

انتخاب ساختار مناسب و بهینه‌سازی موتور سنکرون آهنربای دائم خطی برای کاربردهای دقیق

آرش حسن‌پور اصفهانی^۱، صادق واعظزاده^۲

۱- کارشناس ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، ahasanpour@ieee.org

۲- استاد، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران، vaezs@ut.ac.ir

چکیده

موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی به‌طور روزافزون در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. عملکرد مطلوب این موتورها مستلزم طراحی و ساخت دقیق آنها است. در این مقاله انتخاب ساختار و طراحی بهینه موتور برای کاربردهای دقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد. به این منظور پس از بررسی جامع ساختارهای مختلف ای نوع موتورها و مزایا و معایب آنها، ساختار مناسب برای موتور انتخاب می‌شود. پس از آن مدلسازی موتور به‌روش لایه‌ای انجام می‌گردد. سپس ابعاد قطب آهنربای دائم یک نمونه طراحی شده از موتور به منظور کاهش آهنربای مصرفی و در نتیجه هزینه تولید بهینه‌سازی می‌شود. در نهایت موتور بهینه‌سازی شده توسط روش اجزاء محدود تحلیل می‌گردد. نتایج حاصل موبد تأثیر بهبود قطب آهنربای دائم در نیل به هدف مورد نظر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی

موتور خطی، موتور سنکرون، آهنربای دائم، توپولوژی، بهینه‌سازی، کاربردهای دقیق.

۱- مقدمه

امروزه موتورهای خطی در کاربردهایی که به حرکت انتقالی و رفت و برگشتی نیاز دارند، به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. مهمترین مزیت این موتورها تولید مستقیم حرکت انتقالی و در نتیجه حذف اجزاء تبدیل‌کننده حرکت گردان به حرکت انتقالی است. حذف این اجزاء منجر به حذف تلفات و لقی ناشی از آنها شده و در نتیجه بازده، دقت و قابلیت اطمینان سیستم افزایش می‌یابد [۲].

از میان انواع مختلف این موتورهای خطی، موتور سنکرون آهنربای دائم خطی به دلیل خصوصیتی از قبیل چگالی نیرو و بازده زیاد، عملکرد دینامیکی خوب و ساختار کنترلی نه چندان پیچیده بسیار مورد توجه است [۳ و ۴].

امروزه با ظهور ادوات و مدارهای الکترونیک قدرت سریع و ارزان و کشف منابع مواد تشکیل دهنده آهنربای دائم بسیار قدرتمند و کاهش نسبی قیمت آهنربای دائم، ساخت این موتورها و استفاده از

آنها در صنعت اقتصادی و عملی شده است.

کاربردهای متعددی در گستره وسیعی از عملکرد برای این گونه موتورها وجود دارد. از آن جمله می‌توان به کاربردهای بسیار دقیق و با توان نسبتاً کم مانند صنایع تولید نیمه‌هادی‌ها تا کاربردهایی با توان‌های زیاد مانند صنایع حمل و نقل اشاره کرد [۵]، [۶].

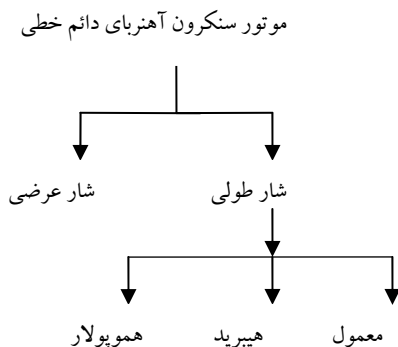
عملکرد مناسب موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی نیاز به طراحی و ساخت دقیق آنها دارد. انتخاب ساختار ماشین اولین مرحله در طراحی می‌باشد. ماهیت خطی بودن ماشین و آرایش‌های مختلف آن مانند یک‌بر، دوبر و غیره در کنار طرق مختلف بکارگیری آهنربای دائم، ساختارهای مختلفی از این موتورها را به وجود می‌آورد. معمولاً کاربرد مورد نظر نقش اساسی در انتخاب ساختار مناسب دارد.

برخی از ساختارهای موتور سنکرون آهنربای دائم خطی در [۱] مورد بررسی قرار گرفته است. تشریح برخی ساختارهای دیگر و

می‌توان به دو دسته با شار طولی و با شار عرضی تقسیم کرد. در موتورهای شار طولی راستای حرکت موج مغناطیسی و جزء متحرک با هم موازی و در موتورهای شار عرضی این دو راستا بر هم عمودند. موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی شار طولی عمومیت بیشتری دارند لذا در این پژوهش به بررسی این نوع از موتورها می‌پردازیم.

موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی شار طولی از لحاظ نوع و ساختار تحریک به سه دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول که بخش عمده این موتورها را تشکیل می‌دهد فقط دارای آهنربای دائم برای تحریک هستند و آهنربا و سیم‌پیچ تغذیه بر روی دو قسمت مجزا، یا در طرفین فاصله هوایی، قرار گرفته‌اند.

در نوع دوم علاوه بر آهنربای دائم، تحریک شامل سیم‌پیچ DC نیز هست. به این نوع از موتورهای آهنربای دائم، نوع هیبرید می‌گویند. در نوع سوم سیستم تحریک و سیستم قدرت یا تغذیه که همان سیم‌پیچ AC است بر روی یک جزء از موتور (اولیه یا ثانویه) واقع هستند و به نوع همپولار معروف می‌باشند. این دسته‌بندی‌ها در نمودار درختی شکل (۱) نمایش داده شده‌اند. در ادامه هر کجا از موتور سنکرون آهنربای دائم خطی نام برده می‌شود منظور موتور معمول است. موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی از لحاظ ساختار به دو دسته کلی تخت و لوله‌ای تقسیم‌بندی کرد. هر کدام از این دو دسته نیز تقسیم‌بندی‌های مختلفی دارند نمودارهای درختی شکل‌های (۲) و (۳) این تقسیم‌بندی‌ها را نشان می‌دهد. نمودار اول ساختارهای مختلف مربوط به ماهیت خطی و شکل هندسی و نمودار دوم ساختارهای مختلف مربوط به نحوه استفاده از آهنربا را نشان می‌دهد. در ادامه با در نظر گرفتن یکی از ساختارهای یک بر به‌عنوان ساختار پایه، سایر ساختارها را با آن مقایسه می‌کنیم.



شکل ۱- طبقه‌بندی کلی موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی

خصوصیات آنها در مقالاتی به‌صورت پراکنده وجود دارد. لیکن مرجعی که این ساختارها را به‌طور جامع بررسی کند وجود ندارد. لذا در این مقاله ابتدا به بررسی نسبتاً کاملی از ساختارهای مختلف موتور سنکرون آهنربای دائم خطی خواهیم پرداخت. سپس ساختار مناسبی برای کاربردهای دقیق انتخاب می‌شود. ساختار انتخابی به کمک یکی از روش‌های موجود، مدل‌سازی می‌گردد. سپس با استفاده از مدل حاصل، یک نمونه موتور طراحی شده بهینه‌سازی می‌شود.

در پژوهش‌های پیشین در بهینه‌سازی این ساختار، افزایش نیروی تولیدی با تغییر شکل و ابعاد سیم‌پیچی و تغییر عرض آهنربا انجام شده است [۷ و ۸]. کاهش ریبیل نیرو نیز یکی دیگر از مسائل مورد توجه بوده است [۷]. در مورد دیگر دو هدف، شامل ثابت الکتریکی موتور و نسبت نیروی تولیدی به جذر تلفات اهمی، برای بهینه‌سازی انتخاب شده است [۹]. بهینه‌سازی چگالی نیروی موتور یعنی مقدار نیروی موتور بر سطح موتور نیز هدف بهینه‌سازی در یکی از پژوهش‌ها بوده است [۱۰].

حذف هسته هوایی در این موتورها منجر به کاهش نیروی تولیدی می‌گردد. این عیب معمولاً با استفاده از مقدار بیشتری آهنربا جبران می‌شود. از آنجا که قیمت آهنربای دائم نسبت به بقیه مواد بکار رفته در این موتورها بیشتر است، استفاده بیشتر آن منجر به افزایش هزینه تولید موتور می‌گردد. با این حال مقدار آهنربای مصرفی و در نتیجه هزینه مواد اولیه و قیمت آن در پژوهش‌های پیشین کمتر مورد توجه بوده است. هر چند این موضوع در یک بهینه‌سازی چند منظوره و کلی‌تر مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱] ولی در مرجع مذکور پارامترهایی از قبیل عرض ماشین و فاصله هوایی در کنار ابعاد آهنربا به‌عنوان گارامترهای بهینه‌سازی انتخاب شده‌اند. با این حال تغییر عرض موتور و فاصله هوایی برای بهینه‌سازی موتورهای موجود مناسب نیست. ولی پهنا و ارتفاع آن را می‌توان به‌سادگی تغییر داد. زیرا آهنربا به‌صورت سطحی و ماژولار بر روی آهن زیرین سوار می‌شوند و امکان تعویض آنها وجود دارد. به‌دلیل لذا در پژوهش حاضر نیروی تولیدی و حجم موتور توأم و تنها با تغییر ابعاد آهنربا در بهینه‌سازی مورد توجه قرار گرفته است. رابطه تحلیلی بین پهنا و ارتفاع بهینه آهنربا بدست آمده و حالت بهینه محاسبه شده است. در نهایت موتور اولیه و موتور بهینه‌سازی شده به کمک روش اجزاء محدود شبیه‌سازی شده و صحت بهینه‌سازی تأیید می‌گردد.

۲- انتخاب ساختار کلی موتور

در یک طبقه‌بندی کلی موتور سنکرون آهنربای دائم خطی را

۲-۱- ساختار یک بر با اولیه کوتاه و آهنربای سطحی

(ساختار یک بر پایه)

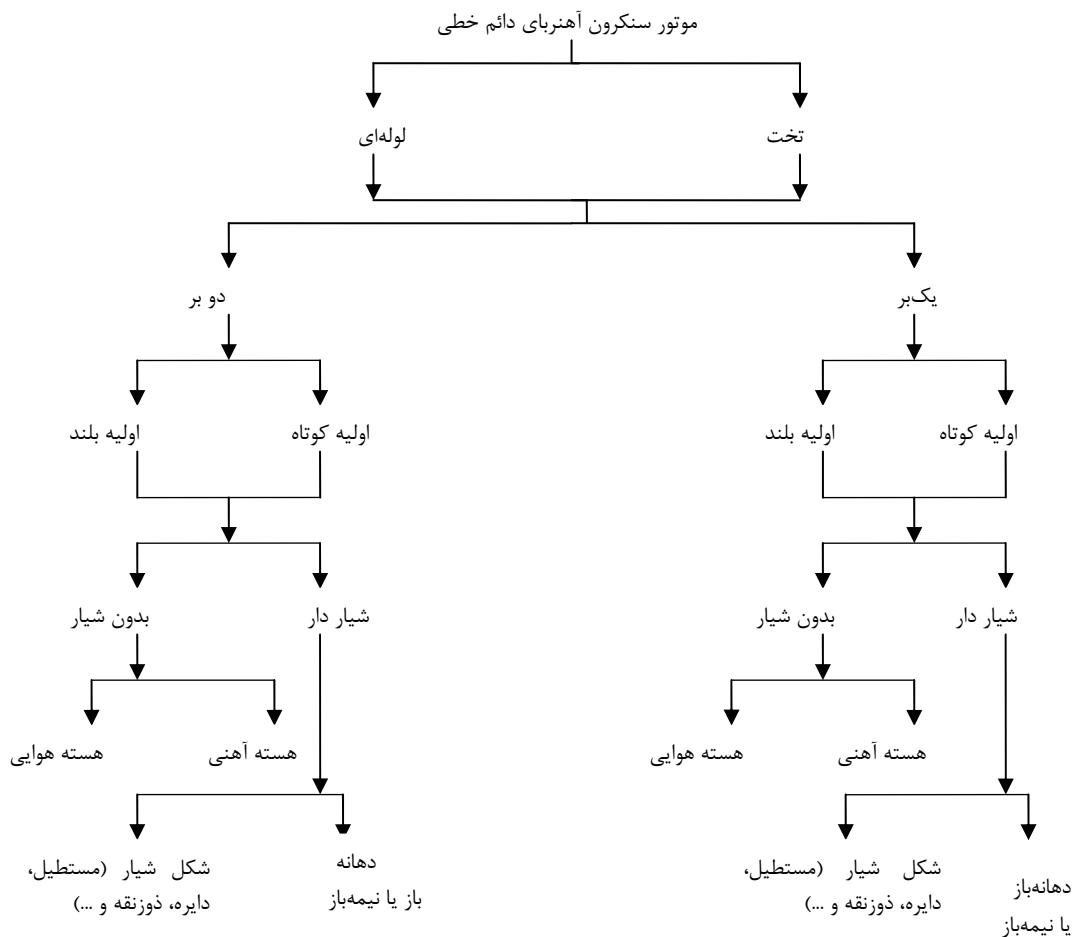
این ساختار دارای اولیه کوتاه و آهنربای سطحی است. در این ساختار آهنربا بر روی ثانویه قرار می گیرد که متشکل از قسمت های متعدد با طول مشخص است که با اتصال تعداد مناسب از آنها می توان به طول دلخواه رسید. از این گونه موتورها معمولاً در مسیرهای کوتاه استفاده می شود زیرا در مسیرهای بلندتر تغذیه اولیه آن مشکل می شود. برای تغذیه این موتورها منبع تغذیه با سیم های انعطاف پذیر به اولیه متصل می شود. محدودیت طول این سیم ها و طول مسیر (شامل قطب های آهنربای دائم) بازه حرکتی اولیه را محدود می کند. در شکل (۴) این ساختار به همراه مسیر شار آهنربای دائم دیده می شود [۱].

این ساختار کاملاً شبیه به ساختار پایه است با این تفاوت که در این ساختار آهنربا داخل آهن ثانویه قرار می گیرد. در نتیجه اندوکتانس محورهای طولی و عرضی متفاوت خواهد بود و نیروی رلوکتانسی نیز به وجود خواهد آمد. در ضمن امکان کار موتور در ناحیه تضعیف شار نیز فراهم می شود. این ساختار در شکل (۵) دیده می شود. این ساختار نسبت به ساختار پایه معایبی نیز دارد که از آن جمله می توان به شار نشتی بیشتر و ساخت مشکل تر و در نتیجه هزینه زیادتر اشاره کرد.

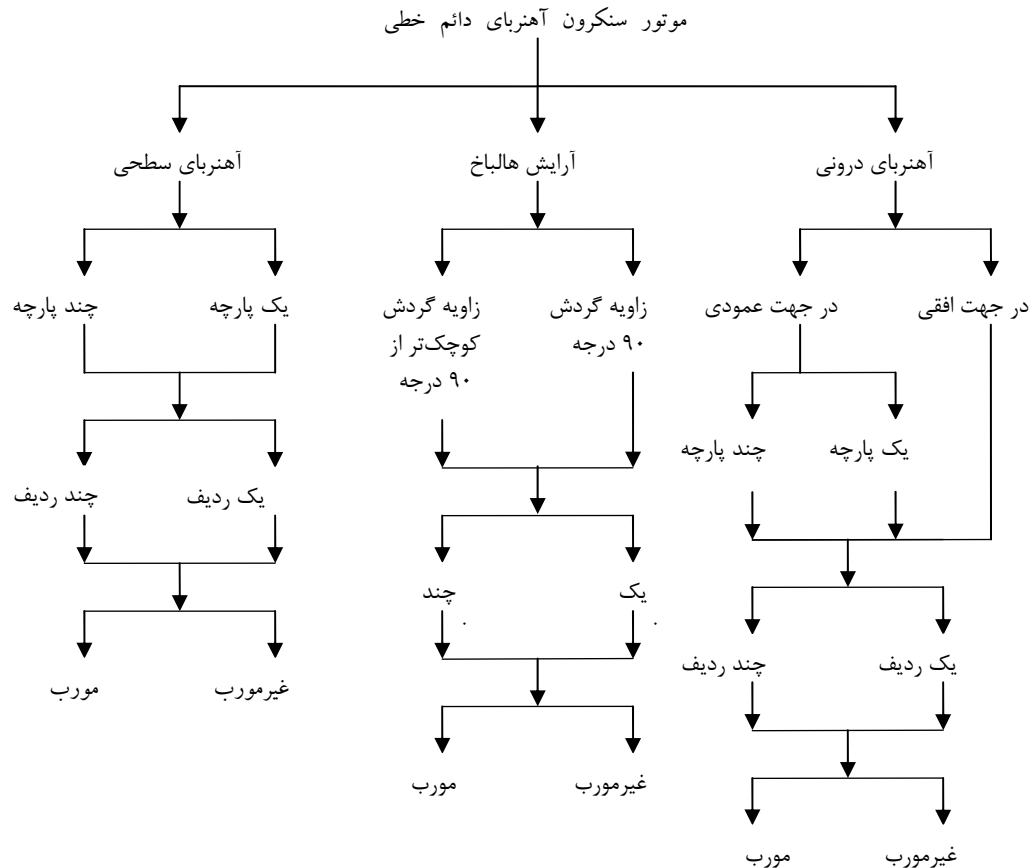
۲-۳- ساختار یک بر با اولیه کوتاه و آهنربای درونی عمودی

در این ساختار جهت میدان مغناطیسی آهنربا در راستای حرکت موتور است. نمای این ساختار به علاوه مسیر شار آهنربا در آن در شکل (۶) دیده می شود [۱].

۲-۲- ساختار یک بر با اولیه کوتاه و آهنربای درونی



شکل ۲- نمودار درختی انواع موتور سنکرون آهنربای دائم خطی از نظر شکل هندسی

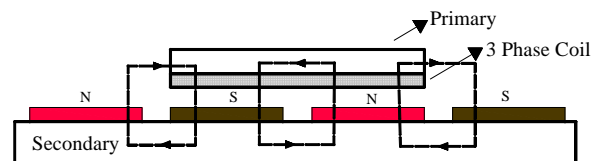


شکل ۳- نمودار درختی انواع موتور سنکرون آهنربای دائم خطی از نظر آرایش آهنربای دائم

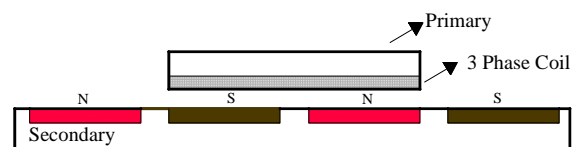
ضریب برجستگی اشاره کرد. اما ساخت آن نسبت به ساختار پایه مشکل‌تر است. همچنین هرچه طول آهنربا در جهت مغناطیس شدگی نسبت به طول فاصله هوایی کمتر شود، شار نشتی بین دو قطب آهنربا، از طریق فاصله هوایی، بیشتر می‌شود.

۲-۴- ساختارهای یک بر با ثانویه کوتاه

ساختارهای پیشین به صورت ثانویه کوتاه نیز موجود می‌باشد. در همه این ساختارها قسمت متحرک از آهنربای دائمی تشکیل می‌شود و قسمت ثابت شامل سیم‌پیچی می‌گردد. این ساختار مزایا و معایبی نسبت به ساختار با اولیه کوتاه دارد. از مزایای این ساختار می‌توان به صرفه‌جویی در استفاده از آهنربای دائم، نیروی بازدارنده کمتر و سهولت ساخت و اقتصادی بودن کاربرد آن در مسافت‌های بلند اشاره کرد. نیروی عمودی در این ساختار، نسبت به ساختار با اولیه کوتاه، کمتر است؛ که این ویژگی در کاربردهای عادی به لحاظ کاهش نیروی اصطکاک مزیت و در کاربردهای شامل تعلیق عیب به‌شمار می‌رود. تغذیه و خنک کردن این ساختار ساده‌تر از ساختار قبلی است ولی میزان تلفات در سیم‌پیچی زیاد است. به این لحاظ

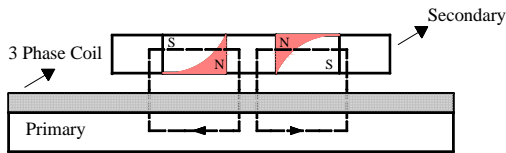


شکل ۴- ساختار یک بر با اولیه کوتاه و آهنربای سطحی



شکل ۵- ساختار یک بر با اولیه کوتاه و آهنربای درونی

در این ساختار، ثانویه نیازی به آهن زیرین ندارد؛ در عوض مقدار آهن بین آهنرباها بیشتر از ساختار پایه است. در این ساختار اگر بنا به دلایلی استفاده از یک لایه در زیر ثانویه ضروری باشد باید از مواد غیرمغناطیسی مانند آلومینیوم تشکیل شود. از مزایای این موتور نسبت به ساختار پایه می‌توان به قابلیت تضعیف شار به علت بالا بودن

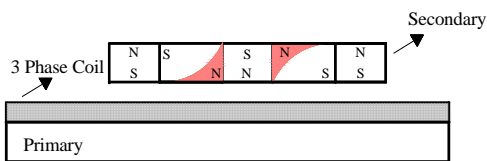


شکل ۹- ساختار یک بر با ثانویه کوتاه و آهنربای درونی عمودی

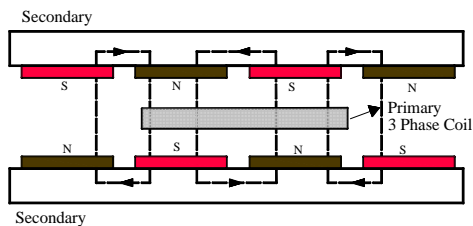
این نیرو به علت تقارن موتور خنثی می‌شود. ابتدا ساختاری را به‌عنوان ساختار پایه موتورهای دوبر انتخاب کرده و آن را با ساختار پایه یک‌بر مقایسه می‌کنیم.

۲-۵- ساختار دوبر با دو ثانویه بلند و یک اولیه کوتاه با هسته هوایی (ساختار دوبر پایه)

در این ساختار سیم‌پیچی با هسته هوایی در بین دو ثانویه شامل آهنربای دائم و آهن زیرین قرار دارد. این ساختار در شکل (۱۱) دیده می‌شود. برای مقایسه این ساختار با ساختار یک‌بر فرض بر آن است که نیروی افقی هر دو نوع تقریباً برابر باشد. با این دید این ساختار نسبت به ساختار پایه یک‌بر دارای محاسنی است که از آن جمله می‌توان به حذف نیروی بازدارنده، حذف اثر انتهایی طولی به دلیل حذف یوغ و نداشتن هسته آهنی، حذف تلفات آهنی مربوط به یوغ و سبک‌تر شدن جزء متحرک اشاره کرد. از معایب آن بیشتر شدن طول فاصله هوایی، در نتیجه افزایش حجم آهنربای مصرفی و افزایش قیمت سیم‌پیچی است. در این ساختار دو آهن زیرین وجود دارد که ارتفاع هر کدام از نصف ارتفاع آهن زیرین در ساختار پایه بیشتر است و در کل حجم آهن زیرین در این ساختار بیشتر می‌باشد.



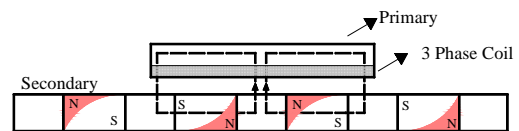
شکل ۱۰- ساختار یک‌بر با ثانویه کوتاه و آهنربا با آرایش هالباخ



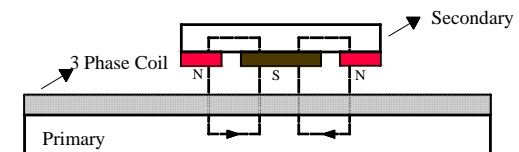
شکل ۱۱- ساختار دوبر با دو ثانویه بلند و یک اولیه کوتاه با هسته هوایی و آهنربای سطحی

در فواصل طولانی از تغذیه مقطعی استفاده می‌شود که هزینه و پیچیدگی سیستم را افزایش می‌دهد. از معایب این ساختار به دو مورد عمده می‌توان اشاره کرد. اول آنکه تمام مسیر باید سیم‌پیچی شود که کار مشکل و پرهزینه است. دیگر اینکه در این ساختار نمی‌توان به راحتی به طول مسیر اضافه کرد و طول مسیر ثابت خواهد ماند. ساختار یک بر با ثانویه کوتاه و آهنربای سطحی به مسیر شار آن در شکل (۷) دیده می‌شود [۱۲]. ملاحظه می‌شود که آهنرباهای انتهایی نصف آهنرباهای مرکزی است لذا در هر مسیر از شار قطب عبور کرده و ارتفاع یوغ و آهن زیرین کاهش می‌یابد. برای دیگر ساختارهای یک بر با اولیه کوتاه نیز ساختارهای متناظری با ثانویه کوتاه وجود دارد که در شکل‌های (۸) تا (۱۰) دیده می‌شود. در شکل (۱۰) آرایش هالباخ دیده می‌شود که موجب افزایش بازده ماشین می‌شود و نیازی به آهن زیرین ندارد. از معایب این آرایش مصرف بیشتر آهنربا، ساخت پیچیده‌تر و در نتیجه هزینه بیشتری باشد [۱۳].

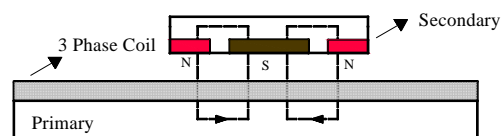
ساختارهای دوبر تنوع بیشتری از ساختارهای یک‌بر دارند. تمام ساختارهای بالا به نحوی می‌توانند ساختارهای متناظر دوبری داشته باشند. تعدادی از این ساختارها به دلیل داشتن معایب زیاد در مقابل مزیت ناچیز عملاً از گردونه ساختارهای مورد بررسی خارج می‌شوند. در ادامه ساختارهایی که ارزش اقتصادی برای ساخته شدن دارند بررسی می‌شوند. مجدداً در این قسمت ساختارها به دو دسته با اولیه کوتاه و با ثانویه کوتاه تقسیم‌بندی می‌شوند. عدم وجود نیروی عمودی یکی از تفاوت‌های ساختارهای دوبر و یک‌بر است که خود می‌تواند هم مزیت وهم عیب این ساختار باشد.



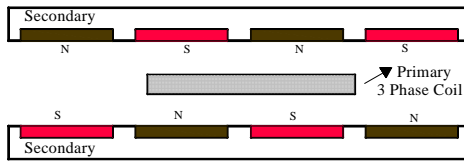
شکل ۶- ساختار یک بر با اولیه کوتاه و آهنربای درونی عمودی



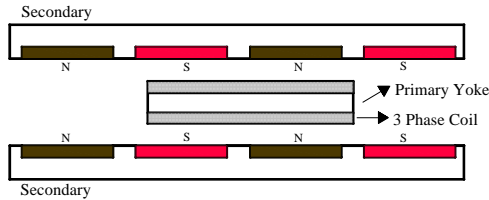
شکل ۷- ساختار یک بر با ثانویه کوتاه و آهنربای سطحی



شکل ۸- ساختار یک بر با ثانویه کوتاه و آهنربای درونی



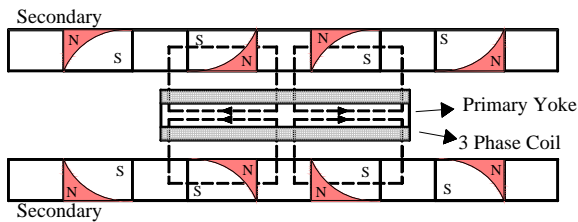
شکل ۱۳- ساختار دوپلر با دو ثانویه بلند و یک اولیه کوتاه با هسته هوایی و آهنربای درونی



شکل ۱۴- ساختار دوپلر با دو ثانویه بلند با آهنربای درونی و یک اولیه کوتاه یوغ‌دار

۲-۷- ساختار دوپلر با دو ثانویه بلند و یک اولیه کوتاه با آهنربای دائمی درونی عمودی

در این ساختار جهت آهنرباها و تغذیه سیم‌پیچ‌های مجاور برعکس هم می‌باشد. مزایا و معایب آن مشابه مباحث مطرح شده در قسمت‌های قبلی است. این ساختار در شکل (۱۵) دیده می‌شود.



شکل ۱۵- ساختار دوپلر با دو ثانویه بلند با آهنربای درونی عمودی و اولیه کوتاه یوغ‌دار

۲-۸- ساختارهای دوپلر با یک ثانویه بلند و دو اولیه کوتاه

در این ساختارها یک ثانویه بلند در وسط و دو اولیه کوتاه متحرک در دو سوی آن قرار گرفته است. شکل (۱۶) یک نمونه از این موتور را نشان می‌دهد. در این ساختار وجود یوغ لازم است. از مزایای این موتور نسبت به مدل پایه می‌توان به حذف آهن زیرین و صرفه‌جویی زیاد در مقدار آهن، فاصله هوایی معادل کمتر (نسبت به نوع هسته هوایی) و در نتیجه صرفه‌جویی در استفاده از آهنربای دائم اشاره کرد. ضمناً با حذف آهن زیرین تلفات این ناحیه نیز حذف می‌شود. از مشکلات این ساختار تولید نیروی بازدارنده و وجود دو سیم‌پیچی است. ولی با استفاده از آهن بین آهنرباها ضریب برجستگی بیشتر از یک قابل دستیابی است. به جای آهن می‌توان از عایق استفاده کرد تا شار نشتی کاهش یابد؛ ولی در آن صورت ضریب

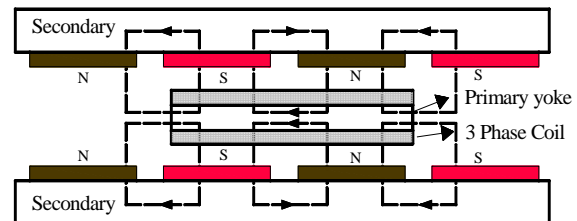
قیمت سیم‌پیچی است. حجم آهن زیرین در این ساختار بیشتر می‌باشد. در این صورت تلفات در آهن زیرین بیشتر می‌شود. ولی باید توجه کرد که تلفات در یوغ حذف شده و از آنجا که عمده تلفات آهن مربوط به تلفات یوغ می‌باشد تلفات آهن به‌طور کلی کاهش می‌یابد. همان‌طور که اشاره شد در این ساختار نیروی عمودی نیز وجود ندارد که موجب کاهش نیروی اصطکاک و از طرفی حذف خاصیت تعلیق می‌شود. سیم‌پیچ در این ساختار می‌تواند همراه با هسته آهنی هم باشد که در آن صورت طول فاصله هوایی کم می‌شود ولی مقدار کمی نیروی بازدارنده و نیز اثر انتهایی وجود خواهد داشت.

۲-۶- ساختار دوپلر با دو ثانویه بلند و یک اولیه کوتاه یوغ‌دار

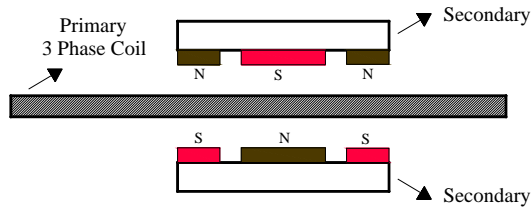
این ساختار کاملاً مشابه ساختار قبلی است فقط دارای یوغ می‌باشد. نحوه چیده‌شدن آهنرباها در هر دو ثانویه مانند هم است در حالی که در ساختار قبلی برعکس هم بود. لذا شار نمی‌تواند به ثانویه مقابل برود و از طریق یوغ مسیر خود را می‌بندد. این ساختار در شکل (۱۲) دیده می‌شود.

این ساختار در مقابل ساختار پایه دوپلر دارای فاصله هوایی کمتر و مقدار آهنربای مصرفی کمتر است. بسته به نوع سیم‌پیچی، نیروی بازدارنده متفاوت می‌باشد. از معایب این ساختار نسبت به ساختار پایه دوپلر وجود دو سیم‌پیچی و در نتیجه پیچیده‌تر شدن ساختار و بالا رفتن هزینه است.

در ضمن اثر انتهایی به‌وضوح دیده خواهد شد. سیم‌پیچ‌ها می‌تواند همراه با هسته هوایی یا هسته آهنی (بدون شیار یا شیاردار) باشند. شکل‌های (۱۳) و (۱۴) ساختارهایی است که کاملاً مشابه دو ساختار قبلی است با این تفاوت که آهنربا در داخل آهن قرار گرفته است که مزایا و معایب آن در بخش ساختارهای یک‌بر بیان شد.



شکل ۱۲- ساختار دوپلر با دو ثانویه بلند با آهنربای سطحی و یک اولیه کوتاه یوغ‌دار



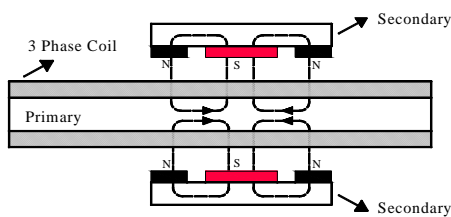
شکل ۱۹- ساختار دوبر با دو ثانویه کوتاه با آهنربای سطحی و یک اولیه بلند با هسته هوایی

۲-۱۰- ساختار دوبر با دو ثانویه کوتاه و یک اولیه دوبر

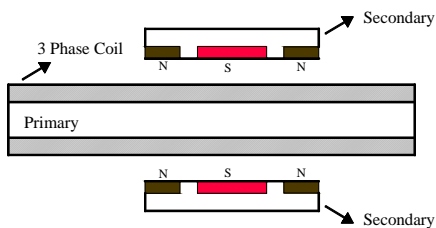
در این ساختار اولیه دارای دو سیم‌پیچ مجزا است و دو ثانویه شامل آهنربای دائم نیز وجود دارد. این ساختار دارای یوغ با ارتفاع زیاد است و از این جهت نسبت به مدل پایه دوبر آهن بیشتری مصرف می‌کند. در مقابل به علت کوچکتر بودن طول مؤثر فاصله هوایی آهنربای کمتری برای ایجاد یک چگالی شار مشخص نیاز دارد ولی در مسیرهای طولانی از نظر اقتصادی به صرفه نیست. در این ساختار بسته به نوع سیم‌پیچی ممکن است نیروی بازدارنده وجود داشته باشد. قیمت سیم‌پیچی در صورتی که هسته هوایی نباشد کمتر از ساختار پایه است. نمونه‌های مختلف این ساختار در شکل‌های (۲۰) تا (۲۲) دیده می‌شود [۱]. تفاوت این ساختارها در نحوه بکارگیری آهنربای دائم است.

۲-۱۱- ساختار دو بر با یک ثانویه کوتاه و دو اولیه بلند

در این ساختار دو اولیه شامل سیم‌پیچ و یوغ وجود دارد. این ساختار نسبت به ساختار دوبر پایه دارای تغذیه و خنک‌سازی ساده‌تر است ولی تلفات سیم‌پیچی آن بیشتر است.

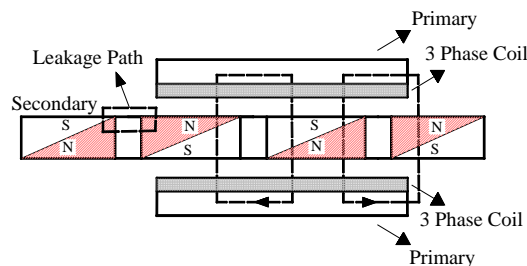


شکل ۲۰- ساختار دوبر با دو ثانویه کوتاه با آهنربای سطحی و یک اولیه بلند دوبر

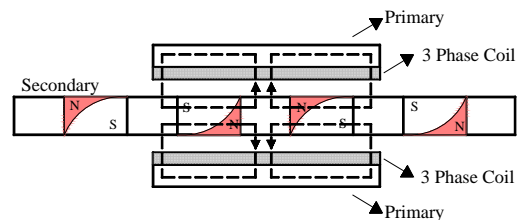


شکل ۲۱- ساختار دوبر با دو ثانویه کوتاه با آهنربای درونی و یک اولیه بلند دوبر

برجستگی تقریباً برابر یک خواهد ماند. طول ناحیه بین دو آهنربا باید از مقدار معینی بیشتر باشد تا شار نشستی زیادی وجود نداشته باشد. مسیر نشت شار در شکل (۱۶) دیده می‌شود. مقاومت مغناطیسی مسیر نشت شار باید از مقاومت مغناطیسی مسیر اصلی شار بیشتر باشد. نوع دیگر این ساختار در شکل (۱۷) دیده می‌شود. عیب این ساختار نسبت به قبلی مصرف آهن بیشتر و نشت بالاتر است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد در این ساختار سیم‌پیچ‌های متناظر و روبروی هم در دو اولیه، ۱۸۰ درجه اختلاف فاز دارند.



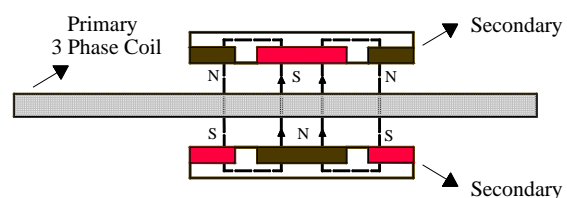
شکل ۱۶- ساختار دوبر با یک ثانویه بلند و آهنربای درونی افقی و دو اولیه کوتاه



شکل ۱۷- ساختار دوبر با یک ثانویه بلند با آهنربای درونی عمودی و دو اولیه کوتاه

۲-۹- ساختارهای دوبر با یک اولیه بلند و دو ثانویه کوتاه

از مزایای عمومی این ساختارها بر ساختارهای با اولیه کوتاه، صرفه‌جویی در مصرف آهنربای دائمی است، سهولت در تغذیه سیم‌پیچ AC و خنک‌سازی این سیم‌پیچ است. عیب اصلی این ساختارها تلفات بالا در این سیم‌پیچ‌ها، لزوم تغذیه مقطعی سیم‌پیچ‌ها، و بالا رفتن هزینه ساخت و تغذیه مسیر می‌باشد. ضمناً تغییر طول مسیر نیز به‌سادگی امکان‌پذیر نیست. شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نمونه‌های دیگر این ساختار را نشان می‌دهد [۱].



شکل ۱۸- ساختار دوبر با دو ثانویه کوتاه با آهنربای درونی و یک اولیه بلند با هسته هوایی

۲-۱۲- ساختارهای لوله‌ای

ساختارهای لوله‌ای از لوله کردن یک موتور با ساختار مسطح حول محور موازی با مسیر حرکت موتور بدست می‌آید. این موتورها معمولاً حرکتی پیستون‌وار دارند. سطح مقطع طولی این موتورها نمایی مانند موتورهای دوپلر دارد. اکثر ساختارهای دوپلر می‌توانند به صورت لوله‌ای نیز مورد استفاده قرار بگیرند. این ساختار نسبت به دیگر ساختارهای موتور آهنربای دائم خطی دارای تفاوت‌ها و خصوصیات منحصر به فردی است. در این ساختار نیروی‌های جانبی و عمودی به دلیل تقارن حذف می‌شوند. از نکات جالب در این موتورها می‌توان به بازده بیشتر آنها اشاره کرد؛ زیرا در سیم‌پیچ AC این موتورها اتصال انتهایی وجود ندارد و مقاومت سیم‌پیچ‌ها نسبت به موتورهایی خطی مسطح کمتر می‌باشد. در نتیجه تلفات مس کمتری به وجود می‌آید [۱۵]. در این ساختارها فاصله هوایی کمتر از ساختارهای مسطح است و در نتیجه در مقدار آهنربای دائم صرفه‌جویی می‌شود.

۳- مقایسه برخی از ساختارها

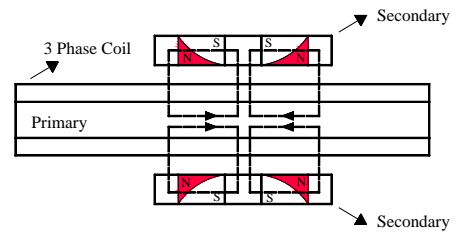
جدول (۱) مقایسه بین ساختارهای شیاردار و بدون شیار را نشان می‌دهد. در جدول (۲) نیز برخی از خواص موتورهایی با هسته هوایی، با هسته آهنی و شیار دار با هم مقایسه شده‌اند.

جدول ۱- مقایسه بین ساختار شیاردار و بدون شیار

بدون شیار	شیاردار
نویز صوتی کمتر	چگالی نیروی بیشتر
بازده بیشتر در سرعت‌های بالا	بازده بیشتر در سرعت‌های پایین
قیمت سیم‌پیچی کمتر	مقدار آهنربای مورد نیاز کمتر
نیروی بازدارنده کمتر	جریان ورودی کمتر

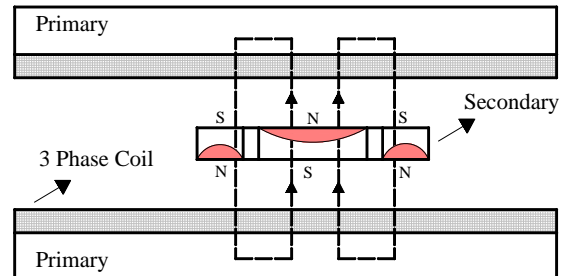
جدول ۲- مقایسه بین ساختار شیاردار و بدون شیار با هسته هوایی و آهنی

عملکرد	شیاردار	هسته آهنی	هسته هوایی
قیمت	کم	خیلی کم	بالا
نیروی عمودی	زیاد	متوسط	ندارد
نیروی بازدارنده	زیاد	متوسط	ندارد
چگالی نیرو	خیلی خوب	خوب	متوسط
مسائل حرارتی	خیلی خوب	خوب	بد
وزن اولیه	سنگین	متوسط	سبک
استقامت اولیه	خیلی خوب	خوب	ضعیف

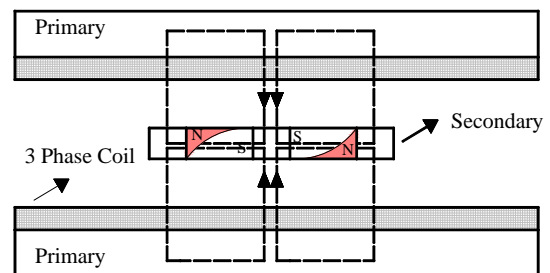


شکل ۲۲- ساختار دوپلر با دو ثانویه کوتاه با آهنربای درونی عمودی و یک اولیه بلند دوپلر

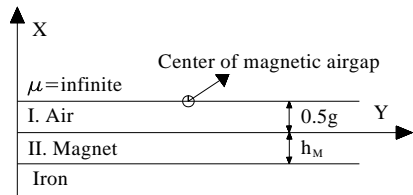
استفاده از این ساختار در مسافت‌های طولانی ممکن است ولی باید از تغذیه مقطعی استفاده کرد و این مسأله موجب افزایش پیچیدگی و هزینه سیستم تغذیه می‌شود. طول مسیر در این ساختار ثابت است و به راحتی نمی‌توان آن را افزایش داد. دو نمونه از این ساختار در شکل‌های (۲۳) و (۲۴) دیده می‌شود. در شکل (۲۳) بین آهنرباها فاصله‌ای وجود دارد و با انتخاب جنس مناسب برای آن می‌توان ضریب برجستگی را تغییر داد [۱۴]. ولی هرچه ضریب گذردهی مغناطیسی این ماده بیشتر باشد نشت شار بیشتر می‌شود. در ساختار شکل (۲۴) فاصله بین آهنرباها از آهن پر می‌شود. در این ساختار ضریب برجستگی ثابت و آهن مصرفی بیشتر است.



شکل ۲۳- ساختار دو بر با یک ثانویه کوتاه با آهنربای افقی و دو اولیه بلند



شکل ۲۴- ساختار دو بر با یک ثانویه کوتاه با آهنربای عمودی و دو اولیه بلند



شکل ۲۶- مدل لایه‌ای موتور

با حل معادلات ماکسول و پواسن در نواحی مختلف و اعمال شرایط مرزی ارئه مناسب، چگالی شار در وسط فاصله هوایی به صورت ارائه شده در رابطه (۱) حاصل می‌گردد. ضرایب C_1 و C_2 در پژوهش قبلی نویسندگان محاسبه شده است [۱۱].

$$B_y(x) = -\frac{\partial A}{\partial x} = -\sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{n\pi}{\tau} \left(C_1 e^{\frac{n\pi g/2}{\tau}} + C_2 e^{-\frac{n\pi g/2}{\tau}} \right) \cos\left(\frac{n\pi x}{\tau}\right) \quad (1)$$

با استفاده از رابطه (۱) و با جایگذاری ضرایب می‌توان مؤلفه اصلی و هارمونیک‌های میدان ناشی از آهنربا را بدست آورد.

$$B_{1g} = -\frac{\pi}{\tau} \times \frac{\frac{8B_r \tau}{\pi^2} \sin\left(\frac{\eta\pi}{2}\right) e^{-\frac{\pi g}{2\tau}}}{\left(e^{-\frac{\pi g}{\tau}} + 1 \right) + \frac{\mu_M \left(-e^{-\frac{\pi g}{\tau}} + 1 \right) \left(e^{\frac{2\pi h_M}{\tau}} + 1 \right)}{\mu_0 \left(e^{\frac{2\pi h_M}{\tau}} - 1 \right)}} \quad (2)$$

در نتیجه شار زیر هر قطب از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\phi_{PM} = \frac{2}{\pi} B_{1g} \tau L \quad (3)$$

در نتیجه شار پیوندی هر فاز از رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$\lambda_{PM} = \phi_{PM} \cdot N_{ph} K_w \quad (4)$$

در رابطه فوق N_{ph} تعداد دور سیم‌پیچ هر فاز و K_w ضریب سیم‌پیچی می‌باشد.

در ادامه برای بدست آوردن نیرو از مدل دو محوری در دستگاه چرخان استفاده می‌کنیم که برای موتورهای آهنربای سطحی با توجه به مساوی بودن اندوکتانس محورهای d و q نیرو به صورت زیر در می‌آید.

$$F_{av} = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \lambda_{PM} i_q \quad (5)$$

با داشتن ابعاد سیم‌پیچی و چگالی جریان داریم:

$$F_{av} = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \phi_{PM} A_s J_{rms} P \quad (6)$$

آهنربا می‌تواند به صورت یک قطعه یا چند قطعه باشد. نوع یک قطعه نوع معمول است ولی برای کم کردن نیروی بازدارنده یا برای حذف هارمونیک‌های خاصی از توزیع چگالی شار آهنربای دائم می‌توان از نوع چند قطعه استفاده کرد. آهنربا می‌تواند به صورت مورب نیز قرار گیرد و در یک یا چند ردیف چیده شود. مورب کردن آهنربا هارمونیک‌ها و نیروی بازدارنده را کاهش می‌دهد.

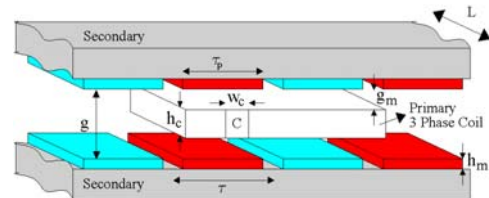
در موتورهای خطی شکل شیارها معمولاً مستطیلی است. دهانه شیار نیز می‌تواند کاملاً باز، نیمه باز یا بسته باشد. هرچه دهانه شیار بسته‌تر باشد، میزان شار نشستی کمتر خواهد بود. شیارهای نیمه‌باز نیروی بازدارنده کمتری تولید می‌کنند. از شیار نیمه‌باز در توان‌های پایین‌تر استفاده می‌شود زیرا با بالا رفتن ولتاژ و جریان قطر عایق و سیم افزایش می‌یابد و اگر دهانه کوچک باشد مشکل نصب پیچک را وجود خواهد داشت. در توان‌های بالاتر معمولاً از شیار با دهانه باز استفاده می‌شود.

در این پژوهش با توجه به مزایای مطرح شده از یک موتور دوبر پایه برای کاربردهای با دقت زیاد مانند میز متحرک برای مونتاژ قطعات الکترونیکی استفاده می‌شود.

۴- مدل تحلیلی موتور

در مدل‌سازی مغناطیسی از روش حل معادلات ماکسول استفاده می‌کنیم. در این روش ماشین به لایه‌های مختلفی از جمله آهن زیرین، آهنربا، هوا، سیم و یوغ تقسیم شده و معادلات پواسن در هر لایه حل می‌شود [۷ و ۱۶ - ۱۸]. به این ترتیب چگالی شار و میدان مغناطیسی در هر نقطه محاسبه و مشخص می‌شود.

ساختار یک موتور سنکرون آهنربای دائم خطی دوبر با هسته هوایی در شکل (۲۵) دیده می‌شود. این مدل شامل دو ثانویه متشکل از آهنربای دائم و آهن زیرین و یک اولیه شامل سیم‌پیچ سه فاز با هسته هوایی است. ابعاد موتور به صورت پارامتری بر روی شکل دیده می‌شود. τ گام قطبی، τ_p پهنای آهنربا، w_c عرض یک فاز سیم‌پیچ، h_c ارتفاع سیم‌پیچ و L عرض موتور است. سیم‌پیچ‌ها سه‌فاز با جریان سینوسی است. با توجه به تقارن ساختار، این مدل لایه‌ای به صورت ارائه شده در شکل (۲۶) ساده می‌شود.



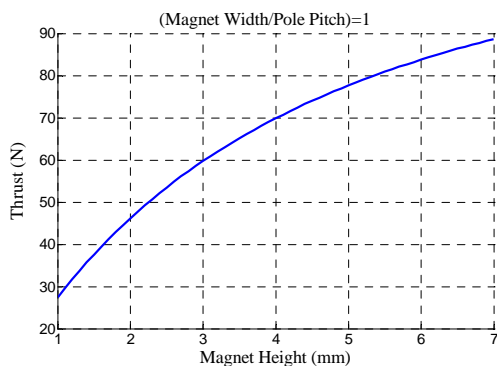
شکل ۲۵- ساختار یک موتور سنکرون آهنربای دائم خطی دو بر با هسته هوایی

آهنرباهای قدرتمندی مانند $Nd-Fe-B$ عملاً امکان دی‌مغناطیس شدن آهنربا بسیار کم است ولی در طراحی باید این مساله قیدی به این منظور برای حداقل ارتفاع آهنربا گذاشته شود.

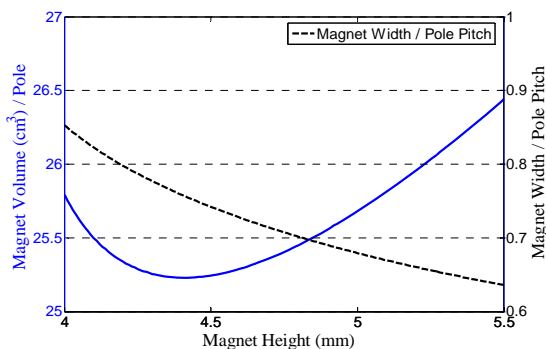
در ادامه برای نیروی ثابت $F_1=68N$ با تغییر ارتفاع آهنربا نمودار شکل (۲۸) بدست می‌آید در این شکل نسبت پهنای آهنربا به گام قطبی و حجم آهنربای مصرفی دیده می‌شود. با استفاده از این نمودار می‌توان ابعاد بهینه آهنربا را برای حداکثر شدن تابع هدف در نیرو مشخص را بدست آورد. ملاحظه می‌شود این نقطه بهینه برای موتور نمونه در ارتفاع آهنربای $4/4$ میلی‌متر اتفاق می‌افتد

جدول ۳ مشخصات موتور نمونه

فاصله هوایی کل	۸/۵mm
تعداد سیم‌پیچ بر فاز بر قطب	۳
ارتفاع سیم‌پیچی	۷mm
تعداد قطب	۲
گام قطبی	۴۲mm
عرض موتور	۹۰ mm
عرض سیم‌پیچی	۱۳ mm



شکل ۲۷- حداکثر نیروی تولیدی بر حسب ارتفاع آهنربا



شکل ۲۸- منحنی حجم آهنربا و نسبت عرض آهنربا به گام قطبی در نیروی ثابت

در این رابطه A_s مساحت هادی هر فاز در زیر هر قطب، J_{rms} چگالی جریان موثر و P تعداد زوج قطب‌ها است.

۵- بهبود ابعاد قطب آهنربای موتور

در این بخش هدف از بهینه‌سازی افزایش نیروی افقی تولیدی و کاهش قیمت موتور از طریق کاهش حجم آهنربای مصرفی می‌باشد. این دو هدف مخالف هم هستند به این صورت که کاهش حجم آهنربای دائم منجر به کاهش نیروی تولیدی خواهد شد. لذا در بهینه‌سازی حجم آهنربا به عنوان تابع هدفی به صورت زیر تعریف شده و نیروی تولیدی به عنوان قید بهینه‌سازی اعمال می‌گردد.

$$J = \frac{1}{V_{PM}} \quad (7)$$

در این رابطه V_{PM} حجم آهنربای دائم در هر قطب از ماشین است.

در طراحی معمولاً حداقل نیروی لازم مشخص است. در این صورت قیدی بر روی نیرو خواهیم داشت. با توجه به روابط بدست آمده برای چگالی شار رابطه بین ارتفاع و پهنای آهنربا از رابطه (۲) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\eta = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(B_{1g} \left(\left(e^{\frac{-\pi g}{\tau}} + 1 \right) + \frac{\left(\mu_M \left(-e^{\frac{-\pi g}{\tau}} + 1 \right) \left(e^{\frac{2\pi h_M}{\tau}} + 1 \right) \right)}{\mu_0 \left(e^{\frac{2\pi h_M}{\tau}} - 1 \right)} \right) \left(\frac{\pi}{8B_r e^{\frac{-\pi g/2}{\tau}}} \right) \right) \quad (8)$$

که در آن هارمونیک اصلی مؤلفه عمودی چگالی شار فاصله هوایی برای داشتن نیروی F_1 عبارت است از:

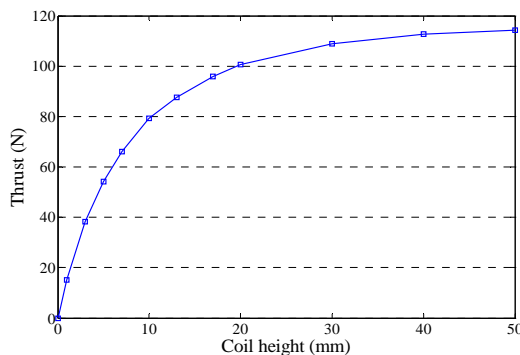
$$B_{1g} = \frac{F_1}{3LA_s J_{rms} P} \quad (9)$$

اما با توجه به این که حداکثر نسبت پهنای آهنربا به گام قطبی برابر یک است ابتدا باید حداقل ارتفاع برای حصول نیروی F_1 را بدست آورد. شکل (۲۷) حداکثر نیروی تولیدی را بر حسب ارتفاع آهنربا نشان می‌دهد. با توجه به این شکل بدیهی است که برای حصول حداکثر نیرو در هر ارتفاع، پهنای آهنربا به گام قطبی برابر یک است. در نتیجه از این نمودار مقدار حداقل ارتفاع برای حصول نیروی F_1 مشخص می‌شود. مثلاً با انتخاب $F_1=68N$ حداقل ارتفاع آهنربا حدود $3/7$ میلی‌متر بدست می‌آید. محدودیت دیگری نیز برای حداقل ارتفاع آهنربا وجود دارد که مربوط به دی‌مغناطیس شدن آن در اثر شدت میدان ناشی از سیم‌پیچ‌ها است. هرچند با وجود

جدول ۴- مشخصات موتور نمونه و موتور بهینه‌سازی شده

مشخصات		موتور نمونه	موتور بهینه
ارتفاع آهنربا		۳/۹mm	۴/۴ mm
نسبت عرض آهنربا به گام قطبی		۰/۹	۰/۷۶
حجم آهنربای مصرفی در هر متر		۶۳۲ Cm ³	۶۰۱ Cm ³
نیروی افقی	روش تحلیلی	۶۸ N	۶۸ N
	روش اجزاء محدود	۷۱/۶ N	۷۲ N

مشاهده می‌گردد که با افزایش مداوم ارتفاع سیم‌پیچی، نوعی از اشباع در نیروی تولیدی حاصل می‌شود. در واقع پس از زانوی منحنی افزایش ارتفاع سیم‌پیچ بر نیروی تولیدی اثر کمی خواهد داشت. نتیجه دیگر آن است که به‌ازای گام قطبی، عرض موتور و چگالی جریان ثابت، حداکثر نیروی یک موتور سنکرون آهنربای دائم دو قطبی محدود می‌باشد. برای استفاده بهینه باید ارتفاع سیم‌پیچ را در محدوده کمتر از ۱۰ میلی‌متر انتخاب کرد که در موتور نمونه و بهبود یافته این محدوده رعایت شده است.



شکل ۳۰- تغییرات نیرو بر حسب ارتفاع سیم‌پیچی

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا به بررسی نسبتاً کاملی از ساختارهای مختلف موتور سنکرون آهنربای دائم خطی پرداخته شد و مزایا و معایب هر ساختار مورد بررسی قرار گرفت. سپس ساختار مناسبی برای کاربردهای دقیق انتخاب شده و این ساختار به کمک روش تحلیلی حل معادلات ماکسول مدل‌سازی گردید. سپس یک بهینه‌سازی موتور نمونه با هدف توام افزایش نیروی و کاهش آهنربای مصرفی انجام شد. نتایج بهینه‌سازی نشان داد که مقدار آهنربای مصرفی در موتور بهینه شده نسبت به موتور نمونه با نیروی تولیدی تقریباً برابر، حدود ۵ درصد کاهش یافت که منجر به کاهش هزینه تولید می‌شود. در پایان صحت نتایج به کمک روش اجزاء محدود تأیید شد.

در جدول (۴) مشخصات موتور نمونه و موتور بهینه‌شده مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که در موتور بهینه‌شده برای هر متر از مسیر ثانویه 31 Cm^3 (۵ درصد) نسبت به موتور نمونه در مصرف آهنربا صرفه‌جویی می‌گردد در حالی که نیروی تولیدی نیز ۱/۵ درصد بهبود یافته است.

در ادامه برای تأیید این موضوع از تحلیل اجزاء محدود استفاده شده است. به این منظور یک طراحی اولیه را با طراحی بهینه موتور مقایسه و شبیه‌سازی نموده‌ایم. خطوط شار در زمان‌های مختلف و با حرکت اولیه در شکل (۲۹) دیده می‌شود. نیروهای بدست آمده توسط روش اجزای محدود در هر دو موتور در جدول (۴) نمایش داده شده است. از آنجا که در روش تحلیلی چگالی شار در وسط فاصله هوایی برای انتخاب شده است و این مقدار کمترین چگالی شار در بخش‌های مختلف سیم‌پیچ است، نیروهای بدست آمده توسط روابط تحلیلی کمتر از مقادیر بدست آمده در روش اجزاء محدود می‌باشد.

در نهایت به بررسی اثر افزایش ارتفاع سیم‌پیچ می‌پردازیم که در مطالعات قبلی نیز توجهی به آن نشده است می‌پردازیم. با ابعاد بهینه بدست آمده برای آهنربا و با گام قطبی و عرض ثابت موتور افزایش ارتفاع آهنربا دو تأثیر متفاوت خواهد داشت. اول آن که موجب افزایش فاصله هوایی شده و در نتیجه موجب کاهش میدان فاصله هوایی می‌شود. از طرفی نیز باعث افزایش سطح موثر سیم‌پیچ شده و با داشتن چگالی جریان ثابت، مقدار آمپر دور سیم‌پیچ افزایش می‌یابد. عامل اول منجر به کاهش نیرو و عامل دوم منجر به افزایش نیرو می‌گردد. برای بررسی چگونگی دقیق تغییرات نیرو، برای ارتفاع‌های مختلف سیم‌پیچ، نیرو به وسیله روش اجزاء محدود بدست آمده است. شکل (۳۰) نمایشگر نیروی تولیدی بر حسب ارتفاع سیم‌پیچ است.



الف- زمان ۰/۵ میلی ثانیه



ب- زمان ۵ میلی ثانیه



ج- زمان ۲۰ میلی ثانیه

شکل ۲۹- خطوط شار در موتور در زمان‌های مختلف

۷- مراجع

- [12] I. S. Jung, S. Y. Yoon, J. H. Shim, D. S. Hyun; **“Analysis of Forces in a Short Primary Type and a Short Secondary Type Permanent Magnet Linear Synchronous Motor”**, IEEE, pp. MC1-8.1-MC1-8.3, 1997.
- [13] S. M. Jang, D. J. You, S. H. Lee, H. W. Cho, W. B. Jang; **“Design and Analysis of Three Types for Permanent Magnet Linear Synchronous Machine”**, in Proc. Sixth Int. Conf. on Electrical Machines and Systems, ICEMS, Vol. 1, Beijing, China, 9-11 Nov, 2003, pp. 31-33.
- [14] Stumberger, D. Zarko, M. T. Aydemir, T. A. Lipo; **“Design and Comparison of Linear Synchronous Motor and Linear Induction Motor for Electromagnetic Aircraft Launch System”**, in Proc. IEEE Int. Electric Machines and Drives Conference, IEMDC, Vol. 1, Madison, Wisconsin, USA, June 1-4, 2003, pp. 494-500.
- [15] S. M. Jang, S. H. Lee, H. W. Cho, S. K. Cho; **“Design and Analysis of Helical Motion Permanent Magnet Motor with Cylindrical Halbach Array”** IEEE Trans. Magn. Vol. 39, pp. 3007-3009, Sept. 2004.
- [16] M. J. Chung, M.G. Lee, S. Q. Lee, S. M. Kim Dae-Gab Gweon; **“Analytical Representation of Cogging Force in Linear Brushless Permanent Magnet Motor”**, Proc. of the ICMT'99, pp. 310-314. Oct. 1999.
- [17] J. Wang, D. Howe, G. W. Jewell; **“Analysis and Design Optimization of an Improved Axially Magnetized Tubular Permanent Magnet Machine”**, IEEE Trans. Eng. Conv. Vol. 19, pp. 289-295, Jun. 2004.
- [18] Z. Deng, I. Boldea, S. A. Nasar, **“Field in Permanent Magnet Linear Synchronous Machines”**, IEEE Trans. Magn., Vol. 22, pp. 107-112, Mar. 1986.
- [19] آرش حسن‌پور اصفهانی، **“مدلسازی، طراحی و بهینه سازی موتور سنکرون آهنربای دائم خطی”**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، شهریور ۱۳۸۴.
- [1] J. F. Gieras, Z. J. Piech; **Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000.
- [2] J. Wang, D. Howe; **“Design Optimization of Radially Magnetized, Iron-Cored, Tubular Permanent-Magnet Machines and Drive Systems”**, IEEE Trans. Magn., Vol. 40, pp. 3262-3277, Sept. 2004.
- [3] A. Boldea, S. Nasar; **Linear Electromagnetic Devices**, Taylor & Francis, 2001.
- [4] S. A. Nasar, I. Boldea; **Linear Electric Actuators and Generators**, Cambridge University Press, 1997.
- [5] M. J. Chung, D. G. Gweon; **“Modeling of Armature Slotting Effect in Magnetic Filed Disturbtion of Linear Permanent Magnet Motor”**, Electrical Engineering Journal, Vol. 84, pp.101-108, Springer-verlag, 2002.
- [6] D. B. Montgomery, **“Overview of the 2004 Magplane Design”**, Magplane Technology, Inc, Tech. Rep., 2004.
- [7] G. H. Kang, J. P. Hong, G. T. Kim, **“A Novel Design of an Air-Core Type Permanent Magnet Linear Brushless Motor by Space Harmonics Field Analysis”**, IEEE Trans. Magn., Vol. 37, pp. 3732-3736, Sept. 2001.
- [8] A. Hassanpour Isfahani, S. Vaez-Zadeh; **“Design Optimization of a Linear Permanent Magnet Synchronous Motor for Extra Low Force Pulsations”**, Journal of Energy Conversion and Management, Vol. 48, pp. 443-449, 2007.
- [9] M. Andriollo, et al; **“Design Optimization of Slotless Linear PM Motors”**, in Proc. of 4th international symposium on linear drives for industry applications, LDIA 2003, Birmingham, UK, 8-10 Sept. 2003, pp. 203-206.
- [10] J. Kim, et al; **“Static Characteristics of Linear BLDC Motor Using Equivalent Magnetic Circuit and Finite Element Method”**, IEEE Trans. Magnetic., Vol. 40, pp. 742-745. Mar. 2004.
- [11] S. Vaez-Zadeh, A. Hassanpour Isfahani; **“Multi-objective Design Optimization of Air-Core Linear Permanent-Magnet Synchronous Motors for Improved Thrust and Low Magnet Consumption”**, IEEE Trans. Magn., Vol. 42, pp. 446-452, March 2006.