





دانشکده مهندسی برق و رباتیک

رشته مهندسی برق گرایش الکترونیک قدرت و ماشین های الکتریکی

پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی مناسب ساختار سیم پیچ استاتور برای کاهش نویز صوتی ماشین مغناطیس دائم مدولار

نگارنده: امیرحسین آقا حسینی

استاد راهنما:

دکتر: امیر حسن نیا خیبری

بهمن ۱۴۰۰

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می نمایم به

روح پدر عزیزم

و مادی که بودنش تاج افتخاری است بر سرم

و همسر مهربانم که در این راه مشوق بنده بودند.

شکر و قدردانی

باسپاس از آفریدگار مهربان، که اسباب محارث این پایان نامه به قدرت او فراهم آمد. در اینجا بر خود لازم می دانم که از زحمات دلسوزانه استاد ارجمند، جناب آقای دکتر

امیر حسن نیاکمال شکر و قدردانی را داشته باشم.

امیر حسین آقا حسینی

بهمن ۱۴۰۰

تعهد نامه

اینجانب **امیرحسین آقاحسینی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق / الکترونیک قدرت و ماشین های الکتریکی دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی مناسب ساختار سیم پیچ استاتور برای کاهش نویز صوتی ماشین مغناطیس دائم تحت راهنمایی دکتر **امیر حسن نیا** خیبری متعهد می شوم:

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

نویز صوتی اثر یک سطح مرتعش است، بنابراین نویز صوتی و ارتعاش دو پدیده به هم پیوند یافته در ماشین‌های الکتریکی بوده و منابع هر دو یکی می‌باشد.

منبع نویز صوتی در ماشین‌های الکتریکی را می‌توان به سه دسته آیرودینامیکی، مکانیکی و الکترومغناطیسی تقسیم بندی نمود، که با مطالعه بسیار دقیق به جرات می‌توان گفت، که منشا ارتعاش و نویز صوتی در ماشین‌های الکتریکی کوچک تا متوسط منبع الکترومغناطیسی و در ماشین‌های بزرگ منبع مکانیکی می‌باشد. گشتاور کجینگ (دندانه ای)، رپل گشتاور و نیروهای شعاعی مغناطیسی از منابع اصلی الکترومغناطیسی محسوب می‌شوند.

علم بر اینکه در چه فرکانس‌هایی مولفه‌های مختلف نیروهای شعاعی تولید می‌گردند، بسیار مهم است، اگر یکی از این فرکانس‌ها با فرکانس طبیعی ماشین برابر یا نزدیک آن شود، تشدید رخ داده و ارتعاش و نویز افزایش می‌یابد.

تحقیقات نشان داده با تغییر در ساختار سیم پیچ، نیروهای شعاعی و مماسی بر روی سطح دندانه‌های استاتور نیز تغییر خواهد کرد، بنابراین می‌توان به یک مقدار بهینه از نویز صوتی موتور دست یافت و تا مقدار مطلوب آن را کاهش داد.

مشکل اساسی ماشین‌های مغناطیس دائم اتصال آهنرباهای دائم بر روی رتور می‌باشد، بنابراین برای سرعت‌های بالا مناسب نمی‌باشد، به همین دلیل این نوع از ماشین‌ها با سرعت پایین کاربرد بیشتری دارند.

در طراحی ماشین برای پایین آوردن سرعت آن دو راهکار کلی می‌توان انجام داد: ۱- کاهش فرکانس: که با تغییر برخی پارامترهای طراحی بعضاً منجر به افزایش تلفات و همچنین حجم ماشین می‌شود. ۲- افزایش تعداد قطب: که در اینجا نیز با مشکل چیدمان آهنرباهای دائم، افزایش تعداد قطب رتور، افزایش تعداد شیار و کم شدن استحکام استاتور مواجه می‌شویم.

برای رفع مشکلات فوق از ساختار مدولار استفاده می‌کنیم، به این شکل که در این ساختار هارمونیک خاصی را بجای هارمونیک اصلی تقویت نموده و براین اساس تعداد جفت قطب‌های رتور برابر با هارمونیک تقویت شده می‌باشد، بنابراین می‌توان بدون افزایش در تعداد شیار استاتور، تعداد قطب‌ها را افزایش داده و مشکلات نامبرده را حل نمود.

کلمات کلیدی: نویز صوتی؛ ارتعاش؛ فرکانس‌های طبیعی ارتعاش؛ نیروهای شعاعی

فهرست مطالب

فصل ۱ مقدمه‌ای بر مسأله نویز موتورهای الکتریکی.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۲- طرح مسئله و اهمیت موضوع.....	۲
۱-۳- اهداف پایان نامه.....	۳
۱-۴- ساختار پایان نامه.....	۳
فصل ۲ مروری بر پژوهش‌ها و مراجع گذشته.....	۵
۲-۱- مقدمه.....	۶
۲-۲- پژوهش‌های انجام شده در زمینه نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی مختلف.....	۶
۲-۳- تحقیقات انجام شده در زمینه اندازه‌گیری نویز صوتی.....	۸
۲-۴- پژوهش‌های انجام شده در زمینه موتور مدولار.....	۹
فصل ۳: آشنایی با موتور مدولار.....	۱۳
۳-۱- مقدمه.....	۱۴
۳-۲- ساختار موتور مدولار.....	۱۴
۳-۳- محاسبه ضریب سیم پیچی.....	۱۵
۳-۴- دامنه هارمونیک‌های فضایی شکل موج mmf فاصله‌هوایی.....	۱۵
۳-۵- تحلیل ماشین مدولار نمونه.....	۱۹
۳-۵-۱- تعیین پارامترهای اساسی طراحی ماشین نمونه.....	۱۹
۳-۵-۲- انتخاب مواد تشکیل دهنده اجزای مختلف ماشین نمونه.....	۲۲
۳-۵-۳- نحوه سیم پیچی و اختصاص تغذیه.....	۲۳
۳-۵-۴- اعمال شرایط مرزی.....	۲۳
۳-۵-۵- تأیید صحت طراحی.....	۲۴
۳-۵-۶- بررسی گشتاور و توان خروجی ماشین.....	۲۵
۳-۵-۷- تحلیل الکترومغناطیسی.....	۲۶
۳-۵-۸- بررسی نیروهای شعاعی و مماسی موتور نمونه.....	۲۷
فصل ۴ بررسی نویز صوتی موتور مدولار نمونه.....	۳۱
۴-۱- مقدمه.....	۳۲
۴-۲- تولید و انتشار نویز در ماشین‌های الکتریکی.....	۳۲
۴-۲-۱- تأثیر رپل گشتاور بر لرزش و نویز صوتی ماشین الکتریکی.....	۳۲
۴-۲-۲- تأثیر سرعت در ایجاد نویز و ارتعاش.....	۳۲

۳-۲-۴	بررسی نويز الكترومغناطیسی	۳۳
۳-۴	روش مدل سازی عددی نويز صوتی	۳۳
۱-۳-۴	تحليل ساختاری	۳۴
۲-۳-۴	تحليل فرکانسی	۳۶
۴-۴	تحليل ساختاری موتور نمونه	۳۶
۱-۴-۴	انتخاب مواد در تحليل ساختاری	۳۶
۲-۴-۴	مش بندی	۳۶
۳-۴-۴	نتایج حاصل از تحليل ساختاری	۳۷
۵-۴	نتایج حاصل از تحليل فرکانسی	۳۹
فصل ۵ تغییر ساختار موتور مدولار به منظور کاهش نويز صوتی		
۱-۵	مقدمه	۴۸
۲-۵	ساختار ۲۴ شیار ۲۸ قطب	۴۸
۱-۲-۵	تحليل الكترومغناطیسی ساختار ۲۴ شیار ۲۸ قطب	۴۸
۲-۲-۵	تحليل فرکانسی ساختار ۲۴ شیار ۲۸ قطب	۵۲
۳-۵	ساختار ۳۶ شیار	۵۷
۱-۳-۵	ساختار ۳۶ شیار ۲۸ قطب	۵۷
۲-۳-۵	تحليل الكترومغناطیسی ساختار ۳۶ شیار ۲۸ قطب	۵۷
۳-۳-۵	تحليل ساختاری هسته استاتور ۳۶ شیار	۶۱
۴-۳-۵	تحليل فرکانسی ترکیب ۳۶ شیار ۲۸ قطب	۶۳
۵-۳-۵	ساختار ۳۶ شیار ۳۰ قطب	۶۶
۶-۳-۵	تحليل الكترومغناطیسی ساختار ۳۶ شیار ۳۰ قطب	۶۷
۷-۳-۵	تحليل فرکانسی ساختار ۳۶ شیار ۳۰ قطب	۷۰
۸-۳-۵	ساختار ۳۶ شیار ۳۲ قطب	۷۳
۹-۳-۵	تحليل الكترومغناطیسی ساختار ۳۶ شیار ۳۲ قطب	۷۳
۱۰-۳-۵	تحليل فرکانسی ساختار ۳۶ شیار ۳۲ قطب	۷۶
۴-۵	بررسی ضریب سیم پیچی و تعداد قطب بر نويز صوتی	۷۹
فصل ۶ جمع بندی ، نتیجه گیری و پیشنهادات		
۱-۶	جمع بندی	۸۲
۲-۶	نتیجه گیری	۸۳
۳-۶	پیشنهادهات	۸۳
منابع		۸۴

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: ضرایب سیم پیچی برای ترکیب های مختلف تعداد قطب p و تعداد شیار Q_s از مرجع [۲۲]..... ۱۱
- شکل ۲-۲: طرح سیم پیچی برای برخی از ترکیب های تعداد قطب p و تعداد شیار Q_s از مرجع [۲۲]..... ۱۱
- شکل ۱-۳: دامنه هارمونیک های شکل موج mmf فاصله هوایی موتور ۲۴ شیار با سیم پیچی $q = \frac{2}{5}$ ۱۶
- شکل ۲-۳: دامنه هارمونیک های شکل موج mmf فاصله هوایی موتور ۳۶ شیار با سیم پیچی $q = \frac{3}{7}$ ۱۷
- شکل ۳-۳: دامنه هارمونیک های شکل موج mmf فاصله هوایی موتور ۳۶ شیار با سیم پیچی $q = \frac{3}{8}$ ۱۷
- شکل ۴-۳: دامنه هارمونیک های شکل موج mmf فاصله هوایی موتور ۳۶ شیار با سیم پیچی $q = \frac{2}{5}$ ۱۸
- شکل ۵-۳: استاتور موتور مدولار نمونه..... ۱۹
- شکل ۶-۳: رتور موتور مدولار نمونه..... ۲۰
- شکل ۷-۳: مدل دو بعدی ماشین نمونه..... ۲۲
- شکل ۸-۳: شکل موج های جریان سه فاز ورودی موتور نمونه..... ۲۳
- شکل ۹-۳: نقشه رنگی توزیع چگالی شار موتور نمونه..... ۲۴
- شکل ۱۰-۳: خطوط شار مغناطیسی موتور نمونه..... ۲۵
- شکل ۱۱-۳: نمودار گشتاور نامی ۲۴ شیار ۲۰ قطب..... ۲۵
- شکل ۱۲-۳: نمودار توان خروجی موتور مدولار نمونه..... ۲۶
- شکل ۱۳-۳: $Back_EMF$ بدست آمده از شبیه سازی موتور نمونه..... ۲۶
- شکل ۱۴-۳: نیروهای شعاعی بر روی دندانه های استاتور برحسب زمان در موتور نمونه..... ۲۸
- شکل ۱۵-۳: نیروهای مماسی بر روی دندانه های استاتور برحسب زمان در موتور نمونه..... ۲۸
- شکل ۱۶-۳: دامنه هارمونیک های نیروهای شعاعی و مماسی موتور نمونه..... ۲۹
- شکل ۱-۴: تأثیر سرعت در ایجاد نویز و ارتعاش..... ۳۳
- شکل ۲-۴: مش بندی استاتور ۲۴ شیار..... ۳۷
- شکل ۳-۴: فرکانس های طبیعی استاتور ۲۴ شیار..... ۳۸
- شکل ۴-۴: تغییر شکل استاتور موتور نمونه در فرکانس ۳۸۴ هرتز..... ۳۸
- شکل ۵-۴: تغییر شکل استاتور موتور نمونه در فرکانس ۷۵۴ هرتز..... ۳۸
- شکل ۶-۴: تغییر شکل استاتور موتور نمونه در فرکانس ۱۰۴۷ هرتز..... ۳۹

- شکل ۷-۴: نمودار مقدار شتاب ذرات به همراه زاویه فاز در موتور نمونه ۳۹
- شکل ۸-۴: شتاب ذرات استاتور ۲۴ شیار ۲۰ قطب در فرکانس ۴۲۲۴ هرتز در موتور نمونه ۴۰
- شکل ۹-۴: شتاب ذرات استاتور ۲۴ شیار ۲۰ قطب در فرکانس ۱۶۱۲۸ هرتز در موتور نمونه ۴۰
- شکل ۱۰-۴: شتاب ذرات استاتور ۲۴ شیار ۲۰ قطب در فرکانس ۱۶۸۹۶ هرتز در موتور نمونه ۴۱
- شکل ۱۱-۴: جابه جایی ذرات در راستای شعاعی در فرکانس ۳۸۴ هرتز ماشین نمونه ۴۱
- شکل ۱۲-۴: جابه جایی ذرات در راستای شعاعی در فرکانس ۴۲۲۴ هرتز ماشین نمونه ۴۲
- شکل ۱۳-۴: جابه جایی در راستای مماسی در فرکانس ۳۸۴ هرتز در موتور نمونه ۴۲
- شکل ۱۴-۴: جابه جایی در راستای مماسی در فرکانس ۱۶۱۲۸ هرتز در موتور نمونه ۴۳
- شکل ۱۵-۴: سرعت ذرات در فرکانس ۴۲۲۴ هرتز در موتور نمونه ۴۳
- شکل ۱۶-۴: سرعت ذرات در فرکانس ۱۶۸۹۶ هرتز در موتور نمونه ۴۳
- شکل ۱۷-۴: نویز انداز گیری شده برحسب فرکانس در موتور نمونه ۴۴
- شکل ۱-۵: ساختار ۲۴ شیار ۲۸ قطب شبیه سازی شده در محیط المان محدود ۴۸
- شکل ۲-۵: توزیع چگالی شار مغناطیسی موتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب ۴۹
- شکل ۳-۵: نمودار گشتاور نامی موتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب ۴۹
- شکل ۴-۵: نیروهای شعاعی بر روی دندانه های استاتور برحسب زمان در موتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب ۵۰
- شکل ۵-۵: نیروهای مماسی بر روی دندانه های استاتور برحسب زمان در موتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب ۵۱
- شکل ۶-۵: دامنه هارمونیک های نیروهای شعاعی و مماسی موتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب ۵۱
- شکل ۷-۵: نمودار مقدار شتاب ذرات به همراه زاویه فاز در ساختار ۲۴ شیار ۲۸ قطب ۵۲
- شکل ۸-۵: شتاب ذرات استاتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب در فرکانس ۴۲۲۴ هرتز ۵۳
- شکل ۹-۵: شتاب ذرات استاتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب در فرکانس ۱۶۱۲۸ هرتز ۵۳
- شکل ۱۰-۵: شتاب ذرات استاتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب در فرکانس ۱۶۸۹۶ هرتز ۵۳
- شکل ۱۱-۵: جابه جایی ذرات در راستای شعاعی در فرکانس ۴۲۲۴ هرتز ماشین ۲۴ شیار ۲۸ قطب ۵۴
- شکل ۱۲-۵: سرعت ذرات در فرکانس ۴۲۲۴ هرتز در موتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب ۵۵
- شکل ۱۳-۵: سرعت ذرات در فرکانس ۱۶۱۲۸ هرتز در موتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب ۵۵
- شکل ۱۴-۵: سرعت ذرات در فرکانس ۱۶۸۹۶ هرتز در موتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب ۵۵
- شکل ۱۵-۵: نویز انداز گیری شده برحسب فرکانس در موتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب ۵۶

- شکل ۵-۱۶: ساختار ۳۶ شیار ۲۸ قطب شبیه سازی شده در محیط المان محدود..... ۵۸
- شکل ۵-۱۷: توزیع چگالی شار مغناطیسی موتور ۳۶ شیار ۲۸ قطب..... ۵۸
- شکل ۵-۱۸: نمودار گشتاور نامی موتور ۳۶ شیار ۲۸ قطب..... ۵۹
- شکل ۵-۱۹: نیروهای شعاعی بر روی دندانه های استاتور برحسب زمان در موتور ۳۶ شیار ۲۸ قطب..... ۶۰
- شکل ۵-۲۰: نیروهای مماسی بر روی دندانه های استاتور برحسب زمان در موتور ۳۶ شیار ۲۸ قطب..... ۶۰
- شکل ۵-۲۱: دامنه هارمونیک های نیروهای شعاعی و مماسی موتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب..... ۶۱
- شکل ۵-۲۲: فرکانس های طبیعی استاتور ۳۶ شیار..... ۶۱
- شکل ۵-۲۳: تغییر شکل استاتور ۳۶ شیار در فرکانس ۴۱۴ هرتز..... ۶۲
- شکل ۵-۲۴: تغییر شکل استاتور ۳۶ شیار در فرکانس ۷۰۶ هرتز..... ۶۲
- شکل ۵-۲۵: تغییر شکل استاتور ۳۶ شیار در فرکانس ۱۱۳۴ هرتز..... ۶۲
- شکل ۵-۲۶: نمودار مقدار شتاب ذرات به همراه زاویه فاز در ساختار ۳۶ شیار ۲۸ قطب..... ۶۳
- شکل ۵-۲۷: شتاب ذرات استاتور ۳۶ شیار ۲۸ قطب در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز..... ۶۳
- شکل ۵-۲۸: جابه جایی ذرات در راستای شعاعی در فرکانس ۴۱۴ هرتز ماشین ۳۶ شیار ۲۸ قطب..... ۶۴
- شکل ۵-۲۹: جابه جایی ذرات در راستای مماسی در فرکانس ۴۱۴ هرتز ماشین ۳۶ شیار ۲۸ قطب..... ۶۴
- شکل ۵-۳۰: سرعت ذرات در فرکانس ۴۱۴ هرتز در موتور ۳۶ شیار ۲۸ قطب..... ۶۵
- شکل ۵-۳۱: سرعت ذرات در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز در موتور ۳۶ شیار ۲۸ قطب..... ۶۵
- شکل ۵-۳۲: نویز اندازه گیری شده برحسب فرکانس در موتور ۳۶ شیار ۲۸ قطب..... ۶۶
- شکل ۵-۳۳: ساختار ۳۶ شیار ۳۰ قطب شبیه سازی شده در محیط المان محدود..... ۶۷
- شکل ۵-۳۴: گشتاور نامی موتور ۳۶ شیار ۳۰ قطب..... ۶۷
- شکل ۵-۳۵: نیروهای شعاعی بر روی دندانه های استاتور برحسب زمان در موتور ۳۶ شیار ۳۰ قطب..... ۶۸
- شکل ۵-۳۶: نیروهای مماسی بر روی دندانه های استاتور برحسب زمان در موتور ۳۶ شیار ۳۰ قطب..... ۶۹
- شکل ۵-۳۷: دامنه هارمونیک های نیروهای شعاعی و مماسی موتور ۲۴ شیار ۳۰ قطب..... ۶۹
- شکل ۵-۳۸: نمودار مقدار شتاب ذرات به همراه زاویه فاز در ساختار ۳۶ شیار ۳۰ قطب..... ۷۰
- شکل ۵-۳۹: شتاب ذرات استاتور ۳۶ شیار ۳۰ قطب در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز..... ۷۰
- شکل ۵-۴۰: جابه جایی ذرات در راستای شعاعی در فرکانس ۴۱۴ هرتز ماشین ۳۶ شیار ۳۰ قطب..... ۷۱
- شکل ۵-۴۱: جابه جایی ذرات در راستای مماسی در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز ماشین ۳۶ شیار ۳۰ قطب..... ۷۱

شکل ۵-۴۲: سرعت ذرات در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز در موتور ۳۶ شیار ۳۰ قطب.....	۷۲
شکل ۵-۴۳: نويز اندازه‌گیری شده برحسب فرکانس در موتور ۳۶ شیار ۳۰ قطب.....	۷۲
شکل ۵-۴۴: ساختار ۳۶ شیار ۳۲ قطب شبیه سازی شده در محیط المان محدود.....	۷۳
شکل ۵-۴۵: گشتاور نامی موتور ۳۶ شیار ۳۲ قطب.....	۷۴
شکل ۵-۴۶: نیروهای شعاعی بر روی دندانه های استاتور برحسب زمان در موتور ۳۶ شیار ۳۲ قطب.....	۷۵
شکل ۵-۴۷: نیروهای مماسی بر روی دندانه های استاتور برحسب زمان در موتور ۳۶ شیار ۳۲ قطب.....	۷۵
شکل ۵-۴۸: دامنه هارمونیک‌های نیروهای شعاعی و مماسی موتور ۲۴ شیار ۳۲ قطب.....	۷۶
شکل ۵-۴۹: نمودار مقدار شتاب ذرات به همراه زاویه فاز در ساختار ۳۶ شیار ۳۲ قطب.....	۷۶
شکل ۵-۵۰: شتاب ذرات استاتور ۳۶ شیار ۳۲ قطب در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز.....	۷۷
شکل ۵-۵۱: جابه جایی ذرات در راستای شعاعی در فرکانس ۱۲۹۳۴۴ هرتز ماشین ۳۶ شیار ۳۲ قطب.....	۷۷
شکل ۵-۵۲: جابه جایی ذرات در راستای مماسی در فرکانس ۴۱۴ هرتز ماشین ۳۶ شیار ۳۰ قطب.....	۷۸
شکل ۵-۵۳: سرعت ذرات در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز در موتور ۳۶ شیار ۳۲ قطب.....	۷۸
شکل ۵-۵۴: نويز اندازه‌گیری شده برحسب فرکانس در موتور ۳۶ شیار ۳۲ قطب.....	۷۹

فهرست جداول

جدول ۳-۱: مقادیر نامی موتور نمونه.....	۱۹
جدول ۳-۲: پارامترهای اساسی موتور نمونه.....	۲۰
جدول ۳-۳: اطلاعات ابعادی ماشین نمونه.....	۲۱
جدول ۳-۴: مشخصات مواد تشکیل دهنده اجزای مختلف ماشین نمونه.....	۲۲
جدول ۳-۵: حداکثر نیروهای شعاعی و مماسی بر روی دندانه های استاتور در ساختار موتور نمونه.....	۲۷
جدول ۴-۱: مشخصات مکانیکی هسته استاتور.....	۳۶
جدول ۵-۱: حداکثر نیروهای شعاعی و مماسی بر روی دندانه های استاتور در ساختار ۲۴ شیار ۲۸ قطب.....	۵۰
جدول ۵-۲: حداکثر نیروهای شعاعی و مماسی بر روی دندانه های استاتور در ساختار ۳۶ شیار ۲۸ قطب.....	۵۹
جدول ۵-۳: حداکثر نیروهای شعاعی و مماسی بر روی دندانه های استاتور در ساختار ۳۶ شیار ۳۰ قطب.....	۶۸
جدول ۵-۴: حداکثر نیروهای شعاعی و مماسی بر روی دندانه های استاتور در ساختار ۳۶ شیار ۳۰ قطب.....	۷۴
جدول ۵-۵: ضرایب سیم پیچی و نويز های بدست آمده هر ترکیب.....	۷۹

فهرست علائم

واحد	نماد متغیر	تعریف
A	I_{ph}	مقدار موثر جریان فاز
V	V_{ph}	مقدار موثر ولتاژ فاز
KW	P_{out}	توان خروجی
H/m	μ_0	نفوذ پذیری خلا
rpm	n_s	سرعت موتور
Hz	f	فرکانس
A.turn	MMF	نیرو محرکه مغناطیسی
dB	P	سطح فشار صوت
T	B	چگالی شار مغناطیسی
T	B_{cs}	چگالی شار بیشینه هسته
T	B_r	چگالی شار پسماند
A/m	H_c	نیروی مغناطیس زدای
A/mm ²	J_s	چگالی جریان
kg/m ³	ρ	چگالی جرم حجمی
turn	N_t	تعداد دور سیم‌پیچ های موتور
mm	g	طول فاصله هوایی

فصل ۱ مقدمه‌ای بر مسأله نویز موتورهای الکتریکی

۱-۱- مقدمه

یکی از مهمترین موضوعاتی که در طراحی ماشین‌های الکتریکی، باید در نظر داشت، کاهش نویز صوتی تولیدی به وسیله آن‌ها است. امروزه با گسترش روزافزون استفاده از ماشین‌های الکتریکی در کاربردهای ویژه نیاز به بررسی و کاهش نویز صوتی حاصل از آنها بیش از پیش احساس می‌شود. طراحان ماشین‌های الکتریکی از حدود ۸۰ سال پیش علاقه مند به بررسی و کاهش نویز صوتی ماشین‌های مورد طراحی خود بوده‌اند. از آنجا که در خیلی از مکان‌هایی که از ماشین‌های الکتریکی استفاده می‌شود، باید حداکثر میزان نویز صوتی را رعایت کرد، بنابراین در طراحی ساختار ماشین‌ها این نکته باید لحاظ شود، به همین علت مساله نویز صوتی امروزه اهمیت زیادی پیدا کرده است.

در ماشین‌های الکتریکی عامل لرزش و نویز صوتی یکی می‌باشد و بیشتر منظور از نویز صوتی امواج مزاحم قابل شنیدن توسط انسان می‌باشد، که تقریباً فرکانس آن بین ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلو هرتز می‌باشد. منابع نویز صوتی را می‌توان به سه دسته کلی الکترومغناطیسی، مکانیکی و آیرودینامیکی تقسیم کرد. منبع الکترومغناطیسی در موتورهای با توان اسمی پایین تا متوسط (کمتر از ۱۵ کیلو وات) و به خصوص در سرعت چرخش کمتر از ۱۵۰۰ دور در دقیقه بر مابقی چیره می‌شود.

۱-۲- طرح مسئله و اهمیت موضوع

امروزه در بسیاری از کاربردهای ماشین‌های الکتریکی مانند استفاده آن‌ها در توربین‌های بادی، آسانسور و مواردی ازین قبیل شرایط عملکردی دائماً در حال تغییر است، ازین رو نیاز به بررسی تاثیر شرایط عملکردی ماشین‌های الکتریکی بر نویز صوتی آن‌ها بیش از پیش احساس می‌شود. در ماشین‌های مدولار باتوجه به تقویت برخی از هارمونیک‌ها که امکان تولید نویز را بیشتر می‌کند، اهمیت کاهش نویز بیشتر می‌شود.

از آنجا که کاربرد گسترده موتور مدولار در تعداد قطب بالا به منظور بدست آوردن سرعت پایین‌تر می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت، که نویز صوتی غالب در این نوع از موتور، نویز الکترومغناطیسی می‌باشد. بنابراین در

این پایان نامه به بررسی نویز صوتی از نوع نویز الکترومغناطیسی یک نوع موتور مدولار پرداخته و نشان داده می‌شود که منابع تاثیرگذار نویز الکترومغناطیسی از جمله نیروهای شعاعی و مماسی وارد بر دندانه‌های استاتور ، ریل گشتاور و ... وابسته به تعداد قطب رتور و انواع ترکیب سیم‌پیچی‌های از نوع مدولار می‌باشند. به منظور کاهش این نوع از منابع نویز ، یک موتور نمونه مدولار مغناطیس دائم معرفی می‌شود و نشان داده می‌شود که با تغییرات در تعداد قطب و ساختار سیم‌پیچی موتور مدولار می‌توان نویز صوتی را کاهش داد و در نهایت موتور نمونه از لحاظ عملکردی با انجام تحلیل‌های الکترومغناطیسی و ساختاری و فرکانسی در نرم افزار المان محدود بررسی می‌شود و سطح فشار صوت تابیده شده از سطح خارجی هسته استاتور موتور محاسبه می‌گردد.

۱-۳- اهداف پایان نامه

با توجه به دلایل ذکر شده و اهمیت موضوع نویز صوتی در ماشین‌های الکتریکی مختلف لازم است این مساله در طراحی این ماشین‌ها در نظر گرفته و آن را بهبود بخشیم. در این پایان نامه نیروهای شعاعی و مماسی الکترومغناطیسی وارد بر دندانه به عنوان منبع اصلی تولید نویز در ماشین‌های الکتریکی در یک ماشین مدولار مغناطیس دائم به کمک نرم افزار المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا یک نمونه از ماشین‌های مدولار مغناطیس دائم معرفی گردیده و در محیط نرم افزاری شبیه سازی شد. با در نظر گرفتن اهمیت علل الکترومغناطیسی در میزان لرزش و نویز صوتی ماشین ، با تغییراتی در ساختار تعداد قطب و فرکانس و همچنین ترکیب سیم پیچی و با در نظر گرفتن حفظ پارامترهای اساسی موتور ، سعی شده است لرزش و به دنبال آن نویز صوتی را کاهش بدهیم.

۱-۴- ساختار پایان نامه

مراجع مرتبط با ماشین‌های مغناطیس دائم مدولار بسیار کم می‌باشند و با توجه به مطالعات صورت گرفته احتمالاً در این نوع از ماشین‌ها مساله لرزش و نویز صوتی در ساختارهای مختلف از این نوع ماشین بررسی نشده است. به همین علت در این پژوهش به بررسی نویز صوتی در موتور مغناطیس دائم مدولار می‌پردازیم.

تحقیقات گسترده ای در زمینه لرزش و نویز صوتی در انواع ماشین‌های الکتریکی صورت گرفته است ، بنابراین در فصل دوم مطالعات انجام شده مرتبط با نویز انواع ماشین‌های الکتریکی مطرح می‌شود و همچنین در این فصل به بررسی انواع نویز و علل به وجود آمدن آن و روش‌های کاهش نویز صوتی ارائه گردیده است.

برای بررسی لرزش و نویز صوتی موتور مدولار آشنایی با ساختار این نوع از ماشین‌ها اهمیت پیدا می‌کند. بنابراین در فصل سوم به بررسی ساختار و عملکرد موتور مدولار پرداخته می‌شود و سپس در فصل چهارم درباره نویز صوتی انواع ماشین‌های الکتریکی ، انواع نویز صوتی ، بررسی نویز الکترومغناطیسی و علل به وجود آمدن آن و تاثیر گذاری آن در لرزش و نویز صوتی در ماشین‌های الکتریکی می‌پردازیم و در نهایت یک ماشین نمونه طراحی شده و در محیط المان محدود با در نظر گرفتن پارامترهای اساسی طراحی موتور نمونه به تحلیل الکترومغناطیسی ماشین پرداخته می‌شود و همچنین نیروهای شعاعی و مماسی ماشین به عنوان عامل اصلی در نویز صوتی مورد بررسی قرار گرفته است و سپس با انجام تحلیل های ساختاری فرکانس‌های طبیعی و شکل مدهای استاتور را بدست آورده و در تحلیل فرکانسی سطح فشار صوت اندازه گیری می‌شود.

در فصل پنجم ساختارهای متفاوت موتور مدولار ارائه شده و در هریک از ساختارها به بررسی نویز صوتی آن می‌پردازیم.

در فصل ششم جمع بندی و نتیجه گیری از نتایج بدست آمده ، صورت گرفته و در نهایت پیشنهاداتی برای علاقه مندان در زمینه نویز صوتی موتور مدولار ارائه می‌گردد.

فصل ۲ مروری بر پژوهش ها و مراجع گذشته

۲-۱- مقدمه

این فصل شامل مطالعات انجام شده در مورد نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی پرداخته که شامل انواع نویز صوتی و روش‌های کاهش آن در ماشین‌های الکتریکی مختلف است. در ادامه پژوهش‌های انجام شده درباره نحوه اندازه‌گیری نویز و ارتعاشات در ماشین‌های الکتریکی ارائه شده است و در پایان تحقیقات صورت گرفته در زمینه موتور مدولار و همچنین روش‌های کاهش نویز در این نوع ماشین‌های الکتریکی ارائه می‌گردد.

۲-۲- پژوهش‌های انجام شده در زمینه نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی مختلف

با مطالعه صورت گرفته در زمینه نویز صوتی و ارتعاشات موتورهای الکتریکی به این مهم می‌توان دست یافت که اکثر مراجع، ارتعاش را عامل نویز صوتی دانسته و همچنین نویز صوتی را به سه دسته آیرودینامیکی، مکانیکی و الکترومغناطیسی تقسیم نموده‌اند و همچنین با توجه به اهمیت نویز الکترومغناطیسی موتور مدولار نسبت به نویزهای آیرودینامیکی و مکانیکی به بررسی مطالعات انجام شده درباره انواع نویز الکترومغناطیسی و روش‌های کاهش آن در موتورهای الکتریکی گوناگون می‌پردازیم.

برخی مراجع با هدف کاهش عوامل نویز الکترومغناطیسی به بررسی کاهش نویز صوتی پرداخته‌اند، بدون آن که نویز صوتی را اندازه‌گیری کرده فقط هدف را کاهش عامل نویز قرار داده‌اند. که در این باره به مراجع زیر می‌توان اشاره داشت:

مرجع [۱] یک موتور شار محوری را مورد بررسی قرار داده و رپیل گشتاور را از جمله عوامل اصلی لرزش و نویز الکترومغناطیسی دانسته است. در نتیجه با کاهش رپیل گشتاور طراحی مورد نظر را به هدف کاهش نویز صوتی انجام داده است. در این مرجع یک روش مقرون به صرفه جهت کاهش رپیل گشتاور برای یک ماشین سنکرون آهنربای دائم شار محوری با استاتور قطعه بندی شده و چند لایه پیشنهاد و بررسی شده و مدل تحلیلی فقط جهت اندازه‌گیری رپیل گشتاور بوده و به اندازه‌گیری نویز صوتی نپرداخته است.

مرجع [۲] تاثیر آهنرباهای V شکل رتور یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم در گشتاور دندانه‌ای را بررسی کرده و با استفاده از کاهش ریپل گشتاور و گشتاور دندانه‌ای به بررسی نویز صوتی پرداخته‌است.

مرجع [۳] با هدف کاهش گشتاور دندانه‌ای در ماشین‌های مغناطیس دائم، پارامترهای طراحی بهینه از جمله ترکیب تعداد شیار استاتور و تعداد قطب‌ها، نسبت کمان قطب به گام قطبی و انحراف قطب‌ها و ... به صورت تحلیلی به دست می‌آیند، تا نویز صوتی را به حداقل برسانند.

مرجع [۴] با تغییرات اصلاحی در دندانه‌های استاتور ماشین‌های مغناطیس دائم، به بررسی کاهش گشتاور دندانه‌ای و نویز صوتی پرداخته‌است.

مرجع [۵] به تاثیر شیار کسری و سیم پیچی متمرکز ماشین‌های مغناطیس دائم در ارتعاش و نویز صوتی پرداخته‌است، که این عامل را با اندازه گیری نیروهای شعاعی بدست آورده است.

مرجع [۶] با طراحی‌های درایو مبتنی بر تبدیل موجک به کاهش ارتعاش و نویز صوتی موتور سنکرون مغناطیس دائم پرداخته است که این مرجع نیز ریپل گشتاور را مهمترین عامل نویز الکترومغناطیسی می‌داند.

گشتاور دندانه‌ای، ریپل گشتاور و نیروهای شعاعی مغناطیسی منابع الکترومغناطیسی می‌باشند، که عامل نویز و ارتعاش هستند، بیشتر کارهای انجام شده در این حوزه معطوف به کاهش ریپل گشتاور و گشتاور دندانه‌ای می‌باشد، کوشش‌های بسیاری در زمینه بهینه سازی شکل رتور، آهنرباهای دائم و شکل استاتور با اهداف مختلف، نظیر کاهش گشتاور دندانه‌ای موتور توسط پژوهشگران انجام شده است که از جمله مهمترین آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

از جمله روش‌های متداول در طراحی استاتور می‌توان به انتخاب سر دندانه‌های ضخیم [۷]، مورب کردن ورقه‌های استاتور [۸ و ۷]، استفاده از شیارهای مجازی روی دندانه‌های استاتور [۸]، زوج کردن دندانه‌ها [۹]، نسبت بهینه پهنای دهانه شیار به گام شیار [۸ و ۷]، تقسیم بندی دندانه استاتور به چند قسمت و جابه جایی شیار و دهانه شیار استاتور [۱۰] اشاره کرد.

از جمله روش‌های پرکاربرد مرتبط با ساختار آهنربای دائم می‌توان مورب کردن قطب‌های مغناطیسی دائم [۱۰]، نسبت بهینه پهنای آهنربا دائم [۱۰ و ۱۱]، تغییر شکل قطب [۱۱]، تغییر در چیدمان آهنرباهای دائم [۱۲]، طرح قطب خارج از مرکز [۱۳]، تقسیم قطب‌های مغناطیسی به چند قسمت [۱۴] را نام برد. و همین طور از متداول‌ترین روش‌های مرتبط با طراحی رتور می‌توان به ایجاد شیار به عنوان مانع شار در رتور [۱۵]، افزایش طول فاصله هوایی [۷] و انتخاب نسبت تعداد شیار به تعداد قطب [۱۰ و ۷] اشاره نمود.

۲-۳- تحقیقات انجام شده در زمینه اندازه‌گیری نویز صوتی

مرجع [۱۶] برای بررسی و تحلیل دقیق نویز صوتی منتشر شده از ماشین‌های الکتریکی به اندازه‌گیری عملی و دقیق نویز صوتی پرداخته است. در این مقاله، یک مدل کارآمد و مبتنی بر آزمایش جهت تحلیل نویز صوتی منتشر شده از یک موتور سنکرون، شناسایی منابع نویز و همچنین استخراج فرکانس‌های طبیعی طراحی شده است. ابتدا سرعت مکانیکی موتور سنکرون توسط درایو کنترل سرعت^۱ از صفر شروع به افزایش می‌کند و در طول زمان شتاب‌گیری موتور سنکرون نویز صوتی منتشر شده از آن توسط "میکروفن اندازه‌گیری" و در شرایط استاندارد اندازه‌گیری می‌شود. سپس با استفاده از ابزار پردازش تصویر نتایج حاصل از اندازه‌گیری مورد پردازش قرار گرفته و منابع نویز موتور سنکرون و همچنین فرکانس‌های طبیعی آن تشخیص داده می‌شود.

در مرجع [۱۷] یک روش عددی برای پیش‌بینی ارتعاش و نویز صوتی ناشی از نیروهای تحریک الکترومغناطیسی در یک موتور شار محوری ارائه شده است. این روش شامل محاسبه نیروهای مغناطیسی شعاعی اعمال شده بر روی سطوح داخلی استاتور با استفاده از نرم افزار المان محدود برای محاسبه لرزش و نویز موتور می‌باشد و همچنین هارمونیک‌های اساسی و مرتبه بالا نیروهای مغناطیسی از طریق فرآیند تبدیل فوریه بدست می‌آیند. تجزیه و تحلیل‌های ساختاری مانند تجزیه و تحلیل مد و هارمونیک برای بررسی فرکانس‌های تشدید طبیعی سیستم موتور و شکل مدها که برای لرزش قاب و نویز صوتی بسیار عامل مهمی هستند

^۱ VFD

انجام شده است و همچنین اندازه ارتعاشات به ترتیب بر روی سطح محفظه موتور و سطح فشار صدا در یک نقطه مشخص از فضا، به ترتیب با استفاده از تجزیه و تحلیل هارمونیک و صوتی بدست می‌آید.

در مرجع [۱۸] روندی برای بهینه سازی شکل استاتور موتور سوئیچ رلوکتانس به منظور کاهش ارتعاش و نویز صوتی در این موتور معرفی شده است. با استفاده از نرم افزار المان محدود ANSYS، الگوی شبیه سازی برای موتور سوئیچ رلوکتانس معرفی شده است که در آن با انجام تحلیل‌های الکترومغناطیسی و مودال نیروی شعاعی لحظه ای وارد بر قطب استاتور و فرکانس‌های طبیعی استاتور با دقت زیادی پیش‌بینی می‌شوند.

در مرجع [۱۹] یک روش مدل سازی عددی برای پیش‌بینی ارتعاش و سر و صدای صوتی برای ماشین تراکشن سوئیچ رلوکتانسی ارائه می‌دهد. مدل سازی عددی شامل شبیه‌سازی نیروی الکترومغناطیسی در JMAG، محاسبه فرکانس‌های طبیعی و شبیه سازی ارتعاش و نویز صوتی در نرم افزار ACTRAN است. ملاحظات در مدل سازی اجزای موتور، مش‌بندی و اتصالات برای اطمینان از صحت شبیه سازی مورد بحث قرار گرفته است. روش مدل سازی عددی ارائه شده در این مطالعه همچنین می‌تواند برای سایر موتورهای سوئیچ رلوکتانس و ماشین‌های الکتریکی برای پیش‌بینی رفتار ارتعاش و سر و صدای صوتی تابشی استفاده شود.

۲-۴- پژوهش‌های انجام شده در زمینه موتور مدولار

مرجع [۲۰] ملاحظات طراحی را برای یک ماشین مغناطیس دائم مدولار شیار کسری با سیم‌پیچ‌های متمرکز یک لایه ارائه می‌دهد. ضریب سیم‌پیچی برای ترکیب‌های مختلف تعداد شیار/قطب محاسبه می‌شوند، تا ترکیب شماره بهینه شیار/قطب را برای تعداد فاز مختلف شناسایی کنند. علاوه بر این، عملکرد الکترومغناطیسی متاثر از شیارهای شار (FGs)^۱، مانند MMF فاصله هوایی، Back-EMF، گشتاور دندانه‌ای، گشتاور بار و ریپل گشتاور و ...، با استفاده از المان محدود دو بعدی به طور جامع مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مرجع تاثیر FG ها بر عملکرد ماشین های مدولار چند فاز ایجاد شده است. که نتیجه آن برای ماشین‌های مدولار دارای

^۱ Flux Gap

تعداد شیار بیشتر از تعداد قطب رتور ، FG ها تأثیرات منفی بر عملکرد الکترومغناطیسی مانند کاهش ضرایب سیم‌پیچی ، هارمونیک های MMF و گشتاورهای متوسط و غیره دارند. اما برای ماشین های مدولار دارای تعداد شیار بیشتر از تعداد قطب رتور ، اگر عرض فاصله شار به درستی انتخاب شده باشد ، FG ها می توانند عملکرد الکترومغناطیسی را افزایش دهند ، مانند افزایش گشتاورهای متوسط و کاهش رپیل گشتاور.

در مرجع [۲۱] با هدف بهبود هارمونیک های فضایی شکل موج MMF فاصله هوایی موتور آهنربای دائم، رفتار موتور بهبود داده می‌شود. در روش پیشنهاد شده برای بهبود هارمونیک های فضایی شکل موج MMF فاصله هوایی موتور آهنربای دائم ، از انتقال سیم پیچ طبقه دوم برای تقویت هارمونیک کاری موتور و حذف هارمونیک اول و کاهش هارمونیک های غیر ضروری استفاده می شود. از سوی دیگر تلفات موتور به حداقل رسیده و راندمان افزایش می یابد.

مرجع [۲۲] یکی از مهمترین مراجع اشاره شده در این پایان نامه می‌باشد که کمک شایانی در تسریع روند موضوع پایان نامه داشته است . هدف این مرجع یافتن بهترین ترکیب سیم‌پیچی های متمرکز برای ماشین های آهنربای دائمی با تعداد قطب بالا است. تعداد قطب ها و شیارهای به ترتیب از ۴ تا ۸۰ و ۶ تا ۹۰ را مورد بررسی قرار داده است. در میان تمام ترکیبات قطب/شیار، آن هایی که بالاترین ضریب سیم‌پیچی را دارند ارائه شده است. هارمونیک ها در نیروی محرکه مغناطیسی (MMF)، رپیل گشتاور و نیروهای مغناطیسی شعاعی که باعث ارتعاش می شوند، به منظور بدست آوردن بهترین ترکیب ها ، تجزیه و تحلیل می شوند. البته در این مقاله نویز مغناطیسی به طور مستقیم مورد بررسی قرار نگرفته و صرفا پیشنهادی برای بدست آوردن نویز کمتر داده شده است ، که به آن می پردازیم.

شکل (۱-۲) از مرجع [۲۲] ضرایب سیم پیچی به ازای ترکیب های مختلف تعداد شیار استاتور و تعداد قطب رتور برای طرح سیم پیچی های مختلف را نشان می‌دهد. که در آن p تعداد قطب رتور و Q_s تعداد شیار استاتور می‌باشد.

[illegible]

Slot/pole combination or number of slot per pole per phase q	Winding layout
 q = 2/5, 2/7	... C' A A' A' AB' BB' B' C C' C' CA' AA A' B B' B' BC' CC...
 q = 3/8, 3/10	... C' A A' A' AA A' B B' B' BB' B' C C' C' CC ...
 q = 3/7, 3/11	... CA' AB' BB' B' C' CA A' A' AB' BC' CC C' A A' B B' B' BC' CA' AA A' B B' C C' C'...
 q = 5/14, 5/16	... C' A A' A' AA A' A' AA A' B B' B' BB' B' B' BB' B' C C' C' CC C' C' CC...
$Q_s = 12 + 6k$, with $k = 0, 1, 2 \dots$ $p = Q_s \pm 2$ If p/2 even If p/2 odd	$\underbrace{A A' A' A...A A' A' AB' BB' B'...B' BB' B' C C' C' C...C C' C' C...}_{Q_s/6}$ $\underbrace{A A' A' A...A' AA A' B B' B' B...B' BB' B' C C' C' C...C' CC C' A' ... AB ... B' C' ... C}_{Q_s/6 \quad Q_s/6 \quad Q_s/6 \quad Q_s/6 \quad Q_s/6 \quad Q_s/6}$
$Q_s = 9 + 6k$, with $k = 0, 1, 2 \dots$ $p = Q_s \pm 1$	$\underbrace{A A' A' A...A' AA A' B B' B' B...B' BB' B' C C' C' C...C' CC C'}_{Q_s/3}$

شکل (۲-۲) طرح سیم پیچی برای برخی از ترکیب های تعداد قطب p و تعداد شیار Q_s را در مرجع [۲۲]

در این مرجع گشتاور دندانه ای و ریپل گشتاور و نیروهای شعاعی بررسی شده است که نتایج گرفته شده ، به

اگر تعداد شیار و قطب ها طوری انتخاب شوند که کمترین مضرب مشترک (ک م م) بین این اعداد ، عددی

می توان توجه داشت که ترکیبی با گشتاور دندان‌های بالا می تواند رپیل گشتاور کمتری نسبت به ترکیبی با گشتاور دندان‌های پایین تر داشته باشد .

نویز مغناطیسی نیز برای برخی از ماشین های مغناطیس دائم با سیم پیچ های متمرکز یک مشکل اساسی است. ماشین‌هایی با طرح سیم‌پیچی نامتقارن مانند ترکیب‌هایی با $p = Q_s \pm 1$ و $Q_s = 9 + 6k$ ، $k = 0, 1, 2, \dots$ دارای نیروهای شعاعی نامتعادل هستند که باعث ارتعاش استاتور و تولید نویز می‌شود.

مرجع [۲۳] ماشین های مغناطیسی دائم مدولار تک لایه را بررسی نموده و برای نوک دندان‌های دارای سیم‌پیچ ساختارهایی متفاوت پیشنهاد داده است که برای ماشین‌های مدولار با تعداد شیار کم‌تر از تعداد قطب برای افزایش ضریب سیم‌پیچی و در نتیجه بهبود عملکرد دستگاه مناسب هستند .

در مرجع [۲۴] ماشین مغناطیسی دائم مدولار با ساختار استاتور متفاوت پیشنهاد شده است که در آن شیارهای استاتور به سه قسمت تقسیم شده و هر قسمت را هر فاز پوشش می دهد و بین هر فاز یک دندان کوچک قرار داده است .

در مطالعات صورت گرفته می‌توان متوجه این موضوع شد که بیشتر تحقیقات صورت گرفته در زمینه موتور مدولار بیشتر به بررسی ترکیب های مختلف سیم پیچی و تغییرات هندسی شیار های استاتور به هدف دستیابی به بهترین ضریب سیم پیچی و همچنین افزایش راندمان موتور پرداخته اند و در زمینه نویز صوتی در ترکیب های مختلف سیم پیچی موتور مدولار کاری صورت نگرفته است.

فصل ۳ : آشنایی با موتور مدولار

۳-۱- مقدمه

ابتدا به تشریح ساختار و عملکرد موتور مدولار پرداخته و سپس ضرایب سیم‌پیچی انواع مختلف سیم‌پیچی و دامنه هارمونیک‌های هر نوع از سیم‌پیچی‌های ممکن را بدست می‌آوریم.

۳-۲- ساختار موتور مدولار

مشکل اساسی ماشین‌های مغناطیس دائم اتصال آهنرباهای دائم بر روی رتور می‌باشد، بنابراین برای سرعت‌های بالا مناسب نمی‌باشد، به همین دلیل این نوع از ماشین‌ها با سرعت پایین کاربرد بیشتری دارند. با توجه به رابطه سرعت موتورهای القایی (۳-۱) در طراحی ماشین برای پایین آوردن سرعت آن دو راهکار کلی می‌توان انجام داد:

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{2p} \quad (۳-۱)$$

۱- کاهش فرکانس (f): که با تغییر برخی پارامترهای طراحی بعضاً منجر به افزایش تلفات و همچنین حجم ماشین می‌شود.

۲- افزایش تعداد قطب (p): که در اینجا نیز با مشکل چیدمان آهنرباهای دائم، افزایش تعداد قطب رتور، افزایش تعداد شیار و کم شدن استحکام استاتور مواجه می‌شویم.

برای رفع مشکلات فوق از ساختار مدولار استفاده می‌کنیم، بدین شکل که در این ساختار هارمونیک خاصی را بجای هارمونیک اصلی تقویت نموده و براین اساس تعداد جفت قطب‌های رتور برابر با هارمونیک تقویت شده می‌باشد، بنابراین می‌توان بدون افزایش در تعداد شیار استاتور، تعداد قطب‌ها را افزایش داده و مشکلات نامبرده را حل نمود.

در ساختار مدولار سیم‌پیچ‌ها را به شکل متمرکز پیچیده می‌شود که این امر منجر به بهبود ضریب سیم‌پیچی و افزایش هارمونیک‌های فرعی شده و می‌توان با استفاده از آن تعداد قطب رتور را افزایش داده و در نتیجه سرعت کمتری داشته باشیم.

استفاده از ماشین‌های آهنربای دائم با تعداد قطب بالا برای کاربردهای درایو مستقیم با سرعت پایین اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. و با حذف گیربکس، در واقع می‌تواند عملکرد بهتری داشته باشد و همچنین سبک تر از موتور القایی با گیربکس باشد. برای این ماشین‌ها، سیم‌پیچ‌های متمرکز اطراف دندانه‌ها، با ساختار ساده و سیم‌پیچ‌های انتهایی کوتاه، بسیار جذاب هستند [۲۵].

در شکل (۲-۲)، نشان داده شده است که چگونه می‌توان طرح‌های مختلف برای سیم‌پیچ متمرکز پیدا کرد که ضریب سیم‌پیچی بالایی را داشته باشد. که در فصل دوم به آن اشاره شد.

۳-۳- محاسبه ضریب سیم‌پیچی

ضریب سیم‌پیچی با استفاده از فازورهای نیروی محرکه الکتریکی (EMF) محاسبه می‌شود [۲۲]. فازور E مربوط به هادی i ام است:

$$\vec{E}_i = e^{j\frac{\pi p}{Q_s} S(i)} \quad (۲-۳)$$

سپس ضریب سیم‌پیچی k_w را می‌توان با استفاده از (۳-۳) محاسبه کرد:

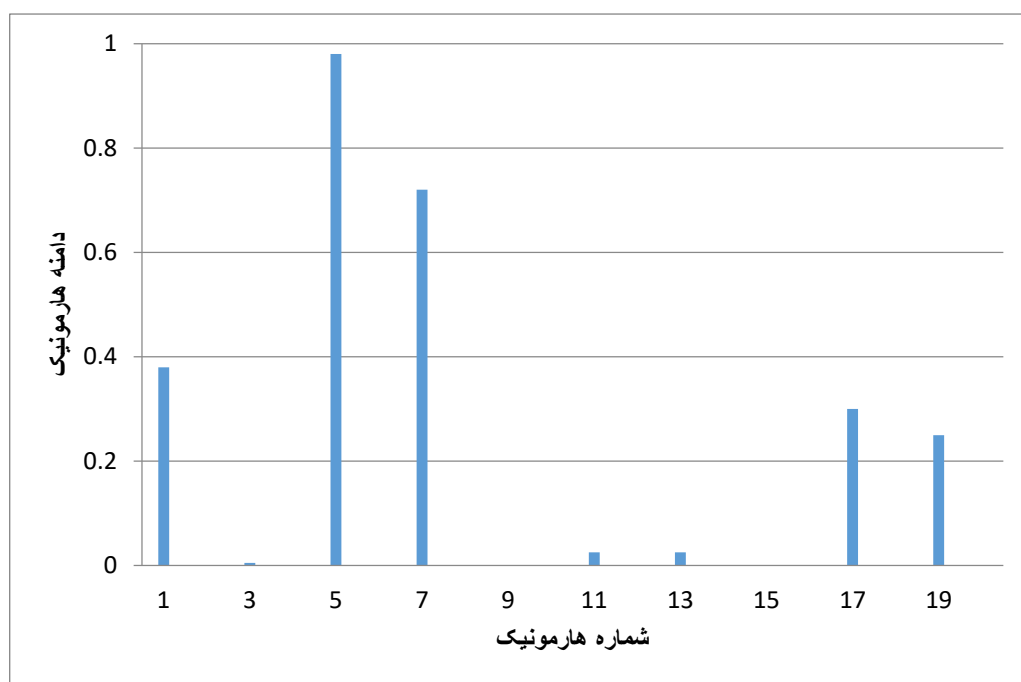
$$k_w = \frac{|\sum_{i=1}^{2Q_s/3} \vec{E}_i|}{n_l Q_s / 3} \quad (۳-۳)$$

S دنباله هادی‌های یک فاز است و n_l تعداد لایه‌ها است. به عنوان مثال برای تعداد شیار (Q_s) ۲۴ و تعداد قطب (P) ۲۰، ضریب سیم‌پیچی (k_w) ۰٫۹۳۳ بدست می‌آید.

۳-۴- دامنه هارمونیک‌های فضایی شکل موج mmf فاصله‌هوایی

با تغییر در نوع سیم‌پیچی سعی می‌شود تا هارمونیک‌های فضایی شکل موج mmf فاصله‌هوایی موتور آهنربای دائم مدولار به شکلی تغییر کنند تا هارمونیک کاری موتور تقویت و هارمونیک اول و هارمونیک‌های غیر ضروری کاهش یابد، از سوی دیگر تلفات موتور به حداقل رسیده و راندمان افزایش یابد. در اینجا از یک موتور ۲۰ قطب ۲۴ شیار استفاده شده که هارمونیک دهم بعنوان هارمونیک کاری در نظر گرفته می‌شود.

شکل (۱-۳) دامنه هارمونیک های شکل موج mmf فاصله هوایی موتور آهنربای دائم مدولار یک موتور ۲۰ قطب ۲۴ شیار با سیم پیچی $q = \frac{2}{5}$ را نشان می دهد.

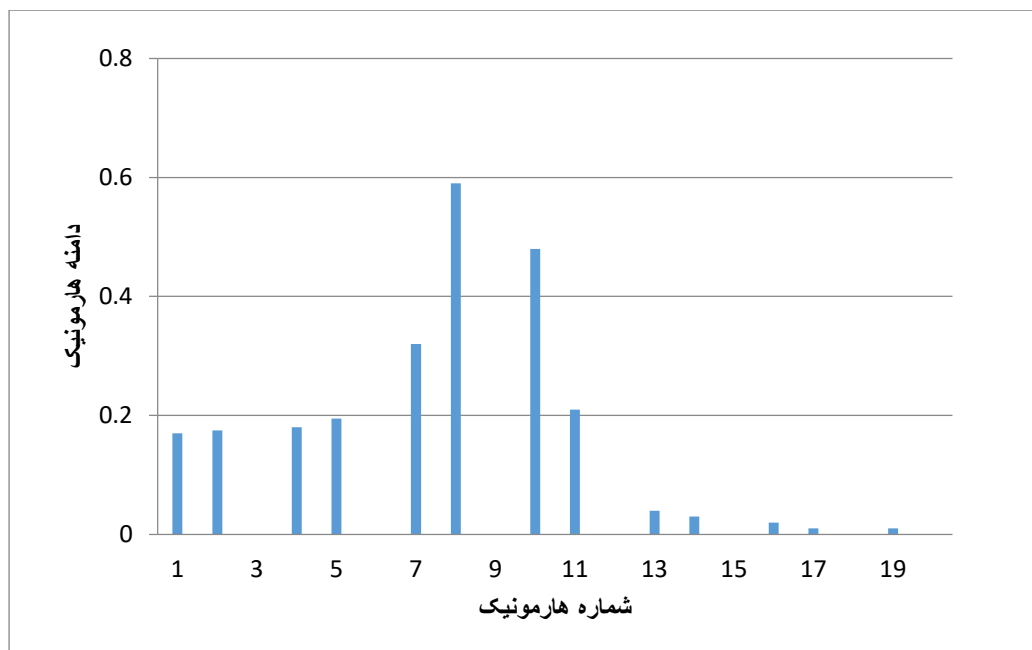


شکل (۱-۳): دامنه هارمونیک های شکل موج mmf فاصله هوایی موتور ۲۴ شیار با سیم پیچی $q = \frac{2}{5}$

شکل (۱-۳) نشان می دهد که هارمونیک های ۵ و ۷ بیشترین دامنه را دارند، بنابراین با این نوع سیم پیچی تعداد قطب رتور می تواند ۱۰ و ۱۴ و یا مضارب صحیحی از ۱۰ و ۱۴ باشند تا گشتاور نسبتاً مناسبی داشته باشیم. از بین مضارب صحیح این هارمونیک ها هر کدام که ضریب سیم پیچی بهتری داشته باشد انتخاب می کنیم. که در این حالت تعداد قطب ۲۰ و ۲۸ قطب ضریب سیم پیچی مطلوب تری را دارا می باشند.

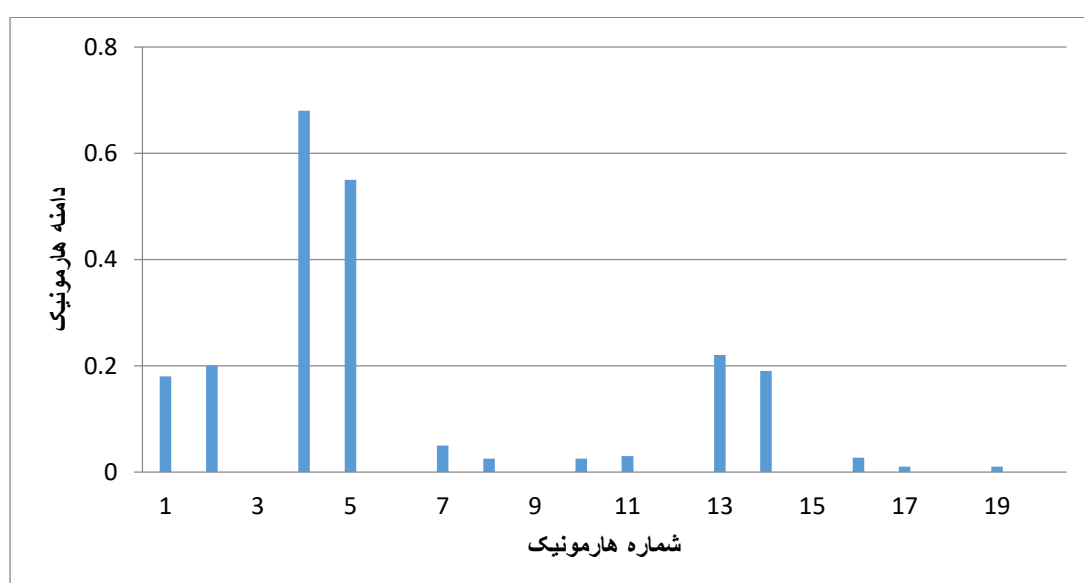
برای بررسی سیم پیچ های با تعداد شیار بر قطب بر فاز $\frac{3}{7}$ و $\frac{3}{8}$ باید تعداد شیار افزایش داده شود، که برای ثابت ماندن حجم، تعداد ۳۶ شیار را در نظر می گیریم. با محاسبه دامنه هارمونیک های mmf فاصله هوایی تعداد قطب های رتور را مشابه حالت ۲۴ شیار بدست آورده و عملکرد موتور را بررسی می کنیم.

شکل های (۲-۳) و (۳-۳) و (۴-۳) دامنه هارمونیک های شکل موج mmf فاصله هوایی به ترتیب با تعداد شیار بر قطب بر فاز $\frac{3}{7}$ و $\frac{3}{8}$ و $\frac{2}{5}$ را در حالت ۳۶ شیار نشان می دهد.



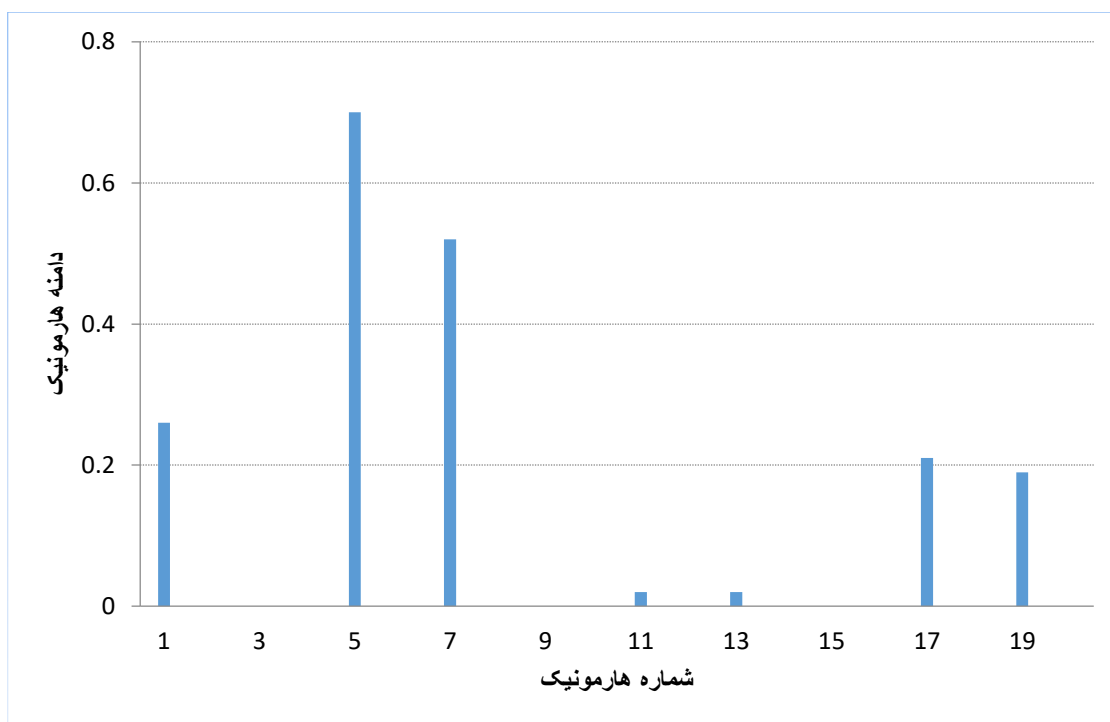
شکل (۲-۳): دامنه هارمونیک های شکل موج mmf فاصله هوایی موتور ۳۶ شیار با سیم پیچی $q = \frac{3}{7}$

شکل (۲-۳) دامنه هارمونیک های شکل موج mmf فاصله هوایی موتور ۳۶ شیار با سیم پیچی $q = \frac{3}{7}$ را نشان می دهد که از هارمونیک های ۷ و ۸ و ۱۰ و ۱۱ بیشترین دامنه را دارند بنابراین می توان با این نوع سیم پیچی تعداد قطب رتور می تواند ۱۴ و ۱۶ و ۲۰ و ۲۲ و یا مضارب صحیحی از این اعداد باشند تا گشتاور نسبتا مناسبی داشته باشیم. از بین تعداد قطب های ممکن ۲۸ قطب را به علت ضریب سیم پیچی مناسب ($k_w = 0.902$) انتخاب می کنیم.



شکل (۳-۳): دامنه هارمونیک های شکل موج mmf فاصله هوایی موتور ۳۶ شیار با سیم پیچی $q = \frac{3}{8}$

شکل (۳-۳) نشان می‌دهد که هارمونیک های ۴ و ۵ بیشترین دامنه را دارند بنابراین می‌توان با این نوع سیم‌پیچی تعداد قطب رتور می‌تواند ۸ و ۱۰ و یا مضارب صحیحی از ۸ و ۱۰ باشند تا گشتاور نسبتاً مناسبی داشته باشیم. که در اینجا ۳۲ قطب را به علت ضریب سیم‌پیچی مناسب ($k_w = 0,945$) انتخاب می‌کنیم.



شکل (۴-۳): دامنه هارمونیک های شکل موج mmf فاصله هوایی موتور ۳۶ شیار با سیم‌پیچی $q = \frac{2}{5}$

شکل (۴-۳) نشان می‌دهد که هارمونیک های ۵ و ۷ بیشترین دامنه را دارند بنابراین می‌توان با این نوع سیم‌پیچی تعداد قطب رتور می‌تواند ۱۰ و ۱۴ و یا مضارب صحیحی از ۱۰ و ۱۴ باشند تا گشتاور نسبتاً مناسبی داشته باشیم. از بین تعداد قطب های ممکن ۳۰ قطب را به علت ضریب سیم‌پیچی مناسب ($k_w = 0,933$) انتخاب می‌کنیم.

در فصل چهارم به بررسی نویز صوتی موتور مدولار نمونه با ۲۴ شیار و ۲۰ قطب ($q = \frac{2}{5}$ و $\frac{2}{7}$) پرداخته و سپس در فصل پنجم نویز صوتی چهار حالت بررسی شده در این بخش مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۵- تحلیل ماشین مدولار نمونه

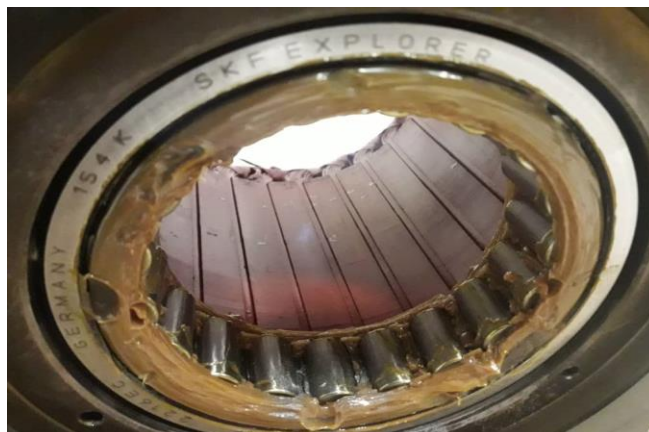
اکنون با توجه به توضیحات داده شده اطلاعات ابعادی یک موتور مدولار موجود را اندازه گیری کرده و در محیط شبیه سازی مورد بررسی قرار می گیرد.

۳-۵-۱ تعیین پارامترهای اساسی طراحی ماشین نمونه

در طراحی موتور های الکتریکی پارامترهای اساسی طراحی معمولاً به سفارش کارفرما تعیین می گردد. مقادیر این پارامترها از داده های یک موتور مدولار موجود در آزمایشگاه بدست آمده و شبیه سازی شده است. در جدول (۳-۱) این پارامترها نشان داده شده است. این مقادیر در طراحی های صورت گرفته در زمینه بهبود نویز نیز ثابت هستند.

جدول (۳-۱): مقادیر نامی موتور نمونه

ردیف	نام پارامتر	نماد	مقدار
۱	توان خروجی	P_{out}	۳٫۹ کیلو وات
۲	سرعت چرخش	n_s	۱۹۲ دور در دقیقه
۳	مقدار موثر ولتاژ فاز	V_{ph}	۳۶۰ ولت
۴	گشتاور متوسط	T	۱۹۶ نیوتن متر



شکل (۳-۵): استاتور موتور مدولار نمونه



شکل (۳-۶) : رتور موتور مدولار نمونه

در جدول (۳-۲) پارامترهای اساسی موتور نمونه را با استفاده از اطلاعات پلاک موتور بدست می‌آوریم.

جدول (۳-۲) : پارامترهای اساسی موتور نمونه

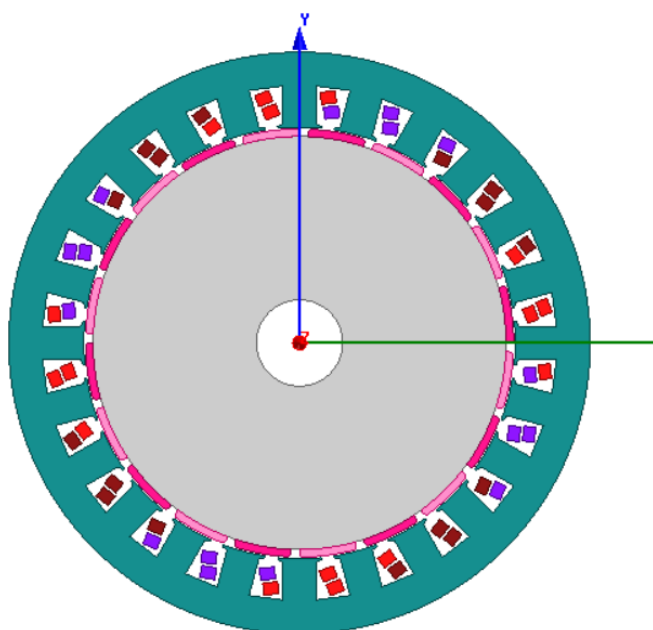
ردیف	نام پارامتر	نماد	مقدار
۱	تعداد فاز ها	m	۳
۲	تعداد دور سیم پیچ هر فاز	N_t	۳۸ دور
۳	چگالی شار ماکزیمم هسته	B_{CS}	۱٫۸ تسلا
۴	فرکانس ورودی	f	۳۲ هرتز
۵	بازده	η	۰٫۸۵
۶	چگالی جریان هادی	J_s	۸ آمپر بر میلی متر مربع

برای تحلیل ماشین نمونه نیاز است تا مدل ۲ بعدی و یا ۳ بعدی از ماشین رسم شود. به دلیل طولانی شدن زمان شبیه سازی بهتر است آن را به صورت ۲ بعدی رسم کرده و در نرم افزار المان محدود ماشین را تجزیه و تحلیل کرد.

با توجه به اطلاعات ابعادی ماشین نمونه در جدول (۳-۳) ماشین نمونه را در نرم افزار Ansys ترسیم و تحلیل الکترومغناطیسی می نماییم.

جدول (۳-۳) : اطلاعات ابعادی ماشین نمونه

ردیف	نام پارامتر	نماد	مقدار
۱	قطر داخلی رتور	D_{ir}	۲۲۰,۴ میلی متر
۲	قطر داخلی استاتور	D_{is}	۲۳۰ میلی متر
۳	قطر خارجی هسته استاتور	D_{os}	۳۱۰ میلی متر
۴	ارتفاع شیار استاتور	H_s	۲۰ میلی متر
۵	ضخامت آهنربای دائم	H_{pm}	۴ میلی متر
۶	طول کمان آهنربای دائم	W_{pm}	۲۹,۹۱ میلی متر
۷	طول یوغ استاتور	d_{cs}	۱۹ میلی متر
۸	طول محوری هسته	L	۲۰۰ میلی متر
۹	تعداد شیار استاتور	S_s	۲۴
۱۰	تعداد قطب رتور	P	۲۰
۱۱	طول فاصله هوایی	g	۰,۸ میلی متر



شکل (۷-۳): مدل دو بعدی ماشین نمونه

۳-۵-۲ انتخاب مواد تشکیل دهنده اجزای مختلف ماشین نمونه

با توجه به شکل (۷-۳) می‌توان با مدل کردن حالت دو بعدی به جای حالت سه بعدی در تحلیل الکترومغناطیسی باعث صرفه جویی در زمان و کاهش حجم محاسبات می‌شود. پس از ترسیم هندسه ماشین باید ماده تشکیل دهنده هر قسمت را به آن اختصاص داد. این کار با توجه به جدول (۴-۳) انجام می‌شود.

جدول (۴-۳): مشخصات مواد تشکیل دهنده اجزای مختلف ماشین نمونه

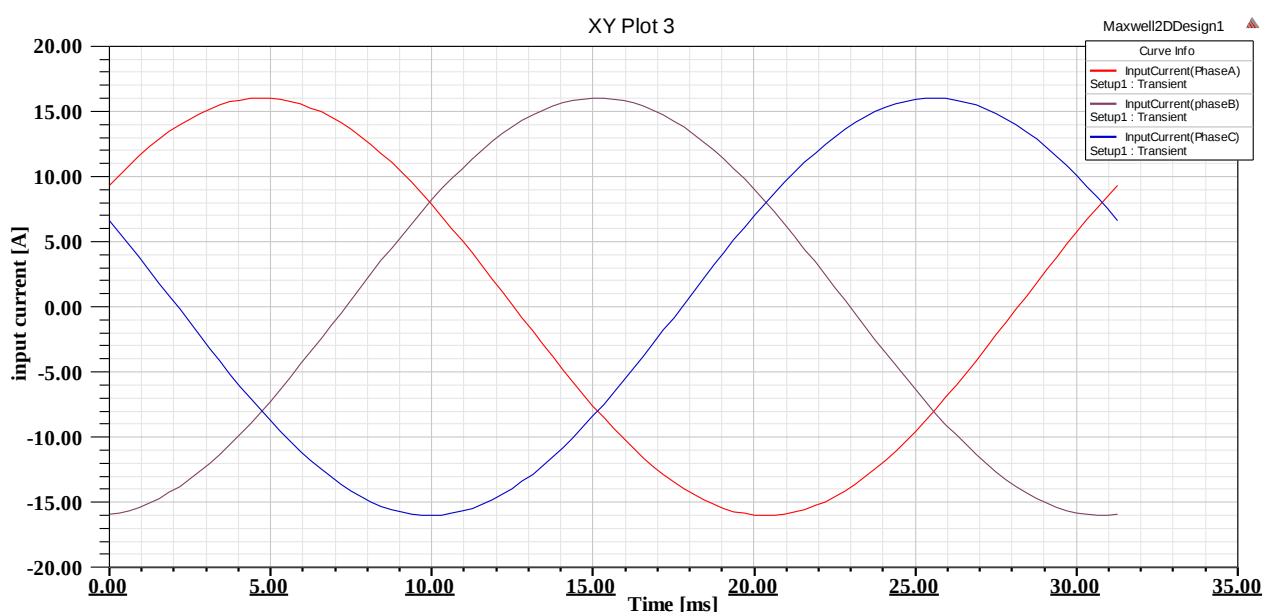
مشخصات الکتریکی	مشخصات مغناطیسی	نوع ماده	قطعه
-	-	Steel_1008	هسته استاتور
-	-	Steel_1008	هسته رتور
هدایت الکتریکی: $625000 \cdot \frac{1}{\Omega.m}$	$B_r = 1 \text{ T}$ $H_c = 995000 \cdot \frac{A}{m}$	NdFeB	آهنربای دائم
هدایت الکتریکی: $580000 \cdot \frac{1}{\Omega.m}$	$\mu_r = 1$	مس	سیم پیچ

۳-۵-۳ نحوه سیم پیچی و اختصاص تغذیه

سیم پیچی ماشین مدولار به صورت متمرکز بوده ، ترکیب سیم پیچی استاتور موتور نمونه به شکل چهار قطبی به صورت ذیل می باشد که دو قطب آن در ۱۲ شیار قرار داده می شود و دو قطب دیگر در ۱۲ شیار بعدی تکرار می شود.

$$\dots|C'A|A'A'|AB'|BB'|B'C|C'C'|CA'|AA'|A'B|B'B'|BC'|CC\dots$$

هرکدام از سه فاز به منابع جریان سینوسی با اختلاف فاز ۱۲۰ درجه ای متصل می باشند. شکل (۳-۸) شکل موج های جریان سه فاز را نشان می دهد.



شکل (۳-۸): شکل موج های جریان سه فاز ورودی موتور نمونه

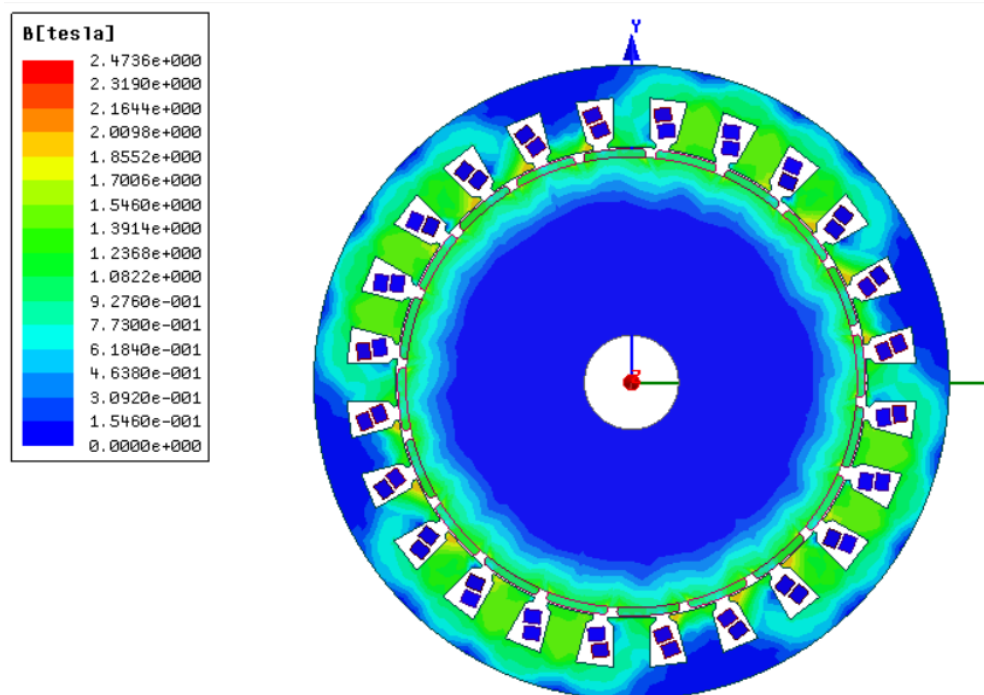
۳-۵-۴ اعمال شرایط مرزی

برای این که بتوان با شبیه سازی ، سیستم را مورد تحلیل الکترومغناطیسی قرار داد و نتایج را بدست آورد نیاز به اعمال شرایط مرزی می باشد. شرط مرزی عایق مغناطیسی برای مشخص کردن مرز محدوده ای که در آن میدان مغناطیسی وجود ندارد استفاده می شود. این شرط مرزی می تواند به سطحی که با یک فاصله در خارج ماشین، ماشین را در بر می گیرد و شار از آن خارج نخواهد شد اعمال شود. بر روی این سطح فقط مولفه مماسی چگالی شار وجود دارد و مولفه عمودی شار مغناطیسی بر روی آن صفر است. اندازه این ناحیه وابسته

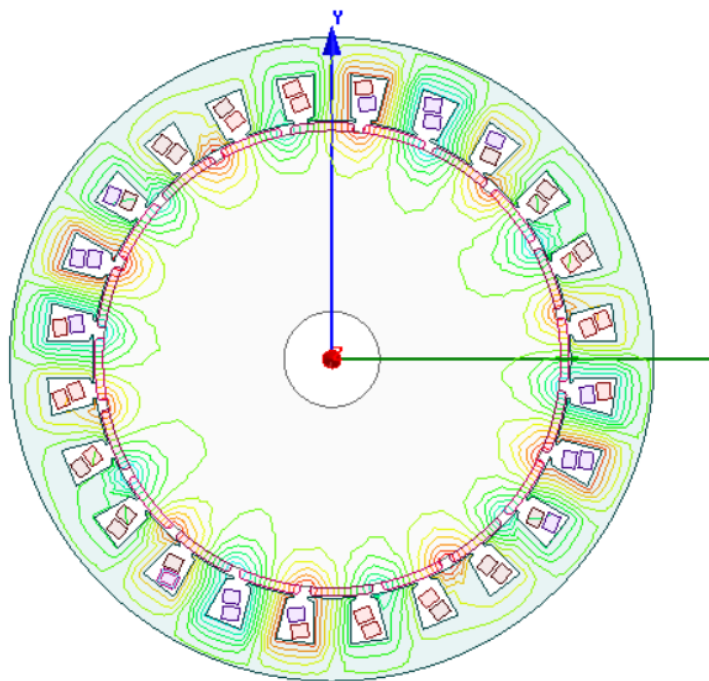
به ساختار موتور با داشتن اندک تجربه ای از تحلیل اجزاء محدود میتواند با یک دقت قابل قبول تعیین شود. [۲۶]

۳-۵-۵ تأیید صحت طراحی

با تحلیل الکترومغناطیسی ماشین طراحی شده صحت طراحی مورد بررسی قرار می گیرد. چنانچه قبلاً هم ذکر شد در این شبیه سازی از نرم افزار اجزاء محدود Ansys Maxwell 16.0 استفاده شده است. شکل (۳-۹)، توزیع چگالی شار مغناطیسی را در حالت گذرا نشان می دهد. همانطور که از شکل مشاهده می شود اشباع در هیچ نقطه ای از ماشین مخصوصاً در دندانه های استاتور اتفاق نمی افتد. همچنین در شکل (۳-۱۰) خطوط شار مغناطیسی نشان داده شده اند. این خطوط در واقع نشان دهنده مسیر شار مغناطیسی در داخل ماشین است.



شکل (۳-۹): نقشه رنگی توزیع چگالی شار موتور نمونه

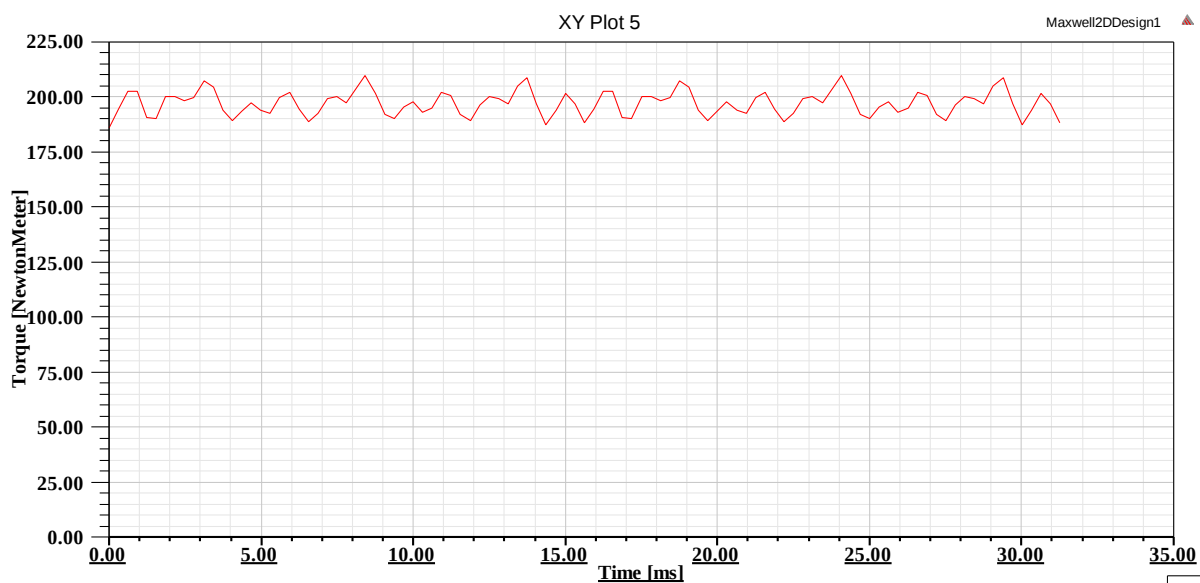


شکل (۳-۱۰): خطوط شار مغناطیسی موتور نمونه

۳-۵-۶ بررسی گشتاور و توان خروجی ماشین

با شبیه سازی موتور تحت شرایط نامی نتایج زیر خواهد بدست می آید:

با شبیه سازی صورت گرفته ، گشتاور موتور تحت شرایط نامی در شکل (۳-۱۱) نشان داده شده است:

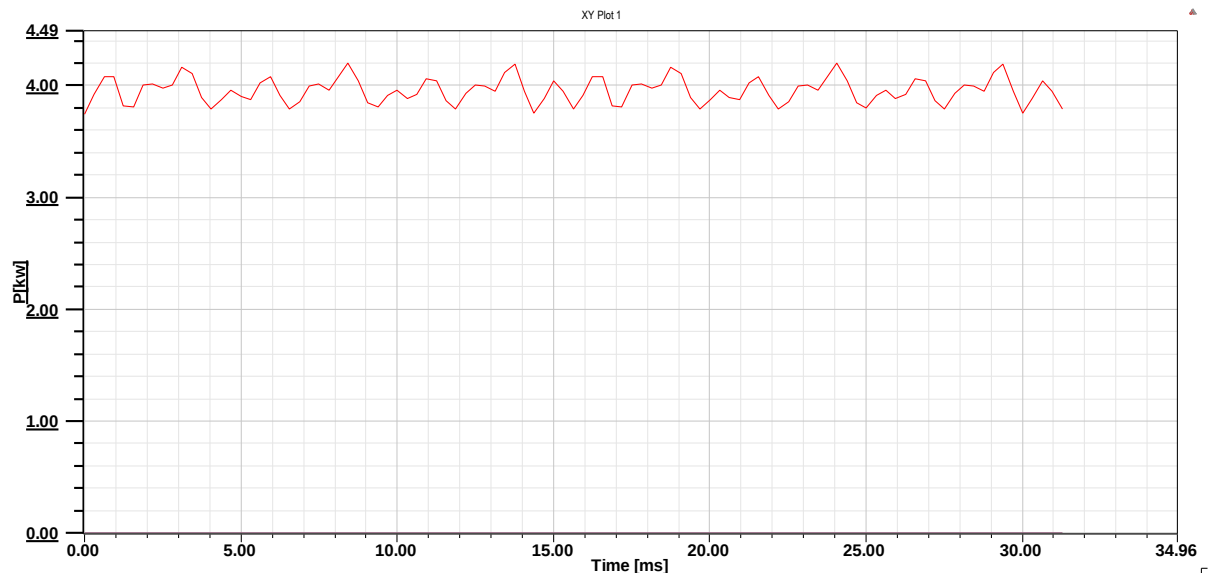


شکل (۳-۱۱): نمودار گشتاور نامی موتور ۲۴ شیار ۲۰ قطب

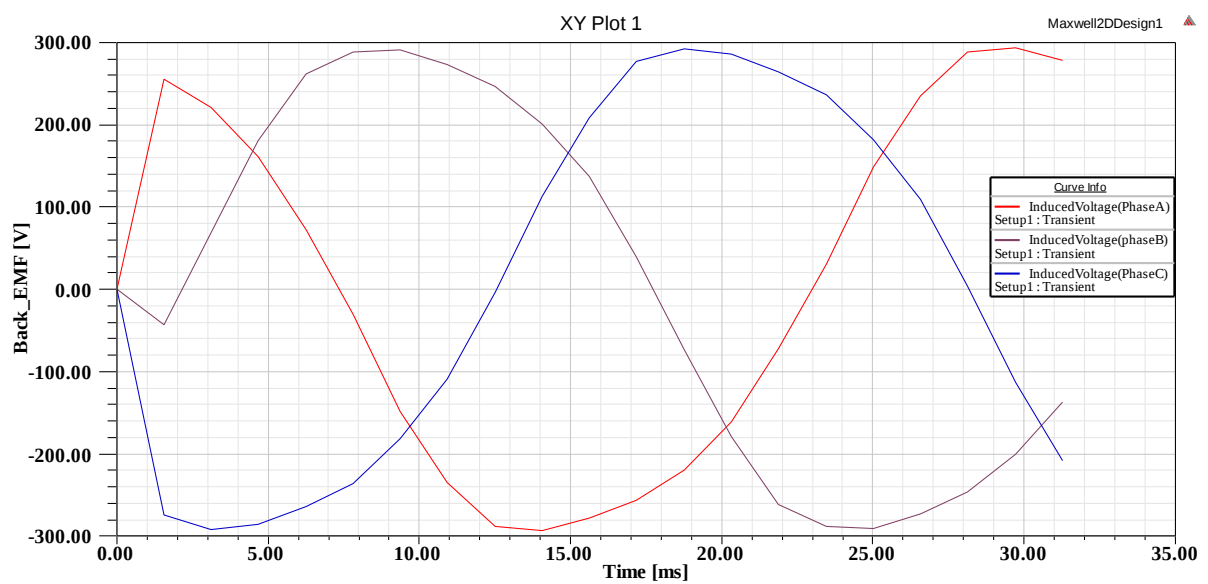
با توجه به شکل فوق و با استفاده از رابطه (۳-۴) ریپل گشتاور موتور برابر است با:

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{average}} = \frac{206 - 185}{196} = 0.11 \quad (4-3)$$

با توجه به گشتاور ماکزیمم زاویه دلتا حدوداً ۳۲ درجه بدست می آید ، که در محدوده پایدار قرار می گیرد. و همچنین توان خروجی و ولتاژ القایی در شکل های (۳-۱۲) و (۳-۱۳) نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۲): نمودار توان خروجی موتور مدولار نمونه



شکل (۳-۱۳): Back_EMF بدست آمده از شبیه سازی موتور نمونه

۳-۵-۷ تحلیل الکترومغناطیسی

اندازه فشارهای الکترومغناطیسی ایجاد شده در امتداد فاصله هوایی بین روتور و استاتور با استفاده از روش تانسور تنش ماکسول محاسبه می شود. [۱۷]

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\mu_0} B_i B_j - \frac{1}{2\mu_0} B^2 \delta_{ij} \quad (5-3)$$

σ_{ij} تنش ناشی از میدان الکترومغناطیسی است، μ_0 نفوذپذیری خلا است، B_i و B_j مولفه های i و j از چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی هستند و B اندازه آن است. سپس نیروهای حاصل در هر سطح دندانه با ضرب مساحت هر سطح دندانه به دست می آید. که با استفاده از نرم افزار المان محدود Ansys Maxwell پس از ترسیم هندسه موتور به صورت دو بعدی این کار صورت می گیرد.

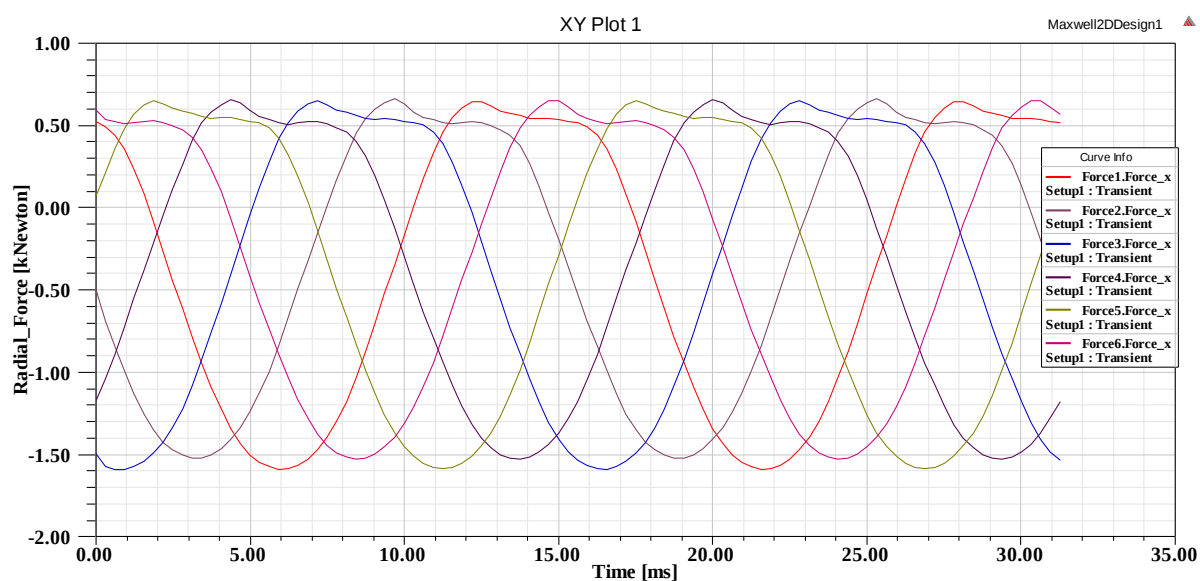
۸-۵-۳ بررسی نیروهای شعاعی و مماسی موتور نمونه

با فرض تحریک استاتور، نیروی شعاعی و نیروی مماسی قابل قبول برای هر دندانه استاتور محاسبه شده است. نیروهای حاصل به زمان و موقعیت زاویه ای بستگی دارد. لازم به ذکر است که برای موتور مورد مطالعه به دلیل آرایش خاص سیم پیچی، حداکثر مقدار نیرو برای همه دندانه های استاتور یکسان نیست جدول (۵-۳) خانواده های مختلف دندانه را نشان می دهد. برای هر خانواده، حداکثر نیروهای شعاعی و مماسی (دامنه های داده شده در نیوتن [N]) گنجانده شده است. هر خانواده از شش دندانه تشکیل شده است که مقدار نیرو برای آنها یکسان است. بین دو خانواده مختلف، تفاوت در مقادیر دامنه و جابجایی فاز وجود دارد. شکل (۳-۱۴) و (۳-۱۵) نیروهای شعاعی و مماسی برای خانواده های دندانه های مختلف را نشان می دهد.

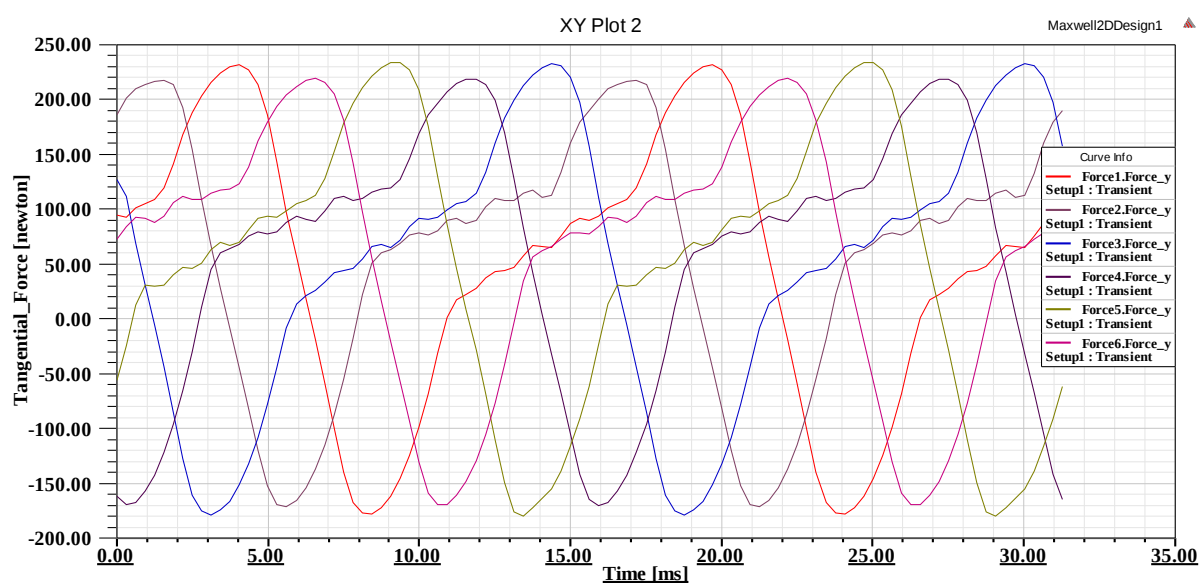
جدول (۵-۳): حداکثر نیروهای شعاعی و مماسی بر روی دندانه های استاتور در ساختار موتور نمونه

خانواده دندانه ها	حداکثر مقدار نیروی شعاعی (N)	حداکثر مقدار نیروی مماسی (N)
۱۹-۱۳-۷-۱	۱۵۸۵	۳۴۷
۲۰-۱۴-۸-۲	۱۵۵۶	۲۳۵
۲۱-۱۵-۹-۳	۱۵۴۱	۲۲۸
۲۲-۱۶-۱۰-۴	۱۵۱۷	۳۳۵
۲۳-۱۷-۱۱-۵	۱۶۱۸	۲۴۶

۲۱۷	۱۴۸۸	۲۴-۱۸-۱۲-۶
-----	------	------------

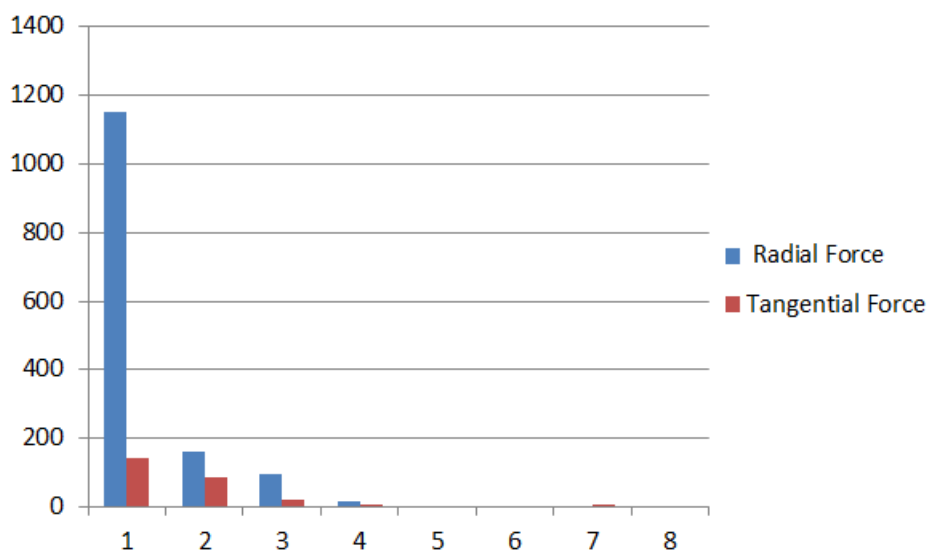


شکل (۳-۱۴): نیروهای شعاعی بر روی دندانه های استاتور برحسب زمان در موتور نمونه



شکل (۳-۱۵): نیروهای مماسی بر روی دندانه های استاتور موتور نمونه برحسب زمان در موتور نمونه

حال به تحلیل هارمونیک نیروهای شعاعی و مماسی می پردازیم. برای این کار دامنه هارمونیک های نیروهای شعاعی و مماسی را با استفاده از تحلیل تبدیل فوریه سریع بدست می آوریم. که نتایج در شکل (۳-۱۶) مشاهده می شود.



شکل (۳-۱۶): دامنه هارمونیک‌های نیروهای شعاعی و مماسی موتور نمونه

همانطور که مشاهده می‌شود دامنه هارمونیک‌های نیروهای شعاعی بیشتر از نیروهای مماسی می‌باشد، بنابراین نیروهای شعاعی نسبت به نیروهای مماسی سهم بیشتری را در نویز صوتی دارند. نیروهای شعاعی حاصل نیروی جاذبه بین میدان‌های مغناطیسی رتور و استاتور می‌باشد و نیروهای مماسی حاصل چرخش میدان مغناطیسی رتور می‌باشد.

فصل ۴ بررسی نویز صوتی موتور مدولار نمونه

۴-۱- مقدمه

در این فصل به مفاهیم نویز صوتی و انواع نویز صوتی ماشین های الکتریکی و نحوه اندازه گیری آن می پردازیم و در آخر ماشین مدولار نمونه موجود را با استفاده از تحلیل ساختاری فرکانس های طبیعی موتور را بدست آورده و در ادامه با تحلیل فرکانسی سطح اندازه گیری صوت را محاسبه می نماییم.

۴-۲- تولید و انتشار نویز در ماشین های الکتریکی

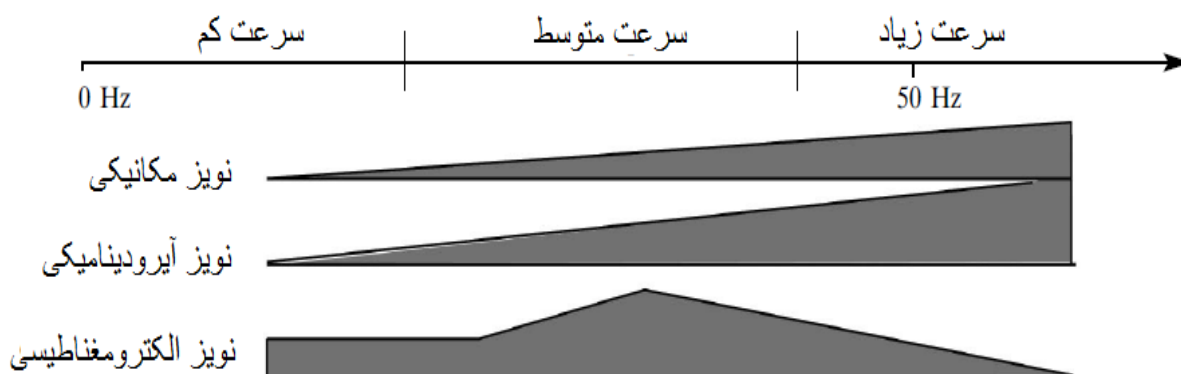
در ماشین های الکتریکی عامل لرزش و نویز صوتی یکی می باشد و بیشتر منظور از نویز صوتی امواج مزاحم قابل شنیدن توسط انسان می باشد که تقریباً فرکانس آن بین ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز می باشد. منابع نویز صوتی را می توان به سه دسته کلی الکترومغناطیسی، مکانیکی و آیرودینامیکی تقسیم بندی کرد. منبع الکترومغناطیسی در موتورهای با توان اسمی پایین تا متوسط (کمتر از ۱۵ کیلو وات) و به خصوص در سرعت چرخش کمتر از ۱۵۰۰ دور در دقیقه بر مابقی چیره می شود.

۴-۲-۱- تاثیر ریپل گشتاور بر لرزش و نویز صوتی ماشین الکتریکی

با مطالعات صورت گرفته در زمینه تاثیر ریپل گشتاور بر روی نویز صوتی می توان به این مهم دست یافت که کاهش ریپل گشتاور، نویز صوتی را می تواند کاهش دهد، البته این بدین معنا نیست که هرچه میزان کاهش ریپل گشتاور بیشتر باشد نویز صوتی کمتری را خواهیم داشت بلکه کاهش بیش از اندازه ریپل گشتاور عملکرد موتور را تحت تاثیر قرار می دهد.

۴-۲-۲- تأثیر سرعت در ایجاد نویز و ارتعاش

در ماشین های الکتریکی سرعت بالا تاثیر منابع نویز مکانیکی و آیرودینامیکی نسبت به نویز الکترومغناطیسی غالب است و نویز الکترومغناطیسی بیشتر در موتورهای با سرعت کمتر از ۱۵۰۰ دور بر دقیقه اهمیت پیدا می کند.



شکل (۴-۱) : تأثیر سرعت در ایجاد نویز و ارتعاش از مرجع [۶]

۳-۲-۴ بررسی نویز الکترومغناطیسی

نویز مغناطیسی باید در طراحی اصلی به حداقل برسد چون کاهش آن در موتور موجود بسیار دشوار است. نویز مغناطیسی اساساً ساختاری است و نمی‌تواند به وسیله پوشش داخلی، صدا کاهش یابد. نویز ناشی از بدنه موتور توسط ارتعاش هسته یا دندانه استاتور به وجود می‌آید. هیچ روش عملی برای ایزوله کردن لایه‌های اصلی استاتور از این محوطه وجود ندارد. بنابراین، این سر و صدا توسط محفظه خارجی از موتور منتقل می‌شود و سپس از لرزش سطح خارجی به هوا منتقل می‌شود. نیروهای اعمال‌شده به دندانه‌های استاتور به طور مساوی در هر دندانه در هر لحظه از زمان توزیع نمی‌شوند، آن‌ها با شدت‌های مختلف در دندانه‌های مختلف اعمال می‌شوند و به موقعیت نسبی دندانه روتور و استاتور وابسته هستند. این امر منجر به امواج نیرو بر روی محیط استاتور خواهد شد که حالت‌های خمشی ارتعاش را تولید خواهد کرد.

مدهای پایین ارتعاش ممکن است فرکانس‌های تشدید نزدیک به فرکانس‌های نیرو را ایجاد کنند.

۳-۴ روش مدل سازی عددی نویز صوتی

این مدل ترکیبی از تجزیه و تحلیل الکترومغناطیسی و ساختاری همراه با یک حل کننده مرز صوتی است. ابتدا نیروهای الکترومغناطیسی هم در جهت شعاعی و هم جهت مماسی سطح دندانه استاتور با تلفیق هندسه موتور، خواص ماده و عملکرد محاسبه می‌شوند. سپس تجزیه و تحلیل‌های مد و هارمونیک برای بدست آوردن فرکانس‌های تشدید و فرکانس‌های طبیعی و شکل‌های مد مربوط به موتور انجام می‌شود و نیروهای

محرك در دامنه فرکانس بر روی سطح دندان شیار اعمال می شود تا لرزش سطوح خارجی موتور را محاسبه کند. سرانجام ، صدای صوتی ناشی از لرزش موتور به عنوان سطح فشار صدا از سطح موتور پیش بینی می شود. این اندازه گیری بر روی لرزش و سر و صدای ایجاد شده به دلیل منابع الکترومغناطیسی متمرکز شده است و فرض می شود که موتور خارج از مرکز و نامتعادل نبوده و همچنین منابع ارتعاش و سر و صدا مکانیکی و آیرودینامیکی نیز مورد چشم پوشی قرار گرفته اند.

۴-۳-۱ تحلیل ساختاری

برای محاسبه فرکانس های طبیعی ماشین به روش المان محدود، جسم مورد مطالعه به صورت مجموعه ای از عناصر کوچک مدل گردیده که هر عنصر در حکم یک سیستم جرم - فنر - دمپر می باشد و با مطالعه نحوه نوسان این مجموعه از عناصر، رفتار ارتعاشی جسم و در نتیجه فرکانس های طبیعی آن بدست می آید. در این روش هر عنصر از یک جرم نقطه ای کوچک تشکیل گردیده که به صورت یک گره در نظر گرفته می شود. گره ها آنقدر کوچک هستند که خود فاقد رفتار ارتعاشی و کشسانی بوده و تنها رفتار نوسانی خواهند داشت. هر دو گره مجاور از طریق یک فنر کوچک به یکدیگر متصل هستند و با حل معادله نوسان برای مجموعه این گره ها و فنرها، فرکانس های طبیعی ماشین بدست می آید. [۲۶]

در روش های تحلیلی اولیه در بررسی نوین تولیدی ماشین های الکتریکی اغلب فقط ارتعاشات استاتور در نظر گرفته می شود ، اگرچه پاسخ ارتعاش ماشین با در نظر گرفتن پوسته با ارتعاش استاتور تنها تفاوت دارد اما در نظر گرفتن پوسته در واقع سبب پیچیدگی محاسبات می شود. چنانچه از پوسته چشم پوشی شود محاسبه سطح ارتعاش استاتور پاسخ قابل قبولی نسبت به سطح ارتعاش کل ماشین می دهد. در واقع با صرف نظر از پوسته سطح ارتعاش بدست آمده اندکی نسبت به حالتی که پوسته در محاسبات لحاظ شود بیشتر است اما دامنه تغییرات قابل قبول می باشد. [۲۷] .

برای محاسبه فرکانس های طبیعی موتور طراحی شده نیاز است تا مدلی ۳ بعدی از ماشین رسم شود و به روش المان محدود رفتار ماشین را تجزیه و تحلیل کرد.

برای این کار نیز از نرم افزار تخصصی Ansys WorkBench، با استفاده از تحلیل مودال نرم افزار به محاسبه فرکانس های طبیعی و بدست آوردن شکل مدها می پردازیم، پس از وارد کردن هندسه ترسیم شده در محیط المان محدود ابتدا نیاز است تا جنس مواد و مش بندی اعمال شود.

تحلیل مودال یکی از پر کاربرد ترین روش ها برای بدست آوردن سطح فشار صوت می باشد، بدین علت که به طور همزمان فرکانس های طبیعی و شکل مدها را می توان استخراج کرد و همچنین نتایج بدست آمده از تحلیل مودال، برای محاسبه پاسخ های هارمونیک گذرا مورد استفاده قرار می گیرد، برای چنین تحلیلی معادله (۱-۴) در نظر گرفته می شود.

$$(\omega^2[M] + j\omega[C] + [K])\{p\} = \{f\} \quad (1-4)$$

که در این معادله M ماتریس جرم، C ماتریس میرایی، K ماتریس سختی، ω فرکانس آشفتگی، F تحریکی است که به سیستم اعمال می شود، p سطح فشار صوت یا در واقع مجهولی است که در اینجا می خواهیم به دست بیاوریم. از حل چنین معادله ای سطح فشار صوتی متناسب با تحریک اعمال شده به سیستم به دست می آید.

دو روش برای تحلیل هارمونیک وجود دارد:

۱. روش کامل^۱: در این روش به دنبال پیدا کردن ماتریس جابه جایی هستیم که با استفاده از (M) ماتریس جرم، (C) ماتریس میرایی، (K) ماتریس سختی، (F) بردار تحریک بدست می آوریم. در واقع زمانی که تحریک را انجام می دهیم مستقیماً فشار سطح صوت را محاسبه نمی کنیم بلکه ماتریس جابه جایی را محاسبه می کنیم.

۲. روش برهم نهی مودال^۲: در این روش در واقع ابتدا یک تحلیل مودال انجام داده و شکل مدها را بدست آورده و در ادامه سهم هریک از این شکل مدها در موج نهایی محاسبه می کنیم.

^۱ Full Method

^۲ modal superposition

۴-۳-۲ تحلیل فرکانسی

در این بخش با انجام تحلیل فرکانسی صوت تولیدی و شتاب ذرات تشکیل دهنده استاتور مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور مشابه با تحلیل ساختاری از نرم افزار المان محدود استفاد می‌گردد. در اینجا نیز همانند تحلیل ساختاری از مدل ۳ بعدی استاتور در محیط المان محدود توسط المان Harmonic Response استفاده کرده و در نهایت با اعمال نیروهای الکترومغناطیسی به سطح دندانه های استاتور و با مش بندی مناسب، نویز موتور را اندازه گیری می‌کنیم.

۴-۴-۴ تحلیل ساختاری موتور نمونه

در تحلیل ساختاری موتور به محاسبه فرکانس های طبیعی موتور می‌پردازیم.

۴-۴-۱ انتخاب مواد در تحلیل ساختاری

ابتدا برای بدست آوردن فرکانس های طبیعی موتور نمونه در نرم افزار المان محدود باید جنس و مشخصات مکانیکی مواد سازنده قسمت هایی از موتور که در تحلیل ساختاری مورد بررسی قرار می‌گیرند، را تعیین کنیم. در جدول (۴-۱) مشخصات مواد و پارامترهای مورد نیاز برای تحلیل ساختاری و فرکانسی موتور داده شده است.

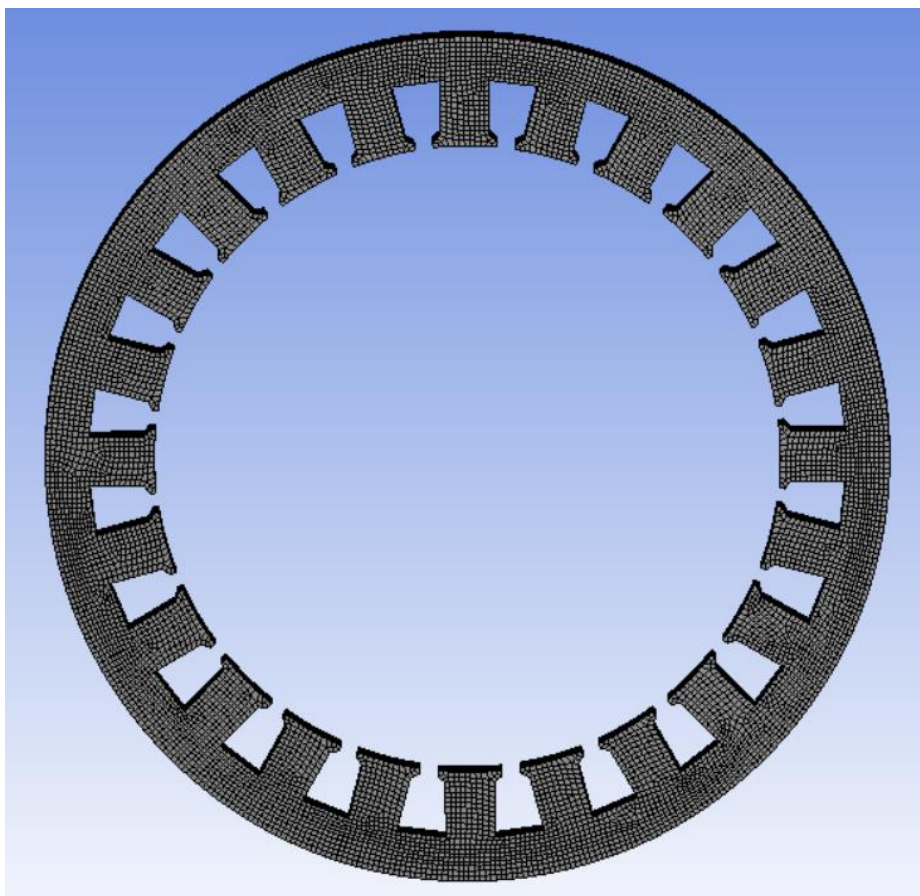
جدول (۴-۱) : مشخصات مکانیکی هسته استاتور

قطعه	جنس ماده	چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	ضریب یانگ (MPa)	نسبت پواسون
هسته استاتور	Structural Steel	۷۸۵۰	۲۰۰۰۰۰	۰,۳

۴-۴-۲ مش بندی

مش بندی اهمیت بسیار زیادی بر حل مساله دارد. اگر مش بیش از اندازه بزرگ باشد دقت جواب های بدست آمده کم بوده و حتی ممکن است فرکانس های طبیعی و پاسخ هارمونیکی اشتباه باشد. از آنجایی که در این تحلیل نیاز است تا استاتور به شکل ۳ بعدی مدل سازی شود ایجاد مش بیش از اندازه کوچک منجر به طولانی

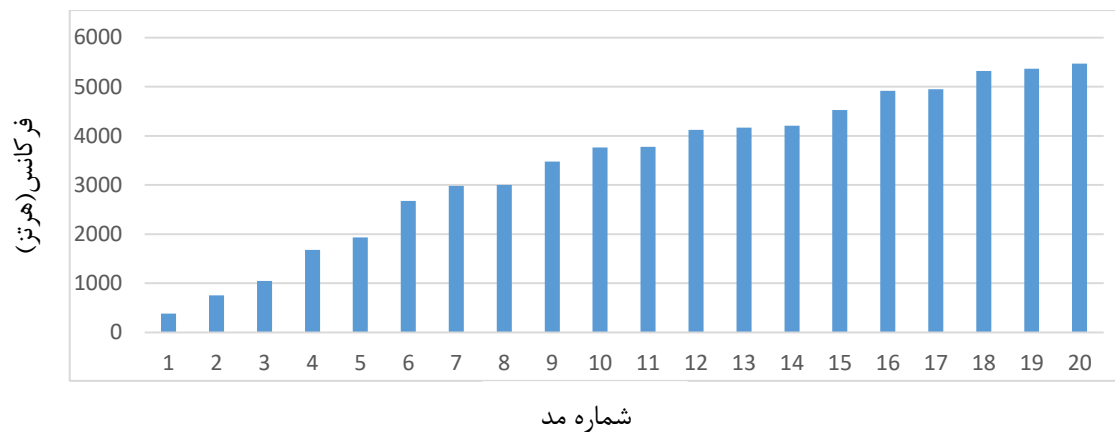
شدن زمان حل مساله شده و يا حافظه كامپيوترهاي موجود قادر به حل مساله نباشد. شكل (۲-۴) يك مش بندی مناسب بر روی استاتور ۲۴ شيار طراحی شده نشان داده است.



شكل (۲-۴) : مش بندی استاتور ۲۴ شيار

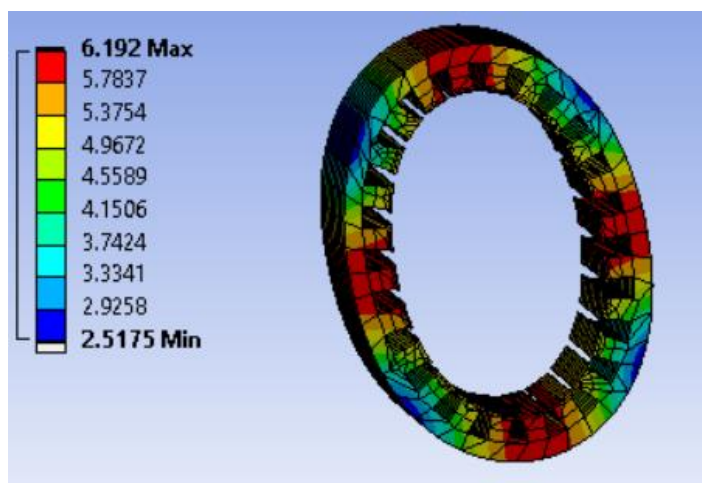
۳-۴-۴ نتايج حاصل از تحليل ساختاری

پس از مراحل مش بندی با اجرای شبیه سازی موتور، می توان فرکانس های طبیعی موتور را تعیین کرد. شكل (۳-۴) فرکانس های طبیعی موتور را نشان می دهد. که به علت زیاد بودن فرکانس های طبیعی این ساختار تنها ۲۰ فرکانس اول را در اینجا به عنوان نشان داده شده است. مطابق با این نمودار اولین فرکانس طبیعی عدد ۳۸۴ هرتز می باشد.

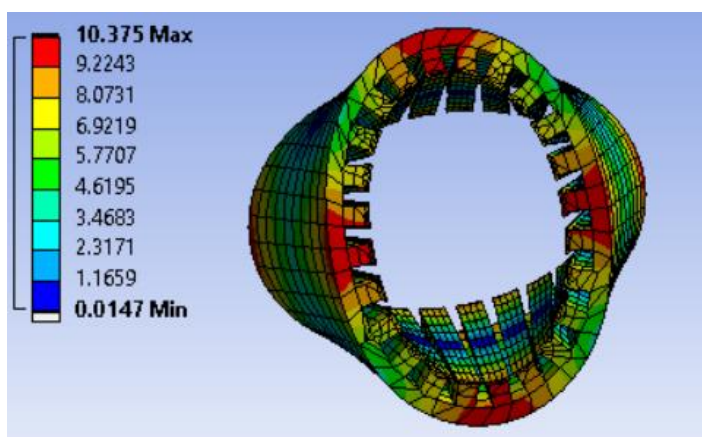


شکل (۳-۴): فرکانس‌های طبیعی استاتور ۲۴ شیار

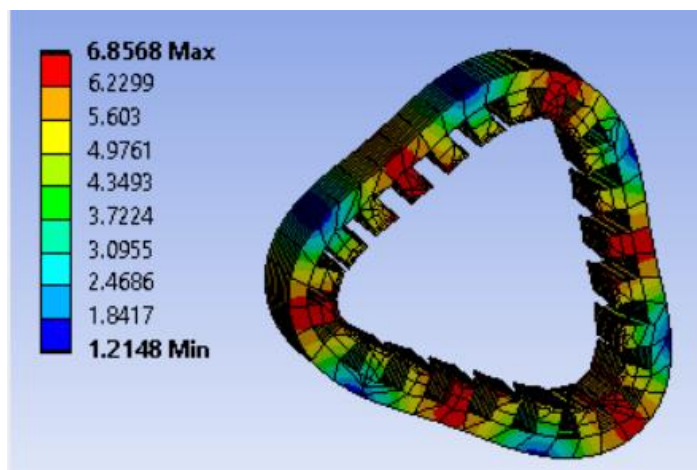
شکل‌های (۴-۴)، (۵-۴) و (۶-۴) تغییر شکل استاتور موتور موجود در مدهای مختلف را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۴): تغییر شکل استاتور موتور نمونه در فرکانس ۳۸۴ هرتز



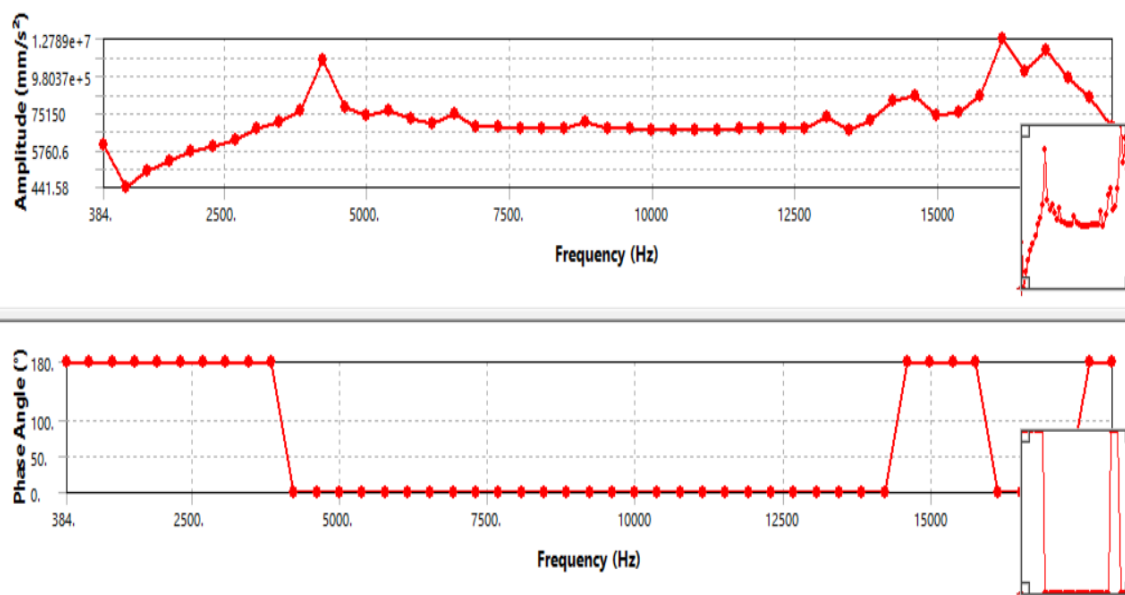
شکل (۵-۴): تغییر شکل استاتور موتور نمونه در فرکانس ۷۵۴ هرتز



شکل (۴-۶): تغییر شکل استاتور موتور نمونه در فرکانس ۱۰۴۷ هرتز

۴-۵- نتایج حاصل از تحلیل فرکانسی

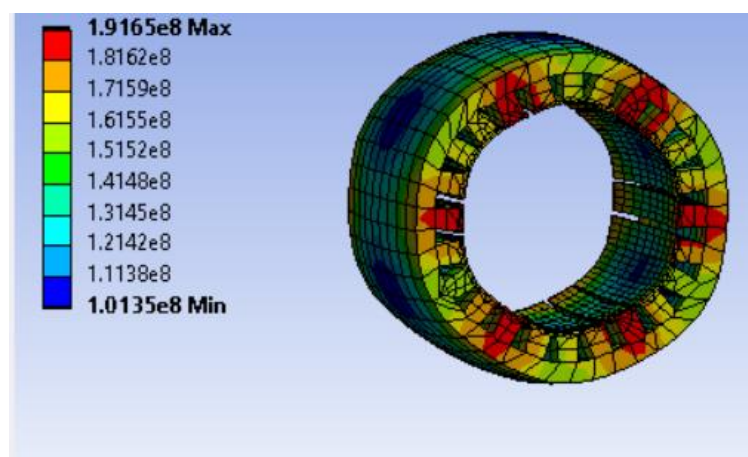
با اعمال نیروهای الکترومغناطیسی به دندانه های استاتور می توان به تحلیل فرکانسی بپردازیم. شتاب ذرات موتور در پاسخ به نیروهای شعاعی و مماسی اعمال شده بر سطح دندانه استاتور از جمله مواردی است ، که معمولاً در بررسی لرزش ماشین های الکتریکی بررسی می شود. شکل (۴-۷) نمودار مقدار شتاب ذرات به همراه زاویه فاز آن در فرکانس های نزدیک به فرکانس طبیعی نشان می دهد.



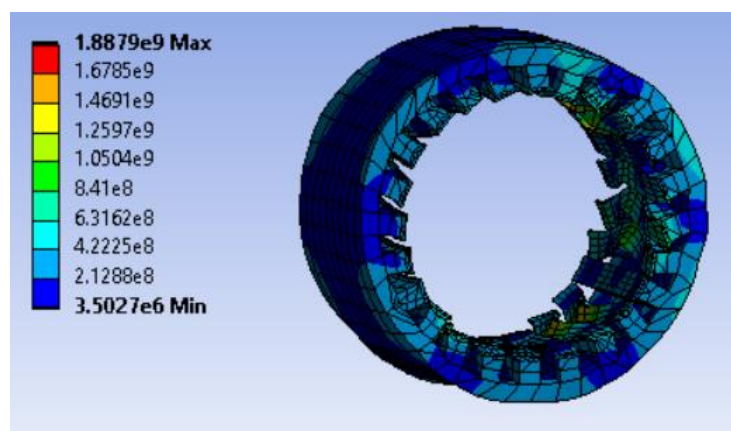
شکل (۴-۷) نمودار مقدار شتاب ذرات به همراه زاویه فاز در موتور نمونه

با توجه به شکل (۴-۷) و نتایج بدست آمده ، در فرکانس های ۴۲۲۴ ، ۱۶۱۲۸ و ۱۶۸۹۶ هرتز بیشترین شتاب ذرات را می توان مشاهده کرد که این نتیجه به ما نشان دهد که فرکانس تحریک با دامنه قابل توجه در محدوده این فرکانس ها یا در واقع نزدیک به فرکانس طبیعی می باشد ، که این فرکانس ها در به وجود آمدن نویز صوتی نقش بسزایی خواهند داشت.

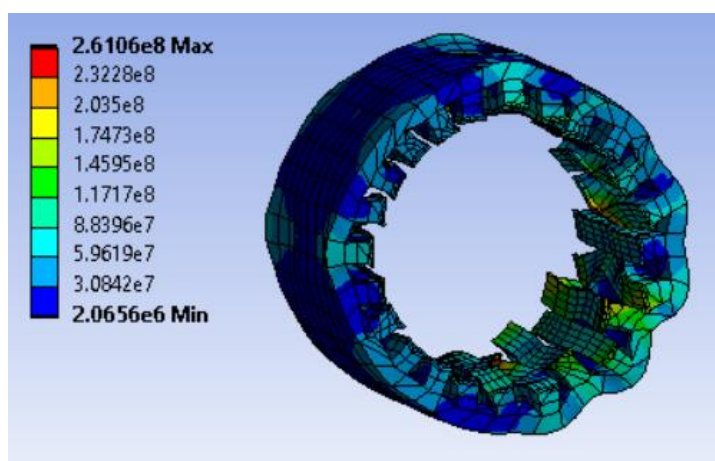
شکل های (۴-۸) و (۴-۹) و (۴-۱۰) شتاب بخش های مختلف استاتور نشان داده شده است. شتاب ذرات در فرکانس های ۴۲۲۴ و ۱۶۱۲۸ و ۱۶۸۹۶ هرتز بیشترین شتاب را داشته اند. واحد مقدارهای اندازه گیری شده بر حسب میلی متر بر مجذور ثانیه می باشد.



شکل (۴-۸) : شتاب ذرات استاتور ۲۴ شیار ۲۰ قطب در فرکانس ۴۲۲۴ هرتز در موتور نمونه

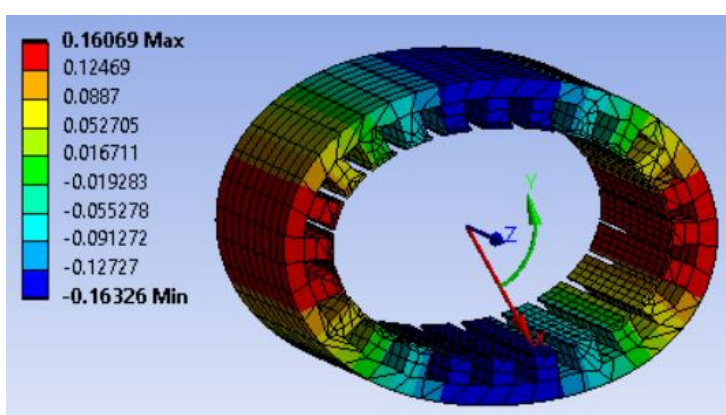


شکل (۴-۹) : شتاب ذرات استاتور ۲۴ شیار ۲۰ قطب در فرکانس ۱۶۱۲۸ هرتز در موتور نمونه

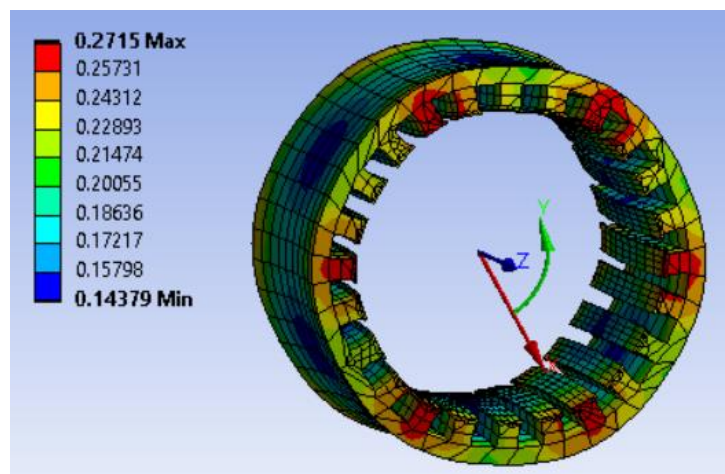


شکل (۴-۱۰) : شتاب ذرات استاتور ۲۴ شیار ۲۰ قطب در فرکانس ۱۶۸۹۶ هرتز در موتور نمونه

نتایج شبیه سازی همچنین نشان می‌دهد که جابه جایی در راستای شعاعی در اولین فرکانس طبیعی یعنی ۳۸۴ هرتز و فرکانس های ۴۲۲۴ ، ۱۶۱۲۸ و ۱۶۸۹۶ هرتز بیشترین مقدار را دارند و در بقیه فرکانس ها جابه جایی کمتر از ۰,۰۸ میلی متر می‌باشد ، در حالیکه در بیشترین جابه جایی در فرکانس ۴۲۲۴ هرتز به مقدار ۰,۲۷ میلی متر می‌باشد. جابه جایی ها در فرکانس های ۳۸۴ و ۴۲۲۴ هرتز به ترتیب در شکل های (۴-۱۱) و (۴-۱۲) نشان داده شده است.



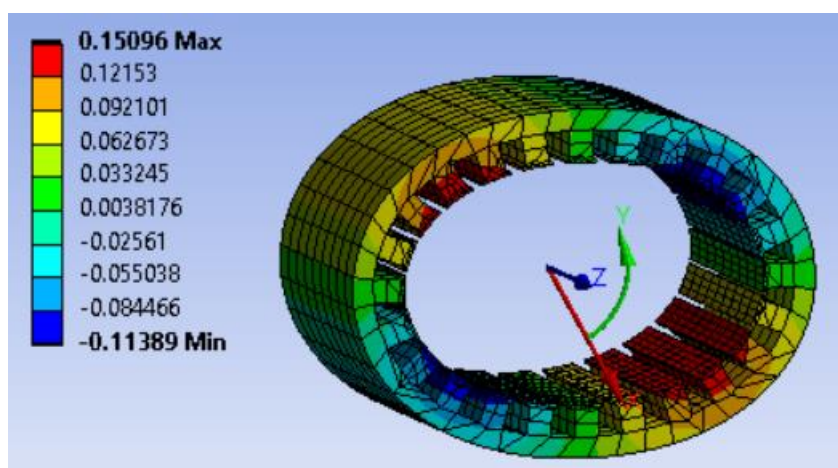
شکل (۴-۱۱) : جابه جایی ذرات در راستای شعاعی در فرکانس ۳۸۴ هرتز ماشین نمونه



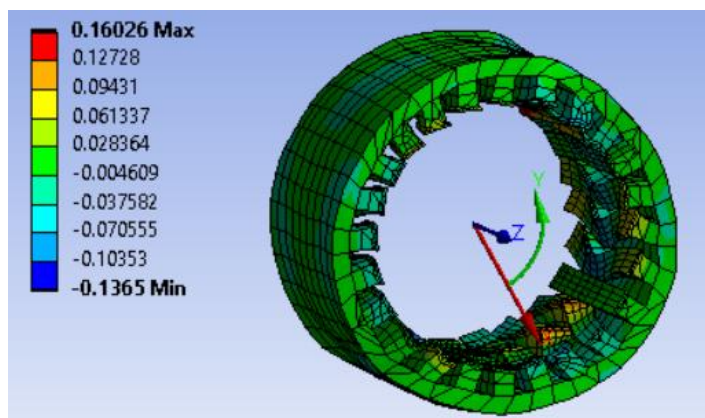
شکل (۴-۱۲): جابه جایی ذرات در راستای شعاعی در فرکانس ۴۲۲۴ هرتز ماشین نمونه

با بررسی جابه جایی در راستای مماسی نیز به این نتایج رسیده که جابه جایی در فرکانس های ۳۸۴ و ۱۶۱۲۸ هرتز بیشترین جابه جایی را در راستای مماسی داشته اند و در بقیه فرکانس ها جابه جایی کمتر ۰,۰۱ میلی متر می باشد.

بیشترین جابه جایی در فرکانس ۱۶۱۲۸ هرتز به مقدار ۰,۱۶ میلی متر می باشد که این نشان دهنده آن است که تشدید به وجود آمده در محدوده این فرکانس ناشی از نیروهای مماسی بر دندانه های استاتور می باشد. شکل های (۴-۱۳) و (۴-۱۴) به ترتیب جابه جایی در فرکانس های ۳۸۴ و ۱۶۱۲۸ هرتز را نشان می دهد.

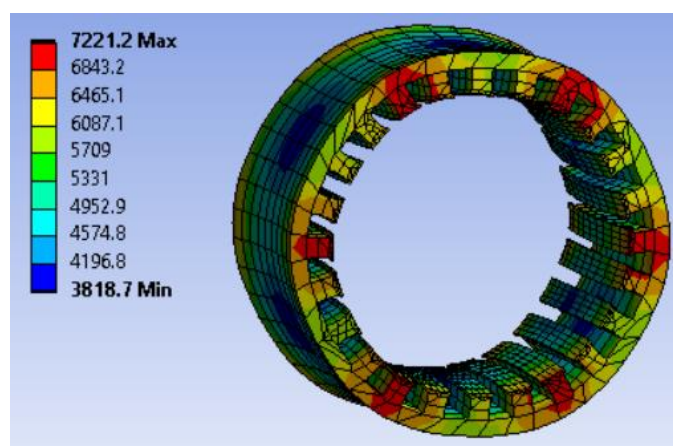


شکل (۴-۱۳): جابه جایی در راستای مماسی در فرکانس ۳۸۴ هرتز در موتور نمونه

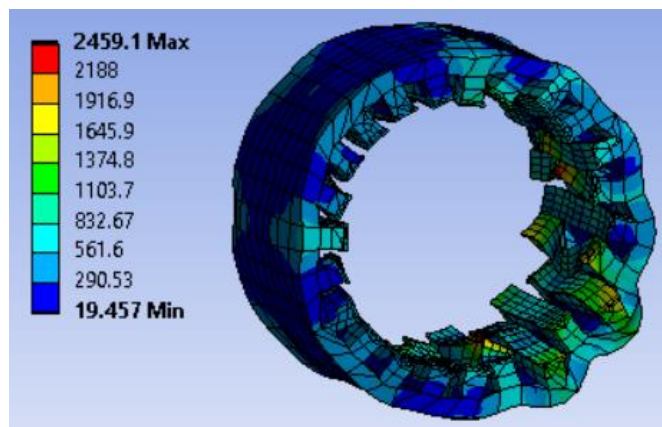


شکل (۴-۱۴): جابه جایی در راستای مماسی در فرکانس ۱۶۱۲۸ هرتز در موتور نمونه

در تحلیل نتایج بدست آمده در ابزار سنجش سرعت ذرات فرکانس های ۴۲۲۴ و ۱۶۸۹۶ هرتز بیشترین سرعت را داشته اند. بیشترین سرعت در فرکانس ۴۲۲۴ هرتز به مقدار ۷۲۲۱ میلی متر بر ثانیه می باشد. شکل های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) به ترتیب سرعت ذرات در فرکانس های ۴۲۲۴ و ۱۶۸۹۶ هرتز را نشان می دهد.



شکل (۴-۱۵): سرعت ذرات در فرکانس ۴۲۲۴ هرتز در موتور نمونه

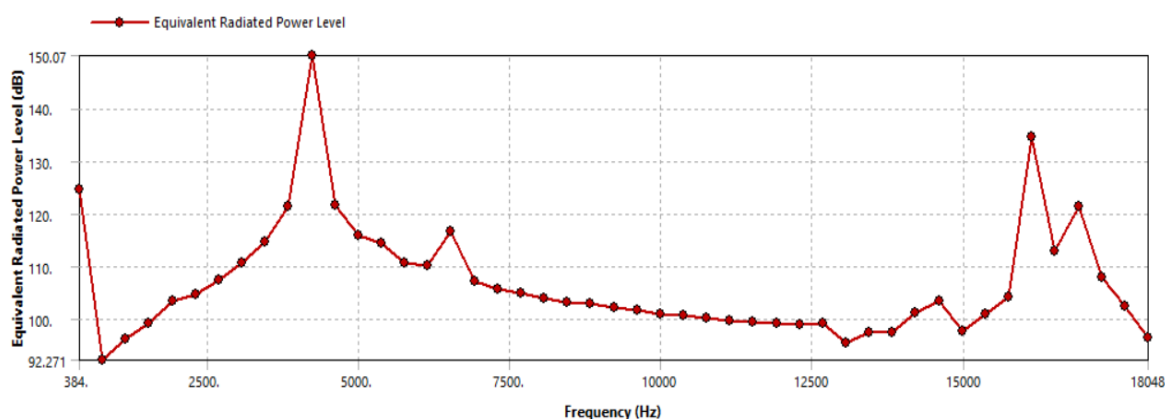


شکل (۴-۱۶): سرعت ذرات در فرکانس ۱۶۸۹۶ هرتز در موتور نمونه

از نتایج بدست آمده می‌توان فهمید که فرکانس‌های ۳۸۴ ، ۴۲۲۴ ، ۶۵۲۸ ، ۱۶۱۲۸ و ۱۶۸۹۶ هرتز از مهمترین فرکانس‌ها در افزایش نویز صوتی می‌باشند.

اکنون ، نویز صوتی موتور بر روی سطح خارجی استاتور را بدست آورده و تحلیل می‌کنیم. نویز اندازه‌گیری شده برحسب فرکانس در شکل (۴-۱۷) نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود در فرکانس ۴۲۲۴ هرتز بیشترین سطح صوت به مقدار ۱۵۰ دسی بل اندازه‌گیری شده است. نکته ای که باید توجه داشت این است که این مقدار از سطح صوت به طور مستقیم برای گوش انسان آسیب‌زا می‌باشد و از آن جا که این مقدار از صوت از سطح خارجی استاتور اندازه‌گیری شده است به این حد رسیده است در نتیجه حد صدای شنیده شده از موتور بعد از سطح پوسته و با فاصله ای مشخص از آن به مقدار کمتری می‌رسد و مبنای پژوهش ما سنجش سطح اندازه‌گیری صوت و میزان کاهش آن می‌باشد.



شکل (۴-۱۷) : نویز اندازه‌گیری شده برحسب فرکانس در موتور نمونه

از شکل (۴-۱۷) می‌توان نتیجه گرفت که فرکانس‌های ۳۸۴ ، ۴۲۲۴ ، ۶۵۲۸ ، ۱۶۱۲۸ و ۱۶۸۹۶ هرتز نقاط اوج صدا هستند که با بررسی نتایج قبلی این نتیجه‌گیری قابل پیش‌بینی بود.

حال به تحلیل هریک از این فرکانس‌ها می‌پردازیم :

- فرکانس ۳۸۴ هرتز : این فرکانس اولین فرکانس طبیعی استاتور و هارمونیک ۱۲ از جریان استاتور می‌باشد ، بیشترین جابه‌جایی در راستای شعاعی ۰,۱۶ میلی‌متر و بیشترین جابه‌جایی در راستای مماس بر دندانه ۰,۱۵ میلی‌متر می‌باشد.

- فرکانس ۴۲۲۴ هرتز : این فرکانس هارمونیک ۱۱ فرکانس طبیعی استاتور می‌باشد ، بیشترین جابه‌جایی در راستای شعاعی ۰,۲۷ میلی‌متر و بیشترین جابه‌جایی در راستای مماس بر دندانه ۰,۰۵ میلی‌متر می‌باشد. که این نشان دهنده آن است که نیروی الکترومغناطیسی شعاعی در این فرکانس تاثیر بسزایی در سطح فشار صوت دارد.
 - فرکانس ۶۵۲۸ هرتز : این فرکانس هارمونیک ۱۱ فرکانس طبیعی استاتور می‌باشد ، بیشترین جابه‌جایی در راستای شعاعی ۰,۲۷ میلی‌متر و بیشترین جابه‌جایی در راستای مماس بر دندانه ۰,۰۵ میلی‌متر می‌باشد. که نسبت به فرکانس های ذکر شده دامنه فشار صوت کمتری دارد.
 - فرکانس ۱۶۱۲۸ هرتز : این فرکانس هارمونیک ۴۲ فرکانس طبیعی استاتور می‌باشد ، بیشترین جابه‌جایی در راستای شعاعی ۰,۱۶ میلی‌متر و بیشترین جابه‌جایی در راستای مماس بر دندانه ۰,۱۶ میلی‌متر می‌باشد..
 - فرکانس ۱۶۸۹۶ هرتز : این فرکانس هارمونیک ۴۴ فرکانس طبیعی استاتور می‌باشد ، بیشترین جابه‌جایی در راستای شعاعی ۰,۱۶ میلی‌متر و بیشترین جابه‌جایی در راستای مماس بر دندانه ۰,۱۶ میلی‌متر می‌باشد.
- این نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر نزدیکی فرکانس تحریک یا در واقع نیروی الکترومغناطیسی به فرکانس طبیعی استاتور دامنه آن نیز مهم است بنابراین برای بررسی کاهش نویز صوتی میبایست فرکانس های تحریک از فرکانس های طبیعی مقداری دورتر باشند و همچنین دامنه آن‌ها در این فرکانس ها تا میزان قابل توجهی کاهش یابد. حال این موضوع را در فصل چهارم با بررسی نویز صوتی در ساختارهای مختلف موتور مدولار به تشریح می‌پردازیم.

فصل ۵ تغییر ساختار موتور مدولار به منظور کاهش نویز صوتی

۵-۱- مقدمه

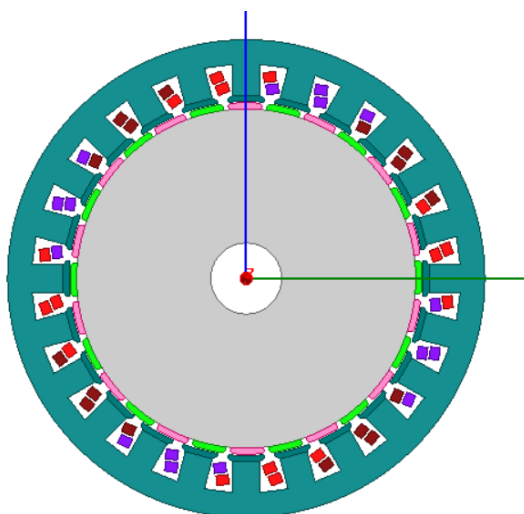
در این بخش ترکیبات مختلف تعداد شیار استاتور و تعداد قطب رتور را با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای اساسی طراحی از جمله توان ، سرعت ، گشتاور میانگین و حجم موتور را به هدف کاهش نویز بررسی می کنیم.

۵-۲- ساختار ۲۴ شیار ۲۸ قطب

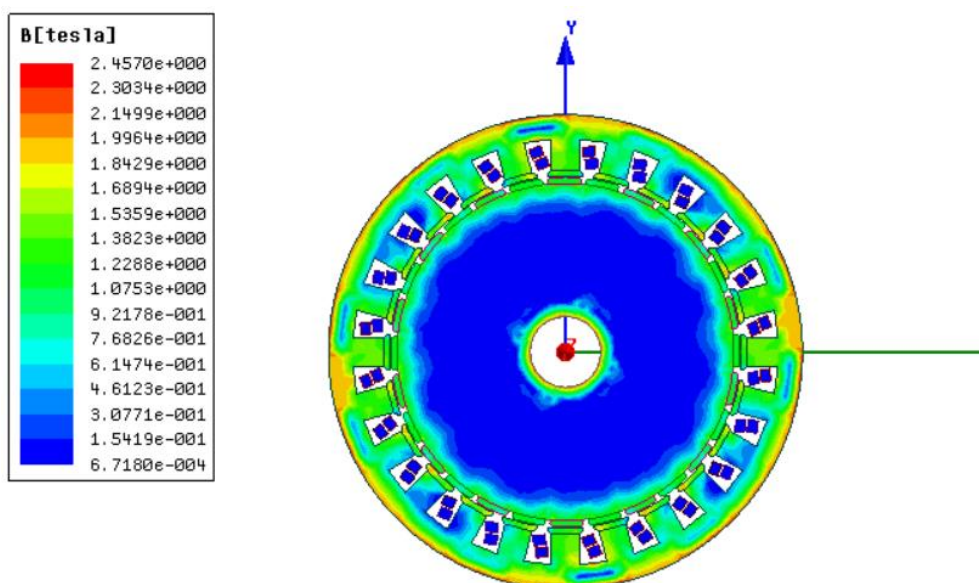
با توجه به ترکیبات بررسی شده در فصل سوم در استاتور های با ۲۴ شیار ، رتور علاوه بر ۲۰ قطب می تواند ۲۸ قطب نیز داشته باشد . در این ساختار سیم پیچی استاتور مشابه موتور نمونه است و تنها تعداد قطب رتور به ۲۸ عدد افزایش پیدا می کند . عامل دیگری که باید تغییر داد فرکانس می باشد زیرا که با ثابت در نظر گرفتن سرعت موتور و تغییر در تعداد قطب رتور فرکانس ۴۴٫۸ هرتز بدست می آید.

۵-۲-۱ تحلیل الکترومغناطیسی ساختار ۲۴ شیار ۲۸ قطب

با تغییرات صورت گرفته باید توجه داشته باشیم که چگالی جریان در سیم پیچ و همچنین چگالی شار مغناطیسی در استاتور و رتور علی الخصوص دندانه های استاتور از حد مجاز بیشتر نشود. شکل (۵-۱) ساختار شبیه سازی شده در محیط المان محدود می باشد. و همچنین شکل (۵-۲)، توزیع چگالی شار مغناطیسی در حالت گذرا را نشان می دهد. همانطور که از شکل مشاهده می شود اشباع در هیچ نقطه ای از ماشین مخصوصا در دندانه های استاتور اتفاق نمی افتد.

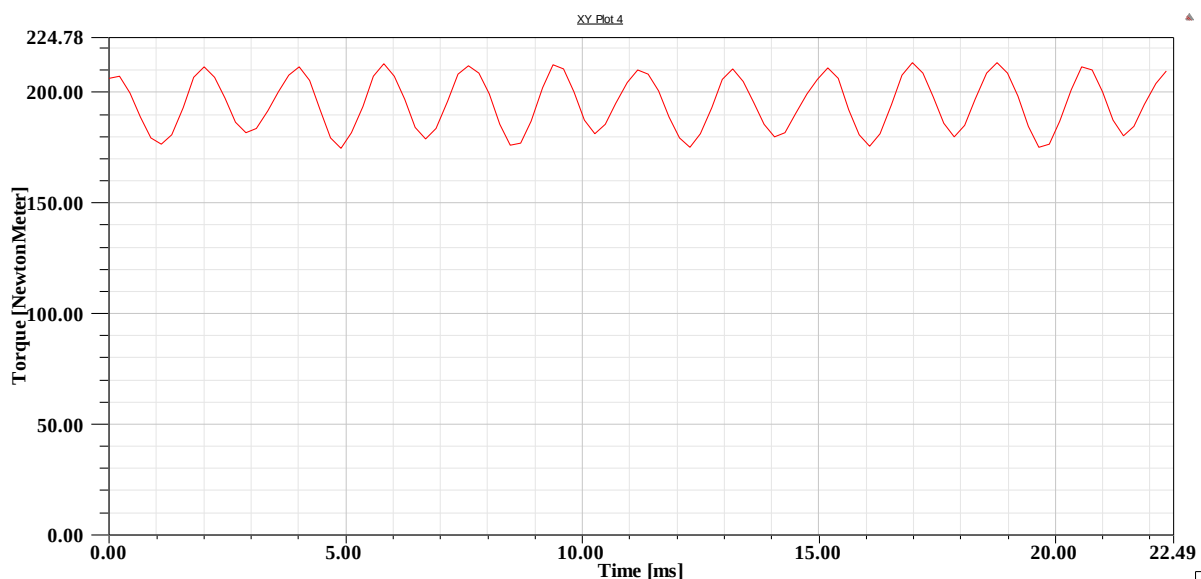


شکل (۵-۱) : ساختار ۲۴ شیار ۲۸ قطب شبیه سازی شده در محیط المان محدود



شکل (۵-۲)، توزیع چگالی شار مغناطیسی موتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب

با شبیه سازی صورت گرفته ، گشتاور موتور تحت شرایط نامی در شکل (۵-۳) نشان داده شده است:



شکل (۵-۳) : نمودار گشتاور نامی موتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب

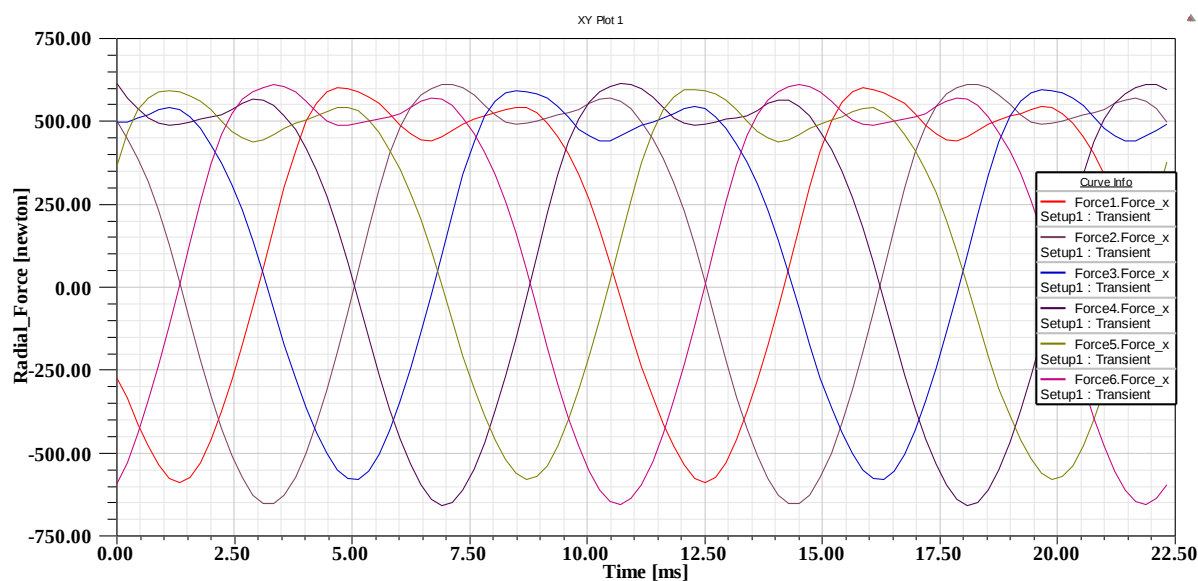
با توجه به شکل فوق و با استفاده از رابطه (۳-۱) رپیل گشتاور موتور ۰,۱۹ بدست می آید.

در این ساختار نیز همانند ساختار ۲۰ قطبی نیروهای شعاعی و مماسی در هر شش دندانه تکرار می شود. جدول

(۵-۱) حداکثر دامنه نیروهای شعاعی و مماسی بر روی هر یک از دندانه های استاتور را نشان می دهد.

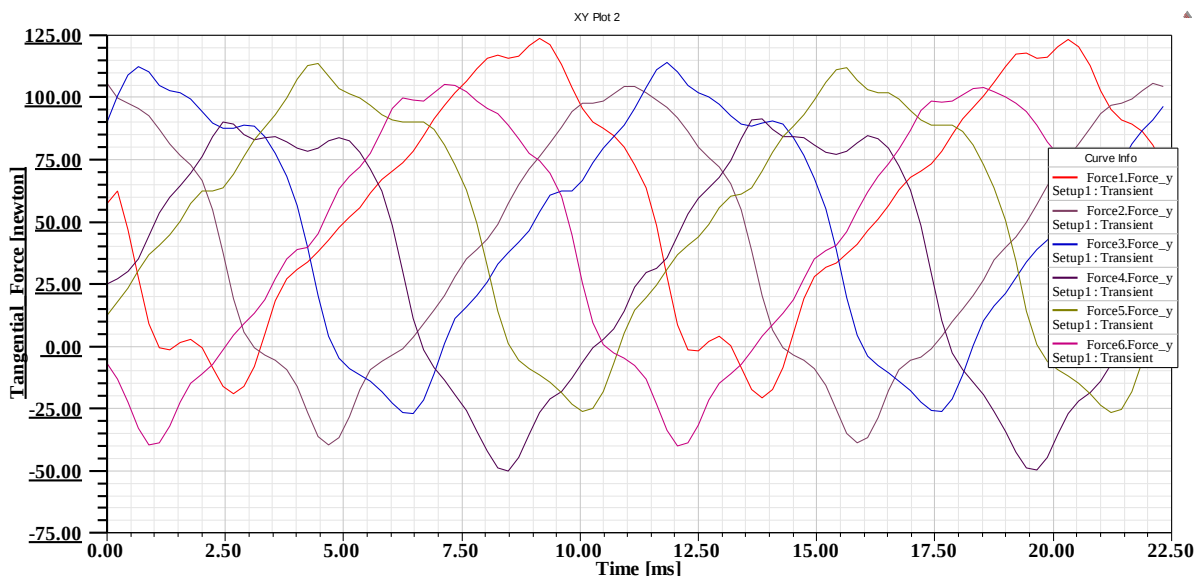
جدول (۵-۱): حداکثر نیروهای شعاعی و مماسی بر روی دندانه های استاتور در ساختار ۲۴ شیار ۲۸ قطب

خانواده دندانه ها	حداکثر مقدار نیروی شعاعی (N)	حداکثر مقدار نیروی مماسی (N)
۱۹-۱۳-۷-۱	۶۷۲	۱۲۳
۲۰-۱۴-۸-۲	۶۹۲	۱۰۸
۲۱-۱۵-۹-۳	۶۸۳	۱۱۰
۲۲-۱۶-۱۰-۴	۷۳۱	۸۸
۲۳-۱۷-۱۱-۵	۷۱۰	۱۲۱
۲۴-۱۸-۱۲-۶	۶۸۹	۱۰۳



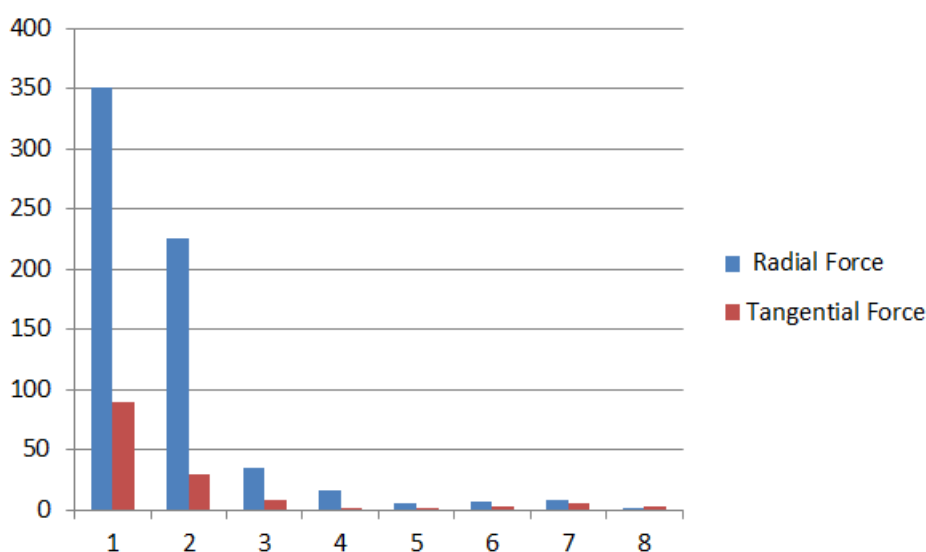
شکل (۵-۴): نیروهای شعاعی بر روی دندانه های استاتور بر حسب زمان در موتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب

به دلیل تکراری بودن نیروهای الکترومغناطیسی دندانه های هم خانواده از هر خانواده نیروهای شعاعی و مماسی یک خانواده به نمایش گذاشته شده است.



شکل (۵-۵): نیروهای مماسی بر روی دندانه های استاتور برحسب زمان در موتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب

حال به تحلیل هارمونیک نیروهای شعاعی و مماسی می پردازیم. برای این کار دامنه هارمونیک های نیروهای شعاعی و مماسی را با استفاده از تحلیل تبدیل فوریه سریع بدست می آوریم. که نتایج در شکل (۵-۶) مشاهده می شود.



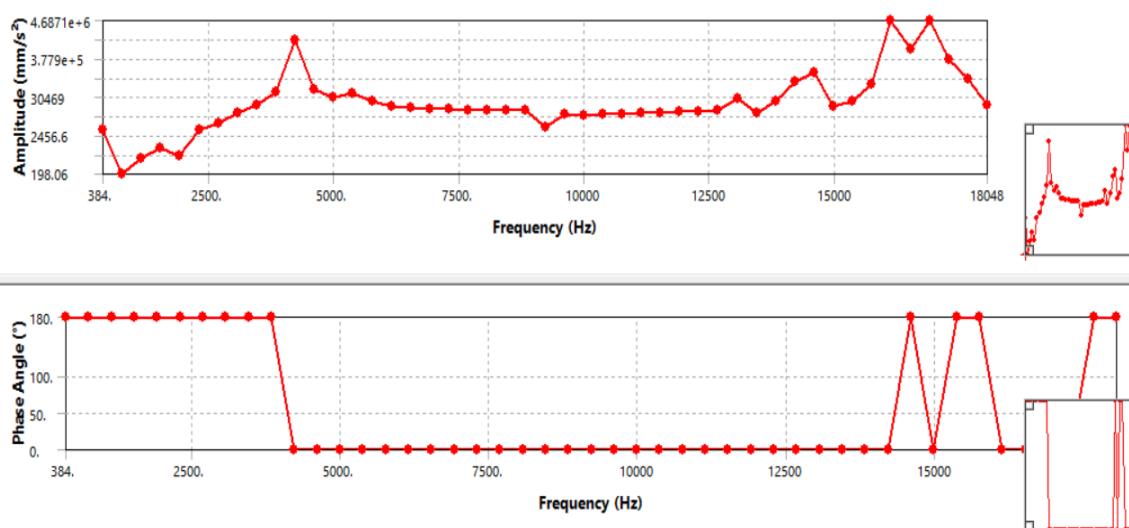
شکل (۵-۶) دامنه هارمونیک های نیروهای شعاعی و مماسی موتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب

همانطور که در شکل (۵-۶) مشاهده می شود، دامنه هر هارمونیک نسبت به حالت ۲۰ قطب موتور نمونه به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. انتظار می رود با وجود افزایش جزئی رپیل گشتاور با توجه به کاهش نیروهای شعاعی و مماسی نویز صوتی نیز کاهش یابد.

۵-۲-۲ تحلیل فرکانسی ساختار ۲۴ شیار ۲۸ قطب

به دلیل ثابت ماندن ساختار هسته استاتور فرکانس های طبیعی همانند حالت قبل است. در نتیجه به تحلیل فرکانسی این ساختار می پردازیم.

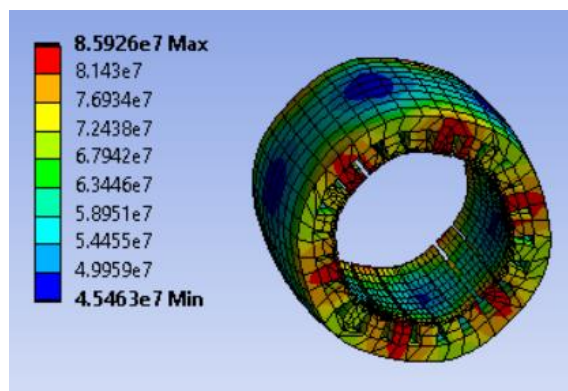
با اعمال نیروهای الکترومغناطیسی به دندانه های استاتور می توان به تحلیل فرکانسی پردازیم. شتاب ذرات موتور در پاسخ به نیروهای شعاعی و مماسی اعمال شده بر سطح دندانه استاتور از جمله مواردی است ، که معمولا در بررسی لرزش ماشین های الکتریکی بررسی می شود. شکل (۵-۷) نمودار مقدار شتاب ذرات به همراه زاویه فاز آن در فرکانس های نزدیک به فرکانس طبیعی نشان می دهد. که در مقایسه با شتاب ذرات در موتور نمونه مقادیر بیشینه کاهش یافته است.



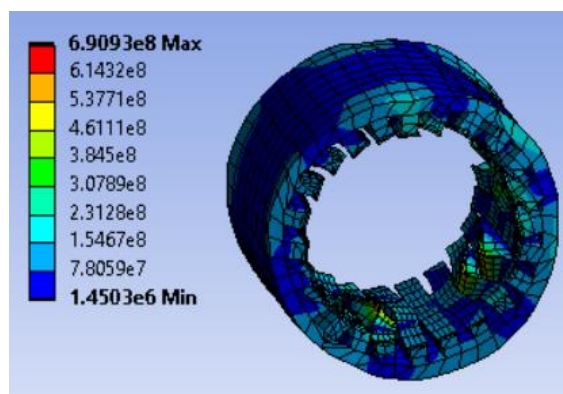
شکل (۵-۷) نمودار مقدار شتاب ذرات به همراه زاویه فاز در ساختار ۲۴ شیار ۲۸ قطب

با توجه به شکل (۵-۷) و نتایج بدست آمده ، در فرکانس های ۴۲۲۴ ، ۱۶۱۲۸ و ۱۶۸۹۶ هرتز بیشترین شتاب ذرات را می توان مشاهده کرد که به ما نشان دهد فرکانس تحریک با دامنه قابل توجه در محدوده این فرکانس ها یا در واقع نزدیک به فرکانس طبیعی می باشد ، که این فرکانس ها در به وجود آمدن نویز صوتی نقش بسزایی خواهند داشت.

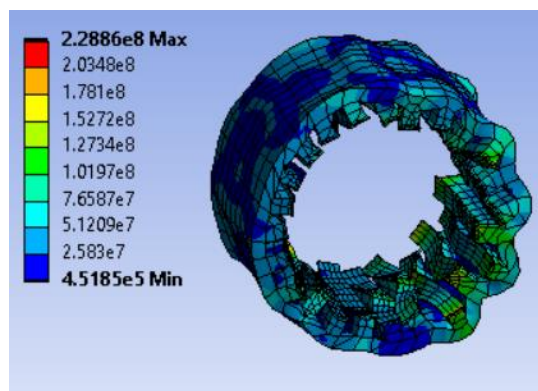
شکل های (۵-۸)، (۵-۹) و (۵-۱۰) شتاب بخش های مختلف استاتور نشان داده شده است. شتاب ذرات در فرکانس های ۴۲۲۴ و ۱۶۱۲۸ و ۱۶۸۹۶ هرتز بیشترین شتاب را داشته اند. واحد مقدارهای اندازه گیری شده بر حسب میلی متر بر مجذور ثانیه می باشد.



شکل (۵-۸): شتاب ذرات استاتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب در فرکانس ۴۲۲۴ هرتز

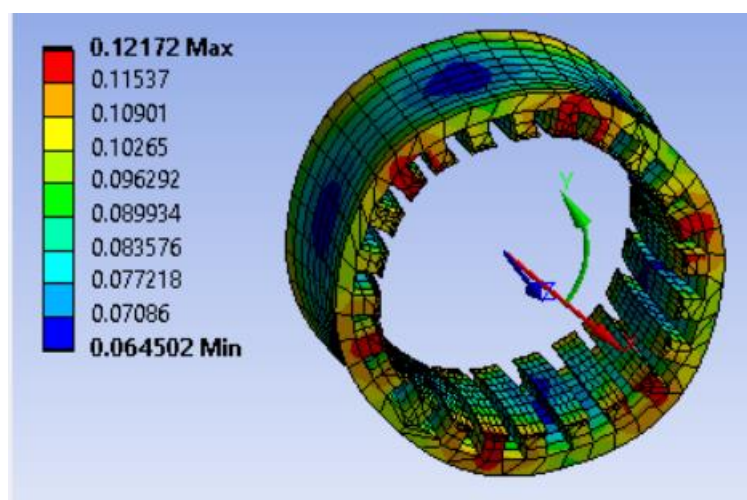


شکل (۵-۹): شتاب ذرات استاتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب در فرکانس ۱۶۱۲۸ هرتز



شکل (۵-۱۰): شتاب ذرات استاتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب در فرکانس ۱۶۸۹۶ هرتز

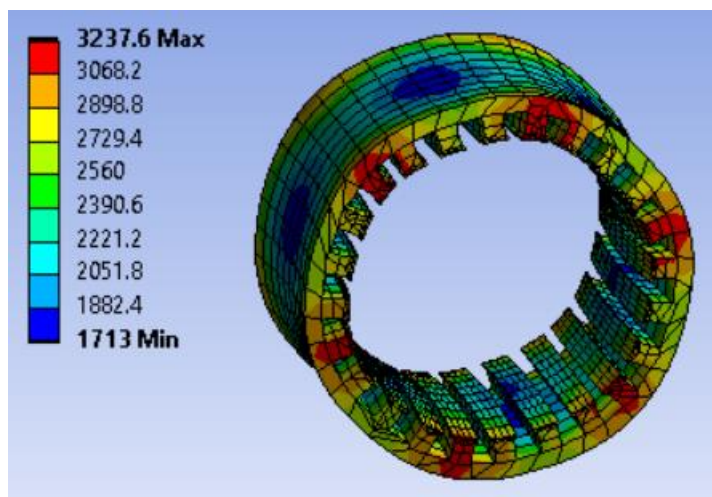
نتایج شبیه سازی همچنین نشان می‌دهد که جابه جایی در راستای شعاعی در اولین فرکانس طبیعی یعنی ۳۸۴ هرتز و فرکانس های ۱۶۱۲۸ و ۱۶۸۹۶ هرتز کاهش محسوسی داشته است و در بقیه فرکانس ها جابه جایی همچنان کم می‌باشد ، در حالیکه بیشترین جابه جایی در فرکانس ۴۲۲۴ هرتز به مقدار ۰,۱۲ میلی متر می‌باشد. که این میزان جابه جایی نسبت به موتور نمونه تقریباً نصف شده است. جابه جایی در فرکانس ۴۲۲۴ هرتز در شکل (۵-۱۱) نشان داده شده است.



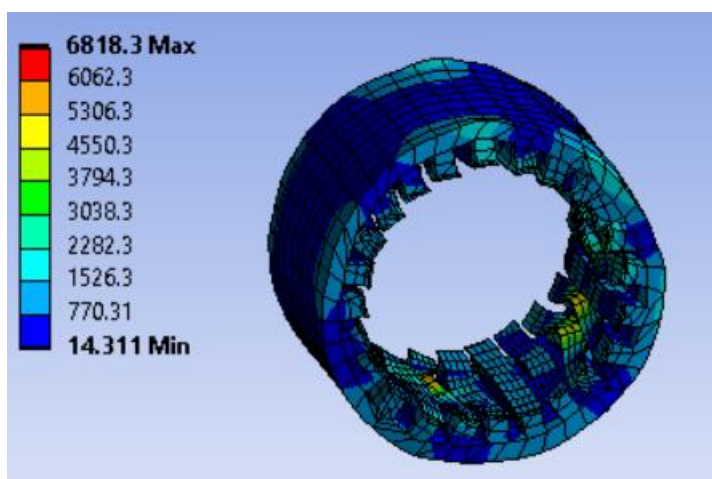
شکل (۵-۱۱): جابه جایی ذرات در راستای شعاعی در فرکانس ۴۲۲۴ هرتز ماشین ۲۴ شیار ۲۸ قطب

با بررسی جابه جایی در راستای مماسی نیز به این نتایج رسیده که هرچند جابه جایی در فرکانس های ۳۸۴ و ۱۶۱۲۸ هرتز بیشترین جابه جایی را در راستای مماسی داشته‌اند اما این مقدار به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. بیشترین جابه جایی در فرکانس ۳۸۴ هرتز به مقدار ۰,۰۶۴ میلی متر می‌باشد.

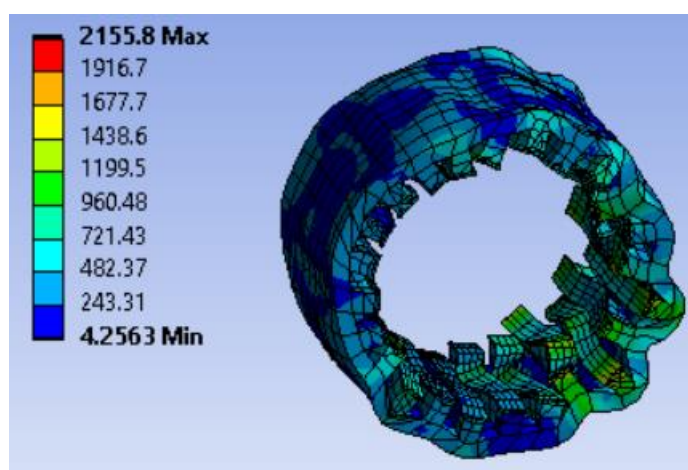
در تحلیل نتایج بدست آمده در ابزار سنجش سرعت ذرات فرکانس های ۴۲۲۴ و ۱۶۱۲۸ و ۱۶۸۹۶ هرتز بیشترین سرعت را داشته‌اند. بیشترین سرعت در فرکانس ۱۶۱۲۸ هرتز به مقدار ۶۸۱۸ میلی متر بر ثانیه می‌باشد. شکل های (۵-۱۲) و (۵-۱۳) و (۵-۱۴) به ترتیب سرعت ذرات در فرکانس های ۴۲۲۴ و ۱۶۱۲۸ و ۱۶۸۹۶ هرتز را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۲): سرعت ذرات در فرکانس ۴۲۲۴ هرتز در موتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب



شکل (۵-۱۳): سرعت ذرات در فرکانس ۱۶۱۲۸ هرتز در موتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب

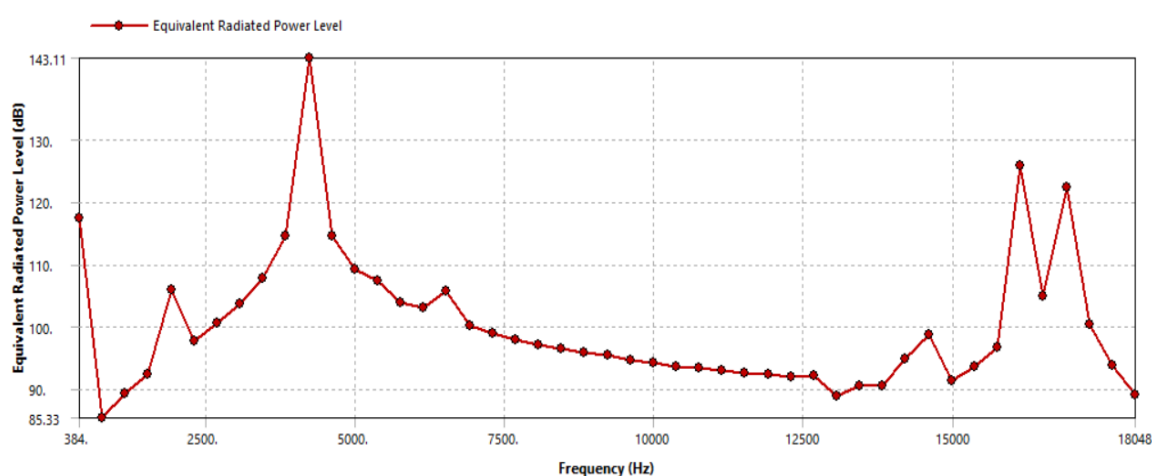


شکل (۵-۱۴): سرعت ذرات در فرکانس ۱۶۸۹۶ هرتز در موتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب

با نتایج بدست آمده تا می‌توان نتیجه گرفت فرکانس‌های ۳۸۴ ، ۴۲۲۴ ، ۶۵۲۸ ، ۱۶۱۲۸ و ۱۶۸۹۶ هرتز همانند ساختار ۲۰ قطب از مهمترین فرکانس ها در افزایش نویز صوتی می‌باشند.

نویز صوتی موتور بر روی سطح خارجی استاتور را بدست آورده و تحلیل می‌کنیم. نویز اندازه گیری شده برحسب فرکانس در شکل (۵-۱۵) نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود در فرکانس ۴۲۲۴ هرتز بیشترین سطح صوت به مقدار ۱۴۳٫۱۱ دسی بل اندازه‌گیری شده است.



شکل (۵-۱۵): نویز اندازه‌گیری شده برحسب فرکانس در موتور ۲۴ شیار ۲۸ قطب

از شکل (۵-۱۵) می‌توان این نتیجه را گرفت که فرکانس‌های ۳۸۴ ، ۴۲۲۴ ، ۱۶۱۲۸ و ۱۶۸۹۶ هرتز نقاط اوج صدا هستند که با بررسی نتایج قبلی این نتیجه‌گیری قابل پیش‌بینی بود. علاوه بر آن فرکانس‌های ۱۹۲۰ ، ۶۵۲۸ و ۱۴۵۹۲ هرتز به این نقاط اضافه گردیده اند که علت آن می‌توان با تغییر فرکانس جریان برخی از فرکانس‌های تحریک نیز به فرکانس طبیعی نزدیک شده اند. اما از آن جا که نسبت به فرکانس ۴۲۲۴ هرتز که بیشترین سطح فشار صوت را دارد قابل چشم‌پوشی است.

فرکانس ۴۲۲۴ هرتز همچنان بیشترین سطح فشار صوت را دارد و تنها موفقیت نسبت به حالت ۲۰ قطبی این بوده است که دامنه نیروی الکترومغناطیسی کاهش یافته است اما همچنان فرکانس نزدیک به فرکانس ۴۱۲۴ هرتز را دارا می‌باشد.

همانطور که مشاهده شد در حالت ۲۸ قطبی علیرغم ضریب سیم پیچی برابر، نیروهای شعاعی و مماسی کاهش پیدا کرده است و علاوه بر آن می‌توان مشاهده کرد که سطح صوت انتشار یافته از سطح خارجی استاتور نیز کاهش پیدا می‌کند.

از بررسی حالت های ۲۲ و ۲۶ قطبی به علت نامتقارن بودن سیم پیچ که نتیجه آن نیروهای شعاعی نامتعادل هستند و به دنبال آن باعث تولید ارتعاش و نویز می‌گردد صرفه نظر می‌نماییم. هم چنین از حالت های دیگر به علت ضریب سیم پیچی کم صرفه نظر می‌گردد.

۵-۳- ساختار ۳۶ شیار

در ساختار ۳۶ شیار تعداد قطب ۲۸ و ۳۰ و ۳۲ را به علت ساختار سیم پیچی متقارن هریک و همچنین ضریب سیم پیچی مناسب و با توجه به دامنه هارمونیک‌های mmf فاصله هوایی بررسی می‌نماییم. بدیهی است که ساختارهای با تعداد شیار بالاتر به علت ثابت بودن حجم استاتور مقدور نمی‌باشد.

در این ترکیبات نیز باید توجه داشت که چگالی جریان در سیم پیچ و همچنین چگالی شار مغناطیسی در استاتور و رتور علی‌الخصوص دندانه های استاتور از حد مجاز بیشتر نشود.

۵-۳-۱ ساختار ۳۶ شیار ۲۸ قطب

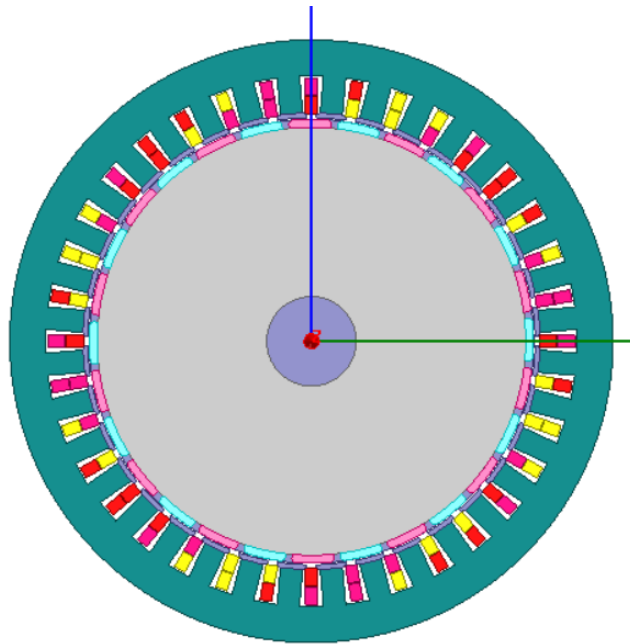
در این ساختار تعداد شیار بر قطب بر فاز $\frac{3}{7}$ می‌باشد که نحوه سیم پیچی آن در ۱۸ شیار به صورت زیر می‌باشد و در ۱۸ شیار دوم تکرار می‌شود.

$$\dots |CA'|AB'|BB'|B'C'|CA|A'A'|AB'|BC'|CC|C'A|A'B|B'B'|BC'|CA'|AA|A'B|B'C'|C'C' \dots$$

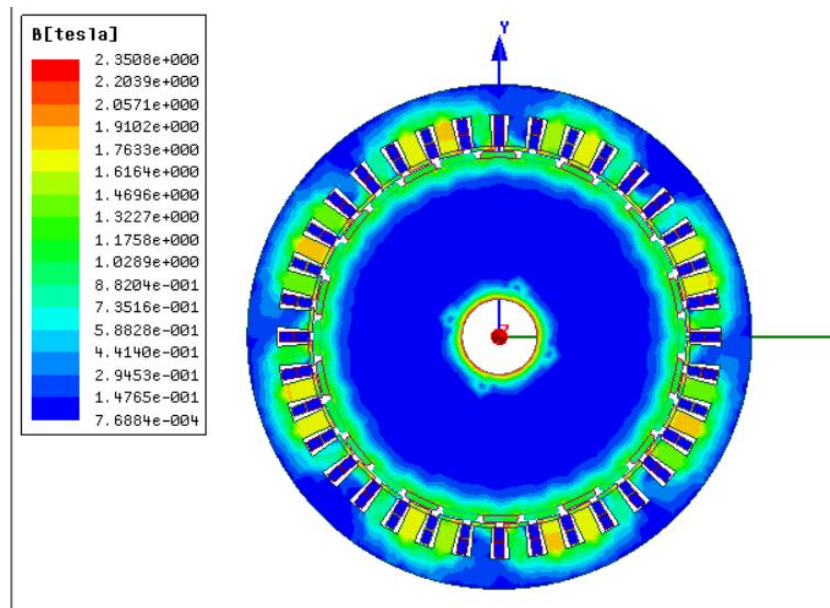
در این ساختار فرکانس ورودی ۴۴,۸ هرتز و تعداد دور سیم پیچ ۲۶ دور می‌باشد.

۵-۳-۲ تحلیل الکترومغناطیسی ساختار ۳۶ شیار ۲۸ قطب

شکل (۵-۱۶) ساختار شبیه سازی شده در محیط المان محدود می‌باشد. و همچنین شکل (۵-۱۷)، توزیع چگالی شار مغناطیسی را در حالت گذرا نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود اشباع در هیچ نقطه ای از ماشین مخصوصا در دندانه های استاتور اتفاق نمی‌افتد.

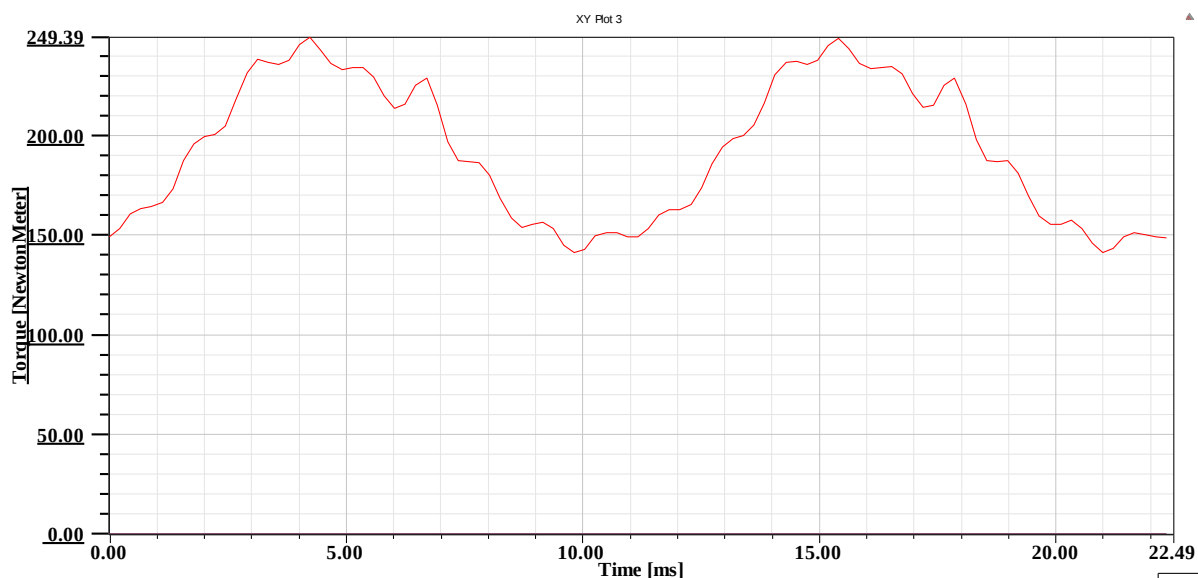


شکل (۵-۱۶): ساختار ۳۶ شیار ۲۸ قطب شبیه سازی شده در محیط المان محدود



شکل (۵-۱۷)، توزیع چگالی شار مغناطیسی موتور ۳۶ شیار ۲۸ قطب

با شبیه سازی صورت گرفته ، گشتاور موتور تحت شرایط نامی در شکل (۵-۱۸) نشان داده شده است:



شکل (۵-۱۸): نمودار گشتاور نامی موتور ۳۶ شیار ۲۸ قطب

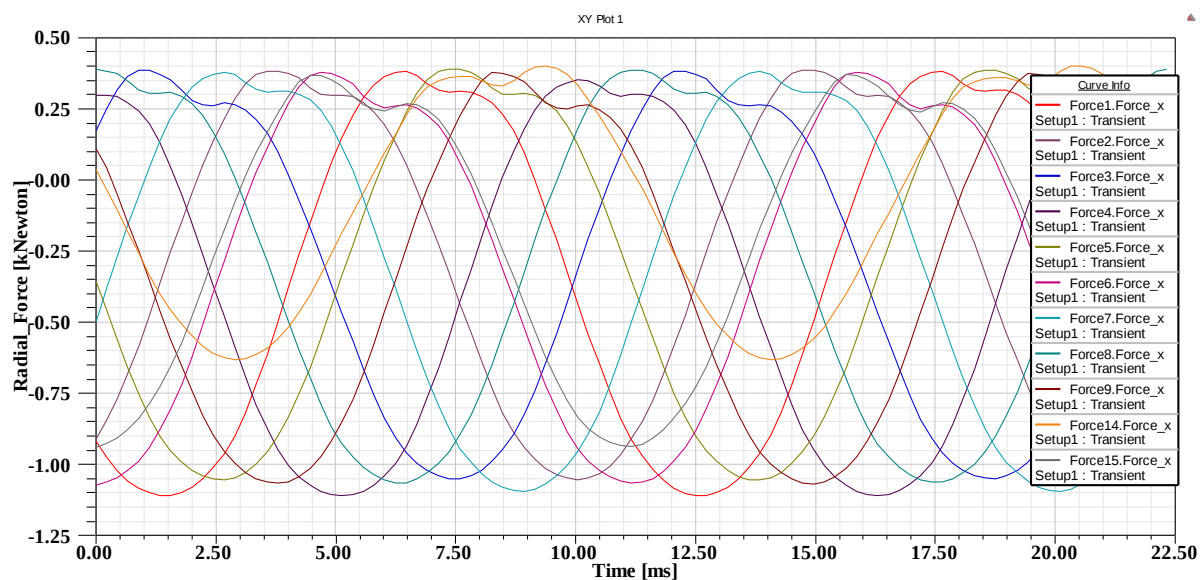
با توجه به شکل (۵-۱۸) و با استفاد از رابطه (۳-۱) ریپل گشتاور موتور ۵۶,۰ بدست می‌آید.

در این ساختار نیروهای شعاعی و مماسی بر روی دندانه‌های استاتور در خانواده دندانه‌های نشان داده شده در جدول (۵-۲) یکسان می باشد.

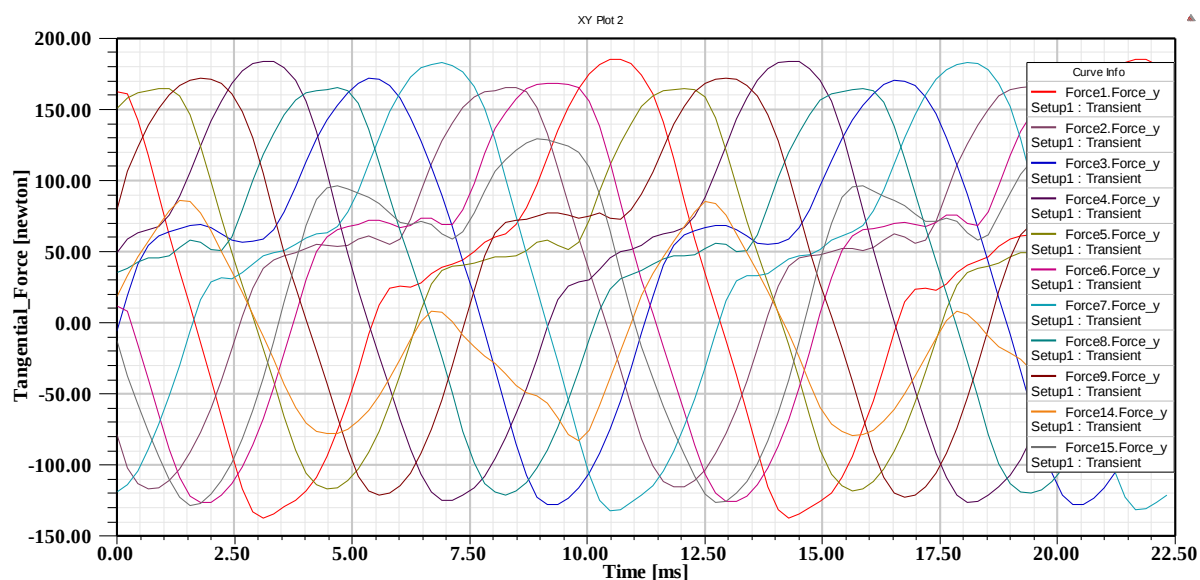
جدول (۵-۲): حداکثر نیروهای شعاعی و مماسی بر روی دندانه‌های استاتور در ساختار ۳۶ شیار ۲۸ قطب

خانواده دندانه ها	حداکثر مقدار نیروی شعاعی (N)	حداکثر مقدار نیروی مماسی (N)
۲۸-۱۹-۱۰-۱	۱۰۹۰	۲۰۰
۲۹-۲۰-۱۱-۲	۱۰۶۳	۱۶۴
۳۰-۲۱-۱۲-۳	۱۰۳۰	۱۷۰
۳۱-۲۲-۱۳-۴	۱۰۸۱	۱۸۵
۲۳-۵	۱۰۴۰	۱۶۹
۲۴-۶	۱۰۷۱	۱۶۹
۳۴-۲۵-۱۶-۷	۱۱۰۰	۱۸۱
۳۵-۲۶-۱۷-۸	۱۰۴۸	۱۶۴

۱۷۱	۱۰۴۱	۳۶-۲۷-۱۸-۹
۷۸	۶۱۵	۳۲-۱۴
۱۲۹	۹۳۷	۳۳-۱۵



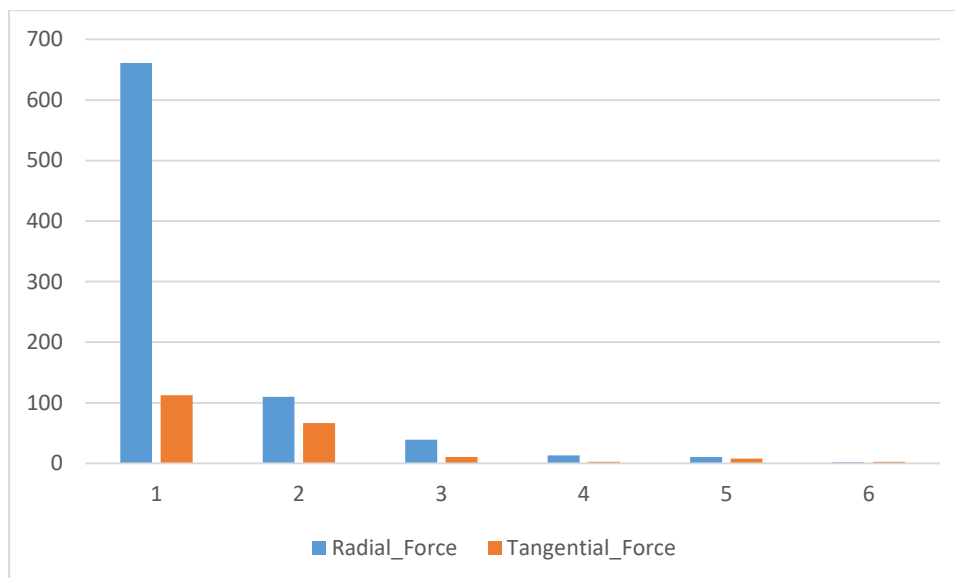
شکل (۵-۱۹): نیروهای شعاعی بر روی دندانه های استاتور برحسب زمان در موتور ۳۶ شیار ۲۸ قطب



شکل (۵-۲۰): نیروهای مماسی بر روی دندانه های استاتور برحسب زمان در موتور ۳۶ شیار ۲۸ قطب

دامنه هارمونیک های نیروهای شعاعی و مماسی را با استفاده از تحلیل تبدیل فوريه سريع بدست می آوريم.

که نتایج در شکل (۵-۲۱) مشاهده می شود.

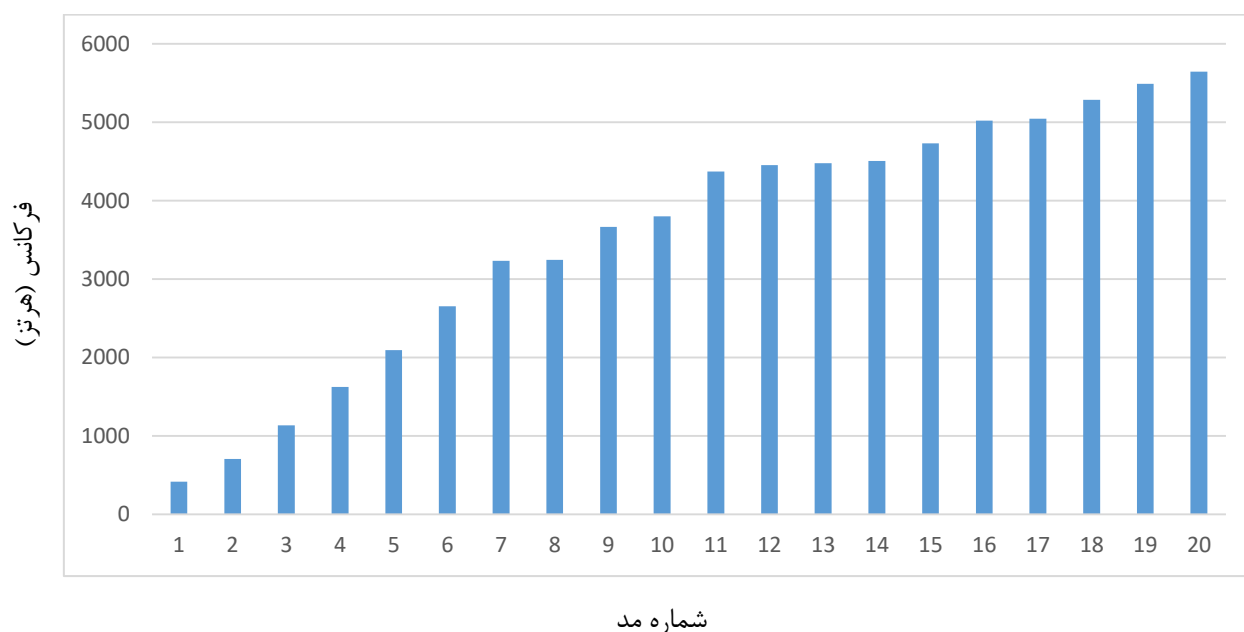


شکل (۵-۲۱) دامنه هارمونیک‌های نیروهای شعاعی و مماسی موتور ۳۶ شیار ۲۸ قطب

۵-۳-۳ تحلیل ساختاری هسته استاتور ۳۶ شیار

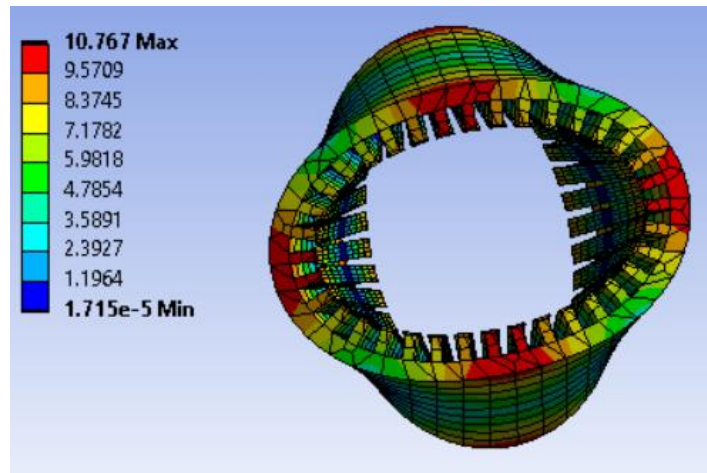
پس از مش بندی موتور ۳۶ شیار طراحی شده و تحلیل ساختاری آن می‌توان فرکانس‌های طبیعی موتور را تعیین کرد.

شکل (۵-۲۲) فرکانس‌های طبیعی موتور در حالت ۳۶ شیار را نشان می‌دهد. از آنجا که تعداد فرکانس‌های طبیعی یک جسم زیاد و بعضاً نامتناهی است، در این جدول نیز همانند حالت ۲۴ شیار تنها ۲۰ فرکانس طبیعی اول نشان داده شده است. مطابق با این جدول اولین فرکانس طبیعی ۴۱۴ هرتز می‌باشد.

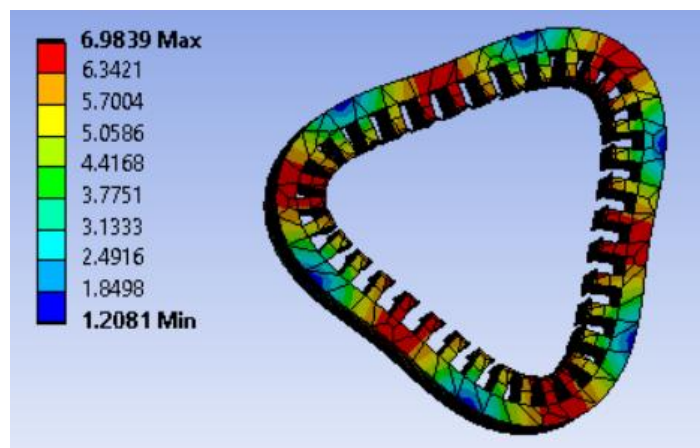


شکل (۵-۲۲) : فرکانس‌های طبیعی استاتور ۳۶ شیار

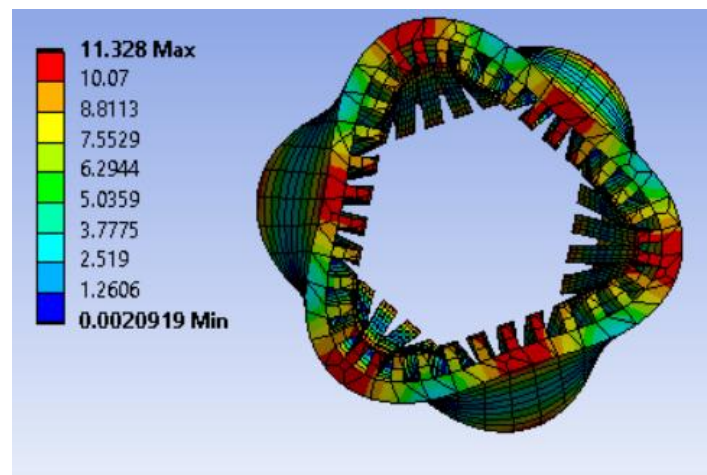
شکل های (۲۳-۵) ، (۲۴-۵) و (۲۵-۵) تغییر شکل استاتور موتور موجود در مدهای مختلف را نشان می دهد.



شکل (۲۳-۵) : تغییر شکل استاتور ۳۶ شیار در فرکانس ۴۱۴ هرتز



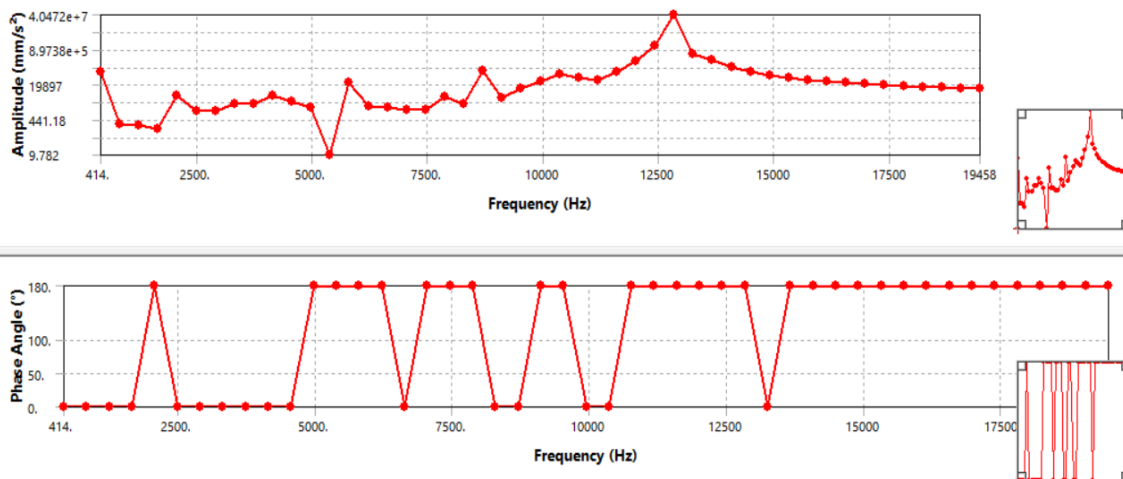
شکل (۲۴-۵) : تغییر شکل استاتور ۳۶ شیار در فرکانس ۷۰۶ هرتز



شکل (۲۵-۴) : تغییر شکل استاتور در فرکانس ۱۱۳۴ هرتز

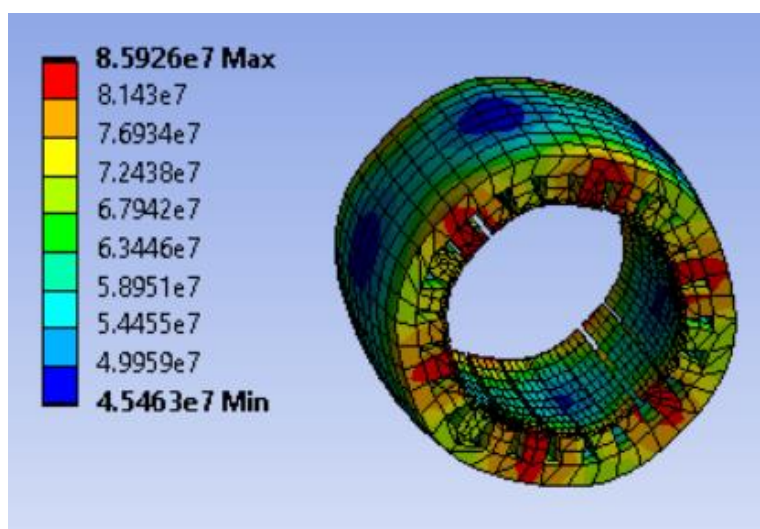
۵-۳-۴ تحلیل فرکانسی ترکیب ۳۶ شیار ۲۸ قطب

با اعمال نیروهای الکترومغناطیسی به دندانه های استاتور می توان به تحلیل فرکانسی پردازیم. شکل (۵-۲۶) نمودار مقدار شتاب ذرات به همراه زاویه فاز آن در فرکانس های نزدیک به فرکانس طبیعی را نشان می دهد.



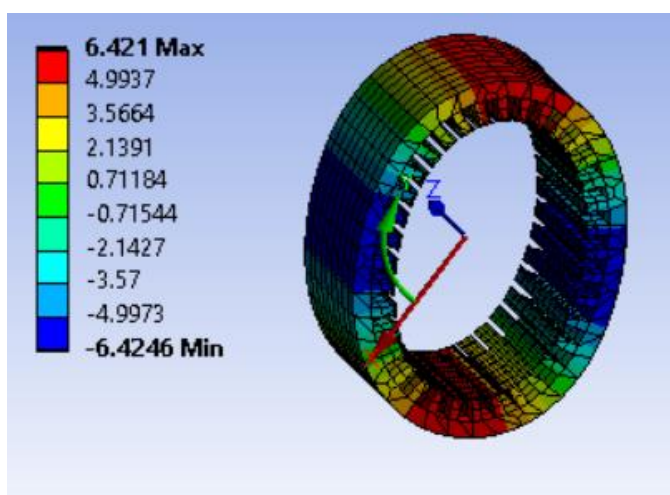
شکل (۵-۲۶) نمودار مقدار شتاب ذرات به همراه زاویه فاز در ساختار ۳۶ شیار ۲۸ قطب

در شکل (۵-۲۷)، شتاب بخش های مختلف استاتور را در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز نشان داده شده است. شتاب ذرات در فرکانس های ۱۲۸۳۴ هرتز بیشترین شتاب را داشته است. واحد مقدارهای اندازه گیری شده برحسب میلی متر بر مجذور ثانیه می باشد.



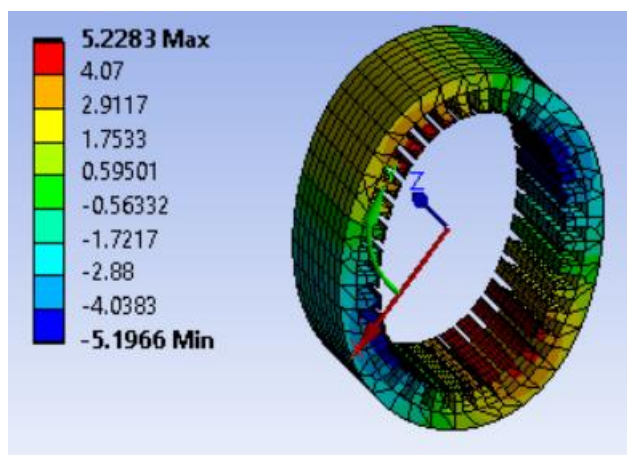
شکل (۵-۲۷) : شتاب ذرات استاتور ۳۶ شیار ۲۸ قطب در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز

نتایج شبیه سازی همچنین نشان می‌دهد که جابه جایی در راستای شعاعی در اولین فرکانس طبیعی یعنی ۴۱۴ هرتز بیشترین مقدار را دارند و در بقیه فرکانس ها جابه جایی کمتر از ۰,۰۸ میلی متر می‌باشد در حالیکه بیشترین جابه جایی در فرکانس ۴۱۴ هرتز به مقدار ۶,۴۲ میلی متر می‌رسد. جابه جایی ها در فرکانس های ۴۱۴ هرتز در شکل (۵-۲۸) نشان داده شده است.



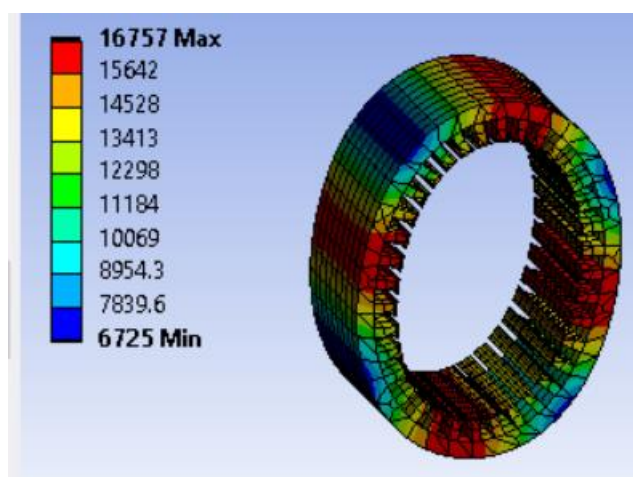
شکل (۵-۲۸) : جابه جایی ذرات در راستای شعاعی در فرکانس ۴۱۴ هرتز ماشین ۳۶ شیار ۲۸ قطب

با بررسی جابه جایی در راستای مماسی نیز به این نتایج رسیده که جابه جایی در فرکانس ۴۱۴ هرتز بیشترین جابه جایی را در راستای مماسی داشته است. بیشترین جابه جایی در فرکانس ۴۱۴ هرتز به مقدار ۵ میلی متر می‌رسد. شکل (۵-۲۹) جابه جایی ذرات در راستای مماسی در فرکانس ۴۱۴ هرتز را نشان می‌دهد.

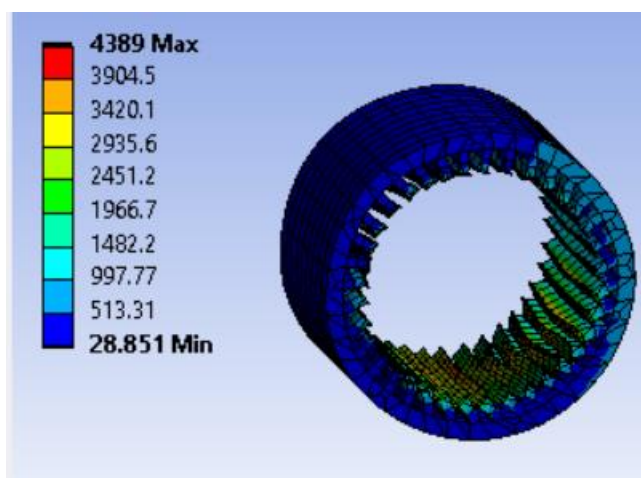


شکل (۵-۲۹) : جابه جایی ذرات در راستای مماسی در فرکانس ۴۱۴ هرتز ماشین ۳۶ شیار ۲۸ قطب

در تحلیل نتایج بدست آمده در ابزار سنجش سرعت ذرات فرکانس های ۴۱۴ و ۱۲۸۳۴ هرتز بیشترین سرعت را داشته اند. بیشترین سرعت در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز به مقدار ۴۳۸۹ میلی متر بر ثانیه می باشد. شکل های (۳۰-۵) و (۳۱-۵) به ترتیب سرعت ذرات در فرکانس های ۴۱۴ و ۱۲۸۳۴ هرتز را نشان می دهد.



شکل (۳۰-۵) : سرعت ذرات در فرکانس ۴۱۴ هرتز در موتور ۳۶ شیار ۲۸ قطب

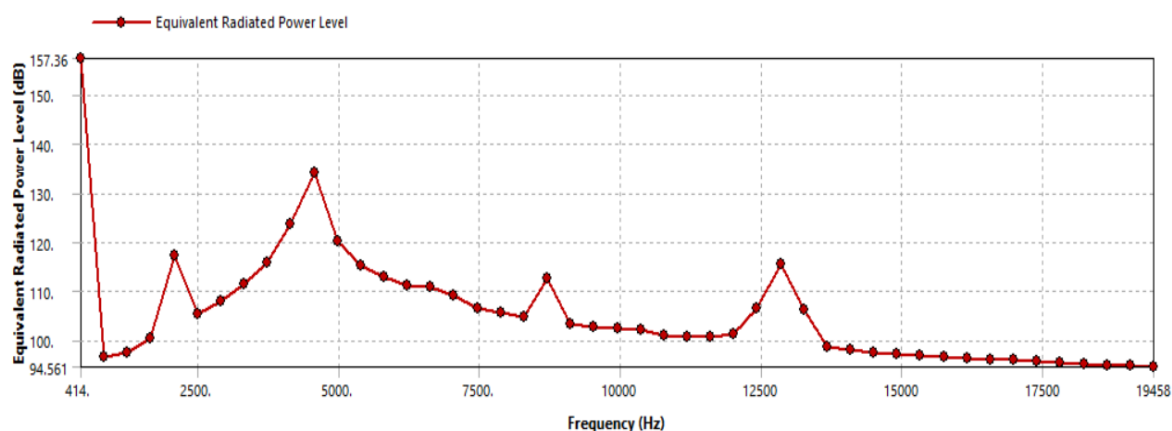


شکل (۳۱-۵) : سرعت ذرات در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز در موتور ۳۶ شیار ۲۸ قطب

با توجه به نتایج بدست آمده فرکانس های ۴۱۴ ، ۱۲۸۳۴ هرتز از مهم ترین فرکانس ها در افزایش نویز صوتی می باشند.

نویز صوتی موتور بر روی سطح خارجی استاتور را بدست آورده و تحلیل می کنیم. نویز اندازه گیری شده بر حسب فرکانس در شکل (۳۲-۵) نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود ، در فرکانس ۴۱۴ هرتز بیشترین سطح صوت به مقدار ۱۵۷,۳۶ دسی بل اندازه‌گیری شده است.



شکل (۵-۳۲) : نویز اندازه‌گیری شده برحسب فرکانس در موتور ۳۶ شیار ۲۸ قطب

از شکل (۵-۳۲) می‌توان این نتیجه را گرفت که فرکانس های ۴۱۴ ، ۲۰۷۰ ، ۴۵۵۴ و ۸۶۹۴ و ۱۲۸۳۴ هرتز نقاط اوج صدا هستند که با بررسی نتایج قبلی این نتیجه‌گیری قابل پیش‌بینی بود. سطح صدا نسبت به موتور نمونه بیشتر شده که علت آن می‌توان به افزایش ریل گشتاور اشاره کرد ، بنابراین به ساختارهای دیگر ۳۶ شیار می‌پردازیم.

۵-۳-۵ ساختار ۳۶ شیار ۳۰ قطب

در این ساختار تعداد شیار بر قطب بر فاز $\frac{2}{5}$ می باشد که نحوه سیم پیچی آن در ۱۲ شیار به صورت زیر می‌باشد و در ۱۲ شیار دوم و سوم تکرار می‌شود.

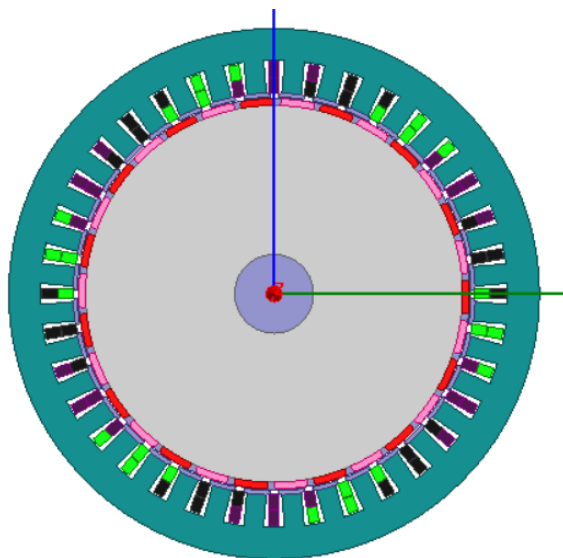
$$\dots |C'A|A'A'|AB'|BB|B'C|C'C'|CA'|AA|A'B|B'B'|BC'|CC\dots$$

در این ساختار فرکانس ورودی ۴۸ هرتز و تعداد دور سیم پیچ ۲۵ دور می‌باشد.

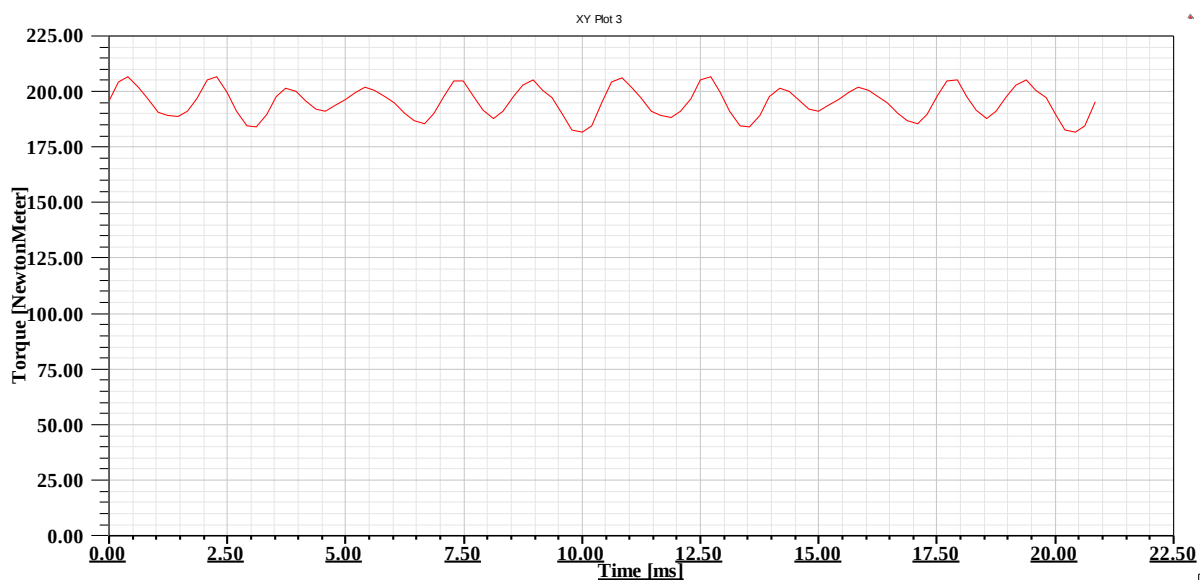
در این ساختار نیروهای شعاعی و مماسی بر روی دندانه های استاتور در خانواده دندانه های نشان داده شده در جدول (۵-۳) یکسان می باشد.

۵-۳-۶ تحلیل الکترومغناطیسی ۳۶ ساختار شیار ۳۰ قطب

مشابه حالت‌های قبل به تحلیل الکترومغناطیسی پرداخته و از تکرار مکررات خودداری می‌گردد. شکل (۵-۳۳) ساختار ۳۶ شیار ۳۰ قطب شبیه سازی شده در محیط المان محدود را نشان می‌دهد که تفاوت ساختار سیم‌پیچی در آن مشاهده می‌شود.



شکل (۵-۳۳): ساختار ۳۶ شیار ۳۰ قطب شبیه سازی شده در محیط المان محدود



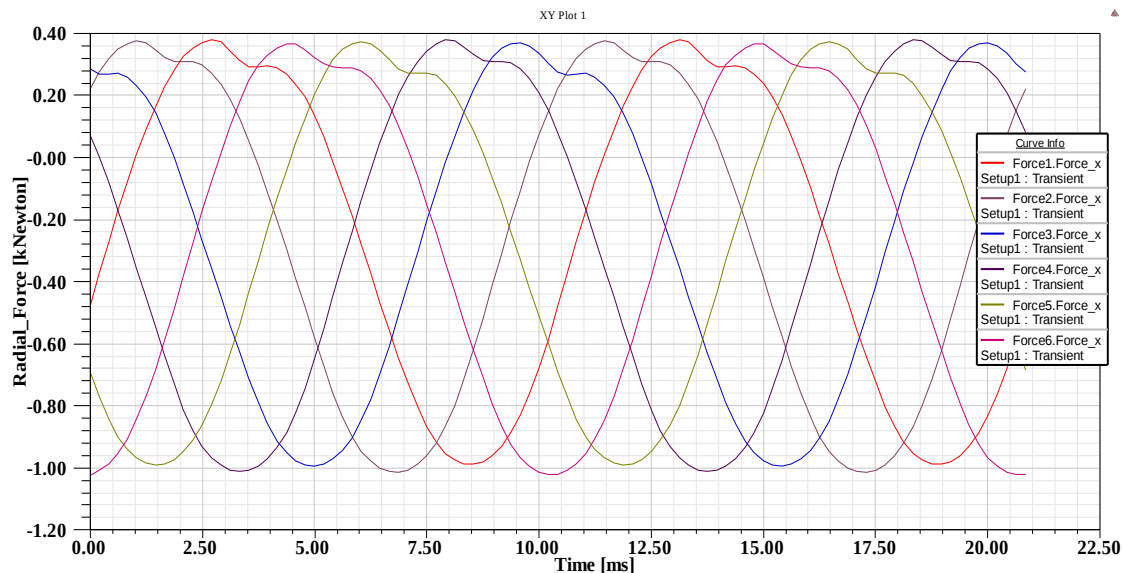
شکل (۵-۳۴): گشتاور نامی موتور ۳۶ شیار ۳۰ قطب

با توجه به شکل (۵-۳۴) و با استفاده از رابطه (۳-۱) ریپل گشتاور موتور ۰,۱۳ بدست می‌آید. که نسبت به حالت ۳۶ شیار ۲۸ قطب ریپل بسیار کمتری داریم.

در این ساختار نیروهای شعاعی و مماسی بر روی دندانه های استاتور در خانواده دندانه های نشان داده شده در جدول (۳-۵) یکسان می باشد.

جدول (۳-۵) : حداکثر نیروهای شعاعی و مماسی بر روی دندانه های استاتور در ساختار ۳۶ شیار ۳۰ قطب

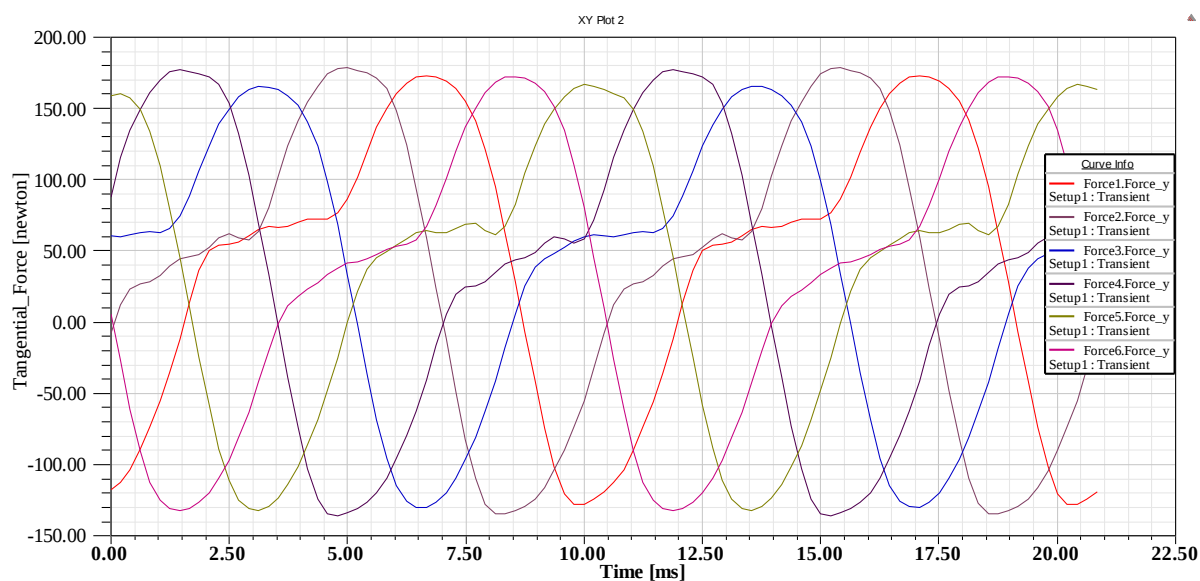
خانواده دندانه ها	حداکثر مقدار نیروی شعاعی (N)	حداکثر مقدار نیروی مماسی (N)
۳۱-۲۵-۱۹-۱۳-۷-۱	۹۸۶	۱۶۸
۳۲-۲۶-۲۰-۱۴-۸-۲	۹۹۰	۱۷۶
۳۳-۲۷-۲۱-۱۵-۹-۳	۹۸۶	۱۶۵
۳۴-۲۸-۲۲-۱۶-۱۰-۴	۱۰۰۶	۱۷۲
۳۵-۲۹-۲۳-۱۷-۱۱-۵	۹۶۷	۱۶۲
۳۶-۳۰-۲۴-۱۸-۱۲-۶	۱۰۲۳	۱۷۲



شکل (۳۵-۵) : نیروهای شعاعی بر روی دندانه های استاتور برحسب زمان در موتور ۳۶ شیار ۳۰ قطب

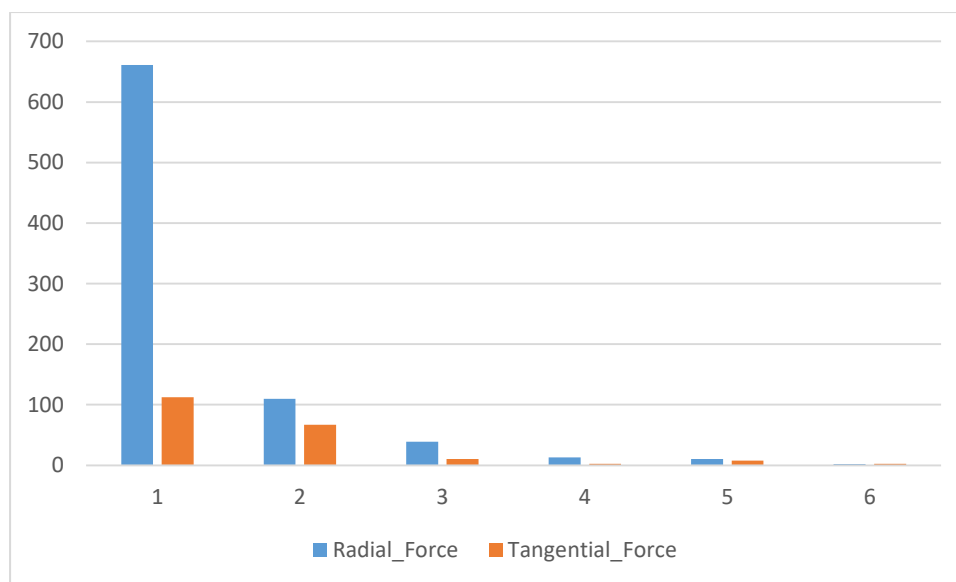
در اینجا شش خانواده شش تایی داریم به این معنا که شش دندانه پشت سرهم نیروهای مشابه داشته و در ادامه شش دندانه ، شش دندانه مطابق جدول (۳-۵) تکرار خواهند شد. شکل (۳۵-۵) و (۳۶-۵) به ترتیب

نیروهای شعاعی بر روی دندانه های استاتور برحسب زمان و نیروهای مماسی بر روی دندانه های استاتور را نشان می دهد.



شکل (۵-۳۶): نیروهای مماسی بر روی دندانه های استاتور برحسب زمان در موتور ۳۶ شیار ۳۰ قطب

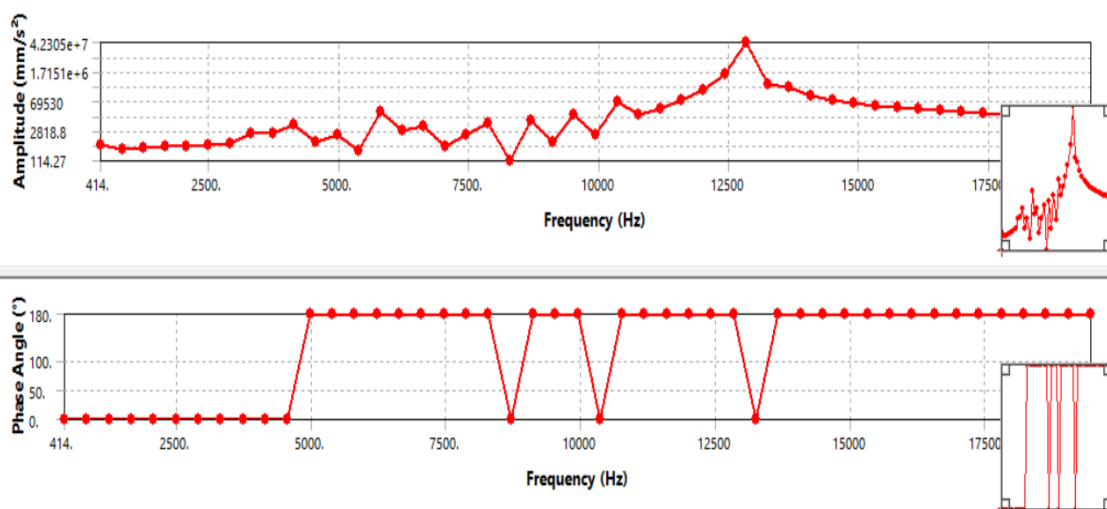
دامنه هارمونیک های نیروهای شعاعی و مماسی را با استفاده از تحلیل تبدیل فوریه سریع بدست می آوریم. که نتایج در شکل (۵-۳۷) مشاهده می شود.



شکل (۵-۳۷) دامنه هارمونیک های نیروهای شعاعی و مماسی موتور ۳۶ شیار ۳۰ قطب

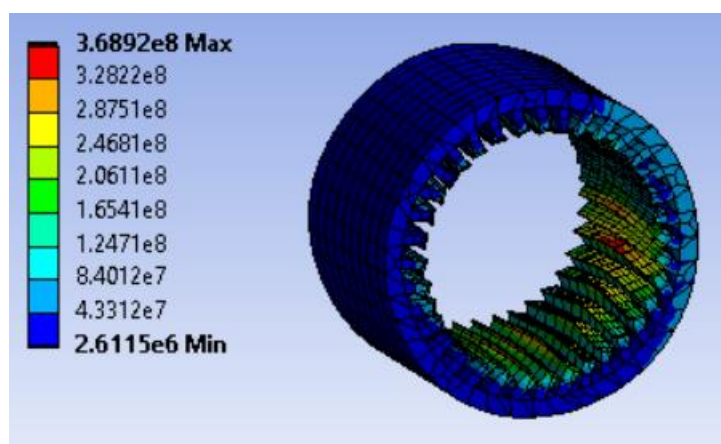
۵-۳-۷ تحلیل فرکانسی ساختار ۳۶ شیار ۳۰ قطب

با اعمال نیروهای الکترومغناطیسی به دندان‌های استاتور می‌توان به تحلیل فرکانسی پردازیم. شکل (۵-۳۸) نمودار مقدار شتاب ذرات به همراه زاویه فاز آن در فرکانس‌های نزدیک به فرکانس طبیعی نشان می‌دهد.



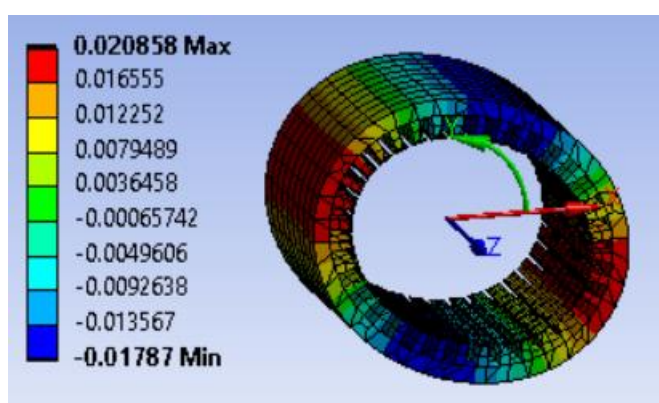
شکل (۵-۳۸) نمودار مقدار شتاب ذرات به همراه زاویه فاز در ساختار ۳۶ شیار ۳۰ قطب

در شکل (۵-۳۹)، شتاب بخش‌های مختلف استاتور را در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز نشان داده شده است. شتاب ذرات در فرکانس‌های ۱۲۸۳۴ هرتز بیشترین شتاب را داشته است. واحد مقدارهای اندازه‌گیری شده برحسب میلی‌متر بر مجذور ثانیه می‌باشد.



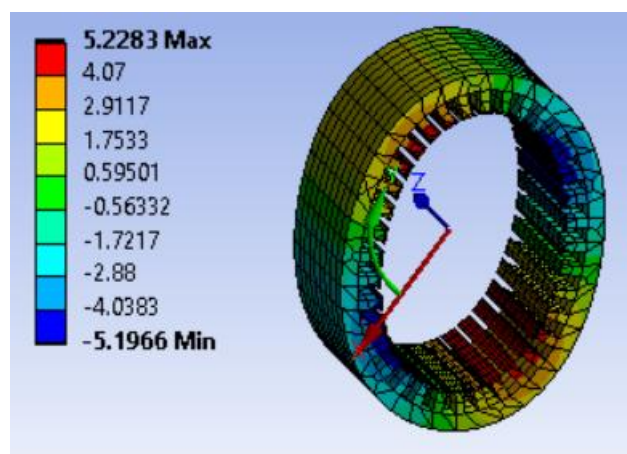
شکل (۵-۳۹) : شتاب ذرات استاتور ۳۶ شیار ۳۰ قطب در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز

نتایج شبیه سازی همچنین نشان می‌دهد که جابه جایی در راستای شعاعی در اولین فرکانس طبیعی یعنی ۴۱۴ هرتز و ۴۱۴۰ و ۴۵۵۴ و ۱۲۸۳۴ هرتز بیشترین مقدار را دارند در حالیکه بیشترین جابه جایی در فرکانس ۴۱۴ هرتز به مقدار ۰,۰۲ میلی‌متر می‌رسد. جابه جایی‌ها در فرکانس‌های ۴۱۴ هرتز در شکل (۵-۴۰) نشان داده شده است. که این مقدار از حالت ۲۸ قطب بسیار کمتر می باشد و این نشان می‌دهد دامنه نیرو در این فرکانس بسیار کمتر شده است.



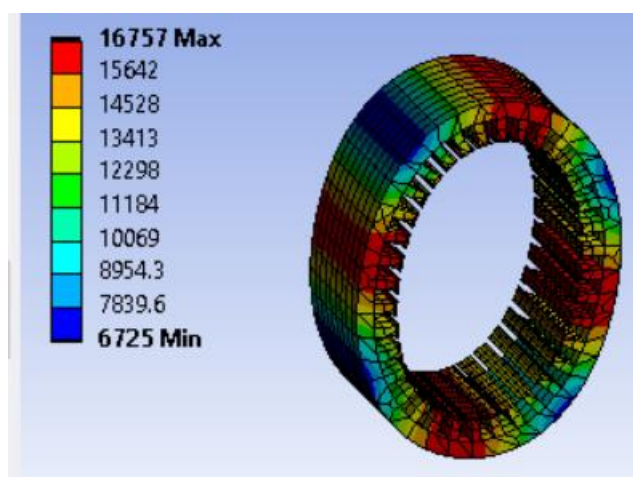
شکل (۵-۴۰) : جابه جایی ذرات در راستای شعاعی در فرکانس ۴۱۴ هرتز ماشین ۳۶ شیار ۳۰ قطب

با بررسی جابه جایی در راستای مماسی نیز به این نتایج رسیده که جابه جایی در فرکانس ۴۱۴ و ۱۲۸۳۴ هرتز بیشترین جابه جایی را در راستای مماسی داشته است. بیشترین جابه جایی در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز به مقدار ۰,۰۵ میلی‌متر می‌رسد. شکل (۵-۴۱) جابه جایی ذرات در راستای مماسی در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز را نشان می‌دهد. که نسب به ساختار قبلی کاهش محسوسی داشته است.



شکل (۵-۴۱) : جابه جایی ذرات در راستای مماسی در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز ماشین ۳۶ شیار ۳۰ قطب

در تحلیل نتایج بدست آمده در ابزار سنجش سرعت ذرات فرکانس های ۴۵۵۴ و ۱۲۸۳۴ هرتز بیشترین سرعت را داشته اند. بیشترین سرعت در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز به مقدار ۴۵۷۴ میلی متر بر ثانیه می باشد. شکل (۴۲-۵) به ترتیب سرعت ذرات در فرکانس های ۱۲۸۳۴ هرتز را نشان می دهد.

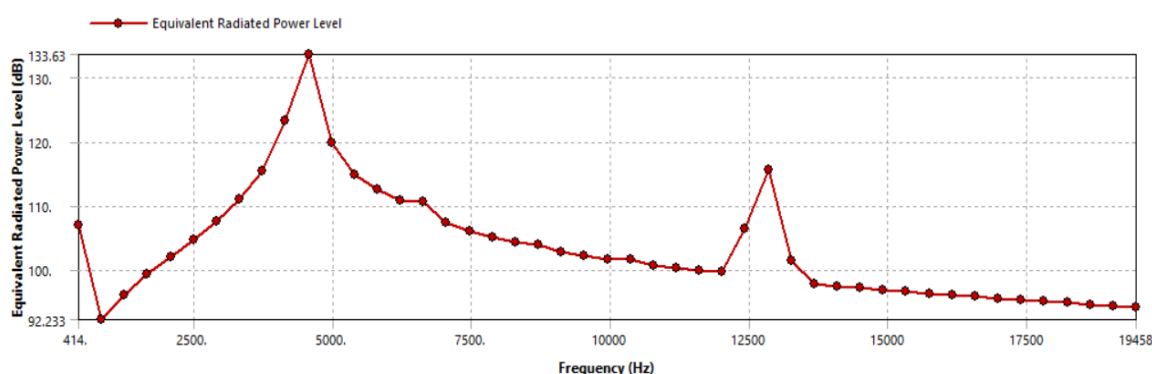


شکل (۴۲-۵): سرعت ذرات در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز در موتور ۳۶ شیار ۳۰ قطب

با توجه به نتایج بدست آمده ، فرکانس های ۴۱۴ ، ۱۲۸۳۴ هرتز از مهم ترین فرکانس ها در افزایش نویز صوتی می باشند.

نویز صوتی موتور بر روی سطح خارجی استاتور را بدست آورده و تحلیل می کنیم. نویز اندازه گیری شده بر حسب فرکانس در شکل (۴۳-۵) نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می شود در فرکانس ۴۵۵۴ هرتز بیشترین سطح صوت به مقدار ۱۳۳,۶۳ دسی بل اندازه گیری شده است. که نسبت به ساختارهای قبلی نویز صوتی کاهش یافته است.



شکل (۴۳-۵): نویز اندازه گیری شده بر حسب فرکانس در موتور ۳۶ شیار ۳۰ قطب

از شکل (۴۳-۵) می‌توان این نتیجه را گرفت که تعداد فرکانس های تشدید کمتر شده و تنها سه فرکانس ۴۱۴ ، ۴۵۵۴ و ۱۲۸۳۴ هرتز نقاط اوج صدا هستند که با بررسی نتایج قبلی این نتیجه گیری قابل پیش بینی بود.

۵-۳-۸ ساختار ۳۶ شیار ۳۲ قطب

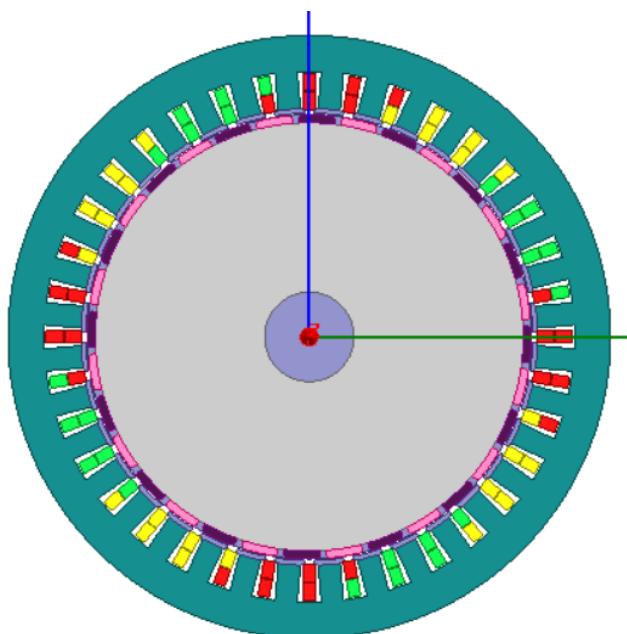
در این ساختار تعداد شیار بر قطب بر فاز $\frac{3}{8}$ می باشد که نحوه سیم پیچی آن در ۹ شیار به صورت زیر می باشد و در ۹ شیار دوم و سوم و چهارم تکرار می شود.

$$\dots|C'A|A'A'|AA|A'B|B'B'|BB|B'C|C'C'|CC|\dots$$

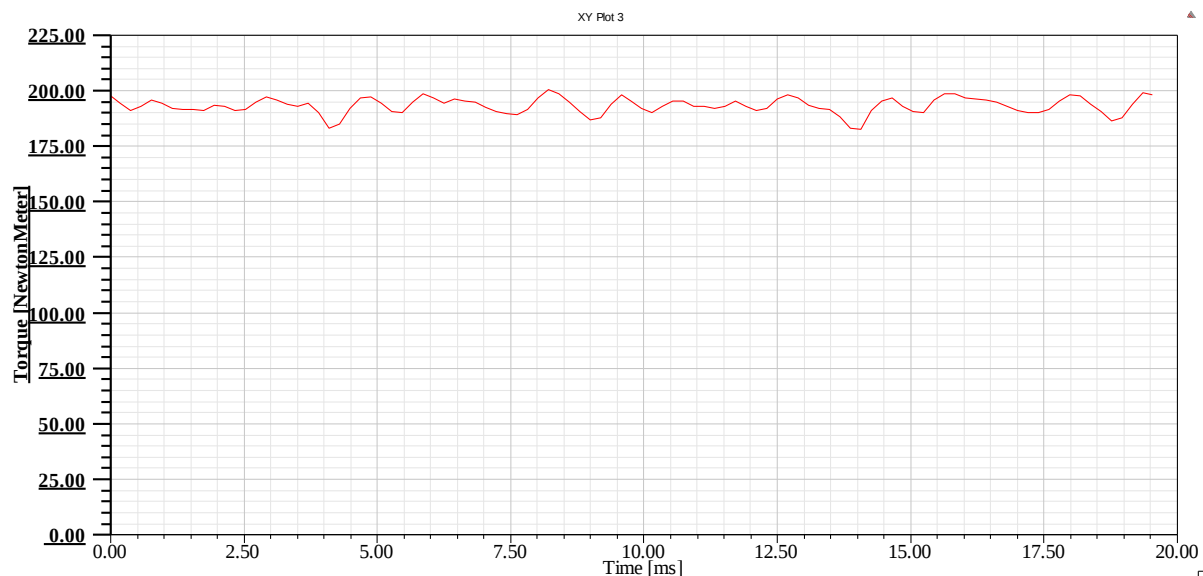
در این ساختار فرکانس ورودی ۵۱,۲ هرتز و تعداد دور سیم پیچ ۲۵ دور می باشد.

۵-۳-۹ تحلیل الکترومغناطیسی ساختار ۳۶ شیار ۳۲ قطب

شکل (۴۴-۵) ساختار ۳۶ شیار ۳۲ قطب شبیه سازی شده در محیط المان محدود را نشان می دهد که تفاوت ساختار سیم پیچی در آن مشاهده می شود.



شکل (۴۴-۵) : ساختار ۳۶ شیار ۳۲ قطب شبیه سازی شده در محیط المان محدود



شکل (۴۵-۵) : گشتاور نامی موتور ۳۶ شیار ۳۲ قطب

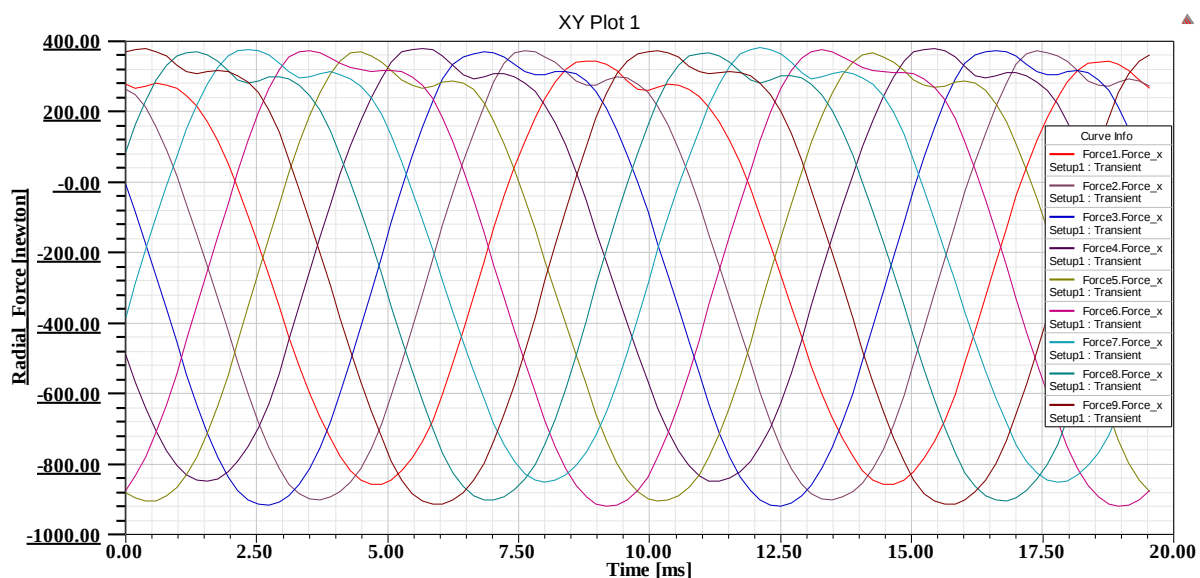
با توجه به شکل (۴۵-۴) و با استفاد از رابطه (۱-۳) ریپل گشتاور موتور ۰,۰۹ بدست می‌آید. که نسبت به ساختارهای قبلی کمترین ریپل را داریم .

در این ساختار نیروهای شعاعی و مماسی بر روی دندانه های استاتور در خانواده دندانه های نشان داده شده در جدول (۴-۵) یکسان می باشد.

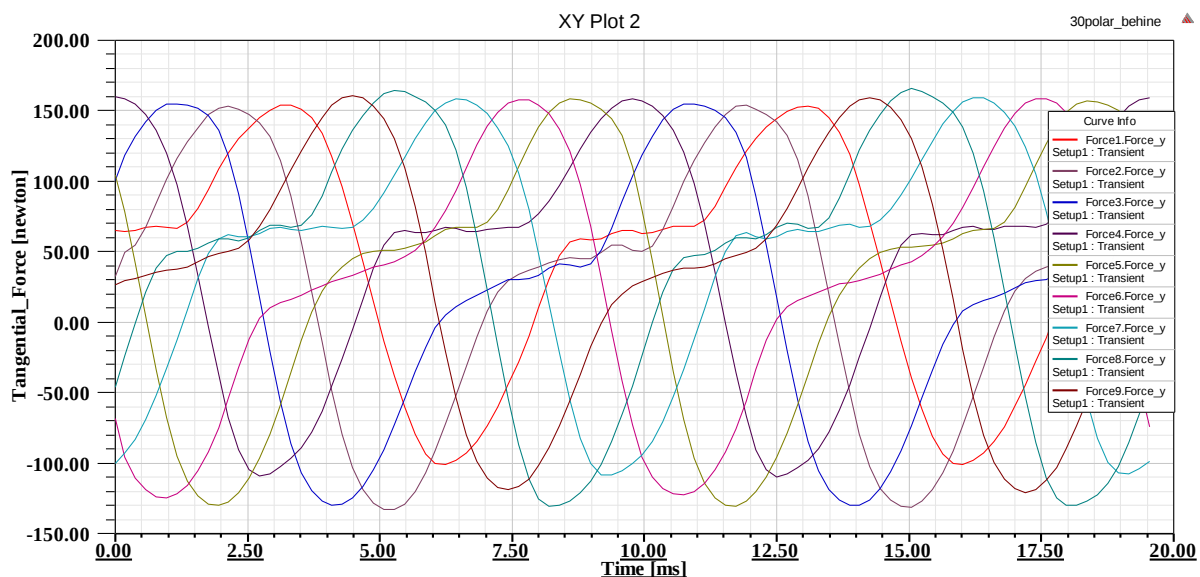
جدول (۴-۵) : حداکثر نیروهای شعاعی و مماسی بر روی دندانه های استاتور در ساختار ۳۶ شیار ۳۲ قطب

خانواده دندانه ها	حداکثر مقدار نیروی شعاعی (N)	حداکثر مقدار نیروی مماسی (N)
۲۸-۱۹-۱۰-۱	۸۵۵	۱۵۰
۲۹-۲۰-۱۱-۲	۸۹۳	۱۵۲
۳۰-۲۱-۱۲-۳	۹۰۸	۱۵۴
۳۱-۲۲-۱۳-۴	۸۲۱	۱۵۸
۳۲-۲۳-۱۴-۵	۸۹۸	۱۵۷
۳۳-۲۴-۱۵-۶	۸۹۲	۱۵۸
۳۴-۲۵-۱۶-۷	۸۴۴	۱۵۵

۱۵۶	۹۰۰	۳۵-۲۶-۱۷-۸
۱۵۳	۹۱۲	۳۶-۲۷-۱۸-۹



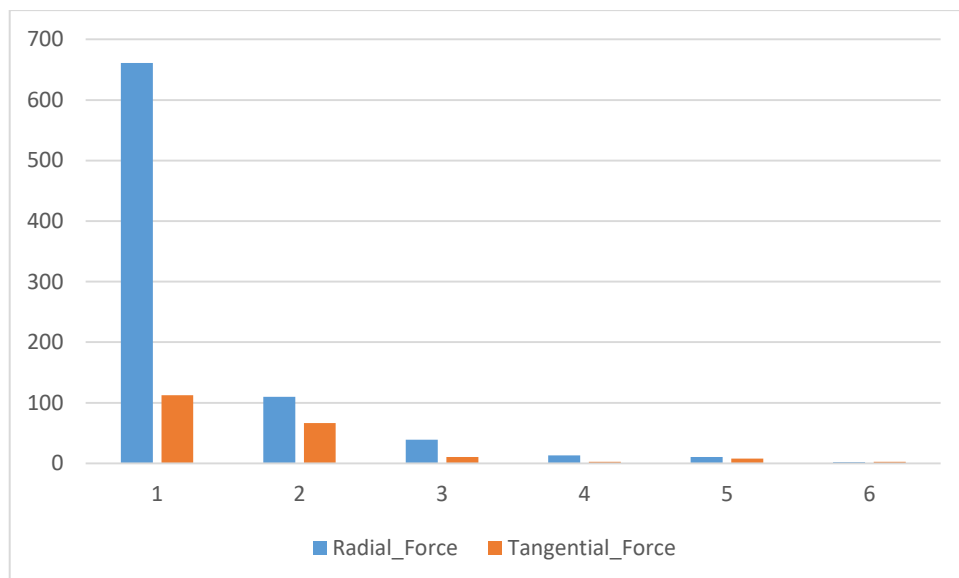
شکل (۴۶-۵): نیروهای شعاعی بر روی دندانه های استاتور برحسب زمان در موتور ۳۶ شیار ۳۲ قطب



شکل (۴۷-۵): نیروهای مماسی بر روی دندانه های استاتور برحسب زمان در موتور ۳۶ شیار ۳۲ قطب

دامنه هارمونیک های نیروهای شعاعی و مماسی را با استفاده از تحلیل تبدیل فوریه سریع بدست می آوریم.

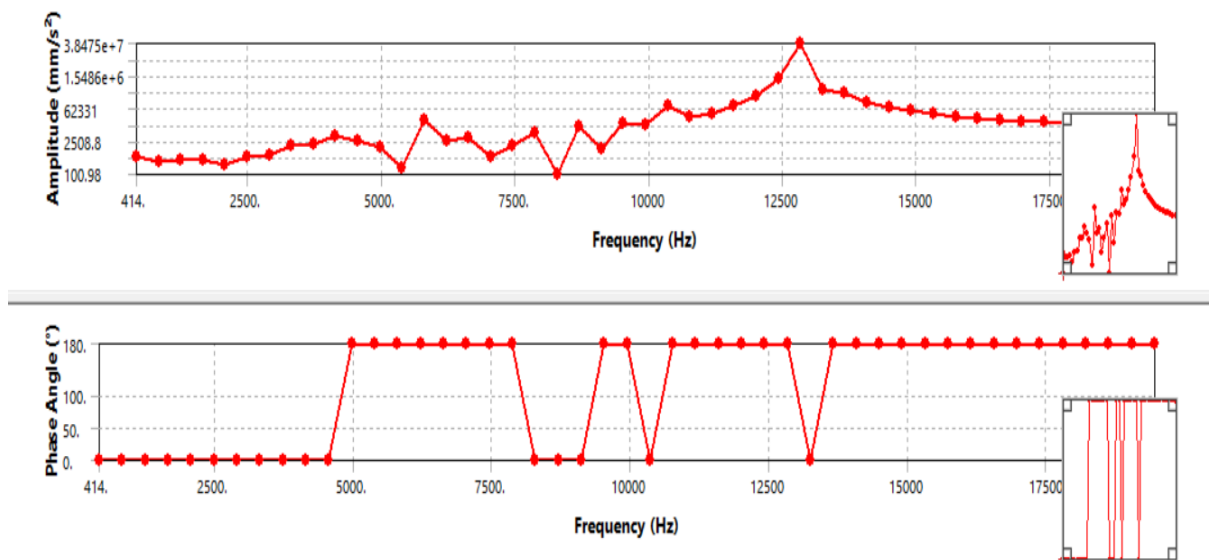
که نتایج در شکل (۴۸-۵) مشاهده می شود.



شکل (۴۸-۵) دامنه هارمونیک‌های نیروهای شعاعی و مماسی موتور ۳۶ شیار ۳۲ قطب
دامنه هارمونیک‌ها کاهش یافته است و نسبت به ساختارهای قبلی کمترین مقدار را دارا می‌باشد.

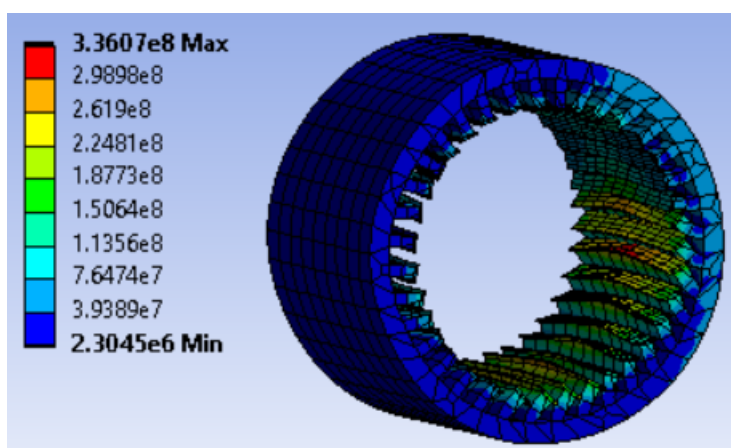
۵-۳-۱۰ تحلیل فرکانسی ساختار ۳۶ شیار ۳۲ قطب

با اعمال نیروهای الکترومغناطیسی به دندانه‌های استاتور می‌توان به تحلیل فرکانسی پردازیم. شکل (۴۹-۵)
نمودار مقدار شتاب ذرات به همراه زاویه فاز آن در فرکانس‌های نزدیک به فرکانس طبیعی نشان می‌دهد.



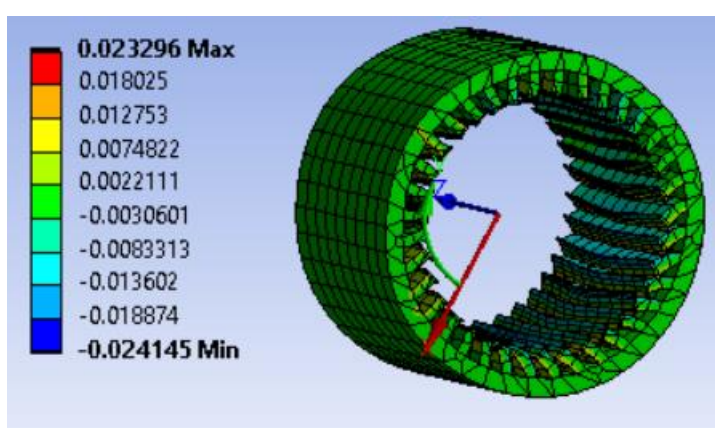
شکل (۴۹-۵) نمودار مقدار شتاب ذرات به همراه زاویه فاز در ساختار ۳۶ شیار ۳۲ قطب

در شکل (۵-۵۰)، شتاب بخش های مختلف استاتور را در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز نشان داده شده است. شتاب ذرات در فرکانس های ۱۲۸۳۴ هرتز بیشترین شتاب را داشته است. واحد مقدارهای اندازه گیری شده برحسب میلی متر بر مجذور ثانیه می باشد.



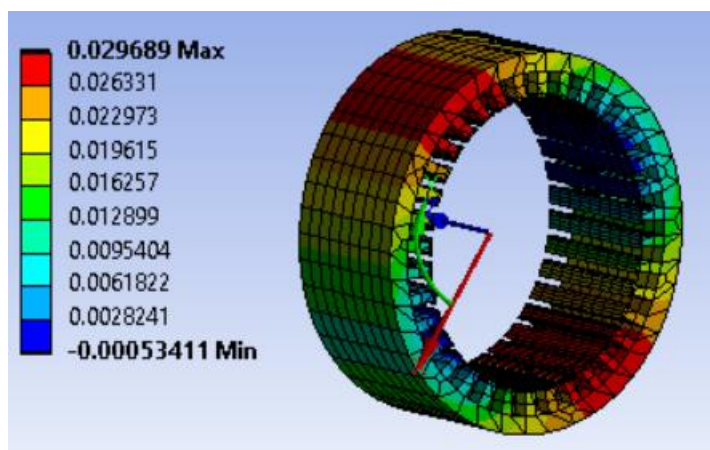
شکل (۵-۵۰): شتاب ذرات استاتور ۳۶ شیار ۳۲ قطب در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز

نتایج شبیه سازی همچنین نشان می دهد که جابه جایی در راستای شعاعی در اولین فرکانس طبیعی یعنی ۴۱۴ هرتز و ۴۵۵۴ و ۱۲۸۳۴ هرتز بیشترین مقدار را دارند در حالیکه در بیشترین جابه جایی در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز به مقدار ۰,۰۲ میلی متر می رسد. جابه جایی ها در فرکانس های ۱۲۸۳۴ هرتز در شکل (۵-۵۱) نشان داده شده است.



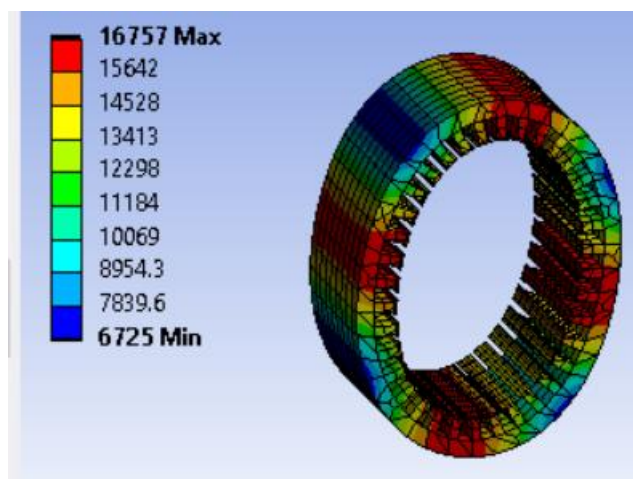
شکل (۵-۵۱): جابه جایی ذرات در راستای شعاعی در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز ماشین ۳۶ شیار ۳۲ قطب

با بررسی جابه‌جایی در راستای مماسی نیز به این نتایج رسیده که جابه‌جایی در فرکانس ۴۱۴ بیشترین جابه‌جایی را در راستای مماسی داشته‌است. بیشترین جابه‌جایی در فرکانس ۴۱۴ هرتز به مقدار ۰,۰۲ میلی‌متر می‌رسد. شکل (۵-۵۲) جابه‌جایی ذرات در راستای مماسی در فرکانس ۴۱۴ هرتز را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۵۲): جابه‌جایی ذرات در راستای مماسی در فرکانس ۴۱۴ هرتز ماشین ۳۶ شیار ۳۲ قطب

در تحلیل نتایج بدست آمده در ابزار سنجش سرعت ذرات نیز فرکانس‌های ۴۵۵۴ و ۱۲۸۳۴ هرتز بیشترین سرعت را داشته‌اند. بیشترین سرعت در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز به مقدار ۴۱۶۷ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد. شکل (۵-۵۳) به ترتیب سرعت ذرات در فرکانس‌های ۱۲۸۳۴ هرتز را نشان می‌دهد.

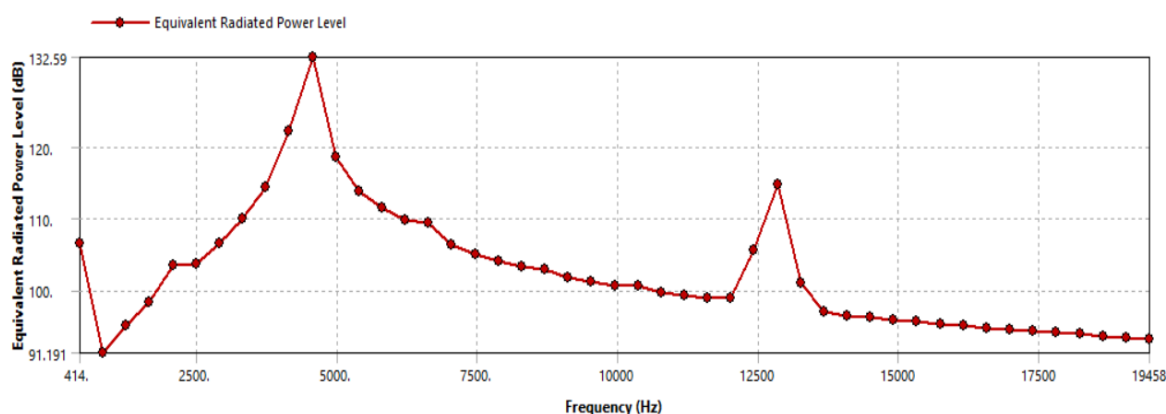


شکل (۵-۵۳): سرعت ذرات در فرکانس ۱۲۸۳۴ هرتز در موتور ۳۶ شیار ۳۲ قطب

با توجه به نتایج بدست آمده فرکانس‌های ۴۱۴ و ۴۵۵۴ و ۱۲۸۳۴ هرتز از مهم‌ترین فرکانس‌ها در افزایش نویز صوتی می‌باشند.

نویز صوتی موتور بر روی سطح خارجی استاتور را بدست آورده و تحلیل می‌کنیم. نویز اندازه‌گیری شده برحسب فرکانس در شکل (۵-۵۴) نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود در فرکانس ۴۵۵۴ هرتز بیشترین سطح صوت به مقدار ۱۳۲,۵۹ دسی بل اندازه‌گیری شده است. که نسبت به ساختارهای قبلی نویز صوتی کاهش یافته است.



شکل (۵-۵۴) : نویز اندازه‌گیری شده برحسب فرکانس در موتور ۳۶ شیار ۳۲ قطب

از شکل (۵-۵۴) می‌توان این نتیجه را گرفت که تعداد فرکانس‌های تشدید کمتر شده و تنها سه فرکانس ۴۱۴، ۴۵۵۴ و ۱۲۸۳۴ هرتز نقاط اوج صدا هستند که با بررسی نتایج قبلی این نتیجه‌گیری قابل پیش‌بینی بود. سطح صدا در همه این نقاط کاهش یافته است که نتایج نشان دهنده کاهش دامنه نیروهای شعاعی در این فرکانس‌ها می‌باشد.

۵-۴- بررسی ضریب سیم پیچی و تعداد قطب بر نویز صوتی

جدول (۵-۵) ضرایب سیم پیچی و نویزهای بدست آمده هر ترکیب را نشان می‌دهد.

با بررسی جدول فوق می‌توان این نتیجه را گرفت که با افزایش تعداد قطب و ضریب سیم پیچی در ترکیبات مختلف موتور مدولار نویز صوتی کاهش می‌یابد. در حالت ۳۶ شیار ۲۸ قطب با کم شدن ضریب سیم پیچی و افزایش رپل گشتاور نویز صوتی نیز افزایش قابل توجهی داشته است.

جدول (۴-۵) ضرایب سیم پیچی و نویزهای بدست آمده هر ترکیب

ترکیب تعداد شیار استاتور و تعداد قطب رتور	ضریب سیم پیچی	ریپل گشتاور	حداکثر نویز صوتی بدست آمده (dB)
۲۴ شیار ۲۰ قطب	۰,۹۳۳	۰,۱۱	۱۵۰
۲۴ شیار ۲۸ قطب	۰,۹۳۳	۰,۱۹	۱۴۳
۳۶ شیار ۲۸ قطب	۰,۹۰۲	۰,۵۶	۱۵۷
۳۶ شیار ۳۰ قطب	۰,۹۳۳	۰,۱۳	۱۳۳
۳۶ شیار ۳۲ قطب	۰,۹۴۵	۰,۰۹	۱۳۲

بنابراین در ساختارهای مختلف موتورهای مدولار ، از نقطه نظر نویز صوتی بهتر است ساختار با ضریب سیم پیچی بالا و تعداد قطب بالاتر و ریپل گشتاور پایین تر انتخاب شود.

فصل ۶ جمع بندی ، نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- جمع بندی

ماشین های مدولار مغناطیس دائم نوع خاصی از ماشین های pm با چگالی توان و راندمان بالا می باشند. از آنجا که در خیلی از مکان هایی که از ماشین های الکتریکی استفاده می شود باید حداکثر میزان نویز صوتی را رعایت کرد ، بنابراین در طراحی ساختار ماشین ها این نکته باید لحاظ شود. به همین علت مسئله نویز صوتی امروزه اهمیت زیادی پیدا کرده است. در این پایان نامه نیروهای شعاعی الکترومغناطیسی وارد بر دندانه های استاتور به عنوان مهمترین عامل نویز در ماشین های الکتریکی در یک ماشین مدولار مغناطیس دائم به کمک نرم افزار المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور با در نظر گرفتن یک نمونه ماشین مدولار موجود ، پارامترهای طراحی را استخراج کرده و با استفاده از تحلیل الکترومغناطیسی به کمک روش المان محدود توسط نرم افزار Ansys ماشین مورد نظر را از لحاظ عملکردی تایید کرده و پس از آن با استفاده از تحلیل ساختاری فرکانس های طبیعی موتور را بدست آورده و در ادامه با تحلیل فرکانسی سطح فشار صوت محاسبه شد.

در ادامه ترکیبات مختلف تعداد شیار استاتور ، تعداد قطب رتور و نوع سیم پیچی موتورهای مدولار با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای اساسی طراحی از جمله توان ، سرعت ، گشتاور میانگین و حجم موتور به هدف کاهش نویز بررسی شد.

با توجه به ترکیبات بررسی شده در فصل سوم در استاتورهای با ۲۴ شیار، رتور علاوه بر ۲۰ قطب می تواند ۲۸ قطب نیز داشته باشد ، در این ساختار سیم پیچی استاتور مشابه موتور نمونه است و تنها تعداد قطب رتور به ۲۸ عدد افزایش پیدا می کند.

با تغییرات صورت گرفته باید توجه داشت که چگالی جریان در سیم پیچ و همچنین چگالی شار مغناطیسی در استاتور و رتور علی الخصوص دندانه های استاتور از حد مجاز بیشتر نشود و در ادامه با تحلیل فرکانسی موتور سطح فشار صوت اندازه گیری شد.

و در آخر ترکیب های مختلف در استاتور ۳۶ شیار مورد بررسی قرار گرفت که در ساختار ۳۶ شیار تعداد قطب ۲۸ و ۳۰ و ۳۲ به علت ساختار سیم پیچی متقارن هریک و همچنین ضریب سیم پیچی مناسب بررسی شد.

که در ساختار ۲۸ قطب استاتور ، سیم پیچی با تعداد شیار بر قطب بر فاز $\frac{3}{7}$ سیم پیچی شده و در ساختار ۳۰ قطب استاتور ، سیم پیچی با تعداد شیار بر قطب بر فاز $\frac{2}{5}$ و همچنین در ساختار ۳۲ قطب استاتور ، سیم پیچی با تعداد شیار بر قطب بر فاز $\frac{3}{8}$ سیم پیچی شد.

۶-۲- نتیجه گیری

با بررسی های صورت گرفته می توان به این نتیجه دست یافت که در تعداد شیار مشابه که ضریب سیم پیچی برابر دارند ، با افزایش تعداد قطب رتور ، نیروهای الکترومغناطیسی شعاعی وارد بر دندانه و همچنین نویز صوتی کاهش می یابد. همانطور که در ساختار ۲۴ شیار مشاهده شد ، در حالت رتور با ۲۸ قطب نویز کمتری نسبت به رتور با ۲۰ قطب بدست آمد.

همچنین با بهبود ضریب سیم پیچی استاتور نیروهای الکترومغناطیسی شعاعی وارد بر دندانه و نویز صوتی نیز کاهش می یابد ، که این نتیجه به وضوح با بررسی سه ترکیب متفاوت در ساختار ۳۶ شیار بدست آمد.

۶-۳- پیشنهادات

با توجه به ساختارهای سیم پیچی متنوع برای ترکیب های ماشین های مدولار می توان موارد زیر را جهت پژوهش در زمینه لرزش و نویز صوتی آن ها به علاقه مندان پژوهش در این حوزه پیشنهاد کرد:

۱- بررسی تاثیر ساختارهای متفاوت موتور مدولار بر روی نویز صوتی با در نظر گرفتن فرکانس های طبیعی سیم پیچ ها و پوسته موتور و محدودیت های آن

۲- بررسی تاثیر گشتاور دندانه ای بر روی نویز ماشین های مدولار مغناطیس دائم

۳ تعیین نویز ماشین های مدولار مغناطیس دائم بصورت عملی و مقایسه آن با نتایج بدست آمده.

۴- بررسی نویز صوتی ماشین های مدولار در ترکیب های تعداد قطب و شیار استاتور مختلف دیگر.

- [1] W. Fei and P. C. K. Luk (2009) "Torque ripple reduction of axial flux permanent magnet synchronous machine with segmented and laminated stator" IEEE pp 132.
- [2] Jong Gun Lee, Yu Ki Lee, Gwan Soo Park (2013) "Effects of V-skew on the cogging torque in permanent magnet synchronous motor" International Conference on Electrical Machines and Systems IEEE pp 122.
- [3] Li Zhu(2009) "Analytical methods for minimizing cogging torque in permanent-magnet machines" IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 45, No. 4.
- [4] Sang-Moon Hwang, Jae-Boo Eom, Geun-Bae Hwang, Weui-Bong Jeong, and Yoong-Ho Jung "Cogging torque and acoustic noise reduction in permanent magnet motors by teeth pairing" IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 36, No. 5, September 2000.
- [5] S. Zhu', W. Zhao', J. Ji' and J. Zheng "Reduction of vibration and acoustic noise in fractional-Slot concentrated-windings permanent-magnet machine" (2018) IEEE International Magnetics Conference.
- [6] امهدی اسلامیان کوپائی، بردیا منتظری، محسن سلیمی، سید ضیاء مظلوم، محسن رادان، "مروری بر روشهای نوین کاهش ارتعاش و نویز صوتی در موتور سنکرون مغناطیس دائم"
- [7] Li Zhu, S.Z. Jiang, Z. Q. Zhu and C. C. Chan, "Analytical method for minimizng cogging torque in permanent magnet machines," IEEE Trans. Magn, Vol. 45, No. 4, pp. 2020-2031, April 2009.
- [8] Mohammad S. Islam, Sayeedmir, and Tomy Sebastian, "Issues in reducing the cogging torque o mass produced permanent magnet brushless dc motor," IEEE Trans. On Magntics, Vol. 43, No. 9, pp. 813-820 2007.
- [9] Sang- Moon Hwang, jae Boo Eom, ect, "various design techniques to reduce cogging torque by controlling energy variation in permanent magnet motors," IEEE Trans. Magn., Vol. 37, No. 4. pp. 2806-2909, 2001.
- [10] Z.Q. Zhu and D. Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines," IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 15,No.4, pp. 407-412, Dec. 2000.
- [11] R. Islam, I. Husain, A. Fardoun, "Permanent-magnet synchronous motor magnet designs with skewing for torque ripple and cogging torque reduction," IEEE Trans. On Industry Application, Vol. 45, No. 1,pp. 152-160 June 2009.
- [12] T. Jahns, "Motion control with permanent- magnet AC machines," in IEEE Proc., Vol. 82, No. 8, pp. 1241-1252, Aug. 1994.

- [13] P. Zheng, J. Zhao, J. Han, "Optimization of the magnetic pole shape of a permanent magnet synchronous motor," IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 43, No. 6, pp. 2531-2533 June 2007.
- [14] R. Lateb, N. Takorabet, F. MeibodyTabar, "Effect of magnet segmentation on the cogging torque in surface-mounted permanent-magnet motors," IEEE Trans. Magn., Vol. 42, No. 3, pp. 442-445 March 2006.
- [15] Gyu-Hong Kang and Jin Hur, "Analytical prediction and reduction of the cogging torque in interior permanent magnet motor," IEEE Trans. Magn., pp. 1420-1624, 2005.
- [16] محمدرضا بقایی پور ، احمد دارابی و علی دستفان "ارائه یک مدل مبتنی بر آزمایش جهت استخراج فرکانسهای طبیعی موثر بر نویز صوتی درموتور سنکرون" مجله مدل سازی در مهندسی سال شانزدهم، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷.
- [17] Sunghyuk Park, Wonho Kim, and Sung-Il Kim, Member, IEEE" A Numerical prediction model for vibration and noise of axial flux motors" IEEE Transaction on industrial electronics, Vol. 61, No. 10, October 2014 .
- [18] امید نادری سامانی ، بابک گنجی " کاهش نویز در ماشین سوئیچ رلوکتانس با تغییر ساختار هندسی ماشین به کمک روش طراحی آزمایش ها" هوش محاسباتی در مهندسی برق، سال هشتم، شماره سوم، پاییز ۹۶.
- [19] Jianbin Liang¹ , James W. Jiang¹ , Alan Dorneles Callegaro , Berker Bilgin , Jianning Dong , Debbie Reeves , Ali Emadi" Prediction of acoustic noise and vibration of a 24/16 traction switched reluctance machine" IET Electr. Syst. Transp, 2020, Vol. 10 Iss. 1, pp. 35-43 , 2019.
- [20] G. J. Li, B. Ren, and Z. Q. Zhu Fellow, IET, "Design guidelines for fractional slot multi-phase modular permanent magnet machines", 2016.
- [21] یاسر حاجب ، امیر حسن نیا خیبری " عملکرد موتور سنکرون آهنربای دائم سرعت پایین (مدولار) با یک طرح جدید سیم پیچی متمرکز با کسری بهبود یافته شیار FSCW "چهارمین همایش بین المللی برق ، علوم کامپیوتر و فناوری ۱۳۸۸.
- [22] F. Libert, J. Soulard "Investigation on pole-slot combinations for permanent-magnet machines with concentrated windings" · January 2004.
- [24] Yiguang Chen, Zhiming Du, Weigang Zhong and Lingbin Kong "Modular stator structure permanent magnet synchronous machine" · November 2008.
- [25] Libert F., Soulard J., "Design study of a Direct-driven surface mounted permanent magnet motor for low speed application", Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems Electromotion 2003, Vol. 1 pp. 252-257, 26-28 November 2003, Marrakesh, Morocco.

[26] رضا میرزا حسینی، (۱۳۹۲) پایان نامه ارشد: "محاسبه نویزهای الکترومغناطیسی یک موتور مغناطیس دائم به روش اجزاء محدود"، دانشکده برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

[27] Shahaj A, PhD. Thesis, "Mitigation of vibration in large electrical machines", Mech. depart, University of Nottingham, 2010.

Abstract

Acoustic noise is the effect of a vibrating surface, so acoustic noise and vibration are two interconnected phenomena in electric machines and the sources of both are the same. The source of noise in electric machines can be divided into three categories: aerodynamic, mechanical and electromagnetic. With a very careful study, it can be boldly said that the source of vibration and sound noise in small to medium electric machines is the electromagnetic source and in large machines is the mechanical sources. Cogging torque, torque ripple, and magnetic radial forces are the main sources of electromagnetic noise. It is very important to know at what frequencies the various components of radial forces are produced, if one of these frequencies is equal to or close to the normal frequency of the machine, intensification occurs and vibration and noise increase. Research has shown that changing the structure of the winding can change the radial and tangential forces on the surface of the stator teeth, so that an optimal amount of motor noise can be achieved and up to Decreased the desired amount. The main problem with permanent magnet machines is that the permanent magnets on the rotor are not formable, so they are not suitable for high speeds, so these types of machines are more useful at low speeds. In designing the machine to reduce its speed, two general solutions can be done: 1- Reducing the frequency: which leads to increasing losses and volume of the machine. 2- Increasing the number of poles: which also increases with the problem of arranging permanent magnets. The number of rotor poles, the number of slots increases and the stator strength decreases. To solve the above problems, we use a modular structure, in which in this structure a special harmonic is amplified instead of the main harmonic, and therefore the number of pairs of rotor poles is equal to the amplified harmonic. Therefore, without increasing the number of stator slots, the number of poles can be increased and the mentioned problems can be solved.

Key words:

acoustic noise; Vibration; Natural vibration frequencies; Radial forces



Shahrood University of
Technology

Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical Engineering and Robotics

Field Power electronics and electric machines

**Proper desing of the stator winding structure to reduce the
acoustic noise of the modular permanent magnet machines**

By: Amir Hossein Agha Hosseini

Supervisor : Dr. A. Hassan nia Kheibari

February 2022