

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

مدلسازی، الگوریتم طراحی اولیه و بهینه سازی موتور شار متقاطع مغناطیس

دائم (PMTFM)

دانشجو :

حسین آذرین فر

استاد راهنما :

دکتر احمد دارابی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

زمستان ۱۳۹۰

شماره : ۰۹۳ / ات ب

تاریخ : ۹۰/۱۱/۱۷

ویرایش : -----

بسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی  
فرم شماره (۶)

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای :

حسین آذرین فر رشته : بسرق گرایش : قدرت

تحت عنوان : مدلسازی، الگوریتم طراحی اولیه و بهینه سازی موتور شار متقاطع مغناطیس دائم (PMITFPM)

که در تاریخ ۹۰/۱۱/۱۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

<input type="checkbox"/> مردود	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input checked="" type="checkbox"/> خوب امتیاز (۱۷,۸۳۷۵)
--------------------------------	------------------------------------	--

۱- عالی ( ۲۰ - ۱۹ )

۲- بسیار خوب ( ۱۸/۹۹ - ۱۸ )

۳- خوب ( ۱۶ - ۱۷/۹۹ )

۴- قابل قبول ( ۱۴ - ۱۵/۹۹ )

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	احمد رازان	استاد	
۲- استاد مشاور	---	---	---
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	ایرینا سردی	استادیار	
۴- استاد منتحن	امین حاجی زاده	استادیار	
۵- استاد منتحن	حسین نهر آذرم	استاد	

رئیس دانشکده /

**نمی دانم از چه بنویسم؟ نوشتن درباره انسان هایی که حیات گرمی  
شان را صرف دلواپسی های من، صرف پویایی من کرده اند، بسیار  
دشوار است**

**پدر صبورم،**

**مادر مهربانم،**

**همسر فداکارم،**

**آفتاب و چشمه**

**سوسن و بهار**

**و این دست نوشته ناقابل را تقدیم مهربانی و شکیبایی شما می کنم**

**زندگی من با وجود نازنین شما معنا گرفته است**

**به خاطر همه چیز سپاسگزارم**

## تعهد نامه

اینجناب **حسین آذریز فر** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **برق سازه** دانشکده مهندسی برق و رباتیک

دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان :

**مدلسازی و آنالیز مدارهای ادریم و بهینه سازی مدارهای انتقال مغناطیسی دائم (PM-TFM)**

تحت راهنمایی آقای دکتر **احمد دلاری** منعقد می شود :

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجناب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در 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 اخلاقی انسانی رعایت شده است .

تاریخ :  
امضاء دانشجو  
آذریز فر

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود 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.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

## تقدیر و تشکر:

به نام آن علیمی که شعله‌ی عشق به تحصیل را در فانوس سینه‌ی پر مهر صاحبان علم و طالبان عمل روشن نمود. حمد و سپاس کردگاری را سزاست که رخصت کسب علم و دانش را به ما عطا فرموده است. اکنون که به فضل خدا در این موقعیت قرار گرفته‌ام بر خود لازم می‌دانم تا از تمامی عزیزانی که در این پروژه از راهنمایی‌ها و مساعدت‌های ایشان بهره برده‌ام، قدردانی نمایم.

بدین وسیله از کلیه اساتید گرانقدرم که در تمام مراحل همواره پشتیبان و حامی بنده بودند، بی‌نهایت سپاسگزارم. به ویژه از استاد ارزشمند جناب آقای دکتر دارابی که درس‌های بزرگی را از ایشان فرا گرفته‌ام و همواره راهنما و راه‌گشای بنده در اتمام و اکمال پایان نامه بوده‌اند، کمال تقدیر و تشکر را دارم. در پایان از خانواده خوبم که از آغاز تا کنون همواره مشوق و پشتیبان اینجانب بوده‌اند و همچنین از کلیه دوستان و هم‌کلاسی‌هایم خود در دانشگاه صنعتی شاهرود که با یاری‌ها و راهنمایی‌های ایشان، بسیاری از سختی‌ها را برایم آسان‌تر نمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

حسین آذرین‌فر

۱۳۹۰

## چکیده

ایده‌ی ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۶ توسط آقایان Weh و May ارائه شد. این ماشین‌ها به عنوان ماشین‌هایی با چگالی توان و گشتاور بالا شهرت یافته‌اند. از جمله کاربردهای این نوع ماشین می‌توان به کاربردهای گشتاور بالا در سرعت پائین همانند ژنراتور توربین های بادی و موتور وسایل نقلیه الکتریکی اشاره کرد. چگالی توان و گشتاور بالا با تعداد قطب‌های زیاد و بارگذاری الکتریکی بالا بدست می‌آیند. جنبه نامطلوب این ماشین‌ها بالا بودن شار پراکندگی و پائین بودن ضریب قدرت به دلیل تعداد قطب‌های زیاد، است. متاسفانه مسیرهای سه بعدی خطوط شار، مسیرهای پیچیده شار نشتی و اشباع قابل توجه هسته به مشکلات طراحی این ماشین‌ها می‌افزاید. از جمله مزایایی که این ماشین‌ها را از ماشین‌های معمولی متمایز کرده است، می‌توان به مستقل بودن فازها از یکدیگر، شکل ساده سیم‌پیچی این ماشین‌ها و ... اشاره نمود.

طراحی و مدل‌سازی این ماشین‌ها امری مهم به نظر می‌رسد. در پژوهش حاضر ابتدا در مورد اصول عملکرد و انواع ساختارهای این نوع از ماشین‌ها بحث می‌شود، سپس با انتخاب ساختار قطب چنگالی<sup>۲</sup>، الگوریتم طراحی اولیه برای طراحی ارائه می‌گردد. بعد از مطرح کردن الگوریتم اولیه، دو نمونه از ماشین‌های طراحی شده در مراجع به منظور اطمینان از صحت الگوریتم، مجدداً طراحی می‌شوند و نتایج با اطلاعات داده شده در مراجع مقایسه می‌گردد. بعد از این مرحله ماشین‌های نمونه با روش اجزا محدود<sup>۳</sup> شبیه‌سازی شده و نتایج آن با الگوریتم مقایسه می‌گردد. در نهایت ماشین اصلی با الگوریتم ارائه شده طراحی می‌شود و ابعاد و پارامترهای ماشین با روش سعی و خطا بهینه می‌گردد.

<sup>۱</sup> - Transverse Flux Permanent Magnet Machines

<sup>۲</sup> - Claw pole

<sup>۳</sup> - Finite Element Method

در پایان پژوهش نیز یک نمونه کوچک از ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم با هسته U شکل ساخته شده در آزمایشگاه مطرح می‌شود.

### **کلمات کلیدی:**

ماشین شار متقاطع قطب چنگالی، روش اجزا محدود، الگوریتم طراحی اولیه



## مقالات مستخرج از پایان نامه

❖ ثبت اختراع با عنوان " ماشین سنکرون دیسکی شار متقاطع مغناطیس دائم تکفاز "

## فهرست مطالب

فصل اول	۱
مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- نگاه کلی به تاریخچه TFPM [۴]	۳
۳-۱- مفاهیم و اصطلاحات مورد نیاز برای شناخت ماشین TFPM [۴]	۴
۳-۱-۱- موقعیت فاصله هوایی نسبت به محور چرخش ( ماشین های شعاعی (R) و محوری (A))	۴
۳-۱-۲- موقعیت هسته استاتور نسبت به جهت حرکت، طولی (L) یا متقاطع (عرضی) (T)	۵
۳-۱-۳- موقعیت PM ها نسبت به فاصله هوایی ( رویهای (SM) و شار متمرکز (FC))	۷
۴-۱- اصول عملکرد TFPM	۷
۵-۱- روش تحلیل گشتاور در TFPM	۹
۶-۱- مزیت های TFPM	۱۱
۷-۱- توصیف انواع TFPM از لحاظ موقعیت PMها	۱۲
۷-۱-۱- TFPM با آهنربای سطحی	۱۲
۷-۱-۲- TFPM شار متمرکز	۱۳
فصل دوم	۱۴
انواع ساختارهای ماشین شار متقاطع مغناطیس دائم	۱۴
۱-۲- انواع ساختارهای TFPM شار متمرکز	۱۵
۱-۱-۲- ماشین TFPM دو طرفه، دو سیم پیچه	۱۵
۲-۱-۲- ساختار دو طرفه، یک سیم پیچه با هسته U شکل :	۱۶
۱-۱-۲-۱- ساختار دو طرفه، یک سیم پیچه با هسته C شکل	۱۷
۱-۲-۴- ماشین شار متقاطع قطب چنگالی	۲۰

- ۲۳-۱-۵- ماشین شار متقاطع مغناطیس دائم با هسته E شکل .....
- ۲۴-۱-۶- ساختار TFPM با روتور دیسکی با هسته C شکل [۷] .....
- ۲۵-۱-۷- ماشین شار متقاطع مغناطیس دائم خطی (TFPLM) .....
- ۲۷-۲- انتخاب ساختار مناسب برای طراحی اولیه .....
- ۲۸-۳- بررسی تستهای انجام شده روی نمونه ساختار TFPM با روتور دیسکی با هسته C شکل .....
- ۲۸-۳-۱- تست مدار باز .....
- ۲۹-۳-۲- تست تعیین اندوکتانسهای محورهای d و q روتور ثابت شده .....
- ۳۲-۴- ضریب قدرت ماشینهای TFPM و هزینه الکترونیک قدرت: .....
- ۳۳-۵- مقایسه عملکرد آهن پودر شده و ورقه‌های فولاد Fe-Si .....
- ۳۵-۵- تلفات آهنی در میدانهای سه بعدی .....
- ۳۷-۶- دیگر خواص مغناطیسی مواد SMC و ورقه‌های فولاد .....
- ۳۸-۷- ساخت پودر آهن .....
- ۴۰- فصل سوم .....
- ۴۰- الگوریتم طراحی اولیه ماشین شار محوری آهنربای دائم .....
- ۴۱-۱-۳- معادله ابعادی ماشین .....
- ۵۴-۲-۳- چگالی شار فاصله هوایی [۱۲] و [۱۳] .....
- ۵۴- چگالی شار متوسط فاصله هوایی  $B_g$  به صورت زیر محاسبه میشود: .....
- ۵۴-۳-۳- سیم پیچی .....
- ۵۵-۴-۳- تأیید صحت الگوریتم ارائه شده با استفاده از مشخصات دو نمونه عملی مندرج در منابع .....
- ۵۵-۳-۴-۱- نمونه اول [۱۰] .....
- ۵۵-۴-۳-۱- بعضی مشخصات داده شده ماشین نمونه ۱ .....
- ۵۵-۴-۳-۲- پیاده سازی الگوریتم برای یافتن ابعاد هندسی ماشین نمونه ۱ .....
- ۵۸-۴-۳-۲- نمونه دوم [۱۴] .....

۵۸	۳-۴-۲-۱- بعضی مشخصات نامی داده شده نمونه ۲
۵۸	۳-۴-۲-۲- پیاده سازی الگوریتم برای یافتن ابعاد و پارامترهای طراحی ماشین نمونه ۲
۵۹	۳-۵- مقایسه نتایج
۶۱	۳-۶- شکل موجهای شار در ماشینهای قطب چنگالی و مقایسه بین آنها
۶۳	فصل چهارم
۶۳	مدلسازی، شبیهسازی و بهینه سازی ماشین شار متقاطع آهنربای دائم با ساختار قطب چنگالی
۶۴	۴-۱- مقدمه:
۶۵	۴-۲- شبیه سازی ماشین قطب چنگالی با روش اجزا محدود
۶۵	۴-۲-۱- مقدمه‌های بر نرمافزار ۴.۲ Comsol
۶۸	۴-۲-۲- نتایج
۷۳	۴-۲-۳- نرم افزار ۱۴a Maxwell
۷۳	۴-۲-۳-۱- به دست آوردن اندوکتانس
۷۵	۴-۲-۳-۲- شار پیوندی سیمپیچ و نیروی ضد محرکه
۷۵	۴-۲-۳-۳- مقدار زاویه بار (δ)
۷۵	۴-۳- نمونه دوم
۷۸	۴-۴- پیاده سازی الگوریتم طراحی اولیه برای یافتن ابعاد هندسی ماشین اصلی و بهینه‌سازی آن
۷۹	۴-۱-۴- مشخصات نامی ماشین اصلی
۷۹	۴-۱-۴-۱- طراحی به ازای فرکانسهای مختلف
۷۹	۴-۱-۴-۱-۱- فرکانس ۳۰ هرتز
۸۰	۴-۱-۴-۲- فرکانس ۵۵ هرتز
۸۲	۴-۱-۴-۳- فرکانس ۲۰۰ هرتز
۸۴	۴-۱-۴-۴- نتایج به دست آمده از الگوریتم در فرکانسهای مختلف
۸۷	۱-۳-۵- بهینه کردن طرح نهائی
۸۷	۱-۴-۴-۵- اثر <i>Ks</i>

۸۸	..... ۱-۵-۴-۲- اثر <i>KL</i>
۹۰	..... فصل پنجم
۹۰	..... یک نمونه عملی از ماشینهای شار متقاطع مغناطیس دائم
۹۱	..... ۱-۵- مشخصات ماشین طراحی و ساخته شده
۹۱	..... ۱-۱-۵- استاتور
۹۳	..... ۲-۱-۵- سیم پیچی
۹۳	..... ۳-۱-۵- شفت (محور)
۹۴	..... ۴-۱-۵- روتور
۹۶	..... ۱-۶-۵- آهنرباهای دائم
۹۶	..... ۱-۷-۵- بلبرینگ
۹۶	..... ۱-۸-۵-۷- اسمبل کردن ماشین
۹۸	..... ۲-۵- تستهای انجام شده روی ماشین
۹۸	..... ۱-۹-۵-۲-۱- در حالت ژنراتوری
۹۹	..... ۱-۲-۵-۱- مشخصه ولتاژ- جریان ماشین در حالت مولدی
۱۰۰	..... ۲-۲-۵-۱-۲- مشخصه راندمان-توان ماشین در حالت مولدی
۱۰۴	..... ۱-۲-۲-۵- مشخصه راندمان-توان ماشین در حالت موتوری
۱۰۴	..... ۲-۲-۲-۵- راکتاس سنکرون ماشین در حالت موتوری
۱۰۶	..... فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۰۷	..... ۱-۶- جمع بندی و نتیجه گیری
۱۰۷	..... ۲-۶- پیشنهادات
۱۰۹	..... مراجع

## فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) : موقعیت فاصله هوایی ماشین شعاعی و ماشین محوری ..... ۵
- شکل (۲-۱) : موقعیت استاتور ماشین طولی و عرضی (مقاطع) ..... ۶
- شکل (۳-۱) : ساختارهای FC و SM ..... ۷
- شکل (۴-۱) : یک بخش از ماشین TFPM یک طرفه ..... ۸
- شکل (۵-۱) : ماشین TFPM با رویه‌ی سطحی ..... ۱۳
- شکل (۶-۱) : ماشین TFPM شار متمرکز ..... ۱۳
- شکل (۱-۲) : ماشین TFPM دو طرفه، دو سیم پیچه ..... ۱۶
- شکل (۲-۲) : ساختار دو طرفه، یک سیم پیچه با هسته U شکل ..... ۱۷
- شکل (۳-۲) : ساختار دو طرفه، یک سیم پیچه با هسته C شکل ..... ۱۸
- شکل (۴-۲) : ماشین دو طرفه، تک سیم پیچه با هسته C شکل مطرح شده توسط Mecrow ..... ۱۸
- شکل (۵-۲) : ماشین شار متقاطع قطب چنگالی ..... ۲۰
- شکل (۶-۲) : ساختار Claw Pole ..... ۲۲
- شکل (۷-۲) : ماشین قطب چنگالی دو طرفه و ماشین خطی ..... ۲۳
- شکل (۹-۲) : نمایش مفهوم کلی یک نمونه موتور دیسک ..... ۲۵
- شکل (۱۰-۲) : نمایش نمونه عملی ..... ۲۵
- شکل (۱۱-۲) : ساختار پایه TFPLM ..... ۲۶
- شکل (۱۲-۲) : آرایش فازهای A و B ..... ۲۶
- شکل (۱۳-۲) : جریان فازها و نیروی محوری ایجاد شده ..... ۲۶
- شکل (۱۴-۲) : تست مدار باز با اتصال اسیلوسکوپ ..... ۲۹
- شکل (۱۵-۲) : تغییرات ولتاژ خروجی بی باری با تغییرات فرکانس ..... ۲۹
- شکل (۱۶-۲) : مدار تست تعیین اندوکتانسهای محورهای d و q روتور ثابت شده ..... ۳۰

- شکل (۲-۱۷) : بردار امیدانس محور d ..... ۳۱
- شکل (۲-۱۸) : بردار امیدانس محور q ..... ۳۱
- شکل (۲-۱۹) : ذرات آهنی میکروسکوپی و عایق بین آن‌ها ..... ۳۵
- شکل (۲-۲۰) : مسیر جریان گردشی در اطراف عایق ..... ۳۵
- شکل (۲-۲۱) : دو ساختار ورقه کردن هسته استاتور ..... ۳۷
- شکل (۲-۲۳) : فرآیند تولید آهن پودر شده ..... ۳۹
- شکل (۳-۱) : ماشین شار متقاطع قطب چنگالی ..... ۴۱
- شکل (۳-۲) : نمایش یک جفت قطب از هر فاز ماشین قطب چنگالی به همراه پارامترهای آن ..... ۴۲
- شکل (۳-۳) : یک قطعه از روتور [۵] ..... ۵۱
- شکل (۳-۴) : مقدار بهینه  $K_L$  نسبت به سرعت مکانیکی نامی  $n_s$  برای تعداد جفتهای قطبهای مختلف ..... ۵۳
- شکل (۴-۱) : سه بعدی ساختار یک فاز از ماشین قطب چنگالی ..... ۶۴
- شکل (۴-۲) : نحوه فراخوانی شکل از نرمافزار کمکی گرافیکی ..... ۶۵
- شکل (۴-۳) : نحوه لینک کردن نرمافزار Solid Works با Comsol ۴.۲ ..... ۶۶
- شکل (۴-۴) : ساختار معرفی شده به نرمافزار Comsol ۴.۲ ..... ۶۶
- شکل (۴-۵) : مش بندی ماشین نمونه ..... ۶۷
- شکل (۴-۶) : مش بندی فاصله هوایی ..... ۶۸
- شکل (۴-۷) : نمایش برداری چگالی شار مغناطیسی همراه با اندازههای چگالی شار در حالت بدون جریان ..... ۶۸
- شکل (۴-۸) : طیف رنگی چگالی شار در یک قطب استاتور ..... ۶۹
- شکل (۴-۹) : توزیع چگالی شار مغناطیسی بیباری در خط وسط فاصله هوایی ماشین قطب چنگالی مورد مطالعه .. ۷۰
- شکل (۴-۱۰) : مؤلفه عمودی چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی در حالت بدون جریان بر حسب اندازه قوس کمان ..... ۷۱
- شکل (۴-۱۱) : مؤلفه عمودی چگالی شار مغناطیسی زیر فاصله هوایی در حالت جریان نامی ..... ۷۱
- شکل (۴-۱۲) : توزیع چگالی شار مغناطیسی بیباری در خط وسط فاصله هوایی ماشین قطب چنگالی مورد مطالعه. ۷۶

- شکل (۴-۱۳) : مؤلفه عمودی چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوائی در حالت بدون جریان بر حسب اندازه قوس کمان ..... ۷۶
- شکل (۴-۱۴) : مؤلفه عمودی چگالی شار مغناطیسی زیر فاصله هوائی در حالت جریان نامی ..... ۷۷
- شکل (۴-۱۵) : مؤلفه عمودی چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوائی در حالت بدون جریان بر حسب اندازه قوس کمان ..... ۸۶
- شکل (۴-۱۶) : طیف رنگی توزیع چگالی شار ..... ۸۷
- شکل (۵-۱) : نمای شبیه سازی شده استاتور بدون ..... ۹۲
- شکل (۵-۳) : هسته U شکل ..... ۹۳
- شکل (۵-۴) : نمای شبیهسازی استاتور همراه با هستهها ..... ۹۳
- شکل (۵-۵) : نقشه شفت روتور به همراه ابعاد ..... ۹۴
- شکل (۵-۷) : نمای جلو و جانبی دیسک روتور به همراه ابعاد ..... ۹۵
- شکل (۵-۸) : نقشه سوراخ کاری دیسک روتور به همراه ابعاد آن ..... ۹۶
- شکل (۵-۹) : شمای کلی ماشین به صورت شبیهسازی شده ..... ۹۷
- شکل (۵-۱۰) : نمای کلی ماشین به صورت عملی ..... ۹۷
- شکل (۵-۱۱) : یکی از بدنههای استاتور به همراه هستههای U شکل و سیمپیچی ..... ۹۸
- شکل (۵-۱۲) : منحنی ولتاژ خروجی بر حسب جریان خروجی در بار مقاومتی ..... ۱۰۰
- شکل (۵-۱۳) : مشخصه راندمان-توان در حالت مولدی ..... ۱۰۰
- شکل (۵-۱۴) : دیاگرام برداری مولدی پس فاز ..... ۱۰۱
- شکل (۵-۱۵) : شکل موج ولتاژ ورودی موتور در یک مرحله آزمایش ..... ۱۰۲
- شکل (۵-۱۶) : شکل موج جریان ورودی موتور در یک مرحله آزمایش ..... ۱۰۲
- شکل (۵-۱۷) : مشخصه راندمان - توان در حالت موتوری ..... ۱۰۴
- شکل (۵-۱۸) : دیاگرام برداری موتور پس فاز ..... ۱۰۵



## فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۱) : سیر تکاملی ماشین TFPM ..... ۳
- جدول (۲-۱) : مشخصات نمونه های عملی ساخته شده TFPM ..... ۴
- جدول (۱-۲) : مقایسه بین نمونه عملی ..... ۳۲
- جدول (۲-۲) : مقایسه بین مقاومت ویژه آهن پودر شده و ورقه‌های فولاد Fe-Si ..... ۳۳
- جدول (۳-۲) : خواص مغناطیسی ورقه‌های Fe-Si و مواد SMC ..... ۳۸
- جدول (۱-۳) : معرفی پارامترهای طراحی ماشین قطب چنگالی ..... ۴۳
- جدول (۲-۳) : شکل موجهای نمونه اولیه نوعی ..... ۴۷
- جدول (۳-۳) : ابعاد و پارامترهای محاسبه شده نمونه دوم با الگوریتم ..... ۵۸
- جدول (۴-۳) : مقایسه نتایج: ماشین نمونه ۱ ..... ۵۹
- جدول (۵-۳) : مقایسه نتایج: ماشین نمونه ۲ ..... ۶۰
- جدول (۶-۳) : مقایسه نتایج: ماشین نمونه ۱ ..... ۶۲
- جدول (۷-۳) : مقایسه نتایج: ماشین نمونه ۲ ..... ۶۲
- جدول (۱-۴) : مقایسه چگالی شار مغناطیسی بدون جریان حاصل از محاسبات تحلیلی و FEM ..... ۷۲
- جدول (۲-۴) : چگالی شار حاصل از جریان آر میچر ..... ۷۲
- جدول (۳-۴) : مقایسه چگالی شار مغناطیسی بدون جریان حاصل از محاسبات تحلیلی و FEM ..... ۷۷
- جدول (۵-۴) : مقایسه بین نتایج حاصل از شبیه سازی و مرجع ..... ۷۸
- جدول (۶-۴) : مقادیر پریونیت شده نیروی ضد محرکه، راکتانس سنکرون و مقاومت ..... ۷۸
- جدول (۷-۴) : فرضیات و پارامترهای بهینه به دست آمده از الگوریتم در فرکانس ۳۰ هرتز ..... ۷۹
- جدول (۸-۴) : فرضیات و پارامترهای بهینه به دست آمده از الگوریتم در فرکانس ۵۵ هرتز ..... ۸۰
- جدول (۹-۴) : فرضیات و پارامترهای بهینه به دست آمده از الگوریتم در فرکانس ۲۰۰ هرتز ..... ۸۲
- جدول (۱۰-۴) : نتایج حاصل از طراحی با فرکانسهای مختلف ..... ۸۴

- جدول (۴-۱۱) : مقایسه چگالی شار فاصله هوایی در محاسبات تحلیلی و روش اجزا محدود ..... ۸۵
- جدول (۴-۱۲) : مقادیر راکتانس سنکرون و نیروی ضد محرکه پریونیت شده ماشین اول نمونه به همراه چگالی توان و تعداد دور ..... ۸۶
- جدول (۴-۱۳) : تاثیر  $Ks$  بر شار پیوندی و اندوکتانس ..... ۸۸
- جدول (۵-۱) : مقادیر ولتاژ و جریان برای بارهای مقاومتی مختلف ..... ۹۹
- جدول (۵-۲) : راکتانس سنکرون ماشین (مولدی) ..... ۱۰۲
- جدول (۵-۳) : نتایج حاصل از آزمایش در حالت موتوری ..... ۱۰۳
- جدول (۵-۴) : راکتانس سنکرون ماشین ..... ۱۰۵

# فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱- مقدمه

ماشین‌های TFPM<sup>۱</sup> به عنوان ماشین‌های با چگالی توان و گشتاور بالا شهرت یافته‌اند. از جمله کاربردهای این نوع ماشین‌می‌توان به کاربردهای گشتاور بالا در سرعت بالا همانند ژنراتور توربین‌های بادی و موتور وسایل نقلیه الکتریکی اشاره کرد [۱]. این ماشین‌ها همچنین در موتورهای ربات و کشتی‌های الکتریکی و وسایل خانگی مانند ماشین لباسشویی بکار می‌روند [۲].

چگالی توان و گشتاور بالا با تعداد قطب‌های زیاد و بارگذاری الکتریکی بالا بدست می‌آیند. جنبه نامطلوب این ماشین‌ها بالا بودن شار پراکندگی و پائین بودن ضریب قدرت به دلیل تعداد قطب‌های زیاد، است. متأسفانه مسیرهای سه بعدی خطوط شار، مسیرهای پیچیده شار نشتی و اشباع قابل توجه هسته به مشکلات طراحی این ماشین‌ها می‌افزاید [۱].

از جمله مزایایی که این ماشین‌ها را از ماشین‌های معمولی متمایز کرده است، می‌توان موارد زیر را مطرح کرد:

الف- هر فاز موتور کاملاً از فاز‌های دیگر مجزا است، بنابراین از لحاظ الکترومغناطیسی هیچگونه تزویجی بین فازها وجود ندارد.

ب- هر سیم‌پیچی استاتور شامل یک سولنوئید است که توسط هسته‌ی مربوط به خود احاطه می‌شود.

---

۱ - Transverse Flux Permanent Magnet Machine

ج- در این ماشین ها معمولاً هسته‌های استاتور در بیرون و داخل روتور قرار می‌گیرند و هر دو طرف فعالانه در تولید گشتاور شرکت می‌کنند [۳].

## ۲-۱- نگاه کلی به تاریخچه TFPM [۴]

جدول (۱-۱) انواع ساختارهای شار متمرکز را نمایش می‌دهد، شش نمونه عملی از این ماشین‌ها ساخته شده و نتایج آزمایشگاهی آن در این جدول به نمایش در آمده است. جدول (۱-۲) بر اساس بالاترین به پایین‌ترین نسبت هزینه به گشتاور مرتب شده است (در محاسبه قیمت‌ها، جرم مس و آهن در ۶ یورو بر کیلوگرم ضرب می‌شود و برای محاسبه قیمت PM، جرم آن در ۴۰ یورو بر کیلوگرم ضرب می‌شود).

جدول (۱-۱): سیر تکاملی ماشین TFPM

نمونه های عملی ساخته شده	نویسندگان	سال تولید در نوشتجات	شار متمرکز TFPM انواع
Weh, ۱۹۸۸, قطر : ۵۰۰ mm	Weh ۱۹۸۸a Weh ۱۹۸۸b	۱۹۸۸	دو طرفه - دو سیم پیچه
Lange , ۲۰۰۰, قطر : ۳۷۰ mm	Weh ۱۹۹۵ Lan ۲۰۰۰a	۱۹۹۵	دو طرفه - تک سیم پیچه با هسته U شکل
Mecrow, ۱۹۹۶, قطر : ۳۶۲ mm Voyce , ۲۰۰۰, قطر : ۱۲۰۰ mm	Weh ۱۹۹۵ Mec ۱۹۹۶ Mit ۱۹۹۷ Voy ۲۰۰۰	۱۹۹۵	دو طرفه - تک سیم پیچه با هسته C شکل
گزارش نشده	Weh ۱۹۹۵	۱۹۹۵	با هسته E شکل
Maddison, ۱۹۹۸ قطر: ۳۳۵ mm Blissenbach, ۲۰۰۰ قطر: ۳۹۰ mm	Weh ۱۹۹۴ Mad ۱۹۹۸ Bli ۲۰۰۰	۱۹۹۴	قطب چنگالی

جدول (۱-۲) : مشخصات نمونه های عملی ساخته شده TFPM

ضریب قدرت در بار کامل	نسبت هزینه به گشتاور (Euros/kNm)	گشتاور به جرم (Nm/Kg)	جرم PM (Kg)	جرم مواد آکسیو مصرفی (Kg)	گام قطبی (mm)	گشتاور نامی (Nm)	قطر (mm)	ساختار و نویسنده TFPM
در دسترس نیست	در دسترس نیست	در دسترس نیست	در دسترس نیست	در دسترس نیست	۴۵	۷۵ ۹۶۰	۱۲۰۰	دو طرفه - تک سیم پیچه با هسته C شکل Voyce [Voy ۲۰۰۰]
در دسترس نیست	۸۱۴	۱۰/۲	۲	۲۷/۲	۸	۲۸۰	۵۰۰	دو طرفه - دو سیم پیچه Weh [Weh ۱۹۸۸a]
در دسترس نیست	۶۶۰	۱۷/۳	۱۱/۵	۷۳	۲۶	۱۲۶۰	۳۷۰	دو طرفه - تک سیم پیچه با هسته U شکل Lange [Lan ۲۰۰۰a]
۰/۵۳	۶۳۵	۱۲/۳	۱/۲	۲۲/۷	۸/۵	۲۸۰	۳۶۰	دو طرفه - تک سیم پیچه با هسته C شکل Mecrow [Mec ۱۹۹۶]
۴	در دسترس نیست	۲۲/۷	در دسترس نیست	۱۱۰	۳۰/۶	۲۵۰۰	۳۹۰	قطب چنگالی Blissenbach [Bli ۲۰۰۰]
در دسترس نیست	۳۶۱	۲۶	۲	۲۰/۸	۱۰/۷	۵۴۰	۳۴۰	قطب چنگالی Maddison [Mad ۱۹۹۸]

### ۳-۱- مفاهیم و اصطلاحات مورد نیاز برای شناخت ماشین

#### TFPM [۴]

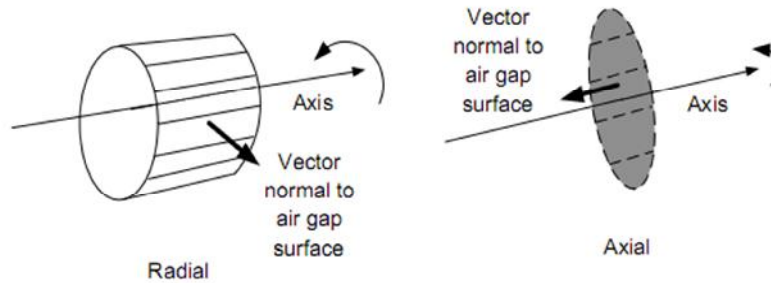
#### ۱-۳-۱- موقعیت فاصله هوائی نسبت به محور چرخش ( ماشین های

#### شعاعی<sup>۱</sup> (R) و محوری<sup>۲</sup> (A))

فاصله هوائی در ماشین ها، برای جدا سازی استاتور از روتور لازم است. همچنین فاصله هوائی، سطحی بین روتور و استاتور ایجاد می کند که می توان یک بردار که به بردار نرمال<sup>۱</sup> معروف است، بر

۱- Radial  
۲- Axial

آن عمود کرد. اگر بردار نرمال فاصله هوایی بر محور چرخش روتور عمود باشد، ماشین شعاعی نامیده می‌شود و اگر بردار نرمال با محور چرخش موازی باشد به آن ماشین محوری گویند (شکل (۱-۱)).



شکل (۱-۱) : موقعیت فاصله هوایی ماشین شعاعی و ماشین محوری

### ۱-۳-۲- موقعیت هسته‌ی استاتور نسبت به جهت حرکت، طولی<sup>۱</sup> (L)

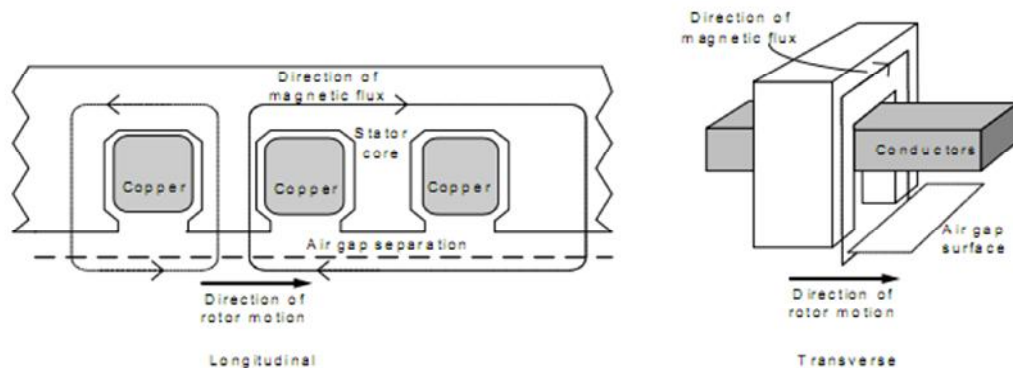
#### یا متقاطع (عرضی)<sup>۲</sup> (T)

هسته استاتور شار را به اطراف سیم‌پیچی‌ها هدایت می‌کند تا نیروی محرکه الکتریکی در سیم‌پیچ‌ها بوجود آید. خطوط شار را می‌توان تقریباً در یک صفحه عمود بر جهت حرکت و یا موازی با جهت حرکت روتور در نظر گرفت که مسیر آنها از یک قطب به قطب دیگر و یا از طرف روتور به استاتور یا بالعکس، بسته می‌شوند. در حالت اول ماشین را عرضی (T) و در حالت دوم طولی (L) می‌نامند (شکل (۲-۱)).

۱ - Vector normal to air gap surface

۲ - Longitudinal

۳ - Transverse



شکل (۱-۲): موقعیت استاتور ماشین طولی و عرضی (مقاطع)

آقای Laithwaite از اولین نویسندگانی بود که استاتورهای طولی و عرضی را بررسی کرد. تفاوت و نکته جالب توجه ماشین های طولی و عرضی در چگالی جریان خطی است. در استاتورهای طولی با کاهش گام قطب، فضای در دسترس برای جاگذاری هادی ها کم می شود. جریان بار گذاری یا چگالی جریان خطی این ماشین ها از رابطه زیر بدست می آید:

$$A = \frac{N_{slot} I_s q m}{\tau_p} \quad (1-1)$$

که در آن  $I_s$  مقدار موثر جریان هر فاز استاتور،  $N_{slot}$  تعداد هادی ها در هر شیار،  $q$  تعداد شیار بر قطب بر فاز،  $m$  تعداد فازها و  $\tau_p$  گام قطب است.

برای یک عرض دندان و چگالی جریان ( $J$ ) ثابت، اگر گام قطب ماشین طولی کم شود، فضای در دسترس برای هادی ها کم شده و مقدار  $N_{slot} I_s$  کاهش می یابد. بنابراین، جریان بارگذاری برای ماشین های طولی با کاهش گام قطب تغییر چندانی نمی کند.

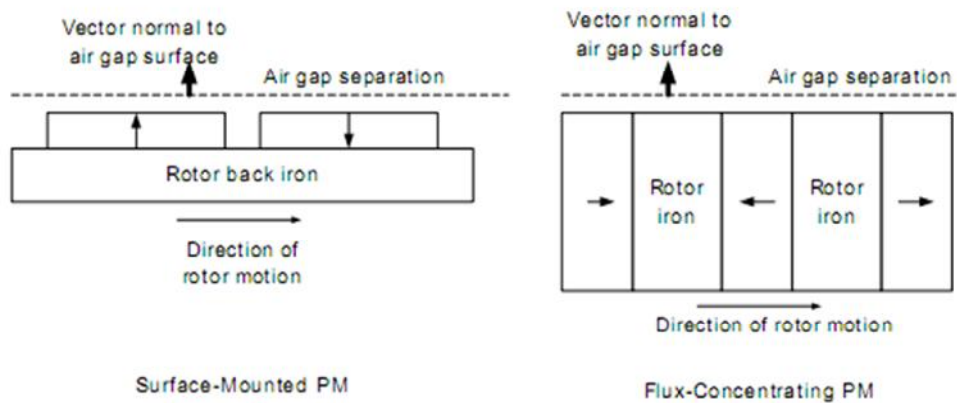
در یک ماشین عرضی، ( $m=1, q=1$ ) فضای در دسترس برای هادی ها به گام قطب وابسته نیست. اگر گام قطب در این ماشین ها کاهش پیدا کند، مقدار  $N_{slot} I_s$  ممکن است ثابت بماند و یا حتی اگر لازم باشد، افزایش پیدا کند. در این صورت جریان بارگذاری در این ماشین ها با کاهش گام قطب، افزایش پیدا می کند.



### ۱-۳-۳- موقیعت PM ها نسبت به فاصله هوایی ( رویه‌ای<sup>۱</sup> ) ( SM ) و شار

#### متمركز<sup>۲</sup> ( FC )

با توجه به شكل (۱-۳)، مغناطیس های دائم بر روی آهن روتور نصب می شوند با این تفاوت كه در ماشین های SM، جهت مغناطش PMها در جهت بردار نرمال صفحه فاصله هوایی است، حال آنكه در FC، عمود بر بردار نرمال صفحه فاصله هوایی است. در نوع FC مغناطیس های دائم طوری نصب می شوند تا شار متمركز شده و به طرف فاصله هوایی هدایت گردد [۴].



شكل (۱-۳) : ساختارهای FC و SM

### ۱-۴- اصول عملکرد TFPM

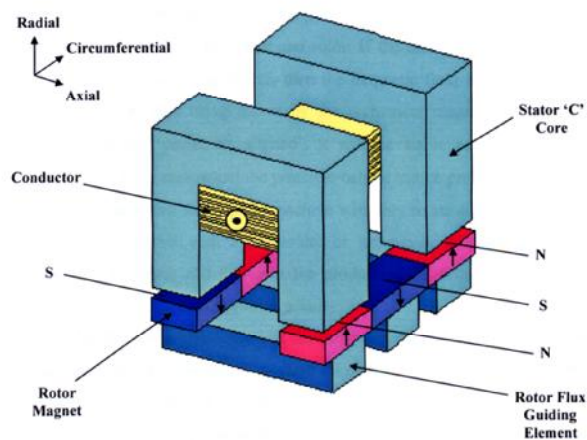
از زمان مطرح شدن ماشین‌های TFPM در اواسط دهه هشتم، تغییرات متعددی در ساختار آن انجام شده است. اولین طرح با یک طرف فعال<sup>۳</sup> از این ماشین‌ها توسط Weh ارائه شده است. این

۱- Surface-Mounted PM

۲- Flux-Concentrating

۳- One Active Side

طرح از هسته‌های مجزای C شکل از ورقه‌های فولادی تشکیل یافته بود که در محیط ماشین قرار داده می شدند. یک سیم پیچ توروئیدال احاطه شده توسط این هسته‌ی C شکل به صورت شعاعی بالای روتور قرار می گرفت. روتور این ماشین شامل دو ردیف از مغناطیس‌های دائم با قطب‌های ناهمنام کنار هم نصب شده بر روی هسته‌های آهنی مورق بود. این هسته‌های آهنی مسیرهای عبور شار بین دو ردیف مغناطیس‌های دائم را ایجاد می کردند. یک بخش از ماشین نمایش دهنده یک فاز از این ساختار در شکل (۴-۱) ارائه شده است.



شکل (۴-۱): یک بخش از ماشین TFPM یک طرفه

اکنون مناسب است کمی در رابطه با نحوه عملکرد ماشین TFPM توضیح دهیم.

مسیر خطوط شار را، همانطور که در شکل (۴-۱) مشاهده می شود، بترتیب شامل بخش‌های زیر می باشد:

- مسیر شعاعی به طرف بالا در فاصله‌ی هوایی سمت راست
- مسیر شعاعی به سمت بالا در بازوی راست هسته‌ی C شکل
- مسیر محوری در بالای هسته‌ی C شکل از راست به چپ

- مسیر شعاعی به سمت پایین در بازوی چپ هسته‌ی C شکل

- مسیر محوری در هسته‌های آهن‌های روتور

یک میدان دور زننده مغناطیسی در اطراف هادی‌ها بواسطه عبور جریان و طبق قانون لنز بوجود می‌آید. به علت نفوذپذیری مغناطیسی مسیر آهنی استاتور و روتور، شار مغناطیسی در آنها جاری می‌شود. اگر جریان هادی بصورت نشان داده شده در شکل (۱-۴) باشد در این موقعیت شار حاصل از جریان سیم پیچی با شار آهنرباهای دائم روتور هم جهت خواهد بود و در این حالت هیچ‌گونه گشتاوری تولید نمی‌شود. به منظور فهم اساس عملکرد ماشین TFM باید توجه شود که تولید گشتاور در این ماشین‌ها مستلزم آن است که استاتور آن‌ها با یک جریان متناوب سینوسی یا دوزنقه‌ای تغذیه شود. اگر آهنرباها در جای خود بدون حرکت باقی بمانند ولی جریان استاتور عکس شود، جهت شار ایجاد شده توسط جریان سیم پیچی در خلاف جهت شار تولید شده توسط آهنرباهای دائم می‌شود. در این شرایط با افزایش جریان، نیروی قابل توجهی بین قطب‌های روتور و استاتور به وجود می‌آید و اگر روتور آزادی حرکت داشته باشد، تقابل بین شارها باعث حرکت زاویه‌ای آن می‌شود. مقدار گشتاور تولیدی در این ماشین‌ها بستگی به شدت مغناطش PM و جریان بارگذاری دارد. نکته قابل توجه این است که اگر سیم پیچی تک فاز باشد، جهت حرکت سیستم کاملاً اختیاری خواهد بود.

## ۱-۵- روش تحلیل گشتاور در TFPM

اساس تحلیل نیرو در ماشین‌های الکتریکی، حاصل ضرب چگالی شار فاصله هوایی ( $B$ )، بارگذاری الکتریکی ویژه ( $i$ ) و طول هادی در میدان مغناطیسی ( $i$ ) می‌باشد. برای تبدیل نیرو به گشتاور باید نیرو در هر نقطه را در شعاع متوسط فاصله هوایی ( $r$ ) ضرب کرد و سپس بر روی محیط ماشین انتگرال گرفت. به دلیل ساختار متمایز ماشین‌های TFM در مقایسه با سایر ماشین‌ها، نمی‌توان این روش تحلیل را بکار برد، بلکه باید از یک رابطه عام‌تر استفاده کرد. گشتاور تولیدی در

ماشین‌های الکتریکی بر حسب نسبت تغییرات کو انرژری به موقعیت روتور نیز بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$T = i \frac{d\psi}{d\theta} = Ni \frac{d\phi}{d\theta} \quad (2-1)$$

با توجه به رابطه (۲-۱)، گشتاور تولیدی ماشین‌های الکتریکی برابر با حاصل ضرب جریان الکتریکی ( $i$ ) و نسبت تغییرات شار پیوندی هر فاز ( $\psi$ ) نسبت به جابجایی زاویه ای ( $\theta$ ) بین موقعیت‌های حداقل و حداکثر شار پیوندی می‌باشد. البته این رابطه تقریبی فقط در یک مدل کاملاً خطی صادق است و برای تحلیل دقیق تر و واقعی تر می‌توان از روش اجزاء محدود استفاده نمود.

اکنون مناسب است در مورد علت و چگونگی ایجاد گشتاور بزرگ در این ماشین‌ها صحبت کرد. همان طور که در قسمت قبل توضیح داده شد، MMF هر فاز با افزایش قطب‌ها در ماشین‌های شار طولی (LFM)<sup>۱</sup> استاندارد، کاهش پیدا می‌کند. کاهش MMF هر فاز باعث می‌شود که شار پیوندی هر دور سیم پیچی متناسب با کاهش تغییرات زاویه‌ای که به واسطه افزایش تعداد قطب‌ها بوجود می‌آید، بطور فاحش کم شود. نتیجه کلی که از این بحث می‌توان گرفت، این است که تولید گشتاور در ماشین‌های LFM نسبتاً مستقل از تعداد قطب‌ها است اما این موضوع در ماشین‌های TFM صحت ندارد. اگرچه افزایش تعداد قطب‌ها، شار هر قطب را کاهش می‌دهد، ولی به دلیل تعداد قطب‌های زیاد، شار پیوندی سیم‌پیچی‌ها در ماشین TFM نسبتاً ثابت است. بعلاوه تعداد قطب‌های زیاد باعث کاهش تغییرات زاویه‌ای قطب‌ها می‌شود ( $\partial\theta$  کاهش یافته ولی  $\partial\psi$  ثابت مانده است)، بنابراین گشتاور تولیدی در ماشین‌های TFM افزایش می‌یابد.

<sup>۱</sup> - Longitudinal Flux Machine

## ۱-۶- مزیت‌های TFPM

سه مزیت مهم ماشین های TFM به صورت زیر است:

- همانطور که در بخش قبل بررسی شد، تعداد قطب‌ها در ماشین TFPM تاثیر قابل ملاحظه ای در مقدار گشتاور خروجی دارد.
- به دلیل شکل توروئیدال سیم‌پیچی در این ماشین‌ها طول سیم پیچی کاهش یافته و این کاهش طول سیم، مقدار مس مصرفی را کاهش و راندمان ماشین را افزایش می‌دهد.
- آهنرباهای قوی ساخته شده از خاک های نادر و بکار گیری تکنیک‌های متمرکز کننده شار، امکان بارگذاری های مغناطیسی بسیار بالا را در این نوع ماشین‌های الکتریکی فراهم آورده است.

باید توجه داشت که برای ایجاد چگالی شار زیاد، نیاز به یک مقدار معادل MMF بزرگ و تعداد دور زیاد برای سیم پیچی‌های آرمیچر، می‌باشد. این تعداد دور سیم پیچی زیاد خود به پنجره بزرگی برای جاگذاری سیم‌پیچی‌ها در آن نیاز دارد. در ماشین‌های LFM معمولاً هادی‌ها بین دندان‌های استاتور قرار می‌گیرد، بنابراین برای افزایش سطح مقطع پنجره سیم-پیچی می‌توان به صورت شعاعی یا دایره‌ای اقدام کرد. اگر افزایش سطح مقطع پنجره سیم-پیچی به صورت دایره‌ای باشد، کم شدن عرض دندان‌های استاتور باعث اشباع آن‌ها می‌گردد در حالیکه اگر افزایش سطح مقطع پنجره سیم‌پیچی شعاعی باشد، طول دندان‌های استاتور در راستای شعاع زیاد می‌شود که این خود باعث افزایش رلوکتانس و قطر ماشین می‌شود. [۵].

## ۷-۱- توصیف انواع TFPM از لحاظ موقعیت PMها

### ۷-۱-۱ TFPM با آهنربای سطحی

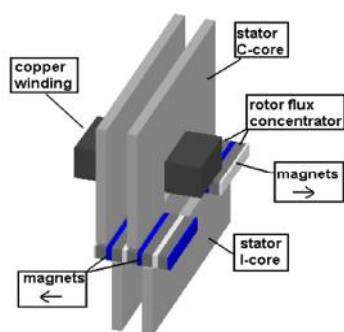
ماشین TFPM با آهنرباهای سطحی در شکل (۱-۵) نمایش داده شده است. نویسندگان مختلف از جمله [Har ۱۹۹۳] [Weh ۱۹۸۸b]، در مورد این ماشین بحث کرده‌اند.

همانطور که در مقدمه بحث شد، چیدمان عرضی استاتور در این ماشین‌ها، سیم‌پیچی‌ها را مستقل از گام قطب می‌کند. به همین دلیل گام قطب در این ماشین‌ها می‌تواند تا حد ۱ تا ۲ سانتی‌متر هم کاهش و مقدار جریان بارگذاری به مقدار خیلی زیاد افزایش یابد. همانطور که در شکل (۱-۵) دیده می‌شود، نیمی از قطب‌های روتور در تولید نیرو محرکه در سیم‌پیچی‌ها نقش دارند. PMهاییکه که در جلوی استاتور قرار دارند، شار مفیدی را در اطراف سیم‌پیچی‌های استاتور ایجاد می‌کنند، در حالیکه PMهاییکه که همزمان جلوی استاتور قرار ندارند، شار را در هوا می‌پراکنند. بنابراین اگر گام قطب در این ماشین‌ها به قدر کافی کوچک انتخاب شود، افزایش در جریان بارگذاری، مسئله فوق‌الذکر را تا حدودی حل خواهد کرد. با قاطعیت می‌توان گفت در هیچ ماشین طولی این مسئله به این شکل قابل حل نیست.

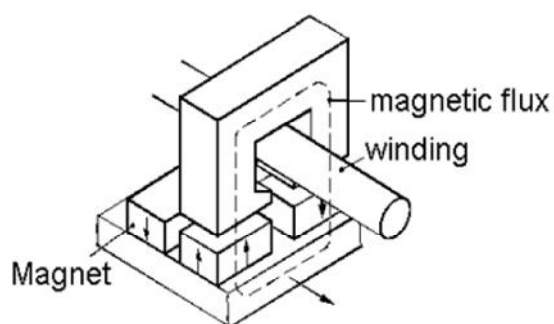
وجود گام قطب کوچک و PMهای سطحی، در ماشین‌های SM-TFPM طول فاصله هوایی موثر و در نتیجه اثر لبه عکس‌العمل آرمیچر را افزایش می‌دهد. بخش بزرگی از شار آرمیچر به بیرون از نواحی قطب‌ها نشت می‌کند و بخش بزرگی از شار ایجاد شده توسط PMها وارد هسته استاتور نمی‌شود بلکه به PMهای کناری نشت می‌کند. این موضوع باعث کاهش چگالی شار بی‌باری و در نتیجه کاهش ولتاژ بی‌باری می‌شود.

## ۱-۷-۲- TFPM شار متمرکز

ماشین TFPM شار متمرکز در شکل (۱-۶) نمایش داده شده است. پراکندگی شار بین قطب‌های مجاور در این ساختار در مقایسه با ساختار TFPM با مگنت رویه‌ای به شدت کاهش می‌یابد. استفاده از تکنیک شار متمرکز، میزان آزادی بیشتری در انتخاب ابعاد PMها ایجاد می‌کند. در ساختار TFPM شار متمرکز، می‌توان عرض PM را بدون تغییر در گام قطب، افزایش داد.



شکل (۱-۶) : ماشین TFPM شار متمرکز



شکل (۱-۵) : ماشین TFPM با رویه‌ی سطحی

## فصل دوم

انواع ساختارهای ماشین شار متقاطع مغناطیس دائم



## ۲-۱- انواع ساختارهای TFPM شار متمرکز

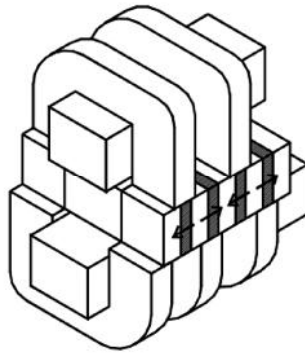
در این فصل انواع ساختارهای TFPM بررسی می‌شوند. به دلیل کارایی کمتر ساختار SM نسبت به FC، بیشتر توجهات به سمت ساختار FC است.

### ۲-۱-۱- ماشین TFPM دو طرفه، دو سیم پیچ<sup>۱</sup>

در شکل (۲-۱) یک ماشین دو طرفه، دو سیم پیچ نمایش داده شده است. طرح اولیه این ماشین در سال ۱۹۸۶ توسط آقای Weh مطرح شد. هسته این ماشین از ورقه‌های فولاد U شکل تشکیل شده است. دو سیم‌پیچ، هسته را احاطه کرده و در دو طرف روتور قرار دارند. هسته‌ها در این طرح به صورت مورق و موازی با جهت مسیر شار و جهت حرکت هستند. هر ورقه در راستای شعاع خود باید به صورت منحنی درآید. روتور همان‌طور که در شکل (۲-۱) مشخص است، در بین دو سیم پیچ قرار دارد و از آهنرباهای مغناطیسی با تکنیک شار متمرکز ساخته شده است. آهنرباهای دائم به گونه‌ای قرار می‌گیرند که جهت مغناطش آن‌ها به صورت موازی با جهت حرکت می‌باشد. این ساختار از لحاظ الکترومغناطیسی کاملاً جذاب است، چرا که هر هسته U شکل یک سیم‌پیچ را احاطه کرده است و همزمان در طرف دیگر مدار مغناطیسی توسط هسته U شکل دیگر، بسته می‌شود. مدل عملی ساخته شده توسط Weh در سال ۱۹۸۸ دارای مشخصه‌های عملکردی خوبی نبود. بنابراین استفاده از یک روش بهینه‌سازی برای بهبود عملکرد ماشین Weh ضروری به نظر می‌رسید. از جمله مشکلات دیگر ساختار این ماشین این بود که روتور توسط بازوهای U شکل احاطه شده بود و این موضوع مشکلاتی را در ساخت ایجاد می‌کرد و موجب افزایش فاصله هوایی ماشین می‌شد. افزایش فاصله هوایی، باعث افزایش جریان بی‌باری در ماشین می‌گردید که متأسفانه این مشکل توسط Weh مطرح نشد.

---

۱ - Double-sided, double-winding TFPM machine



شکل (۲-۱): ماشین TFPM دو طرفه، دو سیم پیچه

## ۲-۱-۲- ساختار دو طرفه، یک سیم پیچه با هسته U شکل<sup>۱</sup>:

ساختار این نوع ماشین که در سال ۱۹۹۵ توسط آقای Weh مطرح شد، در شکل (۲-۲) نمایش داده شده است. این ساختار تقریباً شبیه نمونه قبلی است با این تفاوت که سیم پیچی بالائی در ساختار قبلی حذف شده است، اما حذف این سیم پیچی نباید در گشتاور ماشین تاثیری داشته باشد. رلوکتانس مدارمغناطیسی برای هر دو ساختار یکسان است ولی هنگامی که دو سیم پیچ استفاده می شود، ولتاژ بی باری دو برابر می شود. هنگامی که جریان در هر دو سیم پیچ ساختار قبلی جاری می شود، اشباع هسته های استاتور در نصف جریان ساختار یک سیم پیچه اتفاق می افتد. دلیل این اتفاق این است که دو نیروی محرکه مغناطیسی ایجاد شده توسط دو سیم پیچ بایستی از یک مسیر عبور کند. اگر در هر دو ساختار، مس یکسان به کار برده شود، بایستی طول بازوهای هسته های U شکل در یک طرف نسبت به طرف دیگر افزایش پیدا کند. در حالت کلی برای گشتاور یکسان، مواد مصرفی در استاتور این دو ساختار تقریباً یکسان است. معمولاً از میدان نشتی در پنجره های سیم پیچی صرف نظر می شود و سطح سیم پیچی در سیم پیچی تکی با سیم پیچی دوتایی برابر است و کارائی این دو ساختار

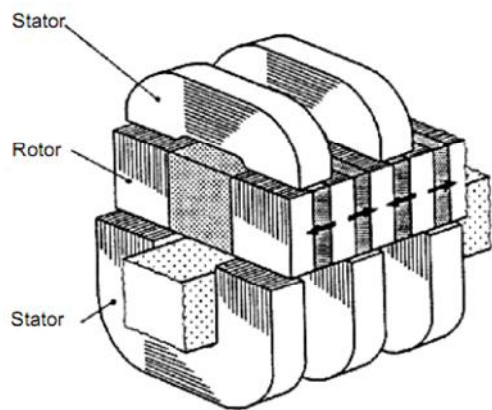
<sup>۱</sup> - Double-sided, Single-winding TFPM machine

در اصل یکسان است. Weh در سال ۱۹۹۵ دو مزیت مهم این ساختار را نسبت به ساختار قبلی این-طور بیان کرد:

۱- مزیت اول حذف پنجره سیم‌پیچ بالایی است، که نگهداری و ثابت نگه‌داشتن آن در هسته U شکل خارجی مشکل است.

۲- مزیت دوم کاهش قطر خارجی ماشین و استفاده بهتر از قطر داخلی آن می باشد.

نمونه عملی این ماشین در [Lan ۲۰۰۰a] ساخته شد و عملکرد بهتر این ماشین نسبت به ساختار مطرح شده در بخش قبل تایید گردید.



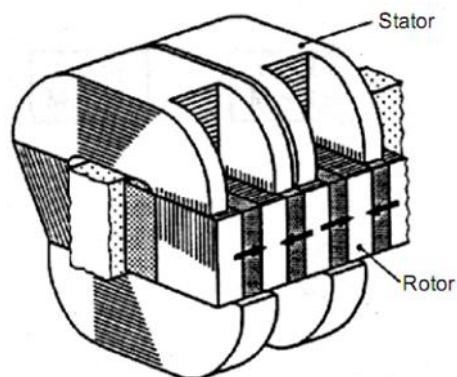
شکل (۲-۲) : ساختار دوطرفه، یک سیم پیچه با هسته U شکل

### ۲-۱-۳- ساختار دو طرفه، یک سیم پیچه با هسته C شکل<sup>۱</sup>

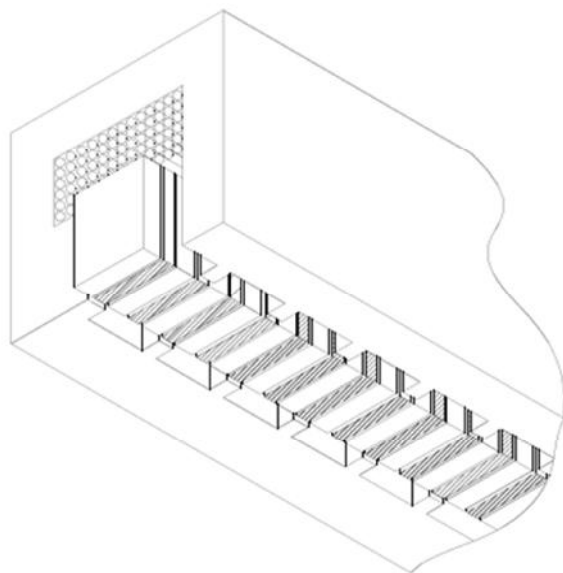
این ساختار که در سال ۱۹۹۵ توسط Weh مطرح گردید، در شکل (۲-۳) نمایش داده شده است. در این طرح یک ردیف از مغناطیس‌های دائم کم می‌شود و با این کار عرض روتور در راستای محور کاهش پیدا می‌کند. وقتی که عرض روتور کوچکتر می‌شود، نیروی گریز از مرکز در بخش‌های انتهایی

۱ - Double-sided, single-winding; C-core arrangement

آن کم می‌شود. ماشین Weh ساخته نشد و یا حداقل هیچ نمونه عملی در بررسی‌های عملی گزارش نشده است. Weh بر این عقیده بود که از ورقه‌های فلزی حالت دار استفاده شود. این ساختار به نظر مشکل می‌رسید تا اینکه تغییراتی در این ماشین در ۱۹۹۶ توسط Mec پیشنهاد شد و اجرا گردید. یک راه‌کار برای این موضوع استفاده از آهن پودر شده به عنوان مواد طبیعی برای ساخت این ماشین بود. این تکنولوژی در شکل (۲-۴) نمایش داده شده است.



شکل (۲-۳): ساختار دو طرفه، یک سیم پیچه با هسته C شکل



شکل (۲-۴): ماشین دو طرفه، تک سیم پیچه با هسته C شکل مطرح شده توسط Mecrow

درحقیقت طرح Mecrow و طرح Weh به نظر می‌رسد که یکسان باشند، فقط با این تفاوت که در طرح Weh هسته‌های C شکل به یکدیگر متصل شده‌اند، ولی در طرح Mecrow استاتور به صورت یکپارچه ساخته شده است. از لحاظ الکترومغناطیسی در این طرح از تمرکز شار شبیه ساختار دو ردیفه مغناطیسی استفاده می‌شود. تفاوت اصلی آن این است که یک ردیف از آهنرباها و یکی از فاصله‌های هوایی حذف شده است. ردیف آهنرباها و فاصله هوایی حذف شده، توسط فولاد یا آهن پودر شده جایگزین می‌شود. انتظار می‌رود که شار پیوندی بی‌باری این ساختار نسبت به ساختارهای مطرح شده در قسمت‌های قبلی قابل مقایسه باشد. فاصله هوایی حذف شده در مسیر مغناطیسی، رلوکتانس دیده شده از سیم‌پیچی‌های استاتور را کاهش می‌دهد. در نتیجه اگر در هر دوی این ماشین‌ها ابعاد یکسان استفاده شود باید چگالی گشتاور نصف حالت قبلی باشد (نمونه‌های عملی ساخته شده این گفته را تأیید می‌کنند). ماشین مطرح شده در [Mec ۱۹۹۶] با این ساختار، چگالی گشتاور  $۵۰/۸ \text{ kNm}/\text{m}^3$  را در قطر  $۳۶۰ \text{ mm}$  به دست آورد. در مقایسه با این ساختار، نمونه عملی ساخته شده در [Lan ۲۰۰a] و ساختار دو طرفه، تک سیم پیچه با هسته U شکل چگالی گشتاور  $\text{kNm}/\text{m}^3$   $۹۶/۳$  را ایجاد می‌کند که تقریباً دو برابر ساختار [Mec ۱۹۹۶] است.

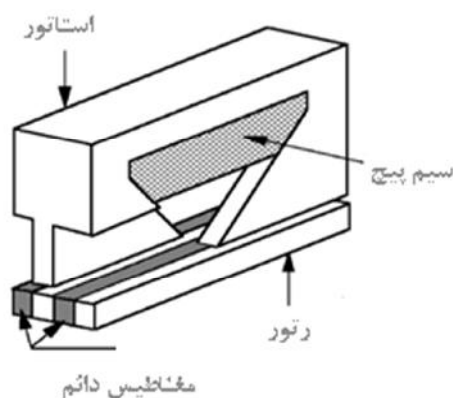
مقدار PM مصرفی و همچنین مقدار مس مصرفی در این ساختار نصف مقدار ساختارهای حالت قبل می‌گردد. مقدار مواد آهنی مورد نیاز نیز به علت کوچکتر شدن پنجره سیم پیچی، کاهش پیدا می‌کند و به طور کلی انتظار می‌رود که هزینه مواد فعال برای گشتاور نصف شده، نصف شود. بنابراین بایستی نسبت‌های قیمت به گشتاور و گشتاور به جرم این طرح با طرح‌های قبلی قابل مقایسه باشد. نسبت هزینه به گشتاور در نمونه عملی ساخته شده در [Mec ۱۹۹۶]،  $۵۶۷ \text{ Euros}/\text{kNm}$  است. این مقدار نسبت به مقدار به دست آمده از ساختار [Lan ۲۰۰a] یک کاهش  $۱۴\%$  را داشت. قضاوت بر اساس نمونه‌های عملی ساخته شده کاری دشوار است، چرا که تمامی مشخصات این نمونه‌ها شبیه یکدیگر نیستند. مثلاً در ساختار [Mec ۱۹۹۶] فاصله هوایی  $۰/۵ \text{ mm}$  است و در ساخت آن از آهن

پودر شده استفاده شده است، در حالیکه در ساختار [Lan ۲۰۰۰a]، فاصله هوایی  $1/2$  mm و از ورقه-های فولاد در ساختار آن استفاده شده است. برای بیان اهمیت فاصله هوایی دو نمونه را با هم مقایسه می‌کنیم، نمونه ساخته شده در [Har ۱۹۹۸] دارای فاصله هوایی  $1$  mm است و فاصله هوایی در [Mec ۱۹۸۶] همانطور که اشاره شد  $0/5$  mm است، این افزایش در فاصله هوایی باعث کاهش ۱۹ درصدی گشتاور شده بود.

بر اساس آنچه که تا این جا در مورد مشکلات ساخت این نوع ماشین از ساختار ورقه ورقه ای مختصراً صحبت شد، به نظر می‌رسد که استفاده از آهن پودر شده در ساختار این ماشین کمی مسئله را ساده تر کند.

## ۲-۱-۴- ماشین شار متقاطع قطب چنگالی<sup>۱</sup>

طرح اولیه ماشین شار متقاطع قطب چنگالی یا به اختصار CP-TFM برای اولین بار در [Weh ۱۹۹۴] مطرح شد. ساختار این ماشین مطابق با طرح [Mad ۱۹۹۸] در شکل (۲-۵) نمایش داده شده است.



شکل (۲-۵): ماشین شار متقاطع قطب چنگالی

۱ - Clawpole TFM

این ماشین در حقیقت نوع تغییر یافته ماشین شار متقاطع مغناطیس دائم دو طرفه، تک سیم پیچه با هسته C شکل است. ساختار شکل (۲-۵) را می توان از ساختار شکل (۲-۳) طی مراحل زیر بدست آورد:

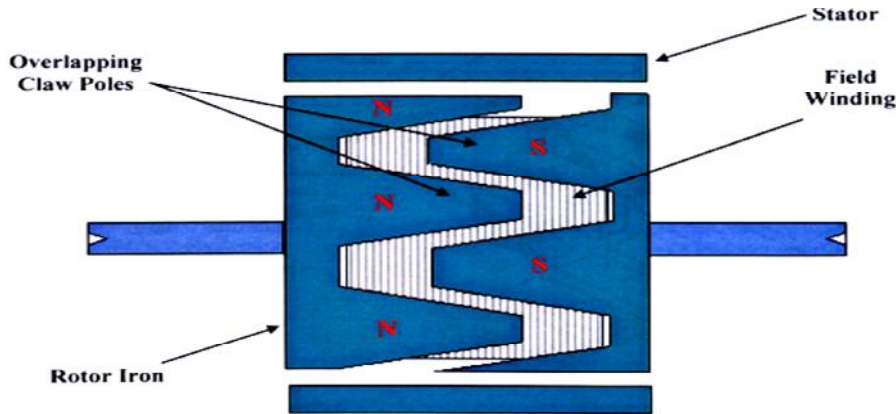
- رتور از بین دندانه‌های استاتور خارج می‌شود.
  - پهنای رتور  $l_{rt1}$  برای تطابق با پهنای استاتور افزایش می‌یابد.
  - طول بازوهای استاتور ( $l_f$ ) در جهت محور به منظور رسیدن شار بیشتر از رتور زیاد می‌شود.
  - سطح مقطع بازوهای استاتور (حاصل ضرب  $l_{leg} w_{sc}$ ) عموماً ثابت است.
- دو مرحله اخیر خیلی مهم است، یعنی باید هسته استاتور در نزدیکی سیم‌پیچی، عریض و در نزدیک فاصله هوائی باریک باشد. هسته استاتور با مساحت (حاصل ضرب  $l_{leg} w_{sc}$ ) زیاد به دلیل اینکه یک نیروی محرکه مغناطیسی بزرگتری را می تواند قبل از به اشباع رفتن هسته در آن جاری شود، بسیار مطلوب می باشد. همچنین اگر هسته استاتور در نزدیکی فاصله هوائی نازکتر شود (نازکتر از ضخامت PMها) پراکندگی شار در فاصله هوائی کم می‌شود.

اگر بخواهیم جهت جاری شدن یک شار پیوندی بزرگ در هسته، سطح مقطع هسته استاتور را افزایش دهیم، بهتر است که این افزایش با نازک نگه داشتن عرض استاتور ( $w_{sc}$ ) و افزایش طول بازوهای استاتور ( $l_f$ ) در نزدیکی فاصله هوائی صورت گیرد. هر چند که یکی از پیامدهای افزایش طول بازوهای استاتور همپوشانی دو بازوی مقابل هم و نتیجتاً افزایش پراکندگی استاتور است. این موضوع به طور گسترده در [Mad ۱۹۹۸] و [Dic ۲۰۰۲] بحث شده است.

با وجود پراکندگی در استاتور به واسطه همپوشانی بازوهای آن در CP-TFM بعلاوه اندازه استاتور و سطح مقطع هادی یکسان در CP-TFM باز هم نمونه ساخته شده از CP-TFM در [Mad ۱۹۹۸] گشتاور بیشتری را نسبت به ساختار دو طرفه، تک سیم‌پیچه با هسته C شکل در [Mec ۱۹۹۶] ایجاد می کند [۴].

تقریباً در تمام ماشین‌های درونسوز از این ماشین‌ها برای تولید توان الکتریکی استفاده می‌-

شود. نمونه استفاده شده در خودروها در شکل (۶-۲) به نمایش درآمده است.



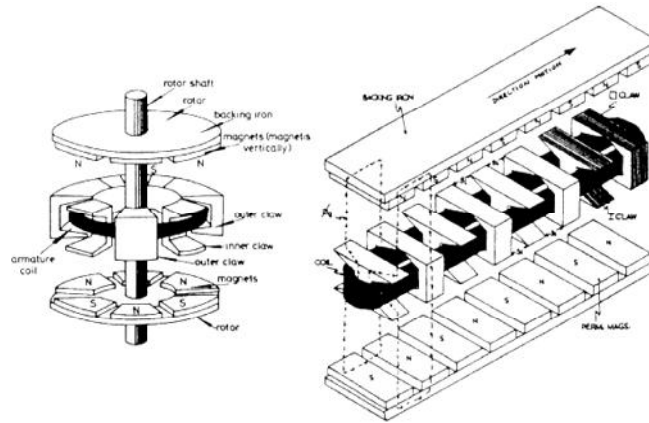
شکل (۶-۲) : ساختار Claw Pole

سیم پیچی استاتور این ماشین ، سه فاز توزیع شده می باشد، این سیم پیچی به یک پل یکسوکننده سه فاز جهت بدست آوردن ولتاژ DC متصل می شود. سیم پیچی میدان در این ماشین به صورت دایره‌ای است و توسط یک جریان DC از طریق دو حلقه‌ی لغزان تغذیه می گردد. سیم پیچی در داخل محفظه‌ای به صورت محوری و شعاعی قرار گرفته است تا مسیری با رلوکتانس کم برای شار مغناطیسی ایجاد کند. به خاطر شکسته شدن مدار مغناطیسی در روتور، قطب‌های N و S در لبه‌های پنجه‌ای شکل، مطابق شکل (۶-۲) به وجود می آید. موقعی که روتور به چرخش در می آید شار از قطب N وارد فاصله هوایی و سپس وارد استاتور شده و سیم پیچی سه فاز را قطع می کند و در نهایت از طریق قطب S مسیر مغناطیسی بسته می شود. شار با عبور از استاتور و دور زدن سیم پیچی - های سه فاز آن، درون آنها ولتاژ القا می کند.

در اواخر سال ۱۹۷۰، McLean، یک ماشین ۶۰۰ W ، ۱۰۰۰ rpm ، مغناطیس دائم و دو طرفه قطب چنگالی را ساخت و در همان دهه یک ماشین خطی مغناطیسی دائم فرکانس ۲۰۰ Hz و



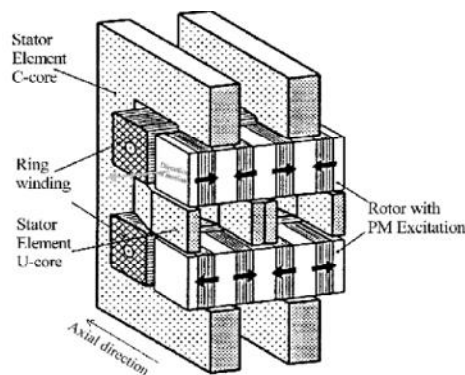
گشتاور  $100 \text{ N.m}$  در سرعت  $4 \text{ m/s}$  توسط او گزارش شد. این دو نمونه ماشین در شکل (۷-۲) نمایش داده شده است. در ماشین های قطب چنگالی دو طرفه از اصول شار عرضی برای هدایت شار تولید شده توسط تعدادی از قطبهای چنگالی که به سمت بیرون یا داخل است، استفاده شده است. این مسیر شار باعث می شود که قطب های N و S در هر دو طرف محور ایجاد گردد [۵].



شکل (۷-۲): ماشین قطب چنگالی دو طرفه و ماشین خطی

## ۲-۱-۵- ماشین شار متقاطع مغناطیس دائم با هسته E شکل<sup>۱</sup>

طرح اولیه این ماشین که در [Weh ۱۹۹۵] مطرح شد، در شکل (۸-۲) نمایش داده شده است.



شکل (۸-۲): ساختار E-core TFPM

<sup>۱</sup> - E-core TFPM

ایده Weh در این طرح این بود که ماشین دو طرفه، دو سیم پیچه خود را گسترش داده و عرض روتور را در راستای محور کم کند. در این طرح استاتور از ورقه های فولادی ساخته شده که دارای دو قسمت مجزا می باشد: بخش اول شامل یک هسته C شکل که هر دو سیم پیچی را احاطه کرده است و بخش دوم شامل هسته های U شکل است که بین سیم پیچی ها قرار می گیرد. هر سیم پیچی استاتور چهار فاصله هوایی در مدار مغناطیسی خود دارد. از لحاظ الکترو مغناطیسی انتظار می رود این ساختار دارای کارایی یکسان با ساختار دو طرفه، دو سیم پیچه باشد.

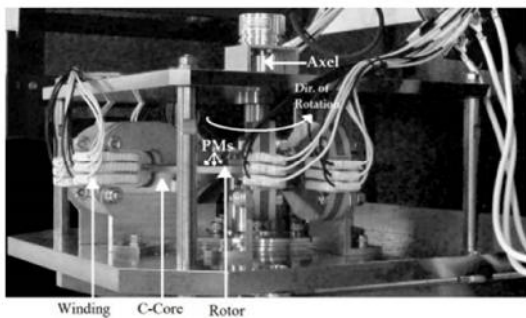
در ساخت این نوع ماشین ها علاوه بر مشکلات ساخت ماشین های دو طرفه، دو سیم پیچه، مشکلات ورقه های U شکل بین سیم پیچی ها نیز افزوده می شود. در این مورد می توان از آهن پودر شده استفاده نمود. مشکل اصلی تر این طرح این است که با وجود چهار فاصله هوایی، باید از اجزای مکانیکی خیلی دقیق و محکم استفاده شود [۴].

## ۲-۱-۶- ساختار TFPM با روتور دیسکی با هسته C شکل [۷]

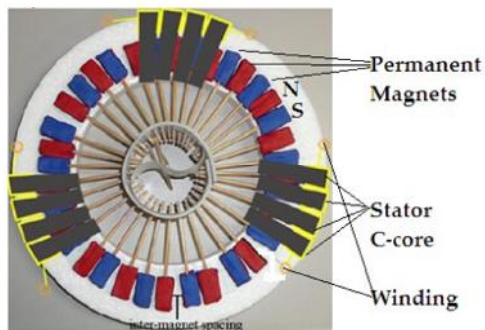
این طرح از هسته های U شکل مجزا ساخته شده است که به صورت شعاعی برای ساختن استاتور این ماشین مرتب شده اند. این طرح در شکل (۲-۹) داده شده است. همانطور که مشاهده می شود این ماشین دارای ۳ فاز برای هر فاز ۴ هسته استاتور وجود دارد. روتور نیز از ۳۶ عدد PM ساخته شده است. باید توجه داشت که خطوط شار در هسته های استاتور هر فاز دارای جهت یکسان هستند و از طرفی چون فاصله فیزیکی زیادی بین فازها وجود دارد، می توان از شار نشستی بین فازها صرف نظر کرد. شکل (۲-۱۰) نمونه عملی واقعی را نشان می دهد. مشاهده می شود که در طی نصب این نمونه عملی جایابی دقیق هسته های استاتور قابل توجه است. موقعیت هسته های استاتور مربوط به هر فاز، در نزدیکی مگنت های روتور باید دقیقتر باشد. میز تست شامل یک موتور بار PMSM است که

مستقیماً به موتور وصل می‌شود. موتور ابتدا برای تست مدار باز در حالت ژنراتوری به چرخش درمی-

آید. این نمونه به یک اینورتر برای تست های دینامیکی متصل می‌شود (شکل (۲-۱۰)).



شکل (۲-۱۰): نمایش نمونه عملی

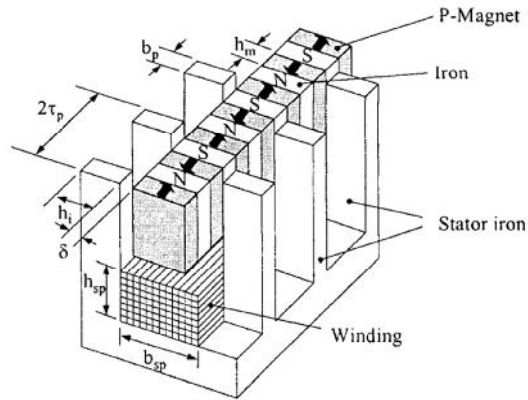


شکل (۲-۹): نمایش مفهوم کلی یک نمونه موتور دیسک

## ۲-۱-۷- ماشین شار متقاطع مغناطیس دائم خطی<sup>۱</sup> (TFPLM)

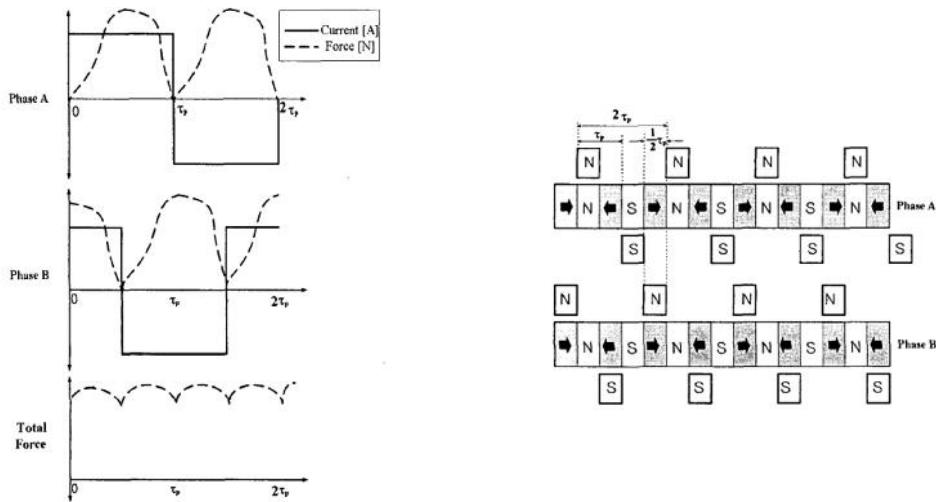
ساختار ماشین شار متقاطع مغناطیس دائم خطی (TFPLM) در شکل (۲-۱۱) نمایش داده شده است. این ماشین در حقیقت جزو ماشین‌های رلوکتانسی به حساب می‌آید. همانطور که مشاهده می‌شود یک سیم‌پیچ رینگی که جهت جریان در آن در جهت حرکت روتور است، در زیر روتور وجود دارد. یک مزیت مهم این ماشین این است که نسبت چگالی گشتاور به حجم آن به دلیل جدا بودن مدار مغناطیسی از مدار الکتریکی و وجود آهنرباهای دائم که یک میدان مغناطیسی متمرکز را در فاصله هوایی ( $\delta$ ) ایجاد می‌کند، زیاد است.

<sup>۱</sup> -Transverse flux Permanent linear motor



شکل (۲-۱۱): ساختار پایه TFPLM

شکل (۲-۱۲) و (۲-۱۳) آرایش فازهای A و B، جریان فازها و نیروی ایجاد شده در یک نمونه دو فاز را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، فاز B به اندازه نصف گام قطبی شیفت پیدا کرده است [۶].



شکل (۲-۱۳): جریان فازها و نیروی محوری ایجاد شده

شکل (۲-۱۲): آرایش فازهای A و B

مزیت ماشین خطی TFLM نسبت به ماشین های خطی معمولی را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- نسبت توان به وزن این ماشین ها بزرگتر است (۰.۳۲/)

- کوپل الکتریکی بهتر با انتهای سیم پیچی احاطه شده توسط فولاد [۵].

## ۲-۲- انتخاب ساختار مناسب برای طراحی اولیه

با توجه به توضیحات فوق ساختار قطب چنگالی برای طراحی در ادامه انتخاب می شود.

**مزیت های این ساختار** را نسبت به ساختارهای موجود را می توان به صورت زیر جمع بندی کرد:

الف- در این ساختار روتور از بین دندانه های استاتور خارج شده است و می توان گفت که

روتور از حالت دیسکی خارج شده است. روتور دیسکی از لحاظ بالانس معمولا با مشکل مواجه می شود، چرا که معمولا فاصله هوایی کوچک مفید است.

ب- زیاد بودن سطح مقطع بازوهای استاتور در این ساختار باعث جاری شدن شار بیشتری از

رتور به استاتور می شود.

ج- هسته استاتور در نزدیکی سیم پیچی در این ساختار عریض و در نزدیک فاصله هوایی

باریک می باشد. هسته استاتور با مساحت زیاد به دلیل اینکه نیروی محرکه مغناطیسی بزرگتری را

می تواند قبل از به اشباع رفتن هسته در خود جاری کند، بسیار مطلوب می باشد. همچنین اگر هسته

استاتور در نزدیکی فاصله هوایی نازکتر شود ( نازکتر از ضخامت  $PM$  ها ) پراکندگی شار در فاصله

هوایی کم می شود. ساختارهای دو طرفه از این نوع ماشین ها، از مزیت متغیر بودن عرض بازوهای

پایه های استاتور در نزدیکی فاصله هوایی و نزدیک سیم بندی، بی بهره اند. هسته ی استاتور این دو

ساختار دارای عرض بازوی ثابت در اطراف سیم بندی و فاصله هوایی است. اگر بخواهیم جهت جاری

شدن یک شار پیوندی بزرگ در هسته، سطح مقطع هسته استاتور را افزایش دهیم، بهتر است که این

افزایش با نازک نگه داشتن عرض استاتور و افزایش طول بازوهای استاتور در نزدیکی فاصله هوایی

صورت گیرد. هر چند که یکی از پیامدهای افزایش طول بازوهای استاتور همپوشانی دو بازوی مقابل

هم و نتیجتاً افزایش پراکندگی استاتور است. با وجود پراکندگی در استاتور به واسطه همپوشانی بازوهای آن در CP-TFM بعلاوه اندازه استاتور و سطح مقطع هادی یکسان در CP-TFM باز هم نمونه ساخته شده از CP-TFM در [Mad ۱۹۹۸] گشتاور بیشتری را نسبت به ساختار دو طرفه، تک سیم پیچه با هسته C شکل در [Mec ۱۹۹۶] ایجاد می کند.

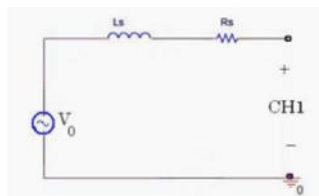
د- مزیت بعدی که می توان از روی نمونه های عملی ساخته شده به آن دست یافت این است که با وجود قطر و فاصله هوائی و مواد اکتیو تقریباً یکسان، این ساختار دارای گشتاور نامی بالاتر و جرم  $PM$  کمتری می باشد.

## ۲-۳- بررسی تست های انجام شده روی نمونه ساختار TFPM

### با روتور دیسکی با هسته C شکل

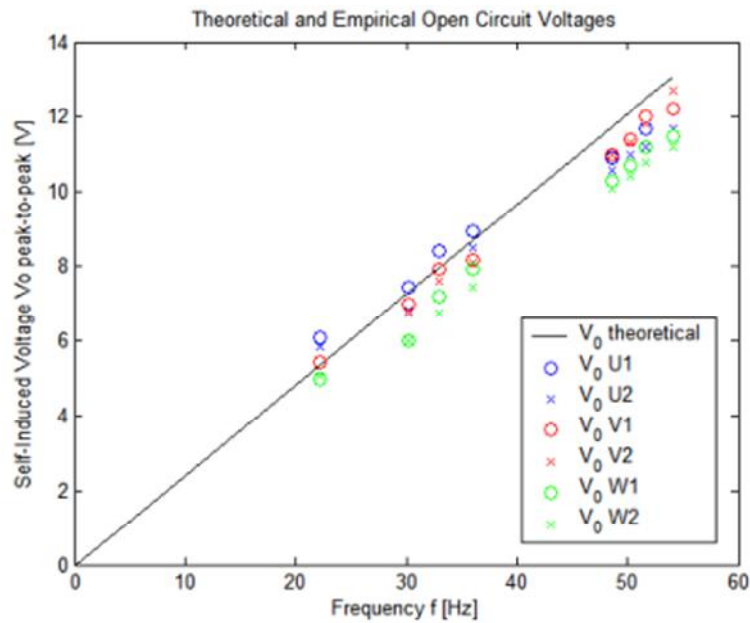
#### ۲-۳-۱- تست مدار باز

در مرحله اول ولتاژ بدون بار اندازه گیری می شود. این تست برای تعیین تغییرات نیرو محرکه معکوس داخلی به عنوان تابعی از سرعت به کار می رود. از این آزمایش برای محاسبه ثابت ماشین که برای کنترل سرعت استفاده می شود به کار می رود. ثابت موتور پرمعنی ترین شاخص عملکردی ماشین است. شکل (۲-۱۴) مدار تست را برای این مرحله نمایش می دهد. کانال CH۱ ولتاژ خروجی را اندازه گیری می کند.



شکل (۲-۱۴) : تست مدار باز با اتصال اسپلوسکوپ

در طی این آزمایش فرکانس تا حدود ۵۰ هرتز تغییر می‌کرد. شکل (۲-۱۵) نشان می‌دهد که مقادیر تجربی برای  $V_0$  در این سرعت کمی از مقادیر تئوری کمتر است. این مسئله دور از انتظار نیست چون مقادیر تئوری با فرض چگالی شار حداکثر در فاصله هوایی محاسبه می‌شود. این چگالی شار حداکثر در عمل کمی کمتر است چرا که خروجی شار باید با شکل سینوسی تخمین زده شود.



شکل (۲-۱۵) : تغییرات ولتاژ خروجی بی باری با تغییرات فرکانس

## ۲-۳-۲- تست تعیین اندوکتانس‌های محورهای d و q روتور ثابت

شده

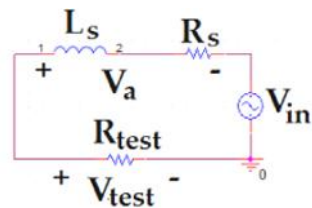
از این تست برای تعیین امپدانس سنکرون داخلی موهومی و حقیقی استفاده می‌شود. یک تست DC برای اندازه‌گیری مقاومت آرمیچر انجام می‌شود. مقاومت آرمیچر تعیین شده برای تایید نتایج

آزمایش تست تعیین اندوکتانس‌های محورهای  $d$  و  $q$  روتور ثابت شده، مفید است. مدار تست در شکل (۱۶-۲) رسم شده است.

$$Z_s = \frac{V_a e^{i\theta}}{V_{test}} \quad (1-2)$$

$$\theta = 2 * \pi * \tau / T \quad (2-2)$$

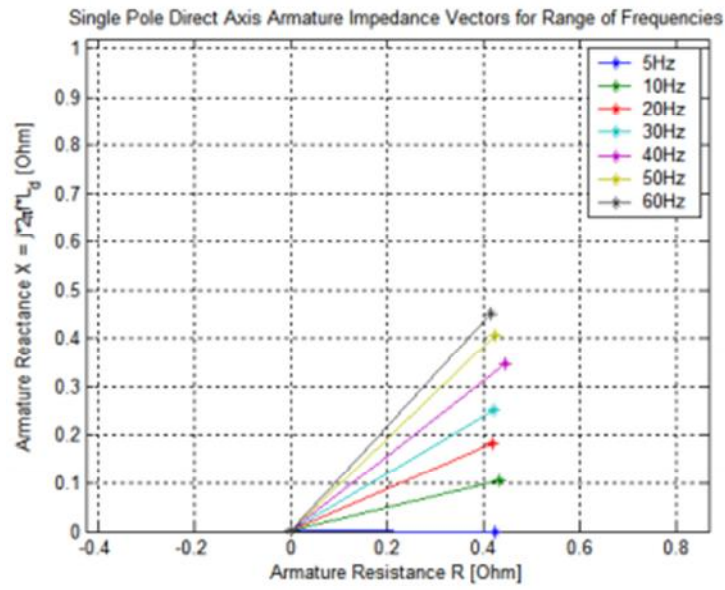
$$Z_s = R_s + j\omega L_s \quad (3-2)$$



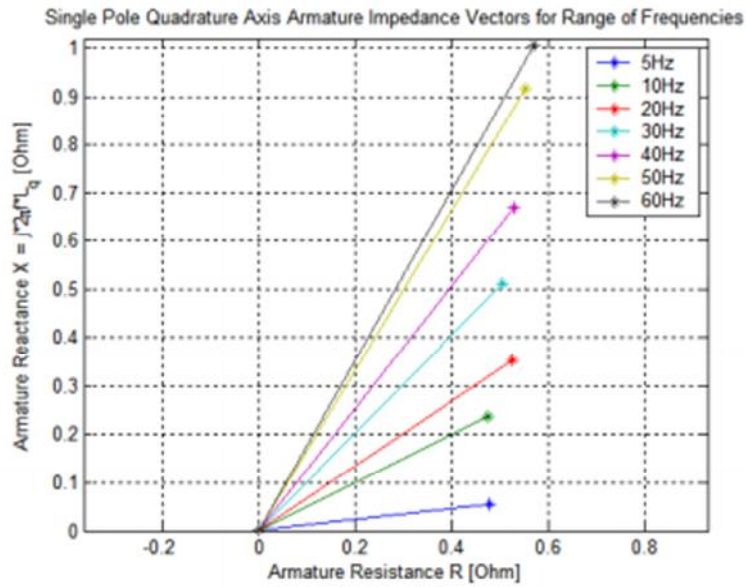
شکل (۱۶-۲): مدار تست تعیین اندوکتانس‌های محورهای  $d$  و  $q$  روتور ثابت شده

نمودار بردار امپدانس مختلط  $d$  و  $q$  در فرکانس‌های مختلف در شکل (۱۷-۲) و (۱۸-۲) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که تصویر این بردارها بر محور  $X$ ها با هم برابر و نزدیک مقاومت تست  $dc$  می‌باشد. نتایج آزمایش عملی و تئوری در جدول (۱-۲) آورده شده است.





شکل (۱۷-۲): بردار امپدانس محور d



شکل (۱۸-۲): بردار امپدانس محور q

جدول (۲-۱): مقایسه بین نمونه عملی

Variable	Theoretical Value	Empirical Value
frequency	50 Hz	50 Hz
$N$	84	84
$L_s = 2 * (L_d + L_q) / 2$	4.16 mH	3.86 mH
$R_s$	0.75 $\Omega$	0.75 $\Omega$
$I_a$	4 A	4 A
$V_o$	9.78 V RMS	14.85 V RMS
$V_a$	14.04 V RMS	18.88 V RMS
$\Phi_f$	5.24 x 10 <sup>-4</sup> Wb	7.96 x 10 <sup>-4</sup> Wb
$B_f$	0.44 T	0.66 T
$B_a$	4.98 x 10 <sup>-4</sup> T	4.98 x 10 <sup>-4</sup> T*
PF	0.93	0.97*
$\eta$	0.70	0.79*
$P_{mechanical}$	117.38 W	178.19 W*
Torque	6.73 Nm	10.21 Nm*
Force Density	50 kN/m <sup>2</sup> = 0.49 atm	75.6 kN/m <sup>2</sup> = 0.75atm*

\*values are estimated based on empirical values for  $V_o$  and  $Z_s$

## ۲-۴- ضریب قدرت ماشین‌های TFPM و هزینه الکترونیک

### قدرت:

چگالی شار به دست آمده در هسته استاتور ماشین TFPM در حالت بی باری معمولاً خیلی پایین‌تر از چگالی شار هسته در حالت اشباع می‌باشد. این موضوع زمانی اتفاق می‌افتد که سطح مقطع استاتور به قدر کافی بزرگ انتخاب شود، که معمولاً در ماشین‌های TFPM با عملکرد بالا به همین صورت می‌باشد. برای به اشباع رفتن هسته، بایستی جریان نامی به قدر کافی بزرگ انتخاب شود، لذا شار در حالت بار کامل نسبت به حالت بی باری خیلی بزرگتر می‌شود. از این مطالب می‌توان به این نتیجه رسید که ولتاژ ترمینال در حالت بار کامل (V) نسبت به ولتاژ بی باری (E) خیلی بزرگتر خواهد بود. اگر از تلفات و برجستگی روتور صرف‌نظر کنیم، توان خروجی سه فاز از رابطه (۲-۴) به دست می‌آید:

$$P_{out} = 3VI \cos \phi = 3EI \cos \psi \quad (۲-۴)$$

$$\cos \phi = \frac{E}{V} \cos \psi \quad (5-2)$$

با توجه به مطالب بالا و معادله (۵-۲) به سهولت می توان فهمید که ضریب قدرت این ماشین‌ها پائین می باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد، یکی از کاربردهای ژنراتوری این ماشین‌ها، در توربین های بادی است، در این توربین‌ها خروجی باید به یک یکسوکننده با توان بالاتر از ژنراتور متصل شود که این یکسو کننده‌ها نسبتاً پر هزینه می باشند . اگر از یکسو کننده پل دیودی استفاده شود، ضریب قدرت پائین این ماشین‌ها باعث هم‌پوشانی زمان روشن بودن دیودها می‌شود. برای جلوگیری از این پدیده از یکسو کننده PWM استفاده می‌شود.

ماشین‌های الکتریکی بر اساس نسبت گشتاور به توان در حالت نامی دسته بندی می‌شوند، در حالیکه یکسوکننده‌ها بر اساس توان ظاهریشان دسته بندی می‌شوند. بنابراین در کاربردهای سرعت پائین و گشتاور بالا همانند توربین‌های بادی، حساسیت نسبت به قیمت ماشین از قیمت ادوات الکترونیک قدرت بیشتر می باشد.

## ۲-۵- مقایسه عملکرد آهن پودر شده و ورقه‌های فولاد Fe – Si

آهن پودر شده یا (SMC<sup>۱</sup>) دارای خواص الکتریکی و ایزوتوپی مغناطیسی مفید و مقاومت ویژه الکتریکی بالائی می باشد (جدول (۲-۲)).

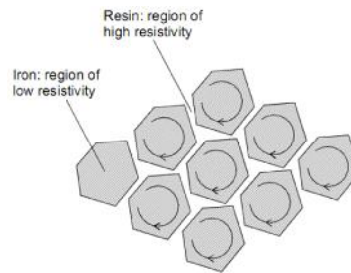
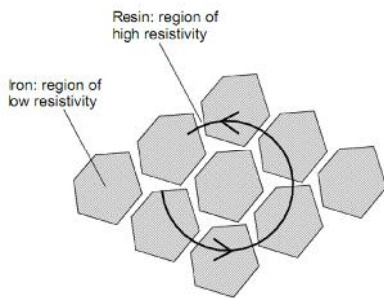
جدول (۲-۲) : مقایسه بین مقاومت ویژه آهن پودر شده و ورقه‌های فولاد Fe-Si

پودر آهن [Cro ۱۹۹۸] ATOMET EM-۱	فولاد Fe – Si	
۱۵۰۰	۵۰ - ۱۰	مقاومت ویژه ( $\mu\Omega - cm$ )

۱ - Soft Magnetic Composite

ورقه‌های فولادی توسط پوششی از یکدیگر عایق می‌شوند و با این کار مسیر جریان‌های ادی کاهش پیدا می‌کند. در آهن پودر شده ذرات آهن با مواد عایق فشرده می‌شوند، تا یک غشای نازک عایقی بین ذرات آهن پودر شده به وجود آید. به این ترتیب تلفات آهنی کاهش پیدا می‌کند، هر چند که تلفات آهنی در فولاد Si-Fe و آهن پودر شده یکسان نیست. در [Per ۱۹۹۶] و [Gel ۱۹۹۷]، تلفات آهنی مربوط به هر دوی این ساختارها در میدان‌های دو بعدی مقایسه شده است و مشخص گردیده است که تلفات میدان در فرکانس‌های پائین در آهن پودر شده بیشتر از ورقه‌های فولاد بوده، اما در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰۰ هرتز تلفات در آهن پودر شده کمتر از تلفات در ورقه‌های فولادی می‌باشد. در هر دو مقاله، ورقه‌ها با ضخامت ۰/۸ mm یا ۰/۹ mm با آهن پودر شده مقایسه شده است.

هر ذره آهن در آهن پودر شده توسط لایه ای از رزین با مقاومت خیلی بالا، عایق می‌شود. همان‌طور که در شکل (۲-۱۹) نمایش داده شده است، در هر کدام از ذرات ریز، حلقه‌های جریان ادی به وجود می‌آید. از طرفی چون عایق بین ذرات دارای مقاومت بی‌نهایت نیست، مسیرهای دیگری برای جریان‌های ادی به وجود می‌آید (شکل (۲-۲۰)). از طرف دیگر، از بین رفتن عایق بین قطعه‌های ساخته شده از آهن پودر شده مسیری دارای مقاومت پائین در قطعه پودر آهن ایجاد می‌کند. برای قطعاتی از ماشین که حجم وسیعی از آهن پودر شده، برای ساخت آنها استفاده شده تعداد حلقه‌های جریان موازی افزایش پیدا می‌کند [Lef ۲۰۰۲]. از طرفی تلفات بر حجم، در حجم‌های کوچک و بزرگ یکسان نیست. به عنوان مثال، یک افزایش ۲۵ درصدی در تلفات آهنی موجب افزایش ۴۰۰ درصدی در حجم می‌شود [Lan ۲۰۰۰b].



شکل (۲-۱۹): ذرات آهنی میکروسکوپی و عایق بین  
 شکل (۲-۲۰): مسیر جریان گردشی در اطراف عایق

آن‌ها

## ۲-۵- تلفات آهنی در میدان‌های سه بعدی

در ساختار ماشین‌هایی که شار به صورت سه بعدی در آن‌ها جریان می‌یابد، این انتظار می‌رود که آهن پودر شده مناسب‌تر از ورقه‌های فولادی باشد. میدان‌های مغناطیسی متغیر، جریان‌های ادی در اطراف مواد فرو مغناطیس بوجود می‌آورند که در نواحی تیز و در اطراف سطح یا پوسته، متمرکز می‌شوند. ضخامت پوسته یا عمق پوسته بستگی به خواص مواد فرومغناطیس دارد. عمق پوسته  $\delta$  از رابطه (۲-۶) به دست می‌آید:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_r \mu_0}} \quad (۲-۶)$$

در این رابطه  $\rho$  مقاومت ویژه ماده مغناطیسی،  $\mu_r$  ضریب نفوذپذیری مغناطیسی ماده،  $\mu_0$

نفوذپذیری مغناطیسی هوا و  $f$  فرکانس الکتریکی است.

جریان‌های ایجاد شده در هسته‌های فرومغناطیس بواسطه‌ی میدان‌های متناوب در شرط زیر با محدودیت مقاومتی<sup>۱</sup> مواجه می‌شوند:

$$2b < \delta \quad (7-2)$$

که  $2b$  پهنای مسیری است که جریان‌های ادی در آن جاری می‌شود. این رابطه در میدان‌های دو بعدی و در ورقه‌های Fe-Si برقرار است. همچنین نسبت تلفات بر حجم را برای این ورقه‌ها می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$P_{eddyloss} = \frac{2\pi^2 f^2}{3\rho} B^2 b^2 \quad (8-2)$$

اگر شار اصلی به صورت عمودی وارد صفحه شود، مسیر جریان‌های ادی کمی پهن تر می‌شود. حضور عایق بین هر ورقه موجب می‌شود که ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی به حدود ۱۰ الی ۲۰ برسد و این مقدار به ضخامت عایق و ورقه بستگی دارد.

آهن پودر شده دارای مقاومت ویژه بالا و ضریب نفوذپذیری پائین است که منجر به تلفات پائین و عمق بزرگ پوسته می‌شود. در فرکانس ۵۰ هرتز عمق پوسته آهن پودر شده حدود ۴ cm است. این نکته مزیت استفاده در حجم بالای این مواد را مشخص می‌کند و باعث کاهش دامنه‌ی جریان‌های ادی می‌گردد. به خاطر این مزیت‌ها، اشکال گوناگونی از هسته‌های فرومغناطیس در ابعاد بزرگ ساخته شده‌اند. از این خاصیت مواد پودر آهن در ساختارهای مختلف TFPM از قبیل قطب چنگالی، دو طرفه-دوسیم‌پیچه و یک طرفه-تک‌سیم‌پیچه با هسته‌های C شکل استفاده می‌شود. در این ساختارها مسیر شار یک مسیر سه بعدی است و در نتیجه آهن پودر شده یک ماده مناسب برای ساخت این‌گونه ماشین‌ها است.

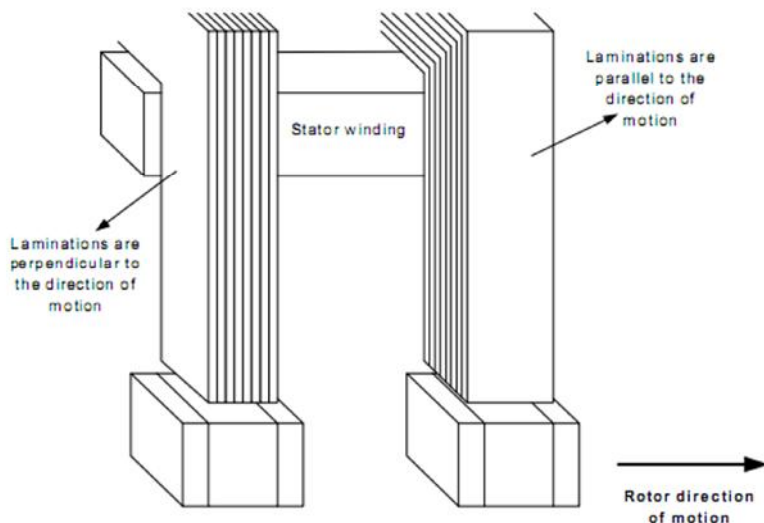
---

۱ - resistance-limited

مورق کردن هسته استاتور به ۲ صورت انجام می گردد:

الف- در جهت حرکت روتور (بازوی سمت راست در شکل (۲-۲۲))،

ب- عمود بر حرکت روتور (بازوی سمت چپ در شکل (۲-۲۲)) .



شکل (۲-۲۱) : دو ساختار ورقه کردن هسته استاتور

اگر ورقه‌ها به صورت عمود بر جهت حرکت باشند (بازوی سمت چپ شکل (۲-۲۱))، شار پراکندگی به صورت عمود بر صفحه ورقه‌ها شکل خواهد گرفت و در نتیجه مسیری با پهنای زیاد را برای جریان‌های ادی ایجاد خواهد کرد. از طرفی اگر ورقه‌ها به صورت موازی با جهت حرکت باشند (بازوی سمت راست شکل (۲-۲۲))، جریان‌های ادی ناشی از شار پراکندگی در ضخامت هر ورقه بوجود خواهند آمد لذا در این حالت تلفات حاصل از جریان‌های ادی کاهش خواهد یافت. البته باید در نظر داشت، که ساختن بازوی سمت راست علی‌رغم تلفات کم، خیلی مشکل‌تر از بازوی سمت چپ می باشد.

## ۲-۶- دیگر خواص مغناطیسی مواد SMC و ورقه‌های فولاد

برخی از خاصیت‌های دو ماده مغناطیسی نمونه در جدول (۲-۳) آمده است.

جدول (۲-۳) : خواص مغناطیس ورقه‌های Fe-Si و مواد SMC

آهن پودر شده ۱-ATOMET EM	فولاد سیلیکون Cold-Rolled	
در حدود ۴۵۰	۱۰۰۰-۱۰۰۰۰	ماکزیمم ضریب نفوذپذیری مغناطیسی در فرکانس ۶۰ هرتز
۱/۱	۱/۷	چگالی شار (T) برای میدان مغناطیسی ( $5kA/m$ )
۱/۶	۱/۸	چگالی شار (T) برای میدان مغناطیسی ( $10kA/m$ )

برای اغلب ماشین‌های PM ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی پائین مسئله‌ی خاصی نیست، زیرا MMF در هسته استاتور خیلی کمتر از MMF موجود در PM است.

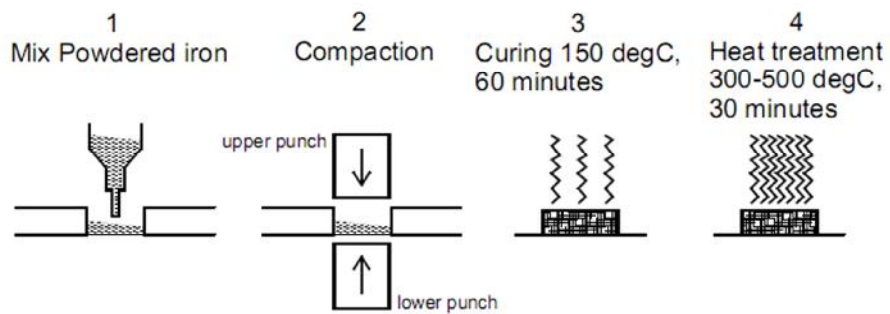
## ۲-۷- ساخت پودر آهن

در این بخش، مراحل لازم برای تولید قطعات آهن پودر شده، مزیت‌ها و محدودیت‌های ساخت آن‌ها مطرح شده است. مراحل تولید قطعات آهن پودر شده، بسیار متفاوت از مراحل تولید ورقه‌های فولاد است. ساخت قطعات شامل ورقه‌های فولاد به این ترتیب است که ورقه‌های فولادی بر روی یکدیگر فشرده می‌شوند. نحوه‌ی به هم فشردن ورقه‌ها، شکل قطعات ساخته شده را بوجود می‌آورد. در مورد آهن پودر شده، روش ساخت به این ترتیب نیست، بلکه از یک فرآیند پیچیده‌تر استفاده می‌شود. پودر ناخالص آهن با یک سری مواد افزودنی آمیخته می‌شود و این ماده‌ی آمیخته در یک قالب ریخته می‌شود و تحت فشار بالا قرار می‌گیرد. بعد از این فرآیند، ماده‌ی حاصل جامد می‌باشد و سپس طی یک فرآیند حرارتی خاص، مواد افزودنی روی مخلوط پودر آهن اضافه می‌گردد. این فرآیند حرارتی مقاومت مکانیکی ماده را افزایش و تنش‌های داخلی ماده را کاهش می‌دهد. در دمای ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس ماده عایقی که از جنس مواد آلی است، به ترکیب اضافه می‌شود. اگر یک لایه‌ی اکسید به ماده اضافه شود و دما به حدود ۳۰۰ تا ۵۰۰ برسد، تغییرات شیمیایی می‌تواند حاصل شود.



ماده حاصله در این قسمت دارای تیرانس مکانیکی ۰/۱۵ درصد است. پروسه تولید آهن پودر شده در

شکل (۲-۲۳) نمایش داده شده است [۴].



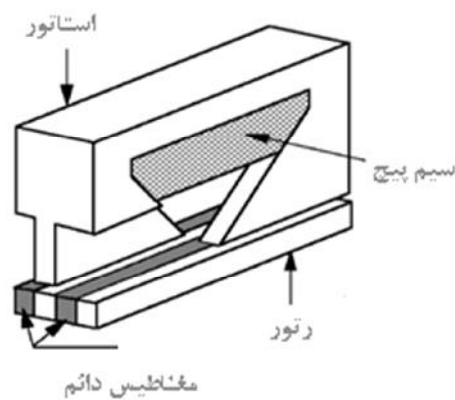
شکل (۲-۲۳): فرآیند تولید آهن پودر شده

## فصل سوم

الگوریتم طراحی اولیه ماشین شار محوری آهنربای دائم

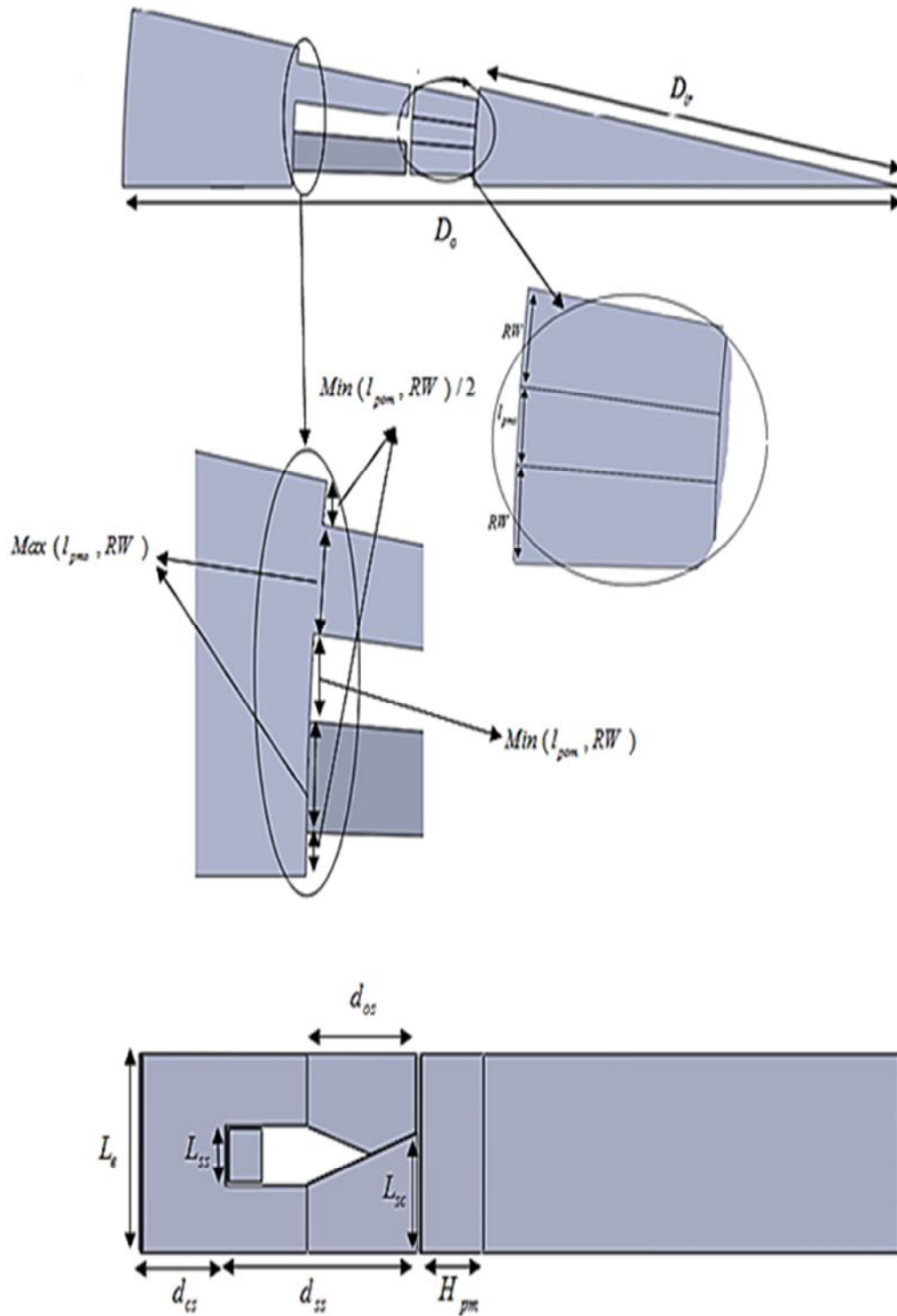
### ۳-۱- معادله ابعادی<sup>۱</sup> ماشین

در این فصل معادلات اساسی طراحی ماشین‌های الکتریکی با نگاه ویژه بر ماشین‌های قطب چنگالی ارائه می‌شود. بخشی از یک ماشین قطب چنگالی در شکل (۳-۱) نشان داده شده است. شکل (۳-۲) بخشی از استاتور (بخشی از یک فاز) ماشین شار متقاطع قطب چنگالی چند فاز به همراه معرفی پارامترها را با جزئیات بیشتر نشان می‌دهد. همچنین جدول (۳-۱)، پارامترهای شکل (۳-۲) را به طور کامل معرفی می‌کند.



شکل (۳-۱): ماشین شار متقاطع قطب چنگالی

<sup>۱</sup> -Sizing Equations



شکل (۳-۲): نمایش یک جفت قطب از هر فاز ماشین قطب چنگالی به همراه پارامترهای آن

جدول (۱-۳) : معرفی پارامترهای طراحی ماشین قطب چنگالی

ردیف	تعریف	پارامتر
۱	قطر خارجی استاتور	$D_o$
۲	قطر داخلی روتور	$D_{ir}$
۳	گام قطبی	$\tau_p$
۴	اندازه کمان متوسط متمرکز کننده‌های شار	$RW$
۵	اندازه کمان متوسط مغناطیس‌های دائم	$L_{pmo}$
۶	طول محوری شیار	$L_{ss}$
۷	طول محوری استاتور	$L_s$
۸	عمق پشت هسته استاتور	$d_{cs}$
۹	عمق شیار	$d_{ss}$
۱۰	طول بازوی استاتور	$d_{os}$
۱۱	ارتفاع مغناطیس‌های دائم	$H_{pm}$
۱۲	اندازه بازوی استاتور در نزدیک فاصله هوایی در راستای محور	$L_{sc}$

ابعاد اصلی یک ماشین شار متقاطع می‌توانند با استفاده از معادله توان الکتریکی خروجی ماشین تعیین شوند. به طور کلی با صرف نظر از مقاومت و اندوکتانس نشستی استاتور توان خروجی برای هر ماشین الکتریکی می‌تواند به صورت زیر بیان شود [۸] و [۱۱].

$$P_R = \eta \frac{m}{T} \int_0^T e(t) i(t) dt = \eta m K_p E_{PK} I_{PK} \quad (1-3)$$

که در آن:

$P_R$ ، توان خروجی نامی ماشین

$e(t)$  و  $E_{PK}$ ، به ترتیب نیروی محرکه الکتریکی لحظه‌ای فاصله هوایی فاز و مقدار ماکزیمم آن

$i(t)$  و  $I_{PK}$ ، به ترتیب جریان لحظه‌ای فاز و مقدار ماکزیمم آن

$\eta$ ، راندمان ماشین

$m$ ، تعداد فازهای ماشین

$T$ ، دوره تناوب یک سیکل  $emf$

کمیت  $K_p$ ، ضریب شکل موج توان الکتریکی<sup>۱</sup> نامیده می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_p = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{e(t) i(t)}{E_{PK} I_{PK}} dt = \frac{1}{T} \int_0^T f_e(t) f_i(t) dt \quad (۲-۳)$$

که در آن  $f_e(t) = \frac{e(t)}{E_{PK}}$  و  $f_i(t) = \frac{i(t)}{I_{PK}}$  عباراتی برای شکل موج های نیروی محرکه الکتریکی و

جریان نرمالیزه شده می باشند.

مقدار نیروی محرکه الکتریکی برای هر ماشین الکتریکی به صورت زیر به دست آید:

$$e(t) = \frac{d\Lambda_g}{dt} = K_e N_t B_g \frac{f}{p} D_g L_e f_e(t) \quad (۳-۳)$$

که در آن  $\Lambda_g$  شار پیوندی فاصله هوایی هر فاز،  $N_t$  تعداد دور هر فاز،  $B_g$  چگالی شار متوسط در فاصله هوایی،  $f$  فرکانس تغذیه،  $p$  تعداد جفت قطب های ماشین،  $K_e$  ضریب نیروی محرکه الکتریکی،  $D_g$  قطر صفحه فاصله هوائی ماشین و  $L_e$  طول محوری موثر ماشین است. مقدار  $K_e$  برای ماشین های شار متقاطع از رابطه زیر به دست می آید:

$$K_e = 2p\pi^2(1 - K_s) \quad (۴-۳)$$

که در آن  $K_s$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_s = \frac{L_{ss}}{L_s} \quad (۵-۳)$$

بطوریکه پارامتر  $L_{ss}$  طول محوری شیار و  $L_s$  طول محوری هر فاز استاتور است که از رابطه زیر به دست می آید:

<sup>۱</sup> - Electrical Power Waveform Factor

$$L_s = \frac{L_e}{m} \quad (6-3)$$

با توجه به  $f_e(t) = \frac{e(t)}{E_{PK}}$  و رابطه (3-3) مقدار  $E_{pk}$  بصورت زیر بدست می‌آید:

$$E_{PK} = K_e N_t B_g \frac{f}{p} D_g L_e \quad (7-3)$$

لازم به ذکر است که رابطه (7-3) برای ماشین‌های شار متقاطع به صورت زیر باز نویسی می‌شود:

$$E_{PK} = K_e N_t B_g \frac{f}{p} D_g L_s \quad (8-3)$$

ضریب شکل موج جریان  $K_i$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_i = \frac{I_{PK}}{I_{rms}} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{i(t)}{I_{PK}} \right)^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9-3)$$

که در آن  $I_{rms}$  جریان مؤثر فاز است که به بارگذاری الکتریکی استاتور  $A_s$  وابسته است.

برای ماشین شار متقاطع، بارگذاری الکتریکی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$A_s = 2m_1 N_t \frac{I_{rms}}{L_s} \quad (10-3)$$

که در آن  $m_1$  تعداد فازهای هر استاتور می‌باشد. در ساختار قطب چنگالی ماشین‌های شار متقاطع  $m_1 = 1$  می‌باشد.

در حالت کلی، بارگذاری الکتریکی کل ( $A$ ) باید شامل هر دو بارگذاری الکتریکی استاتور  $A_s$  و

بارگذاری الکتریکی روتور  $A_r$  باشد. به عبارت دیگر بارگذاری الکتریکی کل  $A = A_s + A_r$  است و

بارگذاری الکتریکی استاتور به صورت زیر بدست می‌آید:

$$A_s = A - A_r = \frac{A}{1 + K_\phi} \quad (11-3)$$

که در آن  $K_\phi = \frac{A_r}{A_s}$  نسبت بارگذاری الکتریکی روتور به استاتور می‌باشد. در یک ماشین آهنربای

دائم بدون سیم‌پیچی روتور  $K_\phi = 0$  است.

با استفاده از معادلات (۹-۳)، (۱۰-۳) و (۱۱-۳) عبارتی برای جریان ماکزیمم بصورت زیر بدست می‌آید:

$$I_{PK} = \frac{1}{1+K_\phi} K_i A \frac{L_s}{2N_t} \quad (12-3)$$

با ترکیب معادلات (۱-۳)، (۷-۳)، (۱۱-۳) و (۱۲-۲) معادله ابعادی کلی برای ماشین‌های شار متقاطع به صورت زیر خواهد بود:

$$P_R = \frac{1}{1+K_\phi} \frac{m}{2} K_e K_i K_p \eta B_g A \frac{f}{p} L_s^2 D_g \quad (13-3)$$

برای یافتن معادله ابعادی مورد نیاز بر حسب  $D_g^3$ ، ضریب نسبت وجه  $K_L$  برای ماشین شار متقاطع به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_L = \frac{L_e}{D_g} \quad (14-3)$$

این نسبت با توجه به کاربردهای خاص ماشین تعیین می‌شود. در ماشین‌های معمولی این کمیت به صورت تابعی از ماکزیمم گشتاور و دما بیان می‌شود. برای این پارامتر در ماشین‌های معمول یک رابطه تجربی به صورت زیر از رگرسیون توان وجود دارد:

$$K_L = \frac{\pi}{2} p^{\frac{2}{3}} \quad (15-3)$$

مقادیر ضرایب  $K_p$  و  $K_i$  در معادله ابعادی می‌توانند با استفاده از جدول (۲-۳) و با توجه به شکل موج‌های نیروی ضد محرکه و جریان تعیین شوند.

با جایگزینی رابطه (۱۳-۲) در رابطه (۱۲-۲) داریم [۱] و [۵]:



$$P_R = \frac{1}{1+K_\phi} \frac{1}{2m} K_e K_i K_p K_L^2 \eta B_g A \frac{f}{p} D_g^3 \quad (۱۶-۳)$$

برای بیان معادله (۱۶-۳) بر اساس قطر خارجی ماشین، مفید است پارامتر زیر را تعریف کنیم:

$$\lambda_o = \frac{D_g}{D_o} = f(d_{ss}, d_{cs}, H_{pm}, D_g, p) \quad (۱۷-۳)$$

که در این رابطه  $d_{cs}$  عمق آهن پشت هسته استاتور و  $d_{ss}$  عمق شیار هسته استاتور است. عموماً با انجام مطالعات جامع روی ساختار خاص، روشی برای تعیین  $\lambda_o$  که وابستگی این پارامتر را به دما، تلفات، بازده و غیره نشان می‌دهد ارائه می‌شود [۸].

جدول (۲-۳): شکل موج‌های نمونه اولیه نوعی

Model	$e(t)$	$i(t)$	$K_e$	$K_i$
1. Sinusoidal waveform			$\sqrt{2}$	$\frac{1}{2} \cos \phi$
2. Sinusoidal waveform			$\sqrt{2}$	0.5
3. Rectangular waveform			1	1
4. Trapezoidal waveform			1.134	0.777
5. Triangular waveform			$\sqrt{3}$	0.333
6. Rectangular & trapezoidal waveform			1.134	0.8
7. Rectangular & trapezoidal waveform			1.389	0.556
8. Trapezoidal waveform			1.389	0.519
9. Rectangular & triangular waveform			1.5	0.333
10. Rectangular waveform			1.225	0.667

عمق آهن پشت هسته استاتور و عمق شیار هسته استاتور را می‌توان از روابط زیر به دست آورد [۸] و [۱۰]:

$$d_{ss} = \frac{A_s}{2J_s K_s K_{cu}} \quad (۱۸-۳)$$

$$d_{cs} = \frac{(1-K_s)B_g}{2B_{cs}} L_s \quad (۱۹-۳)$$

در این روابط  $A_s$  بار گذاری الکتریکی استاتور،  $J_s$  چگالی جریان،  $K_{cu}$  ضریب پیرشوندگی شیار،  $B_{cs}$  چگالی شار در آهن هسته و  $B_g$  مقدار متوسط چگالی شار در فاصله هوایی است.

با قرار دادن رابطه (۱۷-۳) در رابطه (۱۳-۳) داریم:

$$P_R = \frac{1}{1+K_\phi} \frac{1}{2m} K_e K_i K_p \eta B_g A \frac{f}{p} \lambda_o L_s^2 D_o \quad (۲۰-۳)$$

یا:

$$P_R = \frac{1}{1+K_\phi} \frac{1}{2m} K_e K_i K_p K_L^2 \eta B_g A \frac{f}{p} \lambda_o^3 D_o^3 \quad (۲۱-۳)$$

قطر خارجی ماشین شار متقاطع قطب چنگالی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$D_0 = D_g + 2(d_{ss} + d_{cs}) \quad (۲۲-۳)$$

و قطر صفحه فاصله هوایی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$D_g = D_{ir} + 2H_{pm} + 2g \quad (۲۳-۳)$$

که در این رابطه  $g$  طول فاصله هوایی و  $D_{ir}$  قطر داخلی روتور است.

برای ماشین‌های استوانه‌ای معمول، طول فاصله هوایی به صورت زیر تخمین زده می‌شود [۹]:

$$g = 4.7 \times 10^{-3} p^{-0.5} D_g \quad (۲۴-۳)$$

به هر حال این رابطه مقدار کمتری برای طول فاصله هوایی ماشین‌های شار متقاطع نتیجه می‌دهد.

ضخامت شعاعی مغناطیس‌های دائم ( $H_{PM}$ ) در روتور به فاکتور تمرکز شار ( $K_{focus}$ ) و جفت قطب‌ها

به صورت زیر وابسته است [۸] و [۱۰]:

$$H_{PM} = \frac{\pi D_g K_{focus}}{8 p K_d} \quad (25-3)$$

در این رابطه  $K_d$  فاکتور پراکندگی شار ماشین  $PM$  است که با استفاده از روش المان محدود یا داده‌های طراحی ماشین‌های مشابه و یا آزمایشات تعیین می‌شود.

مقدار  $\lambda_o$  تعریف شده با رابطه (۲-۱۷) را می‌توان از رابطه تجربی زیر به دست آورد:

$$\lambda_o = \left(1 + \frac{\pi K_{focus}}{8 p K_d} + 9.4 \times 10^{-3} p^{-0.5} + \frac{A_s}{D_g J_s K_{cu} K_s} + (1 - K_s) K_L \frac{B_g}{B_{cs}}\right)^{-1} \quad (26-3)$$

از این رابطه می‌توان دریافت که پارامتر  $\lambda_o$  نه تنها به بار گذاری الکتریکی و چگالی جریان بستگی دارد، بلکه به ضرایب تمرکز و پراکندگی شار نیز وابسته است.

چگالی شار در هسته استاتور را می‌توان به صورت زیر تخمین زد:

$$B_{cs} = \begin{cases} 5.47 f^{-0.32} & f > 40 \text{HZ} \\ 1.7 \sim 1.8 & f < 40 \text{HZ} \end{cases} \quad (27-3)$$

چگالی شار در فاصله هوایی با استفاده از ضریب تمرکز شار از رابطه زیر به دست می‌آید [۸] و [۹]:

$$B_g = K_{focus} B_u \quad (28-3)$$

که در این رابطه  $B_u$  بارگذاری مغناطیسی است.

ضریب تمرکز شار به عنوان پارامتر وابسته به ساختار آهنرباهای دائم ماشین به صورت زیر تعریف می‌-

شود [۸]، [۹] و [۱۱]:

$$K_{focus} = \frac{A_{pm}}{A_p} K_d \quad (29-3)$$

که در این رابطه  $A_{pm}$  سطح مقطع آهنرباهای دائم و  $A_p$  سطح فعال قطب‌ها و  $K_d$  فاکتور نشت شار می‌باشد.

$A_{pm}$  و  $A_p$  از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$A_{pm} = 2p(1 - K_s) L_s H_{pm} \quad (30-3)$$

$$A_p = \frac{\pi}{4}(1 - K_{pm})(1 - K_s)(D_g - 2g) \quad (31-3)$$

که در آن:

$$K_{pm} = \frac{2pl_{pmo}}{\pi(D_g - 2g)} \quad (32-3)$$

و  $l_{pmo}$  اندازه کمان خارجی مگنت می باشد.

تمرکز شار به عوامل زیر بستگی دارد [۵]:

- سطح اشباع در هسته آهن روتور
- نقطه کار مگنت
- ابعاد فیزیکی روتور
- میزان شار نشتی روتور

برای به دست آوردن ضریب تمرکز شار با توجه به ساختار هندسی مگنت‌ها در روتور داریم:

$$K_{focus} = \frac{B_r}{B_m} \quad (33-3)$$

که در این رابطه  $B_m$  نقطه کار حداقل مگنت<sup>۱</sup> و  $B_r$  چگالی شار پسماند مگنت است. اکنون می توان

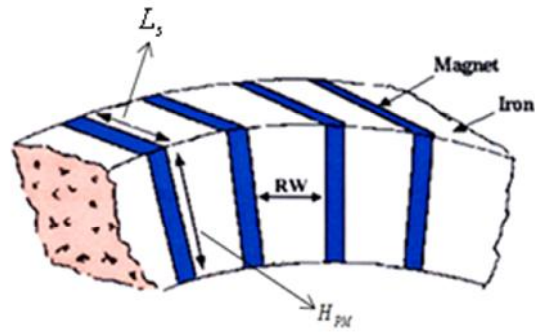
ضریب تمرکز شار را بر اساس ابعاد روتور به دست آورد:

$$K_{focus} = \frac{L_s}{2RW} \quad (34-3)$$

که در آن با توجه به شکل (۳-۳)، پارامتر  $RW$  اندازه کمان متوسط متمرکز کننده شار می باشد.

---

۱- Minimum Magnet Operating Point



شکل (۳-۳): یک قطعه از روتور [۵]

تمام پارامترها به جز مقادیر  $L_{sc}$  و  $d_{os}$  و قبلا محاسبه شده‌اند. با توجه به شکل (۲-۳) مقدار  $L_{sc}$

نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$L_{sc} = \frac{L_s}{2}(1 + \lambda) \quad (۳۵-۳)$$

که در این رابطه مقدار  $\lambda$  بین ۰ تا ۱۰۰ در صد تغییر می‌کند (در اکثر ماشین‌های قطب چنگالی  $\lambda = 0.3$  است).

برای محاسبه مقدار  $d_{os}$  نشان داده شده در شکل (۲-۳) رابطه دقیقی گزارش نشده است. به نظر می‌رسد این پارامتر را می‌توان به صورت زیر تخمین زد:

▪ ابتدا سطح مقطع تقریبی در دسترس بین دو بازوی استاتور محاسبه می‌شود:

$$A_s = L_{ss} d_{ss} \quad (۳۶-۳)$$

▪ سطح مقطع باقیمانده بعد از جا گذاری هادی‌ها از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$A_{srem} = A_s(1 - K_{cu}) \quad (۳۷-۳)$$

▪ حال می‌توان بازه مقدار  $d_{os}$  را از رابطه زیر به دست آورد:

$$d_{os} < \frac{A_{s rem}}{L_{ss}} \quad (38-3)$$

طراحی چند فازه این ساختار می‌تواند به دو صورت انجام گیرد: در روش اول PM های مشترک فازها بطور یک پارچه روی روتور قرار می‌گیرند و برای همه فازها عمل می‌کنند ولی استاتورها در کنار هم حول یک محور و به اندازه  $\alpha$  شیفت یافته نسبت به یکدیگر قرار می‌گیرند. در روش دوم عکس عمل روش اول انجام می‌گیرد. در این روش استاتورها در یک راستا هستند، ولی PM های هر فاز نسبت به فاز دیگر به اندازه  $\alpha$  شیفت پیدا می‌کنند. مقدار  $\alpha$  از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = \frac{360}{m} \quad (39-3)$$

که  $m$  در این رابطه تعداد فازها است.

در ادامه به رابطه چگالی توان در یک نمونه ماشین شار متقاطع با هسته U شکل پرداخته می‌شود. اکنون با در نظر گرفتن شکل موج دوزنقه‌ای و با توجه به ردیف چهارم از جدول (۲-۳) مقادیر ضرایب  $K_i = 1.134$  و  $K_p = 0.777$  بدست می‌آیند. با توجه به اینکه ماشین دارای آهنربای دائم بوده و فاقد سیم‌پیچی روتور است بنابراین  $K_\phi = 0$  است. با این فرضیات معادله ابعادی کلی ماشین شار متقاطع می‌تواند به صورت زیر نوشته می‌شود لازم به ذکر است روابطی که در ادامه بیان می‌شود، مربوط به ماشین شار متقاطع با هسته U شکل است. [۸]:

$$P_R = 0.441 \pi p (1 - K_s) \eta K_L B_g A \frac{f}{p} \lambda_o D_o^2 L_e \quad (40-3)$$

و چگالی توان ماشین از رابطه زیر به دست آید:

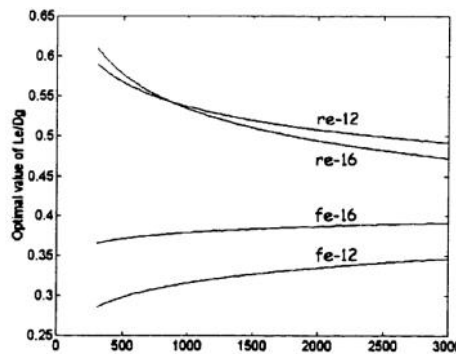
$$\xi = 1.762p(1 - K_s)\eta K_L B_g A \frac{f}{p} \lambda_o \quad (41-3)$$

در معادلات (40-3) و (41-3) تنها پارامترهای مستقل  $K_L$  و  $K_s$  هستند و دیگر پارامترها یا به این دو پارامتر وابسته اند و یا دارای محدودیتهای فیزیکی دیگری هستند.

مقادیر بهینه  $K_L$  و  $K_s$  با در نظر گرفتن چگالی توان و بازده مشخص می‌شوند. برای نمونه های عملی مقدار بهینه  $K_s$  برابر 0/16 در نظر گرفته می‌شود در حالیکه مقدار  $K_L$  رابطه نزدیکی با سرعت مکانیکی نامی ماشین دارد. با مطالعات دقیق، یک سری از منحنی‌های وابسته به بارگذاری الکتریکی، چگالی جریان و توان خروجی نامی ماشین بدست آمده است که رابطه بین مقادیر بهینه  $K_L$  و سرعت مکانیکی نامی  $n_s$  را برای جفت قطب‌های مختلف بطور ضمنی توصیف می‌کند (شکل (4-3)). از این داده‌ها و از رگرسیون توان، رابطه تقریب زیر به دست می‌آید:

$$\frac{L_e}{D_g} = \begin{cases} 0.1770n_s^{0.0838} & p = 6 \\ 0.3087n_s^{0.0295} & p = 8 \end{cases} \quad \text{Ferrite magnets} \quad (42-3)$$

$$\frac{L_e}{D_g} = \begin{cases} 0.927n_s^{-0.0792} & p = 6 \\ 1.1545n_s^{-0.1116} & p = 8 \end{cases} \quad \text{Rare - earth magnets}$$



شکل (4-3): مقدار بهینه  $K_L$  نسبت به سرعت مکانیکی نامی  $n_s$  برای تعداد جفت‌های قطب‌های مختلف

برای  $p=8(fe-16)$  و  $p=6(fe-12)$ ,  $P_R = 75kw$ ,  $J_s = 6.2 \times 10^6 A/m^2$ ,  $A = 60kA/m$

مگنت ferrite و  $p=6(re-12)$  و  $p=8(re-16)$  برای مگنت earth

### ۳-۲- چگالی شار فاصله هوایی [۱۲] و [۱۳]

چگالی شار متوسط فاصله هوایی  $B_g$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$B_g = \frac{B_r H_{pm}}{H_{pm} + g} \quad (۴۳-۳)$$

که در آن  $B_r$  چگالی شار پسماند مگنت می‌باشد.

### ۳-۳- سیم‌پیچی

شکل سیم‌پیچی در ماشین‌های قطب چنگالی از نوع توروئیدال می‌باشد. برای محاسبه قطر سیم

می‌توان از جریان هر فاز و چگالی جریان به صورت زیر استفاده کرد:

مرحله اول: سطح مقطع سیم مس لازم از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$A_{cuw} = \frac{I_{pk}}{J_s} \quad (۴۴-۳)$$

سطح مقطع کل مس نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$A_{cu} = N_t A_{cuw} \quad (۴۵-۳)$$

مرحله دوم: قطر سیم از رابط زیر به دست می‌آید:

$$d_w = \sqrt{\frac{4A_{cuw}}{\pi}} \quad (۴۶-۳)$$



### ۳-۴- تائید صحت الگوریتم ارائه شده با استفاده از مشخصات

#### دو نمونه عملی مندرج در منابع

#### ۳-۴-۱- نمونه اول [۱۰]

#### ۳-۴-۱-۱- بعضی مشخصات داده شده ماشین نمونه ۱

۱. توان خروجی حداکثر موتور  $P_R = 100000 \quad [W]$

۲. تعداد فازها  $m = 3$

۳. ولتاژ خط ماکزیمم (مقدار موثر)  $V_l = 436 \quad [V]$

۴. فرکانس حداقل  $f_{\min} = 768 \quad [Hz]$

۵. فرکانس حداکثر  $f_{\max} = 4000 \quad [Hz]$

۶. سرعت موتور حداقل  $n_{s \min} = 1152 \quad [RPM]$

۷. سرعت موتور حداکثر  $n_{s \max} = 6000 \quad [RPM]$

#### ۳-۴-۱-۲- پیاده سازی الگوریتم برای یافتن ابعاد هندسی ماشین نمونه ۱

اطلاعات دقیق عملکرد مربوط به ماشین در این مرجع ذکر نشده است ولی به نظر می‌رسد که این ماشین در فرکانس ماکزیمم و در ولتاژ حداکثر خط داده شده، توان نامی خود را تحویل می‌دهد. اگر نسبت ولتاژ به فرکانس ثابت نگه داشته شود و مقدار فرکانس به حداقل کاهش داده شود، توان موتور تقریباً به ۲۰ درصد توان نامی تقلیل می‌یابد.

۱. تعداد زوج قطبها  $p = 60f/n = 60(768)/1152 = 40$

۲. بارگذاری الکتریکی کل  $A = 12700 \quad \left[ \frac{A}{m} \right]$

۳. چگالی جریان  $J_s = 6.2 \times 10^6 \quad \left[ \frac{A}{m^2} \right]$

۴. چگالی شار فاصله هوایی  $B_g = 0.45 \quad [T]$

۵. ضریب شکل موج توان الکتریکی  $K_p = 0.778$

۶. ضریب شکل موج جریان  $K_i = 1.134$

۷. نسبت طول محوری شیار به طول موثر ماشین  $K_s = 0.3$

۸. ضریب نیروی محرکه الکتریکی  $K_e = 2p\pi^2(1 - K_s) = (2)(40)(\pi^2)(1 - 0.3) = 552.69$

۹. ضریب پر شونده گی مس  $K_{cu} = 0.42$

۱۰. چگالی شار پس ماند آهنربای دائم  $B_r = 1.1 \quad [T]$

۱۱. حداقل نقطه کاری آهنربا  $B_m = 0.22 \quad [T]$

۱۲. ضریب نشت شار  $K_d = 0.49$

۱۳. ضریب تمرکز شار  $K_{focus} = \frac{B_r}{B_m} = \frac{1.2}{0.37} = 3.24$

۱۴. ضریب نسبت وجه  $K_L = 0.425$

۱۵. قطر صفحه فاصله هوایی

$$D_g = \left( \frac{P_R}{\frac{1}{2m} K_e K_i K_p K_L^2 \eta B_g A \frac{f}{p}} \right)^{\frac{1}{3}} = \left( \frac{100000}{\left(\frac{1}{2m}\right)(27654)(1.134)(0.778)(0.425)^2(0.90)(0.6)(20000)\left(\frac{4000}{40}\right)} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.234 \quad [m]$$

۱۶. طول محوری ماشین  $L_e = K_L D_g = (0.425)(0.234) = 0.0996 \quad [m]$

۱۷. طول محوری هسته استاتور هر فاز  $L_s = \frac{L_e}{m} = \frac{0.0996}{3} = 0.0332 \quad [m]$

۱۸. طول محوری شیار هسته استاتور  $L_{ss} = K_s L_s = (0.3)(0.0332) = 0.0100 \quad [m]$

۱۹. فاصله هوایی  $g = 0.001 \quad [m]$

۲۰. چگالی شار متوسط هسته استاتور  $B_{cs} = 5.47f^{-0.32} = 5.47(768^{0.32}) = 0.6526 \quad [T]$

$$n_m = n_f = 2p = 2(40) = 80$$

۲۱. تعداد مگنت‌ها و متمرکز کننده‌های شار

$$RW = \frac{L_s}{2K_{focus}} = \frac{0.0332}{2(3.24)} = 0.0051 \quad [m]$$

۲۲. اندازه کمان متمرکز کننده‌های شار

۲۳. اندازه کمان خارجی مگنت

$$l_{pmo} = \frac{\pi(D_g - 2g)}{n_f} - RW = \frac{\pi(0.2334 - (2)(0.001))}{80} - 0.0051 = 0.0040 \quad [m]$$

۲۴. سطح فعال قطب‌ها

$$A_p = \frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{2pl_{pmo}}{\pi(D_g - 2g)}\right) (1 - K_s)(D_g - 2g) =$$

$$\frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{(2)(40)(0.004)}{\pi(0.2344 - (2)(0.001))}\right) (1 - 0.3)(0.2344 - (2)(0.001)) = 0.0715 \quad [m^2]$$

$$A_{pm} = \frac{K_{focus}}{K_d} A_p = \frac{3.24}{0.49} (0.0715) = 0.4695 \quad [m^2]$$

۲۵. سطح مقطع آهنرباهای دائم

$$H_{PM} = \frac{\pi D_g K_{focus}}{8pK_d} = \frac{\pi(0.2344)(3.24)}{(8)(40)(0.49)} = 0.0151 \quad [m]$$

۲۶. ضخامت مگنت‌ها

۲۷. قطر خارجی ماشین

$$D_o = D_g + 2(d_{ss} + d_{cs}) = 0.2334 + (2)(0.0476 + 0.0198) = 0.3690 \quad [m]$$

۲۸. تعداد دور سیم پیچی

$$N_t = \frac{E_{pk}}{K_e D_g B_g L_s \frac{f}{p}} = \frac{285}{(552.69)(0.234)(0.45)(0.0332)\left(\frac{4000}{40}\right)} = 1.48 \approx 2$$

$$I = \frac{P_R}{\eta m K_i K_p E_{pk}} = \frac{100000}{(0.9)(3)(1.134)(0.778)(285)} = 139.3 \quad [A]$$

۲۹. جریان موثر استاتور

$$A_{cuw} = \frac{I}{J_s} = \frac{147.3}{6200000} = 0.000023785 \quad [m^2]$$

۳۰. سطح مقطع سیم مسی

$$d_w = \sqrt{\frac{4A_{cuw}}{\pi}} = \sqrt{\frac{(4)(0.000023785)}{\pi}} = 0.0055 \quad [m]$$

۳۱. قطر سیم

$$R = \frac{\rho l}{A_{cuw}} = \frac{1}{5.8 \times 10^7} \frac{1.77148}{0.00002507} = 0.0015 \quad [\Omega] \quad \text{۳۲. مقدار مقاومت سیم پیچی}$$

$$Density = 1.189 \times 10^7 \quad \left[ \frac{Wat}{m^3} \right] \quad \text{۳۳. چگالی توان}$$

### ۳-۴-۲- نمونه دوم [۱۴]

#### بعضی مشخصات نامی داده شده نمونه ۲

۱. توان خروجی نامی موتور  $P_R = 2200 \quad [W]$

۲. تعداد فازها  $m = 3$

۳. فرکانس  $f = 300 \quad [Hz]$

۴. سرعت نامی موتور  $n = 3000 \quad [rpm]$

۵. ولتاژ موثر هر فاز ماشین  $V_{ph} = 120 \quad [V]$

### ۳-۴-۲- پیاده سازی الگوریتم برای یافتن ابعاد و پارامترهای طراحی ماشین

#### نمونه ۲

با اعمال الگوریتم به ماشین نمونه دوم ابعاد و پارامترهای جدول (۳-۳) به دست آمد. در این قسمت از ذکر مجدد روابط جلوگیری شده است.

جدول (۳-۳): ابعاد و پارامترهای محاسبه شده نمونه دوم با الگوریتم

ردیف	پارامتر	علامت	واحد	مقدار
۱	بارگذاری الکتریکی کل	$[A/m]$	$A$	۲۸۰۰۰
۲	چگالی جریان	$[A/m^2]$	$J_s$	۶۲۰۰۰۰۰
۳	متوسط چگالی شار فاصله هوایی	$[T]$	$B_g$	۰/۴۵
۴	ضریب شکل موج توان الکتریکی	-	$K_p$	۰/۷۷
۵	ضریب شکل موج جریان	-	$K_i$	۱/۱۳۴
۶	نسبت طول محوری شیار به طول موثر ماشین	-	$K_s$	۰/۵۸۸
۷	ضریب نیروی محرکه الکتریکی	-	$K_e$	۴۸/۷۶۷۵
۸	ضریب پر شونده مس	-	$K_{Cu}$	۰/۵
۹	چگالی شار پس ماند آهنربای دائم	$[T]$	$B_r$	۱/۲۳

۰/۷	$B_m$	[T]	حداقل نقطه کاری آهنربا	۱۰
۰/۴۶	$K_d$	-	ضریب نشت شار	۱۱
۱/۷۵	$K_{focus}$	-	ضریب تمرکز شار	۱۲
۱/۸۰	$K_L$	-	ضریب نسبت وجه	۱۳
۰/۰۵۶۳	$D_g$	[m]	قطر صفحه فاصله هوائی	۱۴
۰/۰۳۳۹	$L_s$	[m]	طول محوری هسته استاتور	۱۵
۰/۰۱۹۹	$L_{ss}$	[m]	طول محوری شیار هسته استاتور	۱۶
۰/۰۰۱	$g$	[m]	فاصله هوایی	۱۷
۰/۸۸۲	$B_{cs}$	[T]	متوسط چگالی شار هسته استاتور	۱۸
۰/۰۲۰	$d_{ss}$	[m]	عمق شیار هسته استاتور	۱۹
۰/۰۲۰	$d_{cs}$	[m]	عمق پشت هسته استاتور	۲۰
۱۲	$n_f = n_m$	-	تعداد مگنت‌ها و متمرکز کننده‌های شار	۲۱
۲۰/۳۴	$R_w$	°	اندازه کمان متوسط متمرکز کننده‌های شار	۲۲
۹/۶۵۵۶	$L_{pmo}$	°	اندازه کمان خارجی مگنت	۲۳
۰/۰۱۳۸	$H_{pm}$	[m]	ضخامت مگنت‌ها	۲۵
۰/۱۰۹۹	$D_o$	[m]	قطر خارجی ماشین	۲۶
۶۵	$N_t$	-	تعداد دور	۲۷
۶/۸۱	$I$	[A]	جریان موثر	۲۸
۰/۰۰۱۲	$d_w$	[m]	قطر سیم	۳۰
۰/۲۴۸۹	$R$	[Ω]	مقاومت سیم‌پیچ	۳۱
$۴/۸۴ \times ۱۰^۶$	Density	$\left[ \frac{Wat}{m^3} \right]$	چگالی توان	۳۲

### ۳-۵- مقایسه نتایج

در این بخش نتایج به دست آمده از الگوریتم برای نمونه‌های مطرح شده جمع بندی شده است. ستون سمت چپ در هر جدول‌های (۳-۴) و (۳-۵) مربوط به اطلاعات مندرج در مرجع مربوطه و ستون سمت راست ابعاد به دست آمده از الگوریتم می‌باشد.

جدول (۳-۴) : مقایسه نتایج: ماشین نمونه ۱

ابعاد محاسبه شده توسط الگوریتم	ابعاد داده شده در مرجع [۳]
--------------------------------	----------------------------

$D_g$	۲۳۴.۳۴	۲۳۴.۴
$L_e$	۹۹.۶	۹۹.۶
$L_s$	۳۳.۲	۳۳.۲
$L_{ss}$	۱۰	۱۰
$d_{ss}$	۴۷.۶	۴۷.۶
$d_{cs}$	۲۰	۱۹.۸
$l_{pmo}$	$1.98^\circ$	$1.9798^\circ$
$H_{pm}$	۱۵	۱۵.۱
$RW$	$2.52^\circ$	$2.5202^\circ$
$D_o$	۳۶۹.۵۴	۳۶۹

جدول (۳-۵): مقایسه نتایج: ماشین نمونه ۲

	ابعاد داده شده در مرجع [۸]	ابعاد محاسبه شده توسط الگوریتم
$D_g$	۵۶.۵	۵۶
$L_e$	۱۰.۲	۱۰.۱۴
$L_s$	۳۴	۳۳.۴
$L_{ss}$	۱۰	۱۰.۱
$d_{ss}$	۲۰	۱۶.۸
$d_{cs}$	۱۰	۱۰.۱
$l_{pmo}$	۱۰	۹/۶۵
$RW$	۲۰	$20.34^\circ$
$H_{pm}$	۱۴	۱۳.۸
$D_o$	۱۱۰	۱۰۹.۹

توضیح در مورد جدول‌های (۳-۳) و (۳-۴):

۱- طول‌ها بر حسب میلی متر می‌باشد.

۲- برای تبدیل اندازه کمان‌های مگنت و متمرکز کننده‌های شار به درجه در جداول فوق به ترتیب از روابط

$$RW^\circ = \frac{(360)(RW)}{2p(l_{pmo} + RW)} \quad \text{و} \quad l_{pmo}^\circ = \frac{(360)(l_{pmo})}{2p(l_{pmo} + RW)}$$

استفاده می‌شود.

### ۳-۶- شکل موج‌های شار در ماشین‌های قطب چنگالی و

#### مقایسه بین آنها

شکل موج شار زیر هر قطب را می‌توان با مقایسه اندازه کمان خارجی مگنت‌ها ( $l_{pmo}$ )، اندازه کمان متوسط متمرکز کننده‌های شار ( $RW$ ) و اندازه کمان داخلی بازوهای استاتور به دست آورد. مقدار ماکزیمم  $RW$  و  $l_{pmo}$  بر حسب درجه به عنوان اندازه کمان داخلی هر بازوی استاتور در نظر گرفته می‌شود. با این کار حداکثر شار ممکن بین روتور و استاتور مبادله می‌شود. کلا دو حالت زیر در طراحی این ماشین‌ها محتمل است:

۱- در یک سرعت ثابت و در فرکانس‌های پائین معمولاً  $l_{pmo}$  از  $RW$  بیشتر می‌شود. در این حالت اگر طراحی روتور با استفاده از الگوریتم انجام شود، شکل موج شار زیر هر قطب سر تخت خواهد بود (دوزنقه). در این کاربردها اگر بتوان  $l_{pmo}$  را با  $RW$  برابر در نظر گرفت (با فرض ثابت بودن حاصلجمع  $l_{pmo}$  و  $RW$ ) قسمت تخت منحنی کمتر شده و شکل موج شار زیر هر قطب به سینوسی نزدیک می‌شود.

۲- به طور عکس در یک سرعت ثابت و در فرکانس‌های بالا  $RW$  از  $l_{pmo}$  بیشتر می‌شود. چنانچه طراحی روتور در این حالت با استفاده از الگوریتم انجام شود، شکل موج شار زیر هر قطب، در قله‌ها تیز خواهد بود (مثلثی). برای این کاربردها اگر در طراحی روتور  $l_{pmo}$  با  $RW$  برابر فرض شود ( $l_{pmo} + RW = cte$ )، قسمت نوک تیز منحنی ملایم‌تر شده و شکل موج شار زیر هر قطب به شکل موج سینوسی نزدیک می‌شود.

در هر کدام از جدول‌های (۳-۶) و (۳-۷)، ابعاد دو نمونه ماشین با تغذیه‌های سینوسی و دوزنقه‌ای با هم مقایسه شده‌اند. از این جداول مشاهده می‌شود که اگر تغذیه سینوسی برای طراحی انتخاب گردد، حجم ماشین افزایش پیدا می‌کند. لازم به ذکر است که اثر تغذیه با اختصاص مقادیر به ضرائب  $K_p$  و  $K_i$  در الگوریتم اعمال می‌گردد.

جدول (۳-۶) : مقایسه نتایج: ماشین نمونه ۱

	شکل موج سینوسی (ردیف ۲ جدول (۳-۲))	شکل موج دوزنقه‌ای (ردیف ۴ جدول (۳-۲))
$D_g$	۲۵۲.۳	۲۳۴.۴
$L_e$	۱۰۷.۲	۹۹.۶
$L_s$	۳۵.۷	۳۳.۲
$L_{ss}$	۱۰.۷	۱۰
$d_{ss}$	۴۷.۶	۴۷.۶
$d_{cs}$	۲۱.۳	۱۹.۸
$l_{pmo}$	۱.۹۸	۱.۹۷۹۸ <sup>o</sup>
$H_{pm}$	۱۶.۳	۱۵.۱
$RW$	۲.۵۱۸۷ <sup>o</sup>	۲.۵۲۰۲ <sup>c</sup>
$D_o$	۳۹۰	۳۶۹

جدول (۳-۷) : مقایسه نتایج: ماشین نمونه ۲

	شکل موج سینوسی (ردیف ۲ جدول (۳-۲))	شکل موج دوزنقه‌ای (ردیف ۴ جدول (۳-۲))
$D_g$	۶۰.۳	۵۶
$L_e$	۱۰۹.۲	۱۰۱.۴
$L_s$	۳۶.۴	۳۳.۴
$L_{ss}$	۱۰.۹	۱۰.۱
$d_{ss}$	۱۶.۸	۱۶.۸
$d_{cs}$	۱۴.۹	۱۰.۱
$l_{pmo}$	۶.۰۶ <sup>o</sup>	۶.۰۳۷ <sup>o</sup>
$RW$	۸.۹۳ <sup>o</sup>	۸.۹۶ <sup>o</sup>
$H_{pm}$	۱۴.۹	۱۳.۸
$D_o$	۱۱۵.۶	۱۰۹.۷



## فصل چهارم

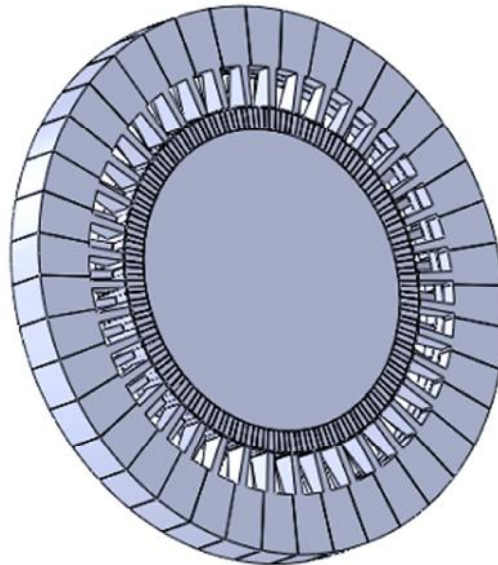
مدل سازی، شبیه سازی و بهینه سازی ماشین شار متقاطع

آهنربای دائم با ساختار قطب چنگالی

## ۴-۱- مقدمه:

در فصل ۳ الگوریتم طراحی اولیه برای ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم<sup>۱</sup> با ساختار قطب چنگالی<sup>۲</sup> ارائه شد. با الگوریتم مطرح شده و یک سری از فرضیات، ابعاد و پارامترهای دو نمونه از این ماشین‌ها محاسبه شدند. در این فصل با به کار گیری روش المان محدود<sup>۳</sup> با نرم‌افزارهای Comsol Multiphysics و Maxwell ۱۴a صحت آن‌ها بررسی می‌شود.

در شکل (۱-۴) نمای سه بعدی ساختار یک فاز از ماشین قطب چنگالی نشان داده شده است. فازهای دیگر نیز در راستای محور و با زاویه  $\frac{360}{m}$  که  $m$  تعداد فازها در ماشین می‌باشد، قرار می‌گیرند.



شکل (۱-۴): سه بعدی ساختار یک فاز از ماشین قطب چنگالی

---

۱ - Transverse Flux Permanent Magnet  
۲ - Claw Pole  
۳ - Finite Element Method

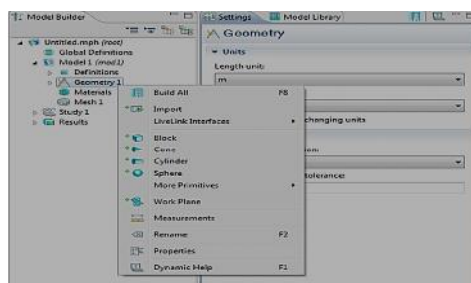
## ۲-۴- شبیه سازی ماشین قطب چنگالی با روش اجزا محدود

در این قسمت مراحل شبیه سازی برای نمونه اول به طور کامل توضیح داده می شود و سپس برای نمونه دوم و ماشین اصلی فقط نتایج ذکر می گردد. در قسمت اول نرم افزار ۴.۲ Comsol و در قسمت دوم نرم افزار Maxwell ۱۴a بررسی می شود. دلیل انتخاب دو نمونه نرم افزار برای تحلیل این ماشین این است که در نرم افزار ۴.۲ Comsol قابلیت به دست آوردن اندوکتانس و شار پیوندی سیم پیچ وجود ندارد، به همین دلیل باید از نرم افزار ۴.۲ Maxwell استفاده کرد. نرم افزار Maxwell ۱۴a نیز به دلیل گرافیک ضعیف پائین قابلیت نمایش چگالی شارهای عمودی و افقی را ندارد.

### ۴-۲-۱- مقدمه ای بر نرم افزار ۴.۲ Comsol

برای معرفی ماشین شار متقاطع قطب چنگالی به این نرم افزار، به دلیل پیچیده بودن ترسیم ساختار ماشین، از یک نرم افزار مکانیکی کمکی به نام Solid works استفاده می شود. در این نرم افزار ابتدا هر کدام از قطعات ماشین در بخش های<sup>۱</sup> جدا ترسیم می شود و سپس تمام قطعات سر هم<sup>۲</sup> می شوند. بعد از ترسیم ساختار این ماشین با نرم افزار گرافیکی کمکی Solid Works باید شکل های طراحی شده به محیط گرافیکی نرم افزار ۴.۲ Comsol منتقل شود. این کار به دو صورت زیر امکان پذیر است:

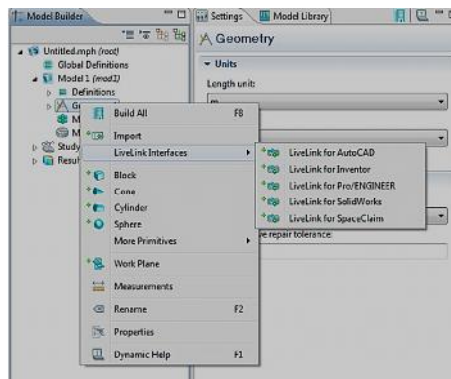
- در روش اول از شاخه Geometry و گزینه Import فایل ذخیره شده توسط Solid Works فراخوانی می شود. این فرآیند در شکل (۲-۴) به نمایش درآمده است.



شکل (۲-۴) : نحوه فراخوانی شکل از نرم افزار کمکی گرافیکی

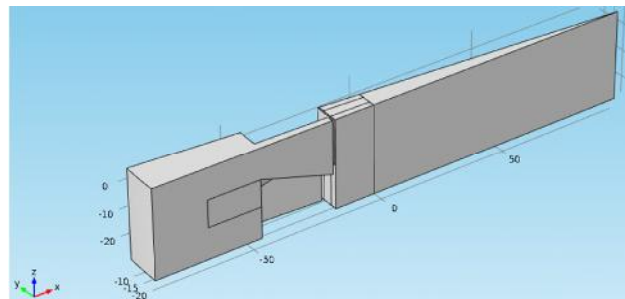
<sup>۱</sup>-Part  
<sup>۲</sup>-Assemble

○ در روش دوم از شاخه Geometry و گزینه Live Link Interfaces و در نهایت گزینه Live Link for Solid Works شکل ترسیم شده در Solid Works فراخوانی می‌شود. در این روش باید نرم‌افزار Solid Works همراه با نرم‌افزار Comsol ۴.۲ هم‌زمان در حال کار باشد. مزیت این روش این است که چنانچه تغییری در ساختار ماشین در نرم‌افزار Solid Works ایجاد گردد، سریعاً می‌توان این تغییر را به نرم‌افزار Comsol انتقال داد. (شکل (۳-۴)).



شکل (۳-۴) : نحوه لینک کردن نرم‌افزار Solid Works با Comsol ۴.۲

در شکل (۴-۴) ساختار معرفی شده به نرم‌افزار Comsol ۴.۲ به نمایش درآمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فقط یک قطب از استاتور یک فاز ماشین به این نرم‌افزار معرفی می‌گردد. چون تزویج مغناطیسی بین سیم‌پیچ‌های فازها وجود ندارد، مدل کردن یک فاز برای تحلیل‌های الکترومغناطیسی کافی به نظر می‌رسد.



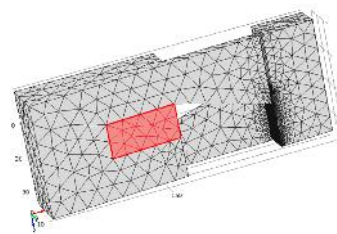
شکل (۴-۴) : ساختار معرفی شده به نرم‌افزار Comsol ۴.۲

بعد از معرفی ساختار به این ماشین باید به هر کدام از اجزا ماشین مواد اختصاص داد که این کار با شاخه Materials نرم افزار انجام می شود.

شاخه بعدی موجود در Model Builder بعد از Materials نوع فیزیک یا تحلیل مسئله را بیان می کند. فیزیک مسئله و نوع مطالعه هر دو در ابتدای کار با نرم افزار انتخاب می گردد. هر چند می توان در مراحل بعد نیز به مسئله نوع تحلیل و مطالعه مورد نیاز را اضافه کرد. فیزیک مورد بررسی در مسائلی که تاکنون مورد بحث قرار گرفته است، Magnetic Fields می باشد. در این قسمت بایستی مگنتها، مقدار جریان و شرایط مرزی مسئله به نرم افزار معرفی گردد. برای تعریف مگنتها باید روی شاخه Magnetic Field راست کلیک کرده و گزینه Amperes Law انتخاب شود. حال باید مقدار چگالی شار پسماند و ضریب نفوذ پذیری مربوط به هر مگنت وارد شود. لازم به ذکر است که به تعداد مگنتی که در یک جهت مغناطیس شده اند، باید فقط یک بار گزینه Amperes Law انتخاب شود.

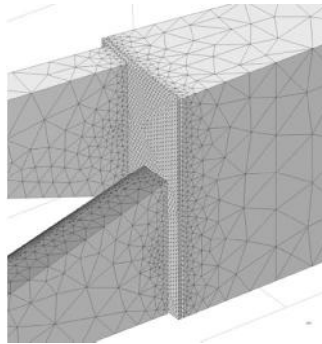
جریان سیم پیچها باید در گزینه External Current Density از شاخه Magnetic Fields مدل شود. باید توجه کرد که چگالی جریان سیم پیچها مورد نیاز است.

مرحله بعدی در Model Builder مربوط به مش بندی مسئله می باشد. با راست کلیک روی گره Mesh و انتخاب گزینه Free Tetrahedral در حالت سه بعدی می توان مسئله را مش بندی نمود. مش بندی سیستم را می توان بنا به نیاز ریز یا درشت انتخاب کرد. مش بندی ماشین مورد مطالعه در شکل (۴-۵) آمده است.



شکل (۴-۵) : مش بندی ماشین نمونه

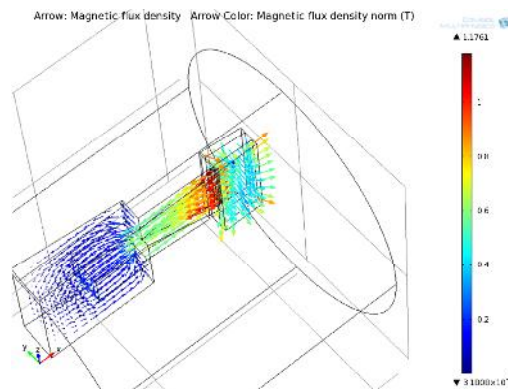
همان‌طور که در شکل مشاهده می‌گردد، این نرم‌افزار قادر است که قسمت‌های مختلف ماشین را با اندازه‌های دلخواه مش بندی کند. چون در این تحلیل بیشتر چگالی شار در فاصله هوایی مطرح است، لذا مش بندی در آن بسیار ریز انجام می‌شود. مش بندی فاصله هوایی به صورت بزرگ شده در شکل (۶-۴) به نمایش درآمده است.



شکل (۶-۴) : مش بندی فاصله هوایی

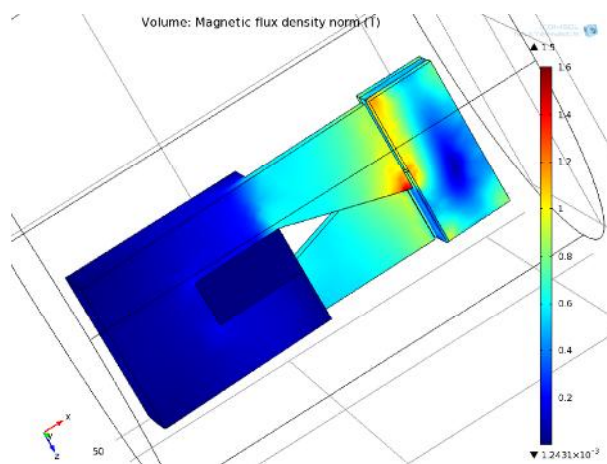
#### ۴-۲-۲- نتایج

پس از آنالیز و حل مدل معرفی شده به این نرم‌افزار می‌توان نتایج مورد نظر را مورد بررسی قرار داد. در شکل (۷-۴) نمونه‌ای از خطوط شار مغناطیسی به همراه طیف رنگی در حالت بی‌باری مشاهده می‌شود.



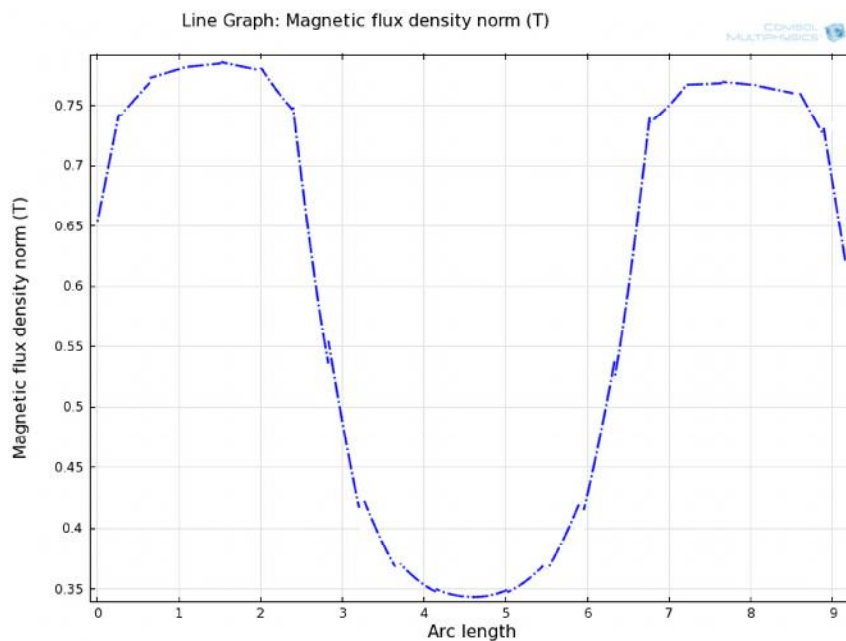
شکل (۷-۴) : نمایش برداری چگالی شار مغناطیسی همراه با اندازه‌های چگالی شار در حالت بدون جریان

شکل (۷-۴) بزرگ بودن اندازه چگالی شار در بازوهای استاتور را نسبت به سایر قسمت‌های ماشین نمایش می‌دهد. برای نمایش بهتر این موضوع طیف رنگی چگالی شار در یک قطب استاتور در شکل (۸-۴) به نمایش درآمده است.



شکل (۸-۴) : طیف رنگی چگالی شار در یک قطب استاتور

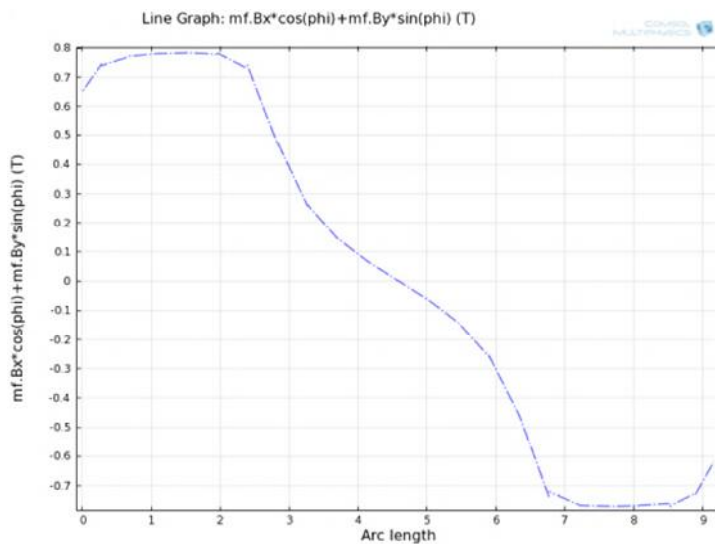
در شکل (۹-۴) توزیع چگالی شار مغناطیسی بی‌باری در فاصله هوایی بر حسب طول کمان زیر یک قطب استاتور رسم شده است. محور عمودی چگالی شار مغناطیسی نرمال بر حسب تسلا و محور افقی طول کمان بر حسب میلی‌متر است. همان‌طور که در شکل (۹-۴) مشاهده می‌شود، مقدار حداکثر چگالی شار ۰/۷۹ تسلا می‌باشد.



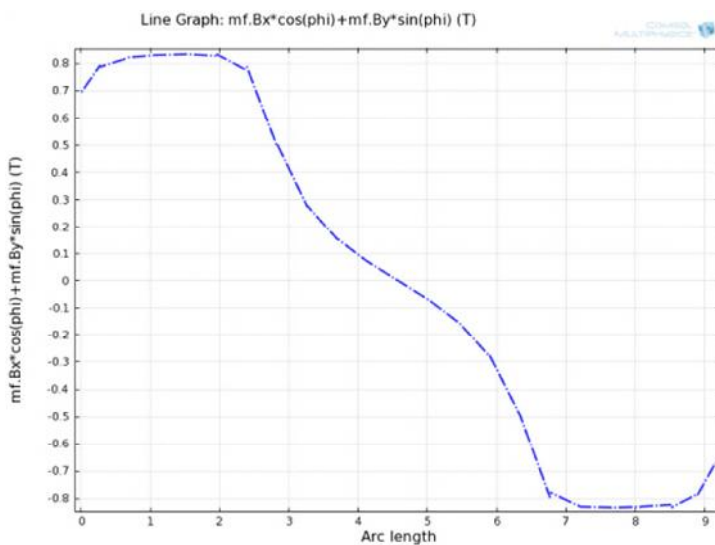
شکل (۴-۹): توزیع چگالی شار مغناطیسی بی‌باری در خط وسط فاصله هوایی ماشین قطب چگالی مورد مطالعه

شکل‌های (۴-۱۰) و (۴-۱۱) منحنی‌های مؤلفه عمودی توزیع چگالی شار مغناطیسی را در ازای بی‌باری و جریان نامی در فاصله هوایی بر حسب طول کمان نمایش می‌دهند. در هر دو حالت روتور ساکن است و بازوهای استاتور دقیقاً برابر متمرکز کننده‌های شار هستند.





شکل (۴-۱۰): مؤلفه عمودی چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی در حالت بدون جریان بر حسب اندازه قوس کمان



شکل (۴-۱۱): مؤلفه عمودی چگالی شار مغناطیسی زیر فاصله هوایی در حالت جریان نامی

در جدول (۱-۴) مقایسه چگالی شار مغناطیسی بی‌باری حاصل از محاسبات تحلیلی و FEM در فاصله هوایی، آمده است.

جدول (۱-۴) : مقایسه چگالی شار مغناطیسی بدون جریان حاصل از محاسبات تحلیلی و FEM

	فاصله هوایی	هسته استاتور
چگالی شار مغناطیسی	$B_{g-avg}$	$B_{c-avg}$
FEM	۰/۴۴۸	۰/۱۳
محاسبات تحلیلی	۰/۴۵	۰/۳۸۴۹

مشاهده می‌شود که چگالی شار فرض شده در الگوریتم درست می‌باشد. اختلاف بین چگالی شار هسته استاتور در دو ستون به دلیل این است که در محاسبات تحلیلی از رابطه ماشین‌های معمول استفاده شده است و در مراجع رابطه دقیقی برای این ماشین گزارش نشده است.

چگالی شار حاصل از جریان استاتور یا عکس‌العمل آرمیچر نیز در جدول (۲-۴) به نمایش در آمده است. در این حالت آهنربا‌های دائم با هوا جایگزین می‌شود. با این کار فقط شار حاصل از جریان استاتور به دست می‌آید.

جدول (۲-۴) : چگالی شار حاصل از جریان آرمیچر

جریان	جریان نامی	دو برابر جریان نامی
چگالی شار متوسط فاصله هوایی	۰/۰۲۸۶	۰/۰۵۷

همان‌طور که در جدول (۲-۴) مشاهده می‌شود، چگالی شار فاصله هوایی حاصل از جریان استاتور حدوداً ۶ درصد چگالی شار حاصل از مگنت‌ها است. این امر منجر به این نتیجه می‌شود که در این

ماشین‌ها می‌توان جریان استاتور را تا چند برابر جریان نامی افزایش داد بدون اینکه هسته استاتور به اشباع برود.

## ۴-۲-۳- نرم افزار Maxwell ۱۴a

برای معرفی این ماشین به نرم افزار Maxwell ۱۴a باید روندی مشابه نرم‌افزار قبلی پیگیری گردد. تنها تفاوتی که در این نرم افزار وجود دارد، این است که پسوندهای معمول Solid Works را نمی‌توان به محیط Maxwell ۱۴a معرفی کرد. به همین دلیل باید از پسوند های دیگر موجود در Solid Works استفاده کرد. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد از این نرم‌افزار برای به دست آوردن شار دور هر و اندوکتانس سیم‌پیچ استفاده می‌شود.

## ۴-۲-۳-۱- به دست آوردن اندوکتانس

هنگامی که روتور یک ماشین سنکرون می‌چرخد، در سیم‌پیچ‌های استاتور آن ولتاژی القاء می‌شود که باعث کشیده شدن جریانی از منبع در حالت موتوری می‌شود. این جریان باعث به وجود آمدن یک میدان مغناطیسی می‌شود که شکل میدان مغناطیسی اصلی روتور را تغییر می‌دهد. این اثر نیروی محرکه مغناطیسی آرمیچر بر روی توزیع فضایی شار میدان اصلی در فاصله هوایی، عکس‌العمل آرمیچر گفته می‌شود و آن را با یک المان سلفی (راکتانس سنکرون در ماشین‌های سنکرون) مدل می‌کنند.

در یک سیستم خطی مغناطیسی، اندوکتانس خودی هر سیم پیچ عبارت است از نسبت شار پیوندی یک سیم پیچ به جریانی که از همان سیم پیچ عبور می‌کند، در حالی که جریان سیم پیچی‌های دیگر صفر باشد. اندوکتانس متقابل عبارت است از نسبت شار پیوندی یک سیم‌پیچ به جریانی که از سیم پیچ دوم عبور می‌کند، در شرایطی که جریان سیم‌پیچ‌های دیگر از جمله همان سیم‌پیچی که شار پیوندی برای آن تعیین می‌شود، صفر باشد.

در ماشین های TFPM شار متقابل بین فازهای استاتور وجود ندارد بنابراین اندوکتانس متقابل بین

فازها صفر است. علاوه بر این در این نمونه ماشین‌ها اندوکتانس با حرکت روتور ثابت نیست و تابعی از موقعیت ( $\theta$ ) می‌باشد. به همین دلیل باید در این ماشین‌ها اندوکتانس‌های  $L_d$  و  $L_q$  تعریف شود. ولی برای ساده سازی روابط و به دلیل اینکه این ماشین‌ها در تعداد قطب بالا و معمولاً در سرعت بالا طراحی می‌شوند، این دو مقدار با هم برابر و حاصلضرب آن‌ها در فرکانس زاویه‌ای برابر راکتانس سنکرون در نظر گرفته می‌شود.

برای به دست آوردن راکتانس سنکرون ابتدا مقدار اندوکتانس هر قطب از هر فاز ماشین به دست می‌آید و سپس طبق رابطه (۱-۴) راکتانس سنکرون بر حسب اهم به دست می‌آید.

$$X_s = 2 \pi f 2 p L_{pole} \quad (1-4)$$

که در این رابطه  $L_{pole}$  مقدار اندوکتانس هر قطب از ماشین می‌باشد.

مقدار اندوکتانس برای هر قطب از نمونه اول  $361/3$  نانو هانری می‌باشد که مقدار راکتانس سنکرون  $0/724$  اهم می‌باشد ( تفاوت بین مقدار حداقل و حداکثر اندوکتانس  $0/322$  نانو هانری می‌باشد). راکتانس سنکرون را می‌توان با در نظر گرفتن مقدار ولتاژ حداکثر هر فاز به عنوان مبنای ولتاژ و جریان موثر هر فاز به عنوان مبنای جریان (رابطه (۲-۴)) پیونیت کرد.

$$Z_b = \frac{E_{pk}}{I} = \frac{285}{147.93} = 1.71 \quad \Omega \quad (2-4)$$

$$X_s^{pu} = \frac{X_s}{Z_b} = \frac{0.724}{1.71} = 0.42 \quad pu \quad (3-4)$$

مقدار پیونیت شده مقاومت برای مقایسه با راکتانس سنکرون در زیر ارائه شده است:

$$R^{pu} = 0.00082689 \quad pu$$

مشاهده می‌شود که مقدار مقاومت خیلی کوچکتر از راکتانس سنکرون می‌باشد.

#### ۴-۲-۳-۲- شار پیوندی سیم پیچ و نیروی ضد محرکه

شارهای پیوندی سیم پیچی هر فاز استاتور و در نتیجه نیروی ضد محرکه در اثر آهنرباهای دائم در غیاب جریان سیم پیچی استاتور به وجود می آید. از آنجایی که چگالی شار ناشی از آهنرباهای دائم در فاصله‌ی هوایی ثابت نیست، شارهای پیوندی نیز ثابت نخواهند بود و تابعی از موقعیت ( $\theta$ ) می باشد. برای یه دست آوردن نیروی ضد محرکه ابتدا شار پیوندی هر قطب را به دست آورده و سپس از رابطه (۴-۴) مقدار آن بر حسب ولت به دست می آید.

$$E_f = 2 \pi f 2 p \varphi_{pole} \quad (4-4)$$

که  $\varphi_{pole}$  در این رابطه مقدار شار پیوندی هر قطب می باشد.

مقدار شار هر قطب برای نمونه اول ۹۹/۹۶ میکرو وبر می باشد. با استفاده از رابطه (۴-۴) مقدار نیروی ضد محرکه ۲۰۱ ولت می باشد. همچنین مقدار این کمیت بر حسب پریونیت ۰/۷۱ می باشد.

#### ۴-۳-۳-۲- مقدار زاویه بار ( $\delta$ )

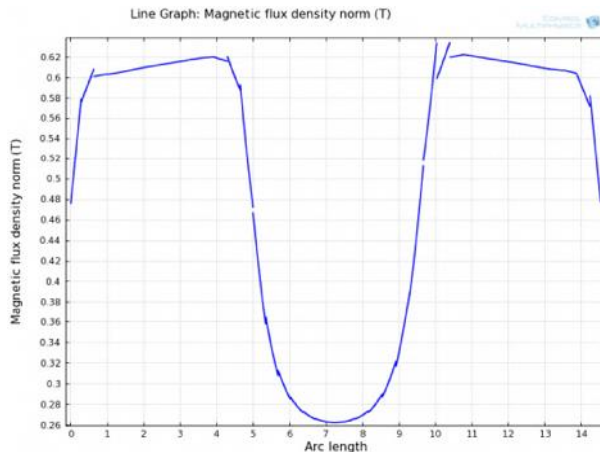
زاویه بار یا زاویه بین ولتاژ ورودی و ولتاژ نیروی ضد محرکه با فرض قطب صاف بودن می توان از رابطه زیر به دست آید:

$$\delta = \sin^{-1} \left( \frac{X_S P_R}{V_{in} E_f} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{0.42}{0.72} \right) = 36^\circ \quad (5-4)$$

#### ۴-۳- نمونه دوم

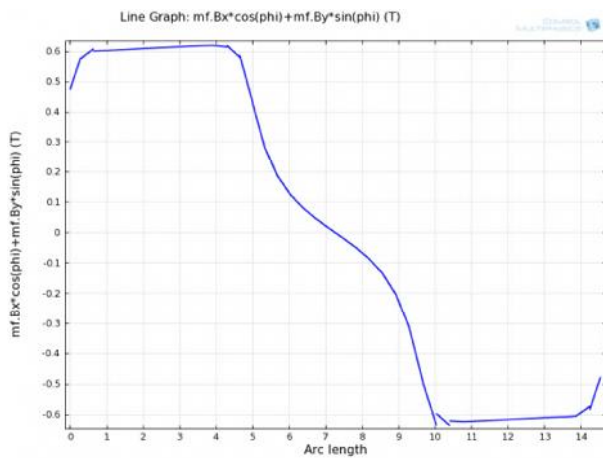
در قسمت قبل مراحل شبیه سازی به طور کامل توضیح داده شده است. در این جا فقط به ذکر نتایج پرداخته می شود. شکل (۴-۱۲) توزیع چگالی شار مغناطیسی بی باری در فاصله هوایی بر حسب طول کمان زیر یک قطب استاتور رسم شده است. محور عمودی چگالی شار مغناطیسی نرمال بر

حسب تسلا و محور افقی طول کمان بر حسب میلی متر است. همان طور که در شکل (۴-۱۲) مشاهده می شود، مقدار حداکثر چگالی شار ۰/۶۲ تسلا می باشد.

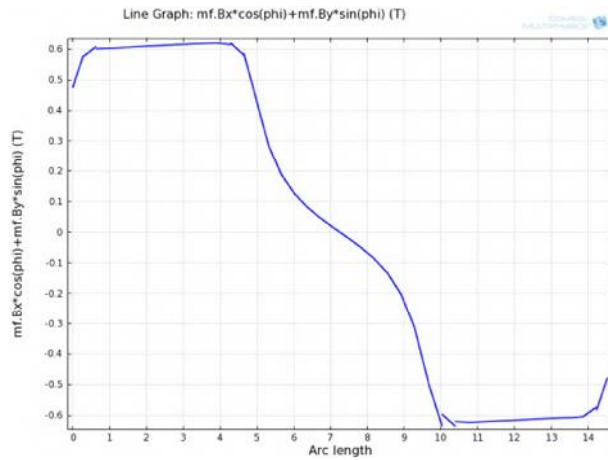


شکل (۴-۱۲): توزیع چگالی شار مغناطیسی بی باری در خط وسط فاصله هوائی ماشین قطب چنگالی مورد مطالعه

شکل های (۴-۱۳) و (۴-۱۴) منحنی های مؤلفه عمودی توزیع چگالی شار مغناطیسی را در ازای بی باری و جریان نامی در فاصله هوائی بر حسب طول کمان نمایش می دهند. در هر دو حالت روتور ساکن است و بازوهای استاتور دقیقاً برابر متمرکز کننده های شار هستند.



شکل (۴-۱۳): مؤلفه عمودی چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوائی در حالت بدون جریان بر حسب اندازه قوس کمان



شکل (۴-۱۴) : مؤلفه عمودی چگالی شار مغناطیسی زیر فاصله هوایی در حالت جریان نامی

در جدول (۳-۴) مقایسه چگالی شار مغناطیسی بی‌باری حاصل از محاسبات تحلیلی و FEM در فاصله هوایی، آمده است.

جدول (۳-۴) : مقایسه چگالی شار مغناطیسی بدون جریان حاصل از محاسبات تحلیلی و FEM

	فاصله هوایی	هسته استاتور
چگالی شار مغناطیسی	$B_{g-avg}$	$B_{c-avg}$
FEM	۰/۴۵۹۹	۰/۳۸
محاسبات تحلیلی	۰/۴۵	۰/۸۸۱۷

جدول (۴-۴) مقادیر اندوکتانس و شار پیوندی هر دور سیم‌پیچی حاصل از شبیه‌سازی و مرجع را با هم نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که در محاسبات ابتدا مقادیر کمیت‌ها مربوط به یک قطب به دست آمده است و سپس در تعداد قطب‌ها ضرب شده است.

جدول (۴-۵) : مقایسه بین نتایج حاصل از شبیه سازی و مرجع

	مقدار به دست آمده از شبیه سازی	مقدار داده شده در مرجع نمونه
اندوکتانس ماکزیمم هر دور سیم پیچی	$0.99 \mu H$	$1 \mu H$
شار پیوندی هر دور سیم پیچی	$0.922 \text{ Weber}$	$0.926 \text{ Weber}$
تعداد دور سیم پیچ	۶۵	۶۸

مقدار پریونیت شده نیروی ضد محرکه، راکتانس سنکرون و مقاومت سیم پیچی در جدول (۴-۶) ارائه شده است.

جدول (۴-۶) : مقادیر پریونیت شده نیروی ضد محرکه، راکتانس سنکرون و مقاومت

$E_f$	$X_s$	$R$
۱/۰۸	۰/۴۹	۰/۰۱۶۲

با استفاده از جدول (۴-۶) زاویه بار به صورت زیر می باشد.

$$\delta = \sin^{-1} \left( \frac{X_s P_R}{V_{in} E_f} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{0.49}{1.08} \right) = 26.89^\circ$$

## ۴-۴- پیاده سازی الگوریتم طراحی اولیه برای یافتن ابعاد هندسی ماشین اصلی و بهینه سازی آن

بعد از حصول اطمینان از صحت الگوریتم طراحی اولیه در بخش های قبل، حال به طراحی نمونه



اصلی پرداخته می‌شود. در این بخش ابتدا ماشین قطب چنگالی اصلی در چند فرکانس مختلف طراحی می‌شود و سپس با توجه به یکسری ملاحظات فرکانس مطلوب انتخاب می‌گردد. در هر مرحله از طراحی بهینه‌ترین طرح با روش سعی و خطا بر روی پارامترهای  $K_L$ ،  $K_S$  به دست آمد.

#### ۴-۴-۱- مشخصات نامی ماشین اصلی

مشخصات نامی ماشین مربوطه به صورت زیر است:

$$P_R = 500000 \quad [W]$$

۱. توان خروجی نامی موتور

$$m = 3$$

۲. تعداد فازها

$$n = 300 \quad [RPM]$$

۳. سرعت نامی موتور

$$E_p = 440 \quad [V]$$

۴. ماکزیمم ولتاژ فاز

#### ۴-۴-۱-۱- طراحی به ازای فرکانس‌های مختلف

نمونه اصلی در فرکانس‌های ۳۰، ۵۵ و ۲۰۰ هرتز طراحی گردید، که نتایج آن در زیر ذکر می‌شود.

#### ۴-۴-۱-۱-۱- فرکانس ۳۰ هرتز

با پیاده سازی الگوریتم طراحی اولیه، نتایج نهائی طرح در جدول (۴-۷) به نمایش در آمده است.

جدول (۴-۷): فرضیات و پارامترهای بهینه به دست آمده از الگوریتم در فرکانس ۳۰ هرتز

ردیف	پارامتر	علامت	واحد	مقدار
۱	بارگذاری الکتریکی کل	$[A/m]$	$A$	۲۹۰۰۰
۲	چگالی جریان	$[A/m^2]$	$J_s$	۶۲۰۰۰۰۰
۳	متوسط چگالی شار فاصله هوایی	$[T]$	$B_g$	۰/۶
۴	ضریب شکل موج توان الکتریکی	-	$K_p$	۰/۷۷۸
۵	ضریب شکل موج جریان	-	$K_i$	۱/۱۳۴
۶	نسبت طول محوری شیار به طول موثر ماشین	-	$K_s$	۰/۳

۸۲/۹۰۴۷	$K_e$	-	ضریب نیروی محرکه الکتریکی	۷
۰/۵	$K_{cu}$	-	ضریب پیرشوندگی مس	۸
۱/۲۳	$B_r$	[T]	چگالی شار پس ماند آهنربای دائم	۹
۰/۷۵	$E_m$	[T]	حداقل نقطه کاری آهنربا	۱۰
۱/۱	$K_d$	-	ضریب نشت شار	۱۱
۱/۶	$K_{focus}$	-	ضریب تمرکز شار	۱۲
۱/۴۵	$K_L$	-	ضریب نسبت وجه	۱۳
۰/۶۳۲۹	$D_g$	[m]	قطر صفحه فاصله هوایی	۱۴
۰/۳۰۵۹	$L_s$	[m]	طول محوری هسته استاتور	۱۵
۰/۰۹۱۸	$L_{ss}$	[m]	طول محوری شیار هسته استاتور	۱۶
۰/۰۰۱	$g$	[m]	فاصله هوایی	۱۷
۱/۸۴۲۱	$B_{cs}$	[T]	متوسط چگالی شار هسته استاتور	۱۸
۰/۰۱۴۵	$d_{ss}$	[m]	عمق شیار هسته استاتور	۱۹
۰/۰۳۴۹	$d_{cs}$	[m]	عمق پشت هسته استاتور	۲۰
۱۲	$n_f = n_m$	-	تعداد مگنت‌ها و متمرکز کننده‌های شار	۲۱
۱۹/۳۶۳۰	$R_w$	°	اندازه کمان متوسط متمرکز کننده‌های شار	۲۲
۹/۶۳۷۰	$L_{pmo}$	°	اندازه کمان خارجی مگنت	۲۳
۰/۰۶۰۳	$H_{pm}$	[m]	ضخامت مگنت‌ها	۲۵
۰/۹۹۱۷	$D_o$	[m]	قطر خارجی ماشین	۲۶
۹	$N_t$	-	تعداد دور	۲۷
۴۵۱/۹۳۹	$I$	[A]	جریان موثر	۲۸
۰/۰۱۹۳	$d_w$	[m]	قطر سیم	۲۹
$۷/۷۸ \times ۱۰^۵$	Density	$\left[ \frac{Wat}{m^3} \right]$	چگالی توان	۳۰

#### ۴-۴-۱-۱-۲- فرکانس ۵۵ هرتز

در این قسمت ماشین با فرکانس ۵۵ هرتز انجام می‌شود. نتایج در جدول (۴-۸)

جدول (۴-۸): فرضیات و پارامترهای بهینه به دست آمده از الگوریتم در فرکانس ۵۵ هرتز

ردیف	پارامتر	علامت	واحد	مقدار
------	---------	-------	------	-------

۳۴۰۰۰	$A$	$[A/m]$	بارگذاری الکتریکی کل	۱
۶۲۰۰۰۰۰	$J_s$	$[A/m^2]$	چگالی جریان	۲
۰/۱۶۵	$B_g$	$[T]$	متوسط چگالی شار فاصله هوایی	۳
۰/۷۷۸	$K_p$	-	ضریب شکل موج توان الکتریکی	۴
۱/۱۳۴	$K_i$	-	ضریب شکل موج جریان	۵
۰/۳	$K_s$	-	نسبت طول محوری شیار به طول موثر ماشین	۶
۱۵۱/۹۹۱	$K_e$	-	ضریب نیروی محرکه الکتریکی	۷
۰/۱	$K_{cu}$	-	ضریب پر شونده گی مس	۸
۱/۲۳	$B_r$	$[T]$	چگالی شار پس ماند آهنربای دائم	۹
۰/۷۷	$E_m$	$[T]$	حداقل نقطه کاری آهنربا	۱۰
۰/۹	$K_d$	-	ضریب نشت شار	۱۱
۱/۶	$K_{focus}$	-	ضریب تمرکز شار	۱۲
۰/۹۵	$K_L$	-	ضریب نسبت وجه	۱۳
۰/۱۶۴۷۲	$D_g$	$[m]$	قطر صفحه فاصله هوایی	۱۴
۰/۲۰۴۹	$L_s$	$[m]$	طول محوری هسته استاتور	۱۵
۰/۰۶۱۵	$L_{ss}$	$[m]$	طول محوری شیار هسته استاتور	۱۶
۰/۰۰۱	$g$	$[m]$	فاصله هوایی	۱۷
۱/۵۱۷۳	$E_{cs}$	$[T]$	متوسط چگالی شار هسته استاتور	۱۸
۰/۰۹۴۱	$d_{ss}$	$[m]$	عمق شیار هسته استاتور	۱۹
۰/۰۲۶۰	$d_{cs}$	$[m]$	عمق پشت هسته استاتور	۲۰
۲۲	$n_f = n_m$	-	تعداد مگنت ها و متمرکز کننده های شار	۲۱

۱۱/۶۷۸۳	$R_w$	°	اندازه کمان متوسط متمرکز کننده‌های شار	۲۲
۴/۶۸۵۴	$L_{pmo}$	°	اندازه کمان خارجی مگنت	۲۳
۰/۰۴	$H_{pm}$	[m]	ضخامت مگنت‌ها	۲۵
۰/۹۸۵۴	$D_o$	[m]	قطر خارجی ماشین	۲۶
۷	$N_t$	-	تعداد دور	۲۷
۴۵۱/۹۳۹	$I$	[A]	جریان موثر	۲۸
۰/۰۱۹۳	$d_w$	[m]	قطر سیم	۲۹
۱/۱۲×۱۰ <sup>۶</sup>	Density	$\left[\frac{Wat}{m^3}\right]$	چگالی توان	۳۰

#### ۴-۱-۱-۳- فرکانس ۲۰۰ هرتز

نهایتاً ماشین اصلی در یک فرکانس نسبتاً بالا طراحی می‌شود. نتایج در جدول (۹-۴) آمده

است

جدول (۹-۴): فرضیات و پارامترهای بهینه به دست آمده از الگوریتم در فرکانس ۲۰۰ هرتز

مقدار	واحد	علامت	پارامتر	ردیف
۳۰۰۰۰	$A$	[A/m]	بارگذاری الکتریکی کل	۱
۶۲۰۰۰۰۰	$J_s$	[A/m <sup>2</sup> ]	چگالی جریان	۲
۰/۶	$B_g$	[T]	متوسط چگالی شار فاصله هوایی	۳
۰/۷۷۸	$K_p$	-	ضریب شکل موج توان الکتریکی	۴
۱/۱۳۴	$K_i$	-	ضریب شکل موج جریان	۵

۰/۳	$K_s$	-	نسبت طول محوری شیار به طول موثر ماشین	۶
۵۵۲/۶۹	$K_e$	-	ضریب نیروی محرکه الکتریکی	۷
۰/۱	$K_{cu}$	-	ضریب پر شوندگی مس	۸
۱/۲۳	$B_r$	[T]	چگالی شار پس ماند آهنربای دائم	۹
۰/۳۷	$B_m$	[T]	حداقل نقطه کاری آهنربا	۱۰
۰/۴۹	$K_d$	-	ضریب نشت شار	۱۱
۳/۲۴۳۲	$K_{focus}$	-	ضریب تمرکز شار	۱۲
۰/۵۵	$K_L$	-	ضریب نسبت وجه	۱۳
۰/۵۶۳۰	$D_g$	[m]	قطر صفحه فاصله هوایی	۱۴
۰/۱۰۳۲	$L_s$	[m]	طول محوری هسته استاتور	۱۵
۰/۰۳۱۰	$L_{ss}$	[m]	طول محوری شیار هسته استاتور	۱۶
۰/۰۰۱	$g$	[m]	فاصله هوایی	۱۷
۱/۰۰۳۸	$B_{cs}$	[T]	متوسط چگالی شار هسته استاتور	۱۸
۰/۱۰۷۵	$d_{ss}$	[m]	عمق شیار هسته استاتور	۱۹
۰/۰۲۶۰	$d_{cs}$	[m]	عمق پشت هسته استاتور	۲۰
۸۰	$n_f$ $= n_m$	-	تعداد مگنت‌ها و متمرکز کننده‌های شار	۲۱
۳/۲۵۰۴	$R_w$	°	اندازه کمان متوسط متمرکز کننده‌های شار	۲۲
۱/۲۴۹۶	$L_{pmo}$	°	اندازه کمان خارجی مگنت	۲۳
۰/۰۳۶۶	$H_{pm}$	[m]	ضخامت مگنت‌ها	۲۵
۱/۰۴۹۱	$D_o$	[m]	قطر خارجی ماشین	۲۶
۳	$N_t$	-	تعداد دور	۲۷

۴۵۱/۹۳۹	$I$	[A]	جریان موثر	۲۸
۰/۰۰۹۶	$d_w$	[m]	قطر سیم	۳۰
$۲/۳۵ \times ۱۰^{-۶}$	Density	$\left[ \frac{Wat}{m^3} \right]$	چگالی توان	۳۱

#### ۴-۱-۱-۴-۴- نتایج به دست آمده از الگوریتم در فرکانس‌های مختلف:

نتایج به دست آمده از المان محدود برای هر سه فرکانس در جدول (۴-۱۰) نمایش داده شده است.

جدول (۴-۱۰): نتایج حاصل از طراحی با فرکانس‌های مختلف

	واحد	$f = ۳۰ \text{ Hz}$	$f = ۵۵ \text{ Hz}$	$f = ۲۰۰ \text{ Hz}$
$X_s$	[ ]	۰/۲۲۶	۰/۳۴۵	۰/۵۰۲۶۵
$E_f$	[V]	۲۸۴/۵۵	۳۷۰	۴۴۲/۳۳
$X_s^{p.u}$	-	۰/۲۶۳	۰/۴۰۱	۰/۵۸۴۴۸
$E_f^{p.u}$	-	۰/۶۴۷	۰/۸۴۵	۱/۰۰۵
$R$	[ ]	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۵۴۹
$R^{p.u}$	-	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۰۶۴۶۶۴
$\delta$	°	۲۴/۳۸	۲۸/۳۳۱	۳۵/۳۷۶

جدول (۴-۱۱) مقایسه بین چگالی شار فرض شده در الگوریتم طراحی اولیه را با محاسبات اجزا

محدود نمایش می‌دهد.

جدول (۴-۱۱): مقایسه چگالی شار فاصله هوائی در محاسبات تحلیلی و روش اجزا محدود

	محاسبات تحلیلی		اجزا محدود	
	$B_{CS}$	$B_g$	$B_{CS}$	$B_g$
$f = 30 \text{ Hz}$	۱/۷	۰/۶۵	۰/۵۵	۰/۶۲
$f = 55 \text{ Hz}$	۱/۵۱	۰/۶۵	۰/۴۳	۰/۶۸
$f = 200 \text{ Hz}$	۱/۰۳	۰/۷	۰/۳۱	۰/۷۲

با توجه به جدولهای (۴-۷) و (۴-۸) و (۴-۹) مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس (افزایش تعداد قطب‌ها) چگالی توان افزایش پیدا می‌کند. افزایش فرکانس در این ماشین‌ها بر خلاف ماشین‌های معمولی باعث افزایش تلفات آهن نمی‌شود. علت این امر همانطور که در فصل اول ذکر شد، استفاده از مواد SMC در ساختار استاتور و متمرکز کننده‌های شار است. این مواد در فرکانس‌های بالا تلفات ادی و تلفات آهن کمتری را نسبت به ورقه‌های سیلیکون ایجاد می‌کند. با توجه به اینکه هدف از بهینه سازی، حداکثر کردن چگالی توان است، فرکانس ۲۰۰ هرتز به عنوان فرکانس مطلوب انتخاب می‌گردد. حال برای اطمینان یافتن از اینکه چگالی توان به دست آمده در فرکانس ۲۰۰ هرتز مطلوب است، این ماشین با ماشین نمونه اول مقایسه می‌گردد. دلیل انتخاب نمونه اول برای مقایسه این است که، تعداد قطب‌های این ماشین با نمونه طراحی شده یکسان است. برای این مقایسه در الگوریتم طراحی نمونه اول سرعت ماشین و فرکانس به مقادیر نمونه طراحی شده تقلیل می‌یابد. مشاهده می‌شود که با این کار توان خروجی به مقدار ۵ کیلو وات کاهش پیدا می‌کند. مقادیر راکتانس سنکرون و نیروی ضد محرکه پریونیت شده ماشین نمونه به همراه چگالی توان و تعداد دور

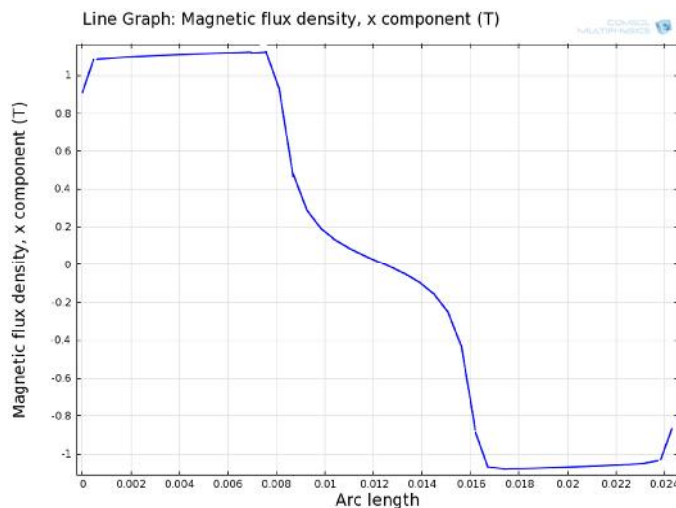
به دست آمده از الگوریتم در این حالت در جدول (۴-۱۲) آمده است. تعداد دور بر حسب ولتاژ ۲۸۵ ولت، به دست آمده است.

جدول (۴-۱۲): مقادیر راکتانس سنکرون و نیروی ضد محرکه پریونیت شده ماشین اول نمونه به همراه چگالی توان و تعداد دور

$X_s$	$E_f$	$Den$	$N_t$
۰/۲۱۱۳	۱/۰۴۱۲۱	۵۹۳۵۷۰	۲۹

از مقایسه چگالی توان مطرح شده در جدول فوق و چگالی توان نمونه اصلی در جدول (۴-۹) می‌توان این نتیجه را گرفت که طرح به دست آمده بهینه است. روش بهینه کردن طرح ۲۰۰ هرتز در بخش بعدی توضیح داده می‌شود.

چگالی شار عمودی بر حسب اندازه کمان برای نمونه نهائی در شکل (۴-۱۵) به نمایش در آمده است.



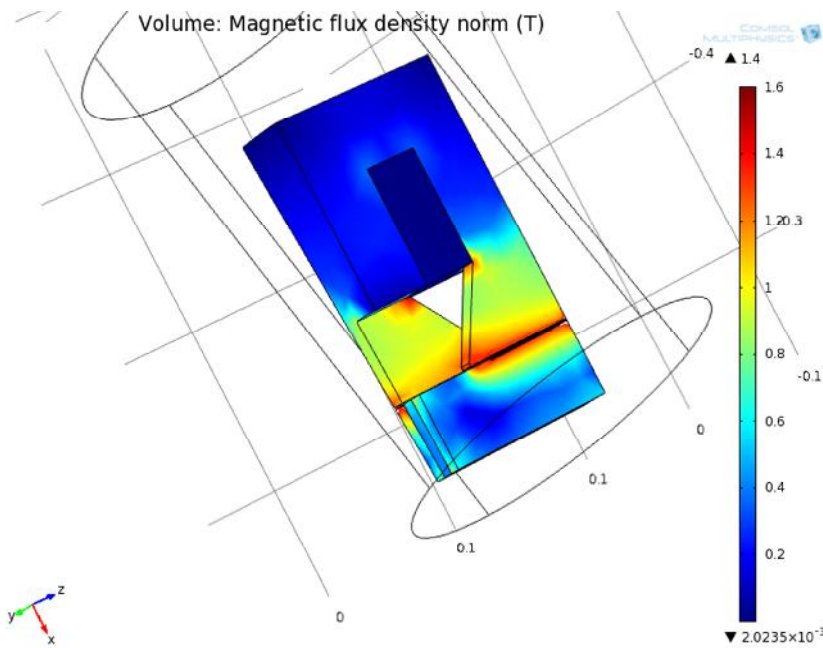
شکل (۴-۱۵): مؤلفه عمودی چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوائی در حالت بدون جریان بر حسب اندازه



## قوس کمان

مشاهده می‌شود که مولفه عمودی چگالی شار زیر هر قطب یک شکل موج کاملاً دوزنقه‌ای دارد.

همچنین شکل (۴-۱۶) طیف رنگی توزیع چگالی شار را نمایش می‌دهد.



شکل (۴-۱۶): طیف رنگی توزیع چگالی شار

## ۴-۵- بهینه کردن طرح نهائی

برای بهینه سازی هر طرح باید یک تابع هدف تعریف شود. در طراحی ماشین‌های TFPM دلیل اینکه روابط حاکم بر طراحی صرفاً روابط ریاضی محض نیست، انتخاب تابع هدف کار بسیار پیچیده‌ای است. به همین منظور برای بهینه کردن طرح از روش سعی و خطا استفاده می‌شود. در ادامه اثر دو پارامتر مهم بر طراحی بررسی می‌شود:

### ۴-۵-۱- اثر $K_s$

با کاهش این پارامتر طول شیار سیم‌پیچی کاهش پیدا می‌کند. با کاهش طول شیار، بازوهای استاتور به یکدیگر نزدیک می‌شوند و در نتیجه راکتانس سنکرون افزایش پیدا می‌کند. این امر باعث

کاهش توان خروجی می‌شود. از طرفی این امر باعث افزایش سطح مقطع عبور شار است که این موضوع منجر به افزایش مقدار نیروی ضد محرکه می‌شود، البته لازم به ذکر است که نشتی بین بازوهای استاتور باعث کاهش شار پیوندی می‌شود. به همین منظور به روش سعی و خطا مقدار بهینه این پارامتر انتخاب می‌شود. برای مشاهده تاثیر این پارامتر بایستی سایر ابعاد ماشین ثابت نگه داشته شود. ثابت نگه داشتن ابعاد منوط به تغییر بارگذاری الکتریکی می‌باشد. جدول (۴-۱۳) اثر این پارامتر را نمایش می‌دهد.

جدول (۴-۱۳): تاثیر  $K_s$  بر شار پیوندی و اندوکتانس

$K_s$	شار پیوندی هر دور سیم پیچی (mweber)	اندوکتانس هر دور سیم پیچی ( $\mu H$ )	تعداد دور
۰/۱۶	۱/۲۳۴	۱/۱۳۴	۲
۰/۳	۱/۴۶۶	۰/۵۵۵۵	۳
۰/۴	۱/۰۹۸	۰/۵۳۹۰	۴
۰/۵	۰/۹۸۹	۰/۵۰۴۵	۵

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش این پارامتر تعداد دور نیز افزایش می‌یابد.

#### ۴-۵-۲- اثر $K_L$

با کاهش این پارامتر حجم کلی ماشین کاهش پیدا می‌کند. این امر از لحاظ کاهش در حجم مواد مصرفی جنبه مطلوبی به شمار می‌رود، ولی به دلیل نزدیک شدن بازوها به یکدیگر و کاهش سطح مقطع عبور شار جنبه نامطلوب به حساب می‌آید. رابطه دقیقی برای مقدار بهینه این پارامتر برای این ماشین‌ها ذکر نشده است: ولی با توجه به روش سعی و خطای انجام شده در فرکانس‌های مختلف، به

می‌رسد که بتوان رابطه ماشین‌های استوانه‌ای معمولی را با ضرب یک ضریب ثابت در آن، که همان تعداد فازها می‌باشد، را برای این نوع ماشین‌ها به کار برد. رابطه پیشنهادی به صورت زیر می‌باشد:

$$K_L = \frac{\pi}{2} p^{\frac{2}{3}} \quad (۶-۴)$$

## فصل پنجم

یک نمونه عملی از ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم

## ۵-۱- مشخصات ماشین طراحی و ساخته شده

در این قسمت یک نمونه ماشین شار متقاطع که در آزمایشگاه در اندازه کوچک ساخته شده است، ارائه می‌گردد. ضمناً لازم به ذکر است که این نمونه عملی در اداره ثبت مالکیت صنعتی به عنوان ثبت اختراع به ثبت رسیده است (ضمیمه).

مشخصات نامی ماشین به صورت زیر است:

۱. توان خروجی نامی موتور  $P_R = ۱۵ \text{ [Wat]}$

۲. تعداد فازها  $m = ۱$

۳. سرعت نامی موتور  $n_s = ۷۵۰ \text{ [RPM]}$

۴. ولتاژ موثر  $V = ۳۷ \text{ [V]}$

۵. تعداد قطب‌ها  $۲p = ۲۴$

طریقه ساخت هر قسمت از این نمونه آزمایشگاهی در ادامه توضیح داده شده است.

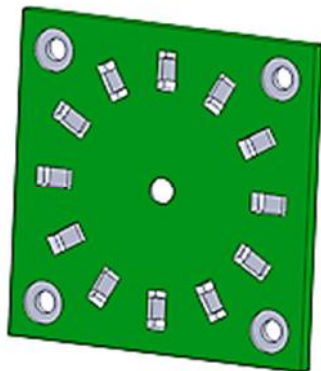
## ۵-۱-۱- استاتور

استاتور از دو قسمت بدنه و هسته‌های U شکل ساخته شده است. بدنه‌های استاتور (همان‌طور که در شکل‌های (۵-۱) و (۵-۲) نشان داده شده است) به طور شبیه‌سازی شده و در شکل (۵-۱۱) (به صورت عملی) از دو ورقه از جنس فیبر استخوانی نخ دار به ضخامت ۸ میلی‌متر و ابعاد  $150 \times 150$  میلی‌متر مربع می‌باشند که در دو طرف روتور قرار می‌گیرند.

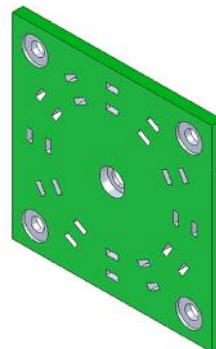
هسته‌های U شکل از جنس فریت می‌باشند (شکل (۵-۳)). این هسته‌ها دارای مزایای بسیاری از جمله ضریب نفوذپذیری مغناطیسی بالا، سبک بودن، نویز کم و همچنین عملکرد بهتر در فرکانس‌های بالا نسبت به هسته‌های مورق می‌باشند. از معایب این هسته‌ها نیز می‌توان به شکننده و غیر قابل انعطاف بودن آن‌ها اشاره کرد. برای قرار گرفتن هسته‌های U شکل روی بدنه‌ها، سوراخ‌هایی توسط

دستگاه CNC با سرمته ایجاد شده است. در هر کدام از بدنه‌های استاتور ۱۲ عدد هسته‌ی U شکل قرار می‌گیرد. هر کدام از هسته‌ها به نحوی در هر بدنه‌ی استاتور قرار می‌گیرد، که قسمت انتهایی U شکل هم‌سطح با یک طرف بدنه باشد و در سطح دیگر بدنه استاتور، دو پایه‌ی هسته‌ی U شکل بیرون آورده شود (شکل (۴-۵)).

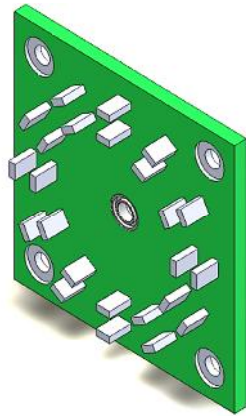
برای ثابت نگه‌داشتن هسته‌های U شکل در بدنه‌های استاتور، بعد از جا زدن آن‌ها از چسب استفاده می‌شود. ضمناً استاتور این ماشین به همراه سیم پیچی، بلبرینگ، پیچ‌ها و هسته‌های فریت در شکل (۵-۱۱) به نمایش در آمده است.



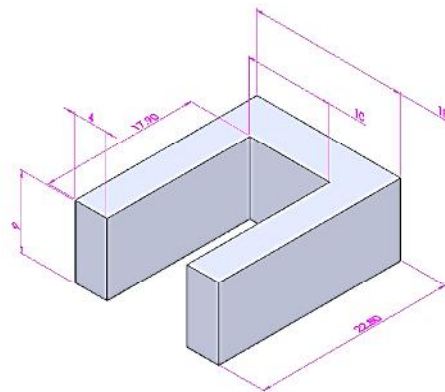
شکل (۵-۲): نمای شبیه سازی شده استاتور بدون هسته‌ها از طرف دیگر



شکل (۵-۱): نمای شبیه سازی شده استاتور بدون هسته‌ها



شکل (۴-۵) : نمای شبیه‌سازی استاتور همراه با هسته‌ها



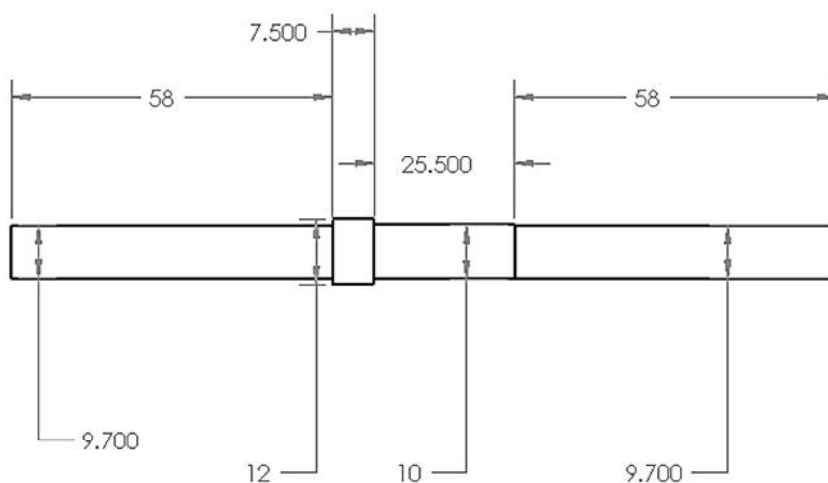
شکل (۳-۵) : هسته U شکل

### ۵-۱-۲-سیم پیچی

سیم پیچی این ماشین شامل دو کلاف دایره‌ای شکل است که از سیم‌های مسی با سطح مقطع ۰/۵ میلی‌متر مربع با تعداد دور ۱۷۸ دور و با شعاع متوسط ۵۵۰ میلی‌متر می‌باشد (شکل (۵-۱۱)). این کلاف‌ها در بین پایه‌های هسته‌های U شکل قرار می‌گیرند. در مجموع از این دو کلاف ۴ رشته سیم بیرون آورده می‌شود، که با توجه به جهت شار ایجاد شده توسط سیم پیچی‌ها که باید در هر نقطه از هسته‌های U شکل هم‌جهت باشند سربندی می‌گردند و در نهایت دو رشته سیم به منبع تغذیه متصل می‌شود.

### ۵-۱-۳- شفت (محور)

شفت این موتور از جنس آهن به طول ۱۵۰ میلی‌متر بوده که به صورت پله پله ساخته شده تا تمامی اجزای موتور (استاتور و روتور و بلبرینگ‌ها) در فواصل مناسبی قرار گیرند. سطح مقطع شفت با تلورانس ۰.۱ میلی‌متر براده برداری شده است. نقشه شفت روتور در شکل (۵-۵) به نمایش در آمده است.

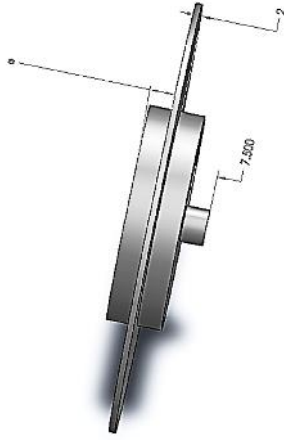


شکل (۵-۵) : نقشه شفت روتور به همراه ابعاد

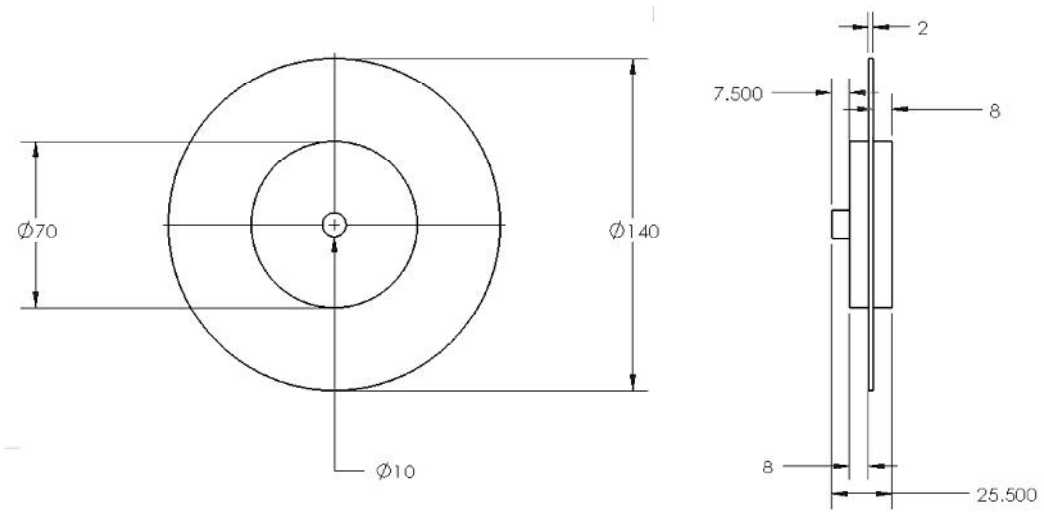
## ۵-۱-۴- روتور

روتور در این ماشین به صورت دیسکی و از جنس فیبر استخوانی نخ دار می‌باشد. برای اینکه فواصل بین روتور و استاتور به طور دقیق رعایت شود پله‌هایی روی روتور تعبیه شده است (شکل (۵-۶) و (۵-۷)). بزرگ‌ترین لایه‌ی دیسکی روتور، دایره‌ای به قطر ۱۴۰ میلی‌متر و ضخامت ۲ میلی‌متر می‌باشد. این لایه مانند بدنه استاتور با دستگاه CNC سوراخ کاری شده تا آهنرباهای دائم در این صفحه قرار گیرند و سپس توسط لایه‌ای از چسب پوشانده شده تا در جای خود ثابت نگه داشته شوند. شکل (۵-۸) محل سوراخ‌های ایجاد شده را همراه با ابعاد آن نشان می‌دهد. در مجموع ۴۸ عدد آهنربا به صورت دو ردیف ۲۴ تایی بر روی این صفحه قرار گرفته‌اند. نحوه‌ی قرار گرفتن آهنرباها به این صورت می‌باشد که پایه‌های هسته‌های U شکل به طور دقیق و با فاصله هوایی ۱ میلی‌متر در مقابل این آهنرباها قرار گیرند. همچنین قطب‌های آهنربا به طور یکی در میان N و S می‌باشند.

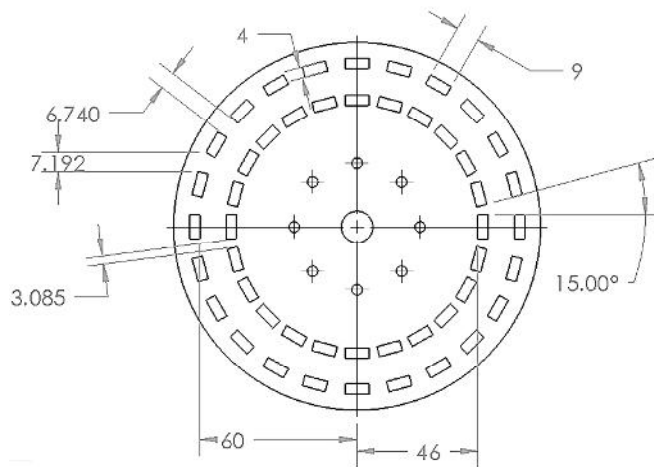




شکل (۵-۶) : شمای کلی دیسک روتور



شکل (۵-۷) : نمای جلو و جانبی دیسک روتور به همراه ابعاد



شکل (۵-۸) : نقشه سوراخ کاری دیسک روتور به همراه ابعاد آن

### ۵-۱-۵- آهنرباهای دائم

آهنرباهای دائم به کار رفته از جنس سرامیکی با چگالی شار ۱۳۵۰۰ گوس می‌باشد. این آهنرباها پس از برش توسط وایرکات به قطعات مستطیلی  $9.2 \times 3.8$  میلی‌متر مربع به ضخامت ۲ میلی‌متر تبدیل شده‌اند. لازم به ذکر است که آهنرباهای نام‌برده شده در راستای محور شار ایجاد می‌کنند.

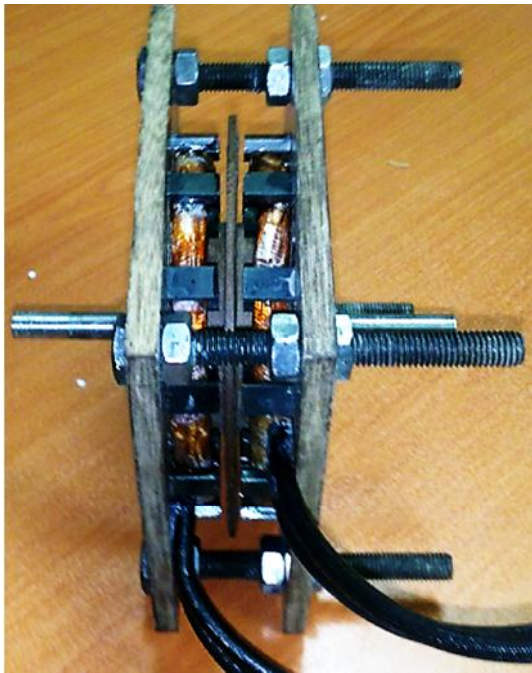
### ۵-۱-۶- بلبرینگ

در مرکز بدنه‌های استاتور سوراخ‌هایی برای جاگذاری بلبرینگ توسط دستگاه CNC تعبیه شده است. لازم به ذکر است که بلبرینگ‌های این ماشین دارای قابلیت گردش حداکثر با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه می‌باشند.

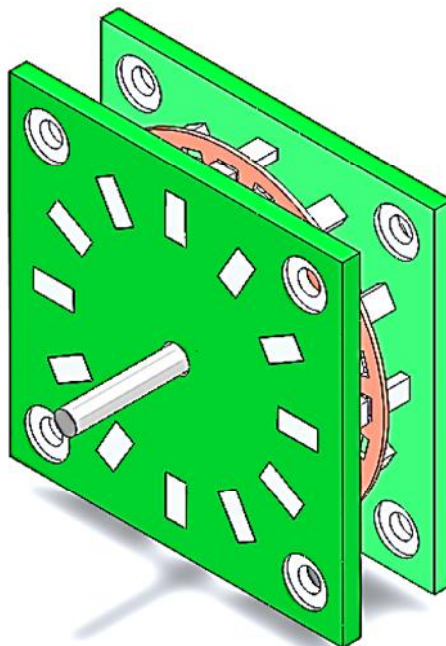
### ۵-۱-۷- اسمبل کردن ماشین

روتور و دو بدنه استاتور بر روی شفت قرار گرفته و دو بدنه استاتور توسط چهار پیچ با سطح مقطع ۱۰ میلی‌متر مربع به یکدیگر پیچ و مهره می‌شوند تا ماشین آماده بهره برداری قرار گیرد. تصویر ماشین

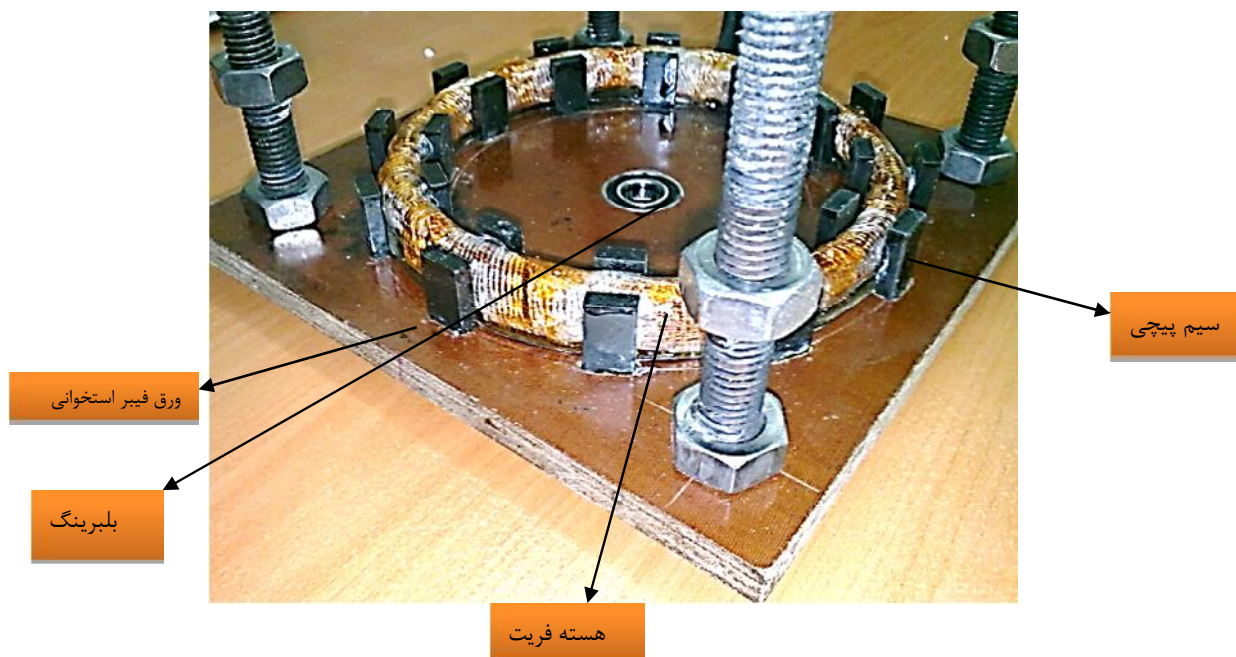
مونتاژ شده در شکل (۹-۵) (به صورت شبیه‌سازی شده) و در شکل (۱۰-۵) (به صورت عملی) نشان داده شده است.



شکل (۱۰-۵): نمای کلی ماشین به صورت عملی



شکل (۹-۵): شمای کلی ماشین به صورت شبیه سازی شده



شکل (۱۱-۵): یکی از بدنه‌های استاتور به همراه هسته‌های U شکل و سیم‌پیچی

## ۵-۲- تست‌های انجام شده روی ماشین

### ۵-۲-۱- در حالت ژنراتوری

برای انجام تست‌های ژنراتوری باید این ماشین با یک محرک خارجی چرخانده شود. بدین منظور از یک موتور dc برای محرک این ماشین استفاده می‌شود. با توجه به فرکانس این ماشین و تعداد قطب‌های آن طبق رابطه زیر باید این ماشین با سرعت  $[Rpm] 750$  چرخانده شود، تا فرکانس مطلوب که ۱۵۰ هرتز می‌باشد، در خروجی ایجاد گردد.

$$n_s = 120 \frac{f}{p} = 120 \frac{150}{24} = 750 \text{ rpm}$$

(۱-۵)

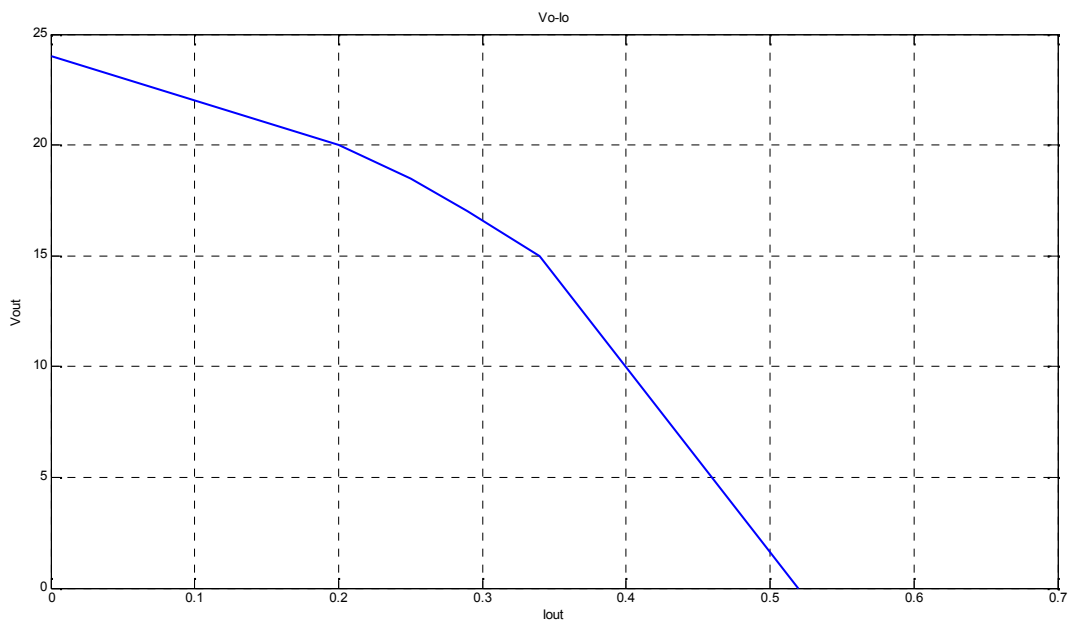
با اعمال یک بار مقاومتی در رنج‌های مختلف و اندازه‌گیری ولتاژ و جریان خروجی، جدول (۱-۵) کامل می‌گردد. ستون دوم از سمت چپ مربوط به بی‌باری ژنراتور و آخرین ستون سمت راست مربوط به حالت اتصال کوتاه می‌باشد.

جدول (۱-۵) : مقادیر ولتاژ و جریان برای بارهای مقاومتی مختلف

$I_{out}$	۰	۰/۲	۰/۲۵	۰/۲۹	۰/۳۴	۰/۵۲
$V_{out}$	۲۴	۲۰	۱۸/۵	۱۷	۱۵/۱	۰
$P_{out}$	۰	۴	۴/۶۲۵	۴/۹۳	۵/۱	-
$P_{in}$	-	۴/۴۵	۵/۳۳	۵/۸۸	۶/۴۱	-
$\eta$	-	۰/۸۹	۰/۸۶	۰/۸۳	۰/۷۹	-

### ۵-۲-۱-۱- مشخصه ولتاژ - جریان ماشین در حالت مولدی

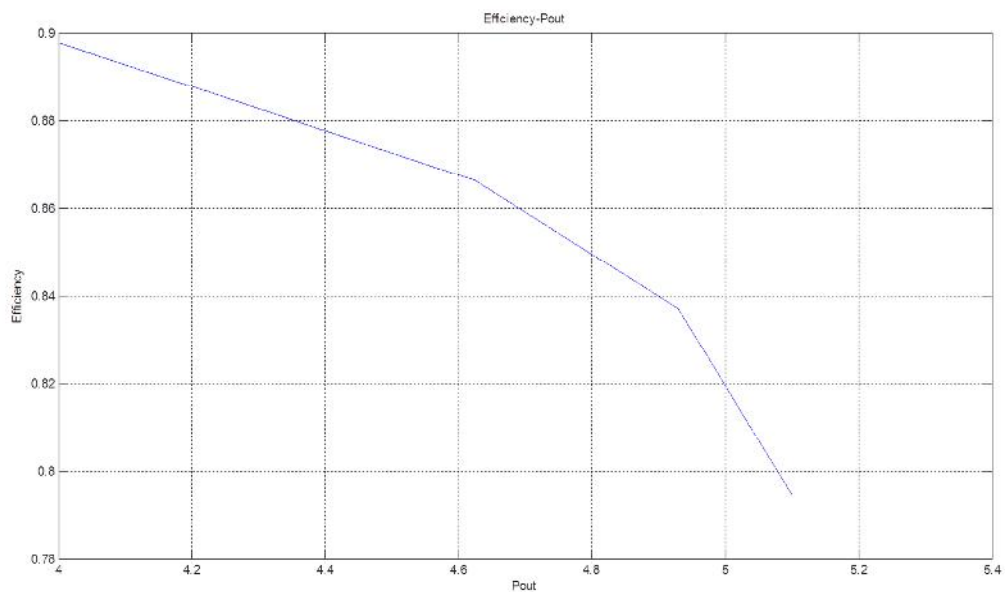
با استفاده از نتایج آزمایش بدست آمده در بخش قبل که در جدول (۱-۵) درج شده است، منحنی مشخصه ولتاژ - جریان ماشین در حالت مولدی به صورت شکل (۱۲-۵) به دست می‌آید. چنانچه از عکس‌العمل آرمیچر صرف‌نظر گردد، انتظار می‌رود که منحنی ولتاژ بر حسب جریان باید یک شیب خطی داشته باشد. ولی همان‌طور که در شکل (۱۲-۵) مشاهده می‌شود این منحنی خطی نیست و دلیل آن نیز عکس‌العمل آرمیچر است.



شکل (۵-۱۲): منحنی ولتاژ خروجی بر حسب جریان خروجی در بار مقاومتی

## ۵-۲-۱-۲- مشخصه راندمان-توان ماشین در حالت مولدی

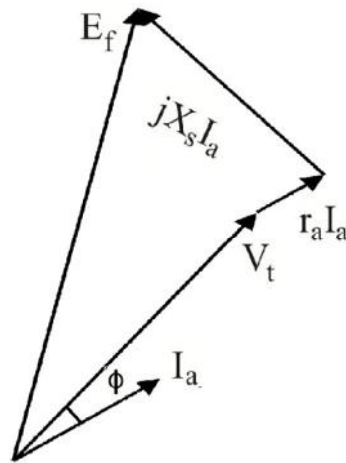
در شکل (۵-۱۳) مشخصه راندمان - توان در حالت مولدی مشاهده می‌شود.



شکل (۵-۱۳): مشخصه راندمان-توان در حالت مولدی

انتظاری که از منحنی راندمان توان می رود این است که دارای یک نقطه ماکزیمم باشد ولی چون در این قسمت از مدل مداری ساده شده استفاده شده است این نمودار دارای ماکزیمم نمی باشد (تلفات آهن مدل نشده است).

دیagram برداری ماشین سنکرون در حالت مولدی پس فاز، به صورت شکل (۵-۱۴) می باشد:



شکل (۵-۱۴): Diagram برداری مولدی پس فاز

مطابق شکل (۵-۱۴) می توان نتیجه گرفت:

$$E_f^2 = (V_t \cos(\phi) + r_a I_a)^2 + (X_s I_a + V_t \sin(\phi))^2 \quad (۲-۵)$$

بنابراین مقدار راکتانس سنکرون از رابطه زیر به دست می آید

$$X_s = \left[ (E_f^2 - (V_t \cos(\phi) + r_a I_a)^2)^{0.5} - V_t \sin(\phi) \right] / I_a \quad (۳-۵)$$

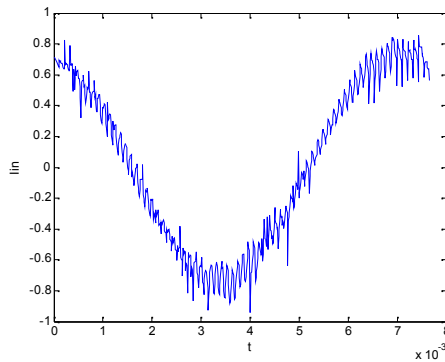
از نتایج جدول (۵-۱) و توضیحات فوق راکتانس سنکرون در حالت مولدی به صورت جدول (۵-۲) به دست می آید.

جدول (۲-۵) : راکتانس سنکرون ماشین (مولدی)

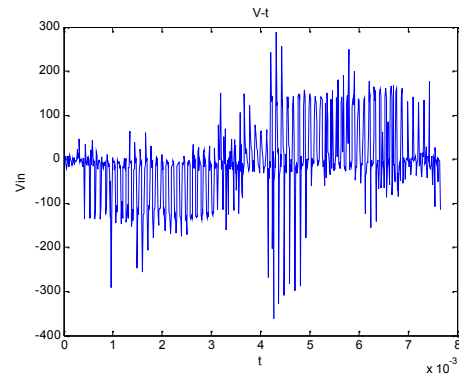
مراحل آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶
$X_s$	-	۴۴/۶	۴۳/۸۵	۴۴/۱۱	۴۳/۵۹	۴۴/۷۲
$R_a$	۱۱/۴	۱۱/۴	۱۱/۴	۱۱/۴	۱۱/۴	۱۱/۴

### ۲-۲-۵ - در حالت موتوری

در این حالت سیم پیچ استاتور به منظور توانایی کنترل فرکانس و ولتاژ به یک اینورتر سری شده با یک اتو ترانسفورماتور متصل می شود. حال به منظور به دست آوردن مشخصه های حالت موتوری باید به روتور ماشین بار اعمال گردد. شکل موج های ولتاژ و جریان مربوط به یک سیکل از ولتاژ و جریان در یک مرحله از آزمایش در شکل های (۱۵-۵) و (۱۶-۵) به نمایش درآمده است.



شکل (۱۶-۵) : شکل موج جریان ورودی موتور در یک مرحله آزمایش



شکل (۱۵-۵) : شکل موج ولتاژ ورودی موتور در یک مرحله آزمایش



نتایج به دست آمده از آزمایش موتوری در جدول (۳-۵) به نمایش درآمده است.

جدول (۳-۵) : نتایج حاصل از آزمایش در حالت موتوری

مراحل بارگذاری	۱	۲	۳	۴	۵	۶
$V_{in}$	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷	۳۷
$I_{in}$	۰/۳۳	۰/۴	۰/۴۴	۰/۵	۰/۵۵	۰/۶۲
$\cos\phi$	۰/۲۵	۰/۶۳	۰/۶۹	۰/۸۱	۰/۸۶	۰/۸۷
$P_{in}$	۳/۱۲	۹/۳۷	۱۱/۲۵	۱۵	۱۷/۵	۲۰
$P_o$	۱/۸۸	۷/۵۵	۹/۰۴	۱۲/۱۵	۱۴/۰۵	۱۵/۶۱
$\eta$ (%)	۶۰/۲۷	۸۰/۵۴	۸۰/۳۸	۸۱/۰	۸۰/۲۹	۷۸/۰۹

برای به دست آوردن توان خروجی در هر مرحله از آزمایش باید مجموع تلفات آهنی، اصطکاک و تلفات اهمی سیم‌پیچی استاتور را از توان ورودی به موتور کم نمود. پس می‌توان نوشت:

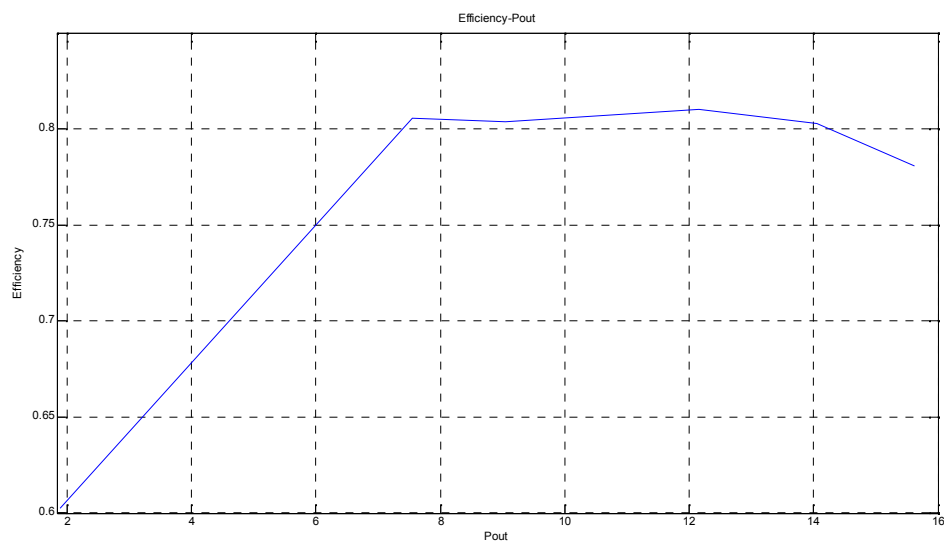
$$P_{out} = P_{in} - (P_{Fe} + P_{fr} + P_{cu}) \quad (۴-۵)$$

از آن جایی که در طی مراحل آزمایش ولتاژ و سرعت ثابت است، مجموع تلفات آهنی و اصطکاک تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند ولی تلفات مسی با تغییر جریان در حال تغییر است. در هر مرحله آزمایش با افزودن بار روی موتور با توجه به اینکه سرعت ثابت است گشتاور افزایش می‌یابد و به تبع آن مطابق رابطه  $P_{out} = T \cdot \omega$  توان خروجی نیز افزایش می‌یابد که مطابق رابطه ۴-۵ این امر مستلزم

کاهش  $P_{cu} = RI^2$  است و چون مقاومت سیم‌پیچ‌ها ثابت است لذا باید جریان ورودی کاهش یابد که منجر به افزایش ضریب توان می‌شود.

### ۵-۲-۲-۱- مشخصه راندمان-توان ماشین در حالت موتوری

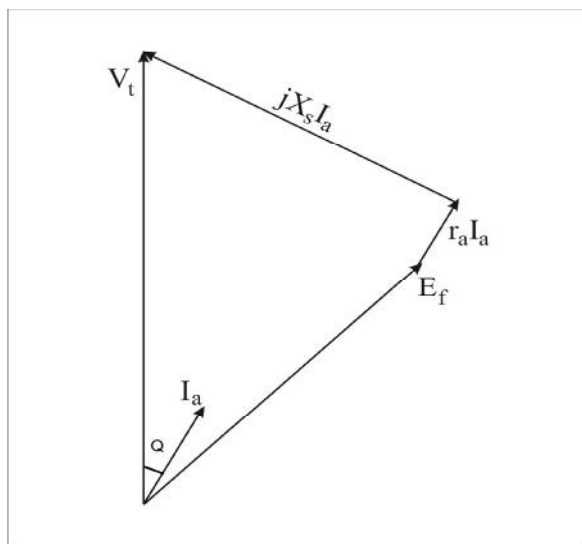
در شکل (۵-۱۷) مشخصه راندمان-توان در حالت موتوری مشاهده می‌شود.



شکل (۵-۱۷) : مشخصه راندمان - توان در حالت موتوری

### ۵-۲-۲-۲- راکتاس سنکرون ماشین در حالت موتوری

دیاگرام برداری ماشین سنکرون در حالت موتوری پس فاز، به صورت شکل (۵-۱۸) می‌باشد



شکل (۱۸-۵) : دیاگرام برداری موتور پس فاز

مطابق شکل (۱۸-۵) می توان نتیجه گیری کرد که:

$$E_f^2 = (V_t \cos(\varphi) - r_a I_a)^2 + (X_s I_a - V_t \sin(\varphi))^2 \quad (۵-۵)$$

بنابراین:

$$X_s = \left[ (E_f^2 - (V_t \cos(\varphi) - r_a I_a)^2) + V_t \sin(\varphi) \right] / I_a \quad (۶-۵)$$

از رابطه فوق و نتایج حاصل از آزمایش موتوری که در جدول (۳-۵) مشاهده می شود، راکتانس سنکرون ماشین را بدست آورده و در جدول (۴-۵) درج شده است.

جدول (۴-۵) : راکتانس سنکرون ماشین

مراحل آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵
$X_s$	۴۴/۶۹	۴۵/۸۳	۴۴/۸۲	۴۳/۳۸	۴۵/۰۹
$R_a$	۱۱/۴	۱۱/۴	۱۱/۴	۱۱/۴	۱۱/۴

## فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

## ۶-۱- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پروژه یک الگوریتم طراحی برای ماشین شار متقاطع قطب چنگالی ارائه گردید و نتایج آن با روش اجزا محدود مقایسه شد. از این مقایسه چنان بر می آید که الگوریتم دارای دقت بالایی برای طراحی می باشد.

## ۶-۲- پیشنهادات

با توجه به گستردگی طراحی و بهره برداری از این ماشین برای آینده گان زمینه های پژوهشی زیر پیشنهاد می گردد:

- ۱- طراحی درایو و بررسی عملکرد موتوری با این درایو
- ۲- بررسی گشتاور کوچینگ<sup>۱</sup> در این ماشین ها و روش های عملی کاهش آن
- ۳- بررسی ارتعاشات و نویز
- ۴- بررسی روش های مختلف تخمین تلفات و انتخاب مناسب ترین روش برای این ماشین ها
- ۵- بررسی حالت های گذرا و محاسبه پارامترهای مدار معادل ماشین
- ۶- طراحی سیستم های خنک سازی مناسب برای این ماشین ها با توجه به شرایط محیطی
- ۷- اثرات پدیده مغناطیس زدائی<sup>۲</sup> بر عملکرد ماشین و روش های جلوگیری از آن

---

<sup>۱</sup>-Cogging

<sup>۲</sup>-Demagnetization



سازمان ثبت اسناد و املاک کشور  
کوهی نامه ثبت اختراع



۰۲۰۵۲۷ الف/۸۹



مشخصات مالک: احمد دارابی - شیراک پوروطن - حسین آذرین فر آدرس: سمنان / شاهرود / خ تهران / بلوار دانشگاه صنعتی شاهرود / دانشکده برق و رباتیک	
مشخصات مخترع: احمد دارابی - شیراک پوروطن - حسین آذرین فر	
عنوان اختراع: ماشین سنکرون دیسکی شار متقاطع مغناطیسی دائم تکفاز.	
طبقه بندی بین المللی:	
حق تقدم:	
شماره ثبت اختراع:	
شماره ثبت اختراع اصلی:	
شماره ثبت اختراع: ۱۳۹۰/۰۶۳۲۲-۷۱۲۶۸	شماره ثبت اختراع اصلی: ۱۳۹۰/۰۴/۲۹-۳۹۰۰۴۰۸۹۲
مدت حمایت: ۲۰ سال از تاریخ ۱۴۱۰/۰۴/۲۹ تا ۱۳۹۰/۰۴/۲۹	
اداره کل مالکیت معنوی رئیس اداره ثبت اختراعات	مهرداد الیاسی تاریخ: ۱۳۹۰/۰۷/۰۵ امضاء:

اداره کل مالکیت صنعتی  
اداره اختراعات  
سازمان ثبت اسناد و املاک کشور

تمام کپی های این سند، بجز کپی های رسمی، فاقد اعتبار است.  
در صورت تردید، با کپی های ثبت اختراع، مراتب خبری شرح در کپی های رسمی باشد.

## مراجع

- [١] Dehlinger, N.; Dubois, M.R,” A New Design Method for the Clawpole Transverse Flux Machine Application to the Machine No-Load Flux optimization. Part I: Accurate Magnetic Model with Error Compensation “.Electrical Machines (ICEM), ٢٠١٠ XIX International Conference.
- [٢] [http://www.google.com/url?sa=t&source=web&cd=٢&ved=.CBoQFjAB&url=http://www.edriveonline.com/images/Presentations/Berkeley\\_TFM/٢٥٢\\_Intro.pdf&ei=MlOTeeRIoOTswbqvaSSDQ&usq=AFQjCNEXjRsTqE٦BAp٤EK٣U٩uixuuSciw](http://www.google.com/url?sa=t&source=web&cd=٢&ved=.CBoQFjAB&url=http://www.edriveonline.com/images/Presentations/Berkeley_TFM/٢٥٢_Intro.pdf&ei=MlOTeeRIoOTswbqvaSSDQ&usq=AFQjCNEXjRsTqE٦BAp٤EK٣U٩uixuuSciw).
- [٣] AJ Mitcham, Rolls-Royce IRD Ltd, Newcastle upon Tyne .(١٩٩٧).“Transverse Flux Motors for Electric Propulsion of Ships”
- [٤] Maxime Roger Joseph DUBOIS.,(٢٠٠٤), PhD. Thesis,”Optimized Permanent Magnet Generator Topologies for Direct-Drive Wind Turbines”, Technische Universiteit Delft.
- [٥] Christopher Paul Maddison.,(١٩٩٩),PhD. thesis,“Transverse Flux Machines For High Torque Applications”, Department of Electrical and Electronic Engineering University of Newcastle.
- [٦] Tae-yun Lint, Do-Hyurt Kaiig, Jong-Moo Kim , Dong-Hee Kin., (٢٠٠٢), “A Study on control of drive for Vibrator Using PM-type Transverse Flux Linear Motor” PCC-Osaka.
- [٧] Genevieve Patterson, Takafumi Koseki, Yasuaki Aoyama, Kentaro Sako.,(٢٠١٠), “Simple Modeling and Prototype Experiments for a New High-Thrust, Low-Speed Permanent Magnet Disk Motor”IEEE.
- [٨] J. Luo, “Axial Flux Circumferential Current Permanent Magnet Electric Machine”, PhD Thesis, Wisconsin Madison University, ١٩٩٩.
- [٩] S. Huang, J. Luo, F. Leonardi and T.A. Lipo, “A General Approach to Sizing and Power Density Equations for Comparison of Electrical Machines,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. ٣٤, No. ١, pp. ٩٢-٩٧, ١٩٩٨.

- [١٠] S. Ahmadi, A. Nje, A. Mansouri, H. Trabelsi and A. Elantabli, “Optimization the Overlap between Teeth of a Claw Pole Transverse Flux Permanent Magnet Machine” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. ٤٠, No. ٣, ٢٠٠٤.
- [١١] S. Huang, J. Luo and T.A. Lipo, “Evaluation of the Transverse Flux Circumferential Current Machine by the Use of Sizing Equations”.
- [١٢] M. Siatkowski and B. Orlik “Influence of Saturation Effects in a Transverse Flux Machine”.
- [١٣] G.Q. Bao , J.H.Shil and J.Z. Jiang, “Efficiency Optimization of Transverse Flux Permanent Magnet Machine Using Genetic Algorithm”.
- [١٤] YouGuang GUO, Jian Guo ZHU and Haiwei LU, “Design and Analysis of a Permanent Magnet ClawPole/Transverse Flux Motor with SMC Core”, Center for Electrical Machines and Power Electronics, Faculty of Engineering University of Technology, Sydney.
- [١٥] Comsol Help.



## **Abstract:**

The permanent magnet transverse flux machine idea in 1986 was presented by Weh and May. These machines are known with high power density and torque. The applications of this type of machine to the high torque applications such as low speed wind turbine generator and the electric motor vehicles. Power density and high torque with high poles and high electrical loading are obtained. Undesirable aspects of the machine are high flux leakage and low power factor due to the number of high poles. Unfortunately, the paths of three-dimensional flux lines, the complex paths of flux leakage and core saturation significantly adds to the difficulty of designing these machines. The advantages of this machine from an ordinary machine has differentiated phases can be independent of each other, simpler forms of machines winding and ... mentioned. Design and modeling of these machines seem to be something important. In this paper, beginning on the principles and structures of this type of machines are discussed, Then by selected of claw pole structure, the initial design algorithm is presented. After discussing the initial algorithm, two examples of machines designed for the authorities to ensure the accuracy of the algorithm, are re-design and the results are compared with data given in references. After this stage, the machines were simulated using finite element method and its results are compared with the algorithm. Finally the original machine is designed with the algorithm presented and machine dimensions and parameters are optimized using try and error. At the end of a small sample of transverse flux permanent magnet machines U-shaped core made in the laboratory are discussed.

**Keywords:** Claw Poles Transverse Flux Machine, Finite Element Method, Initial Design Algorithm



Shahrood University of Technology  
Faculty of Electrical and Robotic Engineering  
M.Sc. Thesis

# **Modeling, Initial Design Algorithm and Optimization of a Permanent Magnet Transverse Flux Motor (PMTFM)**

**Hosein Azarinfar**

Supervisor:

**Dr. Ahmad Darabi**