

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک  
گروه برق - قدرت

## بررسی پدیده مغناطیس زدایی در دو نوع ماشین

### مغناطیس دائم شار محوری و شار متقاطع

دانشجو : نوشین بهادر

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر احمد دارابی

استاد مشاور:

جناب آقای دکتر حسن حسن آبادی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ماه ۱۳۹۲

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم به  
خاطر زحمات بی‌دریغشان:

ره‌آوردی گران‌سنگ‌تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم. باشد که حاصل تلاشم نسیم  
گونه، غبار خستگی‌تان را بزدايد.

بوسه بر دستان پرمهرتان

## تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم تا از راهنمایی‌های ارزشمند استاد ارجمند جناب آقای دکتر دارابی عمیقاً تشکر نمایم. بی‌شک اتمام این پایان‌نامه بدون زحمات دلسوزانه ایشان امکان‌پذیر نبود. همچنین از زحمات و راهنمایی‌های استاد گرانقدر جناب آقای دکتر حسن آبادی که همکاری و مساعدت لازم را مبذول داشتند کمال تشکر را دارم.

## تعهد نامه

اینجانب نوشین بهادر دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق - قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **بررسی پدیده مغناطیس زدایی در دو نوع ماشین AFPM و TFPM تحت راهنمایی دکتر احمد دارابی** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده 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 بدست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار 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 بافتهای 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: ۱۳۹۲/۶/۱۷

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

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

## چکیده

استفاده از مغناطیس‌های دائم در ماشین‌های الکتریکی، سبب حذف تلفات اهمی بخش تحریک ماشین و به دنبال آن افزایش راندمان می‌گردد. از سوی دیگر استفاده از PMها نه تنها ساختار ماشین را ساده و مستحکم می‌نماید وزن و حجم ماشین را کاهش و در نتیجه نسبت توان (گشتاور) به وزن (حجم) ماشین را افزایش می‌دهد. به هر حال از آن جهت که مغناطیس‌های دائم نقش اساسی در ساختار ماشین دارند، کوچکترین تغییر در مشخصه مغناطیسی آنها، احتمال بروز اختلال در عملکرد ماشین را به دنبال خواهد داشت. یکی از پدیده‌هایی که خواص PM را تغییر می‌دهد، پدیده مغناطیس‌زدایی است. این پدیده، وابسته به شدت و ضعف آن، با تغییر دامنه و شکل موج ولتاژ القایی، مشخصه عملکردی ماشین را تغییر خواهد داد. با وجود اهمیت بسیار زیاد این مساله، طراحی ماشین‌های PM همچنان بدون در نظر گرفتن این پدیده و تاثیرات آن انجام می‌گیرد. در این پایان‌نامه، تکنیک طراحی و مدلسازی کلاسیک ماشین‌های مغناطیس دائم با منظور کردن پدیده مغناطیس‌زدایی اصلاح و الگوریتم پیشنهادی روی یک موتور مغناطیس دائم شار محوری نمونه پیاده سازی شده است. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی نشان می‌دهند چنانچه طراحی و مدلسازی بر مبنای روش کلاسیک انجام شود، مشخصه‌های عملکردی بدست آمده برای ماشین همراه با خطا خواهد بود، به گونه‌ای که شاید ماشین خواسته‌های عملکردی مورد انتظار را نتواند به درستی برآورده نماید. علاوه بر این، نتایج این گزارش نشان می‌دهند زمانی که امکان محدود نمودن جریان آرمیچر وجود ندارد، استفاده از دمپر در ساختار موتور شار محوری در رژیم گذرایی می‌تواند تا حد قابل توجهی از شدت بروز این پدیده بکاهد. علاوه بر این نشان داده می‌شود که می‌توان بجای صرف هزینه و وقت جهت اصلاح ساختار ماشین‌هایی نظیر موتور مغناطیس دائم شار محوری، از ماشین‌های PM دیگر با قدرت یکسان و کاربری مشابه که احتمال بروز این پدیده در آنها بسیار کمتر است استفاده کرد. موتور قطب چنگالی بررسی شده در این پایان‌نامه یکی از انواع ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع با ساختاری مقاوم در برابر مغناطیس‌زدایی است، که می‌تواند جایگزین مناسبی برای ماشین‌های شار محوری باشد.

**کلمات کلیدی:** پدیده مغناطیس‌زدایی، ماشین‌های مغناطیس دائم، شار محوری، شار متقاطع

## مقالات مستخرج از پایان نامه

مقالات چاپ شده در مجلات معتبر:

[1] Bahador N, Darabi A, Nikkoo M, “**Dynamic Braking Optimization for Reducing Demagnetization Phenomenon during Fast Stopping in AFPM Motor**”, JEE, Romania, 2013.

مقالات چاپ شده در کنفرانس‌های بین‌المللی:

[2] Bahador N, Darabi A, Hasanabadi H, “**Demagnetization Analysis of Axial Flux Permanent Magnet Motor under Three Phase Short Circuit Fault**”, PEDSTC, Tehran, Iran, 2013.

مقالات چاپ شده در کنفرانس‌های ملی:

[۳] احمد دارابی، نوشین بهادر، حسن حسن‌آبادی، "بررسی تاثیر ساختارهای مختلف دمپر در کاهش پدیده مغناطیس‌زدایی در موتور مغناطیس دائم شار محوری تحت شرایط اتصال کوتاه سه فاز"، کنفرانس ملی مهندسی سیستم‌های قدرت، ملایر، ایران، ۱۳۹۲.

## فهرست مطالب

فصل اول - مقدمه	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ مواد مغناطیس دائم	۷
۱-۲-۱ پارامترهای مهم یک مغناطیس دائم	۷
۲-۲-۱ دسته‌بندی مواد مغناطیس دائم	۸
۳-۲-۱ روش‌های ساخت مواد مغناطیس دائم	۱۱
۴-۲-۱ منحنی مغناطیس‌زدایی مواد مغناطیس دائم	۱۳
۳-۱ پدیده مغناطیس‌زدایی	۱۴
۴-۱ جمع‌بندی فصل	۱۶
فصل دوم - سابقه پژوهشی موضوع پایان‌نامه	۱۷
۱-۲ مقدمه	۱۸
۲-۲ تعیین محدوده بروز مغناطیس‌زدایی در ماشین‌های الکتریکی	۱۸
۳-۲ بررسی پدیده مغناطیس‌زدایی به روش تحلیلی	۱۹
۴-۲ روش‌های ریاضی برای توصیف رفتار بازگشتی ماده NdFeB	۲۱
۱-۴-۲ مدل خطی	۲۲
۲-۴-۲ مدل چندجمله‌ای	۲۳
۵-۲ خطای اتصال کوتاه و پدیده مغناطیس‌زدایی	۲۶
۶-۲ مطالعه تاثیر پدیده مغناطیس‌زدایی بر روی مشخصه‌های ماشین	۲۷



۷-۲	راه کارهای ارائه شده جهت کاهش احتمال بروز پدیده مغناطیس زدایی.....	۲۹
۸-۲	جمع بندی فصل.....	۳۶
<b>فصل سوم - معرفی ماشین مغناطیس دائم شار محوری نمونه .....</b>		
۱-۳	مقدمه .....	۳۸
۲-۳	ساختار موتور مغناطیس دائم شار محوری.....	۳۸
۳-۳	فرآیند طراحی موتور AFPM.....	۴۰
۴-۳	موتور مغناطیس دائم شار محوری طراحی شده .....	۴۴
۵-۳	مدلسازی موتور مغناطیس دائم شار محوری طراحی شده .....	۴۷
۶-۳	جمع بندی فصل.....	۵۱
<b>فصل چهارم - اصلاح الگوریتم مدلسازی موتور مغناطیس دائم شار محوری با در نظر گرفتن پدیده مغناطیس زدایی .....</b>		
۱-۴	مقدمه .....	۵۲
۲-۴	الگوریتم طراحی و مدلسازی پیشنهادی با در نظر گرفتن مغناطیس زدایی.....	۵۴
۳-۴	پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی روی ماشین نمونه .....	۵۶
۴-۴	مقایسه نتایج بدست آمده از مدلسازی ماشین نمونه با در نظر گرفتن پدیده مغناطیس زدایی و بدون در نظر گرفتن آن.....	۶۰
۵-۴	جمع بندی فصل.....	۶۲
<b>فصل پنجم - بررسی پدیده مغناطیس زدایی در موتور مغناطیس دائم شار محوری در شرایط عملکردی خاص.....</b>		
۱-۵	مقدمه .....	۶۳
۲-۵	پدیده مغناطیس زدایی در حالت مدار باز.....	۶۴
۳-۵	پدیده مغناطیس زدایی در شرایط اتصال کوتاه سه فاز.....	۶۴

۷۱.....	تغییرات شدت مغناطیس‌زدایی به ازای بارگذاری‌های	۴-۵
۷۱.....	خارج کردن روتور از استاتور و تاثیر آن بر روی مغناطیس‌های دائم	۵-۵
۷۲.....	بررسی ساختارهای مختلف دمپر و عملکرد آن‌ها در کاهش پدیده مغناطیس‌زدایی	۶-۵
۷۲.....	ساختار شماره ۱	۱-۶-۵
۷۴.....	ساختار شماره ۲	۲-۶-۵
۷۶.....	ساختار شماره ۳	۳-۶-۵
۷۷.....	تعیین مقاومت اتصال کوتاه بهینه در زمان توقف اضطراری با در نظر گرفتن پدیده مغناطیس‌زدایی	۷-۵
۸۱.....	جمع‌بندی فصل	۸-۵
<b>فصل ششم - بررسی پدیده مغناطیس‌زدایی در موتور مغناطیس دائم شار متقاطع</b>		
۸۲.....	<b>قطب چنگالی</b>	
۸۳.....	مقدمه	۱-۶
۸۳.....	موتور مغناطیس دائم شار متقاطع	۲-۶
۸۴.....	موتور مغناطیس دائم شار متقاطع طراحی شده	۳-۶
۸۷.....	نتایج بدست آمده از تحلیل مغناطیس‌زدایی	۴-۶
۸۹.....	پدیده مغناطیس‌زدایی در حالت مدار باز	۱-۴-۶
۹۰.....	پدیده مغناطیس‌زدایی در حالت بی‌باری	۲-۴-۶
۹۱.....	پدیده مغناطیس‌زدایی در حالت بار کامل	۳-۴-۶
۹۳.....	پدیده مغناطیس‌زدایی در حالت روتور قفل شده	۴-۴-۶
۹۵.....	خارج کردن روتور از استاتور و تاثیر آن بر روی مغناطیس‌های دائم	۵-۴-۶
۹۶.....	جمع‌بندی فصل	۵-۶

۹۷.....	فصل هفتم - نتیجه گیری و پیشنهادات
۹۸.....	۱-۷. نتیجه گیری
۹۹.....	۲-۷. نوآوری های کار انجام شده
۹۹.....	۳-۷. پیشنهاداتی جهت تکمیل و ادامه کار
۱۰۱.....	مراجع

## فهرست جداول و شکل‌ها

- شکل ۱-۱: یک ماده پارامغناطیس در غیاب میدان مغناطیسی خارجی..... ۳
- شکل ۲-۱: یک ماده پارامغناطیس در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی قوی..... ۴
- شکل ۳-۱: یک ماده فرومغناطیسی در غیاب میدان مغناطیسی خارجی..... ۵
- شکل ۴-۱: یک ماده فرومغناطیسی در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی قوی..... ۵
- شکل ۵-۱: یک حوزه‌ی مربوط به ماده پادفرومغناطیس. در مواد پاد فرومغناطیس برآیند گشتاورهای مغناطیسی در هر شبکه صفر است..... ۶
- شکل ۶-۱: یک حوزه‌ی مغناطیسی مربوط به ماده‌ی فری مغناطیس. در مواد فری مغناطیس برآیند گشتاورهای مغناطیسی در هر شبکه مخالف صفر است..... ۶
- شکل ۷-۱: اعمال فشار و میدان در مغناطیس دائم..... ۱۲
- شکل ۸-۱: منحنی مغناطش (یا چرخه‌ی پسماند) یک ماده‌ی فرو یا فری مغناطیس..... ۱۴
- شکل ۹-۱: تغییرات نقطه‌کار PM تحت تاثیر یک میدان مغناطیسی مخالف..... ۱۵
- شکل ۱۰-۱: حلقه‌های بازگشتی..... ۱۶
- شکل ۱۱-۱: منحنی بازگشت..... ۱۶
- جدول ۱-۱: مقایسه مواد مغناطیس دائم..... ۱۰
- شکل ۱-۲: مثالی از خط‌کار و نقطه‌کار روی منحنی B-H ماده Neorem 576a..... ۲۰
- شکل ۲-۲: مثالی از چگونگی مغناطیس‌زدایی ناشی از دمای زیاد..... ۲۱
- شکل ۳-۲: مثالی از چگونگی مغناطیس‌زدایی ناشی از عبور جریان زیاد..... ۲۲
- شکل ۴-۲: مدل خطی منحنی بازگشت..... ۲۳
- شکل ۵-۲: مدل چندجمله‌ای منحنی بازگشتی..... ۲۳
- شکل ۶-۲: ضرایب چندجمله‌ای به ازای درصدهای مختلف مغناطیس‌زدایی..... ۲۴
- شکل ۷-۲: درصد مغناطیس‌زدایی..... ۲۴

- شکل ۲-۸: مثال‌هایی از مدل چندجمله‌ای و خطی منحنی بازگشتی به ازای درصدهای مختلف مغناطیس‌زدایی..... ۲۵
- شکل ۲-۹: ساختار LSPM تکفاز..... ۲۷
- شکل ۲-۱۰: شکل موج Back EMF قبل و بعد از مغناطیس‌زدایی..... ۲۸
- شکل ۲-۱۱: شکل موج چگالی شار فاصله هوایی قبل و بعد از مغناطیس‌زدایی..... ۲۸
- شکل ۲-۱۲: شکل موج Back EMF مدل اصلاح شده پس از اتصال کوتاه شدن سیم‌پیچ استاتور..... ۲۹
- شکل ۲-۱۳: پارامترهای طراحی انتخابی جهت اصلاح ساختار روتور..... ۳۰
- شکل ۲-۱۴: شدت میدان مغناطیسی خارجی در ساختار اولیه در مقایسه با ساختار اصلاح شده..... ۳۱
- شکل ۲-۱۵: ماشین PMA-SMs مورد بررسی..... ۳۲
- شکل ۲-۱۶: کمترین چگالی شار متوسط تولیدی توسط PM به ازای ولتاژهای مختلف در یک سیکل برای دو مگنت دوزنقه‌ای شکل و مستطیل شکل..... ۳۲
- شکل ۲-۱۷: مدل‌های روتور ماشین مورد بررسی با میله‌های دمپر اضافی..... ۳۳
- شکل ۲-۱۸: کمترین نقطه کار PM در ۴ مدل بررسی شده..... ۳۳
- شکل ۲-۱۹: ماشین شار معکوس..... ۳۴
- شکل ۲-۲۰: تاثیر تغییر پهناي دندانها در توزیع مغناطش در PMها..... ۳۵
- شکل ۲-۲۱: تاثیر تغییر ضخامت PMها در توزیع مغناطش..... ۳۵
- شکل ۳-۱: طرح ساختار یک موتور TORUS-NS..... ۴۰
- شکل ۳-۲: ابعاد اساسی ماشین طراحی شده (ابعاد بر حسب متر)..... ۴۷
- شکل ۳-۳: فلوچارت مراحل انجام تحلیل مغناطیسی..... ۴۸
- شکل ۳-۴: مدل‌سازی تنها یک جفت قطب از یک لایه موتور AFPM در نرم‌افزار JMAG..... ۴۹
- شکل ۳-۵: مش‌بندی انجام شده روی یک جفت قطب از موتور AFPM مورد بررسی..... ۵۰
- شکل ۳-۶: توزیع چگالی شار مغناطیسی زیر یک قطب در حالت جریان صفر استاتور..... ۵۱
- جدول ۳-۱: مشخصات نامی داده شده برای ماشین مورد طراحی..... ۴۴

- جدول ۳-۲: پارامترها و ابعاد ماشین طراحی شده ..... ۴۵
- شکل ۴-۱: منحنی مغناطیس‌زدایی ..... ۵۴
- شکل ۴-۲: الگوریتم طراحی و مدلسازی پیشنهادی ..... ۵۶
- شکل ۴-۳: جریان هر یک از فازهای استاتور در بار کامل ..... ۵۷
- شکل ۴-۴: توزیع چگالی شار مگنت در بار کامل ..... ۵۸
- شکل ۴-۵: منحنی مغناطیس‌زدایی NEOMAX-42 ( $100^{\circ}\text{C}$ ) ..... ۵۹
- شکل ۴-۶: تحلیل مغناطیس‌زدایی ..... ۵۹
- شکل ۴-۷: توزیع چگالی شار مغناطیسی در امتداد خط میانی فاصله هوایی ..... ۶۱
- جدول ۴-۱: مقایسه نتایج بدست آمده از روش مدلسازی تکراری با روش مدلسازی معمول ..... ۶۱
- جدول ۴-۲: مقدار ضریب توان در بار نامی ..... ۶۲
- شکل ۵-۱: توزیع چگالی شار مگنت در حالت مدار باز ..... ۶۵
- شکل ۵-۲: شتاب‌گیری منفی موتور AFPM در هنگام قطع شدن از تغذیه ..... ۶۵
- شکل ۵-۳: تغییرات جریان سه فاز آرمیچر ماشین‌های سنکرون در هنگام اتصال کوتاه شدن ..... ۶۷
- شکل ۵-۴: پروسه توقف اضطراری ..... ۶۸
- شکل ۵-۵: جریان‌های محاسبه شده بعد از وقوع اتصال کوتاه در سه فاز استاتور ..... ۶۹
- شکل ۵-۶: سرعت روتور ..... ۶۹
- شکل ۵-۷: توزیع چگالی شار مگنت در شرایط اتصال کوتاه سه فاز ..... ۷۰
- شکل ۵-۸: شدت مغناطیس‌زدایی ..... ۷۰
- شکل ۵-۹: تغییرات مغناطیس‌زدایی با افزایش بار (تکرار اول) ..... ۷۱
- شکل ۵-۱۰: توزیع چگالی شار در مگنت پس از خروج روتور از محیط استاتور ..... ۷۲
- شکل ۵-۱۱: ساختار شماره ۱ ..... ۷۳
- شکل ۵-۱۲: توزیع چگالی شار در مگنت در حضور دمپر ۱ ..... ۷۴
- شکل ۵-۱۳: ساختار شماره ۲ ..... ۷۵

- شکل ۵-۱۴: توزیع چگالی شار در مگنت در حضور دمپر ۲ ..... ۷۵
- شکل ۵-۱۵: ساختار شماره ۳ ..... ۷۶
- شکل ۵-۱۶: توزیع چگالی شار در مگنت در حضور دمپر ۳ ..... ۷۷
- شکل ۵-۱۷: رابطه شدت مغناطیس‌زدایی و زمان توقف با مقدار مقاومت ..... ۷۹
- شکل ۵-۱۸: جریان‌های اتصال کوتاه سه فاز پس از افزودن مقاومت ۱.۶ پریونیت به ترمینال موتور ۸۰ ..... ۸۰
- شکل ۵-۱۹: سرعت موتور پس از افزودن مقاومت ۱.۶ پریونیت به ترمینال موتور ..... ۸۰
- جدول ۵-۱: شدت مغناطیس‌زدایی در شرایط اتصال کوتاه سه فاز در حضور دمپر ۱ ..... ۷۴
- جدول ۵-۲: شدت مغناطیس‌زدایی در شرایط اتصال کوتاه سه فاز در حضور دمپر ۲ ..... ۷۵
- جدول ۵-۳: شدت مغناطیس‌زدایی در شرایط اتصال کوتاه سه فاز در حضور دمپر ۳ ..... ۷۷
- جدول ۵-۴: شدت مغناطیس‌زدایی در شرایط اتصال کوتاه سه فاز پس از افزودن مقاومت ۱.۶ پریونیت به ترمینال موتور ..... ۸۱
- شکل ۶-۱: ساختار ماشین شار متقاطع قطب چنگالی ..... ۸۴
- شکل ۶-۲: یک جفت قطب از یک ماشین شار متقاطع قطب چنگالی ..... ۸۴
- شکل ۶-۳: جهت مغناطش PMها ..... ۸۵
- شکل ۶-۴: مسیر عبور شار مغناطیسی در موتور TFPM ..... ۸۶
- شکل ۶-۵: مدلسازی یک جفت قطب از یک لایه موتور TFPM در نرم‌افزار JMAG ..... ۸۸
- شکل ۶-۶: مش‌بندی انجام شده روی یک جفت قطب از موتور TFPM مورد بررسی ..... ۸۸
- شکل ۶-۷: توزیع چگالی شار مغناطیسی در مگنت در حالت مدار باز ..... ۸۹
- شکل ۶-۸: منحنی مغناطیس‌زدایی ماده NdFeB با چگالی شار پسماند ۱ تسلا در دمای ۱۴۰ درجه سانتیگراد ..... ۹۰
- شکل ۶-۹: جریان یک فاز استاتور در بی‌باری ..... ۹۰
- شکل ۶-۱۰: شارهای ناشی وارده به مگنت‌ها در حالت بی‌باری ..... ۹۱
- شکل ۶-۱۱: توزیع چگالی شار مغناطیسی در مگنت در حالت بی‌باری ..... ۹۱

- شکل ۶-۱۲: جریان یک فاز استاتور در بار کامل..... ۹۲
- شکل ۶-۱۳: شارهای نشتی در مگنت در حالت بار کامل..... ۹۳
- شکل ۶-۱۴: توزیع چگالی شار مغناطیسی در مگنت در حالت بار کامل..... ۹۳
- شکل ۶-۱۵: جریان محاسبه شده برای یک فاز استاتور در شرایط روتور قفل شده..... ۹۴
- شکل ۶-۱۶: شارهای نشتی در مگنت در شرایط روتور قفل شده..... ۹۵
- شکل ۶-۱۷: توزیع چگالی شار مغناطیسی در مگنت در شرایط روتور قفل شده..... ۹۵
- شکل ۶-۱۸: توزیع چگالی شار مغناطیسی در مگنت پس از خروج روتور از محیط استاتور..... ۹۶
- جدول ۶-۱: مشخصات نامی داده شده برای ماشین مورد طراحی..... ۸۵
- جدول ۶-۲: پارامترهای انتخابی و پارامترهای بدست آمده از روش اجزاء محدود..... ۸۶
- جدول ۶-۳: ابعاد هندسی ماشین طراحی شده..... ۸۷



## فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱. مقدمه

مواد در یک میدان مغناطیسی اعمالی رفتارهای مغناطیسی متفاوتی از خود بروز می‌دهند. به این ترتیب با توجه به رفتارشان به پنج دسته تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از: دیامغناطیس<sup>۱</sup>، پارامغناطیس<sup>۲</sup>، فرومغناطیس<sup>۳</sup>، پادفرومغناطیس<sup>۴</sup> و فری مغناطیس<sup>۵</sup> [۱، ۲].

به طور کلی سه عامل در منشأ مغناطیسی مواد مؤثر هستند:

الف) گشتاور اسپینی<sup>۶</sup>

ب) گشتاور مداری<sup>۷</sup> الکترون‌ها

ج) گشتاور القایی<sup>۸</sup> ناشی از میدان مغناطیسی خارجی

دو مورد اول در خاصیت پارا، فرو، پاد فرو و فری مغناطیسی مواد نقش اساسی دارند و مورد سوم در خاصیت دیامغناطیسی مواد.

۱- **دیامغناطیس:** هرگاه یک ماده در معرض یک میدان مغناطیسی خارجی قرار بگیرد برهم کنش بین الکترون‌های هر اتم و میدان مغناطیسی خارجی باعث القای یک گشتاور مغناطیسی در اتم می‌شود، این پدیده را دیامغناطیس می‌نامند. از آن جایی که همه‌ی مواد از اتم تشکیل شده‌اند، این خاصیت در همه مواد وجود دارد و ویژگی همه‌ی مواد است. اما این ساختار الکترونی اتم است که در وجود یا عدم وجود یک گشتاور مغناطیسی دائم یا غیردائم در اتم نقش دارد. اتم‌های دیامغناطیس دارای هیچ گشتاور مغناطیسی نمی‌باشند. زیرا در این اتم‌ها جمع برداری گشتاورهای مداری و

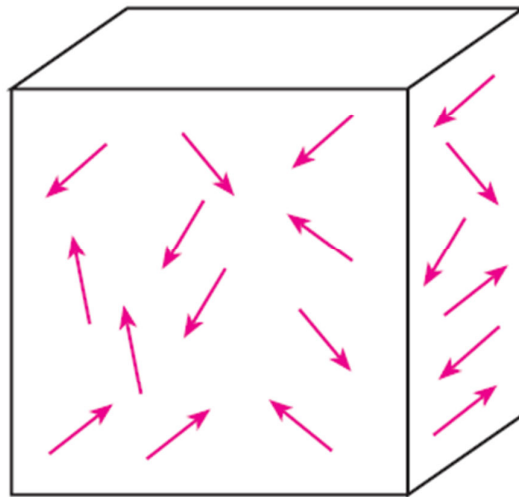
- 
- 1- Diamagnetism
  - 2- Paramagnetism
  - 3- Ferromagnetism
  - 4- Antiferromagnetism
  - 5- Ferrimagnetism
  - 6- Spinning Torque
  - 7- Orbital Torque
  - 8- Induced Torque

اسپینی صفر است. جهت گشتاورهای مغناطیسی القایی در ماده، مطابق قانون لنز، در جهتی است که با حضور میدان مغناطیسی خارجی مخالفت می‌کند. بیسموت، برلییم، متان، دیوکسید کربن، شیشه و ... چند ماده‌ی دیامغناطیس هستند.

## ۲- پارامغناطیس: مواد پارامغناطیس موادی با ویژگی‌های زیر می‌باشند:

الف) اتم‌های آن‌ها دارای یک گشتاور مغناطیسی دائم‌اند که منشأ آن همان‌طور که گفته شد گشتاور اسپینی و مداری الکترون‌هاست.

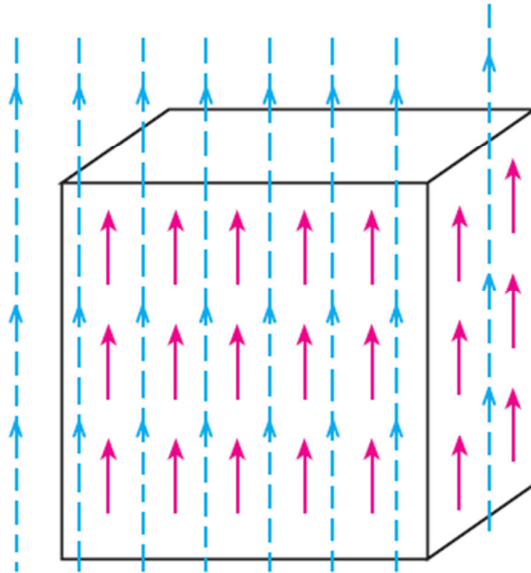
ب) در غیاب میدان مغناطیسی خارجی، جهت گشتاورهای دائمی اتم‌های آن‌ها به طور کاتوره‌ای در داخل ماده توزیع شده‌اند. زیرا نیرویی که باعث جفت‌شدگی بین این گشتاورها در داخل ماده می‌شود ضعیف است. این نیرو به نیروی تبادلی موسوم است و منشأ آن کوانتومی است.



شکل (۱-۱): یک ماده پارامغناطیس در غیاب میدان مغناطیسی خارجی [۱]

ج) اگر این مواد در معرض یک میدان مغناطیسی خارجی قرار بگیرند، علاوه بر القای یک گشتاور مغناطیسی در اتم‌های آن‌ها (پدیده‌ی دیامغناطیس)، تعدادی از گشتاورهای مغناطیسی دائم‌ها در جهت میدان قرار می‌گیرند به طوری که با افزایش شدت میدان تعداد بیشتری از آن‌ها با میدان هم‌راستا می‌شوند. اگر میدان مغناطیسی خارجی خیلی قوی باشد همه‌ی گشتاورهای مغناطیسی ماده در

جهت میدان قرار می‌گیرند. با حذف میدان مغناطیسی خارجی دوباره جهت گشتاور مغناطیسی اتم-های جسم به حالت کاتوره‌ای باز می‌گردند. منگنز، پلاتین، آلومینیم، هوا و ... جزء مواد پارامغناطیس محسوب می‌شوند.



شکل (۱-۲): یک ماده پارامغناطیس در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی قوی [۱]

### ۳- فرومغناطیس، پادفرومغناطیس و فری مغناطیس: اگر برهم‌کنش و نیروی تبادلی بین

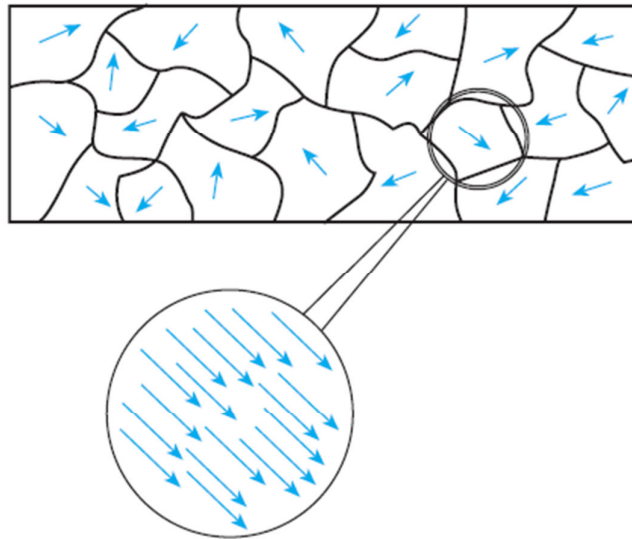
گشتاورهای مغناطیسی (ناشی از حرکت مداری و اسپینی الکترون‌ها) قوی باشد جفت‌شدگی بین گشتاورهای مغناطیسی افزایش می‌یابد. مواد با توجه به نوع جهت‌گیری این گشتاورها به سه نوع فرو، پادفرو و فری مغناطیس تقسیم می‌شوند.

در مواد فرومغناطیس گشتاورهای مغناطیسی اتم‌های ماده به صورت موازی و در یک جهت قرار می‌گیرند. این مواد در حالت عادی (در غیاب میدان مغناطیسی خارجی) دارای خاصیت مغناطیسی نیستند. زیرا هر ماده فرومغناطیس از حوزه‌های مغناطیسی زیادی تشکیل شده است که توسط دیواره‌هایی به نام دیوار بلوخ<sup>۱</sup> از یکدیگر جدا شده‌اند. به طوری که جهت‌گیری گشتاورهای مغناطیسی

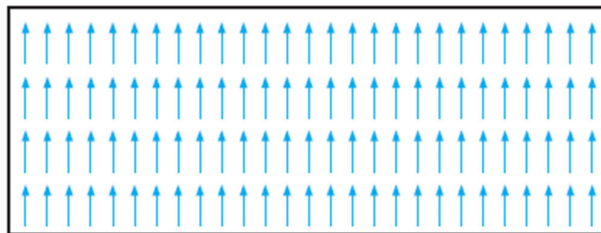
1- Bloch Wall

در هر حوزه‌ی مغناطیسی یکسان است ولی در مجموع گشتاور مغناطیسی برآیند کل نمونه (مغناطش نمونه) برابر صفر است.

حال اگر یک ماده‌ی فرومغناطیس را در معرض یک میدان مغناطیسی خارجی قرار دهیم، گشتاور مغناطیسی حوزه‌هایی که در جهت (یا تقریباً در جهت) میدان هستند هم جهت با آن قرار می‌گیرند به طوری که با افزایش شدت میدان به تدریج گشتاورهای مغناطیسی حوزه‌های دیگر نیز در جهت میدان ردیف می‌شوند و در نهایت ماده به یک تک حوزه‌ی مغناطیسی تبدیل می‌شود. با حذف میدان، پس از گذشت زمان کوتاهی ماده دوباره به حالت اولیه خود باز می‌گردد و خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهد. آهن، کبالت، نیکل، گادولینیم و دیسپرسیوم جزء مواد فرومغناطیس محسوب می‌شوند.

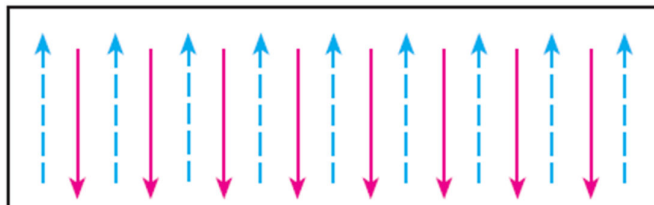


شکل (۱-۳): یک ماده فرومغناطیسی در غیاب میدان مغناطیسی خارجی [۱]



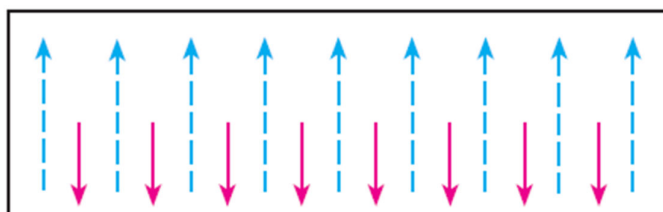
شکل (۱-۴): یک ماده فرومغناطیسی در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی قوی [۱]

مواد پادفرومغناطیس نیز از حوزه‌هایی تشکیل شده‌اند که هر حوزه نیز از شبکه‌هایی شامل دو زیر شبکه‌ی A و B تشکیل شده است به طوری که جهت گشتاورهای مغناطیسی در زیر شبکه‌های A و B به صورت پادموازی یکدیگرند (شکل (۵-۱)). موادی مانند  $MnO$ ،  $MnS$ ،  $FeO$  و ... جزء مواد پادفرومغناطیس هستند.



شکل (۵-۱): یک حوزه‌ی مربوط به ماده پادفرومغناطیس [۱]

مواد فری مغناطیس نیز مانند مواد پادفرومغناطیس می‌باشند با این تفاوت که اندازه‌ی گشتاورهای مغناطیسی در زیر شبکه‌های A و B با هم برابر نیستند و در نتیجه مطابق شکل (۶-۱) برآیند گشتاورهای مغناطیسی در هر شبکه و حوزه مخالف صفر است.



شکل (۶-۱): یک حوزه‌ی مغناطیسی مربوط به ماده‌ی فری مغناطیس [۱]

هرگاه یک ماده‌ی فری مغناطیس در یک میدان مغناطیسی خارجی نسبتاً قوی قرار بگیرد برآیند همه‌ی گشتاورهای مغناطیسی اتم‌ها در راستای میدان قرار می‌گیرند. ویژگی مهم این مواد این است که با حذف میدان مغناطیسی خارجی دیگر گشتاورهای مغناطیسی (حوزه‌ها) به حالت اولیه باز نمی‌گردند و جسم خاصیت مغناطیسی را به صورت دائم در خود حفظ می‌کند (برخلاف مواد فرومغناطیس نرم که با حذف میدان، خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند). این مواد در صنعت و فناوری از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. رابطه‌ی شیمیایی این مواد به صورت  $Mo.Fe_2O_3$

است، که در آن M یک کاتیون دو ظرفیتی است و غالباً Cu، Ni، Cd، Fe، Zn و یا Mg است. عموماً این مواد را فرومغناطیس سخت می‌نامند.

## ۱-۲. مواد مغناطیس دائم

مغناطیس‌های دائم که به اختصار PM خوانده می‌شوند، در واقع مواد فرومغناطیس سخت می‌باشند که تحت اثر میدان‌های شدید، مغناطیسی شده و این اثر را برای مدت طولانی در خود حفظ می‌کنند.

### ۱-۲-۱. پارامترهای مهم یک مغناطیس دائم [۳]

پارامترهای مهم یک مغناطیس دائم عبارت‌اند از:

- چگالی شار پسماند<sup>۱</sup> ( $B_r$ ) و نیروی بازدارنده<sup>۲</sup> ( $H_c$ )

اگر یک مغناطیس دائم تا حد اشباع مغناطیس شود و سپس شدت میدان مغناطیسی آن تا صفر کاهش یابد، مغناطیس هم‌چنان خاصیت مغناطیسی خود را حفظ می‌کند. چگالی شار در این نقطه از منحنی B-H را چگالی شار پسماند می‌نامند و آن را با  $B_r$  نشان می‌دهند. چنانچه شدت میدان مغناطیسی در جهت معکوس افزایش یابد در نقطه‌ای از منحنی B-H چگالی شار صفر خواهد شد. شدت میدان مغناطیسی در این نقطه را نیروی بازدارنده مغناطیسی می‌نامند و آن را با  $H_c$  نشان می‌دهند. نیروی بازدارنده در واقع اندازه mmf مورد نیاز برای مغناطیس‌زدایی می‌باشد.

- انرژی دریافتی<sup>۳</sup> و انرژی دریافتی ماکزیمم

قدر مطلق حاصل ضرب چگالی شار مغناطیسی در شدت میدان مغناطیسی در هر نقطه از منحنی مغناطیس‌زدایی را انرژی دریافتی می‌نامند که نمایانگر چگالی انرژی یا قدرت مغناطیسی در یک PM

1- Remanent Flux Density

2- Coercive Force

3- Energy Product

می‌باشد. مقدار بیشینه ممکن حاصل ضرب فوق را انرژی دریافتی ماکزیمم می‌نامند. واحد انرژی دریافتی  $J/m^3$  می‌باشد. حجم مورد نیاز مغناطیس را می‌توان با تنظیم نقطه کار آن حول نقطه انرژی دریافتی ماکزیمم حداقل کرد. بنابراین انتخاب ماده‌ای با بیشترین انرژی دریافتی ممکن برای یک کاربرد خاص، کمترین حجم ماده مغناطیسی مورد نیاز را خواهد داشت.

#### - درجه حرارت کوری

با افزایش درجه حرارت، خواص مغناطیسی مغناطیس‌ها تضعیف می‌شود. دمای کوری دمایی است که در آن ماده خواص مغناطیسی خود را از دست می‌دهد و برای استفاده باید دوباره مغناطیس شود. انتخاب نوع ماده مغناطیس دائم بر اساس کاربرد مورد نظر و با توجه به نکات زیر صورت می‌گیرد:

۱- چگالی شار پسماند بزرگ، سبب ایجاد نیرو و گشتاور زیاد می‌شود.

۲- نیروی بازدارنده بزرگ، مقاومت مغناطیسی را در برابر نیروهای مغناطیس‌زدا زیاد می‌کند.

۳- مشخصه خطی منحنی مغناطیس‌زدایی عاملی است که باعث کاهش تلفات می‌گردد.

۴- مقدار بزرگتر انرژی دریافتی ماکزیمم، باعث کوچک شدن حجم ماده مغناطیسی می‌شود.

علاوه بر پارامترهای فوق، قیمت نیز در انتخاب نوع ماده مغناطیس دائم نقش به‌سزایی دارد. عامل تعیین کننده دیگر دمای شرایط کاری می‌باشد.

### ۱-۲-۲. دسته‌بندی مواد مغناطیس دائم [۳]

به طور کلی سه دسته از مواد مغناطیس دائم در ماشین‌های الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرند:



- آلنیکو<sup>۱</sup>

اولین موادی که به صورت تجاری مورد استفاده قرار گرفتند مغناطیس‌هایی هستند که از آلیاژ آلنیکو بدست می‌آیند. آلومینیوم، نیکل، آهن و کبالت ترکیب اصلی این آلیاژها را تشکیل می‌دهند. مهم‌ترین مزایای آلنیکو را می‌توان در چگالی شار پسماند بالای آن و همچنین ضریب حساسیت پایین آن دانست. از دیگر مشخصات مغناطیسی آلنیکو می‌توان به عملکرد بهتر آن در دماهای بالا اشاره کرد. آلنیکو به علت نوع ترکیباتش هادی الکتریکی خوبی می‌باشد. نقطه ضعف این ماده کوچک بودن نیروی بازدارنده آن می‌باشد که باعث می‌گردد در برابر میدان‌های خارجی بسیار حساس باشد. کاربرد عمده آلنیکو در صنعت در حدود سال‌های ۱۹۴۰ تا ۱۹۷۰ بود.

- فریت‌ها<sup>۲</sup>

این مواد از ترکیب اکسید آهن و کربنات باریم<sup>۳</sup> یا استرانتیم<sup>۴</sup> بدست می‌آیند که اولین بار در سال ۱۹۵۰ پدید آمدند. به علت آن که این مواد بسیار سخت و شکننده می‌باشند به آن‌ها سرامیک<sup>۵</sup> هم گفته می‌شود. مهم‌ترین مزایای فریت‌ها قیمت پایین آن‌ها و مقاومت الکتریکی و حرارتی بسیار بالای آن‌ها می‌باشد که به معنای عدم وجود تلفات جریان‌های ادی است. حداکثر دمای کاری فریت‌ها برابر ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است. این مواد نسبت به آلنیکوها نیروی بازدارنده بالاتری دارند اما نقطه ضعف این مواد کوچک بودن چگالی شار پسماند آن‌ها می‌باشد.

- مواد مغناطیس دائم خاک نادر<sup>۶</sup>

- 
- 1- Alnico
  - 2- Ferrite Magnets
  - 3- Barium
  - 4- Strontium
  - 5- Ceramic
  - 6- Rare Earth

در سال ۱۹۶۰ مغناطیس‌های دائم از آلیاژ کبالت<sup>۱</sup> و ساماریم<sup>۲</sup> کشف شد (SmCo). این ماده یک ماده مغناطیس دائم قوی با منحنی مغناطیسی خطی است که این مشخصه سبب ناچیز بودن تلفات میدان می‌گردد. از مزایای این مواد به می‌توان به چگالی شار پسماند بالا، نیروی بازدارنده بالا و انرژی دریافتی زیاد اشاره کرد. نقطه ضعف این مواد خصوصیات ضعیف مکانیکی و شکننده بودن آنهاست.

نسل بعدی مواد مغناطیس دائم خاک نادر در سال ۱۹۸۳ معرفی گردید که از ترکیبات نئودیمیم<sup>۳</sup>، آهن<sup>۴</sup> و برن<sup>۵</sup> می‌باشد. این مواد علاوه بر مزایای قبلی از نظر مکانیکی نیز قوی است و هزینه کمتری نسبت به SmCo دارند. در مقابل نقطه ضعف این مواد وابستگی شدید رفتار آنها به دما می‌باشد.

جدول (۱-۱) خواص مهم انواع مغناطیس‌های دائم موجود را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که

$T_{max}$  که در جدول ذکر شده حداکثر دمای عملکرد مطلوب مغناطیس دائم می‌باشد [۴].

جدول (۱-۱): مقایسه مواد مغناطیس دائم [۴]

$B_r$ (Gauss)	$H_c$ (oersted)	$BH_{max}$ ( $\frac{kJ}{m^3}$ )	$T_{max}$ ( $^{\circ}C$ )	ماده مغناطیس دائم
۱۲۸۰۰	۱۲۳۰۰	۴۰	۱۵۰	NdFeB <sup>۶</sup>
۱۰۵۰۰	۹۲۰۰	۲۶	۳۰۰	SmCo <sup>۷</sup>
۱۲۵۰۰	۶۴۰	۵.۵	۵۴۰	Alnico
۳۹۰۰	۳۲۰۰	۳.۵	۳۰۰	Ceramic
۱۶۰۰	۱۳۷۰	۰.۶	۱۰۰	Flexible

1- Cobalt

2- Samarium

3- Neodymium

4- Iron

5- Boron

6- Neodymium Iron Boron

7- Samarium cobalt

### ۱-۲-۳. روش‌های ساخت مواد مغناطیس دائم [۴]

مغناطیس‌های دائم با یکی از روش‌های زیر ساخته می‌شوند:

- زینترینگ<sup>۱</sup>، (مغناطیس‌های خاک‌های نادر، سرامیک‌ها و آلنیکوها)
- اعمال فشار یا تزریق در قالب موجود<sup>۲</sup>، (مواد خاک‌های نادر یا سرامیک‌ها)
- ریخته‌گری<sup>۳</sup>، (آلنیکوها)
- چکش کاری<sup>۴</sup>، (نئودیمیوم و سرامیک‌ها)
- غلطک کاری<sup>۵</sup>، (نئودیمیوم و سرامیک‌ها)

فرآیند ساخت به روش زینترینگ به این صورت است که پودرهای ریز فشرده در فشار بسیار زیاد در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، سپس گداخته شده و پس از قالب ریزی به شکل جامد در می‌آیند. پس از فرآیند زینترینگ، شکل مغناطیس دائم، ناصاف بوده و برای استفاده نیاز به ماشینکاری دارد. باید دقت شود که میزان فشاری که برای صاف کردن و شکل دادن مغناطیس دائم بکار می‌رود محدود است.

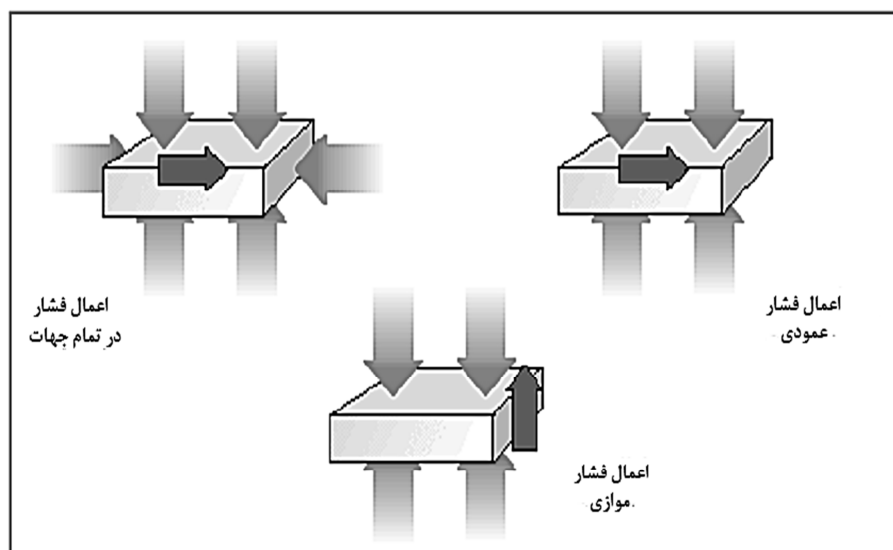
مغناطیس‌های دائم خاک نادر یا تحت فشار در یک جهت قرار می‌گیرند یا فشار در تمام جهات به آنها اعمال می‌شود. اعمال فشار در تمام جهات خواص مغناطیسی مغناطیس دائم را بهتر از حالتی که فشار از یک جهت برای قالب گیری وارد می‌شود نگاه می‌دارد. میدان مغناطیسی اعمال شده به مغناطیس دائمی که در یک جهت به منظور قالب‌گیری تحت فشار قرار می‌گیرد، می‌تواند عمود یا

---

1- Sintering  
2- Pressure Bonding or Injection Moulding  
3- Casting  
4- Extruding  
5- Calendering

موازی با مسیر فشار باشد. تجربه نشان داده است که اعمال میدان عمودی بر مسیر فشار خواص مغناطیسی را بهتر حفظ می‌کند. شکل (۷-۱) اعمال فشار و میدان مغناطیسی در جهات مختلف را نشان می‌دهد.

مغناطیس‌های خاک‌های نادر و همچنین سرامیک‌ها می‌توانند با روش اعمال فشار بر مواد تشکیل دهنده، اعمال حرارت و تزریق به قالب گداخته ساخته شوند. چگالی شار ماده مغناطیسی که به این صورت تشکیل شود کمتر از چگالی شار مغناطیسی ساخته شده به روش زینترینگ می‌باشد.



شکل (۷-۱): اعمال فشار و میدان در مغناطیس دائم [۴]

آلنیکوها به کمک ریخته‌گری یا روش زینترینگ ساخته می‌شوند. آلنیکوها به دلیل شیوه ساخت، قابلیت شکل‌گیری زیادی دارد (مانند آهنرباهای نعل اسبی معمول). اگر آلنیکو با روش زینترینگ ساخته شود قابلیت ساخت در اندازه‌های کوچک را خواهد داشت.

مواد خاک‌های نادر یا سرامیک‌های مغناطیسی انعطاف‌پذیر، با غلطک‌کاری پودرهای مغناطیسی انعطاف‌پذیر، مانند وینیل<sup>۱</sup> قابل ساخت هستند. در صورتی که از این روش برای ساخت مغناطیس

1- Vinyl

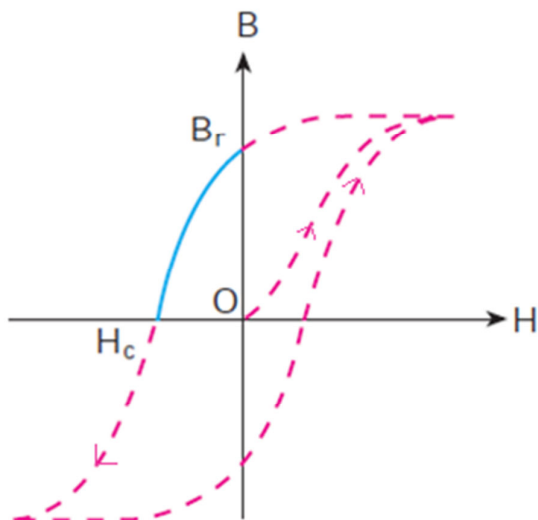
دائم استفاده شود، خواص مغناطیسی نسبت به حالت قبل که با تزریق مغناطیس به قالب مذاب انجام می‌شد ضعیف‌تر خواهد بود. البته این مغناطیس‌های دائم قابلیت برش یا پانچ شدن را دارا می‌باشند.

### ۱-۲-۴. منحنی مغناطیس‌زدایی مواد مغناطیس دائم

یکی از بارزترین مشخصات مواد مغناطیس دائم، منحنی مغناطش یا چرخه‌ی پسماند است. که در آن تغییرات مغناطش جسم  $\vec{M}$  (گشتاور مغناطیسی ماده در واحد حجم یا جرم) را برحسب میدان مغناطیسی خارجی  $\vec{H}$  رسم می‌کنند. دلیل وجود این چرخه ناشی از وجود حوزه‌های مغناطیسی در این مواد است. برآیند گشتاورهای مغناطیسی در هر حوزه مخالف صفر است ولی با توجه به این که گشتاورهای حوزه‌های مختلف در جهت‌های متفاوتی هستند، گشتاور برآیند نمونه صفر است (نقطه O در شکل (۱-۸)). حال اگر این مواد را در یک میدان مغناطیسی قرار دهیم و میدان را به تدریج افزایش دهیم، ابتدا حجم حوزه‌هایی که گشتاور مغناطیسی آن‌ها با میدان هم جهت (با تقریباً هم-جهت) است زیاد می‌شود و با افزایش شدت میدان، گشتاورهای حوزه‌های دیگر نیز به تدریج می‌چرخند و در جهت میدان قرار می‌گیرند و سرانجام در یک میدان مغناطیسی نسبتاً قوی گشتاور مغناطیسی تمام حوزه‌ها با میدان مغناطیسی هم‌جهت می‌شوند و کل نمونه به صورت یک تک حوزه-ی مغناطیسی در می‌آید. اکنون اگر میدان مغناطیسی خارجی را به تدریج کاهش دهیم گشتاورهای حوزه‌های مغناطیسی به حالت اولیه خود بازمی‌گردند، یعنی در غیاب میدان مغناطیسی، مغناطش ماده صفر نمی‌شود و به عبارتی ماده از خود پسماند مغناطیسی نشان می‌دهد. در عمل به جای رسم منحنی M-H، منحنی B-H را (که در آن چگالی شار مغناطیسی است) را رسم می‌کنند.

در این نمودار  $B_r$  پسماند مغناطیسی در ماده است و  $H_c$  میدان بازدارنده جسم است که خاصیت مغناطیسی را در جسم حفظ می‌کند که معمولاً به آن نیروی بازدارندگی می‌گویند. در مواد فرومغناطیس نیروی بازدارنده  $H_c$  کوچک است به همین دلیل با حذف میدان مغناطیسی خارجی جسم پس از مدت زمانی کوتاه به حالت اولیه خود باز می‌گردد. درحالی که در مواد فری مغناطیس

نیروی بازدارنده  $H_c$  بزرگ است و مانع آن می‌شود که در غیاب میدان خارجی جسم خاصیت مغناطیسی خود را از دست بدهد. آن بخش از منحنی پسماند را که در ربع دوم قرار دارد (خط پیوسته در شکل (۸-۱)) منحنی مغناطیس‌زدایی جسم می‌نامند. این منحنی مهمترین مشخصه هر ماده مغناطیس دائمی می‌باشد.



شکل (۸-۱): منحنی مغناطش (یا چرخه‌ی پسماند) یک ماده‌ی فرو یا فری مغناطیس [۵]

### ۳-۱. پدیده مغناطیس‌زدایی

مغناطیس‌زدایی به معنای تضعیف خاصیت مغناطیسی یک ماده مغناطیس دائم است. تقریباً در تمامی وسایل، شرایطی به وجود می‌آید که شار دریافتی از مغناطیس دائم، تضعیف می‌گردد. سه عامل تاثیر عمده‌ای در پایداری ماده مغناطیسی دارند:

- استرس‌های گرمایی: پسماند مغناطیسی در یک ماده مغناطیس دائم تابع دما است به طوری که با افزایش دما پسماند مغناطیسی کاهش می‌یابد. همان‌گونه که ذکر گردید در دمای کوری مغناطیس‌ها خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند و برای استفاده مجدد از آنها باید دوباره مغناطیس شوند.

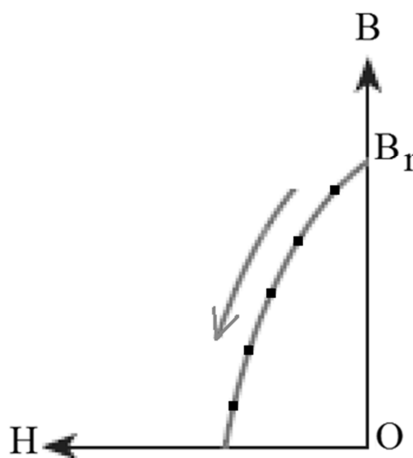
- استرس‌های مکانیکی: ضربه وارد کردن به PM، ارتعاش، فشار زیاد از استرس‌های مکانیکی

محسوب می‌شوند. در اثر این استرس‌ها خاصیت مغناطیسی مواد PM تضعیف می‌شود.

- استرس‌های الکتریکی: میدان‌های مغناطیسی اعمال شده به مغناطیس دائم به طور غیر قابل

برگشتی باعث تغییر شار ایجاد شده توسط ماده مغناطیس دائم می‌شوند. با اعمال میدان مغناطیسی،

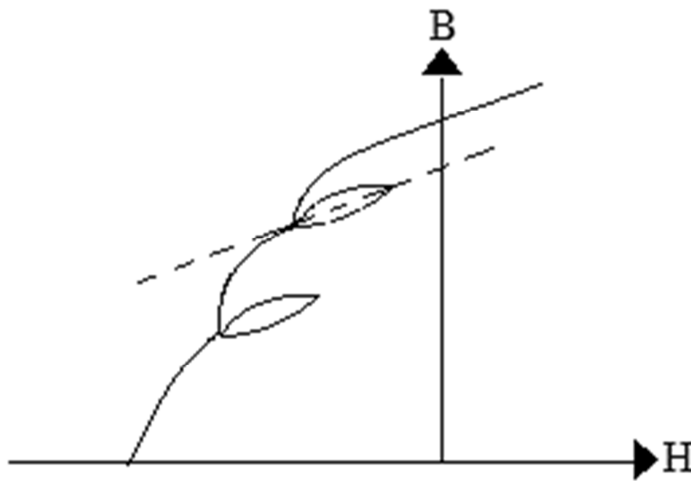
نقطه‌کار به سمت پایین حرکت می‌کند و باعث کاهش چگالی شار می‌شود (شکل (۹-۱)).



شکل (۹-۱): تغییرات نقطه‌کار PM تحت تاثیر یک میدان مغناطیسی مخالف

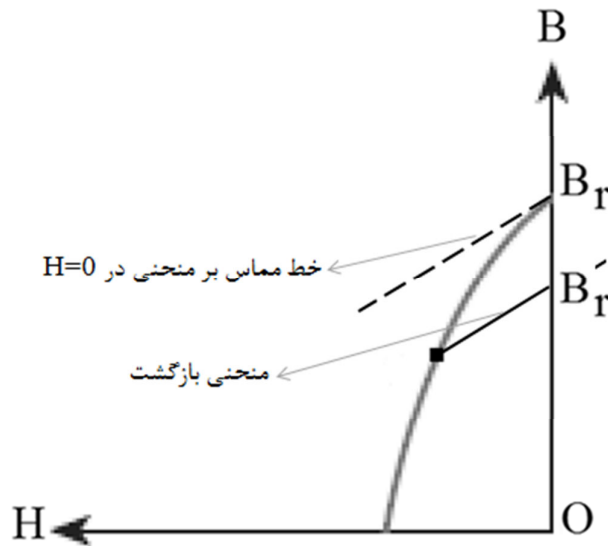
کاهش شار ماده مغناطیس دائم زمانی مشکل‌ساز می‌شود که این پدیده شکل برگشت ناپذیر به خود بگیرد. در این حالت زمانی که عامل مغناطیس‌زدای خارجی بر طرف گردد، نقطه‌کار به نقطه اولیه باز نمی‌گردد. بلکه در امتداد منحنی جدیدی به نام منحنی بازگشت حرکت خواهد کرد. به این ترتیب مقدار چگالی شار پسماند ماده PM تغییر می‌کند. در این حالت پدیده مغناطیس‌زدایی برگشت ناپذیر در ماده PM رخ داده است [۶].

مشخصه بازگشت در یک حلقه کوچک تکرار شونده قرار می‌گیرد. برای اکثر مواد مغناطیسی این حلقه به اندازه‌ای باریک می‌باشد که می‌توان آن را با یک خط راست تقریب زد. شیب این خط نفوذپذیری برگشت نامیده می‌شود. به نظر می‌رسد این شیب تقریباً مساوی شیب حلقه هیستریزس اصلی در  $B_r$  باشد.



شکل (۱۰-۱): حلقه‌های بازگشتی [۷]

از این رو منحنی بازگشت را با یک خط راست مدل می‌کنند. شیب این خط راست با شیب خط مماس بر منحنی در نقطه  $H=0$  برابر است.



شکل (۱۱-۱): منحنی بازگشت [۸]

#### ۴-۱. جمع‌بندی فصل

در این فصل ابتدا مقدمه‌ای در مورد مواد مغناطیس دائم، ویژگی‌ها و روش‌های ساخت آن‌ها معرفی شد. سپس چرخه‌ی پسماند در مواد مغناطیس دائم و منحنی مغناطیس‌زدایی این مواد بطور خلاصه بیان گردید. در انتها نیز پدیده مغناطیس‌زدایی و عوامل بروز این پدیده شرح داده شد.



## فصل دوم

# سابقه پژوهشی موضوع پایان نامه

## ۲-۱. مقدمه

شروع مطالعه روی پدیده مغناطیس‌زدایی در ماشین‌های الکتریکی از سال ۱۹۹۰ بود، که محققان محدوده تغییرات نقطه کار PM را در یک ماشین DC بررسی و حد مجاز بارگذاری ماشین را جهت جلوگیری از مغناطیس‌زدایی مشخص کردند [۹].

تا سال ۲۰۰۲، مطالعات تنها محدود به بررسی تغییرات چگالی‌شار PMها به ازای بارگذاری‌های مختلف در تعدادی ماشین مغناطیس‌دائم بود. در این مطالعات کمترین نقطه کار PM که احتمال بروز پدیده مغناطیس‌زدایی را در پی داشت تعیین می‌گشت.

تحقیقات انجام گرفته در سال‌های بعدی روی این پدیده در ماشین‌های مغناطیس‌دائم به صورت جامع‌تر انجام گرفت. در این مطالعات علاوه بر بررسی احتمال بروز این پدیده در ماشین، راه‌کارهایی نیز جهت جلوگیری از آن ارائه گشت.

## ۲-۲. تعیین محدوده بروز مغناطیس‌زدایی در ماشین‌های الکتریکی

در بسیاری از مقالات، صحت طراحی انجام گرفته، با بررسی احتمال بروز پدیده مغناطیس‌زدایی در ماشین، تایید شده است. به این ترتیب که ابتدا محدوده‌ای که در آن مغناطیس‌زدایی برگشت ناپذیر رخ می‌دهد مشخص شده، سپس کمترین نقطه کار ماشین محاسبه و مقدار آن با توجه به محدوده تعیین شده مورد مقایسه قرار گرفته است. بررسی‌های صورت گرفته، در تعدادی از مقالات به روش تحلیلی و در دیگر مقالات بر اساس روش‌های عددی (عمدتاً روش اجزای محدود) می‌باشند.

در سال ۱۹۹۷، آقای اوشیما و همکارانش بر اساس ابعاد ماشین و مشخصات مغناطیس‌های دائم به کار رفته، رابطه تحلیلی ارائه دادند که با استفاده از آن کمترین جریانی که سبب بروز مغناطیس‌زدایی در ماشین می‌شد، محاسبه گشت [۱۰]. صحت رابطه بدست آمده نیز با استفاده از محاسبات اجزای محدود، تایید شد.

در سال ۲۰۰۰، آقای کانگ و همکارانش با استفاده از یک رابطه تحلیلی کمترین نقطه کار مغناطیس‌های دائم ماشین را برای یک ژنراتور شار محوری در شرایط خطای اتصال کوتاه محاسبه کردند. سپس بر اساس نقطه کار بدست آمده، احتمال وامغناطش<sup>۱</sup> شدن ماشین را در طی مدت بروز خطا مشخص کردند [۱۱].

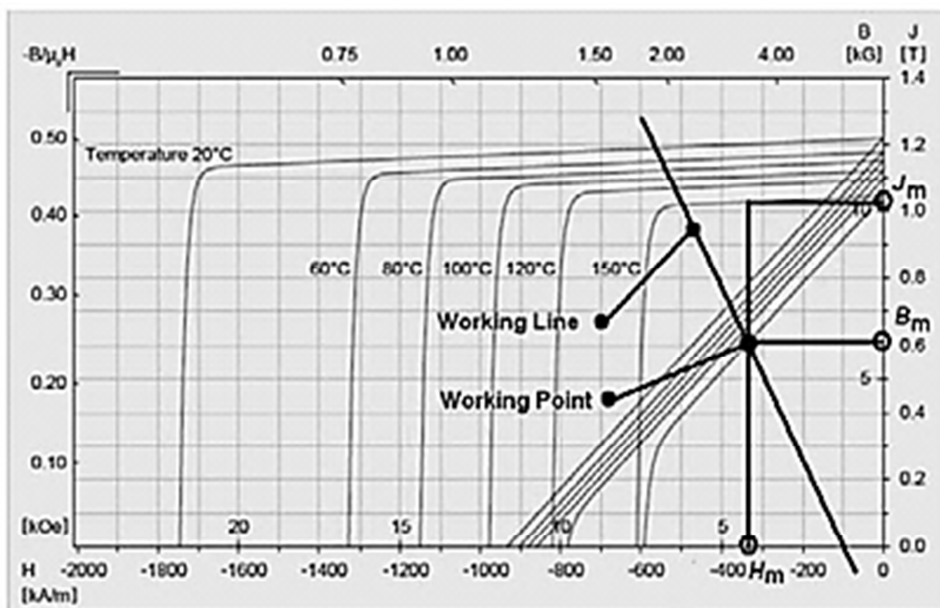
در سال ۲۰۰۱، ارشد و همکارانش موتوری برای عملکردهای گذرای طراحی کردند [۱۲]. ایشان نشان دادند از آنجایی که موتور در شرایط گذرای در مدت زمان کوتاهی کار می‌کند، ابعاد ماشین بر اساس بارگذاری گرمایی تعیین نمی‌شود. در این شرایط فاکتور اصلی طراحی جلوگیری از وامغناطش شدن است. آن‌ها ابعاد ماشین را به ازای کمترین چگالی شار ممکن در PMها محاسبه کردند.

## ۲-۳. بررسی پدیده مغناطیس‌زدایی به روش تحلیلی

در محاسبات تحلیلی رایج با استفاده از مدل مدار مغناطیسی، فرض می‌شود که نقطه کار در بخش‌های مختلف PM، یکسان است. در این تحلیل یک خط به عنوان خط کاری مگنت تعریف می‌شود. شیب این خط به هندسه مدار مغناطیسی وابسته است. وقتی جریانی در مدار وجود نداشته باشد، خط کار از مبدا عبور می‌کند اما اگر جریانی در مدار برقرار باشد، خط کار محور H را در یک نقطه غیر صفر قطع خواهد کرد. این نقطه تقاطع با محور H مطابق با رابطه (۱-۲) به ضخامت مگنت ( $h_m$ ) و آمپر دور مدار مغناطیسی بستگی دارد:

$$H = K \frac{-NI}{h_m} \quad (1-2)$$

از برخورد خط کار با منحنی B-H ماده، نقطه کار بدست می‌آید. به عنوان مثال نقطه کار ماده NdFeB در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.



شکل (۲-۱): مثالی از خط کار و نقطه کار روی منحنی B-H ماده Neorem 576a [۱۳]

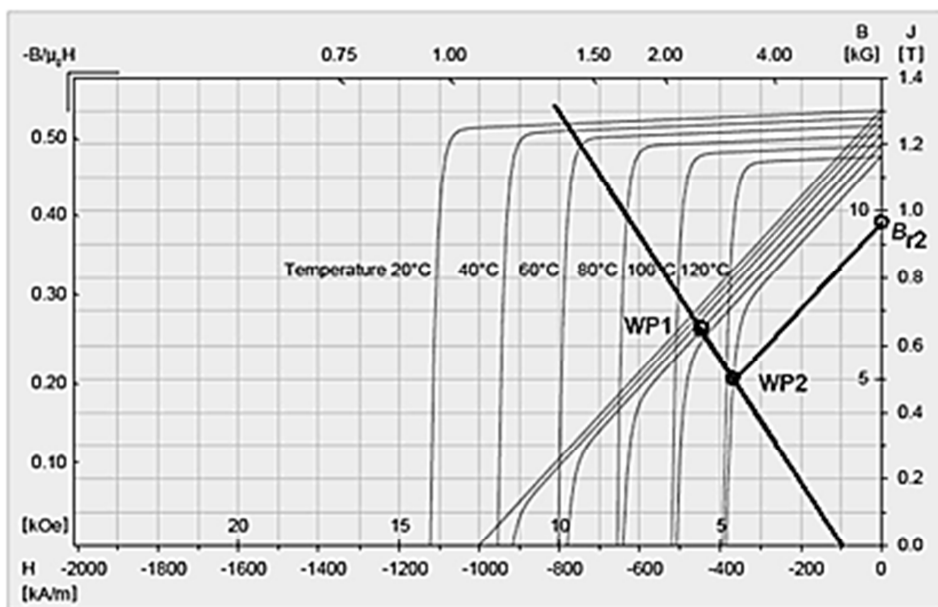
احتمال وقوع پدیده مغناطیس زدایی را به سادگی بر اساس نقطه کار و منحنی B-H بررسی می-کنند. منحنی B-H بخصوص در دماهای بالا دارای خمیدگی است به طوری که معمولاً یک بخش خطی با شیب مشخص و یک بخش عمودی در آن وجود دارد. ناحیه بین این دو بخش، زانوی منحنی B-H نام دارد. بطور خلاصه می توان گفت که اگر نقطه کار در ناحیه خطی قرار بگیرد، احتمال مغناطیس زدایی برگشت ناپذیر وجود ندارد ولی اگر خط کار، منحنی B-H را زیر زانوی منحنی و در بخش عمودی قطع کند، مغناطیس زدایی برگشت ناپذیر در PM رخ داده است. بنابراین برای جلوگیری از احتمال مغناطیس زدایی برگشت ناپذیر، طراح مدار مغناطیسی باید اطمینان حاصل کند که نقطه کار حتی تحت بدترین شرایط عملکردی نیز بالای زانویی منحنی مغناطیس زدایی قرار می-گیرد.

در یک PM، نقطه کار به دو دلیل می تواند زیر ناحیه زانویی حرکت کند:

۱- دمای بالا

۲- جریان لحظه ای شدید

عملاً نمی‌توان مغناطیس‌زدایی ناشی از این دو عامل را از هم تفکیک کرد. افزایش دما ناحیه زانویی منحنی را به سمت راست حرکت می‌دهد (نزدیک‌تر به محور  $B$ ). مغناطیس‌زدایی ناشی از دمای زیاد در شکل (۲-۲) نشان داده شده است.



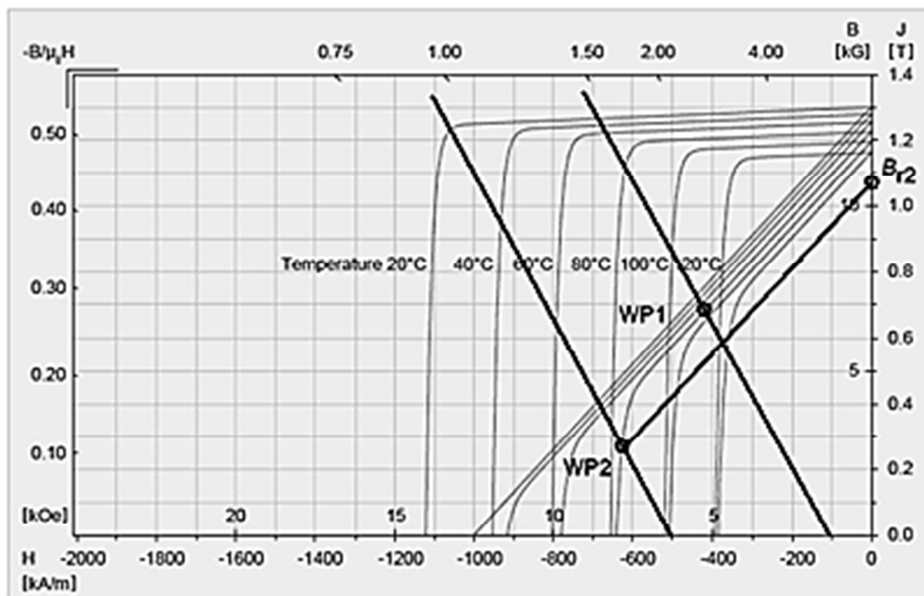
شکل (۲-۲): مثالی از چگونگی مغناطیس‌زدایی ناشی از دمای زیاد [۱۳]

هنگام عبور جریان‌های زیاد از ماشین نیز، نقطه کار ممکن است زیر ناحیه زانویی قرار گیرد. برای مثال هنگام وقوع اتصال کوتاه در یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم، در شروع وضعیت اتصال کوتاه دما ثابت باقی می‌ماند ولی خط کار به طور ناگهانی به طرف چپ حرکت می‌کند. در این حالت ممکن است نقطه کار زیر ناحیه زانویی بیافتد و مغناطیس‌زدایی رخ دهد. مغناطیس‌زدایی ناشی از عبور جریان زیاد در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.

#### ۲-۴. روش‌های ریاضی برای توصیف رفتار بازگشتی ماده NdFeB

در سال ۲۰۱۱، آقای روهو در رساله دکتری خود مطالعه جامعی را پیرامون مدل کردن پدیده مغناطیس‌زدایی در مواد مغناطیس دائم NdFeB انجام داد [۱۳]. بخشی از این مطالعه به مدل

کردن رفتار ماده PM پس از مغناطیس‌زدایی اختصاص یافته است که در ادامه به صورت خلاصه شرح داده شده است.



شکل (۲-۳): مثالی از چگونگی مغناطیس‌زدایی ناشی از عبور جریان زیاد [۱۳]

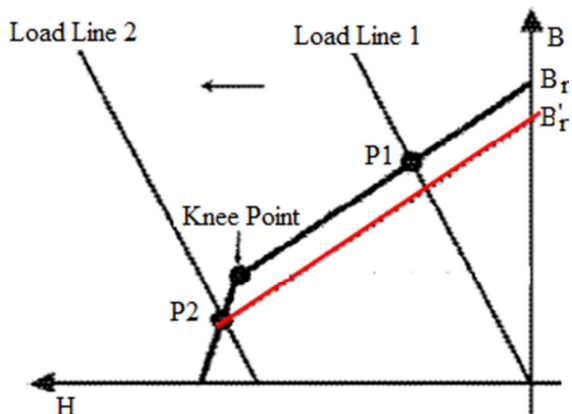
در فرایند تحلیل، اگر در یک مگنت مغناطیس‌زدایی رخ داده باشد، خط بازگشت باید جایگزین منحنی B-H شود. از آنجایی که رفتار ماشین پس از مغناطیس‌زدایی برگشت ناپذیر اهمیت زیادی دارد، باید مدل مناسبی جهت توصیف رفتار بازگشتی ماده مغناطیس دائم ارائه گردد. در ادامه دو مدل ریاضی جهت توصیف رفتار بازگشتی ماده NdFeB ارائه می‌شود.

### ۲-۴-۱. مدل خطی<sup>۱</sup>

مدل خطی منحنی بازگشت از رابطه زیر تبعیت می‌کند.

$$B = B_r + \mu_0 \mu_r H \quad (۲-۲)$$

1- linear model



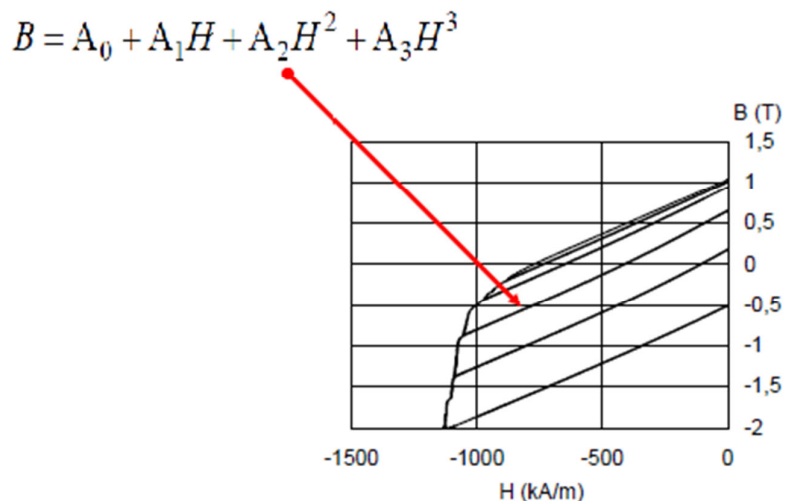
شکل (۲-۴): مدل خطی منحنی بازگشت [۱۳]

### ۲-۴-۲. مدل چند جمله‌ای

مدل چند جمله‌ای درجه ۳ از رابطه زیر تبعیت می‌کند.

$$B = A_0 + A_1H + A_2H^2 + A_3H^3 \quad (۴-۲)$$

با توجه به شکل (۲-۷) منحنی‌های بازگشت با استفاده از یک رابطه درجه ۳ مدل شده‌اند.



شکل (۲-۵): مدل چندجمله‌ای منحنی بازگشتی [۱۳]

ضرایب چندجمله‌ای یعنی مقادیر  $A_0, A_1, A_2, A_3$  به ازای شدت‌های مختلف مغناطیس‌زدایی

برگشت ناپذیر در نمودار (۲-۶) آورده شده‌اند. این ضرایب چندجمله‌ای را می‌توان به صورت تابعی از

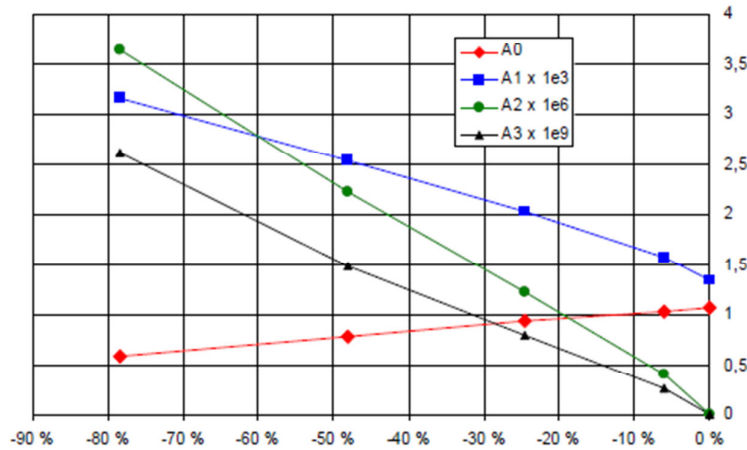
درصد مغناطیس‌زدایی بیان کرد:

$$A_i = a_{i1} + a_{i2}D \quad (5-2)$$

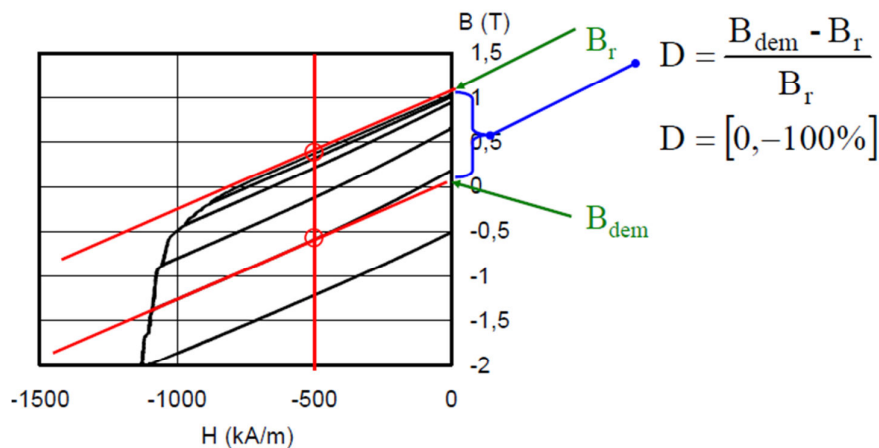
که در آن  $D$  درصد مغناطیس‌زدایی برگشت ناپذیر است (به شکل (۷-۲) توجه کنید) و داریم:

$$D = [-100\% \dots 0\%] \quad (5-2)$$

$$A_i = a_{i0} + a_{i1}D$$



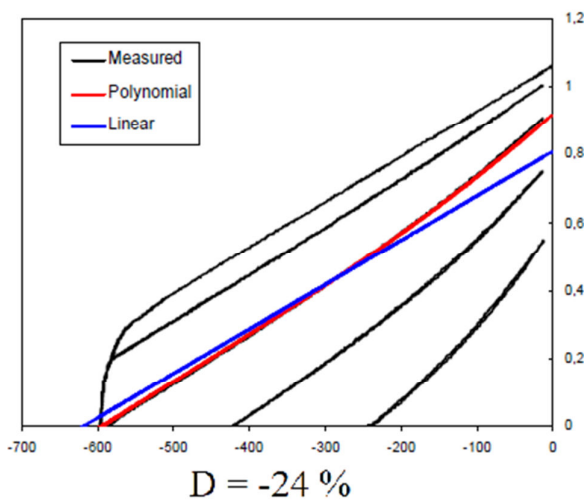
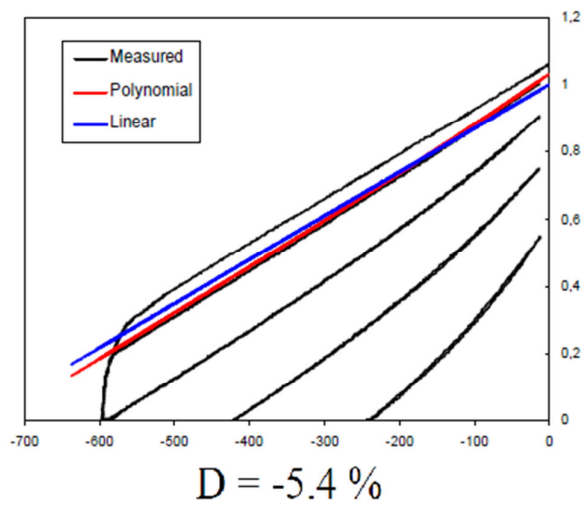
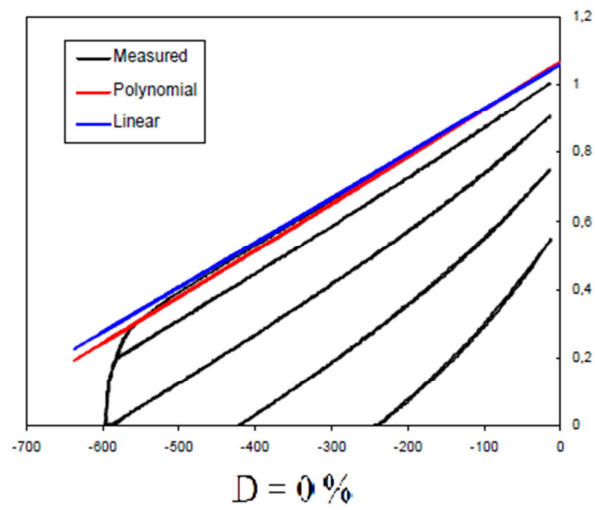
شکل (۶-۲): ضرایب چندجمله‌ای به ازای درصدهای مختلف مغناطیس‌زدایی [۱۳]



شکل (۷-۲): درصد مغناطیس‌زدایی [۱۳]

دقت مدل چند جمله‌ای نسبت به مدل خطی مطرح شده در بالا بیشتر است. تنها مشکل این روش تعداد زیاد پارامترهایی است که باید تعیین شوند. به عنوان چند مثال، مدل‌های چندجمله‌ای و خطی منحنی‌های بازگشت به همراه مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده به ازای شدت‌های مختلف مغناطیس‌زدایی برگشت ناپذیر در شکل (۸-۲) نشان داده شده‌اند.





شکل (۲-۸): مثال‌هایی از مدل چندجمله‌ای و خطی منحنی بازگشتی به ازای درصدهای مختلف مغناطیس‌زدایی

## ۲-۵. خطای اتصال کوتاه سه فاز و پدیده مغناطیس زدایی

خطاهای بسیاری ممکن است سبب بروز پدیده مغناطیس زدایی در ماشین‌های مغناطیس دائم شوند. اما یکی از مشهودترین این خطاها، خطای اتصال کوتاه می‌باشد. اثبات شده که طراحی صحیح یک ساختار، می‌تواند ماشین را در برابر این اتصال کوتاه‌ها محافظت کند.

در سال ۱۹۹۷، آقای گلدنبرگ و همکارانش کمترین نقطه کار PM را تحت شرایط خطای اتصال کوتاه تکفاز در ماشین تعیین کردند [۱۴]. آن‌ها نشان دادند که استفاده از یک قفس دمپر از بروز پدیده مغناطیس زدایی در این شرایط جلوگیری می‌کند.

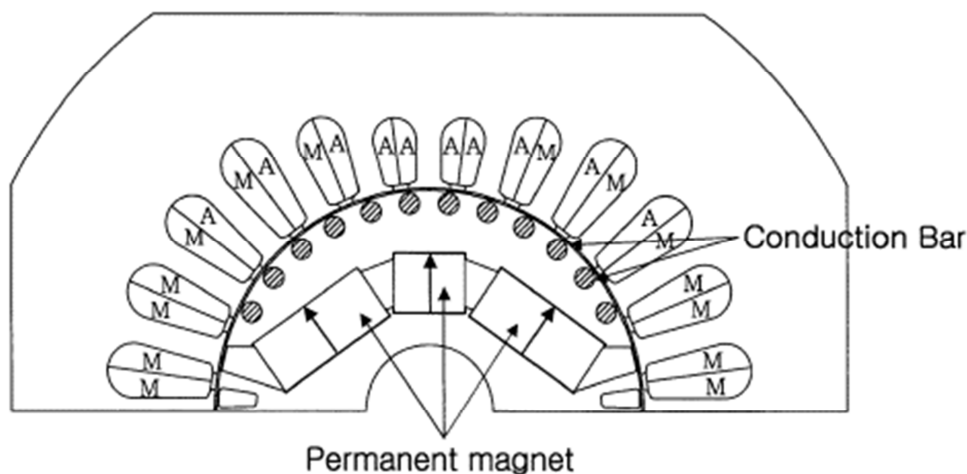
در سال ۱۹۹۹، آقای روسو و همکارانش یک ماشین مغناطیس دائم با مگنت‌های سطحی را با یک ماشین PM با قطب‌های کفشی مقایسه کردند [۱۵]. احتمال بروز پدیده مغناطیس زدایی به ازای بیشترین بارگذاری ماشین، شرایط خطای اتصال کوتاه تکفاز و سه فاز بررسی شد و نشان داده شد که گوشه‌ها حساس‌ترین نواحی مگنت هستند که سریعاً و امگناطش می‌شوند. در همین سال، آقای لامپولا ساختارهای مختلف روتور را از لحاظ مقاومت در برابر مغناطیس زدایی، با استفاده از محاسبه کمترین چگالی شار در PMها در زمان بروز خطای اتصال کوتاه سه فاز، مقایسه کرد. نتیجه بررسی این بود که استفاده از روتور با قطب‌های کفشی در شرایط خطا مقاومت بیشتری در برابر مغناطیس زدایی نشان می‌دهد.

در سال ۲۰۰۰، آقای لامپولا به همراه همکارش سارانساری چندین ماشین با مگنت‌های سطحی را مورد آنالیز قرار دادند [۱۶]. ایشان یک قاعده تنظیم کردند که چگونه بیشترین بارگذاری ماشین را بر اساس مشخصه مغناطیس زدایی ماده PM، محدود کنند. آن‌ها خطای اتصال کوتاه سه فاز و دو فاز را مدل کردند.

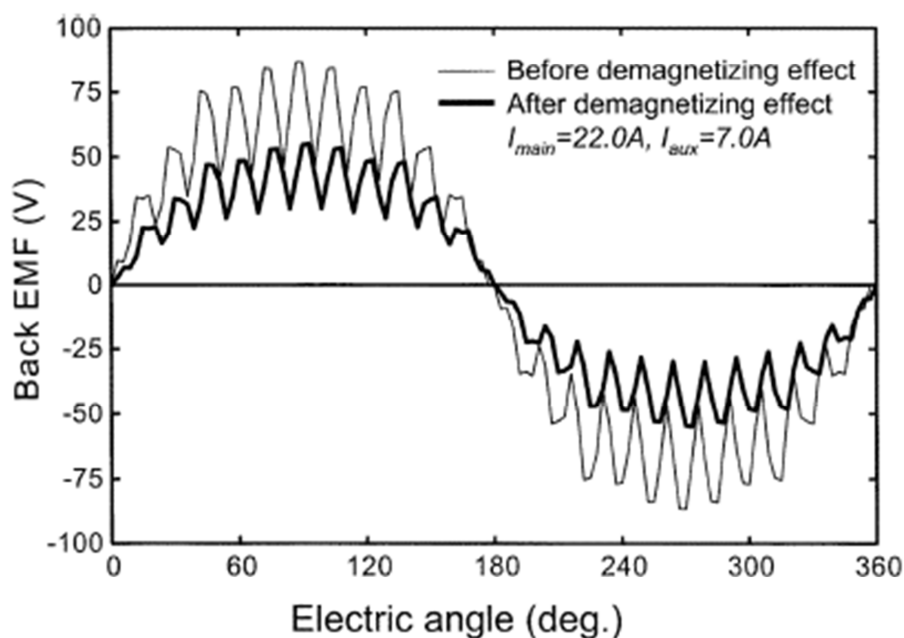
## ۲-۶. مطالعه تاثیر پدیده مغناطیس زدایی بر روی مشخصه های ماشین

در سال ۲۰۰۳، آقای کانگ و همکارانش پدیده مغناطیس زدایی را در یک موتور سنکرون مغناطیس دائم خود راه انداز تکفاز بررسی کردند (شکل ۲-۹) [۱۷]. در این ماشین جریان های راه-اندازی و یا روتور قفل باعث بروز پدیده مغناطیس زدایی شدید در PMها می گردد. این افزایش جریان لحظه ای و به دنبال آن بروز پدیده مغناطیس زدایی سبب کاهش Back EMF می شود. در شکل (۲-۱۰) مقایسه ای بین شکل موج Back EMF موتور در حالت عملکرد نرمال موتور با حالتی که مگنت ها در معرض بیشترین میدان مغناطیس زدا قرار می گیرند، انجام شده است. ایشان مشاهده کردند که در اثر بروز این پدیده در ماشین، دامنه و شکل موج Back EMF تغییر کرده و مقدار موثر آن از ۵۵.۲ ولت به ۳۲.۶ ولت کاهش یافته است. به این ترتیب بروز پدیده مغناطیس زدایی در مگنت ها سبب کاهش مقدار موثر Back EMF به میزان ۵۳ درصد شده است.

در سال ۲۰۱۰ آقای یانگ و همکارانش تاثیر پدیده مغناطیس زدایی را در یک موتور DC مغناطیس دائم مورد بررسی قرار دادند [۱۸]. نتایج نشان داد که در اثر بروز این پدیده در ماشین، مقدار موثر Back EMF به میزان ۱.۳ درصد کاهش یافته است.

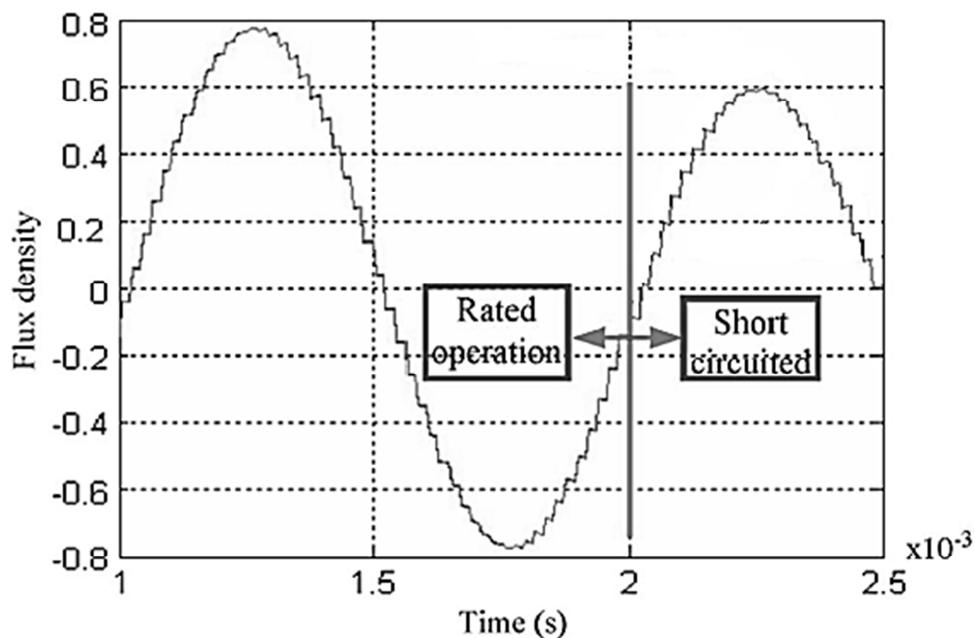


شکل (۲-۹): ساختار LSPM تکفاز [۱۷]



شکل (۲-۱۰): شکل موج Back EMF قبل و بعد از مغناطیس‌زدایی [۱۷]

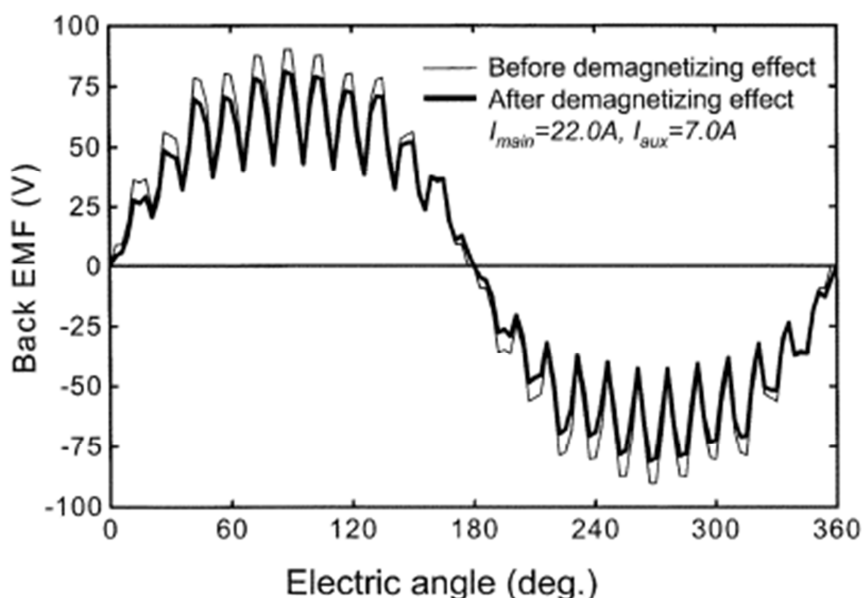
در سال ۲۰۱۰ آقای کینگ و همکارانش پدیده مغناطیس‌زدایی را در یک ماشین PM سرعت بالا در شرایط خطای اتصال کوتاه مورد مطالعه قرار دادند [۱۹]. نتایج بررسی ایشان نشان داد که دامنه شکل موج چگالی شار فاصله هوایی در اثر بروز این پدیده در ماشین کاهش می‌یابد (شکل (۲-۱۱)).



شکل (۲-۱۱) شکل موج چگالی شار فاصله هوایی قبل و بعد از مغناطیس‌زدایی [۱۹]

## ۷-۲. راه کارهای ارائه شده جهت کاهش احتمال بروز پدیده مغناطیس زدایی

همان طور که پیش تر گفته شد در سال ۲۰۰۳، آقای کانگ و همکارانش پدیده مغناطیس زدایی را در یک موتور سنکرون مغناطیس دائم خود راه انداز تکفاز بررسی کردند (شکل ۲-۹). سپس به عنوان راه کاری جهت مقابله با این پدیده، با تغییر پارامترهای طراحی ماشین از قبیل طول مگنت ها، زاویه قرارگیری آنها و تعداد میله های قفس دمپر، شدت بروز آن را کاهش دادند. شکل (۲-۱۲) تغییرات شکل موج Back EMF را پس از اتصال کوتاه شدن سیم پیچ استاتور نشان می دهد. مقدار موثر Back EMF موتور در این شرایط از  $57.8 \text{ V}$  به  $52 \text{ V}$  کاهش یافته است. با مقایسه شکل (۲-۱۰) و شکل (۲-۱۲) مشاهده می شود که راه کارهای ارائه شده موثر واقع گشته و از شدت کاهش Back EMF کاسته شده است.



شکل (۲-۱۲): شکل موج Back EMF مدل اصلاح شده پس از اتصال کوتاه شدن سیم پیچ استاتور [۱۷]

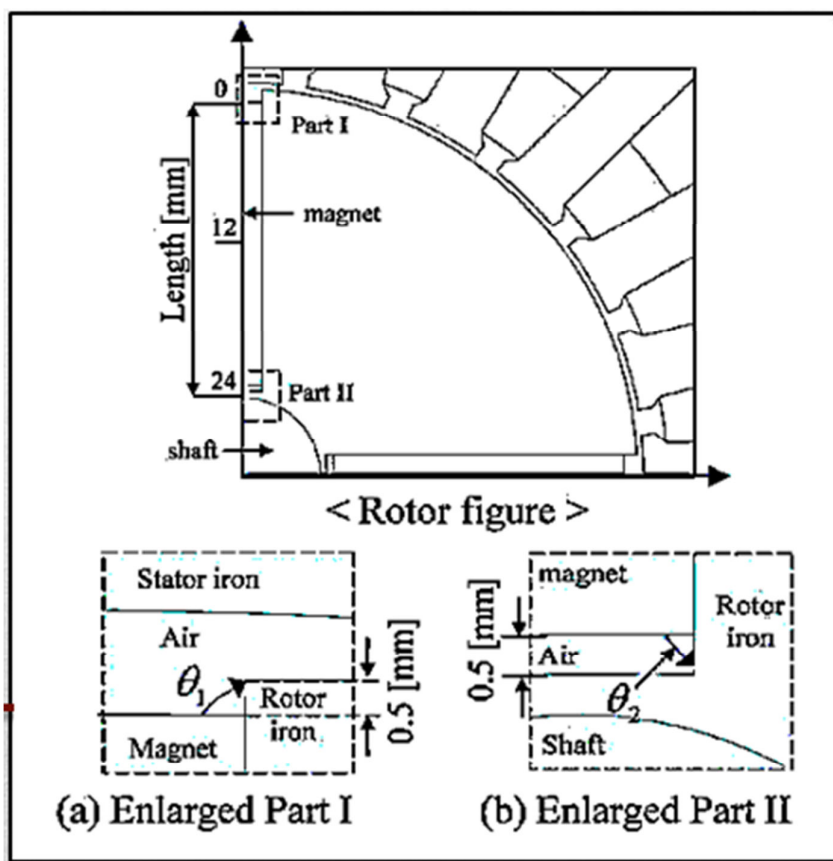
در سال ۲۰۰۹، آقای وانگ و همکارانش پدیده مغناطیس زدایی را در یک موتور سنکرون با مغناطیس های دائم درونی، در شرایط خطا، بررسی کردند [۲۰]. آن ها پس از تعیین ضخامت مناسب برای PMها، با استفاده از متمرکز کننده های شار، ساختار روتور را به گونه ای اصلاح کردند که در

برابر مغناطیس‌زدایی مقاوم باشد. به کار بردن این متمرکزکننده‌های شار از شدت میدان خارجی وارده به مگنت‌ها می‌کاهد.

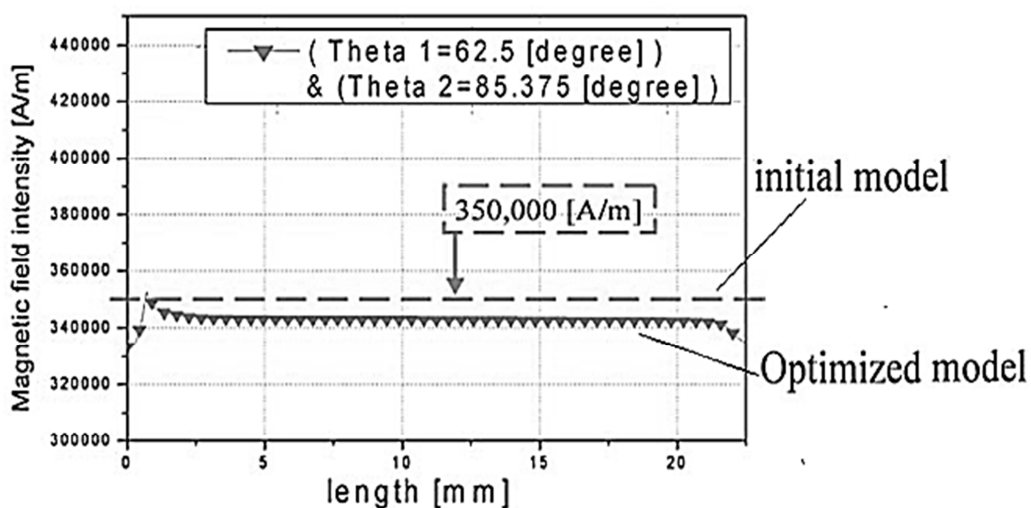
بخشی از ساختار موتور مورد بررسی در شکل (۲-۱۳) نشان داده شده است. متغیرهای طراحی انتخابی جهت اصلاح ساختار روتور،  $\theta_1$  و  $\theta_2$  تعیین شدند.

هر قدر  $\theta_1$  و  $\theta_2$  کوچک‌تر انتخاب شوند، شدت میدان مغناطیسی خارجی وارده به PMها کمتر خواهد بود، اما به همان میزان اشباع در آهن روتور بیشتر می‌شود که باعث افزایش تلفات خواهد شد. بنابراین مقدار بهینه‌ای برای  $\theta_1$  و  $\theta_2$  برگرفته از مصالحه بین اشباع مغناطیسی و شدت میدان مغناطیسی خارجی وارده به PMها بدست آمد.

شکل (۲-۱۴) نشان می‌دهد که در مدل بهینه میزان شدت میدان مغناطیسی وارده به PM، نسبت به ساختار اولیه، کاهش یافته است.

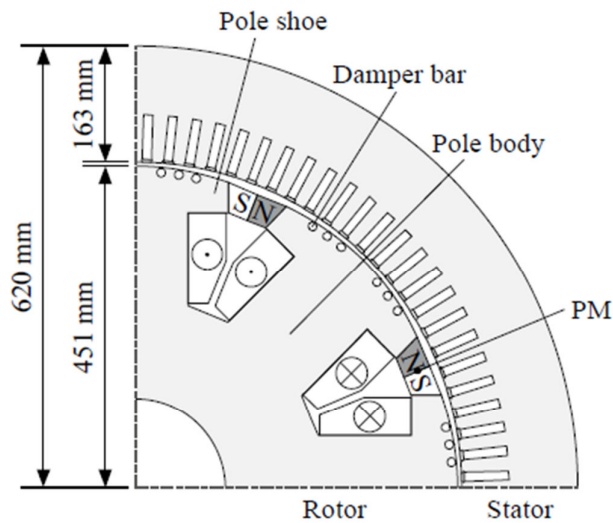


شکل (۲-۱۳): پارامترهای طراحی انتخابی جهت اصلاح ساختار روتور [۲۰]



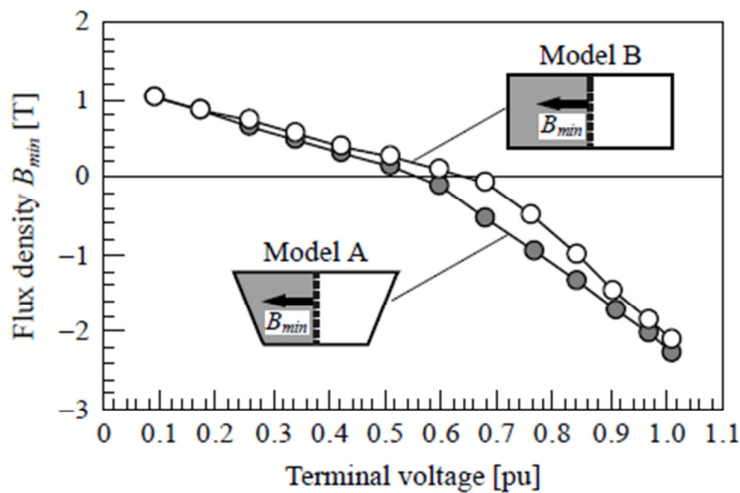
شکل (۲-۱۴): شدت میدان مغناطیسی خارجی در ساختار اولیه در مقایسه با ساختار اصلاح شده [۲۰]

در سال ۲۰۱۰، آقای هوسوی و همکارانش تاثیر شکل مگنت روی شدت مغناطیس‌زدایی را در یک موتور سنکرون قطب برجسته تقویت شده با PM، بررسی کردند (شکل (۲-۱۵)) [۲۱]. در این نوع ماشین پس از وقوع خطای اتصال کوتاه، شار ناشی بین قطب‌های مجاور سبب بروز مغناطیس‌زدایی در PMها می‌شد. سیم‌پیچی میدان و آرمیچر شار ناشی‌ای در درون PMها در خلاف جهت مغناطش آنها تولید می‌کردند. به این ترتیب چگالی شار PMها کاهش یافته و مغناطیس‌زدایی در آنها رخ می‌داد. آنها نشان دادند که شدت مغناطیس‌زدایی در بخش‌های پایینی PM بیشتر از بخش‌های فوقانی آن بود. علت آن نیز دوزنقه‌ای شکل بودن مگنت‌ها بود. فاصله بین کفشک‌های قطب مجاور در بخش پایینی کوچکتر و به همین دلیل رلوکتانس در بخش پایینی کمتر و در نتیجه شار ناشی در این ناحیه بیشتر بود. برای رفع این مشکل، شکل مگنت‌ها را از حالت دوزنقه‌ای به حالت مستطیلی تغییر دادند. با این کار چگالی شار نقاط پایینی PM با مقدار آن در نقاط فوقانی تقریباً برابر گشتند. به این ترتیب تغییر شکل مگنت از دوزنقه‌ای به مستطیلی در کاهش پدیده مغناطیس‌زدایی در بخش‌های داخلی PM موثر واقع شد.



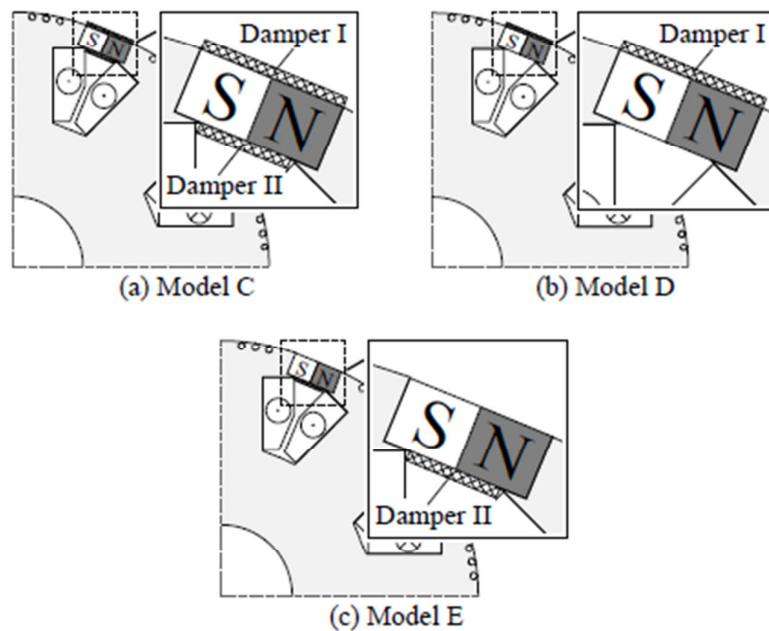
شکل (۲-۱۵): ماشین PMA-SMs مورد بررسی [۲۱]

جهت کاهش هر چه بیشتر این پدیده در مغناطیس‌های دائم، آقای هوسوی و همکارانش استفاده از میله‌های دمپر را نیز بررسی کردند. در سطوح پایینی و فوقانی مگنت‌ها، دمپرهایی را اضافه کرده، تاثیر آن را روی مغناطیس‌زدایی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که دمپری که شار تولیدی آن در داخل مگنت در جهت مغناطش آن بود، در کاهش پدیده مغناطیس‌زدایی موثر واقع شد. به این ترتیب آن‌ها موفق شدند مدل بهینه‌ای برای موتور PMA-SMs ارائه دهند که در برابر مغناطیس‌زدایی مقاوم بود (شکل (۲-۱۸)).

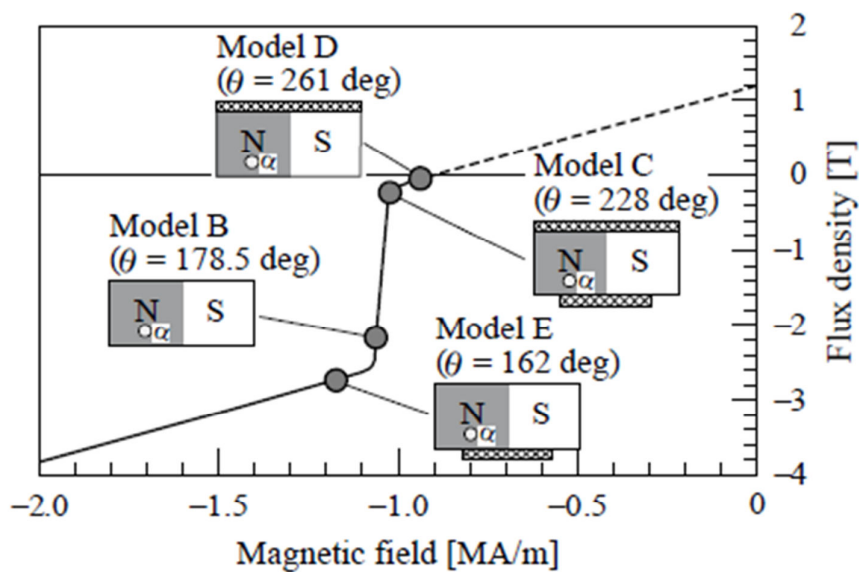


شکل (۲-۱۶): کمترین چگالی شار متوسط تولیدی توسط PM به ازای ولتاژهای مختلف در یک سیکل برای دو مگنت دوزنقه‌ای شکل و مستطیل شکل [۲۱]





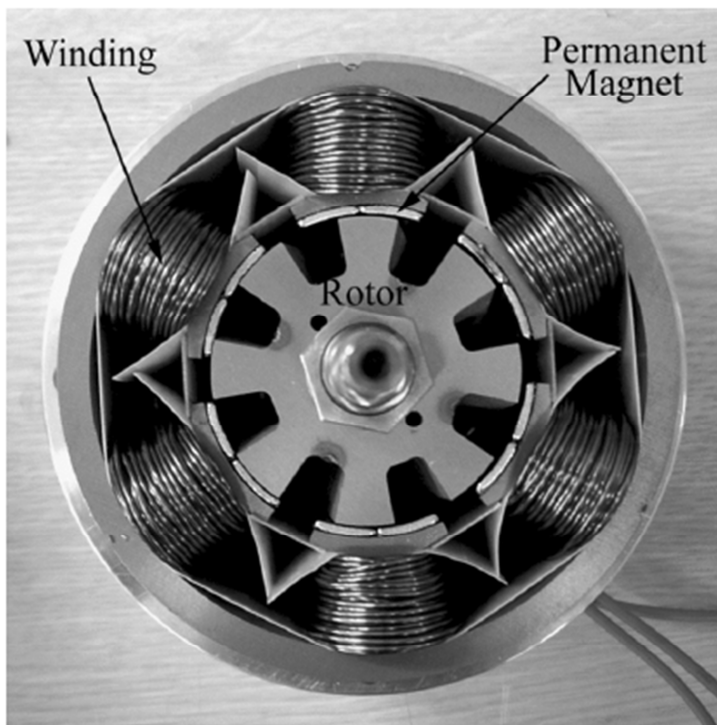
شکل (۲-۱۷): مدل‌های روتور ماشین مورد بررسی با میله‌های دمپر اضافی [۲۱]



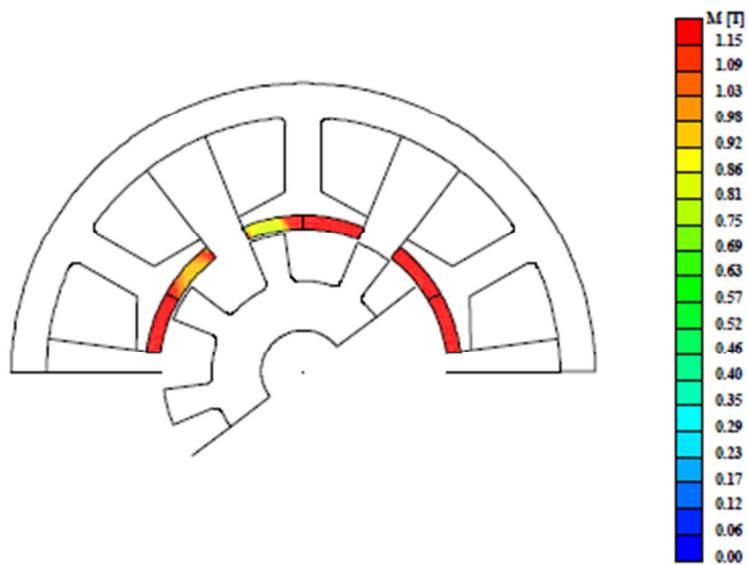
شکل (۲-۱۸): کمترین نقطه کار PM در ۴ مدل بررسی شده [۲۱]

در سال ۲۰۱۱، آقای شین و همکارانش پدیده مغناطیس‌زدایی را در ماشین شار معکوس بررسی کردند (شکل ۲-۱۹) [۲۲]. آن‌ها همچنین تاثیر تغییر پهناي دندانه‌های روتور و ضخامت مگنت‌ها را در کاهش شدت بروز این پدیده مورد بررسی قرار دادند.

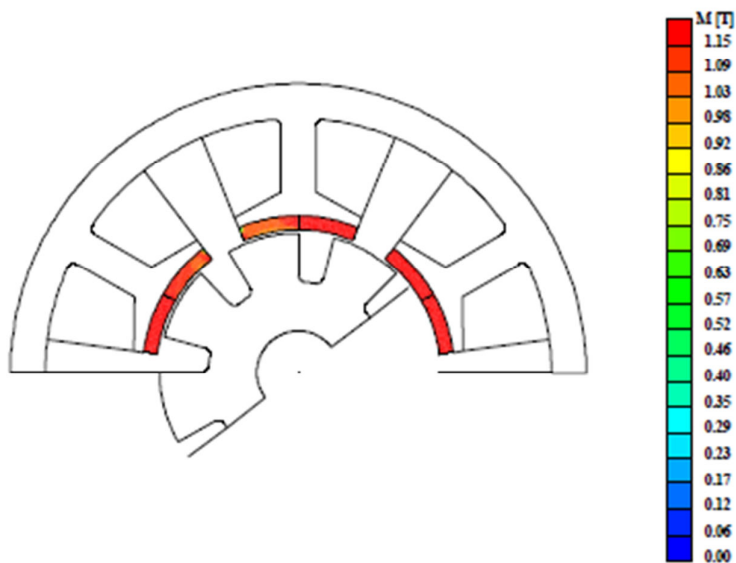
نتایج نشان داد که با افزایش پهنای دندانه‌های روتور، از شدت مغناطیس‌زدایی کاسته شد (شکل ۲-۲۰). این موضوع به این علت است که هرچه دندانه‌های روتور باریک‌تر باشند، مقدار نیرو محرکه مغناطیسی (mmf) بیشتری در مگنت‌ها متمرکز می‌شود. افزایش ضخامت PMها نیز، شدت مغناطیس‌زدایی را کاهش می‌دهد (شکل ۲-۲۱).



شکل (۲-۱۹): ماشین شار معکوس [۲۲]

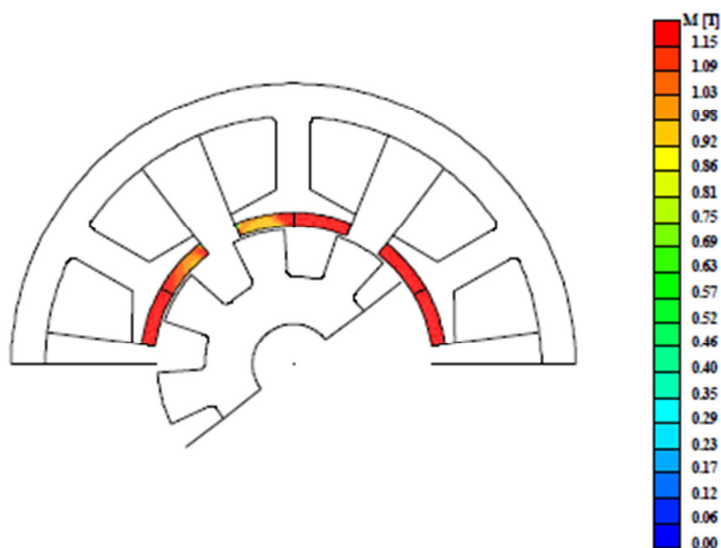


الف) دندانه روتور با پهنای ۱۵ درجه

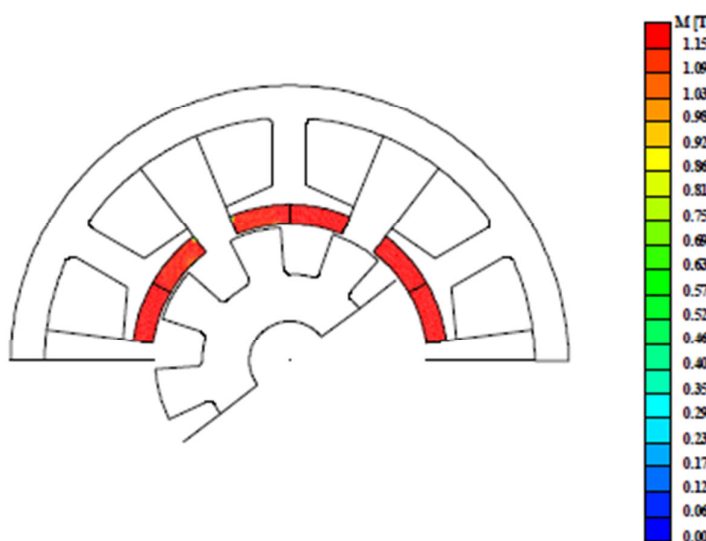


ب) دندانه روتور با پهنای ۳۰ درجه

شکل (۲-۲۰): تاثیر تغییر پهنای دندانه‌ها در توزیع مغناطش در PMها [۲۲]



الف) PM با ضخامت ۲ mm



ب) PM با ضخامت ۳ mm

شکل (۲-۲۱): تاثیر تغییر ضخامت PMها در توزیع مغناطش [۲۲]

## ۲-۸. جمع بندی فصل

در این فصل به کارهای انجام شده پیرامون موضوع پایان نامه پرداخته شد تا اهداف دقیق تری از پروژه در جهت تکمیل و پوشش نقاط کاستی و ارائه نوآوری، مشخص شود. در فصل های بعدی، تاثیر پدیده مغناطیس زدایی در دو نوع ماشین سنکرون مغناطیس دائم که تاکنون به آنها پرداخته نشده است، مورد بررسی قرار می گیرد.

## فصل سوم

# معرفی ماشین مغناطیس دائم شار

## محوری نمونه

### ۳-۱. مقدمه

در این فصل موتور مغناطیس دائم شار محوری به عنوان ماشین نمونه انتخاب شده است. در این راستا ابتدا روند طراحی این موتور تشریح می‌شود. سپس بر پایه پارامترهای طراحی، مدلسازی ماشین انجام می‌گیرد.

### ۳-۲. ساختار موتور مغناطیس دائم شار محوری

به طور کلی ماشین‌های  $AFPM^1$  (شار محوری آهنربای دائم)، ماشین‌هایی با قطب صاف هستند که دارای ساختارهای متنوعی می‌باشند و به صورت ماشین‌های دارای چند دیسک، شیاردار یا بدون شیار و یا حتی بدون هسته طراحی می‌شوند. این ماشین‌ها به واسطه مزایای متعددی از جمله شکل تخت، ساختار فشرده، چگالی توان و راندمان بالایی که دارند، امروزه جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف از جمله صنایع نظامی و دریایی پیدا کرده‌اند و یک جایگزین مناسب برای ماشین‌های  $RFPM^2$  (شار شعاعی آهنربای دائم) به حساب می‌آیند. از جمله کاربردهای این ماشین‌ها می‌توان به کاربردهای حمل و نقل زمینی، زمینه‌های فضانوردی، صنایع هواپیمایی، صنایع کاغذ سازی، نیروی رانشی کشتی‌ها و زیر دریایی‌ها و دیگر محرک‌های صنعتی نام برد [۲۳، ۲۴].

ماشین‌های شار محوری به لحاظ جهت شار که در آنها بصورت موازی با محور مکانیکی ماشین است با ماشین‌های الکتریکی متداول متفاوت هستند. جریان عبوری از هر کویل استاتور در معرض شار ایجاد شده توسط آهنرباهای روی روتور قرار می‌گیرد و باعث ایجاد یک نیروی مماس بر محیط روتور می‌شود. برخی از ویژگی‌های ماشین‌های  $AFPM$  را به صورت زیر می‌توان بیان کرد.

---

1 - Axial Flux Permanent Magnet

2 - Disc-Type

### مزایا:

- ساختمان فشرده ماشین و طول بدنه کوتاه
- چگالی توان بالا
- راندمان بالا؛ بدلیل استفاده از آهنربای دائم و عدم وجود تلفات مس در روتور
- دارای ساختار مستحکم تر از نوع استوانه‌ای

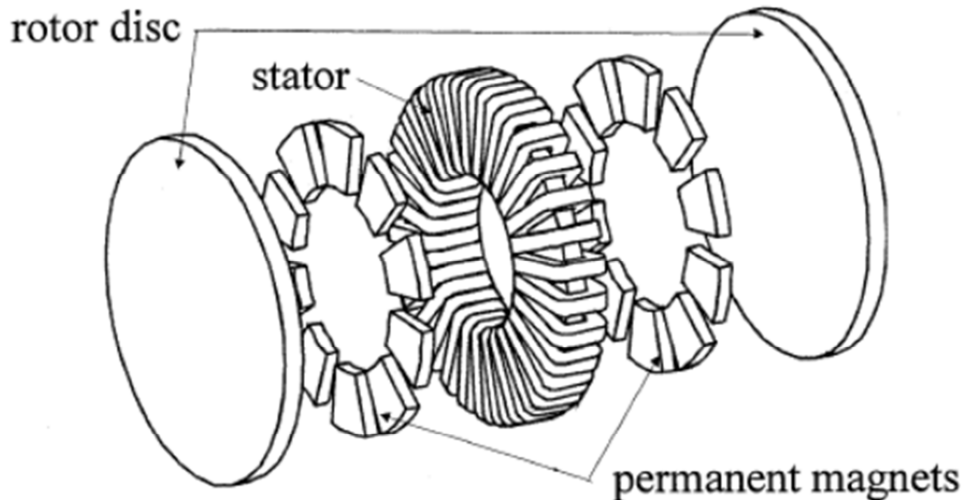
### معایب:

- تلفات بادخوری بالا در کاربردهای سرعت بالا که می‌تواند با قرار دادن ماشین در محفظه نسبتاً خلأ تا حدی کاهش یابد.
  - توپولوژی پیچیده ماشین با دو یا چند فاصله هوایی
- از نظر ساختاری، ماشین‌های AFPM توپولوژی‌های مختلفی دارند و می‌توانند به صورت ماشین‌های یک وجهی<sup>۱</sup>، دو وجهی<sup>۲</sup>، و چند لایه (چند دیسکی)<sup>۳</sup> با و بدون شیار آرمیچر، با و بدون هسته آرمیچر، با روتور PM داخلی و خارجی، با اتصال سطحی<sup>۴</sup> و درونی<sup>۵</sup> PMها، طراحی شوند. برای این بررسی، موتور شار محوری مغناطیس دائم بدون شیار نوع TORUS-NS (دو روتور و یک استاتور با قطب‌های ناهم نام مغناطیس دائم روبه‌روی هم) انتخاب شده است [۲۵]. این ماشین‌ها لایه‌ای بوده و به صورت محوری مونتاژ می‌شوند که این موضوع باعث سادگی ساخت آن می‌شود. در این ماشین‌ها هسته استاتور توسط پیچاندن یک نوار به صورت حلقه‌ای به آسانی ساخته می‌شود. در ماشین‌های بدون شیار، چگالی توان (یا گشتاور) بالا بوده و همین‌طور کاهش نویز صوتی ویژگی منحصر به فرد این نوع ماشین‌ها در مقایسه با ماشین‌های شیاردار بخصوص ماشین‌های شعاعی شیاردار می‌باشد.

---

1 - Single-Sided  
2 - Double-Sided  
3 - Multi-Stage (multi-disc)  
4 - Surface-Mounted  
5 - Buried

در شکل (۱-۳) طرح ساختار یک موتور TORUS-NS یک لایه نشان داده شده است. ماشین شامل یک استاتور می‌باشد که دو روتور دیسکی که حامل مغناطیس‌های دائم هستند، در دو طرف آن قرار گرفته‌اند. مغناطیس‌های دائم به صورت قوسی شکل با اتصال سطحی روی سطح داخلی دو دیسک روتور نصب شده‌اند.



شکل (۱-۳): طرح ساختار یک موتور TORUS-NS [۲۶]

### ۳-۳. فرآیند طراحی موتور AFPM

در این بخش به طراحی یک لایه نیم مگاوات از یک ماشین نمونه TORUS-NS یک یا چند لایه، با دو سطح ولتاژ نسبتاً پایین  $V_{ph} = 105/\sqrt{2}$  ولت در حالت سه فاز پرداخته می‌شود. این موتور یک لایه می‌تواند به صورت دو لایه به منظور تامین توان نامی 1 MW و چند لایه برای تامین توان‌های بیشتر (تا چند مگاوات) مونتاژ و بکار گرفته شوند. در حقیقت هر لایه به لحاظ تحلیلی یک موتور جداگانه با مشخصات دقیقاً یکسان با موتورهای لایه‌های دیگر است.

به طور کلی طراحی ماشین‌های الکتریکی با یک الگوریتم آغاز شده و تک به تک پارامترهای موتور محاسبه می‌شوند. جهت طراحی، لازم است تا یکسری از مشخصات نمونه طرح در اختیار باشد. به این ترتیب ابتدا پارامترهای اصلی طراحی که عبارتند از توان مورد نیاز، سطح ولتاژ و فرکانس نامی



موتور مشخص می‌شوند. در ادامه شرایط فیزیکی از قبیل محیط و نیز امکانات موجود ارزیابی می‌گردند. در گام بعدی مواد مورد استفاده مشخص شده تا طراحی بر پایه آن مواد پیش رود. پس از آن محدودیت‌های اصلی طراحی از قبیل محدودیت قطر خارجی ماشین، محدودیت در حداکثر دامنه ولتاژ ورودی و ... مشخص می‌گردند. یکسری از پارامترها نیز بر اساس خواسته‌های مسئله، انتخاب می‌شوند، که عبارت‌اند از:

- تعداد لایه‌های هر فاز (با توجه به توان مورد نیاز و تغذیه در دسترس)

- تعداد فازها (با توجه به توان مورد نیاز و تغذیه در دسترس)

- فرکانس تغذیه استاتور

- مقدار ماکزیمم Back emf هر فاز (با توجه به دامنه ولتاژ فاز ورودی یا سطح ولتاژ DC باتری)

- مقدار مؤثر ولتاژ فاز ورودی

- ماکزیمم مقدار چگالی شار مجاز در هسته (با توجه به منحنی مغناطیس‌شوندگی هسته)

- بارگذاری الکتریکی ماشین

- بازده ماشین

حال طراحی به کمک آنچه معادله خروجی می‌نامند، آغاز می‌شود. معادله خروجی حاوی همه جزئیات مهم یک طرح، در برگیرنده ابعاد فیزیکی و ضرایبی که وابسته به خواص مواد مورد استفاده است می‌باشد [۲۷]. برای بدست آوردن معادله خروجی ژنراتورها و موتورهای چند فاز متداول، با توجه به ولت-آمپر الکتریکی تولیدی یا مصرفی ماشین‌ها که بخشی از مشخصات مفروض آن‌هاست داریم:

$$S = m.V_{ph}.I_{ph} \quad (Volt - Ampere) \quad (1-3)$$

که در آن m تعداد فازها،  $V_{ph}$  و  $I_{ph}$  به ترتیب مقادیر rms ولتاژ و جریان نامی هر فاز می‌باشند. ولتاژ فاز با رابطه ۲-۳ داده می‌شود.

$$V_{ph} = 4.44\phi \cdot f \cdot N_{ph} \cdot k_w \quad (Volt) \quad (2-3)$$

که در آن  $f$  فرکانس ولتاژ ورودی یا تولیدی بر حسب هرتز،  $\phi$  شار بر قطب بر حسب وبر،  $N_{ph}$  تعداد دورهای وصل شده به طور سری در هر فاز و  $k_w$  ضریب سیم‌پیچی است. با جای‌گذاری معادله ۱-۳ در معادله ۲-۳ خواهیم داشت:

$$S = 4.44m \cdot \phi \cdot f \cdot N_{ph} \cdot I_{ph} \cdot k_w \quad (Volt - Ampere) \quad (3-3)$$

حال شار بر قطب با توجه به رابطه زیر بدست می‌آید:

$\phi =$  (چگالی شار فاصله هوایی متوسط)  $\times$  (سطح یک قطب)

$$\phi = B_{av} \cdot \frac{\pi DL}{p} \quad (Web) \quad (4-3)$$

که در آن  $L$  طول هسته استاتور و یا روتور،  $D$  قطر داخلی استاتور یا قطر خارجی روتور و  $p$  تعداد قطب‌های ماشین و  $B_{av}$  چگالی شار فاصله هوایی متوسط است که "بارگذاری مغناطیسی ویژه" نامیده می‌شود.

با جای‌گذاری معادله ۴-۳ در معادله ۳-۳ خواهیم داشت:

$$S = 4.44m \cdot B_{av} \cdot \frac{\pi DL}{p} \cdot f \cdot N_{ph} \cdot I_{ph} \cdot k_w \quad (Volt - Ampere) \quad (5-3)$$

بارگذاری الکتریکی ویژه ( $A$ ) به صورت آمپرهادی‌های بر متر استاتور، تعریف می‌گردد و لذا داریم:

$$A = \frac{m \cdot (2N_{ph}) \cdot I_{ph}}{\pi D} \quad (AmpereConductor / Meter) \quad (6-3)$$

با مرتب کردن رابطه بالا به صورت  $m \cdot (2N_{ph}) \cdot I_{ph} = \frac{\pi DA}{2}$  و جای‌گذاری در معادله ۵-۳

داریم:

$$S = 4.44m \cdot B_{av} \cdot \frac{\pi DL}{p} \cdot f \cdot k_w \cdot \frac{\pi DA}{2} \quad (Volt - Ampere) \quad (7-3)$$

که با بازنویسی رابطه ۷-۳ خواهیم داشت:

$$S = 4.44m.B_{av} \cdot \frac{\pi^2 D^2 L}{2p} \cdot f \cdot k_w \cdot A \quad (\text{Volt - Ampere}) \quad (8-3)$$

در آخر با توجه به رابطه زیر:

$$f = \frac{n_s \cdot p}{2} \quad (9-3)$$

که در آن  $f$  فرکانس و  $n_s$  سرعت سنکرون ماشین و  $p$  تعداد قطبهای ماشین می‌باشد، به

معادله نهایی زیر می‌رسیم:

$$S = 1.11\pi^2 \cdot n_s \cdot B_{av} \cdot A \cdot D^2 \cdot L \cdot k_w \quad (\text{Volt - Ampere}) \quad (10-3)$$

که این شکل کامل معادله خروجی است.

طراحی به کمک معادله خروجی و تخصیص مقادیر به عبارات بررسی شده در بالا شروع می‌شود.

بعضی از این پارامترها به عنوان مثال مقادیر  $S$  و  $n_s$  و  $k_w$  در یک رنج معین دیکته می‌شوند. حال

آنکه بقیه پارامترها (همچون  $B_{av}$  و  $A$ ) با خواص فیزیکی مواد و همچنین با طبیعت، اندازه و طرح

خود ماشین محدود می‌گردند.

اکنون بر اساس معادله (۱۰-۳) و رابطه بین طول هسته استاتور و یا روتور ( $L$ ) و قطر داخلی

استاتور یا قطر خارجی روتور ( $D$ ) (که به صورت تجربی بدست آمده است)، مقدار  $L$  و  $D$  تعیین می-

شوند.

پس از آن جزئیات سیم‌پیچی شامل نوع آرایش آن انتخاب و همچنین ابعاد دندانه‌ها و شیارها

محاسبه می‌گردند [۲۸]. بارگذاری الکتریکی موتور نقش عمده‌ای در طراحی سیم‌پیچ استاتور دارند.

سپس لازم است پارامترهای موتور از جمله ضخامت یوغ استاتور و روتور، تعداد دور سیم‌پیچی، طول

فاصله هوایی و ... نیز معین گردد. با مشخص شدن پارامترهای ذکر شده فوق، پارامترهای دیگر و

مشخصات الکتریکی ماشین بدست می‌آیند. برای جلوگیری از طولانی شدن گزارش از بیان جزئیات طراحی خودداری شده است.

### ۳-۴. موتور مغناطیس دائم شار محوری طراحی شده

از قبل این ماشین بر اساس الگوریتمی که پیش‌تر ذکر شد، طراحی شده است، و از آنجایی که از قبل نگرانی بروز پدیده مغناطیس‌زدایی وجود داشته، موتور را با Back EMF بزرگتری طراحی کردند. زیرا به دلیل پدیده مغناطیس‌زدایی و نوع ماده PPM که استفاده شده، این احتمال وجود داشت که Back EMF از مقداری که انتظار می‌رفت کمتر شود. مشخصات نامی ماشین مورد طراحی در جدول (۱-۳) آورده شده است.

جدول (۱-۳): مشخصات نامی داده شده برای ماشین مورد طراحی [۲۹]

مقدار	پارامتر	ردیف
۵۰۰۰۰۰	توان نامی موتور (watt)	۱
۳۰۰	سرعت نامی موتور (rpm)	۲
۳	تعداد فازها	۳
۵۵	فرکانس (Hz)	۴
ستاره	اتصال موتور	۵
۷۴.۲۴	ولتاژ موثر فاز (volt)	۶

برای طراحی موتور با توان خواسته شده در یک حجم کوچک، با توجه به سطح ولتاژ پایین و با توجه به اینکه برای موتور سیستم خنک‌کننده در نظر گرفته خواهد شد، حداکثر میزان بارگذاری الکتریکی و چگالی جریان انتخاب شده است. برای نسبت قطر داخلی به قطر خارجی نیز، با توجه به مراجع و ماشین‌هایی که قبلاً ساخته شده‌اند، مقدار ۰/۵۷۷ در نظر گرفته شده است [۲۹].

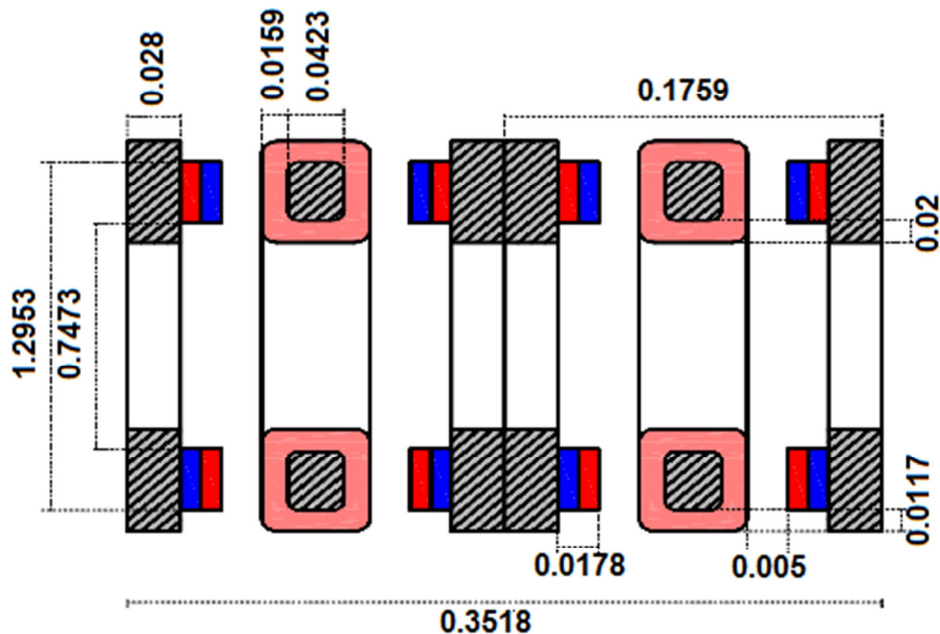
پارامترها و ابعاد موتور شار محوری طراحی شده در جدول (۲-۳) آورده شده است. در شکل (۲-۳) نیز ترسیم دو بعدی و ابعاد اساسی ماشین طراحی شده بر حسب متر نشان داده شده اند. موتور مورد نظر ۱ مگاوات است که از کوپل کردن دو ماشین ۵۰۰ کیلووات طراحی شده، تشکیل شده است. ماده انتخاب شده برای مگنت‌های ماشین از نوع NdFeB با چگالی شار پسماند ۱.۲ می‌باشد. برای سیم‌پیچی استاتور از مس و در هسته استاتور و روتور از 50JN400 استفاده شده است.

جدول (۲-۳): پارامترها و ابعاد ماشین طراحی شده [۲۹]

پارامترهای ماشین			
ردیف	پارامتر	واحد	مقدار
۱	تعداد زوج قطب‌ها	$p$	-
۲	بارگذاری الکتریکی کل	$A$	۶۰۰۰۰ [A/m]
۳	چگالی جریان	$J$	۱۰ [A/mm <sup>2</sup> ]
۴	تعداد مسیرهای موازی جریان در هر لایه	$a_p$	-
۵	چگالی شار فاصله هوایی	$B_g$	۰/۴۴ [T]
۶	نسبت قطر داخلی به قطر خارجی	$\lambda$	۰/۵۷۷
۷	ضریب شکل موج توان الکتریکی	$K_p$	۰/۵
۸	ضریب شکل موج جریان	$K_i$	۱/۴۱۴
۹	ضریب نیروی محرکه الکتریکی	$K_e$	$\pi$
۱۰	ضریب پر شوندگی مس	$K_{cu}$	۰/۴
۱۱	نسبت قوس قطب به گام قطب	$\alpha_i$	۰/۸۶
۱۲	ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آهن‌ربای دائم (NdFeB)	$\mu_{rPM}$	۱/۰۵
۱۳	چگالی شار پس‌ماند آهن‌ربای دائم (NdFeB)	$B_r$	۱/۲ [T]
۱۴	دامنه چگالی شار هسته روتور	$B_{cr}$	۱/۸ [T]
۱۵	ضریب نشت شار	$K_d$	۰/۶۳۳

۰/۶۹۷۴	[T]	$B_u$	بارگذاری مغناطیسی ویژه	۱۶
۰/۹۵	-	$\eta$	راندمان	۱۷
۱/۲۹۵۳	[m]	$D_o$	قطر خارجی	۱۸
۰/۷۴۷۳	[m]	$D_i$	قطر داخلی	۱۹
۱/۰۲۱۳	[m]	$D_g$	قطر متوسط فاصله هوایی	۲۰
۰/۰۰۵	[m]	$g$	فاصله هوایی	۲۱
۱/۵۱۷۳	[T]	$B_{cs}$	دامنه چگالی شار هسته استاتور	۲۲
۰/۰۴۲۳	[m]	$L_{cs}$	طول محوری هسته استاتور هر لایه	۲۳
۰/۰۲	[m]	$W_{cui}$	ضخامت شعاعی سیم‌پیچی انتهایی درون قطر داخلی	۲۴
۰/۰۱۱۷	[m]	$W_{cuo}$	ضخامت شعاعی سیم‌پیچی انتهایی ورای قطر خارجی	۲۵
۰/۰۱۵۸	[m]	$W_{cu}$	متوسط ضخامت شعاعی سیم‌پیچی انتهایی	۲۶
۰/۰۷۴۳	[m]	$L_s$	طول محوری استاتور هر لایه	۲۷
۰/۰۲۸	[m]	$L_{cr}$	طول محوری نصف هسته هر دیسک روتور	۲۸
۰/۰۱۷۸	[m]	$L_{PM}$	طول محوری آهن‌ربای دائم	۲۹
۰/۰۴۳۸	[m]	$L_r$	طول محوری هر روتور انتهایی	۳۰
۰/۱۷۵۹	[m]	$L_e$	طول محوری ماشین	۳۱
۰/۱۲۵	[m]	$w_{PMg}$	عرض آهن‌ربا در قطر متوسط	۳۲
۱۰۵	[V]	$E_{PK}$	مقدار دامنه ولتاژ القایی فاز	۳۳
۱۴	turn	$N_t$	تعداد دور سیم‌پیچی سری هر فاز در هر لایه	۳۴
۲۲۹۱/۸	[A]	$I_{rms}$	جریان موثر سیم‌پیچی استاتور هر لایه	۳۵
۲۰۸/۳۴	[A]	$I_a$	جریان هر مسیر موازی	۳۶
۰/۰۱۵۸۵	[m]	$l_w$	ضخامت لایه سیم‌پیچی	۳۷
۲۰/۸	[mm <sup>2</sup> ]	$s_a$	سطح مقطع هادی سیم‌پیچی	۳۸
۱	[mm]	$d_{str}$	قطر رشته هادی	۳۹
۰/۷۸۵	[mm <sup>2</sup> ]	$s_{str}$	سطح مقطع هر رشته هادی	۴۰

۴۱	تعداد رشته‌های هادی	$N_{str}$	-	۳۱
۴۲	طول مؤثر هسته استاتور در جهت شعاعی (طول آهنریا)	$L_i$	[m]	۰/۲۷۴
۴۳	طول متوسط یک دور سیم‌پیچی	$L_{1av}$	[m]	۰/۶۹۶۶



شکل (۳-۲): ابعاد اساسی ماشین طراحی شده (ابعاد بر حسب متر) [۲۹].

### ۳-۵. مدلسازی موتور مغناطیس دائم شار محوری طراحی شده

پس از پایان پروسه طراحی موتور مدل می‌شود. بهترین روش مدلسازی طرح که به منظور تایید ویژگی‌های مغناطیسی موتور و شناسایی نقاط ضعف و قوت آن صورت می‌گیرد، روش اجزای محدود است. با آنالیز ماشین طراحی شده به روش اجزای محدود، پارامترهای مدل گذرای ماشین طراحی شده از قبیل اندوکتانس‌های خودی و متقابل سیم‌پیچ‌های ماشین، شارهای پیوندی در هر فاز، Back EMF و ... بدست می‌آید.

به طور کلی مراحل شبیه سازی توسط نرم‌افزار اجزاء محدود عبارتند از:

۱- ترسیم مدل هندسی

۲- انتخاب روش تحلیل

۳- مشخص کردن اندازه المان‌های مش‌بندی

۴- تنظیم مشخصات مواد تمام بخش‌های جسم هندسی

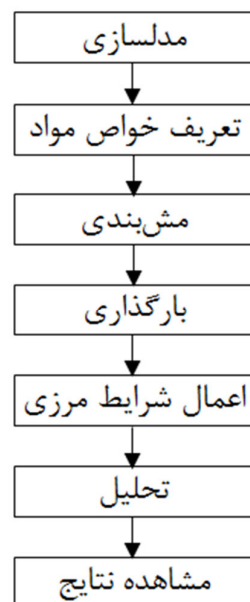
۵- مشخص کردن شرایط مرزی و منابع میدانی جهت روش تحلیل انتخاب شده

۶- تنظیم مشخصات تحلیل نظیر مدت زمان تحلیل، پله‌های زمانی و ...

۷- اجرای آنالیز

۸- مشاهده نتایج

از آنجایی که در این روش تحلیل، بارگذاری‌ها تابعی از زمان هستند، به این ترتیب توزیع میدان مغناطیسی بر روی مدل مورد بررسی نیز تابعی از زمان خواهد بود. به این ترتیب مدل‌هایی با حرکت-های خطی و دورانی باید به روش دینامیکی تحلیل شوند. مراحل انجام این تحلیل مغناطیسی، در فلوچارت شکل (۳-۳) نشان داده شده است.



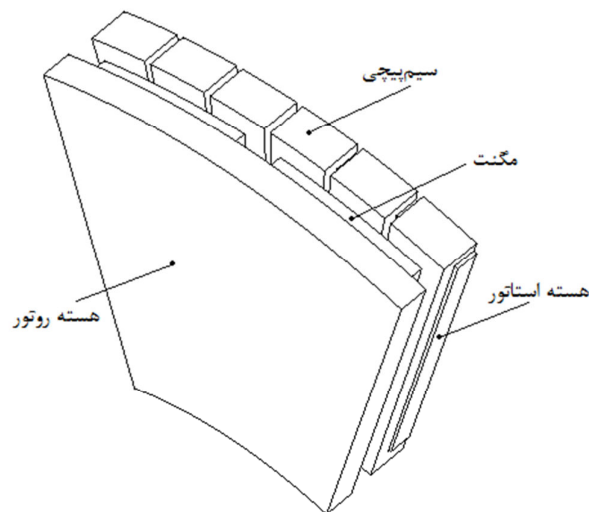
شکل (۳-۳): فلوچارت مراحل انجام تحلیل مغناطیسی



یکی از مهارت‌های کلیدی در روش اجزاء محدود این است که بتوان با ترسیم و مدل‌سازی تنها بخشی از موتور، به نتایج دلخواه دست یافت. این موضوع در مورد مسائل با هندسه‌های سه بعدی و آنالیزهای دینامیکی اهمیت دوچندان می‌یابد.

موتور AFPM مورد بررسی در این فصل یک موتور چند لایه، سه فاز و ۲۲ قطب است. هر لایه به لحاظ هندسی و مغناطیسی از هم مستقل هستند و لذا مدل‌سازی تنها یک لایه برای تحلیل رفتار کلی ماشین کفایت می‌کند. همچنین، الگوی مغناطیسی و هندسی یک جفت قطب در هر لایه به تعداد جفت قطب‌های هر لایه، تکرار می‌شود. لذا مدل‌سازی تنها یک جفت قطب از یک لایه برای رسیدن به اهداف مسئله کافی است. بنابراین با توجه به تقارن هندسی موتور، برای سادگی محاسبات و کاهش زمان اجرای آنالیز، تنها یک جفت قطب ماشین را مدل می‌کنیم.

برای انجام این آنالیز، هندسه ماشین مورد بررسی را در نرم‌افزار JMAG مدل کنیم. یک جفت قطب از یک لایه ماشین مطابق شکل (۳-۴) در نرم‌افزار به صورت سه بعدی مدل شده است.



شکل (۳-۴): مدل‌سازی تنها یک جفت قطب از یک لایه موتور AFPM در نرم‌افزار JMAG

پس از اینکه مدل‌سازی هندسه مساله انجام شد، عمل مش‌بندی بر روی آن انجام می‌گردد تا مدل به یک مدل اجزای محدود تبدیل شود. شکل (۳-۵) مش‌بندی سه بعدی انجام شده روی موتور AFPM مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۵): مش‌بندی انجام شده روی یک جفت قطب از موتور AFPM مورد بررسی

با جریان دهی یکی از فازها، اندوکتانس‌های خودی و متقابل را بدست می‌آورند. در یک سیستم خطی مغناطیسی، اندوکتانس خودی هر سیم‌پیچ عبارت است از نسبت شار پیوندی یک سیم‌پیچ به جریانی که از همان سیم‌پیچ عبور می‌کند، در حالی که جریان سیم‌پیچ‌های دیگر صفر باشد. اندوکتانس متقابل عبارت است از نسبت شار پیوندی یک سیم‌پیچ به جریانی که از سیم‌پیچ دوم عبور می‌کند، در شرایطی که جریان سیم‌پیچ‌های دیگر از جمله همان سیم‌پیچی که شار پیوندی برای آن تعیین می‌شود، صفر باشد.

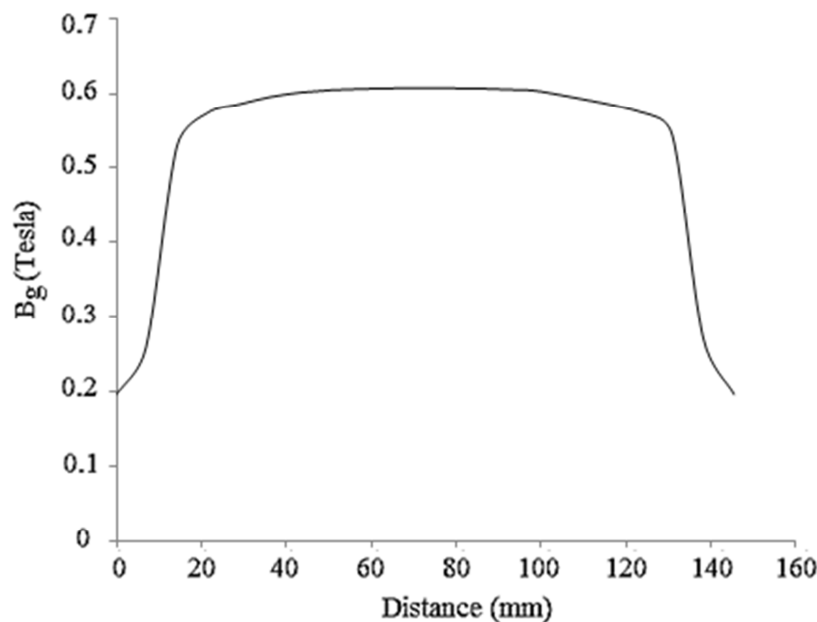
سپس مدار معادل هر فاز ماشین استخراج می‌گردد. در پایان مدل دینامیکی ماشین در نرم‌افزار Matlab شبیه‌سازی شده و مشخصه‌های مهم ماشین نمونه بررسی و الگوریتم طراحی اولیه برای بار دوم مورد ارزیابی و تایید قرار می‌گیرد. در صورتی که ماشین طراحی شده به لحاظ بعضی مشخصات عملکردی قابل قبول نباشد ماشین مجدداً طراحی می‌شود.

سپس به محاسبه شارهای پیوندی در هر فاز ناشی از اثر آهنرباهای دائم بر روی کویل‌های آرمیچر و در شرایطی که جریان سیم‌پیچ‌ها صفر بودند، پرداخته شد. و بر اساس آن ولتاژ القایی در هر فاز

محاسبه گشت. به این ترتیب مقادیر پارامترهای مدل طراحی شده از قبیل مقدار ولتاژ القایی در هر فاز و ضریب توان موتور محاسبه شدند.

بر اساس نتایج بدست آمده، مقدار موثر Back EMF، ۱.۳۳۹۶ پریونیت شد. همچنین با توجه به روابط مشاهده شد که موتور در ضریب توان پیش فازی برابر ۰.۸۴ در بار نامی کار می کند [۲۹].

در شکل (۳-۶) توزیع چگالی شار مغناطیسی زیر یک قطب بر حسب فاصله تا محور عرضی رسم شده است. محور عمودی، چگالی شار مغناطیسی در امتداد خط قرار گرفته در وسط فاصله هوایی بر حسب تسلا و محور افقی فاصله هر نقطه فاصله هوایی از محور عرضی بر حسب میلیمتر است.



شکل (۳-۶): توزیع چگالی شار مغناطیسی زیر یک قطب در حالت جریان صفر استاتور

### ۳-۶. جمع بندی فصل

در این فصل روند طراحی و مدلسازی یک موتور مغناطیس دائم شار محوری به عنوان نمونه مورد مطالعه، ارائه شد. در فصل بعد به تفصیل نشان داده می شود که این روش طراحی و مدلسازی ماشین قابل اطمینان نبوده و رفتار دینامیکی گذرای ماشین را به درستی مدل نمی کند. زیرا در فرآیند طراحی ماشین پدیده مغناطیس زدایی منظور نشده است.

## فصل چهارم

# اصلاح الگوریتم مدلسازی موتور

# مغناطیس دائم شار محوری با در نظر

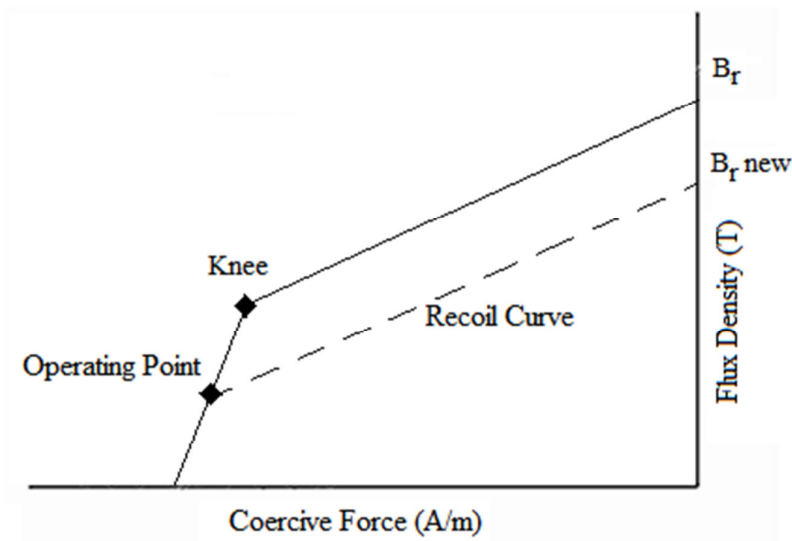
# گرفتن پدیده مغناطیس زدایی

#### ۴-۱. مقدمه

همان طور که در فصل پیش تشریح شد، موتور مغناطیس دائم شار محوری نمونه بر اساس الگوریتم مشخصی طراحی شد. این الگوریتم به این صورت است که یک مقدار برای چگالی شار پسماند در نظر می گیرند. با این چگالی شار پسماند ثابت، مدل دینامیکی کامل ماشین بدست می آید. رفتار دینامیکی گذرای ماشین بر اساس همین مدل بنا می شود. نهایتاً اگر روی طرح قضاوتی انجام بگیرد بر همین اساس است.

این کار نسبتاً اشکال برانگیز است، به خصوص اگر منحنی مغناطیس زدایی ماده PM انتخابی، خطی نباشد (شکل ۴-۱). معمولاً زمانی که ماشین بی بار کار می کند، نقطه کار PM در ناحیه خطی قرار می گیرد و تغییرات بسیار کمی دارد. اما زمانی که ماشین زیر بار کار می کند، جریانی از سیم-پیچی آرمیچر عبور می کند که تولید شار مغناطیسی می کند. این شار روی شار PM ها اثر گذاشته، سبب جابه جایی نقطه کار PM می گردد. بسته به اینکه شار عکس العمل آرمیچر در چه جهتی باشد، نقطه کار روی منحنی مغناطیس زدایی به سمت بالا یا پایین حرکت می کند. اگر میزان و جهت عکس-العمل آرمیچر به حدی برسد که نقطه کار PM پایین تر از زانویی منحنی قرار بگیرد، مغناطیس زدایی برگشتناپذیر رخ می دهد. به این ترتیب حتی زمانی که عامل مغناطیس زدای خارجی از بین برود، نقطه کار به حالت اولیه باز نمی گردد. بلکه روی یک منحنی جدید به نام منحنی بازگشت حرکت خواهد کرد. به این ترتیب مقدار چگالی شار پسماند PM تغییر می کند. اگر میزان این تغییرات چشمگیر باشد، این روش طراحی معمول ماشین های PM، منجر به نتایج غیر دقیق خواهد شد. در بعضی موارد حتی مشاهده شده که در اثر بروز این پدیده در ماشین، دامنه و شکل موج Back EMF و مقدار ضریب توان ماشین نیز تغییر می کند. در این فصل، یک الگوریتم تکراری جهت طراحی و مدلسازی ماشین نمونه با در نظر گرفتن پدیده مغناطیس زدایی ارائه می شود و صحت این موضوع به کمک روش تحلیل اجزای محدود بر روی ماشین نمونه مورد بررسی قرار می گیرد. در

نهایت نشان داده خواهد شد که مشخصه‌های بدست آمده به روش طراحی کلاسیک تا چه اندازه با مشخصه‌های واقعی ماشین تفاوت خواهند داشت.



شکل (۴-۱): منحنی مغناطیس‌زدایی

#### ۴-۲. الگوریتم طراحی و مدل‌سازی پیشنهادی با در نظر گرفتن مغناطیس‌زدایی

در این الگوریتم یک چگالی‌شار پسماند ( $B_r$ ) ثابت را در نظر می‌گیریم. بر اساس این  $B_r$  و به روش طراحی کلاسیک محاسبات لازم را انجام داده و اندوکتانس‌های خودی و متقابل، دامنه و شکل موج Back EMF را بدست می‌آوریم. با توجه به Back EMF بدست آمده، مدل دینامیکی کامل ماشین استخراج می‌شود. با استفاده از این مدل، عملکرد ماشین در بار کامل محاسبه می‌گردد. این محاسبات شامل مقادیر لحظه‌ای جریان‌های استاتور و موقعیت لحظه‌ای روتور می‌باشند. سپس این مقادیر لحظه‌ای در یک بازه زمانی مشخص، مجدداً به مدل اجزاء محدود ماشین اعمال و حرکت نقطه کار مغناطیس دائم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورتی که موقعیت نقطه کار روی منحنی مغناطیس‌زدایی تغییر کند و در یک نقطه دیگری قرار گیرد، چگالی‌شار پسماند PM باید مجدداً محاسبه شود. سپس اندوکتانس‌های خودی و متقابل، دامنه و شکل موج Back EMF، با مقدار جدید  $B_r$  محاسبه می‌شوند.

اما این محاسبات کافی نیست. زیرا زمانی که مغناطیس‌زدایی در ماشین رخ می‌دهد، مدل دینامیکی ماشین نیز تغییر کرده است. در صورتی که مقادیر جریان‌های استاتور و موقعیت‌های مختلف روتور بر اساس مدل دینامیکی بدست آمده از الگوریتم کلاسیک محاسبه شده‌اند. به همین علت باید جریان‌ها و موقعیت‌های مختلف روتور را تصحیح و تحلیل مغناطیس‌زدایی را تکرار کرد. روش تکرار ساده‌ای که در ادامه تشریح شده است برای حل این مسئله کافی است.

بر اساس مقدار جدید  $B_r$ ، مدل دینامیکی ماشین اصلاح می‌شود. مجدداً با استفاده از این مدل، عملکرد ماشین در بار کامل محاسبه می‌گردد و مقادیر لحظه‌ای بدست آمده به مدل اجزاء محدود ماشین اعمال و حرکت نقطه کار مغناطیس دائم مورد بررسی قرار می‌گیرد. این روند را تا جایی تکرار می‌کنیم که موقعیت نقطه کار PM روی منحنی مغناطیس‌زدایی تثبیت شود. در این حالت، چگالی-شار پسماند مغناطیس دائم دیگر تغییر نخواهد کرد. در پایان مدل دینامیکی کامل ماشین، بر اساس مقدار  $B_r$  نهایی استخراج خواهد شد و به این ترتیب مشخصه‌های واقعی ماشین بدست می‌آید. اکنون می‌توان روی مدل ارائه شده و رفتار دینامیکی گذرای ماشین قضاوت درستی داشت. شکل (۴-۲) فلوچارت الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲): الگوریتم طراحی و مدلسازی پیشنهادی

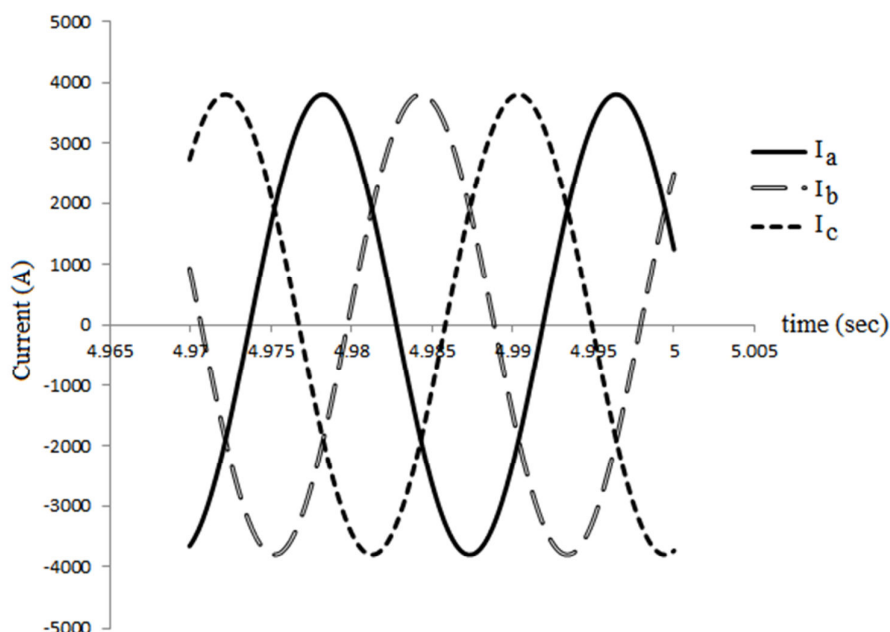
### ۴-۳. پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی روی ماشین نمونه

در این بخش الگوریتم پیشنهادی که پیش‌تر شرح داده شد را روی موتور شار محوری مغناطیس دائم بررسی شده در فصل قبل، پیاده می‌کنیم. کارایی الگوریتم پیشنهادی، باید بر اساس یک روش



عددی دقیق مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این منظور، روش تحلیل اجزای محدود به کمک نرم افزار JMAG مورد استفاده قرار گرفته است.

پس از این که طراحی اولیه انجام شد (طبق روش طراحی کلاسیک ماشین‌های PM)، بر اساس پارامترهای بدست آمده، مدلسازی ماشین صورت گرفت. هدف از این مدلسازی، پیش‌بینی عملکرد موتور در حالت ماندگار بار کامل شامل محاسبات مربوط به مقادیر لحظه‌ای جریان‌های استاتور و موقعیت لحظه‌ای روتور می‌باشد.



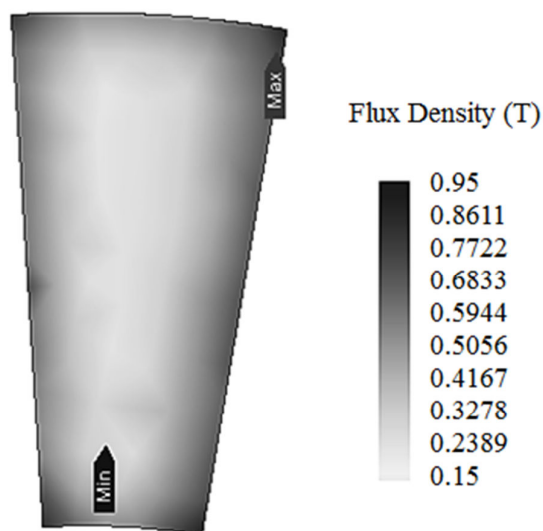
شکل (۴-۳): جریان هر یک از فازهای استاتور در بار کامل

سپس مقادیر لحظه‌ای محاسبه شده را در یک بازه زمانی مشخص، مجدداً به مدل اجزاء محدود ماشین اعمال و حرکت نقطه کار مغناطیس دائم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

هنگامی که روتور ماشین می‌چرخد، در سیم‌پیچ‌های آرمیچر آن ولتاژی القاء می‌شود که باعث کشیده شدن جریانی از منبع در حالت موتوری می‌شود. این جریان باعث بوجود آمدن یک میدان مغناطیسی می‌شود که شکل میدان مغناطیسی اصلی روتور را تغییر می‌دهد. این اثر نیروی محرکه مغناطیسی آرمیچر بر روی توزیع فضایی شار میدان اصلی در فاصله هوایی، عکس العمل آرمیچر

نامیده می‌شود. این نیرو محرکه مغناطیسی آرمیچر باعث کاهش چگالی شار مغناطیس‌های دائم می‌گردد.

با توجه به مدل‌سازی سه بعدی انجام شده، رفتار ماشین مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل (۴-۴)، توزیع چگالی شار را در داخل مگنت نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشهود است، در بخش‌هایی از مگنت که شار عکس‌العمل آرمیچر در خلاف جهت شار PM است، چگالی شار مغناطیس‌دائم به شدت کاهش یافته است.

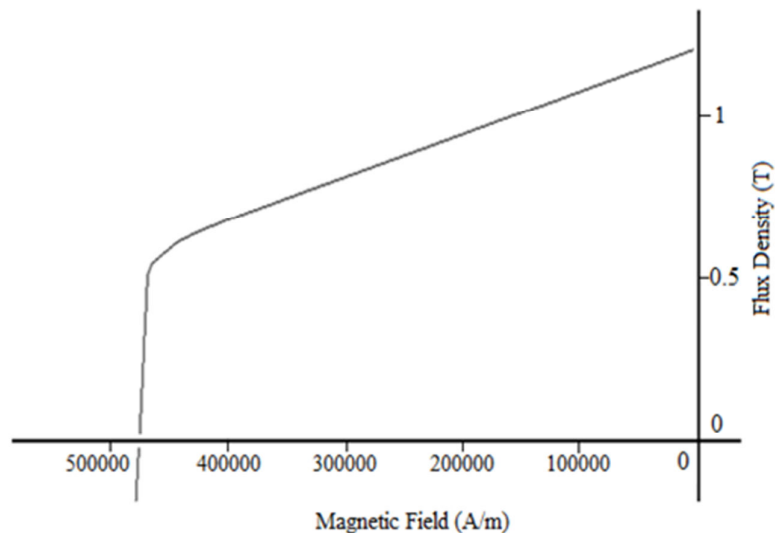


شکل (۴-۴): توزیع چگالی شار مگنت در بار کامل

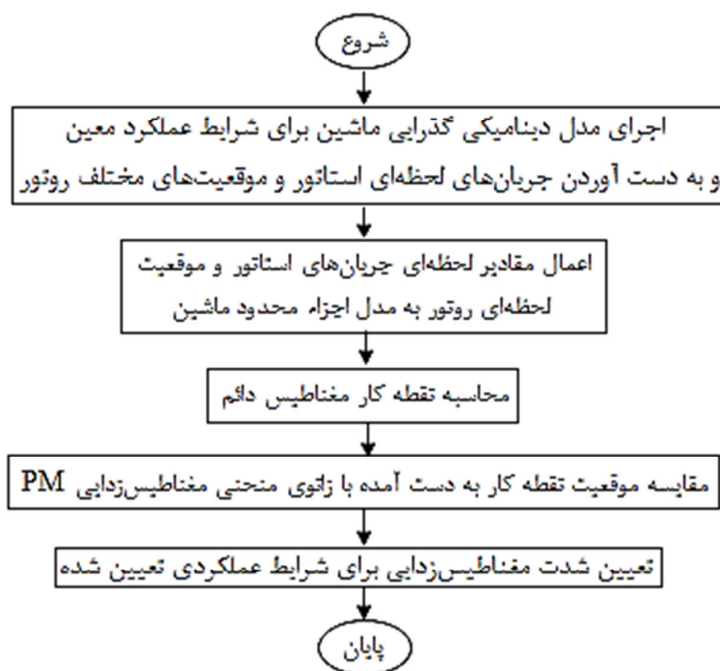
منحنی مغناطیس‌زدایی ماده NdFeB به کار رفته به عنوان مغناطیس دائم، در شکل (۴-۵) آمده است. همان‌طور که مشهود است، چگالی شار نقطه زانویی آن تقریباً ۰.۵۵ T می‌باشد.

برای بررسی پدیده مغناطیس‌زدایی در مگنت مطابق فلوچارت نشان داده شده در شکل (۴-۶)، باید موقعیت نقطه کار مغناطیس دائم را بدست آورده و با زانوی منحنی مغناطیس‌زدایی ماده مقایسه کنیم. در صورتی که نقطه کار بالای نقطه زانویی منحنی قرار گیرد، مغناطیس‌زدایی برگشت‌ناپذیر رخ نداده است و آنالیز به پایان می‌رسد. اما در صورتی که نقطه کار PM پایین‌تر از نقطه زانویی قرار گیرد،

مغناطیس زدایی برگشت ناپذیر رخ داده است. در این حالت شدت مغناطیس زدایی با استفاده از رابطه (۱-۴) محاسبه می شود.



شکل (۴-۵): منحنی مغناطیس زدایی NEOMAX-42 (100 °c)



شکل (۴-۶): تحلیل مغناطیس زدایی

$$Demagnetization\ Ratio = \left(1 - \frac{B_{r\ new}}{B_{r\ initial}}\right) \times 100 \quad (1-4)$$

درصد میانگین ناحیه  $(1 - B_{r\ initial}) \times$  (درصد میانگین ناحیه وامغناطش شده)  $+ B_{r\ new} = B_r'$  (وامغناطش شده)

که در آن:

چگالی شار پسماند مگنت پیش از مغناطیس زدایی:  $B_{r\ initial}$

میانگین چگالی شار پسماند ناحیه وامغناطش شده:  $B_r'$

چگالی شار پسماند مگنت پس از مغناطیس زدایی:  $B_{r\ new}$

در مرحله بعدی، چگالی شار پسماند جدید ماده مغناطیس دائم را به مدل اجزای محدود ماشین اعمال کرده، و شار پیوندی در هر فاز را مجدداً محاسبه می‌کنیم. بر اساس مقادیر بدست آمده برای شار پیوندی، ولتاژ القایی هر فاز نیز محاسبه می‌شود. سپس محاسبات انجام گرفته به مدل دینامیکی ماشین اعمال و مقادیر جدیدی برای جریان‌های استاتور و موقعیت لحظه‌ای روتور بدست می‌آید. سپس این مقادیر را به مدل اجزای محدود ماشین اعمال کرده و آنالیز مغناطیس‌زدایی مجدد اجرا می‌شود. این روند را تا جایی ادامه می‌دهیم که مقدار ولتاژ القایی تثبیت گردد. معمولاً تعداد تکرارهای زیادی لازم نیست و با چند تکرار به نتایج مورد انتظار می‌رسیم.

#### ۴-۳-۱. مقایسه نتایج بدست آمده از مدلسازی ماشین نمونه با در نظر گرفتن پدیده مغناطیس‌زدایی و بدون در نظر گرفتن آن

همان‌طور که پیش‌تر شرح داده شد، طراحی اولیه موتور شار محوری مغناطیس دائم بر مبنای روش طراحی کلاسیک ماشین‌های PM صورت گرفته و به این ترتیب مشخصه‌های ماشین استخراج شده بود.

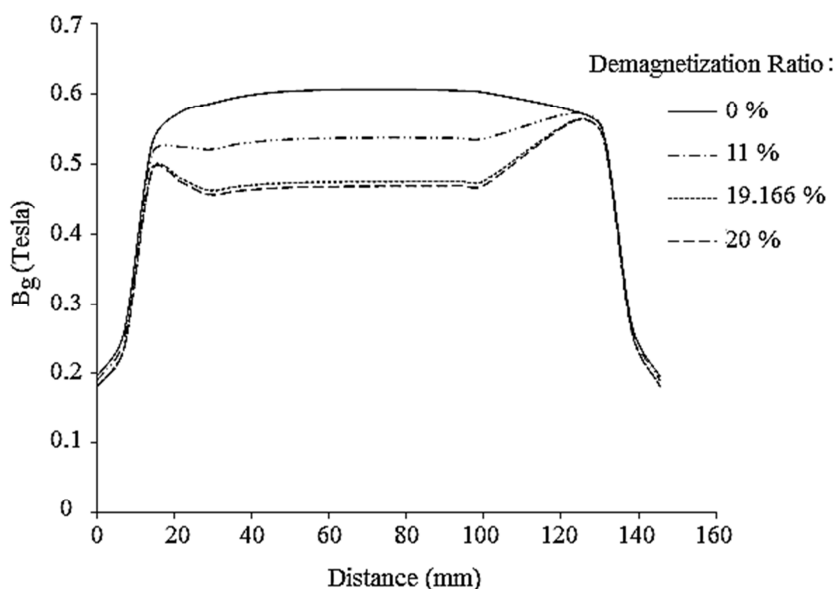
به عنوان یه ایده پیشنهادی، ما یک روش تکراری را روی طراحی اولیه پیاده کردیم. بر اساس نتایج بدست آمده، رفت و برگشت بین مدل دینامیکی و مدل اجزای محدود ماشین مرتباً انجام گرفته تا این که پس از ۴ تکرار مقدار Back EMF تثبیت شد.

درصد مغناطیس‌زدایی و مقدار موثر ولتاژ القایی در هر تکرار در جدول (۴-۱) آمده است. با توجه به نتایج، بروز پدیده مغناطیس‌زدایی در مگنت‌ها سبب کاهش مقدار موثر Back EMF به میزان ۱۳.۱۲ درصد شده است.

در شکل (۴-۷) توزیع چگالی شار مغناطیسی در امتداد خط میانی فاصله هوایی بر حسب تسلا، در هر تکرار نشان داده شده است. همان‌طور که مشهود است، شکل موج چگالی شار فاصله هوایی در اثر پدیده مغناطیس‌زدایی از حالت دوزنقه‌ای و متقارن خود خارج شده است.

جدول (۴-۱): مقایسه نتایج بدست آمده از روش مدلسازی تکراری با روش مدلسازی معمول

تکرار	درصد مغناطیس‌زدایی	مقدار موثر ولتاژ القایی در هر فاز بر حسب پریونیت
مرحله طراحی اولیه	۰	۱.۳۳۹۶
۱	۱۱	۱.۲۸۶۳
۲	۱۹.۱۶۶	۱.۲۰۵
۳	۲۰	۱.۱۶۳۸
۴	۲۰	۱.۱۶۳۸



شکل (۴-۷): توزیع چگالی شار مغناطیسی در امتداد خط میانی فاصله هوایی

همچنین بر اساس جدول (۴-۲) مشاهده می‌شود که با توجه به طراحی تکراری انجام شده، ضریب توان برابر ۰.۹۹۷۷ پیشفاز بدست آمده است. در حالیکه این مقدار طبق روش کلاسیک برابر ۰.۸۴ پیشفاز می‌باشد.

جدول (۴-۲): مقدار ضریب توان در بار نامی

تکرار	درصد مغناطیس‌زدایی	مقدار ضریب توان
مرحله طراحی اولیه	۰	۰.۸۴ پیشفاز
۴	۲۰	۰.۹۹۷۷ پیشفاز

طبق محاسبات انجام شده مشاهده می‌شود که مقادیر بدست آمده برای Back EMF و ضریب توان در روش طراحی کلاسیک با روش طراحی پیشنهادی اختلاف زیادی دارند. حال چنانچه طراحی بر مبنای روش کلاسیک انجام شود بدیهی است که مشخصه‌های بدست آمده برای ماشین دچار خطا می‌شود. به گونه‌ای که شاید عملکرد مشخصی که از ماشین انتظار می‌رود، به درستی انجام نشود.

#### ۴-۴. جمع‌بندی

در این فصل طراحی و مدلسازی ماشین با در نظر گرفتن مغناطیس‌زدایی مطرح شد. سپس الگوریتم پیشنهادی در ماشین نمونه پیاده و نتایج حاصل از آن با طراحی کلاسیک مورد مقایسه قرار گرفت. در مقایسه‌ای که انجام شد دیده شد که بکارگیری روش پیشنهادی در مدلسازی ماشین منجر به نتایج دقیق‌تری می‌شود.

## فصل پنجم

# بررسی پدیده مغناطیس‌زدایی در موتور مغناطیس دائم شار محوری در شرایط عملکردی خاص

## ۵-۱. مقدمه

در فصل قبل، تاثیر پدیده مغناطیس‌زدایی در عملکرد موتور AFPM در شرایط ماندگار با استفاده از تحلیل اجزای محدود بدست آمد. هدف از این فصل، مطالعه دقیق‌تر رفتار موتور مغناطیس دائم شار محوری در مواجهه با پدیده مغناطیس‌زدایی در شرایط عملکردی خاص و رژیم گذرایی و ارائه راه-کارهایی جهت کاهش احتمال بروز این پدیده در ماشین می‌باشد. با شبیه‌سازی ماشین به روش اجزای محدود، نتایج مورد بررسی قرار داده می‌شوند. در ادامه به بررسی جداگانه چند رژیم عملکردی خواهیم پرداخت.

## ۵-۲. پدیده مغناطیس‌زدایی در حالت مدار باز

در حالت مدار باز که عکس العمل آرمیچر صفر است، احتمال دارد که خاصیت مغناطیسی PMها به دلیل وجود جریان‌های ادی تضعیف شود. برای بررسی این موضوع در حالتی که هر سه فاز استاتور از تغذیه قطع می‌باشند (جریان‌های سه فاز صفر هستند) و روتور با سرعت نامی در حال چرخش است، با شبیه‌سازی موتور طراحی شده در نرم افزار اجزای محدود JMAG، مقدار چگالی شار در سرتاسر نقاط ماده مغناطیس دائم محاسبه می‌شود.

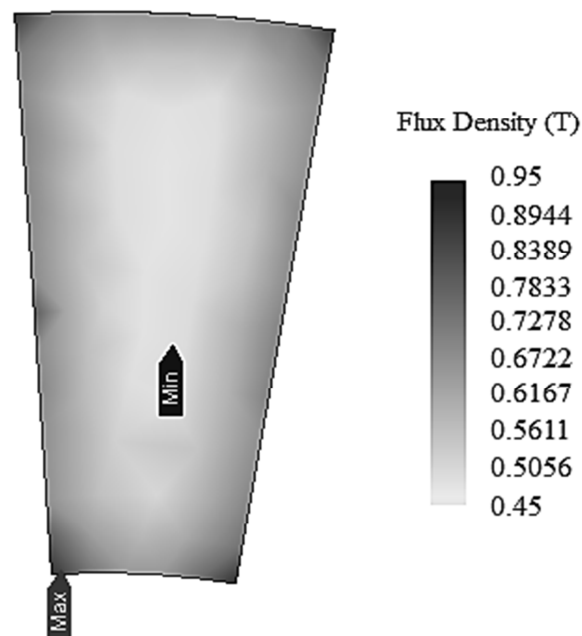
شکل (۵-۱) چگونگی توزیع چگالی شار مغناطیسی در مگنت را در حالت مدار باز نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشهود است، پدیده مغناطیس‌زدایی در بخش‌های میانی مگنت رخ داده است؛ اگرچه شدت آن قابل توجه نمی‌باشد. با توجه به محاسبات انجام گرفته بر اساس روش آنالیز مغناطیس‌زدایی و با استفاده از رابطه (۴-۱)، حدود ۳۰.۸۹ درصد از PM با شدت ۲.۹۵ درصد و امغانطش شده است.

## ۵-۳. پدیده مغناطیس‌زدایی در شرایط اتصال کوتاه سه فاز

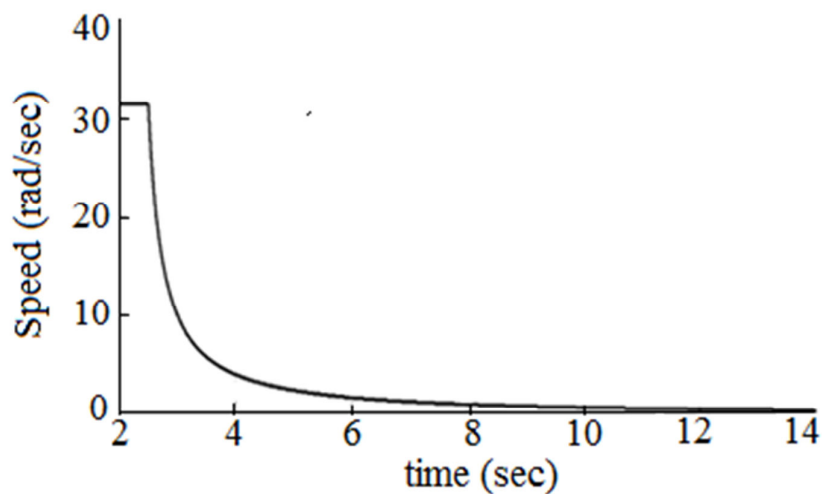
یکی از مدهای عملکردی موتورها، ترمزگیری می‌باشد. عمل توقف، با قطع موتور از تغذیه انجام می‌گیرد. شتابگیری منفی (کاهش سرعت) موتور مغناطیس دائم شار محوری در هنگامی که از



تغذیه قطع شده است در شکل (۲-۵) نشان داده شده است. با توجه به شکل در حدود ۱۰ ثانیه طول می‌کشد تا موتور متوقف شود؛ که این زمان نسبتاً طولانی است.



شکل (۱-۵): توزیع چگالی شار مغنت در حالت مدار باز



شکل (۲-۵): شتاب‌گیری منفی موتور AFPM در هنگام قطع شدن از تغذیه

در بعضی شرایط اضطراری لازم است موتور سریعاً متوقف شود. در موتور AFPM توقف اضطراری با قطع کردن موتور از تغذیه و اتصال کوتاه کردن ترمینال‌های آن حاصل می‌شود. از تقابل شار

مغناطیسی ثابت روتور و شار مغناطیسی تولیدی در هنگام اتصال کوتاه سه فاز آرمیچر، گستاوری به وجود می‌آید که باعث توقف موتور و عمل ترمزگیری می‌گردد [۳۰، ۳۱].

به طور کلی تغییرات جریان آرمیچر در ماشین‌های سنکرون در هنگام بروز اتصال کوتاه سه فاز ناگهانی، از رابطه (۱-۵) تبعیت می‌کند [۳۲].

$$i_a(t) = I_{ac}(t) \sin(\omega_r t + \lambda) - I_h(t) \sin(2\omega_r t + \lambda) - I_{dc}(t) \sin \lambda \quad (1-5)$$

where

$$I_{ac}(t) = V_o \sqrt{2} \left[ \frac{1}{X_d} + \left( \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left( \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right]$$

$$I_{dc}(t) = \frac{V_o}{\sqrt{2}} \left( \frac{1}{X''_d} + \frac{1}{X''_q} \right) e^{-\frac{t}{T_a}}$$

and

$$I_h(t) = \frac{V_o}{\sqrt{2}} \left( \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X''_q} \right) e^{-\frac{t}{T_a}}$$

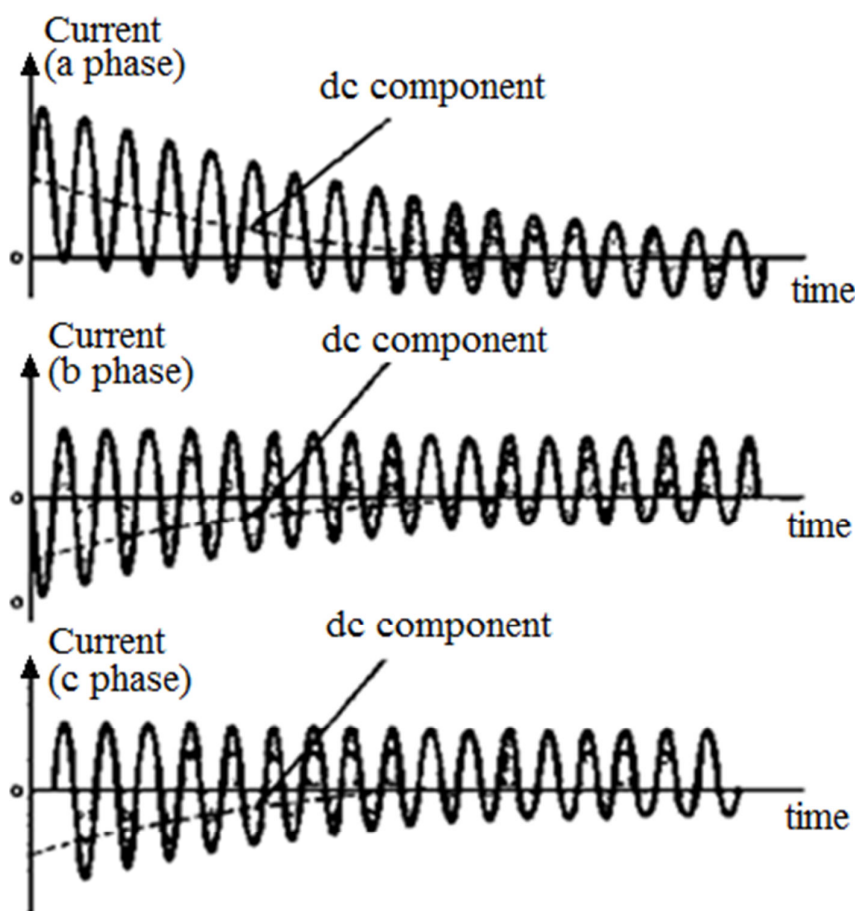
که در آن  $\omega_r$ ، سرعت روتور بر حسب رادیان بر ثانیه و  $V_o \sqrt{2}$ ، مقدار ماکزیمم ولتاژ ترمینال قبل از وقوع خطا بر حسب پریونیت می‌باشد.

شکل (۳-۵) نیز تغییرات جریان‌های سه فاز آرمیچر ماشین‌های سنکرون را در هنگام اتصال کوتاه شدن نشان می‌دهد [۳۲، ۳۳]. برای هر فاز مقدار شکل موج جریان در لحظه وقوع اتصال کوتاه فرق می‌کند. جریان اتصال کوتاه در چند سیکل اولیه خیلی بیشتر از سیکل‌های بعدی می‌باشد و علت آن این است که شار مغناطیسی در فاصله هوایی ماشین در لحظه اتصال کوتاه بسیار زیاد است.

در بحث توقف اضطراری این نکته باید در نظر گرفته شود که توان تولید شده در فرآیند توقف ناگهانی نباید از توان نامی موتور بیشتر گردد، مگر این که زمان ترمزگیری افزایش داده شود تا به موتور آسیب حرارتی وارد نشود. توان ترمزگیری ماکزیمم بر اساس رابطه (۲-۵) محاسبه می‌گردد [۳۴، ۳۵، ۳۶].

$$P_b = \frac{KE}{t_d} = \frac{0.5 \times J_T \times \omega_{rated} (\omega_{rated} - \omega_{stop})}{t_d} \quad (۲-۵)$$

که در آن KE تغییرات انرژی جنبشی،  $J_T$  اینرسی کل بر حسب  $kg.m^2$ ،  $\omega_{rated}$  سرعت زاویه‌ای نامی بر حسب  $rad/sec$ ،  $\omega_{stop}$  سرعت در زمان توقف (که به صورت ایده‌آل صفر در نظر گرفته می‌شود) و  $t_d$  مدت زمان کاهش سرعت از  $\omega_{rated}$  به  $\omega_{stop}$  می‌باشد.



شکل (۳-۵): تغییرات جریان سه فاز آرمیچر ماشین‌های سنکرون در هنگام اتصال کوتاه شدن [۳۲، ۳۳]

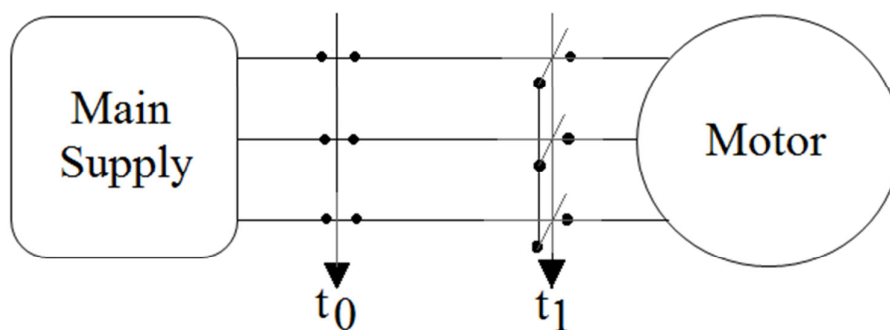
با توجه به شکل (۳-۵)، در هنگام بروز اتصال کوتاه سه فاز در آرمیچر، در یک بازه زمانی کوتاه جریان هجومی‌ای از سیم‌پیچ استاتور عبور می‌کند، به گونه‌ای که میدان مغناطیسی بزرگی در آرمیچر تولید می‌کند. این عکس‌العمل آرمیچر در تقابل با شار PMهای موجود در سطح روتور، باعث تضعیف مغناطیس آنها می‌گردد.

برای بررسی میزان تاثیر پدیده مغناطیس‌زدایی روی PMها در زمان توقف اضطراری به ترتیب زیر

عمل می‌کنیم:

مطابق آنچه در شکل (۴-۵) نشان داده شده است، زمانی که موتور در شرایط بار کامل کار می‌کند،

در یک لحظه موتور را از تغذیه قطع کرده و پس از آن ترمینال‌های آن را اتصال کوتاه می‌کنیم.



شکل (۴-۵): پروسه توقف اضطراری

در ثانیه ۲.۵ام، موتور از تغذیه قطع شده و لحظه کوتاهی پس از آن سه فاز آرمیچر اتصال کوتاه

شده‌اند. شکل موج جریان هر فاز استاتور در زمان توقف اضطراری در شکل (۵-۵) نشان داده شده

است. شکل (۶-۵) نیز تغییرات سرعت موتور در این مدت را نشان می‌دهد. این محاسبات به مدل

اجزای محدود ماشین اعمال شده و نقطه‌کار در قسمت‌های مختلف PM محاسبه می‌گردد. سپس

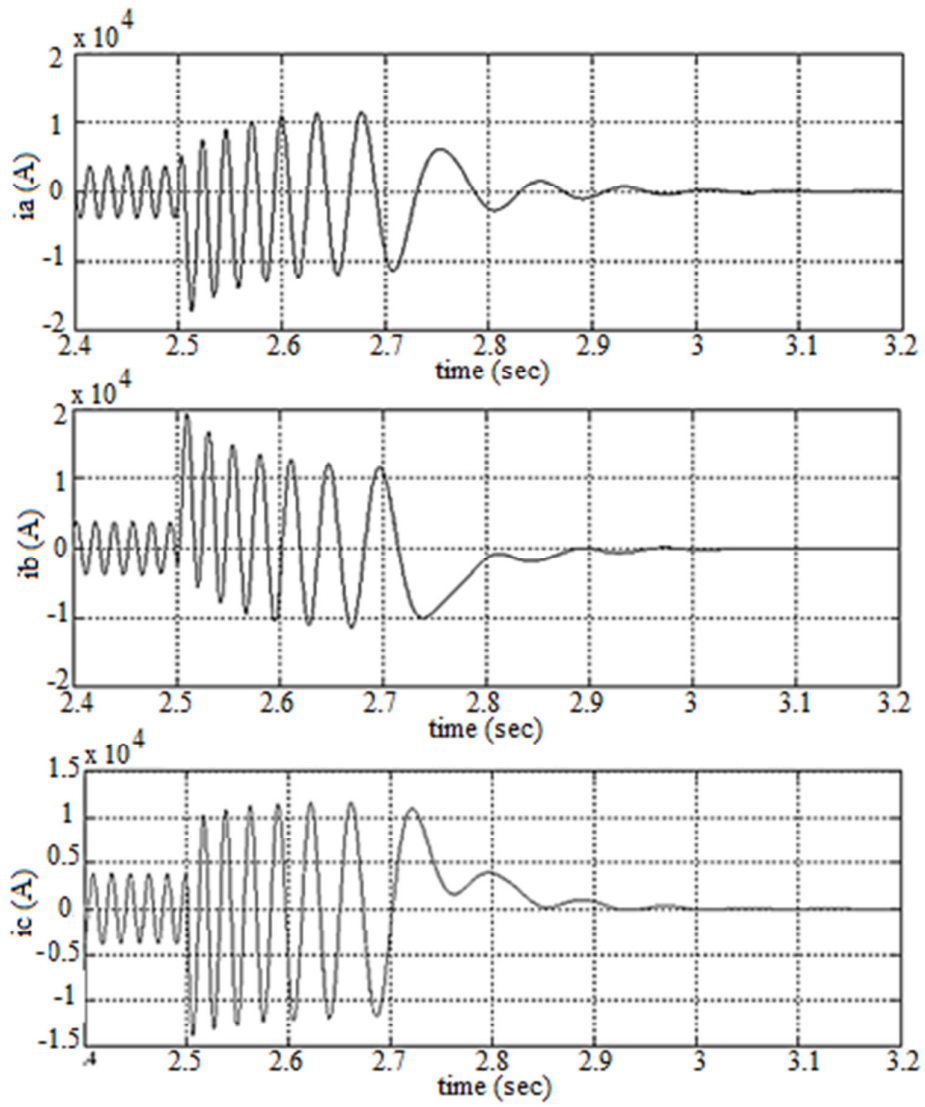
موقعیت نقطه‌کارهای بدست آمده نسبت به زانوی منحنی مغناطیس‌زدایی سنجیده می‌شود.

اثر عکس‌العمل آرمیچر ناشی از پیک لحظه‌ای این جریان روی PMها در شکل (۷-۵) نشان داده

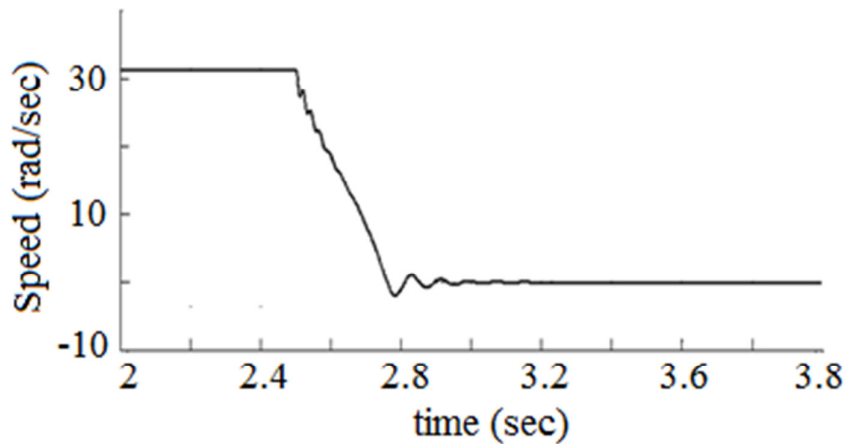
شده است. همان‌طور که در شکل مشهود است، در بخش‌هایی از مگنت که شار عکس‌العمل آرمیچر

در خلاف جهت شار PM است، چگالی شار مغناطیس دائم به شدت کاهش یافته است؛ حتی مقدار

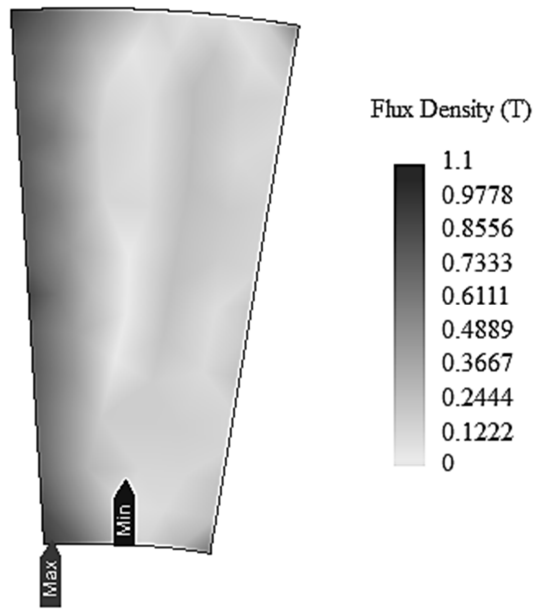
آن در بعضی نقاط به صفر رسیده است.



شکل (۵-۵): جریان‌های محاسبه شده بعد از وقوع اتصال کوتاه در سه فاز استاتور

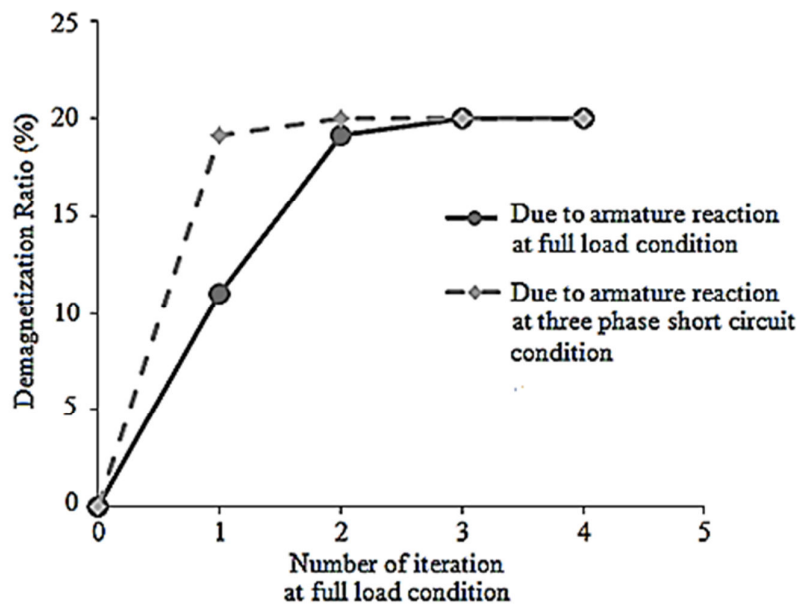


شکل (۵-۶): سرعت روتور



شکل (۵-۷): توزیع چگالی شار مگنت در شرایط اتصال کوتاه سه فاز

بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیل مغناطیس‌زدایی در موتور AFPM مذکور و با توجه به الگوریتم طراحی تکراری، شدت مغناطیس‌زدایی در تکرار دوم ۲۰ درصد محاسبه شد که در حدود ۷۲.۳۸ درصد از مگنت را تحت تاثیر قرار داده بود. در شکل (۵-۸)، نتایج حاصله در شرایط بار کامل و شرایط اتصال کوتاه سه فاز در هر تکرار با یکدیگر مقایسه شده است.

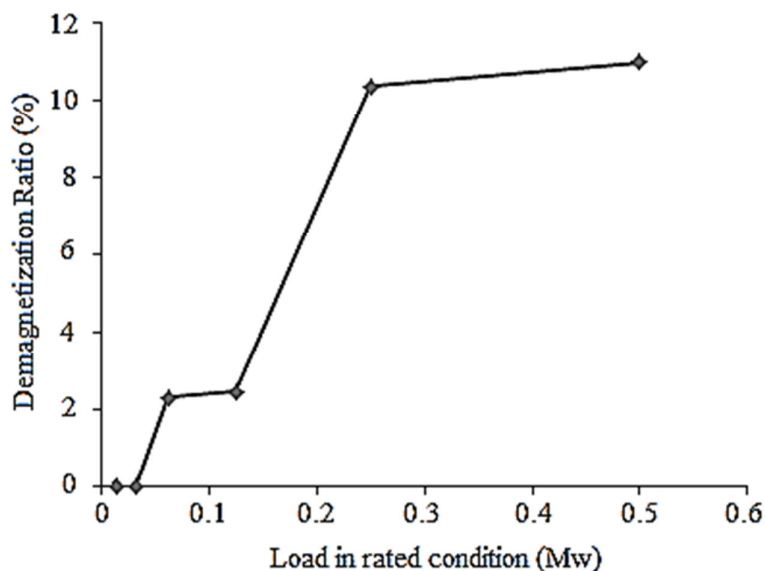


شکل (۵-۸): شدت مغناطیس‌زدایی

#### ۴-۵. تغییرات شدت مغناطیس‌زدایی به ازای بارگذاری‌های مختلف

با افزایش بار، جریان لحظه‌ای هر فاز نیز افزایش می‌یابد. این افزایش جریان، افزایش عکس‌العمل آرمیچر را به دنبال خواهد داشت. شکل (۹-۵) تغییرات شدت مغناطیس‌زدایی را با افزایش میزان بار نشان می‌دهد. با توجه به شکل تقریباً از نصف بار نامی به بعد شدت مغناطیس‌زدایی افزایش چشمگیری می‌یابد.

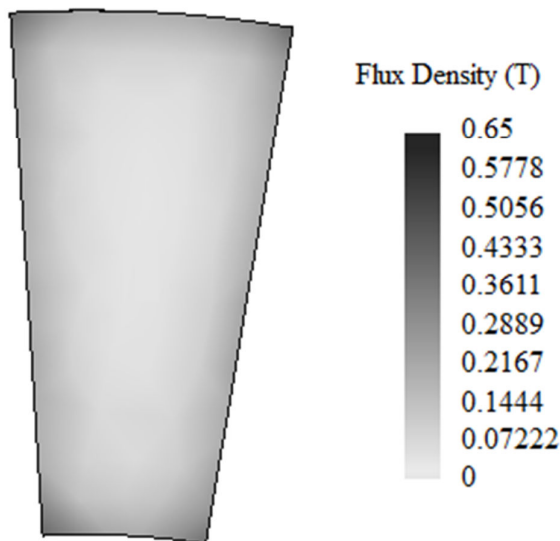
بر اساس آنچه که در این فصل و فصل قبل بررسی شد، شدت بروز پدیده مغناطیس‌زدایی در موتور شار محوری مغناطیس دائم در بارهای زیاد و شرایط گذرای شدید، قابل توجه است؛ به طوری که حتی باعث تغییر مشخصه‌های عملکردی ماشین می‌شود. از این رو لزوم جلوگیری از بروز این پدیده در ماشین اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.



شکل (۹-۵): تغییرات مغناطیس‌زدایی با افزایش بار (تکرار اول)

#### ۵-۵. خارج کردن روتور از استاتور و تاثیر آن بر روی مغناطیس‌های دائم

در مواقع تعمیرات که لازم است روتور از استاتور خارج گردد، قرار گرفتن روتور در فضای آزاد ممکن است سبب تضعیف مغناطیس‌های دائم شود. به همین دلیل لازم است این حالت نیز مورد بررسی قرار گیرد.



شکل (۵-۱۰): توزیع چگالی شار در مگنت پس از خروج روتور از محیط استاتور

همان‌طور که مشاهده می‌شود، چگالی شار نقاط مختلف PM به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا کرده‌اند به طوری که در بخش‌های داخلی آن مغناطیس‌زدایی با شدت زیادی رخ داده است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که در این ماشین خاص برای جلوگیری از آسیب دیدن PMها تحت هیچ شرایطی نباید روتور از استاتور خارج گردد.

## ۵-۶. بررسی ساختارهای مختلف دمپر و عملکرد آن‌ها در کاهش تاثیر پدیده مغناطیس‌زدایی در موتور AFPM

یکی از راه‌های کاهش اثر عکس‌العمل آرمیچر روی PMها در شرایط گذرایی شدید و به دنبال آن کاهش پدیده مغناطیس‌زدایی، استفاده از دمپر در ساختار روتور می‌باشد. دمپر ضربان‌های ناگهانی شارهای مغناطیسی را در مگنت‌ها تقلیل می‌دهد. در این بخش ساختارهای مختلف دمپر معرفی و عملکرد آنها در کاهش تاثیر پدیده مغناطیس‌زدایی روی موتور AFPM مورد بررسی قرار می‌گردد.

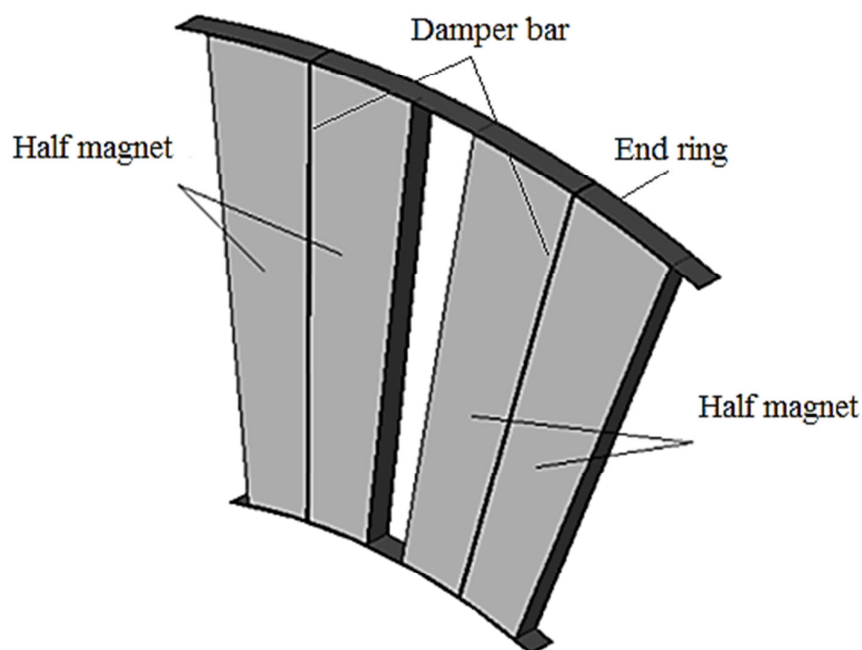
### ۵-۶-۱. ساختار شماره ۱

در این ساختار مطابق شکل (۵-۱۱) مگنت‌ها از وسط برش داده شده، و میله‌هایی در وسط آنها جاسازی می‌گردد. انتهای این میله‌ها نیز توسط دو حلقه اتصال کوتاه می‌شوند. ماده رسانای استفاده

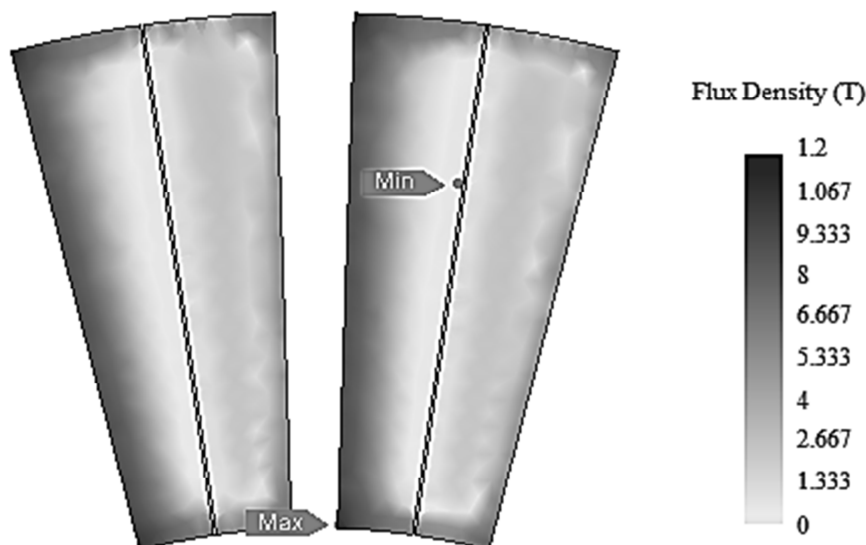


شده در این مطالعه مس می‌باشد. با بروز اتصال کوتاه در یک بازه زمانی کوتاه شار در سطح روتور تغییر می‌کند. به این ترتیب جریانی در دمپر القا می‌گردد تا از تغییرات شار در اون ناحیه جلوگیری کند.

مطابق شکل (۵-۱۲)، با توجه به محل قرارگیری دمپر و جریان‌های القا شده در آن، ناحیه وامغناطش شده تا حدودی کاهش یافته و تا حدی از شدت مغناطیس‌زدایی آن کم شده است. نتایج آنالیز مغناطیس‌زدایی به طور خلاصه در جدول (۵-۱) آورده شده است. همان طور که مشخص است به دلیل بزرگ بودن ناحیه وامغناطش شده، این ساختار دمپر تاثیر کمی داشته است.



شکل (۵-۱۱): ساختار ۱



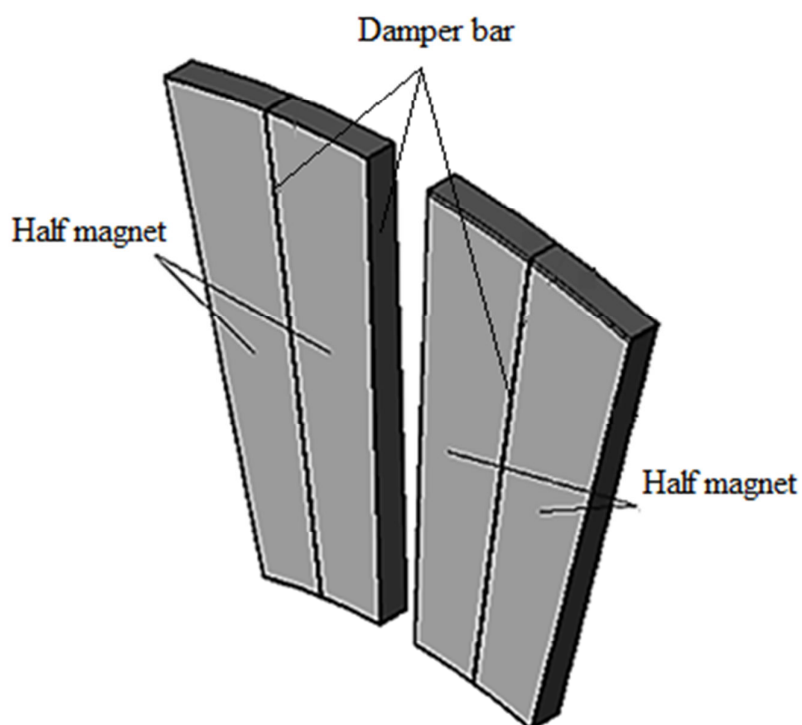
شکل (۵-۱۲): توزیع چگالی شار در مگنت در حضور دمپر ۱

جدول (۵-۱): شدت مغناطیس‌زدایی در شرایط اتصال کوتاه سه فاز در حضور دمپر ۱

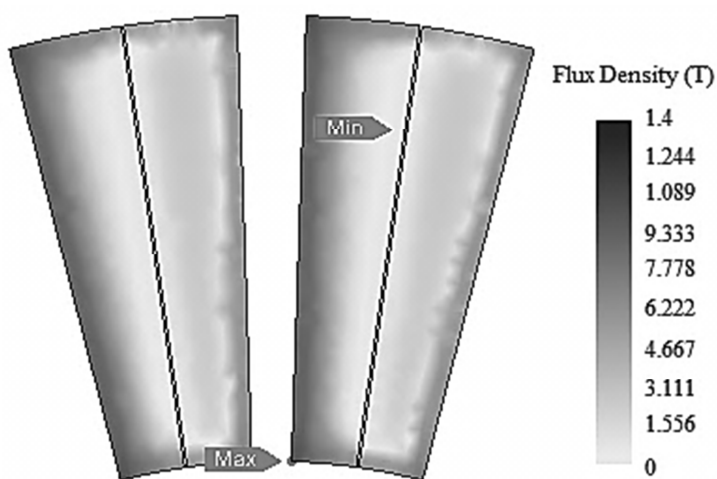
در حضور دمپر	بدون حضور دمپر	
۶۹.۳۸	۷۶.۵۳	درصد میانگین ناحیه وامغناطش شده در مگنت
۲۷.۷۵	۲۸.۳۱	شدت مغناطیس‌زدایی در ناحیه وامغناطش شده

## ۵-۶-۲. ساختار شماره ۲

این ساختار شبکه‌ای در شکل (۵-۱۳) نشان داده شده است. که در آن عرض ستون قرار گرفته در وسط مگنت دو برابر ستون‌های جانبی مجاور مگنت است. شکل (۵-۱۴) توزیع چگالی شار مغناطیسی را در حضور دمپر نشان می‌دهد. با توجه به شکل، این ساختار دمپر نسبت به ساختار قبلی موثرتر بوده و شدت مغناطیس‌زدایی کاهش نسبتاً بیشتری یافته است. اما رویهم رفته با توجه به ناحیه وامغناطش شده، این نوع دمپر نیز نمی‌تواند به عنوان گزینه مناسبی برای جلوگیری از بروز پدیده مغناطیس‌زدایی به کار رود. مقادیر محاسبه شده به طور دقیق در جدول (۵-۲) درج شده‌اند.



شکل (۵-۱۳): ساختار ۲



شکل (۵-۱۴): توزیع چگالی شار در مغنت در حضور دمپر ۲

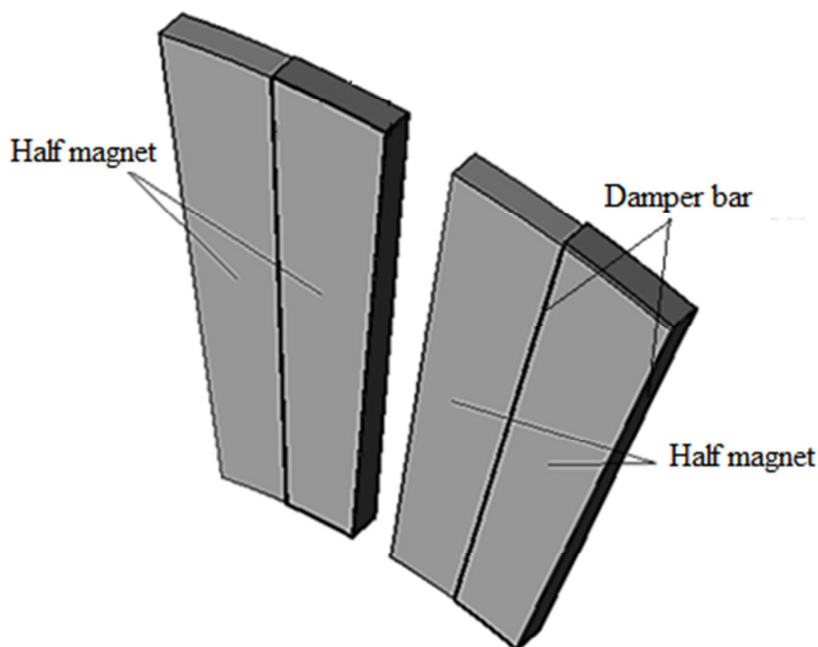
جدول (۵-۲): شدت مغناطیس‌زدایی در شرایط اتصال کوتاه سه فاز در حضور دمپر ۲

در حضور دمپر	بدون حضور دمپر	
۶۶.۹۹	۷۶.۵۳	درصد میانگین ناحیه وامغناطش شده در مغنت
۲۶.۷۹	۲۸.۳۱	شدت مغناطیس‌زدایی در ناحیه وامغناطش شده

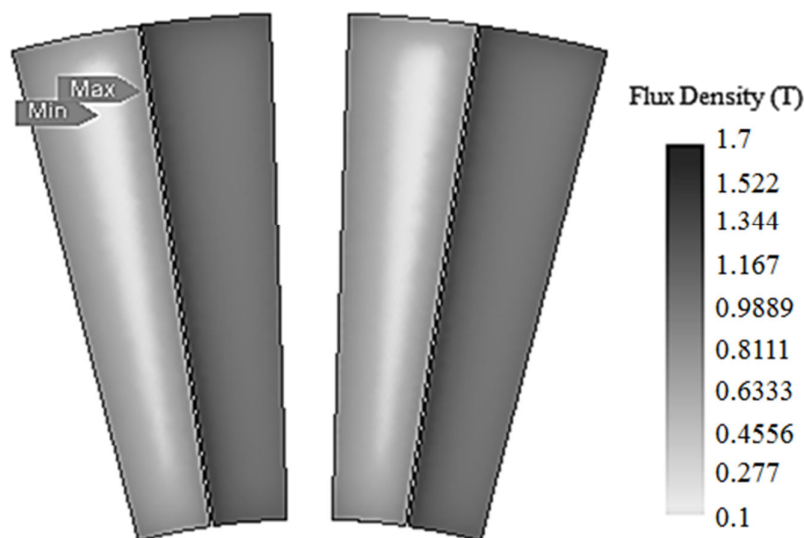
### ۵-۶-۳. ساختار شماره ۳

در این ساختار تنها نصف مگنت که مغناطیس‌زدایی در آن رخ داده است توسط ماده رسانایی به ضخامت ۱ میلی متر احاطه می‌شود. شکل (۵-۱۵) ساختار مورد نظر را نشان می‌دهد. باید این موضوع مد نظر قرار گیرد که این ساختار تنها برای حالتی که موتور در یک جهت حرکت کند موثر خواهد بود. چرا که با تغییر جهت حرکت موتور، ناحیه وامغناطش شده به سمت دیگر مگنت منتقل می‌شود و در این حالت دمپر نمی‌تواند از بروز این پدیده جلوگیری کند.

نتایج حاصل از تحلیل الکترومغناطیسی در شکل (۵-۱۶) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشهود است و بر اساس مقادیر درج شده در جدول (۵-۳)، این ساختار تغییرات شار نیمه سمت راستی مگنت را کاملاً دمپ کرده است. هم‌چنین از شدت پدیده مغناطیس‌زدایی در نیمه سمت چپ مگنت نیز کاسته است.



شکل (۵-۱۵): ساختار ۳



شکل (۵-۱۶): توزیع چگالی شار در مگنت در حضور دمپر ۳

جدول (۵-۳): شدت مغناطیس زدایی در شرایط اتصال کوتاه سه فاز در حضور دمپر ۳

در حضور دمپر	بدون حضور دمپر	
۱۱.۰۰۶	۷۶.۵۳	درصد میانگین ناحیه وامغناطش شده در مگنت
۲۵	۲۸.۳۱	شدت مغناطیس زدایی در ناحیه وامغناطش شده

## ۵-۷. تعیین مقاومت اتصال کوتاه بهینه در زمان توقف اضطراری با در نظر گرفتن پدیده مغناطیس زدایی

در بخش قبل، شدت بروز پدیده مغناطیس زدایی در شرایط توقف اضطراری محاسبه شد. با توجه به محاسبات انجام گرفته، در اثر این پدیده درصد بالایی از مگنت آسیب دیده بود. با توجه به این که ترمزگیری ناگهانی یکی از مدهای عملکردی ماشین می باشد، لازم است سیستم ترمز به گونه ای اصلاح شود که در مدت توقف سریع موتور، کمترین آسیب به مغناطیس های دائم وارد شود.

راه کاری که برای دستیابی به این هدف پیشنهاد می شود، استفاده از مقاومت محدود کننده جریان در ترمینال های موتور است. به این ترتیب که سیم پیچی های سه فاز آرمیچر از طریق یک مقاومت اتصال کوتاه شوند.

مقدار این مقاومت بر اساس دو معیار تعیین می‌شود:

- ۱- مدت زمان شتاب‌گیری منفی تا لحظه توقف: بر اساس این زمان، توان تولید شده در فرآیند ترمزگیری محاسبه می‌گردد (رابطه (۲-۵)). این توان بر اساس رابطه (۳-۵)، حداکثر مقاومتی که می‌توان در ترمینال موتور قرار داد را تعیین می‌کند [۳۷].

$$R_{b \max} = \frac{V_{dc}^2}{P_b} \quad (\text{ohm}) \quad (3-5)$$

که در آن  $V_{dc}$  مقدار ولتاژ باس DC می‌باشد.

- ۲- شدت مغناطیس‌زدایی: مقدار مقاومت باید طوری تعیین گردد که در زمان اتصال کوتاه، جریان عبوری از سیم‌پیچ‌های آرمیچر را محدود کند.

برای موتور شار محوری مغناطیس دائم بررسی شده در این پایان‌نامه، اینرسی کل ( $J_T$ ) برابر  $\text{kg} \cdot m^2$  ۱۲۶.۹۶ می‌باشد. با فرض ۰.۵۲ ثانیه برای زمان شتاب‌گیری منفی و بر اساس رابطه (۲-۵)، توان تولید شده در فرآیند توقف ناگهانی ۰.۲۴۰۹ مگاوات بدست می‌آید.

با توجه به مقدار توان نامی موتور (۰.۵ MW)، توان تولید شده در فرآیند ترمزگیری ۴۸.۱۸ درصد مقدار نامی می‌باشد. از این رو در مدت توقف اضطراری آسیب حرارتی به ماشین وارد نمی‌شود. این توان باید در مقاومت مورد نظر مصرف گردد.

برای موتور ۰.۵ MW، ولتاژ باس DC برابر  $V$  ۲۲۰ می‌باشد. به این ترتیب با توجه به رابطه (۵-۳) مقدار  $R_{b \max}$ ، ۰.۲۰۰۹ اهم (۷.۵۲ پیونیت) بدست می‌آید. مقدار مقاومت مسیر اتصال کوتاه باید از این مقدار کمتر باشد.

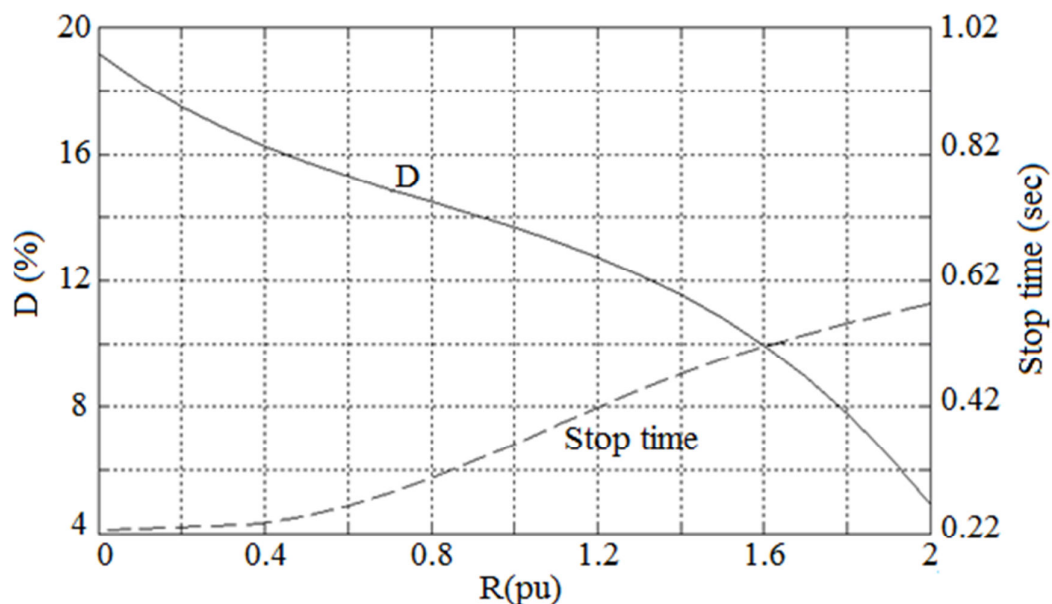
برای بدست آوردن مقدار بهینه مقاومت، شدت مغناطیس‌زدایی در مگنت‌ها را به ازای مقاومت‌های مختلف محاسبه می‌کنیم. مشاهده می‌شود که شدت مغناطیس‌زدایی تابعی از مقدار مقاومت است. این

ارتباط را می‌توان به صورت رابطه ریاضی نشان داد. برای این منظور از تکنیک انطباق منحنی<sup>۱</sup> استفاده می‌کنیم.

از سوی دیگر زمان توقف موتور نیز تابعی از مقدار مقاومت می‌باشد. شکل (۵-۱۷) رابطه شدت مغناطیس‌زدایی و زمان توقف با مقدار مقاومت را نشان می‌دهد.

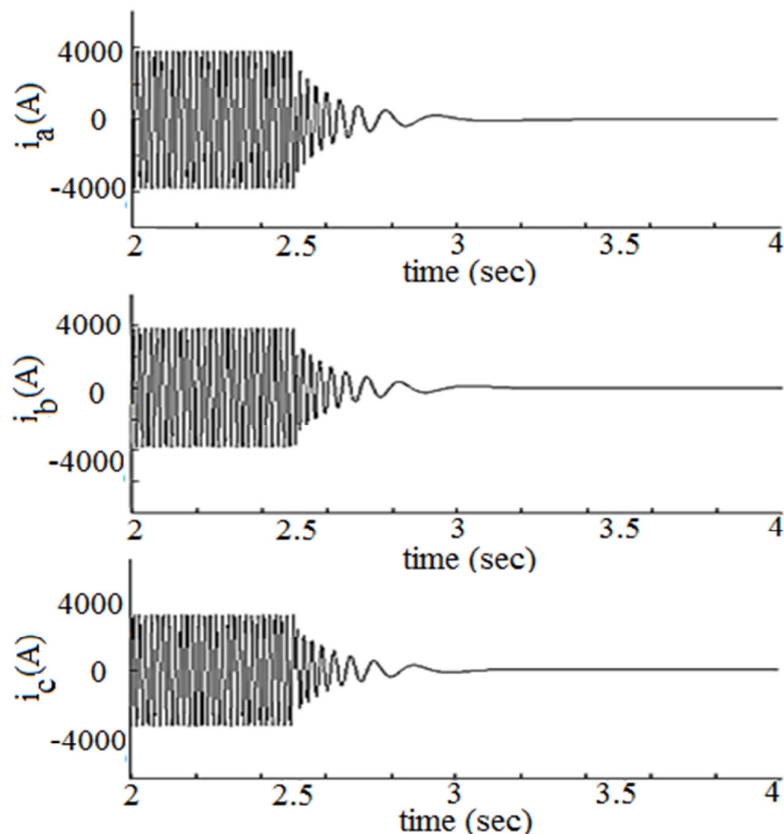
باید مقدار بهینه‌ای برای مقاومت برگرفته از مصالحه بین زمان توقف و شدت مغناطیس‌زدایی وجود داشته باشد.

از آنجایی که زمان توقف اضطراری ۰.۵۲ ثانیه فرض شده بود، مقدار مقاومت را تقریباً ۱.۶ پریونیت انتخاب می‌کنیم. به ازای این مقاومت، همان‌طور که در شکل (۵-۱۸) مشهود است، دامنه جریان آرمیچر در لحظه اتصال کوتاه به کمتر از مقدار نامی کاهش پیدا کرده است. به این ترتیب میزان نیروی محرکه مغناطیسی آرمیچر نیز به نسبت کاهش خواهد یافت.



شکل (۵-۱۷): رابطه شدت مغناطیس‌زدایی و زمان توقف با مقدار مقاومت

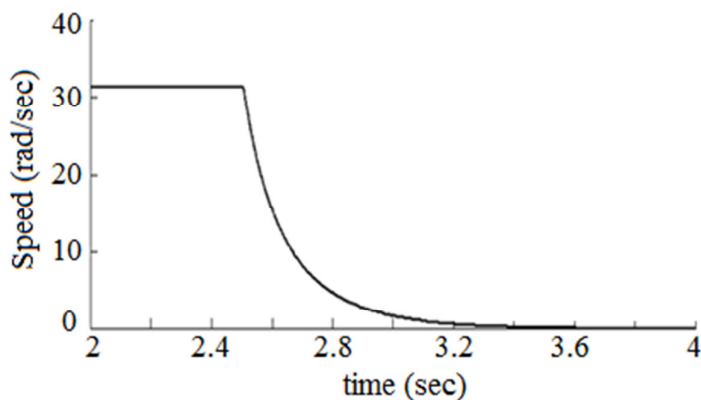
1- Curve Fitting



شکل (۵-۱۸): جریان‌های اتصال کوتاه سه فاز پس از افزودن مقاومت ۱.۶ پریونیت به ترمینال موتور

سرعت موتور در مدت توقف ناگهانی، پس از این که ترمینال‌های موتور با استفاده از یک مقاومت

۱.۶ پریونیت اتصال کوتاه شدند، در شکل (۵-۱۹) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۹): سرعت موتور پس از افزودن مقاومت ۱.۶ پریونیت به ترمینال موتور

تاثیر افزودن مقاومت روی شدت مغناطیس‌زدایی با استفاده از اجزای محدود ارزیابی می‌گردد. مدل

دینامیکی گذرای موتور با توجه به مقاومت موجود اصلاح شده و محاسبات مربوط به جریان‌های



لحظه‌ای استاتور و موقعیت‌های مختلف روتور انجام و به مدل اجزای محدود ماشین اعمال می‌شود. نتایج تحلیل الکترومغناطیسی انجام شده در جدول (۴-۵) خلاصه شده است. با توجه به آنچه از نتایج این جدول استنباط می‌شود، می‌توان ادعا کرد که افزودن مقاومت در مسیر اتصال کوتاه می‌تواند به طور موثری شدت مغناطیس‌زدایی را در زمان توقف ناگهانی کاهش دهد.

جدول (۴-۵): شدت مغناطیس‌زدایی در شرایط اتصال کوتاه سه فاز پس از افزودن مقاومت ۱.۶ پریونیت به ترمینال

موتور

در حضور مقاومت	بدون حضور مقاومت	
۶۰.۴۲۴	۷۶.۵۳	درصد میانگین ناحیه وامغناطش شده در مگنت
۹.۹۵۴	۲۸.۳۱	شدت مغناطیس‌زدایی در ناحیه وامغناطش شده

## ۵-۸. جمع‌بندی فصل

در این فصل رفتار موتور شار محوری مغناطیس دائم در مواجهه با پدیده مخرب مغناطیس‌زدایی در شرایط عملکردی خاص بخصوص رژیم گذرای (اتصال کوتاه سه فاز) مطالعه شد. سپس استفاده از ساختارهای مختلف دمپر در شرایط اتصال کوتاه سه فاز مورد توجه قرار گرفت و در بین آن‌ها موثرترین ساختار تعیین شد. در انتها نیز کنترل جریان آرمیچر به عنوان راه‌کار دیگری جهت کاهش میدان عکس‌العمل آرمیچر و به دنبال آن کاهش شدت مغناطیس‌زدایی در شرایط عملکردی خاص ارائه گردید.

## فصل ششم

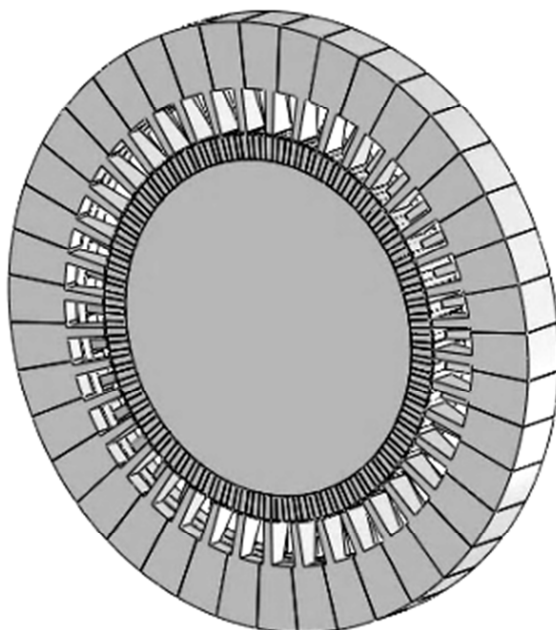
# بررسی پدیده مغناطیس‌زدایی در موتور مغناطیس دائم شار متقاطع قطب چنگالی

## ۶-۱. مقدمه

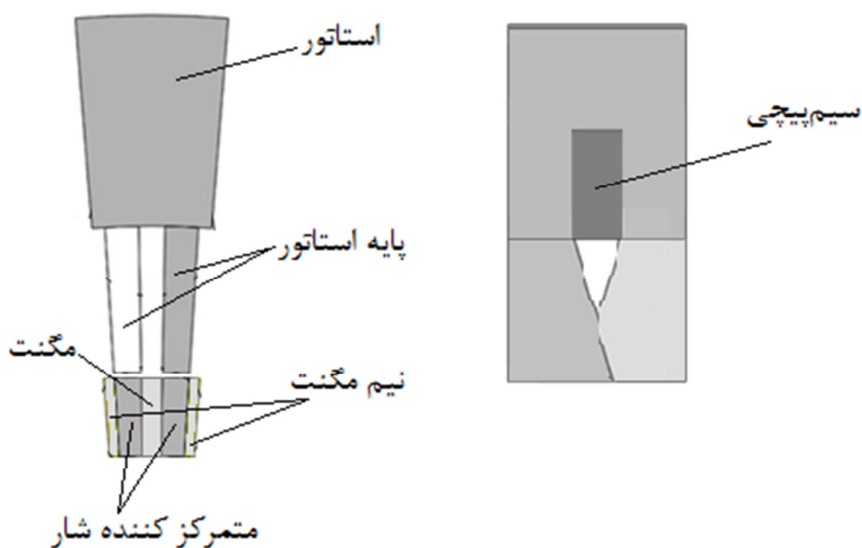
با توجه به آنچه ذکر شد، یکی از عوامل مهم بروز پدیده مغناطیس‌زدایی در ماشین‌های PM، اثر نیروی محرکه مغناطیسی آرمیچر بر روی شار مغناطیس‌های دائم است. در فصول قبل شار آرمیچر به عنوان عامل مغناطیس‌زدا بر روی ماشین‌های با مگنت‌های سطحی مورد بررسی قرار گرفت. در این فصل این پدیده روی ساختار دیگری از ماشین‌های PM با مگنت‌های فرورفته تحت عنوان موتور مغناطیس دائم شار متقاطع قطب چنگالی مطالعه می‌شود. این موتور به لحاظ کاربرد و قدرت تولیدی مشابه موتور AFPM بررسی شده در فصول قبل می‌باشد. اما بر خلاف موتور AFPM، ساختار ماشین TFPM به گونه‌ای است که مسیر شار آرمیچر از داخل مگنت‌ها بسته نمی‌شود. همین موضوع می‌تواند این موتور را به یک ساختار مقاوم در برابر مغناطیس‌زدایی تبدیل کند. در این فصل به بررسی پدیده مغناطیس‌زدایی در این ماشین به تفصیل پرداخته و نتایج آن ارائه شده است.

## ۶-۲. موتور مغناطیس دائم شار متقاطع

ویژگی برجسته ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع، چگالی گشتاور بالای آن‌ها است، به طوری که مقدار چگالی گشتاور این ماشین‌ها نسبت به ماشین‌های دیگر بیشتر می‌باشد و با تعداد قطب‌های ماشین رابطه مستقیم دارد. ویژگی دیگر این ماشین‌ها این است که فازهای آن کاملاً از یکدیگر مجزا هستند. ساختار قطب چنگالی ماشین TFPM، به عنوان بهترین ساختار در بین این ماشین‌ها به لحاظ چگالی توان شناخته شده است. یک فاز از یکی از مدل‌های این ساختار در شکل (۶-۱) نشان داده شده است. با توجه به شکل، مغناطیس‌های دائم در درون آهن روتور جاسازی شده‌اند. جهت مغناطیس PMها عمود بر صفحه فاصله هوایی است. شار مغناطیس‌های دائم توسط یک ماده فرومغناطیس (به عنوان متمرکز کننده شار) به طرف فاصله هوایی هدایت می‌گردد [۳۸، ۳۹].



شکل (۶-۱): ساختار ماشین شار متقاطع قطب چنگالی



شکل (۶-۲): یک جفت قطب از یک ماشین شار متقاطع قطب چنگالی

### ۶-۳. موتور مغناطیس دائم شار متقاطع طراحی شده

مشخصات نامی موتور در جدول (۶-۱) آمده است. این ماشین یک لایه از ماشین ۱ مگاوات فرض

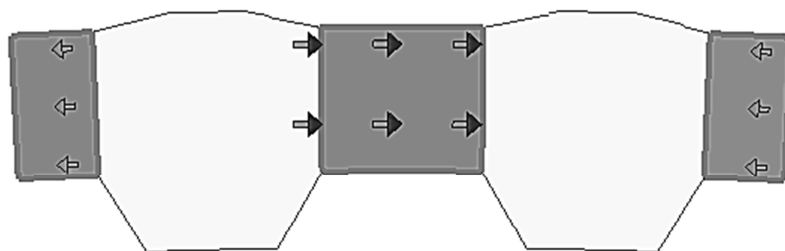
شده است.

جدول (۶-۱): مشخصات نامی داده شده برای ماشین مورد طراحی

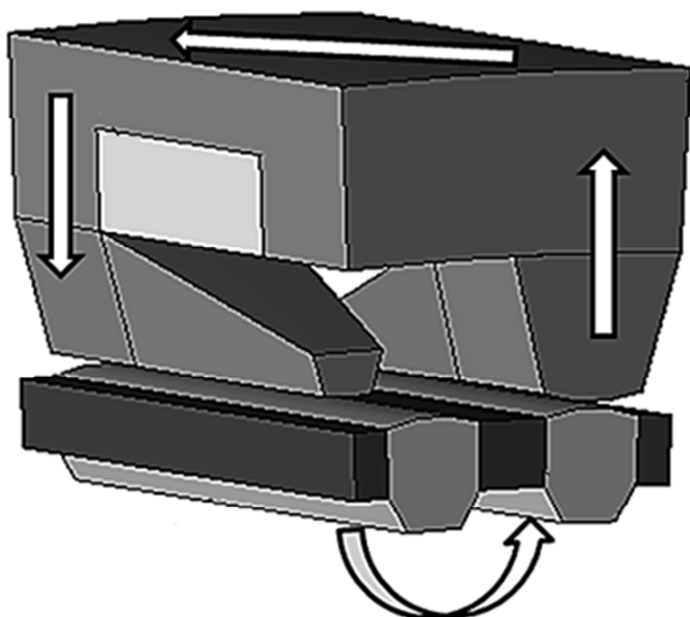
مقدار	پارامتر	ردیف
۵۰۰۰۰۰	توان نامی موتور (watt)	۱
۳۰۰	سرعت نامی موتور (rpm)	۲
۶	تعداد فازها	۳
۳۰۰	فرکانس (Hz)	۴
۷۴.۲۴	ولتاژ موثر فاز (volt)	۵

موتور مورد بررسی از قبل بر اساس الگوریتم معمول و بر اساس مشخصات خواسته شده در جدول بالا طراحی شده است.

هسته روتور و استاتور ماشین طراحی شده از جنس Somaloy500+0.5%Kenolube\_800MPa انتخاب و مغناطیس‌های دائم از جنس NdFeB با چگالی شار پسماند ۱ تسلا انتخاب شده‌اند. جهت مغناطیس PMها در شکل (۶-۳) نشان داده شده است.



شکل (۶-۳): جهت مغناطیس PMها



شکل (۴-۶): مسیر عبور شار مغناطیسی در موتور TFPM

در جدول (۲-۶) و (۳-۶) نیز به ترتیب پارامترهای بدست‌آمده از روش اجزاء محدود و ابعاد هندسی ماشین طراحی شده بر حسب متر آورده شده‌اند.

جدول (۲-۶): پارامترهای انتخابی و پارامترهای بدست‌آمده از روش اجزاء محدود [۴۰]

ردیف	نام پارامتر	نماد پارامتر	مقدار پارامتر
۱	بازده	$\eta$	۰/۹۴
۲	طول فاصله هوایی	$g$	۱ میلی‌متر
۳	چگالی جریان هادی	$J_s$	۶ آمپر بر میلی‌متر مربع
۴	ضریب نشت شار مگنت‌ها در روتور	$K_{lpm}$	۰/۴
۵	ضریب نشت شار مگنت‌ها در دندان‌های استاتور	$K_{l-tooth}$	۰/۱
۶	ضریب نشت شار مگنت‌ها در هسته استاتور	$K_{l-core}$	۰/۰۳۵
۷	نسبت افت mmf مگنت‌ها در هسته به افت mmf در فاصله هوایی	$K_r$	۱/۱۵

جدول (۳-۶): ابعاد هندسی ماشین طراحی شده [۴۰]

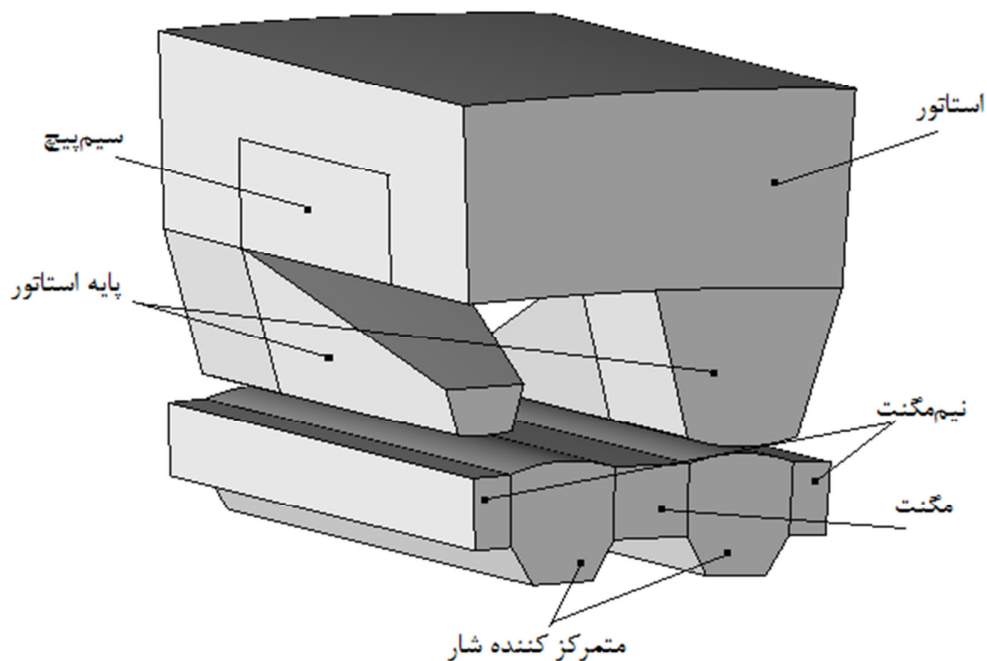
ردیف	نام پارامتر	نماد	مقدار
۱	قطر داخلی روتور	$D_{ir}$	۱۲۳۶ میلی‌متر
۲	طول شعاعی آهنربای دائم	$H_{pm}$	۱۱ میلی‌متر
۳	قطر داخلی استاتور	$D_g$	۱۲۶۰ میلی‌متر
۴	طول شعاعی پایه (دندانه) استاتور	$d_{os}$	۲۶ میلی‌متر
۵	طول شعاعی شیار استاتور	$d_{ws}$	۱۸ میلی‌متر
۶	طول شعاعی یوغ استاتور (عمق هسته پشت سیم‌پیچ)	$d_{cs}$	۱۴/۵ میلی‌متر
۷	طول محوری هر فاز استاتور	$L_s$	۱۰۵ میلی‌متر
۸	طول محوری شیار استاتور	$L_{ss}$	۵۱/۵ میلی‌متر
۹	قطر خارجی هسته استاتور	$D_o$	۱۳۷۷ میلی‌متر

#### ۴-۶. نتایج بدست آمده از تحلیل مغناطیس‌زدایی

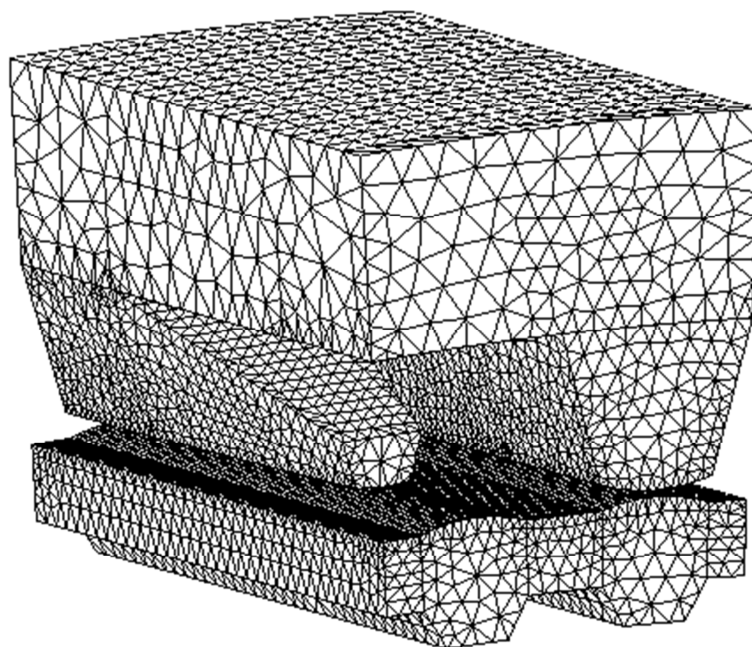
مشابه موتور AFPM، موتور شار متقاطع قطب چنگالی طراحی شده را نیز به صورت سه بعدی در نرم افزار JMAG مدل‌سازی و آنالیز می‌کنیم.

با کویل نمودن مدل مغناطیسی به مدار الکتریکی و حرکت دادن آن، رفتار دینامیکی ماشین را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

در این قسمت به دنبال این هستیم که در شرایط عملکردی مختلف چگالی شار مغناطیس‌های دائم چگونه تغییر می‌کند و در چه رژیم عملکردی احتمال بروز پدیده مغناطیس‌زدایی در ماشین وجود خواهد داشت.



شکل (۵-۶): مدل‌سازی یک جفت قطب از یک لایه موتور TFPM در نرم‌افزار JMAG



شکل (۶-۶): مش‌بندی انجام شده روی یک جفت قطب از موتور TFPM مورد بررسی

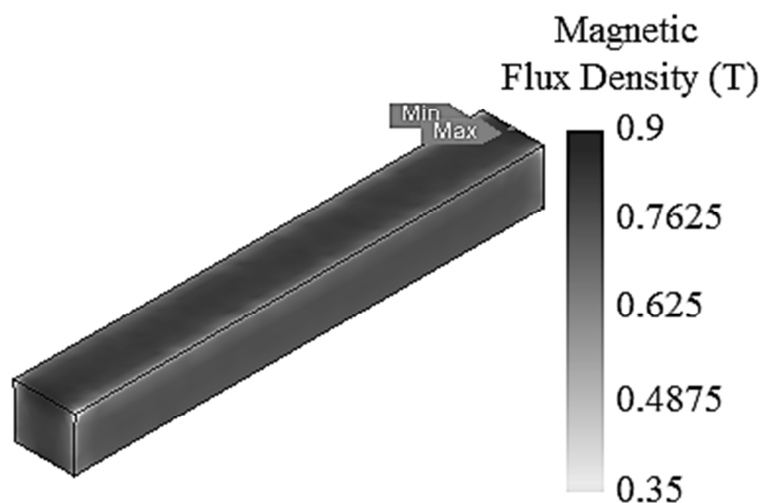
با توجه به مدل‌سازی سه بعدی انجام شده، نتایج زیر بدست آمده است:



### ۶-۴-۱. پدیده مغناطیس‌زدایی در حالت مدار باز

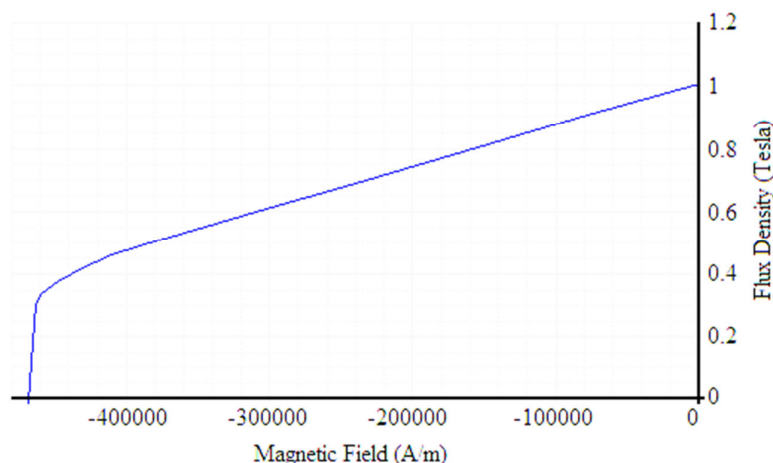
در حالتی که هر سه فاز استاتور قطع می‌باشد (جریان‌های سه فاز صفر هستند) و روتور با سرعت نامی در حال چرخش است، موتور طراحی شده در نرم افزار اجزای محدود JMAG شبیه‌سازی شده و مقدار چگالی شار در سرتاسر نقاط ماده مغناطیس دائم محاسبه می‌شود.

شکل (۶-۷) طیف رنگی توزیع چگالی شار مغناطیسی در مگنت را در حالت جریان صفر نشان می‌دهد.



شکل (۶-۷): توزیع چگالی شار مغناطیسی در مگنت در حالت مدار باز

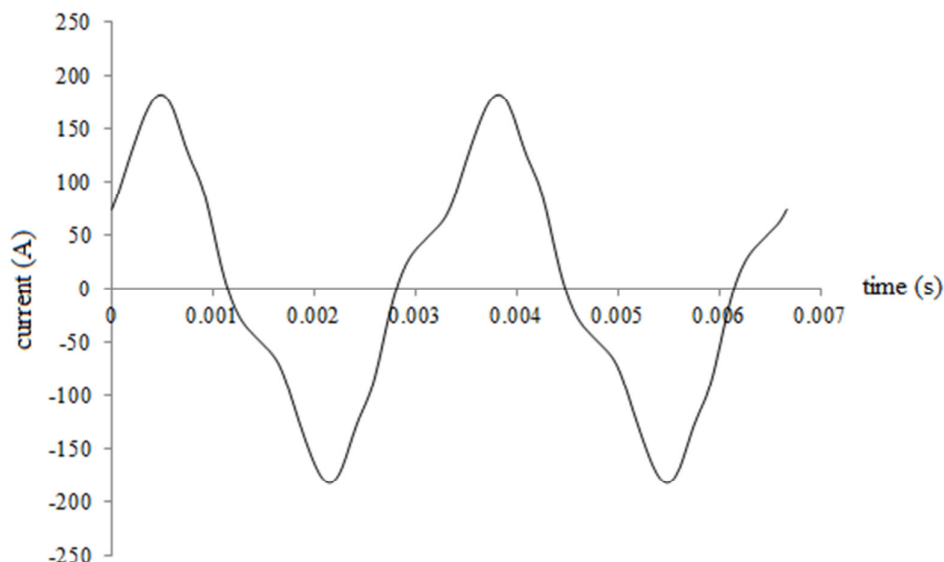
شکل (۶-۸) منحنی مغناطیس‌زدایی ماده PM به کار رفته در موتور مورد بررسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۶-۸) مشهود است، چگالی شار متناظر با نقطه زانویی منحنی ۰.۴ تسلا می‌باشد. با توجه به طیف رنگی توزیع چگالی شار مغناطیسی شکل (۶-۷)، به جز در گوشه‌های فوقانی مگنت و آن هم به مقدار ناچیز، در هیچ قسمت از مگنت مغناطیس‌زدایی رخ نداده است. به این ترتیب با نادیده گرفتن درصد ناچیزی می‌توان ادعا کرد که پدیده مغناطیس‌زدایی در این موتور در حالت مدار باز اتفاق نمی‌افتد.



شکل (۸-۶): منحنی مغناطیس‌زدایی ماده NdFeB با چگالی شار پسماند ۱ تسلا در دمای ۱۴۰ درجه سانتیگراد

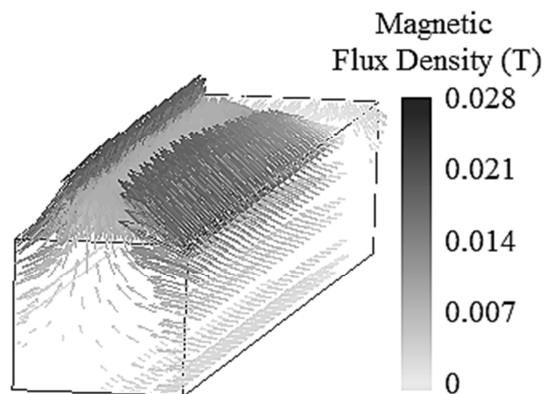
### ۶-۴-۲. پدیده مغناطیس‌زدایی در حالت بی‌باری

در شرایط بی‌باری در حالی که موتور فاقد بار است روتور با سرعت نامی می‌چرخد. جریان‌های لحظه‌ای حالت دائمی در شرایط بی‌باری و موقعیت نسبی بین روتور و استاتور در حین چرخش را که با استفاده از اجرای مدل دینامیکی ماشین در محیط Matlab/Simulink بدست آمده‌اند، به مدل اجزاء محدود ماشین در نرم‌افزار JMAG اعمال می‌کنیم تا از این طریق توزیع چگالی شار در داخل مگنت محاسبه گردد. جریان یک فاز استاتور در حالت بی‌باری در شکل (۹-۶) نشان داده شده است. با توجه به شکل موتور در این شرایط جریان کمی در حدود یک دهم جریان نامی خود می‌کشد.

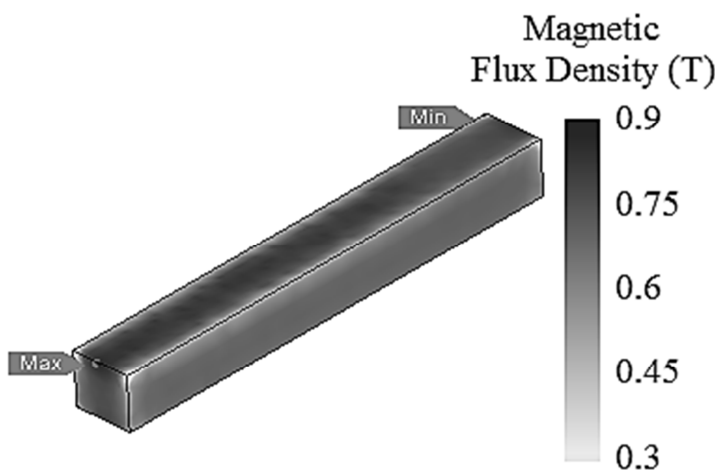


شکل (۹-۶): جریان یک فاز استاتور در بی‌باری

توزیع برداری چگالی شار در حالت بی‌باری در شکل (۶-۱۰) نشان داده شده است. از ظاهر شکل کاملاً مشخص است که در این شرایط درصد ناچیزی شار نشتی وارد PM می‌شود که تنها گوشه‌های فوقانی مگنت را تحت تاثیر قرار می‌دهد. با توجه به شکل (۶-۱۱) شدت مغناطیس‌زدایی نسبتاً کم می‌باشد که این مقدار با توجه به ابعاد PM قابل صرف نظر کردن است.



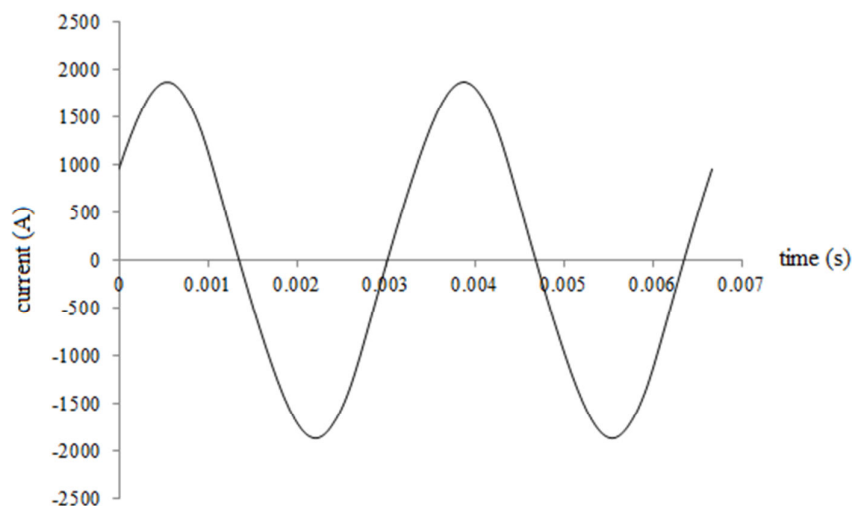
شکل (۶-۱۰): شارهای نشتی وارده به مگنت‌ها در حالت بی‌باری



شکل (۶-۱۱): توزیع چگالی شار مغناطیسی در مگنت در حالت بی‌باری

### ۶-۴-۳. پدیده مغناطیس‌زدایی در حالت بار کامل

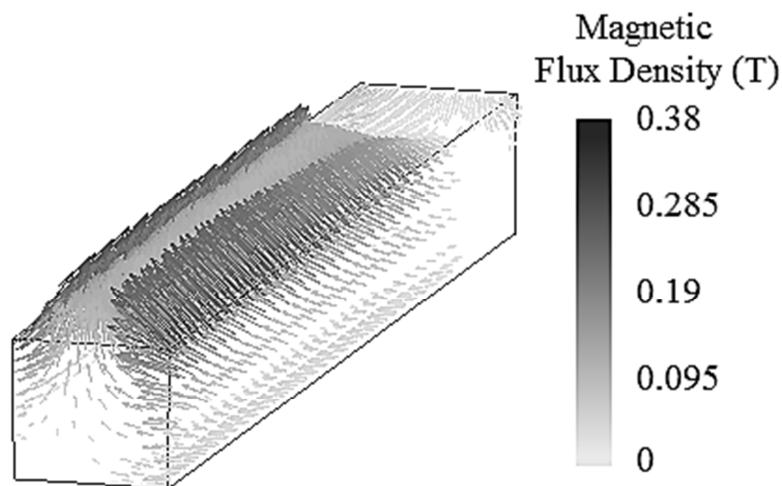
تغییرات جریان حالت دائمی سیم‌پیچی‌های موتور در حین چرخش روتور به اندازه یک جفت قطب در حالت بار کامل، به مدل اجزاء محدود ماشین در نرم‌افزار JMAG اعمال و حرکت نقطه کار مغناطیس دائم مورد بررسی قرار می‌گیرد.



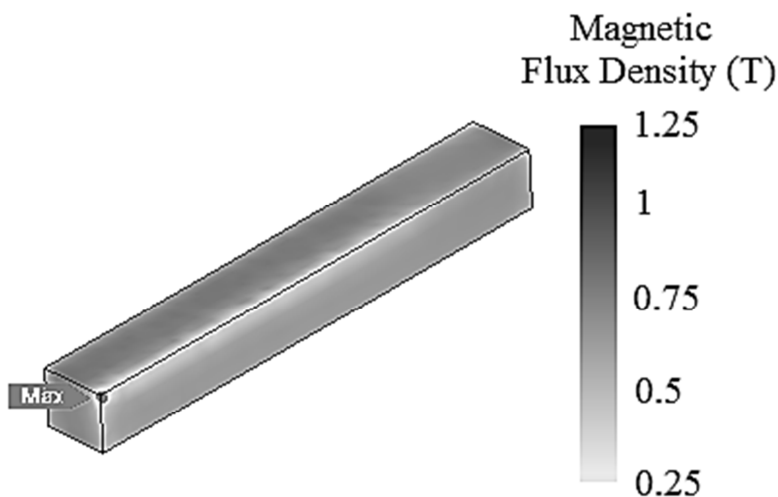
شکل (۶-۱۲): جریان یک فاز استاتور در بار کامل

انتظار بر این است که در حالت بارداری چگالی شار PMها به میزان بیشتری کاهش یابد، چرا که در این حالت نیروی محرکه مغناطیسی آرمیچر بیشتر خواهد بود.

شکل (۶-۱۳) شارهای ناشی وارده به مگنت را در حالت بار کامل نشان می‌دهد. با وجود این که شارهای ناشی مقدار قابل ملاحظه‌ای دارند، اما درصد ناچیزی از این شارها وارد PM می‌شوند. توزیع چگالی شار برای بار کامل در شکل (۶-۱۴) رسم شده است. علت این اتفاق به این موضوع برمی‌گردد که وقتی شار آرمیچر مسیر خود را از طریق متمرکزکننده‌های شار در فاصله هوایی می‌بندد مقاومت مغناطیسی کمتری در مسیر خود می‌بیند تا این که از داخل مگنت‌ها این مسیر بسته شود. به همین دلیل شار ناچیزی وارد PMها می‌گردد.



شکل (۶-۱۳): شارهای ناشی در مگنت در حالت بار کامل



شکل (۶-۱۴): توزیع چگالی شار مغناطیسی در مگنت در حالت بار کامل

همان طور که در شکل (۶-۱۴) مشهود است، در بار کامل نیز پدیده مغناطیس‌زدایی در این موتور رخ نمی‌دهد.

#### ۶-۴-۶. پدیده مغناطیس‌زدایی در حالت روتور قفل شده

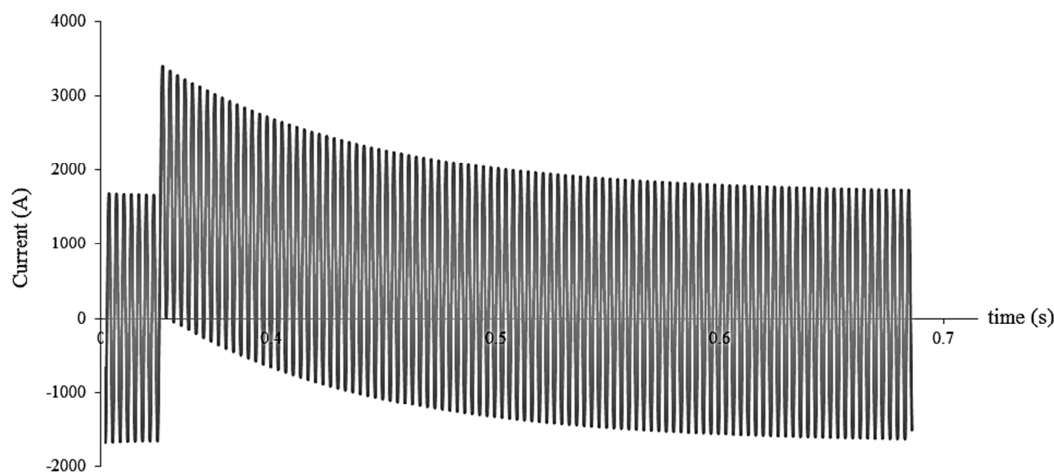
بدترین شرایط از لحاظ مغناطیس‌زدایی زمانی در یک ماشین PM اتفاق می‌افتد که شار عکس-العمل آرمیچر با شار تولید شده توسط مغناطیس‌های دائم کاملاً مخالفت کند.

در این موتور شرایط اتصال کوتاه به عنوان بدترین حالت بررسی نشده است. زیرا موتور TFPM

نسبت  $\frac{E_f}{X}$  کوچکی داشته ( $E_f$ ، مقدار مؤثر ولتاژ و  $X$  در هر فاز و  $X$ ، راکتانس خودی هر

فاز استاتور است)، به همین علت جریان شدیدی در حالت اتصال کوتاه نمی‌کشد [۴۱].

در برخی شرایط عملکردی دیگر نظیر حالت روتور قفل نیز احتمال بروز پدیده مغناطیس‌زدایی وجود دارد. زیرا به دلیل بار زیاد یا گیر کردن محور روتور، موتور از حرکت وامانده و جریان بسیار زیادی مصرف خواهد کرد. به عنوان مثال موتورهای استفاده شده برای لایروبی (یا خاک برداری)، چرخ‌های کشتی‌ها و غیره متحمل است که از حرکت باز ایستند [۴۲]. در موتور TFPM مورد بررسی پیک جریان روتور قفل بیشتر از اتصال کوتاه می‌باشد. این جریان زیاد کشیده شده از موتور تولید میدان مغناطیسی بزرگی در خلاف جهت میدان روتور می‌کند که ممکن است به PMها آسیب برساند. جهت بررسی این موضوع، رفتار موتور TFPM در شرایط خطای روتور قفل محاسبه شده است. شکل (۶-۱۵) جریان محاسبه شده برای یک فاز استاتور را نشان می‌دهد.

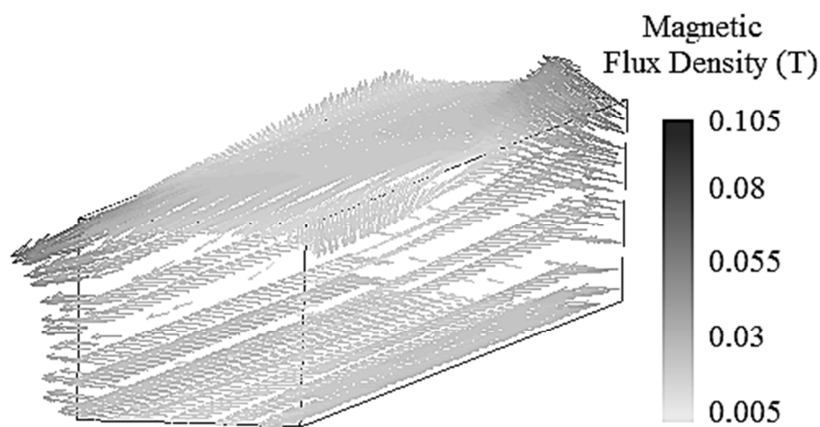


شکل (۶-۱۵): جریان محاسبه شده برای یک فاز استاتور در شرایط روتور قفل شده

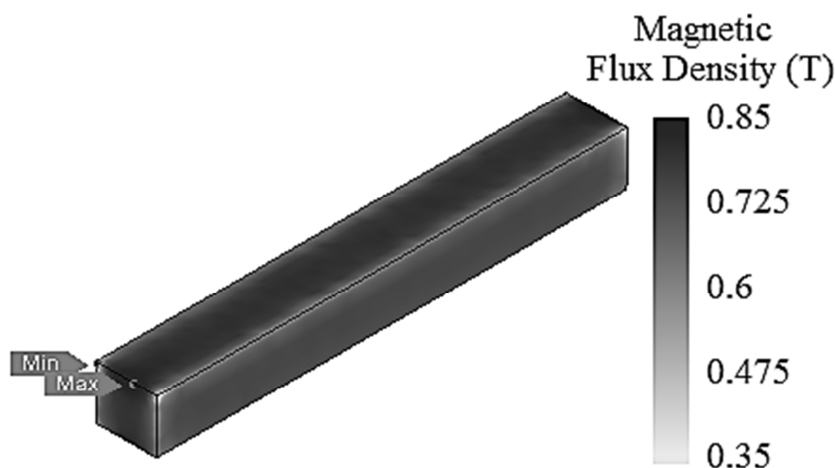
با توجه به شکل (۶-۱۶) در شرایط روتور قفل شده، تعداد خطوط شار نشستی وارده به مگنت زیاد

است اما قدرت آن‌ها به اندازه‌ای نیست که بتواند بر شار PMها غلبه کند.

همان‌طور که در توزیع چگالی شار نشان داده شده در شکل (۶-۱۷) مشخص است، باز هم تنها گوشه‌های مگنت و امگناطش شده‌اند که در مقایسه با ابعاد مگنت قابل توجه نمی‌باشد. به این ترتیب در شرایط روتور قفل نیز شدت مغناطیس‌زدایی تقریباً صفر است.



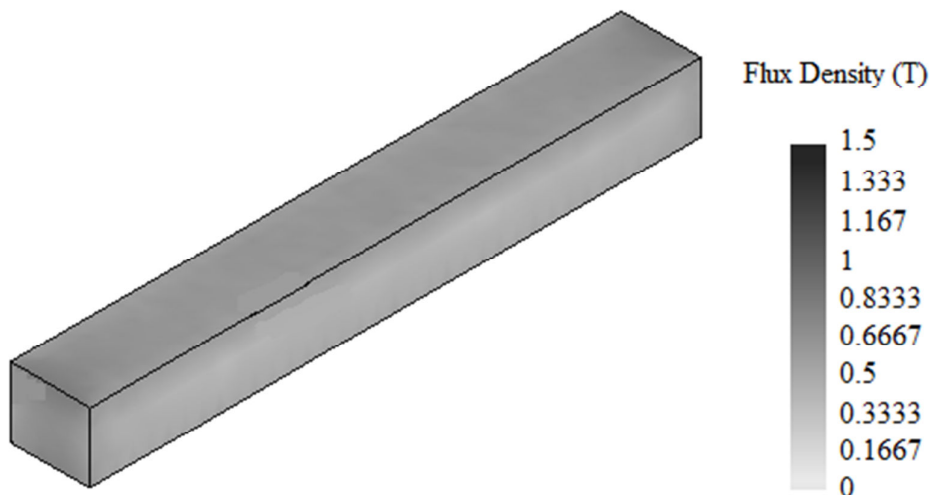
شکل (۶-۱۶): شارهای ناشی در مگنت در شرایط روتور قفل شده



شکل (۶-۱۷): توزیع چگالی شار مغناطیسی در مگنت در شرایط روتور قفل شده

## ۶-۵. خارج کردن روتور از استاتور و تاثیر آن بر روی مغناطیس‌های دائم

در این بخش نیز لازم است تاثیر خارج کردن روتور از استاتور و قرار گرفتن PMها در فضای آزاد مورد بررسی قرار گیرد.



شکل (۶-۱۸): توزیع چگالی شار مغناطیسی در مگنت پس از خروج روتور از محیط استاتور

همان طور که در شکل (۶-۱۸) مشاهده می شود، در صورتی که به دلایل مختلف، روتور از استاتور خارج شود، چگالی شار نقاط مختلف مگنت به میزان کمی کاهش پیدا می کند. به همین دلیل خارج کردن روتور از استاتور در موتور TFPM مشکل ساز نخواهد بود.

## ۶-۶. جمع بندی فصل

در این فصل به بررسی پدیده مغناطیس زدایی در یک موتور شار متقاطع قطب چنگالی مغناطیس دائم پرداخته شد. مدلسازی ماشین انجام و رفتار آن در شرایط عملکرد مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

از مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی موتور، مشاهده شد که حتی در بدترین شرایط عملکردی (روتور قفل شده) و با وجود دمای بالای ماشین (۱۴۰ درجه سانتیگراد)، شدت وامغناطش شدن به حدی نخواهد بود که در عملکرد موتور ایجاد اختلال کند؛ تا جایی که می توان ادعا کرد که این ماشین یک ساختار مقاوم در برابر مغناطیس زدایی می باشد.



## فصل هفتم

# نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۷-۱. نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، ابتدا یکی از پدیده‌های مخرب در ماشین‌های مغناطیس دائم مورد مطالعه قرار گرفته است. این پدیده که اصطلاحاً پدیده مغناطیس‌زدایی نام دارد، مشخصه‌های عملکردی ماشین را تغییر می‌دهد. الگوریتم‌هایی مختلفی تاکنون به منظور طراحی ماشین‌های مغناطیس دائم به کار گرفته شده‌اند. اشکال اساسی این الگوریتم‌ها، در نظر نگرفتن تاثیر این پدیده روی پارامترهای طراحی می‌باشد. در راستای پوشش نقاط ضعف این الگوریتم‌ها، الگوریتم کامل‌تری جهت طراحی و مدلسازی این ماشین‌ها ارائه گردید. جهت ارزیابی کارایی الگوریتم ارائه شده، از تحلیل اجزای محدود بهره بردیم. بررسی انجام شده در یک ماشین شار محوری نمونه نشان داد، چنانچه تاثیر پدیده مغناطیس‌زدایی در طراحی و مدلسازی ماشین‌های PM در نظر گرفته نشود، نتایج حاصل از این طراحی از اعتبار کافی برخوردار نخواهند بود و نمی‌توان قضاوت صحیحی روی عملکرد ماشین داشت.

نتایج بدست آمده از تحلیل اجزای محدود مشخص کرد مگنت‌های به کار رفته در موتور شار محوری مغناطیس دائم بررسی شده، در بارهای زیاد و شرایط گذرای شدید، در اثر پدیده مغناطیس‌زدایی آسیب می‌بینند. این اتفاق منجر به تغییر دامنه و شکل موج چگالی شار فاصله هوایی و به دنبال آن کاهش مقدار موثر Back EMF می‌شود.

در مرحله بعد نشان داده شد که تا چه حد استفاده از یک دمپر مناسب در ساختار موتور AFPM می‌تواند در شرایط گذرای از شدت بروز پدیده مغناطیس‌زدایی بکاهد.

هم‌چنین نشان دادیم در شرایط عملکردی خاص نظیر توقف ناگهانی، با کنترل جریان عبوری از سیم‌پیچی آرمیچر، می‌توان تا حد امکان از بروز این پدیده جلوگیری به عمل آورد.

اما از جهت دیگر، به جای صرف هزینه و وقت جهت اصلاح ساختار ماشین‌هایی نظیر موتور AFPM، با در نظر گرفتن عملکردی که از یک ماشین انتظار می‌رود می‌توان از ماشین‌هایی استفاده کرد که احتمال بروز این پدیده در آن‌ها بسیار کم است. موتور شار متقاطع قطب چنگالی از این دست

می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی موتور TFPM می‌توان دریافت نیرو محرکه مغناطیسی آرمیچر تحت هیچ شرایطی، چه حالت دائمی و چه شرایط گذرای، نمی‌تواند به مغناطیس‌های دائم این ماشین آسیبی وارد کند.

## ۲-۷. نوآوری‌های کار انجام شده

نوآوری‌های مطرح شده در این پایان‌نامه عبارتند از:

۱. بررسی پدیده مغناطیس‌زدایی در موتورهای مغناطیس دائم شار محوری و شار متقاطع که تاکنون به آن‌ها پرداخته نشده است
۲. اصلاح الگوریتم طراحی و مدلسازی کلاسیک ماشین‌های مغناطیس دائم با در نظر گرفتن پدیده مغناطیس‌زدایی برای اولین بار
۳. استفاده از دمپر در جهت کاهش پدیده مغناطیس‌زدایی در موتور AFPM برای اولین بار
۴. تعیین مقاومت اتصال کوتاه بهینه در زمان توقف اضطراری موتور AFPM با در نظر گرفتن پدیده مغناطیس‌زدایی برای اولین بار

## ۳-۷. پیشنهادات

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، در این قسمت به ارائه چند پیشنهاد پرداخته می‌شود:

۱. پیشنهاد می‌شود برای جلوگیری از اثر عکس‌العمل آرمیچر روی PMهای موتور مغناطیس دائم شار محوری، جریان کشیده شده از موتور کنترل شود. به گونه‌ای که جریان موتور محدود شده و اجازه کشیدن جریان‌های لحظه‌ای زیاد به موتور داده نشود.
۲. موتور مغناطیس دائم شار محوری بررسی شده در این پایان‌نامه علاوه بر شرایط گذرای، در شرایط حالت دائمی نیز وامغناطش می‌شود. از این رو پیشنهاد می‌شود که ساختار ماشین برای رسیدن به یک مدل بهینه، کاملاً تغییر داده شود و طراحی ماشین مجدداً انجام گیرد. استفاده از مگنت‌های درونی به جای مگنت‌های سطحی در موتور AFPM مطالعه شده، می-

تواند به عنوان راه‌کاری جهت مقابله با اثر عکس‌العمل آرمیچر روی PMها مورد بررسی قرار گیرد.

۳. در این پایان‌نامه، منحنی بازگشت ماده مغناطیس دائم به صورت خطی مدل شد. برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر پیشنهاد می‌شود از مدل غیرخطی نیز استفاده گردد.

۴. ساختار موثر دمپر در کاهش مغناطیس‌زدایی ناشی از شرایط گذرای برای موتور AFPM در اینجا معرفی گردید. برای ادامه کار می‌توان ساختار موثر را به صورت دقیق طراحی کرد.

۵. در این پایان‌نامه تنها به استرس‌های الکتریکی پرداخته شد. پیشنهاد می‌شود تاثیر استرس‌های مکانیکی و گرمایی نیز روی این ماشین‌ها مطالعه شود.

## مراجع

- [1] Butler R. (2004), "Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes", University of Portland, Portland, Oregon.
- [2] Grosso G. (2003), "solid state physics", Academic Press.
- [۳] انصاری ک، شیخ نظامی ا، (۱۳۸۲)، "تکنولوژی موتورهای مغناطیس دائم".
- [4] Riza M., (2008), "Synchronous Motor Design and Analyzing the Output Characteristics", Electrical & Electronics Engineering. Depart. Malaysia Pahang University, pp. 11-14.
- [5] Reitz R. (2008) "foundations of electromagnetic theory", Addison-Wesley.
- [6] W. N. Fu and S. L. Ho. (2010) "Dynamic Demagnetization Computation of Permanent Magnet Motors Using Finite Element Method With Normal Magnetization Curves", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 20, NO. 3, pp. 851– 855.
- [7] Salon S. ، (۱۳۸۰) ، "تحلیل ماشین‌های الکتریکی با روش عناصر محدود"، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- [8] Ruoho S., Dlala E., Arkkio A. (2007) "Comparison of Demagnetization Models for Finite-Element Analysis of Permanent-Magnet Synchronous Machines", Laboratory of Electromechanics, Helsinki University of Technology, FIN-02015 TKK, Finland Neorem Magnets Oy, FIN-28400 Ulvila, Finland.
- [9] Morimoto S., Takeda Y., Hirasa T., Taniguchi K. (1990), "Expansion of Operating Limits for Permanent Magnet Motor by Current Vector Control Considering Inverter Capacity", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 26, No. 5, pp. 866-871.
- [10] Ooshima M., Miyazawa S., Chiba A., Nakamura F., Fukao T. (1997). "A Rotor Design of a Permanent Magnet-Type Bearingless Motor Considering Demagnetization", Power Conversion Conference, Nagaoka, vol. 2, pp. 655-660.
- [11] Kang Do Hyun, Curia P., Lee Ju (2000). "An Axial Flux Interior PM Synchronous Machine", in Proc. ICEM 2000, Espoo Finland, pp. 1475-1479.
- [12] Arshad W. M., Chin Y. K., Bäckström T., Soulard J., Östlund S., Sadarangani C. (2001). "On Finding Compact motor Solutions for Transient Applications", Electric Machines and Drives Conference, Cambridge, MA, USA, pp. 743-747.
- [13] Ruoho S., (2011) "Modeling Demagnetization of Sintered NdFeB Magnet Material in Time-Discretized Finite Element Analysis" Aalto University School of Electrical Engineering, Espoo, Finland.
- [14] Goldenberg C., Lebensztajn L., Lobosco O.S. (1997) "Analysis of short-circuit transients of a PM machine", Electric Machines and Drives Conference Record, Milwaukee, USA, pp: WB2/13.1-WB2/13.3.
- [15] Rosu M., Arkkio A., Jokinen T., Mantere J., Westerlund J. (1999) "Demagnetisation State Of Permanent Magnets In Large Output Power

- Permanent Magnet Synchronous Motor”, *Electric Machines and Drives*, 1999, in Proc. International Conference IEMD '99, Seattle, USA, pp. 776-778.
- [16] Lampola P. (1999) “Optimisation of low-speed permanent-magnet synchronous machines with different rotor designs”, *Electromotion*, vol. 6, No. 4, pp: 147-159.
- [17] Kang G.-H., Hur J., Nam H, Hong J.-P., and Kim G.-T. (2003) “Analysis of irreversible magnet demagnetization in line-start motors based on the finite-element method,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, no. 3, pp. 1488-1491.
- [18] Yang Y., Wu ch. (2010) ” Study of Anti-Demagnetization Property for a Flux-Shunt Permanent Magnet DC Motor”, *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* , pp: 422 – 426.
- [19] Xing J., Wang F., Wang T., Zhang Y. (2010). ”Study on Anti-Demagnetization of Magnet for High Speed Permanent Magnet Machine”, *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, VOL. 20, NO. 3, pp: 856 – 860.
- [20] Hwang K., Yang B., Rhyu S., Kim B., Kim D., Rhee S., Kwon B. (2009) " Optimal rotor design for reducing the partial demagnetization effect and cogging torque in spoke type PM motor " *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*.
- [21] Hosoi T., Watanabe H., Shima K., Fukami T., Hanaoka R., Takata S. (2010) ” Demagnetization Analysis of Additional Permanent Magnets in Salient-Pole Synchronous Machines under Sudden Short Circuits”, *International Conference on Electrical Machines*, Rome.
- [22] Shin H., Kim T., Kim C. (2011) "A Study on Irreversible Permanent Magnet Demagnetization in Flux-Reversal Machines", *International Conference on Electrical Machines and Systems*.
- [23] Surong H.; Aydin, M.; Lipo, T.A. (2001) "Torque quality assessment and sizing optimization for surface mounted permanent magnet machines", *Industry Applications Conference, Thirty-Sixth IAS Annual Meeting*, Volume 3, P1603.
- [24] Huang S., Luo J., Leonardi F., Lipo T.A. (1999) “A Comparison of Power Density for Axial Flux Machines Based on General Purpose Sizing Equations,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 2, pp. 185-192.
- [25] Huang, S., Aydin, M., Lipo, T.A. (2001) “TORUS Concept Machines: Pre-Prototyping Design Assessment for Two Major Topologies” *IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Sixth IAS Annual Meeting*. Vol. 3, p. 1619-1625.
- [26] Libert F. (2004) “Design, Optimization and Comparison of Permanent Magnet Motors for a Low-Speed Direct-Driven Mixer”, *Licentiate Thesis*, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- [27] Huang S., Aydin M., Lipo T.A. (2001) "TORUS concept machines: pre-prototyping design assessment for two major topologies", *Industry*

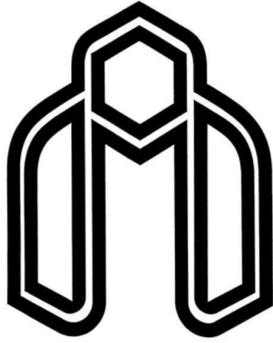
- Applications Conference, Thirty-Sixth IAS Annual Meeting, Volume 3, pp.:1619 -1625
- [28] Spooner E., Chalmers B. J. (1992) "Torus: A slotless, toroidal-stator, permanent-magnet generator," Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 139, pt. B, no. 6, pp. 497-506.
- [29] مرادی ح، (۱۳۹۰)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "مدلسازی، طراحی و بهینه‌سازی ماشین شار محوری آهنربای دائم (AFPM)"، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [30] Wang Q., Gao C., Wang F., Wang C (2011) "The out of step protection strategy for the Vertical-Moving Permanent Magnet Linear Synchronous Motor" International Conference on Electrical Information Engineering and Mechatronics, Vol. 138, p. 559-566.
- [31] Welchko B. A., Jahns T. M., Soong W. L., Nagashima J. M. (2003) "IPM synchronous machine drive response to symmetrical and asymmetrical short circuit faults" IEEE Trans. Energy Convers, vol. 18, pp. 291-298.
- [32] (2003) "IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses", IEEE Standard 1110-2002.
- [33] Thelin, P. (2002) "Short circuit fault conditions of a buried PMSM investigated with FEM" NORPIE Conference, Stockholm, Sweden.
- [34] Bolund B, Bernhoff H, Leijon M (2005) "Flywheel energy and power storage systems" Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 11, pp. 235-258.
- [35] Rahman L., Shirai M., (2012) "Design and analysis of a prototype HOTT generation system" BUP JOURNAL, Vol. 1, Issue 1.
- [36] Abrahamsson J., Bernhoff H. (2011) "Magnetic bearings in kinetic energy storage systems for vehicular applications" Journal of Electrical Systems, vol. 7, Issue 2, pp. 225-236.
- [37] Mitrovic N., Petronijevic M., Kostic V., Jeftenic B. (2012) "Electrical Drives for Crane Application, Mechanical Engineering", Dr. Murat Gokcek (Ed).
- [38] Maddison C.P., Mecrow B.C., Jack A.G. (1998) "Claw Pole Geometries For High Performance Transverse Flux Machines", Proc. Int. Conf. on Elec., pp. 340-345.
- [39] Masmoudi A., Njeh A., Mansouri A., Trabelsi H., Elantably A. (2004) "Optimization the Overlap between Teeth of a Claw Pole Transverse Flux Permanent Magnet Machine", IEEE Trans on Magnetics, Vol. 40, No. 3, pp. 1573 - 1578.
- [40] طحانیان ح، (۱۳۹۱)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "محاسبه توزیع تلفات و دمای ماشین سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع با استفاده از روش اجزای محدود"، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی شاهرود
- [41] Dehlinger N., Dubois M.R. (2010) "A New Design Method for the Clawpole Transverse Flux Machine Application to the Machine No-Load Flux optimization", Int. Conf. on Elec.Mach. ICEM, Rome.
- [42] بیم‌بهارا، (۱۳۹۰)، "ماشین‌های الکتریکی جلد اول، تئوری عملکرد و کاربردها"، ج ۱، ص ۸۲۰.

**Abstract:**

Permanent magnets (PMs) are mostly used in recent applications of the electrical machinery. PM machines present high efficiencies due to lack of excitation losses. Using PMs also reduces the weight and size of the machine. This yields to some increases of torque and power densities. This structure of the machine also is more simple and robust. Since the permanent magnets in a PM machine play a vital role, even a minor variation of their magnetic properties can reduce the quality of the machine performance significantly. The demagnetization is one of the phenomena that may cause a major change in the properties of magnets. This phenomenon, depending on its intensity, will change the machine performance characteristics via altering the amplitude and waveform of the Back EMF. However, despite of many undesirable effects, demagnetization phenomenon is not taken into account precisely by the common design algorithm when designing the machine. This thesis presents a modified approach for designing and modeling of the permanent magnet machines. The proposed method considers the effects of demagnetization properly. The suggested algorithm is implemented for modeling of an axial flux permanent magnet motor. Simulation results presented in this report show that the classical designing and modeling method may produce inaccurate values related to the performance of the machine. Moreover this report illustrates the benefit of applying a damper cage regarding the demagnetizing if for some reasons, reducing the armature currents is unavoidable in the transient operation regimes. It is also shown that, regarding the demagnetizing aspects, we can employ other PM type motors e.g. Transverse Flux Permanent Magnet (TFPM) motor instead of axial flux motor with similar power and other main operating characteristics. It is nice to be mentioned that the claw pole machine is a type of TFPM with a robust structure against demagnetization which is studied in this thesis as an alternative for the AFPMs.

**Key words:** Demagnetization, Permanent Magnet machines, Axial Flux, Transverse Flux





Shahrood University of Technology  
Faculty of Electrical and Robotic Engineering

Thesis Submitted for the Degree of Master of Science

# **Demagnetization Analysis of Axial Flux and Transvere Flux Permanent Magnet Motors**

**Nooshin Bahador**

Supervisor:

**Dr. Ahmad darabi**

Advisor:

**Dr. Hasan Hasanabadi**

September 2013