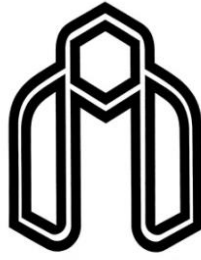


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های قدرت

کاهش ریپل نیرو در موتورهای سنکرون خطی مغناطیس دائم دوطرفه

نگارنده: فاطمه کفاش فریمانی

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

استاد مشاور:

دکتر امیر حسن نیا خیبری

بهمن ۱۳۹۵

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پر مهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگی ام، چشمان پرفروغ مادرم

که هرچه بگو شدم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانی‌شان را سپاس توانم بگویم.

و هم چنین، همسر عزیزم

که سایه مهربانش سایه‌سار زندگی ام است، او که اسوه صبر و تحمل بوده و مشکلات مسیر را برایم هموار نمود.

مشکرو قدردانی:

پاس فراوان نثار ایزدمنان که توفیق رارفتق راهم ساخت تا این پایان نامه را به اتمام برسانم. بر

خود لازم می دانم از زحمات بی دریغ استاد گران قدر، جناب آقای دکتر احمد دارابی، صمیمانه مشکرو

قدردانی نمایم.

همچنین از جناب آقای دکتر امیر حسن نیا که در ممر رسیدن این پایان نامه با صبر و حوصله فراوان

راهنمایی ام نمودند، مشکرو می کنم.

تعهدنامه

اینجانب **فاطمه کفاش فریمانی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق / قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **کاهش ریبیل نیرو در موتورهای سنکرون خطی مغناطیس دائم دو طرفه** تحت راهنمایی دکتر احمد دارابی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه 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 می باشد 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق 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 افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده فارسی

در بسیاری از کاربردهایی که در آنها نیاز به حرکت خطی می‌باشد، استفاده از موتورهای خطی نسبت به موتورهای دوار ترجیح داده می‌شود. در میان انواع موتورهای خطی، موتورهای آهنربای دائم دارای تلفات کم، ثابت زمانی الکتریکی کوچک و پاسخ سریع می‌باشند که امروزه بیشتر از سایر انواع موتورهای خطی مورد توجه قرار گرفته‌اند. با این وجود یکی از معایب ماشین‌های خطی مغناطیس دائم، نیروی دندانه‌ای است که باعث ایجاد ریپل در نیروی رانش و همچنین ایجاد اختلال در حرکت موتور می‌شود. ماشین‌های خطی در دو نوع، یک‌طرفه و دوطرفه، ساخته می‌شوند. در موتورهای خطی دوطرفه نیروی عمودی به صورت یکنواخت‌تری بر قسمت متحرک وارد می‌شود و به‌طور کلی این موتورها عملکرد بهتری نسبت به موتورهای مشابه با ساختار یک‌طرفه دارند. هدف از این تحقیق طراحی بهینه موتور سنکرون مغناطیس دائم خطی شیاردار دوطرفه به منظور کاهش ریپل نیرو می‌باشد، به همین دلیل در این پایان‌نامه ابتدا سعی می‌شود روش‌های مختلف کاهش ریپل نیرو از جمله تغییر عرض دهانه شیار، تغییر ابعاد آهنرباها و پخ کردن نوک دندانه‌ها بررسی شده و میزان حساسیت ریپل نیرو به تغییرات پارامترهای هر روش تعیین شود. در این زمینه یک موتور خطی مغناطیس دائم با مشخصات نامی نوعی در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از مدل المان محدود ماشین، موارد مذکور بررسی خواهند شد. در نهایت سعی می‌شود روش ترکیبی بهینه‌ای برای کاهش مؤثرتر ریپل نیروی ارائه شود.

کلیدواژه‌ها: موتور سنکرون خطی آهنربای دائم شیاردار دوطرفه، ریپل نیرو، طراحی بهینه،

نیروی دندانه‌ای.

فهرست مطالب

فصل اول: پیشگفتار.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۱-۱- اصول عملکرد ماشین‌های خطی.....	۲
۱-۱-۲- انواع ماشین‌های خطی.....	۴
۲- اهداف تحقیق.....	۴
۳-۱- مروری بر فصل‌های پایان‌نامه.....	۵
فصل دوم: سابقه پژوهشی موضوع پایان‌نامه.....	۷
۱-۲- مقدمه.....	۸
۲-۲- کاهش نیروی دندان‌های به کمک مورب کردن آهنرباها و دندان‌ها.....	۸
۳-۲- استفاده از قطب‌های کمکی به منظور کاهش نیروی دندان‌های و اثرات انتهایی.....	۹
۴-۲- استفاده ترکیبی از روش‌های کاهش نیروی دندان‌های.....	۱۳
۵-۲- روش‌های کاهش نیروی دندان‌های در PMLSM دوطرفه.....	۱۶
۶-۲- جمع‌بندی.....	۱۹
فصل سوم: ساختار ماشین‌های سنکرون خطی مغناطیس دائم.....	۲۱
۱-۳- مقدمه.....	۲۲
۲-۳- ساختارهای مختلف ماشین سنکرون خطی مغناطیس دائم.....	۲۲
۱-۲-۳- ماشین سنکرون خطی لوله‌ای و مسطح.....	۲۵
۲-۲-۳- ماشین سنکرون خطی یک‌طرفه و دوطرفه.....	۲۶
۳-۲-۳- ماشین سنکرون خطی با هسته آهن یا هسته هوا.....	۲۷

۲۷	۳-۲-۴- ماشین سنکرون خطی شیاردار و بدون شیار.....
۲۸	۳-۲-۵- ماشین سنکرون خطی شار عرضی و شار طولی.....
۳۲	۳-۳- روش‌های کاهش ریپل نیرو در موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم نمونه.....
۳۴	۳-۳-۱- تغییر عرض دهانه شیارها.....
۳۵	۳-۳-۲- تغییر ابعاد آهنربا.....
۳۶	۳-۳-۳- پخ کردن نوک دندانه‌ها.....
۳۷	۳-۴- جمع‌بندی.....
۳۹	فصل چهارم: معرفی و بررسی عملکرد ماشین سنکرون مغناطیس دائم نمونه.....
۴۰	۴-۱- مقدمه.....
۴۰	۴-۲- معرفی ماشین مورد مطالعه.....
۴۰	۴-۲-۱- فرآیند طراحی ماشین نمونه.....
۴۴	۴-۲-۲- مدار معادل ماشین نمونه.....
۵۰	۴-۳- نحوه شبیه‌سازی ماشین نمونه.....
۵۲	۴-۴- بررسی عملکرد ماشین نمونه.....
۵۳	۴-۴-۱- بررسی عملکرد موتور در شرایط مدارباز.....
۵۶	۴-۴-۲- بررسی عملکرد موتور در شرایط نامی.....
۵۸	۴-۴-۳- بررسی عملکرد موتور در شرایط بیشینه.....
۶۰	۴-۵- جمع‌بندی.....
۶۱	فصل پنجم: کاهش نیروی دندانه‌ای موتور سنکرون مغناطیس دائم نمونه.....
۶۲	۵-۱- مقدمه.....

۶۲	۲-۵- بررسی تغییر عرض دهانه شیار.....
۶۹	۳-۵- بررسی تغییر عرض آهنربا.....
۷۵	۴-۵- بررسی تغییر ارتفاع آهنربا.....
۸۰	۵-۵- بررسی اثر پخ کردن نوک دندانها.....
۸۳	۶-۵- روش ترکیبی بهینه.....
۸۵	۷-۵- جمع بندی.....
۸۷	فصل ششم: جمع بندی و نتیجه گیری.....
۸۸	۱-۶- نتیجه گیری.....
۸۸	۲-۶- پیشنهادهایی برای ادامه کار.....
۹۱	فهرست مراجع.....

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲): مورب کردن آهنرباها در ماشین سنکرون..... ۹
- شکل (۲-۲): ساختار ماشین سنکرون با قطب کمکی..... ۱۰
- شکل (۳-۲): ساختار پل ایزوله مغناطیسی..... ۱۲
- شکل (۴-۲): ساختار PMLSM..... ۱۴
- شکل (۵-۲): ساختار ماشین سنکرون مغناطیس دائم دوطرفه..... ۱۷
- شکل (۱-۳): موتور سنکرون آهنربای دائم با آهنربای سطحی..... ۲۳
- شکل (۲-۳): موتور سنکرون آهنربای دائم با آهنربای درونی..... ۲۳
- شکل (۳-۳): ماشین خطی با اولیه بلند و ثانویه کوتاه..... ۲۴
- شکل (۴-۳): ماشین خطی با اولیه کوتاه و ثانویه بلند..... ۲۴
- شکل (۵-۳): موتور سنکرون خطی آهنربای دائم شیاردار یک‌طرفه لوله‌ای با سیستم اولیه خارجی..... ۲۵
- شکل (۶-۳): موتور سنکرون خطی آهنربای دائم شیاردار یک‌طرفه لوله‌ای با سیستم ثانویه خارجی..... ۲۵
- شکل (۷-۳): ماشین سنکرون خطی مغناطیس دائم یک‌طرفه..... ۲۶
- شکل (۸-۳): موتور سنکرون خطی آهنربای دائم شیاردار دوطرفه با سیستم اولیه خارجی..... ۲۶
- شکل (۹-۳): موتور سنکرون خطی آهنربای دائم دوطرفه با سیستم ثانویه خارجی..... ۲۷
- شکل (۱۰-۳): موتور سنکرون خطی آهنربای دائم یک‌طرفه سطحی بدون شیار با هسته هوایی..... ۲۷
- شکل (۱۱-۳): موتور سنکرون خطی آهنربای دائم دوطرفه سطحی بدون شیار با هسته هوایی..... ۲۸
- شکل (۱۲-۳): موتور سنکرون مغناطیس دائم ترکیبی..... ۲۹
- شکل (۱۳-۳): موتور سنکرون خطی آهنربای دائم دوطرفه با ریل واکنشی سریع..... ۳۰
- شکل (۱۴-۳): موتور سنکرون خطی رلوکتانس متغیر با عبور دهنده‌های جهت‌دار شار..... ۳۱

- شکل (۳-۱۵): موتور سنکرون خطی رلوکتانس متغیر با ورقه‌های فولاد..... ۳۱
- شکل (۳-۱۶): شیار باز در ماشین خطی..... ۳۳
- شکل (۳-۱۷): تغییرات عکس تابع پرمانس فاصله هوایی در ماشین با شیارهای باز..... ۳۴
- شکل (۳-۱۸): تغییرات عکس تابع پرمانس فاصله هوایی در ماشین با شیارهای نیمه بسته..... ۳۵
- شکل (۳-۱۹): شکل شیار ماشین مورد مطالعه..... ۳۵
- شکل (۳-۲۰): ثانویه ماشین نمونه..... ۳۶
- شکل (۳-۲۱): الف) شکل شیار اولیه ب) شکل شیار پیشنهادی..... ۳۷
- شکل (۴-۱): ماشین سنکرون خطی مغناطیس دائم با اولیه متحرک..... ۴۰
- شکل (۴-۲): ابعاد شیار ماشین نمونه..... ۴۳
- شکل (۴-۳): مدار معادل ماشین..... ۴۶
- شکل (۴-۴): نمای دوبعدی ماشین شبیه‌سازی شده در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود..... ۵۱
- شکل (۴-۵): نمای سه‌بعدی ماشین شبیه‌سازی شده در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود..... ۵۱
- شکل (۴-۶): مدار الکتریکی ماشین شبیه‌سازی شده..... ۵۲
- شکل (۴-۷): نمایی از مش بندی موتور در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود..... ۵۲
- شکل (۴-۸): شکل موج نیروی محرکه القایی مدار باز موتور..... ۵۳
- شکل (۴-۹): طیف هارمونیک نیروی محرکه القایی مدار باز موتور..... ۵۳
- شکل (۴-۱۰): شکل موج نیروی دندان‌های..... ۵۴
- شکل (۴-۱۱): توزیع چگالی شار مغناطیسی موتور..... ۵۴
- شکل (۴-۱۲): خطوط چگالی شار مغناطیسی موتور..... ۵۵
- شکل (۴-۱۳): مؤلفه y چگالی شار آهنربا در وسط فاصله هوایی..... ۵۵

- شکل (۴-۱۴): مؤلفه x چگالی شار آهنربا در وسط فاصله هوایی..... ۵۵
- شکل (۴-۱۵): شکل موج نیروی خروجی در شرایط نامی..... ۵۶
- شکل (۴-۱۶): شکل موج ولتاژ دو سر منبع جریان در شرایط نامی..... ۵۶
- شکل (۴-۱۷): طیف هارمونیک شکل موج ولتاژ دو سر منبع جریان در شرایط نامی..... ۵۷
- شکل (۴-۱۸): توان خروجی موتور در شرایط نامی..... ۵۷
- شکل (۴-۱۹): شکل موج ولتاژ دو سر منبع جریان در شرایط بیشینه..... ۵۸
- شکل (۴-۲۰): طیف هارمونیک شکل موج ولتاژ دو سر منبع جریان در شرایط بیشینه..... ۵۸
- شکل (۴-۲۱): شکل موج نیرو در شرایط بیشینه..... ۵۹
- شکل (۴-۲۲): شکل موج توان ورودی در شرایط بیشینه..... ۵۹
- شکل (۵-۱): عرض دهانه شیار در ماشین نمونه..... ۶۲
- شکل (۵-۲): تغییرات نیروی دندانه‌ای نسبت به افزایش عرض دهانه شیار..... ۶۳
- شکل (۵-۳): تغییرات نیروی دندانه‌ای نسبت به کاهش عرض دهانه شیار..... ۶۳
- شکل (۵-۴): نیروی دندانه‌ای موتور با شیارهای بسته..... ۶۴
- شکل (۵-۵): تغییرات نیروی خروجی نسبت به افزایش عرض دهانه شیار..... ۶۴
- شکل (۵-۶): تغییرات نیروی خروجی نسبت به کاهش عرض دهانه شیار..... ۶۵
- شکل (۵-۷): تغییرات ریپل نیرو نسبت به تغییر عرض دهانه شیار..... ۶۵
- شکل (۵-۸): تغییرات نیروی میانگین نسبت به تغییر عرض دهانه شیار..... ۶۶
- شکل (۵-۹): تغییرات بازده نسبت به تغییر عرض دهانه شیار..... ۶۶
- شکل (۵-۱۰): تغییرات ضریب توان نسبت به تغییر عرض دهانه شیار..... ۶۷
- شکل (۵-۱۱): تغییرات چگالی توان نسبت به تغییر عرض دهانه شیار..... ۶۷

- شکل (۵-۱۲): تغییرات حجم هسته نسبت به تغییر عرض دهانه شیار..... ۶۸
- شکل (۵-۱۳): تغییرات تلفات هسته نسبت به تغییر عرض دهانه شیار..... ۶۸
- شکل (۵-۱۴): تحلیل هارمونیکی ولتاژ دو سر منبع جریان..... ۶۹
- شکل (۵-۱۵): عرض آهنربا در ماشین نمونه..... ۶۹
- شکل (۵-۱۶): تغییرات نیروی دندانه‌ای نسبت به تغییر عرض آهنربا..... ۷۰
- شکل (۵-۱۷): تغییرات نیروی خروجی نسبت به تغییر عرض آهنربا..... ۷۰
- شکل (۵-۱۸): تغییرات ریپل نیرو نسبت به تغییر عرض آهنربا..... ۷۱
- شکل (۵-۱۹): تغییرات نیروی میانگین نسبت به تغییر عرض آهنربا..... ۷۱
- شکل (۵-۲۰): تغییرات بازده نسبت به تغییر عرض آهنربا..... ۷۲
- شکل (۵-۲۱): تغییرات ضریب توان نسبت به تغییر عرض آهنربا..... ۷۲
- شکل (۵-۲۲): تغییرات چگالی توان نسبت به تغییر عرض آهنربا..... ۷۳
- شکل (۵-۲۳): تغییرات حجم آهنربا نسبت به تغییر عرض آهنربا..... ۷۳
- شکل (۵-۲۴): تغییرات تلفات هسته نسبت به تغییر عرض آهنربا..... ۷۴
- شکل (۵-۲۵): تحلیل هارمونیکی ولتاژ دو سر منبع جریان..... ۷۴
- شکل (۵-۲۶): ارتفاع آهنربا در ماشین نمونه..... ۷۵
- شکل (۵-۲۷): تغییرات نیروی دندانه‌ای نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا..... ۷۵
- شکل (۵-۲۸): تغییرات نیروی خروجی نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا..... ۷۶
- شکل (۵-۲۹): تغییرات ریپل نیرو نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا..... ۷۶
- شکل (۵-۳۰): تغییرات نیروی میانگین نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا..... ۷۷
- شکل (۵-۳۱): تغییرات بازده نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا..... ۷۷

- شکل (۳۲-۵): تغییرات ضریب توان نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا..... ۷۸
- شکل (۳۳-۵): تغییرات چگالی توان نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا..... ۷۸
- شکل (۳۴-۵): تغییرات حجم آهنربا نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا..... ۷۹
- شکل (۳۵-۵): تغییرات تلفات هسته نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا..... ۷۹
- شکل (۳۶-۵): تحلیل هارمونیکی ولتاژ دو سر منبع جریان..... ۸۰
- شکل (۳۷-۵): پخ کردن نوک دندانها..... ۸۰
- شکل (۳۸-۵): تغییرات نیروی دندانه‌ای نسبت به پخ کردن نوک دندانها..... ۸۱
- شکل (۳۹-۵): تغییرات نیروی خروجی نسبت به پخ کردن نوک دندانها..... ۸۱
- شکل (۴۰-۵): تغییرات کمیت‌های مختلف موتور نسبت به تغییر اندازه پخ کردن نوک دندانها..... ۸۲
- شکل (۴۱-۵): تحلیل هارمونیکی ولتاژ دو سر منبع جریان..... ۸۲
- شکل (۴۲-۵): نیروی دندانه‌ای در موتور اولیه و موتور طراحی شده..... ۸۳
- شکل (۴۳-۵): نیروی خروجی در موتور اولیه و موتور طراحی شده..... ۸۴
- شکل (۴۴-۵): تغییرات کمیت‌های مختلف موتور..... ۸۴
- شکل (۴۵-۵): تحلیل هارمونیکی ولتاژ دو سر منبع جریان..... ۸۵

فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۴): پارامترهای موتور تحت مطالعه..... ۴۱

جدول (۲-۴): ابعاد ماشین نمونه..... ۴۴

جدول (۳-۴): ابعاد و مشخصات مداری ماشین نمونه..... ۴۹

فهرست علائم

مساحت هر شیار	A_{slot}
شتاب	a_i
چگالی شار مغناطیسی	B
چگالی شار مغناطیسی آهنربا در فاصله هوایی	B_{PMg}
چگالی شار پسماند	B_r
عرض شیار	b_s
عرض دهانه شیار	b_{so}
قطر سیم	d_{Co}
نیروی دندان‌های	F_{cogg}
نیروی نامی	F_{xn}
نیروی بیشینه	F_{xpeak}
فرکانس	f
چگالی نیروی نامی	f_{xb}
فاصله هوایی	g
ارتفاع آهنربا	h_m
ارتفاع شیار	h_{su}
ارتفاع یوغ ثانویه	h_{ys}
جریان نامی	I_n
جریان بیشینه	I_{speak}
چگالی جریان	j_{co}

ضریب پرشدگی شیار	k_{fill}
ضریب سیم پیچی	k_w
اندوکتانس خودی محور d	L_d
اندوکتانس نشتی	L_l
اندوکتانس خودی محور q	L_q
اندوکتانس سنکرون	L_s
طول پشته اولیه	l_{stack}
تعداد قطب	N_p
تعداد شیارها	N_s
تلفات مسی نامی	P_{Con}
تلفات مسی بیشینه	P_{Cop}
توان نامی	P_n
توان خروجی	P_{out}
تعداد زوج قطبها	p
تلفات هسته اولیه	$R_{p\ core}$
مقاومت الکتریکی استاتور	R_s
تلفات هسته ثانویه	$R_{s\ core}$
سرعت بیشینه	U_{max}
سرعت نامی	U_{xn}
ولتاژ DC	V_{dc}
ولتاژ بیشینه	$V_{s\ max}$

ولتاژ نامی	V_{sn}
تعداد دور سیم پیچی	W_C
وزن مس	W_{copper}
وزن هسته	W_{core}
وزن اولیه	W_{mover}
بازده	η
ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی هوا	μ_0
گام قطب	τ
عرض آهنربا	τ_{PM}
گام شیار	τ_s
شار پیوندی	ψ

فصل اول

پیشگفتار

۱-۱- مقدمه

امروزه در بسیاری از کاربردهای صنعتی از قبیل سیستم حمل و نقل، صنعت چاپ و بسته‌بندی و زمینه‌های مختلف رباتیک نیاز به حرکت خطی می‌باشد که یک راه حل استفاده از ماشین‌های الکتریکی دوار است. در ماشین‌های الکتریکی دوار، حرکت دوار به‌واسطه تجهیزات و مبدل‌های مکانیکی به حرکت خطی تبدیل می‌شود که از جمله معایب آن‌ها می‌توان به افزایش تلفات، کاهش راندمان، پیچیدگی ساختاری و بروز مشکلات در حین تعمیر و نگهداری اشاره کرد [۱]. یک راه حل جایگزین برای تولید حرکت خطی استفاده از ماشین‌های الکتریکی خطی است که نسل جدیدی از ماشین‌های الکتریکی می‌باشند و در چند سال اخیر بسیار مورد توجه صاحبان صنایع قرار گرفته‌اند. در این ماشین‌ها حرکت خطی بدون واسطه مکانیکی و مستقیماً توسط میدان الکترومغناطیسی تولید می‌شود و در پی آن راندمان بالاتر، قابلیت اطمینان بیشتر و در نهایت دینامیک سریع‌تر محرکه‌های خطی حاصل می‌گردد.

۱-۱-۱- اصول عملکرد ماشین‌های خطی

اساساً برای هر موتور گردان، می‌توان یک مشابه خطی نیز تصور کرد، اصول اساسی حاکم بر هر موتور خطی، مشابه اصول اساسی حاکم بر همتای دوارش است. تفاوت این دو موتور در خروجی مکانیکی آن‌ها می‌باشد. در موتورهای دوار، خروجی به‌صورت سرعت دورانی و گشتاور و در موتورهای خطی خروجی به‌صورت سرعت خطی و نیرو بیان می‌شود. روابط و معادلات حاکم بر هر نوع موتور خطی را می‌توان با انجام تبدیلاتی از روابط و معادلات همتای دوارشان به دست آورد.

یک راه کار مناسب جهت درک فرآیند تولید نیرو در موتورهای خطی از طریق قانون همپلتون می‌باشد. نتیجه‌ای که می‌توان از این قانون گرفت این است که حرکت تولیدشده ناشی از نیرو باعث کمینه شدن میزان انرژی مغناطیسی ذخیره‌شده در سیستم می‌شود. در موتورهای خطی علاوه بر

نیروی رانش^۱ که موجب حرکت قسمت متحرک می‌شود، نیروی عمودی^۲ نیز وجود دارد که شامل دو بخش است. بخش اول یک نیروی دافعه ناشی از عکس‌العمل میدان مغناطیسی اولیه و ثانویه و بخش دوم یک نیروی جاذبه بین آهنرباهای دائم و هسته‌های فرو مغناطیسی می‌باشد.

با توجه به کاربرد ماشین‌های خطی، ساختارهای مختلفی برای آن‌ها پیشنهاد شده است که هر یک از این ساختارها مزایا و معایبی دارند. به‌طور کلی موتورهای خطی از لحاظ ساختاری به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند [۲]:

- مسطح یا لوله‌ای
- یک‌طرفه یا دو طرفه
- هسته شیاردار یا هسته بدون شیار
- هسته آهن یا هسته هوا
- شار عرضی یا شار طولی

ماشین خطی برخلاف ماشین دوار در مسیر حرکتش یک ابتدا و یک انتها دارد که این خصوصیت تولید اثرات انتهایی^۳ خواهد کرد. علاوه بر این در این ماشین‌ها، مدار مغناطیسی در طول مسیر حرکت نامتعادل می‌باشد، به‌طوری‌که سیم‌پیچی‌هایی که در قسمت‌های ابتدایی و انتهایی آرمیچر قرار گرفته‌اند، به دلیل اثرات انتهایی ماشین، نسبت به سایر سیم‌پیچی‌ها دارای مقاومت مغناطیسی بیشتری می‌باشند. این ویژگی سبب القای ولتاژ نامتعادل در سیم‌پیچی‌های آرمیچر و در نتیجه ایجاد جریان داخلی در سیم‌پیچی‌ها می‌گردد. از معایب جریان داخلی می‌توان به کاهش نیروی رانش و عملکرد ضعیف سیستم کنترلی اشاره کرد [۳]. از دیگر معایب ماشین‌های خطی می‌توان به فاصله هوایی بزرگ آن‌ها اشاره کرد که تأثیر نامطلوبی بر عملکرد ماشین می‌گذارد.

1 – Thrust force
2 – Norma force
3- End effect

۱-۲-۱- انواع ماشین‌های خطی

همانند موتورهای دوار موتورهای خطی نیز در انواع مختلفی ساخته می‌شوند که از جمله پرکاربردترین آن‌ها می‌توان به موتورهای خطی القایی^۱ (LIM)، موتورهای خطی پله‌ای^۲، موتورهای خطی DC و موتورهای خطی سنکرون^۳ (LSM) اشاره کرد که هر کدام همتای نوع دوارشان می‌باشند. در مرجع [۴] ساختارهای مختلف ماشین‌های خطی و کاربرد آن‌ها در صنعت و سیستم‌های حمل و نقل مطرح گردیده و روش‌های مختلف طراحی آن‌ها بررسی شده است. در میان موتورهای خطی، موتورهای خطی سنکرون آهنربای دائم^۴ (PMLSM) به دلیل چگالی نیرو بالا، پاسخ دینامیکی سریع، ساختار ساده و تلفات پایین و نویز کم کاربرد گسترده‌ای در صنعت دارند [۵].

از معایب اصلی ماشین‌های خطی سنکرون آهنربای دائم می‌توان به نیروی دندانه‌ای^۵ زیاد آن‌ها نسبت به همتای دوارشان اشاره کرد. علت اصلی ایجاد نیروی دندانه‌ای در ماشین‌های خطی سنکرون آهنربای دائم شیاردار، عکس‌العمل شیارهای هسته آرمیچر و آهنرباها و همچنین اثرات انتهایی ماشین، به علت طول محدود ماشین، می‌باشد. نیروی دندانه‌ای سبب افزایش ریپل نیروی رانش، ارتعاش در حرکت ماشین، اختلال در عملکرد دستگاه‌های کنترل سرعت و سیستم‌های کنترل موقعیت مانند ربات‌ها به خصوص در سرعت‌های پایین می‌شود [۶]، به همین دلیل تلاش‌های بسیاری در زمینه کاهش نیروی دندانه‌ای صورت گرفته است که در فصل دوم برخی از آن‌ها بررسی می‌شود.

۱-۲- اهداف تحقیق

در موتورهای خطی دوطرفه نیروی رانش به صورت یکنواخت‌تری بر قسمت متحرک وارد می‌شود و به‌طور کلی این موتورها عملکرد بهتری نسبت به موتورهای مشابه با ساختار یک‌طرفه دارند.

1 –Linear Induction Motor
2 –Linear Stepper Motor
3 –Linear Synchronous Motor
4 –Permanent Magnet Linear Synchronous Motor
5 –Detent Force

تحقیقات انجام شده، در زمینه کاهش نیروی دندانهای، بیشتر بر روی ماشینهای خطی سنکرون یک طرفه تمرکز دارد. هدف از این تحقیق طراحی بهینه موتور سنکرون مغناطیس دائم خطی شیاردار دوطرفه و تعمیم برخی از روشهای کاهش نیروی دندانهای در ماشینهای یک طرفه به ماشینهای دوطرفه می باشد.

از آنجایی که بزرگترین مؤلفه ریپل نیرو در ماشینهای خطی، مربوط به نیروی دندانهای می باشد به همین دلیل در این تحقیق ابتدا سعی می شود روشهای مختلف کاهش نیروی دندانهای بررسی شده و میزان حساسیت نیروی دندانهای و در نتیجه ریپل نیرو به تغییرات پارامترهای هر روش تعیین شود. در این زمینه یک موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم با مشخصات نامی نوعی در نظر گرفته می شود و با استفاده از مدل المان محدود ماشین، موارد مذکور بررسی خواهند شد. همچنین سعی می شود روش ترکیبی بهینه ای برای کاهش مؤثرتر ریپل نیروی ارائه شود.

۱-۳- مروری بر فصل های پایان نامه

در فصل دوم برخی از کارهای انجام شده در زمینه کاهش نیروی دندانهای در ماشینهای سنکرون خطی مغناطیس دائم بررسی می شود. در فصل سوم ابتدا ساختار ماشینهای سنکرون خطی معرفی می گردد، سپس ویژگی های هر یک بررسی می شود. در نهایت روش های پیشنهادی برای کاهش ریپل نیرو در ماشین مورد مطالعه بیان خواهد شد. در فصل چهارم فرآیند طراحی ماشین نمونه بررسی و مشخصات مداری آن بیان می گردد و عملکرد موتور نمونه به کمک 2-D FEM در شرایط مدار باز، شرایط نامی و بیشینه تحلیل می شود. در فصل پنجم روش های کاهش نیروی دندانهای مورد نظر بر روی ماشین نام برده، پیاده سازی شده و روش ترکیبی بهینه ای برای کاهش مؤثرتر ریپل نیروی ارائه می گردد. در نهایت در فصل ششم جمع بندی و نتیجه گیری ارائه خواهد شد.

فصل دوم

سابقه پژوهشی موضوع پایان نامه

۲-۱- مقدمه

روش‌های کاهش نیروی دندانه‌ای در ماشین‌های خطی مشابه روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای در ماشین‌های دوار می‌باشد. از آنجایی که بزرگ‌ترین مؤلفه ریپل نیرو در ماشین‌های خطی، مربوط به نیروی دندانه‌ای می‌باشد در این فصل سعی می‌شود برخی از کارهای انجام‌شده در زمینه کاهش نیروی دندانه‌ای در ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم بررسی شود.

۲-۲- کاهش نیروی دندانه‌ای به کمک مورب کردن^۱ آهنرباها و دندانه‌ها

یکی از روش‌های کاهش نیروی دندانه‌ای، مورب کردن آهنرباها یا دندانه‌ها می‌باشد که در شکل (۱-۲) چگونگی مورب کردن آهنرباها در یک ماشین سنکرون نشان داده شده است.

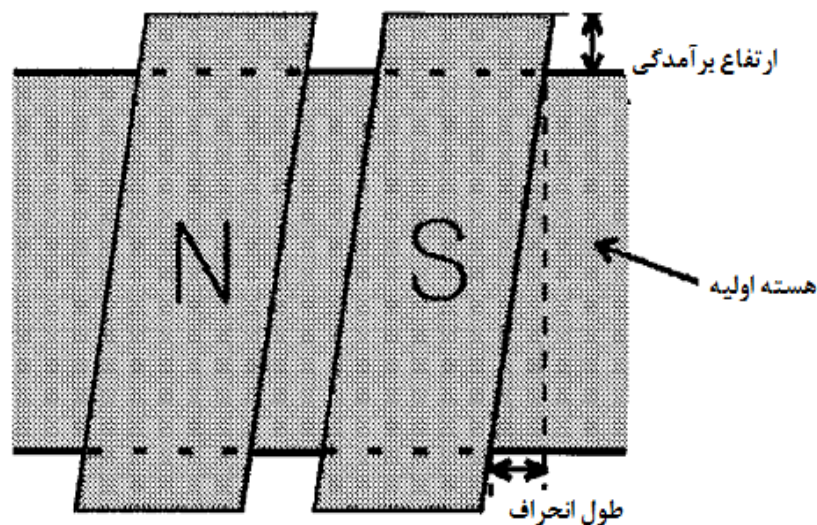
در مرجع [۷] Hur، Jung و Hyun زاویه بهینه مورب کردن آهنرباها را نسبت به پارامترهای مختلف طراحی در یک ماشین سنکرون یک‌طرفه به دست آورده‌اند. به این منظور منحنی نیروی رانش، نیروی عمودی و دندانه‌ای را نسبت به تغییرات طول فاصله هوایی، ضخامت و عرض آهنرباها، طول برآمدگی^۲ و انحراف آهنرباها تحلیل کرده‌اند. علاوه بر این در این مرجع نشان داده‌اند که نتایج کاهش نیروی دندانه‌ای در اثر مورب کردن آهنرباها در ماشین‌های خطی نسبت به ماشین‌های دوار تا حدودی متفاوت می‌باشد، چون در ماشین‌های خطی سنکرون طول فاصله هوایی نسبت به ماشین‌های دوار بزرگ‌تر می‌باشد، به همین دلیل شار نشتی آن‌ها در مقایسه با نوع دوارشان بسیار بیشتر است.

در مرجع [۸] Eastham و Akmese ابتدا منشأ اصلی نیروی دندانه‌ای، دندانه‌ها و طول محدود موتور را، شرح داده‌اند. سپس با استفاده از روش اجزاء محدود^۳ (FEM) اثر مورب کردن آهنرباها را بر نیروی دندانه‌ای تحلیل کرده‌اند. در مرجع [۹] Li و همکارانش بیان کرده‌اند که مورب کردن آهنرباها معایبی دارد و از جمله آن‌ها به پیچیدگی ساختاری موتور، افزایش اندوکتانس نشتی، افزایش تلفات

1 -Skew

2 -Overhang

3 -Finite Element Method



شکل (۱-۲): مورب کردن آهنرباها در ماشین سنکرون [۷]

سرگردان و کاهش نیروی خروجی اشاره کرده‌اند. سپس سعی کرده‌اند تا بدون مورب کردن آهنرباها و به کمک تغییر سایر پارامترهای ماشین از قبیل طول آهنرباها و فاصله آهنرباها در دو نوع ماشین، ماشین با آهنربای سطحی و آهنربای داخلی، گشتاور دندانه‌ای را کاهش دهند.

۲-۳- استفاده از قطب‌های کمکی^۱ به منظور کاهش نیروی دندانه‌ای و اثرات

انتهایی

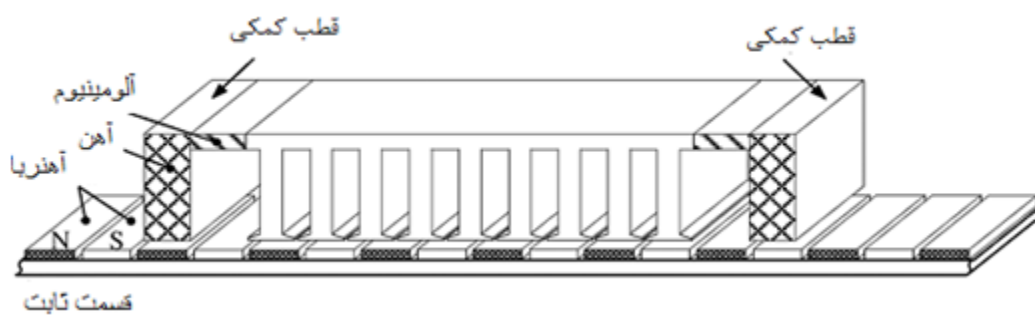
همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، یکی از دلایل ایجاد نیروی دندانه‌ای اثرات انتهایی ماشین خطی است که جزء مشخصات ذاتی ماشین‌های خطی و مربوط به طول محدود ماشین می‌باشد. دلیل اصلی بزرگ بودن نیروی دندانه‌ای در ماشین‌های خطی نسبت به ماشین‌های دوار نیز همین اثرات انتهایی ماشین می‌باشد.

در مرجع [۵] Cho و Chung, Lee, Zhu با استفاده از یک روش جدید سعی در کاهش اثرات انتهایی دارند. ماشین مورد آزمایش در این مقاله، ماشین سنکرون مغناطیس دائم یک‌طرفه با شیارهای نیمه بسته، آرمیچر متحرک، سیم‌پیچی متمرکز و قطب‌های سطحی می‌باشد که ساختار آن

1 – Auxiliary Pole

در شکل (۲-۲) آورده شده است. نویسندگان برای کاهش نیروی دندانهای ساختار قسمت متحرک ماشین را اصلاح کرده و با قرار دادن قطب‌های کمکی در دو طرف هسته، با استفاده از FEM، منحنی نیروی دندانهای را نسبت به ارتفاع، طول و موقعیت قطب کمکی تحلیل کرده‌اند و مشاهده کردند که دامنه نیروی دندانهای با تغییر ارتفاع و طول قطب کمکی مقدار ناچیزی تغییر می‌کند ولی نسبت به تغییر موقعیت قطب کمکی بسیار حساس است.

در انتها با استفاده از محاسبات عددی و نتایج تجربی نیز تأثیرگذاری این روش بر کاهش اثرات انتهایی را بررسی کرده‌اند. از مزایای این روش می‌توان به ساخت آسان آن و عدم تأثیرگذاری قطب کمکی بر نیروی الکترومغناطیسی و توزیع شار مغناطیسی ماشین اشاره کرد.



شکل (۲-۲): ساختار ماشین سنکرون با قطب کمکی [۵]

در مقاله [۶] هدف اصلی Hwang و همکارانش طراحی بهینه ماشین سنکرون به منظور کاهش نیروی دندانهای و افزایش نیروی رانش است و چون تحلیل سه‌بعدی ماشین، با استفاده از FEM، حجم محاسباتی زیادی دارد فرآیند بهینه‌سازی در دو مرحله انجام شده است. ابتدا طراحی بهینه شیارهای هسته به کمک روش تاگوچی^۱ و 2-D FEM صورت گرفته و سپس اثر شیارها و هر دو انتهای هسته، که به قطب کمکی نیز مجهز شده‌اند، با استفاده از 3-D FEM، در نظر گرفته شده است. از نظر تئوری استفاده از شیارهای نیمه بسته نیروی دندانهای را کاهش می‌دهد اما باعث پیچیدگی ساختاری و افزایش هزینه ساخت می‌شود. به همین منظور در این مقاله از شیارهای باز استفاده شده و

1-Taguchi

با انتخاب مناسب تعداد شیارها و قطبها سعی شده تا نیروی دندانهای کاهش یابد. ماشین مورد مطالعه، ماشین سنکرون مغناطیس دائم یک طرفه با سیم پیچی دولایه و آرمیچر متحرک است که آهنرباها، به منظور کاهش نیروی دندانهای، مورب شده اند.

در مرحله اول ابتدا به کمک روش تاگوچی و با انتخاب سه سطح برای عرض دندانها، عرض آهنرباها، ارتفاع آهنرباها و اندازه پخ کردن دندانها اثر هر یک را بر مقدار متوسط نیروی رانش و نیروی دندانهای به دست آورده اند و سپس به کمک 2-D FEM عملکرد ماشین اولیه و ماشین طراحی شده را مقایسه کرده اند.

در مرحله دوم با هدف کاهش اثرات انتهایی، که یکی از دلایل ایجاد نیروی دندانهای است، دو قطب کمکی در دو انتهای قسمت متحرک نصب شده است. مشابه مرحله اول، نیروی دندانهای و نیروی رانش به کمک 3-D FEM و روش تاگوچی و انتخاب سه سطح برای زاویه مورب بودن آهنرباها، عرض قطب کمکی، موقعیت نصب قطب کمکی، اختلاف ارتفاع قطب کمکی و دندانها به دست آمده است. در نهایت عملکرد ماشین اولیه، ماشین طراحی شده در گام اول و ماشین طراحی شده در گام دوم را با نتایج تجربی به دست آمده مقایسه کرده اند.

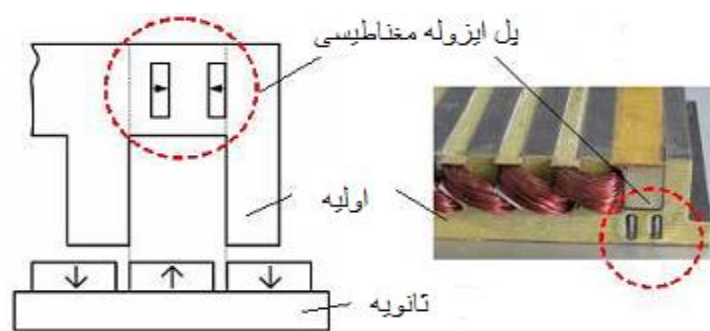
در مرجع [۱۰] Koo, Zhu و Cho ابتدا به بررسی عوامل ایجادکننده رپل نیرو در ماشینهای سنکرون خطی از جمله توزیع غیر سینوسی شار پیوندی استاتور، نیروی رلوکتانسی، نیروی دندانهای و هارمونیکهای زمانی می پردازند. سپس مؤلفه های مختلف نیروی دندانهای و روشهای کاهش آنها را بررسی می کنند. در مرجع [۱۰]، نویسندگان از دو روش، طراحی بهینه ساختار ماشین و استفاده از جبران ساز جریان^۱، برای کاهش نیروی دندانهای استفاده کرده اند. به همین منظور در این مرجع برای کاهش اثر شیارها بر نیروی دندانهای، از شیارهای نیمه بسته استفاده شده و با نصب قطب کمکی در دو انتهای هسته اثرات انتهایی را به طور چشمگیری کاهش داده اند. در مرحله بعد، به کمک روابط و

1 – Current Compensator

معادلات حاکم بر ماشین‌های سنکرون و FEM تغییرات نیروی رانش را نسبت به مقادیر مختلف جریان ورودی تخمین زده‌اند. سپس نیروی دندانه‌ای به‌دست‌آمده، به کمک تزریق جریان لحظه‌ای جبران سازی شده است.

نتایج تجربی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که اگر تنها از روش جبران ساز جریان برای کاهش نیروی دندانه‌ای استفاده شود، جریان فاز معوج می‌شود و از شکل سینوسی فاصله می‌گیرد، درحالی‌که اگر از جبران ساز جریان و قطب‌های کمکی به‌طور هم‌زمان استفاده شود، دامنه مؤلفه‌های هارمونیکی جریان کاهش یافته و شکل موج جریان بسیار به حالت سینوسی نزدیک می‌شود.

در مقاله [۱۱] Zhang و همکارانش برای کاهش نیروی دندانه‌ای قطب‌های کمکی با ساختار یک‌تکه را معرفی کرده‌اند که ساختار آن در شکل (۲-۳) آمده است. در مراجع [۵]، [۶] و [۱۰] قطب کمکی و هسته اولیه دو بخش کاملاً مستقل هستند و قطب کمکی به کمک یک ماده غیر مغناطیسی در دو طرف هسته قرار گرفته است. این ساختار نسبت به ساختار یک‌تکه، دارای استحکام کمتر و پیچیدگی ساختاری بیشتری می‌باشد. برای حل این مشکلات در مرجع [۱۱]، اولیه جدید شامل هسته آرمیچر و قطب‌های کمکی است که توسط پل عایق مغناطیسی، که از دو آهنربای دائم تشکیل شده، از یکدیگر ایزوله شده‌اند.



شکل (۲-۳): ساختار پل ایزوله مغناطیسی [۱۱]

در مرجع [۱۱]، به کمک FEM منحنی نیروی دندانه‌ای نسبت به موقعیت‌های مختلف قطب کمکی و جابجایی قسمت متحرک به‌دست‌آمده است. سپس اثر تغییر ابعاد آهنرباهای پل مغناطیسی

از قبیل ضخامت آهنرباها، ارتفاع آهنرباها، شکل آهنرباها و همچنین موقعیت و فاصله آهنرباها بر منحنی نیروی دندانهای بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که منحنی نیروی دندانهای با تغییر ابعاد، موقعیت و فاصله آهنرباها تغییر چشمگیری نمی کند.

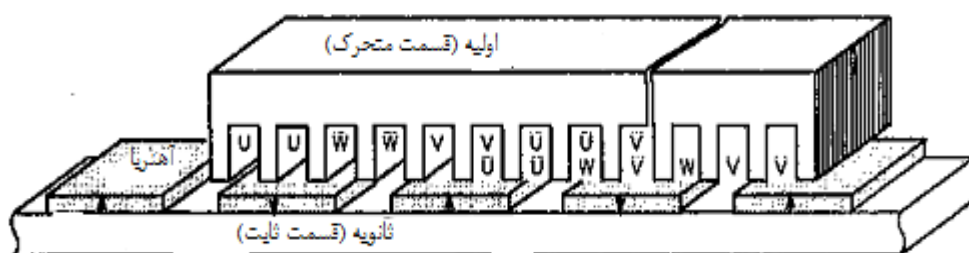
۲-۴- استفاده ترکیبی از روش های کاهش نیروی دندانهای

در مرجع [۱۲] Cruise, Jeans و Landy ابتدا به بررسی مؤلفه های مختلف نیروی رانش، نیروی سنکرون، نیروی دندانهای و نیروی رلوکتانسی، در ماشین های سنکرون خطی می پردازد و یک روش تمایز این نیروها را دوره تناوب آنها می دانند. سپس به کمک FEM روش های مختلف کاهش نیروی دندانهای که شامل تغییر طول آهنربا، مورب کردن آهنرباها، تغییر طول فاصله هوایی و استفاده از شیارهای نیمه بسته است را در دو نوع ماشین سنکرون، ماشین سنکرون با آهنربای سطحی و آهنربای داخلی، بررسی می کنند. نتایج به دست آمده نشان می دهد که مورب کردن آهنرباها مؤثرترین روش در کاهش نیروی دندانهای در هر دو نوع ماشین سنکرون می باشد. همچنین اگر ماشین دارای آهنربای سطحی باشد با تغییر طول آهنربا می توان نیروی دندانهای را تا حد زیادی کاهش داد، درحالی که این روش در ماشین های سنکرون با آهنربای داخلی قابل پیاده سازی نیست.

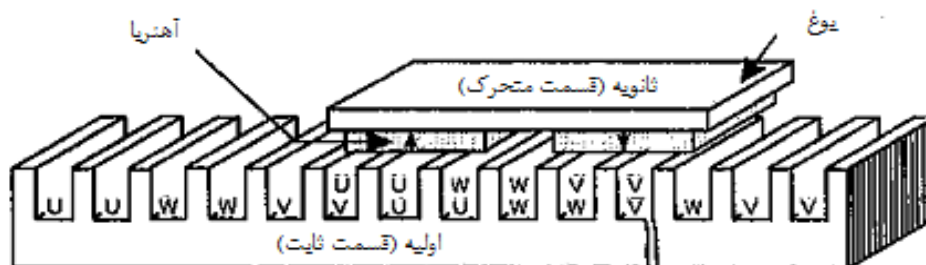
در مقاله [۱۳] Lim و همکارانش چندین روش کاهش نیروی دندانهای، که شامل تغییر عرض آهنربا، آرایش نامتقارن آهنرباها و استفاده از شیارهای نیمه بسته است، را بر روی یک PMLSM با ثانویه کوتاه بررسی کرده اند. آنها نشان داده اند با انتخاب مناسب عرض آهنربا می توان مؤلفه اصلی هارمونیک نیروی دندانهای را حذف کرد. علاوه بر این، در این مرجع اثر تغییر عرض دهانه شیار بر نیروی الکترومغناطیسی و نیروی دندانهای بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که با کاهش عرض دهانه شیار، نیروی الکترومغناطیسی و نیروی دندانهای کاهش می یابد؛ اما کاهش بیش از حد دهانه شیار، باعث افزایش شار نشتی می شود.

در مرجع [۱۴] Jung و همکارانش ابتدا به مقایسه نیروی رانش، نیروی عمودی و دندانهای در دو

نوع ماشین PMLSM، اولیه کوتاه و ثانویه کوتاه، می‌پردازند. در شکل (۲-۴) ساختار این دو ماشین نشان داده شده است. در این مرجع نویسندگان منحنی نیروی رانش در PMLSM با ثانویه کوتاه را نسبت به موقعیت قسمت متحرک به دست آورده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که دوره تناوب نیروی رانش در این ماشین برابر با گام شیار است و عامل اصلی ریبیل نیروی رانش، شیارهای هسته می‌باشد. در حالی که در ماشین PMLSM با اولیه کوتاه، دوره تناوب نیروی رانش برابر با گام قطب و علت اصلی ریبیل آن اثرات انتهایی می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل (۲-۴): ساختار PMLSM (الف) اولیه کوتاه (ب) ثانویه کوتاه [۱۴]

در این مقاله محققان همچنین با ثابت فرض کردن قسمت متحرک تغییرات نیروی عمودی را نسبت به تغییر زاویه جریان به دست آورده‌اند. آن‌ها مشاهده کردند، در PMLSM با ثانویه کوتاه مقدار متوسط نیروی عمودی تقریباً هشت برابر مقدار بیشینه نیروی رانش می‌باشد. محققان همچنین با ثابت در نظر گرفتن زاویه جریان و جابجایی قسمت متحرک دریافتند که در PMLSM با ثانویه کوتاه، تغییرات نیروی عمودی نسبت به جابجایی قسمت متحرک تقریباً ثابت است در حالی که در

PMLSM با اولیه کوتاه نیروی عمودی به علت اثرات انتهایی تغییر می‌کند.

از آنجایی که FEM معمولی زمان اجرا و حجم محاسباتی زیاد دارد، نویسندگان در این مرجع به معرفی روشی جدید جهت تحلیل منحنی‌ها می‌پردازند و منحنی نیروی دندان‌های را نسبت به تغییر عرض آهنربا در دو نوع PMLSM، اولیه کوتاه و ثانویه کوتاه، مقایسه می‌کنند. از آنجایی که در PMLSM با اولیه کوتاه، نیروی دندان‌های با تغییر عرض آهنربا کاهش چشمگیری ندارد، Jung و همکارانش سعی کردند تا با تغییر شکل دندان‌های انتهایی هسته اولیه نیروی دندان‌های را کاهش دهند.

در مرجع [۱۵] Sato و Inous نیروی دندان‌های را ناشی از شیارها و طول محدود اولیه می‌دانند و معتقدند که با مورب کردن دندان‌ها یا آهنرباها می‌توان اثر شیارها را تا حد زیادی از بین برد، ولی مورب کردن تأثیر بسزایی بر اثرات انتهایی ندارد. به همین منظور به توصیف یک روش جدید برای کاهش نیروی دندان‌های در اثر طول محدود اولیه می‌پردازند. در این مقاله ماشین مورد مطالعه PMLSM یک‌طرفه با اولیه کوتاه است.

در مرجع [۱۵] نویسندگان بیان می‌کنند که نیروی دندان‌های برآیند، مجموع نیروهای مغناطیسی وارد شده به دو طرف هسته اولیه است و با نوشتن سری فوریه این نیروها، اختلاف زاویه بین آن‌ها را به دست می‌آوردند. آن‌ها نشان می‌دهند که این زاویه تابعی از طول اولیه می‌باشد و با انتخاب طول مناسب اولیه، می‌توان نیروی دندان‌های را مینیمم کرد. در نهایت برای اعتبار سنجی این روش، نتایج به دست آمده به کمک FEM را با نتایج تجربی مقایسه می‌کنند.

در مقاله [۱۶] Commins و همکارانش به کمک FEM روش‌های کاهش نیروی دندان‌های در یک ماشین خطی لوله‌ای بدون شیار را مورد بررسی قرار داده‌اند. در آزمایش اول طول استاتور را نامحدود فرض کرده و با تغییر طول آرمیچر سعی کرده‌اند تا نیروی دندان‌های را کاهش دهند. برای بررسی دقیق‌تر نیروی دندان‌های، سری فوریه نیروی دندان‌های را محاسبه کرده و محتوای هارمونیک آن را به

دست آورده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد هنگامی که طول استاتور نامحدود است، با تغییر طول آرمیچر، فقط می‌توان هارمونیک اصلی نیروی دندانه‌ای را به‌طور کامل حذف کرد.

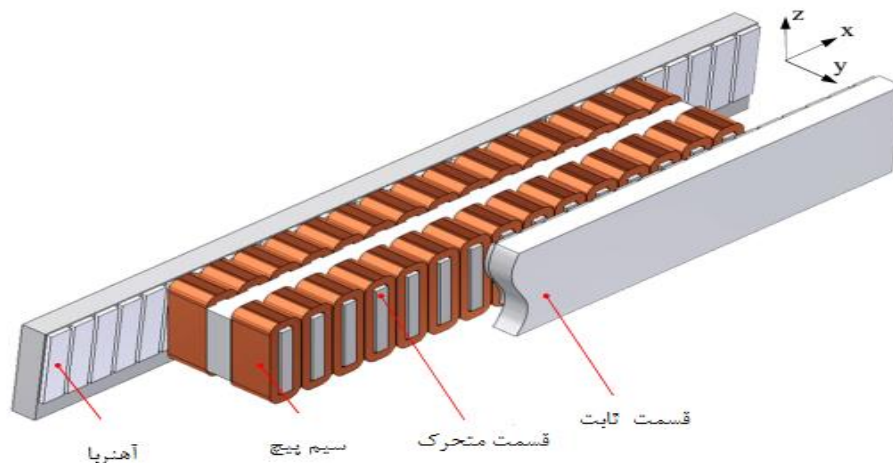
در آزمایش دوم، به‌منظور نشان دادن اهمیت طول استاتور، نیروی دندانه‌ای ماشین به ازای طول‌های مختلف استاتور به‌دست‌آمده است و درنهایت اختلاف طول مناسب بین استاتور و آرمیچر، برای ثبات در شکل موج نیروی دندانه‌ای، پیشنهاد شده است. مقایسه نتایج آزمایش اول و دوم نشان می‌دهد، زمانی که طول استاتور محدود در نظر گرفته می‌شود هارمونیک‌های جدیدی در شکل موج نیروی دندانه‌ای ظاهر می‌شود و به دلیل اثرات انتهایی آرمیچر و استاتور نیروی دندانه‌ای معوج می‌شود.

در مرجع [۱۷]، Kou, Tseng و Su سعی کرده‌اند تا با استفاده از روش تاگوچی و تئوری سیستم خاکستری، با تغییر پارامترهای مختلف ماشین از قبیل عرض آهنرباها، ضخامت آهنرباها و عرض دندانه‌ها نیروی دندانه‌ای را در یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار عرضی کاهش و نیروی رانش را افزایش دهند. نویسندگان با محاسبه نسبت سیگنال به نویز و تحلیل واریانس، پارامترهای اساسی طراحی ماشین را به دست آورده و درنهایت به کمک نرم‌افزار اجزاء محدود نتایج بهینه‌سازی را تأیید کرده‌اند.

۲-۵- روش‌های کاهش نیروی دندانه‌ای در PMLSM دوطرفه

در مقاله [۱] Kim و Chung ابتدا به بررسی نیروی عمودی در PMLSM یک‌طرفه می‌پردازند و بیان می‌کنند نیروی عمودی در این ماشین‌ها پنج تا ده برابر مقدار نامی نیروی رانش است که در نتیجه برای حفظ فاصله هوایی، نیاز به مجموعه‌ای از بلبرینگ‌های خطی می‌باشد. به همین دلیل در بسیاری از کاربردهای صنعتی از PMLSM دوطرفه با هسته آهنی استفاده می‌شود که نیروی عمودی بین قسمت متحرک و دو قسمت ثابت آن به‌طور متقابل خنثی می‌گردد و علاوه بر این به دلیل حذف بلبرینگ‌ها، ساختار آن‌ها نسبت به PMLSM یک‌طرفه ساده‌تر و حجم آن‌ها کمتر می‌باشد اما نیروی

دندانه‌ای در PMLSM دوطرفه نیز وجود دارد و جزء جدانشدنی آن می‌باشد. در شکل (۵-۲) ساختار PMLSM دوطرفه با هسته آهنی نشان داده شده است.



شکل (۵-۲): ساختار ماشین سنکرون مغناطیس دائم دوطرفه [۱]

در این مرجع، [۱]، نویسندگان ابتدا به مقایسه دو روش اساسی کاهش اثرات انتهایی در PMLSM، طراحی دندانه‌های کمکی و تغییر آرایش دندانه‌های هسته، می‌پردازند، سپس به‌طور خاص اثر تغییر آرایش دندانه‌های هسته بر کاهش نیروی دندانه‌ای را بررسی می‌کنند. به این منظور یک PMLSM دوطرفه با هسته آهنی، توسط 2D-FEM شبیه‌سازی شده و نتایج به‌دست‌آمده با نتایج تجربی مقایسه می‌شود.

محققان در این مرجع به دلیل تقارن مغناطیسی و باهدف صرفه‌جویی در وقت و کاهش حجم محاسبات، نیمی از ماشین را شبیه‌سازی کرده و اثر تغییر عرض آهنرباها، تغییر ضخامت آهنرباها و تغییر عرض دندانه‌ها را بر نیروی دندانه‌ای بررسی کرده‌اند. سپس با تغییر آرایش دندانه‌های انتهایی، منحنی نیروی دندانه‌ای را با مدل اولیه ماشین مقایسه کرده و میزان تأثیرگذاری این روش بر مقدار بیشینه نیروی دندانه‌ای را به دست آورده‌اند.

در مرجع [۱۸]، Kim, Lee و دیگر محققان ابتدا به بررسی و مقایسه PMLSM با آرمیچر کوتاه و آرمیچر بلند می‌پردازند و بیان می‌کنند که PMLSM با آرمیچر بلند به دلایلی از جمله وزن کم قسمت

متحرک، عدم نیاز به نصب وسایل الکتریکی بر روی قسمت متحرک و در نتیجه کاهش نویز، برای استفاده در آسانسورها مناسب تر می باشد. سپس در یک PMLSM دوطرفه به کمک FEM، اثر دو جهت مختلف آهنربا، آهنربا با جهت یکسان و آهنربا با جهت معکوس، را بر نیروی رانش بررسی می کنند. نتایج نشان می دهد که ماشین با آهنرباهای یک جهت، نیروی رانش بزرگ تری دارند و بنابراین این نوع ماشین برای سیستم آسانسور مناسب تر می باشد.

در این مقاله همچنین نویسندگان سعی کرده اند تا با تغییر کمیت هایی از قبیل طول آهنرباها، زاویه مورب کردن آهنرباها، طول دهانه شیارها و طول فاصله هوایی نیروی دندانهای را کاهش دهند. آن ها با افزایش طول فاصله هوایی مشاهده کردند که دامنه نیروی رانش و نیروی دندانهای کاهش می یابد و شکستگی های شکل موج نیروی دندانهای کمتر می شود. علاوه بر این Lee و دوستانش برای کاهش دامنه نیروی عمودی، از دو ماشین PMLSM سری، با نصف طول ماشین اولیه، استفاده کرده اند که کاملاً مشابه یکدیگر می باشند و تنها جهت جابجایی آهنرباها در قسمت متحرک آن ها با یکدیگر متفاوت می باشد که این تفاوت جزئی سبب می شود تا نیروی عمودی برآیند این دو ماشین صفر شود.

در مقاله [۱۹] Kim و همکارانش با استفاده از روش تبدیل انرژی به بررسی نیروی دندانهای در PMLSM با آرمیچر ناپیوسته، که عمده ترین کاربرد آن در سیستم حمل و نقل می باشد، می پردازند. در ماشین های سنکرون با آرمیچر ناپیوسته باهدف کاهش هزینه فقط در نواحی که به کاهش و یا افزایش سرعت قسمت متحرک نیاز است، آرمیچر درگیر می باشد. نویسندگان در این مرجع بررسی کرده اند که یک روش کاهش نیروی دندانهای، که توسط لبه های ورودی و خروجی آرمیچر به وجود می آید، تغییر شکل لبه ها است. به همین منظور در این مرجع پنج ساختار مختلف آرمیچر پیشنهاد و عملکرد هریک توسط نرم افزارهای سه بعدی اجزاء محدود تحلیل شده است. از آنجایی که بررسی مزیت های نسبی هریک از مدل های پیشنهادی کار دشواری می باشد، نویسندگان به کمک روش تبدیل انرژی به

ارزیابی نیروی دندانهای در هریک از ساختارها می‌پردازند.

در مرجع [۲۰]، Kim و Park، در ادامه مقاله [۱۹]، به بررسی دیگر مزایای PMLSM با آرمیچر ناپیوسته می‌پردازند و این ساختار را به PMLSM دوطرفه تعمیم داده و نیروی رانش و نیروی دندانهای را نسبت به تغییر موقعیت آرمیچر و تغییر طول انحراف آرمیچر تحلیل و با PMLSM دوطرفه با آرمیچر پیوسته مقایسه می‌کنند.

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که نیروی دندانهای در PMLSM با آرمیچر پیوسته، مشابه نیروی رانش، دارای شکل موج منظم و باثباتی می‌باشد درحالی‌که در PMLSM با آرمیچر ناپیوسته شکل موج نیروی دندانهای و رانش، به دلیل اثرات انتهایی آرمیچر و قسمت متحرک، به‌طور چشمگیری نوسان می‌کند. در مرجع [۲۰]، محققان انحراف آرمیچرها نسبت به یکدیگر را یک روش مؤثر در کاهش نیروی دندانهای می‌دانند و با تغییر طول انحراف آرمیچر و محاسبه نیروی دندانهای، مقدار بهینه انحراف آرمیچر را به دست می‌آورند. سپس اثر تغییر طول انحراف آرمیچر را بر نیروی رانش و ولتاژ ماشین محاسبه می‌کنند.

۲-۶- جمع‌بندی

در این فصل روش‌های مختلف کاهش نیروی دندانهای در ماشین‌های سنکرون خطی مغناطیس دائم بررسی شد. این روش‌ها شامل مورب کردن آهنرباها و دندانها، استفاده از قطب‌های کمکی، استفاده از شیارهای نیمه بسته، تغییر شکل دندانهای انتهایی هسته، تغییر ابعاد آهنرباها، تغییر فاصله هوایی و استفاده از روش‌های ترکیبی می‌باشد. همان‌طور که مشاهده شد تحقیقات انجام‌شده، درزمینه کاهش نیروی دندانهای، بیشتر بر روی ماشین‌های خطی سنکرون یک‌طرفه تمرکز دارد.

فصل سوم

ساختار ماشین‌های سنکرون

خطی مغناطیس دائم

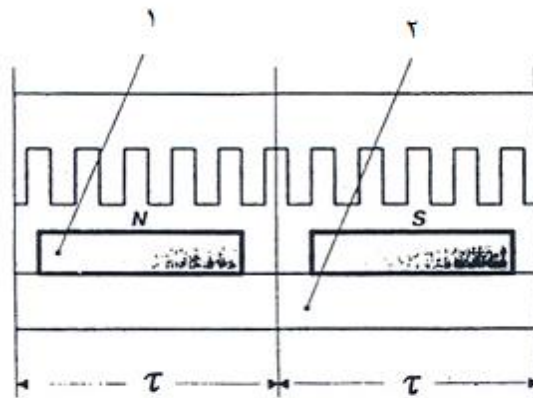
۳-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا ساختار ماشین‌های سنکرون خطی بررسی می‌گردد و ویژگی‌های هر یک بررسی می‌شود. سپس روش‌های پیشنهادی برای کاهش ریپل نیرو در ماشین مورد مطالعه ارائه می‌گردد.

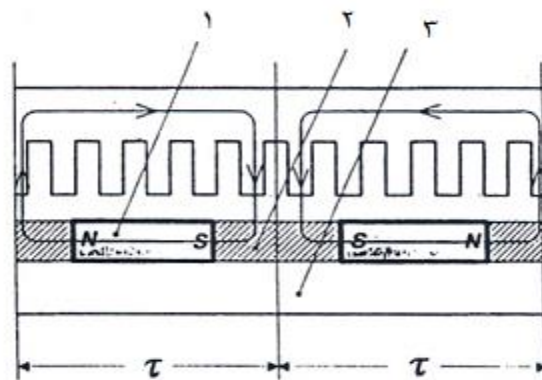
۳-۲- ساختارهای مختلف ماشین سنکرون خطی مغناطیس دائم

همان‌طور که در فصل اول بیان شد اساساً برای هر موتور گردان، می‌توان یک مشابه خطی نیز تصور کرد، اصول اساسی حاکم بر هر موتور خطی، مشابه اصول اساسی حاکم بر همتای دوارش است. ماشین‌های خطی مشابه ماشین‌های دوار از یک قسمت ساکن و یک قسمت متحرک تشکیل شده‌اند. هر یک از دو بخش ساکن (Stator) و یا متحرک (Mover) می‌توانند به‌منظور تولید میدان مغناطیسی، آرمیچر باشند. بخشی از ماشین که دارای سیم‌پیچی آرمیچر است اولیه و بخش باقیمانده ماشین ثانویه نامیده می‌شود.

همان‌طور که بیان شد ماشین مورد مطالعه در این تحقیق، ماشین سنکرون خطی مغناطیس دائم است. به همین منظور در این فصل به‌طور خاص بر ساختار ماشین‌های سنکرون خطی تمرکز می‌شود. در شکل (۳-۱) یک موتور سنکرون خطی آهنربای دائم با آرایش آهنرباهای سطحی نشان داده شده است. در آرایش سطحی آهنرباها به‌صورت عمودی مغناطیس می‌شوند و جنس یوغ از مواد فرو مغناطیس می‌باشد اما در آرایش درونی، شکل (۳-۲)، آهنرباها در جهت میدان مغناطیسی سیار مغناطیس می‌شوند و جنس یوغ عمدتاً از آلومینیوم، که ماده غیر فرو مغناطیس است، ساخته می‌شود. در این حالت اگر یوغ از ماده فرو مغناطیس انتخاب شود شار نشتی از شار پیوندی موتور بیشتر می‌شود. این مشکل در موتورهای آهنربای درونی گردان نیز رخ می‌دهد که لازم است شفت از مواد غیر فرو مغناطیس انتخاب شود [۲۱].



شکل (۱-۳): موتور سنکرون آهنربای دائم با آهنربای سطحی ۱- آهنربا ۲- یوغ [۲]

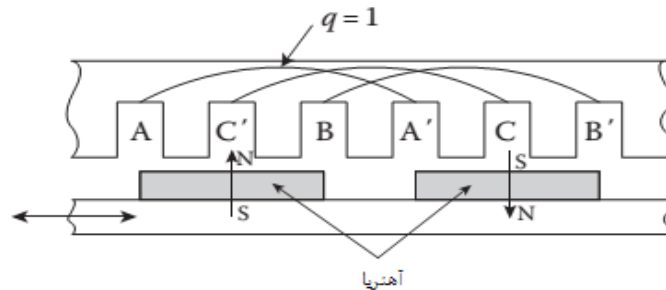


شکل (۲-۳): موتور سنکرون آهنربای دائم با آهنربای درونی ۱- آهنربا ۲- فولاد ۳- یوغ [۲]

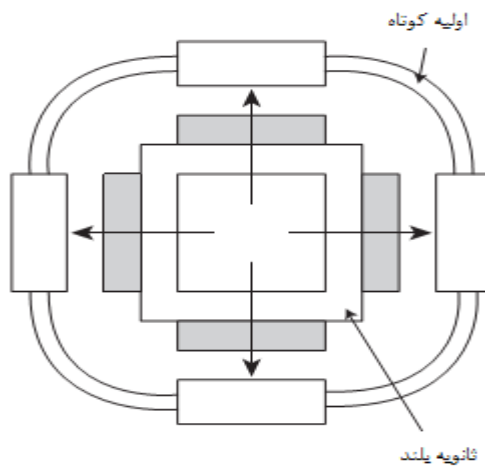
در موتورهای سنکرون گردان از یک سیم‌پیچی میرا کننده قفسی شکل استفاده می‌شود. هنگامی که سرعت موتور با سرعت سنکرون برابر نباشد، در سیم‌پیچی‌ها جریان الکتریکی القا می‌شود. واکنش میدان مغناطیسی آرمیچر و جریان سیم‌پیچی‌های میرا کننده، باعث می‌شود تا سرعت موتور با سرعت سنکرون برابر شود. در موتورهای سنکرون خطی مشابه موتورهای گردان از سیم‌پیچی‌های میرا کننده با روکش آلومینیوم و یا از نوع کفشک‌های قطب از جنس فولاد توپر استفاده می‌شود.

یک تقسیم‌بندی ماشین‌های خطی بر اساس طول اولیه یا ثانویه می‌باشد. ماشین‌های خطی با اولیه بلند و ثانویه کوتاه بیشتر در مسافت‌های طولانی به‌خصوص در سیستم حمل‌ونقل کاربرد دارند درحالی‌که ماشین‌های خطی با اولیه کوتاه و ثانویه بلند در مسافت‌هایی حدود چند متر به کار می‌روند

[۲۲]. در شکل (۳-۳) و (۴-۳) این دو نوع از ماشین‌های سنکرون خطی مغناطیس دائم نشان داده شده است.



شکل (۳-۳): ماشین خطی با اولیه بلند و ثانویه کوتاه [۲۲]



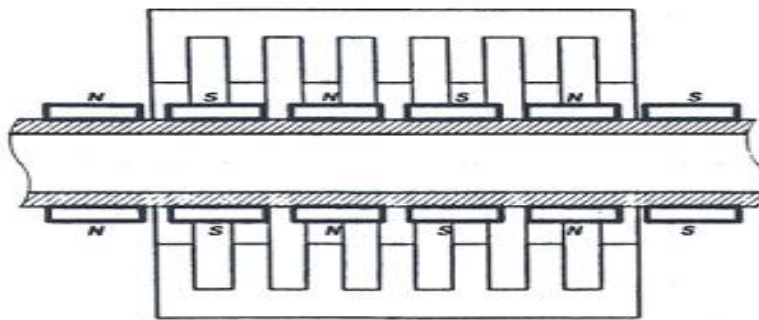
شکل (۴-۳): ماشین خطی با اولیه کوتاه و ثانویه بلند [۲۲]

همان‌طور که در فصل یک بیان شد، با توجه به نوع کاربرد ماشین‌های خطی ساختارهای مختلفی برای آن‌ها پیشنهاد شده است که هر یک از این ساختارها مزایا و معایبی دارند. ماشین‌های خطی از لحاظ ساختاری به پنج گروه زیر تقسیم می‌شوند که در ادامه هر یک از آن‌ها معرفی می‌گردد [۲]:

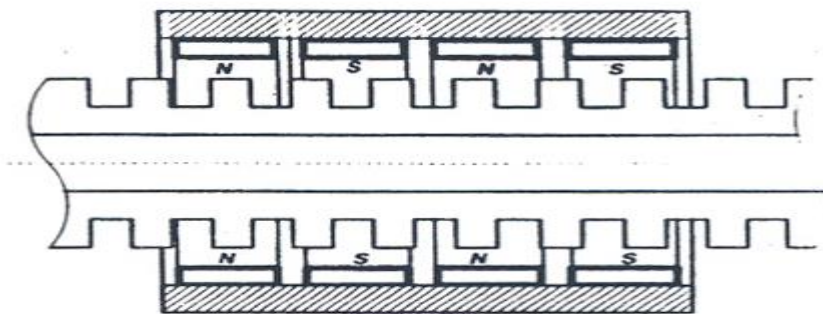
- مسطح یا لوله‌ای
- یک‌طرفه یا دوطرفه
- هسته شیاردار یا هسته بدون شیار
- هسته آهن یا هسته هوا

۳-۲-۱- ماشین سنکرون خطی لوله‌ای و مسطح

یک موتور سنکرون لوله‌ای با چرخش یک موتور خطی مسطح در جهت میدان مغناطیسی گردان و در جهت نیرو ایجاد می‌شود. موتورهای خطی لوله‌ای در ساختارهای مختلفی ساخته می‌شوند. در شکل (۳-۵) یک موتور سنکرون خطی آهنربای دائم لوله‌ای شیاردار یک‌طرفه با سیستم اولیه خارجی و در شکل (۳-۶) با سیستم ثانویه خارجی نشان داده شده است. در موتورهای لوله‌ای به دلیل تقارن نیروهای جانبی و عمودی حذف می‌شوند و امکان حرکت عمودی وجود ندارد در حالی که ماشین‌های مسطح قادر به تغییر مکان افقی و عمودی هستند [۲].



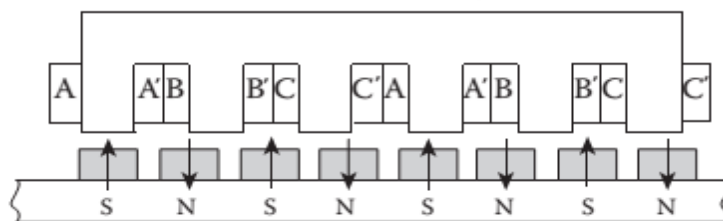
شکل (۳-۵): موتور سنکرون خطی آهنربای دائم شیاردار یک‌طرفه لوله‌ای با سیستم اولیه خارجی [۲]



شکل (۳-۶): موتور سنکرون خطی آهنربای دائم شیاردار یک‌طرفه لوله‌ای با سیستم ثانویه خارجی [۲]

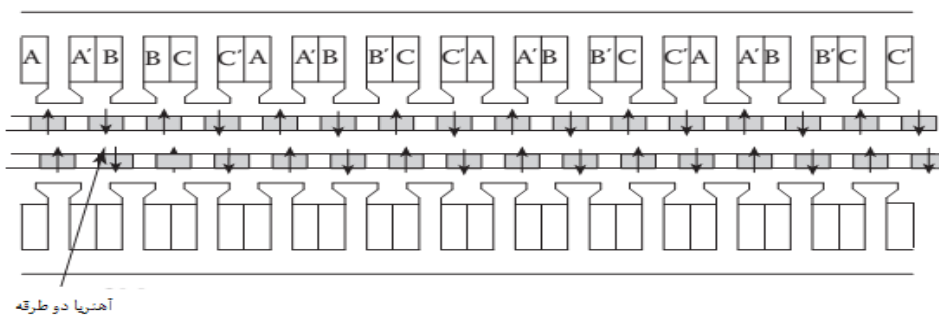
۳-۲-۲- ماشین سنکرون خطی یک طرفه و دو طرفه

موتورهای سنکرون خطی یک طرفه از یک بخش ساکن و یک قسمت متحرک تشکیل شده‌اند که در شکل (۷-۳) نشان داده شده است، در حالی که در موتورهای سنکرون دو طرفه، بخش متحرک بین دو استاتور مسطح قرار گرفته است؛ بنابراین همان طور که قبلاً بیان شد به دلیل وجود تقارن، نیروی عمودی در ماشین‌های دو طرفه وجود ندارد و در نتیجه حرکت عمودی امکان پذیر نیست. از طرفی در موتورهای دو طرفه نیرو از دو طرف بر قسمت متحرک وارد می‌شود به همین علت حرکت یکنواخت‌تری حاصل می‌شود [۲].



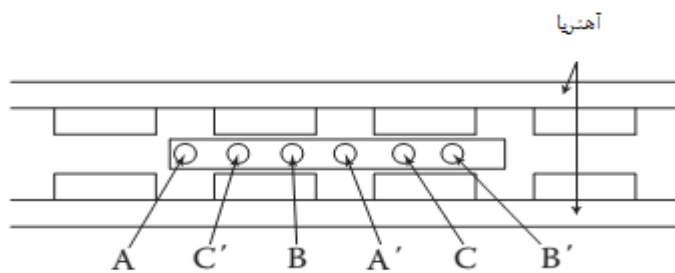
شکل (۷-۳): ماشین سنکرون خطی مغناطیس دائم یک طرفه [۲۲]

موتورهای سنکرون دو طرفه دارای دو آرایش اصلی می‌باشند. در ساختار اول همان طور که در شکل (۸-۳) نشان داده شده است موتور سنکرون دارای دو سیستم اولیه خارجی و یک سیستم ثانویه داخلی می‌باشد. این ساختار برای مسافت‌های طولانی مناسب است و تغذیه و خنک‌سازی در آن نسبت به ساختار دوم راحت‌تر صورت می‌گیرد؛ اما در ساختار دوم موتور از دو سیستم ثانویه خارجی و یک سیستم اولیه داخلی تشکیل شده است [۲] شکل (۹-۳).



آهنربای دو طرفه

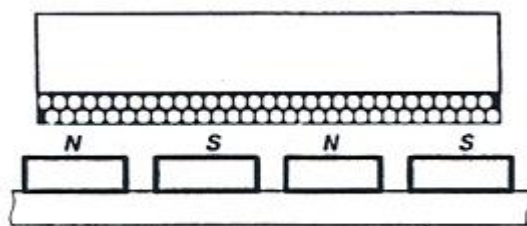
شکل (۸-۳): موتور سنکرون خطی آهنربای دائم شیاردار دو طرفه با سیستم اولیه خارجی [۲۲]



شکل (۳-۹): موتور سنکرون خطی آهنربای دائم دوطرفه با سیستم ثانویه خارجی [۲۲]

۳-۲-۳- ماشین سنکرون خطی با هسته آهن یا هسته هوا

هسته آهن یا هسته هوا مشخص کننده نوع ماده تشکیل دهنده هسته اولیه می باشد. در ماشین های خطی با هسته آهنی به دلیل استفاده از مواد فرو مغناطیس در هسته موتور، در مقایسه با ماشین های خطی با هسته هوایی نیروی بیشتری تولید می کنند که شکل (۳-۸) یک ماشین با هسته آهنی را نشان می دهد. ماشین های خطی با هسته هوایی برای کاربردهایی با دقت بالا بسیار مناسب می باشند زیرا حذف هسته منجر به حذف نیروی دندانه ای می شود در حالی که در موتورهای با هسته آهنی نیروی دندانه ای، که در اثر عکس العمل شیارها و آهنرباها به وجود می آید، مقدار قابل توجهی دارد. در شکل (۳-۱۰) یک نمونه موتور سنکرون خطی آهنربای دائم یک طرفه سطحی بدون شیار با هسته هوایی نشان داده شده است [۲].

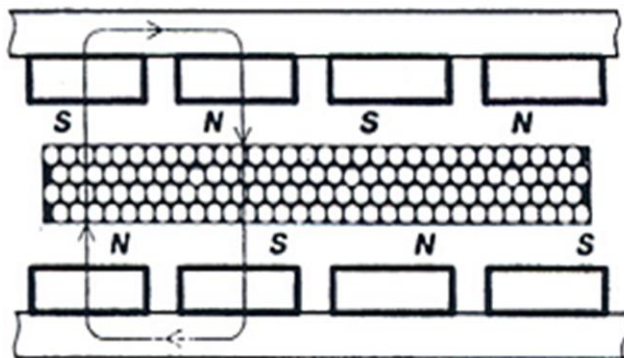


شکل (۳-۱۰): موتور سنکرون خطی آهنربای دائم یک طرفه سطحی بدون شیار با هسته هوایی [۲]

۳-۲-۴- ماشین سنکرون خطی شیاردار و بدون شیار

در شکل (۳-۱۱) ساختار یک موتور سنکرون آهنربای دائم خطی دوطرفه بدون شیار نشان داده شده است. در موتورهای بدون شیار سیم پیچی به طور یکنواخت در سطح هسته توزیع می شود.

موتورهای بدون شیار در مقایسه با موتورهای شیاردار دارای رپیل نیروی کمتر، در فرکانس‌های ورودی بالا دارای بازده بیشتر و به علت استفاده از آهن بیشتر دارای چگالی نیرو کمتری می‌باشد. علاوه بر این موتورهای شیاردار نسبت به موتورهای بدون شیار دارای استحکام بیشتری هستند ولی مدل‌سازی آن‌ها کمی دشوارتر می‌باشد.

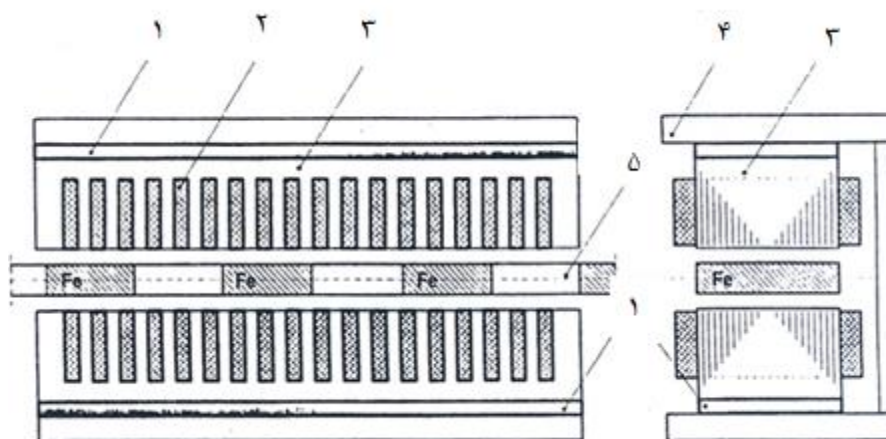


شکل (۳-۱۱): موتور سنکرون خطی آهنربای دائم دوطرفه سطحی بدون شیار با هسته هوایی [۲]

۳-۲-۵- ماشین سنکرون خطی شار عرضی و شار طولی

شکل ورقه‌های فرو مغناطیس هسته که عمودی و یا افقی هستند، جهت شار مغناطیسی اصلی را تعیین می‌کنند. موتورهای سنکرون آهنربای دائم به دو گروه شار عرضی و شار طولی تقسیم می‌شوند. استفاده از ورقه‌های عرضی باعث کاهش جریان‌های مغناطیس‌کنندگی می‌گردد و استفاده از ورقه‌های طولی با کاهش تلفات جریان گردابی بازده را افزایش می‌دهد.

در موتورهای شار عرضی خطوط شار مغناطیسی بر میدان مغناطیسی اصلی عمود می‌باشند. موتورهای شار طولی از نظر نوع تحریک به سه دسته معمولی، هیبرید یا ترکیبی و هموپولار تقسیم می‌شوند [۲۳]. موتورهای معمولی در قسمت تحریک فقط دارای آهنربای دائم هستند و سیم‌پیچی آرمیچر و آهنربا در دو مکان مجزا قرار گرفته‌اند. موتورهای سنکرون شار طولی عمدتاً به این شکل ساخته می‌شوند. در نوع ترکیبی یا هیبرید، که در شکل (۳-۱۲) نشان داده شده است، در قسمت تحریک علاوه بر آهنربا سیم‌پیچی DC نیز وجود دارد.

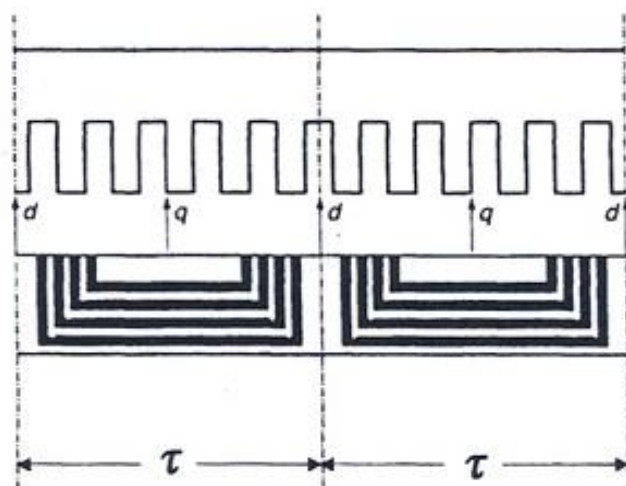


شکل (۳-۱۳): موتور سنکرون خطی آهنربای دائم دوطرفه با ریل واکنشی سریع ۱- آهنربا ۲- سیم‌پیچی آرمیچر ۳- پشته آرمیچر ۴- یوغ ۵- ریل واکنشی پسینو [۲]

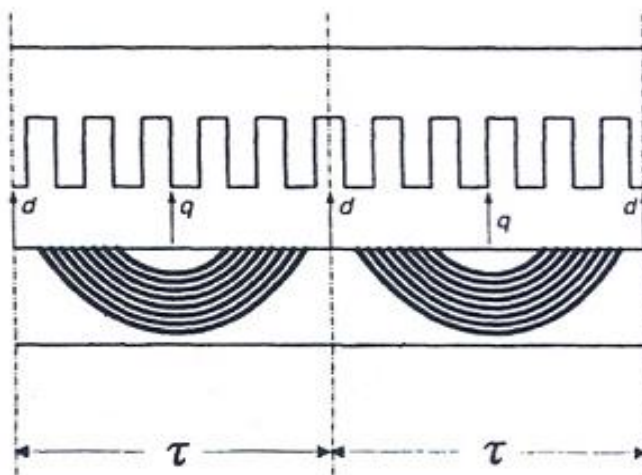
موتورهای سنکرون خطی علاوه بر ساختارهای مختلفی که در بالا بررسی شد، با توجه به ساختار ثانویه یا میدان آن‌ها به موتورهای آهنربای دائم، موتورهای رلوکتانس متغیر و موتورهای سوییچ رلوکتانس تقسیم‌بندی می‌شوند.

در گروه اول، همان‌طور که تاکنون مشاهده شد، در ثانویه آرایشی از آهنرباهای دائم قرار می‌گیرد. در گروه دوم ثانویه ساختار رلوکتانس متغیر دارد. چنین ساختاری نیروی کمی تولید می‌کند زیرا نسبت رلوکتانس محور d به محور q کوچک می‌باشد. به‌منظور بهبود عملکرد این نوع موتورها، یعنی رلوکتانس کم در محور d و پرمانس کم در محور q ، از عبور دهنده‌های جهت‌دار شار و یا ورقه‌های فولاد استفاده می‌شود [۲۷]. در شکل (۳-۱۴) ساختار موتور رلوکتانس متغیر با عبور دهنده‌های شار جهت‌دار و در شکل (۳-۱۵) چگونگی آرایش ورقه‌های فولاد به‌منظور دست یافتن به رلوکتانس متفاوت در محورهای d و q نشان داده شده است.

گروه سوم که موتورهای سوییچ رلوکتانس می‌باشند در عملکرد و ساختار مشابه موتورهای رلوکتانس متغیر خطی هستند، با این تفاوت که در هر لحظه تنها یکی از فازهای موتور تغذیه می‌شود. این موتور دارای قابلیت کنترل سرعت و موقعیت در سرعت‌های پایین می‌باشد [۲۸].



شکل (۳-۱۴): موتور سنکرون خطی رلوکتانس متغیر با عبور دهنده‌های جهت‌دار شار [۲]



شکل (۳-۱۵): موتور سنکرون خطی رلوکتانس متغیر با ورقه‌های فولاد [۲]

تاکنون ساختارهای مختلف ماشین‌های سنکرون خطی بررسی شد. ماشین نمونه در این تحقیق یک موتور سنکرون خطی مغناطیس دائم با ساختار مسطح و دوطرفه با هسته آهنی، شیاردار و شار طولی است که اولیه آن کوتاه و ثانویه آن بلند می‌باشد.

۳-۳- روش‌های کاهش ریپل نیرو در موتور سنکرون خطی مغناطیس

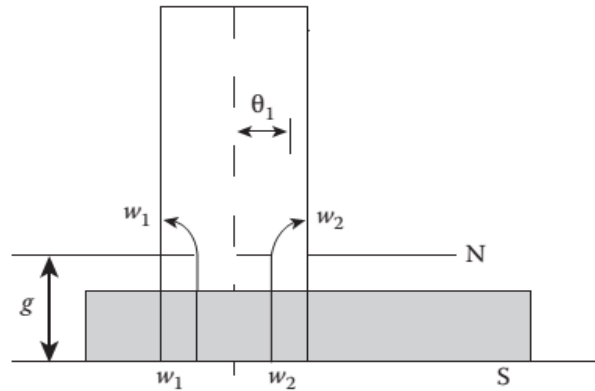
دائم نمونه

ریپل نیرو در ماشین‌های سنکرون خطی به دلایلی از جمله توزیع غیر سینوسی شار پیوندی استاتور، نیروی رلوکتانسی، نیروی دندانه‌ای و هارمونیک‌های زمانی به وجود می‌آید [۱۰]. بزرگ‌ترین مؤلفه ریپل نیرو در ماشین‌های سنکرون خطی مغناطیس دائم، مربوط به نیروی دندانه‌ای می‌باشد. علت اصلی ایجاد نیروی دندانه‌ای در ماشین‌های خطی سنکرون آهنربای دائم شیاردار، عکس‌العمل آهنرباها و شیارهای هسته آرمیچر و همچنین اثرات انتهایی ماشین، به علت طول محدود ماشین، می‌باشد. از معایب اصلی ماشین‌های خطی سنکرون آهنربای دائم نیز نیروی دندانه‌ای زیاد آن‌ها نسبت به همتای دوارشان می‌باشد. نیروی دندانه‌ای سبب افزایش ریپل نیروی رانش، ارتعاش در حرکت ماشین، اختلال در عملکرد سیستم کنترل موقعیت مانند روبات‌ها و دستگاه‌های کنترل سرعت به‌خصوص در سرعت‌های پایین می‌شود [۶].

تلاش‌های بسیاری در خصوص کاهش نیروی دندانه‌ای در ماشین‌های سنکرون خطی صورت گرفته است. روش‌های کاهش نیروی دندانه‌ای در ماشین‌های خطی مشابه روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای در ماشین‌های دوار می‌باشد. تحقیقات انجام‌شده، در زمینه کاهش نیروی دندانه‌ای، بیشتر بر روی ماشین‌های خطی سنکرون یک‌طرفه تمرکز دارد.

هدف از این تحقیق طراحی بهینه موتور سنکرون مغناطیس دائم خطی شیاردار دوطرفه و تعمیم برخی از روش‌های کاهش نیروی دندانه‌ای در ماشین‌های یک‌طرفه به ماشین‌های دوطرفه می‌باشد که این روش‌ها شامل تغییر عرض دهانه شیارهای هسته اولیه، تغییر عرض و ارتفاع آهنرباهای ثانویه، پخ کردن نوک دندانه‌ها و همچنین ارائه روش ترکیبی برای کاهش مؤثرتر ریپل نیرو می‌باشد. در ادامه هریک از این روش‌ها بررسی می‌شود.

برای به دست آوردن اندازه نیروی دندانه‌ای در موتورهای خطی می‌توان از تئوری موتورهای گردان dc بدون جاروبک کمک گرفت [۲۹ و ۳۰]. با استفاده از این تئوری نیروی دندانه‌ای در موتورهای خطی طبق رابطه (۱-۳) و شکل (۱۶-۳) با مجموع نیروهای وارد شده به دیواره‌های شیارهای اولیه برابر می‌باشد.



شکل (۱۶-۳): شیار باز در ماشین خطی [۲۲]

$$F_{cog} \approx \frac{l_{stack}}{2\mu_0} \sum_{n=1}^{N_s} \sum_{v=1}^{\infty} B_{xPMv}^2 \left(\frac{v \cdot 2\pi n}{N_s} + \theta_1 \right) (g_{\alpha} \cdot ssg) \quad (1-3)$$

در این رابطه:

- $g_{\alpha} = 0$ و $ssg = 0$ در بیرون شیار
- $g_{\alpha} = w_1 + g$ و $ssg = 1$ در سمت چپ شیار
- $g_{\alpha} = w_2 + g$ و $ssg = -1$ در سمت راست شیار
- N_s برابر است با تعداد شیار
- l_{stack} طول پشته اولیه
- θ_1 برابر است با زاویه مرکز شیار نسبت به محور آهنربا
- B_{xPMv} نیز از رابطه (۲-۳) به دست می‌آید.

$$\frac{\partial B_{yPMv}(x, y)}{\partial y} + \frac{\partial B_{xPMv}(x, y)}{\partial x} = 0 \quad ;$$

$$B_{yPMv}(x) = (B_{yPMv})_{slotiess} \cdot P_g(x) \quad (2-3)$$

یک روش کاهش اثر شیارها انتخاب تعداد مناسب شیار (N_s) و قطب (N_p) است که می‌تواند اندازه نیروی دندانه‌ای را به‌طور چشمگیری کاهش دهد. با محاسبه K_{cog} می‌توان میزان حساسیت نیروی دندانه‌ای به تعداد شیار و تعداد قطب را طبق رابطه (۳-۳) به دست آورد.

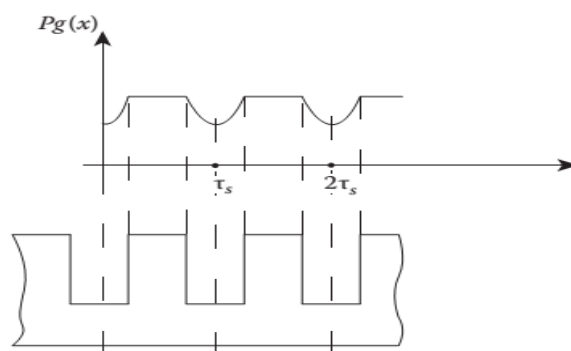
$$K_{cog} = \frac{LCM(N_s, N_p)}{N_p} \quad (3-3)$$

در رابطه (۳-۳)، LCM بزرگ‌ترین مقسوم‌علیه مشترک N_s و N_p می‌باشد. این رابطه نشان می‌دهد هرچه K_{cog} کوچک‌تر باشد نیروی دندانه‌ای بزرگ‌تر می‌باشد؛ بنابراین افزایش K_{cog} یک روش مؤثر در کاهش نیروی دندانه‌ای می‌باشد [۳۱ و ۳۲].

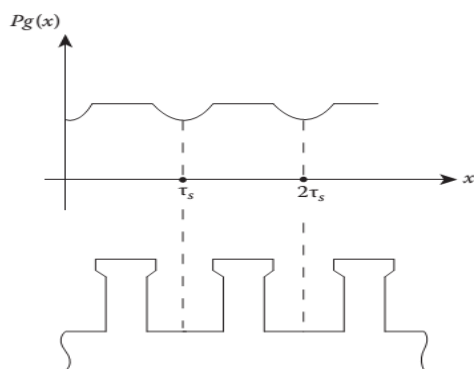
در ماشین نمونه نیز باهدف افزایش نیروی رانش و کاهش نیروی دندانه‌ای $2p > N_s$ انتخاب شده است [۲۲]. در این ماشین تعداد شیارها برابر با ۱۲ و تعداد قطبها برابر با ۸ می‌باشد.

۳-۳-۱- تغییر عرض دهانه شیارها

نیروی دندانه‌ای، یا نیروی در حالت جریان صفر، به علت تغییر در تابع پرمانس فاصله هوایی در اثر شیارهای هسته آهنی به وجود می‌آید. نیروی دندانه‌ای یک تابع متناوب می‌باشد [۲۲]. در شکل (۳-۱۷) و (۳-۱۸) تغییرات عکس تابع پرمانس فاصله هوایی در دو نوع ماشین، ماشین با شیارهای باز و شیارهای نیمه بسته، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با استفاده از شیارهای نیمه بسته تغییرات عکس تابع پرمانس و در نتیجه نیروی دندانه‌ای کمتر می‌شود.

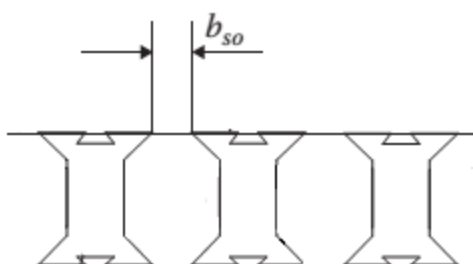


شکل (۳-۱۷): تغییرات عکس تابع پرمانس فاصله هوایی در ماشین با شیارهای باز [۲۲]



شکل (۳-۱۸): تغییرات عکس تابع پرمانس فاصله هوایی در ماشین با شیارهای نیمه بسته [۲۲]

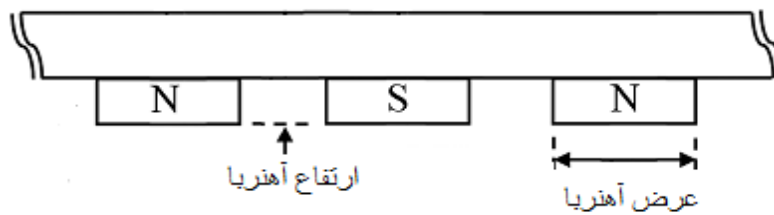
در این تحقیق سعی بر آن است که با تغییر عرض دهانه شیار در یک بازه حول مقدار اولیه، تغییرات نیروی دندانه‌ای را بررسی کنیم و مقدار بهینه‌ای برای عرض دهانه شیار (b_{s0}) به دست آوریم. در شکل (۳-۱۹) شکل شیار ماشین مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۹): شکل شیار ماشین مورد مطالعه [۲۲]

۳-۳-۲- تغییر ابعاد آهنربا

در این تحقیق هم‌چنین اثر تغییر عرض و ارتفاع آهنربا بر نیروی دندانه‌ای بررسی خواهد شد. به این منظور عرض و ارتفاع آهنربا، شکل (۳-۲۰)، را در یک بازه حول مقدار اولیه تغییر داده و نیروی دندانه‌ای و سایر پارامترهای ماشین از قبیل نیروی میانگین، بازده، ضریب توان، چگالی توان، حجم آهنربا و تلفات هسته بررسی می‌گردد و در نهایت مقدار بهینه‌ای برای عرض و ارتفاع آهنربا به دست خواهد آمد.



شکل (۳-۲۰): ثانویه ماشین نمونه [۱۷]

در تجزیه و تحلیل تئوری فرض می‌شود که نیروی تولیدشده بین یک لبه آهنربا و یک دندان هسته سینوسی می‌باشد. از آنجایی که در آهنربا دو لبه، لبه ابتدایی و لبه انتهایی، وجود دارد می‌توان با انتخاب مناسب عرض و ارتفاع آهنربا، اختلاف زاویه بین دو نیرو را به گونه‌ای تغییر داد که نیروی برآیند صفر شود [۱۲]. نیروی بین یک لبه آهنربا و دندان هسته طبق روابط (۳-۴) و (۳-۵) و نیروی برآیند طبق رابطه (۳-۶) به دست می‌آید.

$$F_R = F_0 + \sum_{n=1}^{\infty} F_n \sin \frac{2n\pi}{\tau} x \quad (۳-۴)$$

$$F_L = -F_0 + \sum_{n=1}^{\infty} F_n \sin \left(\frac{2n\pi}{\tau} x + \delta \right) \quad (۳-۵)$$

که در آن F_0 نیروی میانگین، τ گام قطب و δ اختلاف زاویه بین نیروهای ناشی از دو لبه آهنربا می‌باشد.

$$\begin{aligned} F_t &= F_R + F_L \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} F_n \cos \left(\frac{\delta}{2} \right) \sin \left(\frac{2n\pi}{\tau} x + \frac{\delta}{2} \right) \end{aligned} \quad (۳-۶)$$

۳-۳-۳- پخ کردن نوک دندانه‌ها

پخ کردن نوک دندانه‌ها به عنوان یک روش نسبتاً مؤثر در کاهش نیروی دندانه‌ای می‌باشد. پخ کردن نوک دندانه‌ها سبب ایجاد تغییرات نرم‌تر در تابع پرمانس می‌شود. در مرجع [۶] باهدف کاهش نیروی دندانه‌ای، نوک دندانه‌ها در یک ماشین یک‌طرفه را پخ کرده و طول بهینه پخ کردن نوک دندانه‌ها را به دست آورده است. در این تحقیق سعی شده، مشابه مرجع [۶]، اندازه بهینه پخ کردن

نوک دندانها در ماشین سنکرون دوطرفه با شیارهای نیمه بسته تعیین شود. در شکل (۳-۲۱) شکل اولیه دندانهای ماشین و شکل پیشنهادی آن نشان داده شده است.



(ب)

(الف)

شکل (۳-۲۱): الف) شکل شیار اولیه ب) شکل شیار پیشنهادی

در نهایت سعی می‌شود تا با ترکیب روش‌های ذکر شده، روش بهینه‌ای برای کاهش مؤثرتر ریپل نیروی ارائه شود.

۳-۴- جمع‌بندی

در این فصل ابتدا به منظور آشنایی بیشتر با ساختار ماشین مورد مطالعه، ساختارهای مختلف ماشین سنکرون خطی مغناطیس دائم بیان گردید و مزایا و معایب هر یک بررسی شد. سپس ساختار ماشین نمونه معرفی و روش‌های کاهش نیروی دندانهای در ماشین مورد مطالعه بررسی گردید.

فصل چهارم

معرفی و بررسی عملکرد ماشین

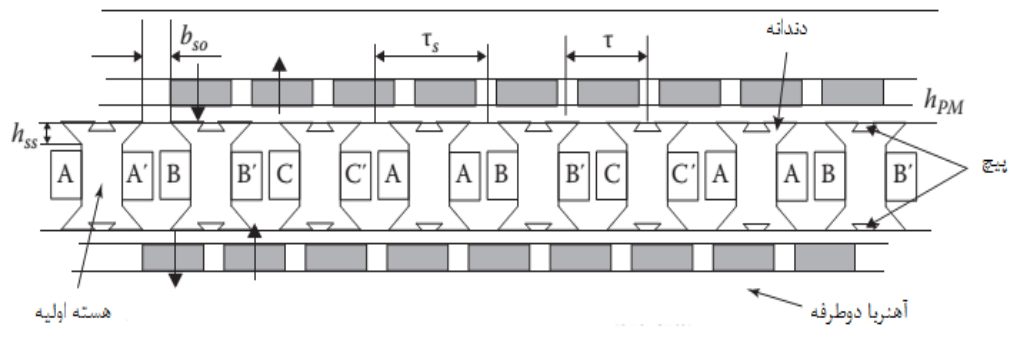
سنکرون مغناطیس دائم نمونه

۴-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا ماشین نمونه معرفی می‌شود. به این منظور مشخصات ساختاری و مشخصات مداری ماشین نمونه و نحوه شبیه‌سازی آن بیان می‌گردد. سپس عملکرد ماشین در شرایط مدارباز، شرایط نامی و شرایط بیشینه تحلیل می‌شود.

۴-۲- معرفی ماشین مورد مطالعه

ماشین نمونه یک ماشین سنکرون خطی مغناطیس دائم مسطح، دوطرفه، شیاردار با هسته آهنی می‌باشد که ساختار آن در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. این ماشین دارای اولیه کوتاه و ثانویه بلند می‌باشد. در ادامه فرآیند طراحی ماشین و سپس مشخصات مداری آن بیان می‌شود.



شکل (۴-۱): ماشین سنکرون خطی مغناطیس دائم با اولیه متحرک [۲۲]

۴-۲-۱- فرآیند طراحی ماشین نمونه

با در نظر گرفتن مشخصات اولیه مطابق جدول (۴-۱) می‌توان سایر پارامترهای طراحی را به صورت زیر محاسبه کرد:

جدول (۱-۴): پارامترهای موتور تحت مطالعه

پارامتر	نماد	مقدار
نیروی نامی	F_{xn}	۸۰۰ نیوتن
سرعت نامی	U_{xn}	۱.۵ متر بر ثانیه
ولتاژ DC	V_{dc}	۳۰۰ ولت
فاصله هوایی	g	۱ میلی‌متر
سرعت بیشینه	U_{max}	۱.۵ متر بر ثانیه
نیروی بیشینه	F_{xpeak}	۱۲۰۰ نیوتن
توان نامی	P_n	۱۲۰۰ وات

گام شیار مطابق رابطه (۱-۴) محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$\tau_s = \tau \cdot \frac{2p}{N_s} \quad (1-4)$$

$$\tau = 30 \text{ mm}; \quad p = 4; \quad N_s = 6$$

که در این رابطه τ_s گام شیار، τ گام قطب، p تعداد جفت قطب و N_s تعداد شیارها می‌باشد.

همان‌طور که در شکل (۱-۴) مشخص شده است، b_{s0} عرض دهانه شیار می‌باشد که از رابطه زیر

محاسبه می‌شود:

$$b_{s0} = (4 - 5)g \quad (2-4)$$

در این رابطه g فاصله هوایی ماشین می‌باشد.

عرض آهنربا با نماد τ_{PM} نشان داده می‌شود و از رابطه (۳-۴) به دست می‌آید:

$$\tau_{PM} \approx (\tau_s - b_{s0})0.8 \quad (3-4)$$

در این رابطه τ_s از رابطه (۱-۴) و b_{s0} از رابطه (۲-۴) محاسبه می‌شود.

ارتفاع آهنربا (h_m) نیز از رابطه (۴-۴) به دست می‌آید، که در آن چگالی شار مغناطیسی آهنربا در فاصله هوایی و برابر 0.07 تسلا می‌باشد.

$$\frac{h_m}{h_m + g} = \frac{B_{PMg}}{B_r} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (1 + k_{fringe}); \quad k_{fringe} = 0.2; \quad B_r = 0.8 \quad (4-4)$$

با محاسبه عرض آهنربا از رابطه (۳-۴)، ارتفاع یوغ ثانویه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$h_{ys} \approx \frac{\tau_{PM} \cdot B_{PMgu}}{B_{ys}}; \quad B_{ys} = 1.7 \quad (5-4)$$

در ماشین مورد مطالعه طول پشته اولیه یا l_{stack} با طول پشته ثانویه برابر بوده و از رابطه (۴-۶) به دست می‌آید، که در این رابطه F_{xn} نیروی نامی، f_{xb} چگالی نیروی نامی و n عددی صحیح است که به طول ثانویه بستگی دارد. از آنجایی که طول ثانویه 4 متر است طول اولیه نمی‌تواند بیشتر از 0.5 متر باشد که با در نظر گرفتن $n = 2$ این مقدار برای طول اولیه به دست می‌آید.

$$l_{stack} = \frac{F_{xn}}{f_{xb} \cdot 6\tau_s \cdot n}; \quad f_{xb} = 2 \text{ N/cm}^2; \quad n = 2 \quad (6-4)$$

همان‌طور که در شکل (۴-۱) نشان داده شده است در هر شیار اولیه دو سیم‌پیچی قرار دارد که ناحیه فعال شیار یا A_{slot} طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$A_{slot} = \frac{2W_C(I_{sn}/\sqrt{2})}{j_{co}k_{fill}} \quad j_{co} = 4 \text{ A/mm}^2; \quad k_{fill} = 0.2 \quad (7-4)$$

در این رابطه j_{co} چگالی جریان نامی، k_{fill} ضریب پرشدگی شیار و W_C تعداد دور سیم‌پیچی می‌باشد و مقدار $W_C I_{sn}$ طبق روابط زیر به دست می‌آید.

ابتدا با در نظر گرفتن $\tau = 0.03$ و $U_b = 1.5$ ، فرکانس نامی به صورت رابطه (۴-۸) محاسبه می‌شود:

$$f_{1b} = \frac{U_b}{2\tau} \quad (8-4)$$

سپس با فرض این‌که در سیم‌پیچی اولیه شار پیوندی Ψ_{PMd} نسبت به جابجایی قسمت متحرک تغییرات سینوسی دارد، مقدار پیک شار پیوندی طبق رابطه (۴-۹) می‌شود:

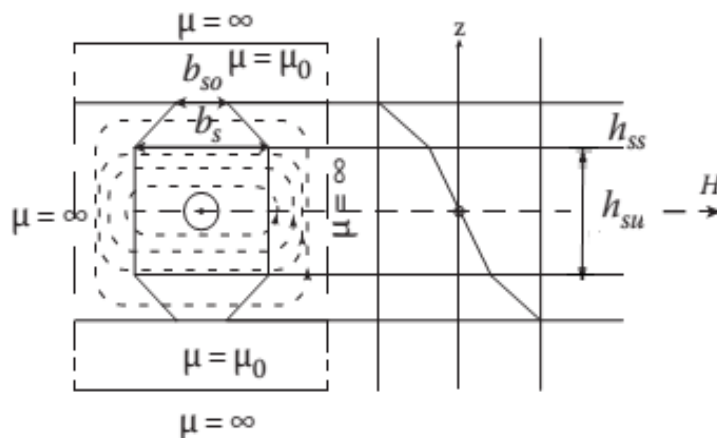
$$\Psi_{PMd} = B_{PMgu} \tau_{PM} l_{stack} 4 W_C k_{w1}; \quad k_{w1} = 0.866 \quad (9-4)$$

که در این رابطه ضریب k_{w1} ضریب سیم‌پیچی است. با جایگذاری مقادیر B_{PMgu} ، τ_{PM} و l_{stack} از روابط قبلی، Ψ_{PMd} بر حسب W_C به دست می‌آید. در نهایت با قرار دادن رابطه (۹-۴) در رابطه (۱۰-۴)، مقدار $W_C I_{sn} = 900$ می‌شود.

$$F_{xn} = \frac{3\pi}{2\tau} \Psi_{PMd} \cdot I_{qn}; \quad I_{qn} = I_{sn} \quad (I_d = 0) \quad (10-4)$$

ارتفاع شیار یا h_{su} که در شکل (۲-۴) نشان داده شده است طبق رابطه (۱۱-۴) محاسبه می‌شود:

$$h_{su} = \frac{A_{slot}}{b_s}; \quad b_s \approx 0.5\tau_s \quad (11-4)$$



شکل (۲-۴): ابعاد شیار ماشین نمونه [۲۲]

با استفاده از اطلاعات جدول (۱-۴) و روابط (۱-۴) تا (۱۱-۴) پارامترهای اولیه و ثانویه ماشین مورد مطالعه را می‌توان در جدول (۲-۴) خلاصه کرد:

جدول (۴-۲): ابعاد ماشین نمونه [۲۲]

پارامتر	نماد	مقدار
عرض آهنربا	τ_{PM}	۲۸ میلی‌متر
ارتفاع آهنربا	h_m	۵.۷ میلی‌متر
ارتفاع یوغ ثانویه	h_{ys}	۱۱.۵ میلی‌متر
گام قطب	τ	۳۰ میلی‌متر
گام شیار	τ_s	۴۰ میلی‌متر
عرض دهانه شیار	b_{s0}	۵ میلی‌متر
عرض شیار	b_s	۲۰ میلی‌متر
ارتفاع شیار	h_{su}	۴۰ میلی‌متر
مساحت شیار	A_{slot}	۷۹۲ میلی مترمربع
طول پشته	l_{stack}	۸۳.۳ میلی‌متر

۴-۲-۲- مدار معادل ماشین نمونه

در این بخش ابتدا مدار معادل ماشین سنکرون خطی مغناطیس دائم در حالت کلی بیان می‌شود،

سپس پارامترهای مدار الکتریکی ماشین نمونه به دست می‌آید.

اندوکتانس مغناطیس کنندگی در ماشین‌های خطی، مشابه ماشین‌های دوار، می‌شود [۳۳]:

$$L_{dm} = L_m \cdot \frac{k_{dm}}{1 + k_{sd}}; \quad L_{qm} = L_m \cdot \frac{k_{qm}}{1 + k_{sq}} \quad (۱۲-۴)$$

$$k_{dm} = \left(\frac{\tau_\rho}{\tau} + \frac{1}{\pi} \sin \frac{\tau_\rho}{\tau} \pi \right) \cdot \frac{g}{g + h_{PM} \frac{\tau}{2l_{PM}}} \quad (۱۳-۴)$$

$$k_{qm} = \frac{\tau_\rho}{\tau} - \frac{1}{\pi} \sin \frac{\tau_\rho}{\tau} \pi + \frac{2}{3\pi} \cos \frac{\tau_\rho}{\tau} \frac{\pi}{2} \quad (14-4)$$

$$L_m = \frac{6\mu_0(k_{w_1} w_{1p}) \tau \cdot l_{stack}}{\pi^2 \cdot p \cdot g \cdot k_c} \quad (15-4)$$

در ماشین با اولیه بلند L_{dm} و L_{qm} اندوکتانس قسمت فعال استاتور، یعنی قسمتی که توسط ثانویه پوشش داده می‌شود، می‌باشد. باقیمانده استاتور به صورت اندوکتانس نشتی عمل می‌کند و با $L_{p'-p}$ نشان داده می‌شود و از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$L_{p'-p} \approx L_{lp'-p} + \frac{6\mu_0(k_{w_1} w_{1p'-p})^2 \tau \cdot l_{stack}}{\pi^2(p' - p) \frac{\tau}{\pi}} \quad (16-4)$$

$$L_d = L_{dm} + L_{lp} + L_{p'-p}; \quad L_q = L_{qm} + L_{lp} + L_{p'-p} \quad (17-4)$$

در ماشین با ساختار اولیه کوتاه L_d و L_q به صورت رابطه (۱۸-۴) خلاصه می‌شود:

$$L_d = L_{dm} + L_{ls}; \quad L_q = L_{qm} + L_{ls} \quad (18-4)$$

که L_{ls} اندوکتانس نشتی می‌باشد.

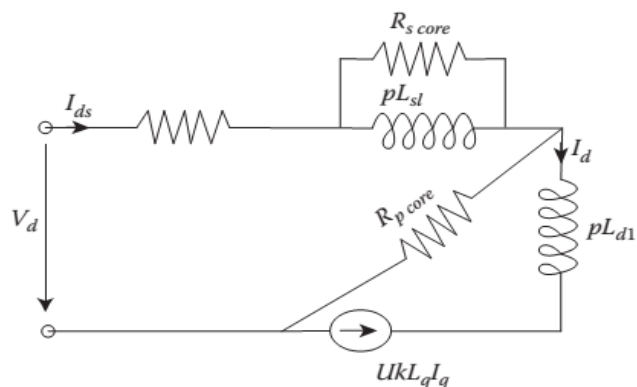
مدار معادل $d - q$ ماشین سنکرون خطی مغناطیس دائم در شکل (۳-۴) نشان داده شده است و

به صورت زیر خلاصه می‌شود:

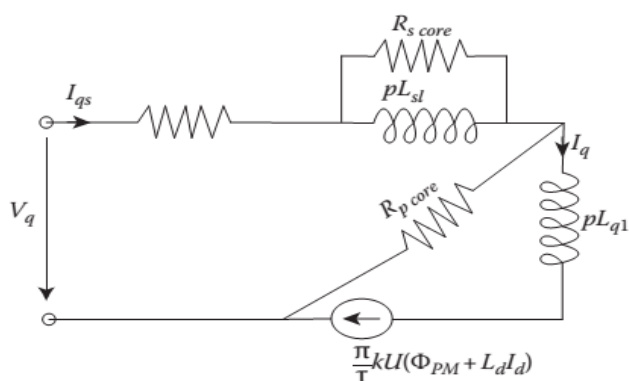
$$\bar{V}_S = R_S \bar{I}_S + \frac{d\bar{\Psi}_S}{dx} + j \frac{\pi}{\tau} U k \cdot \bar{\Psi}_S; \quad \bar{\Psi}_S = L_d I_d + \Psi_{PM} + j L_q I_q \quad (19-4)$$

$$\bar{V}_S = V_d + j V_q; \quad \bar{I}_S = I_d + j I_q \quad (20-4)$$

که در رابطه (۱۹-۴) هنگامی که ثانویه متحرک است $k = 1$ و در حالتی که اولیه متحرک است $k = -1$ می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل (۳-۴): مدار معادل ماشین الف) محور d (ب) محور q [۲۲]

در شکل (۳-۴) $R_{p\ core}$ و $R_{s\ core}$ نشان دهنده تلفات هسته ثانویه و اولیه می باشد.

معادلات حرکت در ماشین سنکرون خطی عبارت اند از:

$$F_x = \frac{3\pi}{2\tau} [\Psi_{PMd} + (L_d - L_q)I_d](I_{qk}) \quad (۲۱-۴)$$

$$G_v \frac{dU}{dt} = F_x - F_{load} - F_{cogg}(x); \quad \frac{dx}{dt} = U \quad (۲۲-۴)$$

$$G_m \frac{dU_g}{dt} = F_n - G_m \cdot g - F_{dis}; \quad \frac{dg}{dt} = U_g; \quad \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{I_d}{I_q} \right) \quad (۲۳-۴)$$

$$F_n \approx \frac{(B_{PMg}^2 + B_{ag}^2 + 2B_{PM} \cdot B_{ag} \cdot \sin \gamma) 2p\tau l_{stack}}{2\mu_0} \quad (۲۴-۴)$$

که در رابطه (۲۴-۴) B_{PM} و B_{ag} به ترتیب مؤلفه اصلی چگالی شار مغناطیسی آهنربا و آرمیچر در فاصله هوایی می‌باشد.

تبدیل پارک در رابطه (۲۵-۴) نشان داده شده است:

$$\begin{vmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{vmatrix} = \frac{2}{3} \begin{vmatrix} \cos(-\frac{\pi}{\tau}x) & \cos(-\frac{\pi}{\tau}x + \frac{2\pi}{3}) & \cos(-\frac{\pi}{\tau}x - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(-\frac{\pi}{\tau}x) & \sin(-\frac{\pi}{\tau}x + \frac{2\pi}{3}) & \sin(-\frac{\pi}{\tau}x - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{vmatrix} \quad (25-4)$$

ماشین سنکرون مورد مطالعه دارای اولیه کوتاه و آهنرباهای سطحی می‌باشد؛ بنابراین در رابطه

$$(19-4) \quad k = -1 \text{ می‌باشد.}$$

در رابطه (۱۵-۴) اندوکتانس مغناطیس کنندگی با صرف نظر از هارمونیک فضایی نیروی محرکه

مغناطیسی به دست آمده است. در رابطه (۲۶-۴) اندوکتانس ماشین نمونه با در نظر گرفتن هارمونیک فضایی نیروی محرکه مغناطیسی محاسبه شده است:

$$L_m \approx \frac{3 \mu_0 (\tau_s - b_{s0}) l_{stack} W_c^2 4}{4(g + h_m) k_c} \quad (26-4)$$

اندوکتانس نشتی نیز در ماشین نمونه به صورت زیر می‌باشد [۳۴]:

$$L_l = 4 \times 2 \mu_0 \cdot l_{stack} \left(\lambda_{slot} + \frac{l_e}{l_{stack}} \cdot \lambda_{end} \right); \quad \lambda_{end} \approx 0.63 \quad (27-4)$$

که λ_{slot} مطابق رابطه (۲۸-۴) به دست می‌آید:

$$\lambda_{slot} \approx 2 \left(\frac{h_{su}}{3 \cdot (2 \cdot b_s)} + \frac{h_{ss}}{b_s + b_{s0}} \right) \quad (28-4)$$

در ماشین نمونه شیارها از دو طرف باز می‌باشند. در شکل (۲-۴) شیارهای ماشین و تغییرات

میدان نشتی نسبت ارتفاع شیار نشان داده شده است.

مقاومت الکتریکی ماشین نیز می‌شود:

$$R_s = 4\rho_{Co}l_c \frac{W_c^2 j_{Con}}{W_c I_{Sn}/\sqrt{2}} \quad (29-4)$$

که در آن ρ_{Co} مقاومت ویژه مس است و l_c از رابطه (۳۰-۴) محاسبه می‌شود:

$$l_c \approx 2 \cdot (l_{stack} + 1.2 \cdot \tau_s + 0.01) \quad (30-4)$$

در ادامه سایر پارامترهای الکتریکی از قبیل ولتاژ بیشینه و نامی، تعداد دور سیم‌پیچی و جریان نامی محاسبه می‌گردد.

با استفاده از رابطه (۳۱-۴) مقدار ولتاژ بیشینه به دست آمده و سپس با جایگذاری در رابطه (۳۲-۴) تعداد دور سیم‌پیچی محاسبه می‌شود.

$$V_{smax} \approx 2 \frac{V_{dc}}{\pi} \cdot 0.95 \quad (31-4)$$

$$V_{smax} = W_c \sqrt{(k_{PM} \cdot \frac{\pi}{\tau} \cdot U + k_R(W_c \cdot I_{speak}))^2 + (\frac{\pi}{\tau} \cdot U \cdot k_L \cdot W_c \cdot I_{speak})^2} \quad (32-4)$$

چون طبق روابط (۹-۴) و (۱۰-۴) مقدار $W_c I_{Sn} = 900$ است؛ بنابراین اندازه جریان نامی ماشین قابل محاسبه است و به کمک رابطه (۳۳-۴) اندازه قطر سیم آرمیچر به دست می‌آید:

$$d_{Co} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{I_n}{j_{Con}}} \quad (33-4)$$

ولتاژ نامی ماشین به کمک رابطه (۳۲-۴) و جایگذاری I_{Sn} به دست می‌آید. علاوه بر این تلفات

مسی و بازده در شرایط نامی و بیشینه طبق روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{Con} = 3R_s I_n^2 \quad (34-4)$$

$$P_{Cop} = P_{Con} \left(\frac{F_{xpeak}}{F_{xn}} \right) \quad (35-4)$$

$$\eta_n = \frac{F_{xn}U_b}{F_{xn}U_b + P_{Con}} \quad (36-4)$$

$$\eta_{peak\ thrust} = \frac{F_{xpeak}U_b}{F_{xpeak}U_b + P_{Con}} \quad (37-4)$$

برای محاسبه شتاب ماشین وزن قسمت اولیه ماشین، که شامل وزن هسته و وزن مس است، نیاز می‌باشد که طبق روابط (38-4) و (39-4) محاسبه می‌شود:

$$W_{core} = 12l_{stack}[\tau_s \cdot (h_{su} + h_{ss}) - (h_{su} \cdot b_s + (b_s + b_{s0})h_{ss})]\gamma_{iron} \quad (38-4)$$

$$W_{copper} = \frac{3 \times l_C W_C \times 4 \times I_n \gamma_{Co}}{J_{con}} \quad (39-4)$$

و در نهایت شتاب ماشین می‌شود [22]:

$$a_{i\ max} = \frac{F_{xpeak}}{W_{mover}} \quad (40-4)$$

پارامترهای به دست آمده به کمک روابط (4-12) تا (4-40) در جدول (4-3) خلاصه شده است.

جدول (4-3): ابعاد و مشخصات مداری ماشین نمونه [22]

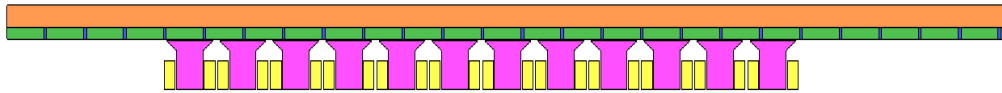
پارامتر	نماد	مقدار
اندوکتانس سنکرون	L_s	۳۷.۱۲ میلی‌هانری
مقاومت هر فاز	R_s	۳.۸۰۸ اهم
تعداد دور سیم‌پیچی	W_C	۱۶۰
قطر سیم	d_{Co}	۱.۱۳ میلی‌متر
شتاب	$a_{i\ max}$	۶۰ متر بر مجذور ثانیه
وزن اولیه	W_{mover}	۲۰ کیلوگرم

شرایط نامی		
نیوتن ۸۰۰	F_{xn}	نیرو
ولت ۱۶۶.۸۴۸	V_{sn}	ولتاژ
آمپر ۵.۶۲۵	I_{sn}	جریان
۰.۹۸	$\cos\varphi_n$	ضریب توان
%۸۶.۹	η_n	بازده
وات ۱۸۰.۷	P_{Con}	تلفات مسی
وات ۱۲۰۰	P_{out}	توان خروجی
شرایط بیشینه		
نیوتن ۱۲۰۰	F_{xpeak}	نیرو
ولت ۱۸۱.۵۲	V_{smax}	ولتاژ
آمپر ۸.۴۳۸	I_{speak}	جریان
۰.۹۵۵	$\cos\varphi_{peak}$	ضریب توان
%۸۱.۶	$\eta_{peak\ thrust}$	بازده
وات ۴۰۵	P_{Cop}	تلفات مسی
وات ۱۸۰۰	P_{out}	توان خروجی

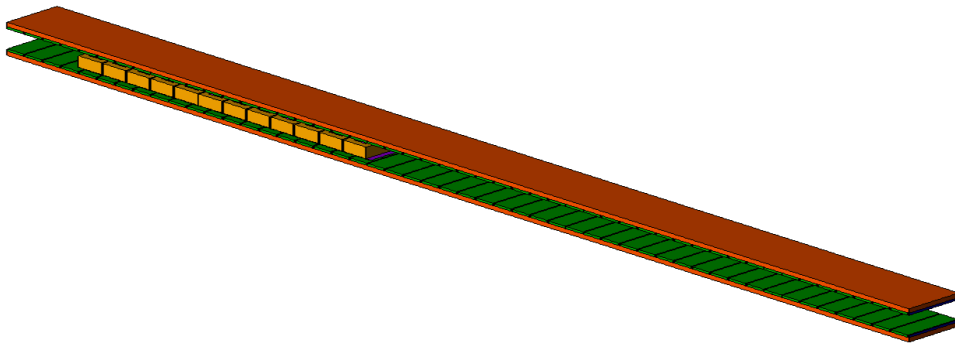
۴-۳- نحوه شبیه‌سازی ماشین نمونه

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد ماشین مورد مطالعه ماشین سنکرون خطی مغناطیس دائم دوطرفه می‌باشد. به دلیل وجود تقارن در ماشین نسبت به محور x و کاهش زمان اجرای برنامه‌ها نیمی از شکل (۴-۱) در نرم‌افزار JMAG-Desinger به صورت دوبعدی شبیه‌سازی شده است.

ماشین نمونه دارای اولیه کوتاه و ثانویه بلند می‌باشد که در این شبیه‌سازی طول مسیر $1/5$ متر در نظر گرفته شده است و 50 عدد از آهنرباها در ثانویه منظور شده است. همچنین قسمت ثانویه ثابت و قسمت اولیه با سرعت ثابت $1/5$ متر بر ثانیه حرکت می‌کند. در ماشین مورد مطالعه جنس هسته اولیه و یوغ ثانویه 50jn470، جنس آهنرباها ND-31SHR 24KOe (reversible) و ماده بین آهنرباها هوا می‌باشد. در شکل (۴-۴) نمای دوبعدی و در شکل (۵-۴) نمای سه‌بعدی ماشین شبیه‌سازی نشان داده شده است.

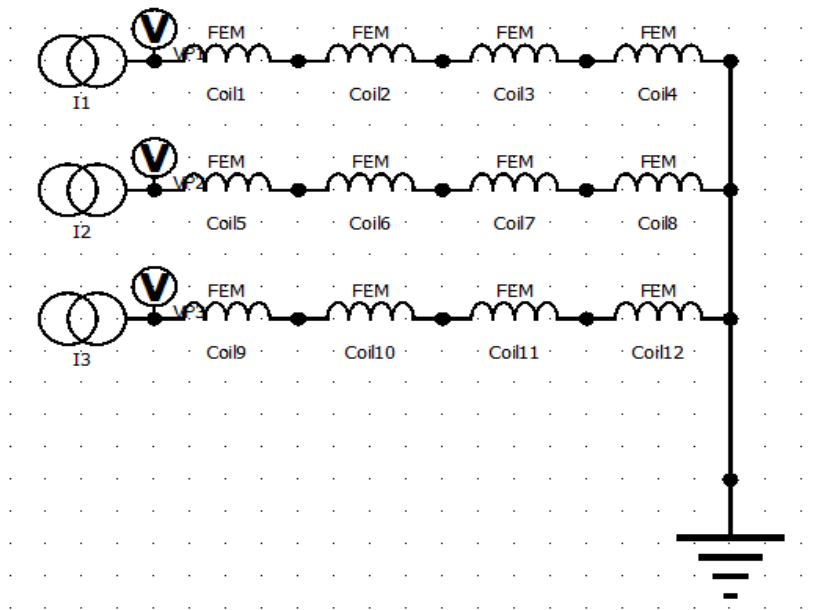


شکل (۴-۴): نمای دوبعدی ماشین شبیه‌سازی شده در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود



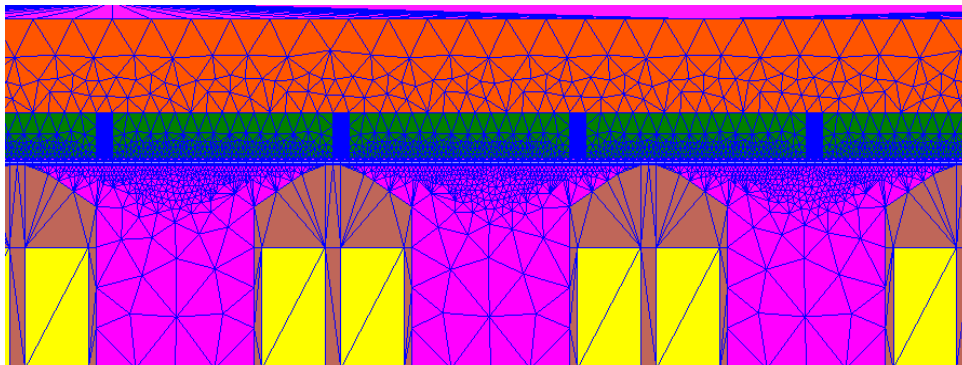
شکل (۵-۴): نمای سه‌بعدی ماشین شبیه‌سازی شده در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود

ماشین مورد مطالعه یک ماشین سه فاز می‌باشد که هر فاز از ۴ سیم‌پیچی سری تشکیل شده است و هر سیم‌پیچی به صورت متمرکز در یک شیار قرار گرفته است. شکل (۶-۴) مدار الکتریکی شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. از آنجایی که نیمی از ماشین شبیه‌سازی شده است کلیه پارامترهای الکتریکی مدار از قبیل مقاومت سیم‌پیچی و تعداد دور سیم‌پیچی نصف مقدار اصلی منظور شده است.



شکل (۴-۶): مدار الکتریکی ماشین شبیه‌سازی شده

در شکل زیر نمایی از مش بندی موتور در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود نشان داده شده است.



شکل (۴-۷): نمایی از مش بندی موتور در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود

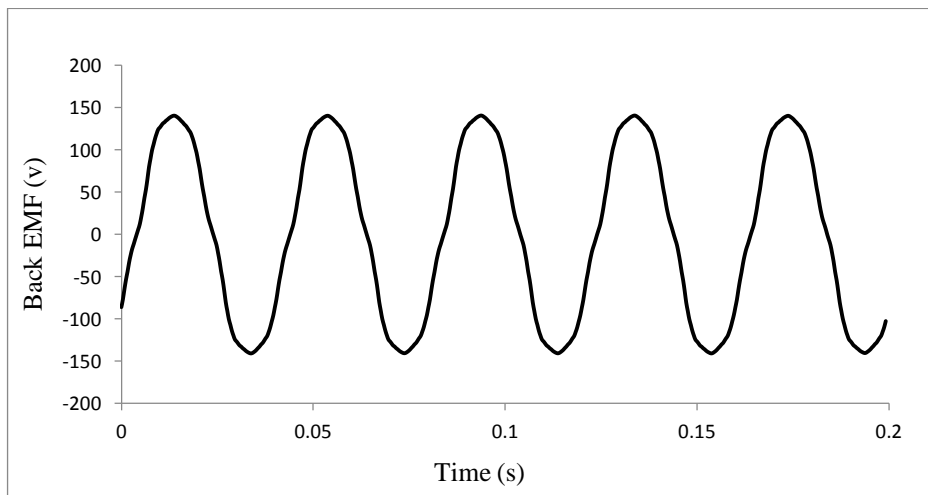
۴-۴- بررسی عملکرد ماشین نمونه

قبل از پیاده‌سازی روش‌های کاهش ریپل نیرو بر روی ماشین مورد مطالعه، لازم است از صحت عملکرد ماشین در شرایط مدارباز، شرایط نامی و بیشینه اطمینان حاصل شود. به همین منظور پارامترهایی از قبیل ولتاژ دو سر منبع جریان، جریان الکتریکی، نیروی رانش، توان ورودی، توزیع چگالی شار مغناطیسی موتور، خطوط شار مغناطیسی، مؤلفه x و y چگالی شار مغناطیسی در وسط فاصله هوایی بررسی می‌شود.

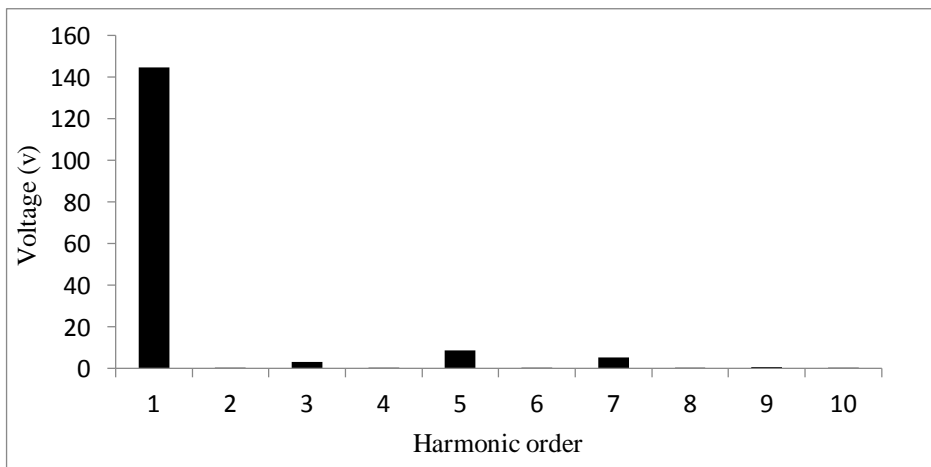
۴-۴-۱- بررسی عملکرد موتور در شرایط مدارباز

در شرایط مدارباز قسمت اولیه با سرعت سنکرون حرکت می‌کند و آرمیچر مدارباز می‌باشد. مقدار بیشینه نیروی محرکه القایی موتور در شرایط مدارباز از رابطه (۴-۴۱) محاسبه می‌شود که در آن U_b سرعت سنکرون، Ψ_{PMd} شار پیوندی و τ گام قطب است و مقادیر آن‌ها در جدول (۴-۲) آورده شده است. در شکل (۴-۸) شکل موج نیروی محرکه القایی موتور و در شکل (۴-۹) طیف هارمونیک آن نشان داده شده است.

$$V_S = \frac{U_b \cdot \pi \cdot \Psi_{PMd}}{\tau} \quad (4-41)$$



شکل (۴-۸): شکل موج نیروی محرکه القایی مدارباز موتور



شکل (۴-۹): طیف هارمونیک نیروی محرکه القایی مدارباز موتور

به کمک رابطه (۴-۴) اندازه نیروی محرکه القایی مدارباز ۱۴۲/۳ ولت و با توجه به شکل (۴-۹)

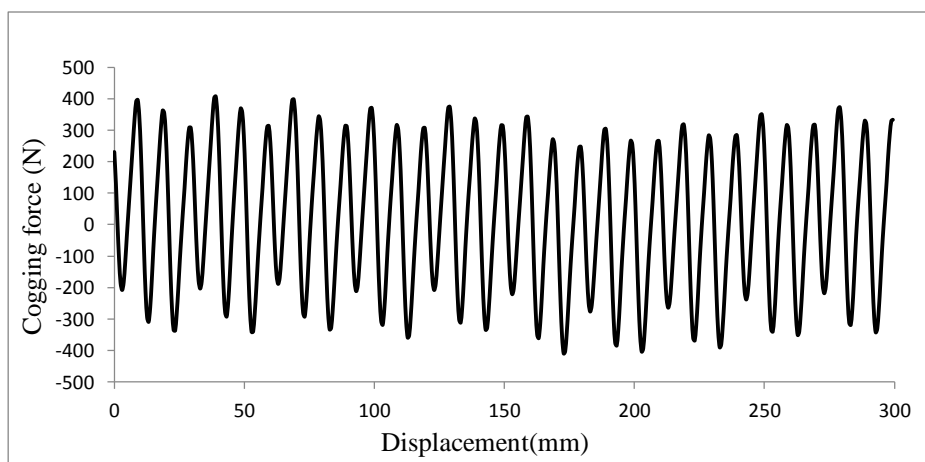
دامنه مؤلفه اصلی هارمونیک نیروی محرکه القایی موتور شبیه‌سازی شده ۱۴۴/۶ ولت می‌باشد.

در شکل (۴-۱۰) نیرو در حالت مدارباز نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً بیان شد این نیرو

نیروی دندانه‌ای نام دارد و علت اصلی ایجاد آن در ماشین‌های خطی سنکرون آهنربای دائم شیاردار،

عکس‌العمل آهنرباها و شیارهای هسته آرمیچر و همچنین اثرات انتهایی ماشین، به علت طول محدود

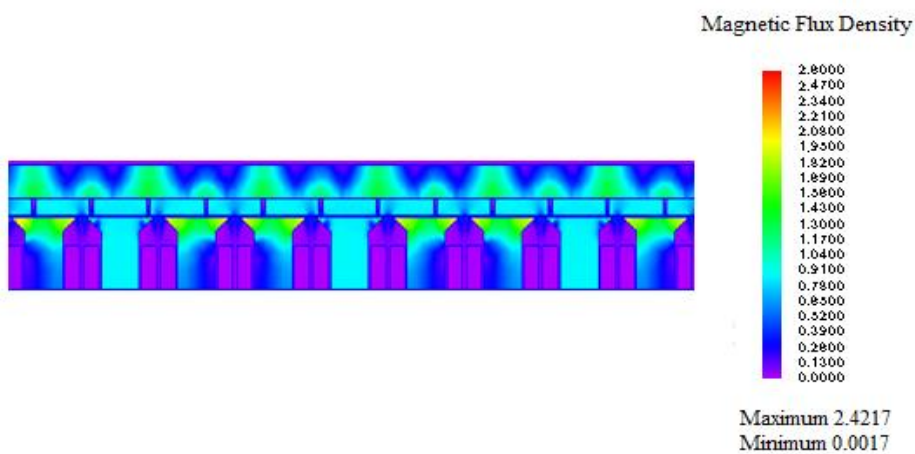
ماشین، می‌باشد. مقدار بیشینه نیروی دندانه‌ای در شکل (۴-۱۰) ۴۴۷/۰۷ نیوتن می‌باشد.



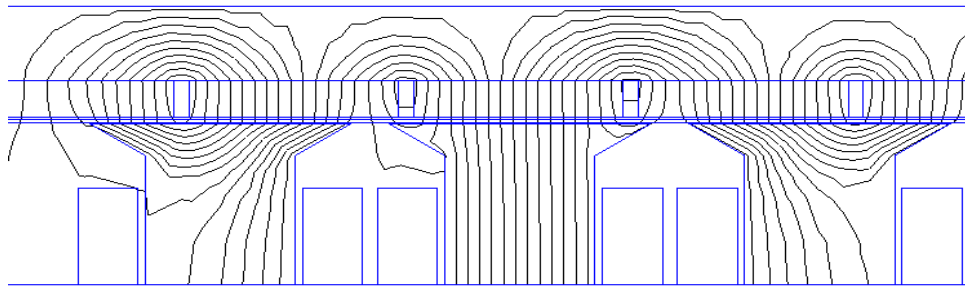
شکل (۴-۱۰): شکل موج نیروی دندانه‌ای

شکل‌های (۴-۱۱) و (۴-۱۲) به ترتیب توزیع چگالی شار مغناطیسی و خطوط شار مغناطیسی

موتور را در نشان می‌دهند.

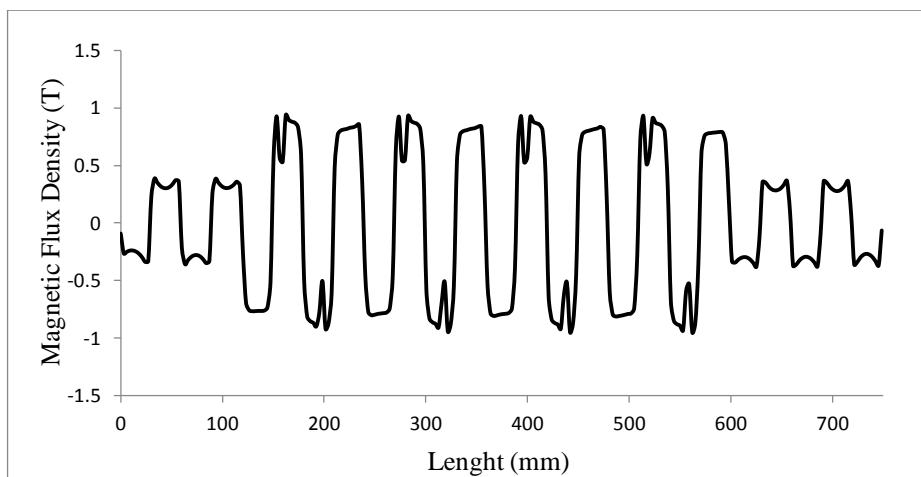


شکل (۴-۱۱): توزیع چگالی شار مغناطیسی موتور

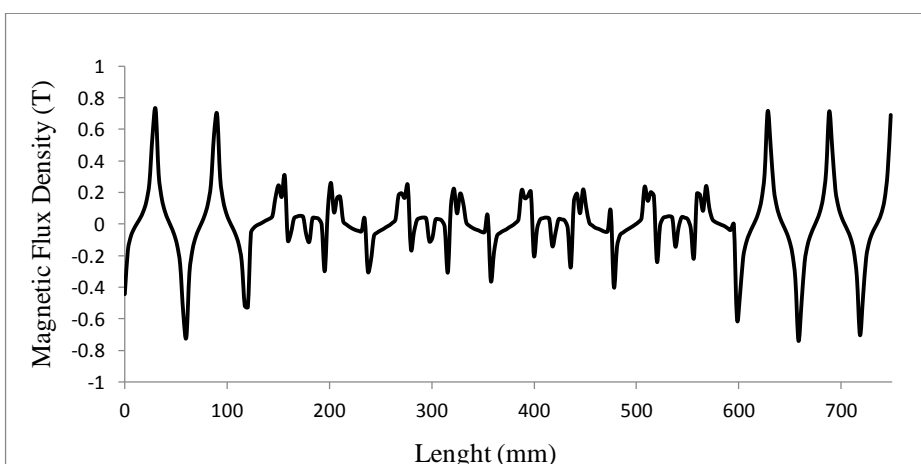


شکل (۴-۱۲): خطوط چگالی شار مغناطیسی موتور

در شکل‌های (۴-۱۳) و (۴-۱۴) به ترتیب مؤلفه y و x چگالی شار مغناطیسی آهنربا در وسط فاصله هوایی نشان داده شده است.



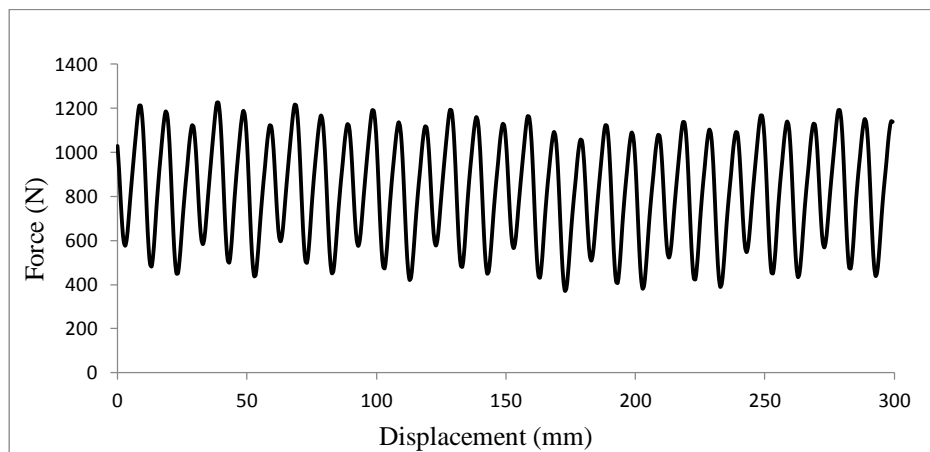
شکل (۴-۱۳): مؤلفه y چگالی شار آهنربا در وسط فاصله هوایی



شکل (۴-۱۴): مؤلفه x چگالی شار آهنربا در وسط فاصله هوایی

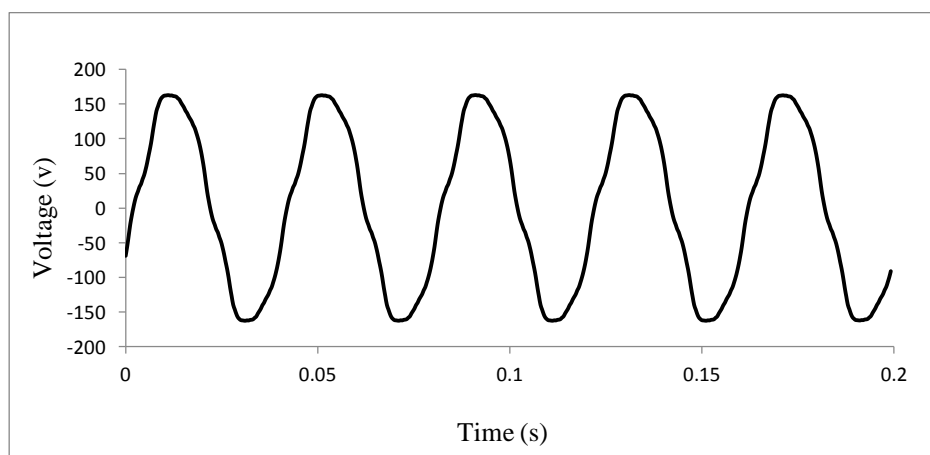
۴-۴-۲- بررسی عملکرد موتور در شرایط نامی

کمیت‌های الکتریکی موتور مورد مطالعه در شرایط نامی در جدول (۳-۴) خلاصه شده است. در این قسمت نیز عملکرد موتور شبیه‌سازی شده در شرایط نامی تحلیل و با مقادیر به دست آمده در جدول (۳-۴) مقایسه می‌شود. ابتدا با قرار دادن منبع جریان با دامنه $5/6$ آمپر، که مقدار نامی جریان می‌باشد، در اولیه و تغییر زاویه جریان سعی می‌شود تا مقدار متوسط نیروی خروجی به مقدار 800 نیوتن نزدیک شود. در شکل (۴-۱۵) شکل موج نیروی خروجی در شرایط نامی نشان داده شده است که مقدار متوسط آن 825 نیوتن می‌باشد.



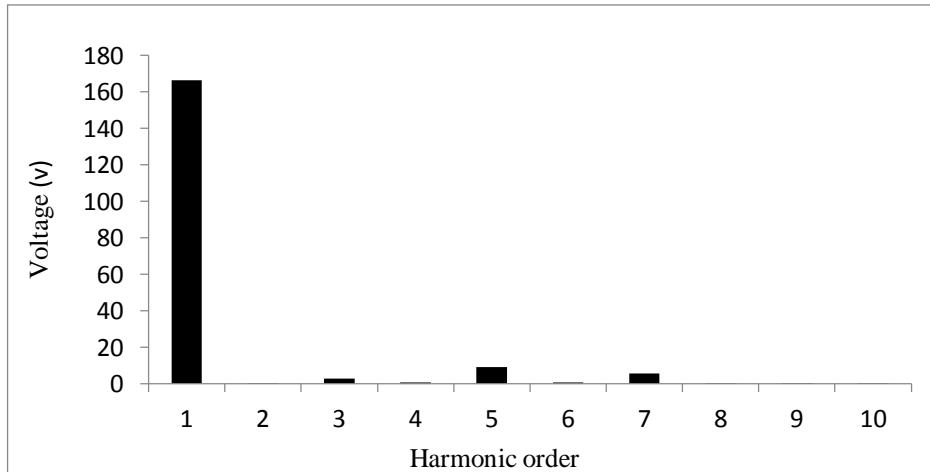
شکل (۴-۱۵): شکل موج نیروی خروجی در شرایط نامی

در شکل (۴-۱۶) شکل موج ولتاژ و در شکل (۴-۱۷) طیف هارمونیک آن نشان داده شده است.



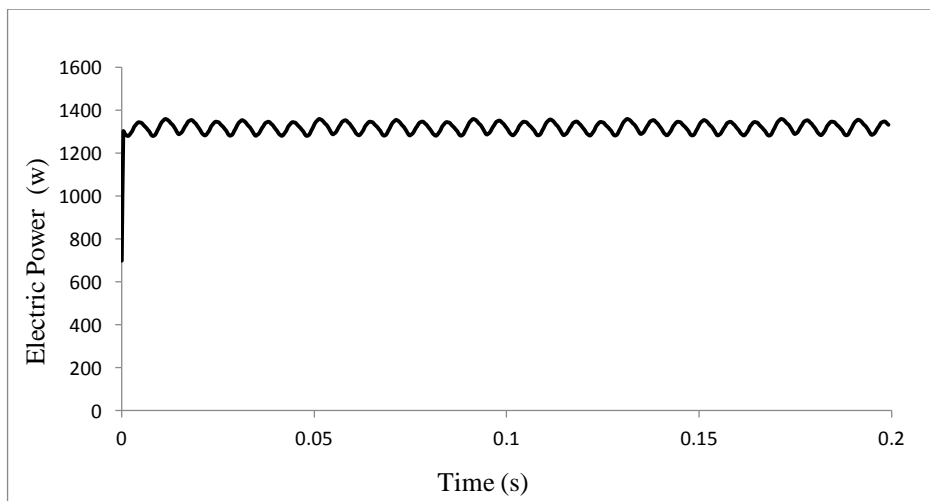
شکل (۴-۱۶): شکل موج ولتاژ دو سر منبع جریان در شرایط نامی

طبق جدول (۳-۴) مقدار بیشینه ولتاژ در شرایط نامی ۱۶۶/۸ ولت می‌باشد. در شکل (۴-۱۷) مؤلفه اصلی هارمونیک ولتاژ موتور شبیه‌سازی شده در شرایط نامی برابر ۱۶۶/۴ ولت است که به مقدار محاسبه شده بسیار نزدیک می‌باشد.



شکل (۴-۱۷): طیف هارمونیکی شکل موج ولتاژ دو سر منبع جریان در شرایط نامی

در ادامه توان ورودی و توان خروجی ماشین در شرایط نامی بررسی می‌شود. در شکل (۴-۱۸) توان ورودی نشان داده شده است که مقدار متوسط آن ۱۳۱۷/۰ وات می‌باشد.



شکل (۴-۱۸): توان خروجی موتور در شرایط نامی

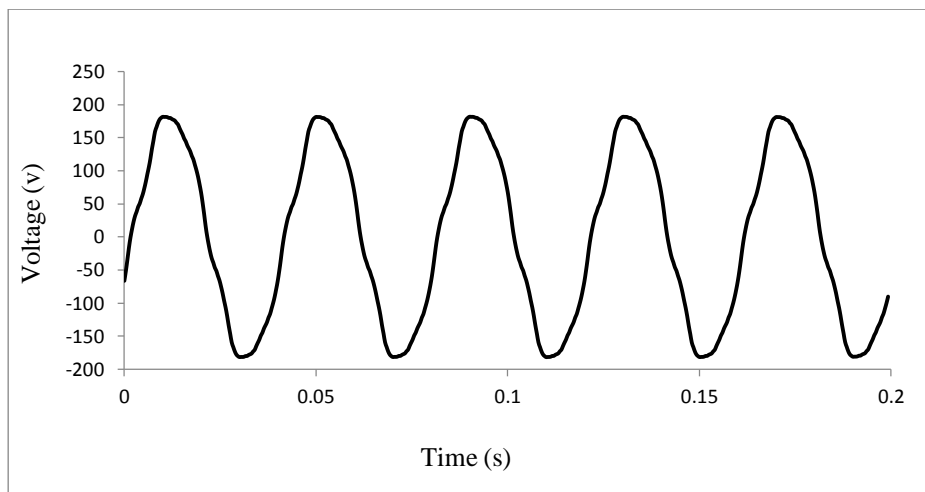
توان خروجی از رابطه (۴-۴۲) به دست می‌آید:

$$P_{out} = F_{xn} \cdot U_b \quad (۴۲-۴)$$

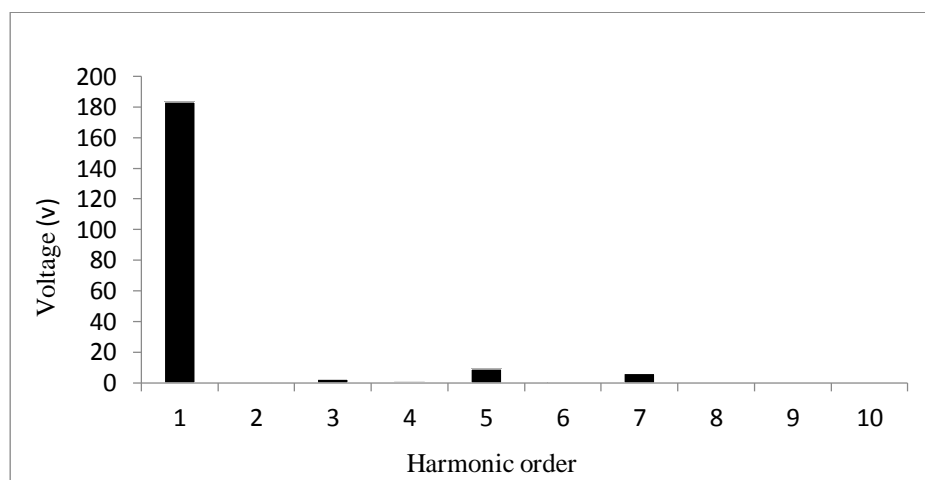
طبق این رابطه توان خروجی $1237/5$ وات می‌شود که طبق جدول (۳-۴) مقدار نامی آن 1200 وات می‌باشد.

۴-۴-۳- بررسی عملکرد موتور در شرایط بیشینه

در شرایط بیشینه جریان آرمیچر $8/4$ آمپر است که $1/5$ برابر جریان نامی می‌باشد و مقدار بیشینه ولتاژ در این شرایط، طبق رابطه (۳۱-۴)، 181.5 ولت محاسبه شده است. شکل (۱۹-۴) شکل موج ولتاژ دو سر منبع جریان را در شرایط بیشینه و شکل (۲۰-۴) طیف هارمونیک آن را نشان می‌دهد.

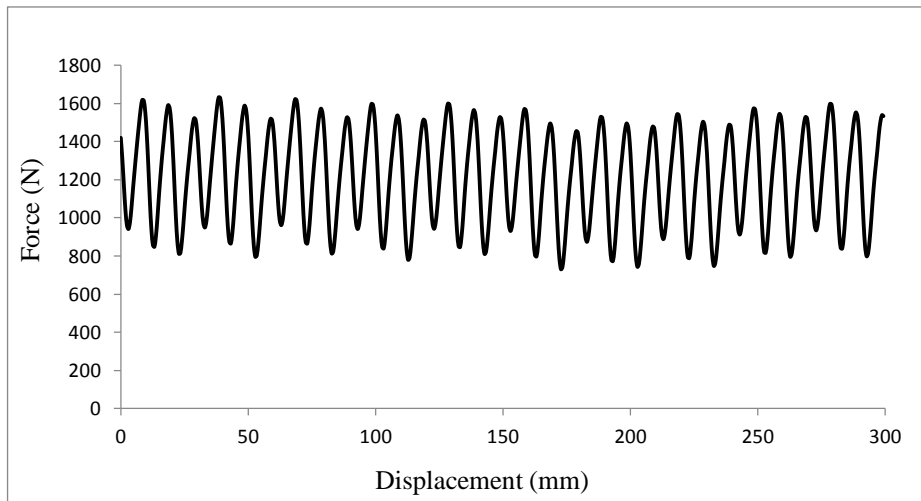


شکل (۱۹-۴): شکل موج ولتاژ دو سر منبع جریان در شرایط بیشینه



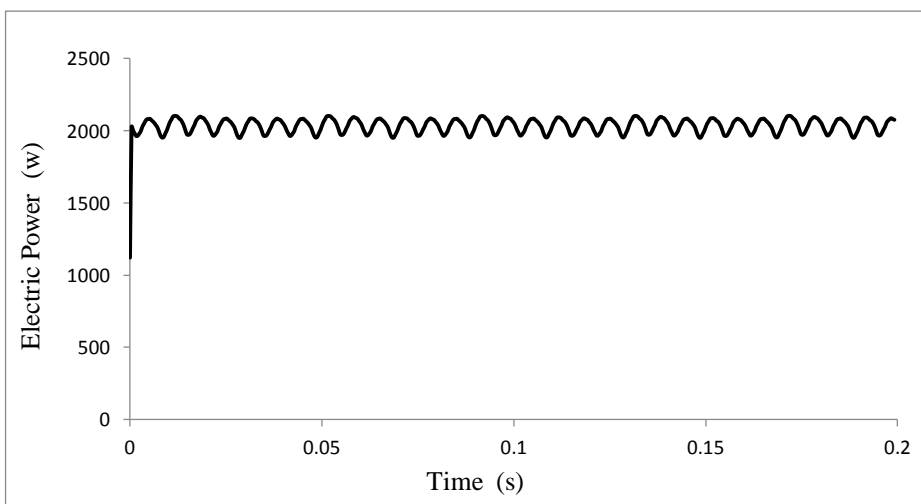
شکل (۲۰-۴): طیف هارمونیک شکل موج ولتاژ دو سر منبع جریان در شرایط بیشینه

همان‌طور که در شکل (۴-۲۰) مشخص شده است مقدار مؤلفه اصلی هارمونیک ولتاژ موتور در شرایط پیشینه ۱۸۳/۳ ولت می‌باشد. علاوه بر این مشابه شرایط نامی، با تغییر زاویه جریان، مقدار متوسط نیرو ۱۲۱۰/۵ نیوتن شده است که به مقدار پیشینه نیرو در جدول (۴-۳) بسیار نزدیک می‌باشد. در شکل (۴-۲۱) شکل موج نیرو نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۱): شکل موج نیرو در شرایط پیشینه

شکل (۴-۲۲) شکل موج توان ورودی را در شرایط پیشینه نشان می‌دهد که مقدار متوسط آن ۲۰۳۰.۸ وات می‌باشد.



شکل (۴-۲۲): شکل موج توان ورودی در شرایط پیشینه

با استفاده از رابطه (۴-۴۲)، مقدار توان خروجی ۱۸۱۷/۷۵ وات به دست می‌آید که مقدار محاسبه‌شده آن در جدول (۴-۳) ۱۸۰۰ وات می‌باشد.

۴-۵- جمع‌بندی

در این فصل ابتدا ماشین مورد مطالعه معرفی گردید. به این منظور فرآیند طراحی موتور بیان و سپس مشخصات مداری آن به دست آمد. سرانجام نحوه شبیه‌سازی ماشین نمونه در نرم‌افزار اجزاء محدود بررسی شده و جهت اطمینان از صحت عملکرد ماشین، عملکرد آن در شرایط مدارباز، نامی و پیشینه تحلیل گردیده است. همچنین کمیت‌های الکتریکی به دست آمده با مقادیر محاسبه‌شده مقایسه شده است.

فصل پنجم

شبیه‌سازی موتور سنکرون

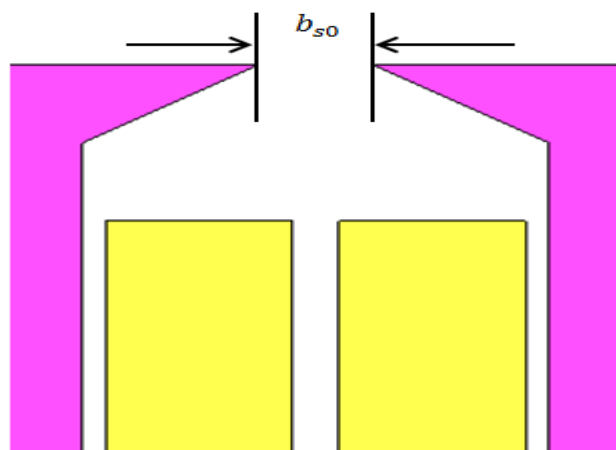
مغناطیس دائم نمونه

۵-۱- مقدمه

پس از معرفی و بررسی عملکرد ماشین مورد مطالعه در فصل چهارم، در این فصل روش‌های کاهش نیروی دندان‌های بر روی ماشین نمونه پیاده‌سازی خواهد شد. همان‌طور که در فصل سوم بیان شد این روش‌ها شامل تغییر عرض دهانه شیار، تغییر ابعاد آهنربا و پخ کردن نوک دندان‌ها می‌باشد. به این منظور ابتدا سعی می‌شود میزان حساسیت نیروی دندان‌های و در نتیجه رپل نیرو به تغییرات پارامترهای روش‌های مختلف بررسی شده و سپس روش ترکیبی بهینه‌ای برای کاهش مؤثرتر رپل نیروی ارائه شود.

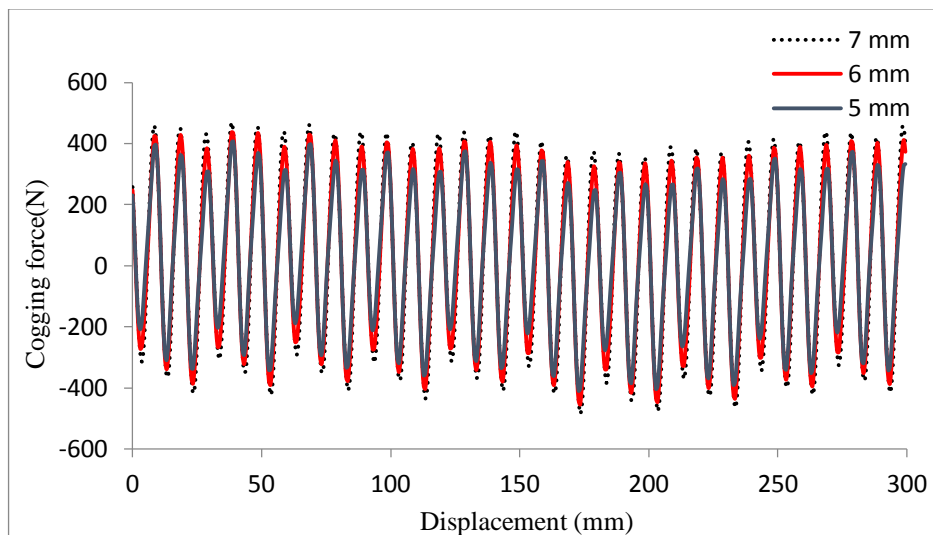
۵-۲- بررسی تغییر عرض دهانه شیار

همان‌طور که بیان شد نیروی دندان‌های به علت تغییر در تابع رلوکتانس فاصله هوایی در اثر شیارهای هسته آهنی به وجود می‌آید. در این قسمت میزان حساسیت نیروی دندان‌های نسبت به تغییر عرض دهانه شیار بررسی می‌گردد و با افزایش و کاهش عرض دهانه شیار، نیروی دندان‌های اندازه‌گیری می‌شود. عرض دهانه شیار اولیه در شکل (۵-۱) نشان داده شده است که مقدار آن برابر ۵ میلی‌متر می‌باشد.

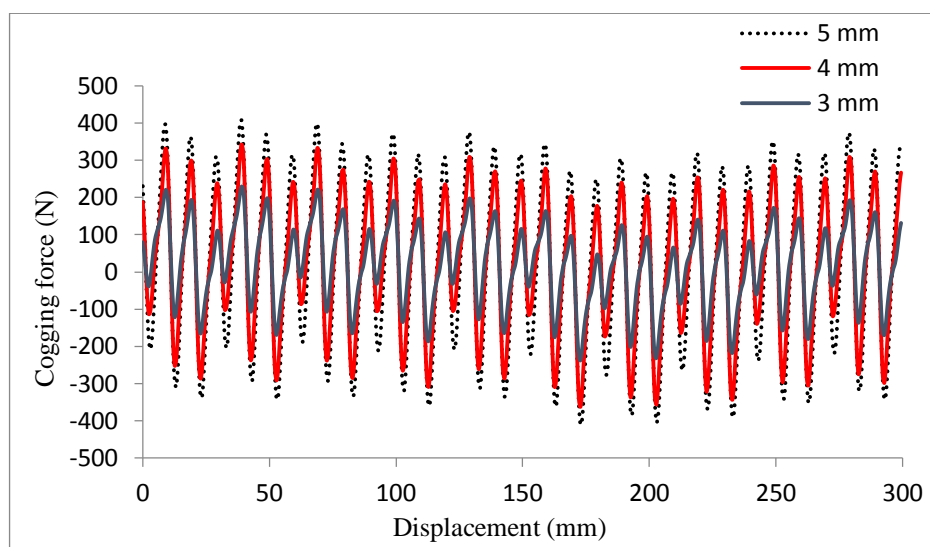


شکل (۵-۱): عرض دهانه شیار در ماشین نمونه

در شکل‌های (۲-۵) و (۳-۵) نیروی دندانه‌ای بر حسب جابجایی موتور به ازای مقادیر مختلف عرض دهانه شیار (b_{s0}) نشان داده شده است.



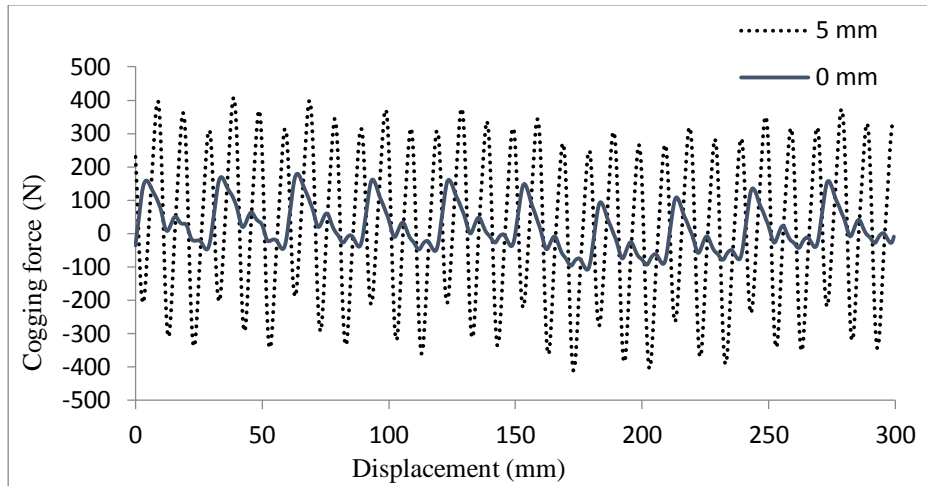
شکل (۲-۵): تغییرات نیروی دندانه‌ای نسبت به افزایش عرض دهانه شیار



شکل (۳-۵): تغییرات نیروی دندانه‌ای نسبت به کاهش عرض دهانه شیار

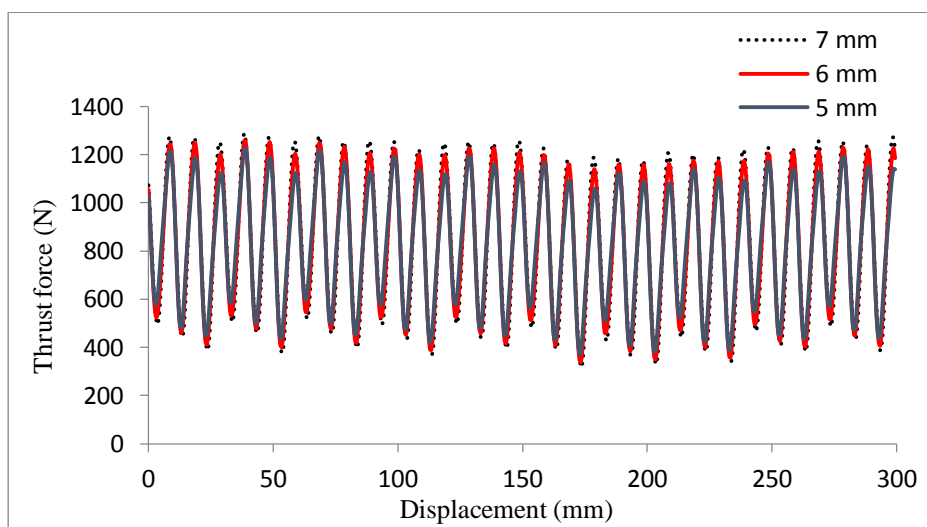
مقدار بیشینه نیروی دندانه‌ای در طراحی اولیه ماشین ۴۷۷/۷ نیوتن می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عرض دهانه شیار مقدار بیشینه نیروی دندانه‌ای افزایش و با کاهش آن مقدار بیشینه نیروی دندانه‌ای کاهش می‌یابد؛ بنابراین با بستن کامل دهانه شیار نیروی دندانه‌ای کاهش چشمگیری پیدا خواهد کرد. شکل (۴-۵) نیروی دندانه‌ای موتور با شیارهای بسته را با موتور اولیه

مقایسه کرده است همان طور که مشاهده می شود مقدار بیشینه نیروی دندانه‌ای به ۱۹۳.۱۹ نیوتن کاهش می یابد.

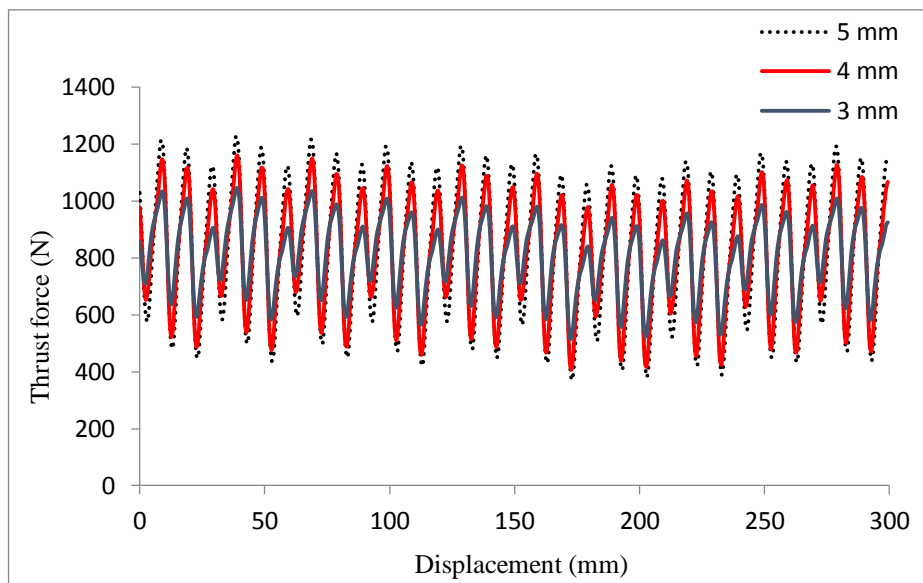


شکل (۴-۵): نیروی دندانه‌ای موتور با شیارهای بسته

با تغییر عرض دهانه شیار علاوه بر نیروی دندانه‌ای دیگر کمیت‌های موتور از قبیل نیروی خروجی، بازده، چگالی توان، ضریب توان نیز تغییر می کند. در ادامه تغییرات هر یک از این کمیت‌ها بررسی می گردد. در شکل‌های (۵-۵) و (۶-۵) تغییرات نیروی خروجی موتور بر حسب مقادیر مختلف عرض دهانه شیار رسم شده است. با افزایش عرض دهانه شیار میانگین نیروی خروجی افزایش و با کاهش آن میانگین نیروی خروجی کاهش می یابد.

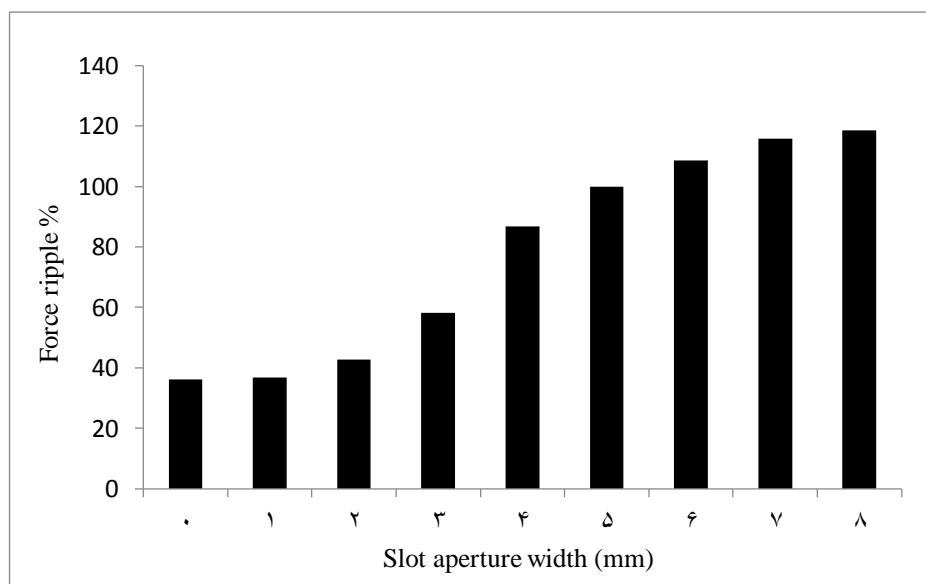


شکل (۵-۵): تغییرات نیروی خروجی نسبت به افزایش عرض دهانه شیار



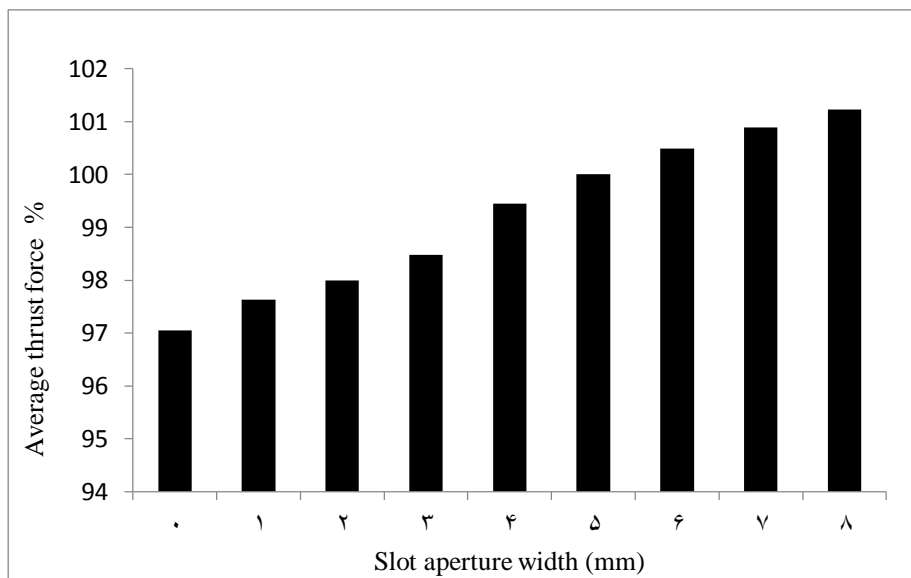
شکل (۵-۶): تغییرات نیروی خروجی نسبت به کاهش عرض دهانه شیار

برای درک بهتر تغییرات نیروی دندانه‌ای، نمودار ستونی شکل (۵-۷) تغییرات نیروی دندانه‌ای را برحسب تغییر عرض دهانه شیار نشان می‌دهد. حساسیت نیروی میانگین به ازای مقادیر مختلف دهانه شیار نیز در قالب نمودار ستونی در شکل (۵-۸) نشان داده شده است.



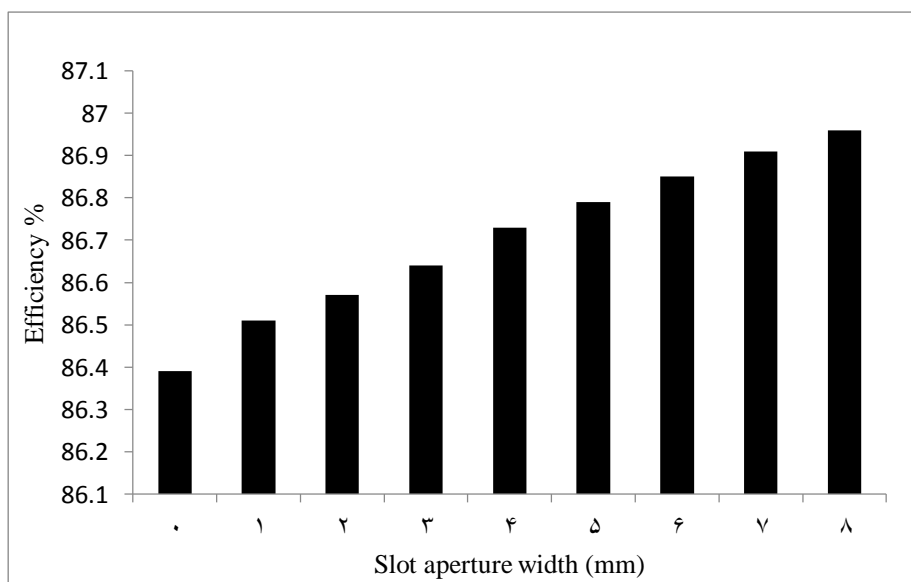
شکل (۵-۷): تغییرات ریبیل نیرو نسبت به تغییر عرض دهانه شیار

با افزایش عرض دهانه شیار ریبیل نیرو افزایش می‌یابد و کمترین ریبیل نیرو مربوط به عرض صفر میلی‌متر یا شیار بسته می‌باشد.



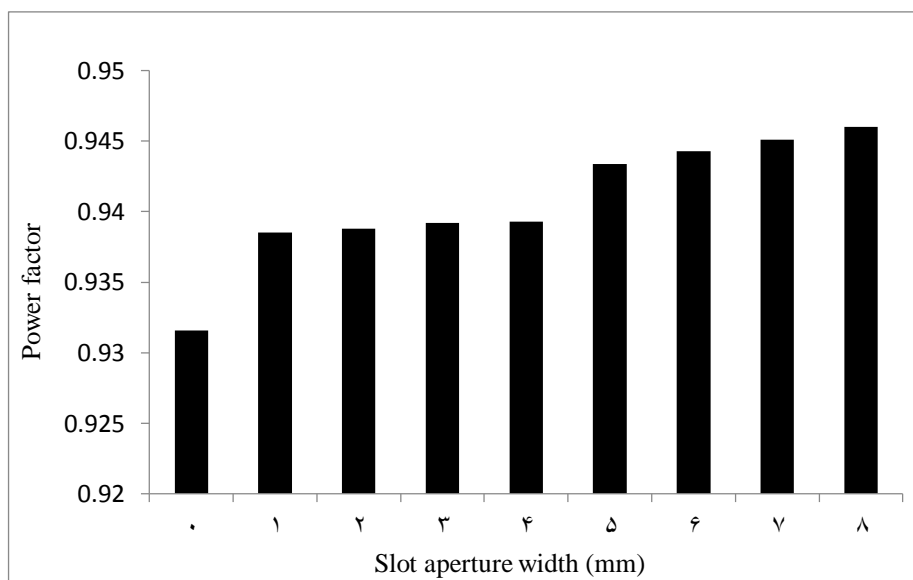
شکل (۵-۸): تغییرات نیروی میانگین نسبت به تغییر عرض دهانه شیار

شکل (۵-۸) نشان می‌دهد که در ماشین با شیارهای بسته نیروی میانگین ۰.۳٪ کاهش می‌یابد که مطلوب نمی‌باشد. در شکل‌های (۵-۹) و (۵-۱۰) تغییرات بازده و ضریب توان نسبت به افزایش عرض دهانه شیار نشان داده شده است.



شکل (۵-۹): تغییرات بازده نسبت به تغییر عرض دهانه شیار

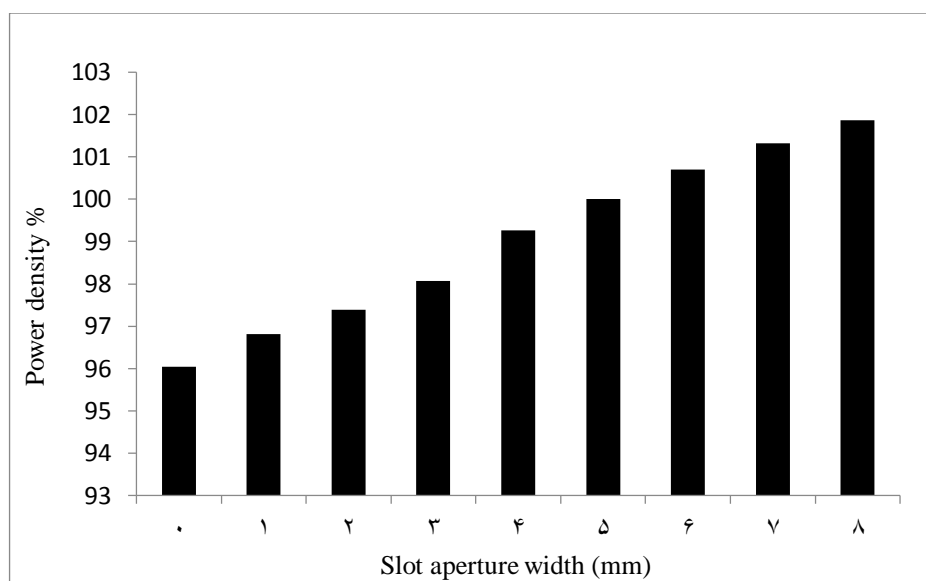
سرعت ماشین ثابت و برابر $1/5 \text{ m/s}$ می‌باشد؛ بنابراین با کاهش نیروی خروجی، توان خروجی و در نتیجه بازده کاهش می‌یابد.



شکل (۱۰-۵): تغییرات ضریب توان نسبت به تغییر عرض دهانه شیار

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که حساسیت ضریب توان نسبت به تغییر عرض دهانه شیار بسیار

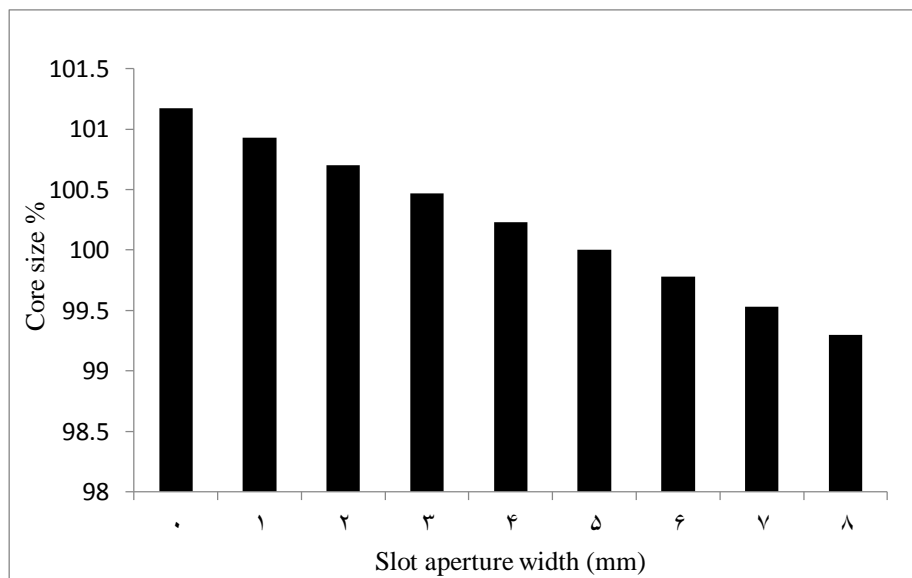
کم می‌باشد. در شکل (۱۱-۵) تغییرات چگالی توان نشان داده شده است.



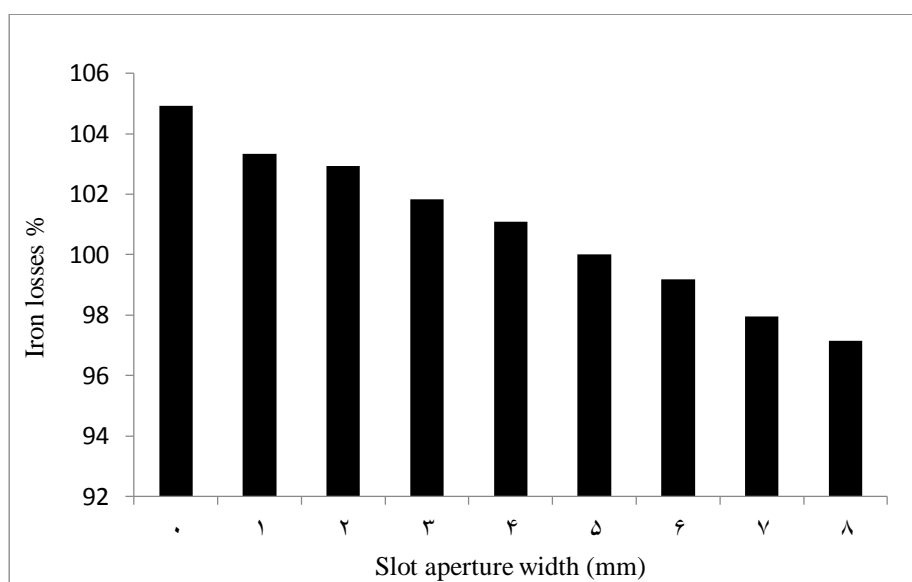
شکل (۱۱-۵): تغییرات چگالی توان نسبت به تغییر عرض دهانه شیار

با کاهش عرض دهانه شیار حجم ماشین ثابت و توان خروجی کاهش می‌یابد و در نتیجه چگالی

توان کم می‌شود. شکل‌های (۱۲-۵) و (۱۳-۵) تغییرات حجم و تلفات هسته را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۲): تغییرات حجم هسته نسبت به تغییر عرض دهانه شیار



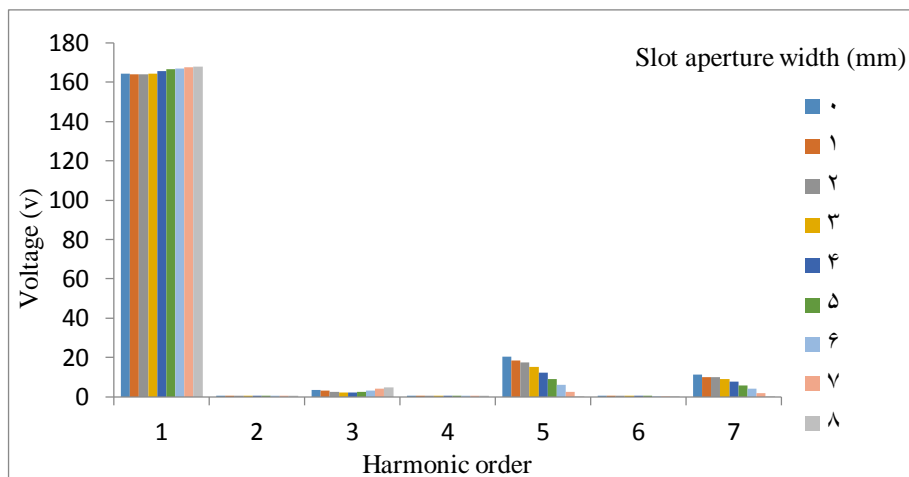
شکل (۵-۱۳): تغییرات تلفات هسته نسبت به تغییر عرض دهانه شیار

با کاهش عرض دهانه شیار تلفات و حجم هسته افزایش می‌یابد.

شکل (۵-۱۴) تحلیل هارمونیک ولتاژ دو سر منبع جریان را نشان می‌دهد. در این شکل هفت

هارمونیک اول ولتاژ نشان داده شده است. با افزایش عرض دهانه شیار مؤلفه اصلی هارمونیک ولتاژ

افزایش و مؤلفه‌های پنجم و هفتم ولتاژ کاهش می‌یابد.

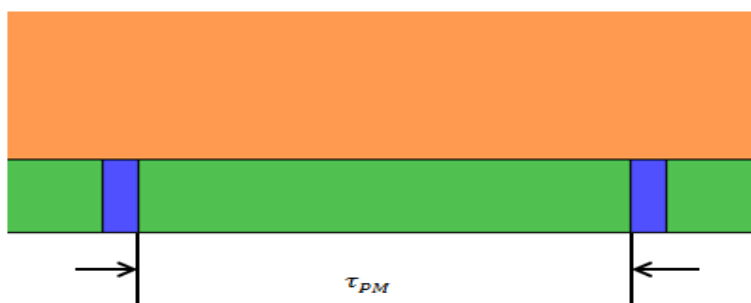


شکل (۵-۱۴): تحلیل هارمونیک ولتاژ دو سر منبع جریان

با مقایسه نمودارهای بالا این نتیجه به دست می‌آید که کاهش عرض دهانه شیار یک روش بسیار مؤثر در کاهش نیروی دندانه‌ای است، به طوری که با بستن کامل دهانه شیار دامنه نیروی دندانه‌ای به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. مزیت کاهش عرض دهانه شیار این است که این روش با تغییر ناچیزی در کمیت‌های ماشین، از قبیل بازده و ضریب توان نیروی دندانه‌ای را کاهش می‌دهد.

۵-۳- بررسی تغییر عرض آهنربا

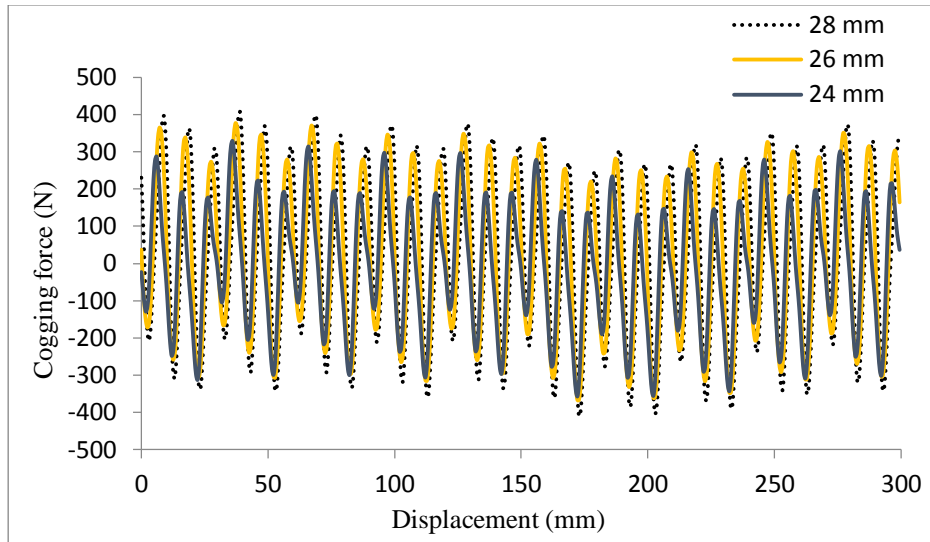
تغییر عرض آهنربا نیز یک روش مؤثر جهت کاهش نیروی دندانه‌ای است. با انتخاب عرض مناسب می‌توان نیروی وارد شده به دیواره‌های شیار توسط لبه‌های آهنربا را خنثی کرد. عرض آهنربا در طراحی اولیه ماشین مورد مطالعه ۲۸ میلی‌متر می‌باشد که در شکل (۵-۱۵) نشان داده شده است. در این بخش با تغییر عرض آهنربا نیروی دندانه‌ای و سایر کمیت‌های موتور بررسی می‌گردد.



شکل (۵-۱۵): عرض آهنربا در ماشین نمونه

در شکل (۵-۱۶) نیروی دندانه‌ای برحسب جابجایی موتور به ازای مقادیر مختلف عرض آهنربا

(τ_{PM}) نشان داده شده است.

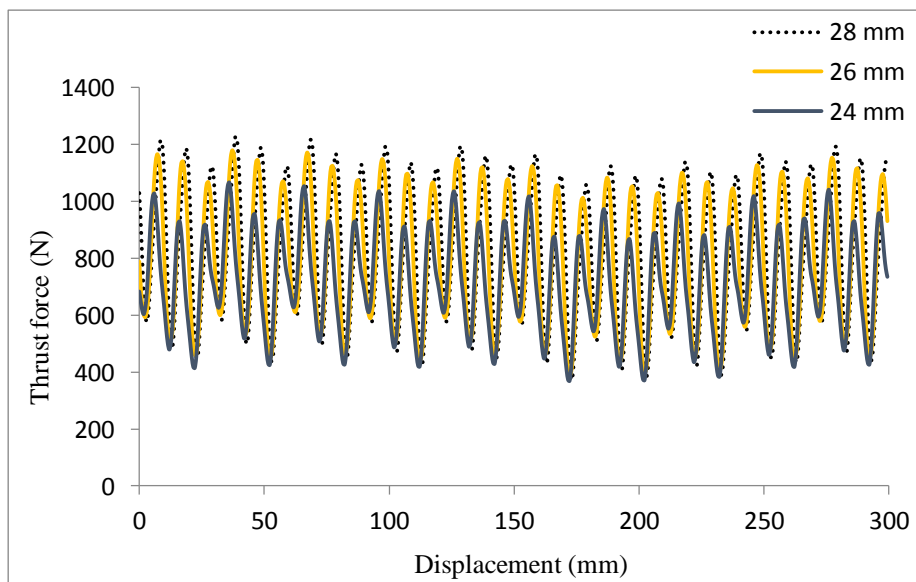


شکل (۵-۱۶): تغییرات نیروی دندانه‌ای نسبت به تغییر عرض آهنربا

با کاهش عرض آهنربا نیروی دندانه‌ای کاهش می‌یابد. در شکل (۵-۱۷) تغییرات نیروی خروجی

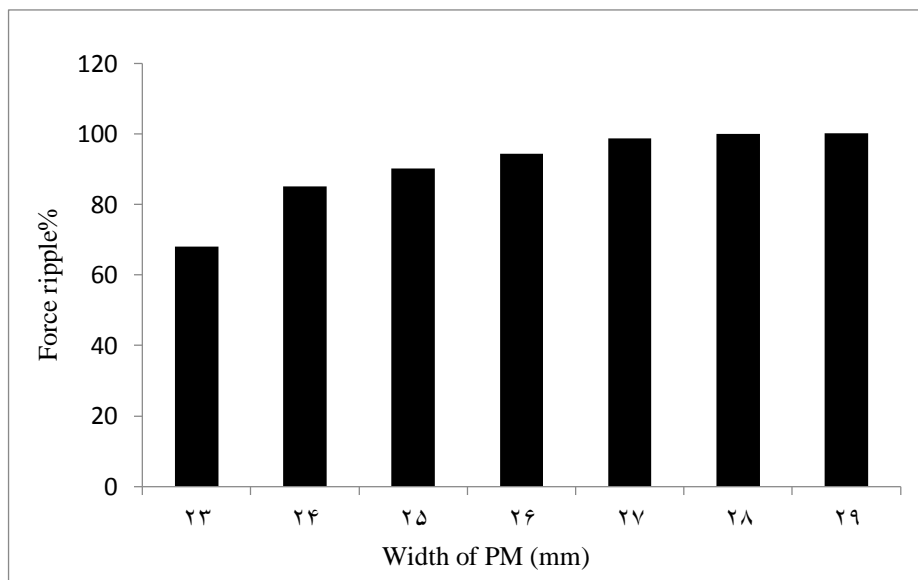
موتور برحسب مقادیر مختلف عرض آهنربا رسم شده است، که مشاهده می‌شود با کاهش عرض آهنربا

میانگین نیروی خروجی نیز کاهش می‌یابد.

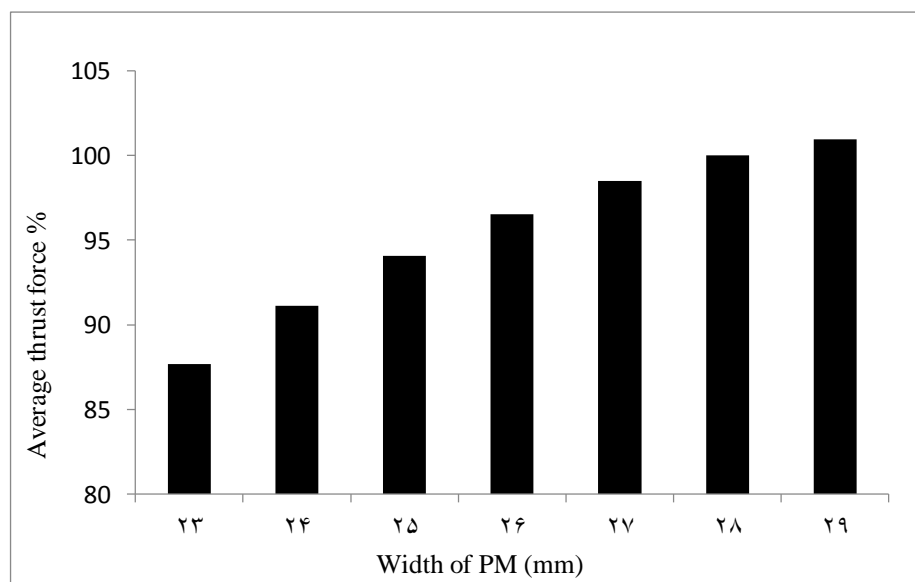


شکل (۵-۱۷): تغییرات نیروی خروجی نسبت به تغییر عرض آهنربا

مشابه قسمت قبل برای درک بهتر تغییرات نیروی دندانهای، نمودار ستونی شکل (۵-۱۸) تغییرات نیروی دندانهای را برحسب تغییر عرض آهنربا نشان می‌دهد. حساسیت نیروی میانگین به ازای مقادیر مختلف عرض آهنربا نیز در قالب نمودار ستونی در شکل (۵-۱۹) نشان داده شده است.



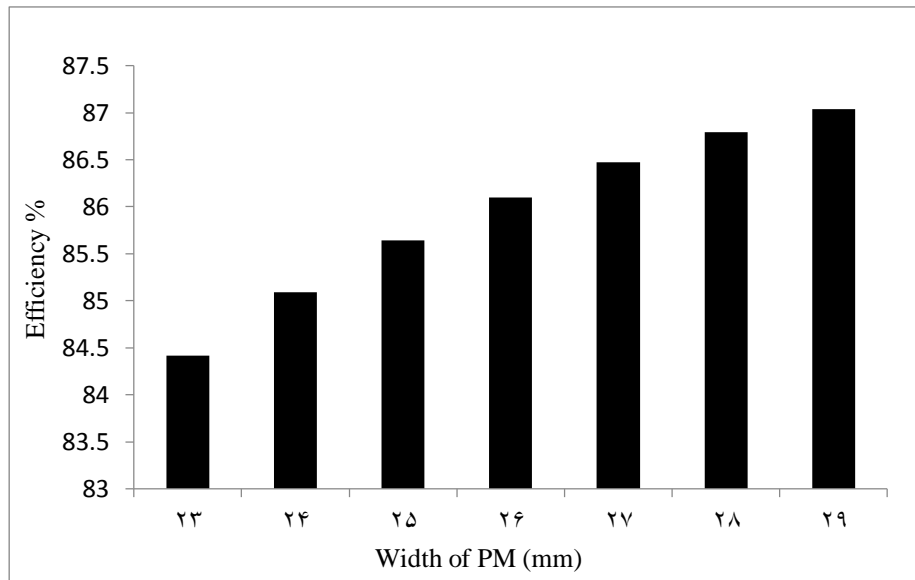
شکل (۵-۱۸): تغییرات ریپل نیرو نسبت به تغییر عرض آهنربا



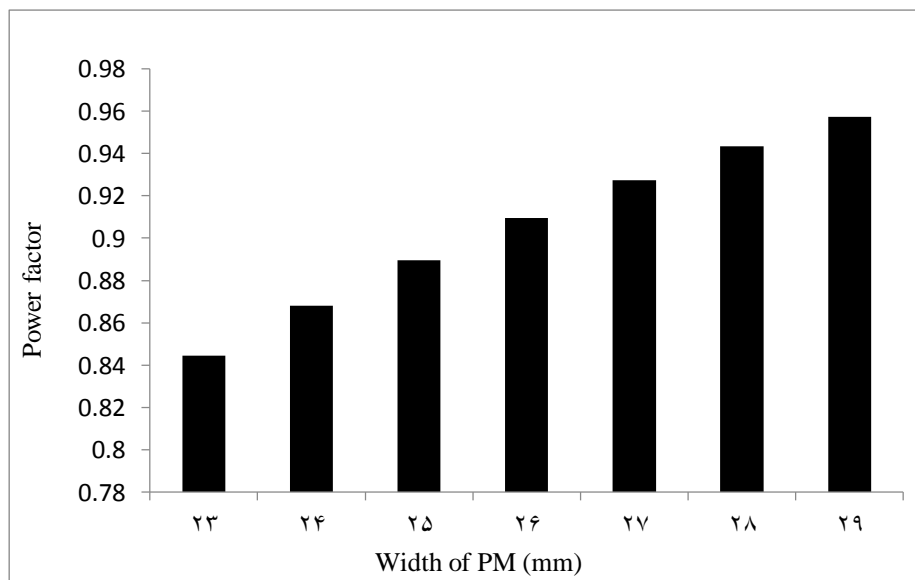
شکل (۵-۱۹): تغییرات نیروی میانگین نسبت به تغییر عرض آهنربا

کمترین نیروی دندانهای و همچنین کمترین نیروی خروجی مربوط به عرض آهنربا ۲۳ میلی‌متر می‌باشد. با توجه باینکه گام قطب در ماشین نمونه ۳۰ میلی‌متر می‌باشد، افزایش عرض آهنربا بیش از

۲۹ میلی‌متر امکان‌پذیر نمی‌باشد. از طرفی با کاهش عرض آهنربا به کمتر از ۲۳ میلی‌متر عملکرد موتور به شدت تضعیف می‌شود. در شکل‌های (۲۰-۵) و (۲۱-۵) تغییرات بازده و ضریب توان نسبت به افزایش عرض آهنربا نشان داده شده است.



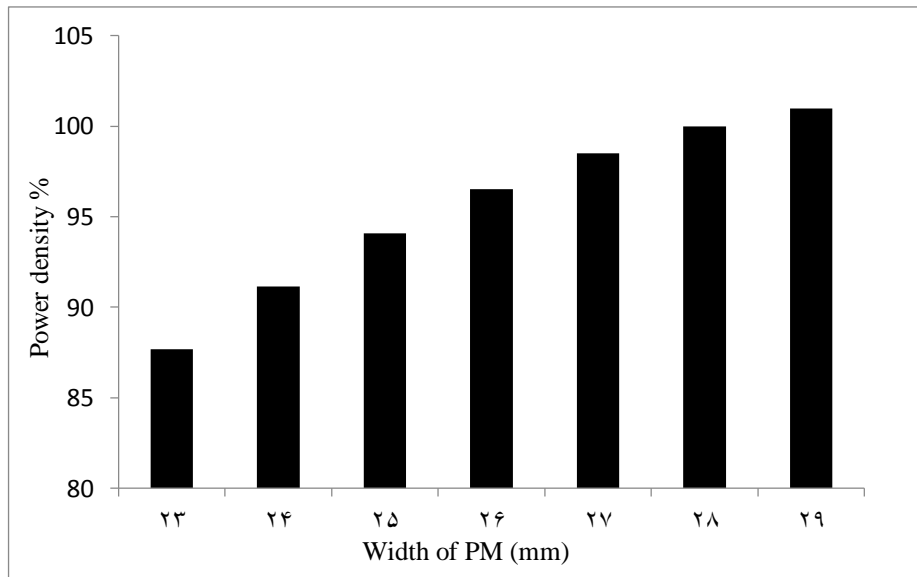
شکل (۲۰-۵): تغییرات بازده نسبت به تغییر عرض آهنربا



شکل (۲۱-۵): تغییرات ضریب توان نسبت به تغییر عرض آهنربا

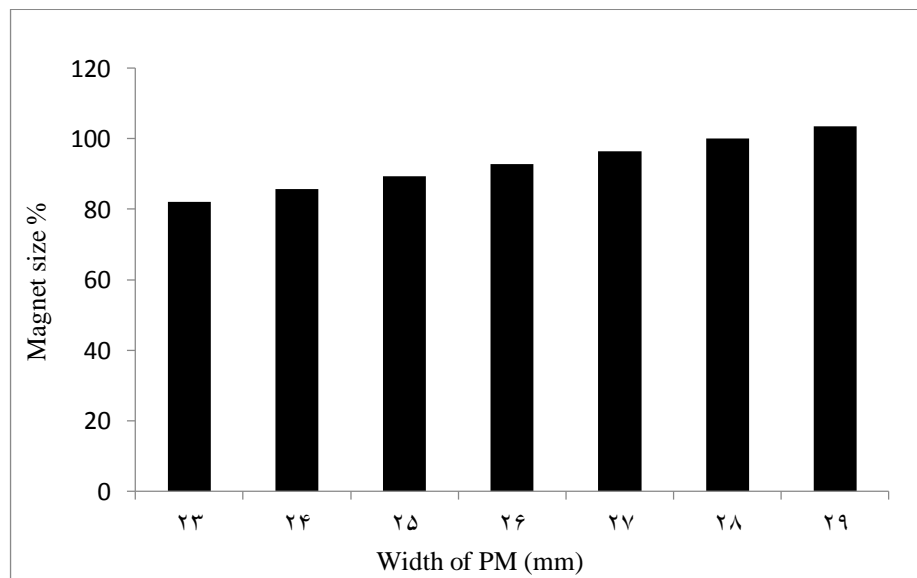
همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عرض آهنربا بازده و ضریب توان افزایش می‌یابند.

در شکل (۲۲-۵) تغییرات چگالی توان نشان داده شده است. با افزایش عرض آهنربا حجم ماشین ثابت می ماند ولی توان خروجی افزایش می یابد به همین دلیل با افزایش عرض آهنربا چگالی توان نیز افزایش می یابد.

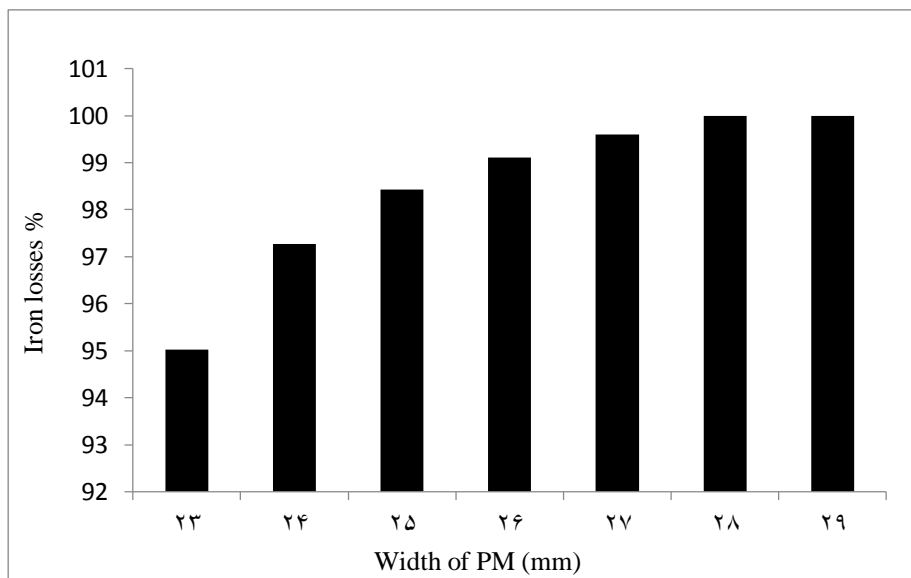


شکل (۲۲-۵): تغییرات چگالی توان نسبت به تغییر عرض آهنربا

شکل (۲۳-۵) و (۲۴-۵) تغییرات حجم آهنربا و تلفات هسته را نشان می دهد. با افزایش عرض آهنربا تلفات هسته و حجم آهنربا افزایش می یابد.

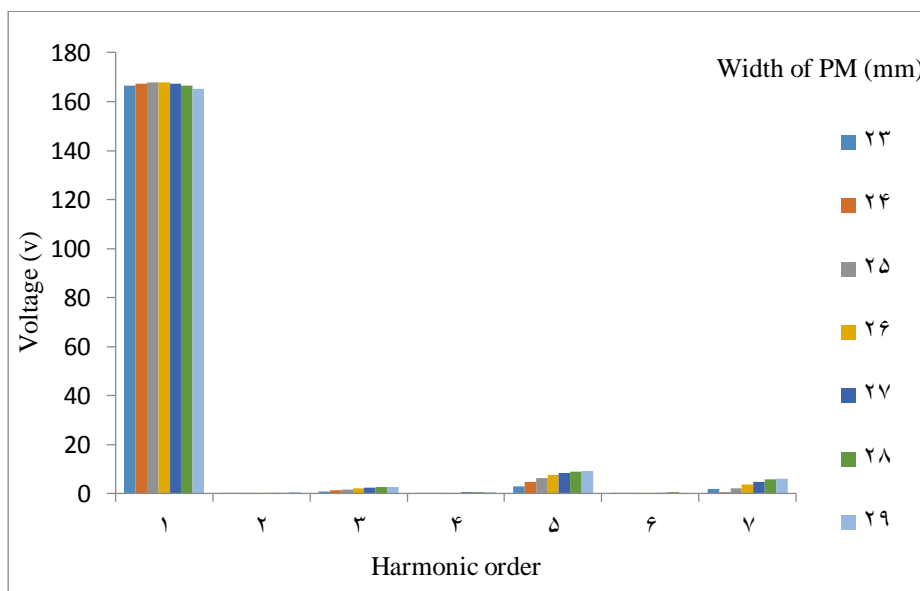


شکل (۲۳-۵): تغییرات حجم آهنربا نسبت به تغییر عرض آهنربا



شکل (۵-۲۴): تغییرات تلفات هسته نسبت به تغییر عرض آهنربا

مشابه قسمت قبل شکل (۵-۲۵) تحلیل هارمونیکی ولتاژ دو سر منبع جریان را نشان می‌دهد. در این شکل هفت هارمونیک اول ولتاژ نشان داده شده است. با افزایش عرض آهنربا مؤلفه‌های سوم، پنجم و هفتم ولتاژ افزایش می‌یابد.



شکل (۵-۲۵): تحلیل هارمونیکی ولتاژ دو سر منبع جریان

با مقایسه نمودارهای بالا این نتیجه به دست می‌آید تغییر عرض آهنربا یک روش نسبتاً مؤثر در کاهش نیروی دندانه‌ای می‌باشد. با استفاده از این روش در بهترین حالت نیروی دندانه‌ای ۳۲٪ کاهش

می‌یابد. تأثیرگذاری این روش نسبت به تغییر عرض دهانه شیار کمتر می‌باشد و همچنین این روش در مقایسه با تغییر عرض دهانه شیار، کمیت‌های موتور از قبیل بازده، نیروی خروجی، ضریب توان و چگالی توان را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد ولی از مزایای کاهش عرض آهنربا می‌توان به کاهش تلفات هسته، کاهش حجم آهنربا و کاهش مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ اشاره کرد.

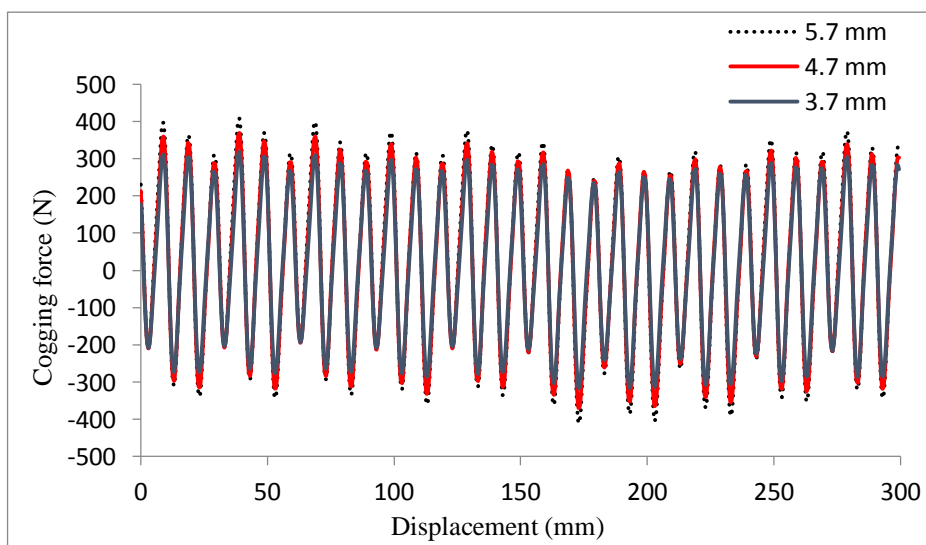
۴-۵- بررسی تغییر ارتفاع آهنربا

ارتفاع آهنربا نیز یک پارامتر مؤثر در کاهش نیروی دندانه‌ای می‌باشد. ارتفاع آهنربا در طراحی اولیه ماشین مورد مطالعه ۵/۷ میلی‌متر می‌باشد که در شکل (۲۶-۵) نشان داده شده است. در این بخش میزان حساسیت نیروی دندانه‌ای نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا بررسی می‌شود.



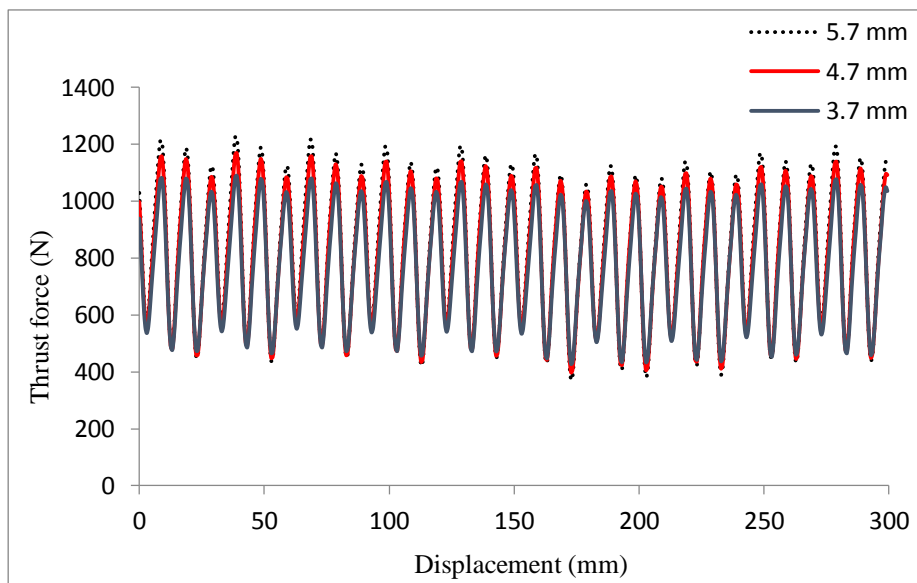
شکل (۲۶-۵): ارتفاع آهنربا در ماشین نمونه

در شکل (۲۷-۵) نیروی دندانه‌ای برحسب جابجایی موتور به ازای مقادیر مختلف ارتفاع آهنربا (h_m) نشان داده شده است.



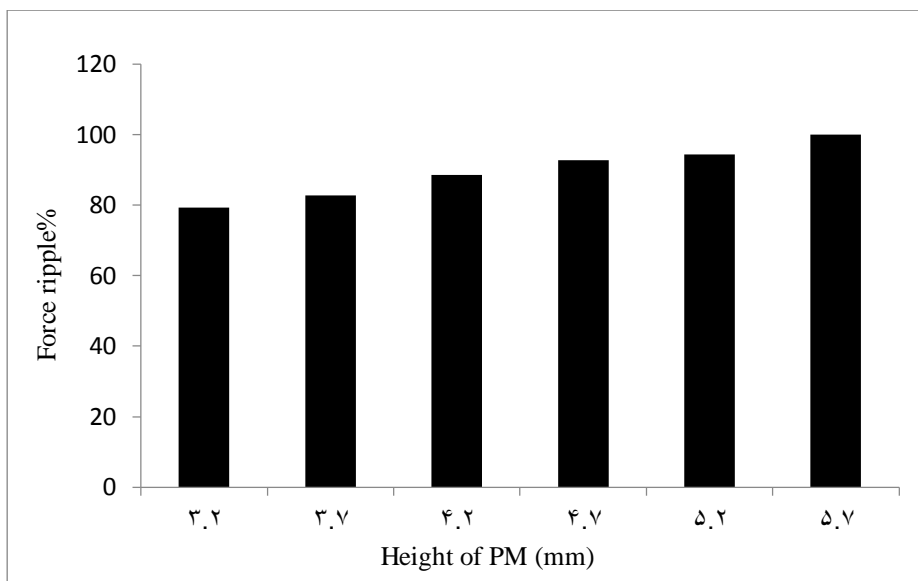
شکل (۲۷-۵): تغییرات نیروی دندانه‌ای نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا

همان‌طور که در شکل (۲۷-۵) مشاهده می‌شود با کاهش ارتفاع آهنربا نیروی دندان‌های کاهش می‌یابد. در شکل (۲۸-۵) تغییرات نیروی خروجی موتور برحسب مقادیر مختلف ارتفاع آهنربا رسم شده است و مشاهده می‌شود که با کاهش ارتفاع آهنربا میانگین نیروی خروجی نیز کاهش می‌یابد.

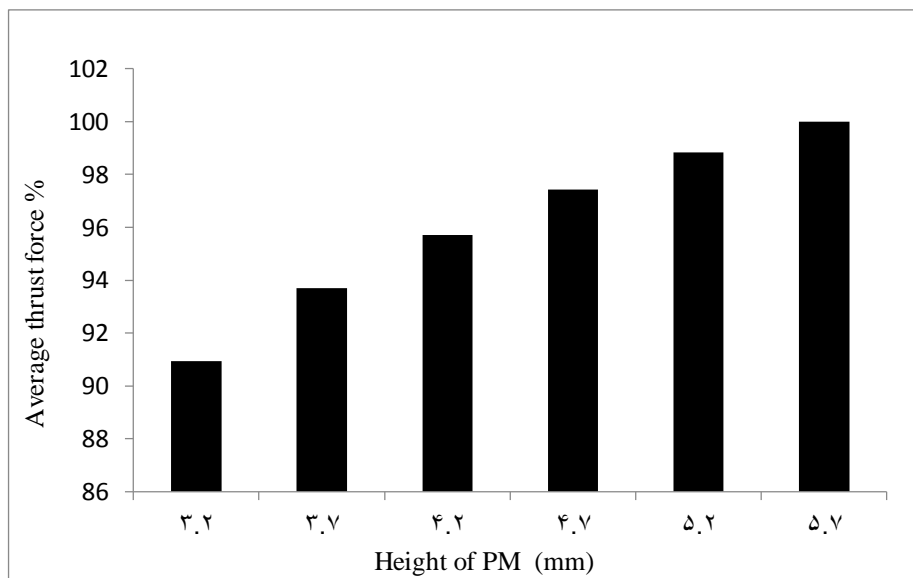


شکل (۲۸-۵): تغییرات نیروی خروجی نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا

نمودار ستونی شکل (۲۹-۵) تغییرات نیروی دندان‌های را برحسب تغییر ارتفاع آهنربا و شکل (۳۰-۵) تغییرات نیروی میانگین را به ازای مقادیر مختلف ارتفاع آهنربا نشان می‌دهند.

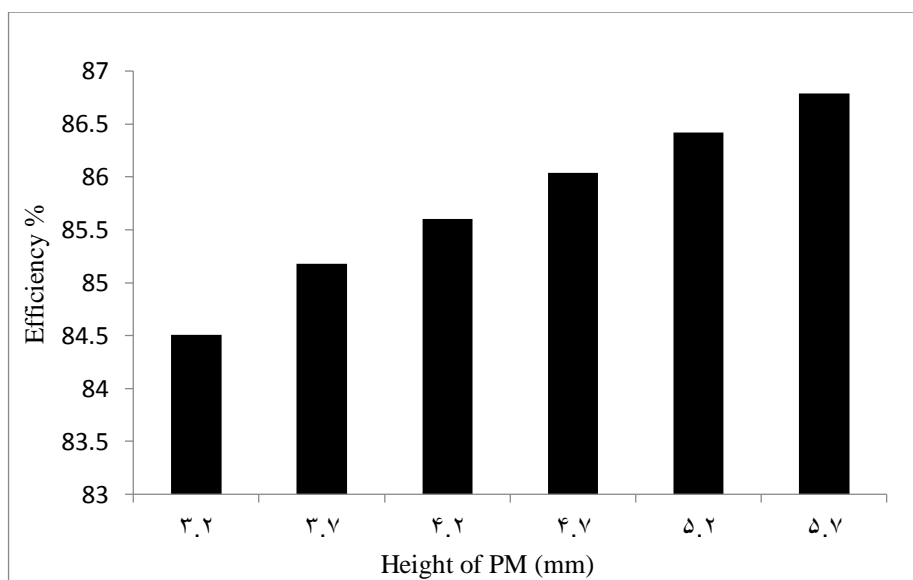


شکل (۲۹-۵): تغییرات ریبیل نیرو نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا

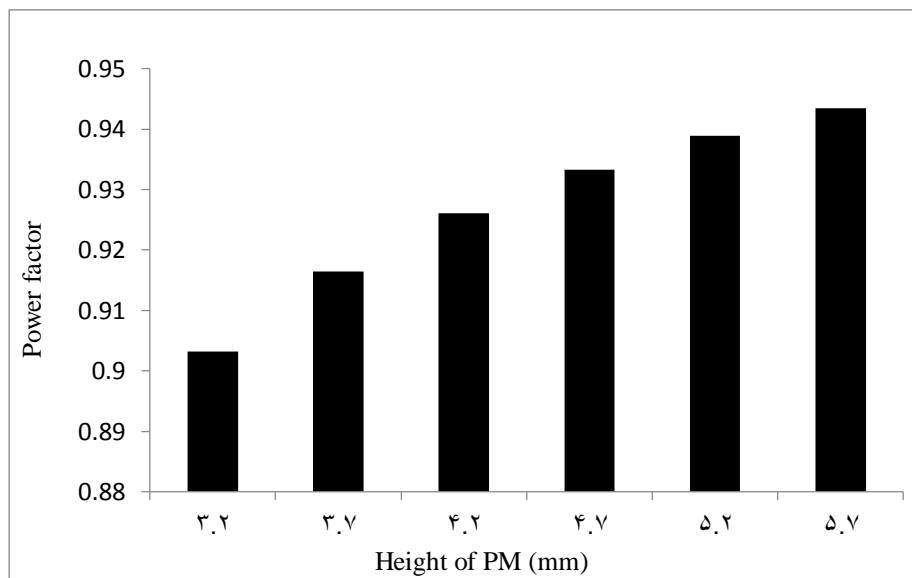


شکل (۳۰-۵): تغییرات نیروی میانگین نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا

با کاهش ارتفاع آهنربا به کمتر از $3/2$ میلی‌متر عملکرد ماشین به شدت تضعیف می‌شود. در شکل‌های (۳۱-۵) و (۳۲-۵) تغییرات بازده و ضریب توان نسبت به افزایش ارتفاع آهنربا نشان داده شده است. با افزایش ارتفاع آهنربا بازده و ضریب توان افزایش می‌یابند.

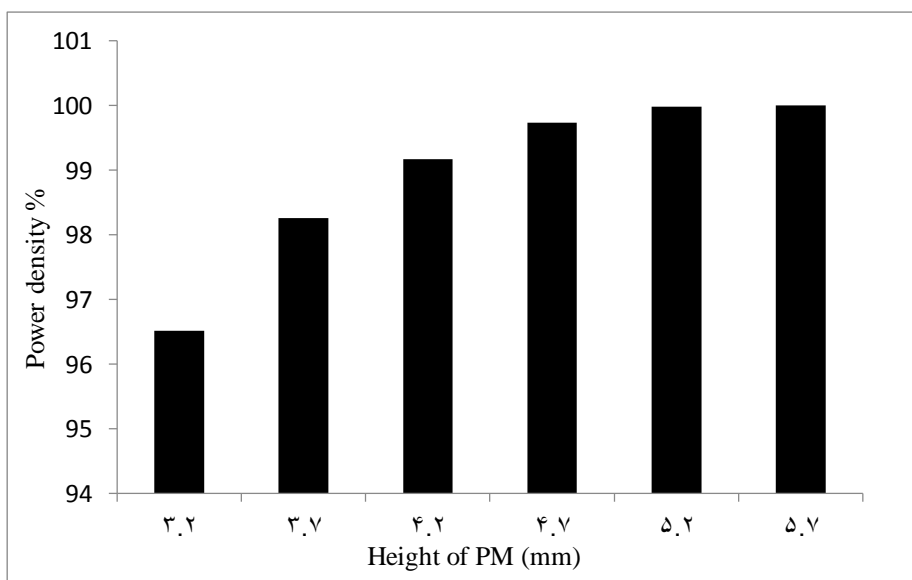


شکل (۳۱-۵): تغییرات بازده نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا



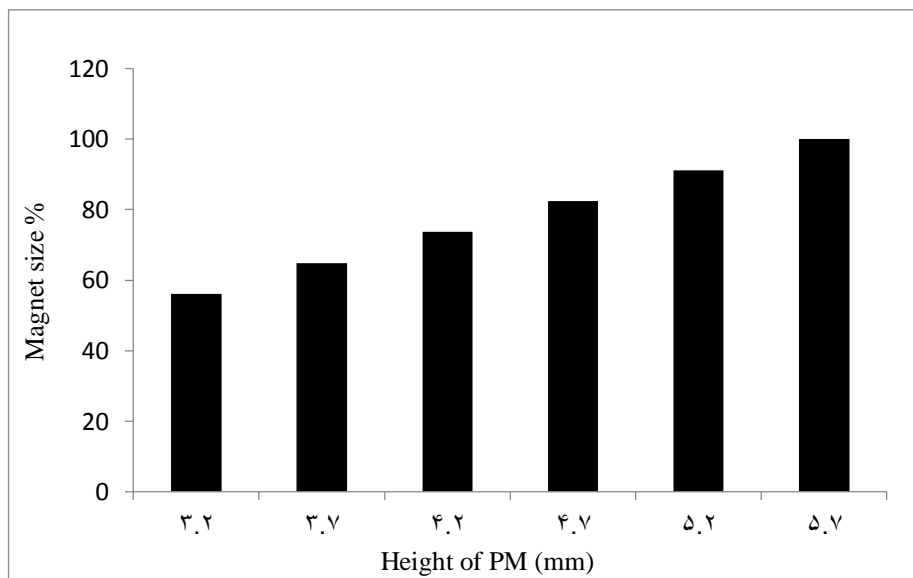
شکل (۳۲-۵): تغییرات ضریب توان نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا

با افزایش ارتفاع آهنربا حجم ماشین و توان خروجی آن افزایش می‌یابد. شکل (۳۳-۵) تغییرات چگالی توان نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا را نشان می‌دهد و مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع آهنربا چگالی توان افزایش می‌یابد.

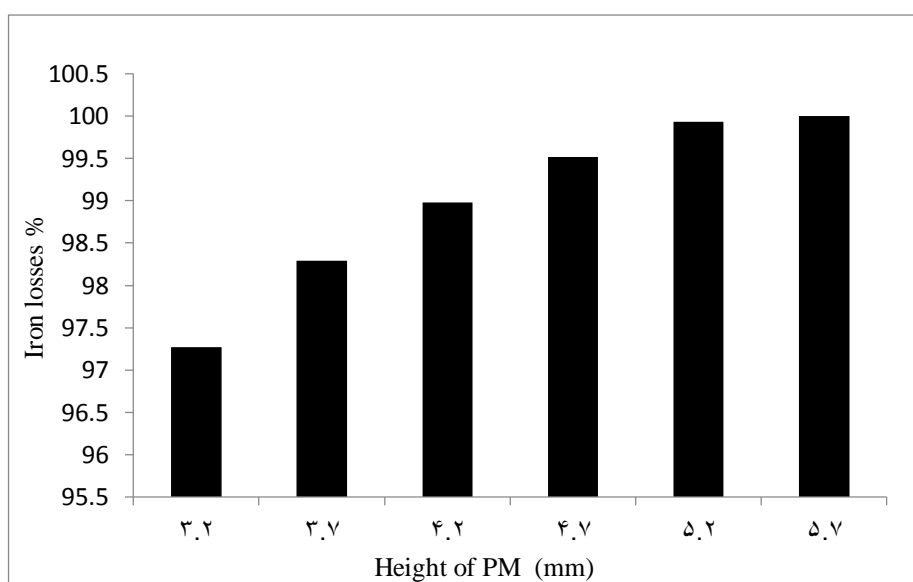


شکل (۳۳-۵): تغییرات چگالی توان نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا

شکل‌های (۳۴-۵) و (۳۵-۵) تغییرات حجم آهنربا و تلفات هسته را نشان می‌دهند. با افزایش ارتفاع آهنربا تلفات هسته و حجم آهنربا افزایش می‌یابند.



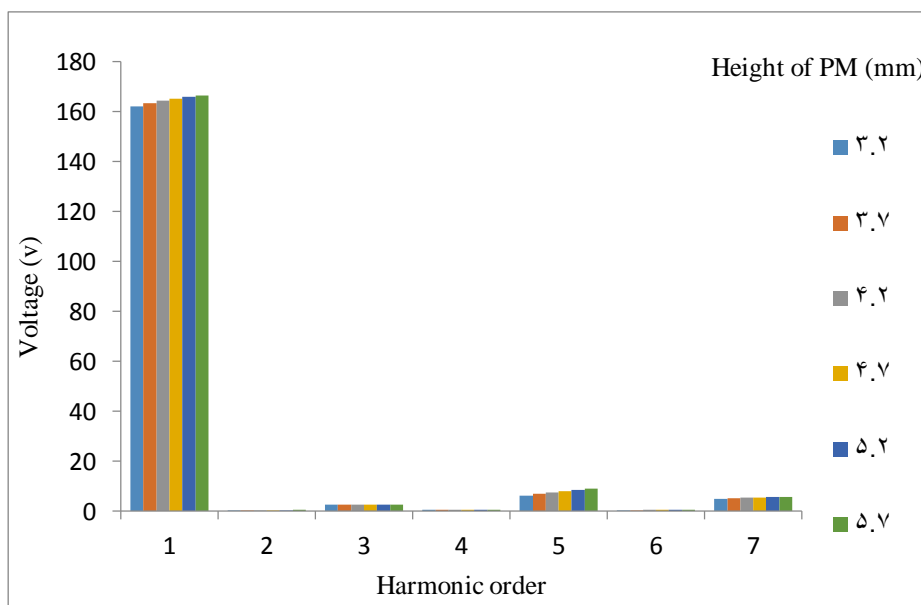
شکل (۳۴-۵): تغییرات حجم آهنربا نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا



شکل (۳۵-۵): تغییرات تلفات هسته نسبت به تغییر ارتفاع آهنربا

در شکل (۳۶-۵) هفت هارمونیک اول ولتاژ دو سر منبع جریان نشان داده شده است. با افزایش

ارتفاع آهنربا مؤلفه‌های اول و پنجم ولتاژ افزایش می‌یابد و سایر مؤلفه‌ها تقریباً ثابت باقی می‌مانند.

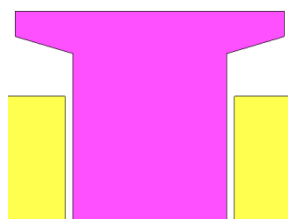


شکل (۵-۳۶): تحلیل هارمونیک ولتاژ دو سر منبع جریان

با مقایسه نمودارهای بالا این نتیجه به دست می‌آید که کاهش ارتفاع آهنربا روش نسبتاً مؤثری در کاهش نیروی دندانه‌ای می‌باشد. با استفاده از این روش در ارتفاع $3/2$ میلی‌متری نیروی دندانه‌ای 21% کاهش می‌یابد. تأثیرگذاری تغییر ارتفاع آهنربا بر دامنه نیروی دندانه‌ای از روش اول، تغییر عرض دهانه شیار، کمتر است. از مزایای این روش می‌توان به کاهش حجم آهنربا، کاهش تلفات هسته و کاهش مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ اشاره کرد. علاوه بر این تغییر ارتفاع آهنربا نسبت به تغییر عرض آهنربا، کمیت‌های موتور از قبیل ضریب توان و بازده را کمتر تحت تأثیر قرار می‌دهد.

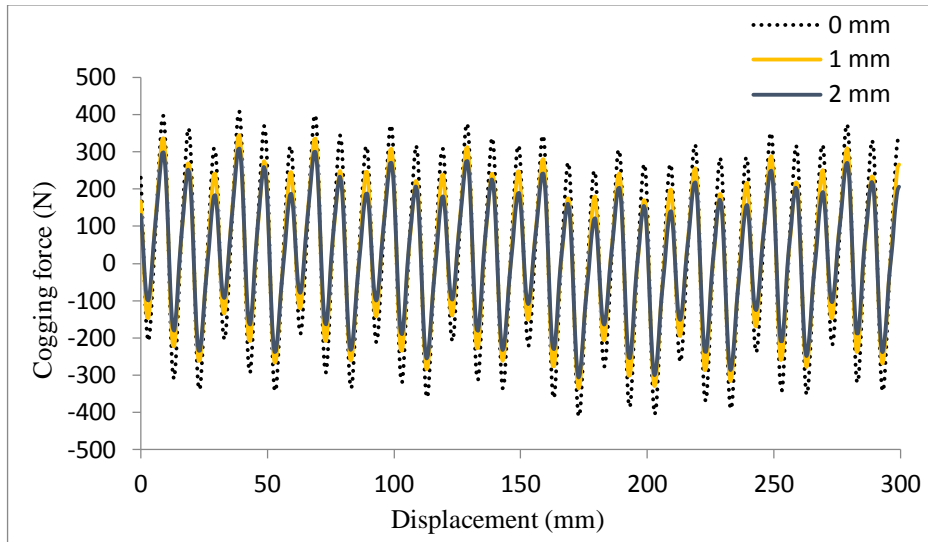
۵-۵- بررسی اثر پخ کردن نوک دندانه‌ها

در این بخش اثر پخ کردن نوک دندانه‌ها بر نیروی دندانه‌ای بررسی خواهد شد و طول بهینه پخ کردن نوک دندانه‌ها به دست خواهد آمد. شکل (۵-۳۷) شکل دندانه‌ها را نشان می‌دهد.



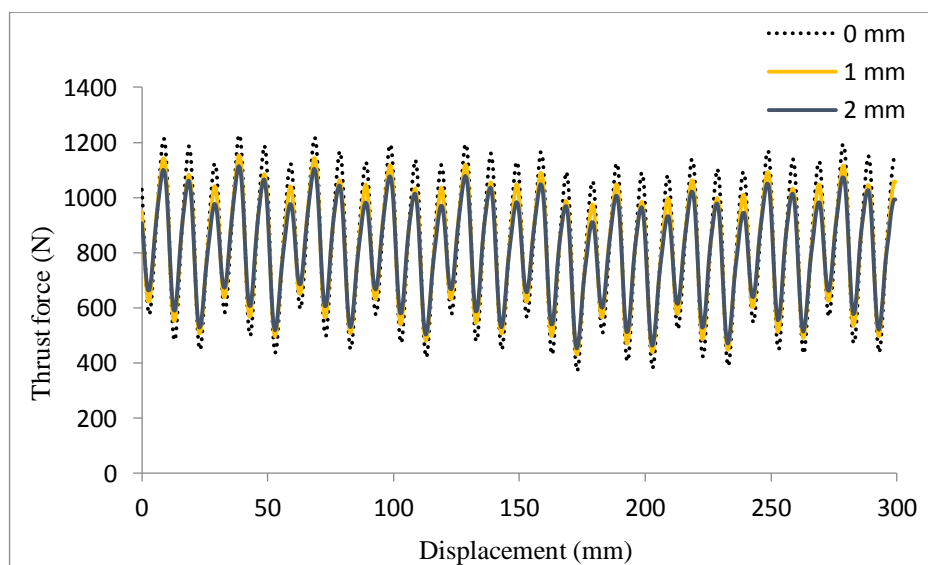
شکل (۵-۳۷): پخ کردن نوک دندانه‌ها

در شکل (۳۸-۵) شکل موج نیروی دندانهای به ازای مقادیر مختلف طول پخ کردن نوک دندانه‌ها نشان داده شده است.



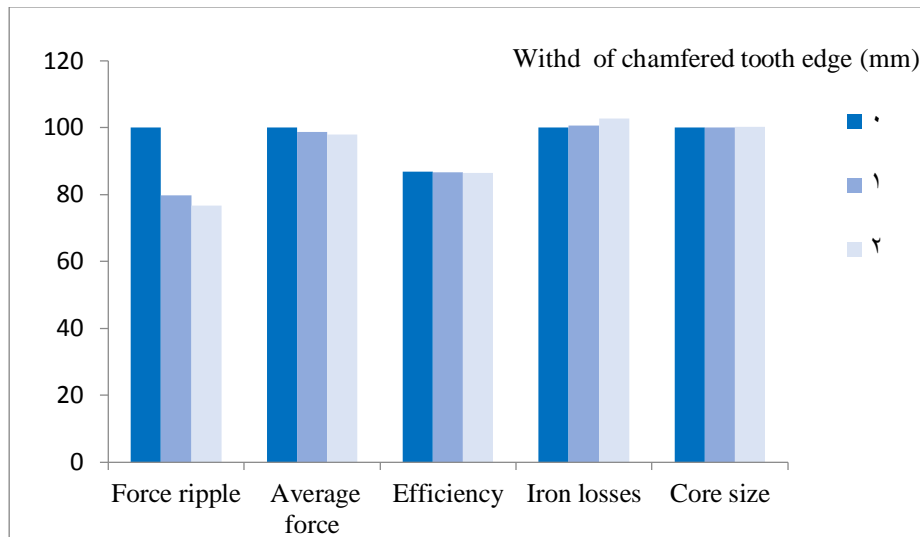
شکل (۳۸-۵): تغییرات نیروی دندانهای نسبت به پخ کردن نوک دندانه‌ها

همان‌طور که در شکل (۳۸-۵) مشاهده می‌شود با افزایش طول پخ کردن نوک دندانه‌ها نیروی دندانهای کاهش می‌یابد. نیروی خروجی موتور برحسب مقادیر مختلف طول پخ کردن در شکل (۳۹-۵) رسم شده است و مشاهده می‌شود که با افزایش اندازه پخ کردن نوک دندانه‌ها میانگین نیروی خروجی نیز کاهش می‌یابد.



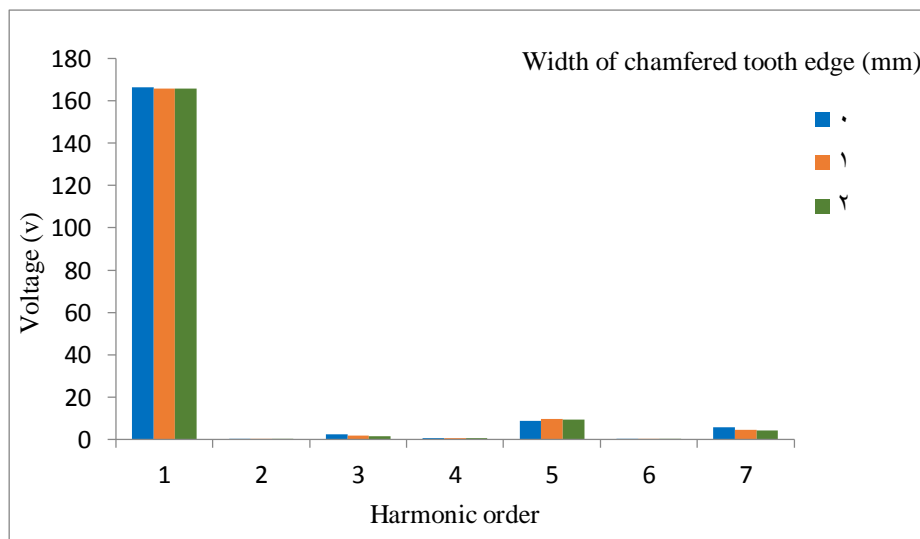
شکل (۳۹-۵): تغییرات نیروی خروجی نسبت به پخ کردن نوک دندانه‌ها

به علت محدود بودن بازه تغییرات اندازه پخ کردن، کمیت‌های ریبیل نیرو، نیروی خروجی، بازده، تلفات و حجم هسته در قالب یک نمودار ستونی در شکل (۴۰-۵) نشان داده شده است.



شکل (۴۰-۵): تغییرات کمیت‌های مختلف موتور نسبت به تغییر اندازه پخ کردن نوک دندانه‌ها

در شکل (۴۱-۵) هفت هارمونیک اول ولتاژ دو سر منبع جریان نشان داده شده است. با افزایش اندازه پخ کردن نوک دندانه مؤلفه پنجم ولتاژ افزایش و مؤلفه هفتم کاهش می‌یابد.



شکل (۴۱-۵): تحلیل هارمونیک ولتاژ دو سر منبع جریان

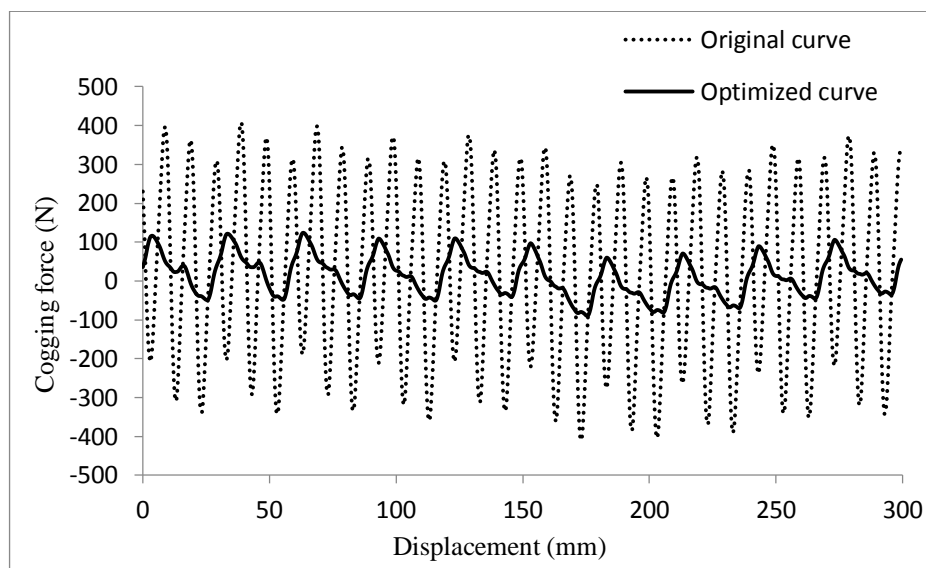
پخ کردن نوک دندانه‌های بیشتر از ۲ میلی‌متر تأثیر چشمگیری بر دامنه نیروی دندانه‌ای

نمی‌گذارد. با استفاده از این روش در بهترین حالت نیروی دندانه‌ای ۲۴٪ کاهش می‌یابد. این روش با تغییر کمی در کمیت‌های موتور، یک روش نسبتاً مؤثر در کاهش نیروی دندانه‌ای به شمار می‌رود، ولی در مقایسه با روش اول تأثیرگذاری آن کمتر است.

۵-۶- روش ترکیبی بهینه

با مقایسه روش‌های بررسی‌شده درمی‌یابیم مؤثرترین روش در کاهش نیروی دندانه‌ای، کاهش عرض دهانه شیار می‌باشد. به همین منظور در روش ترکیبی شیارهای موتور بسته در نظر گرفته شده است. تغییر ابعاد آهنربا نیز یک روش نسبتاً مؤثر در کاهش ریپل نیرو می‌باشد ولی این روش بر دیگر کمیت‌های موتور از قبیل ضریب توان، نیروی خروجی و بازده تأثیر چشمگیری دارد. در روش ترکیبی با در نظر گرفتن ابعاد مختلف برای آهنربا و بررسی نتایج هر یک، مقادیر بهینه‌ای برای عرض و ارتفاع آهنربا انتخاب شده است تا تغییر سایر کمیت‌های موتور قابل قبول باشد. ارتفاع آهنربا ۴/۷ میلی‌متر و عرض آن ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

در شکل (۵-۴۲) نیروی دندانه‌ای در موتور اولیه با موتور طراحی‌شده مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دامنه نیروی دندانه‌ای کاهش چشمگیری پیدا کرده است.

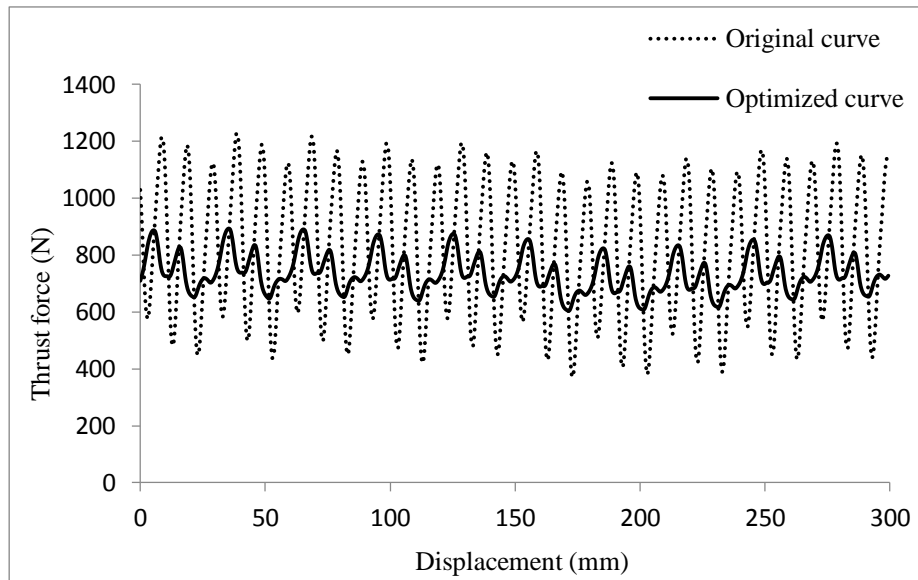


شکل (۵-۴۲): نیروی دندانه‌ای در موتور اولیه و موتور طراحی‌شده

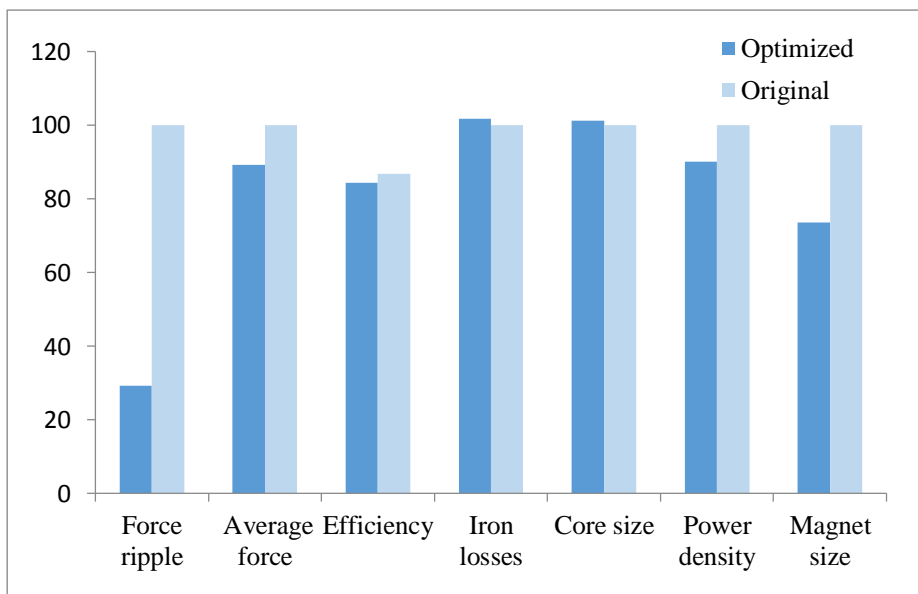
شکل (۴۳-۵) تغییرات نیروی خروجی را نشان می‌دهد. علاوه بر این به‌منظور بررسی دقیق‌تر

عملکرد ماشین، در شکل (۴۴-۵) تغییرات ریپل نیرو، نیروی میانگین خروجی، بازده، چگالی توان و

تلفات و حجم هسته و حجم آهنربا در قالب نمودار ستونی نشان داده شده است.



شکل (۴۳-۵): نیروی خروجی در موتور اولیه و موتور طراحی شده

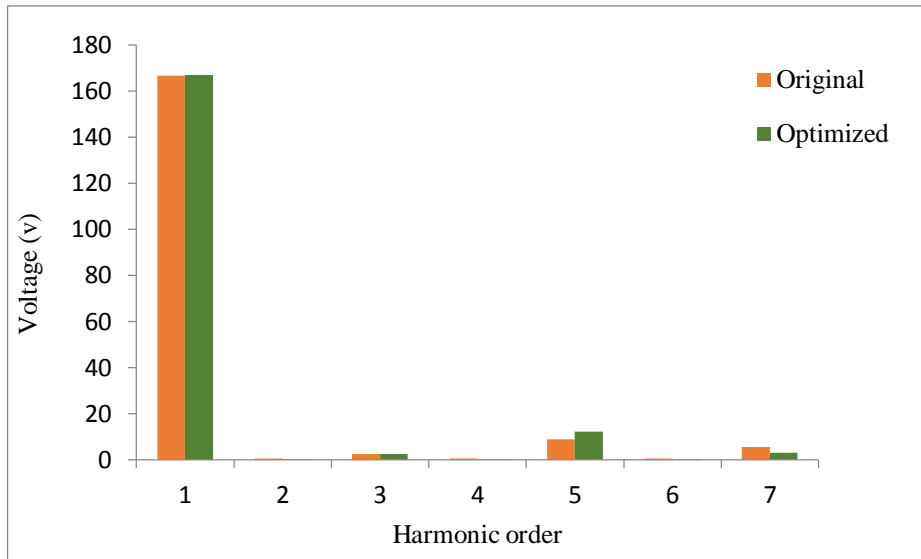


شکل (۴۴-۵): تغییرات کمیت‌های مختلف موتور

ضریب توان موتور نیز پس از طراحی به مقدار 0.86 کاهش می‌یابد. در شکل (۴۵-۵) هفت

هارمونیک اول ولتاژ دو سر منبع جریان نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مؤلفه

پنجم ولتاژ افزایش و مؤلفه هفتم آن کاهش یافته است.



شکل (۵-۴۵): تحلیل هارمونیک ولتاژ دو سر منبع جریان

۵-۷- جمع بندی

در این فصل روش‌های مختلف کاهش نیروی دندانه‌ای شامل تغییر عرض دهانه شیار، تغییر عرض و ارتفاع آهنرباها و پخ کردن نوک دندانه‌ها بر روی ماشین نمونه پیاده‌سازی شد و تغییرات کمیت‌های مختلف موتور از قبیل ریپل نیرو، نیروی خروجی، بازده، ضریب توان، چگالی توان حجم و تلفات هسته و همچنین حجم آهنربا بررسی گردید. سپس روش ترکیبی بهینه‌ای جهت کاهش مؤثرتر ریپل نیرو ارائه شد.

فصل ششم

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

۶-۱- نتیجه گیری

در این پایان نامه طراحی بهینه موتور سنکرون مغناطیس دائم خطی شیاردار دوطرفه با هدف کاهش ریپل نیرو انجام گردید. به همین منظور ابتدا روش های مختلف کاهش ریپل نیرو از جمله تغییر عرض دهانه شیار، تغییر ارتفاع و عرض آهنرباها و پخ کردن نوک دندانها بر روی ماشین نمونه بررسی شد و میزان حساسیت ریپل نیرو و دیگر کمیت های موتور از قبیل نیروی خروجی، بازده، ضریب توان به تغییرات پارامترهای هر روش تعیین شد.

نتایج به دست آمده نشان می دهد که کاهش عرض و ارتفاع آهنربا بر کاهش نیروی دندانه ای تأثیر دارد اما مؤثرترین روش در کاهش نیروی دندانه ای کاهش عرض دهانه شیار است، به طوری که در ماشین با شیارهای بسته دامنه نیروی دندانه ای کاهش چشمگیری پیدا می کند. علاوه بر این کاهش عرض دهانه شیار در مقایسه با سایر روش ها، بر دیگر کمیت های موتور از قبیل بازده و ضریب توان تأثیر کمی می گذارد. به همین منظور در روش ترکیبی شیارهای موتور بسته در نظر گرفته شده است و با در نظر گرفتن ابعاد مختلف برای آهنربا و بررسی نتایج هر یک، مقادیر بهینه ای برای عرض و ارتفاع آهنربا انتخاب شده است تا تغییر سایر کمیت های موتور قابل قبول باشد.

۶-۲- پیشنهادهایی برای ادامه کار

همان طور که قبلاً بیان شد روش های کاهش گشتاور دندانه ای در ماشین های دوار در ماشین های خطی نیز به منظور کاهش نیروی دندانه ای قابل پیاده سازی می باشد. مورب کردن آهنرباها و استفاده از قطب های کمکی نیز دو روش مؤثر در کاهش نیروی دندانه ای در ماشین های خطی می باشد. استفاده از قطب های کمکی تاکنون در ماشین های سنکرون خطی دوطرفه بررسی نشده است و به دلیل نیاز به شبیه سازی سه بعدی در این پایان نامه نیز بررسی نشد. بررسی مورب کردن آهنرباها و استفاده از

قطب‌های کمکی در ماشین سنکرون خطی دوطرفه و مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با ماشین یک‌طرفه
تأثیرگذاری این دو روش را مشهودتر می‌نماید.

فهرست مراجع

- [1] S. U. Chung, and J. M. Kim, "Double-sided iron core PMLSM mover teeth arrangement design for reduction of detent force and speed ripple," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, pp. 3000-3008, 2016.
- [2] J. G. Gieras, and Z. J. Pich, *Linear Synchronous Motors*, Boca Raton, FL: CRC, 2000.
- [3] K. B. Jang, J. H. Kim, H. J. An, and G. T. Kim, "Optimal design of auxiliary teeth to minimize unbalanced phase due to end effect of PMLSM," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 5, pp. 1010–1013, 2011.
- [4] G. W. McLean, "Review of recent progress in linear motors," *IEE Proceedings B - Electric Power Applications*, vol. 135, pp. 380-416, 1988.
- [5] Y. W. Zhu, S. G. Lee, K. S. Chung, and Y. H. Cho, "Investigation of auxiliary poles design criteria on reduction of end effect of detent force for PMLSM," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 6, pp. 2863–2866, 2009.
- [6] C. C. Hwang, P. L. Li, and C. T. Liu, "Optimal design of a permanent magnet linear synchronous motor with low cogging force," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 2, pp. 1039–1042, 2012.
- [7] I. S. Jung, J. Hur, and D. S. Hyun, "Performance analysis of skewed PM linear synchronous motor according to various design parameters," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, no. 5, pp. 3653–3657, 2001.
- [8] R. Akmese, and J. F. Eastham, "Design of permanent magnet flat linear motors for standstill applications," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 28, no. 5, pp. 3042–3044, 1992.
- [9] T. Li, and G. Slemon, "Reduction of cogging torque in permanent magnet motors," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 24, no. 6, pp. 2901–2903, 1988.
- [10] Y. W. Zhu, D. H. Koo, and Y. H. Cho, "Detent force minimization of permanent magnet linear synchronous motor by means of two different methods," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 11, pp. 4345–4348, 2008.
- [11] H. Zhang, B. Kou, S. guo, H. Zhang, Y. Jin, Ch.Zhang, and L. Li, "Research on the end effect detent force reduction of permanent magnet linear synchronous motor with auxiliary poles one-piece structure," pp. 27-32, 2013.
- [12] C. G. Jeans, R. J. Cruise, and C. F. Landy, "Methods of detent force reduction in linear synchronous motors," *Electric Machines and Drives, 1999. International Conference IEMD '99*, pp. 437–439, 1999.
- [13] K. C. Lim, J. K. Woo, G. H. Kang, J. P. Hong, and G. T. Kim, "Detent force minimization techniques in permanent magnet linear synchronous motor," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 2, pp. 1157-1160, 2002.
- [14] I. S. Jung, S. B. Yoon, J. H. Shim, and D. S. Hyun, "Analysis of forces in a short primary type and a short secondary type permanent magnet linear synchronous motor," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, pp. 1265–1270, 1999.
- [15] M. Inoue, and K. Sato, "An approach to a suitable stator length for minimizing the detent force of permanent magnet linear synchronous motors," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, pp. 1890–1893, 2000.
- [16] P. A. Commins, J. W. Moscrop, and C. D. Cook, "Cogging force analysis of a slotless tubular linear motor with finite stator", *The 8 Int. Symposium on Linear Drives for Industry Applications. The Netherlands: LDIA*, pp. 1-4, 2011.

- [17] W. T. Tseng, Ch. N. Kue, and L. I. Su, "Optimizing design parameters of a novel PM transverse flux linear motor," vol. 39, no. 3, pp. 443-451, 2015.
- [18] S. G. Lee, S. A. Kim, S. I. Byun, and Y. H. Cho, "Magnetic force comparison of permanent magnet linear synchronous motor with different topology structures," pp.1-2, 2010.
- [19] Y. J. Kim, and H. Dohmeki, "Cogging force verification by deforming the shape of the outlet edge at the armature of a stationary discontinuous armature PM-LSM," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 6, pp. 2540–2542, 2007.
- [20] E. J. Park, and Y. J. Kim, "A study on reduction of end cogging force by armature offset distance of double-sided PMLSM," *Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia). 9th International Conference on*, pp. 1706–1711, 2015.
- [21] J. F. Gieras, and M. Wing, *Permanent Magnet Motors Technology: Design and Applications*, Marcel Dekker, Inc. New York, U.S.A., 1996.
- [22] I. Boldea, *Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs Handbook*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
- [23] I. Boldea, and S. A. Nasar, *Linear Electromagnetic Devices*, New York: Taylor & Francis, 2001.
- [24] W. Everes, G. Henneberger, H. Wunderlich, and A. Selig, "A linear homopolar motor for a transportation system," *The 2Int. Symposium on Linear Drives for Industry Applications. LDIA '98, Tokyo, Japan*, pp. 46-49, 1998.
- [25] M. Rosenmayr, Casat, A. Glavitsch, and H. Stemmler, "Swissmetro - power supply for a high-power-propulsion system with short stator linear motors," *15th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives Maglev'98*, pp. 280-286, 1998.
- [26] J. Seok-Myeong, and J. Sang-Sub, "Design and analysis of the linear homopolar synchronous motor for integrated magnetic propulsion and suspension," *International Symposium on Linear Drives for Industry Applications. LDIA '98*, pp. 74-77, 1998.
- [27] M. Sanada, S. Morimoto, and Y. Takeda, "Reluctance equalization design of multi flux barrier construction for linear synchronous reluctance motors," *2nd International Symposium on Linear Drives for Industry Applications. LDIA '98*, pp. 259-262, 1998.
- [28] K. Adamiak, D. Barlow, C. P. Choudhury, P. M. Cusack, G. E. Dawson, A. R. Eastham, B. Grady, E. Ho, Yuan Hongpin, L. Pattison, and J. Welch, "The switched reluctance motor as a low speed linear drive," *International Conference on on Maglev and Linear Drives, Las Vegas, U.S.A.*, pp. 39-43, 1987.
- [29] V. Ostovic, *Dynamics of Saturated Electric Machines*, John Wiley & Sons, New York, 1989.
- [30] W. B. Jang, S. M. Jang, and D.Y. Yon, "Dynamic drive analysis through base speed determination for optimum control boundary in PMLSM with self-load," *IEEE Transactions on Magnetics*, pp. 4027–4029, 2005.
- [31] S. Chevailler, "Comparative study and selection criteria of linear motors," Ph.D dissertation, Ecole Polytechnique de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 2006.
- [32] C. C. Hwang, M. H. Wu, and S. P. Cheng, "Influence of pole and slot combinations on cogging torque in fractional slot PM motors," *J. Magnet. Magn. Mater.*, vol. 304, pp. 430–432, 2006.

- [33] I. Boldea, and L. Tutelea, *Electric Machines: Steady State, Transients and Design with Matlab*, CRC Press, Taylor & Francis, New York, 2009.
- [34] I. Boldea, and S. A. Nasar, *Electric Drives*, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2009.

Abstract

In many applications which required linear motion, using linear motors is preferred to rotary motors. Among the variety of linear motors, permanent magnet motors are highly considered due to low-loss, small electrical time constant and fast response. However one of the disadvantages of linear permanent magnet machines is cogging force that causes ripple in the thrust force as well as movement disorders. Linear machines are built in two types include single-sided and double-side. In double-sided linear motors, normal force comes smoother to moving part. Generally, this type outperforms similar motor with the same structure. The aim of this study is to optimum design of double-sided permanent magnet linear synchronous motor to reduce the force ripple. So, at first different methods reducing the force ripple including change of slot aperture width, magnets dimensions and chamfer the tip of the tooth force ripple are studied. Then ripple sensitivity parameters change in each method is determined. A permanent magnet linear motor with nominal specifications is considered and these cases are examined by using finite element model of machine. Finally, an optimal hybrid method is presented to effectively reduce the force ripple.

Key words: Double-Sided Permanent Magnet Linear Synchronous Motor ,Force Ripple, Optimal Design, Cogging Force.



Faculty of Electrical Engineering and Robotic

M.Sc. Thesis in Electrical Power Systems Engineering

Force Ripple Reduction of a Double-Sided Permanent Magnet Linear Synchronous Motor

By: Fatemeh Kafash Farimani

Supervisor:
Dr. Ahmad Darabi

Advisor:
Dr. Amir Hasannia

February 2017