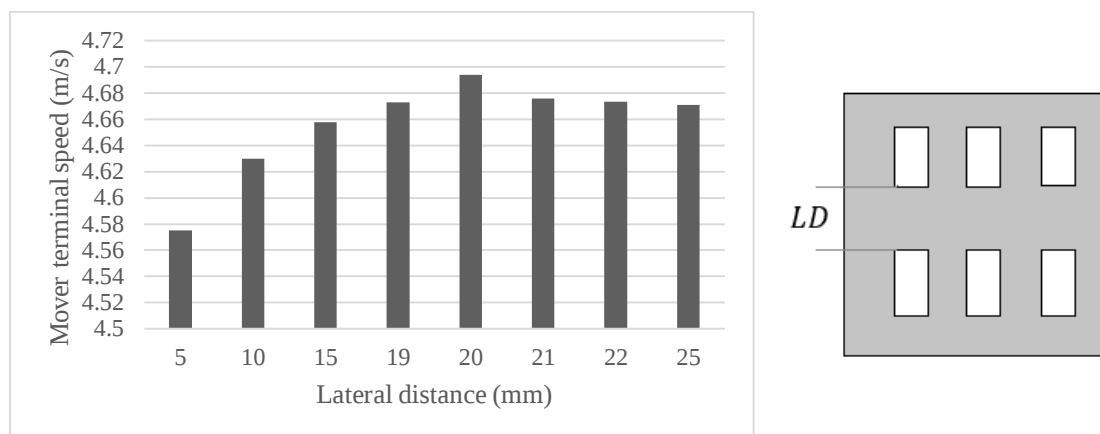
ب- بهینه‌سازی زاویه شیارها

با ثابت قرار دادن تمامی متغیرهای بهینه شده در مراحل قبل و تنها ایجاد زاویه در شیارهای دوگانه ایجاد شده، نتیجه‌ای متفاوت با حالت گفته شده در مرجع [۴۱] بدست می‌آید. در DSLIM مورد

بررسی، بر خلاف SLIM بررسی شده در مرجع یاد شده، مطابق شکل ۳-۲۲، زاویه مورد نظر از رابطه بیان شده تبعیت نکرده و با اضافه کردن زاویه حتی بیشینه سرعت کمتر می‌شود. بنابراین ساختار V شکل از مسیر بهینه‌سازی حذف می‌گردد.



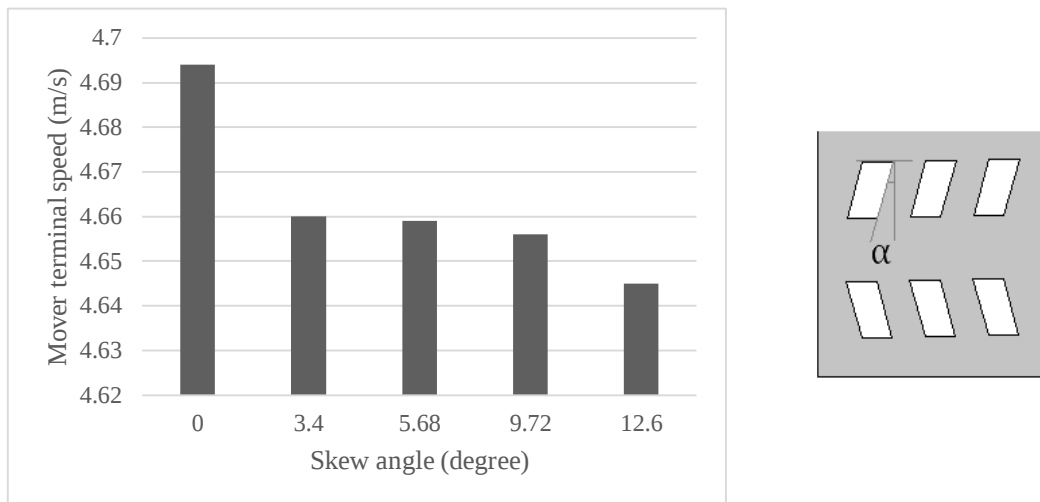
شکل ۳-۲۰: جریان گردابی ورق ثانویه در ساختار شیار دوگانه



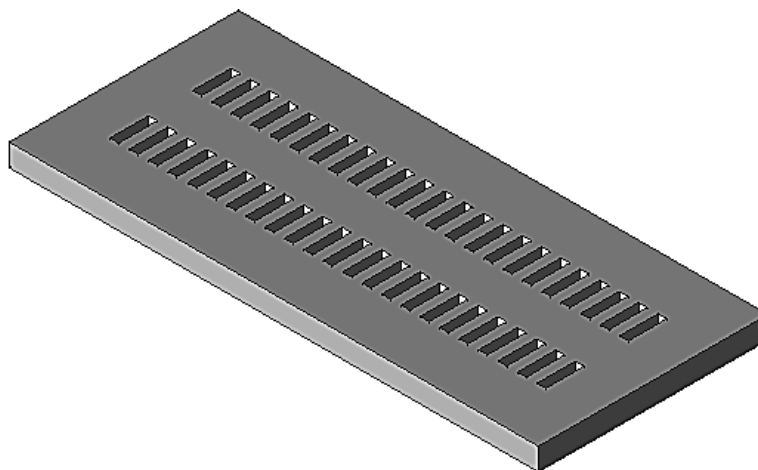
شکل ۳-۲۱: بیشینه سرعت پرتابه بر حسب فاصله محوری (LD)

با بهینه‌سازی توسط روش‌های مرسوم، بیشینه سرعت مجموعاً ۳۶/۲۱ و سرعت میانگین ۴۴/۴۱ درصد افزایش داشته‌اند. شماتیک ساختار بهینه شده توسط روش‌های متداول در شکل ۳-۲۳ قابل مشاهده است. با استفاده از مدل بهینه شده توسط روش‌های مرسوم، روش‌های پیشنهادی مورد بررسی قرار خواهند گرفت، اما برای داشتن یک مقایسه معنادار، لازم است شرایط مقایسه برابر باشد، به همین علت، جهت ثابت ماندن فاصله هوایی، این ساختار با ضخامت ۵ میلی‌متر مورد بررسی مجدد قرار خواهد گرفت و در بخش بعد مورد مقایسه با روش‌های پیشنهادی قرار خواهد گرفت. این ساختار با ضخامت ۵

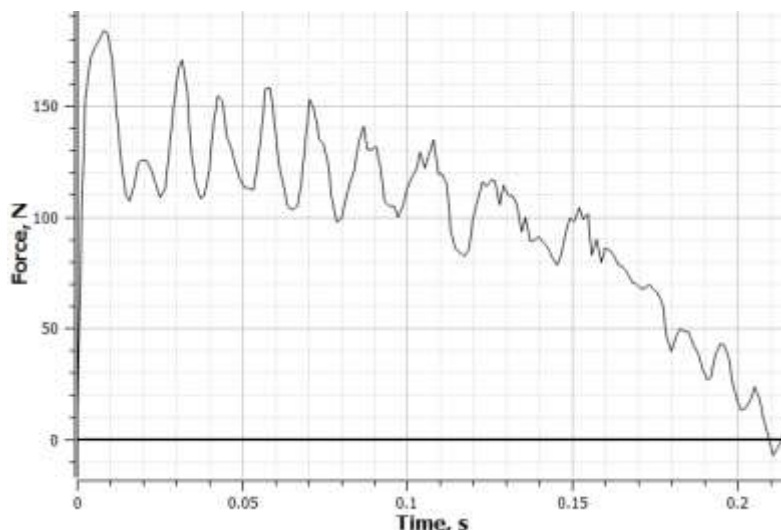
میلی متر دارای بیشینه سرعت 4.53m/s و سرعت میانگین 2.79m/s بوده است، همچنین نیروی پیشران موثر در این حالت مطابق شکل ۳-۲۴ است که مقدار موثر 94.3N را نشان داده است. این داده ها مبنای مقایسه روش های پیشنهادی خواهد بود.



شکل ۳-۲۲: بیشینه سرعت پرتابه بر حسب زاویه شیار (α)



شکل ۳-۲۳: ثانویه بهینه شده با استفاده از روش های متداول



شکل ۳-۲۴: نیروی پیشران بر حسب زمان در ثانویه آلومینیومی با ضخامت 5mm با شیار دوگانه، بدست آمده از FEM

۳-۴-۲ بهینه‌سازی توسط روش‌های پیشنهادی

پس از طی بهینه‌سازی‌های متداول، روش‌های پیشنهادی که و برش گوشه‌های ثانویه و استفاده از ثانویه لایه‌ای است و پیشتر به آنها اشاره شده و تحلیل آنها بیان شده است مورد بررسی قرار می‌گیرند و در پایان ساختار نهایی ارائه خواهد شد.

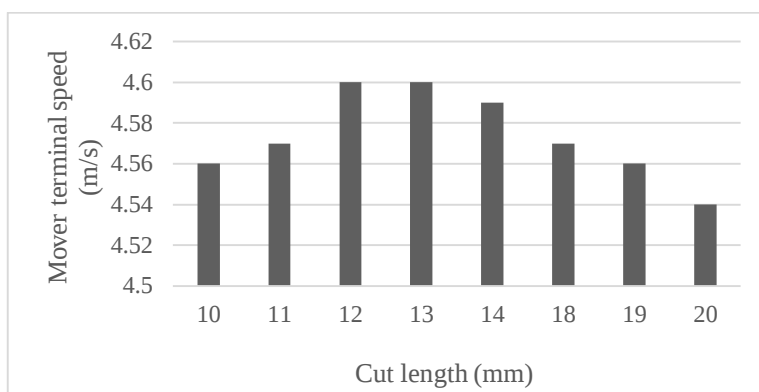
۳-۴-۲-۱ حذف گوشه‌های ثانویه

شکل ۳-۲۰ نشان دهنده چگالی جریان ثانویه بهینه شده توسط روش‌های متداول است، مشاهده می‌شود که، چگالی جریان گردابی در گوشه‌های مستطیل بسیار کم است و حتی می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. در مرجع [۴۳] سعی در تغییر ساختار ثانویه از مستطیل به شکلی غیر از آن شده است، اما در این مطالعه، اصل بر آن بوده است که مساحت ثانویه در طول روند بهینه‌سازی یکسان بماند، و هدف از این مطالعه بیشتر کاهش رپل نیرو بوده است، در این پایان‌نامه بریدن و کم کردن وزن ثانویه به صورتی که در شکل ۳-۲۵ نشان داده شده مورد بررسی قرار گرفته است. با بریدن گوشه‌های ثانویه به این صورت، چگالی جریان گردابی در ثانویه به صورت شکل ۳-۲۶ خواهد بود و بهینه‌سازی مورد نظر، قاعده مثلث بریده شده خواهد بود. نتیجه برش‌های مختلف در شکل ۳-۲۷ آورده شده است. قاعده برش بهینه در ۱۲ و ۱۳ میلی‌متر رخ می‌دهد که به علت نمایش سرعت میانگین بیشتر در برش ۱۳ میلی‌متری، این مقدار برای مرحله بعد انتخاب شده است. حذف گوشه‌های ثانویه نشان‌دهنده ۱/۵۵ درصد پیشرفت در

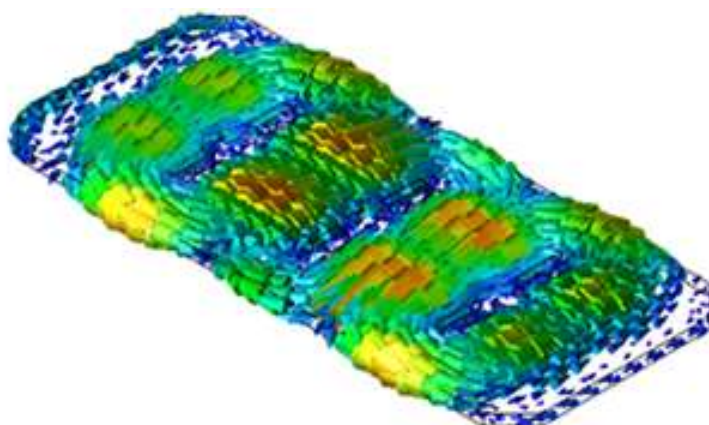
بیشینه سرعت و $1/43$ درصد پیشرفت در سرعت میانگین می باشد.



شکل ۳-۲۵: برش گوشه های ثانویه به منظور کاهش وزن



شکل ۳-۲۶: بیشینه سرعت پرتابه بر حسب قاعده برش (a)

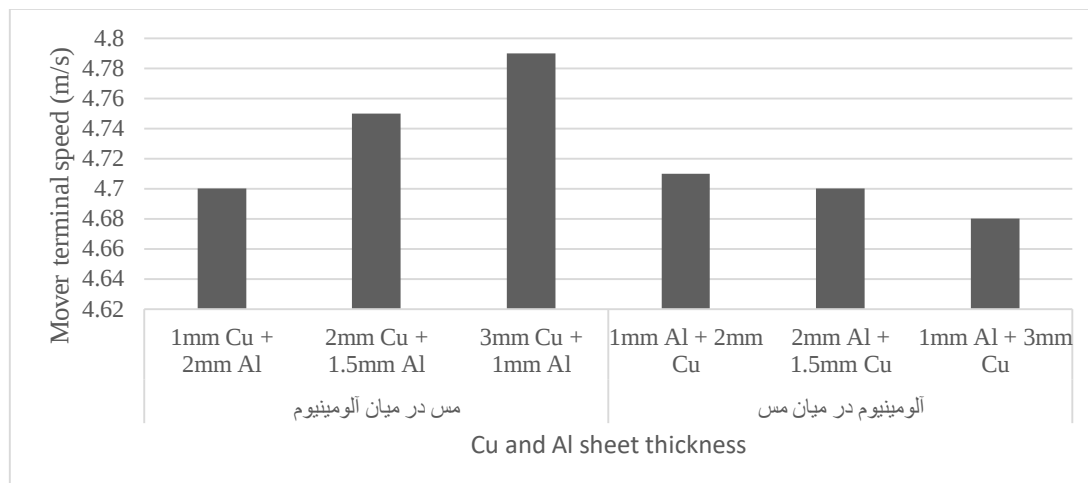


شکل ۳-۲۷: جریان گردابی ورق ثانویه پس از برش گوشه های ثانویه

۳-۲-۲-۴ ساختار ثانویه با استفاده از صفحات مس و آلومینیوم

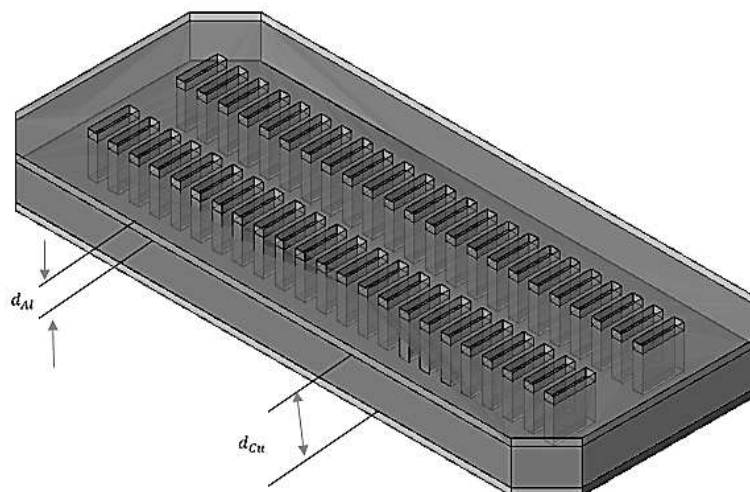
همانطور که پیشتر بیان شد، در هیچ کدام از روش های بیان شده در مراجع، استفاده از تغییر رسانایی

الکتریکی ثانویه با استفاده از خاصیت تغییر عمق نفوذ مغناطیسی در لغزش‌های متفاوت بررسی نشده است. در این پایان‌نامه، استفاده از صفحات مس و آلومینیوم به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از ورق مس در میان دو ورق آلومینیوم، مقدار بهینه نسبت این دو ورق در صورتی که مجموع ضخامت دو ورق ۵ میلی‌متر گردد مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها شکل ۳-۲۸ مشخص‌کننده نقطه بهینه ضخامت این دو ورق است که به استفاده از دو ورق آلومینیوم ۱ میلی‌متری در اطراف یک ورق مس ۳ میلی‌متری خواهد بود. پیشتر استفاده از مس در میان صفحات آلومینیوم مورد تایید تحلیلی قرار گرفته است. نتایج این شکل همچنین تایید کننده استفاده از ثانویه لایه‌ای و همچنین استفاده از مس در میان ورق‌های آلومینیوم هستند. شماتیک ساختار نهایی در شکل ۳-۲۹ قابل مشاهده است.

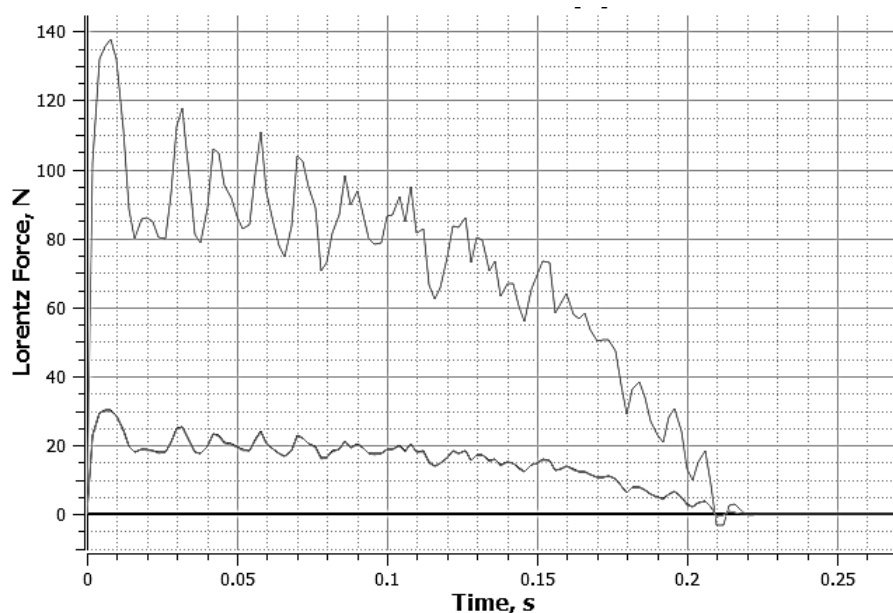


شکل ۳-۲۸: بیشینه سرعت پرتابه بر حسب ضخامت آلومینیوم و مس در ثانویه لایه‌ای

استفاده از ثانویه سه لایه ۴/۱۳ درصد پیشرفت در بیشینه سرعت و ۱/۹۲ درصد پیشرفت در سرعت میانگین نشان داده است. دو روش پیشنهادی مجموعاً ۵/۶۸ درصد افزایش در بیشینه سرعت و ۳/۳۵ درصد افزایش در سرعت میانگین را نشان داده‌اند. نمودار نیروی پیشران مدل پیشنهادی در شکل ۳-۳۰ قابل مشاهده است. نمودار نیروی سه لایه ثانویه به صورت سه منحنی از نرم‌افزار استخراج شده است، که دو منحنی دقیقاً هم‌پوشانی دارند، نیروی کل ثانویه مجموع این سه حالت خواهد بود. مقدار موثر نیروی پیشران در ثانویه پیشنهادی ۹۹.۱۶N بدست آمده است که این مقدار نسبت به ثانویه بهینه شده توسط روش‌های متداول ۴.۸۶N رشد داشته است.



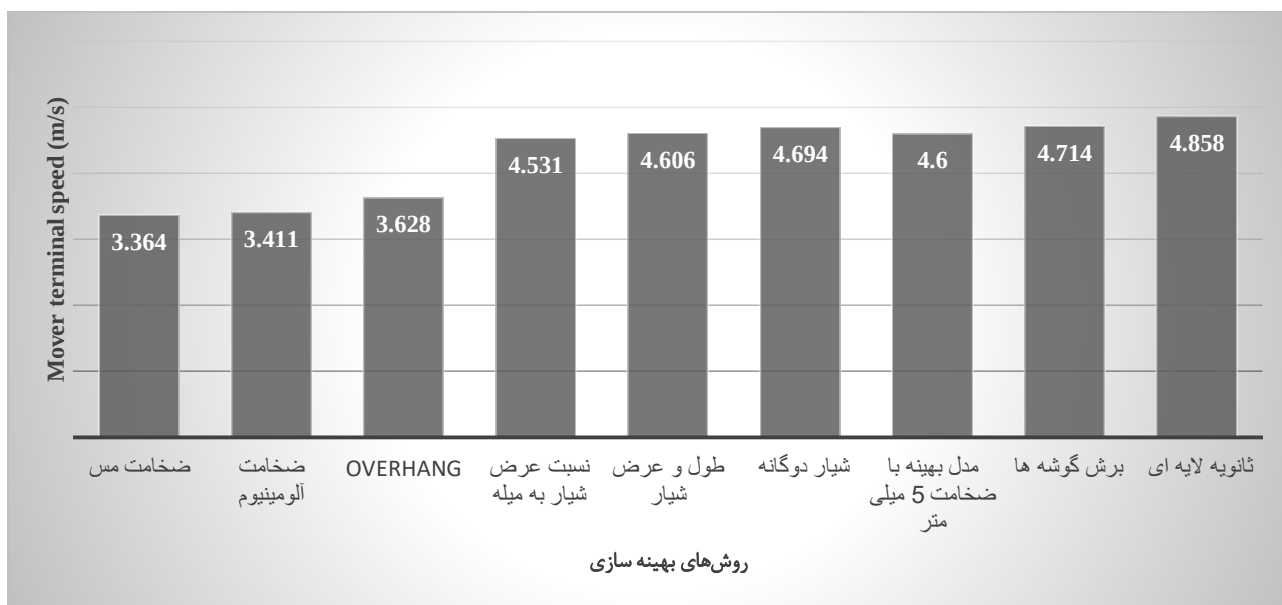
شکل ۳-۲۹: ثانویه پیشنهادی، بهینه‌سازی شده توسط روش‌های متداول و پیشنهادی



شکل ۳-۳۰: نمودار نیروی پیشران بر حسب زمان برای ثانویه پیشنهادی، بدست آمده از FEM

۳-۲-۴-۳ مقایسه نتایج

همانطور که در شکل ۳-۳۱ و جدول ۳-۲ مشاهده می‌شود، پس از طراحی مدل پایه، بیشترین سهم پیشرفت در سرعت در حالت نردبانی کردن ثانویه رخ داده است. در ادامه پس از طراحی ساختار پیشنهادی، این ساختار در هر دو بخش معرفی شده مورد تایید خروجی‌های نرم‌افزار قرار گرفته‌اند. در فصل ۴ آزمایش عملکرد مدل پایه و پیشنهادی آورده شده است.



شکل ۳-۳۱: نمودار میله ای روند بهینه سازی انجام شده توسط روش های مرسوم و پیشنهادی

جدول ۳-۲: روند عددی پیشرفت بهینه سازی نسبت به ثانویه یکپارچه مسی

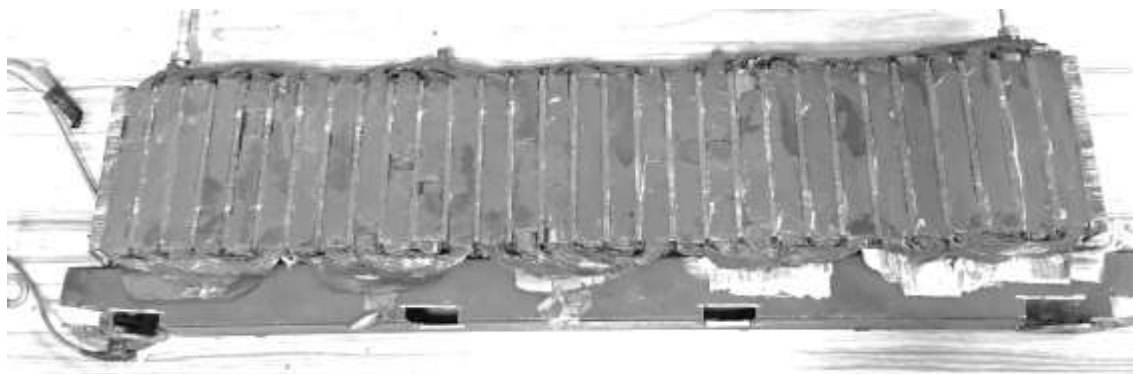
مجموع		افزایش بیشینه		پارامتر مورد بهینه سازی	
سرعت	بیشینه	افزایش سرعت	سرعت	میانگین	سرعت
روش های مرسوم بهینه سازی	٪ ۴۴/۴۱	٪ ۳۶/۲۱	٪ ۱/۸۸	٪ ۱/۴	ضخامت آلومینیوم
			٪ ۷/۱۹	٪ ۶/۳۶	بیرون زدگی
			٪ ۳۲/۱۳	٪ ۲۴/۸۹	نسبت عرض شیار به میله
			٪ ۱/۸۱	٪ ۱/۶۵	طول و عرض شیار
			٪ ۱/۴۰	٪ ۱/۹۱	شیار دوگانه
روش های پیشنهادی	٪ ۳/۳۵	٪ ۵/۶۸	٪ ۱/۹۲	٪ ۴/۱۳	ثانویه لایه ای
			٪ ۱/۴۳	٪ ۱/۵۵	قاعده برش

فصل ۴ ساخت نمونه عملی و آزمایش عملکرد

۱-۴ مقدمه

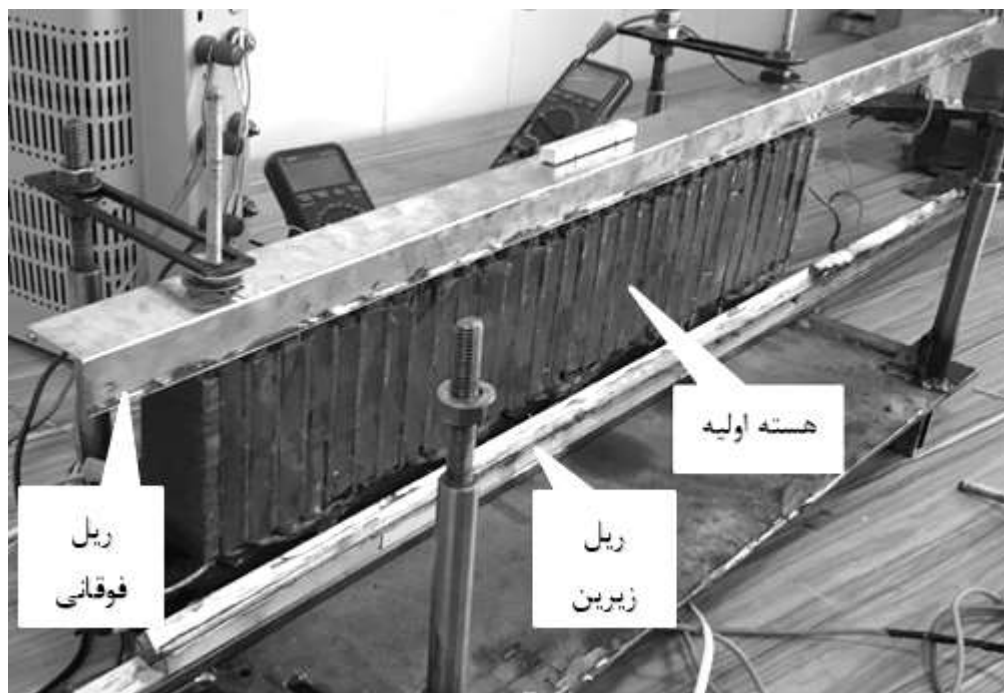
جهت اثبات آزمایشگاهی کارایی ثانویه طراحی شده در فصل ۳، در این فصل با طراحی عملی سازه موتور معرفی شده، دو مورد آزمایش عملی ثانویه‌های طراحی شده در فصل ۳، انجام شده است. نخست مدلی که تحت عنوان مدل پایه بیان شده است که صفحه آلومینیومی با ضخامت و بیرون‌زدگی بهینه است و در پایان، ساختار پیشنهادی مورد آزمایش عملی قرار گرفته است.

دو هسته سیم‌پیچی شده مطابق شکل ۱-۴ تحویل گرفته شده است. یافتن سر و ته کلاف‌ها، پس از مرتب کردن خروجی‌ها کار سختی در پیش نبوده و با استفاده از تست بیزر مالتی‌متر قابل دست یافتن است. از طرفی با اجرای تست بدنه از سلامت عایق بین کلاف‌ها و هسته اطمینان حاصل می‌شود. با گرفتن مقاومت اهمی هر کلاف و ثبت آن، علاوه بر اطمینان از عدم وجود حلقه، یکسان بودن کلاف‌ها مورد بررسی و تایید قرار می‌گیرد. پس از اطمینان از سلامت الکتریکی سیم‌پیچی‌ها، طراحی و ساخت پشتیبان مکانیکی آغاز شده است.



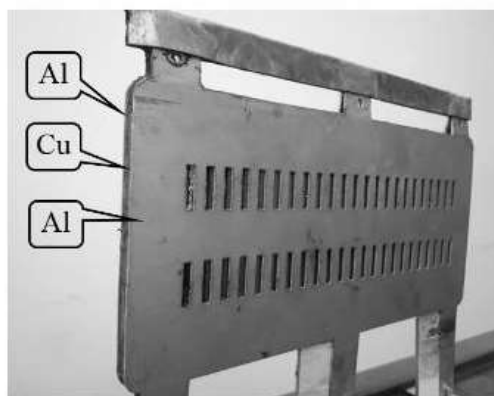
شکل ۱-۴: هسته سیم‌پیچی شده یک LIM

یک DSLIM از دو هسته فرومغناطیس همسان سیم‌پیچی شده به همراه یک ورقه هادی ثانویه تشکیل شده است. هسته سیم‌پیچی شده در شکل ۱-۴ نشان داده شده است، در شکل ۲-۴ برای دید بهتر، یک هسته همراه با تعدادی از قسمت‌های مکانیکی به نمایش گذاشته شده است.

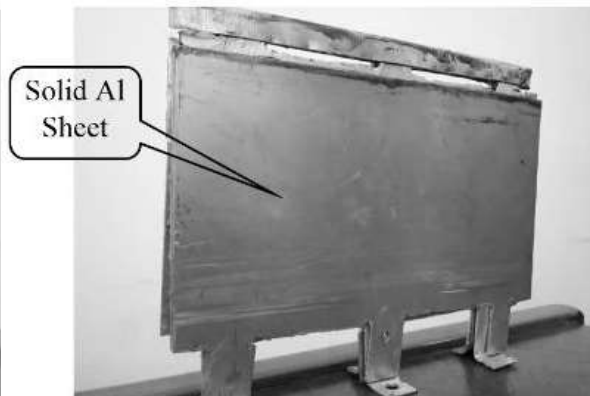


شکل ۴-۲: ساختار یک طرف DSLIM

ثانویه DSLIM در میان دو اولیه قرار می گیرد. جهت توازن ثانویه و ایجاد مسیر کم اصطکاک از یک ریل V شکل در زیر و برای نگه داشتن ثانویه به صورت عمود از دو ریل موازی در بالا استفاده شده است. در هر دو ریل با گریس کاری سعی بر کاهش اصطکاک شده است. کف ثانویه در یک قطعه گالوانیزه کم اصطکاک کوچک که در شکل ۳-۴ قابل مشاهده است چسب می شود و با قرار دادن آن در ریل V شکل، بستری کم اصطکاک برای حرکت ثانویه فراهم می شود. در ریل V شکل قابلیت تنظیم ارتفاع پیش بینی شده است و این ریل از صفحه زیرین مستقل است. جهت جلوگیری از خم شدن این ریل در تحمل وزن ثانویه و بار، از قوطی پروفیل $5 \times 20mm$ در زیر آن استفاده شده است. همچنین ریل های بالایی دارای قابلیت تنظیم ارتفاع و فاصله هستند. همانطور که در شکل ۳-۴ مشاهده می شود، جهت قرار گرفتن بخش مستطیلی ثانویه در هسته، ثانویه های ساخته شده، دارای میله هایی در پایین جهت تنظیم ارتفاع هستند، از سویی میله هایی در بالا مشاهده می شود که این میله ها وظیفه انتقال نیرو به بار را دارند و بار ۴ کیلوگرمی توسط پیچ به این میله ها محکم شده است، به علاوه از میله های بالایی جهت محاسبه سرعت لحظه خروج استفاده می شود، محاسبه سرعت در بخش های بعد بیان شده است.



(ب)



(الف)

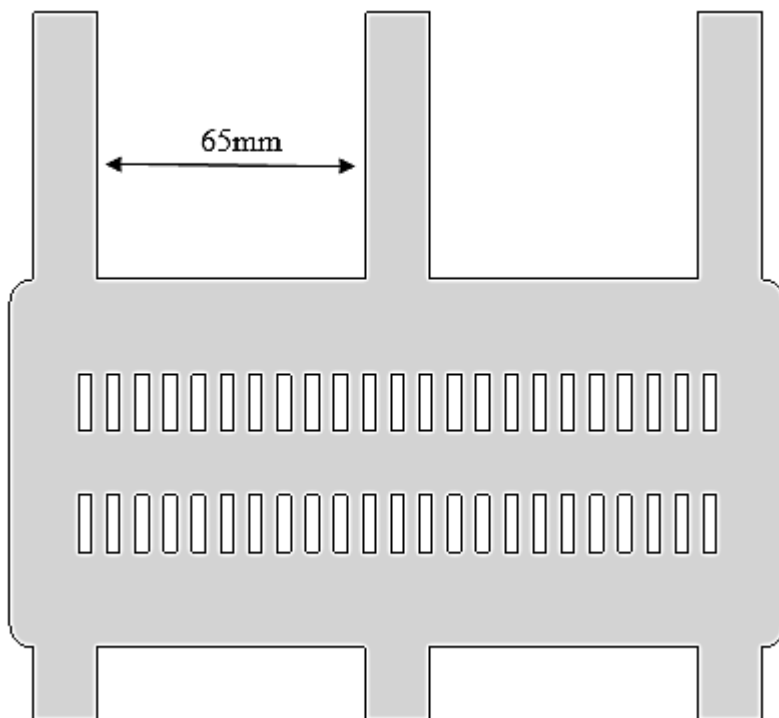
شکل ۴-۳: ثانویه‌های مورد آزمایش الف- مدل پایه ب- مدل پیشنهادی

۴-۲ معرفی محیط آزمایش

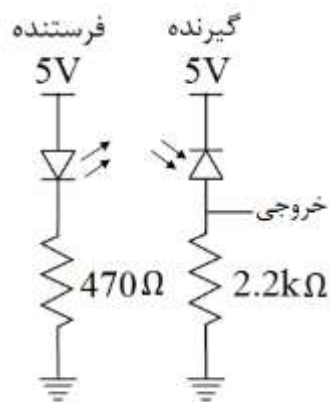
پس از اطمینان از سلامت عایقی هسته‌های سیم‌پیچی شده، طراحی ریل‌ها بیان شد. در این بخش با طراحی ساختار مکانیکی موتور، امکان کار کردن موتور فراهم شده و همچنین با پیش‌بینی محل قرارگیری حسگرها، امکان ثبت زمان جهت محاسبه سرعت فراهم می‌گردد. با اجرای پشتیبان مکانیکی، استفاده از منابع تغذیه و حسگرها، DSLIM مورد نظر برای آزمایش آماده خواهد شد. در ادامه توضیحات کامل‌تری بیان خواهد شد.

۴-۲-۱ نگهدارنده‌های مکانیکی

نیاز به نگهدارنده‌های مکانیکی همواره در موتورهای الکتریکی وجود دارد. همانطور که در شکل ۴-۴ مشاهده می‌شود، جهت نگاه‌داری صحیح موتور و ایجاد امکان آزمایش، هسته‌های فرومغناطیس سیم‌پیچی شده بر روی صفحه پروفیل‌های آهنی قرار می‌گیرند و توسط این پروفیل‌ها بر روی صفحه آهنی زیرین که ساختمان اصلی پشتیبان مکانیکی است محکم می‌شوند. در این صفحه با ایجاد شیارهایی، امکان تغییر در فاصله هوایی مهیا شده است، این شیارها در شکل ۴-۲ قابل مشاهده هستند. پروفیل‌ها بر روی صفحه زیرین قرار می‌گیرند و با پیچ و مهره به آن محکم وصل می‌شوند. جهت تنظیم فاصله هوایی، دو مرجع (فیلر) ثابت برای دو ثانویه مورد آزمایش تولید شده است و با قرار دادن آن در فاصله هوایی و تنظیم پیچ‌های زیرین و پیچ‌های تنظیم فوقانی، فاصله هوایی مورد نظر تنظیم می‌شود. از تنظیم فوقانی فاصله هوایی جهت یکنواخت نگه داشتن فاصله هوایی و جلوگیری از هشتی شکل شدن آن با



شکل ۴-۵: شماتیک ثانویه پیشنهادی مورد آزمایش



شکل ۴-۶: مدار بایاس حسگر مادون قرمز استفاده شده جهت تشخیص سرعت

۴-۲-۳ منابع تغذیه

جهت تغذیه موتور مورد نظر و جلوگیری از آسیب به آن، به یک منبع تغذیه متغیر نیاز است، بدین منظور از یک اتوترانس سه فاز به صورت نشان داده شده در شکل ۴-۴ استفاده شده است. به منظور بایاس نمودن مدارهای اندازه‌گیری نیز به منبع تغذیه DC نیاز است که منبع تغذیه DC متغیر استفاده

شده است.

۴-۲-۴ بار

به منظور استفاده از بار ۴ کیلوگرمی، ماکت پهنپاد نمایش داده شده در شکل ۴-۴ ساخته شده است. با ایجاد قلاویز در پایه این ماکت، امکان پیچ کردن آن به ثانویه مهیا شده است و بار به صورت عمود و پایدار بر روی ثانویه قرار می‌گیرد.

۴-۳ آزمایش عملکرد

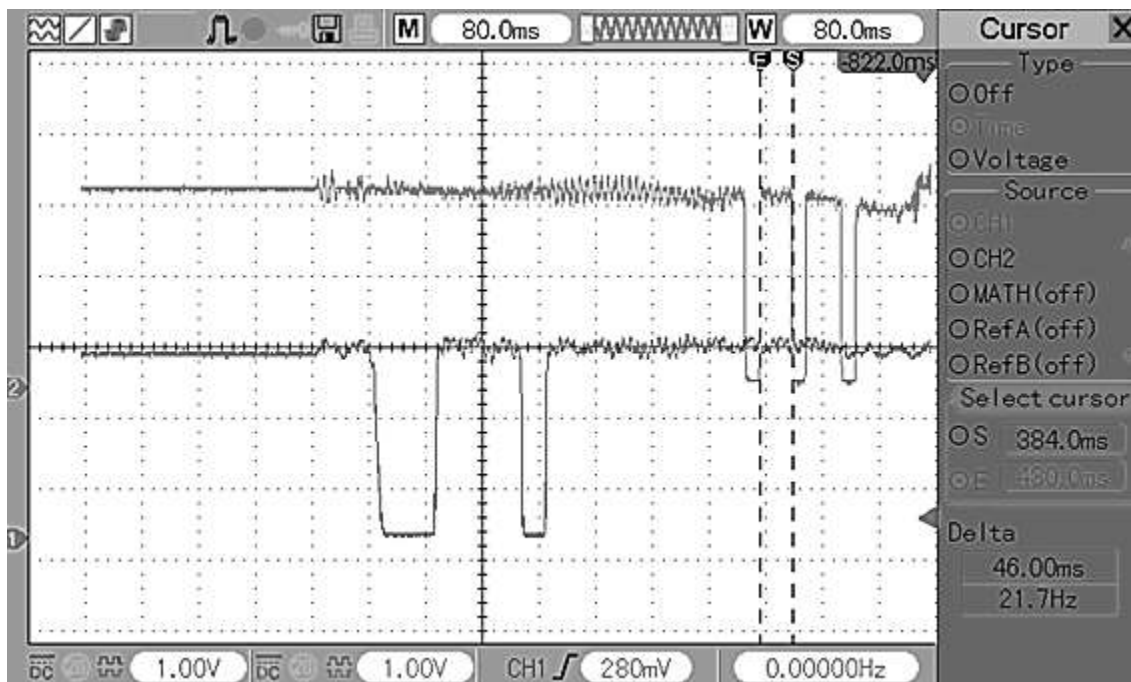
هدف از این دو آزمایش، مقایسه عملی مدل پایه مطرح شده در فصل ۳ و مدل پیشنهادی ساخته شده با استفاده از بهینه‌سازی‌های متداول و ارائه شده در این پژوهش است. پس از انجام این دو آزمایش با ۴۰۰۰ گرم بار، نتایج مقایسه خواهند شد و با مقایسه خروجی داده‌های آزمایشگاهی با خروجی داده‌های فصل ۳ کارایی مدل جدید به صورت تحلیلی و عملی بررسی خواهد شد.

۴-۳-۱ آزمایش عملکرد مدل پایه

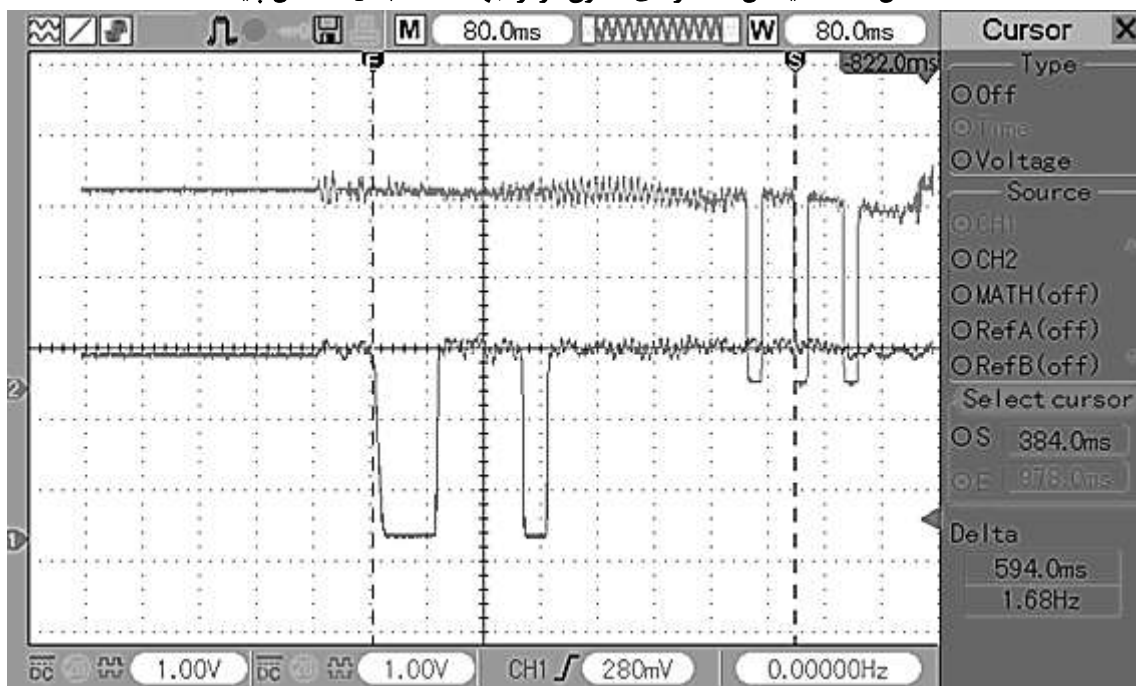
ساختار پایه معرفی شده در فصل ۳، ثانویه‌ای یکپارچه از جنس آلومینیوم به ضخامت ۱۰ میلی‌متر است. با استفاده از این ثانویه و اجرای آزمایش، سیگنال‌های خروجی اسیلوسکوپ به صورت شکل‌های ۴-۷ و ۴-۸ خواهد بود. زمان مورد نیاز برای محاسبه سرعت لحظه خروج ثانویه از اولیه یا به عبارتی، بیشینه سرعت، بین پایان پالس اول آبی و شروع پالس دوم آبی است. زمان طی مسیر بین میله اول و دوم که ۶۵ میلی‌متر است بدست می‌آید. بدین ترتیب :

$$v_{terminal,basic} = \frac{\Delta x_1}{\Delta t_1} = \frac{65mm}{46ms} = 1.41m/s \quad (۴-۱)$$

حسگرها گونه‌ای جایگذاری شده‌اند که دیده شدن میله دوم توسط حسگر اول میسر، حرکت ثانویه و دیده شدن همان میله توسط حسگر آخر مسیر، خارج شدن ثانویه از اولیه را تشخیص می‌دهد. بنابراین جهت محاسبه سرعت میانگین در آزمایش ساختار پایه داریم:



شکل ۴-۷: سیگنال حسگرهای مادون قرمز جهت محاسبه Δt_1 مدل پایه

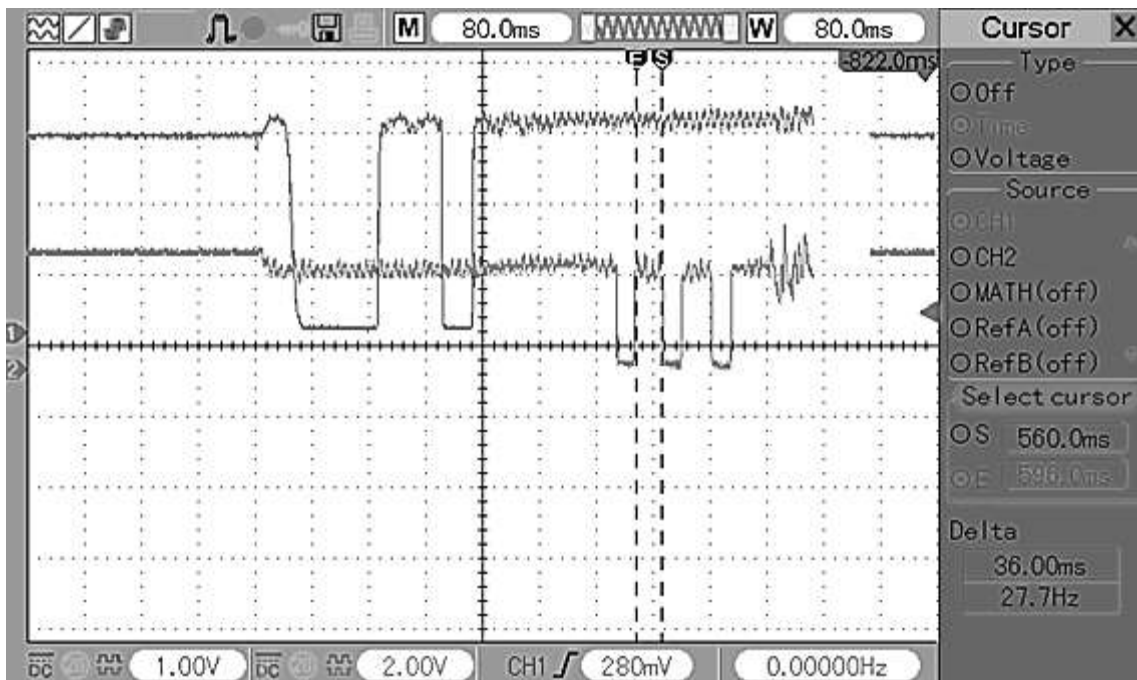


شکل ۴-۸: سیگنال حسگرهای مادون قرمز جهت محاسبه Δt_2 مدل پایه

$$v_{average,basic} = \frac{\Delta x_2}{\Delta t_2} = \frac{600mm}{594ms} = \frac{1.01m}{s} \quad (4-2)$$

۲-۳-۴ آزمایش عملکرد مدل پیشنهادی

در این مرحله از ثانویه‌ای با طول و عرض مدل پایه، اما با تفاوت‌هایی که در مدل بهینه شده بیان شده در فصل ۳ استفاده شده است. به صورتی که روش‌های بهینه‌سازی متداول و ارائه شده در این پژوهش بر روی این ثانویه اجرا شده است. ثانویه بهینه شده به صورت شکل ۳-۴-ب است. ثانویه از یک ورق مس ۳ میلی‌متر مابین دو ورق آلومینیوم ۱ میلی‌متر تشکیل شده است. جهت برش صفحه ثانویه از برش لیزر با گاز اکسیژن استفاده شده است. با اجرای آزمایش، خروجی به صورت شکل ۴-۹ و ۴-۱۰ خواهد بود.

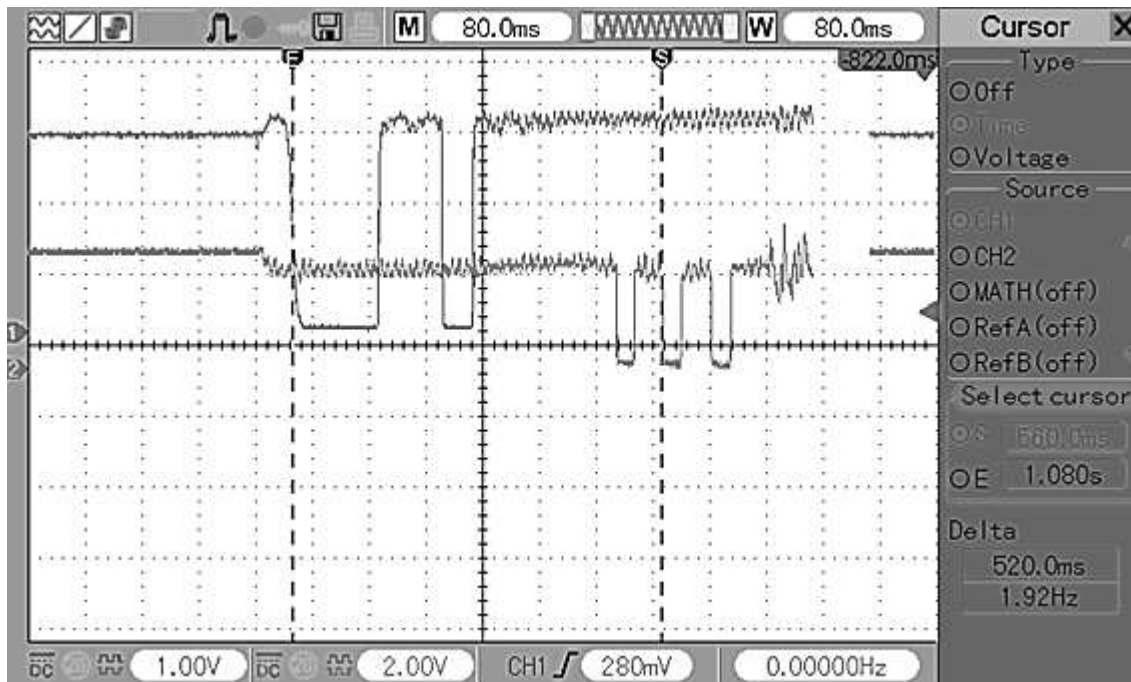


شکل ۴-۹: سیگنال حسگرهای مادون قرمز جهت محاسبه Δt_1 مدل پیشنهادی

جهت محاسبه بیشینه سرعت و سرعت خروج همانند بخش قبل عمل می‌شود:

$$v_{terminal,proposed} = \frac{\Delta x_1}{\Delta t_1} = \frac{65mm}{36ms} = 1.81m/s \quad (۳-۴)$$

$$v_{average,proposed} = \frac{\Delta x_2}{\Delta t_2} = \frac{600mm}{520ms} = 1.15m/s \quad (۴-۴)$$



شکل ۴-۱۰: سیگنال حسگرهای مادون قرمز جهت محاسبه Δt_2 مدل پیشنهادی

۳-۳-۴ مقایسه نتایج

با استفاده از خروجی‌های اسیلوسکوپ به صورت شکل‌های ۴-۷ الی ۴-۱۰، سرعت میانگین و بیشینه

سرعت دو مدل آزمایش شده، در جدول ۴-۱ قابل مشاهده است:

جدول ۴-۱: نتایج آزمایش عملی

سرعت میانگین (m/s)	بیشینه سرعت (m/s)	
۱/۰۱	۱/۴۱	مدل پایه
۱/۱۵	۱/۸۱	مدل پیشنهادی

۴-۴ مقایسه نتایج شبیه‌سازی و نتایج عملی

نتایج نهایی شبیه‌سازی‌های انجام شده در فصل ۳ به همراه نتایج آزمایش عملی به صورت نمودارهای

میله‌ای شکل‌های زیر می‌باشد، در این دو شکل خروجی‌های نرم‌افزار و آزمایش عملی مدل پایه و مدل

پیشنهادی مقایسه شده‌اند. شکل ۴-۱۱ نشان‌گر این مقایسه سرعت میانگین و شکل ۴-۱۲ نشان‌گر

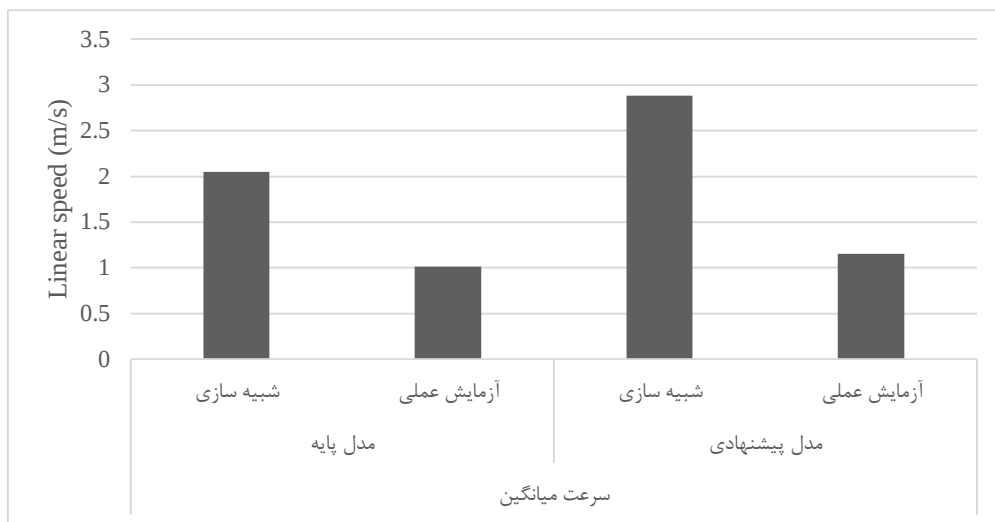
مقایسه بیشینه سرعت می‌باشد. در هر دو نمودار، روند پیشرفت مدل پیشنهادی نسبت به مدل پایه

مشاهده می‌شود، اگرچه به علت مواردی مانند لحاظ نشدن اصطکاک در شبیه‌سازی، خطاهای ساخت،

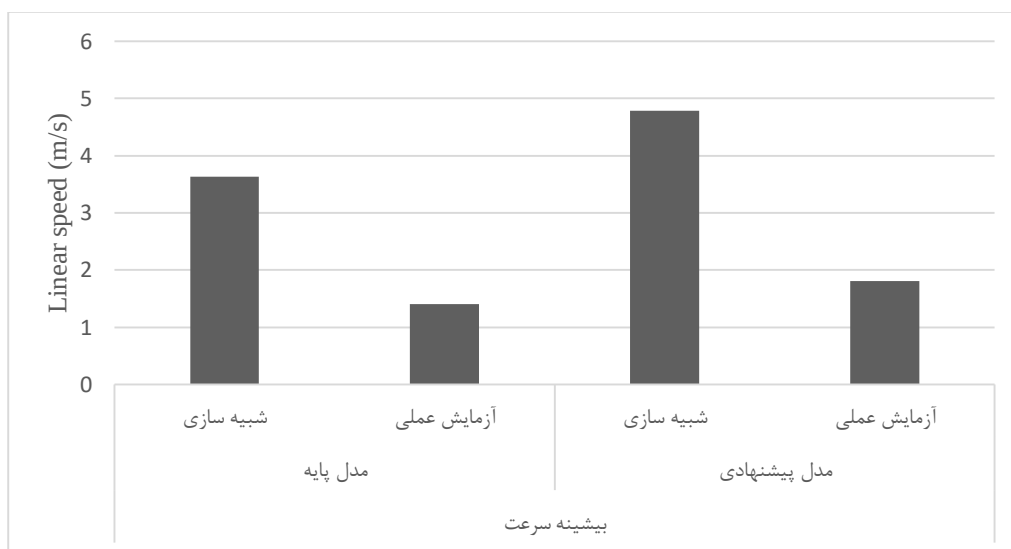
خطاهای اندازه‌گیری و ... خروجی‌های آزمایشگاهی نسبت به خروجی‌های نرم‌افزار با هم اختلاف دارند

اما روند پیشرفت هر دو صعودی بوده و شبیه‌سازی توسط آزمایش عملی مورد تایید قرار گرفته است.

در هر دو نمودار، پیشرفت مدل پیشنهادی نسبت به مدل پایه قابل مشاهده است.



شکل ۴-۱۱: مقایسه سرعت میانگین مدل پایه و مدل پیشنهادی در آزمایش عملی و شبیه سازی



شکل ۴-۱۲: مقایسه سرعت میانگین مدل پایه و مدل پیشنهادی در آزمایش عملی و شبیه سازی

فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهاد های ادامه کار

۵-۱ جمع‌بندی

با توجه به کاربرد فراوان شتاب‌دهنده‌ها در صنعت، و مزایای انکارناپذیر نوع الکترومغناطیسی آن، از یک موتور القائی خطی دوطرفه به عنوان شتاب‌دهنده الکترومغناطیسی استفاده شده است. به علت تاثیر بسیار زیاد ساختار ثانویه در عملکرد موتور القائی خطی، پایان‌نامه اساساً در مورد بهینه‌سازی این ساختار بوده است. در این پژوهش با استفاده از FEM مدل موتور مورد نظر شبیه‌سازی شده است و پس از تایید عملکرد صحیح موتور، انواع ثانویه با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی متداول تحقیق شده است. روش‌های بهینه‌سازی متداول و درصد پیشرفت بیشینه سرعت و سرعت میانگین به صورت زیر است:

استفاده از ورق یکپارچه آلومینیوم با ضخامت بهینه شده به جای ورق مس یکپارچه در بیشینه سرعت $1/4$ و در سرعت میانگین $1/88$ درصد پیشرفت داشته است. بهینه‌سازی بیرون‌زدگی ثانویه، نسبت عرض شیار به عرض میله، طول و عرض شیار، فاصله محوری شیارهای دوگانه به ترتیب $6/36$ ، $24/89$ ، $1/65$ و $1/91$ درصد پیشرفت در بیشینه سرعت و $7/19$ ، $32/13$ ، $1/81$ و $1/4$ درصد پیشرفت در سرعت میانگین داشته‌اند، در صورتی که ساختار شیار زاویه دار، تاثیر مثبتی در ثانویه DSLIM نشان نداده است. سپس روش‌های پیشنهادی از جمله برش گوشه‌های ثانویه و ساخت ثانویه از سه لایه با استفاده از مس و آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفته است که به ترتیب $1/55$ و $4/13$ درصد پیشرفت در بیشینه سرعت و $1/43$ و $1/92$ درصد پیشرفت در سرعت میانگین مشاهده شده است. ساختار آلومینیوم یکپارچه با ضخامت بهینه و ساختار پیشنهادی در بخش آزمایش عملی مقایسه شده‌اند که ساختار پیشنهادی پیشرفت $28/37$ درصدی در بیشینه سرعت و $13/86$ درصدی در سرعت میانگین نشان داده است.

۵-۲ نتیجه‌گیری

تأثیر بسیار ساختار ثانویه در عملکرد موتور القائی خطی به صورت شبیه‌سازی و عملی نشان داده شده است. در این پژوهش روش‌های بهینه‌سازی مطالعه شده در مراجع برای SLIM و DSLIM مورد تحقیق قرار گرفته است، تمامی روش‌های بررسی شده بهینه‌سازی SLIM در DSLIM بجز یک روش، مورد تایید قرار گرفته است.

۵-۳ پیشنهادهای ادامه کار

در این پایان‌نامه حساسیت زیادی بر روی بخش پژوهش، شبیه‌سازی، ساخت نمونه عملی و آزمایش عملکرد خرج داده شده است. اما همواره پیشنهادهایی برای ادامه مسیر پژوهش قابل ارائه است که به شرح زیر مطرح می‌گردد:

۱- در این پایان‌نامه بهینه‌سازی‌های معرفی شده در فصل ۳ با چند ترتیب مختلف مورد بررسی قرار گرفته است و در نهایت ترتیب بهینه از بین چند ترتیب معرفی شده است. به عنوان پیشنهاد می‌توان بررسی ترتیب حالات ممکن را مورد بررسی قرار داد.

۲- در بخش ساخت نمونه عملی از سطح کم اصطکاک با استفاده از روان‌کننده گریس نسوز استفاده شده است. بررسی تأثیر استفاده از سایر روان‌کننده‌ها یا استفاده از بلبرینگ به جای ریل در این بخش خالی از لطف نیست.

۳- از آنجایی که سرعت سنکرون موتور القائی خطی به فرکانس ورودی و گام قطب بستگی دارد، بررسی استفاده از مبدل فرکانس در ورودی و تأثیر آن در بیشینه سرعت پیشنهاد می‌شود.

۴- استفاده از حسگرهای متعدد و بررسی تغییرات سرعت در طی مسیر

- [1] Wei Xu, Jian Guo Zhu, Yongchang Zhang, Yaohua Li, Yi Wang, and Youguang Guo, "An Improved Equivalent Circuit Model of a Single-Sided Linear Induction Motor," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 5, pp. 2277–2289, 2010.
- [2] M. H. Ravanji and Z. Nasiri-Gheidari, "Design Optimization of a Ladder Secondary Single-Sided Linear Induction Motor for Improved Performance," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 4, pp. 1595–1603, 2015.
- [3] J. F. Eastham and E. R. Laithwaite, "Linear Induction Motors As 'Electromagnetic Rivers'," *Electron. Power*, vol. 20, no. 22, pp. 1099–1108, 1974.
- [4] H. Yajima, H. Wakiwaka, K. Minegishi, N. Fujiwara, and K. Tamura, "Design of linear DC motor for high-speed positioning," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 81, no. 1, pp. 281–284, 2000.
- [5] J. W. Judy, D. L. Polla, and W. P. Robbins, "A Linear Piezoelectric Stepper Motor with Submicrometer Step Size and Centimeter Travel Range," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 37, no. 5, pp. 428–437, 1990.
- [6] A. Shiri and A. Shoulaie, "End effect braking force reduction in high-speed single-sided linear induction machine," *IEEE Energy Convers. Manag.*, vol. 61, pp. 43–50, 2012.
- [7] D. Xu, J. Huang, X. Su, and P. Shi, "Adaptive command-filtered fuzzy backstepping control for linear induction motor with unknown end effect," *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 477, pp. 118–131, 2019.
- [8] R. Cao, M. Lu, N. Jiang, and M. Cheng, "Comparison Between Linear Induction Motor and Linear Flux-switching Permanent-Magnet Motor for Railway Transportation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. PP, no. c, pp. 1–1, 2019.
- [9] G. Lyu, T. Zhou, and D. Zeng, "The influence of the secondary thickness on the air-gap magnetic field and losses of the linear induction motor," *12th Int. Symp. Linear Drives Ind. Appl. LDIA 2019*, no. 2, pp. 1–4, 2019.
- [10] H. Lee, S. G. Lee, C. Park, J. Lee, and H. Park, "Characteristic Analysis of a Linear Induction Motor for a Lightweight Train According to Various Secondary Schemes," *IJR International Journal of Railway*, vol. 1, no. 1, pp. 6–11, 2008.
- [11] I. Boldea and S.A.Nasar, "Linear electric actuators and generators," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 14, no. 3, pp. 712–717, 1999.
- [12] H. Karimi, S. Vaez-Zadeh, and F. Rajaei Salmasi, "Combined vector and direct thrust control of linear induction motors with end effect compensation," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 31, no. 1, pp. 196–205, 2016.
- [13] I. Boldea, *ELECTRIC*. 2010.
- [14] X. Sun, L. Shi, Z. Zhang, and H. Zhu, "Thrust Control of a Double-Sided Linear Induction Motor With Segmented Power Supply," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 6, pp. 4891–4900, 2019.
- [15] B. Lee, D. Koo, and Y. Cho, "Secondary Conductor Structure," *IEEE Trans Magn.*, vol. 45, no. 6, pp. 2839–2842, 2009.

- [16] J. I. Nakagawa and H. Misumi, "Fundamental Characteristics of Molten Metal Flow Control by Linear Induction Motor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 30, no. 6, pp. 4764–4766, 1994.
- [17] A. H. Isfahani, B. M. Ebrahimi, and H. Lesani, "Design optimization of a low-speed single-sided linear induction motor for improved efficiency and power factor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 2, pp. 266–272, 2008.
- [18] I. A. Smolyanov, "Study of electrodynamic levitation force in a traction linear induction motor," *Proc. 2019 IEEE Conf. Russ. Young Res. Electr. Electron. Eng. ElConRus 2019*, pp. 1083–1087, 2019.
- [19] L. Zhang, H. Zhang, H. Obeid, and S. Laghrouche, "Time-varying state observer based twisting control of linear induction motor considering dynamic end effects with unknown load torque," *ISA Trans.*, under published, 2019.
- [20] M. Flankl, L. De Oliveira Baumann, A. Tüysüz, and J. W. Kolar, "Energy Harvesting With Single-Sided Linear Induction Machines Featuring Secondary Conductive Coating," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 6, pp. 4880–4890, 2019.
- [21] E. I. Shmakov, N. V Tarchutkin, and I. A. Smolyanov, "Comparison of Dynamic and Harmonic-Field Models of Linear Induction Motor," *2019 IEEE Conf. Russ. Young Res. Electr. Electron. Eng.*, pp. 1070–1072, 2019.
- [22] J. Ma, Y. Zhu, and J. Jiang, "A novel method to calculate the thrust of linear induction motor based on instantaneous current value," *J. Mod. Transp.*, vol. 20, no. 2, pp. 76–81, 2012.
- [23] F. Alonge, M. Cirrincione, M. Pucci, and A. Sferlazza, "Input-output feedback linearization control with on-line MRAS-based inductor resistance estimation of linear induction motors including the dynamic end effects," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 1, pp. 254–266, 2016.
- [24] L. Gan(2014) "Model Predictive Control of Induction Motor Drive", vol. 41, School of Electrical and Computer Engineering Royal Melbourne Institute of Technology, pp. 81-127
- [25] Q. F. Lu and W. H. Mei, "Recent development of linear machine topologies and applications," *CES Trans. Electr. Mach. Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 65–72, 2018.
- [26] G. Lv, T. Zhou, D. Zeng, and Z. Liu, "Influence of Secondary Constructions on Transverse Forces of Linear Induction Motors in Curve Rails for Urban Rail Transit," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 6, pp. 4231–4239, 2019.
- [27] J. Di, J. E. Fletcher, Y. Fan, Y. Liu, and Z. Sun, "Design and Performance Investigation of the Double-Sided Linear Induction Motor With a Ladder-Slot Secondary," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. PP, no. c, p. 1, 2019.
- [28] W. Xu, G. Sun, G. Wen, Z. Wu, and P. K. Chu, "Equivalent circuit derivation and performance analysis of a single-sided linear induction motor based on the winding function theory," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 4, pp. 1515–1525, 2012.
- [29] S. E. Abdollahi, M. Mirzayee, and M. Mirsalim, "Design and Analysis of a Double-Sided Linear Induction Motor for Transportation," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 7, 2015.
- [30] T. Yang, L. Zhou, L. Li, and A. A. M. Field, "Influence of Design Parameters on End Effect in Long Primary Double-Sided Linear Induction Motor," *IEEE Trans. Plasma science* vol. 39, no. 1, pp. 192–197, 2011.
- [31] F. Eastham and T. Cox, "Transient Analysis of Offset Stator Double Sided Short Rotor Linear Induction Motor Accelerator," *20th Int. Conf. Magn. Levitated Syst. Linear Drives*, no. 5, pp. 2–6, 2008.

- [32] T. Onuki and E. R. Laithwaite, "Optimized Design of Linear Induction Motor Accelerators," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineering.*, vol. 118, no. 2, pp. 349–355, 1971.
- [33] 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 Motor," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 9, pp. 7516–7525, 2018.
- [34] A. Accetta, M. Cirrincione, M. Pucci, and G. Vitale, "Closed-loop MRAS speed observer for linear induction motor drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 3, pp. 2279–2290, 2015.
- [35] L. Zhang, H. Zhang, Y. Liu, and D. Liu, "Second order sliding mode control with MARS speed estimation of linear induction motors considering unknown longitudinal end effects," *Asian J. Control*, no. January, pp. 1–11, 2019.
- [36] J. H. Sung and K. Nam, "A new approach to vector control for a linear induction motor considering end effects," *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370)*, Phoenix, AZ, USA, 1999, pp. 2284-2289 vol.4
- [37] O. F. Jan, F. Hedley, J. S. Doyle, and M. Vernon, "Linear induction motor," *United States Patent Office*, 1934.
- [38] E. R. Laithwaite, "Adapting a linear induction motor for the acceleration of large masses to high velocities," *IEE Proc. Electr. Power Appl.*, vol. 142, no. 4, pp. 262–268, 1995.
- [39] D. Patterson et al., "The Development of the Angled-Deck Innovation and Adaptation," *Nav. War Coll. Rev.*, vol. 44, no. 1, pp. 63–78, 2011.
- [40] L. Bertola, T. Cox, P. Wheeler, S. Garvey, and H. Morvan, "Design Study and Scaled Experiment of Induction and Synchronous Motor for Civil Application of Electromagnetic Aircraft Launch System," *18th Electromagnetic Launch Technology Symposium (EML)*, pp. 6–8.
- [41] J. Zhan and Q. Lu, "Design Optimization and Performance Investigation of Novel Double-slit Secondaries for Linear Induction Motors," *2018 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2018*, pp. 1589–1594, 2018.
- [42] Q. Lu, L. Li, J. Zhan, X. Huang, and J. Cai, "Design Optimization and Performance Investigation of Novel Linear Induction Motors with Two Kinds of Secondaries," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 6, pp. 5830–5842, 2019.
- [43] P. Wang, L. Shi, and R. Zhang, "Design Optimization on Secondary and Performance Improvement of Long Primary Double-Sided Linear Induction Motor," *2019 22nd Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2019*, no. 1, pp. 1–4, 2019.

Abstract

Generating linear force directly has so many advantages as the independence of convertors and reducing system maintenance costs. Mechanical, aerodynamic, and pneodynamics systems including accelerators are replacing by electromagnetic systems, therefore magnetic accelerators use in industry and military applications is increasing. Accelerator's duty is to generate linear force, or in other words, to deliver an object at an acceptable speed over time, length, and possibly limited energy. In this study, a double sided linear induction motor(DSLIM) is used as an electromagnetic accelerator and the goal is to optimize the secondary sheet structure. First, the simulation has been done using Jmag-Designer FEM software, various secondary structures are examined after the model is verified. A 4kg load has been applied to this DSLIM. Optimization methods are as following: solid copper sheet thickness, solid aluminum thickness, secondary overhang, ladder slot ratio, slot's width, and length, lateral distance as common methods, and layered secondary and beveling the angles as proposed methods. Using FEM for common methods leads to 36.21% increase in terminal speed and 44.41% increase in average speed. Proposed methods show 3.48% and 6.37% increase in terminal and average speed respectively. Using a 4kW 600mm DSLIM, experimental tests have been done verifying simulation results.

Keywords : Electromagnetic launcher, Linear induction motor, Layered secondary, Optimization, Finite element simulation



Shahrood University of
Technology

Faculty of Electrical and Robotics Engineering

M.Sc. Thesis in Power Electronics and Machine Engineering

Optimal design and experimental test of secondary topology of a double-sided electromagnetic launcher

By: Morteza Samimi

Supervisor:
Dr. Amir Hassannia

February 2021