

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



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
فصل سوم - معرفی ماشین مغناطیس دائم شار محوری نمونه		
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
فصل چهارم - اصلاح الگوریتم مدلسازی موتور مغناطیس دائم شار محوری با در نظر گرفتن پدیده مغناطیس زدایی		
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
فصل پنجم - بررسی پدیده مغناطیس زدایی در موتور مغناطیس دائم شار محوری در شرایط عملکردی خاص.....		
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

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

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 پهنای 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°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 پرینیت به ترمینال موتور ۸۰ ۸۰
- شکل ۵-۱۹: سرعت موتور پس از افزودن مقاومت ۱.۶ پرینیت 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 پرینیت 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^۱، پارامغناطیس^۲، فرومغناطیس^۳، پادفرومغناطیس^۴ و فری مغناطیس^۵ [۱، ۲].

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

الف) گشتاور اسپینی^۶

ب) گشتاور مداری^۷ الکترون‌ها

ج) گشتاور القایی^۸ 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

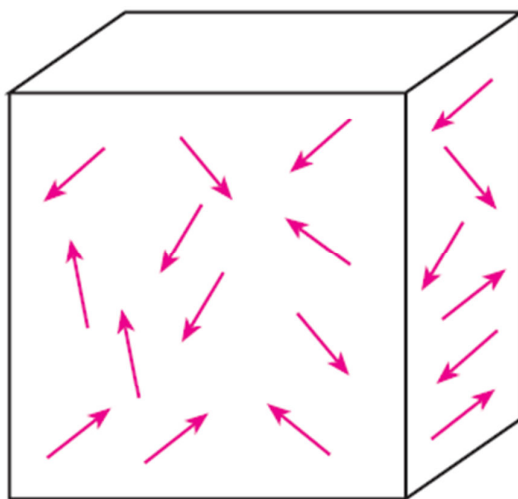
-
- 1- Diamagnetism
 - 2- Paramagnetism
 - 3- Ferromagnetism
 - 4- Antiferromagnetism
 - 5- Ferrimagnetism
 - 6- Spinning Torque
 - 7- Orbital Torque
 - 8- Induced Torque

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.

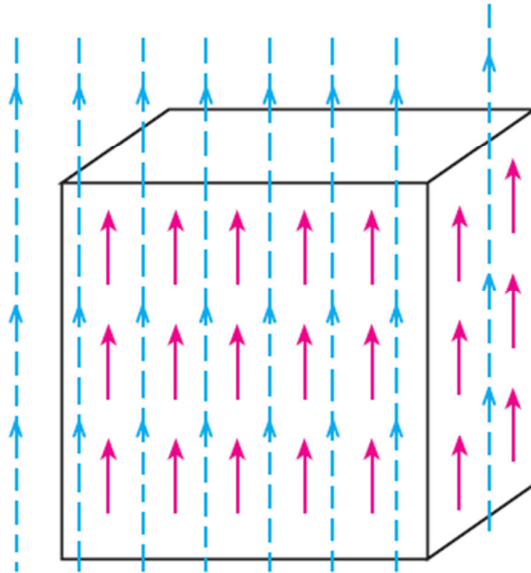
ب) در غیاب میدان مغناطیسی خارجی، جهت گشتاورهای دائمی اتم‌های آن‌ها به طور کاتوره‌ای در داخل ماده توزیع شده‌اند. زیرا نیرویی که باعث جفت‌شدگی بین این گشتاورها در داخل ماده می‌شود ضعیف است. این نیرو به نیروی تبادلی موسوم است و منشأ آن کوانتومی است.



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^۱ از یکدیگر جدا شده‌اند. به طوری که جهت‌گیری گشتاورهای مغناطیسی

1- Bloch Wall