

اسد الحق



دانشکده برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت

# طراحی یک موتور سنکرون چند فاز با سیم پیچ میدان ابرسیانای دمای بالا

نگارش:

مهدی کاشانی

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

استاد مشاور:

مهندس احمد مددی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت

بهمن ۱۳۹۱



بسمه تعالی

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

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

مهدی کاشانی رشته : برق گرایش : قدرت

تحت عنوان : طراحی یک موتور سنکرون چند فاز با سیم پیچ میدان ابر رسانای دمای بالا

که در تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۱۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول ( با درجه : بسیار خوب امتیاز ۱۸/۲۷ )  دفاع مجدد  مردود

۱- عالی ( ۲۰ - ۱۹ )

۲- بسیار خوب ( ۱۸/۹۹ - ۱۸ )

۳- خوب ( ۱۷/۹۹ - ۱۶ )

۴- قابل قبول ( ۱۵/۹۹ - ۱۴ )

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	لهر رازی	رئیس	
۲- استاد مشاور	احمد حوزی	دبیر	
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	مرتضی رحیمی	استاد	
۴- استاد ممتحن	علی رستگار	استاد	
۵- استاد ممتحن	سعید ابرازاد	استاد	

رئیس دانشکده :

در حمد تو چه می توان گفت که قصور کلامم در ستایش خود ستودنی است

---

تقدیم به پدرم که نور وجودش دلیل زندگی ام و

مادرم که دلیل زندگی ام را معنا بخشید

## تقدیر و تشکر

### خدایا تو را سپاس

خدایا تو را سپاس به پاس توفیق آگاهی که به من ودیعه دادی. خدایا همچون گذشته به من قدرتی عطا کن تا به استقبال آینده‌ایی روشن پیش روم، صبر مرحمت فرما تا در سختی‌های روزگار دوباره بکوشم. امیدم، رویایی تازه است در انتظار، کمک کن تا بدان دست یابم.

با توجه به عنایات خاصه خداوند متعال، مساعدت و یاری خانواده عزیز، اساتید بزرگوار و دوستان مهربانم، اکنون که پایان نامه خود را به پایان رسانده‌ام بر خود لازم می‌دانم تا مراتب تشکر و قدردانی خود را ابراز نموده و کمال تشکر و امتنان را دارم.

در ابتدا پدرم که همواره بهترین پشتیبانم بوده است. مادرم که محکم‌ترین تکیه‌گاه زندگی‌ام است. سپس دوستان عزیزم که محبت‌های بی‌دریغشان هرگز فروکش نمی‌کند.

استاد ارجمند، آقای دکتر احمد دارابی که با راهنمایی‌های ارزنده، زحمات بی‌دریغ و تلاش‌های بی‌وقفه‌اشان در تمام مراحل انجام این پروژه، ره‌گشای اینجانب بودند.

استاد بزرگوارم، آقای مهندس احمد مددی برای تمام رهنمودها و زحمات فراوانی که به اینجانب ارزانی داشتند.

همچنین تشکر ویژه از جناب آقای مهندس امیر حسن‌نیا برای تمامی حمایت‌ها و راهنمایی‌هایی که نسبت به اینجانب ارزانی داشتند.

کارمندان محترم دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود، به ویژه آقای یونسین مسئول محترم آموزش تحصیلات تکمیلی، آقای لطفی و دیگر پرسنل محترم که همیشه مرا از رهنمودهایشان بهره‌مند کردند.

و در نهایت دوستانم: آقایان کاوه صرافان، رامین مختاری، حمید سلیمانی، حسین آذرین‌فر، هادی لمعی، میثم رحمتیان و دیگر دوستانم که همواره، همراه بی‌منت‌م بودند.

# تعهد نامه

اینجناب **محمد کامرانی** ..... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی برق** ..... دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان :

**طراحی یک منبر نقره خیزند ساز با سیم پیچ صوتی ابررسانای دما**

تحت راهنمایی آقای دکتر **احمد دلیلی** ..... متعهد می شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجناب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافت های آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ: ۱۳۹۱/۱۱/۱۸

امضاء دانشجو

## مالکیت نتایج و حق نشر

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

## لیست مقالات استخراج شده از پایان نامه:

- [1]-M. Kashani *et al*, “Design of synchronous motor with high temperature superconductive field windings for marine propulsion applications”, Electric power components and systems, Vol 41, No. 4, pp. 413-426, January 2013.
- [2]- M. Kashani *et al*, “Design a twelve phase 1.1Mw low voltage HTS motor for marine application systems”, International review of electrical engineering, Vol. 7, No. 5, pp. 5496-5505, 2012.
- [3]- M. Kashani *et al*, “Design a HTS motor for marine propulsion applications”, 8<sup>th</sup> international conference on ICTPE, No.14, pp. 64-68, 2012.
- [4]- M. Kashani *et al*, “Design Rotor Power Supply for a Synchronous Motor with HTS Field Windings”, ICATE 2012, To be published.
- [5]- M. Kashani *et al*, “Design a cryogenic structure for a 1.1 MW synchronous motor with HTS field windings”, ICATE 2012, To be published.

## چکیده

امروزه نوارهای ابرسانای دما بالا به دلیل خواص الکتریکی فوق‌العاده خود پتانسیل قابل توجهی برای ورود به بازارهای جهانی ماشین‌های الکتریکی از خود نشان داده‌اند. با توجه به این نکته که نوارهای ابرسانای بکار رفته در سیم‌پیچ‌های ابرسانا مقاومت الکتریکی در مقابل عبور جریان از خود نشان نمی‌دهند این امکان وجود دارد که با بکارگیری این نوارها در سیم‌پیچ‌ها و افزایش آمپردور لازم، بخشی از آهن سنگین تشکیل دهنده ماشین حذف شده و مواد غیرمغناطیسی سبک‌تر و مستحکم جایگزین آن گردد. در این طرح یک موتور سنکرون صنعتی با بکارگیری تکنولوژی ابرساناها طراحی شده است. بر خلاف موتورهای سنکرون ابرسانای هسته هوایی برای اولین بار در این طرح بخشی از آهن معمول بکار رفته در روتور حذف شده و با ماده غیرمغناطیسی سخت نظیر فایبرگلاس G-10 جایگزین شده است. این طرح جدید "روتور چند پارچه" نامیده شده و با کاهش وزن روتور چرخان قادر خواهد بود با افزایش طول عمر مکانیکی موتور قابلیت اطمینان کاری موتور را نیز افزایش دهد. در ادامه پس از طراحی، موتور مورد آنالیز اجزاء محدود قرار گرفته تا حفظ خاصیت ابرسانایی در موتور تضمین شود. همینطور علاوه بر فرآیند طراحی موتور توسط اجزاء محدود تحلیل شده و تعدادی از پارامترهای دیگر موتور از قبیل اندوکتانس‌های خودی و متقابل محاسبه و در نهایت هزینه تمام شده و وزن موتور بررسی و تغذیه ابرسانا و ساختار سردکننده پیشنهادی معرفی می‌شوند. در نهایت انتظار می‌رود موتور طراحی شده ضمن کاهش وزن موتور و افزایش قابلیت اطمینان، در حال کار عادی با بازدهی بالای ۹۷ درصد عملکرد مناسبی داشته باشد.

**کلمات کلیدی:** موتور سنکرون، روتور چند پارچه، سیم‌پیچ ابرسانا، المان محدود



## فهرست مطالب

۱- فصل اول.....	ن
۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۲- تاریخچه ابرسانا.....	۳
۱-۳- پدیده ابرسانایی.....	۵
۱-۴- اثر مایسنر.....	۷
۱-۵- مهمترین خواص عمومی ابرساناها.....	۸
۱-۶- تقسیم‌بندی ابرساناها.....	۹
۱-۶-۱- تقسیم‌بندی بر اساس ساختار ماده ابرسانا شامل خالص و مرکب.....	۹
۱-۶-۲- تقسیم‌بندی بر اساس اثر مایسنر.....	۱۱
۱-۶-۳- تقسیم‌بندی ابرساناها بر اساس دمای گذار.....	۱۱
۱-۶-۳-۱- ابرساناهای دما پایین LTS.....	۱۱
۱-۶-۳-۲- ابرساناهای دما بالا HTS.....	۱۲
۱-۶-۳-۳-۱- ابرسانای BSCCO.....	۱۲
۱-۶-۳-۳-۲- ابرسانای YBCO.....	۱۳
۱-۷- کاربرد ابرساناها.....	۱۴
۲- فصل دوم.....	۱۷
۲-۱- مقدمه.....	۱۸
۲-۲- ترانسفورماتورهای قدرت.....	۱۹
۲-۳- موتورهای ابرسانا و انواع آن.....	۲۰
۲-۴- ژنراتورهای ابرسانا.....	۲۳
۲-۵- سیستم رانش ابرسانا.....	۲۴
۳- فصل سوم.....	۲۶
۳-۱- مقدمه.....	۲۷
۳-۲- ماده ابرسانا.....	۲۸
۳-۲-۱- توضیحات ساختاری ابرسانا.....	۲۸

۳۱	مقایسه ابرساناهای موجود در بازار.....	۲-۲-۳
۳۲	طرح موتور ابرسانا.....	۳-۳
۳۲	سیم‌پیچ ابرسانا.....	۱-۳-۳
۳۳	استاتور هسته هوایی در ماشین ابرسانا.....	۲-۳-۳
۳۴	استاتور با سیم‌پیچ ابرسانا.....	۳-۳-۳
۳۵	روتور ابرسانا.....	۴-۳-۳
۳۸	مناسب‌ترین ساختار با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی.....	۴-۳
۴۳	استاتور موتور سنکرون ابرسانا با سیم‌پیچ ابرسانای میدان.....	۱-۴-۳
۴۴	روتور در موتور سنکرون ابرسانا با سیم‌پیچ میدان ابرسانا.....	۲-۴-۳
۴۵	ابرسانا در سیم‌پیچی میدان.....	۳-۴-۳
۴۸	فصل چهارم.....	۴
۴۹	مقدمه.....	۱-۴
۴۹	اصول طراحی.....	۲-۴
۵۰	طراحی موتور سنکرون با سیم‌پیچ میدان ابرسانا.....	۳-۴
۵۰	توضیحات ساختاری.....	۱-۳-۴
۵۴	فاز اول طراحی.....	۲-۳-۴
۵۴	طراحی روتور.....	۱-۲-۳-۴
۶۳	طراحی استاتور.....	۲-۲-۳-۴
۶۹	فاز دوم طراحی.....	۳-۳-۴
۶۹	جزئیات هسته مغناطیسی روتور و دندانه‌های استاتور.....	۱-۳-۳-۴
۷۲	طراحی دمپر.....	۲-۳-۳-۴
۷۳	المان محدود.....	۳-۳-۳-۴
۷۴	معرفی روش المان محدود.....	۱-۳-۳-۳-۴
۷۵	آنالیز مغناطیسی اجزاء محدود.....	۲-۳-۳-۳-۴
۹۰	مقایسه، پیشنهادات و برآورد هزینه تمام شده.....	۴-۳-۳-۴
۹۵	کاربرد طرح.....	۵-۳-۳-۴

۹۶.....	فصل پنجم.....	۵-
۹۷.....	سیستم تغذیه موتور ابرسانا.....	۵-۱-
۹۷.....	مقدمه‌ای بر سیستم تغذیه ابرسانا.....	۵-۱-۱-
۹۷.....	ساختار سیستم تغذیه ابرسانا.....	۵-۱-۲-
۱۰۰.....	قطع و وصل گرم‌کن‌ها.....	۵-۱-۳-
۱۰۲.....	عملکرد سیستم تغذیه.....	۵-۱-۴-
۱۰۶.....	ساختار سردکننده موتور.....	۵-۲-
۱۰۶.....	مقدمه‌ای بر سیستم سردکننده.....	۵-۲-۱-
۱۰۷.....	انواع سیستم سردکننده.....	۵-۲-۲-
۱۰۸.....	ساختار سردکننده مناسب برای موتور طراحی شده.....	۵-۲-۳-
۱۱۴.....	فصل ششم.....	۶-
۱۱۸.....	مراجع.....	❖

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- تغییر مقاومت با کاهش دما..... ۲
- شکل ۱-۲- تاریخچه ابرساناها..... ۵
- شکل ۱-۳- معلق ماندن یک ابرسانا روی یک مغناطیس دائم..... ۶
- شکل ۱-۴- رابطه عوامل دخیل در پدیده ابرسانایی..... ۶
- شکل ۱-۵- هادی کامل در حضور میدان مغناطیسی (سمت راست)، ابرسانا در حضور میدان مغناطیسی و بروز پدیده مایسنر (سمت چپ)..... ۷
- شکل ۱-۶- عناصر ابرسانای نوع ۱، آبی در فشار محیط و سبز نیاز به حضور فشار زیاد..... ۱۰
- شکل ۱-۷- ساختار BSCCO..... ۱۲
- شکل ۱-۸- ساختار YBCO..... ۱۳
- شکل ۱-۹- خلاصه‌ای از کاربرد ابرساناها..... ۱۵
- شکل ۱-۱۰- رشد استفاده از ابرساناها..... ۱۶
- شکل ۲-۱- شمای یک ترانسفورماتور HTS سه فاز (سمت راست)، شمای درونی یک ترانسفورماتور HTS سه فاز (سمت چپ)..... ۲۰
- شکل ۲-۲- ساختار موتور سنکرون HTS..... ۲۱
- شکل ۲-۳- موتور DC ابرسانا (بالا)، موتور شار محوری ابرسانا (پایین)..... ۲۲
- شکل ۲-۴- موتور القایی ابرسانا (بالا) موتور سنکرون ابرسانا (پایین)..... ۲۳
- شکل ۲-۵- نمونه‌ای از یک ژنراتور ابرسانا..... ۲۳
- شکل ۲-۶- کاربرد موتورهای ابرسانا در اتومبیل، هواپیما، زیردریایی و کشتی..... ۲۵
- شکل ۳-۱- سیر تکامل ماشین‌های ابرسانا..... ۲۸
- شکل ۳-۲- نسل اول، Bi-2223 (سمت چپ) و نسل دوم، YBCO (سمت راست)..... ۲۹
- شکل ۳-۳- ظاهر و ساختار نوعی نوار ابرسانای نسل دوم..... ۳۰
- شکل ۳-۴- مقایسه هزینه YBCO و Bi-2223..... ۳۱
- شکل ۳-۵- سیم‌پیچ پنکیک نمونه و دستگاه سازنده‌اش..... ۳۳
- شکل ۳-۶- استاتور هسته هوایی بدون حضور دندانه (سمت راست)، سیم‌پیچ به همراه نگه‌دارنده (سمت چپ)..... ۳۴
- شکل ۳-۷- توزیع سیم‌پیچ‌های ابرسانا در یک ماشین ابرسانا با استاتور ابرسانای نمونه..... ۳۵
- شکل ۳-۸- روتور ابرسانای موتور القایی ابرسانا..... ۳۶
- شکل ۳-۹- روتور و سیم‌پیچ‌های ابرسانای یک موتور سنکرون نمونه..... ۳۷

- شکل ۳-۱۰- رابطه تلف و فرکانس در یک پنکیک دوبل ۵۴ دوری کوچک..... ۴۰
- شکل ۳-۱۱- اجزای اصلی موتور..... ۴۳
- شکل ۳-۱۲- استاتور یک موتور سنکرون ابررسانای نمونه..... ۴۴
- شکل ۳-۱۳- مراحل تکمیل ساختار روتور..... ۴۴
- شکل ۳-۱۴- استاتور و روتور یک موتور سنکرون با سیم‌پیچ ابررسانای نمونه..... ۴۵
- شکل ۳-۱۵- شماتیک پنکیک دوبل (سمت راست)، نمونه واقعی (سمت چپ)..... ۴۶
- شکل ۳-۱۶- مؤلفه میدان عمودی بر ابررسانا..... ۴۶
- شکل ۳-۱۷- آزمایش مربوط به محاسبه جریان بحرانی در دمای خاص..... ۴۷
- 
- شکل ۴-۱- سه بخش روتور..... ۵۲
- شکل ۴-۲- طرح یوغ غیرمغناطیسی..... ۵۵
- شکل ۴-۳- جاگیری سیم‌پیچ‌های ابررسانا روی یوغ غیرمغناطیسی..... ۵۵
- شکل ۴-۴- طرح اولیه قطب روتور..... ۵۷
- شکل ۴-۵- پنکیک‌های دوبل و عایق‌های بکار رفته برای آنها..... ۶۱
- شکل ۴-۶- طرح اولیه روتور..... ۶۲
- شکل ۴-۷- مدل نهایی روتور سه پارچه..... ۷۰
- شکل ۴-۸- سیم‌پیچ ابررسانای طراحی شده برای موتور..... ۷۱
- شکل ۴-۹- مدل نهایی استاتور فولادی..... ۷۱
- شکل ۴-۱۰- مدل مغناطیسی پس از مونتاژ..... ۷۲
- شکل ۴-۱۱- مش بندی..... ۷۵
- شکل ۴-۱۲- موتور پس از مش‌بندی در دو حالت دو بعدی و سه بعدی..... ۷۶
- شکل ۴-۱۳- منحنی مغناطیسی فولاد بکار رفته برای موتور..... ۷۷
- شکل ۴-۱۴- آنالیز مغناطیسی دو بعدی موتور در حالت بی‌باری..... ۷۸
- شکل ۴-۱۵- آنالیز مغناطیسی سه بعدی موتور در حالت بی‌باری (برش عرضی)..... ۷۸
- شکل ۴-۱۶- چگالی شار فاصله هوایی ناشی از تحریک..... ۷۹
- شکل ۴-۱۷- مؤلفه‌های میدان..... ۸۰
- شکل ۴-۱۸- توزیع مولفه عمودی چگالی شار بر سیم‌پیچ‌های ابررسانا در حالت بی‌باری..... ۸۱
- شکل ۴-۱۹- جریان سه فاز اعمال شده به سیم‌پیچ استاتور با فرکانس ۵۰ هرتز..... ۸۲
- شکل ۴-۲۰- مدار معرفی شده برای اعمال جریان سه فاز به سیم‌پیچ استاتور با اتصال ستاره..... ۸۲
- شکل ۴-۲۱- نتایج آنالیز متغیر با زمان المان محدود بر موتور ابررسانا برای چهار زمان مختلف در حالت بار کامل، واحد ثانیه..... ۸۳
- شکل ۴-۲۲- حداکثر میدان اعمال شده به سیم‌پیچ‌های ابررسانا..... ۸۴

- شکل ۴-۲۳- برآزش منحنی برای اندوکتانس خودی فاز  $a$ ، واحد میلی هانری..... ۸۷
- شکل ۴-۲۴- منحنی گشتاور موتور ابررسانای طراحی شده در حالت ماندگار..... ۸۹
- شکل ۴-۲۵- منحنی مغناطیسی و کوفلاکس ۵۰..... ۹۱
- شکل ۴-۲۶- استاتور فولادی بعد از نصب دندانه‌های از جنس و کوفلاکس ۵۰..... ۹۲
- شکل ۴-۲۷- گراف توزیع تلفات در موتور طراحی شده در چهار مدل ذکر شده..... ۹۳
- شکل ۴-۲۸- گراف هزینه تقریبی..... ۹۴
- 
- شکل ۵-۱- ساختار کلی تغذیه ابررسانا..... ۹۸
- شکل ۵-۲- حلقه‌های جریان..... ۹۹
- شکل ۵-۳- برنامه قطع و قطع گرم‌کن‌ها..... ۱۰۰
- شکل ۵-۴- فرآیند شماتیک پمپاژ جریان..... ۱۰۱
- شکل ۵-۵- دیاگرام زمانی عملکرد گرم‌کن..... ۱۰۲
- شکل ۵-۶- برنامه زمانی گرم‌کن‌ها..... ۱۰۳
- شکل ۵-۷- زمان بندی قطع و وصل گرم‌کن‌ها..... ۱۰۳
- شکل ۵-۸- نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم تغذیه نمونه، ولتاژ اعمالی و جریان پمپ شده..... ۱۰۴
- شکل ۵-۹- شبیه‌سازی منبع تغذیه در صورت عملکرد چهار برابر سریعتر گرم‌کن‌ها نسبت به حالت قبلی..... ۱۰۵
- شکل ۵-۱۰- افزایش سرعت پمپاژ در صورت کاهش تعداد دورهای سیم‌پیچ مسی به نصف مقدار قبلی..... ۱۰۶
- شکل ۵-۱۱- قرارگیری مجاری مسی روی یوغ غیرمغناطیسی روتور..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱۲- برش عرضی محور معرفی شده برای موتور ابررسانای مورد نظر..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۳- ساختار سردکننده نصب شده روی روتور..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۴- سیستم سردکننده تکفازی..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۵- زمان مورد نیاز برای سرد سازی سیم‌پیچ توسط یک سردکننده متداول..... ۱۱۲
- شکل ۵-۱۶- شمای نهایی موتور..... ۱۱۳

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۳-۱- موتورهای جریان متناوب ساخته شده ..... ۴۲
- جدول ۴-۱- مشخصات موتوری که باید طراحی شود ..... ۵۴
- جدول ۴-۲- مشخصات ابرسانای YBCO ..... ۵۹
- جدول ۴-۳- مشخصات موتور طراحی شده ..... ۷۳
- جدول ۴-۴- متریکال بکار رفته در موتور ابرسانای طراحی شده ..... ۷۷
- جدول ۴-۵- تلفات در موتور طراحی شده (در فرکانس نامی ۵۰ هرتز) ..... ۸۵
- جدول ۴-۶- سایر تلفات برای یک موتور یک مگاوات ابرسانا ..... ۸۶
- جدول ۴-۷- مقایسه پارامترهای اساسی دو موتور مشابه چندپارچه و تمام آهنی طراحی شده ..... ۹۰
- جدول ۴-۸- مشخصات وکوفلاکس ۵۰ ..... ۹۱
- جدول ۴-۹- مقایسه وزن و بازده چهار موتور مطرح شده ..... ۹۳
- جدول ۵-۱- پارامترهای سیستم تغذیه نمونه ..... ۱۰۲

# فصل اول

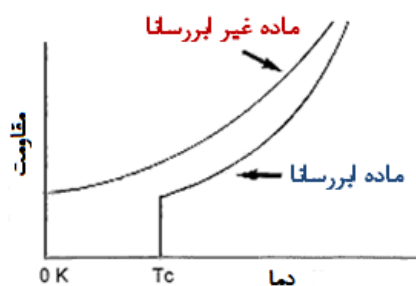
معرفی ابررسانا



## ۱-۱- مقدمه

رسانایی<sup>۱</sup> خاصیتی از مواد است که باعث انتقال انرژی الکتریکی در آنها می شود. این خاصیت در مواد مختلف، یکسان نیست. طلا و نقره رساناهای بسیار خوبی هستند در حالی که شیشه یا پلاستیک بطور کلی رسانا نیستند. معکوس رسانایی مقاومت نامیده می شود که تغییرات ترمودینامیکی و الکترومغناطیسی روی مقدار آن تاثیر می گذارد.

تولید ارزان انرژی و انتقال آن با حداقل تلفات همواره مورد توجه بشر بوده اند. یکی از بهترین گزینه ها برای کم کردن تلفات و هزینه های تولید انرژی الکتریکی بکارگیری تجهیزاتی است که مقاومت الکتریکی کمتری در مقابل جریان عبوری دارند. وجود مقاومت در بسیاری از کاربردها مطلوب نیست چون در حین انتقال انرژی از طریق ماده اتلاف انرژی اتفاق می افتد. نکته جالب توجه این است که در بعضی از مواد اگر دمای ماده از یک مقدار خاص تجاوز کند، تغییری به لحاظ هدایت الکتریکی در آن صورت می گیرد. در چنین دمایی اگر ماده به یک مسیر بدون مقاومت الکتریکی تبدیل شود به آن ابررسانا<sup>۲</sup> می گویند. در این حالت مقاومت الکتریکی بطور کامل از بین می رود. به عنوان مثال، اگر جریانی یک حلقه ابررسانا جاری شود ممکن است در طول مدت زمان صد هزار سال بدون تغییر باقی بماند! شاید بتوان یک ماده ابررسانا را به این صورت تعریف کرد: "یک ابررسانا عنصری است شامل آلیاژ فلزی یا ترکیبات مواد فلزی که در یک دمای معین الکتریسیته را بدون مقاومت عبور می دهد" [۱]. شکل ۱-۱ این امر را نشان می دهد.



شکل ۱-۱ - تغییر مقاومت با کاهش دما

<sup>1</sup>Conductivity

<sup>2</sup>Superconductor

## ۱-۲- تاریخچه ابررسانا

پژوهش در زمینه تغییر مقاومت الکتریکی اجسام در دماهای پائین برای نخستین بار توسط دانشمند اسکاتلندی Jeimes Deour در اواسط قرن نوزدهم آغاز شد. در سال ۱۸۶۴، دو دانشمند لهستانی که روشی برای مایع کردن اکسیژن و نیتروژن یافته بودند، اقدام به بررسی خواص فیزیکی عناصر و از جمله مقاومت الکتریکی در دماهای خیلی کم نمودند و پیش بینی کردند که مقاومت الکتریکی در دماهای کم به شدت کاهش می‌یابد. این دو دانشمند در سال ۱۹۸۰ نتایج آزمایشات خود را منتشر کردند. بعد از آن آقای Deour اعلام داشت مقاومت فلزات در دمای صفر مطلق به صفر نمی‌رسد بلکه به مقداری نزدیک به صفر تنزل می‌یابد. آقای Walternest نیز با استفاده از قانون سوم ترمودینامیک بیان داشت که صفر مطلق دست نیافتنی است. دو دانشمند آلمانی در همین زمان روشی برای سرد کردن و مایع ساختن گازها با افزایش فشار را به ثبت رساندند. در سال ۱۹۰۰ نیز، آقای Tesla به این نتیجه رسید که سرد کردن عناصر مقاومت الکتریکی را کم می‌کند. او سپس این نتایج را منتشر و ثبت کرد.

در سال ۱۹۱۱ برای اولین بار خاصیت ابررسانایی در جیوه توسط آقای Heike Kamerlingh Onnes فیزیکدان آلمانی در دانشگاه Leiden مشاهده شد. وقتی او جیوه را توسط هیدروژن مایع را تا دمای ۴ درجه کلوین سرد کرد، مقاومت آن بطور ناگهانی کاهش یافت. سپس یک حلقه سربی را تا دمای ۷ درجه کلوین سرد کرد تا ابررسانا شود و قوانین فارادی را بر روی آن آزمایش کرد. او دریافت که وقتی با تغییر شار در یک حلقه جریان القایی تولید شود، حلقه سربی خلاف رساناهای دیگر رفتار می‌نماید. یعنی بعد از قطع میدان تا زمانی که حلقه سربی در حالت ابررسانایی قرار دارد، جریان الکتریکی در آن برقرار است. به عبارت دیگر بعد از بوجود آمدن جریان الکتریکی ناشی از میدان مغناطیسی در یک سیم ابررسانا، سیم حتی بدون میدان خارجی یا مولد الکتریکی همچنان می‌تواند جریان را منتقل کند. آقای Onnes این رخداد را در آزمایشگاه دانشگاه Leiden تست کرد. به این شکل که او جریانی را در یک سیم پیچ ابررسانا جاری نمود سپس این سیم پیچ ابررسانای حامل جریان را به همراه سیستم

سرد کننده<sup>۱</sup> به دانشگاه کمبریج<sup>۲</sup> برد. او بدلیل انجام موفقیت آمیز این آزمایش به دریافت جایزه نوبل فیزیک در سال ۱۹۱۳ نایل شد. آقای Onnes همچنین متوجه شد برای هر ابررسانا، دمایی به نام دمای بحرانی<sup>۳</sup> (دمای گذار) وجود دارد بطوریکه وقتی دمای ماده از این دما کمتر شود، ماده ابررسانا می گردد و دردهماهای بالاتر از این دما، ماده دارای مقاومت الکتریکی است. دمای بحرانی عناصر مختلف متفاوت است. مثلاً دمای بحرانی جیوه حدود ۵ درجه کلوین، سرب ۹ درجه کلوین و نیوبیوم ۲/۹ درجه کلوین می باشد و برای بعضی آلیاژها و ترکیبات مانند Nb<sub>3</sub>Sn و Nb<sub>3</sub>Ge دمای بحرانی به ۱۸ و ۲۳ درجه کلوین نیز می رسد. در حال حاضر محدودیتهای پیش روی ابررساناها بطور کامل برداشته نشده و همچنان پژوهش در این زمینه ادامه دارد. البته فلزات رسانایی مانند طلا، نقره و حتی مس نیز وجود دارند که تلاش برای صفر کردن مقاومت ویژه آنها بی نتیجه مانده است و مشخص نیست که اگر دمای آنها به صفر مطلق برسد مقاومت آنها چقدر خواهد بود.

رسانیدن دمای ابررساناهای اولیه به دمای گذار نیازمند وجود هلیوم مایع می باشد که بسیار پرهزینه و خطرناک بوده و دسترسی به آن مشکل است. لذا از همان ابتدا تلاش برای تولید ابررساناهایی با دمای گذار بالاتر شروع شد و محققان تلاش کردند ابررساناهایی با دمای گذار بالاتر پیداکنند. از کشف ابررسانایی در سال ۱۹۱۱ تاکنون، هیچ نظریه فیزیکی جامعی نتوانسته است به بیان دقیق علت خاصیت ابررسانایی بپردازد. قدم مهم در زمینه چگونگی رفتار مواد در دمای بسیار پایین در سال ۱۹۳۳ توسط آقایان Robert Ochsenfeld و Walther Meissner که هر دو آلمانی بودند، برداشته شد. آنها دریافتند که مواد ابررسانا میدان مغناطیسی خارجی را دفع می کنند. در یک ابررسانا میدان مغناطیسی خارجی قدرت نفوذ نداشته، میدان را پس می زند. این پدیده به عنوان یک پدیده دیامغناطیسی قوی تلقی شده و امروزه با نام اثر مایسنر<sup>۴</sup> شناخته می شود.

---

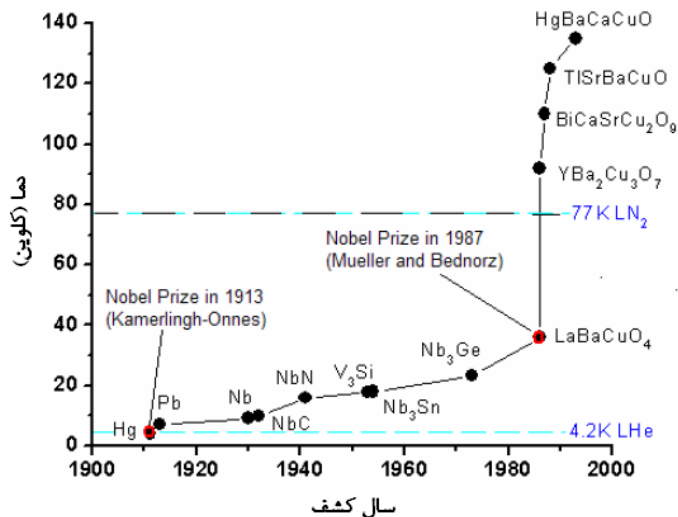
<sup>1</sup>Cooling system

<sup>2</sup>Cambridge

<sup>3</sup>Critical temperature

<sup>4</sup>Meissner Effect

در دهه‌های بعد از دهه ۱۹۳۰ فلزات، آلیاژها و ترکیبات ابررسانای دیگری نیز کشف شدند. در سال ۱۹۴۱ نیتريد نیوبیوم<sup>۱</sup> که دمای گذار آن ۱۶ کلوین بود، کشف شد. در سال ۱۹۵۳ دانشمندان در وستینگ هاوس<sup>۲</sup> به اولین سیم تجاری ابررسانا که آلیاژی از نیوبیوم و تیتانیوم<sup>۳</sup> بود، رسیدند. باوجود اینکه علم جدید همچنان قادر به توضیح پدیده ابررسانایی نیست، اما فواید این فرضیه انگیزه ایست که ما را در جهت فهم آن ترغیب می‌کند. بطور خلاصه محققان همگی در این موضوع اتفاق نظر دارند: "پیشرفت در زمینه‌ی ابررسانایی اقبال زیادی با خود به همراه دارد". امروزه ابررساناهایی با دمای گذار بالاتر نیز کشف شده‌اند. شکل ۱-۲ تاریخچه ابررساناها و دمای گذارشان را به تصویر می‌کشد [۲].



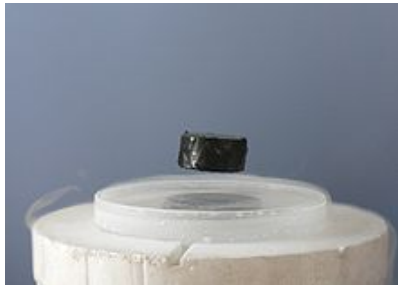
شکل ۱-۲- تاریخچه ابررساناها

### ۱-۳- پدیده ابررسانایی

ابررسانایی پدیده‌ای است که در دماهای بسیار پایین برای برخی از مواد رخ داده و در این حالت مقاومت الکتریکی ماده صفر می‌شود و ماده خاصیت دیامغناطیس کامل پیدا می‌کند، یعنی میدان مغناطیسی را از درون خود طرد می‌کند. طرد میدان مغناطیسی تنها تفاوت اصلی ابررسانا با رسانای

<sup>1</sup>Niobium-nitride  
<sup>2</sup>Westinghouse  
<sup>3</sup>NiTi

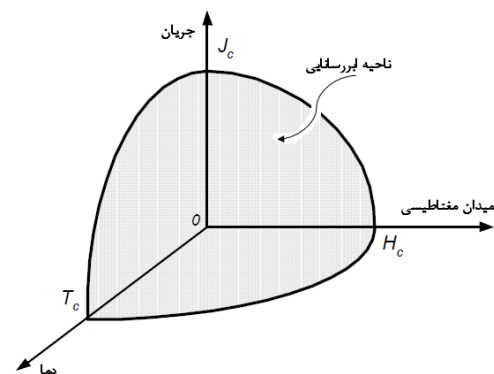
کامل است، زیرا در رسانای کامل انتظار می‌رود میدان مغناطیسی ثابت بماند، در حالی که در ابررسانا میدان مغناطیسی همواره صفر است. شکل ۱-۲، یک قطعه ابررسانا را نشان می‌دهد که در اثر طرد میدان، روی یک ماده مغناطیس دائم معلق شده است.



شکل ۱-۳- معلق ماندن یک ابررسانا روی یک مغناطیس دائم

پدیده ابررسانایی برای طیف وسیعی از مواد مانند قلع و آلومینیوم وجود دارد. همچنین برخی آلیاژها و نیمه رساناها نیز ابررسانا می‌شوند ولی فلزاتی مثل طلا و نقره این پدیده را از خود نشان نمی‌دهند. پدیده ابررسانایی در فلزات فرومغناطیس هم روی نمی‌دهد.

پدیده ابررسانایی به سه عامل دمای بحرانی  $T_c$ ، میدان مغناطیسی بحرانی  $H_c$  و جریان بحرانی  $I_c$  وابسته می‌باشد. در صورت تجاوز هر یک از عوامل از مقدار بحرانی خود خاصیت ابررسانایی از بین خواهد رفت. توجه به این نکته لازم است که مقدار مشخصی برای این عوامل وجود ندارد و میزان هر یک به میزان پارامترهای دیگر وابسته است. شکل ۱-۴ ناحیه ابررسانایی مرتبط با این عوامل را نشان می‌دهد [۳]، [۴].

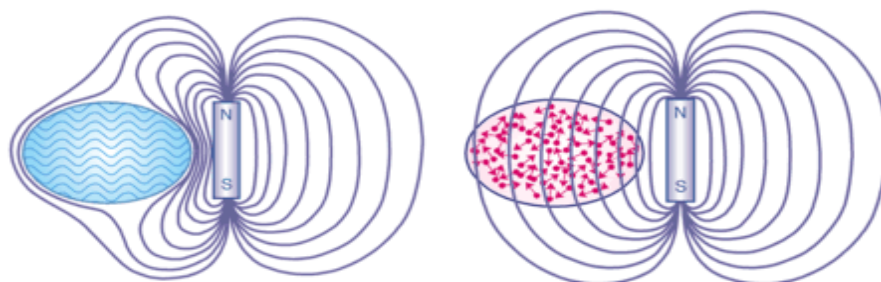


شکل ۱-۴- رابطه عوامل دخیل در پدیده ابررسانایی

قابل ذکر است که نظریه‌های کنونی ابررسانایی، نمی‌توانند پدیده ابررسانایی که امروزه بکار می‌رود را توضیح دهند. از نظر علمی ابرساناهایی که دمای گذار بالاتری دارند کاربردهای بسیار بیشتری دارند، زیرا در دماهایی ابررسانا می‌شوند که راحت‌تر قابل دسترسی هستند. امروزه پژوهش برای یافتن موادی که دمای بحرانی آن‌ها باز هم بیشتر باشد، و همچنین پژوهش برای یافتن نظریه‌ای که ابررسانایی را توجیه کند، همچنان ادامه دارد.

#### ۱-۴- اثر مایسنر<sup>۱</sup>

اثر مایسنر گاهی در مقابل انتظاری که از یک رسانای الکتریکی ایده‌آل می‌رود، قابل درک نیست. مطابق قانون لنز وقتی که تغییرات میدان بر یک رسانا اعمال می‌شود در هادی جریانی القاء می‌شود. این جریان خود بوجود آورنده میدانی است که جهت آن در خلاف جهت میدان بوجود آورنده‌اش است. در رسانای ایده‌آل جریان بزرگی در هادی القاء می‌شود که نتیجه‌اش خنثی کردن میدان اصلی می‌باشد. اثر مایسنر با بحث بالا متفاوت است. فرض کنید فلزی داریم که در وضعیت عادی است و یک میدان مغناطیسی ثابت به آن اعمال شده است. اکنون اگر فلز را سرد کنیم تا به دمای بحرانی برسد در این لحظه شاهد از بین رفتن فوری میدان خواهیم بود حال آنکه از قانون لنز چنین انتظاری نمی‌رود. اثر مایسنر به کمک دو برادر Fritz London و Heinz London مطرح شد. شکل ۱-۵ اثر مایسنر در فاز ابررسانایی را با حالت عادی مقایسه می‌کند [۲].



شکل ۱-۵- هادی کامل در حضور میدان مغناطیسی (سمت راست)، ابررسانا در حضور میدان مغناطیسی و بروز پدیده مایسنر (سمت چپ)

<sup>۱</sup>Meissnereffect

## ۱-۵- مهمترین خواص عمومی ابرساناها

درمورد مهمترین خواص ابرساناها می‌توان به موارد ذیل اشاره داشت.

### • مقاومت صفر در مقابل عبور جریان مستقیم

امروزه صرفه‌جویی در مصرف انرژی، یکی از مهم‌ترین نیازهای کشورهای صنعتی است. هر ساله بودجه زیادی صرف تحقیقات در زمینه کشف راه‌های تازه و موثر برای رسیدن به انرژی‌های ارزان و با ریسک کمتر می‌شود. بر پایه پدیده ابرسانایی، جریان الکتریکی می‌تواند بدون تلفات حرارتی در یک رسانا جاری شوند. بنابراین ابرسانایی با نقشی که می‌تواند در زمینه صرفه‌جویی در تولید و انتقال انرژی الکتریکی بازی کند، در آینده بشر نقشی اساسی خواهد داشت و به همین دلیل در سالهای اخیر پژوهشگران زیادی با صرف هزینه‌های زیاد، تحقیقات خود را روی موضوع ابرسانایی و کاربردهای آن در علوم مختلف متمرکز ساخته‌اند [۲].

### • توانایی در تولید میدان‌های مغناطیسی قوی

برای توضیح خصوصیات مغناطیسی ابرسانا، فرض کنید که در غیاب هر گونه میدان مغناطیسی ابتدا مقاومت ابرسانا با سرد شدن از بین برود و سپس میدان مغناطیسی به آن اعمال شود. به دلیل آنکه چگالی شار نمی‌تواند در داخل ماده ابرسانا تغییر کند، باید حتی بعد از اعمال میدان مغناطیسی نیز صفر باقی بماند. در واقع اعمال میدان مغناطیسی، جریان‌های بدون مقاومتی را القا می‌کند و این جریان‌ها در سطح نمونه طوری گردش می‌کنند که چگالی شار مغناطیسی ایجاد شده توسط آنها در داخل نمونه دقیقاً برابر و در جهت مخالف چگالی شار میدان مغناطیسی اعمال شده باشد. از آنجایی که این جریان‌ها از بین نمی‌روند، چگالی شار خالص در داخل نمونه صفر باقی می‌ماند [۲].

## • خاصیت تونل زنی<sup>۱</sup>

این مشخصه به این معنی است که اگر دو ابرسانا را خیلی به هم نزدیک کنیم، مقداری از جریان یکی به دیگری جاری می‌شود. در دو سر این پیوندگاه یا تونل هیچ ولتاژی وجود ندارد. یعنی میزان جریان نشتی به ولتاژ بستگی ندارد ولی میزان این جریان نشتی به میدان مغناطیسی در مقادیر خیلی کوچک بشدت وابسته است [۲].

### ۱-۶- تقسیم‌بندی ابرساناها

#### ۱-۶-۱- تقسیم‌بندی بر اساس ساختار ماده ابرسانا شامل خالص و مرکب

##### ۱-۶-۱-۱- ابرساناهای نوع ۱ (خالص)

ابرساناهایی که در زیر مجموعه "نوع یک" جا گرفته اند، عموماً از فلزاتی هستند که در دمای اتاق از خود خاصیت رسانایی نشان می‌دهند. عناصر این گروه به کاهش دمای بسیار زیادی به منظور گذار به فاز ابرسانایی نیاز دارند. ابرساناهای نوع ۱ که ابرساناهای نرم نیز نامیده می‌شوند جزء اولین اکتشافات مواد ابرسانا هستند. بسیاری عناصر دیگر نیز هستند که تحت شرایط فشار زیاد به حالت ابرسانایی می‌رسند. برای مثال فسفر ظاهراً تحت فشاری معادل ۲۵۰ مگاپاسگال در دمای گذار بین ۱۴ تا ۲۲ درجه کلوین، به یک ابرسانای نوع ۱ تبدیل می‌شود. شکل ۱-۶ مکان قرار گرفتن عناصر شناخته شده در جدول مندلیف که در فشار محیط (رنگ آبی) و در فشارهای بالا (رنگ سبز) ابرسانا می‌شوند را نشان می‌دهد [۵].

---

<sup>1</sup>Tunneling phenomenon



**KNOWN SUPERCONDUCTIVE ELEMENTS**

■ BLUE = AT AMBIENT PRESSURE  
■ GREEN = ONLY UNDER HIGH PRESSURE

1	2																	10	18	36	54	86	
1	2																	10	18	36	54	86	
3	4																	10	18	36	54	86	
11	12																	10	18	36	54	86	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	54	86				
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	86	86				
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	86	86				
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112								86	86	86	86	86

*SUPERCONDUCTORS.ORG*

* Lanthanide Series	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
+ Actinide Series	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

شکل ۱-۶- عناصر ابرسانای نوع ۱، آبی در فشار محیط و سبز نیاز به حضور فشار زیاد

### ۱-۶-۱- ابرساناهای نوع ۲ (مرکب)

علاوه بر عناصری مانند وانادیم<sup>۱</sup>، تکنیتیوم<sup>۲</sup> و نیوبیوم<sup>۳</sup>، مواد تشکیل دهنده گروه نوع ۲ از ابرساناهای فلزی و آلیاژهای فلزی تشکیل شده است. ابرساناهای 'perovskite' (سرامیک‌های متشکل از اکسید فلز که در حالت معمول ۲ اتم فلز و ۳ اتم اکسیژن دارند) نیز اخیراً کشف شده‌اند و به گروه دوم تعلق دارند. در حقیقت Perovskites یک خانواده‌ی بزرگ از سرامیک‌های کریستالی می‌باشند که نامشان را از یک ماده‌ی معدنی به همین نام گرفته‌اند. آنها مواد معدنی فراوانی در زمین می‌باشند که نسبت فلز به اکسیژن در آنها دو به سه می‌باشد. اولین ترکیب ابرسانای نوع ۲ آلیاژی از سرب<sup>۴</sup> و بیسموت<sup>۵</sup> بود که در سال ۱۹۳۰ توسط اشخاصی به نام W. d. Haas و J. Voogd شناخته شد. ابرساناهای نوع دوم با عنوان ابرساناهای سخت نیز شناخته می‌شوند [۶].

<sup>۱</sup>Vanadium  
<sup>۲</sup>Technetium  
<sup>۳</sup>Niobium  
<sup>۴</sup>Lead  
<sup>۵</sup>Bismuth

### ۱-۶-۲- تقسیم‌بندی بر اساس اثر مایسنر

دو نوع مختلف ابررسانا، براساس همین اثر مایسنر وجود دارند. اولین نوع ابررساناهایی هستند که در آنها خاصیت ابررسانایی در زمان رسیدن میدان به مقدار بحرانی  $H_c$  ناگهان از بین می‌رود. از سوی دیگر به گفته فیزیکدانان ممکن است نوعی ابررسانا به یک وضعیت برسد که در آن هم خاصیت ماده نرمال و هم خاصیت ابررسانایی به طور همزمان وجود داشته باشد. به عبارت دیگر در دومین نوع ابررساناها در این تقسیم‌بندی افزایش میدان و رسیدن به مقدار بحرانی  $H_{c1}$  ما را به وضعیتی می‌رساند که در آن نفوذ شار مغناطیسی با افزایش همراه است ولی همچنان مقاومتی در برابر جریان وجود ندارد اما زمانی که میدان بیش از حد بزرگ شود در میدان بحرانی دوم  $H_{c2}$  خاصیت ابررسانایی از بین می‌رود [۲].

### ۱-۶-۳- تقسیم بندی ابررساناها بر اساس دمای گذار

ابررساناهای کنونی بر اساس دمای گذار به طور کلی به دو دسته  $LTS^1$  و  $HTS^2$  تقسیم می‌شوند.

#### ۱-۶-۳-۱- ابررساناهای دما پایین LTS

ابررساناهای LTS بیشتر شامل آلیاژهای Nb و Nb<sub>3</sub>Sn (مانند Nb<sub>3</sub>SnNb<sub>3</sub>Al) بوده و نسل پیشین ابررساناهای HTS می‌باشد. عناصر LTS برای ابررسانا شدن به کاهش دمای زیادی در حد کمتر از ۲۰ کلوین نیاز دارند. قابل ذکر است ابررساناهای LTS غالباً به واسطه‌ی کاربردی که در علوم مهندسی دارند ابررساناهای فنی نامیده می‌شوند. بسیاری از ابررساناهایی که در این دسته جای می‌گیرند برای گذار به فاز ابررسانایی باید تا حدود ۴ درجه کلوین سرد شوند [۷].

---

<sup>1</sup>Low Temperature Superconductor

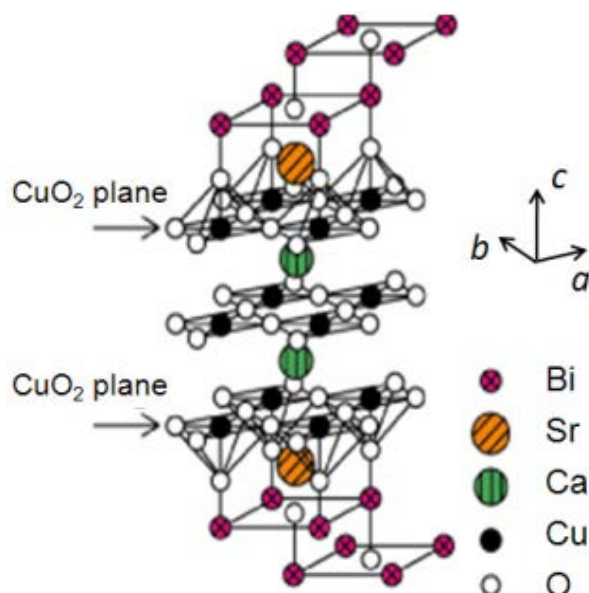
<sup>2</sup>High Temperature Superconductor

### ۱-۶-۳-۲- ابرساناهای دما بالا HTS

اختلاف زیادی بین دمای گذار ابرساناهای LTS و HTS وجود ندارد. تمامی ابرساناهایی که قبل از سال ۱۹۸۶ کشف شدند در زمره ی LTS ها جای گرفتند. عنصر Barium-Lanthanum-Cuprate که توسط Müller و Bednorz با دمای گذار ۳۰ کلوین ساخته شد اولین ماده ی HTS شناخته شده می باشد. بطور کلی هر ترکیبی که در دمایی بالاتر از دمای جوش نیتروژن مایع (۷۷کلوین) ابرسانا شود، HTS خواهد بود [۷].

### ۱-۶-۳-۱- ابرسانای BSCCO

عبارت BSCCO مخفی برای گونه هایی از ابرساناهای سرامیکی است که شامل عناصری مانند بیسموت<sup>۱</sup>، استرونیوم<sup>۲</sup>، کلسیم<sup>۳</sup>، مس<sup>۴</sup> و اکسیژن<sup>۵</sup> می باشد. مثلاً یک قطعه کوچک سرب ترکیب شده با مواد فوق دمای گذار بالایی دارد. خواص منحصر به فرد و دمای گذار بالا، BSCCO را به یک ابرسانای کاربردی مبدل کرده است. ساختار یک BSCCO در شکل ۱-۷ نشان داده شده است [۷].

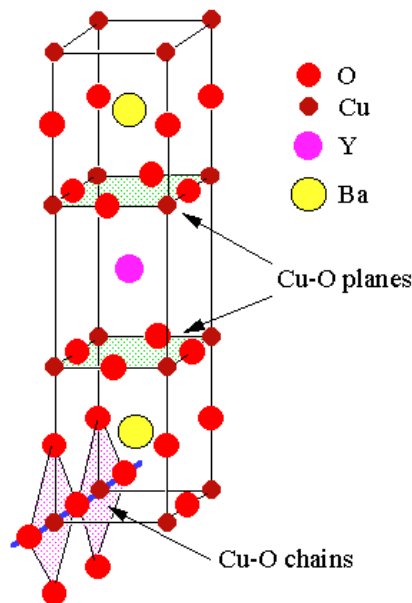


شکل ۱-۷- ساختار BSCCO

<sup>1</sup>Bismuth  
<sup>2</sup>Strontium  
<sup>3</sup>Calcium  
<sup>4</sup>Copper  
<sup>5</sup>Oxygen

### ۱-۶-۳-۲-۲- ابرسانای YBCO

تاریخچه ابرساناهای HTS به زمانی بر می‌گردد که در سال ۱۹۸۶ ماده  $\text{La}_2\text{CuO}_4$  توسط دو شخص به نام‌های J.GeorgBednorz و K.AlexMüller با دمای گذاری معادل ۳۵ درجه کلونین کشف شد. این ماده با دیگر ابرسانای موجود متفاوت بود. ساختار کریستالی پیچیده‌ای داشت و بر اساس ترکیب دیگری از اکسید مس ایجاد شده بود. این کشف دو کاشف خود را به جایزه نوبل رساند و اندکی بعد ماده‌ی دیگری به نام  $\text{Yba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  یا به اختصار YBCO (یا ۱-۲-۳) که نسبت تعداد اتمهای فلزی این ترکیب را نشان می‌دهد، کشف شد. ابرسانای YBCO، دمای گذاری معادل ۹۲ کلونین داشت و این به منزله ظهور ماده‌ای بود که خاصیت ابرسانایی را در دمایی بالاتر از دمای نیتروژن مایع (۷۷ درجه کلونین) بروز داد که بسیار ارزاتر و قابل کنترل‌تر از هلیوم مایع می‌باشد. ساختار ابرسانای YBCO در شکل ۱-۶ قابل مشاهده است [۷]. البته با رشد تکنولوژی و بهبود ساختار ابرساناها امروزه این نوع ابرساناها مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۱-۸- ساختار YBCO

## ۱-۷- کاربرد ابرساناها

ابرساناهاى دماى پايين امروزه همچنان در برخى ابزارآلات پزشكى بكار مى‌روند. به هر حال با وجود معرفى ابرساناهاى دما بالا ورود آنها به بازارهاى جهانى نیازمند گذشت زمان مى‌باشند. علت در توليد انبوه دشوار ضمن حفظ كيفيت بالا نهفته است. اگر چه در حال حاضر، بازار ابرساناهاى دماى بالا رونق كمى دارد، گمان مى‌رود كه در خلال سال‌هاى آينده کاربرد آنها فراگير و پررونق شود.

با پيشرفت‌هاى ايجاد شده در زمينه‌ى ابرساناها کاربرد آنها رو به گسترش است. در سيستم حمل و نقل علاوه بر سيستم‌هاى پيشران الكتريكي، يك نمونه تجارى از بكارگيرى ابرسانا در تكنولوژى مگلو<sup>۱</sup> بود كه در دهه ۱۹۹۰ در ژاپن تحقق يافت. در کنار بهبود تكنولوژى ابرساناها، ملاحظات سياسى و زيست محيطى نيز به پيشرفت آنها كمك كرده است. كشف متحول كننده ابرساناهاى دما بالا در سال ۱۹۸۶ منجر به تحول و توليد نوع جديدى از كابل‌ها در سيستم‌هاى قدرت شد. در ايالات متحده، اروپا و ژاپن رقابت سختى براى توليد كابل‌هاى ابرسانا در سال‌هاى اخيره وجود آمده است. قابليت هدايت جريان برق در كابل‌هاى HTS<sup>۲</sup> بيشتر از هادى‌هاى آلومينيومى و مسى متداول مى‌باشد. در صورت استفاده از سيم‌هاى ابرسانا به جاي سيم‌هاى مسى در ماشين‌هاى الكتريكي و ترانسفورماتورها امكان کاهش تلفات، حجم، وزن آنها وجود داشته و با افزايش بازدهى، صرفه‌جويى قابل توجهى در انرژى الكتريكي صورت مى‌گيرد.

ابرساناها در سيستم‌هاى ذخيره انرژى<sup>۲</sup> هم بكار مى‌روند. در سيستم قدرت بين توان‌هاى الكتريكي توليدى و مصرفى تعادل لحظه‌اى برقرار است و هيچگونه ذخيره انرژى در آن صورت نمى‌گيرد. بنابراين توليد شبكه ناچار به تبعيت از منحنى مصرف است كه غير اقتصادى مى‌باشد. ذخيره‌كننده مغناطيسى ابرسانا وسيله‌اى است كه با ذخيره كردن انرژى به بهبود پايدارى سيستم قدرت و كم شدن نوسانات كمك شايانى مى‌كند. ابرساناى ذخيره كننده انرژى مغناطيسى هزاران بار قابليت شارژ

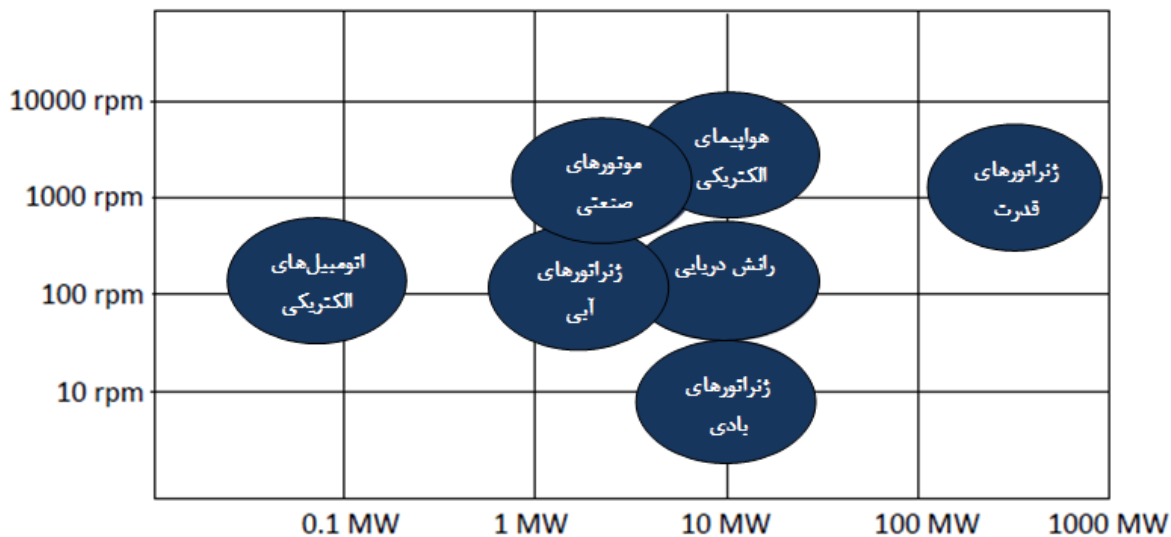
---

<sup>۱</sup>MAGLEV

<sup>۲</sup>SMES

و دشارژ دارد بدون اینکه تغییری در خواص مغناطیسی آن ایجاد شود. حضورسیم پیچ ابرسانا نیز موجب می‌شود که راندمان فرآیند ذخیره انرژی بسیار بالا باشد.

علاوه بر موارد گفته شده، محدودسازهای جریان خطا<sup>۱</sup> ابرسانانیز رده تازه‌ای از وسایل حفاظتی سیستم قدرت را ارائه می‌کنند که قادرند شبکه را از اضافه جریانهای خطرناکی که باعث قطعی‌های پر هزینه برق و خسارت به قطعات حساس سیستم می‌شوند حفاظت نمایند. به این شکل که با تجاوز جریان عبوری از جریان بحرانی ابرسانا تحت شرایط دمایی ثابت، خاصیت ابرسانایی از بین خواهد رفت و فاز ابرسانایی ناپدید و با تبدیل ماده به ماده‌ای با مقاومت الکتریکی بالا میزان جریان عبوری را تا حد امکان پایین می‌آورند. به طریق مشابه با تغییر در شدت میدان مغناطیسی، امکان تغییر در وضعیت جسم ابرسانا از ابرسانایی به مقاومتی و برعکس امکانپذیر است. بنابراین از مواد ابرسانا جهت انجام سوئیچینگ یا کلیدزنی نیز می‌توان بهره گرفت [۷]. این امر در تغذیه الکتریکی ابرسانا نقش عمده‌ای بازی می‌کند. ماشین‌های الکتریکی نیز در این میان بی‌بهره نبوده‌اند. در شکل ۹-۱ خلاصه‌ای از کاربرد ابرساناها در ماشین‌های الکتریکی آورده شده است.



شکل ۹-۱ - خلاصه‌ای از کاربرد ابرساناها

<sup>۱</sup>SFCL



# فصل دوم

## ماشین‌های ابررسانا



## ۲-۱- مقدمه

ابرسانا‌های اولیه در دماهای بسیار پایین (حدود ۴ درجه کلوین) وارد فاز ابرسانایی می‌شدند. پیشرفت‌های تدریجی در ساخت مواد ابرسانا، دستیابی به مواد ابرسانایی با دماهای بالاتر را نیز فراهم کرد. امروزه مواد ابرسانای دمای بالا (HTS) می‌توانند در دمای ۴۰ تا ۹۰ درجه کلوین، حالت ابرسانایی خود را بروز دهند. این موفقیت‌ها در تولید مواد ابرسانای دمای بالا، زمینه پیشرفت در صنعت ماشین‌های الکتریکی ابرسانا را فراهم نموده است. ماشین‌های ابرسانا می‌توانند بسته به شرایط نسبت به ماشین‌های معمولی، کوچکتر، سبکتر و دارای راندمان بالاتری باشند. مزایای چشمگیر این ماشین‌ها قطعاً به زودی صنعت ماشین‌های الکتریکی را متحول خواهد نمود [۷]، [۸]، [۹] و [۱۰]. کاربردهای عمده ماشین‌های ابرسانای HTS در فصل پیشین معرفی گردید. به دلیل انعطاف‌پذیری ماشین‌های ابرسانا، موتورهای ابرسانا یک انتخاب ایده‌آل برای استفاده در پمپ‌ها، فن‌ها، کمپرسورها، سیستم‌های تهویه و سایر اجزای اساسی سیستم‌های حمل و نقل می‌باشند. علاوه بر این، موتورهای ابرسانا کاربردهای دیگری در بسیاری از صنایع سنگین مانند فرزکاری فلزات، کاغذسازی، صنایع شیمیایی، پالایش نفت و گاز، استخراج معادن و ... نیز دارند [۱۱] و [۱۲].

امروزه مواد ابرسانا بصورت سیم‌پیچ‌های ابرسانا در ماشین‌های الکتریکی بکار می‌روند. مطالعات مربوط به بکارگیری سیم‌های ابرسانای دمای پایین (LTS) از سی سال پیش در مجامع بزرگ علمی و پژوهشی دنیامورد بررسی قرار گرفت. با پیدایش نسل HTS ابرساناها بکارگیری انواع قدیمی‌تر کم‌رنگ شد بطوری که اکنون ابرساناهای دما پایین اقبال بسیار کمی در صنایع امروزی به همراه دارند. در دهه ۱۹۷۰ میلادی، بزرگترین تولیدکنندگان ماشین‌های الکتریکی مانند جنرال الکتریک و وستینگ‌هاوس، مطالعات جداگانه‌ای را برای تولید ژنراتورهای بزرگ با استفاده از سیم‌پیچ‌های LTS آغاز کردند. جنرال الکتریک یک ژنراتور ابرسانای ۲۰ مگا ولت آمپری در دهه ۱۹۷۰ با موفقیت ساخت و آزمایش کرد. چندین سال بعد محققان ژاپنی توانستند یک ژنراتور ابرسانای ۷۰ مگا ولت

آمپری را با موفقیت آزمایش کنند. این ماشین‌ها با استفاده از مواد LTS و بویژه آلیاژ نیبرید تیتانیوم<sup>۱</sup> ساخته شده بودند اما با وجود همه ویژگی‌های مثبت موجود دستیابی به دماهای بسیار پایین از مسائل اساسی طراحی این ماشین‌ها بود. سیستم‌های سردکننده در چنین شرایطی می‌بایست سیم‌های ابررسانا را تا دمای ۴ درجه کلوین سرد می‌کردند و این امر سبب می‌شد تا سیستم‌های سردکننده بسیار گران باشند. همچنین اختلاف شدید دما بین قسمت‌های سرد و گرم ماشین، مشکلات زیادی را به لحاظ ایزولاسیون حرارتی<sup>۲</sup> ایجاد می‌نمود. با این وجود، پیشرفت‌های سریع در تولید مواد HTS قابلیت‌های ماشین‌های ابررسانا را آشکارتر ساخت و توجه بسیاری از صنایع را بخود جلب نمود. در ۲۰ سال اخیر، مواد LTS بتدریج جای خود را به مواد HTS دادند. امکان عملکرد ماشین‌های ابررسانا در دماهای بالاتر، هزینه و پیچیدگی سیستم‌های خنک‌سازی را به شدت کاهش داد و باعث گسترش چشمگیر این ماشین‌ها در کاربردهای مختلف شد. گسترش ابررساناهای دما بالا همچنین باعث شد تا ساخت ماشین‌های ابررسانا در توان‌های پایین‌تر نیز به لحاظ فنی امکانپذیر بوده و به لحاظ اقتصادی توجیه شود. در واقع می‌توان گفت ورود مواد HTS به عرصه صنعت، باعث آغاز فصل جدیدی در تحقیقات مرتبط با ماشین‌های ابررسانا شد [۱۳].

## ۲-۲- ترانسفورماتورهای قدرت

در مراحل اولیه ظهور ترانسفورماتورهای HTS، کاهش هزینه، همراه با افزایش بازده به عنوان فواید اصلی کاربرد این نوع ترانسفورماتورها در صنعت بشمار می‌رفتند. کاهش وزن و اندازه ترانسفورماتور HTS می‌تواند در بعضی کاربردها حتی از افزایش بازده مهم‌تر باشد. برای یک ترانسفورماتور HTS با توان ۳۰ مگا ولت آمپر با سیستم خنک کننده حلقه بسته، وزن و اندازه می‌تواند بترتیب به میزان  $1/2$  و  $2/3$  کاهش می‌یابد [۱۳].

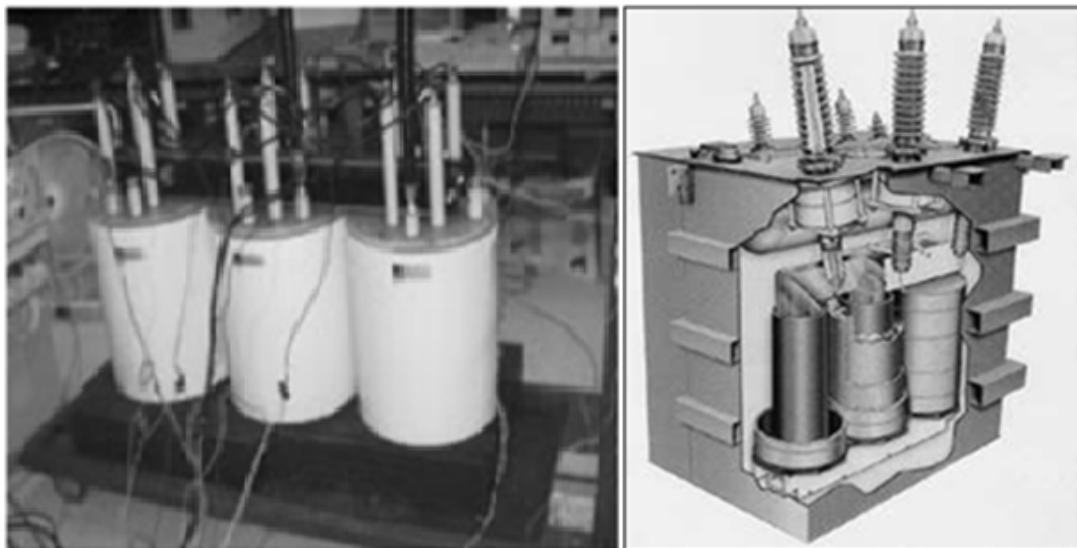
---

<sup>۱</sup>NbTi

<sup>۲</sup>Thermal insulation

اولین ترانسفورماتور ابررسانا در سال ۱۹۹۴ توسط شرکت SNU ساخته شد. پیشرفت مواد HTS امکان ساخت و بهره‌برداری اقتصادی از ترانسفورماتورهای با رنج توانی کمتر را نیز فراهم نموده و توجه سازندگان مختلفی را به این صنعت جلب کرد. یک نمونه ترانسفورماتور کوچک HTS با توان ۱۰ کیلو ولت آمپر با ولتاژ نامی ۴۴۰/۲۲۰ ولت مورد آزمایش قرار گرفت. سیم‌پیچ‌های این ترانسفورماتور از سیم ابررسانای BSCCO ساخته شده بود که جریان نامی آن، ۱۳/۱ آمپر در اولیه و ۲۶/۲ آمپر برای ثانویه بود. سیم‌پیچ اولیه دارای جریان بحرانی ۷۳ آمپر در ۷۷ درجه کلون و سطح مقطع  $۲/۹ \times ۰/۱۶۴$  میلیمتر مربع و سیم‌پیچ ثانویه دارای جریان بحرانی ۱۰۰ آمپر در ۷۷ کلون و سطح مقطع  $۴/۲ \times ۰/۲۰۳$  میلیمتر مربع بود. کل طول سیم بکار رفته در اولیه و ثانویه این ترانسفورماتور نیز به ترتیب به ۷۵ متر و ۶۸ متر بود.

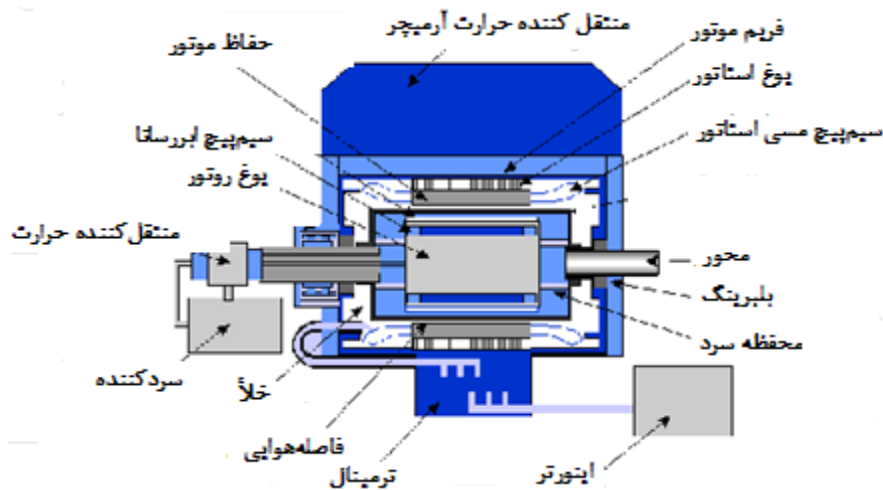
در ساختار ترانسفورماتورهای HTS، معمولاً سیم‌پیچ ابررسانا درون یک محفظه خنک‌کننده و در پیرامون هسته مغناطیسی قرار می‌گیرد. در شکل ۱-۲ نمونه‌ای از یک ترانسفورماتور HTS به همراه اجزای داخلی آن نشان داده شده است. در شکل ۱-۲ اتاقک‌های سیستم سردکننده ترانسفورماتور برای هر سه فاز نشان داده شده است [۱۳].



شکل ۱-۲ - شمای یک ترانسفورماتور HTS سه فاز (سمت راست)، شمای درونی یک ترانسفورماتور HTS سه فاز (سمت چپ)

## ۲-۳- موتورهای ابررسانا و انواع آن

پیشرفت تکنولوژی HTS صنعت ماشین‌های الکتریکی گردان را با تحول بزرگی مواجه نموده است. در کنار توسعه ترانسفورماتورهای HTS، موتورها و ژنراتورهای AC و DC نیز سهم بسزایی در بهره‌گیری از این تکنولوژی داشته‌اند. تاکنون انواع مختلفی از موتورهای سنکرون<sup>۱</sup>، مغناطیس دائم<sup>۲</sup>، هیستریزیسی<sup>۳</sup>، رلوکتانسی<sup>۴</sup> و ... با بهره‌گیری از تکنولوژی ابررساناها ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. شکل ۲-۲ ساختار کلی و اجزای اصلی یک نمونه موتور سنکرون HTS را نشان می‌دهد [۱۴].



شکل ۲-۲- ساختار موتور سنکرون HTS

با وجود اینکه در مطالعات مختلف، قابلیت مواد ابررسانا برای ساخت انواع ماشین‌های الکتریکی نشان داده شده است، اما مواد HTS بطور ویژه برای ساخت موتورهای سنکرون با کاربردهای گوناگون بکار می‌روند. در این ماشین‌ها سیم‌پیچ میدان و هسته روتور در محفظه‌ای سرد قرار می‌گیرند که نسبت به محیط بیرون ایزوله می‌باشند. فقط سیم‌پیچ‌های روتور از ماده HTS ساخته شده‌اند. جداره محفظه سرد از ماده‌ی ایزوله در برابر گرما ساخته شده است و محفظه توسط ساختار سردکننده موتور تا زیر

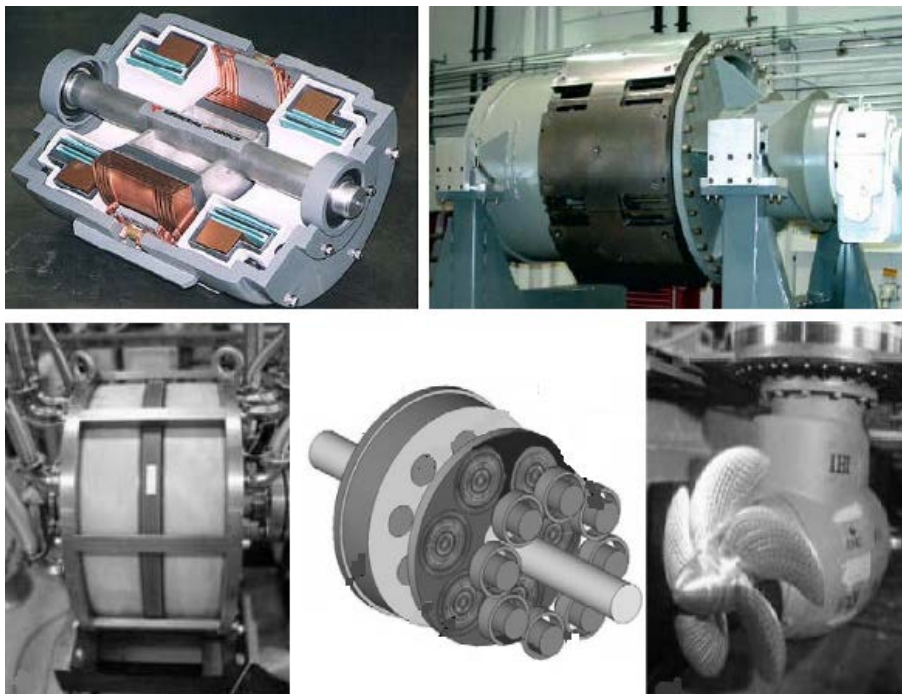
<sup>1</sup>Synchronous motor

<sup>2</sup>Permanent magnet motor

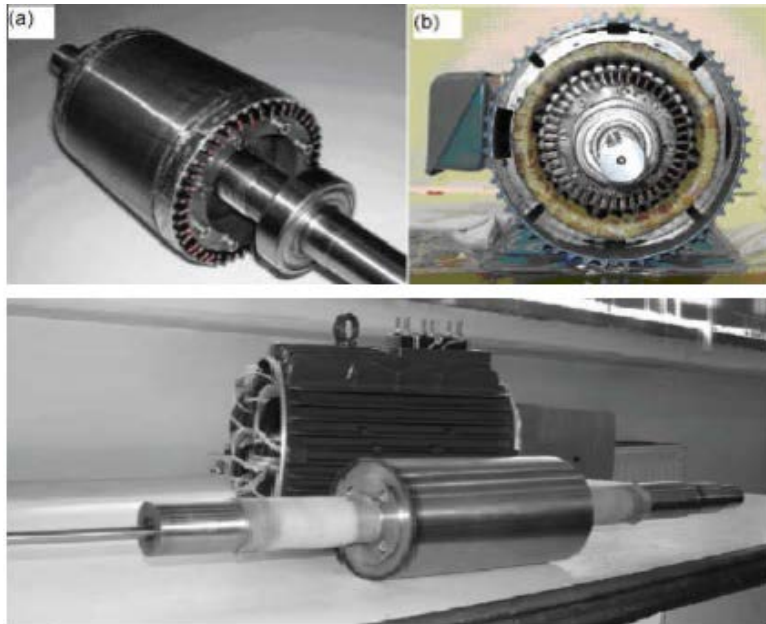
<sup>3</sup>Hysteresis motor

<sup>4</sup>Reluctance motor

دمای بحرانی سرد می‌شود. گاز نیتروژن عموماً به عنوان ماده سردکننده برای خنک کردن اجزای داخل محفظه سرد تا دمای زیر ۷۷ درجه کلوین استفاده می‌شود. ساختار استاتور این ماشین‌ها شامل سیم‌پیچ‌های مسی معمولی می‌باشد. گاهی در ساختار هسته استاتور موتورهای ابرسانا شیار و دندانه وجود ندارد چراکه ممکن است شار بسیار زیاد تولید شده توسط سیم‌پیچ‌های HTS روتور، منجر به اشباع دندانه‌های استاتور می‌شود. در این صورت سیم‌پیچ‌های استاتور در سطح داخلی هسته قرار گرفته و توسط یک تیوب محافظ، ثابت نگه داشته می‌شوند. طبیعتاً در این گونه موتورها، فاصله هوایی بسیار بزرگ است [۱۴]. همانطور که قبلاً ذکر شد علاوه بر موتورهای سنکرون، بسیاری از انواع موتورهای رلوکتانسی، هیستریزیس، مغناطیس دائم و ... نیز با استفاده از مواد HTS برای کاربردهای صنعتی به عنوان نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شده‌اند ولی به دلیل محدودیت‌های کنونی موجود پیش روی ابرساناها به لحاظ تجاری توان رقابت با نمونه‌های سنکرون را پیدا نکرده‌اند. شکل‌های ۲-۳ و ۴-۲ انواع مختلف موتورهای ابرسانا را به تصویر می‌کشد [۴].



شکل ۲-۳- موتور DC ابرسانا (بالا)، موتور شار محوری ابرسانا (پایین)



شکل ۲-۴- موتور القایی ابرسانا(بالا) موتور سنکرون ابرسانا(پایین)

## ۲-۴- ژنراتورهای ابرسانا

ژنراتورهای ابرسانا نیز نسبت به انواع معمول ژنراتورها ویژگی‌های مثبت ارزنده‌ای دارند. از ویژگی‌های منحصر بفرد این ژنراتورها، راندمان بالا در شرایط بارگذاری نسبتاً کم می‌باشد. ژنراتورهای HTS امروزی دارای انواع گوناگونی است. در سال ۲۰۰۴ جنرال الکتریک با همکاری سازمان انرژی آمریکا یک ژنراتور ۱۰۰ مگا ولت آمپری ابرسانا را ساخت و با موفقیت مورد آزمایش قرار داد. با توجه به آزمایشات متنوع انجام گرفته روی ژنراتورهای HTS و بررسی نتایج آنها انتظار می‌رود ژنراتورهای ابرسانا، گوی سبقت را از انواع دیگر ژنراتورها برابند [۱۴]. شکل ۲-۵ نمونه‌ای از ژنراتور ابرسانا را نشان می‌دهد [۴].



شکل ۲-۵- نمونه‌ای از یک ژنراتور ابرسانا

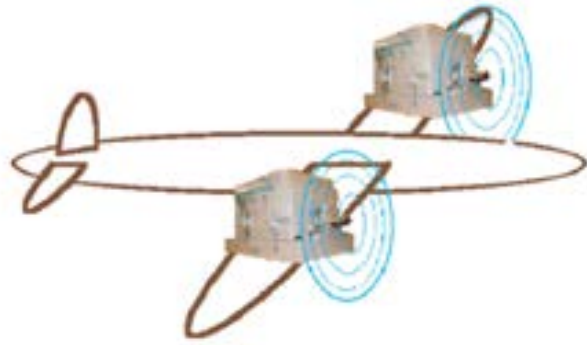
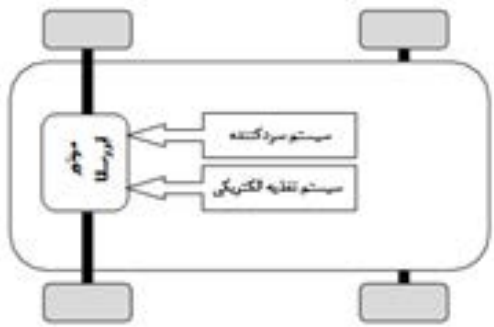
## ۲-۵- سیستم رانش<sup>۱</sup> ابرسانا

استفاده از سیستم‌های رانش الکتریکی، مزایای زیادی نسبت به درایورهای مکانیکی دارد. این سیستم‌ها دارای قابلیت اطمینان بیشتری بوده و در بسیاری از موارد اقتصادی‌تر از سوخت‌های فسیلی هستند. ضمن ایجاد آلودگی صوتی کمتر قابلیت ذخیره انرژی در مواقع لازم را دارا بوده، می‌کنند و امکان استفاده مفیدتر از فضا را فراهم می‌کنند. اخیراً شرکت AMSC یک موتور نمونه ۲۵ مگاوات رابه عنوان سیستم پیشران یک کشتی طراحی کرده است. بطور کلی می‌توان گفت استفاده از تکنولوژی HTS در بخش‌های مختلف سیستم الکتریکی کشتی‌ها، تحول عظیمی را در صنعت حمل و نقل دریایی ایجاد نموده است. با این وجود، کاربردهای موتورهای ابرسانا در صنایع دیگر نیز قابل توجه است [۱۱].

ویژگی‌های مفید موتورهای پیشران ابرسانا سبب شده تا علاوه بر صنایع دریایی، توجه محققان به کاربرد این ماشین‌ها در صنایع هوایی نیز جلب شود. تاکنون مواردی از آزمایش این موتورها به عنوان پیشران هواپیما نیز با موفقیت همراه بوده است [۱۵]. در آینده‌ای نزدیک با رشد تکنولوژی HTS، هزینه سیم‌های HTS و سیستم‌های خنک‌کننده ماشین‌های HTS به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. نتیجتاً ماشین‌های HTS فضای وسیعتری برای رشد پیدا کرده و در سایر زمینه‌ها نیز بکار گرفته خواهند شد. شکل ۲-۶ انواع کاربردهای رانشی موتورهای ابرسانا را نشان می‌دهد.

---

<sup>۱</sup>Propulsion system



شکل ۲-۶- کاربرد موتورهای ابرسانا در اتومبیل، هواپیما، زیردریایی و کشتی



# فصل سوم

ساختارهای مختلف

موتورهای ابررسانای گردان

### ۳-۱- مقدمه

از ابتدای قرن حاضر، ماشین‌های HTS جای خود را در صنعت باز کرده‌اند بطوری که از دهه ۱۹۹۰ میلادی تکنیک‌های ساخت ماشین‌های ابررسانا (HTS) پیشرفت چشم‌گیری داشته است. ماشین‌های ابررسانا، از جمله ماشین‌های DC، ماشین‌های سنکرون، ماشین‌های القایی، ماشین‌های خطی، ماشین‌های رلوکتانس، ماشین‌های هیستریزیس ساخته شده و با موفقیت آزمایش شده‌اند [۱۶] و [۱۷].

با توجه به نتایج حاصله از بکارگیری سیم‌پیچ‌های ابررسانا (HTS) در موتورهای صنعتی، چندین پروژه از سال ۱۹۹۰ در ایالات متحده آمریکا و ژاپن در این زمینه آغاز به کار کرد. بعدها در سال ۲۰۰۰ در آلمان و سال ۲۰۰۱ در کره همین پروژه‌ها پیگیری شد. در رومانی در سال ۲۰۰۸ سرمایه یک پروژه مربوط به ساخت یک نمونه موتور سنکرون HTS توسط CNMP با همکاری دانشکده برق و موسسه تحقیقات مهندسی برق دانشگاه پولیتنیکا بخارست<sup>۱</sup> تامین شد. محصول این پروژه نمونه‌ای از یک موتور سنکرون HTS شد که می‌توانست به دلیل بازده بالایی که داشت کاربرد وسیعی پیدا کند [۷].

موتور HTS به گونه‌ای طراحی می‌شود که بازده انرژی و توان و تلفات را بهینه کرده و اندازه و وزن را در صورت امکان کاهش دهد. برای طراحی یک موتور HTS متغیرهای زیادی باید مورد توجه قرار گیرند از جمله ماده سازنده و حتی محدودیت‌هایی که هر جزء با آن روبه روست [۱۸]. یکی از محدودیت‌های پیش رو برسر هر سیستم که از ابررسانا استفاده می‌کند، هزینه ماده HTS است. در زمینه ماشین‌های الکتریکی ابررسانا بهینه سازی‌های متعددی بر روی آنها به منظور به کارگیری در صنعت صورت گرفته است. با توجه به تجربه محدود ساخت ماشین‌های HTS، به طور کلی مشخص شده است که فواید اقتصادی به کارگیری مواد HTS مستقیماً از یک ماشین کوچک قابل درک نیست. یکی از این روش‌های بهینه سازی استفاده از روش اجزای محدود به منظور حداقل سازی میزان HTS بکاررفته در سازه می‌باشد [۱۹].

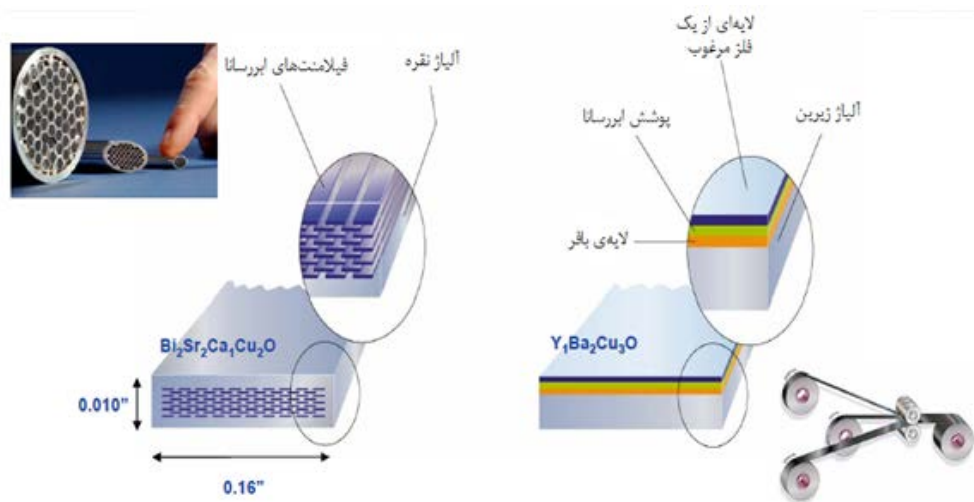
---

<sup>1</sup>University POLITEHNICA of Bucharest (UPB)



همین دلیل سیم‌های ابررسانا معمولاً به شکل نوارهای نازک ساخته شده و شامل مقدار کمی فلز می‌باشند که تا حدودی مشکل عدم استقامت مکانیکی سیم را جبران می‌کند. البته این شکل خاص و نواری شکل بطور کامل مسائل شکنندگی را حل نمی‌کند. این ساختار سیم ابررسانا محدودیت‌هایی بر چگونگی شکل سیم‌پیچ‌ها اعمال می‌کند. مثلاً پیچیدن سیم‌پیچ‌ها به صورت سیم‌پیچ‌های مسطح زیاد سخت نیست ولی هر شکل دیگری برای پیچیدن نوارها غیر عملی می‌باشد. در مورد این سیم‌پیچ‌ها و نحوه پیچیدن آنها بعداً مفصل بحث خواهد شد [۲۰].

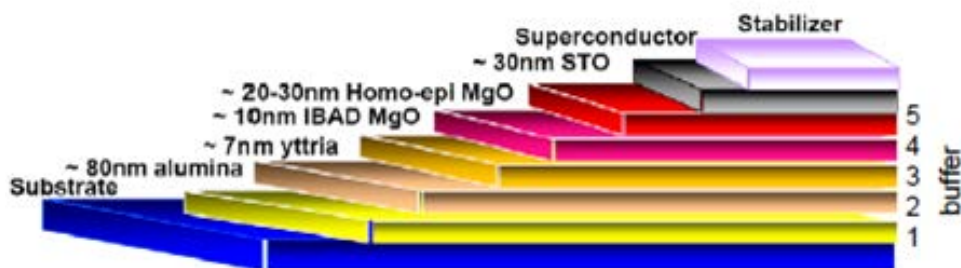
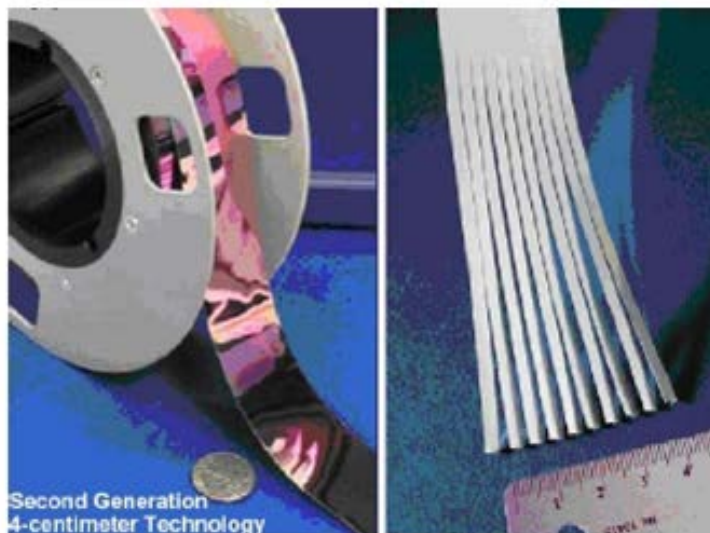
در سال‌های اخیر سیم‌های ابررسانای HTS از نظر ساختار و ویژگی‌ها به طور مداوم پیشرفت کرده به طوری که امروزه تولید آنها به هزاران کیلومتر در سال رسیده است. تاکنون دو نسل از سیم‌پیچ‌های ابررسانا ساخته شده‌اند. نسل اول با علامت اختصاری 1G و نسل دوم با علامت اختصاری 2G نام گذاری می‌شوند. در شکل ۲-۳ هر دو نسل و ساختار آنها را نشان داده شده است.



شکل ۲-۳ - نسل اول، Bi-2223 (سمت چپ) و نسل دوم، YBCO (سمت راست)

نمونه جدیدتر ابررساناها، نسل دوم، بیشتر از مورد پیشین توانسته انتظارات محققان را برآورده کند. لازم به ذکر است نسل سومی از ابررساناها نیز در راهند ولی هیچ اطلاعاتی در حال حاضر در این مورد در دسترس نیست و تا تجاری شدن زمان طولانی لازم دارد. با توجه به این موضوع و رضایت نسبی از ابررساناهای نسل دوم محققان در صددند این ابررساناها را به تولید انبوه برسانند. اکنون نسل دوم

سیم‌پیچ‌های HTS در بازارهای موجود می‌باشند اما به دلیل هزینه سنگین آنها جز برای استفاده در صنایع کلان از نظر اقتصادی مقروم به صرفه نمی‌باشند. اما کارشناسان معتقدند در آینده نزدیک انتظار می‌رود هزینه تمام شده برای تهیه نسل دوم ابررساناها از نصف تا حتی یک پنجم برابر نسبت به قیمت کنونی آن افت قیمت داشته باشد. ساختار نوعی ابررسانای نسل دوم در شکل ۳-۳ داده شده است. این سیم‌ها به دلیل مسائل و محدودیت‌های مکانیکی به صورت عریض تولید شده و معمولاً به صورت عایق بندی شده تحویل مشتری می‌شوند. لازم به ذکر است که عایق به کار رفته در سیم ابررسانا اثر قابل ملاحظه‌ای بر سائز ماشین دارد. نوارهای HTS برای به کارگیری در سیم‌پیچ ماشین ابررسانا به سائزهای کوچکتری مطابق با شکل ۳-۳ بریده می‌شوند [۴].



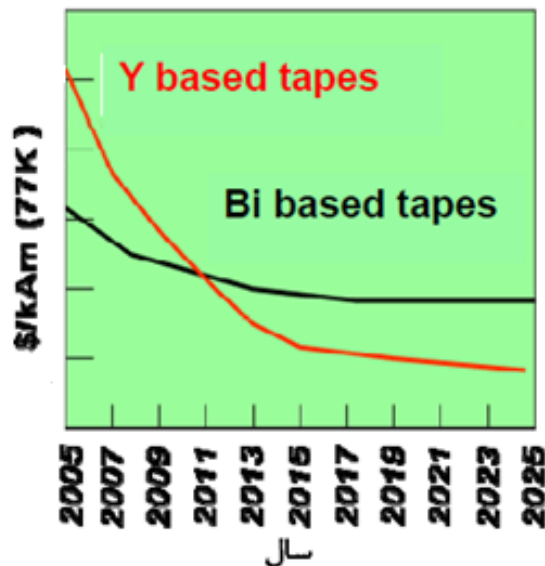
شکل ۳-۳- ظاهر و ساختار نوعی نوار ابررسانای نسل دوم

### ۳-۲-۲- مقایسه ابرساناهای موجود در بازار

همانطور که قبلا هم ذکر شد، امروزه دو نوع ابرسانا از دو نسل قدیم و جدید در بازار موجود است، که به نامهای Bi-2223 و YBCO معروفند. طبق نظر کارشناسان با گذشت زمان هزینه خرید ابرسانای نسل دوم با سرعت بیشتری نسبت به ابرسانای نسل اول پایین تر می آید. پیش بینی محققان از افت قیمت ابرساناهای نسل اول و دوم در شکل ۳-۴ قابل مشاهده می باشد. از سوی دیگر عوامل دیگری نیز وجود دارند که نسل دوم را نسبت به نسل اول متمایز می کنند [۲۱]:

- عملکرد بهتر در میدان مغناطیسی؛
- خواص مکانیکی بهتر (مثلا کشش بالاتر یا خمش بهتر)؛
- شکل دهی بهتر؛
- جریان بالاتر ضمن حفظ خاصیت ابرسانایی؛
- تلفات AC کمتر.

نتایج به کارگیری نوع دوم ابرسانا، YBCO را پیشنهاد می کند.



شکل ۳-۴- مقایسه هزینه YBCO و Bi-2223

توجه به این نکته مهم است که بدانیم با توجه به خواص ذاتی ابررسانا که در فصل‌های پیشین ذکر شد، سیم‌پیچ ابررسانا به هیچ عنوان معادل با یک سیم‌پیچ معمولی با در نظر گرفتن مقاومت صفر (یا خیلی کم در کاربردهای جریان متناوب) نیست. علت این است که مشخصات جریان-میدان مغناطیسی-دما برای سیم‌های ابررسانا بشدت غیر خطی می‌باشد. مقاومت با افزایش دما، جریان و میدان مغناطیسی سریع افزایش می‌یابد. سرد کردن بیشتر از دمای بحرانی ماده ابررسانا برای رسیدن به چگالی جریان بالاتر و چگالی شار بالاتر، هزینه سیستم سردکننده را بالا می‌برد. بنابراین توجه به نقطه کار ابررسانا از اهمیت خاصی برخوردار است.

### ۳-۳- طرح موتور ابررسانا

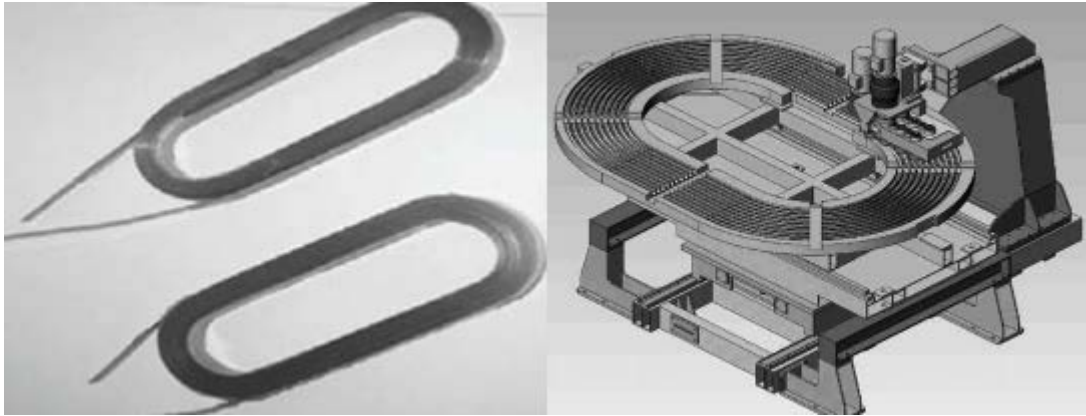
برای طراحی یک موتور ابررسانا با توجه به امکانات در دسترس می‌توان استاتور، روتور یا هر دو را ابررسانا ساخت که البته به دلیل عدم صرفه اقتصادی، تنها روتور یا استاتور یک ماشین را ابررسانا می‌گیرند. اکنون ساختارهای مختلف اجزایی که در موتورهای ابررسانا بکار می‌روند را بطور خلاصه شرح می‌دهیم.

### ۳-۳-۱- سیم‌پیچ ابررسانا

مطابق با موارد ذکر شده در بخش ۳-۲ به دلیل ظاهر نواری شکل سیم‌های ابررسانا، این سیم‌پیچ‌های فضای زیادی اشغال می‌کنند. به همین دلیل کارشناسان طرحواره پنکیک<sup>۱</sup> را به عنوان استاندارد سیم‌پیچ ابررسانا انتخاب کرده‌اند. به این ترتیب شرکت‌های ارائه دهنده سیم‌پیچ‌های ابررسانا به سفارش مشتری با توجه به تعداد دوره‌های مورد نیاز سیم‌پیچ‌های ابررسانا را به صورت پنکیک آماده کرده و تحویل می‌دهند. شکل ۳-۵ سیم‌پیچ استاندارد پنکیک را به همراه دستگاه سازنده‌اش نشان می‌دهد [۲۲].

---

<sup>۱</sup>Pancake coils



شکل ۳-۵- سیم‌پیچ پنکیک نمونه و دستگاه سازنده‌اش

در نهایت سیم‌پیچ‌ها با یک حلقه نگهدارنده در مرکز مجهز شده که نقش اتصال به محل کاربردش و نیز تضمین استحکام مکانیکی را بر عهده دارد. در بعضی کاربردها به ویژه ماشین‌های سنکرون با سیم‌پیچ ابررسانای میدان، تعداد دورهای سیم‌پیچ ابررسانا زیاد است که ممکن است فضای بسیار زیادی نیاز داشته باشد. در این موارد از پنکیک دابل ابررسانا استفاده می‌شود. در بخش‌های بعدی مفصل در مورد پنکیک‌های دابل توضیح داده خواهد شد.

### ۳-۳-۲- استاتور هسته هوایی در ماشین ابررسانا

طراحی آرمیچر برای ماشین‌های HTS همچنان موضوع بحث کارشناسان می‌باشد. در برخی کاربردها دندان از استاتور حذف می‌شود. این امر از اشباع احتمالی دندانه‌ها در صورت حضور شار بالای عبوری از فاصله هوایی جلوگیری می‌کند [۱۸]. آرمیچر نوع هسته هوایی برای بهبود هرچه بیشتر مزایای به کارگیری سیم‌پیچ HTS میدان بوده که باعث افزایش بازده ماشین می‌شود. در یک استاتور هسته هوایی، علاوه بر دندان ممکن است هسته استاتور نیز از ماده غیر مغناطیسی ساخته می‌شود. عدم استفاده از ماده مغناطیسی سبب می‌شود شرایط اشباع در ماشین ایجاد نشده و با از بین رفتن تلفات هسته بازده افزایش یابد. البته ارزش این طرح هنوز به طور کامل از لحاظ اقتصادی تایید نشده است چراکه سطح موثر فاصله هوایی را بشدت افزایش می‌دهد [۲۰]. شکل ۳-۶ سیم‌پیچ نمونه برای



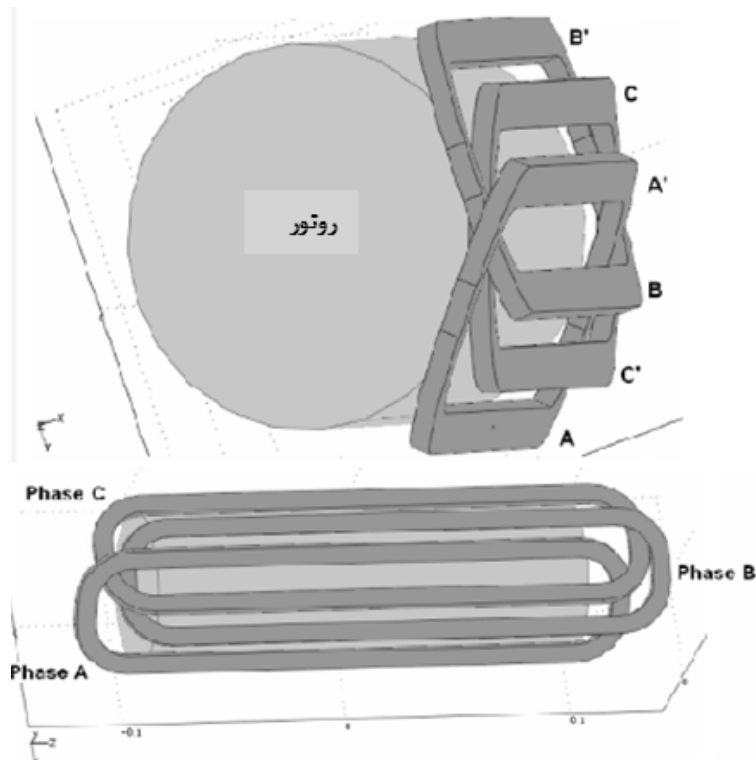
استاتور هسته هوایی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۳-۵ دیده می‌شود سیم‌پیچ‌ها توسط نگه‌دارنده‌های غیر مغناطیسی به استاتور قفل می‌شوند.



شکل ۳-۶- استاتور هسته هوایی بدون حضور دندانه (سمت راست)، سیم‌پیچ به همراه نگه‌دارنده (سمت چپ)

### ۳-۳-۳ - استاتور با سیم‌پیچ ابررسانا

تاکنون نمونه‌های آزمایشی از ماشین‌های ابررسانای HTS با استاتور ابررسانا ساخته شده است. از آنجا که با افزایش فرکانس در نوار ابررسانا، تلفات در نوار بیشتر می‌شود، این ماشین‌ها نتوانسته‌اند برای خود جایگاهی بیابند. علاوه بر مشکلات فرکانسی پیش رو مسائل مکانیکی نیز از عوامل دخیل در عدم موفقیت تجاری این ساختار شده است. هندسه توزیع سیم‌پیچ‌ها مخصوصاً در صورت بالا بودن تعداد فازها و شیارها بکارگیری نوارهای ابررسانا در استاتور را امکان ناپذیر می‌کند. شکل ۳-۷ شماتیک ساختار یک استاتور با سیم‌پیچ سه فاز ابررسانا را نشان می‌دهد. همینطور که در شکل ۳-۷ مشخص است با افزایش فازها یا قطب‌ها یا تعداد شیارها بر قطب بر فاز عملاً سیم‌پیچی استاتور غیر ممکن می‌شود. همانطور که مشخص است استاتور از دو جزء تشکیل شده است. یک جزء شامل ساختاری به منظور نگه‌داری سیم‌پیچ‌های ابررسانا و جزء دیگر شامل یوغ و شیارهای استاتور می‌باشد.



شکل ۳-۷- توزیع سیم‌پیچ‌های ابررسانا در یک ماشین ابررسانا با استاتور ابررسانای نمونه

در این مدل موتور نحوه اتصال سیم‌پیچ‌های ابررسانای استاتور به شبکه اهمیت زیادی دارد. معمولاً در این ماشین‌ها اتصال  $Y$  در نظر گرفته می‌شود. علت آن است اتصال  $\Delta$  سیم‌پیچ‌های سه فاز استاتور می‌تواند موجب ایجاد جریان گردشی نامطلوبی در سیم‌پیچ‌های استاتور گردد. در این طرح باید تدابیری اندیشیده شود که میدان مغناطیسی بر سطح ابررسانا کاهش یافته و از زیاد شدن تلفات AC جلوگیری شود [۲۳].

### ۳-۳-۴ - روتور ابررسانا

روتور را نیز در بسیاری از ماشین‌های الکتریکی از جمله رلوکتانس، خطی، القایی و سنکرون می‌توان با بهره‌گیری از سیم‌پیچ‌های ابررسانا ساخت. موتورهای القایی در ظرفیت‌های متنوع در صنعت حضور دارند که معمول‌ترین آنها مدل قفس سنجابی است. گشتاور راه‌اندازی و بازده موتورهای القایی قفس سنجابی با میزان مقاومت میله‌های اتصال کوتاه شده روتور تغییر می‌کند. روتور موتور قفس سنجابی معمولی از میله‌ها و حلقه‌های مسی یا آلومینیومی ساخته شده و مقاومت روتور قابل تغییر نیست. در

صورتی که مقاومت روتور کوچک باشد بازده در عملکرد بار کامل بالا بوده در حالی که گشتاور راه اندازی پایین است. برعکس بالا بودن میزان مقاومت به گشتاور راه اندازی بالا و بازده بار کامل پایین می‌انجامد.

برای بهبود این دو ویژگی، مقاومت روتور در شروع بالا بوده و پس از رسیدن به بار کامل کاهش می‌یابد. اگر میله‌های معمولی ساخته شده از مس و آلومینیم با نوارهای HTS جایگزین شود، مقاومت روتور در حوزه‌ی وسیعی می‌تواند تغییر کند. به این ترتیب که در لحظه حرکت که لغزش یک است، جریان زیادی در روتور القا شده و فرکانس اعمالی به روتور افزایش می‌یابد. اعمال این شرایط به نوارهای ابررسانا گشتاور راه‌اندازی بالایی را تولید خواهد کرد. با بالا رفتن سرعت، نوارهای HTS سازنده میله‌های اتصال کوتاه شده، با کاهش جریان و فرکانس روتور به حالت ابررسانایی برمی‌گردند. در این حالت مقاومت نوارها کاهش می‌یابد. قابل ذکر است که استاتور این موتور همان استاتور معمول ماشین القایی در نظر گرفته شده و روتور نیز توسط سیستم سرد کننده به دمای ابررسانایی می‌رسد. شکل ۳-۸ نمونه‌ای از روتور قفس سنجابی موتور القایی که در آن از نوارهای ابررسانا استفاده شده است را نشان می‌دهد [۴].



شکل ۳-۸- روتور ابررسانای موتور القایی ابررسانا

روتور ماشین‌های سنکرون نیز می‌تواند ابررسانا باشد. از آنجا که ماشین‌های سنکرون بخصوص موتورهای سنکرون در صنعت به وفور استفاده می‌شود، نوع ابررسانای این ماشین‌ها با اقبال زیادی روبه رو شده است. در طول پیشرفت تکنولوژی HTS و پیشرفت مواد ابررسانا، موتورهای سنکرون نیز

روز به روز پیشرفت کرده‌اند. آمریکا، آلمان، کره و چند کشور دیگر انواع موتورهای سنکرون در توان‌های مختلف را ساخته و آزمایش کرده‌اند. نمونه‌ای از روتور ابررسانای یک موتور سنکرون در شکل ۳-۹ نشان داده شده است.



شکل ۳-۹- روتور و سیم‌پیچ‌های ابررسانای یک موتور سنکرون نمونه

دو نوع ساختار برای ماشین‌های سنکرون ابررسانا معرفی شده است :

- روتور بدون هسته؛
- روتور با هسته فرومغناطیسی.

در نوع بدون هسته از آنجا که مسیر شار در هوا بسته می‌شود، چگالی شار بالایی در فاصله هوایی خواهیم داشت. این امر باعث ایجاد بیشترین میزان چگالی گشتاور نسبت به سایر ماشین‌های الکتریکی می‌گردد. از سوی دیگر در واقع استفاده از روتور بدون هسته کاهش قابل ملاحظه وزن روتور، و در نتیجه کاهش وزن کل ساختار ماشین را سبب می‌شود. مشکل اینجاست که نیروی الکترومغناطیسی مولد گشتاور، مستقیم بر سیم‌های ابررسانا نیرو وارد کرده و باعث عدم ثبات آنها می‌شود. انواع بدون هسته همچنین نیاز بیشتری به سیم‌های ابررسانا دارد که ماشین را از نظر هزینه غیر اقتصادی می‌نماید. با به کارگیری هسته در روتور، بدلیل وجود مسیر آهنی آمپر دور مورد نیاز هسته نسبت به نوع بدون هسته به شدت کاهش می‌یابد. به واسطه همین امر متعاقبا تعداد دور سیم‌پیچ‌های ابررسانای مورد نیاز کاهش یافته که به اقتصادی‌تر شدن هزینه ماشین کمک می‌کند.

همانطور که در ابتدا خاطر نشان کردیم در ساختار کلی یک ماشین، هم روتور و هم استاتور می توانند همزمان ابررسانا انتخاب شوند که نتیجه آن با توجه به ویژگی‌های ابررسانا فوق‌العاده خواهد بود. اما علاوه بر هزینه تمام شده سیستم سردکننده این گونه ماشین‌ها خود امری چالش برانگیز است چراکه همزمان باید بخش گردان روتور و بخش ثابت استاتور سرد شوند که نیاز به تدابیر ویژه‌ای دارد [۲۰].

### ۳-۴- مناسب‌ترین ساختار با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی

صنعت ماشین‌های HTS یک صنعت نوپا است لذا ماشین‌هایی که تاکنون توسط شرکت‌های مختلف ساخته شده‌اند به صورت آزمایشی و برای یک دوره محدود و معمولاً در محل شرکت سازنده ماشین به شبکه برق متصل شده‌اند. بعد از سپری شدن این دوره آزمایشی، ماشین مورد نظر از شبکه خارج کرده و مورد بررسی قرار می‌دهند تا عیوب احتمالی شناسایی و برطرف شوند. با این حال هنوز خرید و فروش این گونه ماشین‌ها به صورت تجاری بین شرکت‌ها رایج نشده است به طوری که هیچ قیمتی مربوط به تجهیزات مختلف ماشین‌های HTS در دست نیست. یک ماشین HTS معمولاً با همکاری دو شرکت تولید می‌شود به طوری که یک شرکت مسئولیت ساخت آن دسته از تجهیزاتی را به عهده می‌گیرد که در یک ماشین عادی به کار می‌روند و شرکت دیگر مسئولیت ساخت تجهیزات مربوط به ابررسانا و سیستم تبرید (سیستم خنک کننده) را بر عهده می‌گیرد.

ماشین‌های HTS صنعتی به منظور حضور در بازارهای تجاری باید توان رقابت با سایر ماشین‌های غیرابررسانای الکتریکی صنعتی را داشته باشند. تلفات در ماشین‌های ابررسانا می‌تواند حتی به نصف تلفات در یک ماشین صنعتی معمول هم رده خود برسد. این امر به کاهش هزینه عملکرد ماشین می‌انجامد. برای مثال با بکارگیری موتور ۶۰۰۰ اسب بخاری سنکرون HTS با سیم‌پیچ میدان ابررسانا هزینه توان الکتریکی سالیانه چیزی در حدود ۴۰۰۰۰ دلار (با در نظر گرفتن عملکرد بار کامل، به ازای  $0.06 \text{ \$/kW-h}$  و عملکردی در حد ۸۵ درصد سال) نسبت به هزینه سالیانه موتور معمولی پربازده هم رده خود کمتر خواهد بود. بنابراین ماشین HTS از نظر اقتصادی زمانی در بازارهای تجاری خواهان

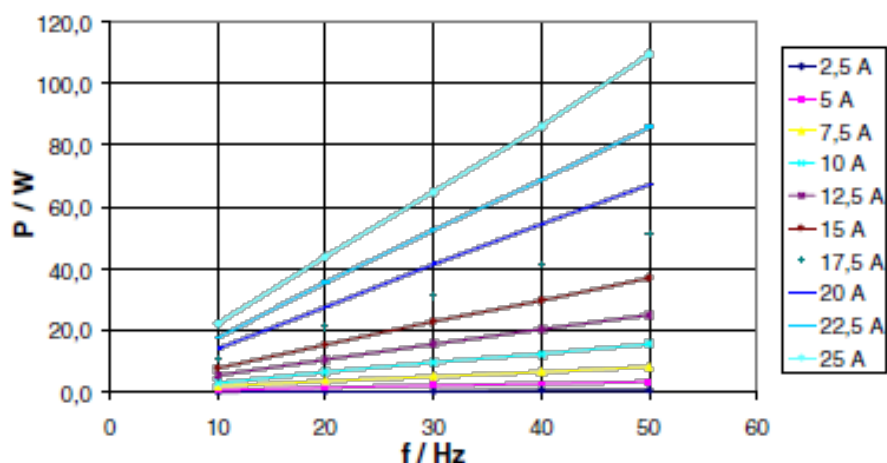
خواهد داشت که هزینه پرداختی برای آن با وجود هزینه‌های کمتر عملکرد و بازده بالاتر با گذشت زمان جبران شود [۲۱].

بخش عمده‌ای از هزینه هر ماشین HTS از قیمت ابررسانای HTS به کار گرفته شده ناشی می‌شود؛ هزینه‌ی این ماده به میزان قابل توجهی از هزینه صرف شده برای فراهم آوردن بخش‌های دیگر بیشتر است. همین موضوع باعث شده که فرایند تجاری شدن ماشین‌های HTS با کندی همراه باشد. هزینه سیم‌های HTS عموماً بر حسب دلار بر کیلوآمپر متر ( \$/kA-m ) داده می‌شود. باید خاطر نشان شود که هزینه داده شده به دو عامل بستگی دارد. اول حداکثر میزان جریانی که سیم HTS قادر به تحمل آن بدون از بین رفتن خاصیت ابررسانایی می‌باشد و دوم هزینه ساخت برای هر متر سیم می‌باشد. هر دو عامل قابلیت بهبود با پیشرفت تکنولوژی را دارا می‌باشند.

اکنون هزینه تهیه ابررساناهای دما بالای نسل دوم از نسل قبلی خود بیشتر است. اما به دلیل کارایی بهتر آنها محققان در صددند در آینده‌ای نه چندان دور هزینه خرید نسل دوم ابررساناها را به میزان قابل توجهی کاهش دهند. شکل ۳-۴ کاهش هزینه ابررساناهای نسل اول و دوم را به تصویر کشیده است. نقره به کار رفته در ابررساناهای دما بالای نسل اول علت ارزانتر بودن نسل دوم نسبت به نسل اول در آینده نزدیک خواهد بود. بنابراین در طراحی ماشین‌های ابررسانا علاوه بر عوامل مرتبط با کارایی، هزینه تمام شده نیز باعث شده تا نسل اول ابررساناها انتخاب مناسبی به شمار نیایند. از آنجا که کوتاه‌ترین طول سیم مورد نیاز در ساخت یک تجهیز قدرت ۱۰۰ متر است، پایین آمدن قیمت نوارهای ابررسانا که قابلیت کار در دمای ۷۷ کلوین را داشته باشند، همان چیزی است که سازندگان ماشین‌های الکتریکی برای ساخت ژنراتورها و موتورهای دیگر تجهیزات قدرت می‌خواهند. با توجه به هزینه هر متر سیم ابررسانای نسل اول در سال ۲۰۰۷، چیزی حدود ۵۰ دلار بر کیلوآمپر متر، انتظار می‌رفت که ای هزینه به ۲۰ دلار بر کیلوآمپر متر در سال ۲۰۰۹ و به ۱۰ دلار بر کیلوآمپر متر در سال ۲۰۱۰ برای هر متر کاهش یابد که این گونه نشد [۴].

همانگونه که قبلاً گفته شد، امروزه ماشین‌های ابررسانای آزمایشی با استاتور شامل سیم‌پیچ‌های ابررسانا ساخته شده‌اند ولی ساخت آنها با چالش‌های بزرگی مواجه است. به طور مثال ساخت سیم‌پیچ HTS برای استاتور ماشین الکتریکی کاری بشدت دشوار و غیر عملی در مقیاس تجاری می‌باشد. ساخت سیم‌پیچ ابررسانای استاتور بدلیل نیاز طبیعی سیم‌پیچ استاتور به پیچ خوردن و خم شدن با شعاع کوچک سخت بوده و عملی نمی‌باشد. از طرفی دیگر با به کارگیری ابررسانا در استاتور، فضای مورد نیاز برای عایق‌های حرارتی نیز مشکل ساز می‌شود. به گونه‌ای که دیگر جایی برای شیارهای استاتور باقی نمی‌ماند و در این صورت سیم‌پیچی هسته هوایی<sup>۱</sup> نیاز است، که خود دشواری‌های دیگری به همراه دارد.

ابررساناها از خود نسبت به عبور جریان مستقیم، مقاومت صفر نشان می‌دهند. اما آزمایش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد این امر در مورد عبور جریان متناوب صحت ندارد. برای روشن شدن موضوع نتایج آزمایش انجام شده بر یک پنکیک دوپل ۵۴ دوری کوچک می‌تواند مفید باشد. در این آزمایش در جریان‌های مختلف با فرکانس‌های مختلف تلفات AC محاسبه شده است. نتایج آزمایش حاکی از آن است که افزایش سطح جریان متناوب یا افزایش فرکانس اعمالی تلفات را افزایش می‌یابد. شکل ۳-۱۰ ارتباط تلفات و فرکانس را برای پنکیک دوپل بالا برای ابررسانای BSCCO نشان می‌دهد [۲۴].



شکل ۳-۱۰- رابطه تلف و فرکانس در یک پنکیک دوپل ۵۴ دوری کوچک

<sup>1</sup>Air Core

توضیحات بالا نشانگر این واقعیت است که بهتر است ابررسانا را در روتور و در شرایط جریان مستقیم به کار ببریم. در این صورت فضای کافی برای سیم‌پیچ‌ها وجود داشته و ساختار کمتر چالش برانگیز است. از طرف دیگر حداکثر استفاده بهینه از ابررسانا در شرایط مقاومت صفر حاصل می‌شود. بنابراین ماشین‌های سنکرون با سیم‌پیچ روتور ابررسانا در حال حاضر عملی‌ترین طرح می‌باشند. تاکنون بیشتر ماشین‌های AC ابررساناییکه ساخته شده و با موفقیت مورد آزمایش قرار داده شده است سنکرون بوده‌اند. در این ماشین‌های ابررسانای سنکرون، سیم‌پیچ میدان روتور از ابررسانا تشکیل شده و در استاتور آنها مشابه انواع معمول از سیم‌های مسی استفاده شده است. جدول ۳-۱ نیز تصدیق می‌کند که در حال حاضر بیشترین تجربیات اجرایی و ساخت، به ماشین‌های سنکرون با قطب‌های برجسته و سیم‌پیچ‌های میدان ابررسانا محدود می‌شود [۴].

در تمامی ماشین‌های ابررسانای سنکرون ساخته شده به استثنای چند نمونه آزمایشگاهی از هسته مغناطیسی استفاده شده است. به کارگیری روتور با هسته مغناطیسی به میزان قابل ملاحظه‌ای MMF مورد نیاز روتور را کاهش داده و عمل کنترل میدان مغناطیسی در سیم‌پیچ روتور را آسان‌تر می‌کند. نکته دیگر آن است که این ساختار اجازه می‌دهد که مقدار بسیار کمتری ماده ابررسانا در سیم‌پیچ روتور نیاز باشد.

شرکت‌های سازنده متناسب با تجربه خود از ساخت ماشین‌های ابررسانای سنکرون با سیم‌پیچ میدان ابررسانا و آزمایش‌های انجام گرفته بر آنها، نتایج حاصل شده را منتشر کرده‌اند. تعدادی از این نتایج در ادامه ذکر شده‌اند:

- چگالی توان بالاتر نسبت به سایر ماشین‌های سنکرون معمول؛
- کاهش وزن در صورت عدم استفاده از هسته مغناطیسی؛
- بالا رفتن بازده و کاهش تلفات؛
- بازدهی بالا در بارهای مختلف؛



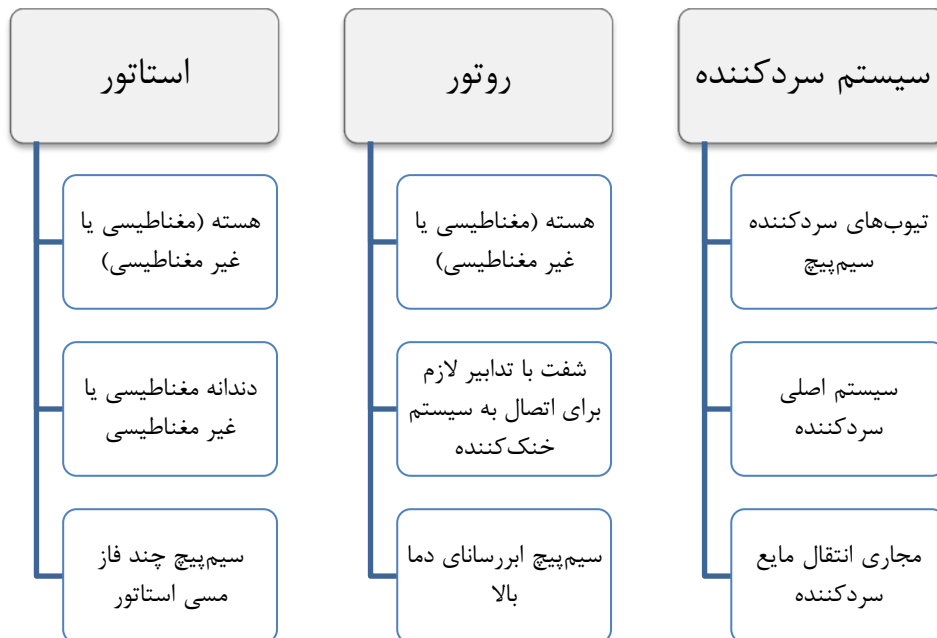
- کم صدایی؛
- طول عمر بیشتر؛
- بازگشت هزینه بالاتر؛
- نیاز به تعمیرات کمتر نسبت به موتور سنکرون معمولی
- و ... [۴].

جدول ۳-۱- موتورهای جریان متناوب ساخته شده

سازنده	توان نامی	نوع	پارامترهای اساسی
آمریکا	۱/۵kW	سنکرون	۲قطب، ۳۶۰۰rpm
	۳/۷kW	سنکرون	۴قطب، ۱۸۰۰rpm
	۹۲kW	سنکرون	۴قطب، ۱۸۰۰rpm
	۷۳۵kW	سنکرون	۴قطب، ۱۸۰۰rpm
	۳/۷MW	سنکرون	۴قطب، ۱۸۰۰rpm
	۵MW	سنکرون	۶قطب، ۲۳۰۰rpm
زیمنس	۴۰۰kW	سنکرون	۴قطب، ۱۸۰۰rpm
	۴MW	سنکرون	۲قطب، ۳۶۰۰rpm
کره	۷۳/۵kW	سنکرون	۴قطب، ۱۸۰۰rpm
	۳kW	سنکرون	۴قطب، ۱۸۰۰rpm
	۰/۷۵kW	القایی	۴قطب، ۱۷۱۰rpm
ژاپن	۳/۱kW	سنکرون	۸قطب، ۷۲۰rpm
	۱/۵kW	القایی	۴قطب، ۱۵۰۰rpm
فنلاند	۱/۵kW	سنکرون	۴قطب، ۱۸۰۰rpm

اکنون که ساختار مناسب برای موتور ابررسانا معرفی شد اجزای اصلی را معرفی می‌کنیم. اجزای اصلی تشکیل دهنده یک ماشین HTS به سه دسته روتور، استاتور و سیستم خنک‌کننده تقسیم می‌شود. در یک موتور HTS سنکرون با روتور ابررسانا، روتور مهم‌ترین بخش بوده و با روتور موتورهای معمولی

تفاوت دارد. این تفاوت به دلیل حضور سیم پیچ HTS میدان بر روی روتور بوده که توسط سیستم خنک کننده سرد می شود [۱۷]. در گراف شکل ۳-۱۱ اجزای اصلی موتور را نشان داده است.

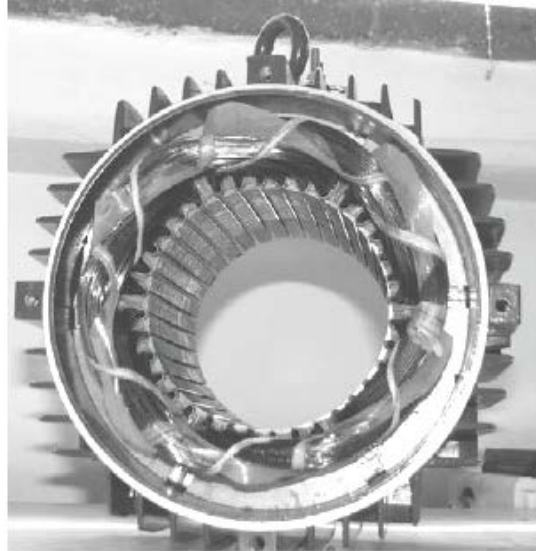


شکل ۳-۱۱- اجزای اصلی موتور

### ۳-۴-۱- استاتور موتور سنکرون ابررسانا با سیم پیچ ابررسانای میدان

طراحی آرمیچر این طرح عموماً همانگونه که در موتورهای معمولی وجود دارد از هسته آهنی تشکیل شده است. سیم پیچ های AC استاتور از مس ساخته شده است. عموماً بعد از طی مرحله ساخت یک حفاظ مغناطیسی<sup>۱</sup> بر روی لایه خارجی استاتور قرار می گیرد و مانع نشت میدان مغناطیسی به بیرون موتور شده و استحکام مکانیکی را تامین می کند [۱۹]. حفاظ موتور از استیل (فولاد ضد زنگ) ساخته شده و به گونه ای ساخته می شود تا حرارت حاصله از تلفات استاتور را با انتقال به محیط بیرون کاهش می دهد. شکل ۳-۱۲ طرح استاتور با هسته مغناطیسی و حفاظ آن را برای یک موتور نمونه نشان داده است [۷].

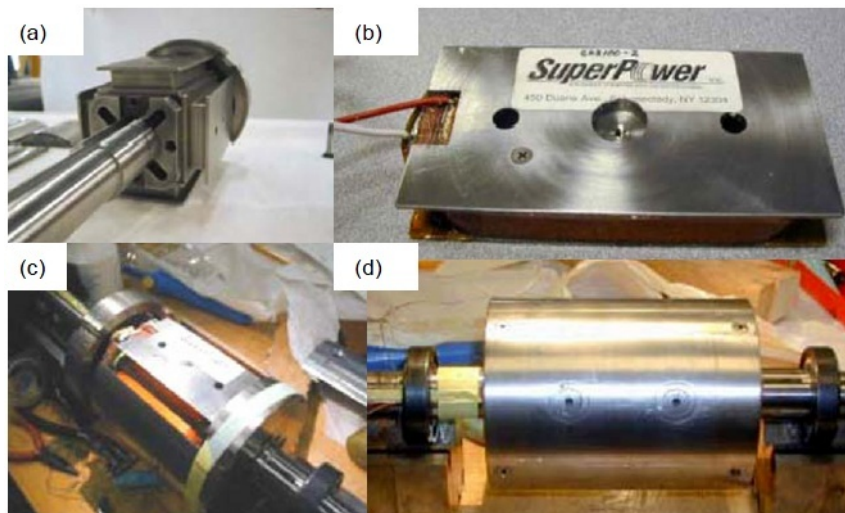
<sup>۱</sup>Electromagnetic shield



شکل ۳-۱۲- استاتور یک موتور سنکرون ابرسانای نمونه

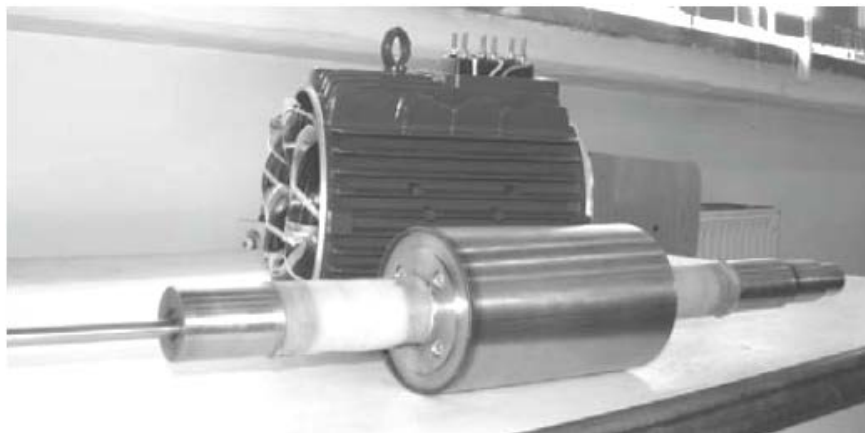
### ۳-۴-۲- روتور در موتور سنکرون ابرسانا با سیم پیچ میدان ابرسانا

روتورموتورهای سنکرون HTS مورد بحث ما دارای ساختار متفاوتی می باشند. روتور شامل سیم پیچ HTS میدان بوده و باید با شرایط مناسب کاری (دما و جریان و میدان مغناطیسی) تطبیق داده شود. روتور به طور پایاپای با سیستم خنک کننده کار می کند تا سیم پیچ های HTS را پایین تر از دمای گذار در حالت ابرسانایی (برای مثال کمتر از ۶۵ کلوین) حفظ کند [۱۹]. شکل ۳-۱۳ قالب کلی روتور یک موتور ابرسانای چهار قطبی را نشان می دهد.



شکل ۳-۱۳- مراحل تکمیل ساختار روتور

شکل ۳-۱۳ (a)، روتور را بدون نصب سیم‌پیچ‌ها نشان می‌دهد. (b)، نشانگر چگونگی قرار گرفتن سیم‌پیچ در محل مورد نظر، (c)، روتور پس از نصب سیم‌پیچ‌ها و در نهایت (d) روتور را پس از قرار گرفتن روتور در اتاقک سرد به تصویر کشیده است. از آنجا که سیم‌پیچ ابررسانا به منظور استفاده باید تا زیر دمای بحرانی سرد شود به منظور ایزوله کردن محیط روتور از استاتور، روتور در محفظه سرد قرار می‌گیرد. رویه استوانه‌ای که در شکل ۳-۱۳ (d) دیده می‌شود دمپر موتور می‌باشد. دمپر و کاربردش در موتور در فصل بعدی توضیح داده خواهد شد. در نهایت شکل ۳-۱۴ استاتور و روتور مربوط به موتور سنکرون با سیم‌پیچ ابررسانای مورد نظر را در کنار یکدیگر نشان می‌دهد.



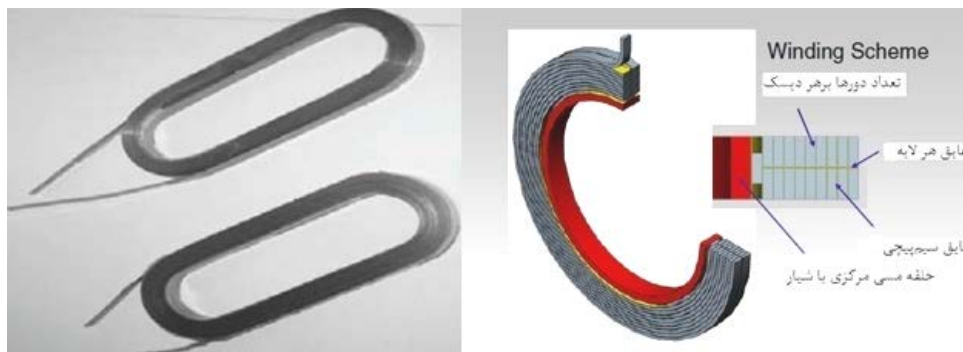
شکل ۳-۱۴- استاتور و روتور یک موتور سنکرون با سیم‌پیچ ابررسانای نمونه

### ۳-۴-۳- ابررسانا در سیم‌پیچی میدان

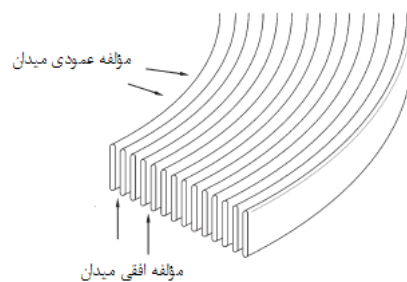
برای بهبود آرایش نوارهای ابررسانا و استفاده مناسب‌تر از فضا، سیم‌پیچ ابررسانای روتور را به صورت پنکیک دابل می‌پیچند. شکل ۳-۱۵ طرحواره یک سیم‌پیچ پنکیک دابل را نشان می‌دهد [۲۴]. برای درک بهتر چگونگی شکل‌گیری پنکیک دابل فرض کنید نواری را از دو انتهایش به دور یک فریم بپیچیم. سیم‌پیچ‌های HTS هنگام پنکیک پیچیده شدن به چسب آغشته و عایق سازی می‌شوند. همینطور هر سیم در سیم‌پیچی با یک لایه عایق ترموپلاستیک<sup>۱</sup> پوشیده می‌شود. بعد از اعمال این ملاحظات، سیم‌پیچ‌ها برای تعیین شرایط کاری از جمله جریان بحرانی مورد آزمایش قرار می‌گیرند.

<sup>۱</sup>thermoplastic (polybndex)

جریان بحرانی نوار HTS به دمای کار ماشین و میدان مغناطیسی حساس می‌باشد و آزمایش‌های انجام شده نشان داده است که وابستگی جریان بحرانی به مؤلفه عمودی میدان مغناطیسی نسبت به مؤلفه افقی یا مماسی آن بیشتر است. شکل ۳-۱۶ میدان مغناطیسی اعمال شده بر نوار را نشان می‌دهد [۲۱].



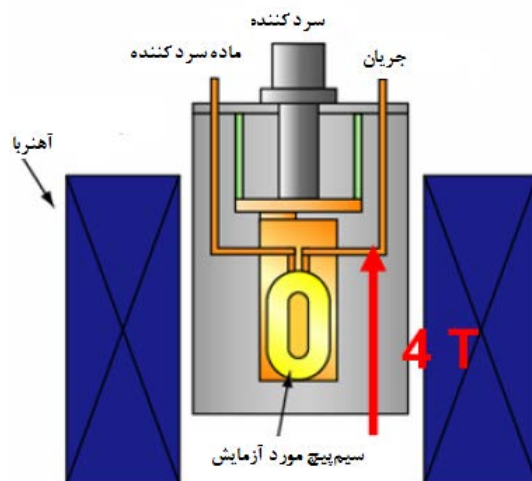
شکل ۳-۱۵- شماتیک پنکیک دوپل (سمت راست)، نمونه واقعی (سمت چپ)



شکل ۳-۱۶- مؤلفه میدان عمودی بر ابرسانا

جریان بحرانی سیم‌پیچ‌های HTS به کار رفته در موتور ابرسانا نقش حیاتی در عملکرد آن دارد. اگر جریان عبوری از سیم‌های ابرسانا از جریان بحرانی بالاتر رود خاصیت ابرسانایی از بین رفته و سیم‌ها آسیب می‌بینند. بنابراین همواره جریان باید در سیم‌پیچی HTS مورد استفاده از مقدار جریان بحرانی کمتر باشد. از طرفی باید جریان عبوری شرایط مغناطیسی لازم را ارضا کند در غیر این صورت صرف کمتر بودن جریان کاری ابرسانا از جریان بحرانی در یک دمای معین حفظ ابرسانایی را تضمین نمی‌کند. جریان بحرانی برای هر سیم‌پیچ با آزمایش بدست می‌آید. نحوه محاسبه جریان بحرانی یک سیم‌پیچ به این شکل است که مطابق شکل ۳-۱۷ یک سیم‌پیچی HTS را در محفظه سرد کننده سرد

کرده و توسط آهنربا به آن میدان مغناطیسی اعمال کرده و با افزایش مقدار جریان در سیم‌پیچی به ازای هر میزان دلخواه میدان مغناطیسی، با مشاهده شکست ابرسانی جریان بحرانی را به ازای آن میدان بدست می‌آورند [۲۵].



شکل ۳-۱۷- آزمایش مربوط به محاسبه جریان بحرانی در دمای خاص

# فصل چہارم

طراحی موتور سنکرون با

سیم پیچ ابررسانا

## ۴-۱- مقدمه

ماشین‌های سنکرون امروزه در بخش گسترده‌ای از صنایع بزرگ به کار گرفته می‌شوند. این امر به دلیل فوایدی است که این گونه ماشین‌ها نسبت به انواع دیگر دارند. همین کاربرد گسترده باعث شده تا توجه ویژه‌ای به این ماشین‌ها شود [۲۶].

در بخش‌های قبلی ماشین‌های ابرسانا تشریح شده و پارامترهای اساسی آنها مورد بحث و بررسی قرار گرفت. با توجه به نکات ذکر شده تاکنون، تدوین دانش فنی طراحی و ساخت ماشین‌های سنکرون ابرسانا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از سوی دیگر ساختار ماشین و حساسیت‌های هندسی با در نظر گرفتن مواد سازنده اجزاء آن از جمله استاتور و روتور، مسائل مرتبط با ساخت آن را پررنگ می‌نماید به طوریکه برای داشتن عملکرد، عمر و دوام مناسب لازم است اجزاء مهم ماشین از جنس مناسب انتخاب و با روند خاصی ساخته شوند. تاکنون هیچ الگوریتم ثابت و مشخصی برای طراحی ماشین‌های ابرسانا ارائه نشده است. غالباً طراحی یک ماشین سنکرون ابرسانا به خاطر حضور ابرسانا تا حدی مبتنی بر محاسبات کامپیوتری اجزاء محدود می‌باشد چراکه اولین رکن در صحت عملکرد ماشین سنکرون صحت عملکرد سیم‌پیچ‌های ابرسانا می‌باشد. از طرفی زیاد بودن میزان طول فاصله هوایی در ماشین‌های ابرسانا، بسیاری از ملاحظات موجود در روند طراحی ماشین‌های الکتریکی معمول را کم اهمیت یا بی اهمیت می‌کند. در طول این فصل یک موتور سنکرون با بهره‌گیری از ویژگی‌های ابرسانا طراحی و ساختار ارائه می‌شود.

## ۴-۲- اصول طراحی

در طراحی هر وسیله اصول و روش‌های خاصی مشترک می‌باشد و آنچه در این میان تغییر می‌یابد میزان پیچیده‌گی برآورده شدن مجموعه مشخصات داده شده می‌باشد. طراحی ماشین‌های الکتریکی نیز مانند طراحی هر وسیله دیگری با دنبال نمودن مراحل منظم و مرتبی انجام می‌گیرد. بنابراین برای شروع فرآیند طراحی باید:



۱. منظور از وسیله مورد طراحی را به‌طور عام و یا در بعضی موارد به‌طور خاص و با جزئیات بیشتر همانطور که در مشخصات آن ذکر می‌شود بدانیم؛

۲. اطلاعات از پیش فراهم شده‌ای را در مورد موادی که وسیله مورد طراحی از آنها ساخته می‌شود در اختیار داشته باشیم؛

۳. اطلاعات کافی در باره خواص فیزیکی مواد سازنده طرح و توانایی لازم در تفسیر این اطلاعات را داشته باشیم به‌طوری‌که مقدار مواد لازم و چگونگی ترکیب آنها با یکدیگر را تخمین بزنیم؛

۴. دانش کافی از اصول عملکرد و اجزای گوناگون طرح و اینکه آنها چگونه با هم عمل می‌نمایند را داشته باشیم؛

۵. یک مدل مناسب را از طرح فراهم نماییم به‌طوری‌که بر آن اساس قادر به ارزیابی دقیق و قابل قبولی از طرح و بررسی برآورده شدن مشخصات مطلوب داشته باشیم. به عنوان مثال این مدل می‌تواند فیزیکی، نمونه یا کپی کوچک، مدل ریاضی، برنامه‌ها و شبیه سازی‌های کامپیوتری باشد.

بنابراین بطور خلاصه باید شناخت مناسبی از آنچه می‌خواهیم طراحی کنیم را داشته باشیم [۲۷].

## ۴-۳- طراحی موتور سنکرون با سیم‌پیچ میدان ابرسانا

### ۴-۳-۱- توضیحات ساختاری

طی این فصل یک موتور سنکرون با سیم‌پیچ میدان ابرسانا طراحی و ارائه شده است. همانگونه که در بخش‌های گذشته ذکر شد ماشین‌های ابرسانا به تازگی توانسته‌اند توجهات را جلب کنند ولی اطلاعاتی در مورد وجود شیوه طراحی این ماشین‌ها در دسترس نیست. از طرفی در این کار صرفاً سعی بر طراحی یک موتور سنکرون ابرسانا نبوده بلکه ساختار جدیدی برای یک موتور ابرسانا معرفی شده است. در این طرح روتور موتور سنکرون ابرسانای طراحی شده بطور کامل از آهن

تشکیل نشده بلکه مقدار قابل توجهی ماده مستحکم و غیر مغناطیسی را نیز در خود بجای آهن به همراه دارد. با معرفی چنین ساختاری در درجه اول وزن روتور به دلیل استفاده از غیر مغناطیسی سبک کاهش یافته و از طرف دیگر هزینه موتور نسبت به انواع هسته هوایی کاهش قابل توجهی خواهد داشت. بکارگیری مواد غیر مغناطیسی در ساختار موتور بدلیل آمپر دور بالای مورد نیاز بدون بکارگیری ابرسانا امکان پذیر نمی باشد. علت آن است که با حذف آهن و افزایش نیروی محرکه مغناطیسی مورد نیاز موتور، در صورت استفاده از هادی های معمول تلفات بسیار زیاد خواهد بود. از سوی دیگر مطابق با توضیحات داده شده در فصل های گذشته، ماشین های سنکرون ابرسانا بدلیل نیاز به وجود محفظه سرد روتور برای کار عادی و نیاز به دمپر مغناطیسی به خودی خود فاصله هوایی بزرگی دارند. در صورت عدم وجود محفظه سرد حرارت ایجاد شده در استاتور به سیم پیچ های ابرسانا منتقل می شود و توان مصرفی سیستم سردکننده را بشدت بالا می برد. پس محیط گرم استاتور توسط عایق های حرارتی از محیط سرد روتور جدا می شود. میزان بزرگی فاصله هوایی مقداری مشخص یا قابل محاسبه نیست و به مسائل حرارتی و مغناطیسی بستگی دارد [۲۸]. فاصله هوایی بزرگ به همراه بکارگیری مواد غیر مغناطیسی طول مؤثر مسیر غیر مغناطیسی را تا چندین برابر افزایش می دهد. بخش های مغناطیسی و غیر مغناطیسی روتور در نهایت بهم پیچ شده و در کنار هم محکم می شوند. دقت شود این طرح با روتور بدون هسته که در بخش معرفی ماشین های سنکرون ابرسانا به آن اشاره شد کاملاً متفاوت است چراکه هسته حذف نشده بلکه بخشی از آهن سازنده هسته روتور با ماده غیر مغناطیسی جایگزین شده است.

در مدل پیشنهادی برای موتور سنکرون ابرسانا، روتور به چهار قسمت مجزا تقسیم شده است:

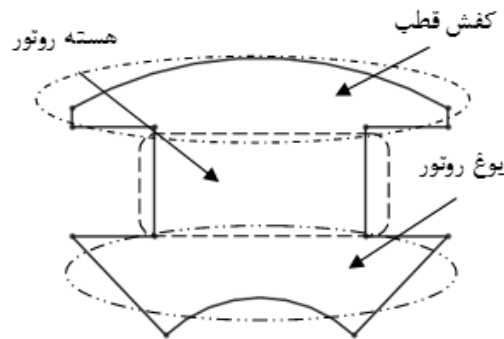
- کفش روتور<sup>۱</sup>؛
- هسته روتور<sup>۲</sup>؛
- یوغ روتور<sup>۱</sup>؛

---

<sup>۱</sup>Pole shoe  
<sup>۲</sup>Rotor core

- محور روتور<sup>۲</sup> (شفت).

به منظور درک بهتر از تقسیم‌بندی ارائه شده شکل ۴-۱ را ببینید. در این مدل کفش روتور و یوغ روتور از مواد غیر مغناطیس مستحکم (نظیر G-10 Fiberglass) تشکیل شده است. در مقابل جنس هسته روتور در این طرح فولاد ضد زنگ<sup>۳</sup> می‌باشد. علت این انتخاب آن است که بدلائل مغناطیسی امکان ساخت تمام هسته روتور از ماده غیر مغناطیس وجود ندارد. علت به مسائل مغناطیسی مربوط می‌شود. در صورتی که میدان مغناطیسی اعمال شده به سیم‌های ابررسانا از حد مجاز فراتر رود خاصیت ابررسانایی از بین رفته و در کار عادی ماشین خلل ایجاد خواهد شد. حال اگر تمام ساختار روتور غیر مغناطیس باشد ممکن است با بالا رفتن بیش از اندازه شارهای ناشی و با بسته شدن بخش زیادی از خطوط شار حاصله از کار عادی در محل سیم‌پیچی ابررسانا، شرایط مغناطیسی مورد نیاز ابررسانا برای حفظ خاصیت ابررسانایی از بین خواهد رفت. از سوی دیگر حجم بالای ابررسانای مورد نیاز از نظر اقتصادی توجیه منطقی نخواهد داشت.



شکل ۴-۱ - سه بخش روتور

به همین دلیل در طرح پیش رو هسته روتور مغناطیسی در نظر گرفته شده است. به این روش شار در طول مسیر هسته مغناطیسی هدایت شده و مانع از تمرکز زیاد شار بر سیم‌های ابررسانای روتور می‌شود. حال آنکه دو بخش دیگر روتور از جنس ماده غیرمغناطیسی خواهد بود. البته انتخاب میزان

<sup>1</sup>Rotor yoke

<sup>2</sup>Shaft

<sup>3</sup>Stainless steel

دقیق آهن مورد نیاز برای تضمین شرایط مناسب مغناطیسی سیم‌های ابررسانا به عنوان یک چالش نیازمند بکارگیری شبیه‌سازی‌های کامپیوتری و بخصوص روش اجزای محدود می‌باشد که در مراحل نهایی طراحی موتور به آن پرداخته خواهد شد.

استاتور در این مدل مشابه با استاتور سایر انواع معمول ماشین‌های سنکرون شامل هسته آهنی بوده و سیم‌پیچ‌های مسی مورد نیاز در دندانه‌های آهنی جا زده شده‌اند. دندانه‌ها به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شوند که با وجود چگالی شار زیاد فاصله هوایی به اشباع نروند. پروسه طراحی به دو فاز اصلی تقسیم‌بندی شده است. طی فاز اول طراحی ابتدا روتور و جزئیات سیم‌پیچ ابررسانا طراحی شده، سپس با طراحی استاتور و جزئیات آن یک طرح اولیه بدست می‌آید. پس از تکمیل فاز اول، طراحی وارد فاز دوم طراحی می‌شود. در فرآیند فاز دوم طراحی، جزئیات نهایی موتور ارائه شده و موتور برای مشخص شدن صحت عملکرد مورد آنالیز اجزاء محدود قرار می‌گیرد. خاصیت ابررسانایی از جمله مواردی است که در فاز دوم طراحی مورد بررسی قرار می‌گیرد. تلفات موتور، بازده و اندوکتانس‌های خودی و متقابل سیم‌پیچ‌های موتور از دیگر پارامترهایی است که مورد توجه قرار گرفته‌اند.

در بسیاری دیگر از موتورهای صنعتی حتی فاصله هوایی بزرگتر هم در نظر گرفته می‌شود. علت نیاز به بکارگیری دمپر مغناطیسی است. بنابراین فاصله هوایی بزرگتری نسبت به حالت معمول مورد نیاز است. البته بالا بردن میزان ابررسانا هزینه را بالا می‌برد که از نقطه نظر اقتصادی مطلوب نیست.

به منظور طراحی روتور در اولین گام باید قطر شفت موتور انتخاب شود. در ماشین‌های ابررسانا شفت نقش ویژه‌ای را بازی می‌کند. علت آن است که مایع سردکننده (معمولاً نیتروژن مایع) از طریق شفت وارد موتور و در سیم‌پیچ‌های ابررسانا توزیع شده و دمای آنها را به زیر دمای بحرانی کاهش می‌دهد. نیتروژن مایع پس از گردش در طول سیم‌های ابررسانا توسط مجراهای تعبیه شده به شفت بازگشته و از موتور خارج می‌گردد. به این خاطر و نیز مسائل مکانیکی قطر شفت معمولاً در ماشین‌های ابررسانا به میزان قابل ملاحظه‌ای از شفت ماشین‌های معمول بزرگ‌تر می‌باشد. جدول ۴-۱ مشخصات موتوری که در این کار طراحی شده را نشان می‌دهد.

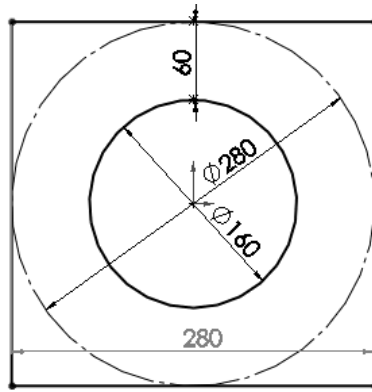
جدول ۴-۱- مشخصات موتور ی که باید طراحی شود

۱/۱	توان نامی موتور (Mw)
۵۰	فرکانس نامی (Hz)
۱۵۰۰	سرعت روتور (rps)
YBCO	ابرسیانای به کار رفته
۳۳۰۰	ولتاژ نامی (rms)
۳	تعداد فازها
۴	تعداد قطبها
۰/۹	ضریب توان

### ۴-۳-۲- فاز اول طراحی

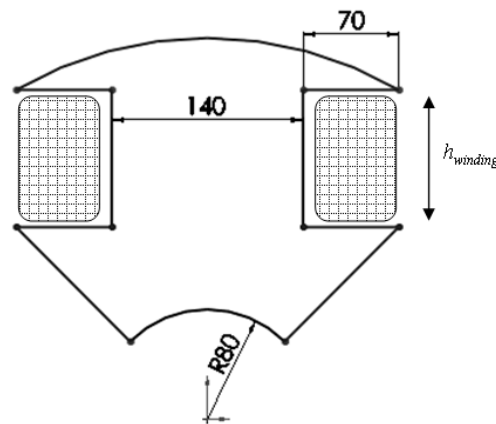
### ۴-۳-۱- طراحی روتور

همانگونه که در بخش توضیحات ساختاری بیان شد، در الگوریتم پیشنهادی ابتدا مشخصات روتور بدست می‌آیند. بدلیل حضور غیرمغناطیس طراحی روتور در این طرح کاملاً به اختیار طراح است. به همین منظور قطر شفت روتور را به عنوان اولین پیش فرض طراحی روتور، ۱۶۰ میلیمتر در نظر می‌گیریم. یوغ روتور نیز که از ماده غیرمغناطیس تشکیل شده به منظور جاگیری بهتر سیم‌پیچ‌های ابررسیان در هر قطب، ساختاری مربعی دارد. با توجه به استحکام مکانیکی بالای غیر مغناطیس بکار رفته، ضخامت فایبرگلاس زیر هر قطب ۶۰ میلیمتر انتخاب شده و به این ترتیب یوغ غیرمغناطیسی بدست می‌آید. دقت شود که مسائل مغناطیسی بر طراحی بخش‌های غیرمغناطیسی کاملاً بی‌تأثیرند. به منظور درک بهتر شکل ۴-۲ را ببینید.



شکل ۴-۲- طرح یوغ غیرمغناطیسی

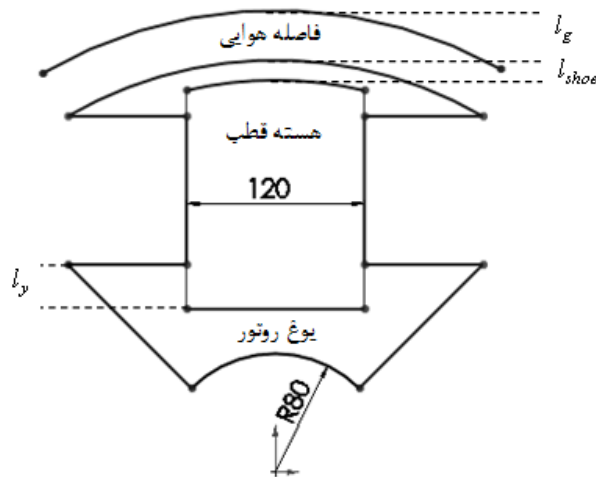
اینک طرح اولیه یوغ غیرمغناطیسی روتور بدست آمده است. اکنون در ادامه سایر بخش‌های روتور طراحی می‌شوند. همانگونه که تاکنون ذکر شد نوارهای ابرسانا که در ماشین‌های الکتریکی به عنوان سیم‌پیچ‌های ابرسانا بکار می‌روند عموماً به صورت پنکیک دابل می‌باشند. بنابراین فضای کافی باید برای سیم‌پیچ‌های پنکیک در نظر گرفته شود. لذا در گام اول نیمی از فضای موجود بر هر ضلع یوغ غیر مغناطیسی را به سیم‌پیچ‌های پنکیک و ساختار سردکننده‌اش اختصاص می‌دهیم. به عبارت دیگر ماکسیمم ۱۴۰ میلیمتر از کل ۲۸۰ میلیمتر فضای موجود به سیم‌پیچ‌های پنکیک و ساختار سردکننده‌اش اختصاص می‌یابد. به منظور درک بهتر مطلب شکل ۴-۳ می‌تواند مفید باشد. لازم به ذکر است که  $h_{winding}$  که در شکل ۴-۳ نشان داده شده ارتفاع سیم‌پیچ ابرسانا بوده که مقدار دقیق آن در مراحل بعدی مشخص خواهد شد.



شکل ۴-۳- جاگیری سیم‌پیچ‌های ابرسانا روی یوغ غیر مغناطیسی

در فصل گذشته مطالبی در مورد فریم‌های مورد نیاز برای هر سیم‌پیچ‌های پنکیک دوبل گفته شد. در این طرح نیز از یک فریم مسی به عنوان نگه‌دارنده و افزایش دهنده استحکام مکانیکی سیم‌پیچ پنکیک استفاده شده است. معمولاً کارخانه‌های سازنده سیم‌پیچ‌های پنکیک، پنکیک‌ها را با فریم‌هایی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر تولید می‌کنند. البته بنا به سفارش مشتری این فریم‌ها ممکن است با ضخامت‌های متفاوت ارائه شوند. در این طرح از فریمی با ضخامت استاندارد ۱۰ میلی‌متر استفاده شده است. با احتساب ۱۴۰ میلی‌متر از طول عرض یوغ برای سیم‌پیچ‌ها و ۲۰ میلی‌متر برای قرارگیری فریم سیم‌پیچ‌های ابررسانا در هر دو طرف هسته قطب، عرض هسته مغناطیسی قطب ۱۲۰ میلی‌متر خواهد بود. در فاز دوم طراحی ضخامت محاسبه شده برای هسته قطب با روش المان محدود به منظور جلوگیری از رخداد پدیده اشباع آهن مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

به منظور محاسبه ارتفاع سیم‌پیچ ابررسانا و همچنین محاسبه آمپردور مورد نیاز فاصله هوایی لازم است ابعاد هسته مغناطیسی قطب مشخص شود. بنابراین لازم است به پدیده اثر فصل مشترک اشاره شود. اثر فصل مشترک در واقع به اغتشاش مغناطیسی حاصل در محل اتصال دو ماده که از لحاظ مغناطیسی عملکردی متفاوت دارند، دلالت دارد. بدلیل اهمیت زیاد این پدیده در عملکرد صحیح سیم‌پیچ‌های ابررسانا نام اثر فصل مشترک توسط نویسنده انتخاب شده است. در واقع اغتشاشات پدید آمده در این شرایط می‌تواند به راحتی شرایط ابررسانایی را با افزایش میزان میدان مغناطیسی اعمال شده به نوارهای ابررسانا از بین ببرد. میزان این اغتشاشات به وجود آمده در لبه‌های تیزتر محل اتصال بیشتر است. پس لازم است حتی‌الامکان لبه‌های هسته مغناطیسی روتور از سیم‌پیچ‌های ابررسانا فاصله داشته باشند. به این منظور طرح داده شده در شکل ۴-۴ به عنوان طرح اولیه قطب روتور ارائه شده است.



شکل ۴-۴- طرح اولیه قطب روتور

در این طرح پیش فرض‌های زیر انتخاب شده‌اند:

$$l_{shoe} = 10mm \quad (1)$$

$$l_y = r_{yoke}^{av} - r_{shaft} \quad (2)$$

همانگونه که قبلا اشاره شد کفش قطب نیز غیرمغناطیسی می‌باشد. با توجه به شکل ۴-۴،  $l_{shoe}$  ضخامت کفش قطب می‌باشد. وجود کفش قطب در این طرح کاملا اختیاری است و می‌تواند از طرح به راحتی کنار گذاشته شود. اما در این طرح بدلیل سرعت چرخش موتور و برای حفظ استحکام مکانیکی سیم‌پیچ‌های ابررسانا کفش قطب بکارگرفته شده و ضخامت آن ۱۰ میلیمتر فرض شده است. از طرف دیگر به منظور سینوسی شدن چگالی شار فاصله هوایی بخش بالایی هسته مغناطیسی روتور گرد فرض شده و در شکل ۴-۴ نیز نشان داده شده است.

مواد غیر مغناطیسی مانند فایبرگلاس در مواجهه با میدان مغناطیسی رفتاری مشابه هوا از خود بروز می‌دهند. در ماشین‌های غیر ابررسانای سنکرون معمول عموما چیزی حدود ۸۰ درصد آمپردور تحریک به آمپردور مورد نیاز فاصله هوایی تخصیص می‌یابد. در این طرح با توجه به فاصله هوایی بزرگ و البته حجم بالای ماده غیر مغناطیسی به کار رفته با دقت بسیار بالا تمام آمپردور تولید شده تحریک مربوط به آمپردور مورد نیاز فاصله هوایی و مواد غیرمغناطیسی می‌باشد. بزرگ بودن مقاومت



مغناطیسی موجود در طرح حاضر بسیاری از جزئیات طراحی موتورهای سنکرون معمول را به حاشیه می‌راند. اصولاً فاصله هوایی در موتورهای ابررسانا بسته به عایق‌های لازم برای فاصله هوایی می‌تواند متفاوت باشد. به منظور وجود فضای کافی برای عایق‌های حرارتی و مغناطیسی، فاصله هوایی برای این طرح ۱۷ میلی‌متر انتخاب شده است. در این صورت کل طول مسیر غیرمغناطیسی  $l_{path}$ ، شامل فاصله هوایی، کفش قطب و یوغ روتور برای هر قطب به صورت زیر خواهد بود.

$$l_{path} = l_g + l_{shoe} + l_{yoke}^{av} \quad (3)$$

که در آن:

$$l_{yoke}^{av} = \frac{\pi \times D_{yoke}^{av}}{4 \times p} \quad (4)$$

در رابطه (۳)  $l_{yoke}^{av}$  طول مسیر غیرمغناطیسی یوغ روتور می‌باشد.  $D_{yoke}^{av}$  در رابطه (۴) قطر متوسط یوغ غیرمغناطیسی بوده که با توجه به شکل ۴-۲، ۲۲۰ میلی‌متر بدست می‌آید.  $p$  نیز در این رابطه تعداد قطب‌ها می‌باشد.

در این طرح قصد بر این است که چگالی شار فاصله هوایی تا حد امکان بالا باشد. به همین دلیل طراحی برای چگالی شار حداکثر فاصله هوایی ۱/۱ تسلا انجام می‌گردد. با توجه به طول مسیر مغناطیسی داده شده در رابطه (۳) و نیز با در نظر گرفتن چگالی شار فاصله هوایی مطلوب، آمپر دور مورد نیاز سیم‌پیچ تحریک به صورت زیر بدست خواهد آمد.

$$\frac{B_g}{\mu_0} \times l_{path} = N_f \times I_c \quad (5)$$

در رابطه (۵)  $B_g$  چگالی شار فاصله هوایی،  $\mu_0$  نفوذپذیری مغناطیسی هوا،  $N_f$  تعداد دورهای سیم‌پیچ تحریک و نیز  $I_c$  جریان کاری سیم‌پیچ‌های تحریک می‌باشد. نکته قابل ذکر این است که جریان کاری سیم‌پیچ‌های تحریک ابررسانا بسته به شرایط اعمالی به آن متفاوت است. از آنجا که

ابرساناها به میدان اعمالی شده حساسند و نیز با توجه به چگالی شار بالای فاصله هوایی، به منظور حفظ خاصیت ابررسانایی در میدان‌های قوی، دمای کاری موتور پس از آنالیز مغناطیسی موتور انتخاب خواهد شد. به منظور شناخت بیشتر پارامترهای مورد نیاز سیم‌پیچ ابررسانا مشخصات ابررسانای YBCO در جدول ۲-۴ ارائه شده است [۲۸]-[۲۹].

جدول ۴-۲- مشخصات ابررسانای YBCO

۰/۳۶ - ۰/۴۴ میلی‌متر	ضخامت نوار
۴/۲۴ - ۴/۴۵ میلی‌متر	پهنای نوار
۱۷ میلی‌متر	حداقل شعاع انحنا
۱۶۵ آمپر	$I_{c0}$ در ۶۵ درجه کلوین
۰/۹	$I_c / I_{c0}$ در میدان حداکثر ۰.۸ تسلا

مطابق با اطلاعات داده شده در جدول ۴-۲ ضخامت و پهنای هر نوار ابررسانای YBCO با در نظر گرفتن تolerانس خطا داده شده است. اصولاً نوارها در کارخانه سازنده قبل از پیچیده شدن عایق کاری می‌شوند. به این صورت که هر نوار با لایه نازکی از عایق پوشانیده می‌شوند. بنابراین ضخامت و پهنای هر نوار بعد از عایق کاری اندکی بیشتر می‌باشد. عایق کاری مناسب مطابق با موارد ارائه شده در مرجع [۲۸] به گونه‌ایست که هر نوار پس از عایق کاری ۰/۹ میلی‌متر ضخامت و ۵ میلی‌متر پهنای خواهد داشت. نوارها پس از عایق کاری به سفارش مشتری در تعداد دوره‌های خواسته شده به صورت پنکیک دویل تحویل می‌گردند.

از طرف دیگر نوارهای ابررسانا در مجموع شکننده می‌باشند. به همین منظور کارخانه سازنده حداقل شعاع انحنا را برای تولید خود را ارائه می‌دهد. برای نواری که در این موتور استفاده شده همانگونه که در جدول ۴-۲ ارائه شده، حداقل شعاع انحنا ۱۷ میلی‌متر برای نوار مجاز می‌باشد. اما بخش مهم این جدول در جزئیات جریان نهفته است.  $I_{c0}$  در جدول ۴-۲ جریان بحرانی نوار ابررسانا در دمای داده شده را ارائه می‌دهد. برای YBCO در ۶۵ درجه کلوین جریان بحرانی ۱۶۵ آمپر می‌باشد. از سوی دیگر  $I_c$  نیز به جریان کاری سیم ابررسانا اشاره دارد. همینطور سطر آخر جدول ۴-۲ مؤید این

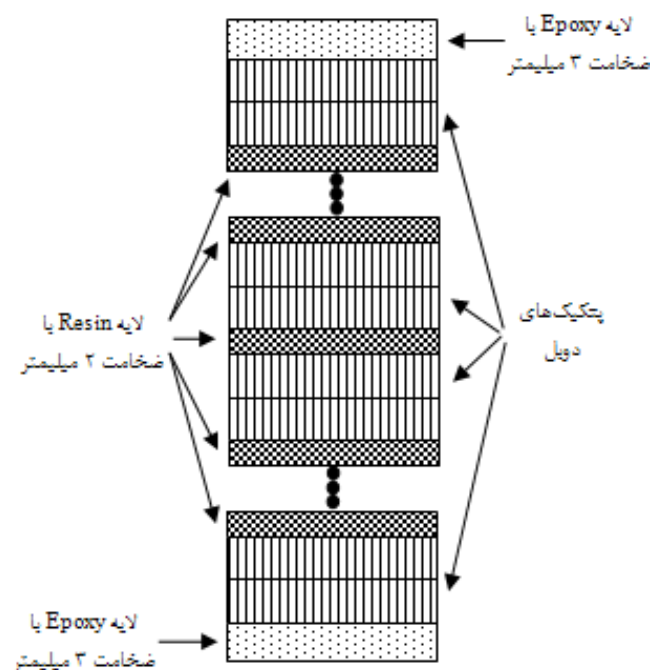
واقعیت است که اگر میدان مغناطیسی مؤثر بر نوار در شرایط ۶۵ درجه کلون به ۰/۸ تسلا افزایش یابد در این صورت جریان حداکثری که نوار بدون از دست رفتن خاصیت ابررسانایی قادر به تحمل آن است ۱۵۰ آمپر می‌باشد. در این موتور بخاطر شرایط مغناطیسی حاکم، به منظور حفظ حاشیه اطمینان مغناطیسی جریان کاری سیم‌پیچ‌های ابررسانای روتور ۱۲۰ آمپر انتخاب شده است. البته این انتخاب در نهایت باید مورد بررسی مغناطیسی قرار گیرد تا اطمینان حاصل شود شرایط ابررسانایی در این جریان تحریک حفظ می‌شود یا خیر. در صورت عدم تأمین شرایط مغناطیسی با انتخاب دمای پایین‌تر مشکل رفع خواهد شد.

اکنون آمپر دور لازم برای فاصله هوایی با بکارگیری معادله (۵) قابل محاسبه است. به منظور حذف تأثیر عکس‌العمل آرمیچر تعداد دور سیم‌پیچ تحریک را بصورتی محاسبه می‌کنیم که چگالی شار فاصله هوایی حداکثر میزان مورد نظر را در فاصله هوایی اختیار کند. در این صورت معادله (۵) به صورت زیر نوشته خواهد شد:

$$\frac{1.1}{\mu_0} \times (17 + 10 + 43) \times 10^{-3} = 120 \times N_f \quad (۶)$$

با توجه به رابطه (۶)،  $N_f$  محاسبه می‌شود. بنابراین کل آمپر دور تحریک مورد نیاز موتور ۶۰۰۰۰ آمپر دور بوده که در قیاس با موتورهای معمول بسیار بزرگ می‌باشد. اما فرآهم آوردن چنین آمپر دور بالایی فقط توسط سیم‌پیچ‌های ابررسانا در صورت حفظ خاصیت ابررسانایی و در شرایط مقاومت الکتریکی صفر امکان‌پذیر است و همین نکته ویژگی شاخص ابررساناها را نسبت به یک هادی معمول مثل مس نشان می‌دهد. از طرف دیگر در موتور باید فضایی برای قرارگیری ساختار سردکننده سیم‌پیچ ابررسانا در نظر گرفته شود. ساختار سردکننده معمولاً شامل مجاری مسی است که مسیری برای گردش نیتروژن مایع ایجاد می‌کنند. سیستم سردکننده بطور مفصل در فصل بعدی تشریح و ساختار سردکننده مناسب برای موتور معرفی می‌شود. اما در این بخش باید فضای لازم برای آن در نظر گرفته شود.

در مرجع [۲۸]، الگویی برای عایق سازی پنکیک‌های دوبل داده شده است. در این طرح از این الگو استفاده شده و به این گونه است که هر پنکیک دوبل به تنهایی از دو طرف منتهی به پنکیک‌های دوبل مجاورش عایق سازی می‌شود. مطابق با الگوی داده شده میان هر دو پنکیک دوبل لایه‌ای از عایق با ضخامت ۲ میلی‌متر قرار گرفته و نیز پنکیک‌های دوبلیکه در انتهای مجموعه قرار می‌گیرند از طرف بیرونی با لایه‌ای از عایق Epoxy با ۳ میلی‌متر ضخامت پوشانیده می‌شوند. برای درک بهتر شکل ۴-۵ را ببینید. بنابراین اگر تعداد سیم‌پیچ‌های پنکیک دوبل لازم برای طرح را  $x$  بنامیم در این صورت ارتفاع سیم‌پیچ،  $h_{winding}$  به صورت معادله (۷) خواهد بود:



شکل ۴-۵- پنکیک‌های دوبل و عایق‌های بکار رفته برای آنها

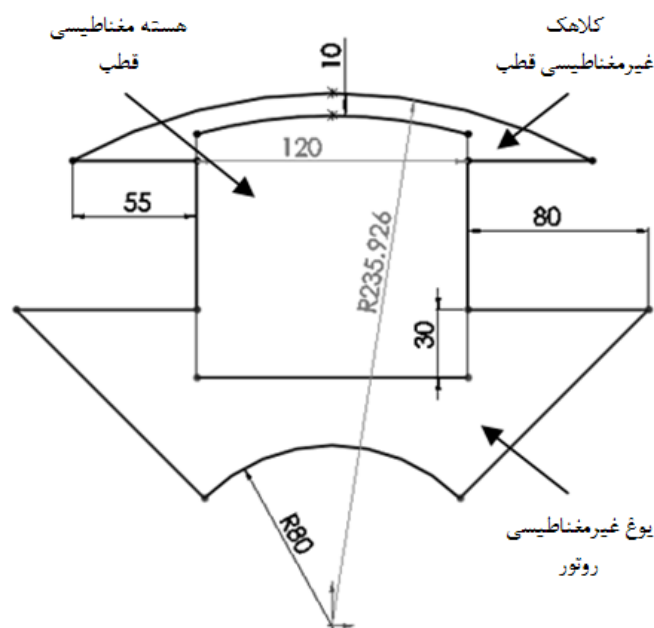
$$h_{winding} = 10x + 2(x - 1) + 6 \quad (7)$$

همچنین یادآوری می‌شود که با در نظر گرفتن پهناهای هر پنکیک معادل با پهناهای هر نوار، در این صورت پهناهای هر پنکیک دوبل ۱۰ میلی‌متر خواهد بود و این در رابطه ۷ بکار گرفته شده است. بعلاوه،

با توجه به مشخصات YBCO ضخامت هر پنکیک نیز مطابق رابطه (۸) محاسبه می‌شود. در رابطه (۸)،  $y$  تعداد دور بر هر پنکیک می‌باشد.

$$w_{winding} = 0.9 \times y \quad (۸)$$

با توجه به آمپردور تحریک تعداد دور مورد نیاز سیم‌پیچ تحریک ۵۰۰ دور خواهد بود. با در نظر گرفتن ۵ پنکیک دابل ۱۰۰ دوری فضای کافی برای لوله‌های سردکننده لازم فراهم می‌آید. لذا با جایگذاری ۵۰ دور به عنوان تعداد دور نوار بر هر پنکیک عرض سیم‌پیچ تحریک  $w_{winding}$  و نیز با در نظر گرفتن ۵ پنکیک دابل ارتفاع سیم‌پیچ ابرسانا  $h_{winding}$  با توجه به روابط (۷) و (۸) به ترتیب ۶۴ و ۴۵ میلی‌متر بدست می‌آیند. کلاهک روتور نیز بگونه‌ای طراحی شده است که بطور کامل سیم‌پیچ‌های ابرسانا را بپوشاند. در این صورت استحکام آنها تضمین خواهد شد. اکنون با توجه به اطلاعات داده شده طرح دو بعدی روتور به صورت داده شده در شکل ۴-۶ خواهد بود.



شکل ۴-۶- طرح اولیه روتور

## ۴-۳-۲-۲ - طراحی استاتور

استاتور در این طرح مشابه استاتور سایر ماشین‌های سنکرون غیر ابررسانا بوده و از ماده مغناطیسی نظیر فولاد تشکیل شده است. دندان‌های مغناطیسی نیز به ساختار استاتور اضافه شده است. بنابراین سیم‌پیچ‌های سه فاز استاتور می‌توانند در آنها جا زده شوند. در اولین گام طراحی استاتور لازم است معادله خروجی معرفی شود. معادله خروجی<sup>۱</sup> در رابطه (۹) ارائه شده است.

$$S(kVA) = C_0 \times D^2 \times L \times n_s \quad (9)$$

که در این رابطه:

$$C_0 = 11 \times B_g \times ac \times K_w \times 10^{-3} \quad (10)$$

معادله خروجی در واقع تلفیقی از معادلات مغناطیسی پایه‌ای ماشین است. در رابطه (۹)،  $D$  و  $L$  بترتیب قطر داخلی ماشین و طول محوری ماشین را معرفی می‌کنند.  $n_s$  نیز سرعت چرخش بر حسب دور بر ثانیه بوده که از رابطه (۱۱) پیروی می‌کند.

$$n_s = \frac{2f}{p} \quad (11)$$

که  $f$  فرکانس می‌باشد.  $ac$  و  $K_w$  که در رابطه (۱۰) معرفی شدند و بترتیب بارگذاری الکتریکی و ضریب سیم‌پیچی استاتور را بیان می‌کنند.  $ac$  با واحد آمپر هادی بر متر استاتور با رابطه (۱۲) بیان می‌شود:

$$ac = \frac{2m \times I_{ph} \times N_{series}}{\pi \times D} \quad (12)$$

ضریب سیم‌پیچی نیز با توجه به مشخصات سیم‌پیچی استاتور مشخص می‌شود. بطور کلی ضریب سیم‌پیچی حاصلضرب دو فاکتور ضریب کوتاهی گام ( $k_1$ ) و ضریب توزیع سیم‌پیچی ( $k_2$ ) می‌باشد. ضریب کوتاهی گام و نیز ضریب توزیع سیم‌پیچی در روابط (۱۳) و (۱۴) ذکر شده‌اند [۲۷].

<sup>1</sup> Output equation

$$k_1 = \sin\left(\frac{\lambda}{2}\right) \quad (13)$$

$$k_2 = \frac{\sin\left(\frac{q}{2}\right) \times \beta}{q \times \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} \quad (14)$$

$$K_w = k_1 \times k_2 \quad (15)$$

$\lambda$  و  $q$  بترتیب درجه کوتاهی گام به درجه الکتریکی و تعداد شیارها بر قطب بر فاز می‌باشند.  $\beta$  نیز از رابطه (۱۶) بدست می‌آید:

$$\beta = \frac{180}{3 \times q} \quad (16)$$

اکنون برای طراحی استاتور طرح مورد بحث در گام اول از معادله خروجی استفاده می‌کنیم. مطابق با شکل ۴-۶، قطر خارجی روتور ۴۷۰/۶ میلیمتر می‌باشد. بنابراین با احتساب ۱۷ میلیمتر فاصله هوایی قطر داخلی استاتور ۵۰۴/۶ میلیمتر خواهد بود. با توجه به رابطه (۹) معادله خروجی بر حسب قطر داخلی و طول محوری موتور به شکل زیر ساده خواهد شد:

$$D^2 L = \frac{S}{1.11 \times \pi^2 \times n_s \times K_w \times ac \times B_g} \quad (17)$$

با توجه به چهار قطبی بودن موتور و نیز فرکانس نامی ۵۰ هرتز سرعت گردش روتور ۱۵۰۰ دور بر دقیقه یا ۲۵ دور بر ثانیه می‌باشد. از سوی دیگر بارگذاری الکتریکی به سیستم خنک ساز سیم‌پیچ‌های مسی استاتور بستگی دارد. در طراحی استاتور با فرض اینکه از عایق‌های مناسب استفاده گردد و تهویه

موتور برای کاهش حرارت ناشی از مقاومت مسی سیم‌پیچ استاتور در سطحی رضایت بخش باشد، ۳۸۰۰۰ آمپر-هادی بر متر مناسب خواهد بود. اکنون ضریب سیم‌پیچی باید مشخص گردد. در این موتور تعداد شیار بر قطب بر فاز ۳ بوده بنابراین برای سیم‌پیچی یک طبقه با گام کامل ضریب سیم‌پیچی به صورت زیر خواهد بود:

$$K_w = k_2 = 0.96 \quad (18)$$

در شرایط کاری نرمال به منظور محاسبه قطر داخلی و طول محوری موتور با در نظر گرفتن ضریب توان ۰/۹ پس فاز و بازدهی معادل ۹۵ درصد و جایگذاری در معادله خروجی خواهیم داشت:

$$D^2 L = V_{motor} = 0.12 \quad (19)$$

با استفاده از رابطه (۱۹) و در نظر گرفتن قطر داخلی استاتور، طول محوری موتور ۴۷۰ میلیمتر محاسبه می‌شود. اکنون به محاسبه جزئیات دندانه و شیار می‌پردازیم. به این منظور گام دندانه معرفی می‌شود. گام دندانه به صورت داده شده در رابطه (۲۰) معرفی می‌گردد:

$$\gamma_{tooth} = \frac{\pi \times D}{n_{tooth}} \quad (20)$$

$n_{tooth}$  تعداد دندانه‌های استاتور (یا تعداد شیارهای استاتور) است که به صورت رابطه (۲۱) مشخص می‌گردد:

$$n_{tooth} = m \times q \times p \quad (21)$$

گام دندانه برای موتور ۴۵ میلیمتر محاسبه شده است. اکنون ابعاد دندانه را محاسبه می‌کنیم. به این منظور ابتدا لازم است شار فاصله هوایی تقریب زده شود. با توجه به چگالی شار فاصله هوایی ۱/۱ تسلا، شار به کمک رابطه (۲۲) تقریب زده می‌شود.



$$\varphi_g = B_g \times \frac{\pi \times D \times L}{p} \quad (22)$$

با محاسبه شار عبوری از فاصله هوایی موتور و با توجه به این نکته که ۹ دندانه در هر گام قطبی قرار می‌گیرند و نیز محدود کردن چگالی شار دندانه به ۱/۸ تسلا جهت حذف احتمال اشباع آهن پهنای مناسب برای دندانه به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$B_{tooth}^{max} = \frac{\varphi_g}{\frac{n_{tooth}}{p} \times L \times W_{tooth}} \quad (23)$$

با جایگذاری مقادیر معلوم در رابطه (۲۳) و احتساب ۱/۸ تسلا برای  $B_{tooth}^{max}$  تقریباً ۲۵ میلی‌متر محاسبه می‌گردد. بنابراین عرض شیار با توجه به ۴۵ میلی‌متر گام دندانه که قبلاً محاسبه شد، با توجه به رابطه (۲۴) بدست خواهد آمد:

$$W_{slot} = \gamma_{tooth} - W_{tooth} \quad (24)$$

به این صورت عرض شیار ۲۰ میلی‌متر یا به عبارتی ۲ سانتیمتر خواهد بود. اکنون که جزئیات شیارها و دندانه‌های استاتور بدست آمد، نوبت به محاسبه جزئیات سیم‌پیچی استاتور می‌رسد. همانگونه که اشاره شد سیم‌پیچ استاتور از سیم‌های مسی معمول بوده و سه فاز پیچیده می‌شوند. در اولین گام با توجه به جدول ۴-۱ با توجه به ولتاژ تغذیه و توان موتور جریان کشیده شده در هر فاز از رابطه توان بدست می‌آید:

$$I_{ph} = \frac{S}{3 \times V_{ph}} \quad (25)$$

با توجه به توان موتور جریان کشیده شده هر فاز ۱۳۰ آمپر بدست می‌آید. اکنون به منظور محاسبه تعداد دورهای سری هر فاز از رابطه داده شده برای بارگذاری الکتریکی، رابطه (۲۶)، تعداد دورهای سری هر فاز برای سیم‌پیچی مسی استاتور بدست می‌آید.

$$N_{series}^{ph} = \frac{\pi \times D \times ac}{6 \times I_{ph}} \quad (26)$$

از آنجا که تعداد دورهای سری هر فاز ۸۴ دور و هر فاز شامل ۶ کلاف می‌باشد بنابراین تعداد دورهای سری هر کلاف ۱۴ دور محاسبه می‌شود. اکنون با در دست بودن جزئیات سیم‌پیچ استاتور ابعاد شیار استاتور قابل محاسبه خواهد بود. با انتخاب چگالی جریان  $4 A/mm^2$  برای سیم‌پیچی استاتور سطح مقطع دسته هادی‌های هر دور به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\zeta = \frac{I}{J} \quad (27)$$

در رابطه (۲۷)،  $\zeta$  سطح مقطع مورد نیاز و  $J$  چگالی جریان انتخابی برای سیم‌پیچ است. در این مورد از سیم مسی استاندارد با قطر  $1/2$  میلی‌متر استفاده شده است. اگر قطر هادی مورد نیاز به منظور عبور چگالی جریان داده شده را  $d$  بنامیم در این صورت  $d$  با رابطه (۲۸) تعیین خواهد شد:

$$\frac{\pi \times d^2}{4} = \frac{I}{J} \quad (28)$$

با جایگذاری مقادیر معلوم  $d$  محاسبه می‌گردد. همانگونه که اشاره شد، در این موتور از رشته سیم‌های مسی با قطر  $1/2$  میلی‌متر استفاده شده است. بنابراین هر هادی شامل ۲۸ رشته سیم مسی با قطر  $1/2$  میلی‌متر می‌باشد. با توجه به این نکته که در هر شیار از ۳۶ شیار استاتور ۱۴ هادی قرار می‌گیرد بنابراین تعداد کل رشته سیم‌های مسی استفاده شده در هر شیار ۳۹۲ رشته خواهد بود. بنابراین سطح مورد نیاز برای هر شیار تقریباً ۴۵۰ میلی‌متر مربع خواهد بود. با توجه به این نکته که عرض شیار در مراحل قبلی محاسبه شد طول هر دندان ۲۴ میلی‌متر خواهد بود. اما با توجه به نیاز شیارها به عایق کاری و نیز احتساب احتمال تفرانس قطر رشته‌های مسی بکار رفته طول هر دندان را به ۳۰ میلی‌متر افزایش می‌دهیم تا از وجود جای کافی برای سیم‌پیچ‌ها و عایق‌های لازم اطمینان حاصل شود.

همانگونه که می‌دانیم شار خالص عبوری از یوغ استاتور نیمی از شار خالص هسته روتور را تشکیل می‌دهد. بنابراین ضخامت یوغ استاتور نصف ضخامت هسته مغناطیسی روتور انتخاب می‌شود. بنابراین قطر خارجی استاتور از رابطه (۲۹) محاسبه خواهد شد.

$$D_o = D + 2 \times (Z_t + T_{stator}) \quad (29)$$

در رابطه (۲۹)،  $Z_t$  طول مؤثر دندانه،  $T_{stator}$  ضخامت هسته استاتور و  $D_o$  قطر خارجی استاتور است. در عمل به منظور قفل شدن سیم‌پیچ استاتور در شیار سر دندانه را طوری می‌سازند که سیم‌پیچ‌ها توسط گوه‌ای که در سر دندانه جاسازی می‌شوند بدون لقی محکم شوند. در این موتور ۶ میلی‌متر دیگر به منظور چایگذاری گوه به هر دندانه اضافه شده است. بنابراین قطر خارجی استاتور ۶۹۵ میلی‌متر خواهد بود.

اکنون مقاومت هر فاز سیم‌پیچی استاتور باید محاسبه شود. تاکنون سطح مقطع سیم‌پیچی استاتور و طول محوری استاتور بدست آمده است. موتور در هر فاز ۶ کلاف ۱۴ دوری و سری شده دارد. با محاسبه مقاومت یک کلاف مقاومت کل هر فاز بدست می‌آید. برای محاسبه مقاومت از رابطه (۳۰) استفاده شده است:

$$R = \frac{\rho \times l}{\zeta} \times 14 \quad (30)$$

که در آن برای مس:

$$\rho = 0.022 \left( \frac{\Omega - mm^2}{m} \right) \quad (31)$$

در رابطه (۳۱)،  $l$  طول هر کلاف از ۶ کلاف هر فاز بوده و مخرج کسر سطح کل مس درون هر شیار می‌باشد که در مرحله قبلی بدست آمد. بنابراین مقاومت هر فاز استاتور ۶ برابر این مقدار می‌باشد. بنابراین مقاومت هر فاز به صورت زیر خواهد بود:

$$R_{phase}^{total} = 6 \times R \quad (32)$$

مقاومت هر فاز با بکارگیری روابط داده شده ۰/۱۴ اهم بدست می‌آید. با محاسبه مقاومت هر فاز استاتور تمامی مشخصات اصلی موتور ابررسانای مورد بحث بدست آمده‌اند. در این مرحله فاز اول طراحی موتور به پایان می‌رسد.

### ۴-۳-۳ - فاز دوم طراحی

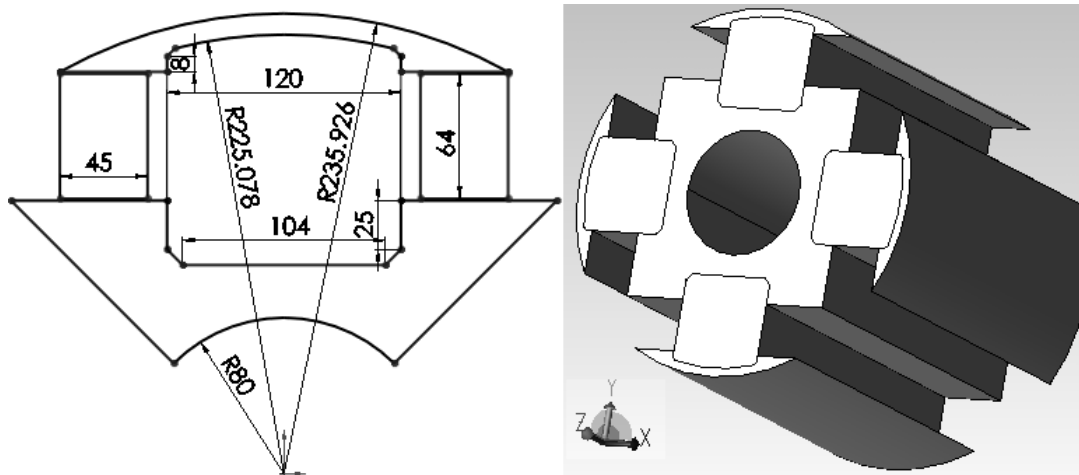
تاکنون در طی فاز اول طراحی، پارامترهای اساسی موتور ابررسانا محاسبه شد. در طی فاز دوم طراحی، جزئیات طرح بررسی شده و در نهایت موتور طراحی شده توسط روش اجزاء محدود<sup>۱</sup> آنالیز شده و نتایج حاصله از آنالیز المان محدود ارائه می‌شوند.

### ۴-۳-۳-۱ - جزئیات هسته مغناطیسی روتور و دندانه‌های استاتور

در بخش طراحی روتور راجع به اثر فصل مشترک توضیح داده شد. اثر فصل مشترک در لبه‌های تیز می‌تواند به اشباع آهن منجر شود. به همین منظور در شرایط مغناطیسی قوی موجود، نقاط تیز هسته مغناطیسی روتور که در شکل ۴-۶ نیز مشخص می‌باشند تغییر شکل داده شده‌اند. با پخ کردن نقاط تیز از اشباع آهن در این نقاط جلوگیری می‌شود. به منظور کاهش اثر اشباع چهار گوشه تیز هسته فولادی روتور با زاویه ۴۵ درجه پخ شده‌اند. شکل ۴-۷ طرح نهایی روتور سه پارچه طراحی شده را نشان می‌دهد.

---

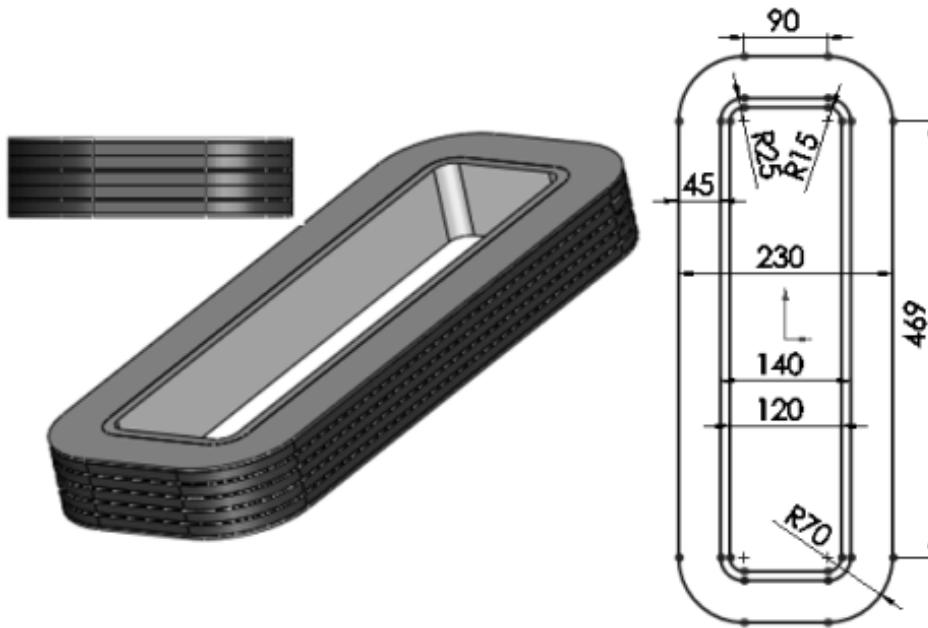
<sup>۱</sup>Finite element method



شکل ۴-۷- مدل نهایی روتور سه پارچه

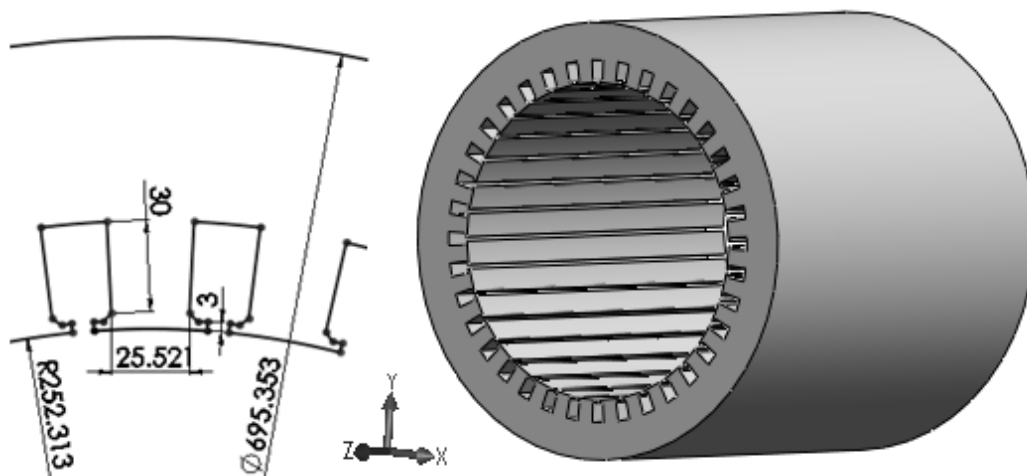
در شکل ۴-۷ تمامی جزئیات روتور نمایش داده شده است. در مدل دو بعدی که برای یک قطب تهیه شده است، ابعاد دقیق هسته مغناطیسی روتور مشخص و ارائه شده و همچنین سطح مقطع سیم‌پیچ‌های ابرسانا را به نمایش می‌گذارد. در نمای سه بعدی، یوغ و کلاhek غیرمغناطیسی روتور و همچنین هسته مغناطیسی روتور مونتاژ شده است. جای قرارگیری شفت موتور خالی گذاشته شده و در فصل بعدی ضمن ارائه ساختار سردکننده شفت موتور نیز به عنوان بخشی از این ساختار طراحی و ارائه خواهد شد.

با مشخص شدن طول محوری موتور، طرح سه بعدی سیم‌پیچ ابرسانای روتور نیز قابل تصور خواهد بود. همانگونه که ضمن طراحی سیم‌پیچ‌های ابرسانای موتور ذکر شد، سیم‌پیچ شامل ۵ سیم‌پیچ پنکیک دوبل سری بوده که هر یک شامل ۱۰۰ دور نوار ابرسانا می‌باشد. شکل ۴-۸ شمای سیم‌پیچ ابرسانای موتور را در دو نمای دو بعدی و سه بعدی به تصویر کشیده است. در این شکل تمامی ۵ سیم‌پیچ پنکیک دوبل به همراه لایه‌های عایق و نیز فریم مربوطه با جزئیات کامل نشان داده شده‌اند.



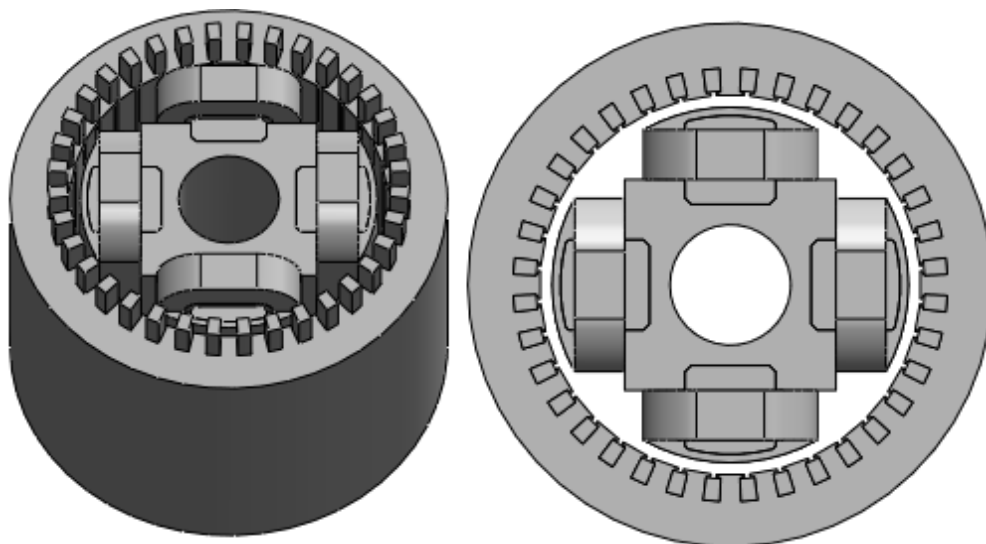
شکل ۴-۸- سیم‌پیچ ابرسانی طراحی شده برای موتور

مسائل مربوط به طراحی دندانه‌های استاتور نیز در بخش قبل بطور مفصل تشریح شد. همانگونه که اشاره شد سیم‌پیچ‌های استاتور باید بگونه‌ای در شیارها محکم گردند. به منظور قرارگیری گوه در گلوگاه شیار، اصولاً شیارها را قیفی شکل در نظر می‌گیرند. در طرح نهایی استاتور موتور مورد بحث این مورد در نظر گرفته شده است. با اعمال تغییرات مناسب بر دندانه‌ها، استاتور به صورت داده شده در شکل ۴-۹ خواهد بود:



شکل ۴-۹- مدل نهایی استاتور فولادی

با ارائه مدل نهایی استاتور، طرح کامل می‌گردد. در ادامه فاز دوم طراحی مدل به روش المان محدود مورد آنالیز مغناطیسی قرار گرفته تا صحت عملکرد موتور در شرایط مغناطیسی قوی حاکم بر آن مورد آزمایش قرار گیرد. مدل مغناطیسی نهایی موتور پس از مونتاژ در شکل ۴-۱۰ به نمایش درآمده است. این مدل در بخش بعدی مورد آنالیز مغناطیسی قرار خواهد گرفت.



شکل ۴-۱۰- مدل مغناطیسی پس از مونتاژ

#### ۴-۳-۲- طراحی دمپر

زمانی که موتور ابرسانا در سرعت سنکرون می‌چرخد، هیچ میدان مغناطیسی متغیر با زمانی در فاصله هوایی بین روتور و استاتور بوجود نمی‌آید. با این حال تحت شرایط تغییر بار موتور یا حتی لحظه راه اندازی میدان‌های متغیر با زمان ایجاد شده در فاصله‌هوایی بر سیم‌پیچ‌های ابرسانا تأثیر منفی می‌گذارند. به همین منظور تدبیری لازم است تا سیم‌پیچ‌های ابرسانا را در رویارویی با شرایط نامطلوب احتمالی ناشی از میدان‌های متغیر با زمان فاصله هوایی حفظ کند. به عنوان یک راه حل، اصولاً یک استوانه مسی یا آلومینیمی در فاصله هوایی قرار گرفته و مجموعه روتور را در بر می‌گیرد تا تأثیر میدان‌های متغیر با زمان را در محفظه داخلی خود به صفر برساند. این استوانه دمپر نامیده

می‌شود. طراحی دمپر تنها به فرکانس و مشخصات ماده بستگی دارد. رابطه ۳۳ میزان ضخامت دمپر مورد نیاز برای موتور را نشان می‌دهد [۳۰].

$$\delta_{thick}^{damper} = \frac{l}{\sqrt{(\pi \times \mu \times f \times \sigma)}} \quad (33)$$

که در آن:

$$\mu = \mu_0 \times \mu_r \quad (34)$$

مس و آلومینیم دو کاندید مهم برای این وظیفه می‌باشند. در صورت استفاده از آلومینیم ضخامت دمپر ۱۳ میلی‌متر و در صورت استفاده از مس ضخامت دمپر ۹ میلی‌متر خواهد بود. با توجه به طول ۱۷ میلی‌متری فاصله هوایی و نیاز به عایق‌های حرارتی از دمپر مسی استفاده شده است. بنابراین اکنون مشخص می‌شود که چرا فاصله هوایی در موتورهای و بطور کلی ماشین‌های ابرسانا بزرگ انتخاب می‌شود. با این توضیح طراحی موتور به اتمام می‌رسد. قبل از ورود به بخش تحلیلی موتور بد نیست پارامترهای اصلی موتور پاداوری گردند. جدول ۴-۳ پارامترها را در خود جای داده است.

جدول ۴-۳- مشخصات موتور طراحی شده

۶۰	ضخامت یوغ استاتور (mm)	۵۰۵/۸	قطر داخلی (mm)
۳	شیار بر قطب بر فاز	۶۹۵	قطر خارجی (mm)
۴۵	عرض سیم‌پیچ روتور (mm)	۴۷۰	طول استاتور (mm)
۶۴	ارتفاع سیم‌پیچ روتور (mm)	۱۷	فاصله هوایی (mm)
۵۰۰	تعداد دور سیم‌پیچ روتور بر قطب	۶۰	ضخامت یوغ روتور (mm)
۱۲۰	جریان سیم‌پیچ روتور (A)	۱۲۰	عرض قطب روتور (mm)
۱۳۰	جریان سیم‌پیچ استاتور (A)	۳۶	طول واقعی دندانه (mm)
۵	تعداد پنکیک‌های دابل	۳۶	تعداد شیارها
Y	اتصال سیم‌پیچ استاتور	۸۴	تعداد دور سیم‌پیچ استاتور

۴-۳-۳-۳-۳-۳ - المان محدود



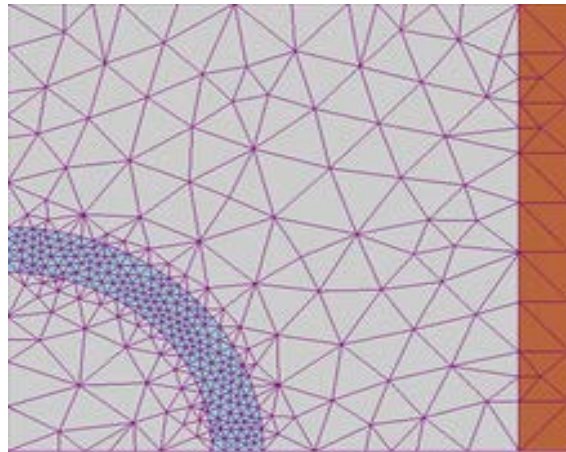
#### ۴-۳-۳-۱- معرفی روش المان محدود

روش اجزاء محدود یا روش المان‌های محدود که به اختصار FEM نامیده می‌شود، روشی عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل انتگرال‌ها می‌باشد. اساس کار این روش بگونه‌ایست که یا حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده سازی آنها به معادلات دیفرانسیل معمولی برسیم که با روشهای عددی مثل روش اویلر حل می‌شوند. در حل معادلات دیفرانسیل جزئی مسئله مهم این است که به معادله ساده‌ای که از نظر عددی پایدار است برسیم. به عبارت دیگر میزان خطا آنقدر نباشد که به نتایج نا مفهوم منتهی شود. روشهایی با مزایا و معایب مختلف برای این امر وجود دارد، که روش اجزاء محدود یکی از بهترین آنهاست.

آنالیز اجزای محدود شامل یک مدل کامپیوتری از یک ماده یا یک طرح می‌باشد که به منظور یافتن نتایجی خاص مورد آنالیز قرار می‌گیرد. این آنالیز به منظور طراحی یک طرح جدید یا حتی به منظور ارتقاء یک طرح با در نظر گرفتن شرایط مطلوب جدید بکار می‌رود. با شکست یا موفقیت آنالیز اجزای محدود برای یک طرح، پیش‌بینی شرایط ممکن برای حصول به مدل بهینه عملی خواهد بود. به طور کلی در صنعت از دو مدل آنالیز ۲ بعدی و ۳ بعدی استفاده می‌شود. مدل ۲ بعدی زمانی استفاده می‌شود که طرح مربوطه ساده بوده و اجرای آنالیز را توسط کامپیوترهای عادی ممکن می‌کند. اگر فیزیک مساله ساده باشد مدل ۲ بعدی پاسخ دقیقی را ارائه می‌کند. مدل ۳ بعدی با وجود اینکه پاسخهای دقیق تری را بدست می‌دهد، اما نیاز به وقت و عملیات پیچیده تری دارد.

همانگونه که از نام این روش برمی‌آید، در این روش یک مساله پیچیده به تعدادی مساله آسان تر شکسته می‌شود. ادامه‌ی شکسته شدن مساله سرانجام از نظر تئوری به تعداد بیشماری مساله آسان می‌انجامد. با این وجود آنالیز اجزای محدود رفتار کل مجموعه را با آنالیز تنها تعداد محدودی از مسایل آسان شده پیش‌بینی می‌کند. هر المان در آنالیز اجزای محدود یکی از این مسایل ساده شده است. هر المان در مدل اجزای محدود از تعداد مشخصی گره تشکیل شده است که هم مرز هر المان را مشخص می‌کند و هم اعمال شرایط مرزی را ممکن خواهد کرد. گره‌ها مش را ایجاد می‌کنند. هر چه

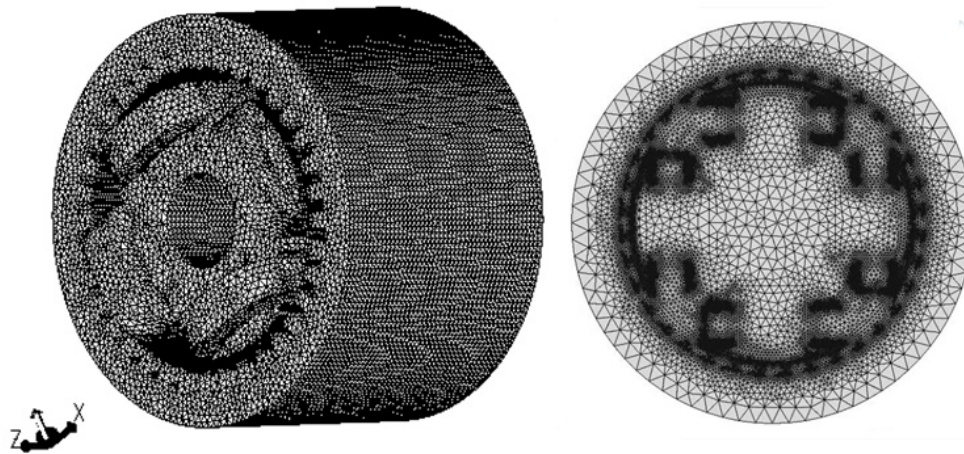
مش ریزتری تشکیل شود در واقع تعداد المان‌ها بیشتر شده و دقت حل مساله بالاتر خواهد رفت. البته دقت به این امر مهم است که با بیشتر شدن المان‌ها و ریزتر شدن مش، حل مساله نیز پیچیده‌تر می‌گردد. شکل ۴-۱۱ تقسیمات المان‌ها (مش‌بندی) در یک بخش مورد مطالعه از یک سیستم نمونه را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، در نقاطی که نیاز به دقت بیشتری داریم تراکم المان‌ها بیشتر بوده و مش‌بندی ریزتر می‌شود.



شکل ۴-۱۱- مش بندی

#### ۴-۳-۳-۲- آنالیز مغناطیسی اجزاء محدود

حال که روش المان محدود معرفی شد موتور طراحی شده در ادامه فاز دوم طراحی به روش المان محدود شبیه‌سازی کامپیوتری شده و نتایج ارائه می‌شوند. آنالیز المان محدود به عنوان یک ابزار قدرتمند بکار گرفته شده تا موتور طراحی شده مورد آزمون‌های تست مجازی قرار گیرد. در این طرح سعی شده تا با انتخاب هر چه بیشتر المان‌ها جواب دقیقتری بدست آید. در گام اول مدل مش‌بندی شده است. شکل ۴-۱۲ موتور را پس از اعمال مش‌بندی در دو حالت دو بعدی و سه بعدی نشان می‌دهد. در مدل دو بعدی به منظور جواب دقیق‌تر از بیش از ۸۰۰۰۰ مش و در حالت سه بعدی از بیش از ۱۰۰۰۰۰۰ مش استفاده شده است. در ادامه نتایج حاصل از آنالیزهای انجام شده ارائه شده تا صحت طراحی تضمین شده و از عملکرد مطلوب موتور اطلاع حاصل شود.

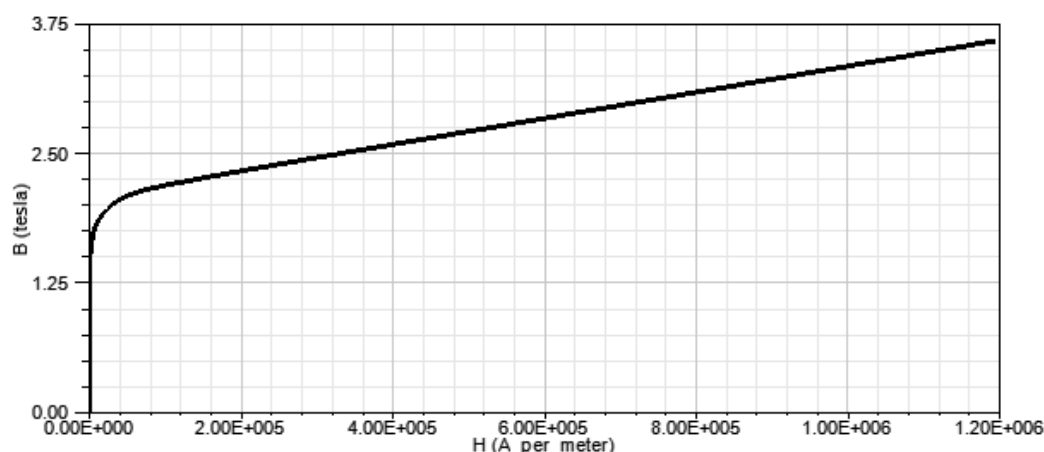


شکل ۴-۱۲- موتور پس از مش بندی در دو حالت دو بعدی و سه بعدی

### • آزمایش صحت طراحی

به منظور شبیه سازی المان محدود موتور، جنس ماده سازنده هر بخش موتور باید به نرم افزار معرفی شود. به این منظور استاتور، دندانه های استاتور همچنین هسته مغناطیسی روتور از جنس فولاد ضدزنگ در نظر گرفته شده اند. منحنی مغناطیسی<sup>۱</sup> فولاد ضدزنگ به کار رفته در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که متریال سیم پیچی ابررسانای موتور به منظور شبیه سازی در کتابخانه هیچکدام از نرم افزارهای موجود وجود ندارد. برای حل مشکل در شبیه سازی ها از یک هادی موجود در کتابخانه نرم افزار به منظور ایجاد آمپر دور لازم استفاده شده است. این امر در تحلیل الکترومغناطیسی خللی ایجاد نمی کند. اما در صورت اقدام به تحلیل های حرارتی این کار عملاً امکان پذیر نمی باشد. به منظور نزدیک تر بودن طرح شبیه سازی شده به طرح واقعی جزئیات دیگر طرح از جمله فریم های مسی و دیگر اجزای غیر مغناطیسی موتور در نظر گرفته شده اند. دقت شود از آنجا که بخش های غیرمغناطیسی روتور در مواجهه با میدان مغناطیسی نقشی نظیر هوا دارند حضورشان در شبیه سازی لازم نیست. مشخصات متریال های بکار رفته در جدول ۴-۴ ارائه داده شده است. قیمت های داده شده بر طبق اطلاعات موجود در اینترنت استخراج شده است.

<sup>۱</sup>B-H curve



شکل ۴-۱۳- منحنی مغناطیسی فولاد بکار رفته برای موتور

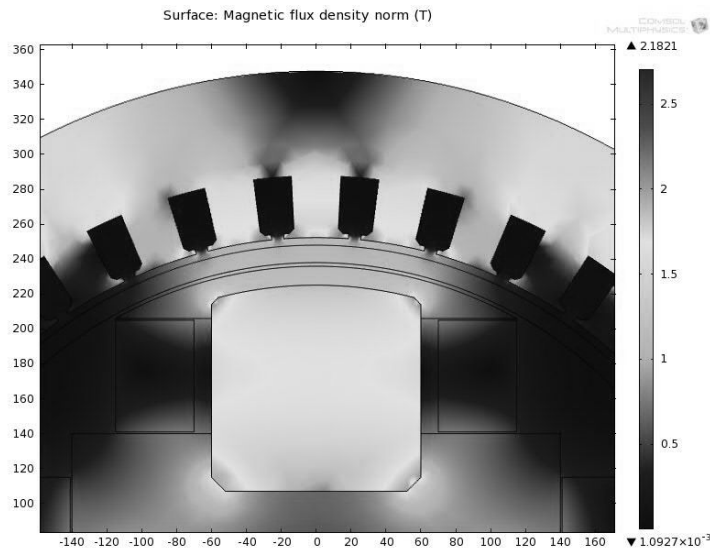
جدول ۴-۴- متریال بکار رفته در موتور ابررسانای طراحی شده

ماده	پارامتر	فولاد ضد زنگ Stainless steel	مس Copper	فایبر گلاس G-10 fiberglass	ابررسانا YBCO
چگالی حجمی	$7/87 \text{ g/cm}^3$	$8/96 \text{ g/cm}^3$	$1/6 \text{ g/cm}^3$	$6/384 \text{ g/cm}^3$	
هدایت الکتریکی	$2000000 \text{ S/m}$	$58000000 \text{ S/m}$	-	∞ (در حالت ابررسانایی)	
نفوذپذیریمغناطیسی	منحنی B-H	۱	۱	۱	۱
قیمت	$2000 \text{ \$/Ton}$	$10000 \text{ \$/Ton}$	$5 \text{ \$/kg}$	$30 \text{ \$/m}$	

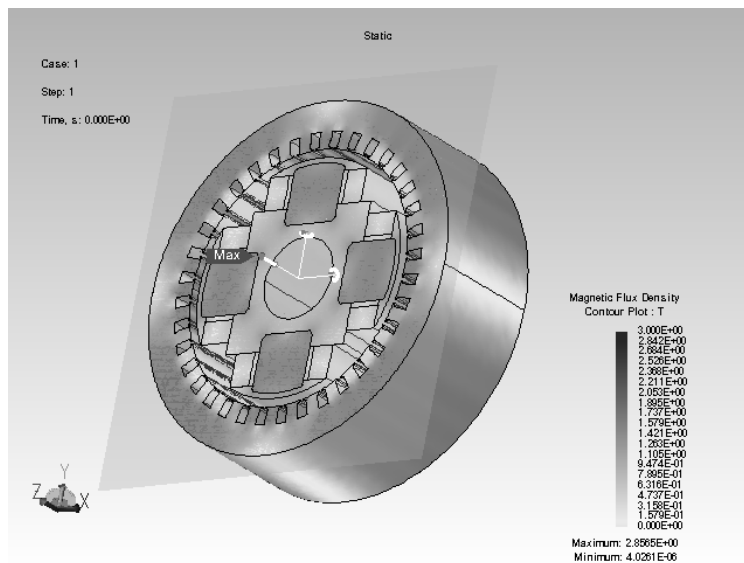
هم در نمونه دو بعدی و هم در نمونه سه بعدی طرح با مشخص شدن متریال، موتور طراحی شده به مرحله آنالیز وارد می‌گردد. موتور با جزئیات کامل شبیه سازی شده است. ابتدا موتور در حالت بی باری تنها با در نظر گرفتن جریان تحریک بررسی شده تا از حفظ شرایط ابررسانایی و صحت کلیات طراحی موتور اطمینان حاصل شود. تعداد دورها و جریان کاری سیم‌پیچ‌های تحریک قبلاً مشخص شده و مدل در حالت ایستا<sup>۱</sup> مورد آنالیز قرار گرفته است. در این بخش برای نمایش توزیع چگالی شار در موتور از تأثیر سیم‌پیچ استاتور صرف‌نظر شده است. به منظور تأیید درستی نتایج بدست آمده از حالت دو بعدی، آنالیز اجزاء محدود در حالت سه بعدی نیز انجام شده و پاسخ‌های بدست آمده با پاسخ‌های حالت دو بعدی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که در این مدل پاسخ‌ها در حالت

<sup>1</sup>Static

دو بعدی با دقت بالایی نتایج آنالیز سه بعدی را تأیید می‌کنند. شکل ۴-۱۴ و ۴-۱۵ نتایج آنالیز انجام شده را در کنار هم نشان می‌دهند.



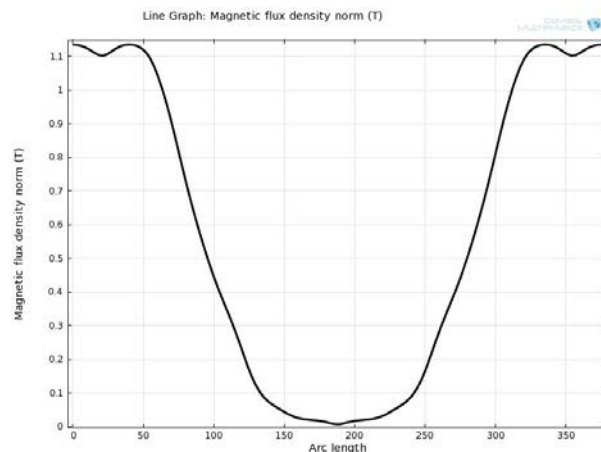
شکل ۴-۱۴- آنالیز مغناطیسی دو بعدی موتور در حالت بی‌باری



شکل ۴-۱۵- آنالیز مغناطیسی سه بعدی موتور در حالت بی‌باری (برش عرضی)

همانگونه که در بخش طراحی ذکر شد، چگالی شار فاصله هوایی برای این طرح ۱/۱ تسلا می‌باشد. به منظور احراز اطمینان از صحت طراحی، چگالی شار فاصله هوایی نیز توسط روش اجزاء محدود بطور دقیق محاسبه شده است. در شکل ۴-۱۶ نتایج حاصل از محاسبه چگالی شار فاصله هوایی در حالت

بی‌باری برای یک چهارم مدل نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود چگالی شار تحریک بدست آمده با دقت بالایی نشان از صحت طراحی موتور دارد.



شکل ۴-۱۶- چگالی شار فاصله هوایی ناشی از تحریک

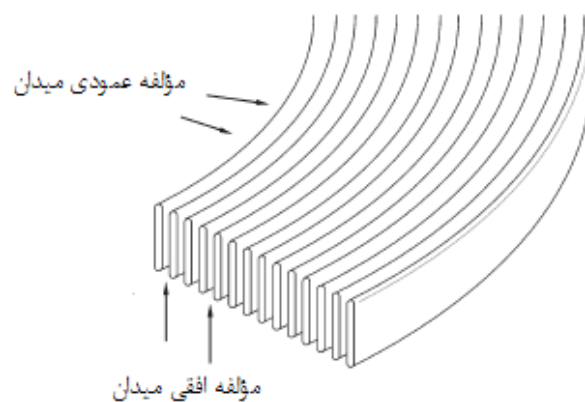
#### • ولتاژ Back emf

ولتاژ پستی یا همان Back emf موتور نیز باید به عنوان یک پارامتر بسیار مهم مد نظر قرار گیرد. فرض کنیم سیم‌پیچ‌های استاتور اتصال باز باشند. در صورتی که روتور با جریان نامی تحریک و در سرعت سنکرون بچرخد میدان دوار حاصله در سیم‌پیچ‌های چند فاز استاتور طبق قانون فاراده ولتاژی القا می‌کند. این ولتاژ القا شده را ولتاژ پستی می‌نامند. میزان ولتاژ پستی به عنوان یک پارامتر مهم در صحت طراحی مؤثر بوده و در این کار نیز به آن توجه شده است. ولتاژ پستی حاصله در حالت بی‌باری، از نظر اندازه نزدیک به ولتاژ ترمینال ماشین بوده که برای کار در آن ولتاژ طراحی شده است. ولتاژ پستی موتور مورد نظر پس از شبیه‌سازی کامپیوتری بدست آمده و نتایج ۳۵۵۰ ولت مؤثر را نشان می‌دهد.

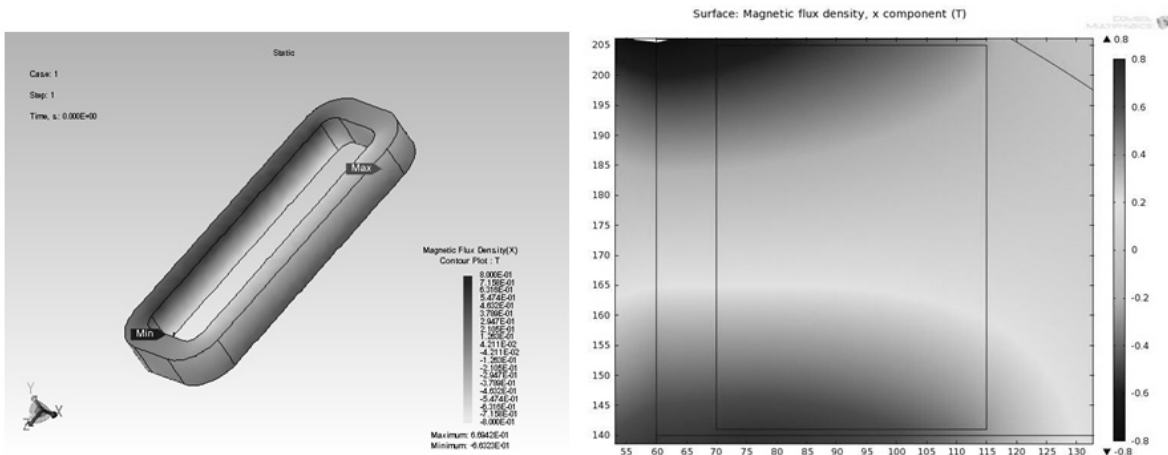
#### • خاصیت ابررسانایی در بی‌باری و بار کامل

❖ بی‌باری

همانگونه که تاکنون بارها اشاره شده است، در صورتی موتور طراحی شده به کار عادی خود در شرایط مطلوب ادامه می‌دهد که شرایط ابرسانایی درون محفظه سرد روتور حفظ شود. در این بخش نیز آنالیز اجزاء محدود کمک شایانی به عملکرد مناسب طرح خواهد کرد. چگالی شار بالای فاصله هوایی ممکن است شرایط ابرسانایی را از بین ببرد. به این منظور سه فاکتور اساسی در برقراری خاصیت ابرسانایی یعنی جریان، میدان مغناطیسی و دمای کاری باید در مقدار مناسب قرار بگیرند. جریان کاری موتور قبلاً انتخاب شده است بنابراین دو فاکتور دیگر باید بررسی شوند. کنترل دمای کاری موتور بدست کاربر موتور می‌باشد. بنابراین در صورتی که چگالی شار اعمال شده به سیم‌پیچ‌های ابرسانا در لحظات مختلف بدست آید در این صورت می‌توان دمای کاری موتور را با توجه به میزان حداکثر چگالی شار اعمالی به سیم‌پیچ‌های ابرسانای موتور در حین کار عادی انتخاب کرد. به همین منظور وضعیت مغناطیسی حاکم بر سیم‌پیچ‌های ابرسانا بررسی شده است. ضمن کار عادی موتور عموماً مؤلفه عمودی میدان بر نوارهای ابرسانا بیشترین تأثیر را بر خاصیت ابرسانایی دارد. علت آن است که مؤلفه عمودی سهم بیشتری در مقدار واقعی چگالی شار اعمال شده به سیم‌پیچ‌های ابرسانا دارد. در شکل ۴-۱۷ چگالی شار عمودی و افقی اعمال شده بر نوارهای ابرسانا نشان داده شده است. آنالیز المان محدود طرح نتایج حاصله برای مؤلفه عمودی چگالی شار اعمال‌شده بر نوارها ناشی از جریان تحریک را در شکل ۴-۱۸ به دو صورت دوبعدی و سه بعدی ارائه شده است.



شکل ۴-۱۷- مؤلفه‌های میدان



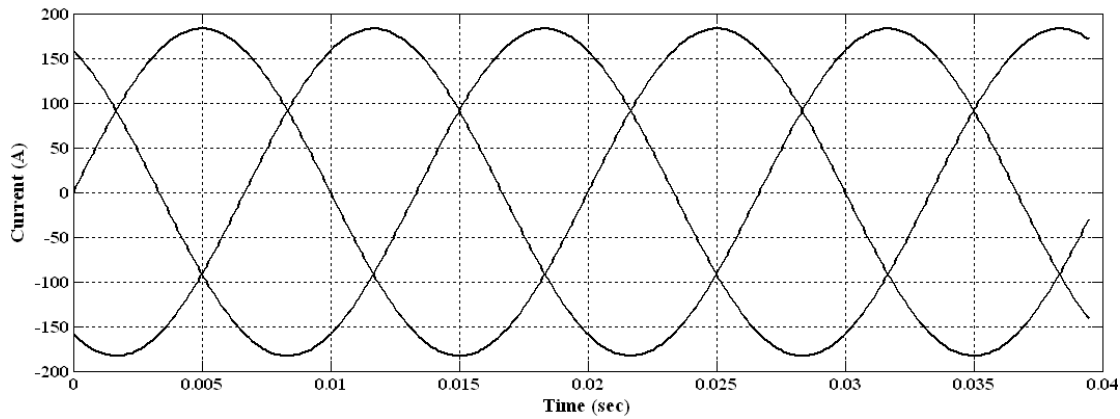
شکل ۴-۱۸- توزیع مؤلفه عمودی چگالی شار بر سیم‌پیچ‌های ابرسانا در حالت بی‌باری

اثر فصل مشترک بر سیم‌پیچ ابرسانا که در ابتدای فصل به آن اشاره شد، با توجه به شکل ۴-۱۹ در بخش بالایی و پایینی سیم‌پیچ ابرسانا دیده می‌شود. نتایج حاصل از آنالیز انجام شده، حداکثر مقدار مؤلفه عمودی چگالی شار بر سیم‌پیچ ابرسانا را  $0.69$  تسلا نشان می‌دهد. بطور مشابه، مؤلفه افقی میدان بر سیم‌پیچ ابرسانا نیز بدست آمده است. حداکثر مقدار مؤلفه افقی میدان حاصل از تحریک موتور  $0.3$  تسلا محاسبه شده است.

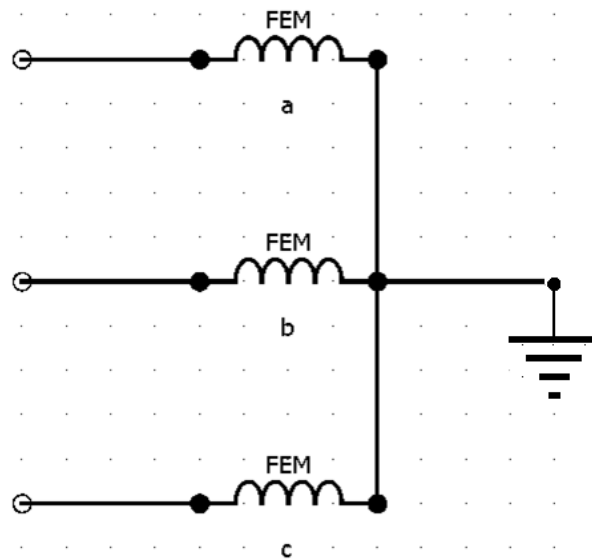
## ❖ بار کامل

در این بخش به منظور درک بهتر از عملکرد موتور، موتور تحت بار کامل مورد آنالیز اجزاء محدود قرار گرفته است. در واقع سیم‌پیچ‌های استاتور نیز به همراه سیم‌پیچ ابرسانای میدان تغذیه شده‌اند. آنالیز اجزاء محدود در بار کامل امکان محاسبه حداکثر چگالی شار ممکن بر سیم‌پیچ‌های ابرسانا را فراهم می‌آورد. با توجه به جدول ۴-۱ و رابطه توان، جریان نامی مؤثر استاتور  $130$  آمپر می‌باشد. به این منظور جریان سینوسی (بدون در نظر گرفتن درایو) مطابق با شکل ۴-۱۹ به سیم‌پیچ‌های استاتور اعمال شده است.



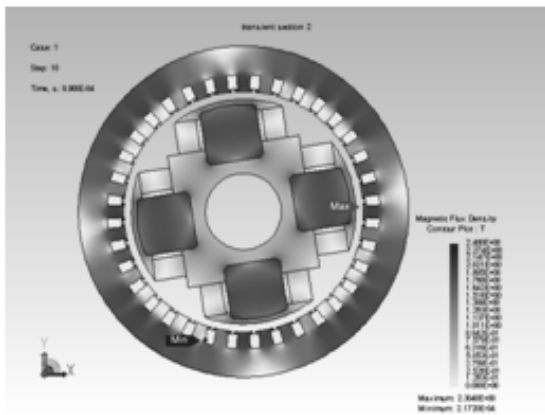


شکل ۴-۱۹- جریان سه فاز اعمال شده به سیم‌پیچ استاتور با فرکانس ۵۰ هرتز

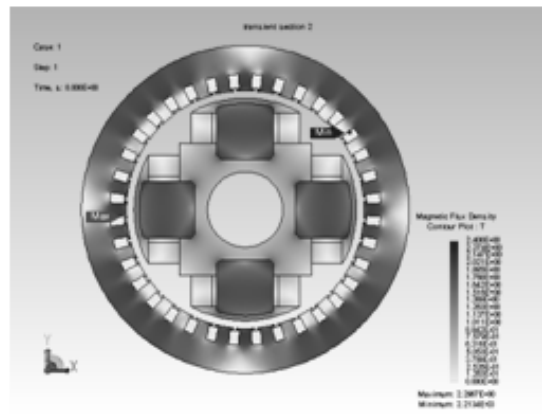


شکل ۴-۲۰- مدار معرفی شده برای اعمال جریان سه فاز به سیم‌پیچ استاتور با اتصال ستاره

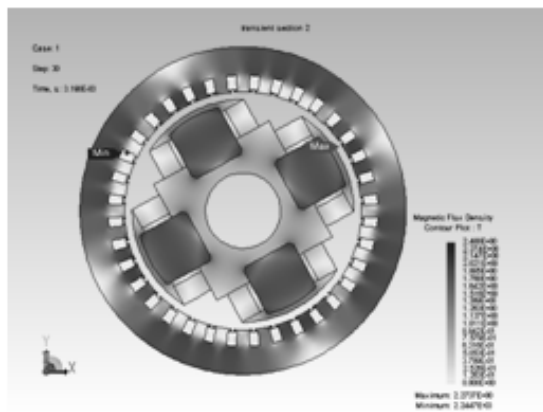
جریان سه فاز به مدار الکتریکی سه فاز استاتور داده شده در شکل ۴-۲۰ اعمال شده است. هر یک از سه سیم‌پیچ نماینده یک فاز سیم‌پیچ استاتور پس از ساده سازی می‌باشد که با تعداد دور و مقاومت هر فاز مشخص می‌شود. در مرحله طراحی پارامترهای سیم‌پیچ‌های استاتور محاسبه شد. با جایگذاری پارامترهای بدست آمده مورد نظر آنالیز اجزاء محدود در حالت متغیر با زمان انجام شده است. نتایج آنالیز برای چهار زمان مختلف نمونه در حالت بار کامل به صورت داده شده در شکل ۴-۲۱ به عنوان نمونه نشان داده شده است.



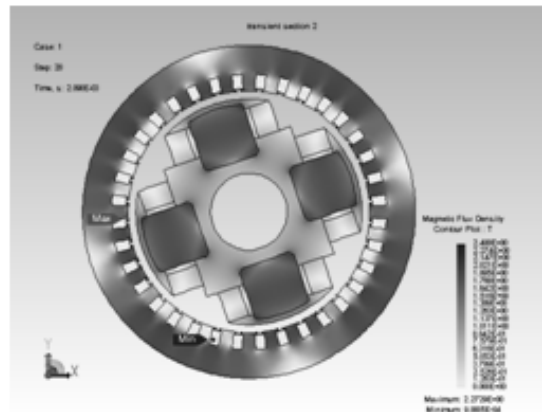
$t=2.09e-4$



$t=0$



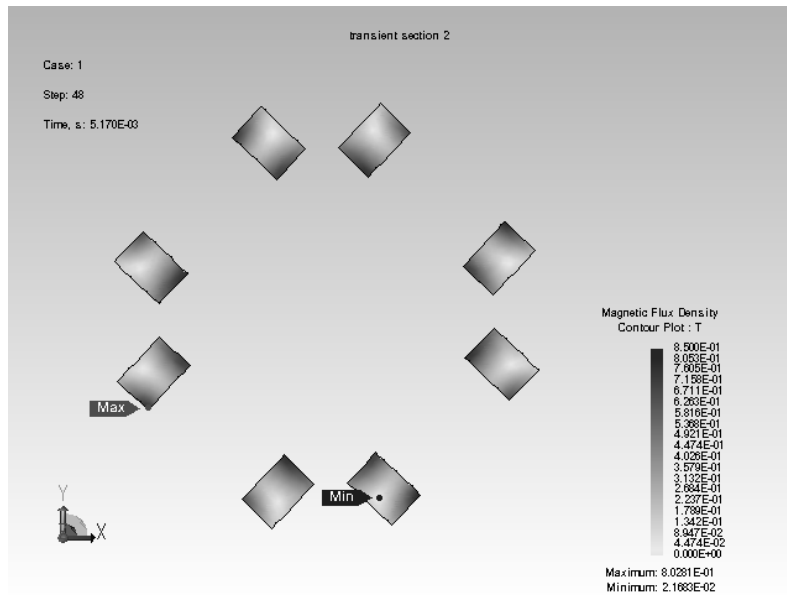
$t=3.19e-3$



$t=2.09e-3$

شکل ۴-۲۱- نتایج آنالیز متغیر با زمان المان محدود بر موتور ابررسانا برای چهار زمان مختلف در حالت بار کامل، واحد ثانیه

توزیع چگالی شار اعمالی بر سیم‌پیچ‌های ابررسانا در یک دور کامل چرخش روتور توسط آنالیز اجزاء محدود بدست آمده است. نتایج بدست آمده نشان داده‌اند که حداکثر چگالی شار اعمالی بر سیم‌پیچ‌های ابررسانای روتور به  $0.8$  تسلا محدود شده است. شکل ۴-۲۲ لحظه‌ای از کار عادی موتور را نمایش می‌دهد که چگالی شار حداکثر مقدارش را در گوشه سیم‌پیچ اختیار کرده است.



شکل ۴-۲۲- حداکثر میدان اعمال شده به سیم‌پیچ‌های ابررسانا

با در اختیار داشتن شرایط جریان و چگالی شار اعمالی بر سیم‌پیچ ابررسانا دمای مورد نیاز سیم‌پیچ‌ها برای حفظ خاصیت ابررسانایی قابل انتخاب است. با توجه به موارد ذکر شده در مرجع [۲۹]، اطلاعاتی در ارتباط با شرایط جریان، میدان و دمای ابررسانای YBCO ارائه شده است. با توجه به میدان مغناطیسی اعمال شده و جریان کاری سیم‌پیچ‌ها بهترین دمای کاری برای عملکرد بدون مشکل ۶۵ درجه کلون می‌باشد. در این دمای کاری تضمین می‌شود که با توجه به میدان مغناطیسی دائم اعمال شده، شرایط ابررسانایی حفظ شود.

#### • تلفات و بازده موتور

برای موتوری که طراحی شده محاسبه تلفات موجود و نیز متعاقباً بازده موتور از اهمیت بالایی برخوردار است. به همین منظور سعی شده تا دورنمایی از بازده موتور در شرایط بار نامی حاصل شود. لازم به ذکر است در شرایط واقعی جریان کشیده شده توسط موتور هارمونیک می‌باشد که خود حاصل تأثیر درایو موتور می‌باشد. در این کار از تأثیر هارمونیک درایو صرنظر شده است. به این مفهوم که جریان سینوسی به موتور اعمال شده و تلفات با صرف نظر از هارمونیک‌های موجود احتمالی محاسبه شده است. تلفات در این موتور شامل تلفات آهن و سیم‌پیچ‌های مسی استاتور می‌باشد. در

این موتور تلف روتور بسیار کم و نزدیک به صفر است چراکه سیم‌پیچ ابررسانای روتور عملاً تلفات مقاومتی نداشته و تلف کم آهن روتور نیز با جایگزینی بخش زیادی از آن با ماده غیر مغناطیسی عملاً به صفر نزدیک شده است. بنابراین بیشترین تلف موتور در استاتور موتور اتفاق می‌افتد که تلفات آهن یوغ استاتور بیشترین تأثیر را بر مقدار آن دارد. نتایج آنالیز اجزاء محدود انجام شده به منظور مشخص شدن تلفات در جدول ۴-۵ آورده شده است. تلفات مسی سیم‌پیچ استاتور نیز محاسبه شده است. به این منظور با توجه به مقاومت هر فاز استاتور معادله ۳۵ بیانگر کل تلفات مسی استاتور خواهد بود. تلفات مسی نیز در جدول ۴-۵ ارائه شده است.

$$P_{cu} = 3 \times R_{phase}^{total} \times I_{ph}^2 \quad (35)$$

جدول ۴-۵- تلفات در موتور طراحی شده

روتور	استاتور	بخش تلف
۴×۰/۶	۱۳۶۷۳	تلفات آهنی (وات)
صفر	۷۱۰۰	تلفات مسی (وات)
۲۰۷۷۳		مجموع (وات)

همانگونه که در جدول ۴-۵ نشان داده شده است کل تلف در روتور به کمتر از ۳ وات خلاصه شده است. به عبارت دیگر تلف در هر یک از بخش‌های آهنی هسته قطب تنها ۰/۶ وات می‌باشد. همینطور در شرایط ابررسانایی مقاومت الکتریکی ابررسانا در کاربرد جریان مستقیم صفر است که در جدول ۴-۵ نیز منظور شده است. به منظور دقت بالاتر با توجه به مرجع [۳۱] سایر تلفات موجود در شرایط واقعی به شکل داده شده در جدول ۴-۶ تقریب زده شده است. لازم به ذکر است اطلاعات داده شده در جدول مذکور مربوط به نتایج واقعی تلفات یک موتور سنکرون ابررسانا با توان یک مگاوات می‌باشد. از این اطلاعات در جمع بندی تلفات موتور استفاده شده است.

جدول ۴-۶- سایر تلفات برای یک موتور یک مگاوات ابرسانا

نوع تلف	وات
بادخوری و اصطکاک	۱۰۲۷
بارسگردان	۱۳۰۵
دیگر تلفات	۲۹۵۳
مجموع	۵۲۸۵
<b>کل تلفات (وات)</b>	
$۲۰۷۷۳+۵۲۸۵=۲۶۰۵۸$	

اکنون با توجه به تلفات محاسبه شده بازده موتور قابل تعیین است. بازده موتور از رابطه آشنای ۳۶ بدست می‌آید:

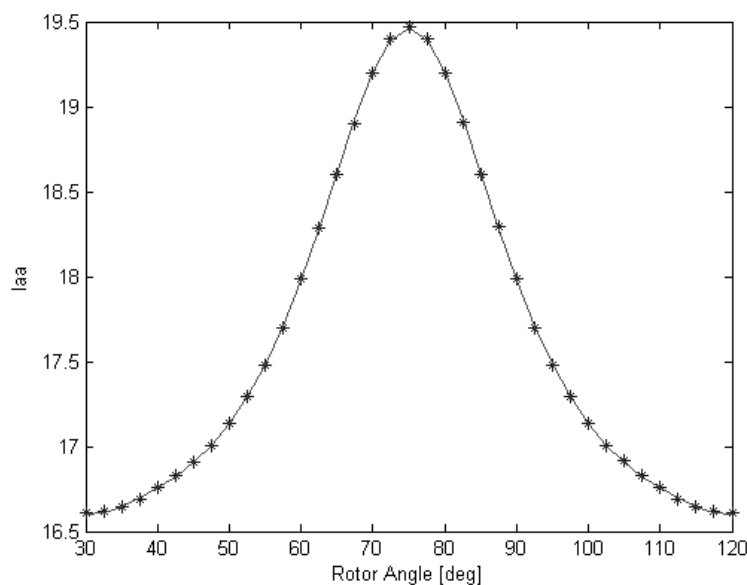
$$\eta = \left( \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}^{total}} \right) \times 100 \quad (۳۶)$$

به این ترتیب بازده موتور ۹۷/۶٪ بدست می‌آید.

#### • اندوکتانس سیم‌پیچ‌ها و گشتاور حالت ماندگار

اندوکتانس‌های خودی و متقابل سیم‌پیچی‌های تحریک و استاتور نیز توسط روش المان محدود محاسبه شده‌اند. به منظور محاسبه اندوکتانس‌های خودی و متقابل، روتور را چرخانده و در هر مرحله با جریان‌دهی یک سیم‌پیچ اندوکتانس‌های مرتبط با آن سیم‌پیچ بدست می‌آید. لازم به ذکر است که اندوکتانس مستقل از جریان است. در واقع اندوکتانس به مقدار جریان اعمال شده بستگی ندارد. اما از سوی دیگر اندوکتانس‌ها وابسته به زاویه روتور می‌باشند. در این مرحله برای مثال سیم‌پیچ فاز a جریان دهی شده و اندوکتانس‌های خودی و متقابل سیم‌پیچ ضمن چرخش موتور بدست می‌آیند. به منظور یافتن معادله‌ای برای اندوکتانس فاز a بر حسب زاویه روتور، به کمک روش آنالیز اجزاء محدود ابتدا اندوکتانس در موقعیت‌های مختلف روتور محاسبه شده و در انتها توسط شیوه برازش منحنی نزدیک‌ترین معادله بر حسب موقعیت روتور برای اندوکتانس بدست می‌آید. در این بخش برای نمونه

اندوکتانس خودی فاز a با بکارگیری نتایج حاصل از آنالیز المان محدود به روش برازش منحنی محاسبه شده است. شکل ۴-۲۳ اندوکتانس خودی فاز a را پس از اعمال برازش منحنی بدست می‌دهد. در شکل ۴-۲۳ نقاط نشان داده شده توسط آنالیز اجزاء محدود بدست آمده‌اند. در واقع در این مورد روتور از موقعیت ۳۰ درجه تا ۱۲۰ درجه در هر مرحله ۲/۵ درجه چرخیده و اندوکتانس مربوطه بر حسب میلی هانری محاسبه شده است. مقادیر اندوکتانس در باقی موقعیت‌ها به صورت همسان تکرار می‌شوند. در نهایت نقاط بدست آمده توسط منحنی سیاه رنگ با دقت بالا برازش شده و اندوکتانس با واحد میلی هانری به صورت معادله‌ای بر حسب زاویه روتور تا هارمونیک هشتم بیان شده است.



شکل ۴-۲۳- برازش منحنی برای اندوکتانس خودی فاز a، واحد میلی هانری

$$l_{aa}=17.6369+1.2975*\cos(4*(\theta+1.0472))+0.3690*\cos(2*4*(\theta+1.0472))+0.1199*\cos(3*4*(\theta+1.0472))+0.0241*\cos(4*4*(\theta+1.0472))+0.0112*\cos(5*4*(\theta+1.0472))+0.0748*\cos(6*4*(\theta+1.0472))+0.0275*\cos(7*4*(\theta+1.0472))+0.0038*\cos(8*4*(\theta+1.0472));$$

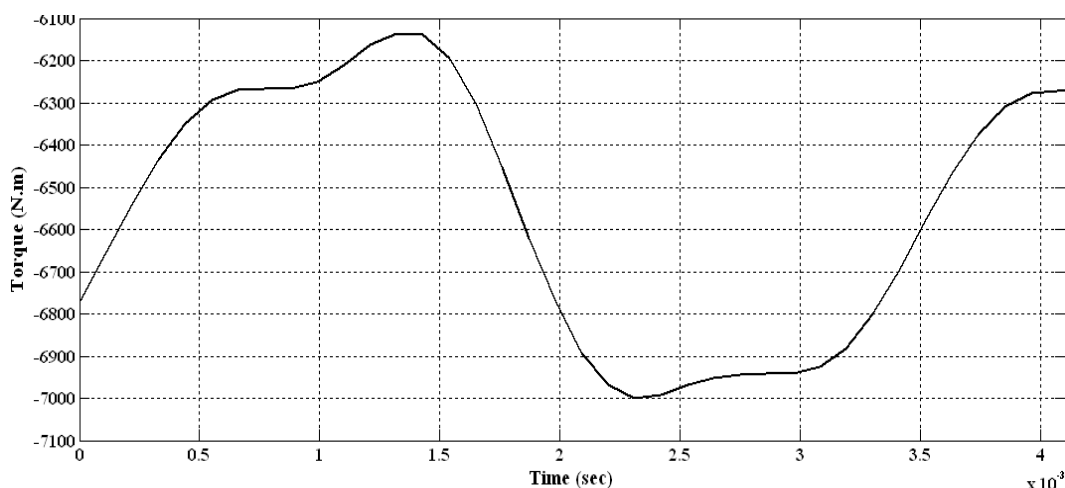
همین روش برای محاسبه اندوکتانس‌های متقابل فاز a و بطور مشابه برای سایر فازها نیز انجام شده و نتایج آن بدست آمده است. متغیر theta موقعیت روتور را بر حسب رادیان نمایندگی می‌کند. در ادامه سایر اندوکتانس‌های مربوط به فاز a داده شده‌اند.

$$lab = -4.1337 + 1.1642 * \cos(4 * (\theta - 0)) - 0.0574 * \cos(2 * 4 * (\theta - 0)) - 0.0283 * \cos(3 * 4 * (\theta - 0)) - 0.0229 * \cos(4 * 4 * (\theta - 0)) + 0.0011 * \cos(5 * 4 * (\theta - 0)) + 1.9659 * \cos(6 * 4 * (\theta - 0)) + 0.8055 * \cos(7 * 4 * (\theta - 0)) + 0.0486 * \cos(8 * 4 * (\theta - 0));$$

$$lac = -4.1337 + 1.1642 * \cos(4 * (\theta - 1.0472)) - 0.0574 * \cos(2 * 4 * (\theta - 1.0472)) - 0.0283 * \cos(3 * 4 * (\theta - 1.0472)) - 0.0229 * \cos(4 * 4 * (\theta - 1.0472)) + 0.0011 * \cos(5 * 4 * (\theta - 1.0472)) + 1.9659 * \cos(6 * 4 * (\theta - 1.0472)) + 0.8055 * \cos(7 * 4 * (\theta - 1.0472)) + 0.0486 * \cos(8 * 4 * (\theta - 1.0472));$$

$$lat = -0.0034 + 172.1799 * \cos(4 * (\theta - 0.5236)) + 0.0031 * \cos(2 * 4 * (\theta - 0.5236)) - 12.0189 * \cos(3 * 4 * (\theta - 0.5236)) + 0.0029 * \cos(4 * 4 * (\theta - 0.5236)) - 0.7041 * \cos(5 * 4 * (\theta - 0.5236)) + 4.8080 * \cos(6 * 4 * (\theta - 0.5236)) + 0.9856 * \cos(7 * 4 * (\theta - 0.5236)) - 0.9619 * \cos(8 * 4 * (\theta - 0.5236)).$$

با وجود تقارن موجود در ماتریس اندوکتانس موتور، اندوکتانس سایر فازها با توجه به شیفت فازی ۱۲۰ درجه‌ای نسبت به یکدیگر محاسبه می‌شوند. بنابراین با در نظر گرفتن اندوکتانس‌های خودی و متقابل فاز a، اندوکتانس خودی و متقابل فازهای b و c محاسبه خواهند شد. در ادامه به منظور ارائه بیشتر مشخصات موتور طراحی شده، گشتاور موتور نیز در حالت ماندگار محاسبه شده است. لحظه مرجع اولیه موتور را لحظه صفر نشان داده شده در شکل ۴-۲۱ در نظر بگیرید. نتیجه آنالیز المان محدود موتور برای منحنی گشتاور حالت مانا بر حسب نیوتن متر در مدت زمان ۰/۰۴ ثانیه با در نظر گرفتن موقعیت اولیه موتور در لحظه صفر در شکل ۴-۲۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۴- منحنی گشتاور موتور ابررسانای طراحی شده در حالت ماندگار

### • آزمایش اتصال باز، اتصال کوتاه و راکتانس سنکرون

یکی دیگر از پارامترهای مهم ماشین‌های سنکرون، راکتانس سنکرون آن می‌باشد. بطور کلی راکتانس سنکرون مشخص می‌کند ماشین سنکرون طراحی شده توانایی تولید توان نامی خود را دارد یا خیر. علت آن است که راکتانس سنکرون با توان تولید شده رابطه عکس دارد. ماشین سنکرونی که راکتانس سنکرون بالایی داشته باشد در تولید توان ضعیف خواهد بود. اما در صورتی که راکتانس سنکرون کوچک باشد تولید توان نامی با محدودیت همراه نخواهد بود. بطور کلی ماشین‌های سنکرون ابررسانا بدلیل فاصله هوایی بزرگ راکتانس سنکرون کوچکی دارند. این امر در مورد موتور حاضر نیز صادق می‌باشد. راکتانس سنکرون عموماً بصورت پریونیت داده می‌شود. در این کار راکتانس سنکرون موتور نیز محاسبه و ارائه شده است. فرض کنیم روتور با سرعت سنکرون بچرخد. می‌خواهیم ولتاژ نامی موتور را در پایانه‌های مدار باز شده استاتور بدست آوریم. جریان مورد نیاز تحریک را  $A_T^{No-load}$  می‌نامیم. قبلاً ضمن محاسبه ولتاژ پشتی نیز مشابه این آزمایش انجام گرفت. در این آزمایش جریان تحریک بگونه‌ای تنظیم می‌شود تا ولتاژ ترمینال به میزان ولتاژ نامی افزایش یابد. با انجام تست‌های لازم، جریان تحریک مورد نظر،  $A_T^{no-load}$ ، ۱۰۹ آمپر بدست می‌آید نتیجه آزمایش اتصال باز استاتور بصورت داده شده در شکل ۴-۲۶ خواهد بود. اکنون فرض کنیم پایانه‌های سیم‌پیچ استاتور اتصال



کوتاه شود. حال  $A_T^{Short-circuit}$  را بگونه‌ای تعیین می‌کنیم تا جریان نامی ۱۳۰ آمپر از سیم‌پیچ استاتور بگذرد. قطعا  $A_T^{Short-circuit}$  بخش کوچکی از جریان نامی تحریک است چراکه با بالا بردن جریان تحریک جریان بسیار بزرگی در سیم‌پیچ استاتور بوجود آمده و سیم‌پیچ‌ها آسیب خواهند دید. اکنون راکتانس سنکرون  $X_s$ ، از رابطه ۳۷ بر حسب پریونیت بدست خواهد آمد [۳۲].

$$X_s = \frac{A_T^{Short-circuit}}{A_T^{No-load}} \quad (37)$$

آزمایش اتصال کوتاه نیز برای موتور طراحی شده در فضای مجازی اجرا شده و نتایج بدست آمده‌اند. بر این اساس در صورتی که جریان ۱۶ آمپر از سیم‌پیچ‌های ابرسانای تحریک بگذرد جریان نامی در سیم‌پیچ‌های استاتور حاصل خواهد شد. با توجه به نتایج آزمایش‌های اتصال باز و اتصال کوتاه انجام شده و نیز معادله ۳۷ راکتانس سنکرون موتور مورد نظر ۰/۱۴ پریونیت خواهد بود.

#### ۴-۳-۳-۴ - مقایسه، پیشنهادات و برآورد هزینه تمام شده

به منظور درک بیشتر ویژگی‌های موتور طراحی شده، همین طرح به صورت تمام آهنی طراحی و تمامی نتایج آنالیز المان محدود برای مدل تمام آهنی نیز بدست آمده است. ارائه تک تک نتایج با جزئیات بصورت جداگانه از حوصله این بخش خارج بوده و تنها مطابق جدول ۴-۷ به آنها اشاره می‌کنیم.

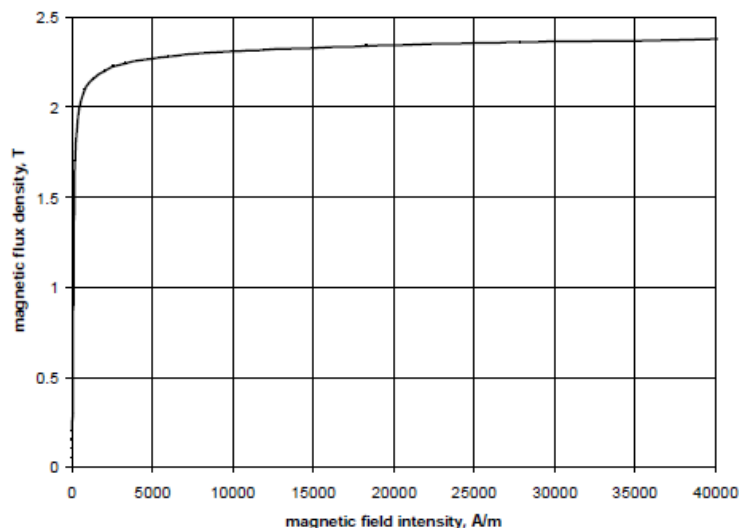
جدول ۴-۷ - مقایسه پارامترهای اساسی دو موتور مشابه چند پارچه و تمام آهنی طراحی شده

تمام آهنی	روتور چند پارچه	نوع پارامتر
۰/۴۷×۰/۶۸	۰/۶۹۵×۰/۴۷	ابعاد ( $m^2$ )
۲۰۴۶	۱۸۷۹	وزن (kg)
۰/۹۷	۱/۱	چگالی شار فاصله هوایی (T)
۱۳۷۲۰	۱۳۶۷۳	تلفات آهنی (w)
۹۷/۶	۹۷/۶	بازده (/.)
۱۹۳۰	۲۸۲۷	میزان سیم‌پیچ مورد نیاز (km)

امروزه با پیشرفت تکنولوژی، مواد مغناطیسی نیز بهبود داده شده‌اند. نتایجی که تاکنون از موتور طراحی شده بدست آمده حاصل بکارگیری آهن بکارگرفته شده در ماشین‌های الکتریکی معمول است. اخیراً آلیاژی از آهن پا به بازارهای تجاری گذاشته که از آهن و کبالت مشتق شده است. این ماده با نام تجاری وکوفلاکس<sup>۱</sup> ۵۰ شناخته شده و ساخت کشور آلمان می‌باشد. علت شهرت زیاد این آلیاژ خاص آهن استقامت بالای مکانیکی و خاصیت منحصر بفرد مغناطیسی آن می‌باشد. منحنی مغناطیسی این ماده نقطه زانویی خود را در ۲/۴ تسلا اختیار کرده و مشخصات وات بر کیلوگرمی به مراتب پایین‌تری نسبت به آهن معمول دارد. منحنی مغناطیسی وکوفلاکس ۵۰ در شکل ۴-۲۵ نشان داده شده است. لازم بذکر است که تنها عیب این آلیاژ آهن نسبت به انواع دیگر سنگین‌تر بودن و گران‌تر بودن این فلز می‌باشد. در جدول ۴-۸ مشخصات وکوفلاکس ارائه شده است [۴].

جدول ۴-۸- مشخصات وکوفلاکس ۵۰

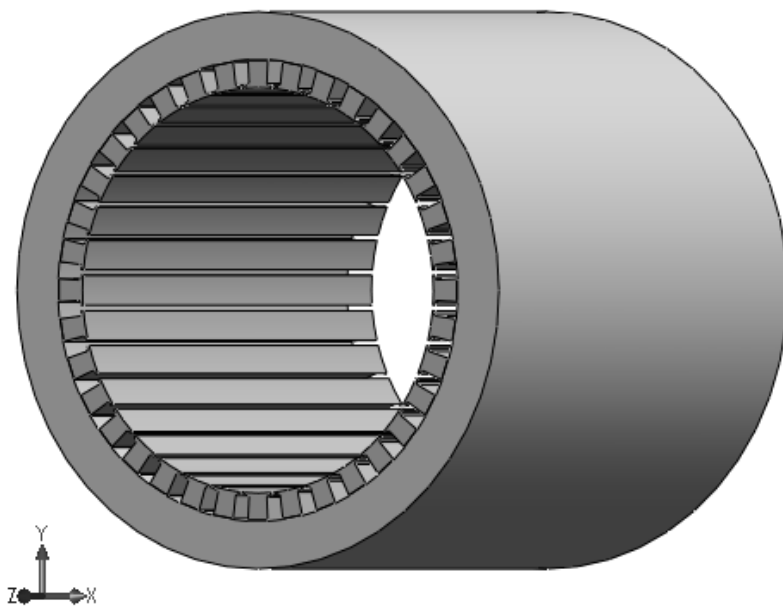
۸/۱۲۵	جرم حجمی ( $g/cm^3$ )
منحنی B-H	نفوذ پذیری مغناطیسی
۵۰	درصد کبالت موجود (%)
۲۵	حداقل قیمت (\$/kg)



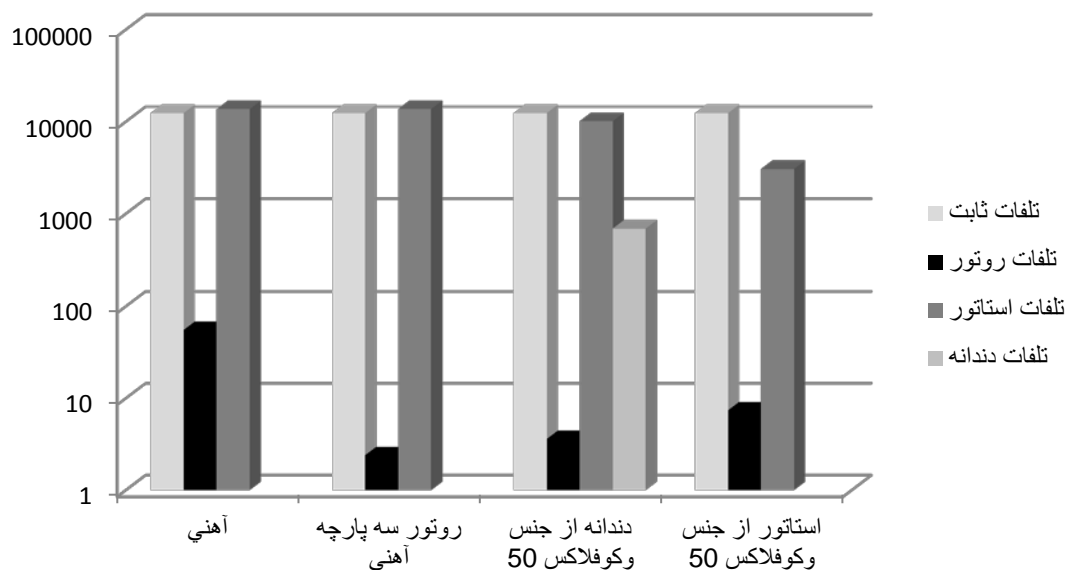
شکل ۴-۲۵- منحنی مغناطیسی وکوفلاکس ۵۰

<sup>۱</sup>Vacoflux50

به عنوان یک رهیافت، از وکوفلاکس ۵۰ در مدل طراحی شده استفاده و نتایج با حالت‌های قبلی مقایسه شده‌اند. دو حالت در نظر گرفته شده است. در حالت اول تنها دندانه‌های استاتور از جنس وکوفلاکس ۵۰ در نظر گرفته شده و در حالت بعدی تمامی استاتور را از جنس وکوفلاکس ۵۰ در نظر می‌گیریم. در حالت اول دندانه‌ها پس از قالب‌گیری و ساخت تک تک در محل خود بر استاتور سوار شده و محکم می‌شوند. علت انتخاب دندانه این است که نیازمند هزینه کمتری برای ماده سازنده باشیم. شکل ۴-۲۶ استاتور را پس از نصب دندانه‌ها نشان می‌دهد. دقت شود ابعاد استاتور تغییری نکرده است. در مرحله بعدی فرض می‌شود استاتور بطور کامل از وکوفلاکس ۵۰ ساخته شود. تمامی مراحل انجام شده تاکنون به منظور رسیدن به مقدار بازده تکرار شده و در نهایت تمامی چهار طرح باهم مقایسه شده‌اند. از آنجا که میزان تلفات آهن در روتور بسیار کم است نیازی به استفاده از وکوفلاکس ۵۰ در ساختار روتور نیست چراکه بخش اعظم تلفات آهن در استاتور اتفاق می‌افتد. به همین علت میزان تلفات آهن در چهار حالت شامل روتور تمام آهنی، آهنی، روتور چند پارچه با دندانه‌ها از جنس وکوفلاکس ۵۰ و در نهایت روتور چند پارچه با استاتور از جنس وکوفلاکس ۵۰ محاسبه و با هم مقایسه شده‌اند. نتایج در گراف شکل ۴-۲۷ ارائه شده‌اند.



شکل ۴-۲۶- استاتور فولادی بعد از نصب دندانه‌های از جنس وکوفلاکس ۵۰



شکل ۴-۲۷- گراف توزیع تلفات در موتور طراحی شده در چهار مدل ذکر شده

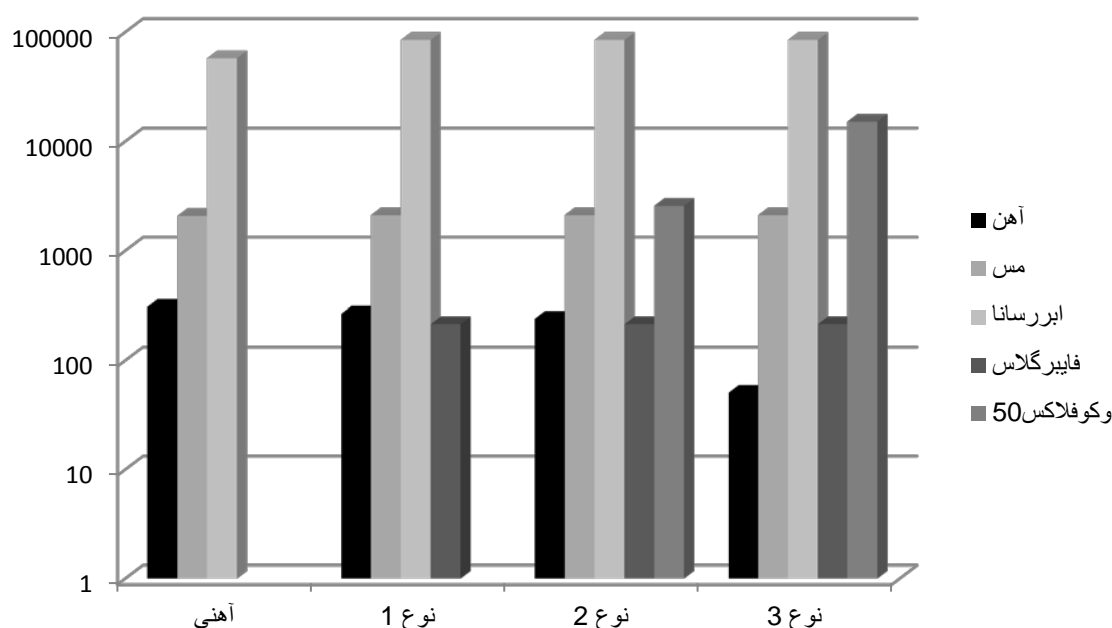
در شکل ۴-۲۷، تلفات ثابت شامل تلفات داده شده در جدول ۴-۶ به همراه تلفات مسی سیم پیچ استاتور می باشد. همانگونه که گراف شکل ۴-۲۷ نشان می دهد، در صورت استفاده از وکوفلاکس میزان تلفات در موتور کاهش می یابد. در حالتی که تنها دندانه ها از جنس وکوفلاکس ۵۰ انتخاب شوند نسبت به حالت آهنی تلفات به ۸۵ درصد و در صورتی که تمام استاتور از جنس وکوفلاکس ۵۰ انتخاب شود تلفات به میزان ۱۵ درصد حالت استاتور آهنی کاهش می یابد. در این صورت بازده موتور افزایش چشم گیری خواهد داشت. نتایج حاصله مقایسه وزن و بازده موتورها در جدول ۴-۹ ارائه شده است.

جدول ۴-۹- مقایسه وزن و بازده چهار موتور مطرح شده

نوع پارامتر	نوع ۱*	نوع ۲**	نوع ۳***
بازده (%)	۹۷/۵	۹۷/۸	۹۸/۶
وزن (kg)	۱۲۹۶	۱۱۳۷	۱۱۵۴

\* موتور با روتور سه پارچه  
 \*\* موتور با روتور سه پارچه در صورت بکارگیری وکوفلاکس ۵۰ در دندانه  
 \*\*\* موتور با روتور سه پارچه در صورت بکارگیری وکوفلاکس ۵۰ در کل استاتور

همانگونه که در جدول ۴-۹ ارائه شده است در صورت بکارگیری وکوفلاکس ۵۰ بازده افزایش می‌یابد. البته حتی با استفاده از این ماده باز هم وزن موتور از یک موتور مشابه آهنی کمتر است که این نیز ویژگی مثبت دیگری است. تنها نکته منفی هزینه بالای مورد نیاز برای تهیه متریال موتور است. به منظور مقایسه نهایی هزینه تهیه متریال موتور را بررسی شده و نتایج آن در گراف شکل ۴-۲۸ ارائه شده است.



شکل ۴-۲۸- گراف هزینه تقریبی

همانگونه که در گراف نشان داده شده است ابرسانا بطور قابل ملاحظه‌ای از دیگر مواد مورد نیاز گران‌تر است. علاوه بر هزینه متریال هزینه ساخت و تولید را هم در نظر بگیرید! همین موضوع تجاری شدن این نوع موتورها را به تعویق انداخته است. بخش اعظم هزینه موتور در وضعیت فعلی صرف ابرسانا می‌گردد. به همین دلیل در حال حاضر استفاده از غیرمغناطیس در موتور به منظور کاهش وزن چه بصورت هسته هوایی و چه بصورت روتور چند پارچه صرفه اقتصادی ندارد و تنها عیب اینگونه موتورها می‌باشد. البته در آینده نزدیک با کاهش چشم‌گیر قیمت ابرساناها بدلیل تسریع بازگشت هزینه، این عامل دیگر منفی نخواهد بود. البته حضور استاتور هسته هوایی (با یوغ غیرمغناطیسی) با

وجود بازدهی بسیار بالا و وزن ناچیز بدلیل آمپر دور فوق العاده زیاد مورد نیاز احتمالا انتخاب مناسبی نخواهد بود چراکه حجم بالای ابررسانای مورد نیاز مخصوصا در موتورهایی با تعداد قطب زیاد حتی در آینده نیز صرفه اقتصادی نخواهد داشت. از طرف دیگر در انواع مرسوم موتورهای ابررسانا با هسته تمام آهنی با وجود هزینه به مراتب کمتر نسبت به مدل پیشنهادی مزیت کاربردی زیادی نسبت به انواع معمول غیر ابررسانا جز بازدهی بالاتر ندارد. بکارگیری ابررسانا زمانی مفید است که ضمن افزایش بازده بتوان از دیگر ویژگی‌های بکارگیری آن مخصوصا وزن کمتر بهره جست. در این طرح سعی شد تا با طراحی موتور بصورت روتور سه پارچه تعادلی بین هزینه و وزن موتور ایجاد شود. همینطور با معرفی ماده مغناطیسی کم تلف نشان داده شد که بازده در حالت روتور سه پارچه نیز می‌تواند به میزان قابل توجهی افزایش یافته و در عین حال کل مجموعه وزن کمتری داشته باشد.

#### ۴-۳-۳-۵- کاربرد طرح

موتورهای ابررسانا نقش ویژه‌ای در صنعت حمل و نقل ایفا می‌کنند. حمل و نقل دریایی یکی از کاربردهای اصلی این موتورهاست. زمانی که موتور الکتریکی به عنوان قوای رانشی یک شناور به کار رود وزن و بازده موتور معیار مهمی برای انتخاب خواهد بود. از آنجا که اصولا موتورهایی با سرعت‌های کمتر برای این کار انتخاب می‌شوند عموما بسیار بزرگ و سنگین خواهند بود. چراکه بکارگیری جعبه دنده پر سروصدا بوده و باعث اتلاف انرژی خواهد بود. به همین منظور برای یک شناور موتورها با سرعت نامی ۱۰۰ تا ۳۰۰ دور بر دقیقه طراحی می‌شوند. در چنین سایزهای بزرگی وزن موتور یک عامل تعیین کننده خواهد بود. با توجه به تجربه حاصل از یک موتور چهار قطب با روتور سه پارچه، انتظار می‌رود در یک مدل مشابه ۲۰ قطبی با قطر داخلی حدودا ۱/۵ متری ضمن حصول به چگالی توان بالاتر به میزان زیادی کاهش وزن داشته باشیم.

# فصل پنجم

سیستم تغذیه تحریک و ساختار  
سردکننده ابررسانا برای موتور طراحی  
شده

## ۵-۱- سیستم تغذیه موتور ابررسانا

### ۵-۱-۱- مقدمه‌ای بر سیستم تغذیه ابررسانا

همزمان با پیشرفت تکنولوژی ابررساناها تمایل جامعه مهندسی نسبت به بکارگیری این تکنولوژی در وسایل مختلف افزایش یافته است. ساخت و عرضه وسایل ابررسانا نیاز به وجود یک سیستم تغذیه مناسب ابررسانا را اجتناب ناپذیر می‌کند. تغذیه الکتریکی ابررسانا کاملاً با تغذیه سایر هادی‌های الکتریکی موجود متفاوت است. علت این است که منبع تغذیه با یک مسیر بدون مقاومت روبه رو بوده و امکان اتصال الکتریکی سیم‌های معمول با نوارهای ابررسانا به راحتی امکان پذیر نمی‌باشد. همین موضوع باعث می‌شود تا طراحان وسایل ابررسانا به دنبال روشی برای تغذیه این نوع خاص هادی‌ها باشند. در این فصل یک ساختار ساده ولی عملی برای تغذیه سیم‌پیچ‌های ابررسانای موتور سنکرون طراحی شده معرفی و ساختار آن توضیح داده شده است. در این ساختار از یک سیم‌پیچ مسی، یک سیم‌پیچ ابررسانا، هسته مغناطیسی و دو گرمکن استفاده شده که گرم‌کن‌ها نقش خارج‌کننده ابررسانا از فاز ابررسانایی را بازی می‌کنند. ویژگی دیگر این ساختار آن است که از اتصال الکتریکی مستقیم ابررسانا با منبع مولد جریان توسط هسته آهنی موجود اجتناب شده است. در این ساختار جریان سیم‌پیچ ابررسانای موتور با توجه به عملکرد گرم‌کن‌ها پله به پله افزایش یافته تا به مقدار نامی ۱۲۰ آمپر رسد. در ادامه در این باره بیشتر توضیح داده خواهد شد.

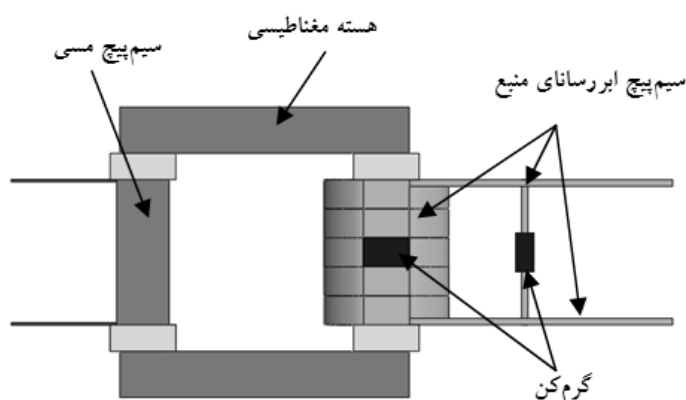
### ۵-۱-۲- ساختار سیستم تغذیه ابررسانا

همانگونه که قبلاً ذکر شد ساختار سیستم تغذیه سیم‌های ابررسانا با کلیه منابع تغذیه معمول متفاوت است. معمولاً برای تحریک یک موتور سنکرون معمولی از یک ژنراتور جریان مستقیم استفاده می‌شود. ژنراتور جریان مستقیم نقش منبع تغذیه سیم‌پیچ را داشته و در مدلسازی دینامیک مدار تحریک نقش عمده‌ای بازی می‌کند. اما در حالتی که سیم‌پیچ روتور ابررسانا باشد نیازمند ساختار جدیدی از منبع تغذیه می‌باشیم. از طرفی وجود دمپر در فاصله هوایی تأثیرات میدان‌های متغیر با زمان بر سیم‌پیچ



روتور را از بین برده و انتظار می رود جریان روتور در صورت حفظ شرایط ابرسانایی در طی کار عادی بدون تغییر باقی بماند.

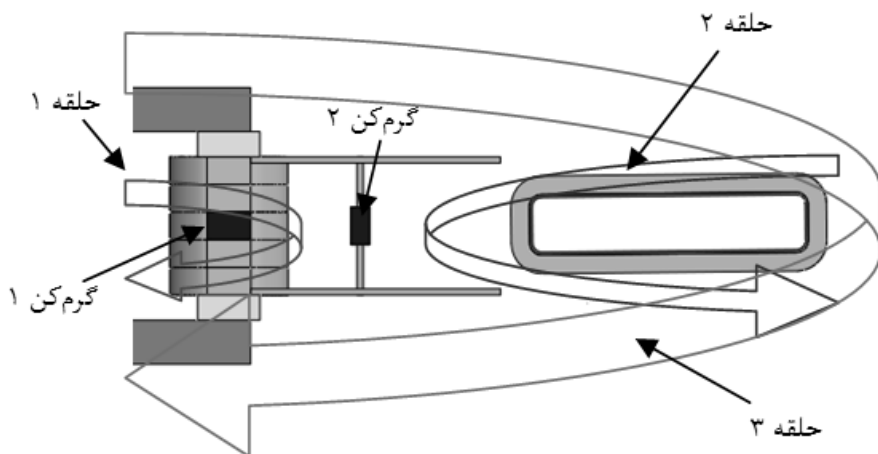
به طور کلی ساختار سیستم تحریک ابرسانا شامل یک سیم پیچ معمولی و یک سیم پیچ ابرسانا بوده که در طرفین یک هسته مغناطیسی پیچیده شده اند. همچنین منبع تغذیه شامل دو گرم کن می باشد که وظیفه افزایش دمای موضعی نوار ابرسانا را دارند تا برای لحظاتی از فاز ابرسانایی خارج شوند. شکل ۵-۱ ساختار کلی سیستم تحریک را به طور شماتیک نشان می دهد.



شکل ۵-۱- ساختار کلی تغذیه ابرسانا

طریقه عملکرد این سیستم تغذیه بگونه ایست که سیم پیچ مسی توسط یک مولد پالس D.C. به طور متناوب و کنترل شده تغذیه می شود. سطح پالس اعمالی ولتاژ بسته میزان جریان مطلوب در سمت ابرسانا و سطح حفاظت سیستم قابل انتخاب است. عبور جریان از سیم پیچ مسی در هسته مغناطیسی تولید شار می کند. بر طبق قانون بقای شار در سیم پیچ ابرسانا که در طرف دیگر هسته مغناطیسی قرار گرفته نیز جریانی القا می شود. سه حلقه جریان در مدار این منبع تغذیه معرفی می شود. عملکرد متناوب و برنامه ریزی شده گرم کن ها جریان را به این حلقه ها هدایت می کند. شکل ۵-۲ حلقه ها را نشان می دهد. در هر مرحله که به سیم پیچ مسی پالس ولتاژ اعمال می شود، جریان حاصله تولید شار مغناطیسی کرده و شار عبوری در هسته مغناطیسی در حلقه ابرسانای شماره ۱ جریانی القا می کند. گرم کن ها در این مرحله وظیفه مهمی بر عهده دارند. در لحظه اول گرم کن شماره ۲ روشن شده و نوار

ابرسانای مربوطه را از فاز ابرسانایی خارج کرده و مسیر جریان مسدود می‌شود. شکل ۵-۲ را ببینید. جریان جاری در حلقه شماره ۱، به سیم‌پیچ ابرسانای بار، حلقه شماره ۳، جاری می‌شود. با صفر شدن پالس، گرم‌کن شماره ۲ خاموش می‌شود. از آنجا که سیم‌پیچ ابرسانا در محیط سرد قرار دارد با خاموش شدن گرم‌کن نوار سرعت به فاز ابرسانایی بازمی‌گردد. حال گرم‌کن شماره ۱ روشن شده و مسیر جریان از طرف سیم‌پیچ ابرسانای منبع قطع شده و جریان جاری را در سیم‌پیچ تحریک موتور، حلقه شماره ۲، به تله می‌اندازد. در این لحظه دوباره پالس به سیم‌پیچ مسی اعمال شده و بار دیگر تولید شار می‌کند. باز هم بدلیل قانون بقای شار جریانی معادل با حالت قبل با باز شدن مسیر سیم‌پیچ ابرسانای منبع ضمن خاموش شدن گرم‌کن ۱ و باز گشت به فاز ابرسانایی شکل می‌گیرد. با تکرار مراحل فوق‌الذکر با روشن شدن گرم‌کن شماره ۲ جریان حاصله به جریان تولید شده در مرحله قبل اضافه می‌شود. با گذشت زمان و پس از تکرار چندین سیکل جریان مورد نیاز تحریک موتور فراهم خواهد شد. از آنجا که مطابق مطالب گفته شده جریان مرحله به مرحله تا میزان مطلوب افزایش می‌یابد، اصطلاحاً این فرآیند تغذیه را پمپ جریان<sup>۱</sup> می‌نامند. دقت شود جهت فلش‌ها در شکل ۵-۲ لزوماً جهت درست جریان را نشان نمی‌دهد و تنها به منظور معرفی حلقه‌ها می‌باشد [۳۲].

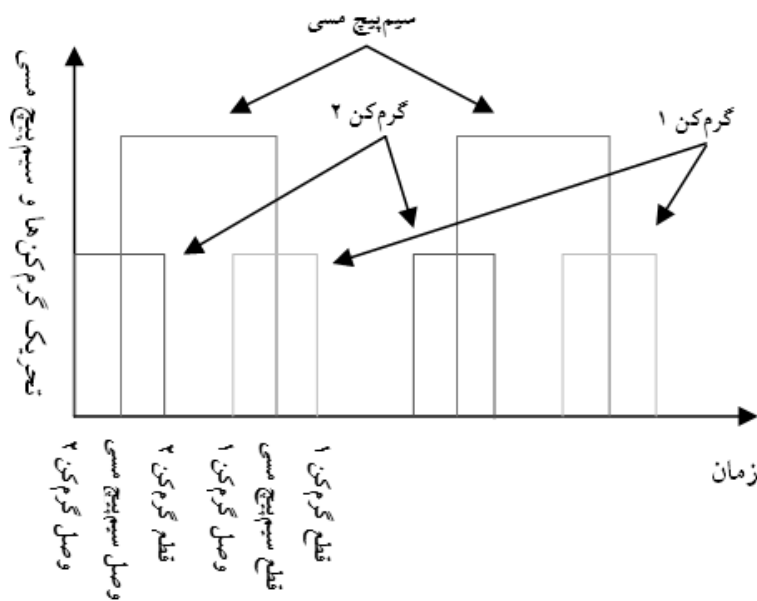


شکل ۵-۲- حلقه‌های جریان

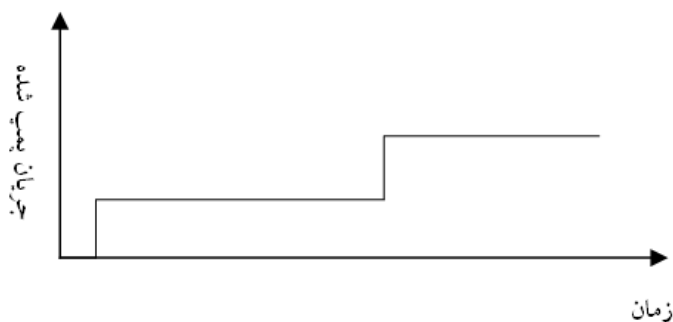
<sup>۱</sup>Current pumping

### ۵-۱-۳- قطع و وصل گرم‌کن‌ها

تحقیقات انجام شده در ارتباط با منابع تغذیه ابرسانا نشان داده است که سه عامل زیر بر کیفیت و کمیت پمپاژ جریان تأثیر مستقیم دارند: زمان‌بندی قطع و وصل گرم‌کن‌ها، میزان ولتاژ اعمال شده به سیم‌پیچ مسی و در نهایت تعداد دورهای سیم‌پیچ‌های مسی و ابرسانای بکار رفته در منبع تغذیه. با این حال به دلیل تاخیرهای موجود بر سر راه انتقال حرارت به منظور گذار به فاز ابرسانایی و نیز خروج از آن در محل گرم‌کن‌ها، در شرایط معمول سرعت قطع و وصل گرم‌کن‌ها با محدودیت روبه‌روست. گرم‌کن‌ها غشاء نازکی را تشکیل داده‌اند که بر بخش کوچکی از نوار ابرسانا قرار می‌گیرد. گرم‌کن در اثر عبور جریان الکتریکی گرم شده و دمای محل قرارگیری گرم‌کن را از دمای بحرانی بیشتر کرده و آن بخش را از فاز ابرسانایی خارج می‌کند. در این شرایط مقاومت ابرسانا در مقابل عبور جریان بشدت بالا رفته و جریان قطع خواهد شد. با قطع جریان جاری در گرم‌کن دمای ابرسانا به دمای محیط، پایین‌تر از دمای بحرانی بازگشته و فاز ابرسانایی احیا خواهد شد. شکل ۵-۳ برای دو مرحله دیاگرام شماتیک قطع و وصل گرم‌کن‌ها و تغذیه سیم‌پیچ مسی را نشان می‌دهد. شکل ۵-۴ نیز نحوه افزایش جریان در این دو مرحله پمپاژ را برای درک بهتر موضوع نشان می‌دهد.



شکل ۵-۳- برنامه قطع و وصل گرم‌کن‌ها



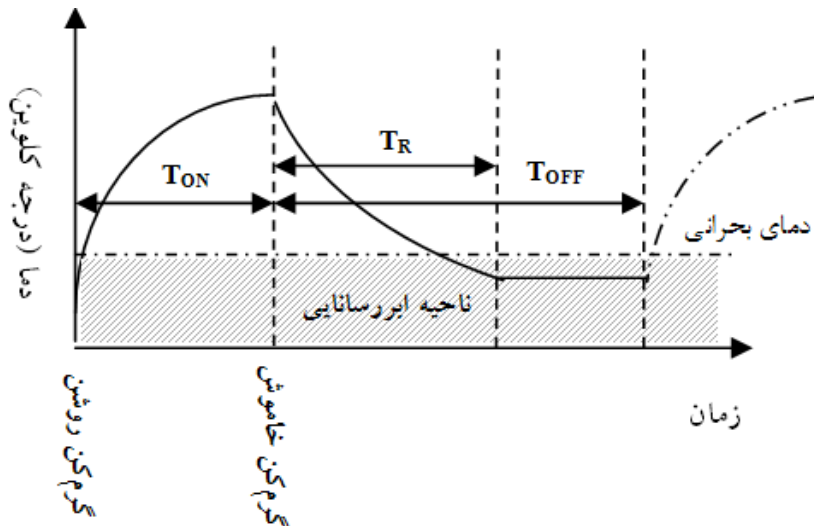
شکل ۵-۴- فرآیند شماتیک پمپاژ جریان

به منظور بهبود کیفیت پمپاژ جریان توسط سیستم تغذیه با علم به مطالبی که تاکنون ذکر شده، موارد زیر باید در ارتباط با گرم‌کن‌ها مدنظر قرار گیرد:

✓ کاهش زمان فعال سازی گرم‌کن‌ها، به عبارت دیگر گرم‌کن‌ها در کوتاهترین زمان ممکن بتوانند نوار را از فاز ابرسانایی خارج کنند؛

✓ میزان افزایش دمای ابرسانا توسط گرم‌کن‌ها باید تا حد امکان کم باشد تا بازگشت به فاز ابرسانایی پس از قطع گرم‌کن، سریعتر صورت پذیرد.

دقت شود که موارد بالا پمپ جریان را تسریع نمی‌کند بلکه میزان جریان پمپ شده در هر مرحله را تا حد امکان پایین می‌آورد تا تأمین جریان‌های کم نیز عملی باشد. در ادامه این امر توضیح داده خواهد شد. منحنی زمانی عملکرد گرم‌کن در شکل ۵-۵ ارائه شده است. در شکل ۵-۵ زمان  $T_{ON}$  زمانی است که برای روشن بودن گرم‌کن برنامه‌ریزی شده است. در طی این زمان نوار ابرسانا از فاز ابرسانایی خارج شده و مسیر جریان مربوطه قطع می‌شود. به منظور بالا بردن کیفیت پمپ جریان این زمان باید به حداقل کاهش یابد. روشن بودن بیش از حد نیاز تنها باعث تلف انرژی شده و زمان بازگشت به فاز ابرسانایی نیز بیشتر خواهد بود. در مقابل  $T_{OFF}$  زمانی است که گرم‌کن تا مرحله بعدی خاموش می‌ماند.  $T_R$  کسری از  $T_{OFF}$  است که نوار ابرسانا تحت شرایط محیط سرد موجود به فاز ابرسانایی بازگشته و مسیر جریان باز می‌شود.



شکل ۵-۵- دیاگرام زمانی عملکرد گرم کن

### ۵-۱-۴- عملکرد سیستم تغذیه

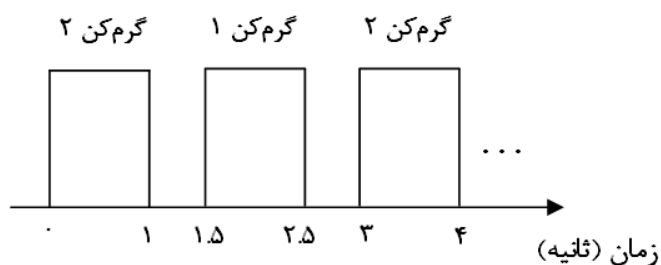
در این بخش بدلیل عدم وجود امکانات لازم برای انجام آزمایشات تجربی از داده‌های تجربی منابع دیگر برای ارائه عملکرد گرم‌کن‌های سیستم تغذیه استفاده شده است [۳۲]. منبع تغذیه باید جریان مستقیم ۱۲۰ آمپری را برای سیم‌پیچ ابررسانای روتور (بار) مهیا کند. بمنظور آشنایی بیشتر با فرآیند پمپ جریان فرض می‌شود مقادیر پارامترهای منبع تغذیه و گرم‌کن‌ها به صورت داده شده در جدول ۵-۱ انتخاب شود.

جدول ۵-۱- پارامترهای سیستم تغذیه نمونه

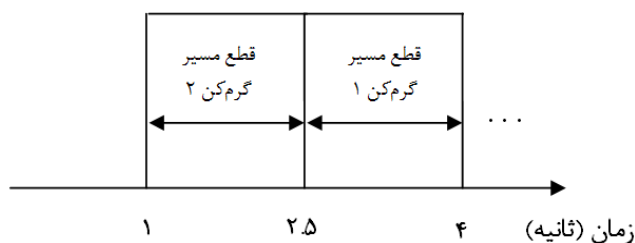
پارامتر / مشخصه	سیم پیچ مسی	سیم پیچ ابررسانا	بار
تعداد دور	۱۵۰	۱۰	۵۰۰ (۳/۵ هانری)
جنس	مس	YBCO	YBCO
نوع تحریک	مولد پالس ۲۲۰ ولت	-	-

فرض کنید سویچینگ مدار گرم‌کن به گونه‌ای است که از لحظه روشن شدن به مدت ۱ ثانیه روشن می‌ماند. مطابق آزمایشات تجربی مرجع [۳۲] نتایج عملی نشان داده است که این میزان جریان برای خارج کردن نوار از فاز ابررسانایی کافی است. مطابق اطلاعات داده شده در مرجع [۳۲] گرم‌کن بکار

رفته از آلیاژ نیکل و کروم بوده که ۴۱ اهم مقاومت دارد. عبور جریان ۰/۵۵ آمپر از گرم کن دما را بالا برده و با افزایش دمای نوار ابررسانا از فاز ابررسانایی خارج می‌شود. بطور مشابه با قطع گرم کن‌ها تحت تاثیر دمای محیط سرد، دمای ابررسانا به آرامی به دمای حالت ابررسانایی برمی‌گردد. زمان بازگشت در این منبع نمونه ۱/۵ ثانیه می‌باشد. برای درک بهتر فرض کنید گرم کن‌ها سویچ‌هایی هستند که مدار را به مدت ۱/۵ ثانیه یک در میان قطع می‌کنند. در شکل ۵-۶ نمودار زمانی تحریک گرم کن‌ها داده شده است. تغذیه سیم‌پیچ مسی نیز با توجه به سویچینگ گرم کن‌ها تعیین می‌شود. با در نظر گرفتن دیاگرام زمانی گرم کن‌ها، نتیجه عملکرد گرم کن‌ها بصورت داده شده در شکل ۵-۷ خواهد بود.

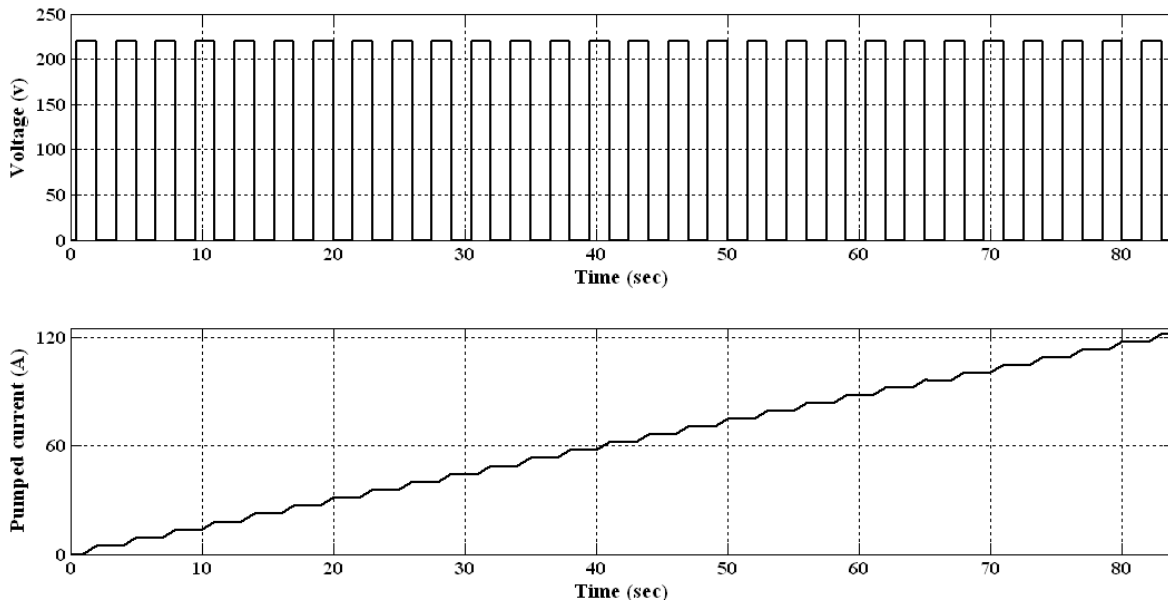


شکل ۵-۶- برنامه زمانی گرم کن‌ها



شکل ۵-۷- زمان بندی قطع و وصل گرم کن‌ها

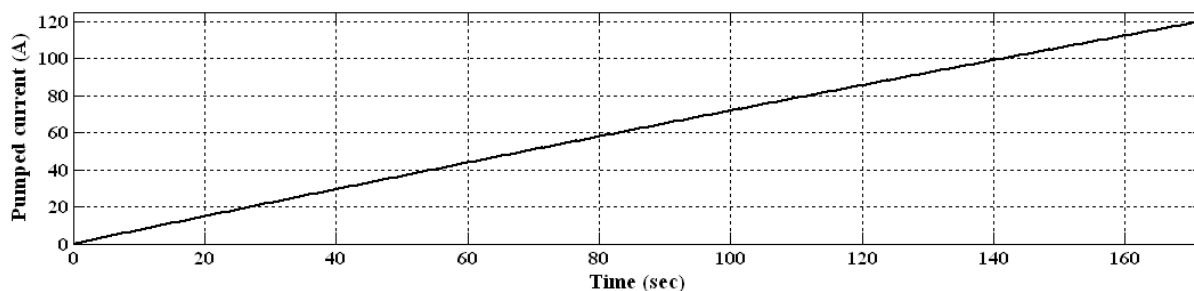
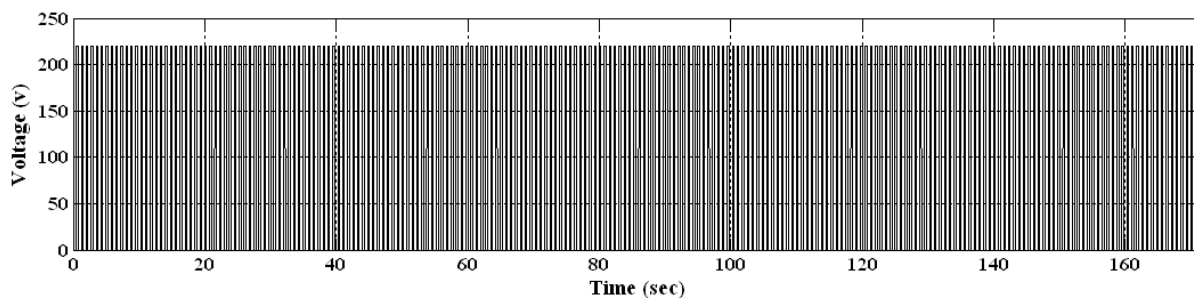
فرض کنید این سیستم تغذیه قرار است سیم‌پیچ ابررسانای موتور طراحی شده را تغذیه کند. به این منظور در ابتدا با توجه به اطلاعات بدست آمده از بخش محاسبه اندوکتانس موتور بار را مدلسازی می‌کنیم. اندوکتانس سیم‌پیچ تحریک ۳/۵ هانری بدست آمده است. اکنون با توجه به عملکرد گرم کن‌ها سیستم تغذیه را شبیه‌سازی می‌کنیم. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۵-۸ نشان داده شده است.



شکل ۵-۸- نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم تغذیه نمونه، ولتاژ اعمالی و جریان پمپ شده

در شکل ۵-۸ فرآیند پمپ جریان بوضوح قابل مشاهده است. همانگونه که دیده می‌شود با اعمال پالس ولتاژ به سیم‌پیچ مسی جریان مرحله به مرحله افزایش یافته تا پس از ۸۵ ثانیه به میزان مورد نظر ۱۲۰ آمپر می‌رسد. در واقع این سیستم تغذیه نمونه در هر چهار ثانیه  $4/5$  آمپر به سیستم پمپ می‌کند که در مقیاس با سطح جریان تحریک بسیار کم می‌باشد. از طرفی سیستم تغذیه باید توانایی مبادله جریان بالایی داشته باشد. در حالت واقعی جریان دقیق جاری در سیم‌پیچ ابررسانای موتور در هر لحظه چک شده تا در صورت لزوم جریان به سیستم پمپ شود.

اکنون کیفیت پمپ جریان توضیح داده می‌شود. منظور از کیفیت پمپ جریان کوچک شدن مقدار جریان پمپ شده در هر پله است. در این شرایط امکان تأمین جریان در کمترین مقدار ممکن وجود خواهد داشت. به منظور بالا بردن کیفیت پمپ جریان فرض کنید امکان عملکرد گرم‌کن‌ها با چهار برابر سرعت نسبت به حالت قبلی وجود داشته باشد. در این صورت نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای این حالت به صورت داده شده در شکل ۵-۹ خواهد بود. دقت شود که برنامه زمانی گرم‌کن‌ها و برنامه زمانی پالس ولتاژ اعمال شده باید همگام باهم تغییر کنند.



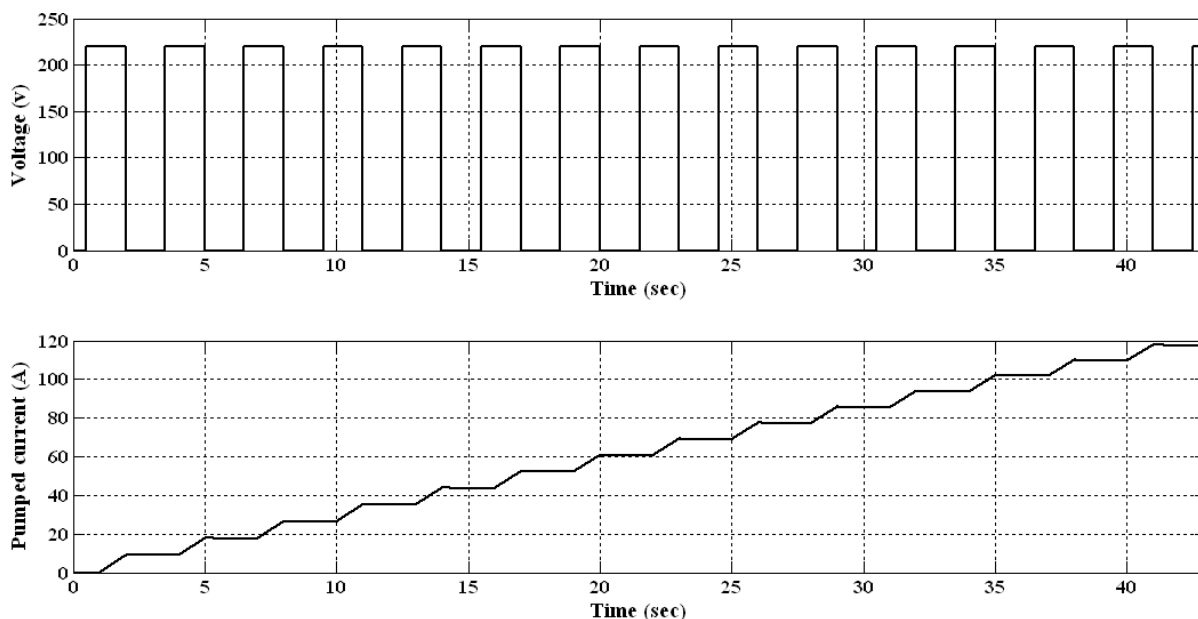
شکل ۵-۹- شبیه‌سازی منبع تغذیه در صورت عملکرد چهار برابر سریعتر گرم‌کن‌ها نسبت به حالت قبلی

همان‌گونه که در شکل ۵-۹ مشخص است مقدار پمپاژ جریان در این شرایط به ازای هر مرحله کاهش یافته است. در این شرایط که هر گرم‌کن در  $0.25$  ثانیه مدار را قطع کند، منبع در هر گام  $0.55$  آمپر به سیستم پمپ می‌کند. تاکنون مواردی از این منبع تغذیه‌ها ساخته و به بازار ارائه شده‌اند. با بالا بردن تکنولوژی سویچینگ گرم‌کن‌ها سعی شده تا جای ممکن دقت فرآیند پمپاژ افزایش یابد. یک نمونه که توسط شرکت لیک شور<sup>۱</sup> عرضه شده است قابلیت پمپ جریان با نرخ ۱ میلی آمپر بر ثانیه تا حدود ۱۰۰ آمپر بر ثانیه را دارا می‌باشد [۳۳]. یک منبع تغذیه ایده‌آل باید قادر باشد خود را بر حسب شرایط تنظیم کند. به این منظور باید یک کنترل کننده سطح لحظه‌ای جریان در سیم‌پیچ ابرسانای روتور را کنترل کرده و سطح پمپاژ را تنظیم کند. همین کنترلرها در شرایط کار عادی موتور نیز می‌توانند سطح جریان تحریک را در سطح مطلوب حفظ نمایند. اکنون فرض کنید لازم باشد در هر گام میزان بیشتری جریان به سیم‌پیچ پمپ شود. با تغییر تعداد دورهای سیم‌پیچ مسی (با فرض ثابت ماندن سطح ولتاژ سیم‌پیچ مسی) این امر امکان‌پذیر است. فرض کنید عملکرد

<sup>۱</sup>Lake shore



سوییچینگ گرم‌کن‌ها مطابق شکل ۵-۶ باشد. در این صورت اگر تعداد دور سیم‌پیچ مسی به نصف کاهش یابد فرآیند پمپ جریان بصورت شکل ۵-۱۰ تغییر خواهد کرد.



شکل ۵-۱۰- افزایش سرعت پمپاژ در صورت کاهش تعداد دورهای سیم‌پیچ مسی به نصف مقدار قبلی

سرعت پمپ جریان در این حالت مطابق با نتایج ارائه شده در شکل ۵-۱۰ با نصف شدن تعداد دورهای سیم‌پیچ مسی بکار رفته در ساختار منبع و بدون تغییر در سوییچینگ گرم‌کن‌ها نسبت به فرآیند داده شده در شکل ۵-۸ دو برابر شده است. بنابراین در صورتی که سوییچینگ گرم‌کن‌ها و تغییر تپ سیم‌پیچ مسی در رنج مطلوبی قابل تعیین باشد با طراحی کنترلرهای مناسب منبع جریان قادر خواهد بود در سریع‌ترین زمان جریان خواسته شده را با بیشترین دقت مهیا نماید.

## ۵-۲- ساختار سرد کننده موتور

### ۵-۲-۱- مقدمه‌ای بر سیستم سرد کننده

ماشین ابررسانای دما بالادر مقایسه با یک موتور معمول دارای چند قسمت اضافی شامل سیم‌پیچ‌های ابررسانا، عایق حرارتی و سیستم سرد کننده می‌باشند [۳۳]. شاید بتوان گفت سیستم سرد کننده مهمترین بخش هر ماشین HTS است که با توجه به نوع آن دارای قسمت‌های مختلفی می‌باشد. البته

تمام سیستم‌های سردکننده معمولاً دارای سه قسمت اصلی کندانسور، حلقه برودتی و سیال سردکننده می‌باشند. همزمان با توسعه کاربردهای ماشین‌های ابررسانا، توجه بیشتری به سیستم‌های سردکننده این ماشین‌ها معطوف شده است. طراحی موتورهای با چگالی توان بالاتر نیازمند سیستم‌های سردکننده مناسب می‌باشد. البته با توجه به اهمیت سیستم سردکننده در عملکرد یک موتور HTS، انتخاب سیال سردکننده و فرآیند انتقال حرارت نیز از جمله موضوعاتی است که باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد. توان مصرفی و راندمان سیستم سردکننده نیز از پارامترهای مهم و تاثیرگذار بویژه در ماشین‌های با توان کوچک‌تری باشد [۳۴]، [۳۵]، [۳۶].

## ۵-۲-۲- انواع سیستم سردکننده

در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان سیستم‌های سردکننده را به دو دسته تکفازی و دوفازی طبقه‌بندی کرد. در سیستم‌های تکفازی سیال سرد کننده، که معمولاً نیتروژن مایع می‌باشد، فقط در یک فاز (مایع یا گاز) قرار دارد و در حلقه برودتی تغییر فاز نمی‌دهد. به همین دلیل ظرفیت انتقال گرما در این سیستم‌ها نسبتاً کم بوده و معمولاً در آنها از سردکننده‌های فرعی نیز استفاده می‌شود. از سوی دیگر طراحی و کنترل سیستم‌های تکفازی آسان‌تر می‌باشد و عملکرد مناسبی در ماشین‌های ابررسانا دارند. سیستم‌های دوفازی غالباً در توان‌های بالا کاربرد دارند. در این سیستم‌ها، سیال سردکننده در کندانسور از فاز گاز به فاز مایع می‌رود و در تبخیرکننده دوباره به حالت گاز برمی‌گردد. طراحی سیستم‌های دوفاز و کنترل فشار فرآیندها در قسمت‌های مختلف آن مشکل‌تر است اما راندمان سیستم نسبتاً زیاد بوده و توزیع دما در مقایسه با سیستم‌های تکفازی، یکنواخت‌تر می‌باشد. ساختارهای سیستم‌های دوفازی معمولاً شامل ترموسیفون، سیستم تبخیری باز<sup>۱</sup> و سیستم تبخیری لوله‌ای<sup>۲</sup> است. در بین ساختارهای سیستم دوفازی ترموسیفون از باقی ساختارهای ذکر شده پرکاربردتر می‌باشد. با این حال با وجود راندمان بالا و عملکرد مناسب سیستم‌های دوفازی،

---

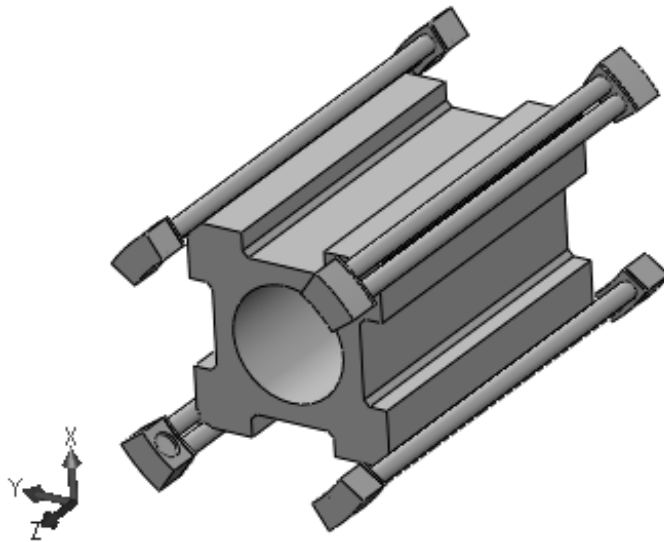
<sup>۱</sup>OEC

<sup>۲</sup>PEC

محدودیت‌ها و دشواری‌های طراحی و ساخت این سیستم‌ها باعث استقبال گسترده طراحان ماشین‌های ابرسانا از سیستم‌های سردکننده تکفازی شده است. در این سیستم‌ها معمولاً از گاز هلیوم، نیتروژن مایع، نئون مایع و ... بعنوان سیال سردکننده استفاده می‌شود. در برخی موارد از ترکیب این سیال‌ها برای سردکننده‌های فرعی یا تثبیت‌کننده‌های دما یا فشار نیز می‌توان استفاده کرد [۳۷]، [۳۸]. توضیح بیشتر راجع به سیستم سردکننده از حوصله این بخش خارج می‌باشد.

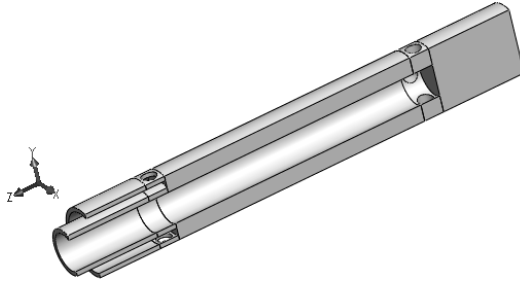
### ۵-۲-۳- ساختار سردکننده مناسب برای موتور طراحی شده

در فصل چهارم یک موتور ابرسانا طراحی و پارامترهای آن مشخص شد. به منظور ایجاد ارتباط میان سیستم سردکننده و سیم‌پیچ‌های ابرسانای موتور، نیازمند معرفی یک ساختار سردکننده می‌باشیم. سیستم‌های سردکننده در هر نوع که لازم باشد در بازار قابل تهیه بوده اما ساختار سردکننده ماشین ابرسانا بسته به طراحی آن ساختارهای متفاوتی ممکن است داشته باشد. بنابراین هر ماشین ابرسانا پس از طراحی اصلی ساختاری نیز به عنوان ساختار سردکننده نیاز دارد تا توسط آن به سیستم اصلی سردکننده که در بیرون ماشین قرار می‌گیرد مرتبط شده و سیال سردکننده بتواند در آن جاری شود. در بخش طراحی سیم‌پیچ‌های ابرسانا فضایی برای لوله‌های انتقال دهنده سیال سردکننده در نظر گرفته شد. در واقع ساختار سردکننده موتور شباهت زیادی به ساختار سردکننده یخچال‌های خانگی دارد. در یخچال‌های خانگی سیال سردکننده توسط کمپرسور و پمپ‌های تعبیه شده بطور دائم در مجاری موجود حلقه وار گردش می‌کند. همین مورد نیز در ساختار سردکننده موتور ابرسانا یا بطور کلی هر ماشین ابرسانا بکار می‌رود. لوله‌های انتقال دهنده سیال سردکننده در موتور از جنس مس در نظر گرفته شده‌اند. مس از ضریب انتقال حرارت بالایی برخوردار بوده و فرآیند انتقال حرارت را تسریع می‌کند. در اولین گام مجاری مسی تو خالی مطابق با شکل ۵-۱۱ به منظور هدایت سیال سردکننده در ساختار موتور قرار داده شده‌اند.



شکل ۵- ۱۱- قرارگیری مجاری مسی روی یوغ غیرمغناطیسی روتور

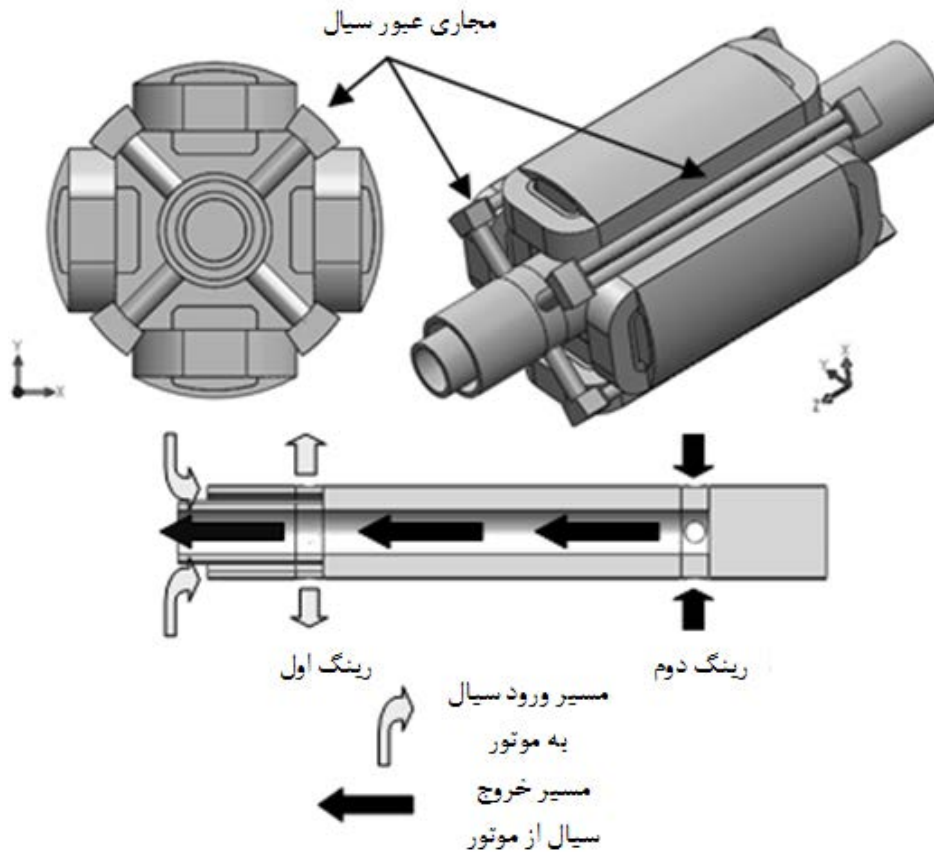
همانگونه که مشاهده می‌شود مجاری سردکننده در محل پیش‌بینی شده ضمن طراحی روتور قرار گرفته‌اند. هر سمت سیم‌پیچ ابرسانا در مجاورت یک لوله سردکننده قرار می‌گیرد. بنابراین نیاز به هشت لوله داریم که در شکل ۵-۱۱ نشان داده شده است. سیال سردکننده از یک طرف به لوله‌ها جریان یافته و از طرف دیگر خارج می‌شود. چالش اصلی ورود سیال سردکننده به موتور است چرا که سیم‌پیچ‌های ابرسانا بر روی روتور چرخان قرار داده شده‌اند. ورود سیال به موتور از طریق محور گردان موتور صورت می‌پذیرد. در بخش طراحی موتور ذکر شد که شفت موتور سنکرون با سیم‌پیچ میدان ابرسانا بزرگتر از محور موتورهای معمولی است. علت آن است که در این دسته موتورها سیال سردکننده درون محور جریان دارد. بنابراین بدلیل نیاز به فضای کافی برای جریان سیال و نیز حفظ استحکام مکانیکی محور بزرگ انتخاب می‌شود. همین موضوع باعث شده تا توجه ویژه‌ای به ساختار محور گردد. سیال سردکننده از طریق محور وارد موتور شده در مجاری مسی تعبیه شده در مجاورت سیم‌پیچ‌های ابرسانا عبور کرده و در انتهای حلقه برودتی بار دیگر وارد محور شده و به سیستم سردکننده برمی‌گردد. سیال در سیستم سردکننده تا دمای مناسب سرد شده و مسیر را دوباره می‌پیماید. به منظور آشنایی بیشتر با ساختار محور شکل ۵-۱۲ مفید خواهد بود.



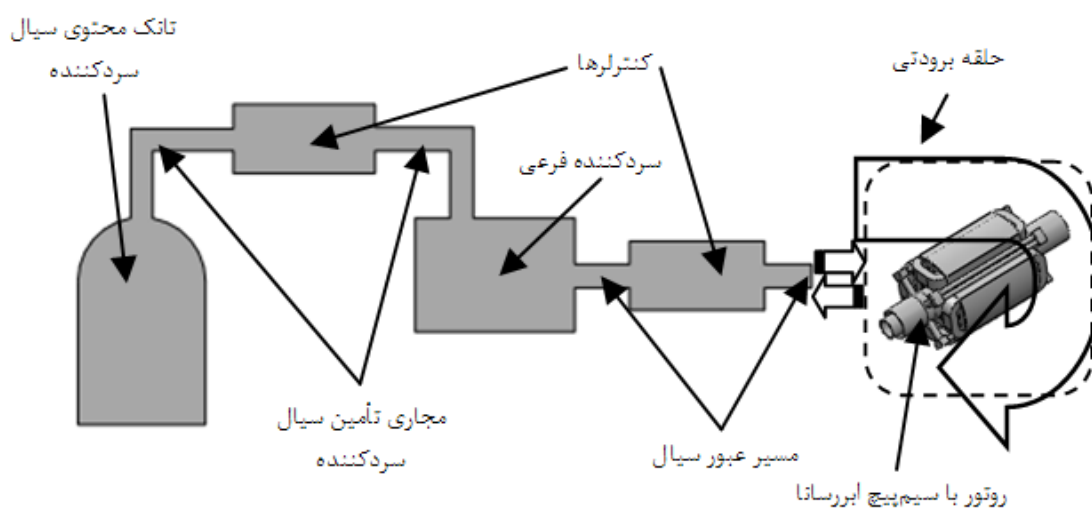
شکل ۵-۱۲- برش عرضی محور معرفی شده برای موتور ابرسانای مورد نظر

شکل ۵-۱۲ به خوبی ساختار متفاوت محور موتور ابرسانای مورد نظر را نسبت به محور موتورهای معمول غیر ابرسانا نشان می‌دهد. چهار بخش اصلی برای این محور در نظر گرفته شده است. بخش اول، بخشی است که به سیستم سردکننده متصل می‌شود. سیال سردکننده توسط یک رینگ هرزگرد (در شکل نشان داده نشده است) از مسیر بالایی محور فولادی وارد محور می‌گردد. دومین بخش شامل دو رینگ ثابت می‌باشد که مطابق شکل ۵-۱۲ در طول محور قرار داده شده‌اند. این رینگ‌ها وظیفه انتقال سیال سردکننده از محور به سیم‌پیچ‌ها و از سیم‌پیچ‌ها به محور را بر عهده دارند. مشخصاً رینگ اول سیال را به سیم‌پیچ‌ها رسانده و سیال در انتهای حلقه برودتی با بکارگیری رینگ دوم به محور باز می‌گردد. بخش سوم بدنه توخالی محور است که بین رینگ‌ها قرار می‌گیرد. محور از یک طرف بسته شده تا سیال در انتهای حلقه برودتی از فضای توخالی بخش میانی به سیستم سردکننده باز گردد. این میسر در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است. بخش چهارم نیز قسمتی است که محور از طریق آن به بار متصل می‌گردد. این بخش از روتور یکپارچه و تو پر بوده و با توجه به استحکام مکانیکی ماده سازنده می‌تواند سایز متفاوتی با آنچه در شکل نشان داده شده داشته باشد. شکل ۵-۱۳ روتور موتور ابرسانای طراحی شده را پس از نصب کامل ساختار سردکننده بطور شماتیک نشان می‌دهد. در این شکل مسیر جریان سیال سردکننده به موتور را نیز به تصویر کشیده شده است. اکنون این ساختار قادر است به سیستم سردکننده مرتبط شود. همانگونه که می‌دانیم روتور توسط دمپر مغناطیسی پوشانیده و با لایه‌های عایق حرارتی مناسب عایق سازی می‌شوند.

بنابراین پروسه سردسازی روتور بدون مشکل انجام خواهد شد. شکل ۵-۱۴ جزئیات بیشتری از سیستم سردکننده و ساختار سردکننده را به نمایش می‌گذارد.



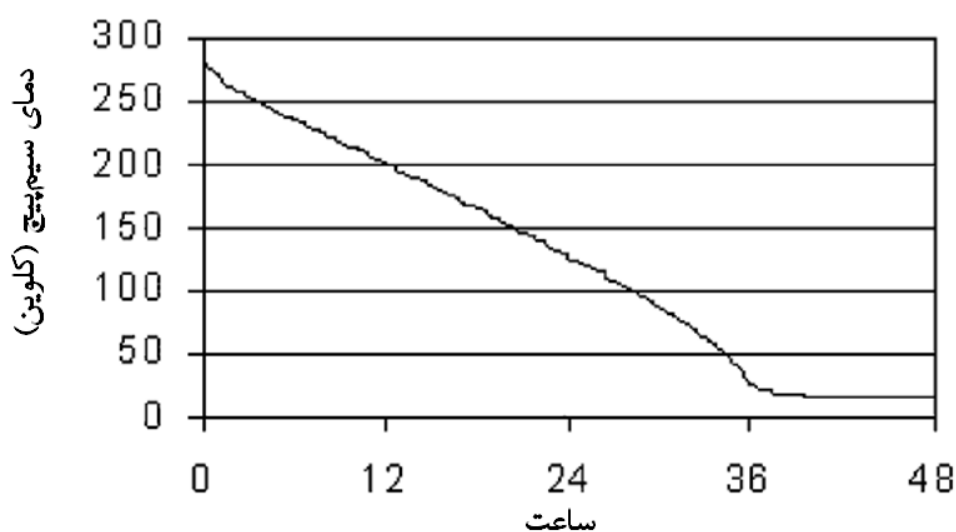
شکل ۵-۱۳- ساختار سردکننده نصب شده روی روتور



شکل ۵-۱۴- سیستم سردکننده تکفازی

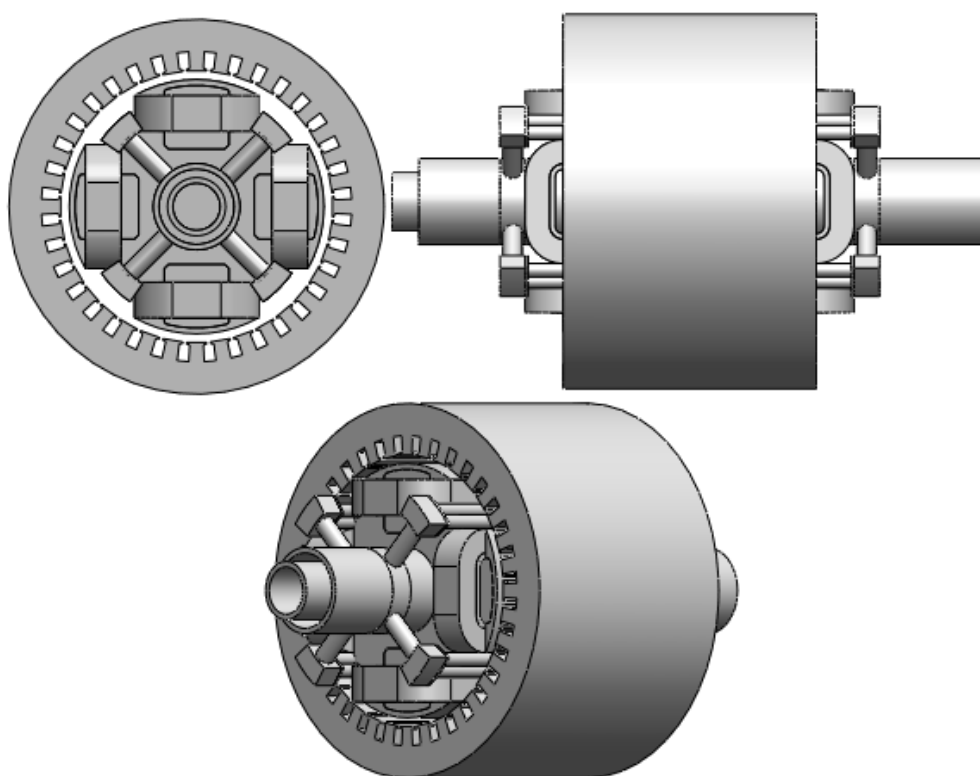
شکل ۵-۱۴ ساختار سیستم سردکننده تکفازی را نشان می‌دهد. همانگونه که نشان داده شده است سیستم سردکننده اصلی شامل تانک اصلی، کنترلرها و سردکننده فرعی می‌باشد. در صورتی که در طی مدت عملکرد نیاز باشد میزان بیشتری سردکننده به حلقه برودتی موتور فرستاده شود یا برعکس نیاز کمتری به سیال سردکننده در حلقه برودتی احساس شود، سیال سردکننده از تانک به حلقه برودتی و یا برعکس از سیال اضافی از حلقه برودتی به تانک فرستاده می‌شود. کنترلرها نقش نظارت بر سیال برودتی و دمای کار عادی موتور را بر عهده دارند. سردکننده فرعی نیز دمای سیال را در هر حلقه چرخشی به زیر دمای بحرانی کاهش داده و بار دیگر به درون موتور پمپ می‌کند.

البته باید دقت شود فرآیند سردسازی روتور حتی با ایجاد محفظه سرد که محیط گرم استاتور را از محیط سرد روتور جدا می‌کند، بسیار کند صورت می‌گیرد و به نوع سیستم سردکننده بکار رفته بستگی ندارد. برای مثال برای یک موتور ابرسانای چهار قطبی از یک سیستم متداول سردکننده استفاده شده و نتایج بیانگر این واقعیت است که حدود ۳۶ ساعت زمان لازم است تا دمای سیم‌پیچ‌های ابرسانا درون محفظه سرد به حدود ۵۰ درجه کلوین برسد. سیستم سردکننده موتور پس از رسیدن به دمای مطلوب توسط کنترلرها دمای محفظه سرد را ثابت نگه خواهند داشت. شکل ۵-۱۵ نتایج زمانی سردسازی را نشان می‌دهد [۳۲].



شکل ۵-۱۵- زمان مورد نیاز برای سرد سازی سیم‌پیچ توسط یک سردکننده متداول

به این ترتیب موتور ابررسانا کامل می‌گردد. طی این فصل و فصل گذشته یک طرح جدید موتور سنکرون با سیم‌پیچ‌های میدان ابررسانا طراحی و ساختار آن معرفی شد. تغذیه ابررسانا توضیح داده شده و در نهایت یک ساختار مناسب به عنوان ساختار سرد کننده آن ارائه شد. اکنون طرح کامل شده و مشخصات آن معرفی شده است. نتیجه نهایی کار در شکل ۵-۱۵ نشان داده شده است. در این طرح به منظور دیده شدن اجزاء دمپر استوانه‌ای در فاصله هوایی نشان داده نشده است.



شکل ۵-۱۶- شمای نهایی موتور



# فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

تاکنون ویژگی‌های مفید زیادی در ارتباط با بکارگیری ابررساناها در موتورهای الکتریکی گزارش شده است. از آنجا که در فاز ابررسانایی ابررساناها مقاومت الکتریکی در مقابل عبور جریان مستقیم از خود نشان نمی‌دهند ضمن کاهش تلفات مسی موتور باعث افزایش بازده می‌شوند. ابررساناها محدودیت‌های نامطلوبی نیز دارند. از جمله محدودیت‌های فرکانسی ابررساناهای فعلی که مانع از استفاده اجرایی از ابررساناها در کاربردهای جریان متناوب شده است چرا که ابررساناهای امروزی در مقابل عبور جریان متناوب مقاومت صفر از خود بروز نمی‌دهند. بلکه با افزایش فرکانس اعمال شده مقاومت ابررسانا نیز بالا رفته و تلفات نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در شرایط فعلی عملی‌ترین کاربرد ابررسانا در کاربردهای جریان مستقیم می‌باشد.

در این کار یک موتور سنکرون با سیم‌پیچ میدان ابررسانا طراحی و پارامترهای آن مشخص گردید. تاکنون نمونه‌هایی از انواع موتورهای ابررسانا طراحی و در موارد نادری ساخته شده‌اند. هم‌اکنون هزینه خرید ابررسانا بسیار زیاد است. بنابراین ساخت نمونه‌های طراحی شده نیاز به سرمایه‌گذاری کلانی دارد. زمینس به عنوان یک شرکت پیشگام تاکنون نمونه‌هایی از موتورهای سنکرون ابررسانا را طراحی کرده و به مرحله اجرا رسانیده است. البته هیچگونه جزئیاتی از این موتورها منتشر نشده است. در مجامع آکادمیک نیز به صورت محدود در این زمینه تحقیقاتی صورت پذیرفته است.

با توجه به این موارد در این کار سعی شده تا با بکارگیری ابررسانا طرح جدیدی از موتورهای صنعتی ابررسانا ارائه شود. اصولاً بازدهی بالای موتورهای ابررسانا بطور خاص نظر کاربران صنایع حمل و نقل را جلب کرده است. اما نکته مهم اینجاست که می‌توان با بکارگیری ابررسانا در کنار بازدهی بالاتر ویژگی‌های مثبت دیگری را نیز بدست آورد یا خیر. برای مثال کاهش وزن موتور نیز با بکارگیری ابررسانا امکان‌پذیر می‌باشد. استفاده از موتورهای سبکتر تأثیر بسیار زیادی بر بهبود عملکرد سیستم‌های رانشی خواهد داشت. بنابراین به عنوان یک ایده موتور سنکرون با سیم‌پیچ ابررسانای میدانی طراحی شده که نیمی از حجم روتور آهنی با مواد غیرمغناطیسی ولی سبک جایگزین شده است. همانگونه که قبلاً اشاره شد، مواد غیرمغناطیسی در شرایط مغناطیسی رفتاری مشابه هوا از خود

بروز می‌دهند. عدم وجود مقاومت الکتریکی سیم‌پیچ میدان در شرایط جریان مستقیم امکان تأمین آمپر دور بسیار بالای مورد نیاز موتور را فراهم می‌آورد.

بکارگیری مواد غیر مغناطیسی در این مدل چهار قطب و ۱/۱ مگاواتی، در نهایت وزن موتور را با احتساب وزن ماده غیرمغناطیس حدوداً ۱۷۰ کیلوگرم نسبت به وزن موتور ابرسانای تمام آهنی مشابه کاهش داده است. از طرفی بازده یک موتور سنکرون غیر ابرسانا در این رنج توان در بهترین حالت عملکرد حدود ۹۵ درصد می‌باشد. موتور ابرسانای طراحی شده، در کنار وزن کمتر بازدهی بالاتر از ۹۷ درصد دارد. اما ویژگی‌های مثبت به اینجا ختم نشده و موتور طراحی شده با چگالی شار فاصله هوایی بالا چگالی انرژی بسیار بالاتری نسبت به انواع غیر ابرسانا و حتی ابرسانای دیگر دارد. موتور پس از طراحی توسط آنالیز المان محدود مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج حاصل ارائه شده است. برای مثال خاصیت ابرسانایی توسط روش المان حدود بررسی شده است. موتور در بی‌باری و بارداری آنالیز اجزاء محدود شده و نتایج حاصل حداکثر چگالی شار اعمال شده بر سیم‌پیچ‌های ابرسانا را ۰/۸ تسلا نشان داده است. با توجه به مشخصات ابرسانای بکار رفته با توجه به جریان و حداکثر میدان محاسبه شده سیم‌پیچ‌های ابرسانا در دمای ۶۵ کلوین خاصیت ابرسانایی را حفظ خواهند کرد. در موتورهای معمول ابرسانا با هسته آهنی چگالی شار اعمال شده بر سیم‌پیچ از ۰/۵ تسلا تجاوز نمی‌کند اما در این موتور بدلیل چگالی شار بالای فاصله هوایی این میزان به ۰/۷ تسلا در بی‌باری و ۰/۸ تسلا در حالت بار کامل رسیده است که خود نیازمند دمای پایین‌تری می‌باشد. موتورهای ابرسانای معمول به منظور عملکرد مناسب باید تا ۷۷ درجه کلوین سرد شوند. اما با توجه به اینکه سیستم سردکننده تنها به میزان بسیار کمی توان اضافی برای تأمین دمای کاری ۶۵ کلوین در مقایسه با ۷۷ کلوین نیاز دارد این امر به هیچ عنوان یک ویژگی منفی به حساب نمی‌آید.

در طی فصل چهارم یک ماده مغناطیسی بنام وکوفلاکس ۵۰ معرفی شد. این ماده از فولاد معمول که در طرح اولیه بکار رفته گران‌تر و تا حدودی سنگین‌تر می‌باشد. در گام بعدی وکوفلاکس ۵۰ در ساختار مدل بمنظور مقایسه عملکرد آن با مدل فولادی اولیه استفاده شد. تمامی نتایج بیانگر آن

است بکارگیری وکوفلاکس ۵۰ بازدهی موتور را به میزان چشم‌گیری افزایش می‌دهد. البته حتی در صورتی که تمام استاتور، به عنوان قطب تلفات در موتور، از وکوفلاکس ساخته شود تنها ۶ کیلوگرم به وزن موتور اضافه می‌شود که بازهم به مقدار ۱۵۰ کیلوگرم از وزن مدل تمام آهنی سبکتر می‌باشد. اما بازدهی موتور بیش از یک درصد افزایش یافته که بسیار مطلوب خواهد بود. بنابراین بکارگیری این ماده بجای فولاد در استاتور می‌تواند نتایج مطلوب این طرح را بشدت افزایش دهد. البته از آنجا که هزینه بالایی باید برای ابررسانای بکار رفته هزینه شود پرداخت کمی هزینه بیشتر برای بهبود چشم‌گیر بازده زیاد دور از ذهن نمی‌باشد. معمولاً شرکت‌های سازنده موتورهای ابررسانا از فولاد معمول (سیلیکون) استفاده نمی‌کنند. تلاش آنها بر این است که با بکارگیری مواد جدید و کمتر شناخته شده که ویژگی‌های مغناطیسی و غیرمغناطیسی بهتری از جمله میزان وات بر کیلوگرم کمتر نسبت به انواع معمول دارند، موتورهایی با کارایی بالاتر تولید کنند. بکارگیری این مواد تلفات آهنی را تا حد امکان کاهش داده و بازده افزایش می‌یابد. اما از آنجا که هنوز این نسل جدید از موتورها به بازارهای جهانی راه نیافته‌اند، مشخصات این موتورها و مواد مورد استفاده همچنان به عنوان یک راز در مراکز بزرگ تحقیقاتی باقی مانده است.

- [1]- <http://fa.wikipedia.org/wiki>
- [2]- <http://www.superconductors.org/History.html>
- [3]-R. Hott, R.Kleiner, T. Wolf, G. Zwicknagl, "Superconductive material, a topical overview", Springer, Verlag, Berlin, 2004.
- [4]-J.F. Gieras, Advancements in electric machines, Springer, Dordrecht–Boston–London, 2008.
- [5]-<http://www.superconductors.org/Type1.html>
- [6]-<http://www.superconductors.org/Type2.html>
- [7]-I. Dobrin, Alexandru M. morega, Mihail Popescu, "The Development of a small power, High temperature superconductor (HTS) Synchronous motor", Annals of the University of Croatia, Electrical Engineering series, No. 34, 2010.
- [8]-S. Il Han, Itsuya Muta, Tsutomu Hoshino, and Taketsune Nakamura, "An Approach of Optimal Design of HTS Synchronous Motor Using Genetic Algorithm", IEEE Transaction On Applied Superconductivity, vol. 14, No.2, June 2004.
- [9]-Maitham K. Al-Mosawi, C. Beduz, and Y. Yang, "Construction of a 100 kVA High Temperature Superconducting Synchronous Generator", IEEE Transaction On Applied Superconductivity, vol. 15, No. 2, June 2005.
- [10]- S. K. Baik, M. H. Sohn, E. Y. Lee, Y. K. Kwon, Y. S. Jo, T. S. Moon, H. J. Park, and Y. C. Kim, "Design Considerations for 1 MW Class HTS Synchronous Motor", IEEE Transaction On Applied Superconductivity, vol. 15, No.2, June 2005.
- [11]-K Umemoto, K Aizawa, M Yokoyama, K Yoshikawa, Y Kimura, M Izumi, K Ohashi, M Numano, K Okumura, M Yamaguchi, Y Gocho and E Kosuge, "Development of 1 MW-class HTS motor for podded ship propulsion system", 9th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 09), Journal of Physics: Conference Series 234(2010) 032060.
- [12]-Swarn S. Kalsi, Nancy Henderson and John Voccio, "Superconductor motors for high speed ship propulsion", American Superconductor<sup>TM</sup> Corporation, Westborough, MA.
- [13]-S. Lee et al., "Test Results of a Three Phase HTS Transformer with Double Pan Cake Windings", IEEE trans. Appl. Superconductivity, Vol. 12, No 1, March 2002.
- [14]-J. Xun Jin, L. H. Zheng, Y. G. Guo and Jian Guo Zhu, "Development of High Temperature Superconducting Machines", Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics Vol.15, Supplement (2007).

[15]-P. J. Masson, J. E. Pienkos, and Cesar A. Luongo, *Member, IEEE*, "Scaling Up of HTS Motor Based on Trapped Flux and Flux Concentration for Large Aircraft Propulsion", *IEEE transaction on Applied Superconductivity*, Vol. 17, No. 2, June 2007.

[16]-L. Hail Zheng, et al, "Technical and Theoretical Analysis of HTS Machines and Their Development", *Nature Sciences*, Vol. 1, No. 1, PP. 33-41, December 2006.

[17]-Y. K. Kwon, et al, "Performance test of a 1 MW class HTS synchronous motor for industrial application", *Physica C*, 468 (2008) 2081–2086.

[18]-N. Mijatovic, et al, "Coil Optimization for High Temperature Superconductor Machines", 2010 IEEE, to be published.

[19]-Y. Jiang, et al, "Design of an HTS motor", 8<sup>th</sup> European conference on applied superconductivity (EUCAS 2007).

[20]-K. F. Goddard, et al, "Alternative Designs of High-Temperature Superconducting Synchronous Generators" *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, NO. 6, December 2009.

[21]-R. Schiferl et al, "High-Temperature Superconducting Synchronous Motors: Economic Issues for Industrial Applications", *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 44, NO. 5, September 2008.

[22]-R. Cazzaniga, N. Valle, C. D. Urzo, "Winding machines for the manufacturing of superconductive coils of the main European fusion research machines", *Fusion Engineering and Design* 75–79 (2005) 7–10.

[23]-L. Liyi Member IEEE, Cao Jiwei, Kou Baoquan Member IEEE, Zhengnan Han, Chen Qingquan Fellow, "Design of the HTS permanent magnet motor with superconducting armature winding", IEEE 2011 to be published.

[24]-B. Oswald, K - J Best, et al, "AC Application of HTS Conductors in Highly Dynamic Electric Motors", *Journal of Physics: Conference Series* 43(2006) 800–803.

[25]-H. Man Jang, et al, "Design and Electrical Characteristics Analysis of 100 HP HTS Synchronous Motor in 21<sup>st</sup> Century Frontier Project, Korea", *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol.13, NO. 2, June 2003.

[26]-R. A. El-Sehiemy and M. I. Abd-Elwanis and A. B. kotb and M. Elwany, "Synchronous Motor Design using Particle Swarm Optimization Technique", 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10), Cairo University, Egypt, December 19-21, 2010.

[۲۷]- دکتر احمد دارابی، "طراحی ماشین‌های الکتریکی، جزوه در سی"، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۸۳.

[28]-X. Li, Y. Zhou, L. Han, D. Zhang, J. Zhang, Q. Qiu, Shaotao Dai, Z. Zhang, D. Xia, G. Zhang, L. Lin, L. Xiao, S. Zhu, H. Bai, B. Bian, S. Li, and W. Gao, "Design of a High Temperature Superconducting Generator for Wind Power Applications", *IEEE Transaction On Applied Superconductivity*, vol.21. NO. 3, June 2011.

- [29]-A. B. Abrahamsen, N. Mijatovic, E. Seiler, M. P. Sørensen, M. Koch, P. B. Nørgård, N. F. Pedersen, C. Træholt, N. H. Andersen, and J. Østergård, "Design Study of 10 kW Superconducting Generator for Wind Turbine Applications", *IEEE Transaction On Applied Superconductivity*, vol,19. NO. 3, June 2009.
- [30]-H. M. Kim, Y. S. Yoon, Y. K. Kwon, Y. C. Kim, S. H. Lee, J. P. Hong, J. B. Song, and H. G. Lee, "Design of Damper to Protect the Field Coil of an HTS Synchronous Motor", *IEEE Transaction On Applied Superconductivity*, vol,19. NO. 3, June 2009.
- [31]-S.K. Baik , Y.K. Kwona, H.M. Kim, S.H. Kim, J.D. Lee, Y.C. Kim, H.J. Park, W.S. Kwonb, G.S. Park, " Electrical parameter evaluation of a 1 MW HTS motor via analysis and experiments", *Cryogenics* 49 (2009) 271–276.
- [32]-J. D. Edrick, R. F. Schiferl, and H. E. Jordan, "High temperature superconductivity applied to electric motors," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, Vol. 2, No. 4, pp. 189–195, December 2005.
- [33]-Y. Soo Yoon, S. Eun Yang, D. Ho Cho, Y. Sik Kim, M. Cheol Ahn, H. Min Kim, and T. Kuk Ko, "Design and Test of a Superconducting Power Supply With YBCO Coated Conductor Load", *IEEE Transaction On Applied Superconductivity*, vol,18. NO. 2, June 2008.
- [34]-[www.lakeshore.com](http://www.lakeshore.com)
- [35]-M. Frank, J. Fraunhofer, B. Gromoll, B. van. HaBelt, W. Nick, and G. Nerowskietal., "Thermosyphon cooling system for the Siemens 400kW HTS synchronous machines," in *Proc. Advance in Cryogenic Engineering: Transaction of the Cryogenic Engineering Conference, CEC*, Vol. 49, pp. 859–866, 2004.
- [36]-F. Song, D. Ewing, and C. Y. Ching, "Fluid flow and heat transfer model for high-speed rotating heat pipes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 4393–4401, 2003.
- [37]-W. Bailey, H. Wen, M. Al-Mosawi, K. Goddard, and Y. Yang, "Testing of a Light weight Coreless HTS Synchronous Generator Cooled by Subcooled Liquid Nitrogen", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 21, No. 3, June 2011.
- [38]-J. B. Na, H. Kang, Y. J. Hwang, S. E. Yang, D. K. Park, D. K. Bae, and T. K. Ko, "Experimental Study on the Electrical Breakdown Characteristics of Sub-Cooled Liquid Nitrogen for Designing a High Voltage Superconducting Machine", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 20, No. 3, June 2010.

**Abstract:**

Today high temperature superconductive (HTS) tapes have taken sufficient potential to penetrate electrical machines markets due to their fascinating electrical properties. In order to zero electric losses in HTS windings, it is possible to reduce motor's total weight by using tenacious non-magnetic materials. In comparison by heavy magnetic materials such as steel, non-magnetic materials are so light. Here a new structure for 1.1Mw industrial HTS synchronous motor was introduced, numerical FEM analysis was performed on and its main specifications were obtained. Unlike air-cored HTS synchronous motors, in compound model large amount of heavy iron used in rotor construction was replaced with light non-magnetic materials such as G-10 fiberglass. This, reduced rotor weight up to 50% in comparison by similar completely iron made one. Furthermore, even for non-improved model, rotor bearings sustain less pressure and their working stability would be increased besides total weight reduction in over 97% efficiency condition respectively.

**Keywords:** Synchronous motor, compound rotor, high temperature superconductive (HTS) windings, finite element.





*Shahrood University of Technology*

Faculty of Electrical and Robotic Engineering

Title:

**Design of a Multy Phase Synchronous Motor with  
High Temperature Superconductive Field  
Windings**

By:

Mehdi Kashani

Supervisor:

Dr. Ahmad Darabi

Associate Supervisor:

Ahmad Maddadi

February 2013