

سورة

A highly stylized, black and white calligraphic flourish. It features a large, sweeping curve on the left side that transitions into a series of smaller, intricate loops and curves on the right. The design is reminiscent of traditional Islamic calligraphy, possibly representing a decorative element or a specific character from a script like Thuluth or Nasta'liq. The overall shape is elongated and vertical.



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد الکترونیک قدرت و ماشین های الکتریکی

# طراحی، مدل سازی و ساخت موتور القایی شارمحوری دو روتوره با یاتاقان های مستقل

نگارنده: پوریا سهیلی

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

شهریور ۱۳۹۷

شماره: ۱۵۹۱، آ.ت.ب  
تاریخ: ۹۷، ۲، ۱۲

باسمه تعالی



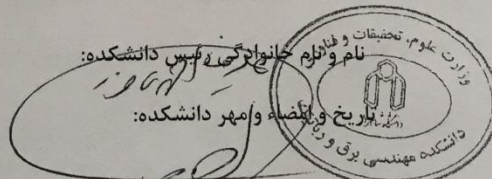
مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صور تجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای پوریا سهیلی با شماره دانشجویی ۹۳۰۹۸۴۴ رشته مهندسی برق گرایش قدرت تحت عنوان: طراحی، مدلسازی و ساخت موتور القایی شار محوری دو روتوره با یاتاقانهای مستقل که در تاریخ ۱۳۹۷/۰۶/۱۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۱۸،۴۵،۶۵ درجه پنج خجسته)  مردود   
نوع تحقیق: نظری  عملی

| امضاء | مرتبه علمی | نام و نام خانوادگی | عضو هیأت داوران           |
|-------|------------|--------------------|---------------------------|
|       | استاد      | دکتر احمد راین     | ۱- استاد راهنمای اول      |
| —     | —          | —                  | ۲- استاد راهنمای دوم      |
| —     | —          | —                  | ۳- استاد مشاور            |
|       | استاد      | دکتر امیر راین     | ۴- نماینده تحصیلات تکمیلی |
|       | استاد      | دکتر امیر راین     | ۵- استاد ممتحن اول        |
|       | استاد      | دکتر امیر راین     | ۶- استاد ممتحن دوم        |



تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به پدر و مادرم کہ  
تنہا یادآور خوبی ہا ہستند

## تقدیر و تشکر:

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از تلاش و زحمات بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزنده استاد گرانقدر و دل‌سوزم، جناب آقای دکتر احمد دارابی، در تمام مراحل انجام این پایان‌نامه صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم. همچنین از دوست و همشاگردیم جناب مهندس امین نوبهاری که همواره مرا در اتمام این پروژه همراهی کردند تقدیر و تشکر می‌نمایم.

## تعهدنامه

اینجانب ..... پوریا سهیلی ..... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ..... برق / قدرت..... دانشکده ..... برق و رباتیک ..... دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه .... طراحی و مدل سازی و ساخت موتور القایی شار محوری دو روتوره با یاتاقان های مستقل .... تحت راهنمایی...دکتر احمد دارابی...متعهد می شوم.

- ♦ تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- ♦ در استفاده از نتایج پژوهش 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 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 میگردد.
- ♦ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- ♦ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

### تاریخ و امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- ♦ کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.
- این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- ♦ استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

در این پایان‌نامه طراحی مناسب یک موتور القایی شار محوری دو روتوره با یاتاقان‌های مستقل مورد مطالعه قرار گرفته‌است. نخست با استفاده از معادلات ابعاد و محاسبه مدل مدار معادل الکتریکی، یک الگوریتم اولیه برای طراحی این موتور ارائه شده است و پس از آن مدل‌های المان محدود دوبعدی و سه‌بعدی موتور توسعه داده شده‌اند. مدل‌سازی‌ها و نتایج نمونه ساخته‌شده اعتبار و دقت بالای الگوریتم طراحی را نشان می‌دهند. همچنین قابلیت‌ها و دقت مدل‌سازی این موتور با استفاده از روش المان محدود دوبعدی، با توجه به مزایای آن در حجم و زمان محاسبات در مقایسه با مدل‌سازی سه‌بعدی مورد ارزیابی قرار گرفته است. ساخت این موتور نیز نتایج شبیه‌سازی‌ها را تصدیق می‌کند. موتور دو روتوره با محورهای مجزا ویژگی‌های منحصر به فردی را فراهم می‌کند، از جمله این ویژگی که روتور پر سرعت تر گشتاور بیشتر و روتور کم سرعت تر گشتاور کمتری دارد. در این پایان‌نامه یک کاربرد خاص برای این موتور ارائه شده است که می‌توان از آن در خودروهای الکتریکی استفاده کرد و دیفرانسیل خودرو را به‌طور کلی حذف نمود.

واژه‌های کلیدی: موتور القایی شارمحوری دو روتوره با یاتاقان‌های مستقل، دیفرانسیل مغناطیسی، خودروی الکتریکی

## فهرست مطالب

|    |   |
|----|---|
| ک  | فهرست شکل‌ها.....                               |
| ن  | فهرست جدول‌ها.....                              |
| ۱  | فصل ۱: مقدمه .....                              |
| ۲  | ۱-۱- ماشین‌های شارمحوری .....                   |
| ۴  | ۱-۲- موتور القایی شارمحوری .....                |
| ۵  | ۱-۳- مرور پژوهش‌های مرتبط با AFMs .....         |
| ۱۰ | ۱-۴- معرفی پایان‌نامه .....                     |
| ۱۳ | فصل ۲: الگوریتم طراحی DIR-AFIM .....            |
| ۱۴ | ۲-۱- مقدمه .....                                |
| ۱۴ | ۲-۲- معرفی جزئیات ساختار مورد نظر .....         |
| ۱۹ | ۲-۳- معادلات طراحی .....                        |
| ۱۹ | ۲-۳-۱- بارگذاری ویژه الکتریکی و مغناطیسی .....  |
| ۲۱ | ۲-۳-۲- پارامترهای اختیاری طراحی .....           |
| ۲۲ | ۲-۳-۳- تعیین ابعاد اصلی موتور .....             |
| ۲۵ | ۲-۳-۴- سایر ابعاد هسته‌ها و هادیهای موتور ..... |
| ۳۰ | ۲-۴- مدار معادل الکتریکی .....                  |
| ۳۶ | ۲-۵- تلفات موتور .....                          |
| ۳۷ | ۲-۶- الگوریتم طراحی .....                       |



|    |  |
|----|--|
| ۳۹ | ۷-۲- موتور طراحی شده   |
| ۴۰ | ۸-۲- موتور ساخته شده   |
| ۴۳ | فصل ۳: مدل سازی DIR-AFIM در FEM و MATLAB                           |
| ۴۴ | ۱-۳- مقدمه   |
| ۴۴ | ۲-۳- معادلات حالت دائمی  |
| ۴۷ | ۳-۳- مدل سازی در محیط FEM  |
| ۵۰ | ۴-۳- ارزیابی الگوریتم طراحی DIR-AFIM با استفاده از روش المان محدود |
| ۵۱ | ۱-۴-۳- نتایج 2D-FEM  |
| ۵۳ | ۲-۴-۳- نتایج 3D-FEM  |
| ۵۷ | فصل ۴: نتایج شبیه سازی ها  |
| ۵۸ | ۱-۴- مقدمه   |
| ۵۸ | ۲-۴- مقایسه مدار معادل و FEM                                       |
| ۶۱ | ۳-۴- شبیه سازی در تمامی بارها                                      |
| ۶۱ | ۱-۳-۴- گشتاور  |
| ۶۴ | ۲-۳-۴- جریان و ولتاژ   |
| ۶۶ | ۴-۴- نتایج تست عملی  |
| ۶۸ | ۵-۴- اتصال N-S و N-N   |
| ۷۰ | ۶-۴- مقایسه راندمان DIR-AFIM با DR-AFIM                            |

|    |                                       |
|----|---------------------------------------|
| ۷۱ | ..... ۷-۴- مد ژنراتوری                |
| ۷۳ | ..... ۸-۴- کاربردهای DIR-AFIM         |
| ۷۳ | ..... ۱-۸-۴- دیفرانسیل مغناطیسی       |
| ۷۴ | ..... ۲-۸-۴- گشتاور بالا در سرعت بالا |
| ۷۷ | ..... فصل ۵: جمع‌بندی و پیشنهادات     |
| ۷۸ | ..... ۱-۵- جمع بندی                   |
| ۷۸ | ..... ۲-۵- پیشنهادات                  |
| ۸۰ | ..... مراجع                           |

## فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱): ابعاد اصلی شارمحوری (راست) و شارشعاعی (چپ) ..... ۴
- شکل (۲-۱): ساختارهای متداول AFMS ..... ۴
- شکل (۱-۲): استاتور بدون هسته (الف)، استاتور با هسته فرومغناطیس (ب) ..... ۱۶
- شکل (۲-۲): سیم‌پیچی معمولی (الف) و سیم‌پیچی حلقوی (ب) ..... ۱۷
- شکل (۳-۲): استاتور (الف)، روتور (ب)، موتور مونتاژ شده (ج) ..... ۱۸
- شکل (۴-۲): (الف) نمایش ابعاد اصلی موتور در استاتور و (ب) نمایش ابعاد اصلی موتور در روتور ..... ۲۷
- شکل (۵-۲): مدار معادل الکتریکی بر فاز یک موتور القایی ..... ۳۱
- شکل (۶-۲): مدار معادل مغناطیسی موتور القایی دو روتوره در بی باری ..... ۳۱
- شکل (۷-۲): مدار معادل الکتریکی بر فاز موتور القایی دو روتوره با یاتاقان‌های مستقل ..... ۳۲
- شکل (۸-۲): ضریب نیرو محرکه یوغ ..... ۳۴
- شکل (۱۰-۲): توزیع تلفات موتورهای القایی با توان کمتر از ۱۰۰ کیلووات ..... ۳۷
- شکل (۱۱-۲): الگوریتم طراحی موتور القایی شارمحوری دو روتوره ..... ۳۸
- شکل (۱۲-۲): هسته رول شده از ورق سیلیس‌دار برای استاتور ..... ۴۱
- شکل (۱۳-۲): استاتور به همراه شیار و سیم‌بندی ..... ۴۱

- شکل (۲-۱۴): روتور به همراه قفس ..... ۴۲
- شکل (۲-۱۵): موتور مونتاژ شده ..... ۴۲
- شکل (۳-۱): مدار معادل الکتریکی DIR-AFIM ..... ۴۶
- شکل (۳-۲): نمودار گشتاور سرعت سمت ۱ بر حسب سرعت سمت ۲ ..... ۴۷
- شکل (۳-۳): نحوه اعمال معادلات خارجی مدار الکتریکی و دینامیک روتور در روش المان محدود ..... ۴۹
- شکل (۳-۴): نحوه ایجاد مدل دو بعدی ..... ۵۲
- شکل (۳-۵): توزیع چگالی شار در هسته مغناطیسی ..... ۵۲
- شکل (۳-۶): مقایسه گشتاور خروجی موتور در حالت مدار معادل و شبیه سازی دو بعدی ..... ۵۳
- شکل (۳-۷): مقایسه جریان نامی موتور در حالت مدار معادل و شبیه سازی دو بعدی ..... ۵۳
- شکل (۳-۸): توزیع میدان مغناطیسی در هسته استاتور ..... ۵۴
- شکل (۳-۹): توزیع میدان مغناطیسی در هسته روتور ..... ۵۵
- شکل (۳-۱۰): مقایسه گشتاور خروجی موتور در حالت مدار معادل و شبیه سازی سه بعدی ..... ۵۵
- شکل (۳-۱۱): مقایسه جریان موتور در حالت مدار معادل و شبیه سازی سه بعدی ..... ۵۶
- شکل (۴-۱): گشتاور خروجی موتور برای مثال ۱ ..... ۵۹
- شکل (۴-۲): گشتاورهای خروجی موتور برای مثال ۲ ..... ۶۰

- شکل (۳-۴): گشتاور خروجی محور ۱ برای مثال ۱ و ۲ ..... ۶۰
- شکل (۴-۴): گشتاور خروجی محور ۲ برای مثال ۱ و ۲ ..... ۶۱
- شکل (۵-۴): نمودار گشتاور سرعت در حالت‌های سرعت برابر و نابرابر ..... ۶۳
- شکل (۶-۴): گشتاور ۱ و ۲ بر حسب کاهش سرعت ۱ و افزایش سرعت ۲ به‌طور همزمان ..... ۶۴
- شکل (۷-۴): مدار معادل DIR-AFIM ..... ۶۵
- شکل (۸-۴): جریان ۱ و ۲ بر حسب کاهش سرعت ۱ و افزایش سرعت ۲ به‌طور همزمان ..... ۶۵
- شکل (۹-۴): ولتاژ ۱ و ۲ بر حسب کاهش سرعت ۱ و افزایش سرعت ۲ به‌طور همزمان ..... ۶۶
- شکل (۹-۴): نحوه کوپل ست LAYBOND با DIR-AFIM ..... ۶۷
- شکل (۱۰-۴): نتایج تست عملی و FEM بر روی نمودارهای بدست آمده از مدار معادل ..... ۶۷
- شکل (۱۲-۴): توزیع شار N-N در FEM ..... ۶۹
- شکل (۱۴-۴): مقایسه راندمان DIR-AFIM با DR-AFIM ..... ۷۱
- شکل (۱۵-۴): توان خروجی در حالت ژنراتوری ..... ۷۲
- شکل (۱۶-۴): توان خروجی DIR-AFIM در حالت ژنراتوری ..... ۷۲
- شکل (۱۷-۴): دیفرانسیل مکانیکی و نحوه کار آن ..... ۷۴
- شکل (۱۸-۴): مقایسه نمودار گشتاور سرعت DIR-AFIM با موتور القایی معمولی ..... ۷۵

## فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۲): پارامترهای اختیاری طراحی ..... ۲۲
- جدول (۲-۲): افت نیرومحرکه مغناطیسی در بخش‌های مختلف مغناطیسی ..... ۳۴
- جدول (۳-۲): مقادیر نامی موتور طراحی شده ..... ۳۹
- جدول (۴-۲): نتایج موتور طراحی شده ..... ۳۹
- جدول (۵-۲): پارامترهای مدار معادل طراحی شده ..... ۴۰
- جدول (۵-۲): پارامترهای مدار معادل الکتریکی طراحی شده ..... ۴۰
- جدول (۱-۴): دو مثال برای مقایسه مدار معادل و FEM ..... ۵۸

# فصل ۱: مقدمه

## ۱-۱- ماشین‌های شارمحوری

به‌طور کلی ماشین‌های الکتریکی بر اساس جهت میدان در فاصله هوایی به دو دسته شارشعاعی (RFMs<sup>۱</sup>) و شارمحوری (AFMs<sup>۲</sup>) تقسیم می‌شوند. همان‌گونه که از نام‌گذاری آن‌ها برمی‌آید، جهت شار در فاصله هوایی RFMs در راستای شعاع و جهت شار در فاصله هوایی AFMs در راستای محور ماشین است. بنابراین راستای قرارگیری هادی‌های الکتریکی برای تولید میدان مغناطیسی و برای القای نیرو- محرکه الکتریکی، در RFMs و AFMs به ترتیب محوری و شعاعی می‌باشد [۱]. در برخی از مراجع از این دو نوع ساختار با عناوین ماشین‌های استوانه‌ای و تخت به ترتیب برای RFMs و AFMs نام برده می‌شود. اگرچه اولین ماشین ساخته شده در سال ۱۸۲۱ توسط فارادی، از نوع تخت بود، با اختراع اولین ماشین شارشعاعی در سال ۱۸۳۷ استفاده از RFMs به عنوان ساختار قابل اطمینان، تا به امروز متداول‌تر بوده است [۲]. شاید مهم‌ترین دلیل استفاده کمتر از AFMs دشواری ساخت هسته مغناطیسی آن‌ها در مقایسه با RFMs باشد. به‌علاوه نیروی محوری بین روتور و استاتور در این ماشین‌ها یکی دیگر از مشکلات قطعی این ساختار بوده که هزینه ساخت آن را افزایش می‌دهد. با این وجود با توسعه تکنولوژی ساخت ماشین‌های الکتریکی چالش‌های مرتبط با این ساختار کمتر شده است. در عوض مزایای ویژه ماشین‌های تخت سبب شده تا این ماشین‌ها به عنوان جایگزین ماشین‌های معمول استوانه‌ای در کاربردهای مختلفی مطرح شوند. لذا در سال‌های اخیر فعالیت‌های پژوهشی متنوعی در خصوص این ساختار انجام شده است. این فعالیت‌ها بکارگیری این ساختار در تکنولوژی‌های مختلفی اعم از انواع ماشین‌های جریان مستقیم و جریان متناوب را شامل می‌شود. همان‌گونه که اشاره شد مزایای مختلف موجود در این ساختار انگیزه اصلی گرایش مهندسی به استفاده از آن شده است، که در زیر برخی از مهم‌ترین مزایا ذکر شده است.

---

<sup>1</sup> Radial Flux Machines

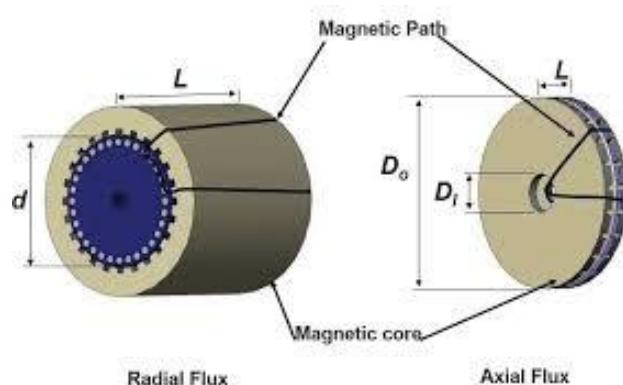
<sup>2</sup> Axial Flux Machines



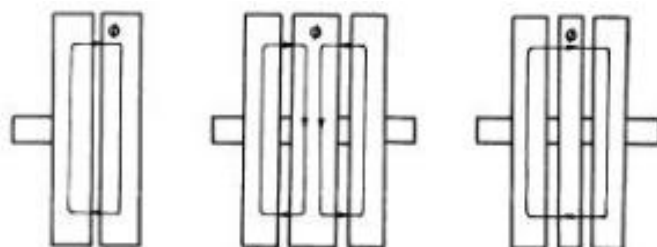
- بهره برداری مناسب ماشین از مواد فعال و در نتیجه چگالی توان بالا. این موضوع با توجه به امکان ساخت آسان ماشین (در مقایسه با RFMs) به صورت دوطرفه (با دوافصله هوایی) یک مزیت ویژه برای این ساختار به حساب می‌آید.
- اینرسی مکانیکی کم و در نتیجه ثابت زمانی کوچک، که این ساختار را برای کاربردهای سروو و کاربردهای سرعت بالا مناسب می‌سازد.
- نسبت قطر به طول محوری کم (در مقایسه با RFMs)، که در نتیجه بکارگیری این ماشین‌ها را برای کاربردهایی که طول کم یک مزیت محسوب می‌شود، مناسب می‌کند.
- امکان ساخت ماشین به صورت چند طبقه، که سبب می‌شود تا در کاربردهایی که توان بار متغییر است بتوان با در مدار قرار دادن تعداد طبقات مقتضی، در نزدیک‌ترین نقطه به توان نامی طبقات و در نتیجه بیشترین راندمان را از ماشین بهره‌برداری کرد.
- تنوع ساختاری بیشتر در مقایسه با RFMs.

معمولاً در زمان طراحی ماشین‌های استوانه‌ای، طول محوری ماشین ( $l$ ) و قطر آن در محل فاصله هوایی (d) یا اصطلاحاً قطر فاصله هوایی آن به عنوان ابعاد اصلی موتور در نظر گرفته می‌شوند. این درحالیست که در AFMs قطر داخلی ( $D_i$ ) و قطر خارجی ( $D_o$ ) هسته، ابعاد اصلی موتور را تشکیل می‌دهند. شکل (۱-۱) RFM و AFM را به همراه ابعاد اصلی آنها نمایش می‌دهد. تحلیل عملکرد AFMs درست مشابه RFMs می‌باشد و تنها تفاوت در مسیر شار مغناطیسی و شکل ظاهری آن‌هاست. انتخاب ساختار دوطرفه، خود گزینه‌های متنوع‌تری را در اختیار طراح قرار می‌دهد. به‌طور مثال استاتور و روتور، هر کدام می‌توانند در وسط قرار بگیرند، بخش میانی ماشین (استاتور یا روتور) می‌تواند با یا بدون یوغ باشد که در نتیجه آن مسیر شار مغناطیسی دو فاصله هوایی می‌تواند موازی و یا سری باشد. امکان ساخت ماشین با شیار و یا

بدون شیار و امکان حذف هسته مغناطیسی نیز از مواردی است که به تفصیل در پژوهش‌های مختلف مطرح شده‌اند. اگرچه اجرای بسیاری از این موارد در RFMs نیز غیرممکن نیست، ولی سهولت اجرای آنها در ماشین‌های تخت بیشتر است. شکل (۲-۱) شمای ساده‌ای از متداول‌ترین ساختارهای AFMs را نمایش می‌دهد.



شکل (۱-۱): ابعاد اصلی شارمحوری (راست) و شارشعاعی (چپ)



شکل (۲-۱): ساختارهای متداول AFMs

## ۲-۱- موتور القایی شارمحوری

بخش اعظمی از انرژی در شبکه‌های الکتریکی توسط موتورهای الکتریکی به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود. در این میان موتورهای القایی چه در کاربردهای صنعتی و چه غیر صنعتی (خانگی، کشاورزی و ...) بیش از سایر انواع موتورهای الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۰]. مصرف انرژی الکتریکی توسط موتورهای القایی امروزه چیزی بین ۵۵-۶۵٪ مصارف صنعتی را در بر می‌گیرد [۱۱]. قانون القا توسط

فارادی در حدود سال ۱۸۳۱ کشف شد و ماکسول قوانین الکترومغناطیس را در سال ۱۸۶۰ فرمول بندی کرد و بدین ترتیب زمینه اختراع موتور القایی فراهم شد. اولین موتورهای القایی توسط گالیلئو فراریس در سال ۱۸۸۵ و نیکلا تسلا در سال ۱۸۸۶ ساخته شدند. اگرچه موتورهای القایی در سال‌های بعد تکامل یافته و عملکرد بسیار بهتری را ارائه دادند، ولی اصول عملکرد آنها با اولین نمونه‌هایشان یکسان است [۱۰]. این اصول شامل یک سیم‌پیچی چند فاز در استاتور جهت تولید میدان دوار است که در سیم‌پیچی‌های روتور ولتاژی را القا می‌کند. برهمکنش میان میدان استاتور و میدان حاصل از جریان‌های جاری در سیم‌پیچی‌های اتصال کوتاه شده روتور سبب تولید گشتاور می‌شود. از آنجاکه این موتور برای تولید گشتاور نیاز به لغزش از سرعت سنکرون دارد، به آن موتور آسنکرون نیز می‌گویند. اگرچه ساخت روتور موتورهای القایی به دو صورت روتور سیم‌پیچی و روتور قفسی ممکن است، نوع روتور قفسی در کاربردهای صنعتی متداول‌تر می‌باشد [۱۲]. از جمله مزایای این موتور در مقایسه با سایر انواع ماشین‌های الکتریکی می‌توان به قابلیت اطمینان بالا با توجه به ساختمان محکم و مقاوم و نبود سیستم جاروبک و حلقه‌های لغزان، قابلیت کنترل سرعت مناسب (با در نظر گرفتن توسعه تکنولوژی و ادوات الکترونیک قدرت)، ساخت آسان و ارزان، چگالی گشتاور خوب، بازده قابل قبول و ... اشاره کرد [۱۰] و [۱۱]. چنین مزایایی موجب بکارگیری این موتورها در گستره وسیعی از کاربردها شامل فن، کمپرسور، لوازم خانگی، صنایع غذایی، صنایع فولاد، صنایع پتروشیمی، صنایع هوایی، سیستم‌های بالابر، خودروهای برقی و ... شده است [۱۰]، [۱۳]، [۱۴]، [۱۵].

### ۳-۱- مرور پژوهش‌های مرتبط با AFMs

مرجع [۶] مطالعات انجام‌شده مرتبط با AFMs را در پنج گروه دسته‌بندی کرده است:

- طراحی و ساخت انواع ساختار AFMs

- استفاده از تکنولوژی مواد جدید در ساخت AFMs
- استفاده از AFMs در کاربردهای مختلف
- بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد موتور

در این بخش برخی از مهم‌ترین پژوهش‌های گزارش شده در این حوزه‌ها را مرور کرده و مورد نقد و بررسی قرار می‌دهیم:

مراجع [۱]، [۲]، [۳]، [۱۶]، [۱۷] معادلاتی جهت طراحی AFIMs<sup>۱</sup> ارائه کرده‌اند. در [۱] معادلات مرتبط با محاسبه ابعاد مختلف ماشین‌های شارمحوری ارائه شده است. بر همین اساس چندین ماشین شارمحوری با تکنولوژی‌های مختلف شامل موتور شار محوری جریان مستقیم، موتور سنکرون و موتور القایی تکفاز ساخته شده‌اند. در این مقاله بیش از اینکه به اعتبارسنجی معادلات طراحی بر اساس نتایج حاصل از ساخت پرداخته شود، ویژگی‌ها، مزایا و کاربردهای موتورهای شار محوری مورد بحث قرار گرفته‌اند. از جمله کارهای مهمی که در این مقاله انجام شده، تعیین نسبت قطر خارجی به داخلی هسته ماشین‌های شار محوری برای بهینه‌سازی توابع هدف مختلف شامل، چگالی توان، اینرسی مکانیکی و تلفات اهمی است. زیرا این نسبت یکی از پارامترهای اختیاری طراحی است که تأثیر قابل توجهی در خروجی طراحی و عملکرد ماشین دارد.

مرجع [۱۷] معادلات و الگوریتم طراحی یک موتور القایی شارمحوری را ارائه کرده است. معادلات طراحی بر اساس ویژگی‌های ابعادی و هندسی موتور القایی به روشی مشابه آنچه برای موتورهای القایی معمول (شارشعاعی) مرسوم است، محاسبه شده‌اند. بر همین اساس هم، کمیتی به نام ثابت موتور القایی شار محوری از معادله توان خروجی موتور استخراج شده است. همچنین در این مقاله معادله‌ای برای محاسبه

---

<sup>1</sup> Axial Flux Induction Machines

نسبت توان به حجم موتور، به عنوان معیاری برای سنجش استفاده بهینه از مواد در طراحی، محاسبه شده است. در نتیجه به طور تقریبی نشان داده شده که این نسبت متناسب با تعداد فاصله هوایی های بکار رفته در موتور است.

مرجع [۱۶] یک نمونه معین موتور القایی شار محوری یکطرفه ۷ کیلووات را برای کاربرد خودرو الکتریکی درایو مستقیم، طراحی و بررسی کرده است. جزئیات معادلات مورد استفاده در طراحی ارائه نشده اند ولی نتایج طراحی با استفاده از مدل المان محدود دوبعدی ( $2D-FEM^1$ ) ارزیابی شده و با یک موتور مشابه از نوع شارشعاعی مقایسه شده است. در نهایت پاسخ های دینامیکی موتور در حالت تغذیه سینوسی و  $PWM^2$  با استفاده از شبیه سازی موتور در محیط نرم افزار سیمولینک بررسی شده اند. در پایان این مقاله نتایج ساخت یک موتور ۱ کیلووات برای ارزیابی صحت طراحی ارائه شده است.

مراجع [۲] و [۳] نیز به ترتیب به طراحی و ساخت AFIM سه فاز و تکفاز پرداخته اند. در [۲] یک AFIM سرعت بالا طراحی و ساخته شده است. در تمام مراحل طراحی از مدل المان محدود برای مدل سازی موتور استفاده شده است. موتور سرعت بالای طراحی شده در این پایان نامه شامل روتوری با هسته فولاد یکپارچه و قفس آلومینیومی می باشد. در طراحی روتور پارامترهای مختلفی مانند تعداد شیار روتور، طول فاصله هوایی و عمق شیارها و یوغ روتور با استفاده از آنالیز حساسیت طراحی شده اند. همچنین از پوشش نازک مسی بر روی سطح روتور برای کاهش تلفات جریان گردابی روتور، مشابه آنچه در موتورهای القایی شارشعاعی با هسته یکپارچه در روتور، مرسوم است، استفاده شده است.

نحوه کار در [۳] متفاوت است. در این مقاله یک AFIM تکفاز دو سرعت با هسته روتور موقر طراحی و ساخته شده است. در این مقاله از مدل مدار معادل موتور القایی برای تکمیل الگوریتم طراحی، استفاده

---

<sup>1</sup> Dimensions Finite Elements

<sup>2</sup> Pulse Width Modulation

شده است. تمام معادلات مربوط به محاسبه ابعاد موتور و محاسبه پارامترهای مدار معادل با جزئیات ذکر شده‌اند. پارامترهای مدار معادل این موتور، بر اساس معادلات مربوط به موتورهای القایی شارشعاعی، و با در نظر گرفتن تفاوت‌های ساختاری محاسبه شده‌اند. شبیه‌سازی المان محدود سه‌بعدی (3D-FEM<sup>1</sup>) نیز مؤید طراحی اولیه مبتنی بر مدار معادل است. لذا از الگوریتم تحلیلی ارائه شده برای طراحی بهینه موتور با استفاده از روش‌های هوشمند بهینه‌سازی (الگوریتم ژنتیک) استفاده شده است. در این موتور شیارهای روتور برای کاهش اثر هارمونیک‌های شیار به مقدار معینی مورب شده‌اند. در حالیکه در [۲] شیارهای روتور بدون مورب‌سازی ساخته شده‌اند. همچنین در این مقاله یک روش جدید برای پیاده‌سازی فاصله هوایی کوچک در موتور شار محوری پیشنهاد شده است.

مراجع فوق‌الذکر به نوعی بخشی از معتبرترین مراجع موجود تا این زمان، در رابطه با معادلات و الگوریتم طراحی موتورهای القایی تخت می‌باشند.

در بیشتر نمونه‌های AFIMS از فولاد برای ساخت هسته روتور و استاتور استفاده شده است. همان‌گونه که اشاره شد، در برخی کاربردها برای کاهش هزینه ساخت روتور و همچنین افزایش استقامت مکانیکی آن، هسته روتور از فولاد یکپارچه ساخته می‌شود. تکنولوژی‌های متفاوت ارائه‌شده برای مواد مورد استفاده در AFIMS شامل مواد مغناطیسی غیرهادی<sup>۲</sup> برای هسته و ابررساناها برای هادی‌های موتور می‌شود. مرجع [۱۸] طراحی AFIM با هسته ساخته‌شده از مواد مغناطیسی غیرهادی را مطرح کرده است. استفاده از کامپوزیت‌های پودری<sup>۳</sup> امکان ساخت آسان هسته را فراهم می‌کند. این موضوع به خصوص در ماشین‌های شار محوری، با توجه به دشواری ساخت هسته‌های مغناطیسی می‌تواند جذاب باشد. از آنجاکه استفاده از این مواد در ساخت هسته سبب حذف تلفات آهن می‌شود، بکارگیری آنها در کاربردهای فرکانس بالا،

---

<sup>1</sup> Dimensions Finite Elements

<sup>2</sup> Magneto Dielectrics

<sup>3</sup> Powder Composit

توجیه بیشتری پیدا می‌کند. اگرچه خاصیت مغناطیسی این هسته‌ها در مقایسه با هسته‌های معمولی کمتر است.

در [۱۹] و [۲۰] استفاده از تکنولوژی ابررسانا برای طراحی AFIMs پیشنهاد شده است. در [۲۰] یک AFIM مینیاتوری با استاتور بدون هسته شامل هادی‌های ابررسانای دمای بالا (<sup>1</sup>HTS) ساخته شده است. در این مقاله چند طرح متفاوت برای روتور مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این طرح‌ها شامل روتور با سیم‌پیچی آلومینیومی و روتور با سیم‌پیچی ابررسانا می‌باشد. نشان داده شده که در یک AFIM ابررسانا بهترین انتخاب تعداد شیار روتور، عددی نزدیک به تعداد قطب‌های موتور است.

مدل‌سازی و پیش‌بینی عملکرد AFIMs را می‌توان در دو دسته مدل‌سازی المان محدود [۵]، و مدل‌سازی تحلیلی ([۴] و [۲۱]) قرار داد. در [۲۲] یک مدل تحلیلی برای مدل‌سازی AFIM تکفاز ارائه شده و نتایج آن با مدل‌سازی المان محدود دوبعدی، سه‌بعدی و تست عملی مقایسه شده است. در [۵] مدل المان محدود سه‌بعدی یک AFIM روتور قفسی با هسته روتور یکپارچه توسعه داده شده است. در این مقاله نشان داده شده که آنالیز فرکانسی المان محدود<sup>۲</sup> این موتور برای لغزش‌های کم (کمتر از ۱۰٪) دقت قابل قبولی دارد (نتایج المان محدود با نتایج تست آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند).

مرجع [۴] نیز یک روش شبه سه‌بعدی برای مدل‌سازی عملکرد AFIM با هسته روتور یکپارچه ارائه کرده است. در این مدل‌سازی جریان‌های روتور دارای توزیع دوبعدی می‌باشند و از اثر اشباع مغناطیسی چشم‌پوشی شده است. این مدل قابلیت محاسبه عملکرد موتور یک‌طرفه و دوطرفه را برای تغذیه با منبع جریان و منبع ولتاژ دارد. مقایسه مدل با نتایج تست، نشان از دقت قابل قبول آن در سرعت‌های بالا

---

<sup>1</sup> High Temperature super Conductor

<sup>2</sup> Time harmonic FE

(لغزش‌های کم) دارد، با این وجود سرعت بالای محاسبات در مقایسه با مدل‌هایی مانند مدل المان محدود، مزیت اصلی این نوع روش‌های تحلیلی می‌باشد.

درحالی‌که بیشتر مدل‌سازی‌ها در مراجع مختلف مانند نمونه‌های فوق متوجه AFIM با هسته روتور یکپارچه می‌باشد، در [۲۲] به مدل‌سازی AFIM تکفاز با روتور قفسی و هسته مورق پرداخته است. مدل تحلیل ارائه شده، یک مدل دوبعدی می‌باشد که در آن اشباع و اثر هارمونیک‌ها در نظر گرفته شده است. مدل تحلیلی ارائه شده به صورت یک مدل لایه‌ای است که در مختصات کارتیزین مدل شده‌اند بنابراین حرکت موتور به صورت یک حرکت خطی فرض شده است. سپس معادلات ماکسول در هر لایه حل می‌شوند. همچنین در این مقاله مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی المان محدود موتور نیز محاسبه شده‌اند و با نتایج مدل تحلیلی مقایسه گشته‌اند. نشان داده شده است که مدل دوبعدی AFIM دقت قابل قبولی در محاسبه عملکرد موتور دارد.

## ۴-۱- معرفی پایان‌نامه

هدف اصلی در این پایان‌نامه ارائه یک مدل مداری برای موتور القایی شارمحوری دو روتوره با یاتاقان‌های مستقل است (DIR-AFIM<sup>۱</sup>). این موتور از لحاظ مداری درست شبیه به دو موتور القایی که هر کدام یک فاصله هوایی دارند و به صورت سری با هم به منبع ورودی وصل شده‌اند می‌باشد. در ابتدا معادلات طراحی این موتور، شامل تمام اطلاعات لازم برای محاسبه ابعاد و مقادیر بخش‌های مختلف مدار مغناطیسی و الکتریکی آن تعیین خواهند شد. سپس مدار معادل حالت دائمی موتور برای هر طرف به صورت جداگانه محاسبه می‌شود و در آخر دو مدار را باهم سری می‌شوند و مدار معادل نهایی برای ساختار مورد نظر بدست می‌آید. فصل دوم به این ترتیب انجام خواهد شد. در فصل سوم نحوه مدل‌سازی در محیط FEM

---

<sup>1</sup> Dual independent Rotor-Axial Flux Induction Machine



بیان خواهد شد و نشان داده می‌شود که چگونه از نرم افزار متلب برای ادامه تحلیل DIR-AFIM استفاده می‌گردد. در فصل چهارم نیز شبیه سازی‌های اصلی در بارهای مختلف و رسم منحنی مشخصه‌ها برای این موتور انجام می‌شود. در انتهای همین فصل یک کاربرد مخصوص و یک کاربرد کلی برای DIR-AFIM ارائه خواهد شد. در نهایت جمع‌بندی پایان‌نامه و پیشنهادات در فصل پنجم ارائه بیان می‌شوند.



## فصل ۲: الگوریتم طراحی DIR-AFIM

## ۲-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا ساختار موتور موردنظر از میان ساختارهای متنوع، انتخاب شده، جزئیات آن تعیین و ارائه خواهد شد. سپس معادلات طراحی آن، شامل طراحی هسته‌های استاتور و روتور، سیم‌پیچی و قفس محاسبه می‌شوند. پس از آن مدل مدار معادل حالت دائمی برای ارزیابی عملکرد موتور طراحی شده، معرفی می‌شود. با استفاده از معادلات طراحی و مدل مدار معادل، یک الگوریتم طراحی پیشنهاد می‌شود که بر اساس آن یک نمونه موتور طراحی خواهد شد. در نهایت موتور ساخته شده بر اساس طراحی‌های انجام داده‌شده نشان داده می‌شود. نتایج روش المان محدود که برای سنجش اعتبار و دقت معادلات و الگوریتم طراحی استفاده شده، در فصل چهارم ارائه خواهد شد.

## ۲-۲- معرفی جزئیات ساختار مورد نظر

همان‌گونه که در فصل قبل اشاره شد، یکی از چالش‌های مهم در ساخت موتورهای القایی شار محوری، اجرای فاصله هوایی کوچک در زمان مونتاژ موتور است. این مشکل ناشی از نیروی محوری میان روتور و استاتور است که مقدار آن با کاهش فاصله هوایی به شدت افزایش می‌یابد. در این شرایط استفاده از ساختار دوطرفه (یک استاتور در میان دو روتور و یا یک روتور در میان دو استاتور) می‌تواند این مشکل را حل کند. به‌علاوه این ساختار امکان دستیابی به مزایای دیگری را نیز بدست می‌دهد که از مهمترین آنها می‌توان به بهره‌برداری از موتوری با چگالی توان بیشتر اشاره کرد. لذا در این پایان‌نامه ساختار دوطرفه به‌عنوان ساختار مورد مطالعه انتخاب شده است. در این مرحله دو گزینه شامل موتور با یک استاتور و دو روتور، یا موتور با یک روتور و دو استاتور پیش رو قرار می‌گیرند. واقعیت این است که هر کدام از این دو گزینه نسبت به دیگری دارای مزایایی می‌باشند و تعیین این موضوع که کدام مورد گزینه مناسب‌تری است، بسته به کاربرد و شرایط بهره‌برداری می‌تواند پاسخ‌های متفاوتی داشته باشد. به‌طور مثال ساختار یک روتور و دو استاتور در کاربردهایی که نصب موتور به بدنه تجهیز با محدودیت روبرو است نسبت به

ساختار یک استاتور و دو روتور مناسب تر است. ولی اگر ارزان تر بودن و سبک تر بودن موتور اهمیت داشته باشد، مناسب تر است تا از ساختار دو روتوره استفاده شود. در این پایان نامه ساختار دو روتوره به عنوان گزینه نهایی در نظر گرفته شده است. در ادامه برخی جزئیات مربوط به استاتور و روتور معرفی خواهند شد.

## • استاتور

استاتور موتورهای شار محوری دوطرفه می توانند دارای هسته فرومغناطیس و یا بدون آن باشند [۶]. موتورهای بدون هسته نیاز به نیرو محرکه مغناطیس کننده بزرگ تری می باشند. این موضوع در موتورهای القایی سبب کاهش قابل توجه ضریب قدرت خواهد شد. بعلاوه ساخت موتورهای بدون هسته در توان های بالا به سبب استقامت مکانیکی کم استاتور و کلاف های سیم پیچی آن مناسب نمی باشد. شکل (۱-۲) استاتور بدون هسته و با هسته را نشان می دهد. استاتورهای با هسته فرومغناطیس می توانند دارای شیار و یا بدون شیار باشند [۶]. موتور القایی با استاتور بدون شیار نیز به دلیل فاصله هوایی بزرگ نیازمند جریان مغناطیس کننده بزرگی است که ضریب قدرت آن را کاهش داده و تلفات اهمی آن را افزایش می دهد. لذا بهتر است که استاتور موتور دارای هسته فرومغناطیس بوده و جایگذاری سیم پیچی درون شیارهای استاتور انجام شود. اگرچه ایجاد شیار در هسته استاتور موتورهای شار محوری کاری دشوار است، ولی این کار تأثیر زیادی در عملکرد بهتر موتور خواهد داشت.



(ب)



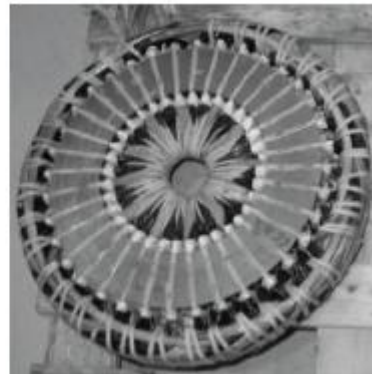
(الف)

شکل (۱-۲): استاتور بدون هسته (الف)، استاتور با هسته فرومغناطیس (ب)

سیم‌پیچی موتور نیز موضوع مهمی است که کیفیت آن بر عملکرد موتور تأثیر قابل توجهی دارد. در ماشین‌های شارمحوری سیم‌پیچی به دو صورت معمولی (سیم‌پیچی روی هم) و سیم‌پیچی حلقوی متداول است. سیم‌پیچی حلقوی بیشتر در ساختارهای دوطرفه با یک استاتور و دو روتور به کار می‌رود. در حقیقت تفاوت این دو نوع سیم‌پیچی مربوط به شکل اتصالات انتهایی و نحوه اتصال کلاف‌های یک فاز به یکدیگر است. در موتورهای شارمحوری دو روتوره سیم‌پیچی حلقوی سبب کاهش طول اتصالات انتهایی می‌شود و این یعنی مقاومت و پراکندگی مربوط به اتصالات انتهایی سیم‌پیچی استاتور کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر در این حالت نسبت طول مفید به کل طول کلاف افزایش می‌یابد. البته در سیم‌پیچی معمولی امکان اتصال سیم‌پیچی طرفین استاتور به صورت سری و موازی وجود دارد، درحالی‌که در سیم‌پیچی حلقوی، کلاف‌های دو طرف استاتور توسط یک اتصال پشت‌به‌پشت با یکدیگر سری شده‌اند. در شکل (۲-۲) سیم‌پیچی‌های معمولی و حلقوی نمایش داده شده‌اند.



(ب)



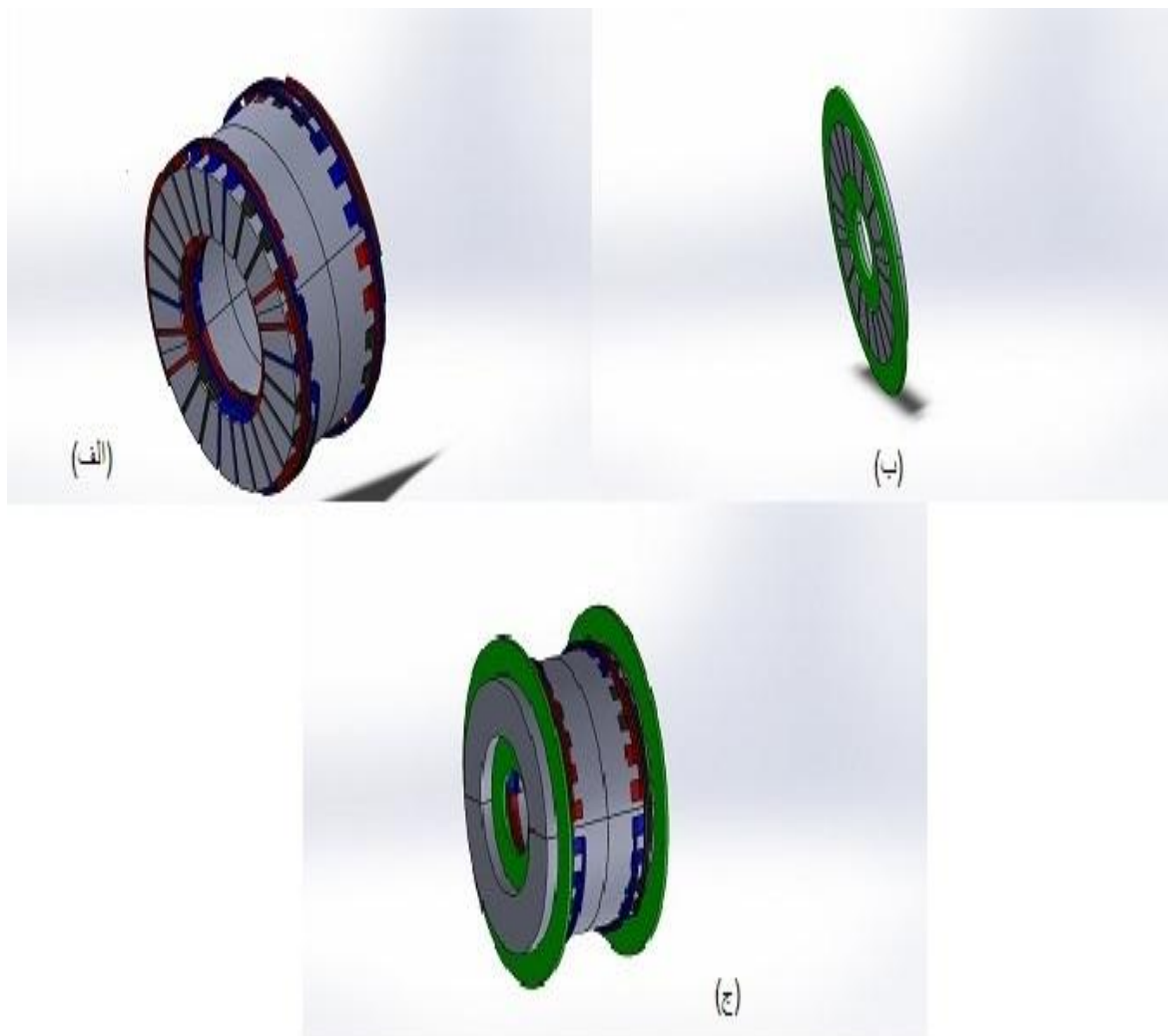
(الف)

شکل (۲-۲): سیم‌پیچی معمولی (الف) و سیم‌پیچی حلقوی (ب)

## • روتور

مطابق مطالب ارائه شده در فصل اول، ساختارهای متنوعی برای روتور موتور القایی شار محوری در مقالات ارائه شده است. هسته روتور می‌تواند از ورقه‌های فرومغناطیس و یا فولاد یکپارچه ساخته شود. در حالت اول برای جاری شدن جریان‌های القایی روتور لازم است تا مسیری مناسب از جنس مواد رسانا در روتور در نظر گرفته شود، زیرا هسته موق در مقابل جریان الکتریکی مقاومت بسیار بزرگی دارد. برای این منظور می‌توان از یک قفس آلومینیومی یا مسی استفاده کرد. برای نصب هادی‌های قفس مناسب است تا از شیارهای شعاعی در سطح روتور استفاده شود. ولی در ساختار روتور با هسته یکپارچه لزومی برای طراحی قفس در روتور نمی‌باشد، زیرا امکان جاری شدن جریان‌های القایی در هسته روتور وجود دارد. به عبارت دیگر در صورت حذف قفس از این روتور، محیط جریان الکتریکی و شار مغناطیسی مشترک خواهد بود. در این صورت مقاومت الکتریکی مدار روتور نسبت به روتور قفسی بسیار بزرگ‌تر بوده و در نتیجه سرعت نامی موتور کاهش می‌یابد. بعلاوه هارمونیک‌های میدان فاصله هوایی سبب تولید مقادیر قابل توجهی تلفات جریان‌های گردابی در هسته روتور می‌شوند. از طرف دیگر مزایایی که استفاده از موتور القایی شار محوری با هسته روتور یکپارچه بدست می‌دهد شامل گشتاور راه‌اندازی بیشتر، استحکام مکانیکی بالاتر و هزینه ساخت کمتر است. این ویژگی‌ها سبب می‌شود تا استفاده از موتور القایی شار محوری با هسته روتور

یکپارچه (با قفس یا بدون قفس) برای کاربردهای سرعت بالا مناسب باشد. در این کاربردها می توان تلفات هسته روتور را با کاهش هارمونیک های میدان فاصله هوایی از طریق افزایش طول فاصله هوایی و یا استفاده از یک ورقه نازک پوشش از جنس ماده رسانای غیر مغناطیسی یا ماده مغناطیسی با هدایت الکتریکی کم کاهش داد [۲]. در این پایان نامه ساختار روتور با هسته مورق و قفس آلومینیومی به عنوان گزینه ای مناسب برای کار در سرعت های قابل حصول توسط فرکانس تغذیه شبکه (بدون لزوم استفاده از اینورتر) انتخاب می شود. در شکل (۲-۳) بخش های مختلف ساختار مورد نظر نشان داده شده اند.



شکل (۲-۳): استاتور (الف)، روتور (ب)، موتور مونتاژ شده (ج)



## ۲-۳- معادلات طراحی

### ۲-۳-۱- بارگذاری ویژه الکتریکی و مغناطیسی

اگر  $N_{s1}$  را تعداد دور سری یک فاز موتور در یک فاصله هوایی آن در نظر بگیریم، آنگاه مؤلفه اصلی نیروی محرکه مغناطیسی حاصل از یک سیم‌پیچی متقارن  $m$  فاز در آن فاصله هوایی به صورت زیر خواهد بود:

$$F_1(\theta, t) = \frac{2m\sqrt{2}N_{s1}K_w I_{ph}}{\pi p} \cos(\theta - \omega_s t) \quad (1-2)$$

که در این رابطه  $K_w$  ضریب سیم‌پیچی،  $I_{ph}$  و  $P$  به ترتیب جریان هر فاز و تعداد قطب‌های موتور هستند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود میدان حاصل، یک میدان دوار (با توزیع هم‌زمان فضایی و زمانی) با فرکانس زاویه  $\omega_s$  است. اگر  $x$  را متغیر طول محیطی فاصله هوایی موتور فرض کنیم،  $F_1$  را می‌توان برحسب آن نوشت:

$$F_1(x, t) = \frac{2m\sqrt{2}N_{s1}K_w I_{ph}}{\pi p} \cos\left(\frac{\pi}{T_p}x - \omega_s t\right) \quad (2-2)$$

که  $T_p$  گام قطب موتور است. نکته قابل توجه این است که در موتورهای شارمحوری محیط موتور در فاصله هوایی تابع موقعیت شعاعی است. به همین دلیل لازم است تا تمام محاسبات در یک قطر معین موتور انجام شود. قطر میانی هندسی موتور،  $D_{ave}$  برای این منظور انتخاب می‌شود و تمام محاسبات از جمله  $T_p$  در این قطر محاسبه می‌شوند.

$$D_{avg} = \sqrt{D_i D_o} \quad (3-2)$$

$D_o$  و  $D_i$  به ترتیب قطر داخلی و خارجی هسته‌های موتور هستند که ابعاد اصلی آن را تشکیل می‌دهند. این ابعاد در بخش بعد محاسبه خواهند شد. مشتق  $F_1(x, t)$  نسبت به  $x$  مؤلفه اصلی چگالی جریان خطی استاتور یا روتور  $I_{ph}$  (بسته به اینکه جریان استاتور یا روتور باشد) را بدست خواهد داد.

$$A_1(x, t) = \frac{\partial F_1(x, t)}{\partial x} \quad (۴-۲)$$

به طریق مشابه، سایر مؤلفه‌های هارمونیک فضایی و زمانی چگالی جریان خطی، از جایگذاری هارمونیک-های متناظر نیرومحرکه مغناطیسی در (۴-۲) بدست خواهند آمد. دامنه مؤلفه اصلی چگالی جریان خطی برابر است با:

$$A_{1, \max} = \frac{2m \sqrt{2} N_{s1} K_w I_{ph}}{PT_p} \quad (۵-۲)$$

$A_{1, \max}$  یکی از پارامترهای بسیار مهم طراحی ماشین‌های الکتریکی است. در برخی از مراجع  $A_{1, \max}$  و در برخی دیگر مقدار مؤثر مؤلفه اصلی چگالی جریان خطی  $(A_{1, \max} / \sqrt{2})$  تحت عنوان بارگذاری ویژه الکتریکی موتور شناخته می‌شوند. واحد بارگذاری ویژه الکتریکی، آمپر بر متر است و افزایش آن به معنی فشرده‌تر شدن فضای جریان‌های جاری در موتور و در نتیجه کاهش حجم آن است. در این پایان‌نامه مقدار مؤثر  $A_1(x, t)$  به عنوان بارگذاری ویژه الکتریکی موتور تعیین شده است. بارگذاری ویژه الکتریکی یک فاصله هوایی موتور برابر مجموع بارگذاری ویژه الکتریکی استاتور و روتور در آن فاصله هوایی است. اگر  $I_{ph}$  را جریان یک فاز استاتور قرارداد کنیم، بارگذاری ویژه الکتریکی استاتور را در یک فاصله هوایی برای اختصار با  $A$  نشان داده و داریم:

$$A = \frac{2m N_{s1} K_w I_{ph}}{\pi D_{av}} \quad (۶-۲)$$

چگالی شار مغناطیسی حاصل از جریان استاتور و روتور در هر فاصله هوایی موتور توابع متناوب با توزیع فضایی و زمانی هستند. بنابراین می‌توان این دو تابع را به صورت زیر نشان داد:

$$B_s(\theta, t) = \Re\left\{ \sum_{v_1} \sum_{\mu_1} \sqrt{2} B_{v_1 \mu_1}^s e^{j(\mu_1 \omega_s t - v_1 \theta)} \right\} \quad (7-2)$$

$$B_r(\theta, t) = \Re\left\{ \sum_{v_2} \sum_{\mu_2} \sqrt{2} B_{v_2 \mu_2}^r e^{j(\mu_2 \omega_s t - v_2 \theta)} \right\} \quad (8-2)$$

$$B_{airgap}(\theta, t) = B_s(\theta, t) + B_r(\theta, t) \quad (9-2)$$

دامنه مؤلفه اصلی  $B_{airgap}(\theta, t)$  ( $v_1, v_2 = P/2, \mu_1, \mu_2 = 1$ ) پارامتر مهم دیگری در طراحی ماشین‌های الکتریکی است که بارگذاری ویژه مغناطیسی نامیده می‌شود. در ادامه این پارامتر را با  $B_g$  نشان خواهیم داد.

## ۲-۳-۲- پارامترهای اختیاری طراحی

برخی از پارامترهای طراحی موتور به صورت اختیاری توسط طراح قابل تعیین هستند. لازم به ذکر است که معمولاً قواعدی شامل محدودیت‌ها و توصیه‌ها در مراجع مختلف، حدود معینی را برای این پارامترها تعیین می‌کنند. جدول (۲-۱) پارامترهای اختیاری پیشنهادی در روند طراحی پیشرو را نشان می‌دهد.

جدول (۱-۲): پارامترهای اختیاری طراحی

| ردیف | پارامتر  | نماد     | یکا     |
|------|--|----------|---------|
| ۱    | بارگذاری ویژه فاصله هوایی                          | $B_g$    | $T$     |
| ۲    | بارگذاری ویژه الکتریکی استاتور                     | $A$      | $A/m$   |
| ۳    | تعداد شیار بر فاز بر قطب استاتور در یک فاصله هوایی | $q_s$    | ۳       |
| ۴    | تعداد شیار هر روتور                                | $Q_r$    | ۴       |
| ۵    | چگالی جریان سطحی هادی‌های استاتور                  | $J_s$    | $A/m^2$ |
| ۶    | چگالی جریان سطحی هادی‌های روتور                    | $J_r$    | $A/m^2$ |
| ۷    | حداکثر چگالی شار در دندان استاتور                  | $B_{ts}$ | $T$     |
| ۸    | حداکثر چگالی شار در دندان روتور                    | $B_{tr}$ | $T$     |
| ۹    | حداکثر چگالی شار در یوغ استاتور                    | $B_{ys}$ | $T$     |
| ۱۰   | حداکثر چگالی شار در یوغ روتور                      | $B_{yr}$ | $T$     |

### ۲-۳-۳- تعیین ابعاد اصلی موتور

همان‌طور که در فصل اول اشاره شد، قطر داخلی و قطر خارجی هسته استاتور (و روتور) ابعاد اصلی موتورهای شار محوری محسوب می‌شوند. برای محاسبه این مقادیر لازم است تا ارتباط میان آن‌ها را با مشخصات نامی موتور و پارامترهای اختیاری مربوطه بدست آوریم. در ادامه روش معادله خروجی مطابق روند ارائه‌شده در [۱]، جهت محاسبه ابعاد اصلی موتور در دستور کار قرار می‌گیرد. توان ظاهری موتور برحسب ولتاژ و جریان ترمینال موتور قابل بیان است.

$$S = mV_{ph}I_{ph} = m \frac{E_{ph}}{K_{vag,fl}} I_{ph} \quad (۱۰-۲)$$

در این رابطه  $S$  توان ظاهری موتور،  $E_{ph}$  نیرو محرکه الکتریکی القایی استاتور و  $K_{vag,fl}$  ضریب ولتاژ فاصله هوایی (نسبت ولتاژ فاصله هوایی به ولتاژ ترمینال) در بار کامل است. از آنجاکه با توجه به ساختار سیم‌پیچی حلقوی، طرفین استاتور به لحاظ الکتریکی با یکدیگر سری هستند، لذا در صورت وجود تقارن در طرفین موتور (شامل تقارن در استاتور، یکسان بودن دو روتور و مساوی بودن دو فاصله هوایی)، در هر فاصله هوایی نیمی از تبدیل انرژی موتور انجام می‌شود. لذا می‌توان رابطه فوق را برای یک فاصله هوایی مجدداً به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{S}{2} = m \frac{E_{ph1}}{K_{vag,fl}} I_{ph} \quad (11-2)$$

که در آن  $E_{ph1}$  نیرومحرکه الکتریکی القایی استاتور زیر یک فاصله هوایی است. همچنین مقدار توان ظاهری بر اساس توان نامی خروجی موتور ( $P_n$ ) راندمان و ضریب قدرت موتور قابل محاسبه است.

$$S = \frac{P_n}{\text{Eta} \times \text{PF}} \quad (12-2)$$

مقادیر  $\text{Eta}$ ،  $K_{vag,fl}$  و  $\text{PF}$  باید در ابتدای طراحی تخمین زده شده و در پایان آن محاسبه شوند. رابطه زیر ارتباط بین ولتاژ فاصله هوایی و شار برقطب را برحسب تعداد دور برفاز موتور در یک فاصله هوایی بدست می‌دهد.

$$E_{ph1} = \sqrt{2} \pi f K_w N_{s1} FPP \quad (13-2)$$

که در آن  $f$  و  $FPP$  به ترتیب فرکانس تغذیه برحسب هرتز و شار برقطب یک فاصله هوایی برحسب وبر و  $K_w$  ضریب سیم‌پیچی استاتور است. شار برقطب یک فاصله هوایی نیز به صورت زیر خواهد بود:

$$FPP = \pi \frac{(1+K_d)(1-K_d^2)}{4P} D_o^2 \alpha B_g \quad (14-2)$$

در این رابطه  $\alpha$  نسبت میانگین چگالی شار فاصله هوایی ( $\bar{B}_g$ ) به حداکثر آن است:

$$\alpha = \frac{\bar{B}_g}{B_g} \quad (15-2)$$

مقدار  $\alpha$  با فرض توزیع کاملاً سینوسی میدان در فاصله هوایی، برابر  $\frac{2}{\pi}$  است. درحالیکه درعمل به سبب پدیده اشباع در دندانهای استاتور (در محل پیک میدان)، مقدار  $\alpha$  کمی بیشتر از  $\frac{2}{\pi}$  خواهد بود.

از جایگذاری روابط (۶-۲) و (۱۲-۲) تا (۱۵-۲) در (۱۱-۲) قطر خارجی موتور بدست می‌آید:

$$D_o = \sqrt[3]{\frac{\sqrt{2}P_n}{\text{Eta.PF}.\pi K_w K_{vag.fl} K_D n_s \alpha B_g A}} \quad (16-2)$$

در این رابطه  $n_s$  سرعت سنکرون موتور برحسب دور بر ثانیه است، و مقدار آن را می‌توان برحسب فرکانس اصلی تغذیه و تعداد قطب‌های موتور بیان کرد:

$$n_s = \frac{2f}{P} \quad (17-2)$$

همچنین  $K_D$  را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$K_D = \frac{1}{8}(1+K_d)(1-K_d) \quad (18-2)$$

بنابراین با داشتن قطر خارجی می‌توان قطر داخلی را نیز محاسبه کرد.

$$D_i = K_d D_o \quad (19-2)$$

یکی از پارامترهای بسیار مهم و تعیین کننده در عملکرد هر ماشین الکتریکی، طول فاصله هوایی آن است. در موتور القایی دو روتوره با توجه به حذف نیروی محوری میان روتور و استاتور، مقدار فاصله هوایی می‌تواند، کوچکتر از موتورهای شار محوری یک طرفه اجرا شود. با این وجود تاکنون رابطه مناسبی برای

تعیین طول فاصله هوایی موتورهای القایی شارمخوری ارائه نشده است. در این مرحله از رابطه زیر که در [۱۲] برای موتورهای القایی شارشعاعی پیشنهاد شده استفاده می‌کنیم.

$$g = \frac{0.18 + 0.006 \times P_n^{0.4}}{1000} \times 1.6 \quad (20-2)$$

که در آن  $P_n$  باید بر حسب وات باشد.

### ۲-۳-۴- سایر ابعاد هسته‌ها و هادی‌های موتور

پس از محاسبه ابعاد اصلی موتور، جهت تکمیل اطلاعات مورد نیاز برای ساخت هسته‌های استاتور و روتور، لازم است تا مقادیر مربوط به ابعاد دندانه‌ها و یوغ هر هسته محاسبه گردند. گام شیار استاتور (فاصله مرکز دو شیار مجاور) برابر است با:

$$T_{ss} = \frac{\pi(1 + K_d)D_o}{2Q_s} \quad (21-2)$$

و گام قطب موتور برابر است با:

$$T_p = \frac{\pi(1 + K_d)D_o}{2P} \quad (22-2)$$

ابتدا عرض دندانه مناسب را جهت دستیابی به حداکثر چگالی شار دندانه، مطابق مقدار تعیین شده در بخش پارامترهای اختیاری، تعیین می‌کنیم. برای سهولت محاسبه فرض می‌کنیم تمام شار فاصله هوایی از دندانه‌ها عبور کرده و هیچ شاری از طریق شیار وارد هسته نمی‌شود.

$$W_{ts} = \frac{B_g}{q_s m B_{ts} K_{fe}} T_p \quad (23-2)$$

که در این رابطه  $W_{ts}$  و  $K_{fe}$  به ترتیب عرض دندانه استاتور و ضریب مورق‌سازی هسته است. این ضریب به کیفیت ساخت هسته مورق بستگی دارد. تفاضل گام شیار و عرض دندانه عرض شیار را بدست می‌دهد:

$$W_{ss} = T_{ss} - W_{ts} \quad (24-2)$$

برای تعیین عمق شیار استاتور، لازم است تا سطح فضای مورد نیاز هر شیار استاتور ( $S_{slot}$ ) را داشته باشیم. سطح فضای هر شیار با توجه به سطح مقطع هر کلاف و عایق آن محاسبه می شود:

$$S_{slot} = \frac{1}{K_{full}} N_c CSA_s K_{ins} \quad (25-2)$$

که در آن  $K_{ins}$  و  $K_{fill}$  به ترتیب ضرایب پرشوندگی سیم پیچی و عایق شیار هستند. عبارت سمت راست تساوی فوق برای سیم پیچی دوطبقه باید در ۲ ضرب شود. بنابراین ارتفاع مورد نیاز برای قرارگیری کلافها داخل شیار (بدون در نظر گرفتن نوک دندانه و گوه) برابر خواهد بود با:

$$h_{ss} = \frac{S_{slot}}{W_{ss}} \quad (26-2)$$

محاسبه دندانه ها و شیار روتور نیز عینا مشابه استاتور انجام می شود، با این تفاوت که بجای  $Q_s$ ،  $q_s$  و  $B_{ts}$  به ترتیب  $Q_r$ ،  $\frac{Q_r}{mP}$  و  $B_{tr}$  جایگذاری می شوند و سطح فضای شیار روتور، مساوی سطح مقطع میله های قفس ( $CSA_{bar}$ ) است.

اکنون می توانیم روابط زیر را برای محاسبه طول حلقه های انتهایی داخلی و بیرونی قفس هر روتور معرفی کنیم:

$$l_{endin} = \pi(K_d D_o - \frac{h_{end}}{2}) \quad (27-2)$$

$$l_{endout} = \pi(D_o + \frac{h_{end}}{2}) \quad (28-2)$$

که در آن ارتفاع حلقه انتهایی از سطح هسته ( $h_{end}$ ) بر حسب ارتفاع شیار روتور ( $h_{sr}$ ) برابر است با:



$$h_{end} = \frac{CSA_{end}}{h_{sr}} \quad (29-2)$$

ارتفاع یوغ نیز در روتور و استاتور از روابط زیر بدست می‌آیند:

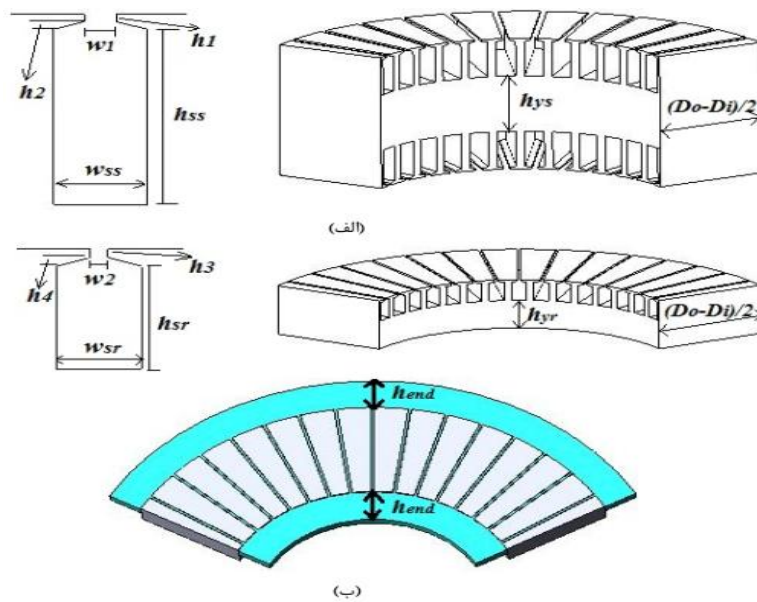
$$h_{ys} = \frac{FPP}{B_{ys}(1-K_d)D_o K_{fe}} \quad (30-2)$$

$$h_{yr} = \frac{\frac{1}{2} FPP}{B_{yr}(1-K_d)D_o K_{fe}} \quad (31-2)$$

با داشتن ارتفاع یوغ استاتور، رابطه زیر را برای محاسبه طول هادی‌های هر فاز استاتور ( $l_w$ ) معرفی می‌شود:

$$l_w = N_{ph} [(D_o - D_i) + (0.4\pi R_o) + (0.4\pi R_i)] \quad (32-2)$$

شکل (۴-۲) جزئیات ابعاد هسته‌ها و شیارهای استاتور و روتور و همچنین  $h_{end}$  را بر روی تصویر موتور نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲): الف) نمایش ابعاد اصلی موتور در استاتور و ب) نمایش ابعاد اصلی موتور در روتور

بعلاوه لازم است تا تمامی مشخصات لازم جهت تهیه و ساخت سیم‌پیچی استاتور و قفس روتور محاسبه شود. ابتدا از استاتور شروع می‌کنیم.

جریان نامی هر فاز استاتور برابر است با:

$$I_{ph} = \frac{S}{mV_{ph}} \quad (32-2)$$

لذا می‌توان با توجه به چگالی جریان در نظر گرفته شده سطح مقطع هادی‌های استاتور را محاسبه کرد .

$$CSA_s = \frac{I_{ph}}{J_s} \quad (33-2)$$

که در آن  $J_s$  سطح مقطع هادی‌های استاتور برحسب  $m^2$  است و تعداد مسیر موازی در مدار استاتور ۱ فرض شده است. همچنین برای محاسبه تعداد دور هر فاز و هر کلاف استاتور از معادله (۲-۳۴) استفاده می‌کنیم. برای سادگی و پرهیز از سردرگمی بهتر است تا محاسبات را برای تعداد دور بر فاز یک فاصله هوایی انجام دهیم.

$$N_{s1} = \frac{E_{ph1}}{\sqrt{2}\pi f K_w FPP} \quad (34-2)$$

تعداد کلاف‌های هر فاز در سیم‌پیچی حلقوی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$n_c = q_s P \quad (35-2)$$

در سیم‌پیچی دوطبقه سمت راست معادله (۲-۳۶) در ۲ ضرب می‌شود. بنابراین تعداد دور هر کلاف ( $N_c$ ) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$N_{s1} = \text{round} \left( \frac{2N_{s1}}{nc} \right) \quad (36-2)$$

در این رابطه تابع round به معنی گرد کردن عدد داخل پرانتز به نزدیک‌ترین عدد صحیح است. پس از گرد کردن تعداد دور هر فاز، لازم است تا مقادیر جدید تعداد دور برفاز استاتور از معادله (۳۷-۲) محاسبه گردد.

$$N_{s1} = \frac{N_c nc}{2} \quad (37-2)$$

در این معادله  $N_c$  تعداد دور گرد شده (عدد صحیح) است. سپس مقادیر شاربرق‌قطب، بارگذاری ویژه الکتریکی استاتور و بارگذاری ویژه الکتریکی به ترتیب از معادلات (۱۳-۲)، (۶-۲) و (۱۴-۲) محاسبه شوند. تعداد دور کل سری هر فاز استاتور  $N_s$  مساوی دو برابر  $N_{s1}$  خواهد بود. با توجه به ساختار سیم‌پیچی حلقوی، برای محاسبه طول هادی‌های استاتور لازم است تا ابتدا طول یوغ استاتور محاسبه گردد. بنابراین این پارامتر را در مراحل بعدی محاسبه می‌شوند. اکنون می‌توان محاسبات هادی‌های روتور را انجام داد.

بر اساس [۱۲] جریان القایی در میله‌های قفس روتور را می‌توان از برابر قرار دادن آمپرهادی مؤثر روتور و استاتور و با حذف مؤلفه جریان مغناطیس‌کننده از جریان کل استاتور بدست آورد.

$$I_{bar} = \frac{2N_{s1}m}{Q_r} K_w . PF . I_{ph} \quad (38-2)$$

مشابه هادی‌های استاتور با داشتن جریان میله‌ها، می‌توان سطح مقطع مورد نیاز برای جریان آن‌ها را بدست آورد.

$$CSA_s = \frac{I_{bar}}{J_r} \quad (39-2)$$

جریان حلقه انتهایی قفس نیز بر حسب جریان میله‌ها قابل محاسبه است [۱۲]:

$$I_{end} = \frac{I_{bar}}{2 \sin \frac{\gamma_r}{2}} \quad (40-2)$$

که در این رابطه  $\gamma_r$  زاویه الکتریکی گام شیار روتور می‌باشد.

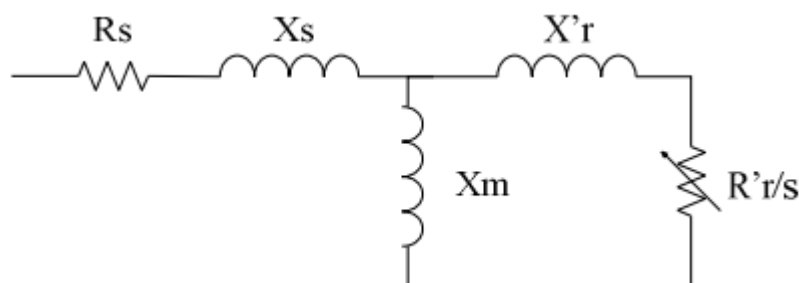
$$\gamma_r = \frac{P \pi}{Q_r} \quad (41-2)$$

بنابراین برای سطح مقطع حلقه انتهایی خواهیم داشت:

$$CSA_{end} = \frac{I_{end}}{J_r} \quad (42-2)$$

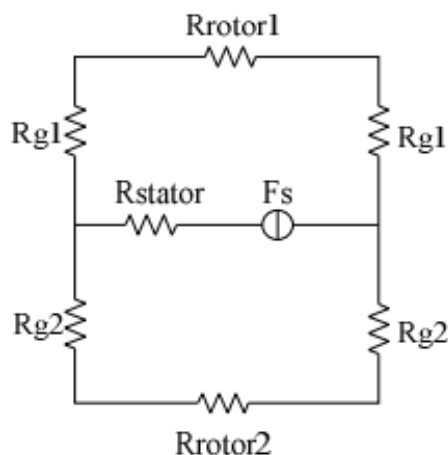
## ۴-۲- مدار معادل الکتریکی

مدار معادل حالت دائمی موتور القایی، یک مدل شناخته‌شده برای بررسی برخی از مهم‌ترین مشخصات عملکردی موتور در حالت دائمی است. از جمله این مشخصات می‌توان به محاسبه تلفات اهمی، ضریب قدرت، جریان الکتریکی، توان و گشتاور ناخالص خروجی اشاره کرد. بررسی مشخصات مذکور در این مرحله از طراحی کفایت می‌کند، و سایر مشخصات موتور مانند تلفات آهن، تلفات سرگردان، هارمونیک‌های جریان و گشتاور و ... در صورت نیاز با استفاده از مدل‌های دقیق‌تر در بخش‌های بعدی طراحی مورد بررسی قرار خواهند گرفت. مدار معادل شکل (۲-۵) برای مدل‌سازی یک فاز موتورهای القایی چندفاز متقارن مورد استفاده قرار می‌گیرد.



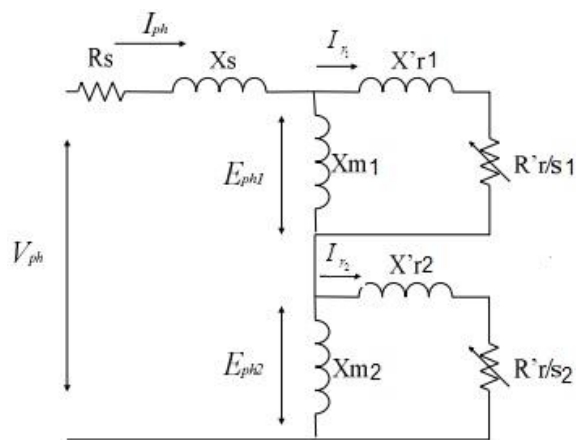
شکل (۲-۵): مدار معادل الکتریکی بر فاز یک موتور القایی

مدار مغناطیسی یک موتور القایی دو روتوره نیز به صورت شکل (۲-۶) خواهد بود.



شکل (۲-۶): مدار معادل مغناطیسی موتور القایی دو روتوره در بی باری

با توجه به اینکه مدار مغناطیسی طرفین موتور با یکدیگر موازی هستند، نیرو محرکه مغناطیسی آنها برابر می‌باشد، بنابراین در مدار الکتریکی، امپدانس مربوط به دو فاصله هوایی با یکدیگر به صورت سری قرار می‌گیرند. باید به این نکته توجه شود برای انتقال مقادیر امپدانس روتور به سمت استاتور، باید تعداد دور مربوط به هر طرف استاتور (نصف تعداد دور کل موتور) را در نظر گرفت. شکل (۲-۷) مدار معادل الکتریکی یک موتور القایی شار محوری با دو روتور مستقل را نشان می‌دهد. با توجه به این مدار، هرگونه تفاوت در دو رتور، دو فاصله هوایی و یا طرفین استاتور قابل مدل سازی است.



شکل (۷-۲): مدار معادل الکتریکی بر فاز موتور القایی دو روتوره با یاتاقان‌های مستقل

اکنون باید تک تک پارامترهای این مدار محاسبه شوند.

### • مقاومت الکتریکی

مقاومت‌های الکتریکی مدار معادل، شامل مقاومت برفاز مدار استاتور، و مقاومت معادل روتور ارجاع شده به یک فاز استاتور می‌باشند.

$$R_s = \frac{l_w}{\sigma_{cu} CSA_s} \quad (۴۳-۲)$$

در این رابطه  $\sigma_{cu}$  هدایت ویژه مس است که می‌توان آن را به صورت تابعی از دمای کار موتور محاسبه کرد. به طریق مشابه می‌توان مقاومت هر یک از میله‌های روتور و حلقه‌های انتهایی آن نیز بدست آورد.

$$R_{bar} = \frac{(1-K_d)D_o}{2\sigma_{AL} CSA_{bar}} \quad (۴۴-۲)$$

$$R_{endin} = \frac{l_{endin}}{\sigma_{AL} CSA_{end}} \quad (۴۵-۲)$$

$$R_{endout} = \frac{l_{endout}}{\sigma_{AL} CSA_{end}} \quad (46-2)$$

می‌باشند. با استفاده از رابطه زیر مقاومت یک قفس را به سمت استاتور ارجاع می‌دهیم.

$$R_{r1} = \frac{4m}{Q_r} (K_w N_{s1})^2 \left[ R_{bar} + \frac{R_{endin} + R_{endout}}{4Q \sin^2\left(\frac{\gamma_r}{2}\right)} \right] \quad (47-2)$$

### • راکتانس مغناطیس‌کننده

برای محاسبه راکتانس مغناطیس‌کننده یک فاصله هوایی، ابتدا باید نیرومحرکه مغناطیسی مورد نیاز برای تولید شار نامی در مدار مغناطیسی یک طرف موتور را حساب شود. با توجه به مدار مغناطیسی شکل (۶-۲) نیرومحرکه مغناطیسی کل برای یک طرف موتور در طول مسیر یک قطب ( $F_{total}$ ) برابر است با:

$$F_{total} = F_g + F_{ts} + F_{tr} + 0.5F_{ys} + F_{yr} \quad (48-2)$$

دامنه مؤلفه اصلی نیرومحرکه مغناطیسی استاتور برای یک سیم‌پیچی سه‌فاز به صورت زیر قابل بیان است:

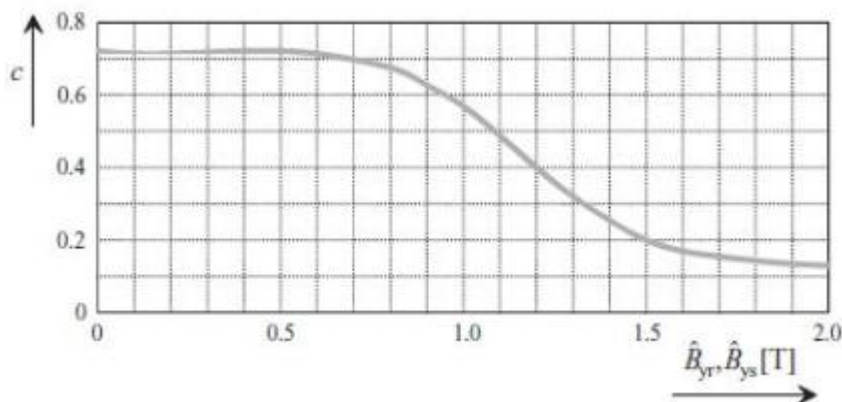
$$F_{total} = \frac{6\sqrt{2}N_{s1}K_w I_{mag}}{\pi P} \quad (49-2)$$

مقدار افت نیرومحرکه مغناطیسی، در فاصله هوایی ( $F_g$ )، دندانه‌های استاتور و روتور ( $F_{tr}$  و  $F_{ts}$ ) و یوغ استاتور و روتور ( $F_{ys}$  و  $F_{yr}$ ) به صورت جدول (۲-۲) خواهد بود.

جدول (۲-۲): افت نیرو محرکه مغناطیسی در بخش‌های مختلف مغناطیسی

|                              |
|------------------------------|
| $F_g = K_c g B_g / \mu_0$    |
| $F_{ts} = h_{ss} H_{ts}$     |
| $F_{tr} = h_{sr} H_{tr}$     |
| $F_{ys} = C_{ys} T_p H_{ys}$ |
| $F_{yr} = C_{yr} T_p H_{yr}$ |

$K_c$  ضریب کارتر نامیده می‌شود و اثر شیارهای استاتور و روتور را در فاصله هوایی مؤثر مدار مغناطیسی لحاظ می‌کند [۱۰]. همچنین،  $C_{ys}$  و  $C_{yr}$  به ترتیب ضرایب نیرو محرکه مغناطیسی یوغ استاتور و روتور هستند که اثر غیریکنواختی توزیع محیطی شدت میدان مغناطیسی را در طول مسیر جریان شار در یوغ استاتور و روتور محاسبه می‌کنند [۱۲]. در شکل (۲-۸) مقدار این ضرایب بر حسب چگالی شار یوغ ارائه شده‌اند. بعلاوه  $H_{ts}$ ،  $H_{tr}$ ،  $H_{ys}$  و  $H_{yr}$  حداکثر شدت میدان مغناطیسی به ترتیب در دندان استاتور و روتور و یوغ استاتور و روتور هستند.



شکل (۲-۸): ضریب نیرو محرکه یوغ [۱۲]

بنابراین جریان مغناطیس‌کننده را می‌توان از برابر قرار دادن حداکثر مؤلفه اصلی نیرو محرکه مغناطیسی منتجه استاتور و نیرو محرکه کل مورد نیاز در طول یک قطب بدست آورد:



$$I_{mag} = \frac{\pi P}{6\sqrt{2}N_{s1}K_w} K_c K_{sat} g \frac{B_g}{\mu_0} \quad (50-2)$$

در این رابطه  $K_{sat}$  ضریب اشباع نام دارد و برابر است با:

$$K_{sat} = \frac{F_{total}}{F_g} \quad (51-2)$$

بنابراین رکتانس مغناطیس کننده برابر است با:

$$X_{m1} = \frac{E_{ph}}{I_{mag}} = \frac{K_{vag} V_{ph} / 2}{I_{mag}} \quad (52-2)$$

### • رکتانس های پراکندگی

معادله (53-2) زیر برای محاسبه رکتانس پراکندگی استاتور به کار می رود.

$$C_{ls} \left( \frac{h_{ss}}{3W_{ss}} + \frac{2h_2}{W_{ss} + W_1} + \frac{h_1}{W_1} + \frac{5g/W_1}{5 + 4g/W_1} \right) + 2X_{m1} \left( \frac{\pi^2(10q_s^2 + 2)}{27} \times (\sin(30^\circ / q_s))^2 - 1 \right) \quad (53-2)$$

که در آن داریم:

$$C_{ls} = 8\pi f \mu_0 \frac{(D_o - D_i)N_{s1}^2}{2Pq_s} \quad (54-2)$$

همچنین رکتانس نشتی یک روتور با ارجاع به سمت استاتور به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$X'_{r1} = X_{m1} \left[ \left( \frac{P\pi}{wQ_r \sin(\frac{P\pi}{2Q_r})} \right)^2 - 1 \right] + C_{lr} \left( \frac{4m}{Q_r} (N_{s1}K_w)^2 \right) \left( \frac{h_{sr}}{3W_{sr}} + \frac{2h_4}{W_{sr} + W_2} + \frac{h_3}{W_2} + \frac{5g/W_2}{5 + 4g/W_2} \right) \quad (55-2)$$

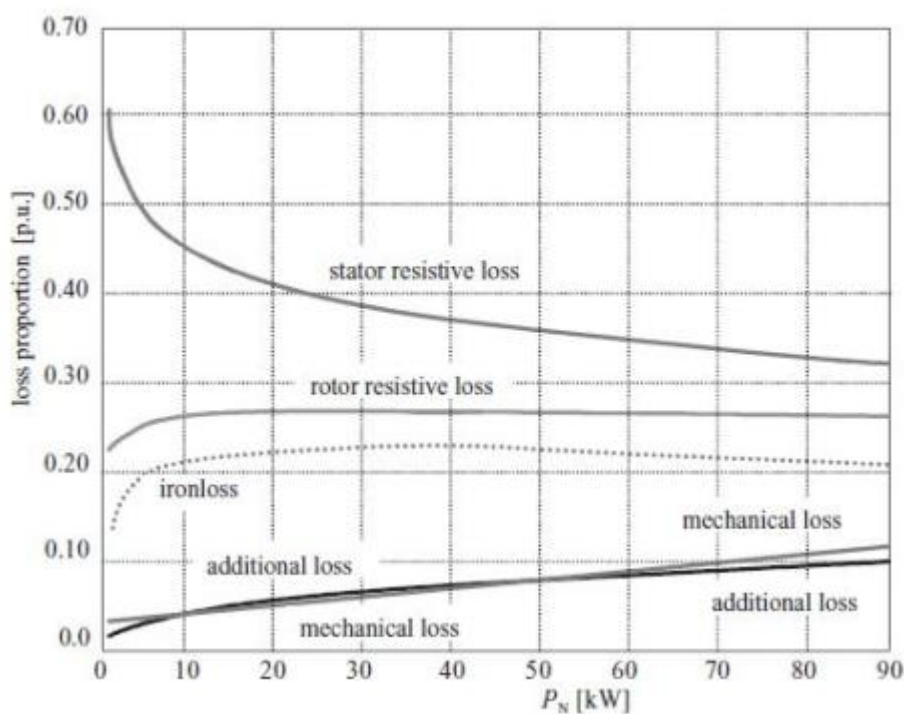
$$C_{lr} = \pi f \mu_0 (D_o - D_i) \quad (۵۳-۲)$$

نکته قابل توجه اینکه در این مرحله مقادیر پراکندگی انتهایی در محاسبه رکتانس‌های پراکندگی استاتور و روتور در نظر گرفته نشده‌اند.

اکنون عباراتی برای محاسبه تمام المان‌های مدار معادل الکتریکی برفاز موتور القایی دو روتوره با یاتاقان‌های مستقل ارائه شد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، برخی از مشخصات عملکرد موتور در کار حالت دائمی با استفاده از این مدار معادل قابل محاسبه خواهند بود.

## ۲-۵- تلفات موتور

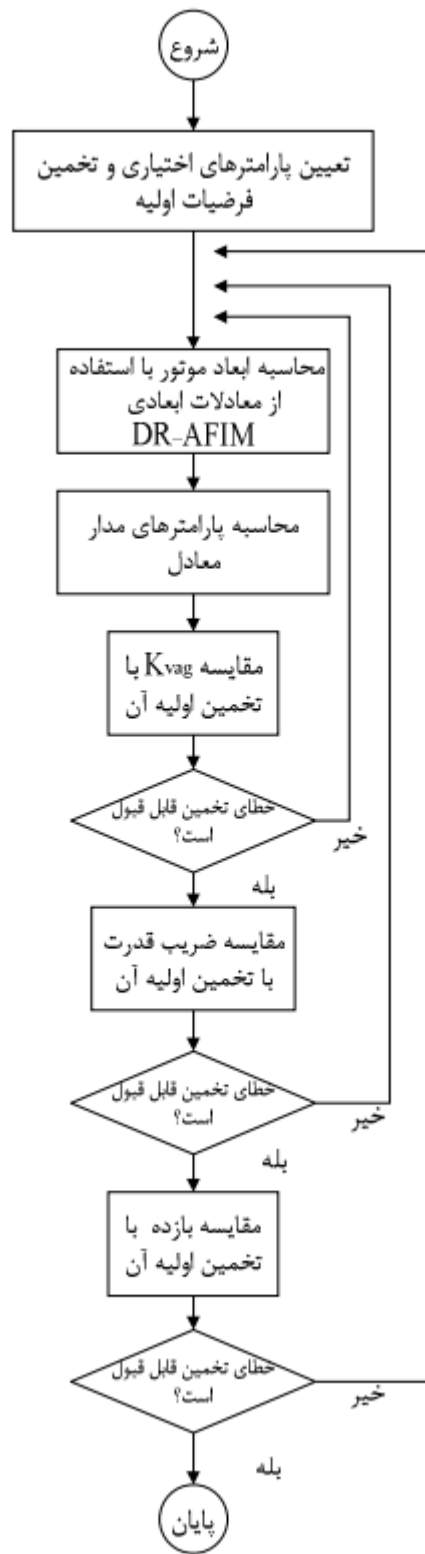
تلفات ماشین‌های الکتریکی شامل تلفات اهمی (یا مسی)، تلفات هسته فرومغناطیس (یا آهن)، تلفات مکانیکی و تلفات اضافی (یا تلفات سرگردان بار) می‌شود. تعاریف متفاوتی برای تلفات اضافی ارائه شده است ولی متداول‌ترین آن افزایش تلفات موتور از بی‌باری تا بار کامل بر اثر هارمونیک‌های میدان است. شکل (۲-۱۰) توزیع تلفات موتورهای القایی را در توان‌های کمتر از ۱۰۰ کیلووات نشان می‌دهد [۱۲]. همچنین در [۴۱] نیز روابطی برای محاسبه تلفات آهن استاتور و تلفات مکانیکی ماشین‌های شار محوری ارائه شده است. محاسبه تلفات اهمی موتور با استفاده از مدار معادل به‌سادگی امکان‌پذیر است. اگرچه روش‌های تحلیلی برای محاسبه تلفات آهن و تلفات اضافی موتورها موجود است، این روش‌ها بیشتر یک تخمین از این تلفات را بدست می‌دهند و در بسیاری از مواقع دقیق نیستند. در الگوریتم اولیه طراحی برای تخمین تلفات آهن، تلفات مکانیکی و تلفات اضافی موتور از منحنی شکل (۲-۱۰) برحسب تلفات اهمی استفاده شده است. این کار در مرحله نخست طراحی انجام شده و محاسبه تلفات الکترومغناطیسی موتور (تلفات اهمی، آهن و اضافی) با دقت بیشتر در مراحل بعدی طراحی توسط روش المان محدود انجام خواهد شد.



شکل (۲-۱۰): توزیع تلفات موتورهای القایی با توان کمتر از ۱۰۰ کیلووات [۱۲]

## ۲-۶- الگوریتم طراحی

در طراحی موتور با استفاده از معادلات ابعادی و مدل مداری ارائه شده، لازم است تا برخی از فرض‌ها و تخمین‌های اولیه در طی روند طراحی اصلاح شوند. در این پایان‌نامه از الگوریتم شکل (۲-۱۱) برای این منظور استفاده شده است.



شکل (۲-۱۱): الگوریتم طراحی موتور القایی شارمحوری دو روتوره

در این الگوریتم ابتدا پارامترهای اختیاری تعیین می‌شوند. سه مقدار ضریب توان، راندمان و  $K_{vav,fl}$  در ابتدا به همراه پارامترهای اختیاری تخمین زده می‌شوند. سپس طبق روابط گفته شده به محاسبه ابعاد موتور پرداخته می‌شود. در نهایت نیز پارامترهای مدار معادل بدست می‌آیند. در این مرحله ابتدا  $K_{vav,fl}$  را با مقدار تخمین زده شده در ابتدای طراحی مقایسه می‌کنیم اگر میزان خطا زیاد بود، مقدار آن را تغییر داده و به ابتدای الگوریتم برمی‌گردیم و محاسبات را بار دیگر انجام می‌دهیم، این روند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که خطا قابل قبول باشد. همین روش کار پس از بدست آمدن  $K_{vav,fl}$ ، به ترتیب برای ضریب توان و راندمان اعمال می‌شود و در نهایت موتور مورد نظر طراحی خواهد شد.

## ۷-۲- موتور طراحی شده

براساس نحوه تعیین پارامترهای موتور القایی شارمخوری دو روتوره موتور مورد نظر با مقادیر زیر ابتدا طراحی و ساخته شد.

جدول (۳-۲): مقادیر نامی موتور طراحی شده

| توان نامی | ولتاژ خط | تعداد خط | تعداد قطبها/ فرکانس |
|-----------|----------|----------|---------------------|
| ۴۰۰W      | ۳۸۰V     | ۳        | ۵۰Hz/۴              |

جدول (۴-۲): نتایج موتور طراحی شده

| مقدار | مقدار | کمیت       | یکا | مقدار | کمیت      |
|-------|-------|------------|-----|-------|-----------|
| mm    | ۱     | $h_1, h_3$ | mm  | ۱۳۴/۲ | $D_o$     |
| mm    | ۵/۷   | $W_{tr}$   | mm  | ۷۷/۸  | $D_i$     |
| mm    | ۱۲/۱  | $W_{sr}$   | mm  | ۱     | $g$       |
| mm    | ۲/۴   | $W_2$      | دور | ۶۱۶   | $2N_{s1}$ |
| mm    | ۳/۴   | $h_{sr}$   | عدد | ۱۶    | $nc$      |
| mm    | ۱     | $h_3, h_4$ | mm  | ۴,۲   | $W_{ts}$  |
| mm    | ۸۰/۲  | $h_{ys}$   | mm  | ۹/۱   | $W_{ss}$  |
| mm    | ۱۰    | $h_{yr}$   | mm  | ۲/۶   | $W_1$     |
| mm    | ۱۷/۸  | $h_{end}$  | mm  | ۱۵/۲  | $h_{ss}$  |

جدول (۵-۲) پارامترهای مدار معادل شکل (۲-۱۱)، متناظر با موتور طراحی شده را نشان می‌دهد.

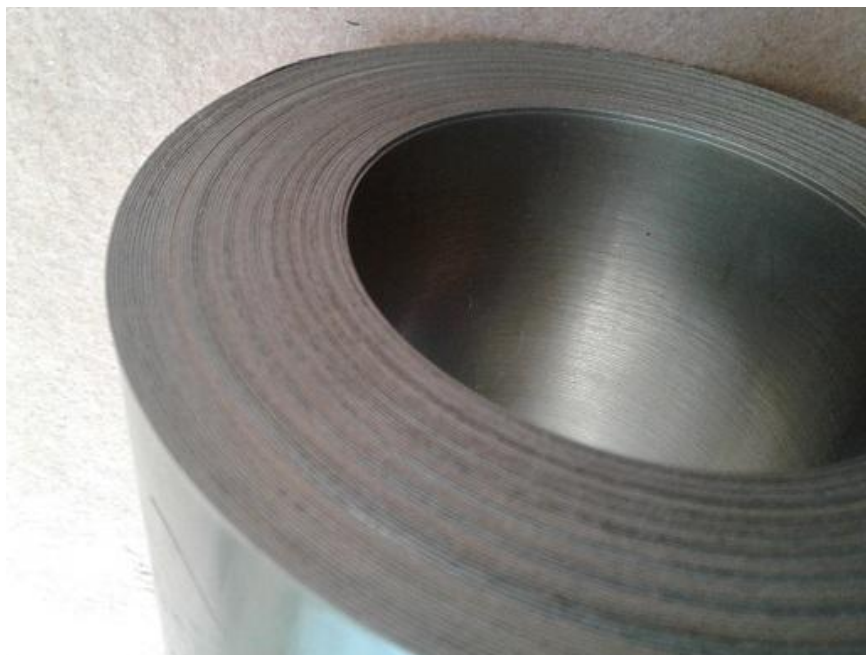
جدول (۵-۲): پارامترهای مدار معادل الکتریکی طراحی شده

| $R_s (\Omega)$ | $X_s (\Omega)$ | $X_m (\Omega)$ | $R_r' (\Omega)$ | $X_r' (\Omega)$ |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| ۱۳/۶           | ۱۰             | ۱۴۶            | ۲۶              | ۱۰/۳            |

## ۲-۸- موتور ساخته شده

با توجه به الگوریتم طراحی که در بخش ۲-۶ معرفی شد اقدام به ساخت یک نمونه DIR-AFIM شده است. استاتور این موتور به صورت ورق ورق شده از فولاد سیلیکون‌دار به صورت شکل (۲-۱۲) ابتدا رول شده و سپس توسط دستگاه وایرکات دو سمت آن شیارهایی تعبیه شده است. در ساخت استاتور با توجه به محدودیت مکان برای سیم‌پیچی‌ها در قطر داخلی هم از سیم‌پیچی معمولی استفاده شده است و هم طول یوغ استاتور را کمی بزرگ‌تر در نظر گرفته شده است. شکل (۲-۱۳) استاتور شیار دار را به همراه سیم‌بندی انجام شده نشان می‌دهد.

روتورها نیز به صورت آهن‌های یکپارچه تهیه شده است و توسط دستگاه وایرکات، همانند استاتور شیاردار شده است. برای میله‌های روتور نیز از ریختگری آلومینیوم انجام گرفته است. شکل (۲-۱۴) روتور را به همراه قفس نشان می‌دهد. شکل (۲-۱۵) نیز موتور مونتاژ شده در انتهای کار را به تصویر می‌کشد.



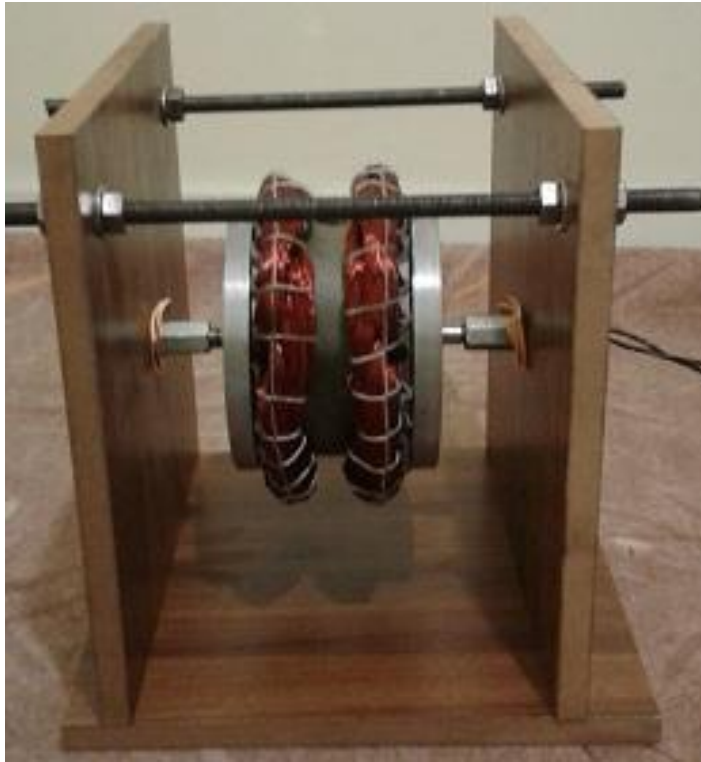
شکل (۱۲-۲): هسته رول شده از ورق سیلیس دار برای استاتور



شکل (۱۳-۲): استاتور به همراه شیار و سیم بندی



شکل (۲-۱۴): روتور به همراه قفس



شکل (۲-۱۵): موتور مونتاژ شده



# فصل ۳: مدل سازی DIR-AFIM در

**Matlab و FEM**

### ۳-۱- مقدمه

منحنی مشخصه‌های موتور القایی با توجه به این که یک سرعت مشخص وجود دارد، همگی به صورت منحنی‌های دوبعدی خواهند بود. حال در صورتی که دو موتور القایی را سری و یا از DIR-AFIM استفاده شود، یک پارامتر مستقل دیگر به معادلات اضافه خواهد شد و تمام منحنی‌های تحلیل هر طرف ماشین به صورت سه‌بعدی خواهند بود. در این فصل ابتدا این معادلات، سپس بار دیگر صحت مدار معادل الکتریکی توسط آنها، بیان می‌شود. در آخر نیز نحوه مدل‌سازی ماشین DIR-AFIM در محیط FEM نشان داده خواهد شد.

### ۳-۲- معادلات حالت دائمی

معادلات حالت دائمی DIR-AFIM را با اضافه کردن یک معادله به معادلات موتور القایی یک‌روتوره به-

صورت معادله (۳-۱) بیان می‌شود.

$$\begin{bmatrix} V_{abc_s} \\ V'_{abc_{r1}} \\ V'_{abc_{r2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [r_s] & & \\ & [r'_{r1}] & \\ & & [r'_{r2}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc_s} \\ i'_{abc_{r1}} \\ i'_{abc_{r2}} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} [L_s] & [L'_{sr1}] & [L'_{sr2}] \\ [L'_{sr1}]^T & [L'_{r1}] & 0 \\ [L'_{sr2}]^T & 0 & [L'_{r2}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc_s} \\ i'_{abc_{r1}} \\ i'_{abc_{r2}} \end{bmatrix} \quad (۳-۱)$$

این معادلات را با تبدیل dq به دستگاه مرجع سنکرون انتقال داده می‌شوند تا بتوان به راحتی ماشین را مورد بررسی قرار داد. برای این کار از تبدیل (۲-۳) استفاده می‌شود.

$$\begin{aligned} f_{qd0_s} &= k_s f_{abc_s} \\ f'_{qd0_r} &= k_r f'_{abc_r} \end{aligned} \quad (۲-۳)$$

پس از اعمال تبدیل (۳-۲) به معادلات (۱-۳) معادلات برای ماشین DIR-AFIM به صورت زیر خواهد بود.

$$\begin{cases} V_{qd0_s} = r_s i_{qd0_s} + \omega \lambda_{dq_s} + p \lambda_{qd0_s} \\ V'_{qd0_{r1}} = r'_{r1} i'_{qd0_{r1}} + (\omega - \omega_{r1}) \lambda'_{dq_{r1}} + p \lambda'_{qd0_{r1}} \\ V'_{qd0_{r2}} = r'_{r1} i'_{qd0_{r2}} + (\omega - \omega_{r2}) \lambda'_{dq_{r2}} + p \lambda'_{qd0_{r2}} \end{cases} \quad (۳-۳)$$

که  $\lambda_{dq}$  و  $\lambda_{qdo}$  به صورت زیر هستند:

$$\begin{cases} (\lambda_{dq_s})^T = [\lambda_{d_s} \quad \lambda_{q_s} \quad 0] \\ (\lambda'_{dq_{r1}})^T = [\lambda'_{d_{r1}} \quad \lambda'_{q_{r1}} \quad 0] \\ (\lambda'_{dq_{r2}})^T = [\lambda'_{d_{r2}} \quad \lambda'_{q_{r2}} \quad 0] \end{cases} \quad (۴-۳)$$

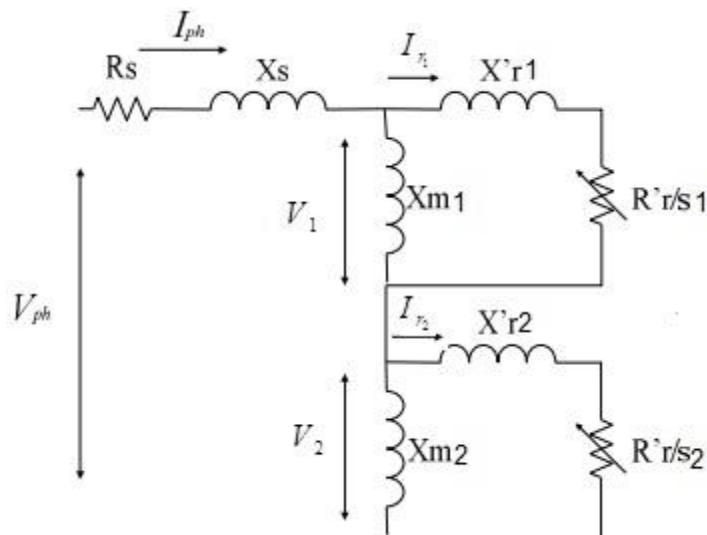
$$\begin{bmatrix} \lambda_{qdo_s} \\ \lambda'_{qdo_{r1}} \\ \lambda'_{qdo_{r2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_s L_s (k_s)^{-1} & k_s L'_{sr1} (k_{r1})^{-1} & k_s L'_{sr2} (k_{r2})^{-1} \\ k_s L'_{sr1} (k_{r1})^{-1} & k_{r1} L_{r1} (k_{r1})^{-1} & 0 \\ k_s L'_{sr2} (k_{r2})^{-1} & 0 & k_{r2} L_{r2} (k_{r2})^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qd0_s} \\ i'_{qdo_{r1}} \\ i'_{qdo_{r2}} \end{bmatrix} \quad (۵-۳)$$

معادلات شارهای پیوندی نیز در این دستگاه در نهایت به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{cases} \psi_{q_s} = X_{l_s} i_{q_s} + X_M (i_{q_s} + i'_{q_1} + i'_{q_2}) \\ \psi_{d_s} = X_{l_s} i_{d_s} + X_M (i_{d_s} + i'_{d_1} + i'_{d_2}) \\ \psi'_{q_1} = X'_{l_1} i'_{q_1} + X_{M_1} (i_{q_s} + i'_{q_1}) \\ \psi'_{d_1} = X'_{l_1} i'_{d_1} + X_{M_1} (i_{d_s} + i'_{d_1}) \\ \psi'_{q_2} = X'_{l_2} i'_{q_2} + X_{M_2} (i_{q_s} + i'_{q_2}) \\ \psi'_{d_2} = X'_{l_2} i'_{d_2} + X_{M_2} (i_{d_s} + i'_{d_2}) \end{cases}$$

(۶-۳)

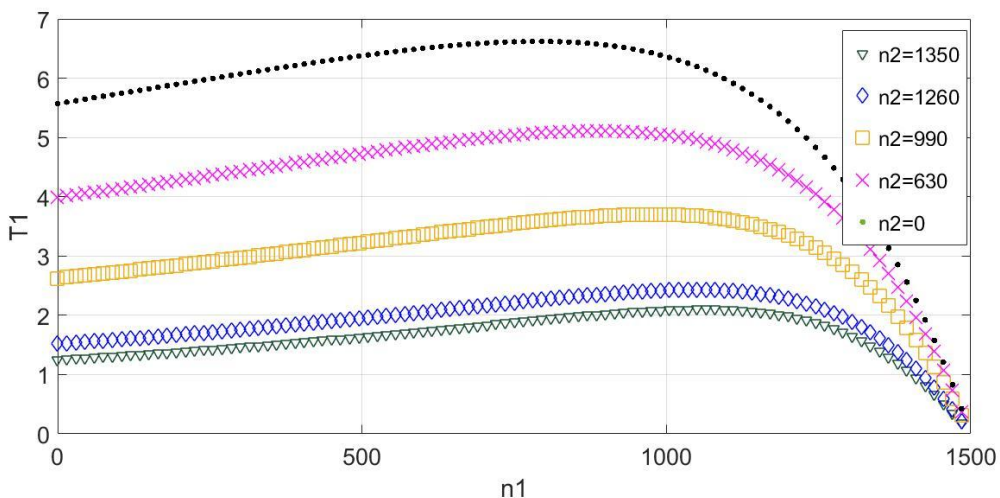
با توجه به معادلات (۶-۳) و تبدیل آن‌ها به سیستم فازور مدارمعادل به صورت شکل (۱-۳) بدست می‌آید.



شکل (۱-۳): مدارمعادل الکتریکی DIR-AFIM

حال تمام معادلات ماشین اعم از ولتاژ جریان، توان،  $\cos \phi$  و ... برای هر طرف از ماشین در حالت دائمی به صورت جداگانه در محیط m-file متلب کد نویسی می‌شوند. لغزش‌ها به صورت پارامترهای مستقل مقدار دهی می‌شوند و سایر پارامترها طبق معادلات بدست می‌آیند.

مقداردهی برای هر پارامتر در محیط متلب (گشتاور، جریان، توان و....) به این صورت است که هر کدام ۱۰۰۰۰ (۱۰۰\*۱۰۰) مقدار خواهد داشت. یعنی اگر منحنی گشتاور سرعت سمت ۱ را بخواهیم بدست آوریم باید سرعت سمت ۲ را در یک سرعت ثابت در نظر بگیریم تا بتوانیم آن را به صورت شکل (۲-۳) نشان دهیم.



شکل (۲-۳): نمودار گشتاور سرعت سمت ۱ بر حسب سرعت سمت ۲

جزئیات دیگر این نمودار و نمودارهای دیگر و تحلیل آنها به تفصیل در فصل بعدی بررسی خواهد شد.

### ۳-۳- مدل سازی در محیط FEM

ضرورت دستیابی به دقت بالا در فرآیند طراحی ماشین‌های الکتریکی موجب گسترش روش‌های عددی مناسب برای محاسبه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی شده است. اساس این روش‌ها محاسبه توزیع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در ساختار سیستم مورد مطالعه بر مبنای حل معادلات ماکسول است. حل تحلیلی این معادلات به دلیل پیچیدگی هندسی ساختار ماشین‌ها و سیستم‌های الکترومغناطیسی و

همچنین خواص غیرخطی مواد، به سادگی قابل تحصیل نیست. بنابراین در بیشتر موارد، بکارگیری یک روش عددی در روند طراحی و تحلیل عملکرد، متداول است.

روش المان محدود یک تکنیک عددی مناسب برای دستیابی به مدل دقیق ماشین‌های الکتریکی است. این روش برای اولین بار در سال ۱۹۴۰ مطرح شد، ولی ده سال بعد برای اولین بار به صورت کاربردی در تکنولوژی هوافضا و تحلیل سازه‌ها بکار گرفته شد. در طی سالهای پس از آن، این روش در کاربردهای مختلف فیزیک و ریاضیات مورد استفاده قرار گرفت به گونه‌های که امروزه فراگیرترین روش در حل مسائل میدان‌های برداری است [۴۳].

در این روش امکان حل میدان‌های الکترومغناطیسی در مواد غیر همگن، ناهمسانگرد<sup>۱</sup> و غیرخطی میسر می‌باشد. در استفاده از این روش، کل فضای محاسبات به بخش‌های جزئی موسوم به المان‌های محدود یا اجزای محدود تقسیم شده، و معادلات میدان در هر المان با فرض توزیع مرتبه ۲، ۱ و یا بیشتر در فضای آن المان، حل می‌شوند. مرتبه توزیع میدان در یک المان، مرتبه آن المان نامیده می‌شود. بدون شک بکارگیری المان‌های مرتبه بالاتر، علاوه بر افزایش دقت محاسبات، حجم بیشتر محاسبات را نیز در پی خواهد داشت. معادلات میدان در روش المان محدود به سه روش استاتیک، گذرایی یا TS<sup>۲</sup> و آنالیز فرکانسی یا TH<sup>۳</sup> قابل حل هستند. در روش استاتیک، معادلات در یک لحظه زمانی معین حل می‌شوند، بنابراین در این روش زمان به عنوان یک متغیر مطرح نیست. در روش TS معادلات در هر گام زمانی حل شده، و نتایج آن به عنوان مقادیر اولیه گام زمانی بعدی در نظر گرفته می‌شوند. در این روش گام زمانی به عنوان یک پارامتر اختیاری است و امکان مطالعه گذرایی و دینامیکی سیستم وجود دارد. در روش TH معادلات میدان به صورت فازوری و در حالت دائمی سینوسی حل می‌شوند. لذا امکان مطالعه دینامیکی

---

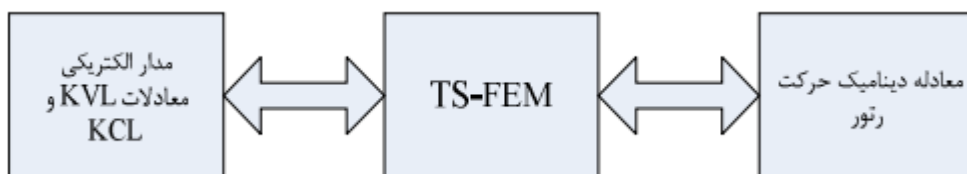
<sup>۱</sup> Anisotropic

<sup>۲</sup> Time Stepping

<sup>۳</sup> Time Harmonics

وجود ندارد. در مطالعات مختلف، بسته به هدف و نیاز مسئله روش حل آن بر اساس یکی از موارد فوق انتخاب می‌شود. گسترش کاربرد روش المان محدود در کاربردهای متنوع مهندسی، سبب توسعه نرم‌افزارهای تجاری در این حوزه شده است. در این میان نرم‌افزار JMAG-Designer16 در این پروژه مورد استفاده قرار گرفته است. این نرم‌افزار قابلیت‌های متنوعی برای تحلیل مسائل الکترومغناطیسی مرتبط با ماشین‌های الکتریکی در اختیار قرار می‌دهد.

در این پایان‌نامه از روش TS برای محاسبه عملکرد DIR-AFIM استفاده شده است. همچنین برای نزدیک‌تر شدن شبیه‌سازی به واقعیت، تغذیه موتور با منبع ولتاژ فرض شده است. بعلاوه معادله دینامیک حرکت روتور نیز برای شبیه‌سازی بارگذاری مکانیکی، به‌طور جداگانه اعمال می‌شوند. بنابراین لازم است تا در هر گام زمانی معادلات میدان، معادلات مدار الکتریکی و معادله دینامیک حرکت روتور به‌طور همزمان حل شوند (شکل (۳-۳)).



شکل (۳-۳): نحوه اعمال معادلات خارجی مدار الکتریکی و دینامیک روتور در روش المان محدود

میدان پتانسیل مغناطیسی برداری ( $\vec{A}$ ) به‌عنوان کمیت اصلی مورد محاسبه قرار می‌گیرد. سایر کمیت‌ها شامل شدت میدان مغناطیسی، چگالی شار مغناطیسی، ولتاژها و جریانهای القایی و ... از  $\vec{A}$  قابل محاسبه هستند.

$$\vec{\nabla} \times (\nu \vec{\nabla} \times \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{J}_s = 0 \quad (7-3)$$

در این معادله  $\sigma$  و  $\vec{J}_s$  به ترتیب هدایت ویژه مغناطیسی، هدایت ویژه الکتریکی و چگالی جریان اعمالی خارجی در هر المان می‌باشند. همچنین اپراتور  $\vec{\nabla}$  در دستگاه کارتزین به صورت زیر است:

$$\vec{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \quad (۸-۳)$$

### ۳-۴- ارزیابی الگوریتم طراحی DIR-AFIM با استفاده از روش المان محدود

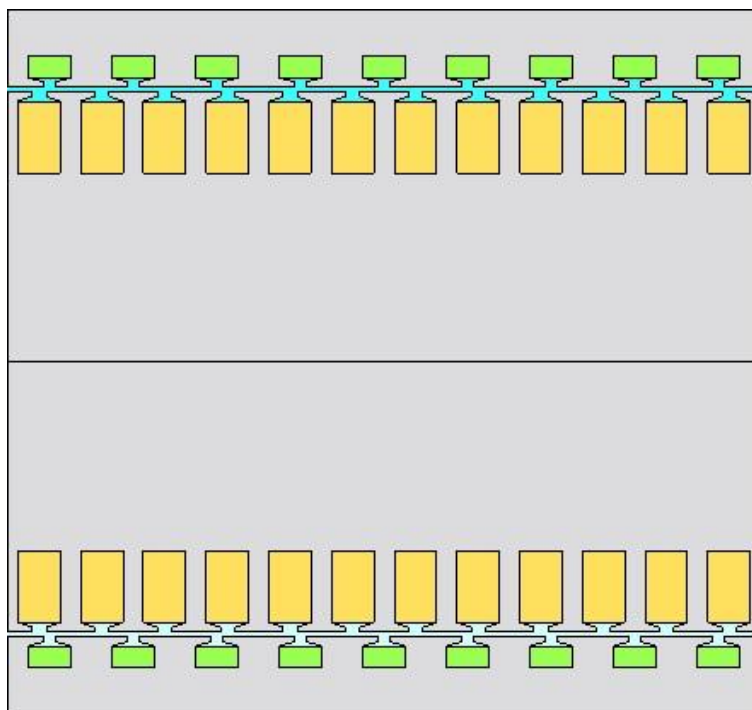
تحلیل ماشین‌های الکتریکی به روش المان محدود با استفاده از مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی متداول است. در مدل دوبعدی از تغییرات میدان در بعد سوم چشم‌پوشی می‌شود. بنابراین از دقت محاسبات کاسته خواهد شد. ولی تجربه ما در این پروژه نشان می‌دهد که اختلاف زمان و حجم حافظه مورد نیاز رایانه در تحلیل مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی بسیار زیاد است. بنابراین استفاده از مدل دوبعدی می‌تواند در بسیاری از کاربردها قابل توجیه باشد. مطابق [۴۳] در موتورهای القایی مدل‌سازی یک  $n$ ام از موتور با هدف کاهش تعداد المان‌ها و حجم محاسبات امکان‌پذیر است، که  $n$  بزرگترین مقسوم‌علیه مشترک تعداد قطب ( $P$ )، تعداد شیار استاتور ( $Q_s$ ) و تعداد شیار روتور ( $Q_r$ ) است. بنابراین یک‌دوم موتور طراحی شده در بخش (۲-۷) برای محاسبه کفایت می‌کند. همچنین با در نظر گرفتن تقارن موتور در دو فاصله هوایی (در صورت وجود تقارن) می‌توان تنها یک فاصله هوایی آن را مدل‌سازی کرد. لذا با در نظر گرفتن این فرض، مدل جزئی موتور به یک چهارم کاهش خواهد یافت (این مدل فقط برای حالت‌هایی که سرعت هر دو طرف از موتور برابر باشند در نظر گرفته می‌شود).



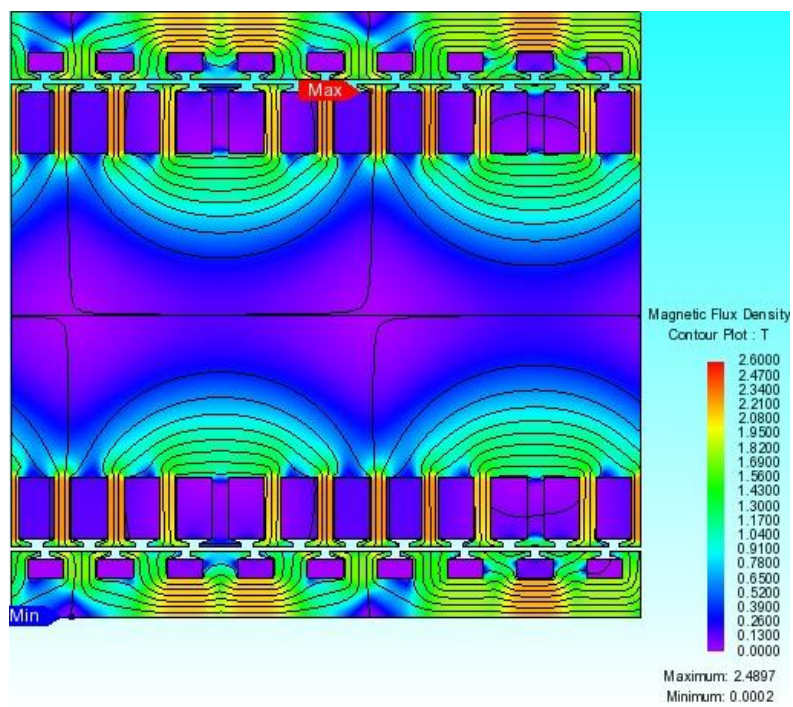
### ۳-۴-۱- نتایج 2D-FEM

در ادامه نتایج حاصل از اجرای شبیه‌سازی دوبعدی المان محدود در بی‌باری و بار کامل ارائه خواهد شد. نحوه ساخت یک مدل دوبعدی در شکل (۳-۴) نشان داده شده است. با توجه به این شکل یک موتور با حرکت خطی مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. هدف اصلی از شبیه‌سازی بی‌بار موتور، ارزیابی دقت معادلات ابعاد موتور برای دستیابی به چگالی شار معین در بخش‌های مختلف موتور است. در نتیجه از مواردی مانند اشباع هسته‌های مغناطیسی روتور و استاتور پیشگیری خواهد شد.

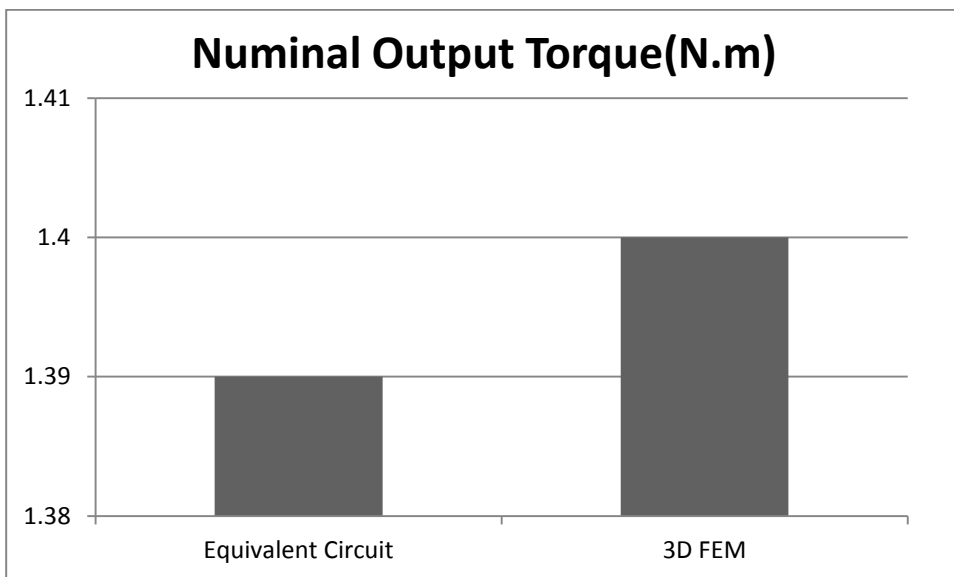
در این مطالعه با توجه به محدودیت ساخت، و اجبار به بزرگ‌تر انتخاب کردن طول یوغ استاتور، در شبیه‌سازی‌ها این افزایش اندازه در نظر گرفته شده است و این موضوع در شکل (۳-۴) نیز مشخص است. شکل (۳-۵) نیز توزیع چگالی شار در هسته مغناطیسی را نشان می‌دهد. در شکل (۳-۶) گشتاور خروجی حاصل از مدار معادل حالت دائمی و شبیه‌سازی دوبعدی نشان داده شده است. مقایسه جریان این دو حالت را نیز شکل (۳-۷) به تصویر می‌کشد.



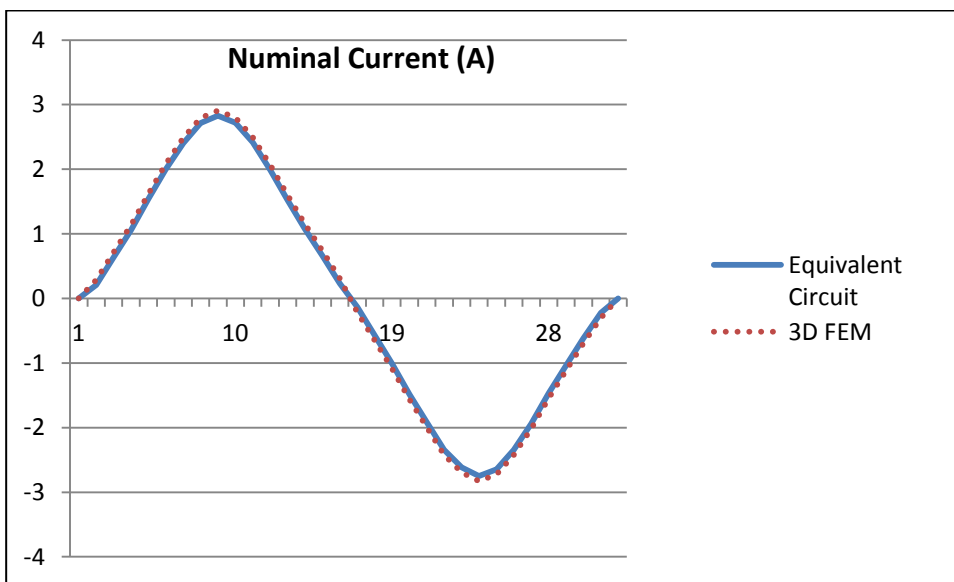
شکل (۳-۴): نحوه ایجاد مدل دو بعدی



شکل (۳-۵): توزیع چگالی شار در هسته مغناطیسی



شکل (۳-۶): مقایسه گشتاور خروجی موتور در حالت مدار معادل و شبیه سازی دو بعدی

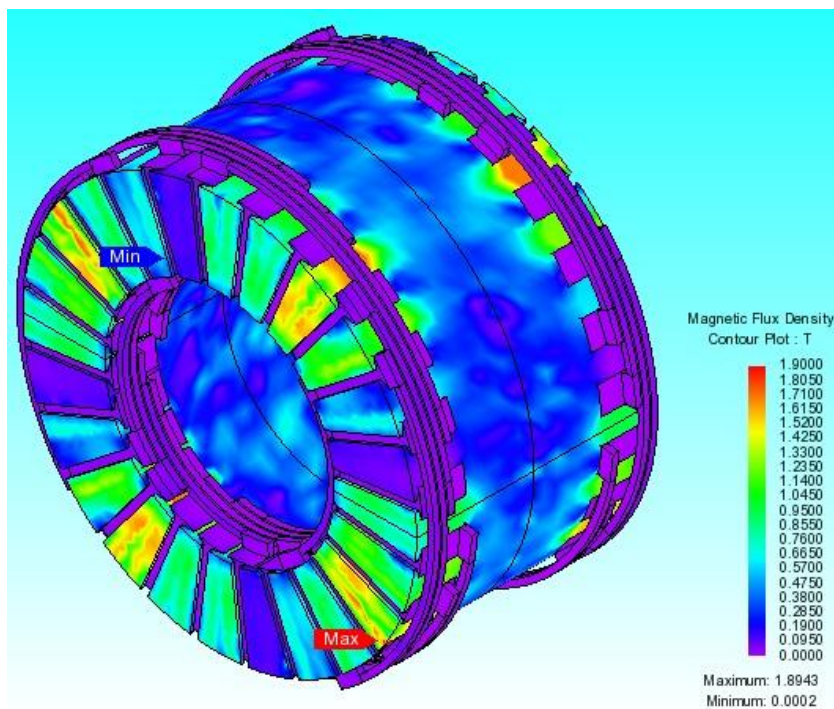


شکل (۳-۷): مقایسه جریان نامی موتور در حالت مدار معادل و شبیه سازی دو بعدی

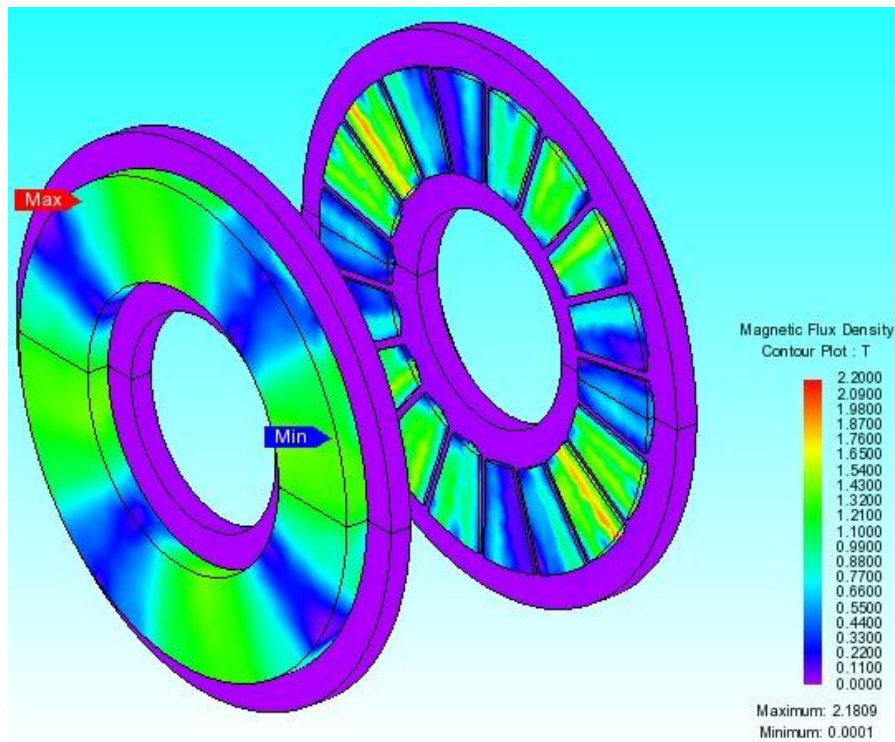
### ۳-۴-۲- نتایج 3D-FEM

اکنون با استفاده از روش 3D-FEM عملکرد موتور را در بی باری و در بار کامل ارزیابی می کنیم. توزیع میدان در بی باری در استاتور و روتور به ترتیب در شکل (۳-۸) و (۳-۹) نشان داده می شوند. توزیع چگالی

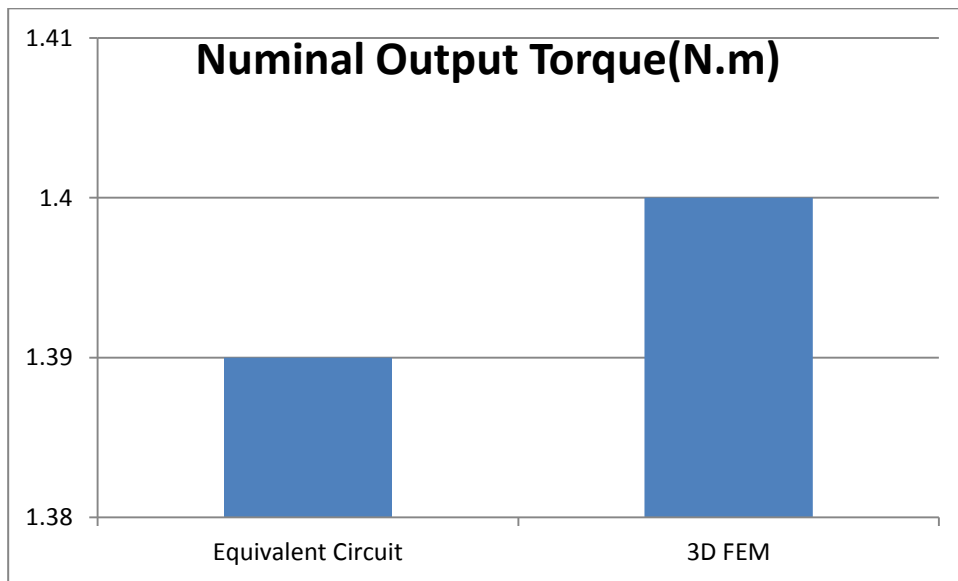
شار حاصل در این مدل‌سازی نیز، مطابق انتظار بوده و صحت طراحی را تأیید می‌کند. باید به این نکته توجه شود که در مدار معادل موتور، شارهای پراکندگی انتهایی استاتور و روتور در نظر گرفته نشده‌اند. در بی‌باری اثر پراکندگی روتور به خوبی قابل چشم‌پوشی است. همچنین رکتانس پراکندگی استاتور در مقایسه با رکتانس مغناطیس‌کننده موتور بسیار کوچک می‌باشد. بنابراین چشم‌پوشی از پراکندگی‌ها چندان مهم به نظر نمی‌رسد. در شرایط بار کامل نیز اثر مقاومت انتهایی استاتور و روتور (به‌ویژه روتور)، بسیار مهم‌تر از اثر پراکندگی‌های انتهایی است. لازم به یادآوری است که مقاومت‌های انتهایی استاتور و روتور در مدار معادل در نظر گرفته شده‌اند. تأثیر پراکندگی‌های انتهایی در سرعت‌های پایین و به‌خصوص در راه‌اندازی حداکثر است که مقاومت‌های انتهایی استاتور و روتور در مدار معادل در نظر گرفته شده‌اند. شکل (۱۰-۳) و (۱۱-۳) به ترتیب گشتاور و جریان را در دو حالت مدار معادل و شبیه‌سازی سه‌بعدی نشان می‌دهند.



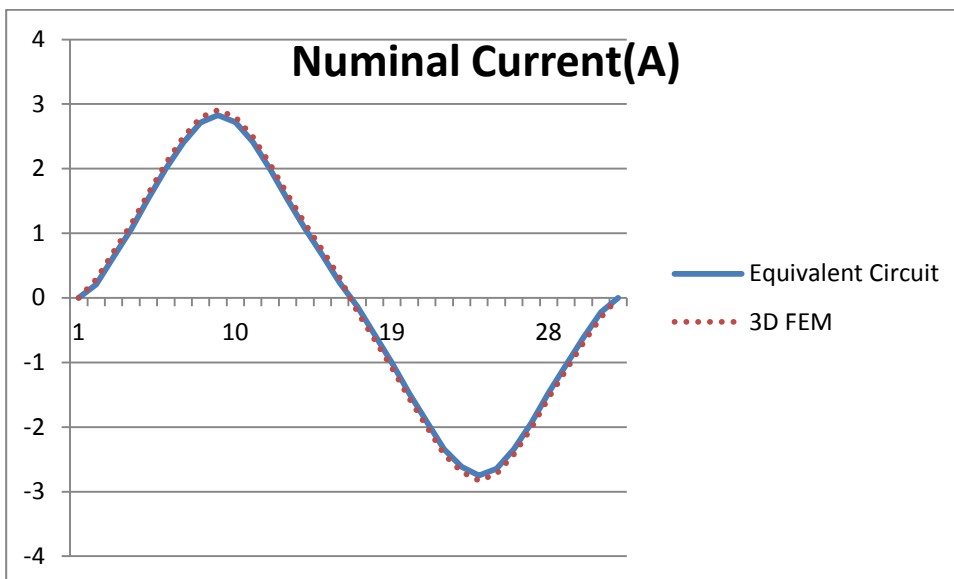
شکل (۳-۸): توزیع میدان مغناطیسی در هسته استاتور



شکل (۳-۹): توزیع میدان مغناطیسی در هسته روتور



شکل (۳-۱۰): مقایسه گشتاور خروجی موتور در حالت مدار معادل و شبیه‌سازی سه‌بعدی



شکل (۳-۱۱): مقایسه جریان موتور در حالت مدار معادل و شبیه‌سازی سه بعدی

با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌های دو و سه بعدی دیده می‌شود که دقت شبیه‌سازی سه بعدی به مراتب بیشتر از دوطبقه‌ای است ولی در مقابل زمان شبیه‌سازی کاملاً قابل چشم‌پوشی و منطقی است که از شبیه‌سازی‌های دوطبقه‌ای برای تحلیل موتور استفاده کنیم.

## فصل ۴: نتایج شبیه‌سازی‌ها

## ۴-۱- مقدمه

موتور القایی شارمخوری دو روتوره با یاتاقانهای مستقل (یا محورهای مستقل) دقیقا مشابه دو موتور القایی که به صورت سری باهم به منبع تغذیه متصل شده‌اند عمل می‌کند. بازه تغییرات این موتور بسیار وسیع تر خواهد شد و برای بررسی آن معادلات نیز پیچیده تر خواهد بود و تمامی مشخصه‌ها از دو بعدی به سه بعدی تغییر حالت می‌دهند. به همین دلیل لازم است تا نقاط کار بسیاری برای تحلیل این موتور جستجو و پیدا شوند. لذا کار در محیط متلب و استفاده از مدار معادل بسیار ساده‌تر و قابل فهم‌تر از محیط المان محدود خواهد بود. از این رو در این فصل ابتدا نتایج حاصل حالت دائمی از مدار معادل را با نتایج حالت دائمی در FEM مقایسه می‌شوند و نشان داده خواهد شد که مدار معادل به درستی طراحی شده و می‌توان از آن برای تحلیل حالت دائمی به خوبی استفاده کرد. سپس موتور در لغزشهای بسیار مورد آزمون قرار داده می‌شود، مشخصه‌ها بدست می‌آیند و کاربردهای آن بیان خواهد شد.

## ۴-۲- مقایسه مدار معادل و FEM

در این بخش ابتدا صحت نتایج حاصل از مدار معادل با شبیه‌سازی المان محدود تصدیق می‌شوند، سپس تحلیل باقی موتور در حالت دائمی توسط مدار معادل انجام خواهد شد.

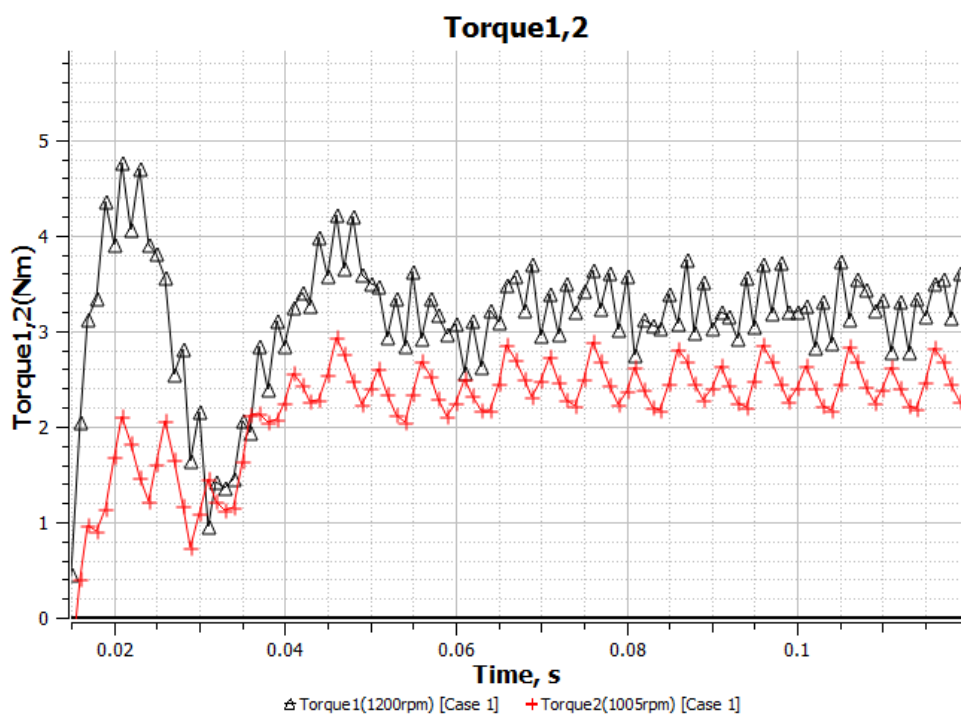
با توجه به جدول (۴-۱) دو نمونه بارگذاری بر روی موتور قرار داده می‌شود و نتایج با مدار معادل مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

جدول (۴-۱): دو مثال برای مقایسه مدار معادل و FEM

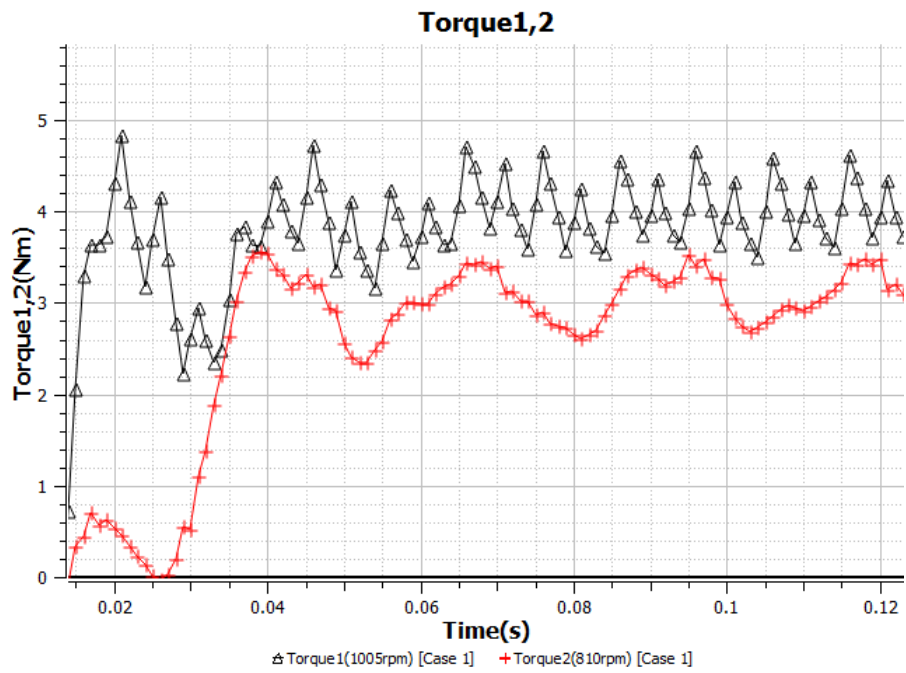
| مثال ۲       | مثال ۱       |
|--------------|--------------|
| $n_1 = 1005$ | $n_1 = 1200$ |
| $n_2 = 810$  | $n_2 = 1005$ |



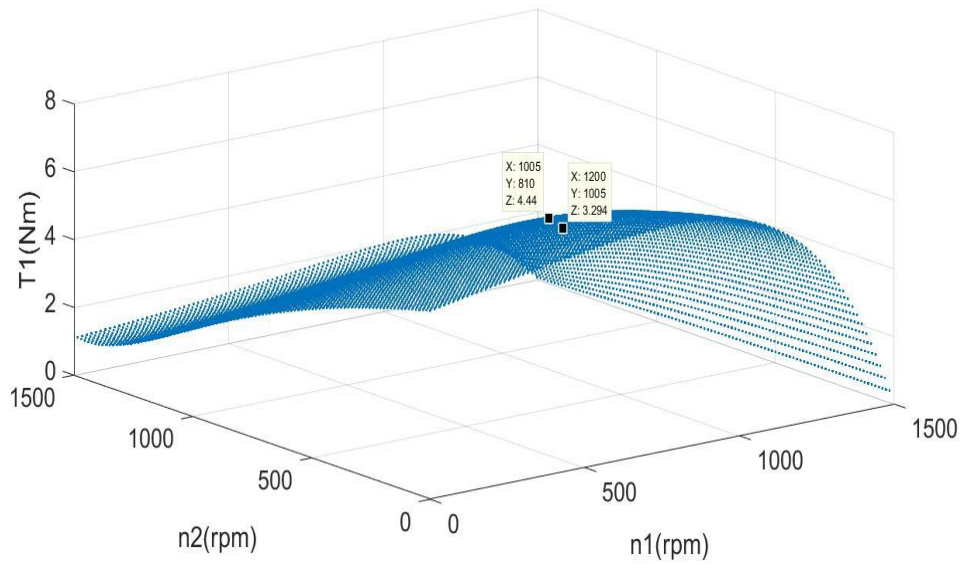
ابتدا گشتاور خروجی موتور حاصل از این دو مثال در شبیه‌سازی المان محدود به ترتیب در شکل‌های (۴-۱) و (۴-۲) نشان داده می‌شود. سپس همین مقادیر در حل معادلات از مدار معادل به ترتیب در شکل-های (۴-۳) و (۴-۴)، به تصویر کشیده خواهد شد.



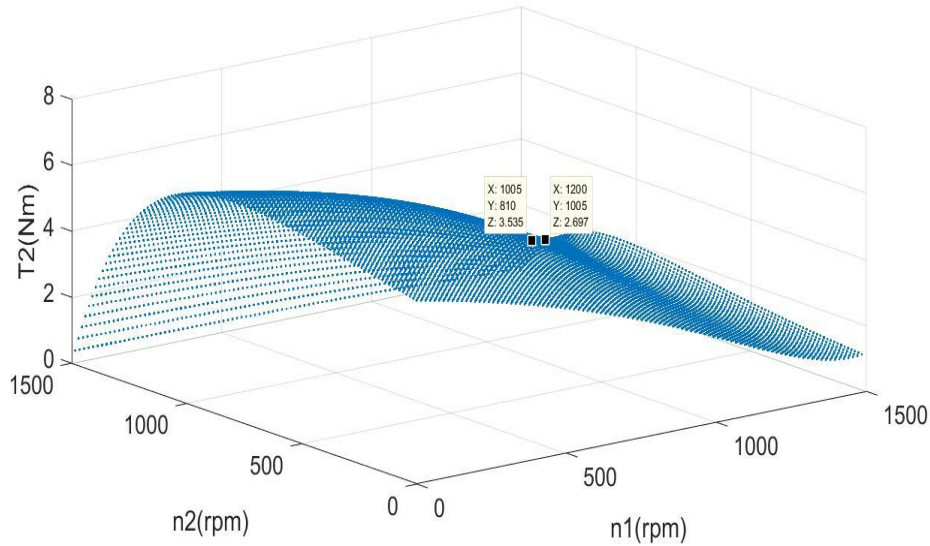
شکل (۴-۱): گشتاور خروجی موتور برای مثال ۱



شکل (۲-۴): گشتاورهای خروجی موتور برای مثال ۲



شکل (۳-۴): گشتاور خروجی محور ۱ برای مثال ۱ و ۲



شکل (۴-۴): گشتاور خروجی محور ۲ برای مثال ۱ و ۲

همان‌طور که مشخص است در مشخصه‌های مربوط به مدار معادل گشتاور خروجی محور ۱ در مثال ۱ برابر ۳/۲۹۴ و در المان محدود حدود ۳/۳، و برای محور ۲ به ترتیب ۲/۶۹۷ و حدوداً ۲/۷ می‌باشد. در مثال دو نیز گشتاور خروجی محور ۱ در مدار معادل و المان محدود به ترتیب ۴/۴ و حدوداً ۴/۳ و برای محور دو نیز ۳/۵۳۵ و ۳/۴ می‌باشد. با توجه به این شبیه‌سازی‌ها همان‌طور که مشخص است، توسط مدار معادل حالت دائمی براحتی DIR-AFIM در حالت دائمی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۴-۳- شبیه‌سازی در تمامی بارها

### ۴-۳-۱- گشتاور

نمودار گشتاور سرعت یک موتور القایی که یک فاصله هوایی و یا چند فاصله هوایی کوپل شده را دارد، این نکته را خاطرنشان می‌کند که با افزایش بار مکانیکی، سرعت مکانیکی روتور کاهش پیدا می‌کند. حال در

همین موتورها اگر با افزایش بار بتوان ولتاژ تغذیه را افزایش دهیم سرعت کاهش نخواهد یافت، که البته نیازمند ابزار کنترلی برای ولتاژ خواهیم بود.

در DIR-AFIM باتوجه به شبیه سازی‌ها این نکته قابل استخراج است که در حالتی که بار اعمالی به هر یک از محورها برابر باشد شار تولیدی استاتور به دو قسمت مساوی تقسیم خواهد شد و هر دو روتور در شرایط الکترومغناطیسی یکسانی قرار خواهند گرفت (همانند موتور القایی با یک فاصله هوایی یا چند فاصله هوایی کوپل شده). در شکل (۴-۵) نمودار تیره‌تر حالت‌هایی که سرعت هر دو سمت برابر است را نشان می‌دهد. حال اگر بار اعمالی سمت ۲ بیشتر و سمت ۱ کمتر شود، سرعت سمت ۱ بیشتر و سرعت سمت دیگر کمتر خواهد شد (بر خلاف حالت معمول موتور القایی). در شکل (۴-۶) فرض می‌شود هر دو سرعت برابر ۹۰۰ باشد، سپس سرعت ۱ کاهش، و سرعت ۲ افزایش داده می‌شود، نتایج گشتاورها این موضوع را تصدیق می‌کنند که بجای رابطه غیر مستقیم سرعت و گشتاور، رابطه مستقیم برقرار می‌شود. در همین راستا رابطه‌ای که برای گشتاور هر سمت نسبت به لغزش‌ها می‌توان بیان کرد به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{s_1 \left( \frac{R'_r}{s_2} \right) + X^2}{s_2 \left( \frac{R'_r}{s_1} \right) + X^2} \quad (1-4)$$

که در این رابطه  $X = X'_r + X_m$  است. طبق این رابطه اگر  $s_1 = s_2$  در نتیجه  $T_1 = T_2$  خواهد بود. ولی اگر لغزش‌ها با هم برابر نباشند و داشته باشیم:

$$\frac{R'_r}{s_1} ; \frac{R'_r}{s_2} < X \quad (2-4)$$

در این صورت رابطه تقریبی زیر برقرار خواهد بود:

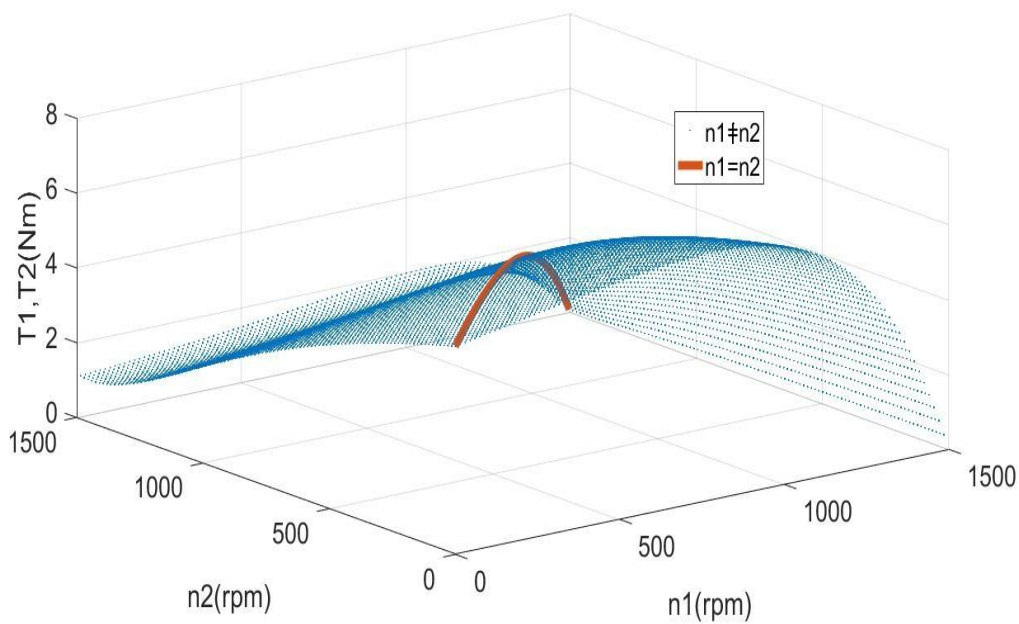
$$\frac{T_1}{T_2} \approx \frac{s_2}{s_1} \quad (3-4)$$

که نشان می‌دهد گشتاور بیشتر بر روی روتور پرسرعت‌تر خواهد بود. ولی اگر شرایط (۲-۴) به صورت زیر تغییر کنند:

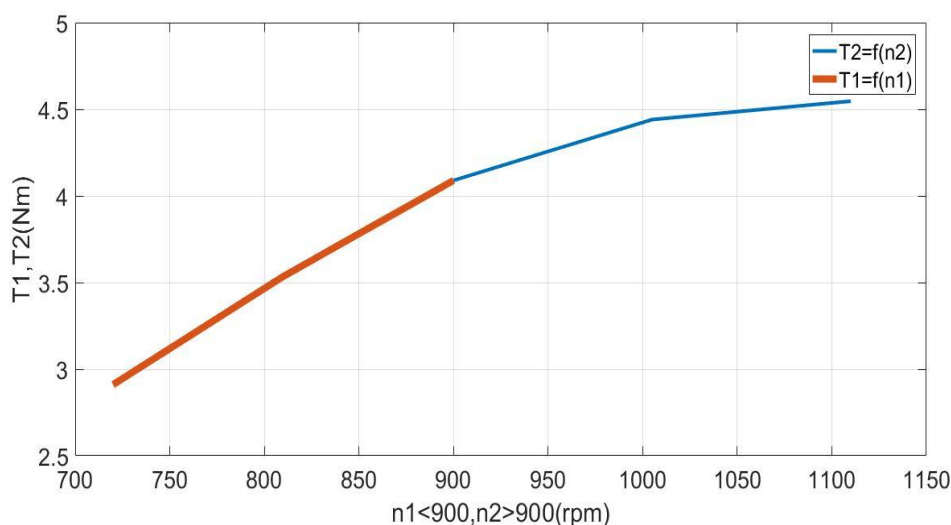
$$\frac{R_r}{s_1}; \frac{R_r}{s_2} > X \quad (4-4)$$

رابطه (۳-۴) نیز به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$\frac{T_1}{T_2} \approx \frac{s_1}{s_2} \quad (5-4)$$



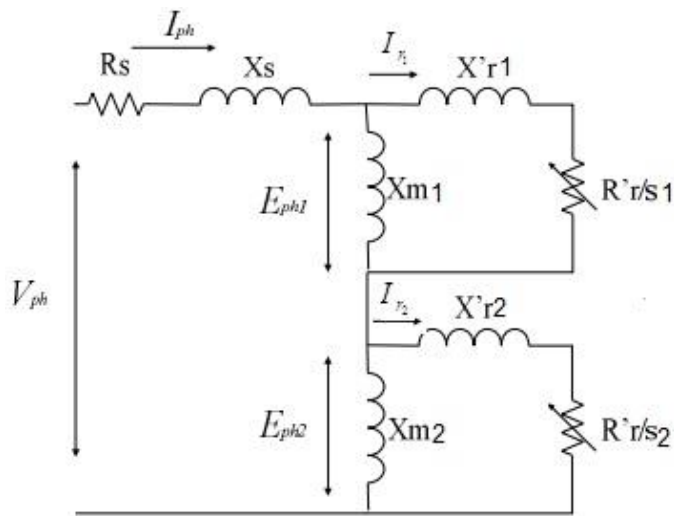
شکل (۵-۴): نمودار گشتاور سرعت در حالت‌های سرعت برابر و نابرابر



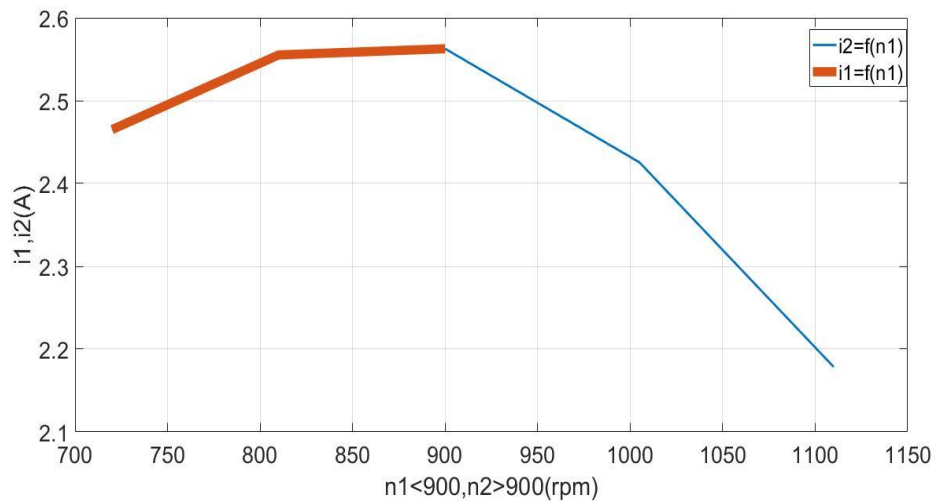
شکل (۴-۶): گشتاور ۱ و ۲ بر حسب کاهش سرعت ۱ و افزایش سرعت ۲ به طور هم‌زمان

### ۴-۳-۲- جریان و ولتاژ

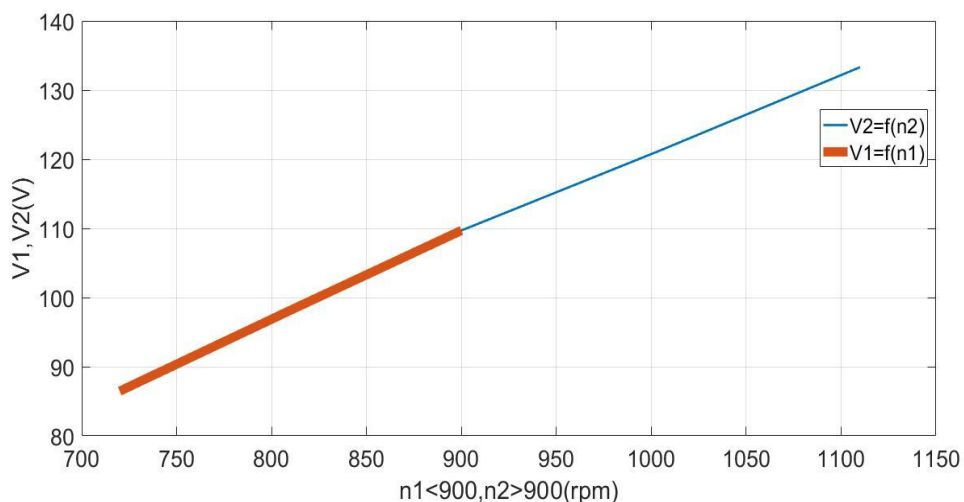
جریان و ولتاژ DIR-AFIM در حالت‌هایی که سرعت‌ها برابر هستند، برای هر دو طرف یکسان است. حال اگر همان فرضی را که برای گشتاور در نظر گرفته شد و سرعت‌ها تغییر یابند، در این‌جا نیز در نظر گرفته شود، جریان در میله‌های روتور ۲ کمتر می‌شود. تا زمانی که لغزش در سمت ۱ بیشتر است (سرعت کمتر) شار استاتور تمایل به حرکت در روتور ۱ دارد. اگر بار دیگر به مدار معادل این موتور نگاهی بیاندازیم (شکل (۴-۷)) زمانی که لغزش‌ها برابر هستند هر سمت از موتور نصف ولتاژ ورودی را سهم می‌شوند و جریان‌های روتورها نیز برابر است. اما اگر لغزش‌ها برابر نباشند و طبق فرض تغییر کنند سهم ولتاژ سمت ۱ کمتر و سمت ۲ بیشتر می‌شود و توزیع شار در هر فاصله هوایی متفاوت می‌شود. این شرایط با این فرض بیان می‌شوند که شار تولیدی استاتور که متناسب با ولتاژ  $V_s$  و تعداد دورهای آن ( $N_s$ ) می‌باشد تغییر نکنند. شکل‌های (۴-۸) و (۴-۹) به ترتیب جریان و ولتاژ هر سمت را نسبت به سرعت همان سمت نشان می‌دهد.



شکل (۴-۷): مدار معادل DIR-AFIM



شکل (۴-۸): جریان ۱ و ۲ بر حسب کاهش سرعت ۱ و افزایش سرعت ۲ به طور همزمان



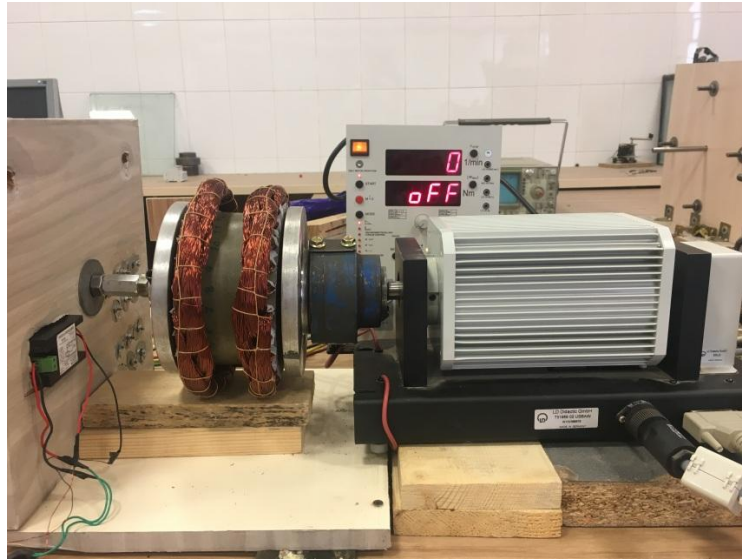
شکل (۹-۴): ولتاژ ۱ و ۲ بر حسب کاهش سرعت ۱ و افزایش سرعت ۲ به طور همزمان

با توجه به این روابط دیده می شود که مشخصات هر طرف از موتور به لغزش طرف دیگر بستگی دارد یعنی در هر لغزش برای سمت ۱ مشخصه های سمت ۲ متفاوت خواهد بود.

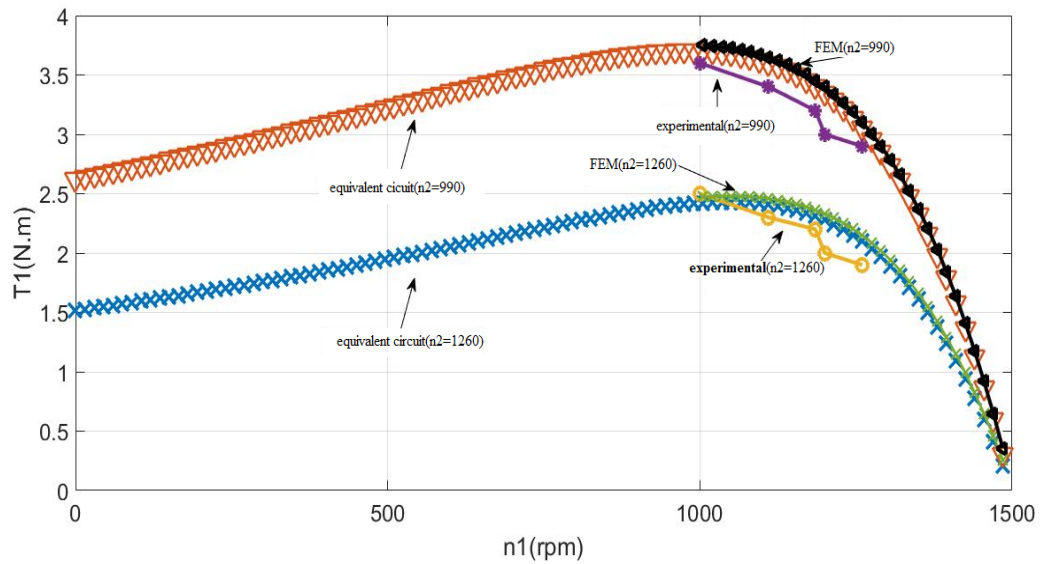
#### ۴-۴- نتایج تست عملی

برای تست عملی DIR-AFIM به یک گشتاورسنج نیاز است که باید به خروجی موتور کوپل شود. برای این منظور از ست LABOND استفاده می شود و مطابق شکل (۹-۴) با یکدیگر کوپل می شوند. با توجه به محدودیتی که در ساخت این موتور وجود داشت، تنها قادر به این خواهیم بود که یک سمت از موتور با گشتاورسنج کوپل، و مقدار آن اندازه گیری شود. به همین جهت برای بدست آمدن گشتاور سمت دیگر، از نتایج مدار معادل به عنوان فرض اولیه استفاده می شود و باری به این سمت اعمال خواهد شد. این بار آنقدر کم و زیاد می شود تا نقطه کار مورد نظر، با توجه به بار اعمالی توسط گشتاور سنج بدست آید. این روند برای بدست آوردن نمودار تست عملی استفاده شده است. شکل (۱۰-۴) نمودارهای این تست را نشان می دهد.





شکل (۴-۹): نحوه کوپل ست LAYBOND با DRI-AFIM

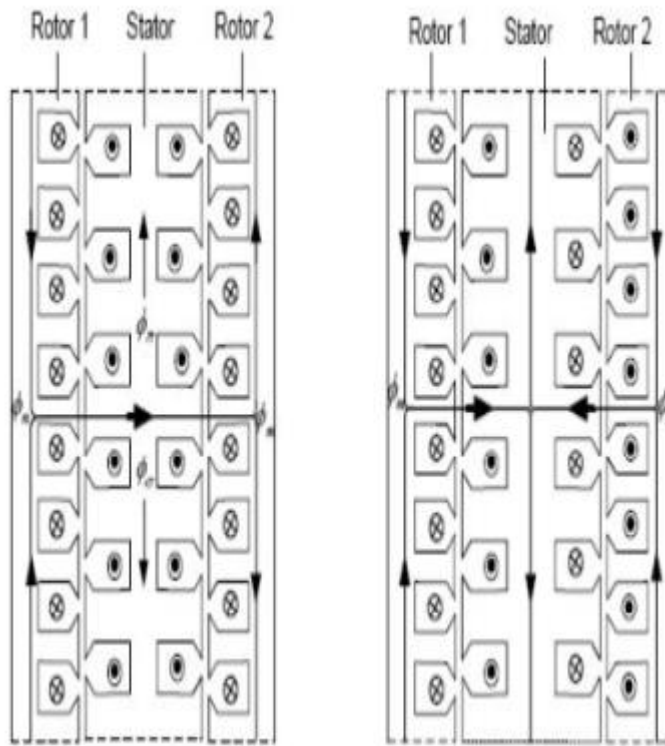


شکل (۴-۱۰): نتایج تست عملی و FEM بر روی نمودارهای بدست آمده از مدار معادل

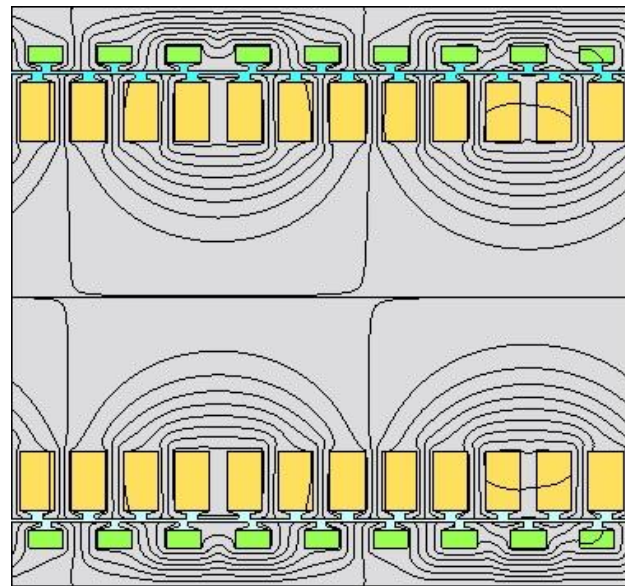
## ۴-۵- اتصال N-N و N-S

در ماشین‌های شارم‌حوری دو وجهی می‌توان به دو صورت استاتور را سیم‌پیچی کرد. هر کدام از این نوع سیم‌پیچی‌ها نحوه توزیع شار در استاتور و روتور را تعیین می‌کنند. در اتصال نوع اول (N-N) ابتدای کلاف از هر شیار که عبور می‌کند، انتهای آن نیز باید از سمت مقابل برگردد. در این صورت هر دو طرف استاتور قطب‌های هم‌نامی را ایجاد می‌کنند. در این اتصال مسیر شار هر روتور به‌طور جداگانه از استاتور بسته می‌شود و هسته استاتور مولفه محیطی شار را دارد. در نتیجه در این اتصال حتماً نیازمند یک هسته فرومغناطیس برای استاتور خواهیم بود. در اتصال نوع دوم (N-S) انتهای هر کلاف از شیار مقابل در سمت دیگر استاتور بر نمی‌گردد، بلکه به اندازه یک گام کلاف انتقال (شیفت) پیدا می‌کند. در این حالت دو طرف استاتور قطب‌های هم‌نامی نخواهند داشت و مسیر شار استاتور از دو هسته روتور بسته خواهد شد. در این اتصال می‌توانیم هسته استاتور را حذف کنیم. شکل (۴-۱۰) نحوه سیم‌پیچی و مسیر شار را در این دو اتصال نشان می‌دهد.

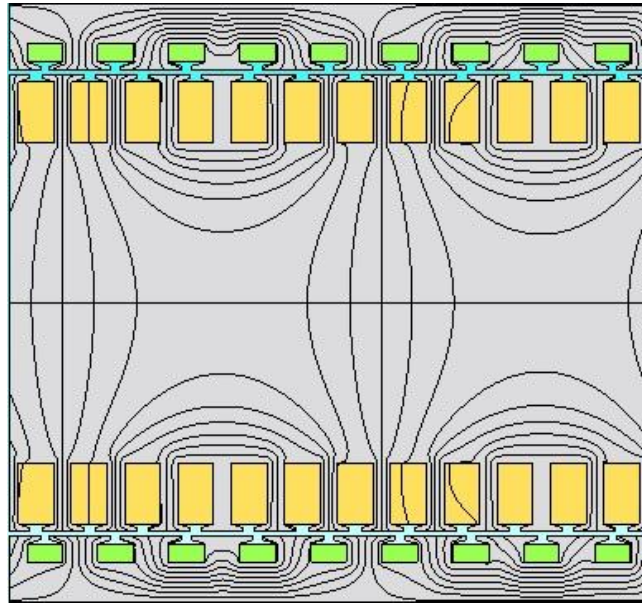
در موتور DIR-AFIM در حالت‌هایی که لغزش‌ها با هم برابر نیستند، ممکن است در حالت‌هایی شار استاتور افزایش پیدا کند و این موضوع باعث اشباع هسته بشود. برای جلوگیری از این اتفاق بهتر است تا سیم‌بندی استاتور به صورت N-S باشد. شکل‌های (۴-۱۱) و (۴-۱۲) نیز این نوع از سیم‌پیچی‌ها را در شبیه‌سازی‌المان محدود به ترتیب برای حالت‌های N-N و N-S نشان می‌دهند.



شکل (۴-۱۱): توزیع شار در ساختار N-N (راست) و N-S (چپ)



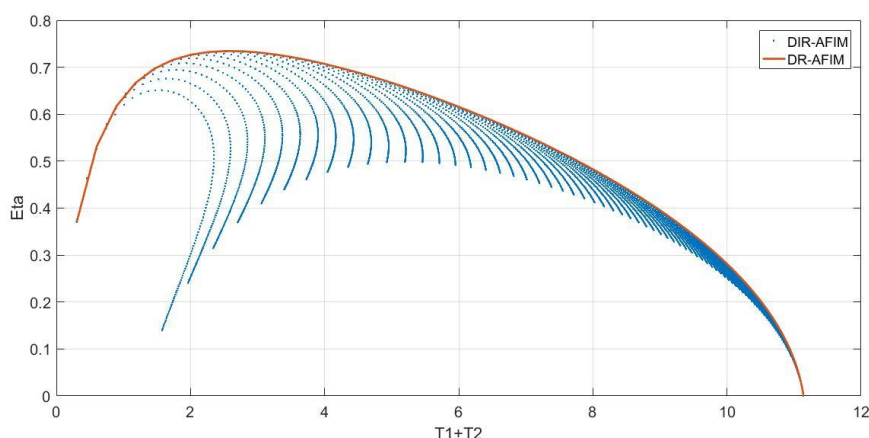
شکل (۴-۱۲): توزیع شار N-N در FEM



شکل (۴-۱۳): توزیع شار N-S در FEM

#### ۴-۶- مقایسه راندمان DIR-AFIM با DR-AFIM

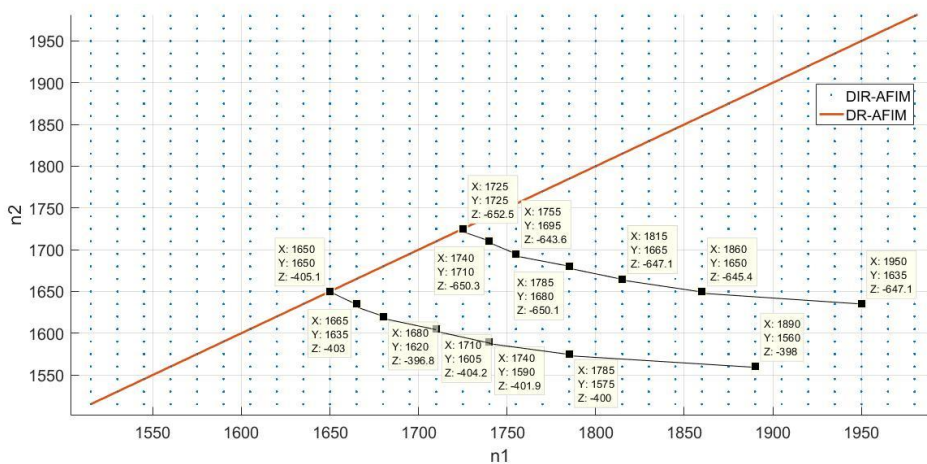
در صورتی که فرض شود روتورها به یکدیگر کوپل هستند (DR-AFIM) گشتاور خروجی حاصل از هر روتور برابر نصف گشتاور خروجی کل خواهد بود. به طوری که سهم هر روتور برابر خواهد بود. حال اگر موتور DIR-AFIM فرض شود و گشتاور نامساوی بر هر روتور اعمال شود (همان گشتاوری که به DR-AFIM به طور مساوی اعمال شده است) راندمان موتور در هیچ حالتی بهتر از DR-AFIM نخواهد شد. در واقع بهترین شرایط کاری برای یک موتور القایی این است که بار به طور مساوی بین هر سمت از موتور دو وجهی تقسیم شود. شکل (۴-۱۴) این مقایسه را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱۴): مقایسه راندمان DR-AFIM با DIR-AFIM

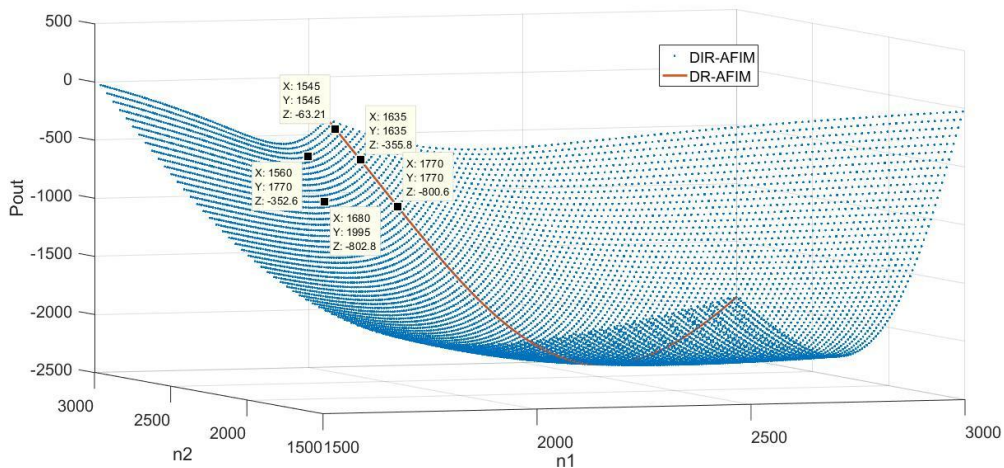
## ۴-۷- مد ژنراتوری

در یک موتور القایی در صورتی که بتوان توسط یک محرک خارجی سرعت شفت را از سرعت سنکرون بیشتر کرد (در ابتدا باید ماشین به یک شبکه متصل شود سپس سرعت سنکرون توسط فرکانس آن شبکه و تعداد قطب‌های استاتور تعیین شود) ماشین وارد حالت ژنراتوری خواهد شد. شکل (۴-۱۵) منحنی توان خروجی DIR-AFIM را برحسب سرعت نشان می‌دهد. از آنجایی که دو شفت از یکدیگر مستقل هستند، در واقع هر شفت (در حالت سرعت برابر) نیمی از توان خروجی را تولید می‌کند. جدا بودن این دو شفت و تقسیم ژنراتور به دو بخش کوچکتر این مزیت را به دنبال خواهد داشت که کنترل سرعت در حالت ژنراتوری در هر طرف نسبت به حالتی که تنها یک محور وجود داشته باشد راحت‌تر خواهد بود و ادوات مکانیکی آن دارای پیچیدگی کمتری خواهند بود. نکته دیگری را که با توجه به شکل (۴-۱۵) می‌توان استخراج کرد این است که، یک توان بخصوص را می‌توان به صورت ثابت در نظر گرفت که در سرعت‌های متفاوت رخ خواهند داد. در واقع با کمتر شدن سرعت شفت ۱ و بیشتر شدن سرعت شفت ۲ به یک میزان تقریباً توان خروجی ثابتی تولید خواهد شد.



شکل (۴-۱۵): توان خروجی در حالت ژنراتوری

شکل (۴-۱۶) نیز منحنی توان خروجی را برای DIR-AFIM نشان می‌دهد. در این شکل نشان داده شده است که برای بدست آوردن یه توان خروجی خاص نیازی به افزایش سرعت هر دو سمت نیست و تنها با افزایش یک محور می‌توان به توان خروجی مورد نظر دست پیدا کرد.



شکل (۴-۱۶): توان خروجی DIR-AFIM در حالت ژنراتوری

## ۴-۸- کاربرد های DIR-AFIM

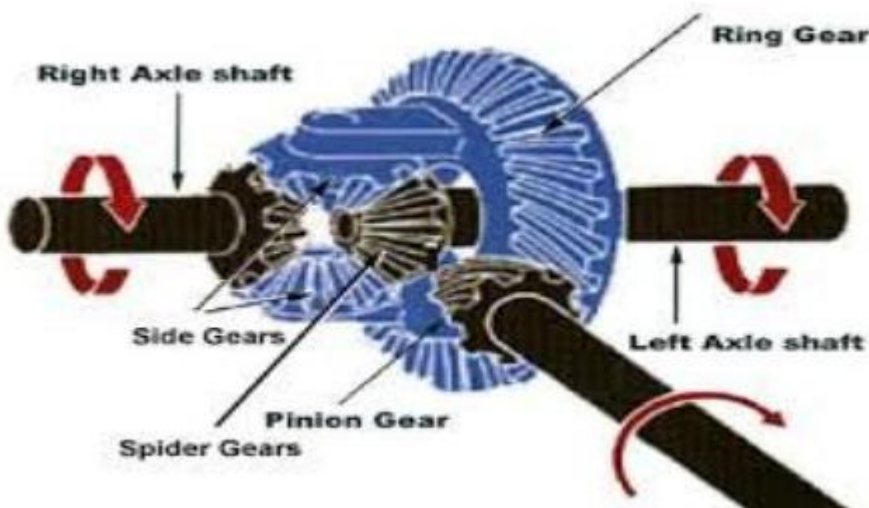
بکارگیری DIR-AFIM در حوزه صنعتی و یا تحقیقاتی، با توجه به رفتار این موتور در زمینه‌های مختلف، قابل برداشت است. حساسیت پارامترهای مختلف این موتور، نسبت به لغزش‌ها و انتخاب بازه کاری خاصی برای کاربردهایی که مشخصا از دو موتور استفاده می‌شود، می‌تواند مفید باشد. در اینجا دو نمونه از این کاربرد ها در دوبخش زیر مورد بحث قرار می‌گیرد.

### ۴-۸-۱- دیفرانسیل مغناطیسی

در یک خودرو که دارای یک موتور احتراقی و یا الکتریکی هست، یک دیفرانسیل مکانیکی وظیفه بوجود آوردن اختلاف سرعت در شرایط مختلف را برای دو چرخ محرک خودرو بر عهده دارد. زمانی که خودرو در یک مسیر مستقیم قرار دارد سرعت هر دو چرخ باید برابر باشند. در این موقعیت گیربکس نیرو را به صورت مساوی بین دو چرخ انتقال می‌دهد. زمانی که خودرو در یک مسیر منحنی قرار می‌گیرد، چرخ بیرونی باید سرعت بیشتری داشته باشد، همچنین نیروی بیشتری نیز بر روی این چرخ قرار می‌گیرد و طرف دیگر باید سرعت کمتر را در نیروی کمتر دارا باشد. یک دیفرانسیل مکانیکی که ساختار آن در شکل (۴-۱۳) نشان داده شده است، این شرایط را برای خودرو ایجاد می‌کند. موتور DIR-AFIM رفتاری دقیقا مشابه با آن‌چه که در دیفرانسیل مکانیکی رخ می‌دهد را داراست. یعنی چرخ‌هایی که بار بیشتری بر روی آن قرار می‌گیرد سرعت بیشتری را باید داشته باشد. از این رو در خودروهای الکتریکی می‌توان از این موتور به‌جای منبع محرک و دیفرانسیل مکانیکی تنها یک DIR-AFIM استفاده کرد.

نکته‌ای که در اینجا باید به آن دقت کرد این است که در خودرویی که از دیفرانسیل مکانیکی در آن استفاده شده است، سرعتی که خودرو با آن وارد یک پیچ می‌شود حائز اهمیت نبوده و به‌صورت خیلی دقیق اختلاف سرعت را با توجه به شعاع پیچ، بین دو چرخ ایجاد می‌کند. در حالی که اگر شعاع پیچ را

ثابت فرض کنیم خودرو با هر سرعتی که وارد پیچ بشود نیروهای متفاوتی بر هر کدام از چرخ‌ها وارد می‌شود.



شکل (۴-۱۷): دیفرانسیل مکانیکی و نحوه کار آن

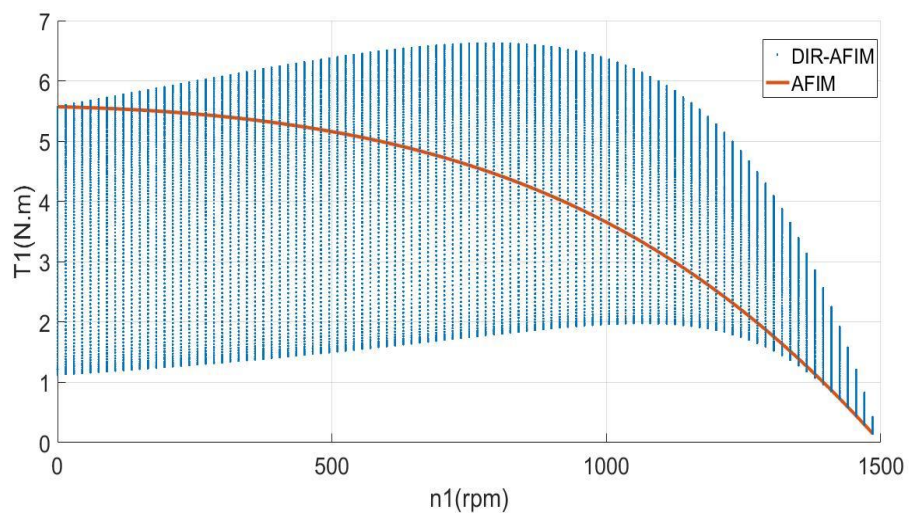
در این حالت اگر از DIR-AFIM استفاده می‌کنیم، لازم است تا با تغییر ولتاژ و فرکانس ورودی نقطه کار ماشین را طوری توسط یک سیستم کنترلی عوض کنیم که دقیقا همان اختلاف سرعت مورد نظر بین دو چرخ ایجاد شود. این موضوع خود به تنهایی می‌تواند موضوعی مجزا برای یک پژوهش در نظر گرفته شود.

#### ۴-۸-۲- گشتاور بالا در سرعت بالا

شکل (۴-۱۴) نمودار گشتاور سرعت موتور القایی یک طرفه و DIR-AFIM را برای یک سمت به صورت دو بعدی نشان می‌دهد. نمودار خط مربوط به موتور یک طرفه و مجموع نقاط همان موتور یک طرفه که به صورت سری با یک موتور مشابه قرار گرفته است. با توجه به این شکل در حالت موتور معمولی، در هر سرعتی تنها یک گشتاور خواهیم داشت، اما در DIR-AFIM (مجموعه نقاط روی شکل) تقریبا در هر سرعتی، هر گشتاوری را خواهیم داشت. البته تغییر نقطه کار از نمودار خط به مجموعه نقاط، نقطه کار



سمت دیگر موتور را نیز تغییر خواهد داد که با توجه به مطالعه این موتور و کاربرد مورد نظر، می توان نقطه بهینه را انتخاب و مورد استفاده قرار داد.



شکل (۴-۱۸): مقایسه نمودار گشتاور سرعت DIR-AFIM با موتور القایی معمولی



## فصل ۵: جمع‌بندی و پیشنهادات

## ۵-۱- جمع بندی

عناوین فعالیت‌های انجام‌شده در این پایان‌نامه به‌صورت زیر هستند:

۱. محاسبه تمام معادلات ابعادی لازم برای طراحی یک موتور القایی شار محوری دو روتوره.
۲. محاسبه مدل مدار معادل الکتریکی این موتور و ارزیابی قابلیت آن در پیش‌بینی عملکرد موتور در شرایط مختلف کاری در مقایسه با مدل المان محدود موتور.
۳. ارائه یک الگوریتم طراحی برای این موتور با استفاده از معادلات ابعادی و مدار معادل الکتریکی
۴. ارائه نحوه مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی در محیط المان محدود
۵. بررسی موتور القایی شارمحوری دو روتوره (DIR-AFIM) با استفاده از روش‌های عددی و مدار معادل الکتریکی و تصدیق این نوع بررسی توسط روش‌های المان محدود
۶. دو نمونه کاربرد برای این موتور بیان شد که در نمونه اول کاربرد کاملاً مشخص است و برای استفاده صنعتی نیاز به مطالعات بیشتر برای رسیدن به نمونه واقعی را دارد و نمونه دوم یک کاربرد کلی‌تر است که با توجه به نیاز مصرف‌کننده می‌توان موتوری را طراحی و استفاده کرد که علاوه بر داشتن مزیت‌های یک موتور القایی دارای مشخصه‌های کاملاً متفاوت نسبت به آن باشد.

## ۵-۲- پیشنهادات

برخی از پیشنهادات حاصل از انجام این پروژه، به‌عنوان فعالیت‌های مفید آتی از قرار زیرند:

- طراحی بهینه DIR-AFIM با استفاده از الگوریتم طراحی ارائه‌شده.
- بهبود معادلات و الگوریتم طراحی موتور به‌خصوص در بخش مدل‌سازی مدار معادل. محاسبه پراکندگی‌های انتهایی موتور می‌تواند در این خصوص مؤثر باشد.

- ارزیابی ساخت موتور با استفاده از روش‌های ساده‌تر. به‌عنوان مثال میزان تغییر مشخصه‌های موتور با هسته روتور یکپارچه مورد بررسی قرار بگیرد.
- بررسی امکان استفاده از خاصیت دو روتوره بودن، برای بهبود راه‌اندازی موتور.
- تحلیل عملکرد موتور با تعداد شیار متفاوت در دو روتور.
- مدل‌سازی تحلیلی موتور جهت محاسبه هارمونیک‌های گشتاور بدون نیاز به استفاده از FEM

## مراجع

- [1] W. Leung and J. Chan, "Axial-field electrical machines-design and application," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 99, pp. 1679-1685, 1980.
- [2] M. Valtonen, *Performance characteristics of an axial-flux solid-rotor-core induction motor*: Lappeenranta University of Technology, 2007.
- [3] Z. Nasiri-Gheidari and H. Lesani, "Optimal design of adjustable air-gap, twospeed, capacitor-run, single-phase axial flux induction motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 28, pp. 543-552, 2013.
- [4] M. Mirzaei, M. Mirsalim, and S. E. Abdollahi, "Analytical modeling of axial air gap solid rotor induction machines using a quasi-three-dimensional method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, pp. 3237-3242, 2007.
- [5] M. S. M. Valtonen, D. S. A. Parviainen, and J. PyrhOnen, "Electromagnetic field analysis of 3D structure of axial-flux solid-rotor induction motor," in *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006.*, 2006, pp. 174-178.
- [6] Z. Nasiri-Gheidari and H. Lesani, "A survey on axial flux induction motors," *Przegla d Elektrotechniczny (Electrical Review)*, vol. 88, pp. 300-305, 2012.
- [7] F. Caricchi, F. Crescimbin, F. Mezzetti, and E. Santini, "Multistage axialflux PM machine for wheel direct drive," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, pp. 882-888, 1996.
- [8] F. Zhao, T. A. Lipo, and B.-I. Kwon, "A novel dual-stator axial-flux spoketype permanent magnet vernier machine for direct-drive applications," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, pp. 1-4, 2014.
- [9] S. J. Arand and M. Ardebili, "Multi-objective design and prototyping of a low cogging torque axial-flux PM generator with segmented stator for small-scale direct-drive wind turbines," *IET Electric Power Applications*, vol. 10, pp. 889-899, 2016.

- [10] I. Boldea, *The induction machines design handbook*: CRC press, 2009.
- [11] R. Chitroju, "Improved performance characteristics of induction machines with non-skewed symmetrical rotor slots," 2009.
- [12] J. Pyrhonen, T. Jokinen, and V. Hrabovcová, *Design of rotating electrical machines*: John Wiley & Sons, 2009.
- [13] H. Shim, S. Wang, and K. Lee, "3-D optimal design of induction motor used in high-pressure scroll compressor," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, pp. 2076-2084, 2009.
- [14] W. Cao, B. C. Mecrow, G. J. Atkinson, J. W. Bennett, and D. J. Atkinson, "Overview of electric motor technologies used for more electric aircraft (MEA)," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, pp. 3523- 3531, 2012.
- [15] S.-J. Lee, J.-M. Kim, D.-K. An, and J.-P. Hong, "Equivalent circuit considering the harmonics of core loss in the squirrel-cage induction motor for electrical power steering application," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, pp. 1-4, 2014.
- [16] A. G. Benoudjit, N. Nait Saïd, A, "Axial flux induction motor for on-wheel drive propulsion system," *Electric Machines & Power Systems*, vol. 28, pp. 1107-1125, 2000.
- [17] J. Varga, "Magnetic and dimensional properties of axial induction motors," *IEEE transactions on energy conversion*, pp. 137-144, 1986.
- [18] S. Kubzdela and B. Weglinski, "Magnetodielectrics in induction motors with disk rotor," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 24, pp. 635-638, 1988.
- [19] A. Álvarez, P. Suárez, D. Caceres, E. Cordero, J.-M. Ceballos, and B. Pérez, "Disk-shaped superconducting rotor under a rotating magnetic field: Speed dependence," *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 15, pp. 2174-2177, 2005.
- [20] A. González-Parada, F. Espinosa-Loza, A. Castaneda-Miranda, R. BoschTous, and X. Granados-Garcia, "Application of HTS BSCCO tapes in an ironless axial flux

superconductor motor," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, pp. 5201004-5201004, 2012.

[21] J. Igelspacher and H.-G. Herzog, "Analytical description of a single-stator axial-flux induction machine with squirrel cage," in *Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on*, 2010, pp. 1-6.

[22] Z. Nasiri-Gheidari and H. Lesani, "Theoretical modeling of axial flux squirrel cage induction motor considering both saturation and anisotropy," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 24, pp. 335- 346, 2014.

[23] K. Taniguchi, M. Inoue, Y. Takeda, and S. Morimoto, "A PWM strategy for reducing torque-ripple in inverter-fed induction motor," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 30, pp. 71-77, 1994.

[24] L. Romeral, A. Arias, E. Aldabas, and M. G. Jayne, "Novel direct torque control (DTC) scheme with fuzzy adaptive torque-ripple reduction," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, pp. 487-492, 2003.

[25] G. Kron, "Induction Motor Slot Combinations Rules to Predetermine Crawling, Vibration, Noise and Hooks in the Speed-Torque Curve," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 50, pp. 757-767, 1931.

[26] B.-T. Kim, B.-I. Kwon, and S.-C. Park, "Reduction of electromagnetic force harmonics in asynchronous traction motor by adapting the rotor slot number," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, pp. 3742-3744, 1999.

[27] J. Le Besnerais, V. Lanfranchi, M. Hecquet, and P. Brochet, "Optimal slot numbers for magnetic noise reduction in variable-speed induction motors," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, pp. 3131-3136, 2009.

[28] K. N. Gyftakis and J. Kappatou, "The impact of the rotor slot number on the behaviour of the induction motor," *Advances in Power Electronics*, vol. 2013, 2013.



- [29] Y. Kawase, T. Yamaguchi, Z. Tu, N. Toida, N. Minoshima, and K. Hashimoto, "Effects of skew angle of rotor in squirrel-cage induction motor on torque and loss characteristics," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, pp. 1700-1703, 2009.
- [30] C. I. McClay and S. Williamson, "The variation of cage motor losses with skew," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, pp. 1563-1570, 2000.
- [31] D. G. Dorrell, P. J. Holik, and C. B. Rasmussen, "Analysis and effects of inter-bar current and skew on a long skewed-rotor induction motor for pump applications," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 43, pp. 2534-2536, 2007.
- [32] H. Kometani, S. Sakabe, and A. Kameari, "3-D analysis of induction motor with skewed slots using regular coupling mesh," *IEEE Transactions on magnetics*, vol. 36, pp. 1769-1773, 2000.
- [33] T. Yamaguchi, Y. Kawase, and S. Sano, "3-D finite-element analysis of skewed squirrel-cage induction motor," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 40, pp. 969-972, 2004.
- [34] S. Williamson, T. J. Flack, and A. F. Volschenk, "Representation of skew in time-stepped two-dimensional finite-element models of electrical machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, pp. 1009-1015, 1995.
- [35] D. G. Dorrell, P. J. Holik, P. Lombard, H.-J. Thougard, and F. Jensen, "A multisliced finite-element model for induction machines incorporating interbar current," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, pp. 131-141, 2009.
- [36] Z. Haisen, Z. Jian, W. Xiangyu, W. Qing, L. Xiaofang, and L. Yingli, "A design method for cage induction motors with non-skewed rotor bars," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, pp. 769-772, 2014.
- [37] L. Wang, X. Bao, C. Di, and J. Li, "Effects of Novel Skewed Rotor in Squirrel-Cage Induction Motor on Electromagnetic Force," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, pp. 1-4, 2015.

[38] L. Wang and Y. Zhou, "Influence on Vibration and Noise of Squirrel-cage Induction Machine with Double Skew Rotor for Different Slot Combination."

[۳۹] طاهری پور م ع، ۱۳۹۴ پایان نامه کارشناسی ارشد، "مدلسازی، طراحی و ساخت موتور القایی تخت قفس سنجابی شار محوری سه فاز با استاتور بدون هسته"، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[40] A. Mahmoudi, S. Kahourzade, N. A. Rahim, and W. P. Hew, "Design, analysis, an prototyping of an axial-flux permanent magnet motor based on genetic algorithm and finite-element analysis," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, pp. 1479-1492, 2013.

[41] J. F. Gieras, R.-J. Wang, and M. J. Kamper, *Axial flux permanent magnet brushless machines*: Springer Science & Business Media, 2008.

[42] A. Mahmoudi, N. A. Rahim, and H. W. Ping, "Axial-flux permanent-magnet motor design for electric vehicle direct drive using sizing equation and finite element analysis," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 122, pp. 467- 496, 2012.

[43] N. Bianchi, *Electrical machine analysis using finite elements*: CRC press, 2005

## **Abstract:**

In this thesis, proper design of a dual rotor axial flux induction motor is studied. Firstan algorithm is presented for design of this motor by using of sizing equations and electrical equivalent circuit model, then its two and three dimensional finite element models are developed. The models results show the validity and good precision of design algorithm. Also the ability and precision of two dimensional finite elements model is evaluated by comparing with three dimensional model, whereas its advantages in computation costs. Construction of this machine confirms the simulation results. Dual independent rotor axial flux induction machine provides unique features. We will have a motor that its characteristics is different from conventional induction motor. A special application for this motor is presented in this thesis which can be used in electric vehicles.

*Keywords:* Double rotor axial flux induction motor whit independent shafts, magnetic differential, electric vehicles



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Electrical and Robotic Engineering**

**M.Sc Thesis in Power Electronic and Machine Engineering**

**Design, modeling and prototyping of a dual-rotor axial-flux  
induction motor with independent bearings**

**By: poria soheili**

**Supervisor:**  
**Dr. Ahmad Darabi**

**September 2018**