

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی

ارزیابی نشت میدان مغناطیسی در موتورهای القایی

نگارنده: مهسا انتظاری

استاد راهنما:

دکتر امیر حسن نیا خیبری

استاد مشاور:

دکتر ولی اله مشایخی

دی ۱۴۰۰

شماره: ۱۸۵۲
تاریخ: ۱۴۰۰/۱۱/۴
ویرایش: ۱

باسمه تعالی

فرمهای ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد
مربوط به ورودی‌های ۹۴ به بعد



مدیریت تحصیلات تکمیلی

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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خاتم / آقای مهسا انتظاری با شماره دانشجویی ۹۶۰۳۱۸۴ رشته برق-قدرت گرایش الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی تحت عنوان ارزیابی نشست میدان مغناطیسی در موتورهای القایی که در تاریخ ۱۴۰۰/۱۰/۰۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۸ ☒ ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹ - ۱۶ ☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹ - ۱۴ ☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐ نوع تحقیق: نظری ☐ عملی ☐			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	امیر حسینی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	_____	_____	_____
۳- استاد مشاور	ولریا - مسیحی	استاد	
۴- استاد داور اول	مجتبی شوی	استاد	
۵- استاد داور دوم	نیما ابراهیم	استاد	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	مجتبی شوی	استاد	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء:

تقدیم اثر

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران، در کمال افتخار و امتنان تقدیم می نمایم به محضر ارزشمند اسطوره های زندگیم،
به مادر عزیزم، که موسید کرد تا من رو سپید شوم، عاشقانه سوخت تا کربانش وجودم و روشنگر راهم باشد و با مهربانش مسیر بهتر
زیستن و انسان بودن را به من آموخت و دعای خیرش همواره بدرقه ی راهم بود...
به روح پاک و ملکوتی پدر عزیزم، که عاشقانه برای زندگی با تمام دردها، سال ها جنگید و به من آموخت که دردهای بزرگ از
آن مردان بزرگ است اما از آن به کوچکی یاد می کنند و همواره الگوی مقاومت و استواری من بود...
به وجود نازنین یگانه خواهر عزیزم، دکتر مونا انطاری که با تلاش و پشتکاری بی حدش همواره در عرصه ی خود بهترین است و در
تمام طول تحصیل همراه، پشتیبان و مشوق من در این مسیر بود...
به پاس همه ی زحمات محبت آمیز و بی دریغ شان، که در تمام عرصه های زندگیم برایم کشیدند،
باشد که بتوانم ذره ای از الطاف بیکران شان را جبران نمایم...

پاسکزاری

پاس یکران ایندمنان را که، هستی مان، بخشد و به طریق علم و دانش، رهنمونان شد و به، همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و علم و معرفت را روزیایان کرد

پاس از اولین و بزرگترین اساتید زندگیم، پدر و مادر عزیزم که الفبای انسانیت را در مکتب عشق آنها آموختم و هرچه بگو شتم قطره ای از دریای یکران محبت ایشان را پاس توانم گفت

از استاد دکتر انقدر جناب آقای دکتر امیر حسن نیا، صمیمانه پاسکزارم، که رهنمودهای شایسته ای ایشان جان مایه ای اصلی این پایان نامه بود و بسیاری از سختی های راه را برایم آسانتر نمودند و بدون راهنمایی های ارزنده ای ایشان این پایان نامه به نتیجه مطلوب نمی رسید
از استاد گرامی جناب آقای دکتر ولی اله مشایخی، که بایاری ایشان همواره راه گشای بنده در تمام و اکمال این پایان نامه بودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم

از اساتید محترم جناب آقای دکتر حسین تبار و جناب آقای دکتر آزادی طینت، که زحمات و داورای این پایان نامه را بر عهده داشتند، بسیار پاسکزارم.

تعهدنامه

اینجانب **مهسا انتظاری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته الکترونیک قدرت و ماشین های الکتریکی دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع ارزیابی نشت میدان مغناطیسی در موتور های القایی تحت راهنمایی دکتر امیر حسن نیا متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام **دانشگاه صنعتی شاهرود** و یا **Shahrood University of Technology** به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) 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 :

امضاء 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 نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده :

موتور القایی رایج‌ترین موتور جریان متناوب در کاربردهای صنعتی است که جریان روتور از طریق القای الکترومغناطیسی از میدان مغناطیسی سیم‌پیچ‌های استاتور تامین می‌شود. طراحی ساده، عملکرد پایدار، ساختار مقاوم و ارزان، کارآمد بودن و هزینه تعمیرات و نگهداری اندک، از جمله برتری‌های بنیادی موتور القایی خصوصا از نوع قفس‌سنجایی است و لذا این موتورها از جایگاه ویژه‌ای در صنعت برخوردارند. از طرفی در برخی از کاربردهای این موتورها می‌توان به صنایع نظامی و تجهیزات و تاسیسات مخفی اشاره کرد. نشت میدان مغناطیسی در فضای اطراف موتورهای الکتریکی و ردیابی این میدان با حسگرها و ابزارهای ویژه، یکی از روش‌های عمده شناسایی تجهیزات مخفی است. بنابراین دسترسی به روشی مناسب برای ارزیابی و تخمین نشت میدان‌های مغناطیسی اطراف موتور و نیز طراحی مناسب در جهت کاهش میدان نشتی رتور بسیار حائز اهمیت است. روش‌های المان محدود یکی از رایج‌ترین ابزارهای محاسبه و تحلیل میدان مغناطیسی در ماشین‌های الکتریکی هستند. اما از آنجائیکه این روش‌ها مبتنی بر تقسیم فضای مساله به اجزای بسیار کوچک هستند، تحلیل میدان در فواصل بسیار دور از موتور مستلزم حل مساله با تعداد المان‌های زیاد بوده و با مشکل حجم بالای محاسبات مواجه می‌شود. از سوی دیگر روش‌های تحلیلی برای مدلسازی توزیع جریان نسبتا پیچیده در سیم‌پیچ‌های ماشین‌های الکتریکی، دقت کافی ندارند و بویژه برای محاسبه میدان در نقاط دور از موتور، خطای زیادی ایجاد می‌کنند. در این پایان‌نامه از یک روش جدید ترکیبی با استفاده از مدل اجزای محدود و قضیه هم‌ارزی برای محاسبه میدان مغناطیسی در فواصل بسیار دور از موتور استفاده شده است. این روش محدودیت زمان محاسبات روش اجزای محدود و مشکل تقریب زیاد در روش تحلیلی را ندارد و برای تمام انواع موتورهای الکتریکی قابل استفاده است. با استفاده از روش پیشنهادی، مولفه‌های مختلف میدان مغناطیسی در فواصل دور از یک موتور القایی رتور قفسی 1hp، محاسبه شده و تاثیر پارامترهای مختلف طراحی بر میدان نشتی موتور بررسی می‌شود. با توجه به مطالعات انجام شده، سیم‌پیچ‌های انتهایی استاتور بیشترین تاثیر را در میدان نشتی موتور دارند و لذا راهکاری برای مهار میدان این بخش از موتور مورد توجه قرار گرفته است. با استفاده از راهکارهای پیشنهادی در این پایان‌نامه، تا بیش از ده برابر می‌توان میدان نشتی موتور القایی مذکور را کاهش داد.

کلید واژه‌ها : موتور القایی، نشت میدان مغناطیسی، تشخیص و ردیابی، قضیه هم‌ارزی، روش المان محدود

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه و کلیات تحقیق	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ بیان مسئله	۲
۳-۱ اهداف پایان نامه	۴
۴-۱ ساختار پایان نامه	۵
فصل دوم : مروری بر پژوهش ها و مراجع گذشته	۷
۱-۲ مقدمه	۸
۲-۲ پژوهش های انجام شده در زمینه بررسی انتشار میدان در فواصل نزدیک	۹
۳-۲ تحقیقات انجام شده در زمینه مدلسازی موتور الکتریکی	۱۲
۴-۲ پژوهش های انجام شده در زمینه بررسی انتشار میدان مغناطیسی به واسطه آزمایش عملی	۱۵
فصل سوم : ارزیابی و بررسی نشت میدان مغناطیسی در موتور القایی	۳۱
۱-۳ مقدمه	۳۲
۲-۳ آنالیز المان محدود	۳۲
۳-۳ معرفی و تشریح قضیه هم‌ارزی	۳۴
۴-۳ محاسبه میدان مغناطیسی اطراف سیم محدود حامل جریان الکتریکی با استفاده از قضیه هم‌ارزی	۳۶
۵-۳ معرفی موتور القایی مورد مطالعه	۳۹
۶-۳ تحلیل و توسعه مدل در نرم افزار المان محدود	۴۳
۷-۳ محاسبه میدان مغناطیسی اطراف موتور القایی با استفاده از قضیه هم‌ارزی	۴۸
فصل چهارم : بهینه سازی ساختار موتور القایی به منظور کاهش نشت میدان	۵۹
۱-۴ مقدمه	۶۰
۲-۴ مقایسه سیم پیچی یک طبقه و دو طبقه استاتور	۶۰
۳-۴ مقایسه سیم پیچی دو طبقه بدون گام کسری و با گام کسری	۶۷
۴-۴ بررسی پارامتر D و L با ثابت نگه داشتن حجم داخلی موتور	۷۰
۱-۴-۴ موتور القایی با سیم پیچی دو طبقه با کوتاهی گام و طول محوری نصف حالت اولیه (حالت دوم)	۷۰
۲-۴-۴ موتور القایی با سیم پیچی دو طبقه با کوتاهی گام و طول محوری دو برابر حالت اولیه (حالت سوم)	۷۷
۵-۴ بررسی تاثیر شیلد انتهایی بر انتشار میدان از موتور القایی	۸۳
فصل پنجم : جمع بندی ، نتیجه گیری و پیشنهادها	۹۱
۱-۵ جمع بندی	۹۲
۲-۵ نتیجه گیری	۹۲
۳-۵ پیشنهادها	۹۳
مراجع	۹۵

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: انتشار امواج متعامد الکتریکی و مغناطیسی در فضا ----- ۳
- شکل ۱-۲: مقادیر میدان مغناطیسی: الف) $I=0$ A، ب) $I=15$ A ----- ۱۰
- شکل ۲-۲: مقادیر میدان مغناطیسی با محافظ اطراف موتور: الف) $I=0$ A، ب) $I=15$ A ----- ۱۱
- شکل ۳-۲: مدلسازی دوقطبی مغناطیسی با حلقه جریان ----- ۱۲
- شکل ۴-۲: موتور و حسگرهای افقی و عمودی ----- ۱۶
- شکل ۵-۲: مولفه مماسی میدان در اطراف موتور به شعاع 500 mm ----- ۱۶
- شکل ۶-۲: مولفه شعاعی و مماسی میدان در اطراف موتور بدون روتور به شعاع 680 mm ----- ۱۷
- شکل ۷-۲: مولفه شعاعی و مماسی میدان در اطراف موتور با روتور به شعاع 680 mm ----- ۱۸
- شکل ۸-۲: مولفه شعاعی و مماسی میدان موتور چهار قطبی با شیلد: الف) بدون روتور ب) با روتور ----- ۱۸
- شکل ۹-۲: مولفه شعاعی و مماسی میدان موتور چهار قطبی بدون شیلد و با روتور ----- ۱۹
- شکل ۱۰-۲: مسیر شار در موتور القایی ۶ قطبی ----- ۲۱
- شکل ۱۱-۲: مدار معادل مغناطیسی موتور القایی ----- ۲۲
- شکل ۱۲-۲: بلوک دیاگرام سیستم اندازه‌گیری ----- ۲۳
- شکل ۱۳-۲: تنظیمات آزمایشی موتور IM و نقاط اندازه‌گیری در سطح صفر ----- ۲۳
- شکل ۱۴-۲: توزیع چگالی شار مغناطیسی در $z=10$ cm: الف) کانتور خطوط نما، ب) نقشه سه بعدی ----- ۲۴
- شکل ۱۵-۲: توزیع چگالی شار مغناطیسی در $z=20$ cm: الف) کانتور خطوط نما، ب) نقشه سه بعدی ----- ۲۴
- شکل ۱۶-۲: توزیع چگالی شار مغناطیسی در $z=30$ cm: الف) کانتور خطوط نما، ب) نقشه سه بعدی ----- ۲۵
- شکل ۱۷-۲: توزیع چگالی شار مغناطیسی در $z=0$ cm: الف) کانتور خطوط نما، ب) نقشه سه بعدی ----- ۲۵
- شکل ۱۸-۲: نقاط اندازه‌گیری میدان در جهت شعاعی در وسط موتور ----- ۲۵
- شکل ۱۹-۲: تغییرات چگالی شار با فاصله، در وسط موتور ----- ۲۶
- شکل ۲۰-۲: تخمین چگالی شار شعاعی با مدل تحلیلی و $\mu r = 2000$ ----- ۲۶
- شکل ۲۱-۲: تخمین چگالی شار شعاعی با مدل تحلیلی و $\mu r = 1500$ ----- ۲۷
- شکل ۲۲-۲: حسگرهای سیم‌پیچ اندازه‌گیر میدان اطراف موتور القایی ----- ۲۷
- شکل ۲۳-۲: بالای چگالی شار مغناطیسی ردیابی شده توسط حسگر x، پایین) جریان فاز a ----- ۲۸
- شکل ۲۴-۲: بالای چگالی شار مغناطیسی ردیابی شده توسط حسگر y، پایین) جریان فاز a ----- ۲۸
- شکل ۲۵-۲: بالای چگالی شار مغناطیسی ردیابی شده توسط حسگر z، پایین) جریان فاز a ----- ۲۹
- شکل ۱-۳: کاربرد اصل هم‌ارزی ----- ۳۴
- شکل ۲-۳: نمایش بردار R توسط بردارهای r و r' ----- ۳۵
- شکل ۳-۳: فلوجارت محاسبه میدان با استفاده از قضیه هم‌ارزی ----- ۳۵
- شکل ۴-۳: سیم محدود حامل جریان ----- ۳۶
- شکل ۵-۳: مش بندی سطح جانبی استوانه‌ای مفروض اطراف سیم محدود حامل جریان ----- ۳۷

- شکل ۳-۶: مش بندی سطح بالایی استوانه‌ی مفروض اطراف سیم محدود حامل جریان -----۳۷
- شکل ۳-۷: مولفه H_y در راستای x اطراف سیم محدود حامل جریان -----۳۸
- شکل ۳-۸: موتور القایی مورد مطالعه: الف) ساختار کلی موتور، ب) اجزا اصلی موتور، ج) روتور قفس سنجابی، د) استاتور با سیم‌پیچی یک طبقه و ۲۴ شیار -----۴۰
- شکل ۳-۹: نمای دو بعدی موتور القایی و ابعاد اندازه‌گیری شده -----۴۰
- شکل ۳-۱۰: ترسیم سه بعدی موتور در نرم‌افزار المان محدود -----۴۳
- شکل ۳-۱۱: مش‌های مدل سه بعدی موتور القایی -----۴۴
- شکل ۳-۱۲: منحنی اشباع مغناطیسی هسته فولادی موتور القایی -----۴۵
- شکل ۳-۱۳: شکل جریان سه فاز اعمال شده به استاتور -----۴۵
- شکل ۳-۱۴: توزیع چگالی شار مغناطیسی در سرعت نامی -----۴۶
- شکل ۳-۱۵: توزیع اندازه چگالی شار مغناطیسی در فاصله هفت برابر قطر موتور القایی -----۴۶
- شکل ۳-۱۶: دو راستای محوری و شعاعی موتور برای تحلیل اندازه نشت چگالی شار مغناطیسی -----۴۷
- شکل ۳-۱۷: تغییرات شدت میدان مغناطیسی اطراف موتور در دو راستای محوری و شعاعی -----۴۷
- شکل ۳-۱۸: الف) نمای کلی مش بندی، ب) بخش‌های منتخب بر روی سطوح جانبی و بالا برای استوانه مفروض اطراف موتور -----۴۹
- شکل ۳-۱۹: مولفه شعاعی در بخش‌های انتخاب شده بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور یک طبقه -----۴۹
- شکل ۳-۲۰: مولفه مماسی در بخش‌های انتخاب شده بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور یک طبقه -----۵۰
- شکل ۳-۲۱: مولفه عمودی در بخش‌های انتخاب شده بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور یک طبقه -----۵۰
- شکل ۳-۲۲: مولفه شعاعی در بخش‌های انتخاب شده بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور یک طبقه -----۵۱
- شکل ۳-۲۳: مولفه مماسی در بخش‌های انتخاب شده بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور یک طبقه -----۵۱
- شکل ۳-۲۴: مولفه عمودی در بخش‌های انتخاب شده بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور یک طبقه -----۵۲
- شکل ۳-۲۵: مولفه شعاعی در بخش‌های انتخاب شده بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور یک طبقه -----۵۲
- شکل ۳-۲۶: مولفه مماسی در بخش‌های انتخاب شده بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور یک طبقه -----۵۲
- شکل ۳-۲۷: مولفه عمودی در بخش‌های انتخاب شده بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور یک طبقه -----۵۳
- شکل ۳-۲۸: روند تغییرات مولفه‌های میدان در راستای محور x -----۵۴
- شکل ۳-۲۹: راستا های در نظر گرفته شده اطراف موتور مورد مطالعه برای محاسبه میدان -----۵۶
- شکل ۳-۳۰: مقادیر مولفه‌های میدان و اندازه میدان برآیند در محور های ۱، ۳، ۵ و ۷ -----۵۶
- شکل ۳-۳۱: مقادیر مولفه‌های میدان و اندازه میدان برآیند در محور های ۲، ۴، ۶ و ۸ -----۵۷
- شکل ۳-۳۲: مقایسه اندازه میدان برآیند در دو راستای مینیمم و ماکزیمم اندازه میدان -----۵۷
- شکل ۴-۱: الف) موتور با طراحی سیم‌پیچی یک طبقه، ب) موتور با طراحی سیم‌پیچی دو طبقه -----۶۱
- شکل ۴-۲: نمودار گشتاور موتور القایی: الف) با سیم‌پیچی یک طبقه، ب) با سیم‌پیچی دو طبقه -----۶۱
- شکل ۴-۳: مولفه شعاعی در بخش‌های انتخاب شده بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور دو طبقه -----۶۲
- شکل ۴-۴: مولفه مماسی در بخش‌های انتخاب شده بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور دو طبقه -----۶۳
- شکل ۴-۵: مولفه عمودی در بخش‌های انتخاب شده بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور دو طبقه -----۶۳

- شکل ۴-۶: مولفه شعاعی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور دو طبقه-----۶۳
- شکل ۴-۷: مولفه مماسی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور دو طبقه-----۶۴
- شکل ۴-۸: مولفه عمودی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور دو طبقه-----۶۴
- شکل ۴-۹: مولفه شعاعی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور دو طبقه-----۶۴
- شکل ۴-۱۰: مولفه مماسی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور دو طبقه-----۶۵
- شکل ۴-۱۱: مولفه عمودی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور دو طبقه-----۶۵
- شکل ۴-۱۲: روند تغییرات میدان اطراف موتور دو طبقه در راستای محور x-----۶۶
- شکل ۴-۱۳: مقایسه اندازه نشت میدان مغناطیسی در موتور با سیم‌پیچی یک طبقه و دو طبقه-----۶۷
- شکل ۴-۱۴: موتور القایی با سیم‌پیچی دو طبقه: (الف) با گام کامل، (ب) با کوتاهی گام کلاف-----۶۸
- شکل ۴-۱۵: مقایسه اندازه میدان در سیم‌پیچی موتور با گام کامل و با کوتاهی گام-----۶۸
- شکل ۴-۱۶: بررسی نشت میدان در سیم‌پیچی یک طبقه و سیم‌پیچی دو طبقه با و بدون کوتاهی گام-----۶۹
- شکل ۴-۱۷: (الف) موتور القایی دو طبقه با کوتاهی گام کلاف، (ب) موتور حالت (الف) با طول محوری نصف-----۷۱
- شکل ۴-۱۸: مولفه شعاعی در بخش‌های منتخب بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور با طول نصف-----۷۲
- شکل ۴-۱۹: مولفه محیطی در بخش‌های منتخب بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور با طول نصف-----۷۲
- شکل ۴-۲۰: مولفه عمودی در بخش‌های منتخب بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور با طول نصف-----۷۳
- شکل ۴-۲۱: مولفه شعاعی در بخش‌های منتخب بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور با طول نصف-----۷۳
- شکل ۴-۲۲: مولفه محیطی در بخش‌های منتخب بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور با طول نصف-----۷۳
- شکل ۴-۲۳: مولفه عمودی در بخش‌های منتخب بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور با طول نصف-----۷۴
- شکل ۴-۲۴: مولفه شعاعی در بخش‌های منتخب بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور با طول نصف-----۷۴
- شکل ۴-۲۵: مولفه محیطی در بخش‌های منتخب بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور با طول نصف-----۷۴
- شکل ۴-۲۶: مولفه عمودی در بخش‌های منتخب بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور با طول نصف-----۷۵
- شکل ۴-۲۷: اندازه میدان برآیند در راستای ماکزیمم میدان اطراف موتور القایی با طول محوری نصف-----۷۶
- شکل ۴-۲۸: اندازه میدان برآیند در راستای مینیمم میدان اطراف موتور القایی با طول محوری نصف-----۷۶
- شکل ۴-۲۹: (الف) موتور القایی دو طبقه با کوتاهی گام کلاف، (ب) موتور حالت (الف) با طول محوری دو برابر-----۷۷
- شکل ۴-۳۰: مولفه شعاعی در بخش‌های منتخب بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور با طول دو برابر-----۷۷
- شکل ۴-۳۱: مولفه محیطی در بخش‌های منتخب بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور با طول دو برابر-----۷۸
- شکل ۴-۳۲: مولفه عمودی در بخش‌های منتخب بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور با طول دو برابر-----۷۸
- شکل ۴-۳۳: مولفه شعاعی در بخش‌های منتخب بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور با طول دو برابر-----۷۹
- شکل ۴-۳۴: مولفه محیطی در بخش‌های منتخب بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور با طول دو برابر-----۷۹
- شکل ۴-۳۵: مولفه عمودی در بخش‌های منتخب بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور با طول دو برابر-----۷۹
- شکل ۴-۳۶: مولفه شعاعی در بخش‌های منتخب بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور با طول دو برابر-----۸۰
- شکل ۴-۳۷: مولفه محیطی در بخش‌های منتخب بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور با طول دو برابر-----۸۰
- شکل ۴-۳۸: مولفه عمودی در بخش‌های منتخب بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور با طول دو برابر-----۸۰
- شکل ۴-۳۹: اندازه میدان برآیند در راستای ماکزیمم میدان اطراف موتور القایی با طول محوری دوبرابر-----۸۱

- شکل ۴-۴۰: اندازه میدان برآیند در راستای مینیمم میدان اطراف موتور القایی با طول محوری دوبرابر -----۸۲
- شکل ۴-۴۱: بررسی انتشار میدان با تغییر طول محوری موتور -----۸۲
- شکل ۴-۴۲: الف) موتور القایی با سیم‌پیچی دوطبقه با کوتاهی گام کلاف، ب) طراحی موتور (الف) با شیلد بر روی سیم‌پیچی‌های انتهایی موتور -----۸۴
- شکل ۴-۴۳: مولفه شعاعی در بخش‌های منتخب بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور با شیلد انتهایی -----۸۴
- شکل ۴-۴۴: مولفه محیطی در بخش‌های منتخب بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور با شیلد انتهایی -----۸۵
- شکل ۴-۴۵: مولفه عمودی در بخش‌های منتخب بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور با شیلد انتهایی -----۸۵
- شکل ۴-۴۶: مولفه شعاعی در بخش‌های منتخب بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور با شیلد انتهایی -----۸۵
- شکل ۴-۴۷: مولفه محیطی در بخش‌های منتخب بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور با شیلد انتهایی -----۸۶
- شکل ۴-۴۸: مولفه عمودی در بخش‌های منتخب بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور با شیلد انتهایی -----۸۶
- شکل ۴-۴۹: مولفه شعاعی در بخش‌های منتخب بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور با شیلد انتهایی -----۸۶
- شکل ۴-۵۰: مولفه محیطی در بخش‌های منتخب بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور با شیلد انتهایی -----۸۷
- شکل ۴-۵۱: مولفه عمودی در بخش‌های منتخب بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور با شیلد انتهایی -----۸۷
- شکل ۴-۵۲: اندازه میدان برآیند در راستای ماکزیمم میدان اطراف موتور القایی با شیلد انتهایی -----۸۸
- شکل ۴-۵۳: مقایسه طراحی های متفاوت موتور القایی -----۸۸

فهرست جداول

- جدول ۱-۲ : مقایسه اندازه‌گیری و محاسبات چگالی شار اطراف موتور مورد مطالعه ----- ۱۴
- جدول ۲-۲ : تخمین شدت میدان مغناطیسی برای یک کارخانه غنی سازی شامل هزار دستگاه سانتریفیوژ ----- ۱۴
- جدول ۳-۲ : مشخصات موتورهای القایی مورد استفاده در آزمایش ----- ۲۴
- جدول ۱-۳ : مقادیر نامی موتور----- ۴۱
- جدول ۲-۳ : اطلاعات ابعادی موتور القایی ----- ۴۱
- جدول ۳-۳ : مشخصات هادی‌های مس و آلومینیوم----- ۴۵

فهرست علائم

تعریف	نماد متغیر	واحد
میدان الکتریکی	E	N/C
میدان مغناطیسی	M	A/m
سرعت نور	C	m/s
طول موج	λ	m
فرکانس	f	Hz
جریان	I	A
چگالی شار مغناطیسی	B	T
تعداد دور سیم‌پیچی‌های موتور	N	$turn$
شعاع دوقطبی مغناطیسی	b	mm
ممان مغناطیسی دوقطبی	m	$A.m^2$
فاصله از مرکز دوقطبی	R	m
مولفه شعاعی شدت میدان مغناطیسی	H_R	A/m
مولفه مماسی شدت میدان مغناطیسی	H_θ	A/m
شار اصلی پیوندی	Ψ_{Main}	wb
شار نشتی استاتور	Ψ_{Ls}	wb
شار نشتی روتور	Ψ_{Lr}	wb
بخشی از شار پیوندی خارج استاتور	Ψ_{Stray}	wb
شار خالص فاصله هوایی	Ψ_{Airgap}	wb
نیروی محرکه مغناطیسی	MMF	$A.turn$
Mmf ناشی از جریان‌های استاتور	F_{Stator}	$A.turn$
Mmf ناشی از جریان‌های روتور	F_{Rotor}	$A.turn$
رلوکتانس استاتور	R_{Stator}	$A.turn/ wb$
رلوکتانس روتور	R_{Rotor}	$A.turn/ wb$

m	l_{Stator}	طول مسیر شار استاتور
m	l_{Rotor}	طول مسیر شار روتور
H/m	μ_0	ضریب نفوذپذیری خلا
-	μ_r	ضریب نفوذپذیری نسبی
-	μ_{Stator}	ضریب نفوذپذیری نسبی استاتور
-	μ_{Rotor}	ضریب نفوذپذیری نسبی روتور
m^2	A_{Stator}	سطح مقطع استاتور
m^2	A_{Rotor}	سطح مقطع روتور
rad	θ_p	زاویه قطب
mm	s	ضخامت یوغ استاتور
mm	r_s	شعاع متوسط استاتور
m	x	فاصله از سطح استاتور
T	B_{airgap}	چگالی شار فاصله هوایی
T	B_{stray}	چگالی شار نشتی
C/m^2	ρ	چگالی بار الکتریکی
A/m^2	J	چگالی جریان الکتریکی
F/m	ϵ	ضریب گذردهی الکتریکی
A/m	J_s	جریان سطحی هم‌ارز
A/m	H_t	اندازه برآیند شدت میدان از هم ارزی
-	n	بردار واحد عمودی برون‌سو
-	r	بردار مکان مشاهده‌ی میدان
-	r'	بردار مکان مرکز تمام مش‌ها
A/m	H_y	مولفه y شدت میدان
W	P	توان
V	V	ولتاژ
rpm	n_r	سرعت

mm	L	طول محوری موتور
mm	Ag	طول فاصله هوایی
mm	$D_{out,s}$	قطر خارجی استاتور
mm	D	قطر داخلی استاتور
mm	$D_{out,r}$	قطر خارجی روتور
mm	D_{shaft}	قطر شفت روتور
mm	T_s	عرض دندان استاتور
mm	W_s	عرض شیار استاتور
mm	H_s	ارتفاع دندان استاتور
-	S_s	تعداد شیار استاتور
mm^2	S_{bar}	سطح مقطع روتور بار
-	S_r	تعداد میله ها روتور
T	B_{av}	چگالی شار متوسط فاصله هوایی
A/m	A	ضریب بارگزاری الکتریکی ویژه
-	K_w	ضریب سیم پیچی
wb	φ	شار
$turn$	N_{ph}	تعداد دور سیم پیچی یک فاز
$turn$	N_{coil}	تعداد دور سیم پیچی یک کوئل

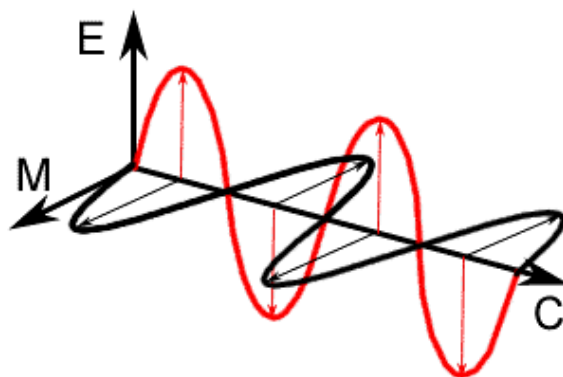
فصل اول: مقدمه و کلیات تحقیق

۱-۱ مقدمه

با توسعه شبکه‌های جریان متناوب و بهره‌وری از برق سه فاز به عنوان برق صنعتی، مصرف انرژی در صنعت برق، امروزه رو به افزایش است و اثرات مخربی بر روی سلامتی و ایمنی انسان‌ها در مجاورت آنها می‌گذارد. تاثیرات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر روی سلامت انسان‌ها از مضرات این صنعت است. انسان‌ها در زندگی روزمره خود در معرض میدان الکتریکی و مغناطیسی قرار می‌گیرند. میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی به وسیله خطوط نیرو، تجهیزات الکترونیکی و حتی ماشین‌های الکتریکی که در بسیاری از تجهیزات کاربرد دارند، تولید می‌شوند. به عبارت دیگر امواجی که روزانه در معرض آن هستیم مانند امواج رادیویی، امواج تلویزیونی، امواج ماکروویو و تمام امواجی که از سایر تجهیزات الکترونیکی تابش می‌کنند، جزو امواج الکترومغناطیسی هستند. امواج الکترومغناطیسی می‌توانند دارای دو تاثیر عمده باشند. اول آنکه می‌توانند بر روی سیستم‌های عصبی، رشد، تکامل و ترمیم سلول‌ها اختلالاتی ایجاد کنند و همچنین اثرات مخرب بر روی تجهیزات مجاور هم در فواصل نزدیک داشته باشند. دوم آنکه انتشار این امواج به جهت مورد ردیابی قرار گرفتن، در برخی کاربردهای نظامی و حساس، در فواصل دور دارای اهمیت هستند. در هر دو صورت انتشار این امواج می‌تواند مشکل‌ساز باشد و بنابراین حداقل میزان انتشار امواج الکترومغناطیسی دارای اهمیت است.

۱-۲ بیان مسئله

تشعشعات الکترومغناطیسی از تمام تجهیزات الکترونیکی و همچنین وسایلی که در ساخت آن‌ها از موتورهای الکتریکی استفاده شده است، ساطع می‌شوند. تمام تشعشعات الکترومغناطیسی دارای خواص اساسی هستند و مطابق با مبانی تئوری موج به روش‌هایی قابل پیش‌بینی، رفتار می‌کنند. مطابق شکل زیر تشعشعات الکترومغناطیسی شامل یک میدان الکتریکی که دامنه آن در جهتی عمود بر جهتی که تابش در آن جهت حرکت می‌کند، تغییر می‌کند و یک میدان مغناطیسی با زاویه قائم نسبت به میدان الکتریکی جهت‌گیری می‌کند، است. هر دو این میدان‌ها با سرعت نور حرکت می‌کنند.



شکل ۱-۱ : انتشار امواج متعامد الکتریکی و مغناطیسی در فضا

دو ویژگی تشعشعات الکترومغناطیسی که خصوصا برای درک و دریافت از راه دور این تشعشعات مهم هستند، طول موج (λ برحسب متر یا برخی فاکتورهای متر) و فرکانس (f برحسب هرتز یا مضارب آن) هستند. طول موج طول یک سیکل موج است که می‌تواند به عنوان فاصله‌ی بین قله‌های موج متوالی اندازه‌گیری شود. فرکانس به تعداد سیکل‌های موجی که از نقطه ثابتی در واحد زمان می‌گذرد اشاره دارد. فرکانس و طول موج با رابطه زیر مرتبط هستند.

$$C = \lambda \times f \quad (1-1)$$

بنابراین این دو با یکدیگر رابطه معکوس دارند. هرچه طول موج کوتاه‌تر باشد، فرکانس بالاتر است و برعکس. درک ویژگی‌های تشعشعات الکترومغناطیسی از نظر طول موج و فرکانس آنها برای درک اطلاعاتی به منظور سنجش از راه دور، بسیار مهم است. سنجش و تخمین از راه دور را می‌توان به عنوان فرآیند بدست آوردن اطلاعات بدون تماس با تجهیز تعریف کرد. حسگرها یکی از ابزارهای الکترومغناطیسی برای این منظور هستند. حسگرها را می‌توان بسته به نحوه کارکردشان به گروه‌های مختلفی طبقه‌بندی کرد. حسگرها می‌توانند مکانیکی، الکتریکی، مغناطیسی یا نوری باشند. یکی از انواع حسگرها که در تشخیص میدان‌های مغناطیسی کاربرد دارند، حسگرهای مغناطیسی است. حسگرهای مغناطیسی، اطلاعات مغناطیسی یا کد شده به صورت مغناطیسی را به سیگنال‌های الکتریکی برای پردازش در مدارهای الکترونیک تبدیل می‌کنند. حسگرهای

مغناطیسی برای تشخیص میدان‌های مغناطیسی در کاربردهای متفاوتی استفاده می‌شوند. به عنوان مثال یک نوع از این حسگرها، که در آن سیگنال خروجی، تابعی از چگالی میدان مغناطیسی اطراف آن است حسگر اثر هال نامیده می‌شود. همچنین مغناطیس‌سنج یا مگنتومتر^۱ نیز یک ابزاری است که مغناطیس حاصل از مغناطش مواد مغناطیسی مانند فرومغناطیس، یا جهت، قدرت و تغییر نسبی میدان مغناطیسی در یک مکان خاص را اندازه‌گیری می‌کند. قطب‌نما نمونه ساده‌ای از یک مغناطیس‌سنج است که جهت میدان مغناطیسی را نشان می‌دهد. مغناطیس‌سنج‌ها به شکل گسترده‌ای در اندازه‌گیری میدان مغناطیسی زمین و در نقشه‌برداری ژئوفیزیکی به منظور شناسایی انواع مختلف ناهنجاری مغناطیسی و همچنین در مسائل نظامی جهت تشخیص زیر دریایی‌ها و یا به عنوان یک آپ سامانه موقعیت‌یابی جهانی به کار می‌روند. اسکوئید (SQUID) یک حسگر فوق حساس مغناطیسی است که برای اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی بسیار ظریف استفاده می‌شود و به اندازه‌ای حساس هستند که می‌توانند برای اندازه‌گیری میدان‌هایی به کوچکی $10^{-18} \times 5$ تسلا مورد استفاده قرار گیرند [۵-۱].

۱-۳ اهداف پایان‌نامه

این پایان‌نامه به منظور دستیابی به دو هدف اساسی دنبال می‌شود. هدف اول محاسبه‌ی میدان مغناطیسی منتشرشده در اطراف موتورهای القایی در فواصل دور است. هدف دوم، ارائه اصلاحاتی در طراحی موتورهای القایی به منظور کاهش میدان مغناطیسی ناشی در اطراف موتور و در فواصل دور است. دلیل بررسی این موضوع از جهت ردیابی و شناسایی موتورهای الکتریکی در برخی کاربردهای حساس و نظامی است که ردیابی موتورهای الکتریکی تجهیزات، اهمیت به‌سزایی دارد. در نتیجه این پایان‌نامه به منظور ارائه‌ی راهکارهایی برای کاهش امواج میدان مغناطیسی اطراف موتورهای الکتریکی انجام شد.

¹ Magnetometer

۴-۱ ساختار پایان نامه

در فصل دوم مروری بر پژوهش‌های انجام شده در زمینه نشت میدان مغناطیسی در اطراف موتورهای الکتریکی انجام می‌شود. در فصل سوم، ابتدا مرور مختصری بر روش‌های عددی تحلیل میدان‌های مغناطیسی تشریح می‌شوند. سپس روش پیشنهادی این پایان‌نامه برای تحلیل میدان مغناطیسی اطراف موتور در فواصل دور با عنوان قضیه هم‌ارزی معرفی می‌شود. صحت و اعتبارسنجی این قضیه برای سیم محدود حامل جریان ارائه می‌شود. در نهایت موتور القایی مورد مطالعه، معرفی شده و با استفاده از قضیه هم‌ارزی و توسعه یک مدل تحلیلی برای محاسبه میدان مغناطیسی اطراف موتور در فواصل دور، نرخ کاهش مولفه‌های مختلف میدان ارزیابی می‌شوند. در فصل چهارم با توجه به دستیابی به رابطه تحلیلی برای برآورد و تخمین میدان‌های مغناطیسی در فواصل دور و در راستای هدف کاهش نشت میدان مغناطیسی اطراف موتورهای الکتریکی، طراحی‌های متنوعی با مشخصات نامی یکسان و گشتاور و سرعت یکسان با موتور مورد مطالعه اولیه، ارائه می‌شود. این کار با انگیزه‌ی عدم ردیابی و شناسایی موتورهای الکتریکی در تجهیزات و تاسیسات مخفی، در نهایت دسترسی به یک مدل با حداکثر کاهش ممکن نشت میدان مغناطیسی در اطراف موتور الکتریکی، انجام می‌شود. روش مورد استفاده در این پایان‌نامه مبتنی بر افزودن یک شیلد مغناطیسی بر روی سیم‌پیچ‌های انتهایی موتور است. همچنین به وسیله نرم‌افزار المان محدود شبیه‌سازی و انتشار میدان با کد برنامه‌نویسی در محیط متلب بر مبنای قضیه هم‌ارزی بررسی می‌شود. اگرچه در اکثر مراجع و مطالعات صورت‌گرفته پیشین قرار دادن شیلد پیشنهاد شده است، ولی نتیجه‌ای برای میزان انتشار و نشت میدان مغناطیسی در فواصل دور در هیچ یک از مراجع یافت نشده است. بنابراین برای اولین بار در این پایان‌نامه، روشی تحلیلی با دقت بالا و خطای کم برای تحلیل و ارزیابی نشت میدان مغناطیسی اطراف موتورهای القایی، در فواصل نسبتاً دور ارائه می‌شود. همچنین انتشار میدان در فواصل دور برای حالت بهینه از نظر کمترین میزان نشت میدان مغناطیسی برای موتور با شیلد انتهایی بررسی و برآورد می‌شود.

فصل دوم: مروری بر پژوهش‌ها و مراجع گذشته

۲-۱ مقدمه

در این فصل تحقیقات و پژوهش‌های مختلف ارائه شده‌ی پیشین به منظور بررسی و محاسبه‌ی شدت میدان‌های الکترومغناطیسی اطراف ماشین‌های الکتریکی بررسی خواهد شد. همچنین روش‌های سابق ارائه شده با هدف کاهش انتشار میدان‌های مغناطیسی اطراف ماشین‌های الکتریکی نیز شرح داده خواهد شد. با بررسی‌های صورت گرفته بر روی مقالات و تحقیقات قبلی که در زمینه نشت میدان‌های مغناطیسی اطراف موتورهای الکتریکی موجود است، دو نکته قابل توجه و حائز اهمیت است. نکته اول آنکه در برخی از این مقالات ارزیابی و سنجش میدان مغناطیسی اطراف موتور الکتریکی، تنها در فواصل نزدیک (به عنوان مثال کمتر از یک متر) صورت گرفت و در اکثر این تحقیقات، توسط روش‌های عددی نظیر آنالیز نرم‌افزارهای المان محدود انجام شد. در واقع به سبب عدم امکان تحلیل شبیه‌سازی‌ها در فواصل دورتر به دلیل زمان محاسباتی بالا و دقت محاسباتی پایین، بررسی‌ها فقط در نواحی نزدیک اطراف موتور صورت گرفت. با توجه به اینکه هدف این پایان‌نامه بررسی و تخمین انتشار میدان‌های مغناطیسی اطراف موتور الکتریکی در فواصل دورتر (به عنوان مثال بیشتر از ده متر) است، این اولین نقطه ضعف مراجع موجود است. نکته دوم آنکه در برخی از مقالات موجود، موتور الکتریکی یا سیم‌پیچی‌های آن با یک مدل ساده‌تر نظیر حلقه جریان مدل‌سازی شده و انتشار میدان مغناطیسی اطراف موتور برآورد شد. این دومین نقطه ضعف مراجع موجود به دلیل عدم تحلیل دقیق مقادیر نشت میدان مغناطیسی اطراف موتورهای الکتریکی است. همچنین لازم به ذکر است برخی از مراجع نیز، تنها به بررسی انتشار تشعشعات ناشی از درایو ماشین‌های الکتریکی پرداخته‌اند. مطالعات انتشار تشعشعات از درایوهای آسنکرون سه فاز اغلب به تجزیه و تحلیل میدان‌های الکترومغناطیسی منتشرشده از اینورتر و کابل محدود می‌شوند. نویز تداخل الکترومغناطیسی (EMI^1) که به عنوان یک سیگنال الکتریکی ناخواسته تعریف می‌شود، اثرات نامطلوبی را در یک سیستم کنترل ایجاد می‌کند، مانند خطاهای ارتباطات، عملکرد ضعیف تجهیزات و نقص یا عملکرد نادرست تجهیزات. مرجع [۶] به درک مشترک از موضوع EMI پرداخته است و

¹ Electromagnetic Interference

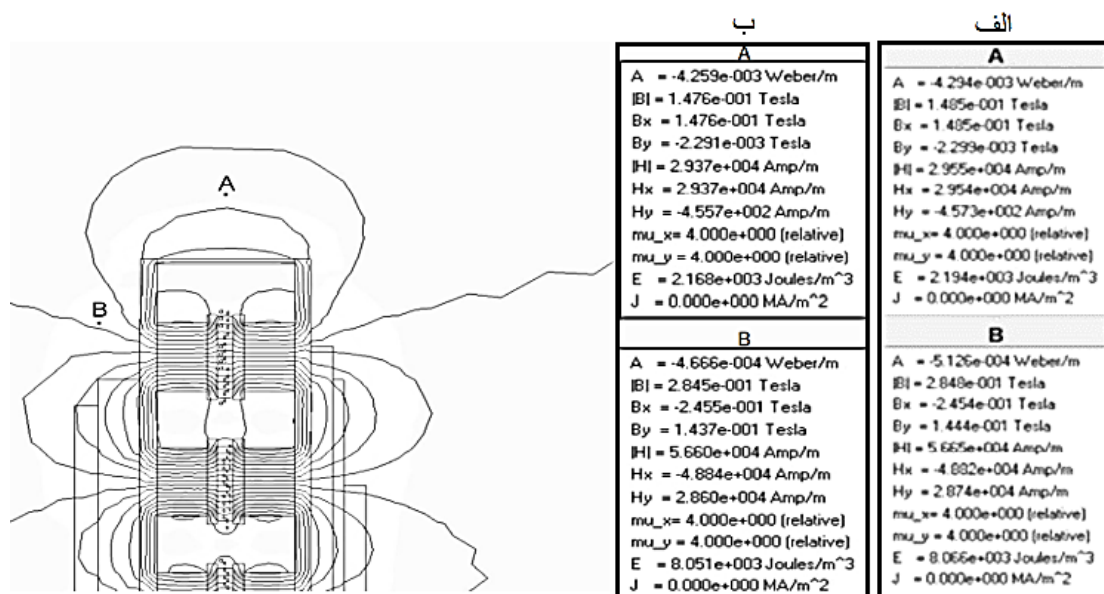
دستورالعمل‌هایی در کاربردهای صنعتی برای نصب درایوهای موتور AC با سرعت قابل تنظیم با مدولاسیون پهنای پالس (PWM¹) را ارائه می‌دهد. همچنین در مرجع [۷]، به ارزیابی انتشار تشعشعات ناشی از عملیات سوئیچینگ سیستم‌های درایو قدرت که منابعی از EMI تابشی و هدایت شده هستند و منجر به مشکلات سازگاری الکترومغناطیسی (EMC²) با سایر سیستم‌ها می‌شوند، پرداخته شده است. در مرجع [۸] نیز، با توصیف یک مدل تقریبی، انتشار تشعشعات ناشی از درایو ماشین القایی پیش‌بینی شده است و تنها با شبیه‌سازی کامپیوتری صحت مدل پیشنهادی اثبات شده است و آزمایش عملی برای اثبات مدل بیان شده صورت نگرفت. در ادامه برخی دیگر از مقالات و تحقیقات در زمینه‌ی میدان‌های منتشرشده از موتورهای الکتریکی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۲-۲ پژوهش‌های انجام شده در زمینه بررسی انتشار میدان در فواصل نزدیک

در [۹]، به بررسی موضوع سازگاری الکترومغناطیسی (EMC) که عدم در نظر گرفتن آن می‌تواند باعث احتمال وجود پارازیت در تجهیزات مجاور هم و همین‌طور موجب خطاهای جدی‌تر در تجهیزات الکترونیکی شود، پرداخته شد. یک موتور PM DC با روش المان محدود بصورت دو بعدی برای بررسی انتشار میدان‌های مغناطیسی در فواصل نزدیک اطراف موتور، شبیه‌سازی شد. این نوع موتورها در سیستم‌های خودرو (نظیر برف‌پاک کن خودرو، پمپ شیشه شوی خودرو، بالابر شیشه در خودرو و ...) کاربرد دارند. در این تحقیق تنها بر نوع بار موتور متمرکز شده است. آنالیز عددی میدان مغناطیسی برای دو مقدار جریان بار $I_z = I$ یعنی $I=0A$ و $I=15A$ انجام شد. مقادیر میدان مغناطیسی منتهی در دو نقطه مکانی نشان داده شده A و B در شکل زیر برای جریان $I=0A$ و $I=15A$ نشان داده شده است.

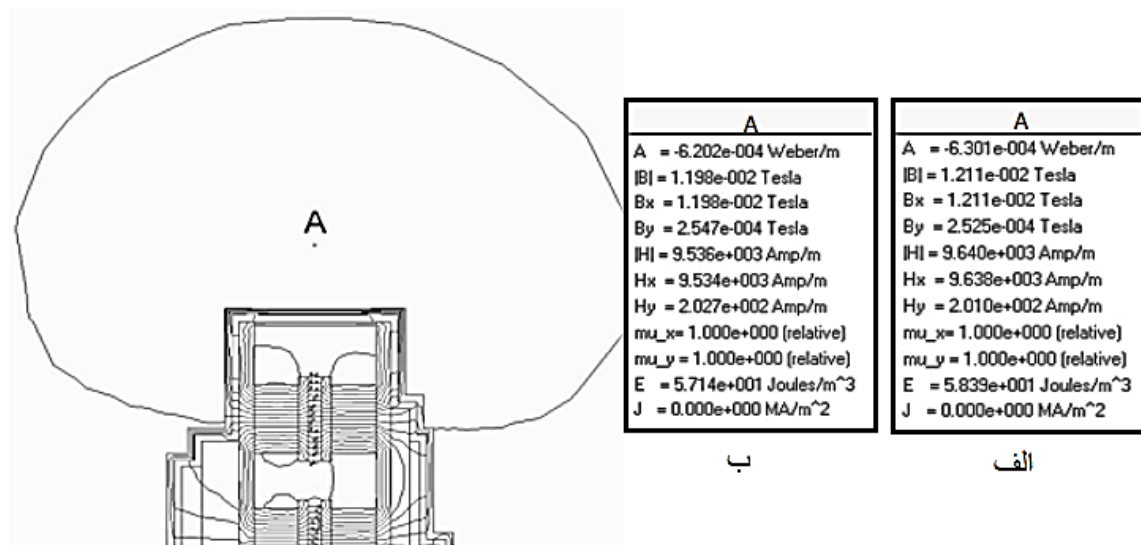
¹ Pulse Width Modulation

² Electromagnetic Compatibility



شکل ۲-۱: مقادیر میدان مغناطیسی: الف) I=0 A، ب) I=15 A [۹]

با اندازه‌گیری عملی چگالی شار مغناطیسی در محل A، جایی که میدان مغناطیسی بدست آمده کمترین است، صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی بررسی و تایید شده است. همانطور که واضح است، بهبود EMC موتورها می‌تواند به واسطه کاهش مقدار مطلق چگالی شار میدان مغناطیسی یا توسط کاهش تغییرات اندوکتانس مغناطیسی متغیر، ناشی از شرایط کار متغیر ماشین الکتریکی حاصل شود. قرار دادن پوشش محافظ مناسب، راه‌حل پیشنهادی برای بهبود EMC است. طراحی پوشش محافظ موتور با شبیه‌سازی کامپیوتری مورد آنالیز قرار گرفت. در این مقاله دو پوشش محافظ با ضخامت 2 mm در نظر گرفته شد. وظیفه پوشش محافظ اول با مقاومت نسبتاً بزرگ مغناطیسی (با کمترین نفوذ پذیری نسبی) کاهش اندازه میدان مغناطیسی نشی است. همچنین وظیفه پوشش محافظ دوم با مقاومت نسبتاً کوچک مغناطیسی (با بیشترین نفوذ پذیری نسبی) از سمت دیگر برای ایجاد اتصال کوتاه برای کاهش بقیه شار نشت است. نتایج شبیه‌سازی موتور با پوشش محافظ مطابق شکل ۲-۲ است.



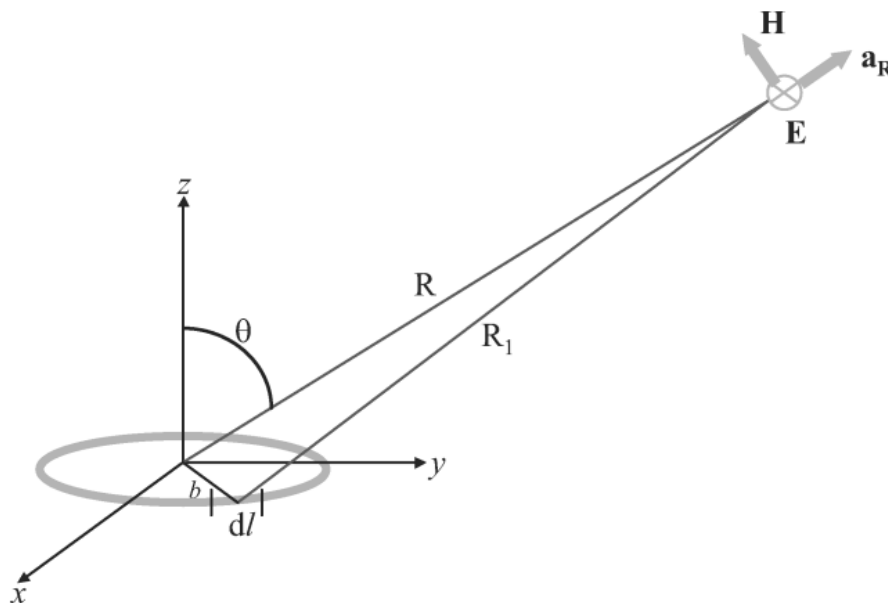
شکل ۲-۲: مقادیر میدان مغناطیسی با محافظ اطراف موتور : الف) $I=0$ A ، ب) $I=15$ A [۹]

با مقایسه نتایج بدست آمده از شکل فوق که پوشش محافظ اطراف موتور قرار داده شد، با نتایج حاصل در شکل ۱-۲ اندازه چگالی شار مغناطیسی در محل A تحت جریان موتور $I=0$ A از مقدار 0.1485 T به 0.01211 T کاهش می یابد و به طور مشابه اندازه چگالی شار مغناطیسی تحت جریان $I=15$ A از مقدار 0.1476 T به 0.01198 T کاهش می یابد. تغییرات چگالی شار مغناطیسی ناشی از تغییر جریان موتور از مقدار $\Delta B=0.0009$ T به $\Delta B=0.00013$ T کاهش می یابد.

از نقص های این روش می توان به این نکات اشاره نمود که روش تحلیل آنالیز عددی به واسطه شبیه سازی المان محدود دو بعدی باعث عدم تحلیل تمام مولفه های میدان می شود. همچنین شبیه سازی المان محدود دو بعدی تنها قادر به تحلیل میدان در فواصل نزدیک است. در فواصل دورتر حجم محاسبات بصورت غیرمنطقی افزایش یافته و در مقابل دقت نتایج کم می شود. لذا این روش برای تحلیل میدان منتشر شده از ماشین در فواصل دور قابل استفاده نیست. همچنین در این مقاله نتایج آزمایش عملی به صورت دقیق بیان نشده است. فاصله اندازه گیری میزان نشت چگالی شار میدان مغناطیسی اطراف موتور نیز تعیین نشده است.

۲-۳ تحقیقات انجام شده در زمینه مدلسازی موتور الکتریکی

در مرجع [۱۰]، به تخمین تشعشعات الکترومغناطیسی از موتورهای الکتریکی مورد استفاده در تاسیسات غنی‌سازی و سانتریفیوژها، پرداخته شده است. همچنین در این مقاله امکان شناسایی سانتریفیوژهای دوار از طریق امواج الکترومغناطیسی منتشرشده از آن، مورد بحث قرار گرفته است. این موضوع به دلیل آنکه تکنولوژی سانتریفیوژ در سطح جهانی به عنوان روش انتخابی غنی‌سازی اورانیوم مورد استفاده قرار می‌گیرد و به دلیل اهمیت بحث شناسایی این تاسیسات غنی‌سازی مخفی که می‌تواند برنامه هسته ای یک کشور را آشکار نماید، بسیار حائز اهمیت است. این مقاله مدلی برای برآورد انتشار میدان مغناطیسی برحسب تابعی از فاصله از تاسیسات غنی‌سازی سانتریفیوژها ارائه می‌دهد. در روش پیشنهادی این مقاله سیم‌پیچی‌های موتور سنکرون را بصورت یک حلقه سیم حامل جریان متناوب مطابق با شکل زیر مدلسازی کرد. به دلیل آنکه اثر هر بخش سیم‌پیچی مستقل از دیگری است، می‌توان تشعشعات کل را با ضرب نمودن اثر یک حلقه منفرد با تعداد کل سیم‌پیچی‌های موتور (N) تقریب زد.



شکل ۲-۳: مدلسازی دوقطبی مغناطیسی با حلقه جریان [۱۰]

اغلب در مباحث مغناطیس در حالت استاتیک، یک حلقه‌ی دایره‌ای از جریان الکتریکی به عنوان مدل پایه‌ی دوقطبی مغناطیسی در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. در این مرجع نیز همین حالت در نظر گرفته شده است. مدل حلقه جریان شکل فوق با جریان متناوب $i(t) = I \cos(\omega t)$ ، یک دوقطبی مغناطیسی با شعاع b است. همچنین شعاع سیم‌پیچی‌های کوئل استاتور نیز در نظر گرفته شده است، پارامتر m که بعنوان گشتاور مغناطیسی تعریف می‌شود، مطابق رابطه زیر است.

$$m = I\pi b^2 a_z \quad (۱-۲)$$

دو ناحیه میدان‌های نزدیک و دور نسبت به طول موج الکترومغناطیسی و نیز توسط فرکانس جریان تعیین می‌شوند. فرکانس موتورهای سانتریفیوژ در محدوده‌ی کیلو هرتز است، بنابراین طول موج به صدها کیلومتر می‌رسد. از این رو مولفه‌های میدان در فاصله R از مرکز دوقطبی (شکل ۲-۳) که در ناحیه میدان نزدیک برای منبع تعریف می‌شود، یعنی $R \ll \lambda/2\pi$ مطابق روابط زیر هستند.

$$H_R = \frac{m}{4\pi R^3} 2 \cos \theta \quad (۲-۲)$$

$$H_\theta = \frac{m}{4\pi R^3} \sin \theta \quad (۳-۲)$$

برای تست این مدلسازی و ایده ارائه شده در مقاله، بطور مثال برای یک موتور فن کامپیوتر که یک موتور AC دو قطبی با فرکانس ۶۰ هرتز و جریان ۰/۱۳ آمپر و شعاع کوئل ۲ سانتی‌متر است، با در نظر گرفتن $\theta = 0$ معادلات فوق اعمال شد. برای یک موج الکترومغناطیسی 60 Hz، طول موج 5000 km و $\lambda/2\pi = 796$ km است. از این رو تمام اندازه‌گیری‌ها برای این موتور برای میدان نزدیک هستند. مطابق جدول زیر تنها با اندازه‌گیری مولفه شعاعی میدان در این راستا در فواصل نزدیک، مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسبه شده با مدلسازی فوق، مقایسه شد. تنها در بازه 14cm تا 28cm از موتور نتایج با یکدیگر مطابقت دارند. محاسبات مولفه شعاعی میدان در ستون سوم جدول زیر با استفاده از رابطه ۲-۲ محاسبه شد و در تعداد دور موتور یعنی $N=550$ ضرب شد.

جدول ۱-۲ : مقایسه اندازه‌گیری و محاسبات چگالی شار اطراف موتور مورد مطالعه [۱۰]

Distance (cm)	Measured B-field ($\times 10^{-7}$ Tesla (T))	Calculated B-field ($\times 10^{-7}$ T)
2	1200	—
4	660	—
6	350	—
8	200	—
10	130	—
12	85	—
14	59	59
16	42	40
18	30	28
20	22	21
22	17	16
24	13	12
26	10	10
28	8	8

با اعمال مدل پیشنهادی این مقاله برای یک کارخانه سانتریفیوژ شامل هزار دستگاه سانتریفیوژ بدون در نظر گرفتن پوشش اطراف موتورها و با در نظر گرفتن پوشش آلومینیومی ۱۰ و ۵۰ میلیمتری برای موتورها و با فرض یک توزیع تصادفی برای فاز موتورها، شدت میدان مغناطیسی مطابق نتایجی که در جدول زیر موجود است تخمین زده شد. اگر یک پوشش آلومینیومی با ضخامت 50 mm اطراف موتورها واقع شود، تشخیص هر سیگنال تابشی حتی در فاصله ده متری از کارخانه غیرممکن خواهد بود. زیرا حسگرهای فعلی میدان قادر به اندازه‌گیری میدان در این رنج نیستند [۱۲].

جدول ۲-۲ : تخمین شدت میدان مغناطیسی برای یک کارخانه غنی سازی شامل هزار دستگاه سانتریفیوژ [۱۰]

Distance (m)	B-field (T)		
	No casing	10 mm Al casing	50 mm Al casing
10	0.12×10^{-7}	4×10^{-12}	8×10^{-26}
100	12×10^{-12}	4×10^{-15}	8×10^{-37}
2,000	16×10^{-16}	4×10^{-19}	8×10^{-33}

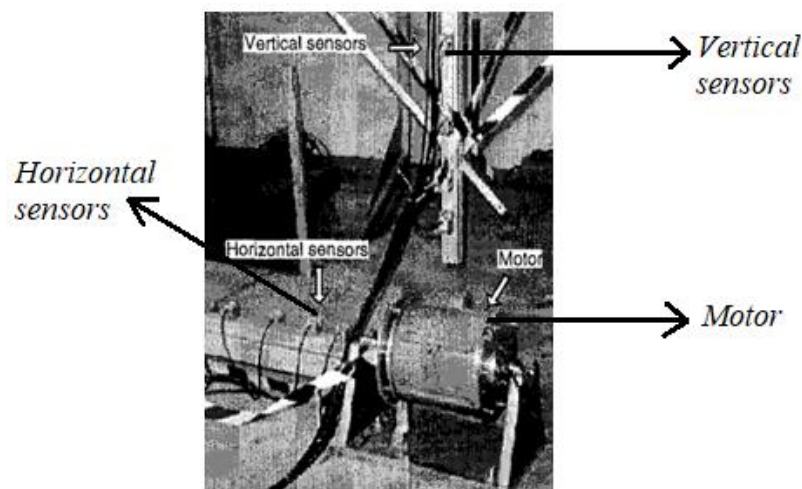
چندین نکته در این مقاله قابل توجه است. اول آنکه روش مدلسازی سیم‌پیچی‌های موتور الکتریکی با یک حلقه جریان با تقریب بسیار زیاد همراه است. حتی تست این مدل تنها در بازه‌ی ۱۴ تا ۲۸ سانتی‌متری و تنها برای یک موتور منفرد صورت پذیرفت. طبق مطالعات این مقاله مدلسازی در ناحیه میدان نزدیک صحیح است و فاصله ۲ تا ۱۲ سانتی‌متری از مدل نیز قطعاً در ناحیه میدان نزدیک است ولی محاسباتی که برای این ناحیه صورت گرفت با مقادیر اندازه‌گیری شده طبق ستون دوم جدول ۱-۲، تفاوت بسیار زیادی دارد که در نتایج

این جدول نوشته نشده است. همچنین در شکل مدل دوقطبی جهت زاویه θ را مشخص نموده، اما برای موتور الکتریکی جهت زاویه‌ی اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی و اینکه اندازه‌گیری‌ها در راستای شعاعی یا محوری است، مشخص نشده است. ابهامات فراوانی درخصوص این راستا یافت می‌شود. به علاوه نتایج بیان شده در جدول ۲-۲ برای یک کارخانه غنی‌سازی با تعداد هزار دستگاه سانتریفیوژ، نتایج کاملاً غیر دقیق است. به دلیل آنکه در واقع تاثیر یک موتور سانتریفیوژ بدست آورده شد و در تعداد کل سانتریفیوژها موجود ضرب شده است. در این روش تاثیر چیدمان سانتریفیوژها و اثرات آن بر میدان برآیند منتشرشده از مجموعه تمام سانتریفیوژها، در نظر گرفته نشده است. واضح است که نحوه قرارگیری موتورهای الکتریکی در کنار هم می‌تواند در میدان برآیند بسیار تاثیرگذار باشد و حتی گاهی موجب خنثی شدن برخی مولفه‌های میدان شود. در واقع این مقاله با در نظر گرفتن فرضیاتی مانند توزیع تصادفی فاز موتورها و همچنین تقریب‌هایی مانند در نظر گرفتن تاثیر سیم‌پیچی‌ها بطور مستقل و در نهایت ضرب در تعداد دور برای محاسبه میدان برآیند، که صحیح به نظر نمی‌رسد، نتایجی را برای شدت میدان مغناطیسی اطراف یک کارخانه سانتریفیوژ برآورد می‌کند که عملاً منطقی و مستند نیست.

۲-۴ پژوهش‌های انجام شده در زمینه بررسی انتشار میدان مغناطیسی به واسطه آزمایش عملی

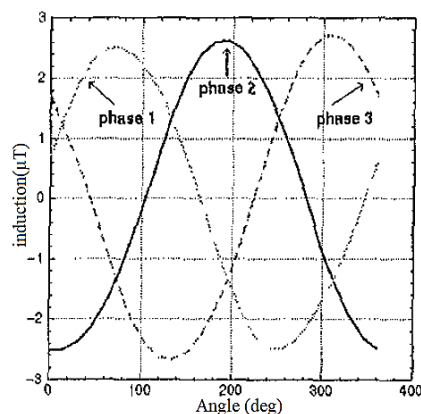
در مرجع [۱۳] ، دو روش برای ارزیابی امواج الکترومغناطیسی اطراف موتورهای القایی ارائه شد. ابتدا یک مطالعه تجربی و آزمایشگاهی برای موتورهای القایی دو قطبی و چهار قطبی توسعه یافت. سپس محاسبات نظری با شبیه‌سازی موتور دو قطبی در نرم‌افزار ارائه شد. در روش آزمایشگاهی اول به منظور اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی منتشرشده اطراف موتورها با مشخصات زیر، مطابق شکل ۲-۴ چهارده حسگر مغناطیسی سه بعدی، اطراف موتور قرار می‌گیرد. موقعیت قرارگیری حسگرها در راستای شعاعی و محوری، از یک قانون لگاریتمی برای درک آسان و مقایسه با مدل‌سازی پیروی می‌کنند. یعنی فاصله بین حسگرها بصورت لگاریتمی افزایش می‌یابد. موتورهای القایی مورد مطالعه یک موتور القایی دو قطبی، 25 kVA و شعاع استاتور 153.5mm

و یک موتور القایی چهار قطبی 18.5 kW و شعاع استاتور 240 mm هستند. تحلیل مقادیر ارائه شده توسط حسگرها با سیستم اکتساب داده با ۶۴ کانال آنالوگ انجام می‌شود. اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در نزدیک موتور در چند آزمایش برای موتور بدون روتور و تنها با استاتور انجام شده است. موتور به صورت فیزیکی در سطح افقی می‌چرخد تا مقادیر میدان توسط حسگرها اندازه‌گیری شود.



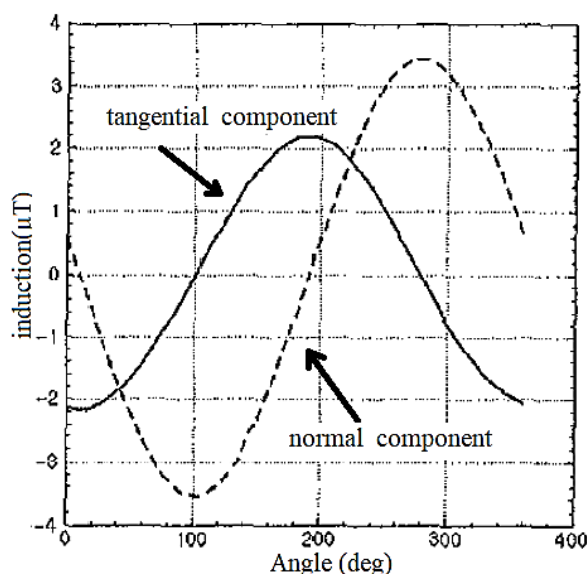
شکل ۲-۴: موتور و حسگرهای افقی و عمودی [۱۳]

در این مطالعه، برای موتور دو قطبی ابتدا یک فاز موتور تغذیه می‌شود. تکرار پذیری اندازه‌گیری‌ها برای هر سه فاز موتور مورد بررسی قرار می‌گیرد. مولفه مماسی القای مغناطیسی در امتداد محیط 500 mm از مرکز موتور، وقتی هر فاز به طور جداگانه تغذیه می‌شود، مطابق شکل زیر ارائه می‌شود.



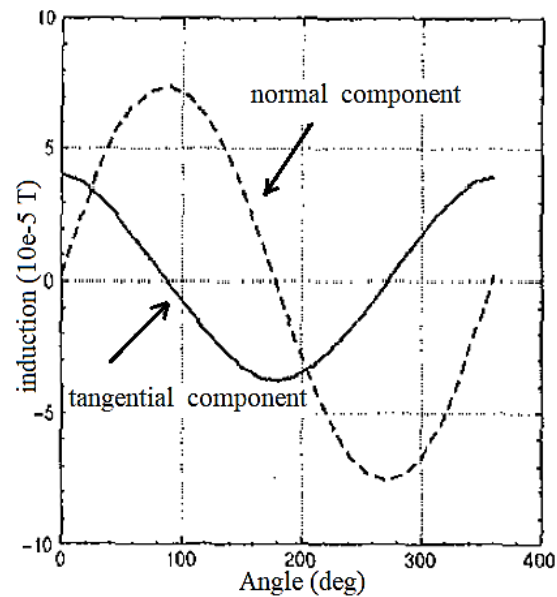
شکل ۲-۵: مولفه مماسی میدان در اطراف موتور به شعاع 500 mm [۱۳]

مطابق شکل فوق دامنه هر فاز به مقدار $2.5 \mu T$ در فاصله 500 mm می‌رسد. در این مقاله هر فاز در فاصله دور معادل یک دوقطبی در نظر گرفته شد. زیرا دامنه میدان با توان سوم فاصله از موتور کاهش می‌یابد که مطابق قانون دوقطبی است. فاصله‌ی دور معادل سه برابر قطر ماشین است. سپس یک آزمایش سه فاز برای موتور انجام شد. یعنی موتور در یک زمان مشخص به منظور نشان دادن یک نقطه عملکرد تغذیه می‌شود. بنابراین وقتی جریان در فاز اول برابر I است، در دو فاز دیگر برابر $-I/2$ است. در شکل زیر القای مغناطیسی در محیط 680 mm دور موتور وقتی سه فاز تغذیه می‌شوند در حالت بدون روتور را نشان می‌دهد.



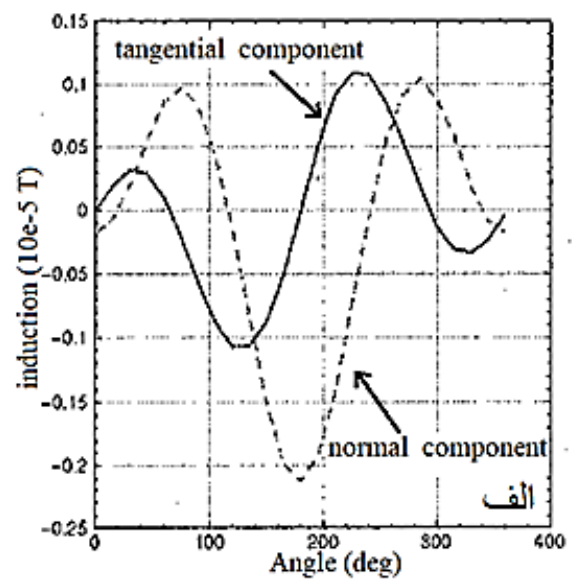
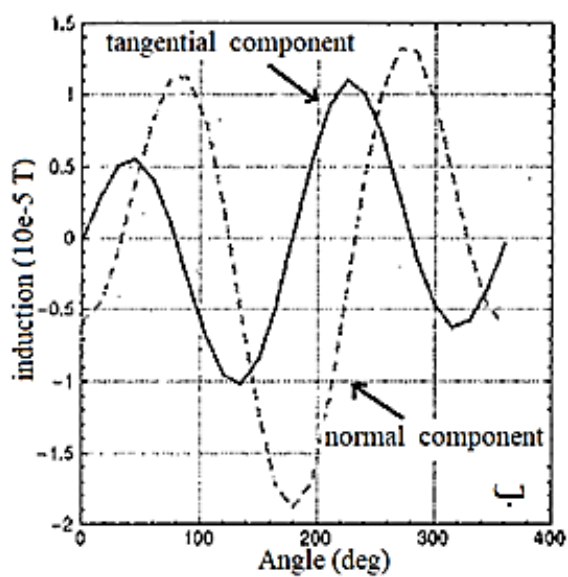
شکل ۲-۶: مولفه شعاعی و مماسی میدان در اطراف موتور بدون روتور به شعاع 680 mm [۱۳]

مطالعات فوق منجر به این نتیجه می‌شود که در حالت بدون روتور، هنگامی که سه فاز تغذیه می‌شوند دوقطبی، معادل با مجموع سه دوقطبی است زمانی که هر فاز به طور جداگانه تغذیه می‌شوند. همچنین در حالت با روتور به دلیل مقادیر بالاتر میدان‌های پراکنده و اشباع مدار مغناطیسی، نمی‌توان با تقریب دوقطبی و مجموع آنها در نظر گرفت. زیرا میدان‌های نشتی و پراکنده روتور به استاتور اضافه می‌شوند. در شکل زیر القای مغناطیسی در محیط 680 mm دور موتور دو قطبی با روتور را نشان می‌دهد. که مولفه مماسی دامنه‌ای حدود $50 \mu T$ دارد که نمی‌تواند نادیده گرفته شود.



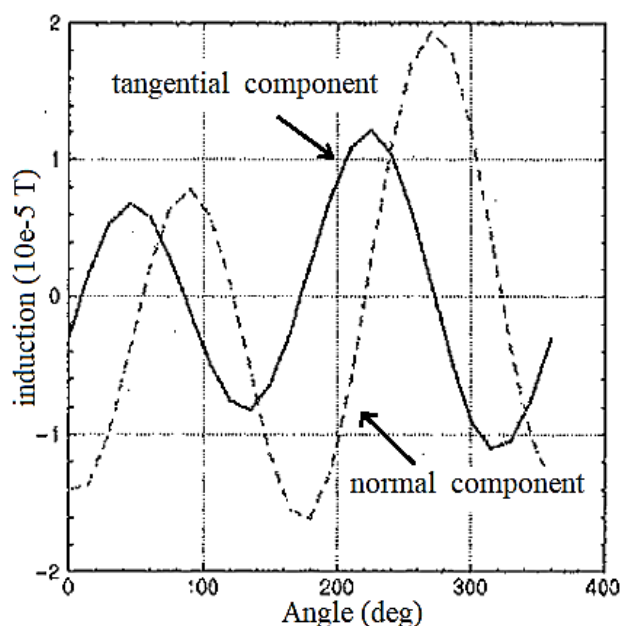
شکل ۷-۲: مولفه شعاعی و مماسی میدان در اطراف موتور با روتور به شعاع 680 mm [۱۳]

برای موتور دوم که چهار قطبی و دارای شیلد است، آزمایش‌های مشابهی انجام شده است. نتایج القای مغناطیسی در امتداد محیط 680 mm برای حالت بدون روتور و حالت با روتور برای حالتی که هر سه فاز تغذیه می‌شوند، مطابق شکل زیر است.



شکل ۸-۲: مولفه شعاعی و مماسی میدان موتور چهار قطبی با شیلد: الف) بدون روتور ب) با روتور [۱۳]

نتایج این بخش نشان می‌دهد القای مغناطیسی در حالت با روتور، ۱۰ برابر بیشتر از حالت بدون روتور است. برای بررسی تاثیر شیلد همین آزمایش برای موتور چهار قطبی بدون شیلد در امتداد محیط 680 mm انجام شده است که القای میدان مغناطیسی مطابق شکل زیر است.



شکل ۹-۲: مولفه شعاعی و مماسی میدان موتور چهار قطبی بدون شیلد و با روتور [۱۳]

شکل فوق نشان می‌دهد دامنه مولفه شعاعی و مماسی میدان برای حالت بدون شیلد و حالت با شیلد تقریباً یکسان است.

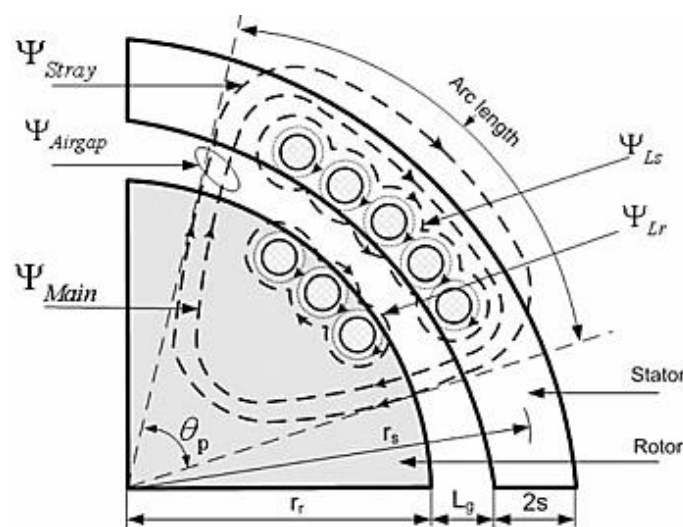
در بخش دوم این مقاله ابتدا به مطالعه دو بعدی در سطح مقطع وسط موتور می‌پردازد البته با فرض آنکه می‌توان اثرات سه بعدی زمانی که موتور به اندازه کافی بلند است، نادیده گرفته شود. در این حالت نتایج مولفه‌های میدان مغناطیسی برای موتور مطرح نشده است و تنها نتیجه‌گیری بیان شده آن است که اگر از موتور دور شویم دیگر نمی‌توان اثرات سه بعدی ناشی از سیم‌پیچی‌های انتهایی و طول محدود موتور نادیده گرفته شود.

با توجه به آنکه نتایج تقریباً منطقی از هر بخش این مقاله حاصل شد، اما ایرادات عمده‌ای به این مرجع وارد است. از جمله آنکه ابهاماتی در مورد تحلیل موتور با شیلد انتهایی موجود است. مهم‌تر آنکه در بخشی از این مقاله تاثیر موتور با شیلد و بدون شیلد مقایسه شده است، که هیچ تفاوتی از نظر اندازه میدان در یک شعاع یکسان اطراف موتور با مشخصات یکسان وجود ندارد. یعنی شیلد که در این پژوهش نحوه قرارگیری و مشخصات آن مشخص نشده است و اطراف موتور قرار گرفته است، تاثیری در انتشار میدان نداشته است که یک موضوع غیر بدیهی است. با توجه به نتایج این مقاله به دلیل آنکه نرخ کاهش میدان در فواصل دور (سه برابر قطر ماشین) تقریباً متناسب با عکس توان سوم فاصله است، در نتیجه این نرخ کاهش مطابق با قانون دوقطبی عنوان شده است. در صورتی که نتایج مقاله حداکثر تا فاصله‌ی 680 mm از اطراف موتور بدست آمده است. همچنین با نتایج مرجع [۱۰] که تقریباً موتور الکتریکی با دوقطبی تنها در محدوده‌ی میدان‌های نزدیک انجام شد هم‌خوانی ندارد.

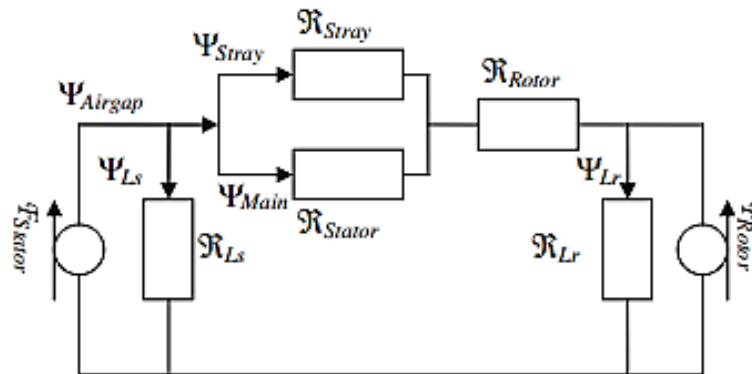
باتوجه به تمام ایرادات این مقاله دو نتیجه بسیار مهم و منطقی بیان شده است. اول آنکه در این مرجع عنوان شده است که در حالت موتور با روتور نمی‌توان موتور را با یک مدل دوقطبی تقریب زد و مدلسازی کرد. به دلیل آنکه میدان‌های ناشی روتور نیز به استاتور اضافه می‌شوند و نمی‌توان سیم‌پیچی‌های هر فاز استاتور را معادل یک دوقطبی در نظر گرفت. این نکته که کاملاً واضح و منطقی است در مرجع [۱۰] رعایت نشده و تقریباً موتور با مدل دوقطبی در نظر گرفته شده است. دومین مورد بسیار مهم که در این مرجع اشاره شده است آن است که نمی‌توان اثرات سه بعدی میدان ناشی سیم‌پیچی‌های انتهایی موتور را نادیده گرفت و تحلیل دو بعدی انجام داد. این نکته در این پایان‌نامه نیز مورد توجه قرار گرفته است.

مرجع [۱۴]، نیز چگالی شار مغناطیسی ناشی اطراف موتورهای القایی را مورد بررسی قرار می‌دهد. در این پژوهش این کار با هدف فراهم آوردن مناطقی امن برای انسان‌ها در مجاورت این موتورها، به خصوص در وسایل نقلیه الکتریکی، جایی که جریان‌های زیاد منجر به انتشار چگالی شار زیاد می‌شوند، انجام شد. در کاربردهایی

مانند وسایل نقلیه الکتریکی، موتورهای القایی (IM) با جریان‌های نامی بالا تا رنج 50 A به‌طور گسترده استفاده می‌شوند. این موتورها معمولاً زیر صندلی مسافر قرار می‌گیرند. منابع فعال چگالی شار مغناطیسی بالا، ناشی از تحریک آمپر دور بالای سیم‌پیچی‌های استاتور از کاربردهای مکترونیکی است. بنابراین شارهای مغناطیسی پراکنده در اطراف این موتورها ممکن است باعث ایجاد سیگنال‌های الکتریکی شوند و مشکلات سلامتی برای انسان‌های نزدیک در مجاورت آنها ایجاد کنند. دانش توزیع میدان‌های پراکنده می‌تواند در ارائه راه‌حل‌های فنی برای کاهش میدان‌های پراکنده و طراحی شیلد الکترومغناطیسی مناسب، موثر واقع شود. این مقاله یک مدار معادل مغناطیسی جدید به منظور محاسبه میدان‌های مغناطیسی منتشرشده را توسعه می‌دهد. MMF ناشی از جریان‌ها در مدار استاتور و روتور باعث افزایش نشت شار می‌شوند. مسیر مولفه‌های این شارها در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است. در شکل زیر Ψ_{Main} ، شار اصلی پیوندی میان استاتور و روتور بدون نشتی است. Ψ_{Ls} ، شار نشتی از سیم‌پیچی‌های استاتور و Ψ_{Lr} ، نیز شار نشتی از روتور و Ψ_{Stray} ، بخشی از شار اصلی پیوندی بین استاتور و روتور که خارج از سطح استاتور نشت می‌کند و همچنین Ψ_{Airgap} ، شار خالص فاصله هوایی است و معادل $\Psi_{Stray} + \Psi_{Main}$ است. این شارها با مشخصات مسیر مغناطیسی آنها در مدار معادل مغناطیسی شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۰: مسیر شار در موتور القایی ۶ قطبی [۱۴]



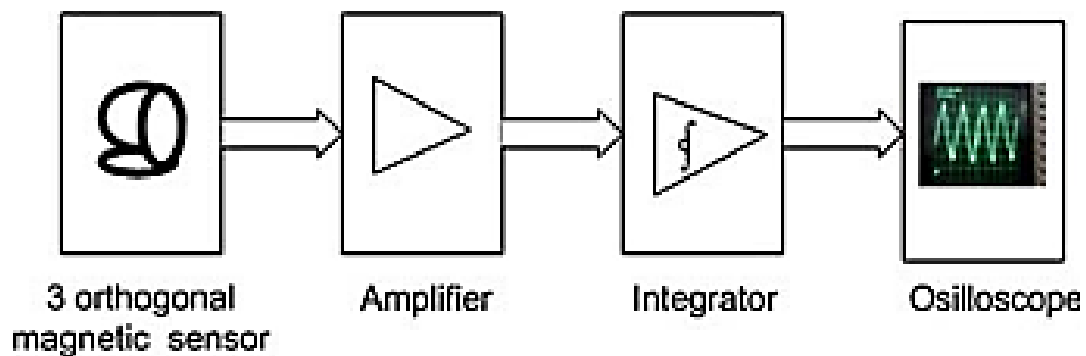
شکل ۲-۱۱: مدار معادل مغناطیسی موتور القایی [۱۴]

در شکل فوق رلوکتانس استاتور و روتور بستگی به ساختار و مشخصات مواد مورد استفاده در ساخت موتور دارد. F_{Stator} ، MMF ناشی از جریان‌های استاتور و F_{Rotor} ، MMF ناشی از جریان‌های القایی روتور است، باتوجه به مدار معادل پیشنهادی فوق، انتشار میدان مغناطیسی مطابق رابطه زیر است:

$$B_{Stray} = \frac{1}{1 + \left(\frac{x + \pi(r_s + s + x)\theta_p}{r_s + s + x} \right) \left(\frac{r_s \mu_{Stator}}{s + \pi r_s \theta_p} \right)} \times B_{Airgap} \left(\frac{r_s - s}{r_s + s + x} \right) \quad (۴-۲)$$

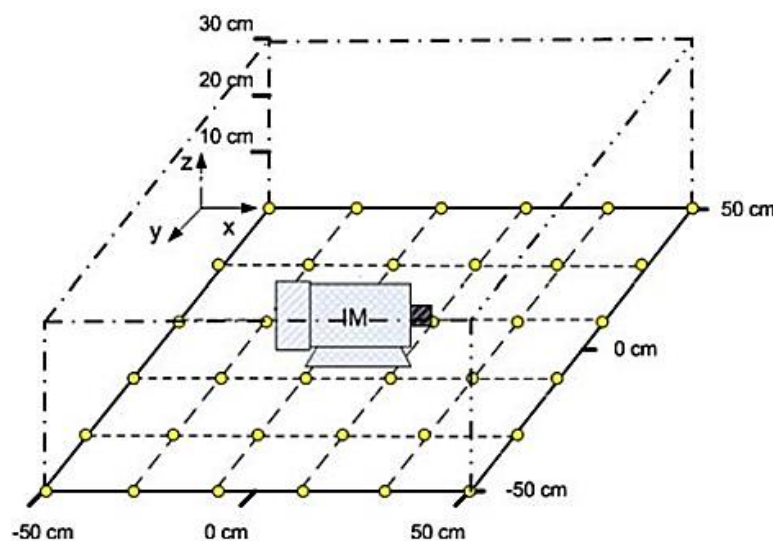
در این بخش تنها یک مدار معادل برای تخمین میدان‌های مغناطیسی منتشرشده اطراف موتور ارائه شده است. با استفاده از رابطه ۴-۲ میدان مغناطیسی نشتی در این مدار معادل برآورد و تخمین زده می‌شود.

در بخش بعدی این مقاله اندازه‌گیری و نتایج عملی ارائه می‌شود که شامل دو مرحله اندازه‌گیری مختلف برای مطالعه میدان‌های مغناطیسی پراکنده اطراف موتور است. اولین مرحله استفاده از یک گوس‌متر تجاری است که چگالی شار خالص را در نقاط انتخاب‌شده، نشان می‌دهد. مرحله دوم اندازه‌گیری ساده و مستقیم است، که به منظور اندازه‌گیری چگالی میدان مغناطیسی متناوب ناشی از ماشین‌های الکتریکی طراحی شده است. بلوک دیاگرام این سیستم اندازه‌گیری در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است. این مدل از سه سیم‌پیچ مغناطیسی متعامد بدون هسته که به عنوان حسگر به کار می‌رود و یک مدار تقویت‌کننده سیگنال متشکل از تقویت‌کننده و انتگرال‌گیر است. خروجی انتگرال‌گیر مستقیماً به یک اسیلوسکوپ متصل می‌شود.



شکل ۲-۱۲: بلوک دیاگرام سیستم اندازه‌گیری [۱۴]

تنظیمات آزمایشی متعامد موتور القایی و سطح صفر نقاط شار اندازه‌گیری شده بالای موتور در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است. در این تحقیق فاصله بین موتور و سیستم کنترل به اندازه‌ای زیاد است که برهمکنش و تعامل میدان آنها نادیده گرفته شود.



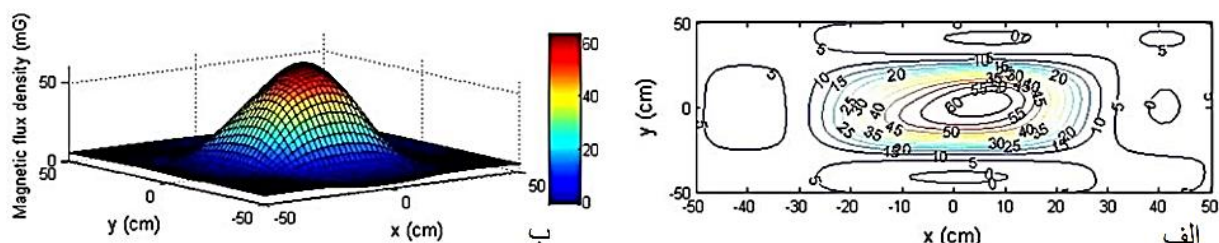
شکل ۲-۱۳: تنظیمات آزمایشی موتور IM و نقاط اندازه‌گیری در سطح صفر [۱۴]

چگالی شار در اطراف موتور در نقاط تعیین شده در شکل فوق در سه سطح مختلف با گوس‌متر استاندارد اندازه‌گیری شد و مقدار خالص چگالی شار در این نقاط بدست آمد. پارامترهای پلاک موتورهای مورد مطالعه در جدول زیر نشان داده شده است. موتور مورد مطالعه اول موتور نوع III است.

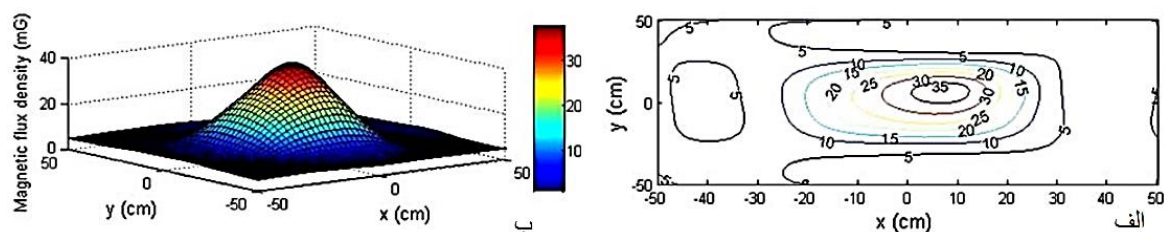
جدول ۲-۳: مشخصات موتورهای القایی مورد استفاده در آزمایش [۱۴]

Motor no.	Rated values						Operating condition		
	Motor type	Power (kW)	Voltage Δ/Y (V)	Current Δ/Y (A)	$\cos \varphi$	Speed (rpm)	Motor connection	Line current (no-load)	Voltage (V)
I	Slip ring	7.5	220/380	26/15	0.87	1450	Y	4.9	380
II	Squirrel cage	7.5	380/660	17/9.81	0.76	960	Δ	8.3	380
III	Squirrel cage	0.75	220/380	3.8/3.7	0.74	925	Y	1.2	380

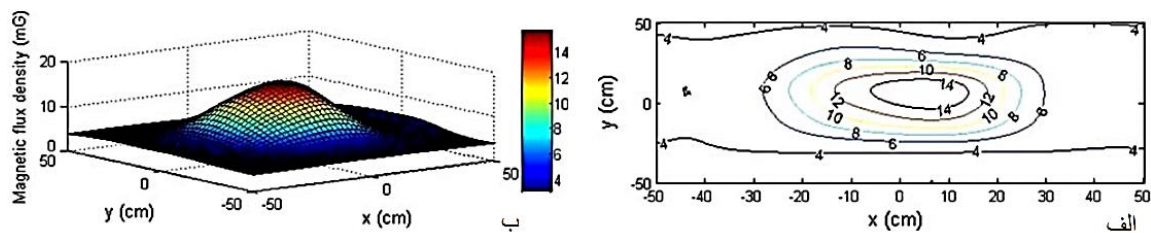
عملکرد شار اندازه‌گیری شده در $z=10$ cm و $z=20$ cm و $z=30$ cm بالاتر از نقاط اندازه‌گیری به ترتیب در شکل های ۲-۱۴ و ۲-۱۵ و ۲-۱۶ نشان داده شده است. این شکل ها تغییرات میدان را با فاصله افقی از موتور نشان می‌دهند. کانتورها یا خطوط رنگی نشان می‌دهند که چگالی شار مغناطیسی حاصل در جهات محوری (یعنی جهت x در شکل ۲-۱۳) در مقایسه با جهات شعاعی کوچکتر است. این یک نتیجه مورد انتظار است، زیرا که شار موتور دوار در جهت شعاعی طراحی شده است. با این وجود به دلیل سیم‌پیچی‌های انتهایی و ماهیت توزیع میدان مغناطیسی در هوا، میدان در جهت محوری نیز وجود دارد. شکل ۲-۱۷ نمودار سه بعدی را برای موتور نوع III نشان می‌دهد.



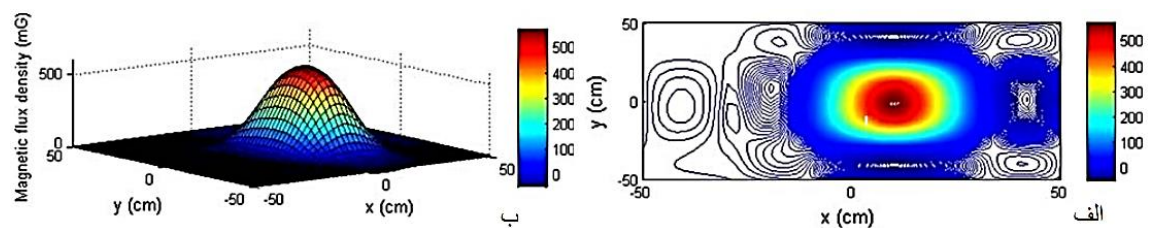
شکل ۲-۱۴: توزیع چگالی شار مغناطیسی در $z=10$ cm (الف) کانتور خطوط نما، (ب) نقشه سه بعدی [۱۴]



شکل ۲-۱۵: توزیع چگالی شار مغناطیسی در $z=20$ cm (الف) کانتور خطوط نما، (ب) نقشه سه بعدی [۱۴]

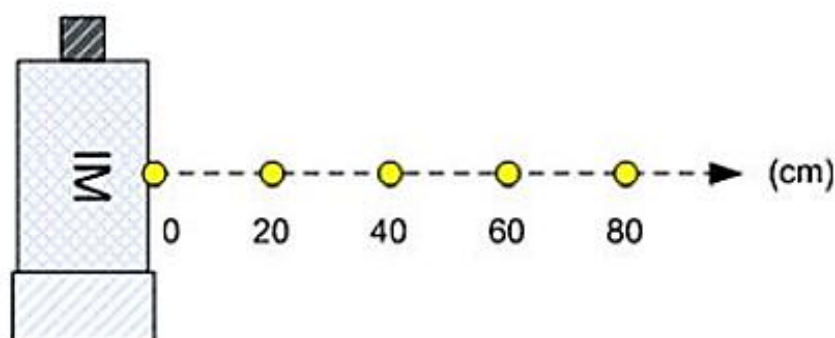


شکل ۲-۱۶: توزیع چگالی شار مغناطیسی در $z=30$ cm (الف) کانتور خطوط نما، (ب) نقشه سه بعدی [۱۴]

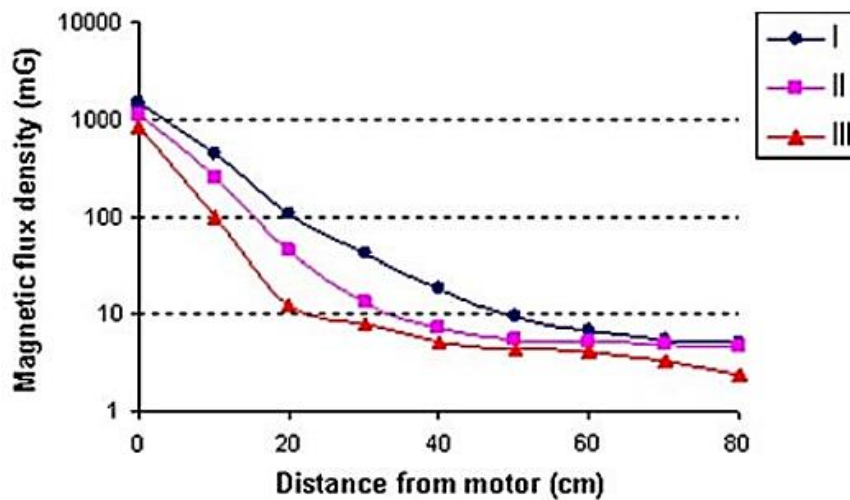


شکل ۲-۱۷: توزیع چگالی شار مغناطیسی در $z=0$ cm (الف) کانتور خطوط نما، (ب) نقشه سه بعدی [۱۴]

مطابق شکل فوق واضح است که چگالی شار بسیار بالایی در اطراف موتور توزیع شده است. بنابراین لازم است برای محافظت از انسان‌های مجاور، محافظ قرار بگیرد. تغییرات میدان مغناطیسی با فاصله اندازه‌گیری شده در نقاط نشان داده شده در شکل ۲-۱۸ برای هر سه موتور مختلف ارائه شده در جدول ۲-۳ در شکل ۲-۱۹ نشان داده شده است.

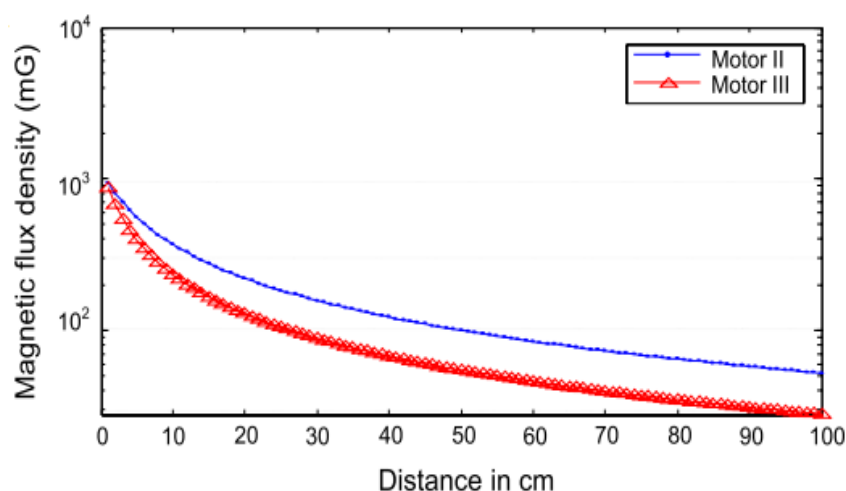


شکل ۲-۱۸: نقاط اندازه‌گیری میدان در جهت شعاعی در وسط موتور [۱۴]

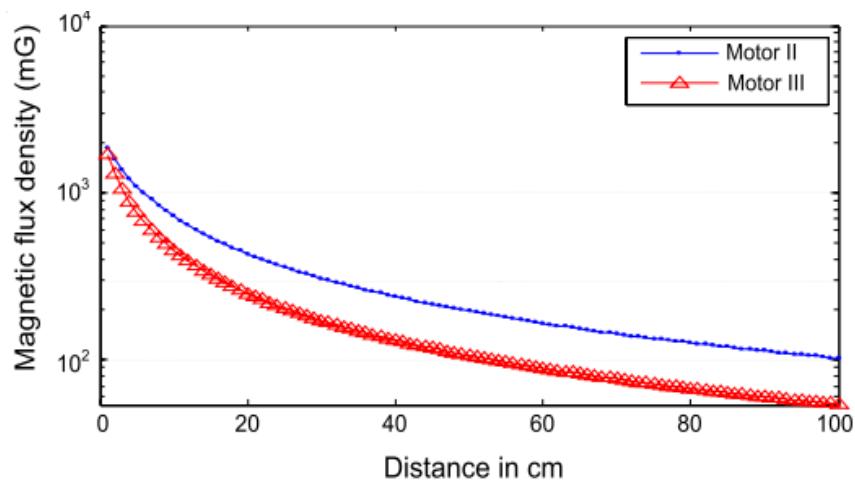


شکل ۲-۱۹: تغییرات چگالی شار با فاصله، در وسط موتور [۱۴]

مطالعات فوق منجر به این نتیجه شد که اندازه چگالی شار منتشرشده به طور مستقیم با آمپردور استاتور متناسب است. به دلیل آنکه در آمپردور نسبتاً بالا چگالی شار بالاتری اتفاق می‌افتد. چگالی شار منتشرشده در اطراف موتور الکتریکی با توجه به مدار مغناطیسی معادل پیشنهادی مطابق شکل ۲-۲۰ و شکل ۲-۲۱ برآورد شده است. در این ارزیابی اثر اشباع و نفوذپذیری مغناطیسی نیز در نظر گرفته شده است. این بررسی به منظور نشان دادن صحت چگالی شار منتشرشده و برآورد شده با توجه به رابطه ۲-۴، انجام شد.



شکل ۲-۲۰: تخمین چگالی شار شعاعی با مدل تحلیلی و $\mu_r = 2000$ [۱۴]



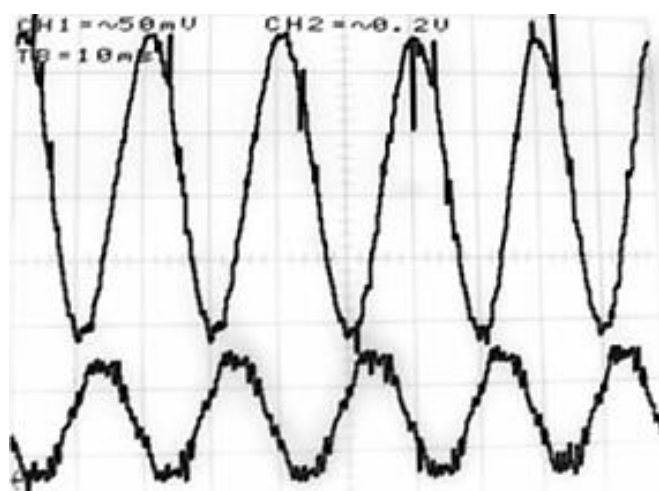
شکل ۲-۲۱: تخمین چگالی شار شعاعی با مدل تحلیلی و $\mu_r = 1500$ [۱۴]

از شکل‌های فوق می‌توان نتیجه گرفت که چگالی شار اندازه‌گیری شده در شکل ۲-۱۹ کوچک‌تر از چگالی شار تخمین زده شده با رابطه‌ی ۲-۴ مطابق شکل ۲-۲۰ است. دلیل این اختلاف با توجه به تفاوت در پوسته‌ی محافظ موتورها توجیه شده است. از طرفی تاثیر اشباع آهن هسته استاتور در کاهش نفوذپذیری واضح است. یعنی در نفوذپذیری نسبتاً کمتر ($\mu_r = 1500$)، میدان مغناطیسی منتشرشده خارج ماشین به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در مرحله دوم برای اندازه‌گیری مولفه‌های میدان، برای تنظیمات شکل ۲-۱۳ از مجموعه حسگر سیم‌پیچ، مطابق شکل زیر استفاده شد. مطابق شکل زیر مجموعه حسگر سیم‌پیچ در پنج سانتی‌متری از سطح استاتور است.

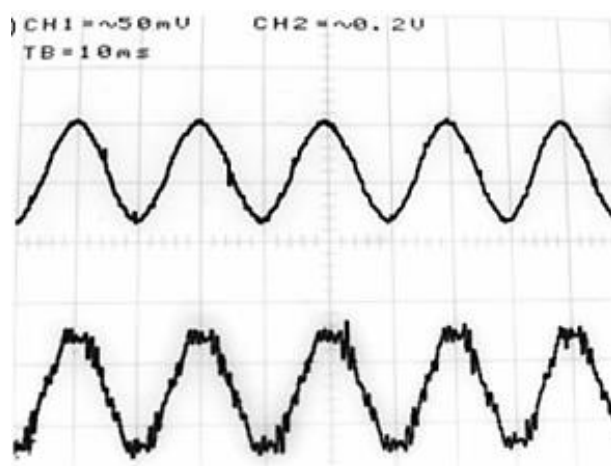


شکل ۲-۲۲: حسگرهای سیم‌پیچ اندازه‌گیر میدان اطراف موتور القایی [۱۴]

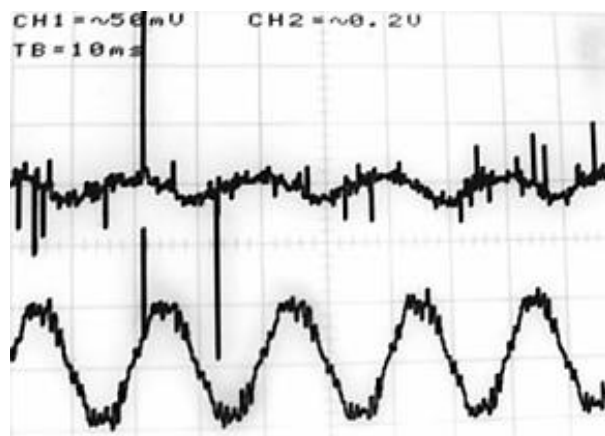
میدان مغناطیسی بدست آمده برای ولتاژ ورودی 60V و سرعت روتور 900rpm است. نتایج اندازه‌گیری شده‌ی چگالی شار توسط حسگر X یک شکل موج سینوسی با دامنه 120 mG مطابق شکل ۲-۲۳ است. نتایج اندازه‌گیری شده‌ی چگالی شار توسط حسگر Y یک شکل موج سینوسی با دامنه 60 mG و شکل موج صاف‌تر مطابق شکل ۲-۲۴ است. از طرف دیگر نتایج اندازه‌گیری شده‌ی چگالی شار توسط حسگر Z کوچک‌ترین است و مطابق شکل ۲-۲۵، شکل موج هارمونیک است.



شکل ۲-۲۳: بالا) چگالی شار مغناطیسی ردیابی شده توسط حسگر X، پایین) جریان فاز a [۱۴]



شکل ۲-۲۴: بالا) چگالی شار مغناطیسی ردیابی شده توسط حسگر Y، پایین) جریان فاز a [۱۴]



شکل ۲-۲۵: بالا) چگالی شار مغناطیسی ردیابی شده توسط حسگر Z، پایین) جریان فاز a [۱۴]

یکی از نقاط مهم ضعف این مقاله آنست که به منظور تخمین چگالی شار مغناطیسی منتشرشده اطراف موتور القایی یک مدار معادل مغناطیسی جدید ارائه می‌دهد و یک رابطه تحلیلی که بواسطه آن می‌توان مقدار چگالی شار نشتی را تخمین زد. اما برآورد میدان مغناطیسی منتشرشده با استفاده از رابطه تحلیلی ارائه شده و مقادیر میدان اندازه‌گیری شده، نتایج متفاوتی هستند. که البته توجه این موضوع در این پژوهش، به دلیل آنکه در واقعیت موتورها دارای پوسته هستند، عنوان شده است. اما در هر حال این رابطه تحلیلی به عنوان یک رابطه برای محاسبه میدان نشتی اطراف موتور القایی صحیح به نظر نمی‌رسد و دارای دقت پایینی است.

فصل سوم : ارزیابی و بررسی نشت میدان مغناطیسی در موتور القایی

۳-۱ مقدمه

همانطور که در فصل‌های قبل مطرح شد تشخیص وجود و عملکرد موتورهای الکتریکی یکی از چالش‌های مرتبط با موضوع طراحی و بهره‌برداری از ماشین‌های الکتریکی است. در این فصل روش تشخیص کارکرد یک موتور القایی با استفاده از پایش میدان‌های مغناطیسی منتشرشده از موتور بررسی خواهد شد. به این منظور لازم است میدان‌های مغناطیسی منتشرشده از موتور القایی مورد مطالعه، در شرایط عملیاتی در فضای اطراف موتور تا فاصله‌ی هدف برای تشخیص موتور، محاسبه و بررسی شود. متأسفانه با توجه به حجم بالای محاسبات و محدودیت کامپیوترها، امکان محاسبه‌ی این میدان‌ها در فواصل نسبتاً دور با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود وجود ندارد. بنابراین باید از روش‌های محاسباتی جایگزین و مدل‌های تحلیلی به این منظور استفاده کرد.

در این فصل ابتدا مرور مختصری بر روش‌های عددی تحلیل میدان‌های مغناطیسی صورت می‌گیرد. سپس روش پیشنهادی این پایان‌نامه برای تحلیل و تخمین میدان مغناطیسی اطراف موتور در فواصل دور با عنوان قضیه هم‌ارزی معرفی می‌شود. صحت و اعتبارسنجی این قضیه برای سیم محدود حامل جریان انجام می‌شود. در نهایت موتور القایی مورد مطالعه، معرفی می‌شود و روند برداشت مشخصات و شبیه‌سازی میدان مغناطیسی اطراف موتور در فواصل نزدیک با استفاده از روش المان محدود تشریح می‌شود. در نهایت با استفاده از قضیه هم‌ارزی و توسعه یک مدل تحلیلی برای محاسبه میدان مغناطیسی اطراف موتور در فواصل دور، نرخ کاهش مولفه‌های مختلف میدان در راستاهای مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۳-۲ آنالیز المان محدود

از جمله روش‌های عددی برای حل مسائل پیچیده‌ی فیزیکی، می‌توان به روش المان محدود اشاره کرد، که یک روش محاسباتی عددی برای تحلیل مسائل فیزیکی که عمدتاً با معادلات مشتقات جزئی تعریف می‌شوند، است. روش المان محدود برای تحلیل مسائل پیچیده‌ی آنالیز ساختاری و کشسانی در مهندسی مکانیک، عمران و

هوافضا گسترش یافت. این پیشرفت حاصل کار الکساندر هرلیکف (۱۹۴۱) و ریچارد کورانت (۱۹۴۲) است [۱۵]. با وجود روش کار متفاوت این دو دانشمند، یک مشخصه اصلی مشترک، که یک محدوده دامنهی پیوسته به المانهای کوچکتری به نام اجزای محدود تقسیم می‌شوند، وجود دارد [۱۶].

روش المان محدود در تحلیل ماشینهای القایی بر مبنای معادلات ماکسول است. در واقع روابط بین میدان مغناطیسی، میدان الکتریکی، بار الکتریکی و جریان الکتریکی را توسط چهار معادله که یک توصیف فیزیکی کامل از میدانهای الکترومغناطیسی هستند، بیان می‌نماید [۱۷]. این معادلات مطابق روابط زیر است.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (۱-۳)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (۲-۳)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (۳-۳)$$

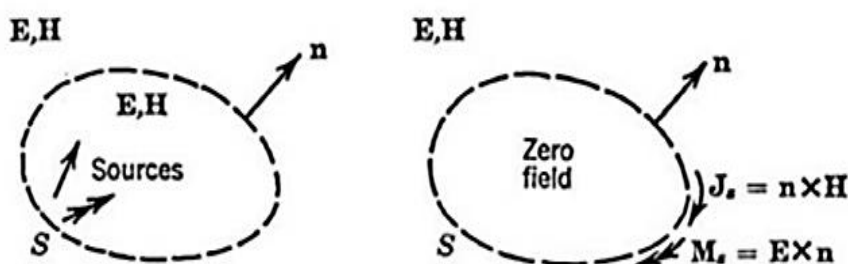
$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (۴-۳)$$

روش آنالیز المان محدود در فضای سه بعدی دارای پیچیدگی بیشتر به خاطر وجود بعد سوم است. تحلیل میدانهای اطراف موتور القایی به طور دقیق و با در نظر گرفتن اثر سیم‌پیچیهای انتهایی موتور با توجه به تاثیر قابل توجهی که بر نشت میدانهای مغناطیسی در اطراف موتور می‌گذارند، لزوم شبیه‌سازی موتور القایی در نرم‌افزار المان محدود بصورت سه بعدی را بیشتر می‌کند. نرم‌افزارهای آنالیز المان محدود برای تحلیل سه بعدی با توجه به حجم بالای محاسبات و محدودیت‌های کامپیوترهای در دسترس، در فضای محاسبه‌ی اطراف موتور دارای محدودیت هستند. بنابراین لازم است از مدل‌های تحلیلی از جمله مدل‌های مبتنی بر قضیه هم‌ارزی استفاده شود. قضیه هم‌ارزی میدانهای مغناطیسی روی یک سطح بسته را با جریانهای الکتریکی سطحی معادل می‌کند. با توجه به این جریان‌ها بصورت تحلیلی میدان مغناطیسی در فضای اطراف سطح بسته، قابل محاسبه خواهد بود. همچنین با توجه به اینکه این قضیه یک رابطه تحلیلی برای محاسبه میدان بر حسب فاصله

از محل توزیع جریان‌ها ارائه می‌دهد، محدودیتی در فاصله‌ی محل محاسبه‌ی میدان و محل توزیع جریان وجود نخواهد داشت.

۳-۳ معرفی و تشریح قضیه هم‌ارزی

طبق اصل هم‌ارزی میدان‌های الکترومغناطیسی در خارج یک ناحیه محدود منبع را می‌توان با جریان‌های سطحی محصور روی سطح محدود ایجاد کرد. در واقع دو منبع که میدان‌های یکسانی از داخل یک ناحیه از فضا ایجاد می‌کنند را هم‌ارز گویند. در یک ناحیه از فضا برای دانستن میدان، نیازی به دانستن منابع واقعی نیست، منابع معادل نیز همان میدان را در فضا ایجاد می‌کنند [۱۸]. یک کاربرد ساده اصل هم‌ارزی در شکل زیر نشان داده شده است:



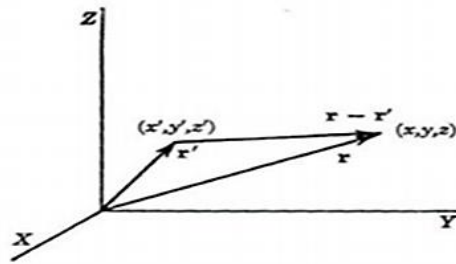
شکل ۳-۱: کاربرد اصل هم‌ارزی [۱۸]

مطابق شکل فوق اگر یک منبع تولید میدان درون سطح بسته قرار گیرد، میدان‌هایی را روی سطح بسته ایجاد کرده که منجر به تولید جریان‌های سطحی J و M می‌شوند. حال اگر این منبع درون فضای بسته را حذف کرده، طبق اصل هم‌ارزی از این جریان‌های سطحی می‌توان میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی را در فضای آزاد نامحدودی تعیین نمود. میدان مغناطیسی مطابق روابط زیر محاسبه می‌شود [۱۹].

$$J_s = n \times H \quad (۵-۳)$$

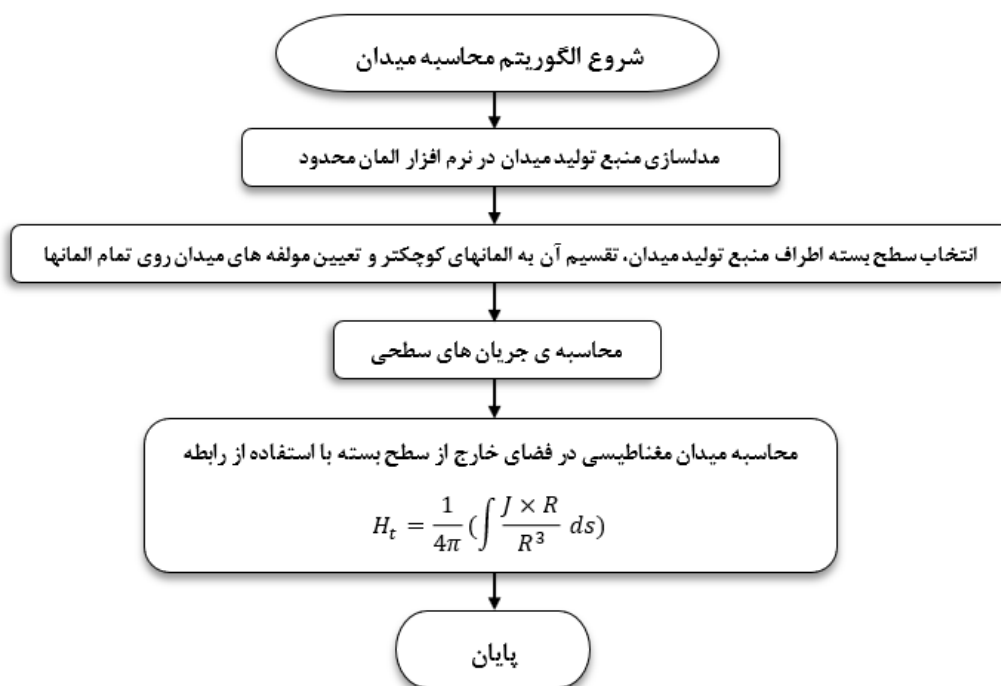
$$R = r - r' \quad (۶-۳)$$

$$H_t = \frac{1}{4\pi} \left(\int \frac{J \times R}{R^3} ds \right) \quad (۷-۳)$$



شکل ۳-۲: نمایش بردار R توسط بردارهای r و r'

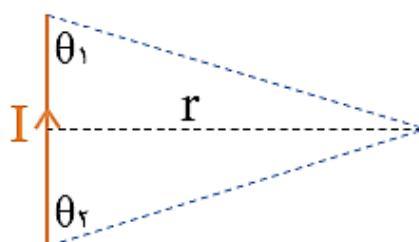
n بردار واحد عمودی برون سو بر سطح S بوده و H میدان مغناطیسی اصلی روی سطح S است. J_S جریان سطحی هم‌ارز نامیده می‌شود و همان میدانی را خارج از سطح S ایجاد می‌کند که منابع اصلی تولید می‌کنند. بردار R مطابق شکل ۳-۲ معادل $R = r - r'$ است. بردار r' بردار مکان مرکز تمام مش‌های در نظر گرفته شده بر روی سطح بسته محدود اطراف منبع تولید میدان است و همچنین بردار r بردار مکان مشاهده‌ی میدان است. در بخش بعد برای اعتبارسنجی و صحت‌سنجی روش پیشنهادی این پایان‌نامه که بر مبنای قضیه هم‌ارزی بنا شده، با روند تحلیلی مطابق فلوچارت زیر، به محاسبه‌ی میدان مغناطیسی اطراف سیم محدود حامل جریان الکتریکی پرداخته خواهد شد. کد برنامه‌نویسی قضیه هم‌ارزی در محیط متلب، از فلوچارت زیر اخذ شده است.



شکل ۳-۳: فلوچارت محاسبه میدان با استفاده از قضیه هم‌ارزی

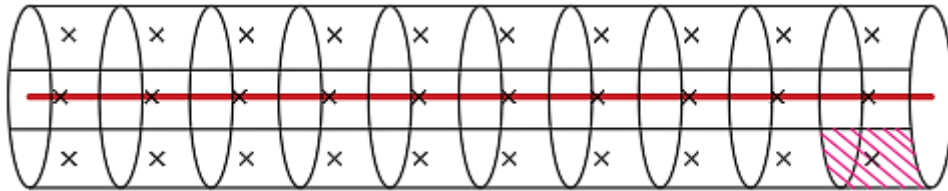
۳-۴ محاسبه میدان مغناطیسی اطراف سیم محدود حامل جریان الکتریکی با استفاده از قضیه هم‌ارزی

به منظور اعتبارسنجی روش تحلیلی این پایان‌نامه، ابتدا در این بخش به تحلیل میدان مغناطیسی در فواصل دور برای یک مدل با توزیع جریان ساده مانند یک سیم محدود حامل جریان الکتریکی پرداخته می‌شود. سپس در بخش‌های بعد به تحلیل میدان مغناطیسی منتشرشده اطراف موتور القایی پرداخته خواهد شد. برای این مدل با توجه به آنکه با استفاده از روابط موجود، میدان در هر نقطه دلخواه در فضای نامحدود اطراف سیم حامل جریان قابل محاسبه است، به راحتی می‌توان روش تحلیلی ارائه شده در این پایان‌نامه بر مبنای قضیه هم‌ارزی را اعتبارسنجی نمود. برای اعمال این قضیه و مطابق فلوچارت مطرح شده در بخش قبل لازم است ابتدا یک سطح بسته اطراف منبع تولید میدان که در این مسئله یک سیم محدود حامل جریان است، در نظر گرفته شود. فضای بسته اطراف تکه سیم به شکل استوانه‌ای در نظر گرفته می‌شود و بصورت شکل ۳-۵ و شکل ۳-۶ با استفاده از بخش‌هایی به المان‌های کوچکتری تقسیم شده است. یکی از مش‌ها در این دو شکل با هاشور مشخص شده است. اندازه میدان مغناطیسی روی هر کدام از گره‌های شکل ۳-۵ و شکل ۳-۶ با استفاده از فرمول ۳-۸ محاسبه شده است [۲۰]. این میدان در هر گره دارای سه مولفه r ، θ ، z است. لازم به ذکر است که در این مسئله مولفه‌های r و z برابر صفر هستند. این مقادیر برای بهره‌گیری در کد برنامه‌نویسی متلب که براساس قضیه هم‌ارزی تحلیل شده، مورد استفاده قرار می‌گیرند. فرمول محاسبه میدان اطراف سیم محدود حامل جریان مطابق شکل ۳-۴ به صورت رابطه ۳-۸ است:

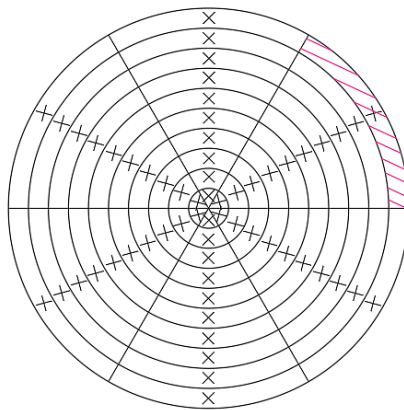


شکل ۳-۴: سیم محدود حامل جریان

$$|\vec{H}| = \frac{I}{4\pi r} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (۸-۳)$$



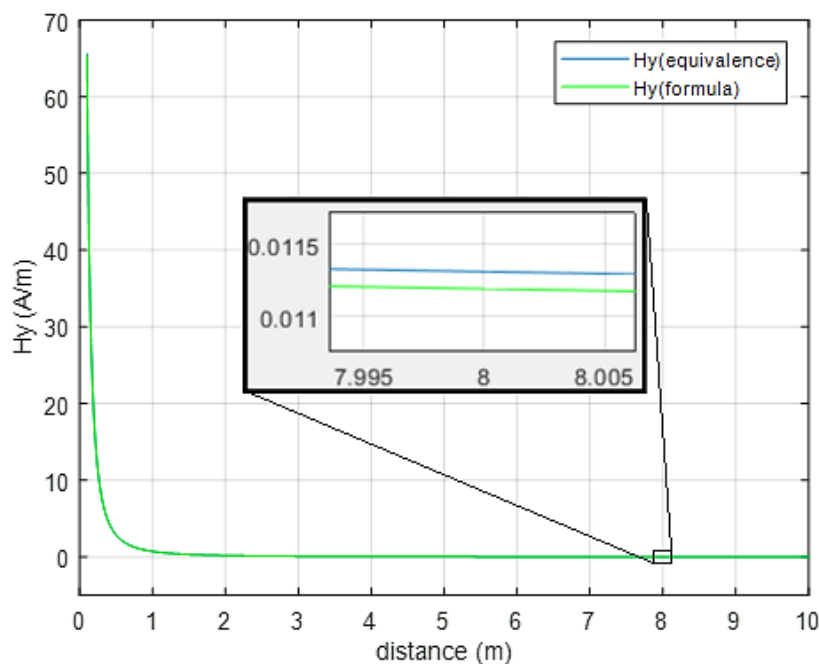
شکل ۳-۵: مش بندی سطح جانبی استوانه‌ی مفروض اطراف سیم محدود حامل جریان



شکل ۳-۶: مش بندی سطح بالایی استوانه‌ی مفروض اطراف سیم محدود حامل جریان

در این مسئله بردار I^r که با توجه به تعریف، بردار محل مشاهده‌ی میدان است، در راستای محور X از فاصله‌ی ۱۰۰ میلیمتری تا ۱۰ متری در نظر گرفته شد. بنابراین با توجه به روند کد برنامه در هر نقطه دلخواه با استفاده از قضیه هم‌ارزی می‌توان هر سه مولفه‌ی میدان را بدست آورد. برای اعتبارسنجی قضیه هم‌ارزی در همین راستا و محدوده، میدان مغناطیسی با استفاده از رابطه و فرمول ۳-۸ برای هر سه مولفه‌ی میدان محاسبه شد. با برهم نهادن دو نمودار برای هر سه مولفه‌ی میدان به صورت مجزا، که اولی از قضیه هم‌ارزی و دیگری از فرمول محاسبه می‌شود، تطابق بسیار خوبی مشاهده می‌شود که نشان از خطای بسیار کم و دقت قابل قبول برای قضیه هم‌ارزی دارد. مولفه‌های X و Z مطابق آنچه با توجه به فرمول انتظار می‌رفت، با استفاده از قضیه

هم‌ارزی نیز برابر صفر می‌شود. بنابراین تنها مولفه y شدت میدان مغناطیسی یعنی H_y در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۷-۳: مولفه H_y در راستای X اطراف سیم محدود حامل جریان

شکل ۷-۳ مولفه y شدت میدان مغناطیسی (H_y) در امتداد محور X ، از ۱۰۰ میلیمتری تا ۱۰ متری اطراف سیم محدود حامل جریان را با دو نمودار که اولی از قضیه هم‌ارزی و دومی از فرمول بدست آمد، نشان می‌دهد. تطابق بسیار خوب مولفه y خطای زیر پنج درصد را برای رابطه تحلیلی بر مبنای قضیه هم‌ارزی اثبات می‌کند. همچنین مولفه‌های X و Z در این راستا با استفاده از فرمول صفر هستند. با استفاده از قضیه هم‌ارزی نیز صفر بدست آمد. لازم به ذکر است سیم حامل جریان در امتداد محور Z و مرکز آن در $z=0$ است.

در نتیجه میدان در فضای اطراف سیم محدود حامل جریان که با استفاده از فرمول قابل محاسبه بود، با بهره‌گیری از قضیه هم‌ارزی نیز بدست آمد. تطابق کامل نمودارها صحت روش تحلیلی ارائه شده بر مبنای قضیه هم‌ارزی را تایید نمود. اما بیان این نکته حائز اهمیت است که برای محاسبه‌ی میدان‌های مغناطیسی برای مدل‌هایی با توزیع جریان ساده مانند سیم محدود حامل جریان که میدان مغناطیسی در هر نقطه‌ای از

فضا با رابطه و فرمول مشخص است، عملاً قضیه هم‌ارزی کاربردی ندارد و این موضوع صرفاً به منظور اعتبارسنجی این روابط تحلیلی و کد برنامه‌نویسی متلب که بر اساس قضیه هم‌ارزی است، مطرح شد. اما قضیه هم‌ارزی برای سیستم‌هایی با توزیع جریان‌های پیچیده مانند موتورهای الکتریکی که رابطه تحلیلی برای محاسبه میدان‌های مغناطیسی اطراف، موجود نیست و همچنین به دلیل حجم بالای محاسبات نمی‌توان از روش‌های عددی مانند شبیه‌سازی در فضای نرم‌افزارهای المان محدود استفاده نمود، بسیار کاربردی و پر اهمیت است. به عبارت دیگر تنها راه‌حل برای تخمین و محاسبه‌ی میدان مغناطیسی اطراف موتور الکتریکی در فواصل دور است.

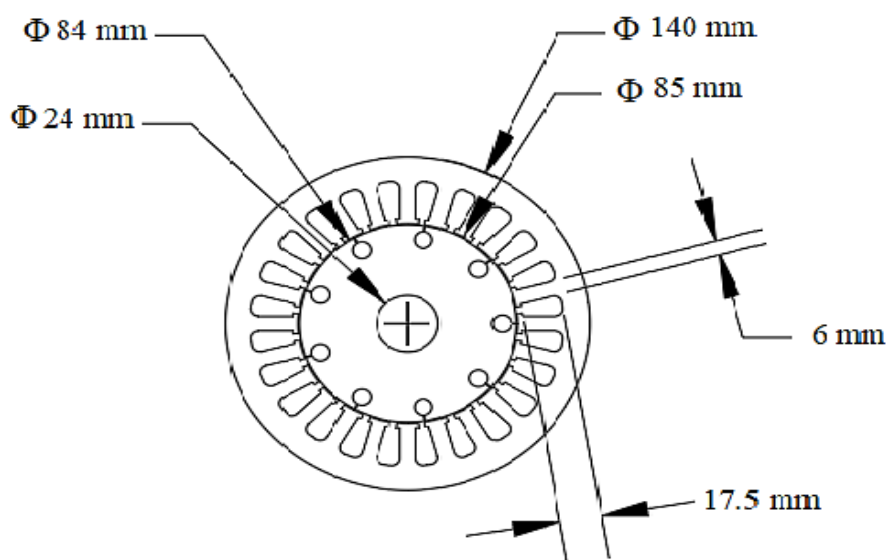
۳-۵ معرفی موتور القایی مورد مطالعه

موتور القایی مورد مطالعه، یک موتور القایی 1 hp ، چهار قطبی و با سیم‌پیچی یک لایه است که تصویری از آن در شکل ۳-۸ (الف) نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی، نیاز به اطلاعات ابعادی است و این اطلاعات از روی موتور برداشت می‌شود. بنابراین درپوش‌های موتور باز شده و قسمت‌های روتور و استاتور دمونتاژ می‌شوند (شکل ۳-۸ ب). سپس ابعاد طراحی موتور اندازه‌گیری می‌شوند. ابعاد اندازه‌گیری شده دارای خطای اندازه‌گیری هستند اما با دقت مناسبی برای شبیه‌سازی المان محدود مناسب است. مشخصات درج شده بر روی پلاک موتور مطابق جدول ۳-۱ است. همچنین جنس ورق هسته استاتور و جنس هسته روتور با توجه به مشاهده، از نوع ورق سیلیس (آهن کربن‌دار) است. روتور از نوع قفس‌سنجایی و میله‌های روتور از جنس آلومینیوم و سیم‌پیچی‌های استاتور از جنس مس هستند. سیم‌پیچی استاتور یک لایه است و هسته استاتور دارای ۲۴ شیار است (شکل ۳-۸ ج و د). مقادیر اندازه‌گیری شده ابعادی ماشین مطابق جدول ۳-۲ است. این ابعاد برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار المان محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۳-۹ نقشه‌ی دو بعدی هسته استاتور و روتور نیز نشان داده شده است.



شکل ۳-۸: موتور القایی مورد مطالعه، الف) ساختار کلی موتور، ب) اجزا اصلی موتور، ج) روتور قفس سنجایی، د) استاتور با

سیم پیچی یک طبقه و ۲۴ شیار



شکل ۳-۹: نمای دو بعدی موتور القایی و ابعاد اندازه گیری شده

جدول ۳-۱: مقادیر نامی موتور

متغیر	نماد	مقدار
توان	P	$1 \text{ Hp} = 750 \text{ w}$
سرعت	n_r	1400 rpm
جریان	I	$3.5/2 \text{ A}$
ولتاژ	V	$220/380 \text{ V}$
فرکانس	f	50 Hz

جدول ۳-۲: اطلاعات ابعادی موتور القایی

متغیر	نماد	مقدار
طول محوری موتور	L	80 mm
طول فاصله هوایی	Ag	0.5 mm
قطر خارجی استاتور	$D_{out,s}$	140 mm
قطر داخلی استاتور	D	85 mm
قطر خارجی روتور	$D_{out,r}$	84 mm
قطر شفت روتور	D_{shaft}	22 mm
عرض دندانه استاتور	T_s	5.5 mm
عرض شیار استاتور	W_s	6 mm
ارتفاع دندانه استاتور	H_s	17.5 mm
تعداد شیار استاتور	S_s	24
سطح مقطع روتور بار	S_{bar}	38.48 mm^2
تعداد میله ها روتور	S_r	9

با توجه به شکل ۳-۸ (د)، تعداد شیارهای استاتور، نحوه‌ی سیم‌پیچی استاتور و گام کلاف مشخص است. اما تعداد دور استاتور تقریباً حدود ۳۰۰ دور است. برای محاسبه‌ی دقیق تعداد دور استاتور، با توجه به پارامترهای نامی روی پلاک موتور و محاسباتی مطابق الگوریتم زیر، می‌توان تعداد دور دقیق را بدست آورد.

$$S = 1.11 \times \pi^2 \times n_s \times D^2 \times L \times B_{av} \times A \times K_w \text{ (V.A)} \quad (9-3)$$

$$S = 3V_{ph}I_{ph} = 3 \times 220 \times 2 = 1320 \text{ (V.A)} \quad (10-3)$$

$$n_s = 1500/60 = 25 \text{ (r.p.s)} \quad (11-3)$$

$$D = 85 \text{ (mm)} \quad (12-3)$$

$$L = 80 \text{ (mm)} \quad (13-3)$$

$$D^2L = 0.000578 \text{ (mm}^3\text{)} \quad (14-3)$$

$$K_w = 0.95 \quad (15-3)$$

$$A \cong 22000 \left(\frac{A}{m}\right) \quad (16-3)$$

$$B_{av} \cong 0.58 \text{ (T)} \quad (17-3)$$

$$V_{ph} = 4.44 \times \varphi \times f \times N_{ph} \times K_w \text{ (V)} \quad (18-3)$$

$$V_{ph} = 220 \text{ (V)} \quad (19-3)$$

$$f = 50 \text{ (Hz)} \quad (20-3)$$

$$\varphi = B_{av} \times \frac{\pi DL}{p} = 0.0032 \text{ (wb)} \quad (21-3)$$

$$N_{ph1} = 332.99 \text{ (Turn)} \quad (22-3)$$

$$N_{coil/ph} = 12/3 = 4 \text{ (Turn)} \quad (23-3)$$

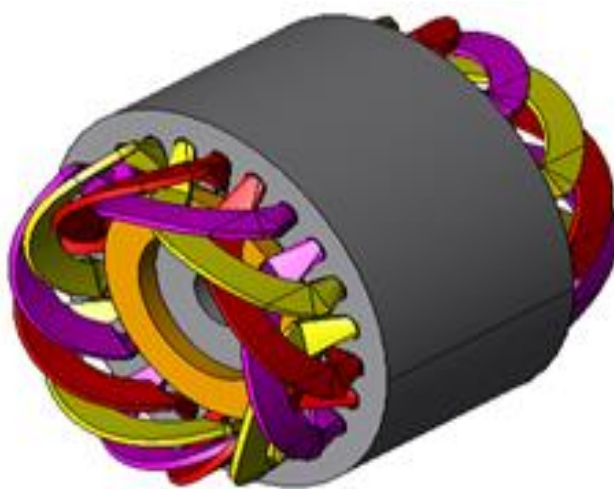
$$N_{coil} = \frac{N_{ph}}{4} \approx 84 \text{ (Turn)} \quad (24-3)$$

$$N_{ph2} = 4 \times 84 = 336 \text{ (Turn)} \quad (25-3)$$

مطابق روابط فوق مشاهده می شود که تعداد دور سیم پیچی های استاتور برای هر فاز ۳۳۶ دور است. این مقدار در مدار الکتریکی معادل موتور در شبیه سازی نرم افزار المان محدود در بخش بعد مورد استفاده قرار می گیرد.

۳-۶ تحلیل و توسعه مدل در نرم افزار المان محدود

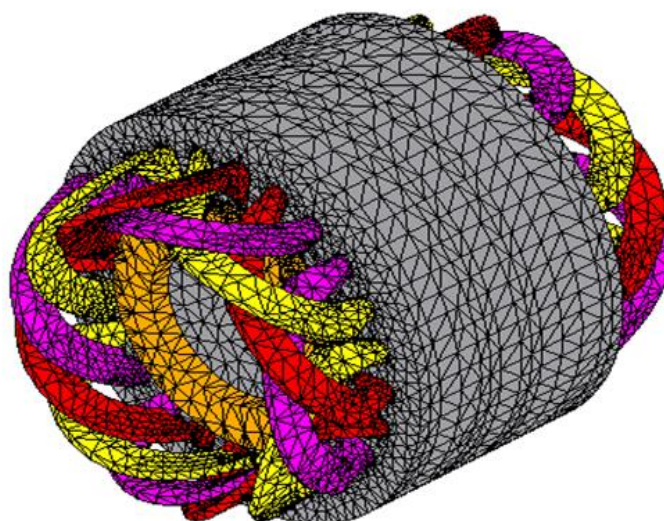
برای محاسبه و تحلیل نشت میدان مغناطیسی در فواصل نزدیک با توجه به محدودیت‌های حجم محاسبات، می‌توان از نرم‌افزار المان محدود استفاده کرد. در این پایان‌نامه از نرم‌افزار JMAG-Designer به دلیل قابلیت‌های بالقوه‌ای که در تحلیل سیستم‌های الکترومغناطیسی دارد، استفاده شده است. از آنجاییکه میدان مغناطیسی در راستاهای مختلف موتور با الگوهای متفاوتی منتشر می‌شود، باید از مدل سه بعدی برای تحلیل المان محدود استفاده کرد. در این پایان‌نامه مدل سه بعدی ماشین با استفاده از ابعاد برداشت شده از موتور القایی واقعی مطابق شکل زیر در محیط نرم‌افزار JMAG-Designer ترسیم شد.



شکل ۳-۱۰ : ترسیم سه بعدی موتور در نرم‌افزار المان محدود

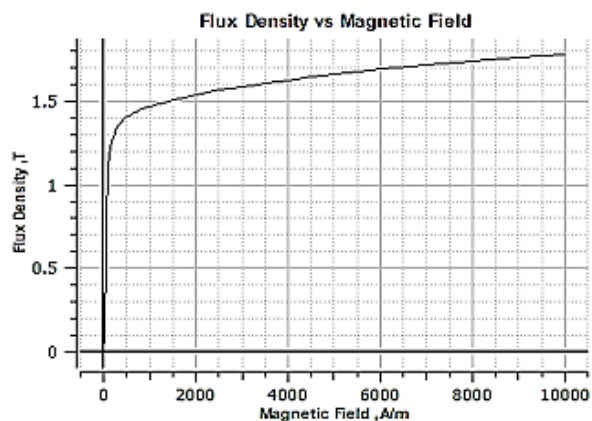
یکی از پارامترهای بسیار تاثیرگذار در حجم محاسبات و روند تحلیل مدل المان محدود، به‌ویژه در مدل‌های سه بعدی، تعداد مش‌های مدل است. هر چقدر از مش‌های کوچک‌تری در مدل استفاده شود، نتایج تحلیل دقیق‌تر خواهد بود. اما افزایش تعداد مش‌ها منجر به افزایش زمان محاسبات و محدود شدن محدوده‌ی محاسبه‌ی میدان مغناطیسی در اطراف موتور القایی خواهد شد. از طرف دیگر اگر از مش‌هایی با ابعاد بزرگ‌تر در مش‌بندی مساله استفاده شود، می‌توان محدوده‌ی بزرگ‌تری را در تعداد مش ثابت بررسی کرد، اما دقت نتایج خروجی و میدان محاسبه‌شده کاهش خواهد یافت. بنابراین لازم است ابعاد مش بصورت بهینه انتخاب

شود. در این مساله برای محاسبه‌ی ابعاد بهینه‌ی مش، فاصله مشخصی جهت محاسبه‌ی میدان مغناطیسی با استفاده از روش المان محدود در نظر گرفته شد. این فاصله حدود هفت برابر شعاع خارجی استاتور فرض شد. ابعاد مش با سعی و خطا به گونه‌ای تغییر یافت که با کوچک‌تر کردن ابعاد مش‌ها تغییر محسوسی در نتایج خروجی مشاهده نشود. در اینصورت فضای کل مساله به بیش از دو میلیون مش تقسیم شد. که با توجه به محدودیت‌های سیستم‌های محاسباتی در دسترس، زمان محاسبات معقولی را خواهد داشت. در شکل زیر مش‌های هسته استاتور و سیم‌پیچ‌های آن و روتور در مدل سه بعدی موتور القایی نشان داده شده است. این مش‌بندی با روند منطقی تا محدوده‌ی هفت برابری شعاع استاتور نیز ادامه یافته است.



شکل ۳-۱۱ : مش‌های مدل سه بعدی موتور القایی

برای این مدل با توجه به اینکه هسته استاتور و روتور از جنس ورق سیلیس بود، مواد هسته از یک نمونه مشخصه مربوط برای آلیاژ آهن مطابق شکل زیر استفاده شد. برای هسته روتور نیز از همین آهن استفاده شد. جنس قفس روتور از آلومینیوم و سیم‌پیچ‌های استاتور از مس هستند که ضرایب رسانایی این مواد مطابق جدول ۳-۳ است.

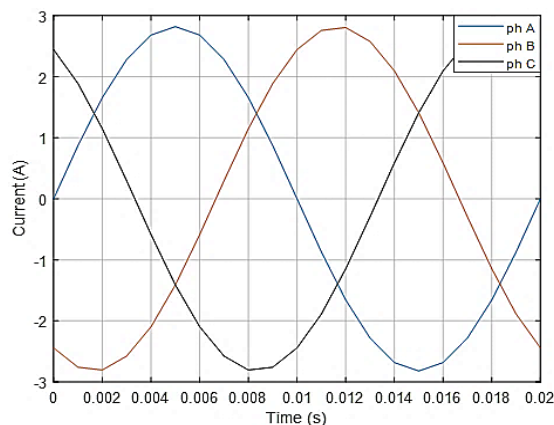


شکل ۳-۱۲: منحنی اشباع مغناطیسی هسته فولادی موتور القایی

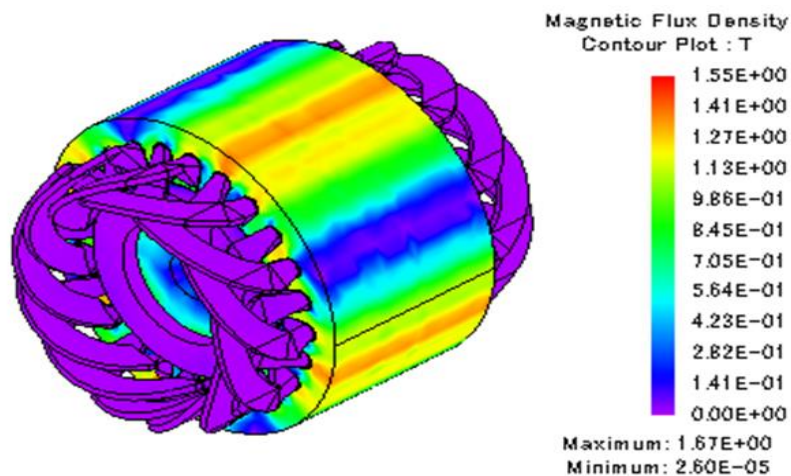
جدول ۳-۳: مشخصات هادی‌های مس و آلومینیوم

نام رسانا	مقاومت ویژه ($\Omega.m$)	رسانایی الکتریکی ($\Omega^{-1}.m^{-1}$)
مس	$1.673e-8$	59590000
آلومینیوم	$2.655e-8$	37740000

اگر سرعت چرخش روتور در این مدل برابر با 1400 rpm در نظر گرفته شود، میانگین گشتاور در این صورت برابر با گشتاور نامی است. همچنین جریان‌هایی که به کویل‌های استاتور اعمال می‌شوند به صورت سینوسی سه فاز متقارن در نظر گرفته شده‌اند که در مدل شبیه‌سازی شده مطابق شکل ۳-۱۳ است. توزیع میدان مغناطیسی در هسته روتور، استاتور و سیم‌پیچ‌های آن در لحظه $t = 73ms$ مطابق شکل ۳-۱۴ است.

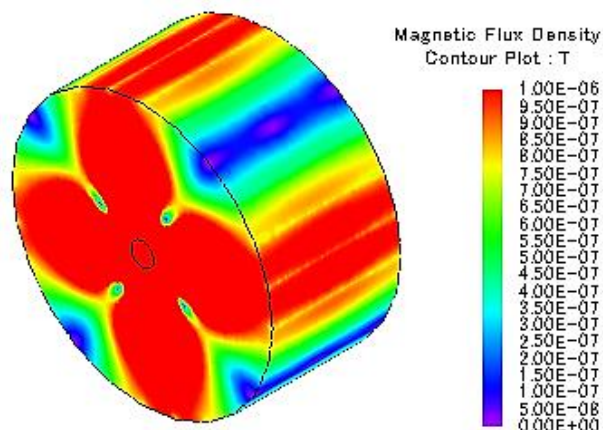


شکل ۳-۱۳: شکل جریان سه فاز اعمال شده به استاتور



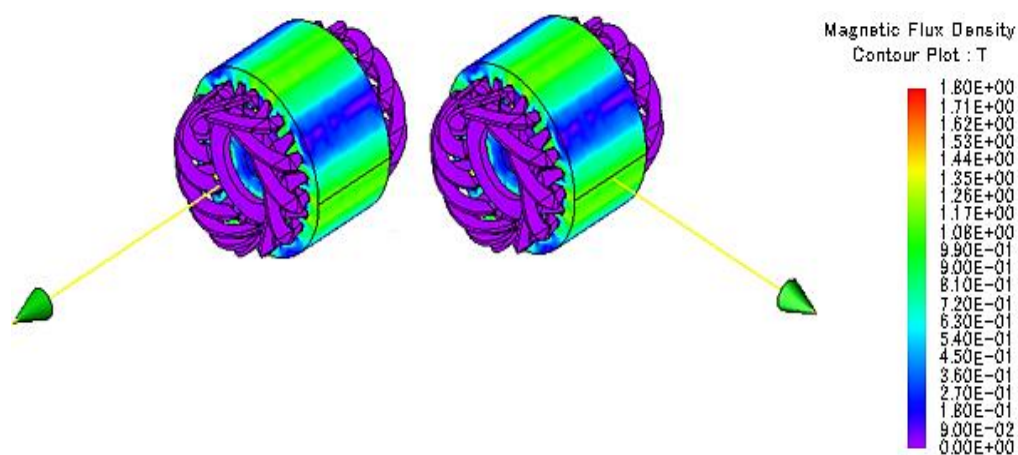
شکل ۳-۱۴: توزیع چگالی شار مغناطیسی در سرعت نامی

توزیع میدان‌های مغناطیسی مطابق انتظار تشکیل چهار قطب مغناطیسی در یوغ استاتور را نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رفت میدان مغناطیسی در مرکز قطب‌ها مینیمم و در فضای بین قطب‌ها تا حدود بیش از ۱/۵ تسلا است. با توجه به ضریب نفوذپذیری بسیار پایین در سیم‌پیچ‌های استاتور، در شکل فوق نیز میدان مغناطیسی قابل توجهی در سیم‌پیچ‌های استاتور مشاهده نمی‌شود. میدان در سطح خارجی محدوده‌ی محاسبه‌ی المان محدود مطابق شکل زیر نشان داده شده است. لازم به ذکر است از تاثیر پوسته موتور در شبیه‌سازی‌ها صرف نظر شده است.

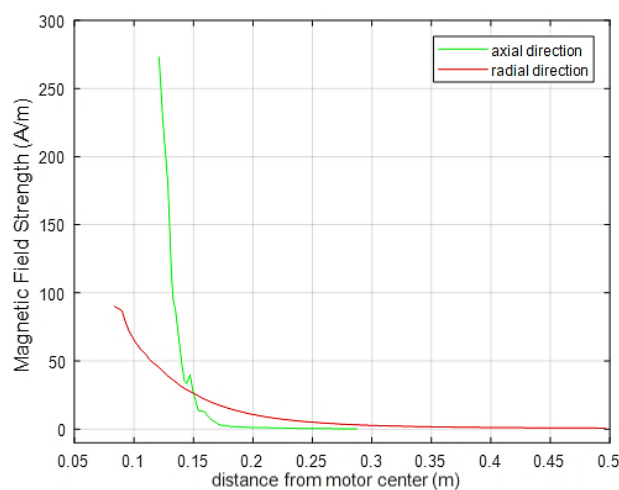


شکل ۳-۱۵: توزیع اندازه چگالی شار مغناطیسی در فاصله هفت برابر قطر موتور القایی

شکل فوق نشان می‌دهد که در راستای شعاعی ماشین انتشار میدان مغناطیسی ماشین نسبت به راستای محوری نسبتاً زیاد است، در راستای شعاعی الگوی انتشار میدان مغناطیسی مطابق همان میدانی است که در یوغ استاتور مشاهده می‌شود و مقدار نسبتاً بیشتری در مقایسه با راستای محوری دارد. با توجه به شکل ۳-۱۵ با دور شدن از مرکز قطر استاتور در راستای شعاعی مقدار میدان کاهش پیدا می‌کند و بیشترین میدان در مرکز یوغ استاتور است. در شکل ۳-۱۶ دو راستای مختلف برای مطالعه‌ی میدان مغناطیسی نشان داده شده است. اندازه‌ی میدان مغناطیسی در دو راستای معرفی شده در این شکل نیز، در شکل ۳-۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۶: دو راستای محوری و شعاعی موتور برای تحلیل اندازه نشت چگالی شار مغناطیسی



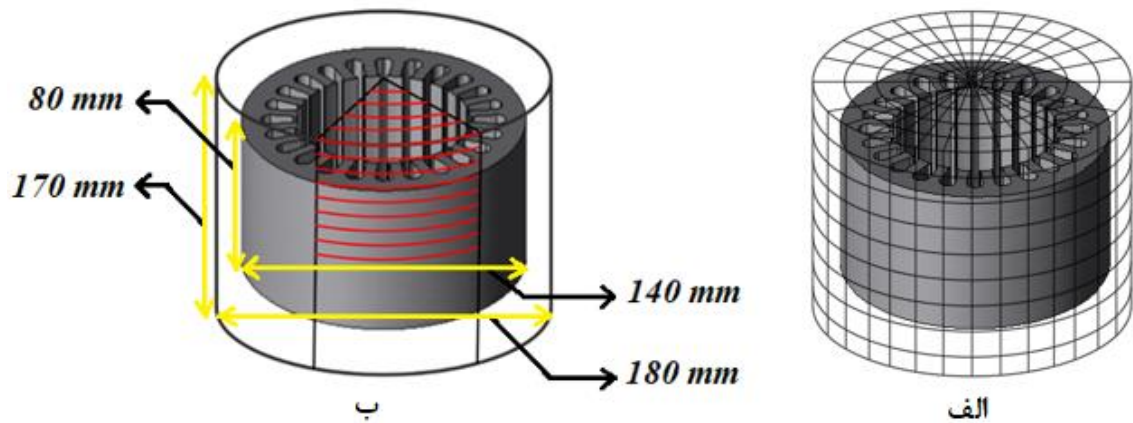
شکل ۳-۱۷: تغییرات اندازه شدت میدان مغناطیسی اطراف موتور در دو راستای محوری و شعاعی

شکل فوق نشان می‌دهد همان‌گونه که انتظار می‌رفت با وجود آنکه میدان مغناطیسی در راستای محوری در فواصل نزدیک دامنه بیشتری دارد، اما با افزایش فاصله از موتور نرخ کاهش میدان مغناطیسی در راستای محوری بسیار زیاد بوده و میدان به سمت صفر میل می‌کند. اما میدان در راستای شعاعی نرخ کاهش کمتری دارد و دامنه بزرگ‌تری در فواصل دورتر خواهد داشت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت برای تشخیص کارکرد موتور القایی راستای اطراف یوغ استاتور، یعنی در راستای شعاعی اطراف موتور، فضای مناسب‌تری است.

۳-۷ محاسبه میدان مغناطیسی اطراف موتور القایی با استفاده از قضیه هم‌ارزی

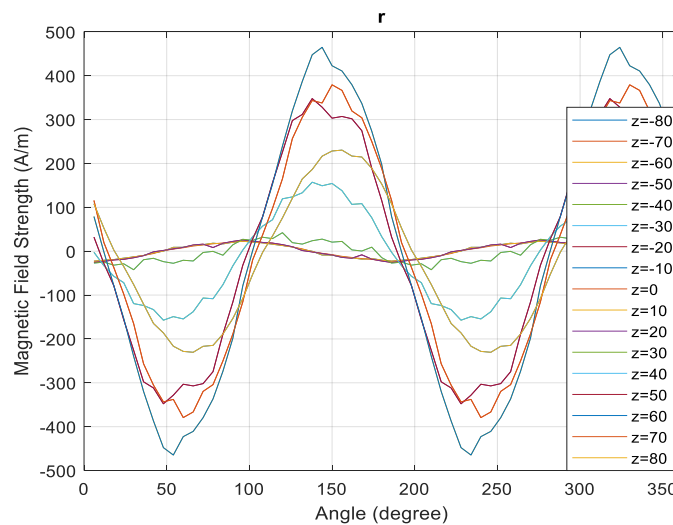
همانگونه که در بخش‌های قبل بیان شد به منظور محاسبه میدان‌های مغناطیسی در سیستم‌هایی با توزیع جریان‌های پیچیده مانند یک موتور الکتریکی در فواصل نسبتاً دور، به دلیل عدم وجود رابطه‌ای تحلیلی و همچنین محدودیت‌های روش‌های عددی المان محدود در بازه‌ی محاسبه‌ی میدان و زمان بالای محاسبات، تنها راه‌حل استفاده از قضیه هم‌ارزی است. در این بخش به محاسبه‌ی میدان مغناطیسی اطراف موتور در فواصل دور با استفاده از قضیه‌ی هم‌ارزی پرداخته خواهد شد. برای این منظور در این مساله موتور الکتریکی مورد مطالعه، که در بخش قبل مشخصات آن مطرح شد، به عنوان منبع تولید میدان در قضیه هم‌ارزی در نظر گرفته شد. یک سطح بسته‌ی استوانه‌ای در اطراف آن فرض شد و میدان‌های مغناطیسی روی سطح استخراج شد. به منظور برداشت داده‌های میدان روی سطح بسته نزدیک موتور، از المان محدود استفاده شد. سطح جانبی استوانه‌ی مفروض اطراف موتور به هفده قسمت دایره‌ای در راستای محور Z و در سطوح بالا و پایین در راستای I به پنج قسمت مساوی بصورت دایره‌ای تقسیم شد، نمای کلی مش بندی سطح بسته‌ی اطراف موتور مطابق شکل ۳-۱۸ (الف) است. اما همانطور که از شکل ۳-۱۸ (ب) مشخص است، بخش‌های منتخب به صورت ربع دایره یعنی ۹۰ درجه و تنها در نیمه‌ی بالایی سطح مفروض، انتخاب شده اند. دلیل این امر تقارن ذاتی دوره تناوب مولفه‌های میدان موتور چهار قطبی است، که دارای توزیع سیم‌پیچی متقارن هستند. شکل موج میدان در مسیر دایره‌ای اطراف موتور به صورت دو سیکل کامل است. نمودارهای مقادیر میدان مغناطیسی

برای دو سیکل کامل باتوجه به تقارن در نظر گرفته شده، برای هر سه مولفه مطابق شکل های ۳-۱۹ تا ۳-۲۷ برای سطح جانبی و سطوح بالا و پایین بدست آمده‌اند.

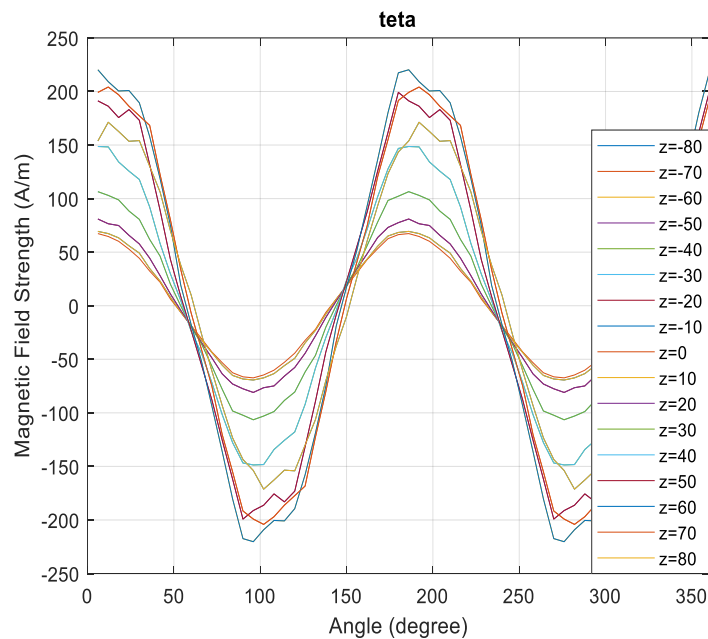


شکل ۳-۱۸: الف) نمای کلی مش بندی، ب) بخش‌های منتخب بر روی سطوح جانبی و بالا برای استوانه مفروض اطراف موتور

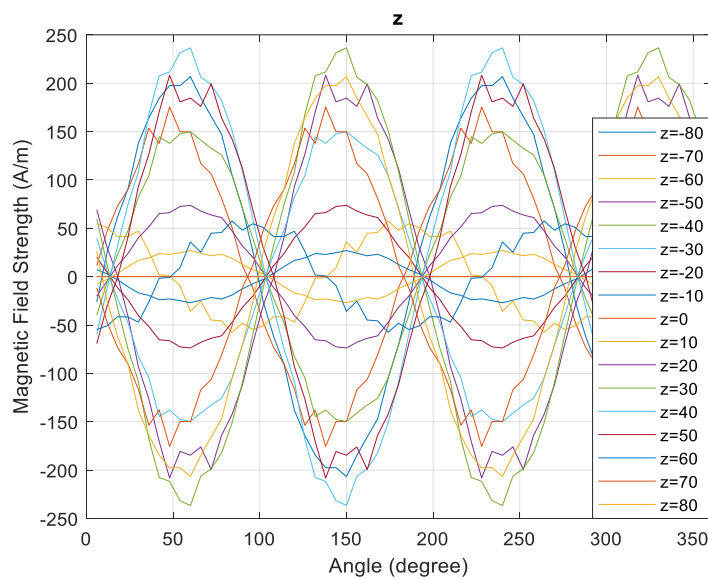
میدان در بخش‌های انتخاب‌شده برای سطح جانبی که در ربع دوره تناوب کامل در نظر گرفته و سپس متقارن‌سازی می‌شود، برای سه مولفه r و θ و z بصورت زیر است. همچنین نیمه بالا و پایین استوانه مفروض نیز در مولفه‌های r و θ دارای تقارن کامل هستند و مولفه z نیز دقیقا قرینه است. چون مرکز هندسی موتور در مبدا دستگاه مختصات قرار دارد و تقارن صفحه $z=0$ نیز در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۱۹: مولفه شعاعی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور یک طبقه



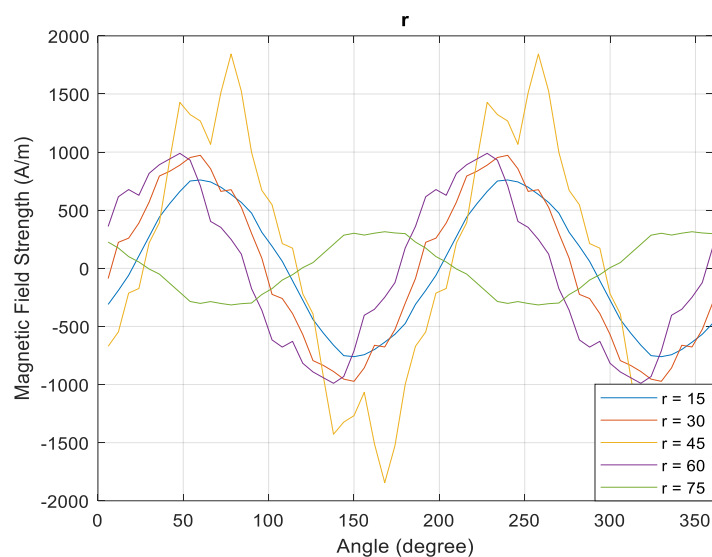
شکل ۳-۲۰: مولفه مماسی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور یک طبقه



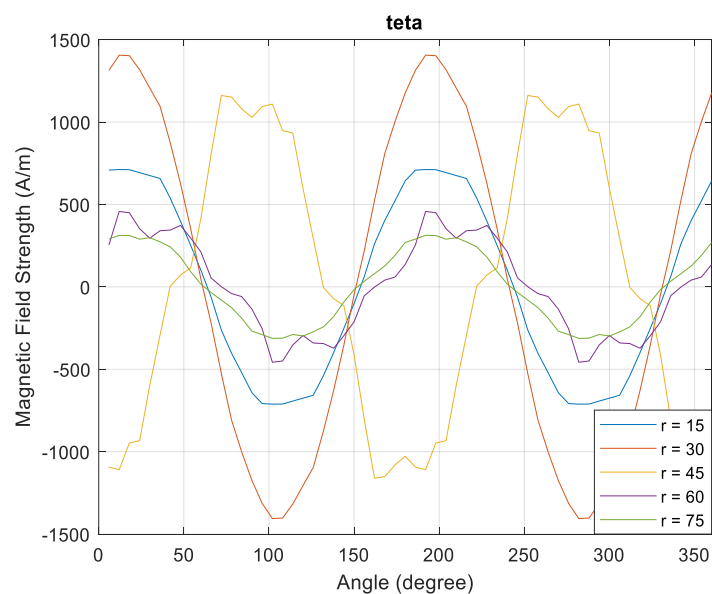
شکل ۳-۲۱: مولفه عمودی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور یک طبقه

مولفه‌های میدان در بخش‌های انتخاب‌شده برای سطح بالا که مشابه حالت قبل در ربع دوره تناوب کامل در نظر گرفته و سپس مقارن‌سازی می‌شود، برای سه مولفه I و θ و Z بصورت شکل ۳-۲۲ تا ۳-۲۴ هستند. همچنین

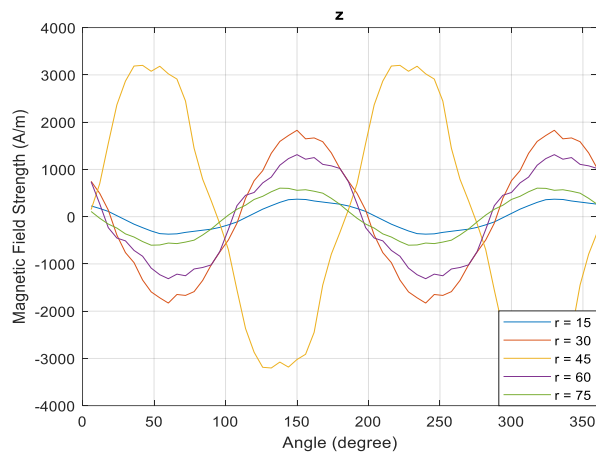
به دلیل تقارن کامل نیمه بالا و پایین استوانه مفروض در مولفه‌های r و θ و قرینه بودن مولفه z ، مولفه‌های میدان در سطح پایین استوانه نیز به طور مشابه به صورت شکل ۳-۲۵ تا ۳-۲۷ هستند.



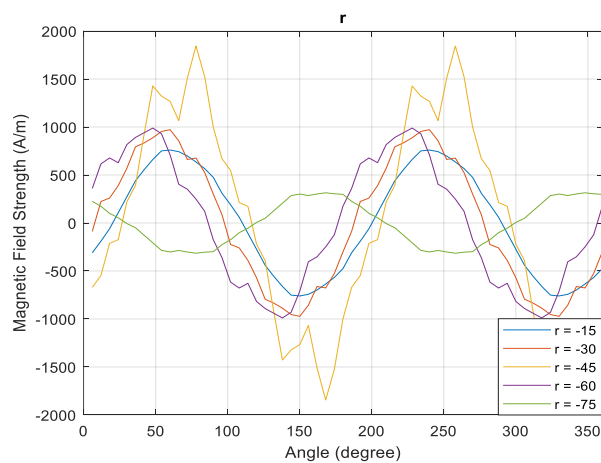
شکل ۳-۲۲: مولفه شعاعی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور یک طبقه



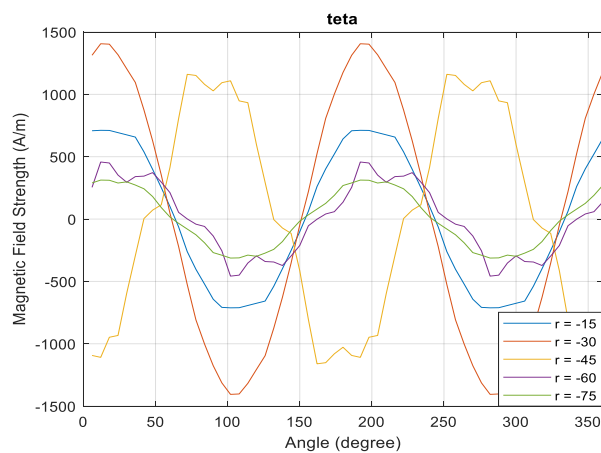
شکل ۳-۲۳: مولفه مماسی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور یک طبقه



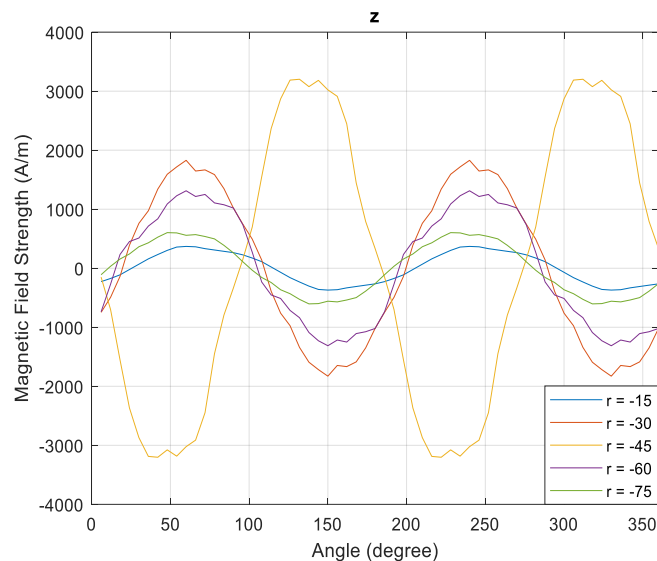
شکل ۳-۲۴: مولفه عمودی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور یک طبقه



شکل ۳-۲۵: مولفه شعاعی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور یک طبقه



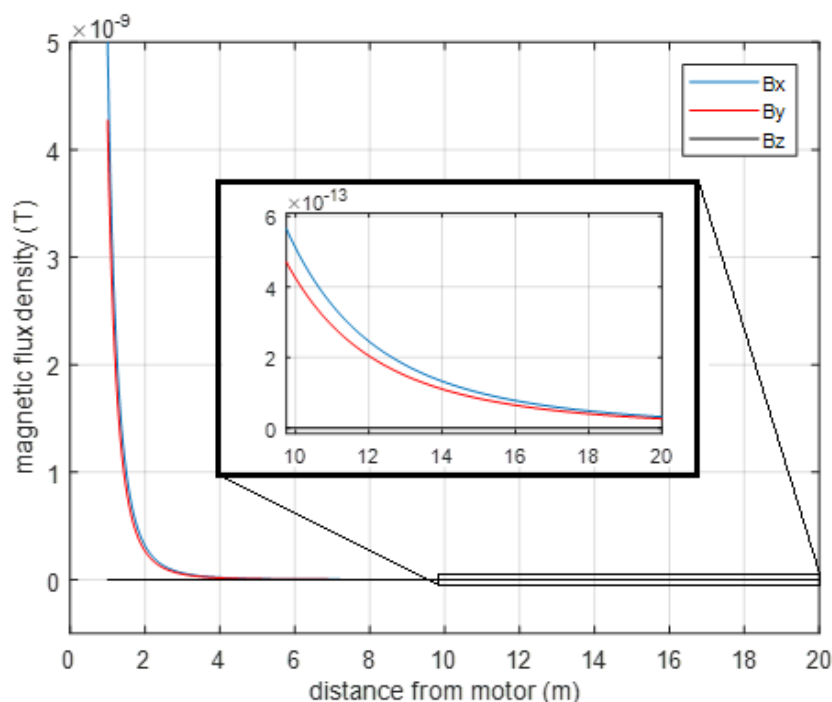
شکل ۳-۲۶: مولفه مماسی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور یک طبقه



شکل ۳-۲۷: مولفه عمودی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور یک طبقه

طبق الگوریتم قضیه هم‌ارزی که در فلوچارت بخش ۳-۳ مشخص شد، برای محاسبه‌ی میدان مغناطیسی اطراف موتور القایی در فواصل دور، در قدم اول مقادیر مولفه‌های میدان مغناطیسی بر روی سطح بسته‌ی فرض شده در فضای نزدیک موتور القایی مورد مطالعه از نرم‌افزار المان محدود برداشت می‌شود. با توجه به توضیحات فوق این مقادیر به دلیل خاصیت چهار قطبی بودن موتور، توزیع سیم‌پیچی متقارن و در نتیجه تقارن ذاتی مولفه‌های میدان، در ربع یک دوره تناوب کامل از نرم‌افزار استخراج می‌شوند و در یک دوره تناوب کامل مطابق آنچه در شکل‌های ۳-۱۹ تا ۳-۲۷ نشان داده شده است، متقارن‌سازی و تکمیل می‌شوند. در قدم بعد با بهره‌گیری از کد برنامه، مقادیر جریان‌های سطحی هم‌ارز محاسبه و در نهایت مقادیر هر سه مولفه‌ی میدان در دستگاه مختصات دکارتی در صفحه $z=0$ و در امتداد راستای محور x محاسبه می‌شوند. لازم به ذکر است مرکز هندسی موتور القایی مورد مطالعه در مبدا مختصات قرار دارد و طول محوری موتور در راستای محور z است. این مقادیر در فاصله‌ی اندکی اطراف موتور با مقادیری که از المان محدود بدست می‌آیند در تطابق نسبتاً خوبی است. البته اندک درصدی اختلاف بین این مقادیر به دلیل خطای نرم‌افزار و همچنین متقارن‌سازی داده‌ها، طبیعی و قابل توجیه است. با توجه به قضیه هم‌ارزی و با استفاده از کد برنامه‌نویسی بر مبنای آن،

مقادیر هر سه مولفه میدان در راستای محور X از فاصله‌ی یک متری تا فاصله‌ی بیست متری از مرکز موتور القایی مورد مطالعه مطابق شکل ۳-۲۸ است.

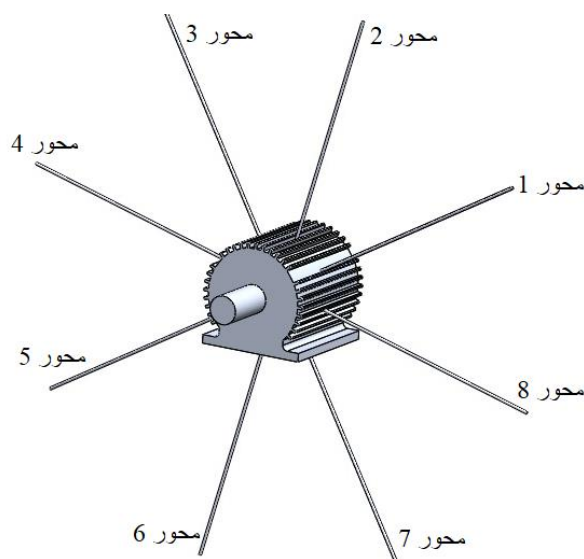


شکل ۳-۲۸: روند تغییرات مولفه‌های میدان در راستای محور X

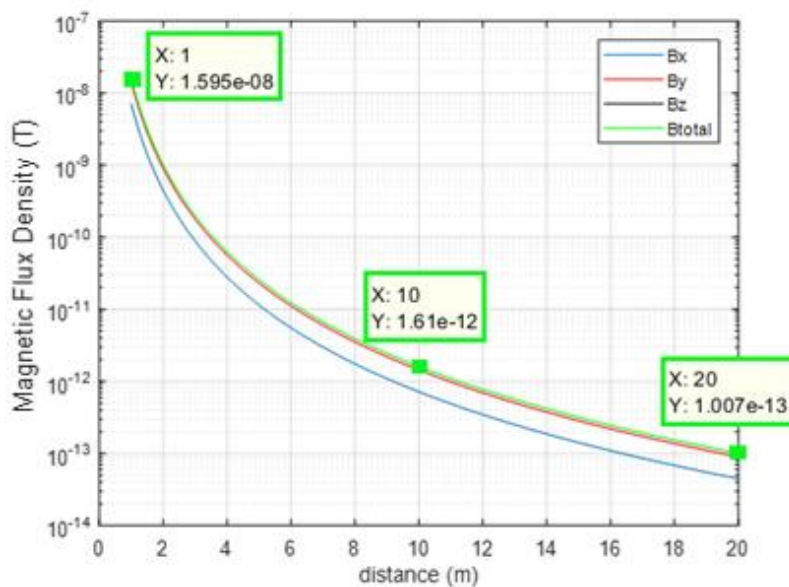
با توجه به بررسی‌های صورت گرفته بر روی مقادیر میدان در نمودار شکل فوق که براساس قضیه هم‌ارزی برای موتور القایی بدست آمد، نتایج مهمی در خصوص روند تغییرات میدان حاصل می‌شود. از جمله آن که بررسی‌ها نشان می‌دهد اگر فاصله از موتور القایی π برابر شود، مقادیر مولفه‌های میدان با تقریب خوبی با توان چهارم π کاهش می‌یابد. که این موضوع با آنچه در مرجع [۱۰] اشاره شد، مغایرت دارد. یعنی نمی‌توان از مدل دوقطبی برای تخمین میدان‌های اطراف موتور استفاده کرد. در مرجع [۱۰] عنوان شده بود که به دلیل آن که انتشار مولفه‌های میدان مغناطیسی با توان سوم فاصله از موتور رابطه معکوس دارد، در نتیجه می‌توان از تقریب دوقطبی استفاده کرد.

همانگونه که بیان شد راستای متشکل از نقاط مشاهده‌ی میدان، در حالت قبل که در دستگاه مختصات دکارتی در نظر گرفته شد، در صفحه $z=0$ و در راستای محور x از فاصله‌ی یک متری تا چند ده متری است. اگر این بردار در دستگاه مختصات استوانه‌ای بیان شود در صفحه $z=0$ و در راستای محور r و با زاویه $\theta=0$ قرار می‌گیرد. حال اگر زاویه θ متغیر در نظر گرفته شود، در زوایای مختلف و در جهات مختلف می‌توان مولفه‌های میدان را محاسبه نمود و تغییرات آن را برآورد کرد. این کار با تغییر در بردار مکان مشاهده‌ی میدان در کد برنامه، انجام شد. این تحلیل، موقعیت قرارگیری قطب‌ها، در واقع محور قطب‌ها و محور خنثی را در یک لحظه از زمان که استخراج داده‌های بررسی نیز در همان لحظه صورت گرفت، نشان می‌دهد. در کد برنامه‌نویسی بر مبنای قضیه هم‌ارزی، زاویه θ از ۰ تا ۳۶۰ درجه تغییر داده شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد اگر مولفه‌ی میدان برآیند در تمام زوایا از ۰ تا ۳۶۰ درجه بررسی شود، جایی که مولفه‌ی برآیند میدان دارای اندازه ماکزیمم است در $\theta=\pi/3$ رادیان اتفاق می‌افتد. یعنی محور بین قطب‌ها در زاویه ۶۰ درجه است. بنابراین محور قطب‌ها نیز در زاویه ۴۵+۶۰ است. این امر به دلیل خاصیت چهار قطبی بودن موتور است. بیان این نکته ضروری است که تمام این تحلیل‌ها در یک لحظه از زمان کار موتور است، یعنی میدان مورد مطالعه بر روی این محورها با توجه به آن که دامنه‌ی میدانی که اطراف موتور تولید می‌شود تغییرات زمانی ندارد، اما فاز میدان تولیدی تغییرات مکانی دارد، در حال تغییر است. بنابراین محور قطب‌ها نیز در حال گردش اطراف موتور هستند. واضح است که به دلیل آن که ماشین چهار قطبی است، تعداد محور قطب‌ها و محور خنثی برابر چهار است. به عنوان نمونه هشت راستا اطراف موتور القایی در نظر گرفته و این راستاها در شکل ۳-۲۹ نشان داده شده است. محور شماره ۱ در $\theta=60$ انتخاب شده است. یعنی در راستایی که اندازه‌ی میدان برآیند در لحظه مورد نظر ماکزیمم است. بنابراین محور شماره ۵ که در امتداد این محور است نیز دارای اندازه‌ی میدان برآیند ماکزیمم است. همچنین در محور شماره ۳ و امتداد آن محور شماره ۷ که به ترتیب با محور شماره ۱ و ۵، ۹۰ درجه اختلاف مکانی دارند، نیز اندازه میدان ماکزیمم مشاهده می‌شود. این محورها محور بین قطب‌های ماشین هستند. در محورهای شماره ۲، ۴، ۶ و ۸ نیز که با اختلاف زاویه ۴۵ درجه‌ای با محورهای ۱، ۳، ۵ و ۷ دقیقاً وسط این محورها قرار می‌گیرند،

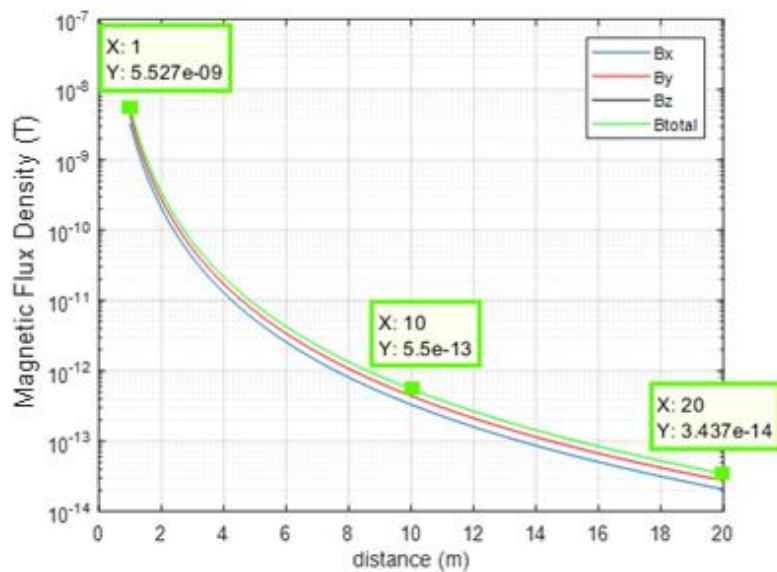
اندازه میدان برآیند مینیمم است. یعنی در راستای محور قطبها که شار قابل توجهی وجود ندارد و اصطلاحاً محور خنثی نامیده می‌شود. هر سه مولفه‌ی میدان و اندازه‌ی میدان برآیند برحسب فاصله از موتور در چهار راستای محور ۱، ۳، ۵ و ۷ که راستای ماکزیمم اندازه‌ی میدان هستند، مطابق شکل ۳-۳۰ است و در ۴ راستای محور ۲، ۴، ۶ و ۸ دارای مینیمم اندازه‌ی میدان هستند مطابق شکل ۳-۳۱ است.



شکل ۳-۲۹: راستاهای در نظر گرفته شده اطراف موتور مورد مطالعه برای محاسبه میدان

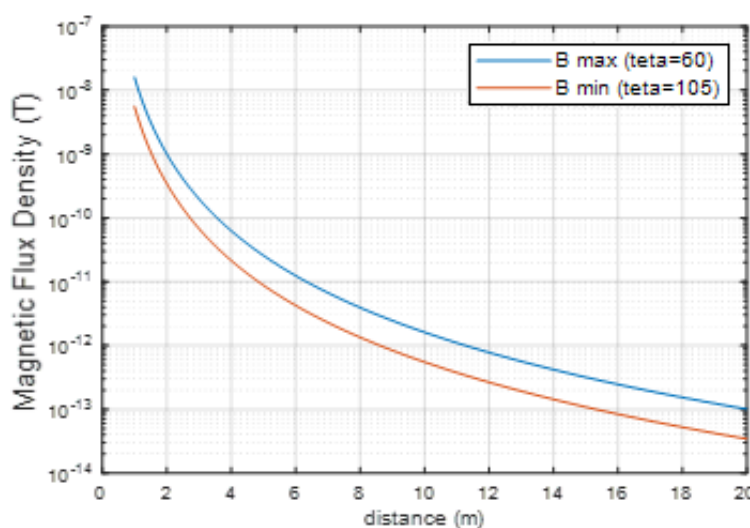


شکل ۳-۳۰: مقادیر مولفه‌های میدان و اندازه میدان برآیند در محورهای ۱، ۳، ۵ و ۷



شکل ۳-۳۱: مقادیر مولفه‌های میدان و اندازه میدان برآیند در محورهای ۲، ۴، ۶ و ۸

با توجه به آنچه از شکل‌های ۳-۳۰ و ۳-۳۱ پیداست، مقادیر میدان برآیند در تمام نقاط در راستای محورهای ۱، ۳، ۵ و ۷ بیشتر از مقادیر میدان در راستای محورهای ۲، ۴، ۶ و ۸ هستند. به منظور مقایسه‌ی بهتر در نمودار شکل زیر مولفه میدان برآیند در راستای ماکزیمم و مینیمم برهم منطبق شده است. شکل زیر محدوده‌ی تغییرات میدان را به خوبی نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳۲: مقایسه اندازه میدان برآیند در دو راستای مینیمم و ماکزیمم اندازه میدان

در این فصل با استفاده از روش پیشنهادی این پایان نامه مقادیر مولفه‌های میدان در فواصل دور برای یک موتور القایی 1hp محاسبه شد. این روش به منظور محاسبه‌ی میدان مغناطیسی بر مبنای قضیه هم‌ارزی برای سیستم‌هایی با توزیع جریان پیچیده، که به دلیل حجم بالای محاسبات امکان آنالیز عددی نظیر روش‌های شبیه‌سازی المان محدود و همچنین رابطه‌ای تحلیلی برای فواصل دور وجود ندارد، ارائه شد. بررسی نتایج در راستای شعاعی اطراف موتور نشان می‌دهد شدت میدان با افزایش فاصله از موتور کاهش می‌یابد، با این وجود بیشینه مقدار برآیند میدان، در فاصله بیست متری از مرکز موتور دامنه‌ای برابر 1×10^{-13} دارد که با حسگرهای موجود قابل تشخیص است.

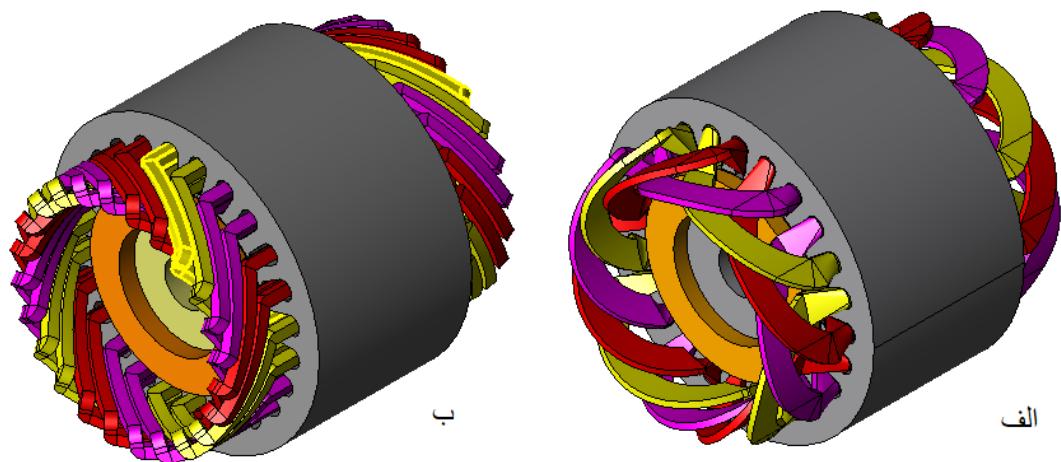
فصل چهارم: بهینه‌سازی ساختار موتور القایی به منظور کاهش نشت میدان

۴-۱ مقدمه

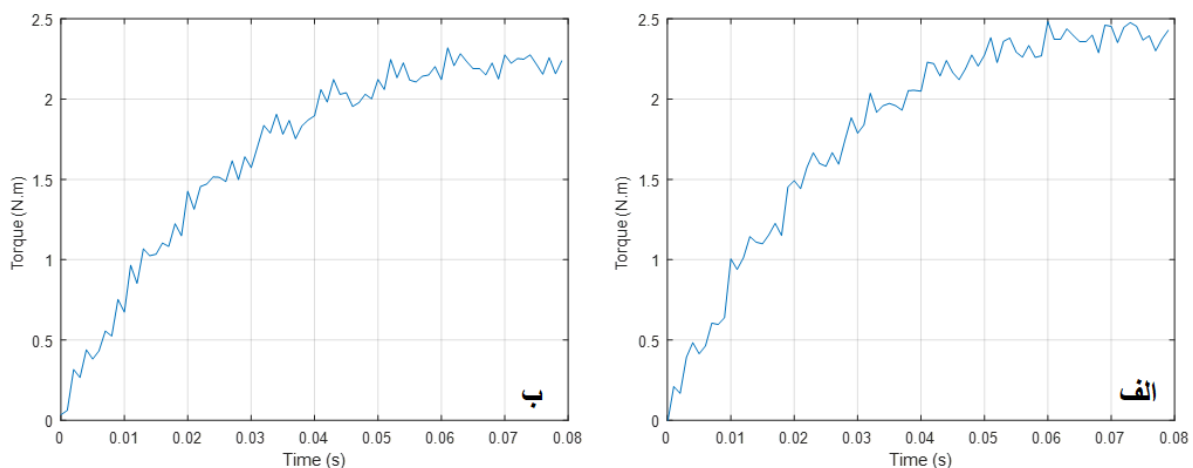
در فصل قبل با استفاده از اصل هم‌ارزی روشی تحلیلی به منظور محاسبه‌ی میدان مغناطیسی اطراف موتورهای القایی ارائه شد. از سوی دیگر موضوع تشخیص و ردیابی موتورهای الکتریکی در برخی از کاربردهای خاص، به وسیله ارزیابی و پایش میدان‌های مغناطیسی اطراف موتور الکتریکی، حائز اهمیت است. بنابراین لازم است موتور القایی برای الگوریتم‌های متفاوت طراحی، با هدف کاهش نشت میدان مغناطیسی در فواصل دورتر مورد بررسی قرار گیرد. طراحی باید به گونه‌ای اصلاح شود، تا بتوان به مدلی بهینه از لحاظ کمترین میزان نشت میدان در فواصل دور، دست یافت. برای این منظور چند تئوری در نظر گرفته شد. در این فصل به بررسی این موارد و الگوریتم‌های طراحی پیشنهادی جهت کاهش نشت میدان مغناطیسی اطراف موتور القایی پرداخته خواهد شد.

۴-۲ مقایسه سیم‌پیچی یک طبقه و دوطبقه استاتور

اولین ایده‌ای که در این پایان‌نامه به منظور کاهش نشت میدان مغناطیسی اطراف موتور القایی مطرح شد، تغییر در نوع سیم‌پیچی‌های استاتور است. ابتدا موتور مورد مطالعه با سیم‌پیچی یک طبقه مطابق آنچه در بخش ۳-۶ شرح داده شد، در نرم‌افزار المان محدود بصورت سه بعدی ترسیم شد. سپس باتوجه به کد برنامه‌نویسی متلب که مطابق فلوچارت فصل قبل با قضیه هم‌ارزی تعمیم یافت، تغییرات نشت میدان در یک راستای معین مشاهده شد. سپس موتور با همان پارامترهای طراحی و همان ابعاد با سیم‌پیچی دوطبقه استاتور بدون گام کسری به نحوی طراحی شد که گشتاور در حالت دائمی به مقدار حالت قبل برسد. در شکل ۴-۱ مدل سیم‌پیچی موتور با نحوه‌ی سیم‌پیچی یک طبقه و دو طبقه بدون گام کسری در نرم‌افزار المان محدود نشان داده شده است. تغییرات گشتاور دو مدل سیم‌پیچی موتور القایی در شکل ۴-۲ نشان داده شد.



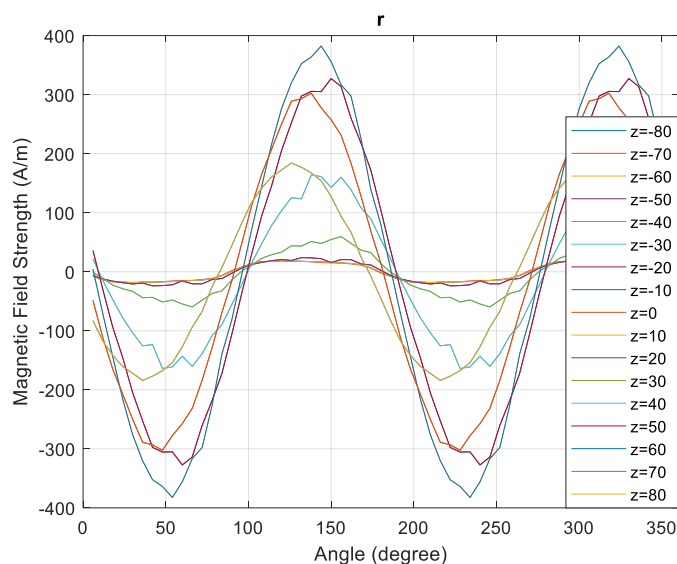
شکل ۴-۱: الف) موتور با طراحی سیم‌پیچی یک طبقه، ب) موتور با طراحی سیم‌پیچی دو طبقه



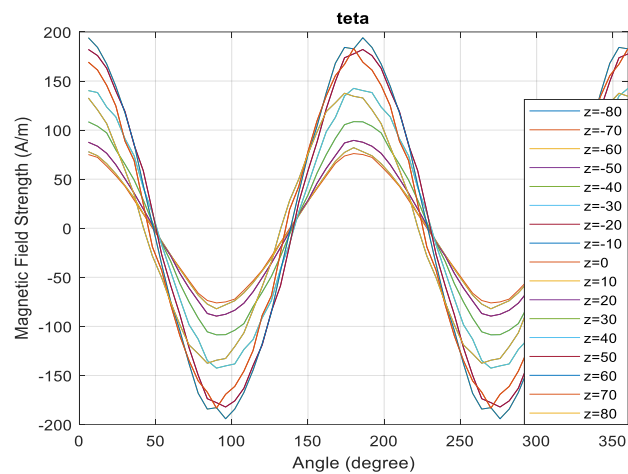
شکل ۴-۲: نمودار گشتاور موتور القایی: الف) با سیم‌پیچی یک طبقه، ب) با سیم‌پیچی دو طبقه

در این بخش به مقایسه اندازه‌ی نشت میدان‌های مغناطیسی در اطراف موتورهای القایی با دو طراحی متفاوت از نظر نحوه‌ی سیم‌پیچی استاتور، پرداخته خواهد شد. به این منظور مطابق آنچه در فصل قبل مطرح شد، برای محاسبه نشت میدان مغناطیسی موتور القایی دوطبقه با استفاده از روش تحلیلی بر مبنای قضیه هم‌ارزی، ابتدا یک سطح بسته‌ی استوانه‌ای دقیقاً مطابق شکل ۳-۱۸ اطراف موتور القایی دوطبقه نیز در نظر گرفته می‌شود. سپس توسط بخش‌هایی به المان‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود. هر سه مولفه‌ی میدان مغناطیسی در تمام

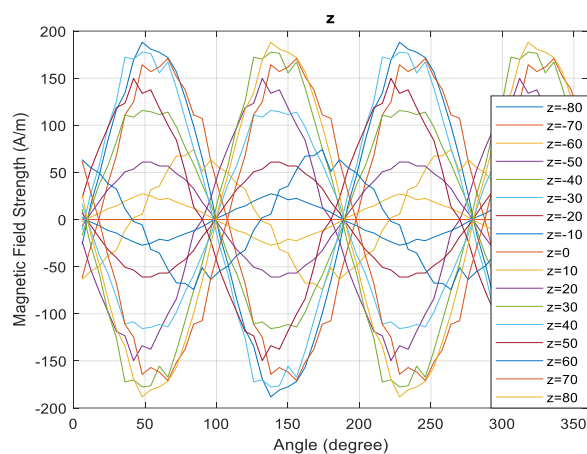
گره‌های این المان‌های کوچک از نرم‌افزار المان محدود استخراج می‌شوند. مشابه حالت قبل سطح جانبی استوانه به هفده قسمت دایره‌ای در راستای محور Z و در سطوح بالا و پایین در راستای r به پنج قسمت مساوی بصورت دایره‌ای تقسیم می‌شود. استخراج مقادیر مولفه‌های میدان مغناطیسی اطراف موتور، بر روی سطح استوانه‌ای مفروض، مطابق توضیحات بیان شده در فصل قبل است. با توجه به تقارن مولفه‌های r و θ و قرینه بودن مولفه Z در نیمه‌ی بالا و پایین استوانه‌ی مفروض نسبت به صفحه $z=0$ و تقارن ذاتی یک دوره تناوب کامل میدان در یک بخش دایره‌ای در اطراف موتور به دلیل توزیع سیم‌پیچی متقارن، این بخش‌ها بصورت ربع یک دوره تناوب در نظر گرفته می‌شوند. یعنی بخش‌های انتخاب شده به صورت ربع دایره تنها برای نیمه بالایی استوانه‌ی مفروض هستند (مطابق آنچه در شکل ۳-۱۸ (ب) نشان داده شد). مقادیر مولفه‌های برای دوره تناوب کامل و نیمه‌ی پایین موتور تکمیل می‌شوند. متقارن‌سازی مولفه‌های میدان مطابق شکل های ۴-۳ تا ۴-۱۱ صورت می‌گیرد.



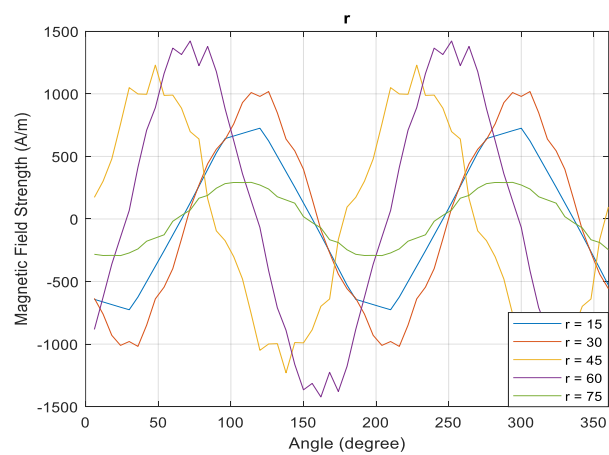
شکل ۴-۳: مولفه شعاعی در بخش‌های انتخاب شده بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور دو طبقه



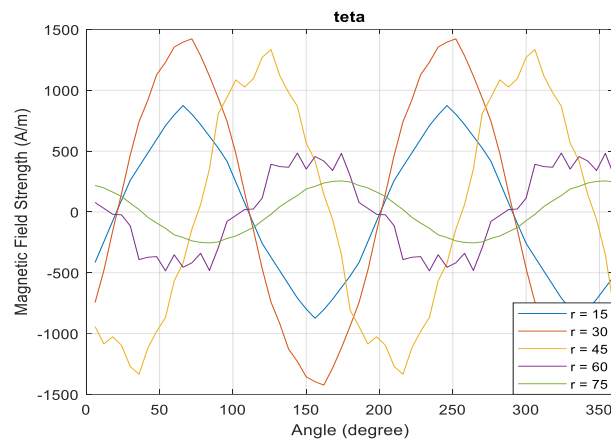
شکل ۴-۴: مولفه مماسی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور دو طبقه



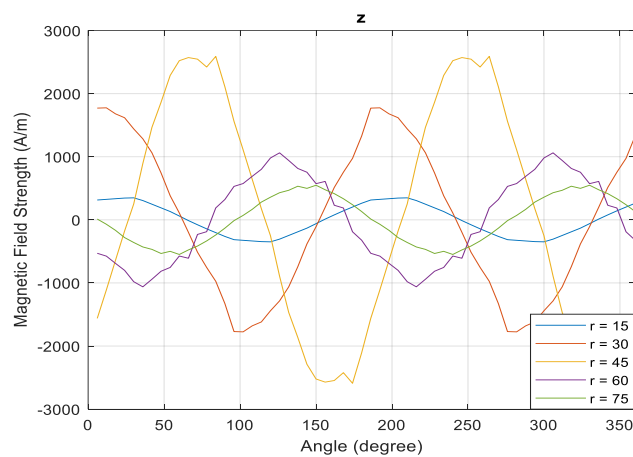
شکل ۴-۵: مولفه عمودی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور دو طبقه



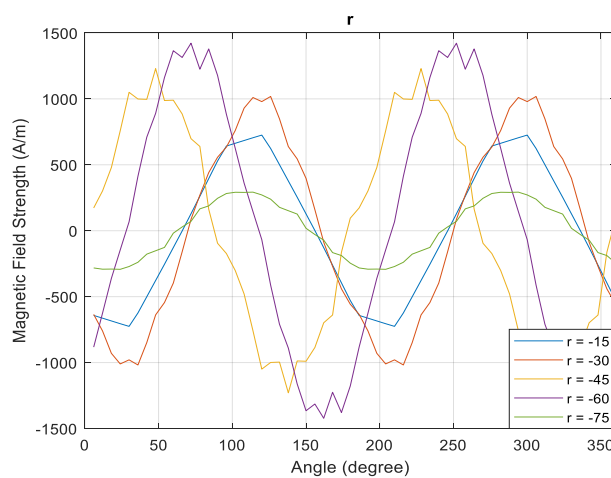
شکل ۴-۶: مولفه شعاعی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور دو طبقه



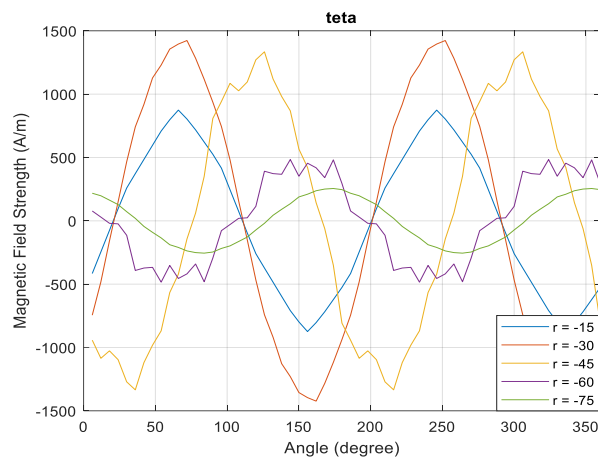
شکل ۴-۷: مولفه مماسی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور دو طبقه



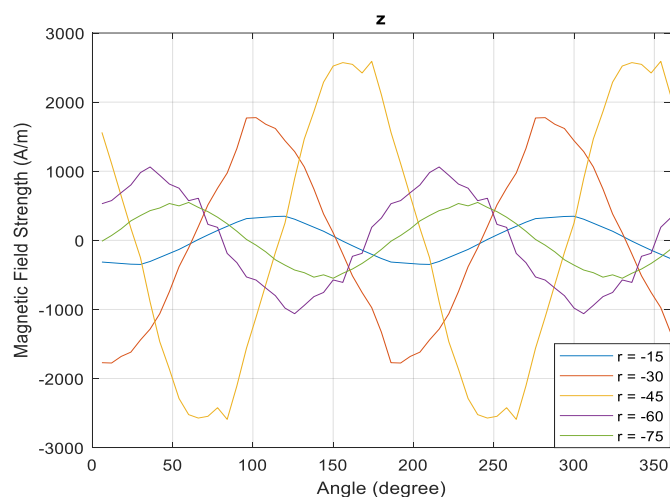
شکل ۴-۸: مولفه عمودی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور دو طبقه



شکل ۴-۹: مولفه شعاعی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور دو طبقه

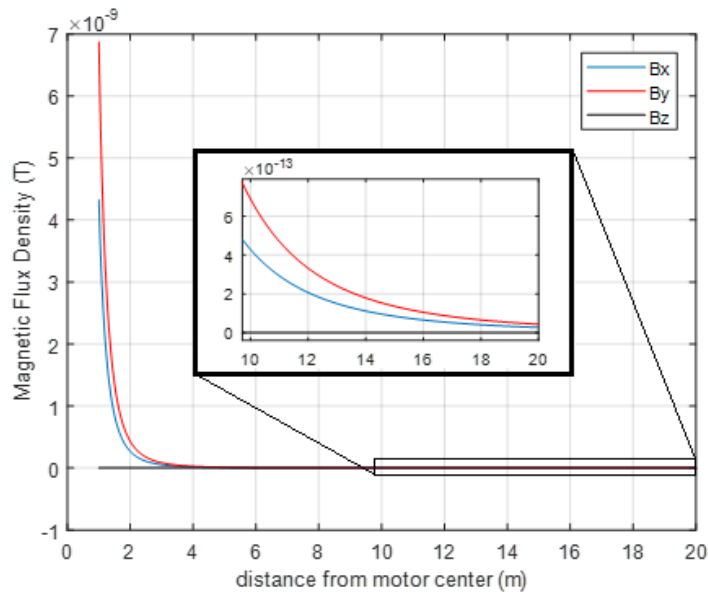


شکل ۴-۱۰: مولفه مماسی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور دو طبقه



شکل ۴-۱۱: مولفه عمودی در بخش‌های انتخاب‌شده بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور دو طبقه

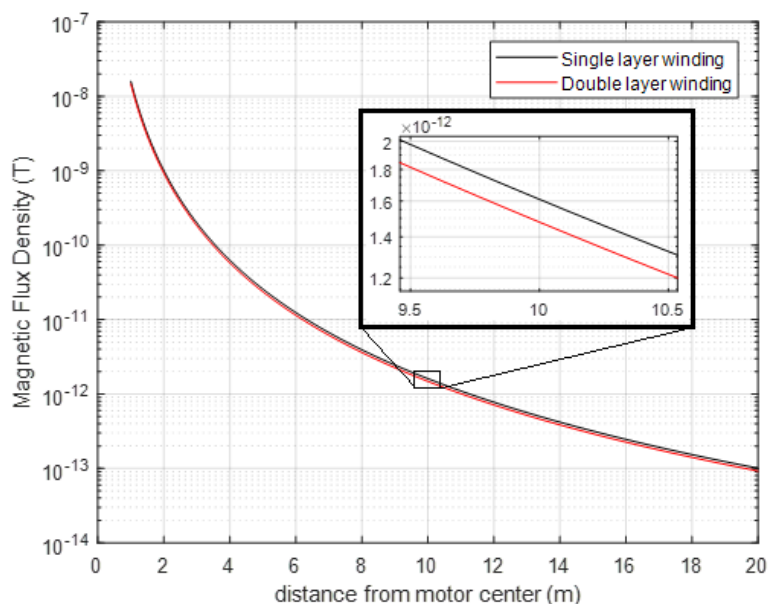
در ادامه با استفاده از کد برنامه جریان‌های سطحی هم‌ارز بر روی سطح استوانه‌ای مفروض محاسبه می‌شوند. در نهایت مولفه‌های میدان مغناطیسی در دستگاه مختصات استوانه‌ای در صفحه‌ی $z=0$ و در راستای شعاعی و در جهات مختلف زاویه θ محاسبه و بررسی می‌شوند. مقادیر هر سه مولفه میدان در صفحه $z=0$ و در امتداد محور x یعنی در دستگاه مختصات استوانه‌ای در راستای محور r و $\theta=0$ از فاصله‌ی یک متری تا فاصله‌ی بیست متری از موتور القایی مورد مطالعه مطابق شکل ۴-۱۲ است.



شکل ۴-۱۲: روند تغییرات میدان اطراف موتور دو طبقه در راستای محور X

به منظور مقایسه صحیح و بررسی اندازه‌ی شدت میدان مغناطیسی منتشرشده اطراف موتور القایی با دو نوع سیم‌پیچی یک طبقه و دو طبقه، مقایسه برای هر دو نوع موتور در راستای محور بین قطب‌ها، که شدت میدان در این راستا ماکزیمم است، صورت پذیرفت. یعنی ابتدا برای هر دو نوع موتور با سیم‌پیچی یک طبقه و دو طبقه در تمام زوایای θ اطراف موتور، اندازه‌ی شدت میدان برآیند محاسبه و بررسی می‌شود. سپس مقادیر میدان در یک لحظه از زمان، در زاویه‌ای که در آن بیشترین اندازه میدان مشاهده می‌شود، برداشت می‌شوند و با یک‌دیگر مورد مقایسه قرار می‌گیرند. راستای ماکزیمم اندازه‌ی میدان، برای موتور یک طبقه همانطور که در فصل قبل بیان شد در زاویه 60° درجه نسبت به محور افقی است. بررسی‌های اطراف موتور با نحوه‌ی سیم‌پیچی دو طبقه نیز نشان می‌دهد، در راستای $\theta=60^\circ$ اندازه میدان برآیند ماکزیمم رخ می‌دهد. مقادیر میدان بر روی این دو راستا از فاصله یک متری تا بیست متری از مرکز موتور برای موتور با سیم‌پیچی یک طبقه و سیم‌پیچی دو طبقه بدون گام کسری در شکل زیر نشان داده شده است. تحلیل نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در موتور با نحوه سیم‌پیچی دو طبقه اندازه‌ی انتشار شدت میدان در راستای ماکزیمم به میزان حدود 10

درصد از موتور با نحوه سیم‌پیچی یک طبقه کمتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، برای تشخیص و ردیابی کارکرد یک موتور القایی نحوه سیم‌پیچی استاتور تاثیر چندانی ندارد.

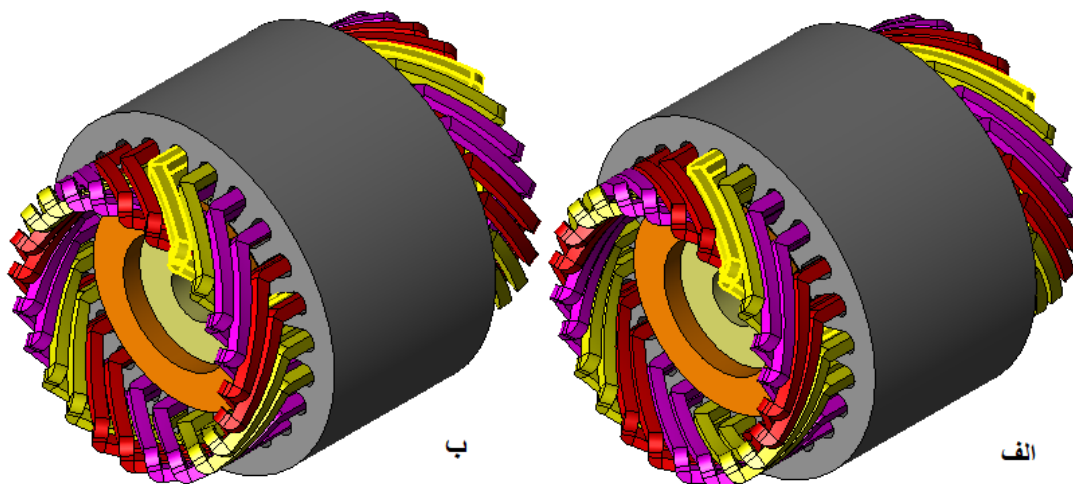


شکل ۴-۱۳: مقایسه اندازه نشت میدان مغناطیسی در موتور با سیم‌پیچی یک طبقه و دو طبقه

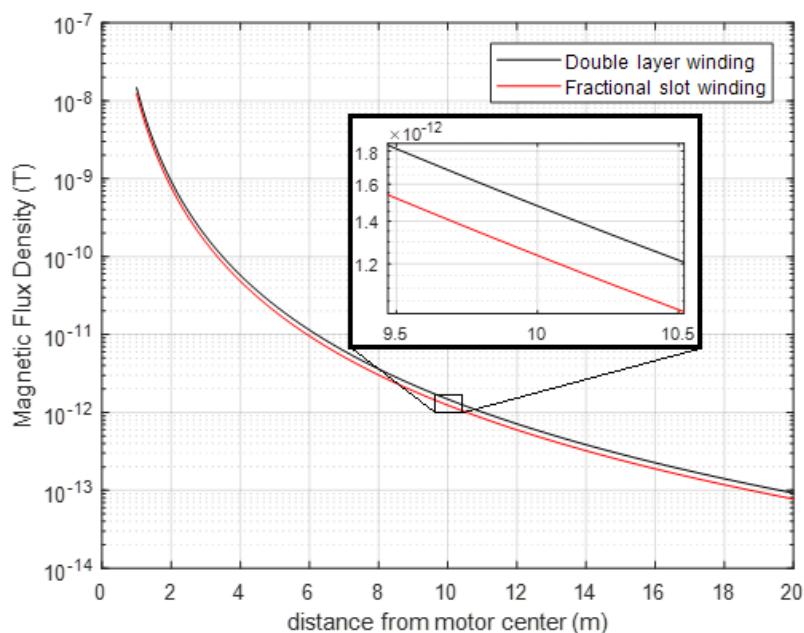
۴-۳ مقایسه سیم‌پیچی دوطبقه بدون گام کسری و با گام کسری

دومین راهکار موثر در کاهش نشت میدان‌های مغناطیسی اطراف موتور القایی، طراحی موتور با سیم‌پیچی دوطبقه با گام کسری است. برای بررسی و تحلیل نشت میدان مغناطیسی اطراف موتور القایی با سیم‌پیچی دو طبقه و با کوتاهی گام کلاف، ابتدا موتور با سیم‌پیچی دو طبقه و با کوتاهی گام در نرم‌افزار المان محدود مطابق شکل ۴-۱۴ (ب) شبیه‌سازی می‌شود. سپس یک سطح بسته‌ی استوانه‌ای اطراف آن در نظر گرفته و این سطح بسته به المان‌های کوچکتری تقسیم می‌شود. مقادیر میدان بر روی سطح مذکور از المان محدود برداشت می‌شود. در نهایت با استفاده کد برنامه بر مبنای قضیه هم‌ارزی در راستاهای مختلف اطراف موتور، انتشار میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای مقایسه موتور با سیم‌پیچی بدون گام کسری و با استفاده از گام کسری، ابتدا در هر دو نوع موتور، راستایی اطراف موتور که مقادیر میدان در آن راستا ماکزیمم است، در نظر گرفته می‌شود. مقادیر میدان در این راستا با استفاده کد برنامه‌نویسی شده بر مبنای قضیه هم‌ارزی

محاسبه می‌شود. مطابق شکل ۴-۱۵ با یکدیگر مقایسه می‌شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهد نشت میدان مغناطیسی اطراف موتور با سیم‌پیچی دو طبقه با گام کسری حدود ۲۰ درصد از موتور با سیم‌پیچی گام کامل کمتر است.

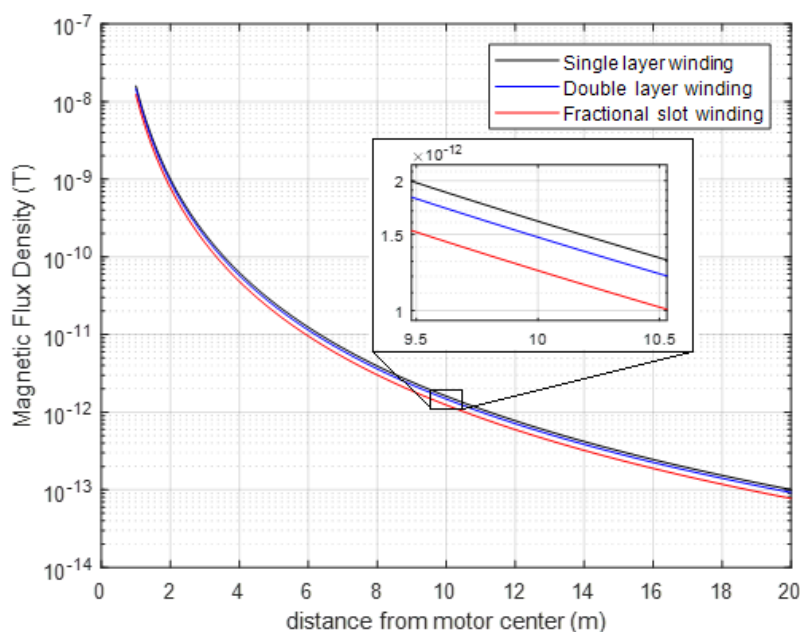


شکل ۴-۱۴: موتور القایی با سیم‌پیچی دو طبقه: الف) با گام کامل، ب) با کوتاهی گام کلاف



شکل ۴-۱۵: مقایسه اندازه میدان در سیم‌پیچی موتور با گام کامل و با کوتاهی گام

این مقایسه برای هر سه طراحی موتور یعنی موتور با سیم‌پیچی یک طبقه و موتور با سیم‌پیچی دو طبقه با گام کامل و موتور با سیم‌پیچی دوطبقه با کوتاهی گام کلاف در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. این بررسی و مقایسه نشان می‌دهد که بهترین طراحی موتور القایی از نظر کمترین میزان انتشار و نشت میدان اطراف آن، طراحی موتور با سیم‌پیچی دو طبقه با کوتاهی گام کلاف است و به میزان حدود ۲۰ درصد نشت میدان اطراف این موتورها کمتر از موتورهای القایی با سیم‌پیچی دو طبقه و با گام کامل است. همچنین نشت میدان در موتورهای القایی با سیم‌پیچی دو طبقه و با گام کامل نیز حدود ۱۰ درصد از نشت میدان در موتورهایی با طراحی سیم‌پیچی بصورت یک طبقه کمتر است. بنابراین بهینه‌ترین حالت از نظر نوع طراحی سیم‌پیچی، موتور القایی دوطبقه با کوتاهی گام کلاف است، که البته این میزان کاهش انتشار میدان، تاثیر چندانی در بحث شناسایی موتورها نمی‌گذارد.



شکل ۴-۱۶: بررسی نشت میدان در سیم‌پیچی یک طبقه و سیم‌پیچی دو طبقه با و بدون کوتاهی گام

۴-۴ بررسی پارامتر D و L با ثابت نگه داشتن حجم داخلی موتور

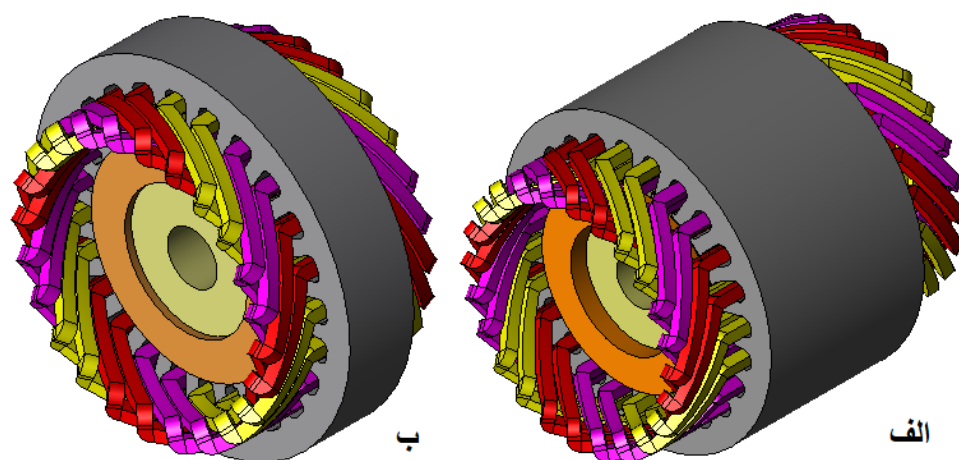
سومین ایده‌ی ارائه شده به منظور بررسی و مقایسه‌ی نشت میدان مغناطیسی اطراف موتورهای القایی، ایده‌ی بررسی نسبت طول محوری به قطر ماشین، با شرط ثابت نگه داشتن حجم داخلی موتور و ثابت ماندن گشتاور موتور در حالت کار پایدار است. با شرط ثابت ماندن حجم موتور، دو حالت متفاوت از نظر طول محوری با موتور مورد مطالعه‌ی اولیه در نظر گرفته می‌شود. این دو طراحی با حالت اولیه موتور القایی مقایسه می‌شود. البته لازم به ذکر است که موتور القایی در حالت اولیه، موتور القایی با سیم‌پیچی دوطبقه با کوتاهی گام کلاف، به دلیل کمترین میزان نشت میدان مغناطیسی در اطراف موتور القایی نسبت به موتور القایی یک طبقه و موتور القایی دو طبقه بدون کوتاهی گام کلاف، در نظر گرفته می‌شود. بنابراین در مقایسه و بررسی‌های این بخش حالت اول، موتور القایی با طراحی سیم‌پیچی دوطبقه با کوتاهی گام کلاف در نظر گرفته می‌شود. حالت دوم، موتور القایی حالت اول با طول محوری نصف در نظر گرفته می‌شود. حالت سوم نیز موتور القایی حالت اول با طول محوری دوبرابر در نظر گرفته می‌شود. که در همه این حالات حجم داخلی موتور یعنی D^2L ثابت باقی می‌ماند. انتشار میدان مغناطیسی موتور القایی با نحوه‌ی سیم‌پیچی دوطبقه استاتور و با کوتاهی گام کلاف به طور مفصل در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفت و مقادیر نشت میدان موجود است. در زیر ابتدا به بررسی انتشار میدان اطراف موتور با طول محوری نصف موتور حالت اول پرداخته می‌شود. سپس نشت میدان موتور القایی با طول محوری دو برابر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۴-۱ موتور القایی با سیم‌پیچی دو طبقه با کوتاهی گام و طول محوری نصف حالت اولیه (حالت

دوم)

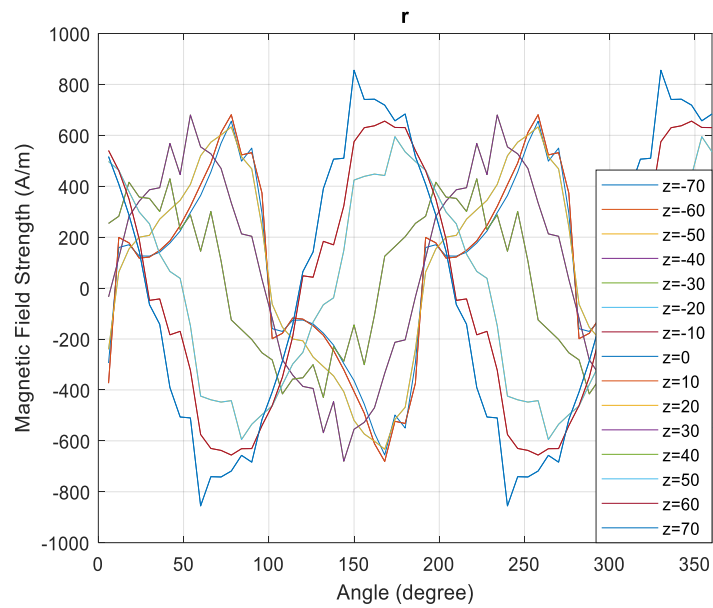
طبق الگوریتم بیان شده بر مبنای قضیه هم‌ارزی در فصل سوم به منظور محاسبه‌ی انتشار میدان مغناطیسی اطراف موتور، ابتدا موتور القایی با سیم‌پیچی دو طبقه و با کوتاهی گام کلاف با طول محوری نصف حالت اولیه یعنی با طول محوری $L=40\text{ mm}$ در نرم‌افزار المان محدود مطابق شکل ۴-۱۷ (ب) شبیه‌سازی و ترسیم

می‌شود. مشابه حالات قبل یک سطح بسته‌ی استوانه‌ای اطراف آن در نظر گرفته می‌شود و توسط بخش‌هایی به المان‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود. مقادیر مولفه‌های شدت میدان مغناطیسی در مرکز این المان‌ها از نرم‌افزار استخراج می‌شود و در کد برنامه قرار می‌گیرد. همانطور که بیان شد در این برنامه‌نویسی که با قضیه هم‌ارزی تعمیم یافته، از روی مقادیر مولفه‌های میدان سطحی، ابتدا جریان‌های سطحی هم‌ارز محاسبه می‌شوند و سپس مطابق جریان‌های سطحی هم‌ارز، انتشار میدان در فواصل دورتر محاسبه می‌شود.

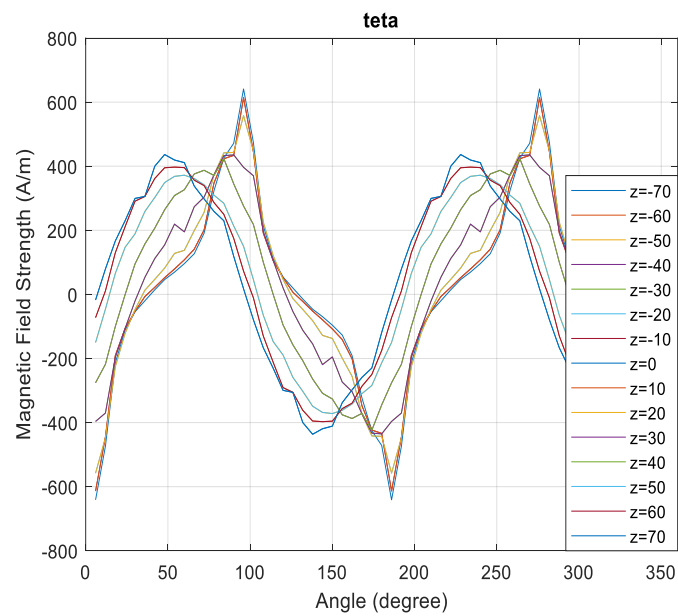


شکل ۴-۱۷: الف) موتور القایی دوطبقه با کوتاهی گام کلاف، ب) موتور حالت (الف) با طول محوری نصف

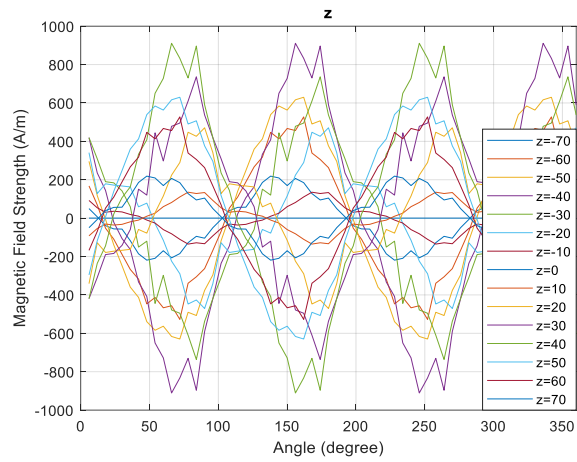
برای این مدل نیز سطح بسته‌ی استوانه‌ای اطراف موتور القایی، در سطح جانبی به پانزده قسمت در راستای Z بصورت ربع دایره و همچنین در سطح بالای استوانه نیز در راستای r به پنج قسمت مساوی بصورت ربع دایره تقسیم شد. استخراج داده‌های میدان تنها در ربع بخش‌های دایره‌ای و تنها در نیمه‌ی بالایی استوانه به دلیل خاصیت چهار قطبی بودن موتور و توزیع سیم‌پیچی متقارن، که اولاً منجر به یک دوره تناوب متقارن برای شدت میدان و دوماً منجر به برابر بودن مولفه r و θ و قرینه بودن مولفه Z میدان، نسبت به صفحه $z=0$ می‌شود، صورت می‌گیرد. متقارن سازی برای دوره تناوب کامل و تمام بخش‌های استوانه‌ی مفروض مطابق شکل ۴-۱۸ تا ۴-۲۶ صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است مرکز هندسی موتور در مبدا مختصات و طول محوری موتور در راستای محور Z است.



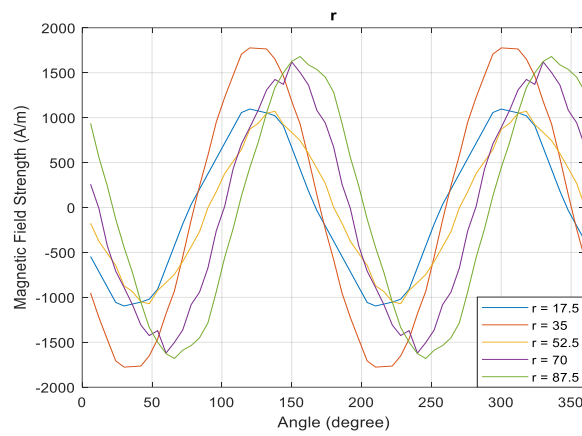
شکل ۴-۱۸ : مولفه شعاعی در بخش‌های منتخب بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور با طول نصف



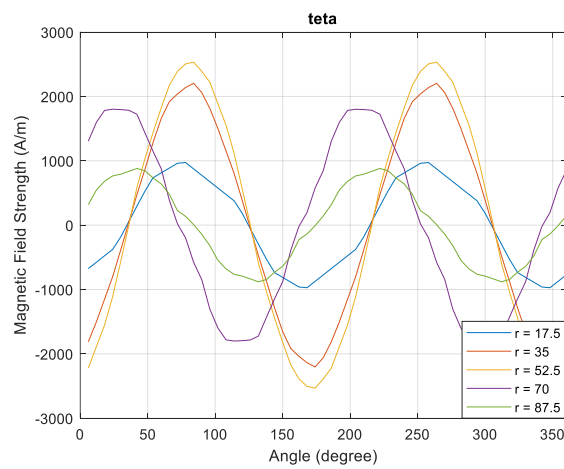
شکل ۴-۱۹ : مولفه محیطی در بخش‌های منتخب بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور با طول نصف



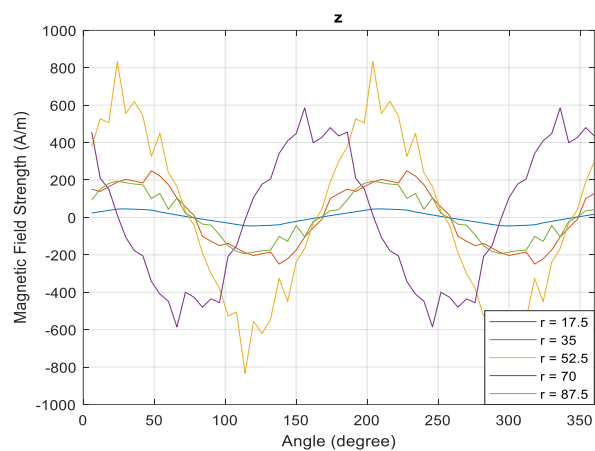
شکل ۴-۲۰: مولفه عمودی در بخش‌های منتخب بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور با طول نصف



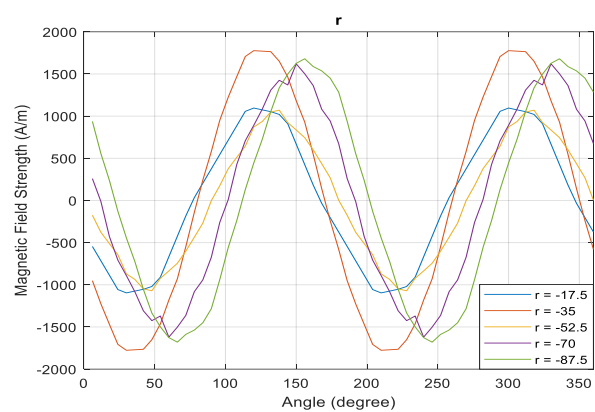
شکل ۴-۲۱: مولفه شعاعی در بخش‌های منتخب بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور با طول نصف



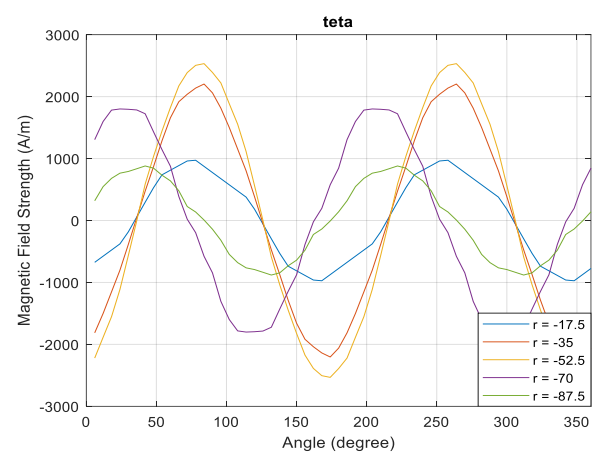
شکل ۴-۲۲: مولفه محیطی در بخش‌های منتخب بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور با طول نصف



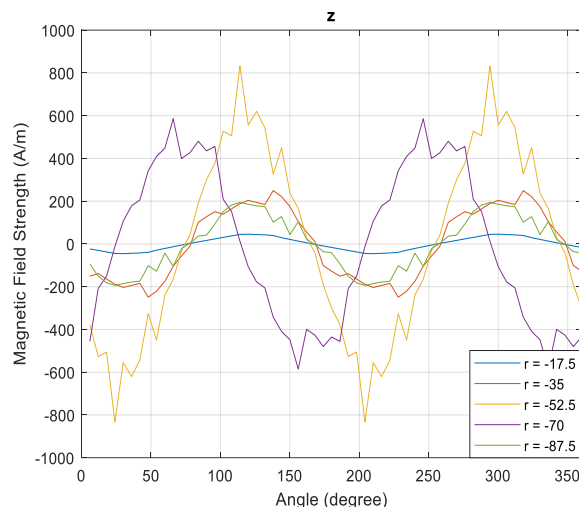
شکل ۴-۲۳: مولفه عمودی در بخش‌های منتخب بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور با طول نصف



شکل ۴-۲۴: مولفه شعاعی در بخش‌های منتخب بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور با طول نصف

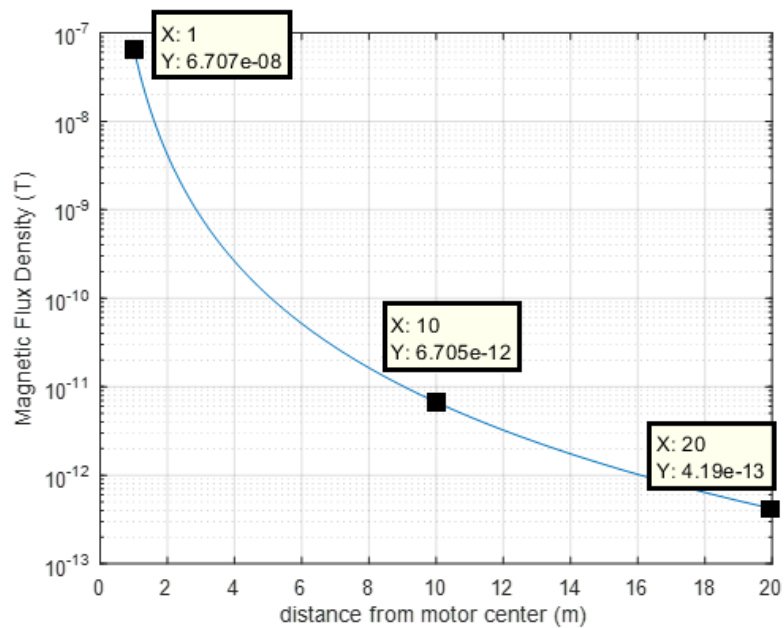


شکل ۴-۲۵: مولفه محیطی در بخش‌های منتخب بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور با طول نصف

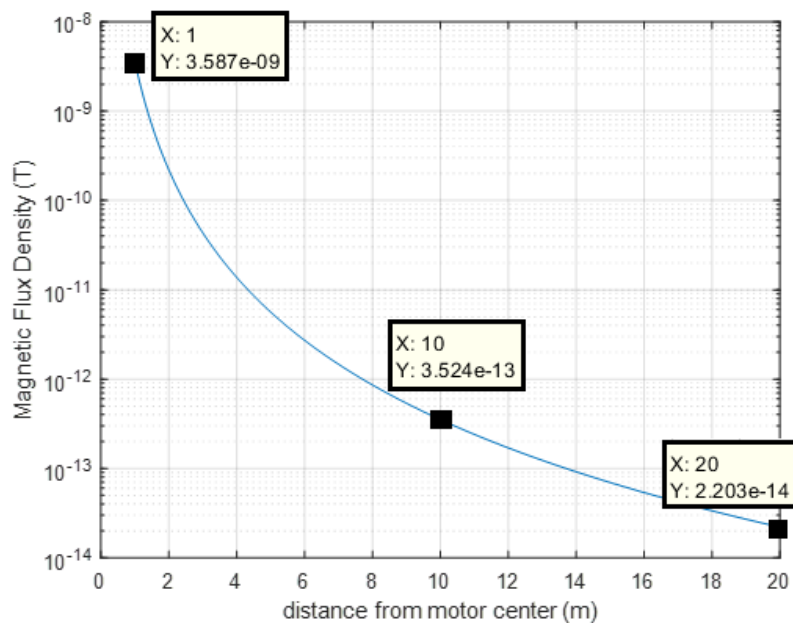


شکل ۴-۲۶: مولفه عمودی در بخش‌های منتخب بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور با طول نصف

در این حالت نیز در صفحه $z=0$ و در امتداد محور r و در تمام جهات θ ، از فاصله یک متری تا بیست متری اطراف موتور، اندازه‌ی میدان برآیند مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. در این طراحی در زاویه $\theta=\pi/5$ رادیان یا ۳۶ درجه بیشترین مقدار اندازه‌ی میدان برآیند مطابق شکل ۴-۲۷ است. در این طراحی نیز مشابه حالات قبل باتوجه به خاصیت چهار قطبی بودن موتور، در امتداد این راستا و همچنین در راستاهایی با اختلاف ۹۰ درجه‌ای با این راستا و امتداد آن نیز اندازه میدان برآیند ماکزیمم است. بنابراین اگر مطابق شکل ۳-۲۹ محور شماره ۱ را $\theta=\pi/5$ در نظر گرفته شود، شکل ۴-۲۷ اندازه میدان برآیند را در راستای محورهای ۱، ۳، ۵ و ۷ نشان می‌دهد. این محورها محور بین قطب‌های موتور هستند. همچنین در محورهای شماره ۲، ۴، ۶ و ۸ که با اختلاف زاویه ۴۵ درجه‌ای با محورهای ۱، ۳، ۵ و ۷ دقیقاً وسط این محورها قرار می‌گیرند، اندازه‌ی میدان برآیند مینیمم است. یعنی راستای محور قطب‌ها هستند. اندازه‌ی میدان برآیند در راستای این محورها نیز در شکل ۴-۲۸ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۷: اندازه میدان برآیند در راستای ماکزیمم میدان اطراف موتور القایی با طول محوری نصف

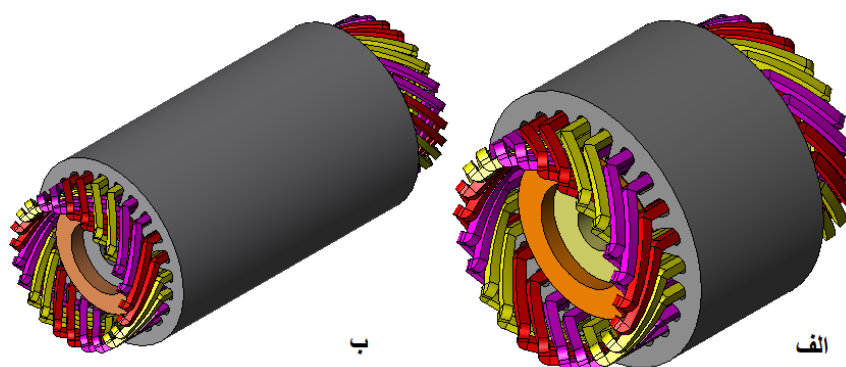


شکل ۴-۲۸: اندازه میدان برآیند در راستای مینیمم میدان اطراف موتور القایی با طول محوری نصف

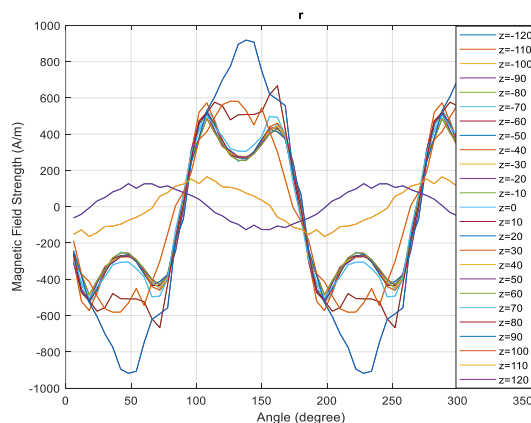
۴-۴-۲ موتور القایی با سیم پیچی دو طبقه با کوتاهی گام و طول محوری دو برابر حالت اولیه (حالت

سوم)

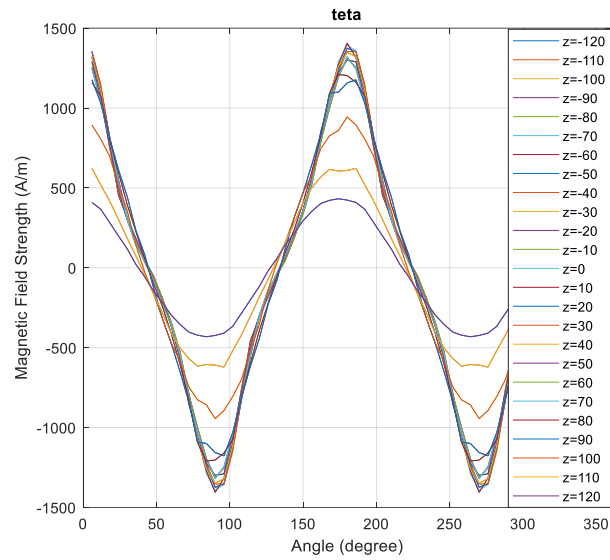
به منظور محاسبه و بررسی انتشار میدان مغناطیسی اطراف موتور القایی حالت اولیه با طول محوری دو برابر، ابتدا موتور با طول محوری $L = 160 \text{ mm}$ در نرم افزار المان محدود مطابق شکل ۴-۲۹ (ب) شبیه سازی می شود و یک سطح بسته ای استوانه ای اطراف آن در نظر گرفته می شود. این سطح بسته به المان های کوچک تری تقسیم می شود و مقادیر میدان بر روی سطح مذکور از المان محدود برداشت می شوند. مطابق آنچه در بخش های قبل توضیح داده شد مقادیر مولفه های شدت میدان در ربع دوره تناوب از نرم افزار برداشت می شوند و مقارن سازی بصورت شکل ۴-۳۰ تا ۴-۳۸ انجام می شود.



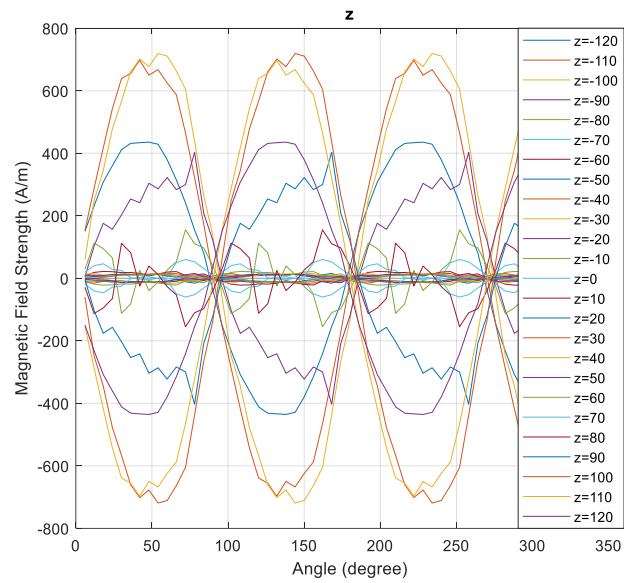
شکل ۴-۲۹: (الف) موتور القایی دو طبقه با کوتاهی گام کلاف، (ب) موتور حالت (الف) با طول محوری دو برابر



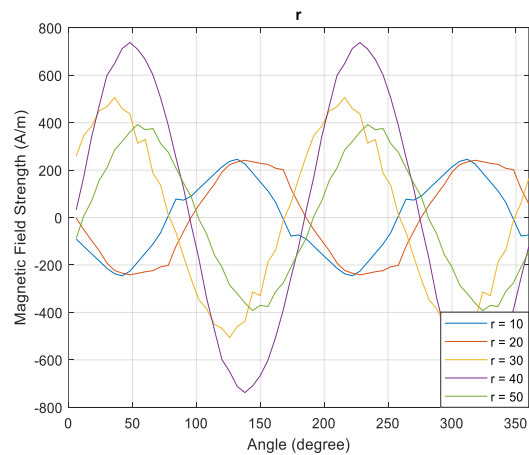
شکل ۴-۳۰: مولفه شعاعی در بخش های منتخب بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور با طول دو برابر



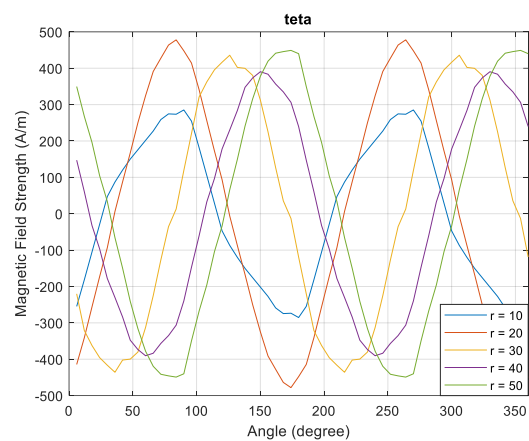
شکل ۳۱-۴: مولفه محیطی در بخش‌های منتخب بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور با طول دو برابر



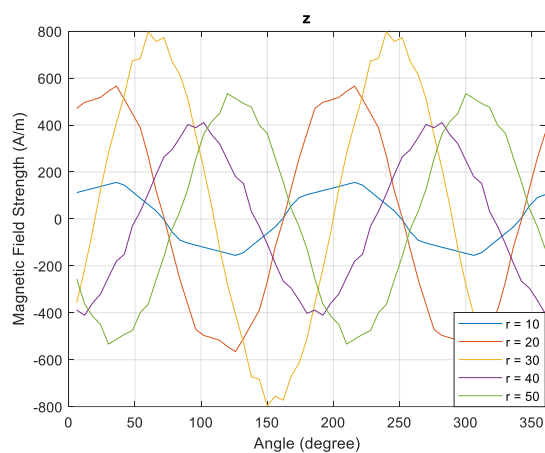
شکل ۳۲-۴: مولفه عمودی در بخش‌های منتخب بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور با طول دو برابر



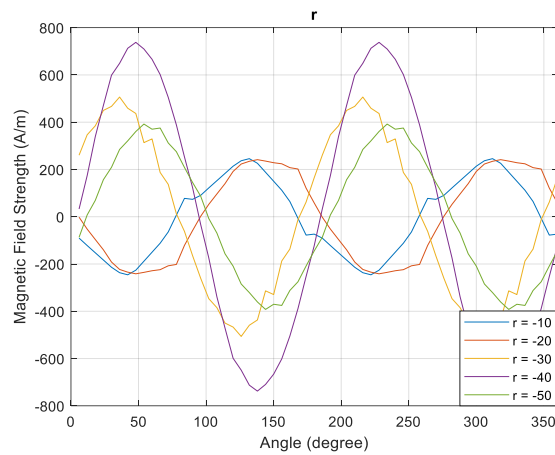
شکل ۴-۳۳: مولفه شعاعی در بخش‌های منتخب بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور با طول دو برابر



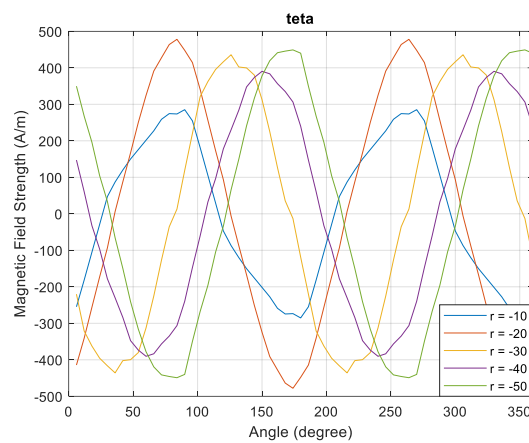
شکل ۴-۳۴: مولفه محیطی در بخش‌های منتخب بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور با طول دو برابر



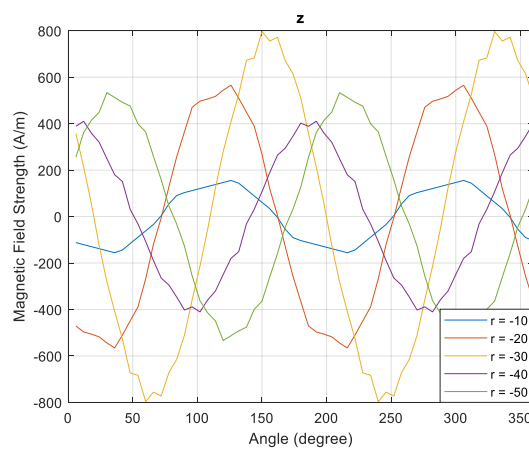
شکل ۴-۳۵: مولفه عمودی در بخش‌های منتخب بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور با طول دو برابر



شکل ۴-۳۶: مولفه شعاعی در بخش‌های منتخب بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور با طول دو برابر

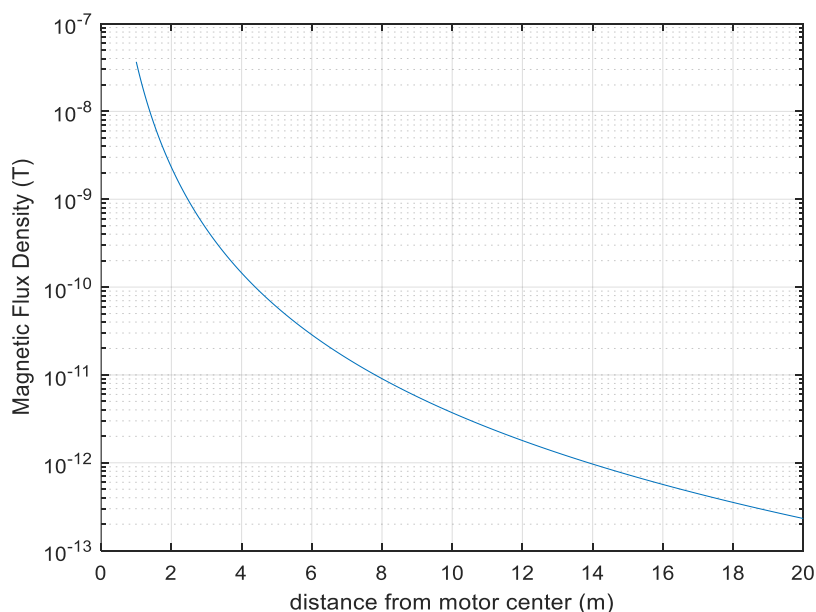


شکل ۴-۳۷: مولفه محیطی در بخش‌های منتخب بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور با طول دو برابر

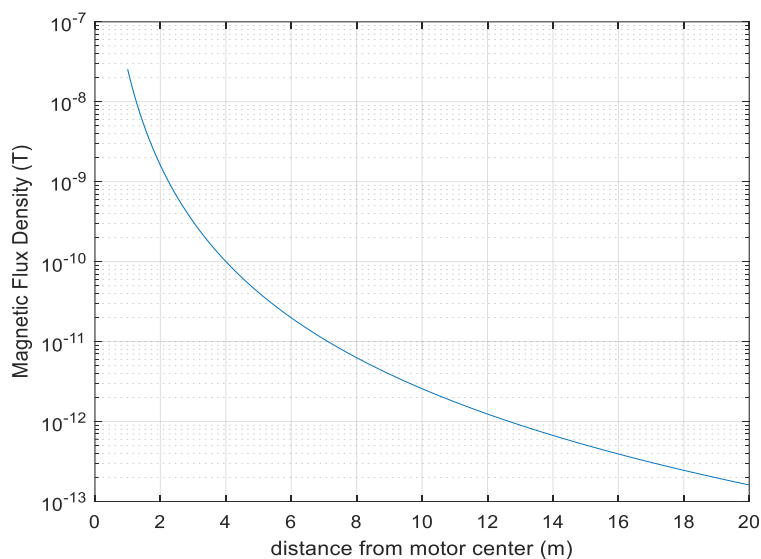


شکل ۴-۳۸: مولفه عمودی در بخش‌های منتخب بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور با طول دو برابر

در ادامه با استفاده کد برنامه بر مبنای قضیه هم‌ارزی در راستاهای مختلف اطراف موتور انتشار میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این حالت نیز در صفحه $z=0$ و در امتداد محور r و در تمام جهات θ ، از فاصله یک متری تا بیست متری اطراف موتور، اندازه‌ی میدان برآیند مورد مقایسه و بررسی قرار می‌گیرد. در این موتور در راستای $\theta=\pi/4.5$ رادیان مقدار اندازه‌ی میدان برآیند ماکزیمم است یعنی مطابق شکل ۳-۲۹ محور شماره ۱ در زاویه ۴۰ درجه است، در نتیجه در محورهای شماره ۳، ۵ و ۷ نیز اندازه‌ی میدان برآیند ماکزیمم است یعنی این محورها راستای بین قطب‌های موتور هستند. شکل ۴-۳۹ اندازه‌ی میدان برآیند را در راستای محورهای ۱، ۳، ۵ و ۷ نشان می‌دهد. بنابراین در محورهای ۲، ۴، ۶ و ۸ که با اختلاف ۴۵ درجه‌ای بین محورهای ۱، ۳، ۵ و ۷ قرار دارند، اندازه‌ی میدان برآیند مینیمم است، که راستای محور قطب‌ها است. اندازه میدان برآیند در راستای این محورها نیز در شکل ۴-۴۰ نشان داده شده است.

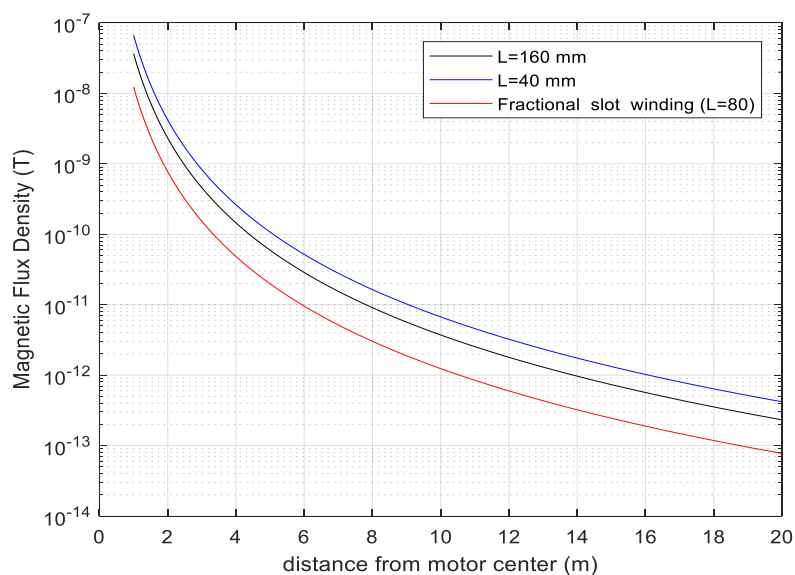


شکل ۴-۳۹: اندازه میدان برآیند در راستای ماکزیمم میدان اطراف موتور القایی با طول محوری دوبرابر



شکل ۴-۴۰: اندازه میدان برآیند در راستای مینیمم میدان اطراف موتور القایی با طول محوری دوبرابر

به منظور مقایسه سه حالت فوق ، ابتدا در هر سه نوع موتور راستایی اطراف موتور که مقادیر میدان در آن راستا ماکزیمم است، در نظر گرفته می شود. مقادیر میدان در این راستاها با استفاده کد برنامه نویسی شده بر مبنای قضیه هم‌ارزی محاسبه می شود و مطابق شکل ۴-۴۱ با یکدیگر مقایسه می شوند.



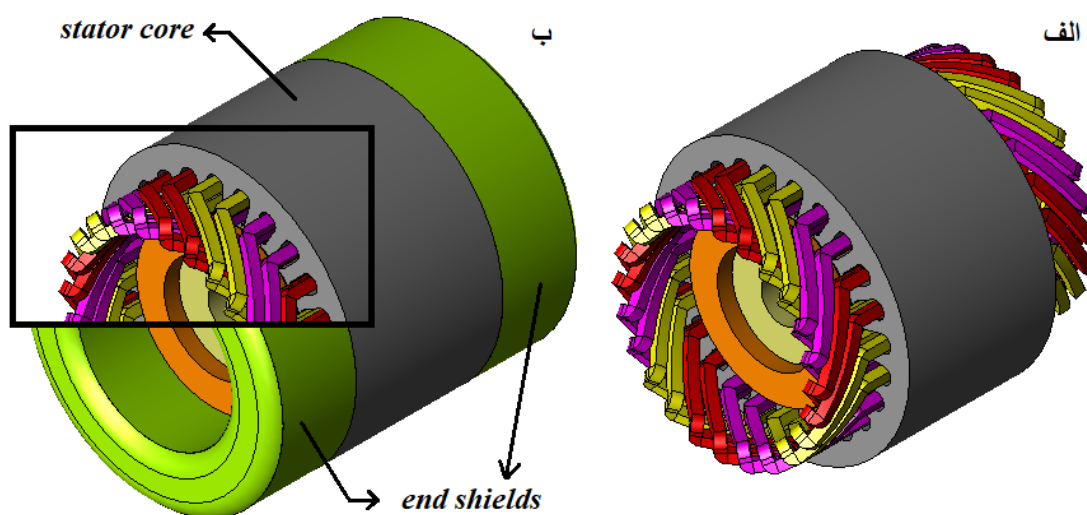
شکل ۴-۴۱: بررسی انتشار میدان با تغییر طول محوری موتور

از شکل فوق می‌توان نتیجه گرفت که موتور با ابعاد متناسب به لحاظ انتشار میدان بهترین و بهینه‌ترین حالت است. یعنی اگر طول موتور کشیده‌تر شود یا طول آن کمتر شود و بصورت دیسکی طراحی شود، در هر دو صورت انتشار میدان مغناطیسی اطراف موتور بیشتر می‌شود.

۴-۵ بررسی تاثیر شیلد انتهایی بر انتشار میدان از موتور القایی

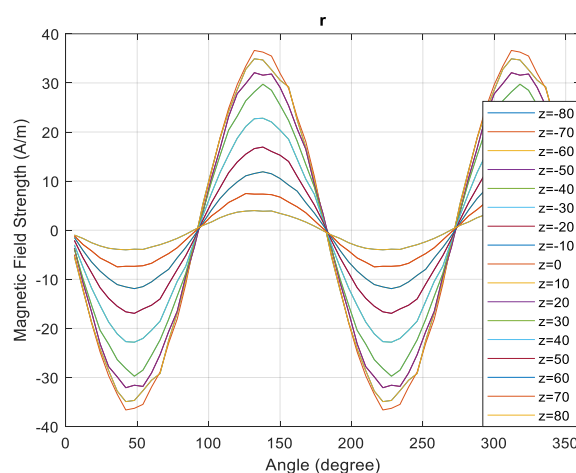
ایده‌ی نهایی که در این پایان‌نامه به منظور کاهش نشت میدان مغناطیسی اطراف موتور القایی مطرح شد و مورد بررسی قرار گرفت، قرار دادن شیلد مغناطیسی بر روی سیم‌پیچی‌های انتهایی موتور القایی مورد مطالعه بود. میدان مغناطیسی اطراف موتور، توسط سیم‌پیچی‌های حامل جریان در موتور تولید می‌شود. قسمتی از میدان مغناطیسی تولید شده در محدوده‌ی هسته‌ی مغناطیسی موتور قرار می‌گیرد و بنابراین شار مغناطیسی قابل‌توجهی از این بخش نشت نمی‌کند. اما در بخش‌های سیم‌پیچی‌های انتهایی موتور، به‌علت آنکه هسته‌ای در اطراف سیم‌پیچی‌های انتهایی موجود نیست، نشت میدان بیشتری وجود دارد. بنابراین قسمت بیشتر میدان نشتی اطراف موتورها به واسطه سیم‌پیچی‌های انتهایی موتور انتشار می‌یابد. جنس پوسته‌ی موتور، چه مغناطیسی و چه غیر مغناطیسی باشد، در هر دو صورت، هم میدان منتشرشده اطراف هسته و هم میدان منتشر شده اطراف سیم‌پیچی‌های انتهایی، از طریق پوسته خارج می‌شوند. بنابراین در هر دو حالت جنس هسته در انتشار میدان، اهمیتی ندارد. همچنین میدان منتشرشده توسط سیم‌پیچی‌های انتهایی بسیار موثرتر خواهد بود. در نتیجه با توجه به این فرضیه‌ی منطقی، یک هسته بصورت یک شیلد تنها بر روی سیم‌پیچی‌های انتهایی موتور قرار می‌گیرد. تا بتواند از انتشار میدان تولید شده توسط سیم‌پیچی‌های انتهایی جلوگیری کند. با توجه به آنکه بهترین طراحی از نظر نوع سیم‌پیچی، موتور القایی با سیم‌پیچی دو طبقه و با کوتاهی گام کلاف بود، بنابراین در این بخش برای بررسی تاثیر شیلد روی سیم‌پیچی‌های انتهایی، یک موتور القایی با سیم‌پیچی دو طبقه و با کوتاهی گام و با شیلد انتهایی روی سیم‌پیچی‌های آن، در نرم‌افزار المان محدود مطابق شکل ۴-۴۲ (ب) ترسیم می‌شود. با توجه به روند محاسبه‌ی میدان مطابق فلوجارت مطرح شده در فصل قبل، ابتدا سطح بسته‌ای اطراف موتور با مشخصات مذکور در نظر گرفته می‌شود و توسط بخش‌هایی به المان‌های کوچک‌تر

تقسیم می‌شود. که همانطور که در بخش‌های قبل توضیح داده شد به دلیل تقارن ذاتی میدان‌ها، این بخش‌ها بصورت یک ربع دوره تناوب کامل تنها در نیمه بالایی موتور در نظر گرفته می‌شود. با توجه به تقارن میدان‌ها برای تمام قسمت‌های سطوح جانبی و بالا و پایین موتور مطابق شکل ۴-۴۳ تا ۴-۵۱ تکمیل و متقارن‌سازی می‌شود. سپس با توجه به کد برنامه از میدان‌های روی سطح بسته مفروض جریان‌های سطحی هم‌ارز محاسبه و سپس میدان‌های مغناطیسی در راستاهای مختلف اطراف موتور مذکور مورد محاسبه و بررسی قرار می‌گیرد.

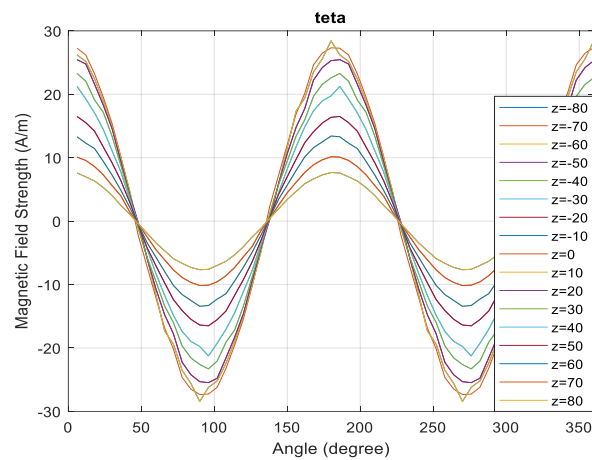


شکل ۴-۴۲: الف) موتور القایی با سیم‌پیچی دوطبقه با کوتاهی گام کلاف، ب) طراحی موتور (الف) با شیلد بر روی

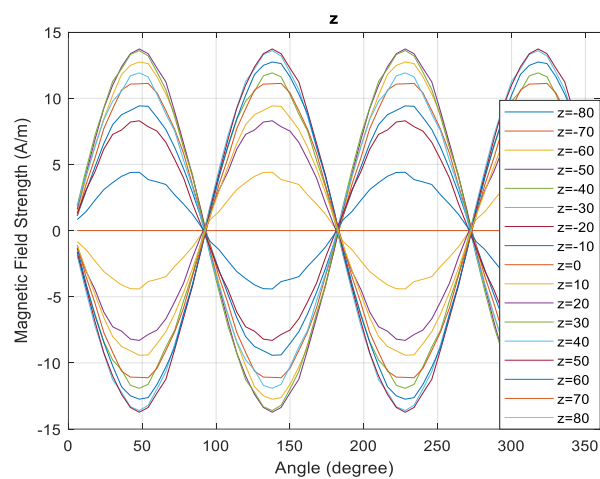
سیم‌پیچی‌های انتهایی موتور



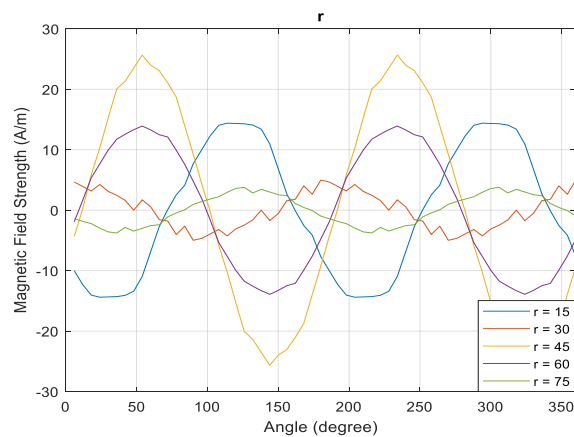
شکل ۴-۴۳: مولفه شعاعی در بخش‌های منتخب بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور با شیلد انتهایی



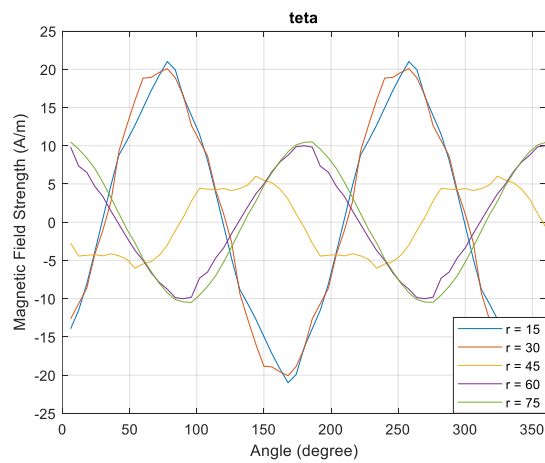
شکل ۴-۴۴: مولفه محیطی در بخش‌های منتخب بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور با شیلد انتهایی



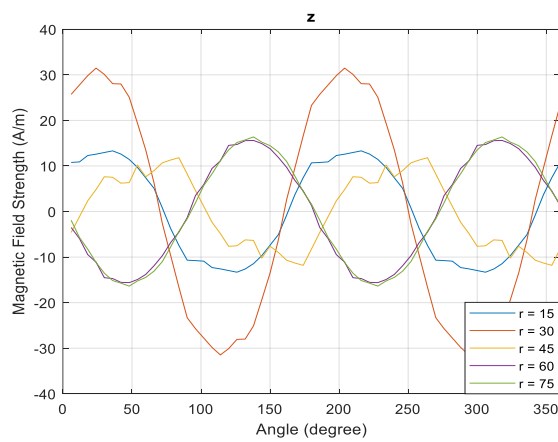
شکل ۴-۴۵: مولفه عمودی در بخش‌های منتخب بر سطح جانبی استوانه اطراف موتور با شیلد انتهایی



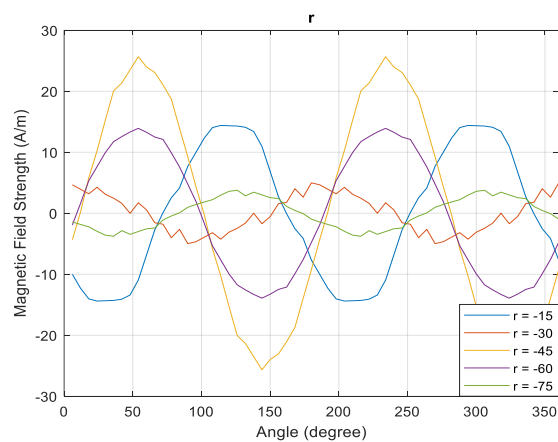
شکل ۴-۴۶: مولفه شعاعی در بخش‌های منتخب بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور با شیلد انتهایی



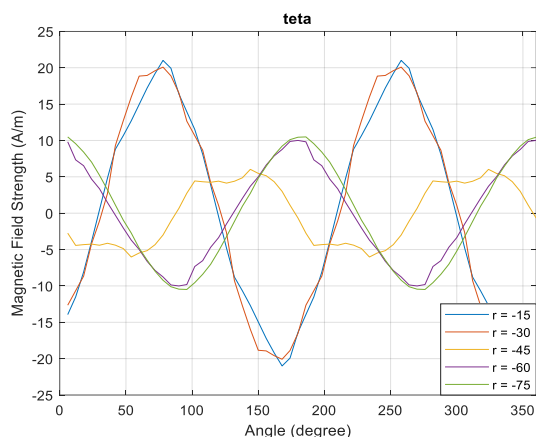
شکل ۴-۴۷: مولفه محیطی در بخش‌های منتخب بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور با شیلد انتهایی



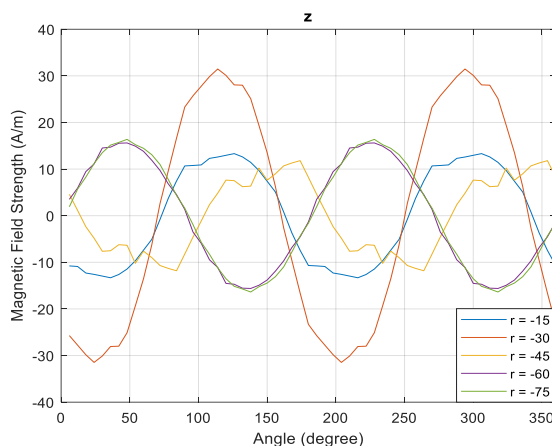
شکل ۴-۴۸: مولفه عمودی در بخش‌های منتخب بر سطح بالایی استوانه اطراف موتور با شیلد انتهایی



شکل ۴-۴۹: مولفه شعاعی در بخش‌های منتخب بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور با شیلد انتهایی



شکل ۴-۵۰: مولفه محیطی در بخش‌های منتخب بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور با شیلد انتهایی

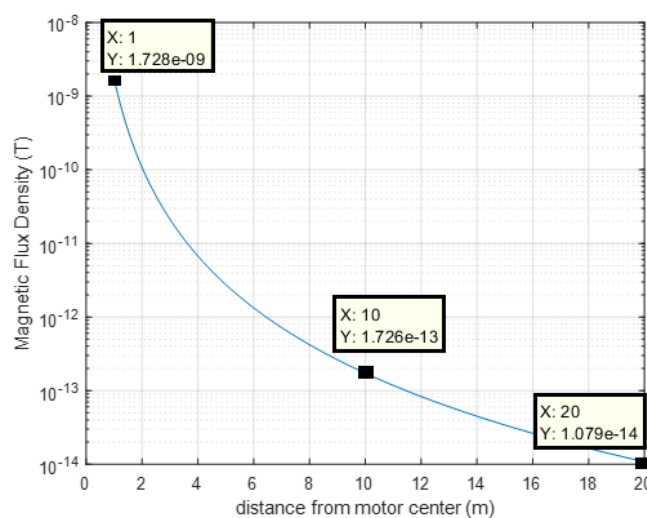


شکل ۴-۵۱: مولفه عمودی در بخش‌های منتخب بر سطح پایینی استوانه اطراف موتور با شیلد انتهایی

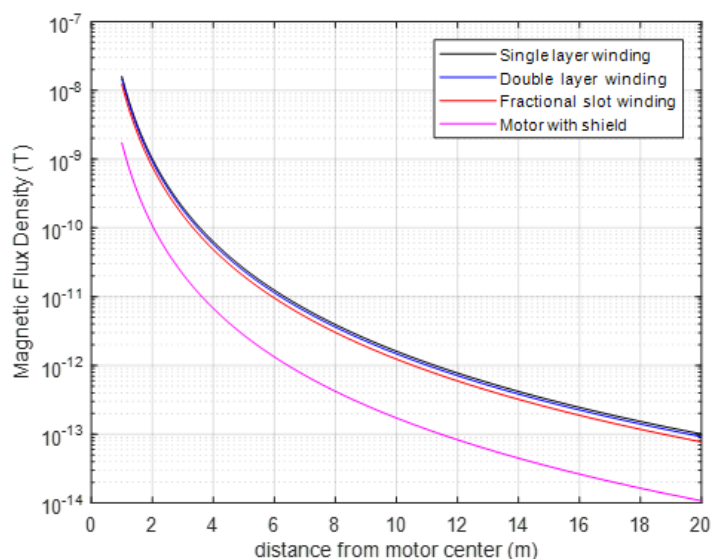
همانطور که از انتشار میدان اطراف موتور القایی با طراحی سیم‌پیچی بصورت دو طبقه و با کوتاهی گام کلاف و قرار دادن شیلد مغناطیسی تنها بر روی سیم‌پیچی‌های انتهایی موتور مذکور در شکل‌های فوق مشخص است، می‌توان نتیجه گرفت، که مقادیر میدان در همین فاصله نزدیک نسبت به حالات بررسی شده‌ی قبلی که موتورها دارای شیلد انتهایی نبودند، بسیار کمتر است. این نتیجه می‌تواند به کاهش بسیار بیشتر میدان مغناطیسی اطراف موتور در فواصل دور نیز منجر شود.

در شکل ۴-۵۲ راستایی اطراف موتور که اندازه‌ی میدان برآیند ماکزیمم است را نشان می‌دهد. این راستا در امتداد زاویه ۴۵ درجه رخ می‌دهد. با تحلیل نتایج بدست آمده و مقایسه آن با اندازه‌ی میدان مغناطیسی در

موتور دوطبقه با کوتاهی گام و موتور دو طبقه بدون کوتاهی گام و موتور یک طبقه مشاهده می‌شود که طراحی موتور با شیلد بر روی سیم‌پیچی‌های انتهایی به نسبت موتور القایی یک طبقه در فاصله بیست متری حدود ۹۰۰ درصد نشت میدان کمتری دارد. شکل ۴-۵۳ مقایسه‌ی اندازه میدان مغناطیسی را در طراحی مختلف ذکر شده نشان می‌دهد.



شکل ۴-۵۲: اندازه میدان برآیند در راستای ماکزیمم میدان اطراف موتور القایی با شیلد انتهایی



شکل ۴-۵۳: مقایسه طراحی‌های متفاوت موتور القایی

از مقایسه شکل ۵۲-۴ و شکل ۱۵-۴ می‌توان نتیجه گرفت اندازه‌ی میدان برآیند، اطراف موتور با شیلد انتهایی در راستای ماکزیمم، به میزان ده برابر از اندازه‌ی میدان برآیند در راستای ماکزیمم اطراف موتور القایی دو طبقه با کوتاهی گام کلاف، کمتر است. با وجود آنکه نشت میدان در راستای ماکزیمم در موتور القایی دو طبقه با کوتاهی گام کلاف، از میدان نشتی موتور القایی اولیه (دارای سیم پیچی یک طبقه) به میزان ۳۰ درصد کمتر است، در نتیجه میدان منتشر شده اطراف موتور القایی با شیلد انتهایی بیش از ده برابر از موتور القایی اولیه کمتر است. این میزان کاهش میدان مغناطیسی، می‌تواند در زمینه‌ی ردیابی موتورهای القایی بسیار موثر واقع شود. شکل ۵۳-۴ نیز تایید همین نتیجه است. در واقع نشان می‌دهد که تغییر در نوع سیم‌پیچی موتورهای تأثیر چندانی در میزان انتشار میدان‌های نشتی و بحث شناسایی موتورهای ندارد. بنابراین تنها راهکار بسیار موثر در ارزیابی‌های انجام شده، افزودن شیلد مغناطیسی بر روی سیم‌پیچی‌های انتهایی موتور است.

فصل پنجم : جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱ جمع بندی

در این پایان نامه ابتدا یک رابطه‌ی تحلیلی برای محاسبه میدان مغناطیسی منتشرشده اطراف منبع تولید میدان مغناطیسی، بر مبنای قضیه هم‌ارزی ارائه شد. رابطه تحلیلی ارائه شده بر مبنای قضیه هم‌ارزی، میدان در فواصل دور را بر اساس جریان‌های سطحی هم‌ارز محاسبه می‌کند. جریان‌های سطحی هم‌ارز از روی میدان‌های روی سطح بسته نزدیک منبع محاسبه می‌شوند. روش ارائه شده برای محاسبه میدان مغناطیسی در فواصل دور، با یک مدل با توزیع جریان ساده، مانند یک سیم محدود حامل جریان، صحت‌سنجی شد که دارای خطای زیر ۵ درصد بود. سپس یک موتور القایی 1 hp، چهار قطبی و با سیم‌پیچی یک لایه در نظر گرفته شد. به منظور شبیه‌سازی موتور در نرم‌افزار المان محدود، درپوش‌های موتور باز شد و قسمت‌های روتور و استاتور دمونتاز شدند. اطلاعات ابعادی موتور به وسیله اندازه‌گیری، بدست آمد. با شبیه‌سازی این موتور در نرم‌افزار المان محدود میدان مغناطیسی اطراف موتور، در فواصل نزدیک استخراج شد. سپس با رابطه تحلیلی ارائه شده بر مبنای قضیه هم‌ارزی، انتشار میدان مغناطیسی اطراف موتور در فواصل دور، برآورد و محاسبه شد. در نهایت برای کاهش انتشار میدان مغناطیسی اطراف موتور در فواصل دور، راهکارهایی ارائه شد. راهکارهایی از جمله نحوه سیم‌پیچی استاتور بصورت یک طبقه و دوطبقه، تاثیر کوتاهی گام کلاف، تاثیر نسبت طول محوری به قطر ماشین و در انتها تاثیر افزودن شیلد مغناطیسی بر روی سیم‌پیچی‌های انتهایی موتور القایی، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

۵-۲ نتیجه‌گیری

از نتایج مهم این پایان نامه می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

روش‌های آنالیز عددی مانند روش‌های المان محدود در تحلیل میدان‌ها در فواصل دور نمی‌تواند موثر واقع شود. دلیل این موضوع زمان محاسبات بسیار بالا و دقت پایین این روش‌ها است.

اثرات سه بعدی میدان نشتی سیم‌پیچی‌های انتهایی موتور را نمی‌توان نادیده گرفت و تحلیل دو بعدی انجام داد. به دلیل آنکه احتمالاً بیشترین تاثیر در اندازه میدان نشتی اطراف موتورهای القایی را، سیم‌پیچی‌های

انتهایی ایفا می‌کنند. زیرا در اطراف سیم‌پیچی‌هایی محصور شده با هسته موتور، مسیر شار مغناطیسی از طریق هسته بسته می‌شود و میدان کمتری نسبت به قسمت‌های سیم‌پیچی‌هایی انتهایی نشت می‌یابد.

برای محاسبه و برآورد میدان مغناطیسی منتشرشده اطراف موتورهای القایی نمی‌توان کوئل‌های استاتور ماشین را با یک مدل ساده، نظیر یک دوقطبی مغناطیسی مدل کرد. زیرا در اینصورت اگر از تقریب زیاد این مدل برای سیم‌پیچی‌های استاتور نیز صرف‌نظر شود، بازهم میدان‌های نشتی روتور نادیده گرفته می‌شود. که با تقریب بسیار زیادی همراه است و قابل توجیه و پذیرش نیست.

میدان مغناطیسی نشتی بررسی شده برای موتور القایی مورد مطالعه در این پایان‌نامه، در فاصله بیست متری دارای دامنه‌ی 10^{-13} است که با حسگرهای تشخیص میدان، قابل ردیابی است.

راهکارهایی مثل تغییر در تعداد طبقات سیم‌پیچی استاتور، گام قطب کامل یا کوتاهی گام کلاف، تاثیر قابل توجهی در میزان انتشار میدان مغناطیسی اطراف موتور القایی ندارد. بنابراین نمی‌تواند در بحث شناسایی این موتورها موثر واقع شود.

تغییر پارامتر طول محوری موتور القایی، یعنی موتور چه بصورت دیسکی و چه بصورت کشیده‌تر طراحی شود، نتیجه منفی در کاهش انتشار میدان مغناطیسی اطراف موتور القایی می‌گذارد. در نتیجه بهترین حالت طراحی موتور با ابعاد متناسب به لحاظ انتشار میدان است.

از میان تمام ایده‌های ارائه شده در این پایان‌نامه، تنها ایده‌ای که تاثیر قابل توجه و چشمگیری در کاهش انتشار میدان نشتی اطراف موتور داشت، پوشاندن سیم‌پیچ‌های انتهایی بوسیله شیلد مغناطیسی بود. که این روش نشت میدان مغناطیسی اطراف موتور القایی را تا بیش از ده برابر کاهش داد.

۵-۳ پیشنهاد ها

با توجه به روش تحلیلی این پایان‌نامه می‌توان میدان مغناطیسی را در اطراف هر منبع تولید میدان، محاسبه کرد. به همین خاطر پیشنهاد می‌شود ساختار موتورهای الکتریکی دیگر نیز بررسی شود. تا بتوان از لحاظ میزان انتشار میدان، ساختارهای متفاوت را مورد مقایسه قرار داد.

در این پایان نامه برای محاسبه و برآورد میدان مغناطیسی در فواصل دور، که بر مبنای قضیه هم‌ارزی تعمیم یافت، برای محاسبه میدان‌های مغناطیسی بر روی سطح بسته نزدیک موتور، از شبیه‌سازی المان محدود استفاده شد. که قطعا در همان فاصله‌ی نزدیک نیز دارای خطای محاسباتی است و می‌تواند در نتایج تاثیر منفی داشته باشد. پیشنهاد می‌شود برای دستیابی به مقادیر دقیق میدان، آزمایش عملی صورت گیرد و بوسیله‌ی حسگرها مقادیر میدان برداشت شود، تا میزان انتشار میدان محاسبه شده توسط رابطه تحلیلی در فواصل دور با مقادیر واقعی انتشار میدان، مطابقت داده شود.

در این پایان نامه از بررسی تاثیر پوسته‌ی موتور القایی صرف نظر شد. به دلیل آنکه این پژوهش دارای دو هدف اصلی، شامل دستیابی به یک رابطه تحلیلی برای برآورد میدان در فواصل دور و دیگری دستیابی به طراحی بهینه با بیشترین کاهش میدان مغناطیسی اطراف موتور بود. برای رسیدن به این اهداف نیاز به طراحی پوسته موتور نبود. پیشنهاد می‌شود تاثیر جنس پوسته موتور بر انتشار میدان اطراف مورد بررسی قرار بگیرد و نسبت میدان مغناطیسی ناشی به پوسته از جنس چدن و آلومینیوم محاسبه شود.

همچنین تاثیر سطوح حفاظتی موتورهای الکتریکی یا در اصطلاح فنی IP، می‌تواند در انتشار میدان تاثیرگذار باشد و می‌تواند مورد بررسی قرار بگیرد.

- [1] Lenz, J. E. (1990). **A review of magnetic sensors**. Proceedings of the IEEE, 78(6), 973-989.
- [2] Mahdi, A. E., Panina, L., & Mapps, D. (2003). **Some new horizons in magnetic sensing: high-Tc SQUIDs, GMR and GMI materials**. Sensors and Actuators A: physical, 105(3), 271-285.
- [3] Ripka, P. (Ed.). (2021). **Magnetic sensors and magnetometers**. Artech house.
- [4] Clarke, J., & Braginski, A. I. (Eds.). (2006). **The SQUID handbook: Applications of SQUIDs and SQUID systems**. John Wiley & Sons.
- [5] Romani, G. L., Williamson, S. J., & Kaufman, L. (1982). **Biomagnetic instrumentation. Review of Scientific Instruments**, 53(12), 1815-1845.
- [6] Skibinski, G. L., Kerkman, R. J., & Schlegel, D. (1999). **EMI emissions of modern PWM AC drives**. IEEE Industry Applications Magazine, 5(6), 47-80.
- [7] Antonini, G., Cristina, S., & Orlandi, A. (1999). **A prediction model for electromagnetic interferences radiated by an industrial power drive system**. IEEE Transactions on Industry Applications, 35(4), 870-876.
- [8] Della Torre, F., & Morando, A. P. (2009). **Study on far-field radiation from three-phase induction machines**. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 51(4), 928-936.
- [9] Kovac, D., & Kovacova, I. (2011). **The magnetic fields of electric motors and their EMC**. Advances in Electrical and Electronic Engineering, 7(1-2), 183-186.
- [10] Habib, B. (2007). **Estimation of the electromagnetic radiation emitted from a small centrifuge plant**. Science & Global Security, 15(1), 31-47.
- [11] Seleznyova, K., Strugatsky, M., & Kliava, J. (2016). **Modelling the magnetic dipole**. European Journal of Physics, 37(2), 025203.
- [12] Range, S. K. (2004). **Gravity Probe B examining Einstein's spacetime with gyroscopes: An educator's guide**. National Aeronautics and Space Administration, Tech. Rep., Oct.
- [13] Le Coat, G., Foggia, A., Bongiraud, J., & Le Thiec, P. (1999). **Electromagnetic signature of induction machines**. IEEE Transactions on Energy Conversion, 14(3), 628-632.
- [14] Koroglu, S., Adam, A. A., Umurkan, N., & Gulez, K. (2009). **Leakage magnetic flux density in the vicinity of induction motor during operation**. Electrical Engineering, 91(1), 15-21.
- [15] Ciarlet, P. G. (2002). **The finite element method for elliptic problems**. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [16] Humphries, Stanley (2010). **Finite-element Electrostatic Solutions**. Journal of applied mechanics 8.4: 169-175.
- [17] Salon, S. J. (1995). **Finite element analysis of electrical machines** (Vol. 101). Boston: Kluwer academic publishers.

- [18] balanis, ca, & Orlandi, A. (2012). **Advanced engineering electromagnetics** (2012)[book review]. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 4(4), 47-47.
- [19] harrington RF.(1961 Jun) **Antennas and propagation society,microwave theory and techniques society.time harmonic electromagnetic field**. New York: Mcgraw-Hill.
- [20] Cheng, D. K. (1989). **Field and wave electromagnetics**. Pearson Education India.

Abstract:

Induction motor is the most common AC motor in industrial applications where the rotor current is supplied by electromagnetic induction from the magnetic field of the stator windings. Simple design, stable performance, durable and inexpensive structure, efficiency and low maintenance costs are among basic advantages of induction motors, especially squirrel cage and therefore these motors have a special place in the industry. On the other hand, in some applications of these motors can be mentioned to the military industry and secret equipment and facilities. Leakage of magnetic field in the space around electric motors and tracking this field with sensors and special tools is one of the main methods of detecting hidden equipment. Therefore, access to suitable method for evaluating and estimating the leakage of magnetic fields around the motor and also proper design to reduce the leakage field of the rotor is very important. Finite element methods are one of the most common tools for calculating and analyzing magnetic field in electric machines. However, since these methods are based on division problem space into very small components, field analysis at very long distances from the motor requires problem solving with a large number elements and is faced with the problem of high calculations volume. On the other hand, analytical methods are not accurate enough to model the relatively complex current distribution in the windings of electric machines and they make a lot of mistakes, especially when calculating the field away from the motor. In this dissertation, a new combined method using finite element model and equivalence theorem is used to calculate the magnetic field at very long distances from the motor. This method does not have the calculations time constraint of the finite element method and the problem of high approximation in the analytical method. And can be used for all types of electric motors. Using the proposed method, different components of the magnetic field at distance away from a 1 hp cage rotor induction motor are calculated and the effect of different design parameters on the motor leakage field is investigated. According to studies, stator end windings have the greatest impact on the motor leakage field, therefore a solution to control the field of this part of the motor has been considered. Using the solutions proposed in this dissertation, the leakage field of the induction motor can be reduced up to ten times.

Keywords: induction motor, magnetic field leakage, detection and tracking, equivalence theorem, finite element method.



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical and robotics Engineering

MSc Thesis in Power Engineering

Evaluation of magnetic field leakage in induction motors

By : Mahsa Entezari

Supervisor:
Dr. Amir Hassannia

Advisor:
Dr. Valiolah Mashayekhi

December 2021