

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

# تحلیل و مقایسه مشخصه‌های صوتی یک موتور القایی روتور سیم‌پیچی شده و موتور سنکرون

سعید اکبرپور

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر احمد دارابی

استاد مشاور:

جناب آقای دکتر حسین مروی

ارائه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۴

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ





## تشکر و قدردانی

وظیفه خود می‌دانم سپاسگزار تمام آن‌هایی باشم که در این دوره ارزشمند بودنشان و امیدشان راهگشای من بود؛ پدر و مادر عزیزم که همانند تمام روزهای گذشته با صبر و حوصله در کنارم بودند.

همچنین از استاد گران‌قدرم جناب آقای دکتر احمد دارابی که با تلاش‌های بی‌شائبه خود مرا در انجام این پایان‌نامه یاری نمودند و هنگام نیاز برای حل مشکلات این‌جانب از هیچ کمکی دریغ نکردند. برای ایشان آرزوی سلامتی، موفقیت و سربلندی را دارم. نیز کمال تشکر و قدردانی را از جناب آقای دکتر حسین مروی به عمل می‌آورم که با مشاوره ارزشمند خود مرا در انجام این پایان‌نامه یاری نمودند.

# تعهد نامه

اینجانب ...سعید اکبرپور... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ...مهندسی برق / قدرت... دانشکده ...برق و رباتیک... دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه ... تحلیل و مقایسه مشخصه‌های صوتی یک موتور القایی روتور سیم‌پیچی شده و موتور سنکرون... تحت راهنمایی...دکتر احمد دارابی... متعهد می‌شوم.

- 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 اخلاق 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 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

در بسیاری از تحقیقات انجام شده در مورد نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی، تأثیر پارامترهای ابعادی و ساختاری، مورد بررسی قرار گرفته است. با این وجود، تأثیر شرایط عملکردی تاکنون مورد بحث زیادی قرار نگرفته است. یکی از اهداف این تحقیق، بررسی تأثیر شرایط عملکردی بر مشخصه‌های صوتی ماشین‌های القایی و سنکرون و همچنین مقایسه اجمالی مشخصه‌های صوتی موتورهای القایی و سنکرون است. برای رسیدن به اهداف این تحقیق، یک موتور القایی روتور سیم‌پیچی به‌عنوان موتور مورد آزمایش انتخاب شده است. بنابراین ابتدا روابط تحلیلی با هدف بررسی تأثیر شرایط عملکردی بر مشخصه‌های صوتی موتور مورد آزمایش ارائه شده و در ادامه با تحلیل نتایج حاصل از اندازه‌گیری در شرایط عملکردی مختلف، درستی روابط ارائه شده بررسی شده است. علاوه بر این، این پایان‌نامه به شناسایی منابع نویز در ماشین‌های الکتریکی پرداخته است. در روش اول، با اندازه‌گیری مقدار فشار صوت در اطراف موتور مورد آزمایش، منبع غالب در ایجاد نویز صوتی تشخیص داده شد. در تحقیقات اخیر اغلب از این روش استفاده شده است. در ادامه یک روش جدید برای تعیین منابع غالب در ایجاد نویز صوتی ماشین‌های سنکرون روتور سیم‌پیچی شده، ارائه شده است. ابتدا سه متغیر سرعت مکانیکی، ولتاژ ترمینال و جریان تحریک به‌عنوان پارامترهای مستقل انتخاب شده و با تغییرات هر یک از پارامترها بصورت مستقل و خطی با زمان، مقدار سیگنال فشار صوت نیز به‌طور هم‌زمان اندازه‌گیری شده است. در نهایت منابع غالب نویز صوتی در موتور مورد آزمایش با تحلیل نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های انجام شده در این سه مود، به‌درستی تعیین شده‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** ماشین‌های الکتریکی، موتور سنکرون، اندازه‌گیری نویز صوتی، فرکانس طبیعی،

تشخیص منابع نویز صوتی، تحلیل پاسخ صوتی ماشین‌های الکتریکی

## مقالات مستخرج از پایان نامه

### مقالات چاپ شده در کنفرانس بین المللی

[۱] سعید اکبرپور، احمد دارابی، حسین مروی " طراحی یک آزمایش جدید برای استخراج فرکانس‌های طبیعی غالب در ایجاد صوت یک موتور سنکرون با قطب‌های روتور صاف"، سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، بهمن ۱۳۹۴

[۲] سعید اکبرپور، احمد دارابی، حسین مروی " اندازه‌گیری، تحلیل و مقایسه مشخصه‌های صوتی موتورهای القایی و سنکرون"، سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، بهمن ۱۳۹۴

### مقالات ارسال شده

[3] A. Darabi, S. Akbarpour, M. Baghayipour, "A Comprehensive Experimental Method for Definite Identification of Dominant Noise Sources in a Wound-Rotor Synchronous Motor," *IEEE Trans. on Industrial Electronic*. Submitted at 21-Dec-2015



## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل ۱: مقدمه و بررسی منابع .....	۱
۱-۱- مقدمه .....	۱
۱-۲- مروری بر پیشینه نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی .....	۲
۱-۳- بررسی موردی مراجع مربوط به نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی .....	۳
۱-۴- مروری بر استانداردهای مربوط به نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی .....	۷
۱-۵- تعریف موضوع و هدف از این پژوهش .....	۷
فصل ۲: معرفی کمیت‌های پایه‌ای صوت و مکان‌یابی منبع غالب صوت یک موتور القایی ...	۱۱
۲-۱- مقدمه .....	۱۱
۲-۲- معرفی کمیت‌های پایه‌ای صوت .....	۱۱
۲-۲-۱- فشار صوت و تراز فشار صوت .....	۱۲
۲-۲-۲- شدت صوت و تراز شدت صوت .....	۱۲
۲-۲-۳- توان صوت و تراز توان صوت .....	۱۴
۲-۳- اندازه‌گیری کمیت‌های پایه‌ای صوت .....	۱۴
۲-۳-۱- اندازه‌گیری فشار صوت .....	۱۴
۲-۳-۲- اندازه‌گیری شدت صوت .....	۱۵
۲-۴- اندازه‌گیری توان صوت .....	۱۶
۲-۵- انجام آزمایش و مکان‌یابی منبع صوت یک موتور القایی .....	۱۹

فصل ۳: دسته بندی منابع نویز در ماشین های الکتریکی..... ۲۵

۱-۳- مقدمه ..... ۲۵

۲-۳- منابع آیرودینامیکی..... ۲۵

۳-۳- منابع مکانیکی..... ۲۶

۴-۳- منابع الکترومغناطیسی..... ۲۷

۵-۳- ارتعاش پوسته استاتور در اثر نیروهای شعاعی ماکسول..... ۲۸

فصل ۴: تحلیل و مقایسه مشخصه های صوتی موتور القایی روتور سیم پیچی شده

وموتور سنکرون..... ۳۱

۱-۴- مقدمه ..... ۳۱

۲-۴- هارمونیک های فضایی چگالی شار استاتور و روتور موتور القایی..... ۳۲

۳-۴- هارمونیک های چگالی شار روتور موتور مورد آزمایش در رژیم سنکرون..... ۳۴

۴-۴- مقایسه نویز الکترومغناطیسی موتور سنکرون و آسنکرون..... ۳۶

۵-۴- ایجاد نیروهای شعاعی..... ۳۹

۶-۴- فرکانس و مرتبه نیروهای شعاعی ناشی از هارمونیک های فضایی چگالی شار..... ۴۱

۱-۶-۴- نیروهای شعاعی حاصل از هارمونیک های فضایی استاتور..... ۴۱

۲-۶-۴- نیروهای شعاعی حاصل از هارمونیک های فضایی روتور..... ۴۲

۳-۶-۴- نیروهای شعاعی حاصل از اثر متقابل بین هارمونیک های روتور و استاتور..... ۴۲

۴-۶-۴- نیروهای شعاعی حاصل از تأثیر ناهم محوری بر چگالی شار فاصله هوایی..... ۴۳

۵-۶-۴- نیروهای شعاعی حاصل از پدیده اشباع..... ۴۴

۴۴	۴-۶-۶- نامتعادلی ولتاژ تغذیه
۴۵	۴-۷- نیروی‌های شعاعی حاصل از هارمونیک‌های جریان استاتور
<b>فصل ۵: اندازه‌گیری و تحلیل نویز صوتی موتور سنکرون در شرایط عملکردی مختلف....۴۷</b>	
۴۷	۵-۱- مقدمه
۴۸	۵-۲- انجام آزمایش عملی و استخراج نتایج اولیه
۴۸	۵-۲-۱- معرفی سیستم اندازه‌گیری و تجهیزات مورد نیاز برای انجام آزمایش
۵۱	۵-۲-۲- آزمایش در مود سرعت متغیر
۵۴	۵-۲-۳- آزمایش در مود تحریک متغیر
۵۶	۵-۲-۴- آزمایش در مود ولتاژ متغیر
۵۷	۵-۳- داده‌کاوی و استخراج اطلاعات موجود در طیف رنگی
۶۰	۵-۴- استخراج فرکانس‌های طبیعی ارتعاش ساختار مکانیکی
۶۲	۵-۴-۱- استخراج و تفکیک فرکانس‌های طبیعی با استفاده از پردازش تصویر
۶۷	۵-۵- روش جدید ارائه شده برای تشخیص منابع نویز صوتی موتور سنکرون
<b>فصل ۶: نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۸۵</b>	
۸۵	۶-۱- نتیجه‌گیری
۸۶	۶-۲- پیشنهادات
۸۸	مراجع
۹۴	پیوست A
۹۶	پیوست B

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۱۵.....	شکل (۱-۲): نمایی از یک میکروفن اندازه‌گیری
۱۶.....	شکل (۲-۲): نمایش شماتیک پروب شدت صوت
۱۷.....	شکل (۳-۲): اندازه‌گیری توان صوت بر مبنای شدت صوت
۱۸.....	شکل (۴-۲): روش اندازه‌گیری توان صوت ISO 9614-1
۱۹.....	شکل (۵-۲): موقعیت قرار گیری موتور سنکرون مورد آزمایش و چهار چوب اندازه‌گیری
۲۰.....	شکل (۶-۲): نحوه شبکه بندی چهارچوب اندازه‌گیری
۲۲.....	شکل (۷-۲): طیف توان صوت منتشر شده از موتور القایی
۲۳.....	شکل (۸-۲): نقشه فشار صوت موتور القایی
۲۳.....	شکل (۹-۲): نقشه فشار صوت موتور القایی در صورت پوشاندن مسیر فلوی هوای فن
۲۴.....	شکل (۱۰-۲): طیف توان صوت موتور القایی در صورت پوشاندن مسیر فلوی هوای فن
۲۶.....	شکل (۱-۳): منابع نویز صوتی در ماشین‌های الکتریکی
۲۸.....	شکل (۲-۳): روند ایجاد نویز الکترومغناطیسی
۳۰.....	شکل (۳-۳): شکل مودهای ارتعاشی پوسته استاتور در اثر اعمال نیروهایی با مرتبه مختلف
۳۵.....	شکل (۱-۴): مدار تغذیه سیم‌پیچی روتور موتور القایی
۳۵.....	شکل (۲-۴): شماتیکی از مسیر شار و جریان‌های روتور
	شکل (۳-۴): طیف فرکانسی فشار صوتی در فاصله ۲۰ cm از موتور مورد بررسی در رژیم عملکرد
۳۷.....	آسنکرون و بصورت بی‌بار ( $V_1=250\text{ V}$ )
	شکل (۴-۴): طیف فرکانسی فشار صوت در فاصله ۲۰ cm از موتور مورد بررسی در رژیم عملکرد
۳۷.....	سنکرون و بصورت بی‌بار ( $V_1=250\text{ V}, I_1=5\text{ A}$ )
۴۳.....	شکل (۵-۴): ناهم‌محوری استاتیک روتور

- شکل (۴-۶): ناهم محوری دینامیک روتور ..... ۴۳
- شکل (۴-۷): طیف فرکانسی فشار صوت در فاصله ۲۰ cm از موتور مورد بررسی در رژیم عملکرد  
 آسنکرون و بصورت بی بار و با استفاده درایو فرکانس متغیر ( $V_t=380\text{ V}$ ) ..... ۴۶
- شکل (۵-۱): تجهیزات مورد نیاز برای انجام آزمایش ..... ۴۸
- شکل (۵-۲): طیف فرکانسی سه بعدی ..... ۵۲
- شکل (۵-۳): طیف رنگی سه بعدی در مود سرعت متغیر ..... ۵۳
- شکل (۵-۴): طیف رنگی سرعت و خطوط مورب موجود در آن ..... ۵۴
- شکل (۵-۵): مدار سیم پیچی های روتور مورد بررسی با هدف استفاده از آن به عنوان موتور سنکرون ..... ۵۴
- شکل (۵-۶): طیف رنگی در مود تحریک متغیر ..... ۵۶
- شکل (۵-۷): طیف رنگی در مود ولتاژ متغیر ..... ۵۷
- شکل (۵-۸): فلوجارت الگوریتم پردازش تصویر مورد استفاده برای استخراج معادله خطوط  
 ظاهر شده در طیف رنگی ..... ۵۸
- شکل (۵-۹): طیف فرکانسی متوسط فشار صوت در طول آزمایش تحریک متغیر ..... ۵۹
- شکل (۵-۱۰): خطوط مورب تشخیص داده شده توسط الگوریتم پردازش تصویر ..... ۵۹
- شکل (۵-۱۱): تعیین اولیه فرکانس های طبیعی ..... ۶۲
- شکل (۵-۱۲): خطوط تشخیص داده شده توسط الگوریتم پردازش تصویر ..... ۶۳
- شکل (۵-۱۳): تغییرات فشار صوت بر روی خط L1 با افزایش سرعت مکانیکی موتور ..... ۶۵
- شکل (۵-۱۴): تغییرات فشار صوت بر روی خط L2 با افزایش سرعت مکانیکی موتور ..... ۶۵
- شکل (۵-۱۵): تغییرات فشار صوت بر روی خط L2 با افزایش سرعت مکانیکی موتور ..... ۶۵
- شکل (۵-۱۶): فلوجارت الگوریتم ارائه شده برای تشخیص منابع نویز صوتی ..... ۶۷
- شکل (۵-۱۷): تغییرات مقدار مؤثر فشار صوت منتشر شده از موتور سنکرون مورد بررسی نسبت  
 به تغییرات سرعت مکانیکی ..... ۷۲

- شکل (۵-۱۸): بزرگنمایی قسمتی از طیف رنگی سرعت در اطراف سرعت ۱۵۰۰ rpm به همراه خطوط تشخیص داده شده توسط الگوریتم پردازش تصویر ..... ۷۲
- شکل (۵-۱۹): تغییرات مقدار مؤثر فشار صوت با حرکت بر روی هرکدام از خطوط غالب با تغییرات سرعت مکانیکی ..... ۷۵
- شکل (۵-۲۰): نمایش جریان تحریک روتور، جریان استاتور و ولتاژ ترمینال ورودی موتور مورد بررسی در آزمایش تحریک متغیر ..... ۷۹
- شکل (۵-۲۱): تغییرات مقدار مؤثر فشار صوت با حرکت بر روی هرکدام از خطوط غالب با تغییرات جریان تحریک ..... ۸۰
- شکل (۵-۲۲): تغییرات مقدار مؤثر فشار صوت با حرکت بر روی هرکدام از خطوط غالب با تغییرات ولتاژ ترمینال ..... ۸۱
- شکل (۵-۲۳): بزرگنمایی قسمتی از طیف رنگی سرعت در صورتی که درپوش فن توسط کاغذ پوشانده شده است ..... ۸۳

## فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول (۱-۲): کمیت‌های پایه‌ای صوت	۱۲
جدول (۲-۲): ابعاد منبع صوت و چهار چوب اندازه‌گیری	۱۹
جدول (۳-۲): پارامترهای نامی موتور القایی مورد آزمایش	۲۰
جدول (۴-۲): نتایج حاصل از اندازه‌گیری توان صوت یک موتور القایی با توان نامی ۶/۳ kw	۲۲
جدول (۵-۲): خلاصه معیارهای سنجش کلاس دقت اندازه‌گیری	۲۲
جدول (۱-۴): فشار صوت موتور مورد آزمایش در رژیم‌های عملکردی مختلف	۳۹
جدول (۱-۵): پارامترهای نامی موتور روتور سیم‌پیچی شده قطب صاف	۴۹
جدول (۲-۵): فرکانس و مرتبه نویز الکترومغناطیسی محتمل	۶۰
جدول (۳-۵): منابع کاندید برای هرکدام از خطوط و شیب آن‌ها	۶۴
جدول (۴-۵): منابع ایجاد خطوط در طیف رنگی و فرکانس‌های تشدید شده توسط آن‌ها	۶۶
جدول (۵-۵): خطوط تشخیص داده توسط الگوریتم پردازش تصویر به همراه منبع اختصاص داده شده برای هرکدام	۷۰
جدول (۶-۵): شماره خطوط غالب در سرعت ۱۵۰۰ rpm به همراه منابع تشخیص داده شده برای آن‌ها	۷۳





---

# فصل ۱: مقدمه و بررسی منابع

---

## ۱-۱- مقدمه

طراحان ماشین‌های الکتریکی جدید به منظور استفاده بهینه از مواد و کاهش وزن و حجم ماشین، معمولاً چگالی شار فاصله هوایی را بیشتر از مقادیر در نظر گرفته شده برای ماشین‌های قدیمی‌تر انتخاب می‌کنند. در حقیقت مواد مغناطیسی جدید با چگالی شار بالا، این امکان را برای طراحان و تولیدکنندگان ماشین‌های الکتریکی فراهم نموده است تا ماشین‌های الکتریکی را نسبت به گذشته فشرده‌تر بسازند. هنگام طراحی معمولاً هرچه قدر چگالی شار فاصله هوایی یک ماشین الکتریکی استوانه‌ای متداول بزرگ‌تر انتخاب شود نیروهای مغناطیسی شعاعی مزاحم وارد شونده به استاتور و روتور نیز بیشتر خواهد بود. از طرف دیگر عامل عمده ارتعاشات، لرزش و بنابراین نویز صوتی ماشین‌های استوانه‌ای دوار همان نیروهای شعاعی می‌باشند. افزایش آگاهی‌ها در مورد مسائل زیست‌محیطی آلودگی‌های صوتی صنعتی و پدیدار شدن استانداردهای سخت‌گیرانه‌تر، مطالعه نویزهای صوتی ماشین‌های الکتریکی را با توجه به کاربردهای متنوع و بسیار گسترده در صنایع مختلف، امری اجتناب‌ناپذیر کرده است. مشخصه‌های صوتی ماشین‌های الکتریکی در بعضی از کاربردهای ویژه به لحاظ اطلاعاتی و امنیتی نیز اهمیت پیدا کرده است. به‌رحال امروزه شناخت نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی و روش‌های حذف آن، یکی از اصلی‌ترین مباحث مرتبط با طراحی، ساخت و به‌کارگیری ماشین‌های الکتریکی شده است و این حوزه تحقیقی به‌طور چشم‌گیری در حال توسعه می‌باشد.

## ۱-۲- مروری بر پیشینه نويز صوتی ماشین‌های الکتریکی

عامل اصلی نويز الکترومغناطیسی، نیروهای شعاعی وارد بر پوسته استاتور هستند که طبق تنسور مغناطیسی ماکسول این نیروها به دلیل وجود شار مغناطیسی در فاصله هوایی بین روتور و استاتور ایجاد می‌شود [۱]، [۲]. تغییرات چگالی شار فاصله هوایی باعث تغییرات نیرو و در نتیجه ارتعاش پوسته استاتور می‌شود و از این طریق نويز صوتی ایجاد می‌شود. بنابراین از سال ۱۹۳۰ بحث نويز الکترومغناطیسی مورد توجه قرار گرفت و نويز الکترومغناطیسی ماشین‌های سنکرون با ارائه روابط تحلیلی برای استخراج فرکانس‌های طبیعی آن‌ها مورد بحث قرار گرفت [۳]. در سال‌های بعد تحلیل‌های اولیه در مورد هارمونیک‌های چگالی شار فاصله هوایی و تأثیر آن‌ها بر نويز الکترومغناطیسی ماشین‌های القایی تک فاز و سه فاز و پیش‌بینی میزان نويز الکترومغناطیسی با در نظر گرفتن اثر شیارهای روتور و استاتور انجام گرفت [۴]–[۶] و در سال ۱۹۵۰ اولین کتاب با موضوع نويز در موتورهای الکتریکی منتشر شد [۷].

شاید بتوان گفت که جامع‌ترین تحلیل در مورد هارمونیک‌های چگالی شار در ماشین‌های القایی با نظر گرفتن پارامترهایی چون اثر شیارهای روتور و استاتور و بررسی جامع تأثیر آن‌ها بر دامنه و فرکانس هارمونیک‌های چگالی شار فاصله هوایی و همچنین نیروهای شعاعی وارد بر استاتور، تأثیر ناهم‌محوری بر هارمونیک‌های چگالی شار و نیروهای شعاعی، تأثیر تعداد مسیرهای موازی و همچنین نوع سیم‌پیچی استاتور بر نويز الکترومغناطیسی و همچنین اثر اشباع بر نويز صوتی در سال ۱۹۷۷ میلادی توسط هلر و هاماتا ارائه شده است [۸]. با این وجود در این مرجع ماشین‌های سنکرون روتور سیم‌پیچی شده و مغناطیس دائم مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. علاوه بر این، در این مرجع تنها نیروهای شعاعی مورد بحث قرار گرفته است و ارتعاش استاتور و در مرحله بعد از آن، صوت حاصل از ارتعاش مورد بحث قرار نگرفته است.

سومین کتاب در مورد نویز ماشین‌های الکتریکی با رویکرد کاهش میزان نویز صوتی، توسط یانگ در سال ۱۹۸۱ منتشر شد [۹]. هشت سال بعد، در سال ۱۹۸۹ میلادی تیمار به همراه همکارانش، تحلیل جامعی از هارمونیک‌های چگالی شار، نیروهای شعاعی، ارتعاش و در نتیجه نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی (ماشین‌های القایی، ماشین‌های سنکرون روتور سیم‌پیچی شده و ترانسفورماتور) در چهارمین کتاب مربوط به نویز ماشین‌های الکتریکی منتشر کردند [۱۰].

تمام منابع ذکر شده تاکنون با استفاده از روابط تحلیلی به بررسی نویز ماشین‌های الکتریکی پرداخته‌اند علاوه بر این، ماشین‌های مغناطیس دائم موضوع بحث آن‌ها نبوده است. در سال ۲۰۰۵ میلادی جمع‌آوری جامعی از تحقیقات انجام‌شده در مورد نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی ارائه شد و ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم نیز مورد بحث قرار گرفت [۱۱]. در این کتاب تحلیل ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم نیز صورت گرفت. علاوه بر این روش‌های تحلیل و پیش‌بینی نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی و روش‌های عددی با نتایج عملی مقایسه شده و میزان دقت آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. در این کتاب جمع‌آوری جامع و بسیار مفیدی از روش‌های اندازه‌گیری نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی نیز ارائه شده است.

### ۳-۱- بررسی موردی مراجع مربوط به نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی

در [۱۲] دسته‌بندی کاملی از منابع نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی انجام شده است علاوه بر این تأثیر پارامترهای مختلف بر نویز صوتی هر کدام از منابع، مورد بررسی قرار گرفته است و روش‌هایی برای کاهش نویز صوتی ناشی از هر کدام از منابع ایجاد نویز صوتی پیشنهاد شده است. با این وجود منابع ایجاد نویز صوتی بصورت عمیق مورد بررسی قرار نگرفته‌اند.

یکی از عوامل ایجاد نیروهای شعاعی در ماشین‌های الکتریکی با شار شعاعی، هارمونیک‌های جریان استاتور هستند. تأثیر هارمونیک‌های جریان استاتور بر نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی در

[۱۳] بصورت جامع مورد بررسی قرار گرفته است. در این مرجع فرکانس نویز صوتی حاصل از هارمونیک‌های جریان استاتور با استفاده از اندازه‌گیری استخراج‌شده و انواع آن‌ها دسته‌بندی شده و رابطه کلی برای پیش‌بینی آن‌ها ارائه شده است. در این مقاله یک روش عملی برای پیش‌بینی نویز صوتی حاصل از هارمونیک‌های جریان استاتور ارائه شده است.

همان‌گونه که اشاره شد، یکی از عوامل ایجاد نویز صوتی در ماشین‌های الکتریکی هارمونیک‌های جریان استاتور می‌باشد. استفاده از درایوهای فرکانس متغیر با ایجاد هارمونیک در جریان ورودی ماشین‌های الکتریکی باعث غنی شدن طیف فرکانسی هارمونیک‌های چگالی شار فاصله هوایی شده و در نتیجه نویز صوتی حاصل از ماشین‌های الکتریکی را افزایش می‌دهد. فرکانس سوئیچینگ و شیوه کنترلی درایو از عوامل تأثیرگذار بر نویز صوتی حاصل از درایو می‌باشد. بنابراین، می‌توان با استخراج فرکانس‌های طبیعی ارتعاش پوسته استاتور و انتخاب بهینه فرکانس سوئیچینگ درایو، میزان نویز صوتی منتشرشده از ماشین الکتریکی را تا حد ممکن کاهش داد. تأثیر درایو در [۱۴]–[۱۶] مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، در [۱۶] تأثیر درایو بر نویز صوتی منتشرشده از موتورهای آسنکرون در سرعت‌های مختلف بررسی شده است.

درایوهای فرکانس متغیر با تغییر فرکانس مؤلفه اصلی جریان استاتور، سرعت ماشین و فرکانس نیروهای شعاعی وارد بر استاتور را تغییر می‌دهند. بنابراین ممکن است فرکانس نیروهای شعاعی با فرکانس طبیعی ارتعاش استاتور برابر شده و نویز صوتی افزایش یابد. در [۱۷] این موضوع مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر سرعت ماشین‌های الکتریکی بر نویز صوتی حاصل از آن‌ها بررسی شده است.

یکی از عوامل اصلی ایجاد نویز صوتی در ماشین‌های الکتریکی ناهم‌محوری می‌باشد. وجود ناهم‌محوری علاوه بر ایجاد هارمونیک در چگالی شار فاصله هوایی اثرات جانبی دیگر مانند خمیدگی شفت ایجاد می‌کند. که بررسی دقیق آن با در نظر گرفتن شیارهای روتور و استاتور تقریباً غیرممکن است با این وجود فرکانس و مرتبه نیروهای شعاعی ناشی از آن تا حدودی قابل پیش‌بینی می‌باشد.

مراجع مختلف تأثیر پارامترهای مختلف مانند میزان ناهم‌محوری و همچنین پارامترهای ساختاری ماشین‌های الکتریکی را بر فرکانس و دامنه میزان نیروهای شعاعی حاصل از ناهم‌محوری و اثرات جانبی آن مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۸]–[۲۰].

در [۲۱] نویز حاصل از هارمونیک‌های چگالی شار فاصله هوایی یک موتور سنکرون مغناطیس دائم با استفاده از روش‌های اجزاء محدود بررسی شده و نویز حاصل از اثر متقابل بین چگالی شار روتور و استاتور به‌عنوان منبع اصلی نویز در ماشین سنکرون مغناطیس دائم معرفی شده است.

در [۲۲]، [۲۳] مرور کلی منابع ایجاد نیروهای شعاعی و همچنین فرکانس نویز تولیدشده توسط هرکدام از منابع نویز الکترومغناطیسی، مکانیکی و آیرودینامیکی در ماشین‌های القایی و ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم ارائه شده است. علاوه بر این روابط تحلیلی برای تعیین فرکانس‌های طبیعی ارتعاش استاتور ماشین‌های شار شعاعی نیز ارائه شده است. این مراجع در عین سادگی بسیار مفید و کارآمد هستند.

محاسبه و پیش‌بینی نویز صوتی یک ماشین الکتریکی (به‌ویژه در صورت استفاده از درایو) بدون تعیین فرکانس‌های طبیعی آن میسر نیست. بنابراین برای بررسی نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی نیاز به روش‌هایی برای تعیین فرکانس‌های طبیعی غیرقابل‌انکار است. استخراج روابط تحلیلی برای تعیین فرکانس‌های طبیعی ارتعاش استاتور یک ماشین الکتریکی شار شعاعی بدون صرف‌نظر کردن از اثر شیار و همچنین برجستگی‌های پوسته استاتور ممکن نیست. بنابراین در [۳]، [۱۰]، [۱۱]، [۲۳] استاتور بصورت یک پوسته استوانه‌ای در نظر گرفته‌شده و روابط تحلیلی برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی با این فرض ارائه شده است. علاوه بر این، [۱۱]، [۲۴] از روش‌های عددی (روش‌های المان محدود دوبعدی و سه‌بعدی) نیز برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی استفاده کرده‌اند. روش‌های تحلیلی و عددی برای محاسبه فرکانس‌های طبیعی نیاز به پارامترهای ابعادی دقیق و همچنین جنس

قسمت‌های مختلف دارند. با این وجود این روش‌ها به دلیل ساده‌سازی‌های صورت گرفته دقیق نمی‌باشند [۱۱].

ماشین‌های الکتریکی از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده‌اند که ممکن است با اعمال نیرو مرتعش شده و باعث ایجاد صوت شوند نیروهای شعاعی حاصل از هارمونیک‌های چگالی شار فاصله هوایی، یکی از منابع اصلی ایجاد نویز صوتی در ماشین‌های الکتریکی هستند. اغلب روش‌های عملی ارائه شده برای تشخیص فرکانس‌های طبیعی، بر پایه آنالیز ارتعاش استاتور می‌باشد، که در [۲۴] پنج روش برای استخراج فرکانس‌های طبیعی ارتعاش استاتور ارائه شده است. تمام این روش‌ها بر پایه آنالیز ارتعاش استاتور بصورت جداگانه می‌باشد در صورتی که وجود قسمت‌های مختلف باعث تغییر فرکانس‌های طبیعی ارتعاش می‌شود. تأثیر روتور بر فرکانس‌های طبیعی ارتعاش در [۲۵] و تأثیر وجود پوشش فن بر فرکانس‌های طبیعی ارتعاش در [۲۶] مورد بررسی قرار گرفته است.

در [۲۰] یک موتور الکتریکی مورد آزمایش قرار گرفته و با استفاده از سنسور ارتعاش، سرعت ارتعاش در پوسته استاتور اندازه‌گیری شده است. علاوه بر این نویز صوتی منتشرشده نیز بصورت همزمان اندازه‌گیری شده و نتیجه حاصل نشان می‌دهد که ارتعاش استاتور لزوماً باعث ایجاد صوت نمی‌شود.

یک روش عملی برای استخراج فرکانس‌های طبیعی با استفاده از اندازه‌گیری صوت نیز در [۲۷] ارائه شده است. در این روش با استفاده از  $RPWM^1$  طیف وسیعی از هارمونیک با دامنه‌های یکسان در ولتاژ ورودی موتور القایی ایجاد شده است و نویز صوتی منتشرشده از موتور بررسی در صورت استفاده از درایو و بدون استفاده از درایو، اندازه‌گیری شده و مقایسه شده است از این طریق به استخراج فرکانس‌های طبیعی ارتعاش استاتور پرداخته است. این روش ضعف بیان شده برای روش‌ها

1 -random pulse width modulation

قبل را ندارد، با این وجود این روش قادر به تشخیص آن دسته از فرکانس‌های طبیعی که بدون استفاده از درایو نیز تحریک می‌شوند نیست.

## ۱-۴- مروری بر استانداردهای مربوط به نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی

تاکنون استانداردهای مختلفی در رابطه با پارامترها و روش‌های اندازه‌گیری نویز صوتی و سطوح مجاز این پارامترها در انواع مختلف ماشین‌های الکتریکی منتشر گردیده است. به‌عنوان مثال، استانداردهای ISO- Acoustics (مراجع [۲۸]-[۴۰]) روش‌های مختلف اندازه‌گیری شدت و توان صوت را به‌طور کامل مورد بررسی قرار می‌دهند. همچنین استانداردهای IEC 60034-9 و NEMA ([۴۱], [۴۲]) سطوح مجاز توان صوت منتشرشده از انواع مختلف ماشین‌های الکتریکی را دربر دارند [۱۱]. استاندارد IEEE sdt 85-1973 (مراجع [۴۳]) روش‌های اندازه‌گیری نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی را دربر دارد.

## ۱-۵- تعریف موضوع و هدف از این پژوهش

امروزه در بسیاری از کاربردهای ماشین‌های الکتریکی مانند استفاده آن‌ها در توربین‌های بادی، آسانسور و مواردی از این قبیل شرایط عملکردی دائماً در حال تغییر است. با این وجود تاکنون این موضوع مورد بحث زیادی قرار نگرفته است. بنابراین نیاز به بررسی تأثیر شرایط عملکردی ماشین‌های الکتریکی بر نویز صوتی آن‌ها بیش‌ازپیش احساس می‌شود.

یکی از اهداف این تحقیق بررسی، شناخت و اندازه‌گیری مشخصه‌های صوتی یک موتور آسنکرون روتور سیم‌پیچی شده و یک موتور سنکرون با ساختار مشابه و همچنین بررسی تأثیر شرایط عملکردی بر مشخصه‌های صوتی تولیدشده توسط موتور آسنکرون و موتور سنکرون می‌باشد.

تعیین مشخصه‌های صوتی ماشین‌های الکتریکی بر اساس دانش مقدماتی از پارامترهای داخلی ماشین‌ها نظیر ابعاد و جنس قسمت‌های مختلف ماشین و یا بر اساس محتویات هارمونیک جریان استاتور، اختلاف زاویه بین میدان گردان روتور و استاتور، میزان بارگذاری و ... بسیار مشکل است. بنابراین مطالعات ما عمدتاً بر روی یک موتور آسنکرون روتور سیم‌پیچی شده که می‌تواند با تغذیه صحیح سیم‌پیچی روتور آن بصورت موتور سنکرون نیز بکار گرفته شود به همراه یک درایو و اتوترانس با قابلیت تنظیم سطح ولتاژ ورودی موتور و نیز با استفاده از ادوات اندازه‌گیری مشخصه‌های صوتی موجود در دانشگاه صنعتی شاهرود متمرکز خواهد بود. تحقیقات و مطالعات مربوط به پروژه حاضر با استفاده از این تجهیزات منجر به ارائه نتایج تئوریک و عملی در این پایان‌نامه خواهد شد.

پارامترهای ابعادی و ساختاری ماشین‌های الکتریکی تأثیر قابل‌توجهی بر فرکانس و دامنه صوت منتشرشده از موتور، دارند. بنابراین برای مقایسه مشخصه‌های صوتی موتورهای سنکرون و آسنکرون، با هدف بررسی تأثیر رژیم عملکردی سنکرون و آسنکرون بر مشخصه‌های صوتی موتور، باید تمام پارامترهای ابعادی موتور سنکرون و آسنکرون کاملاً یکسان باشند. بنابراین برای انجام این آزمایش نیاز به یک موتور سنکرون و یک موتور آسنکرون داریم به‌گونه‌ای که از لحاظ ابعادی و ساختاری کاملاً یکسان باشند. بنابراین در این آزمایش از یک موتور آسنکرون روتور سیم‌پیچی شده، استفاده شده است که با اتصال صحیح سیم‌پیچی‌های روتور به یک منبع تغذیه DC خارجی می‌توان از آن به‌عنوان موتور سنکرون نیز استفاده کرد. مزیت این انتخاب این است که در هر دو رژیم عملکردی (رژیم سنکرون و رژیم آسنکرون) تمام پارامترهای ابعادی و ساختاری حتی نوع بلبرینگ، نوع فن میزان ناهم‌محوری روتور، جنس قسمت‌های مختلف و .... کاملاً یکسان است. و به‌راحتی می‌توان تأثیر رژیم عملکردی سنکرون و آسنکرون را در مشخصه‌های صوتی ماشین مشاهده کرد.

ابتدا روابط تحلیلی برای استخراج فرکانس هارمونیک‌های چگالی شار فاصله هوایی به‌عنوان منبع اصلی نویز الکترومغناطیسی، با در نظر گرفتن ساختار موتور سنکرون و القایی مورد آزمایش در این



مقاله ارائه می‌شود. و تأثیر شرایط عملکردی بر روی آن‌ها مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت با تحلیل نتایج حاصل از اندازه‌گیری عملی صوت منتشرشده از موتور، در شرایط عملکردی سنکرون و القایی (با استفاده از میکروفن اندازه‌گیری) درستی روابط ارائه شده بررسی می‌شود.

همان‌گونه که پیش‌ازاین اشاره شد، تاکنون روش‌های مختلفی برای استخراج فرکانس‌های طبیعی ارتعاش ماشین‌های الکتریکی ارائه شده است که نقاط ضعف و قوت آن‌ها پیش‌ازاین بیان شد. در این تحقیق یک روش عملی و کارآمد برای استخراج فرکانس‌های طبیعی ارتعاش موتور مورد بررسی در این تحقیق ارائه شده است. این روش قادر است تمام فرکانس‌های طبیعی یک ماشین الکتریکی شامل فرکانس‌های طبیعی استاتور، روتور، درپوش‌ها و درپوش فن را تشخیص دهد و همچنین فرکانس‌های طبیعی تحریک‌شده توسط منابع الکترومغناطیسی را از فرکانس‌های طبیعی تحریک‌شده توسط سایر منابع ارتعاش تفکیک کند. در این روش می‌توان پیش‌بینی کرد که با افزایش سرعت مکانیکی ماشین سنکرون هر کدام از فرکانس‌های طبیعی در چه سرعتی و توسط کدام یک از منابع نویز(به‌عنوان مثال ناهم‌محوری استاتیک، ناهم‌محوری دینامیک و یا اثر متقابل بین چگالی شار روتور و استاتور) تشدید خواهند شد.

یکی از موضوعات بسیار مهم در زمینه نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی که در حال حاضر تحقیقات گسترده‌ای را به خود اختصاص داده است، شناسایی دقیق منابع غالب در ایجاد نویز صوتی ماشین‌های الکتریکی می‌باشد. بطوریکه با تحلیل نویز صوتی منتشرشده از یک ماشین الکتریکی منابع غالب در ایجاد آن را به‌طور دقیق تشخیص داد. تحقیقات اخیر به نتایج مفیدی در این زمینه دست‌یافته‌اند. با این وجود هنوز نقاط ضعف در روش‌های پیشنهادشده وجود دارد. با این وجود اغلب تحقیقات انجام‌شده در این زمینه با استفاده از روابط تحلیلی و نرم‌افزارهای اجزاء محدود به این موضوع پرداخته‌اند. تعدادی از تحقیقات انجام‌شده با اندازه‌گیری فشار صوت، شدت صوت و یا استفاده از سنسور ارتعاش در قسمت‌های مختلف در اطراف ماشین به بررسی منابع نویز پرداخته‌اند [۴۴]—

[۴۶]. این روش‌ها قادر به تشخیص دقیق منابع نویز نیستند. برخی از مقالات با استفاده از طیف رنگی سرعت به بررسی منابع نویز صوتی در ماشین‌های الکتریکی پرداخته‌اند [۱۵]، [۱۶]، [۴۷]–[۴۹]. موفق‌ترین و جدیدترین روش معرفی‌شده تاکنون در زمینه شناسایی منابع نویز در [۴۹] ارائه شده است که نتایج بسیار ارزشمندی را ارائه کرده است. با این وجود، در این تحقیق چند نکته اساسی مورد توجه قرار نگرفته است. ۱- هرکدام از فرکانس‌های ایجاد شده در طیف فرکانسی فشار صوت ممکن است ناشی از بیش از یک عامل ایجادکننده نویز صوتی باشد. ۲- تمام منابع نویز صوتی لزوماً باعث ارتعاش پوسته استاتور نمی‌شود. ۳- فرکانس طبیعی ارتعاش قسمت‌های مختلف تشکیل‌دهنده یک ماشین الکتریکی لزوماً یکسان نیست. ۴- فرمول‌بندی تمام فرکانس‌هایی که احتمال ظهور آن‌ها در طیف فرکانسی فشار صوت وجود دارد، ممکن نیست. بنابراین یکی از اهداف اصلی این پایان‌نامه ارائه روشی جامع برای تعیین دقیق منابع نویز صوتی غالب در موتورهای سنکرون می‌باشد که روش ارائه شده می‌تواند با اندکی تغییر برای ماشین‌های القایی و ماشین‌های مغناطیس دائم نیز مورد استفاده قرار گیرد.

---

## فصل ۲: معرفی کمیت‌های پایه‌ای صوت و مکان‌یابی منبع غالب صوت یک موتور القایی

---

### ۲-۱- مقدمه

صوت در حقیقت ارتعاشاتی است که از طریق یک جسم (سیال) واسطه با فرکانس‌هایی در محدوده ۲۰ تا ۲۰۰۰۰ هرتز منتقل می‌شود و گوش انسان می‌تواند آن‌ها را تشخیص دهد. صوت ناخواسته را نویز صوتی گویند. انتقال ارتعاشات و صوت درون مواد به وسیله امواجی صورت می‌پذیرد که توابعی از مکان و زمان هستند. بر این اساس، امواج ارتعاش و صوت شامل امواج جابجایی، سرعت و شتاب ارتعاشی می‌باشند. در یک مکان ثابت درون جسم مرتعش، هرکدام از امواج فوق بصورت یک سیگنال تابع زمان دیده می‌شوند. با استفاده از آنالیز فوریه، می‌توان هر نوع سیگنال ارتعاشی را بصورت مجموعه از سیگنال‌های سینوسی بیان نمود. بر این اساس، آنالیز صوت و ارتعاش می‌تواند به بهترین شکل با استفاده از تحلیل فازوری صورت گیرد. این تحلیل به تعریف گروهی از پارامترهای صوتی و ارتعاشی منجر می‌شود که می‌توانند جهت کمی‌سازی صوت و ارتعاش مورد استفاده قرار گیرند [۱۱].

### ۲-۲- معرفی کمیت‌های پایه‌ای صوت

صوت را می‌توان توسط سه کمیت فشار صوت، شدت صوت و توان صوت توصیف کرد که در جدول (۲-۱) تعاریف کلی، موارد استفاده و تخمین هرکدام ارائه شده است.

جدول (۱-۲): کمیت‌های پایه‌ای صوت

روش تعیین مقدار	کاربرد	واحد	کمیت
اندازه‌گیری	تعیین میزان ناهنجاری صوت	پاسکال (Pa)	فشار صوت
اندازه‌گیری	مکان‌یابی و ارزیابی منبع صوت	وات بر مترمربع ( $W/m^2$ )	شدت صوت
محاسبه	ارزیابی منبع صوت	وات (W)	توان صوت

## ۲-۲-۱- فشار صوت و تراز فشار صوت

فشار صوت یک کمیت اسکالر است و در واقع نوسانات فشار هوا در یک نقطه می‌باشد. فشار صوت در یک نقطه اندازه‌گیری می‌شود که بیان‌کننده میزان ناهنجاری و مضر بودن صوت است. واحد اندازه‌گیری این کمیت پاسکال است. از آنجایی که رنج تغییرات این کمیت زیاد است (محدوده شنوایی گوش انسان از  $20 \mu Pa$  تا  $200 Pa$  است) معمولاً برای بیان میزان فشار صوت از سطح فشار صوت<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. که بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \log_{10} \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad (1-2)$$

در رابطه بالا،  $L_p$  معرف سطح فشار صوت در نقطه موردنظر و  $p_0$  فشار صوتی مبنا ( $p_0=20 \mu Pa$ ) بوده و  $p$  مقدار مؤثر (جذر متوسط زمانی مربعات) فشار صوتی را در نقطه مزبور نشان می‌دهد.

## ۲-۲-۲- شدت صوت و تراز شدت صوت

شدت صوت یک کمیت برداری بوده و بصورت (۲-۲) تعریف می‌شود که بیان‌کننده مقدار و جهت انتشار توان صوت می‌باشد. واحد اندازه‌گیری شدت صوت وات بر مترمربع ( $W/m^2$ ) می‌باشد. برای اندازه‌گیری شدت، صوت یک پروب مخصوص به همراه یک آنالیزر موردنیاز است. شدت صوت در واقع

1 - Sound Pressure Level (SPL)

بیان‌کننده مسیر شارش توان صوتی است که می‌توان برای مکان‌یابی و همچنین ارزیابی منبع صوت از این کمیت استفاده کرد.

$$I(t) = p(t)\bar{u}(t) \quad (2-2)$$

در رابطه بالا  $p(t)$  فشار لحظه‌ای صوت و  $u(t)$  بردار سرعت ارتعاش و  $I(t)$  بردار شدت صوت می‌باشد. با این وجود ما اغلب با میدان‌های صوتی ایستا (میدان‌های صوتی که تابع متناوبی از زمان هستند) و همچنین متوسط زمانی شدت صوت سروکار داریم که بصورت (2-3) تعریف می‌شود و در اغلب مراجع، منظور از شدت صوت در واقع متوسط زمانی شدت صوت می‌باشد.

$$\bar{I}(t) = \overline{p(t)u(t)} \quad (3-2)$$

از اینجا به بعد برای سادگی بجای  $\bar{I}(t)$  از  $I$  استفاده می‌کنیم. فشار صوت و سرعت ارتعاش در راستای شعاعی هم‌فاز بوده و توسط مشخصه امپدانسی هوا  $\rho c$  بصورت (2-4) با یکدیگر مرتبط می‌شوند. که  $\rho$  چگالی هوا و  $c$  سرعت انتشار صوت در هوا است.

$$u(t) = \frac{p(t)}{\rho c} \quad (4-2)$$

بنابراین داریم:

$$I(t) = \overline{p(t)u(t)} = \frac{\overline{p^2(t)}}{\rho c} = \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \quad (5-2)$$

تراز شدت صوتی در یک نقطه مطابق با رابطه زیر به صورت ۱۰ برابر لگاریتم (مبنای ۱۰) نسبت اندازه بردار شدت صوت در نقطه مزبور بر مقدار شدت صوت مبنا ( $I_0 = 10^{-12} \text{W/m}^2$  در هوا)، برحسب دسی‌بل تعریف می‌گردد.

## ۲-۲-۳- توان صوت و تراز توان صوت

توان صوت یک کمیت اسکالر بوده و به‌صورت مقدار انرژی صوتی منتشرشده از یک منبع صوتی در واحد زمان تعریف می‌شود. توان صوت یک منبع بصورت مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست. اما می‌توان با استفاده از روش‌های ارائه شده بر پایه اندازه‌گیری فشار صوت و شدت صوت، توان صوت یک منبع را محاسبه کرد. واحد اندازه‌گیری توان صوت وات ( $W$ ) است. برای ارزیابی و مقایسه نویز صوتی منابع مختلف باید توان صوت منتشرشده از آن‌ها را باهم مقایسه کرد.

همانند تراز فشار صوتی، تراز توان صوتی یک منبع صوت مطابق به‌صورت ۱۰ برابر لگاریتم (مبنای ۱۰) نسبت توان صوتی تولیدی منبع به توان صوتی مبنا ( $W_0=10^{-12}W$  در هوا)، برحسب دسی‌بل (dB) تعریف می‌گردد.

## ۲-۳- اندازه‌گیری کمیت‌های پایه‌ای صوت

کمیت‌های پایه‌ای صوت عبارت‌اند از فشار صوت، شدت صوت و توان صوت، که پیش از این به معرفی این سه کمیت پرداخته شد. فشار صوت و شدت صوت بصورت کمیت‌های قابل اندازه‌گیری هستند. اما توان صوت بصورت مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست با این وجود، این کمیت با اندازه‌گیری فشار صوت و یا شدت صوت، قابل محاسبه است.

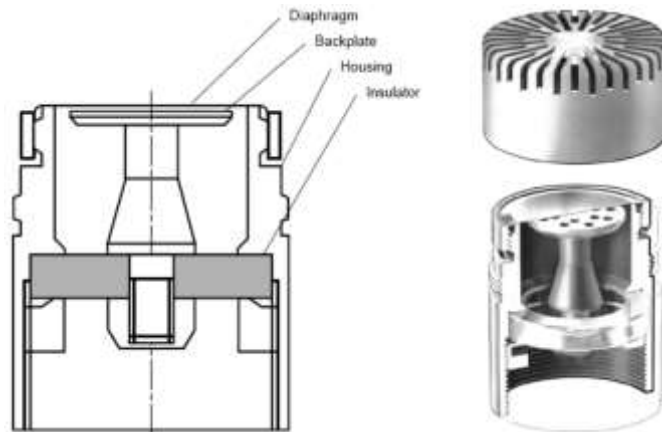
## ۲-۳-۱- اندازه‌گیری فشار صوت

فشار صوت به‌طور مستقیم با استفاده از میکروفن قابل اندازه‌گیری است. میکروفن‌های موجود به سه دسته کلی زیر تقسیم می‌شوند:

- میکروفن‌های ساده (cheap microphones)، مورد استفاده در وسایلی مانند موبایل
- میکروفن‌های استودیو (studio microphones)، مورد استفاده برای ضبط صدا

• میکروفن‌های اندازه‌گیری (measuring microphone)، مورد استفاده برای اندازه‌گیری صوت

یک میکروفن اندازه‌گیری از چهار بخش اصلی چهارچوب<sup>۱</sup>، دیافراگم<sup>۲</sup>، صفحه پشتی<sup>۳</sup> و ایزولاتور<sup>۴</sup> تشکیل شده است که نمای کلی آن در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.



شکل (۱-۲): نمایی از یک میکروفن اندازه‌گیری [۵۰]

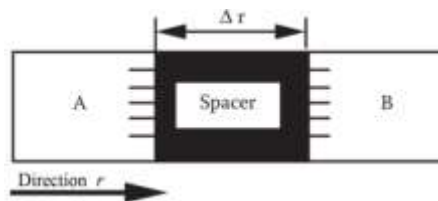
### ۲-۳-۲- اندازه‌گیری شدت صوت

اندازه‌گیری شدت صوت نیازمند تعیین فشار صوت و سرعت ارتعاش به‌طور همزمان و در موقعیت یکسان است که از سه روش می‌توان برای انجام آن استفاده کرد: ۱- با استفاده از اندازه‌گیری فشار صوت توسط دو میکروفن که در فاصله معین و نزدیک به هم قرار دارند سرعت ارتعاش را تخمین زد و فشار صوت را برابر با متوسط فشار صوت دو نقطه در نظر گرفت (روش  $p-p$ ). ۲- از یک میکروفن برای اندازه‌گیری فشار صوت و از یک ترنسدیوسر سرعت ارتعاش استفاده کرد (روش  $p-u$ ). ۳- با استفاده از دو ترنسدیوسر سرعت ارتعاش فشار صوت را محاسبه کرد (روش  $u-u$ ). روش اول توسط استاندارد ISO-3743 مورد استفاده قرار گرفته است. با پیشرفت‌های اخیر شرکت میکرفلون<sup>۵</sup> روش دوم نیز

1 - housing  
2 - diaphragm  
3 - back-plate  
4 - insulator  
5 - Microflown

مورد استفاده قرار گرفته است. با این وجود به دلیل اینکه پایداری و قابلیت اطمینان بالای میکروفن‌های خازنی نسبت به ترانسدیوسر سرعت ارتعاشی، روش اول ترجیح داده می‌شود [۵۱].

در اندازه‌گیری‌های این پایان‌نامه از روش  $p-p$  استفاده شده است. برای اندازه‌گیری شدت صوت به این روش باید دو میکروفن A و B کنار یکدیگر قرار بگیرند بطوریکه با استفاده از یک قطعه پلاستیکی (spacer) در فاصله ثابت و مشخصی از یکدیگر نگه‌داشته شوند، شکل (۲-۲).



شکل (۲-۲): نمایش شماتیک پروب شدت صوت [۱۱]

با استفاده از معادله دیفرانسیل حاکم بین فشار صوت و سرعت ارتعاش، (۲-۶) (معادله نویر-استوکس<sup>۱</sup>) می‌توان سرعت ارتعاش را در راستای مسیر بین دو میکروفن طبق (۲-۷) محاسبه کرد.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial r} \approx -\frac{p_B - p_A}{\Delta r} \quad (۲-۶)$$

$$u = -\frac{1}{\rho \Delta r} \int (p_B - p_A) dt \quad (۲-۷)$$

در دو رابطه بالا  $\rho$  چگالی سیال و  $r$  بردار مکان نقطه اندازه‌گیری نسبت به منبع انتشار صوت است. با استفاده از این روابط، مقدار سرعت ارتعاش ( $u$ ) به صورت ضربی از اختلاف فشار صوتی ( $p$ ) بین دو نقطه A و B با فاصله کوچک  $\Delta r$  به دست می‌آید.

## ۲-۴ - اندازه‌گیری توان صوت یک موتور القایی

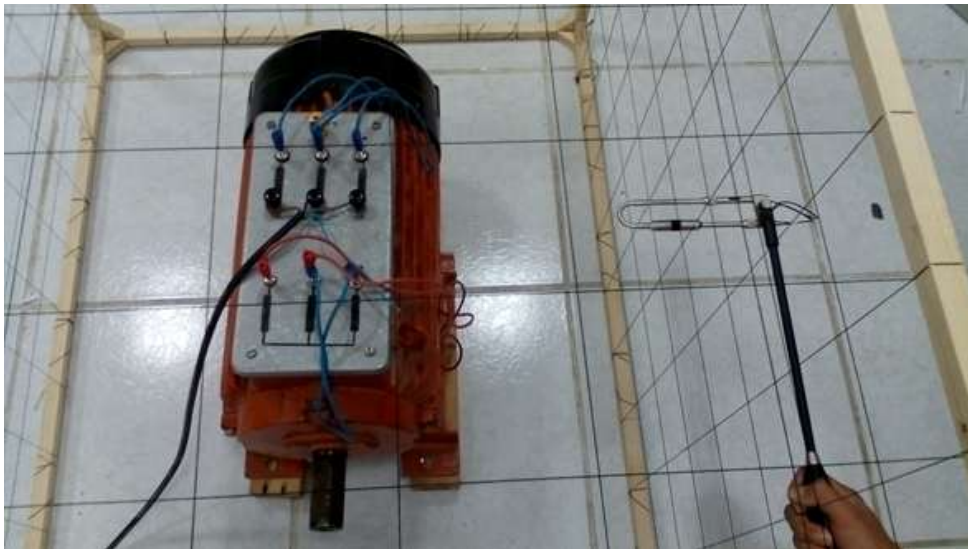
مطابق با استانداردهای ISO روش‌های اندازه‌گیری توان صوت به دو دسته کلی، ۱- اندازه‌گیری توان صوت بر مبنای فشار صوت ۲- اندازه‌گیری توان صوت بر مبنای شدت صوت تقسیم می‌شوند. در

1- Navier-Stokes



روش اول تعداد زیادی میکروفن اندازه‌گیری موردنیاز است. و همچنین اندازه‌گیری توان صوت باید در یک محیط ایزوله و بدون انعکاس<sup>۱</sup> انجام شود. بنابراین استفاده از این روش پرهزینه می‌باشد. با این وجود در صوت استفاده از این روش می‌توان به سیگنال زمانی توان صوت منتشرشده از منبع صوت دست‌یافت. روش دوم نیاز به اتاقک صوت ندارد و حتی در یک محیط صنعتی نیز می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. در این روش منبع صوت داخل یک چهارچوب مشبک مطابق با شکل (۲-۳) قرار می‌گیرد. سپس شدت صوت در جهت عمود بر صفحه چهارچوب و در مرکز هر قطعه اندازه‌گیری شده و در نهایت با استفاده از شدت صوت اندازه‌گیری شده در تمام قطعات، توان صوت منبع مطابق با رابطه (۲-۸) محاسبه می‌شود [۵۲].

$$P = \sum_{i=1}^N \vec{I}_i \cdot \vec{S}_i \quad (۲-۸)$$

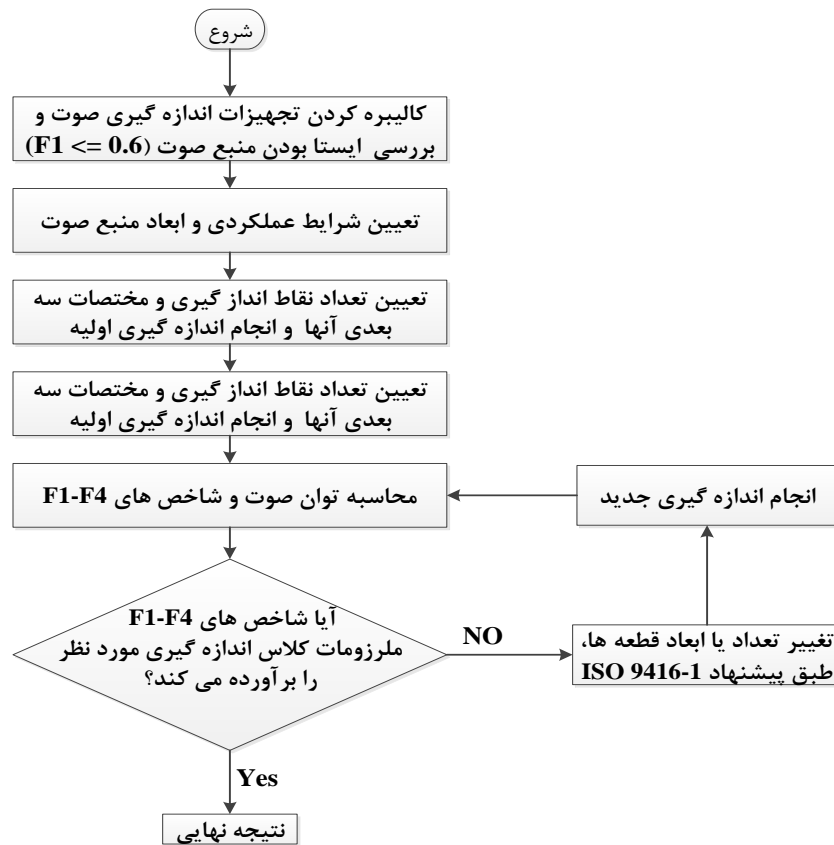


شکل (۲-۳): اندازه‌گیری توان صوت بر مبنای شدت صوت

در رابطه (۲-۸) اندیس  $i$  نشان‌دهنده شماره هر قطعه<sup>۲</sup>،  $N$  تعداد کل قطعه‌ها،  $I_i$  شدت صوت در مرکز هر قطعه و در جهت عمود بر صفحه هر قطعه و بصورت خارج شونده از آن،  $S_i$  بردار مساحت هر قطعه و  $P$  توان صوت منتشرشده از منبع صوت بر حسب وات ( $W$ ) می‌باشد. هزینه استفاده از این

1- free field  
2- segment

روش نسبت به روش اول کمتر است. با این وجود این روش تنها قادر به اندازه‌گیری توان صوت منابع ایستا می‌باشد. که در نهایت می‌توان توان متوسط صوت منتشرشده از منبع را اندازه‌گیری کرد و سیگنال زمانی توان صوت قابل دسترسی نیست.



شکل (۲-۴): روش اندازه‌گیری توان صوت ISO 9614-1

همانطور که اشاره شد، یک چهارچوب مشبک برای استفاده از این روش مورد نیاز است که اندازه ابعاد چهارچوب مورد استفاده برای اندازه‌گیری توان صوت، تعداد قطعه‌ها در هر وجه چهارچوب و همچنین ابعاد هر قطعه بر میزان دقت اندازه‌گیری تأثیر گذار خواهد بود. استاندارد ISO 9614-1 شاخص‌های F1، F2، F3 و F4 را برای تعیین کلاس دقت‌های مختلف اندازه‌گیری و همچنین تعیین ایستا بودن منبع صوت تعریف کرده است. تعریف و نحوه محاسبه این شاخص‌ها در پیوست A ارائه شده است. فلوچارت الگوریتم ارائه شده برای اندازه‌گیری توان صوت، در شکل (۲-۴) ارائه شده است.

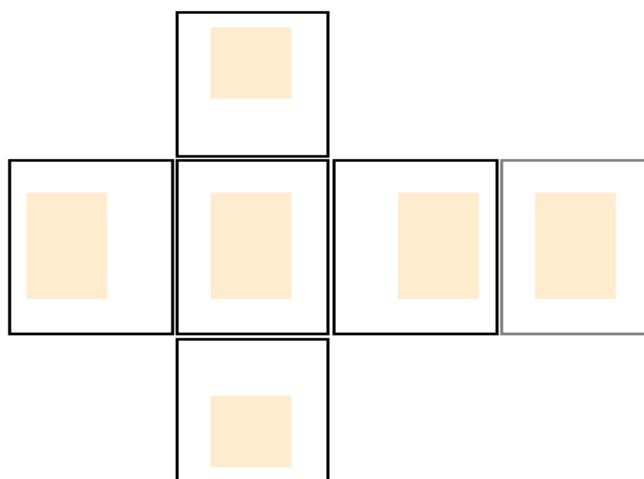
در ادامه با اندازه‌گیری توان صوت منتشرشده از یک موتور الکتریکی جزئیات روش دوم تشریح خواهد شد.

## ۲-۵- انجام آزمایش و مکان‌یابی منبع صوت یک موتور القایی

همان‌گونه که پیش از این اشاره شد، برای اندازه‌گیری توان صوت منتشر شده از یک منبع صوت مطابق با استاندارد ISO 9614-1 باید منبع صوت در داخل یک چهارچوب قفس مانند قرار گیرد، شکل (۲-۳). مشخصات ابعادی چهار چوب اندازه‌گیری و مشخصات منبع صوت در جدول (۲-۲) و موقعیت آنها نسبت به هم در شکل (۲-۵) نشان داده شده است. منبع صوت در این آزمایش یک موتور القایی روتور سیم‌پیچی شده با مشخصات نامی ارائه شده در جدول (۲-۳) می‌باشد.

جدول (۲-۲): ابعاد منبع صوت و چهار چوب اندازه‌گیری

	ارتفاع (m)	عرض (m)	طول (m)
چهارچوب اندازه‌گیری	۰/۵۰	۰/۶۴	۰/۶۰
منبع صوت	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۳۷

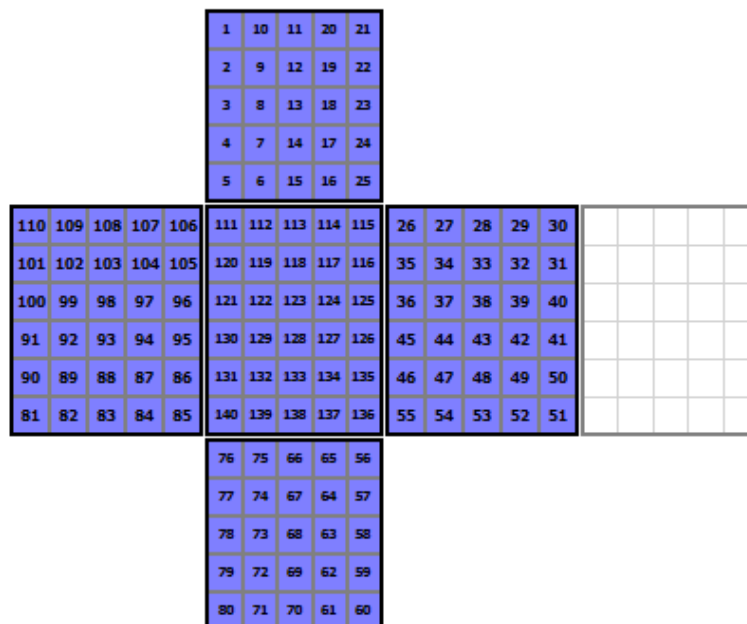


شکل (۲-۵): موقعیت قرارگیری موتور سنکرون مورد آزمایش و چهار چوب اندازه‌گیری

جدول (۳-۲): پارامترهای نامی موتور القایی مورد آزمایش

پارامتر	مقدار	نماد	واحد
مدل	Siemens	-	-
توان خروجی	6.3	P	kW
تعداد فاز	3	m	-
ولتاژ نامی (ولتاژ خط)	360	V <sub>T</sub>	V
نوع اتصال	Y	-	-
فرکانس نامی	50	f <sub>n</sub>	Hz
تعداد جفت قطب	2	p	-

ابتدا پنج وجه چهارچوب اندازه‌گیری (وجه جلو، وجه عقب، وجه سمت چپ، وجه سمت راست و بالا) با استفاده از نخ بصورت نشان داده شده در شکل (۳-۲) مشبک شده شده و و تعداد ۱۴۰ نقطه برای اندازه‌گیری تعیین می‌شود. اندازه‌گیری‌های انجام شده در مرکز هر کدام از شبکه‌ها و در جهت بردار نرمال سطح هر کدام از شبکه‌ها انجام می‌شود. پروب اندازه‌گیری شدت صوت مورد استفاده در این آزمایش بصورت نشان داده شده در شکل (۴-۲) شامل دو میکروفن است که جهت محور آن از سمت میکروفن A به سمت میکروفن B است.



شکل (۴-۲): نحوه شبکه بندی چهارچوب اندازه‌گیری

برای شروع اندازه‌گیری شدت صوت نیاز است تا میکروفن‌های مورد استفاده کالیبره شوند. برای اندازه‌گیری شدت صوت ابتدا باید هر کدام از میکروفن‌ها توسط کالیبراتور فشار صوت کالیبره شوند و در مرحله اختلاف فاز بین دو میکروفن با اعمال سیگنال صوت یکسان در یک محفظه کاملاً بسته به هر کدام از میکروفن‌ها کالیبره شود. بنابر این برای اندازه‌گیری فشار صوت، کالیبراتور فشار صوت و کالیبراتور شدت صوت مورد نیاز است. کالیبراتور فشار صوت شامل یک محفظه هم‌اندازه با میکروفن است که میکروفن داخل محفظه قرار می‌گیرد و یک سیگنال صوت با فرکانس معلوم یک کیلو هرتز و مقدار موثر معلوم  $114\text{dB}$  بر آن اعمال شده و سیگنال اعمال شده توسط میکروفن اندازه‌گیری شده و میزان حساسیت میکرفن در شرایط اندازه‌گیری تعیین می‌شود و این عدد در نرم‌افزار تحلیل صوت ذخیره شده و اندازه‌گیری‌های بعدی بر مبنای این مقدار صورت می‌گیرد. نرم‌افزار تحلیل سیگنال صوت مورد استفاده، نرم‌افزار SAMURAI می‌باشد.

مطابق با الگوریتم نشان داده شده برای اندازه‌گیری توان صوت در شکل (۲-۴) در یکی از  $140$  نقطه تعیین شده برای اندازه‌گیری شدت صوت، متوسط در بازه زمانی  $10$  ثانیه اندازه‌گیری شده و این اندازه‌گیری  $10$  بار تکرار می‌شود و با استفاده از نتایج حاصل، شاخص  $F_1$  محاسبه می‌شود (پیوست A). همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، در این روش باید سیگنال مورد اندازه‌گیری ایستا باشد. مطابق با استاندارد ISO 9614-1 اگر مقدار محاسبه شده برای  $F_1$  کمتر از  $0/6$  باشد می‌توان سیگنال اندازه‌گیری شده را ایستا در نظر گرفت. شدت صوت متوسط در تمام نقاط تعیین شده اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل توسط نرم‌افزار SAMURAI Sound Intensity پردازش شده و نتایج حاصل بصورت زیر است.

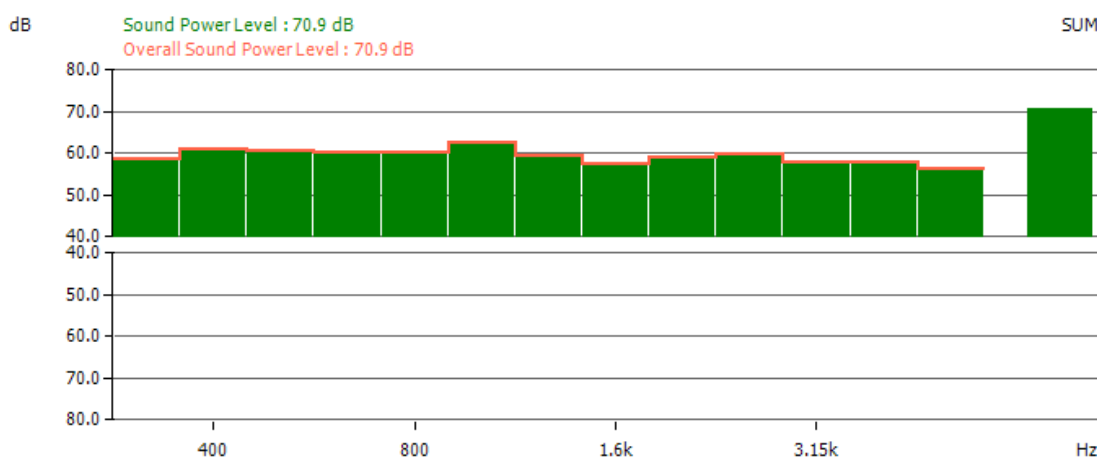
جدول (۲-۴): نتایج حاصل از اندازه‌گیری توان صوت یک موتور القایی با توان نامی ۶/۳ kw

Measurement Information		Sound power			Achieved Precision Grades		
Start Time :	8/2/2015 5:31 PM	Sound power level over all bands (with/without Q) :			Class 1	YES	
End Time :	8/2/2015 7:09 PM	70.9	/	--	dB	Class 2	YES
		70.4	/	--	dB(A)	Class 3	YES
		Sound power level over selected bands (with/without Q) :			Q		
		70.1	/	--	dB	--	dB
		70.2	/	--	dB(A)		

همان‌گونه که اشاره شد، برای سنجش کیفیت اندازه‌گیری باید شاخص‌های F1 تا F4 محاسبه شده و با استفاده از این شاخص‌ها کلاس دقت اندازه‌گیری تعیین شوند. کلاس دقت اندازه‌گیری انجام شده در این آزمایش قابل قبول می‌باشد، جدول (۲-۵). طیف فرکانسی توان صوت نیز در شکل (۲-۷) ارائه شده است. با استفاده از این طیف می‌توان فرکانس‌نویز غالب را تا حدودی مشاهده کرد که این موضوع با استفاده از اندازه‌گیری فشار صوت در فصول آتی مورد بحث جامعی قرار خواهد گرفت. تعریف پارامترهای  $L_d$  و C در پیوست A ارائه شده است.

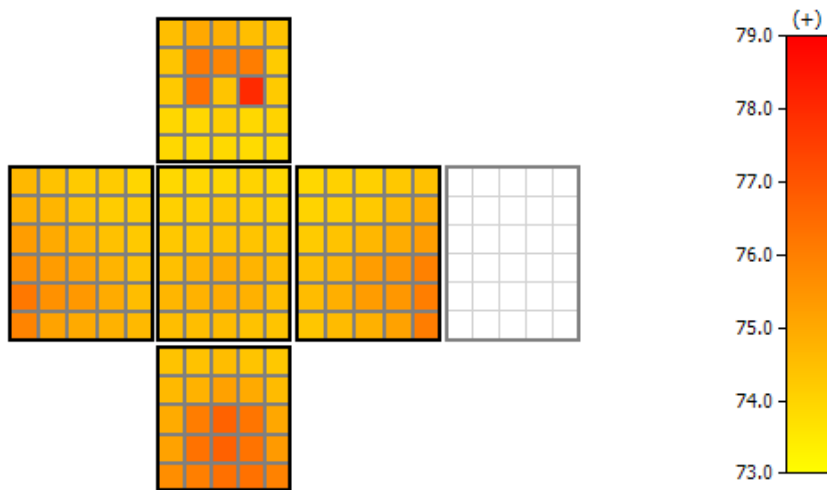
جدول (۲-۵): خلاصه معیارهای سنجش کلاس دقت اندازه‌گیری

Discrete Points Method			
Class :	1	2	3
F1 ≤ 0.6	✓		
F2 < Ld	✓		✓
F3 - F2 ≤ 3 dB		✓	
N > C(F4) <sup>2</sup>	✓	✓	✓

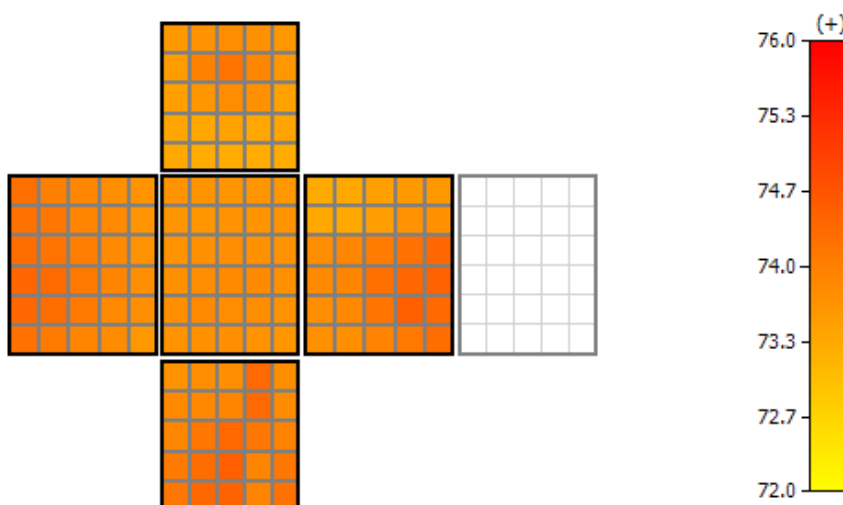


شکل (۲-۷): طیف توان صوت منتشر شده از موتور القایی

نقشه صوت حاصل از اندازه‌گیری در شکل (۸-۲) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که فشار صوت در تعدادی از شبکه‌ها نسبتاً زیاد است. بنابراین می‌توان با استفاده از نقشه کامل صوت، یک نقطه در داخل چهارچوب اندازه‌گیری را به عنوان منبع غالب در ایجاد صوت معرفی کرد. با توجه موقیت قرارگیری موتور القایی در داخل چهارچوب، می‌توان حدس زد که منبع غالب در ایجاد صوت این موتور، در قسمت انتهایی آن است. و نویز صوتی ناشی از فن می‌تواند به عنوان کاندید برای منبع غالب در ایجاد صوت مطرح شود. بنابراین می‌توان آزمایش را با پوشاندن مسیر هوای ناشی از فن تکرار کرده و درستی این حدس را نشان داد، شکل (۹-۲).

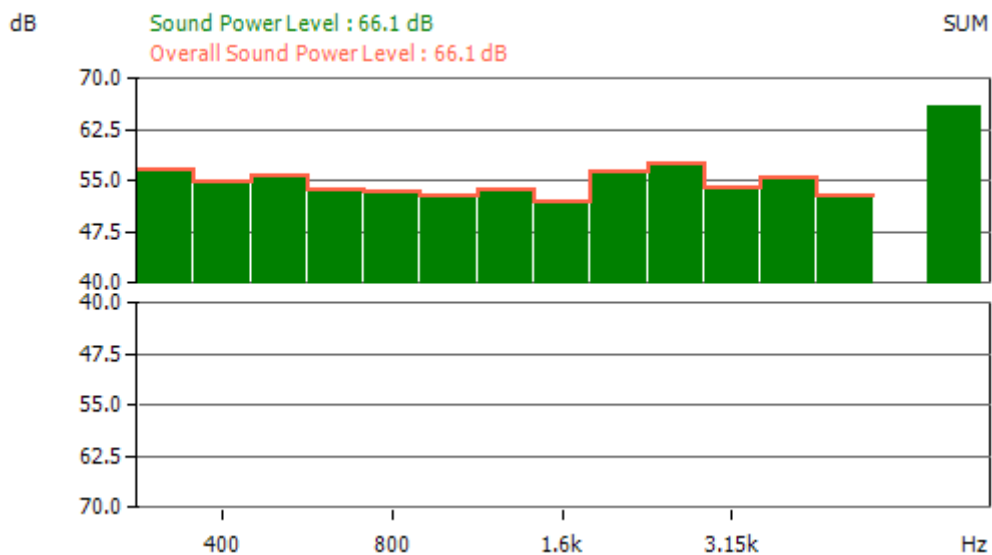


شکل (۸-۲): نقشه فشار صوت موتور القایی



شکل (۹-۲): نقشه فشار صوت موتور القایی در صورت پوشاندن مسیر فلوی هوای فن

در نقشه فشار صوت موتور القایی در صورتی که مسیر فلوی هوای فن توسط کاغذ پوشانده شده است، مشاهده می‌شود که منبع غالب در ایجاد صوت وجود ندارد و تمان نقاط تقریباً سهم یکسانی در ایجاد صوت دارند. مقایسه نقشه فشار صوت منتشر شده از موتور القایی در حالت عملکرد عادی و حالتی که مسیر فلوی هوای ناشی از فن خنک کننده توسط کاغذ پوشانده شده باشد، نشان می‌دهد که فن خنک کننده به عنوان منبع غالب در ایجاد صوت بوده است. طیف فرکانسی توان صوت منتشر شده در این حالت به همراه توان صوت کلی، در شکل (۲-۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۲-۱۰): طیف توان صوت موتور القایی در صورت پوشاندن مسیر فلوی هوای فن

حال می‌توان توان صوت را در واحد وات نیز محاسبه کرده و توان صوتی ناشی از فن را بصورت مستقل محاسبه کرد. توان صوت در حالت عمل کرد عادی برابر با  $1.23 \times 10^{-5}$  وات و در حالتی که مسیر عبور هوا توسط کاغذ پوشانده شده است برابر با  $4.07 \times 10^{-6}$  وات می‌باشد. بنابراین این توان حاصل از فن به تنهایی برابر با تفاضل این دو مقدار است. بنابراین این توان حاصل از فن به تنهایی برابر  $8.22 \times 10^{-6}$  و به عبارت دیگر برابر با  $69/15$  دسیبل است. مشاهده می‌شود که سهم بسیاری زیادی از نویز صوتی تولید شده توسط موتور القایی در حالت عمل کرد عادی ناشی از سیستم خنک سازی بوده است. و روش معرفی شده در تعیین مکان صوت و منبع صوت قابل بکارگیری است و نتایج حاصل از این روش، در تعیین منبع نویز مفید خواهد بود.



---

## فصل ۳: دسته بندی منابع نویز صوتی در ماشین‌های الکتریکی

---

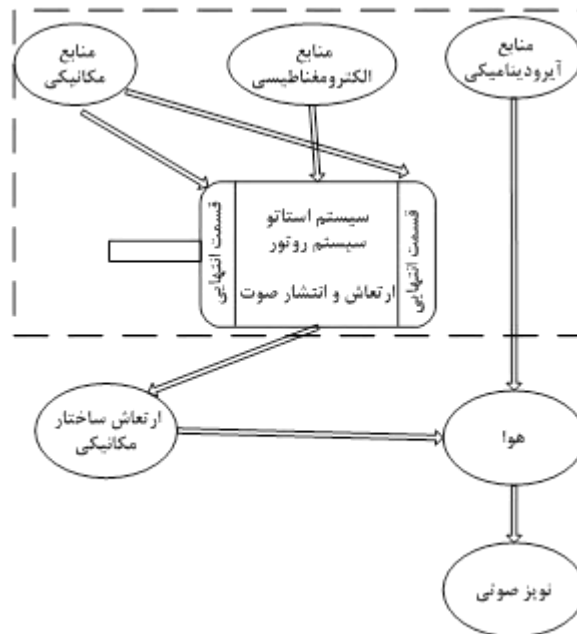
### ۳-۱- مقدمه

منابع نویز صوتی در ماشین‌های الکتریکی را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم کرد. ۱- منابع آیرودینامیکی، شامل نویز حاصل از جریان هوا و همچنین چرخش پره‌های فن در ماشین‌هایی که برای خنک‌سازی از فن استفاده می‌کنند. ۲- منابع مکانیکی، شامل بلبرینگ‌ها، جاروبک‌ها و خمیدگی شفت. ۳- منابع الکترومغناطیسی، که میدان‌های مغناطیسی عامل ایجاد آن هستند. شکل (۳-۱) شماتیکی از نحوه اثر منابع مختلف و ایجاد صوت را نشان می‌دهد.

### ۳-۲- منابع آیرودینامیکی

بخش اصلی توان صوتی منتشرشده از ماشین‌های الکتریکی با سطح توان پایین و سرعت‌بالا (مانند ماشین‌های القایی دو قطب)، مربوط به منابع آیرودینامیکی است. نویز صوتی حاصل از منابع آیرودینامیکی عموماً شامل فرکانس‌های زیاد اما گسسته می‌باشد. که این فرکانس‌ها ممکن است به دلیل جریان هوای جاری شده در سطح پوسته استاتور و یا چرخش پره‌های فن باشند. تئوری پیچیده محاسبه نویز صوتی جریان هوا روش‌های عملی را برای استخراج ویژگی‌های نویز صوتی فن‌ها پیشنهاد می‌کنند. بنابراین رابطه تجربی (۳-۱) برای پیش‌بینی توان صوتی منتشر شده از منابع آیرودینامیکی پیشنهاد شده است [۱۰].

$$L_w = (40 \pm 4) + 10 \log \frac{V}{V_0} + 20 \log \frac{\Delta p_t}{\Delta p_{t,0}} \quad (1-3)$$



شکل (۱-۳): منابع نویز صوتی در ماشین‌های الکتریکی

در رابطه بالا  $V$  دبی هوا برحسب  $m^3/s$ ،  $\Delta p_t$  اختلاف فشار بین اولیه و ثانویه فن برحسب پاسکال،  $V_0 = 1 m^3/s$  و  $\Delta p_{t,0} = 1 \text{ pa}$  می‌باشد. دبی هوا با افزایش سرعت ماشین بصورت نمایی افزایش پیدا می‌کند [۵۳]. بنابراین با افزایش سرعت ماشین و یا سرعت فن نویز صوتی حاصل از آن تغییرات شدیدی خواهد داشت.

### ۳-۳- منابع مکانیکی

سرعت ماشین‌های القایی نوعا بالاست. بنابراین در صورت استفاده از این‌گونه ماشین‌ها برای کاربردهایی که نیاز به سرعت پایین دارند، علاوه بر درایو سرعت متغیر می‌توان از گیربکس یا تسمه برای کاهش سرعت استفاده کرد. که استفاده از آن‌ها باعث افزایش نویز صوتی خواهد شد. بدون در نظر گرفتن گیربکس و یا تسمه اصلی‌ترین منبع نویز صوتی مکانیکی یا تاقان‌ها می‌باشند که اثر آن‌ها

با افزایش سرعت افزایش پیدا می‌کند. دو نوع یاتاقان در ماشین‌های الکتریکی استفاده می‌شود (یاتاقان‌های لغزشی و بلبرینگ) که یاتاقان‌های لغزشی نویز صوتی کمتری ایجاد می‌کنند. علاوه بر اینکه بلبرینگ‌ها مستقیماً باعث ایجاد نویز صوتی می‌شوند، در صورتی که از کیفیت کافی برخوردار نباشند باعث نامتعادلی روتور شده و با ایجاد هارمونیک در چگالی شار فاصله هوایی باعث ایجاد نیروهای شعاعی و ارتعاش پوسته استاتور شده و در نتیجه نویز صوتی می‌شود. پیش‌بینی دامنه نویز صوتی حاصل از بلبرینگ به پارامترهای متعددی بستگی دارد با این وجود می‌توان فرکانس نویز صوتی حاصل از آن را پیش‌بینی کرد. فرکانس‌های نویز ایجاد شده توسط بلبرینگ بصورت (۲-۳) خواهد بود. در حالت کلی نویز صوتی حاصل از منابع مکانیکی بصورت (۳-۳) خواهد بود [۱۰]، [۱۱]، [۲۳]، [۴۹].

$$f_r = k \frac{r_i}{r_i + r_o} n_m N_b \quad (۲-۳)$$

$$f_r = k n_m \quad (۳-۳)$$

در رابطه‌های بالا  $n_m$  سرعت مکانیکی ماشین بر حسب تعداد دور در هر ثانیه،  $r_i$  شعاع داخلی بلبرینگ، شعاع خارجی بلبرینگ،  $N_b$  تعداد تویی‌های داخل بلبرینگ،  $f_r$  فرکانس نویز صوتی و  $k = 1, 2, 3, \dots$  است. علاوه بر روابط بالا فرکانس‌های دیگری نیز ممکن است که ایجاد شوند که احتمال ایجاد آن‌ها کم است با این وجود فرکانس آن‌ها در [۱۱] بررسی شده است.

### ۳-۴- منابع الکترومغناطیسی

نیروهای الکترومغناطیسی که باعث ایجاد نویز و ارتعاش در ماشین‌های الکتریکی می‌شوند به دو

دسته کلی تقسیم می‌شوند [۲۲]:

۱- نیروهایی که بر روی سطح دندان‌های استاتور اثر می‌گذارند:

این نیروها که علت اصلی ارتعاشات شعاعی و مماسی در ماشین‌های الکتریکی هستند، با نام نیروهای ماکسول (رلوکتانسی) شناخته می‌شوند. نیروهای ماکسول از طریق فاصله هوایی بین روتور و استاتور منتقل شده و به نوک دندان‌های استاتور وارد می‌شوند. عواملی چون شکل هندسی شیارها، طول فاصله هوایی، آرایش سیم‌پیچ‌ها، سطح اشباع و... در ایجاد این نیروها موثر هستند.

۲- نیروهایی که بر روی سیم‌پیچی‌های آرمیچر اثر می‌گذارند:

نیروی لورنتس، نیرویی است که به سیم‌پیچ حامل جریان در میدان مغناطیسی وارد می‌شود. بسته به ساختار ماشین الکتریکی مورد بررسی، نیروی مزبور می‌تواند سبب ایجاد گشتاور محرک و یا حتی ایجاد ارتعاش در سیم‌پیچی آرمیچر گردد. ارتعاش سیم‌پیچی‌های آرمیچر از دست رفتن عایق سیم‌پیچی‌ها و اتصال کوتاه را محتمل می‌سازد.

### ۳-۵- ارتعاش پوسته استاتور در اثر نیروهای شعاعی ماکسول

عامل اصلی ارتعاش ساختار مکانیکی نیروهای ماکسول می‌باشند. مطابق با تنسور مغناطیسی ماکسول در یک ماشین الکتریکی شار شعاعی، تغییرات چگالی شار فاصله هوایی باعث ایجاد نیروهای متغیر متناوب با فرکانس‌های مختلف خواهد شد. این نیروها بر دندان استاتور وارد شده و پوسته استاتور را مرتعش خواهد کرد، شکل (۳-۲).



شکل (۳-۲): روند ایجاد نویز الکترومغناطیسی

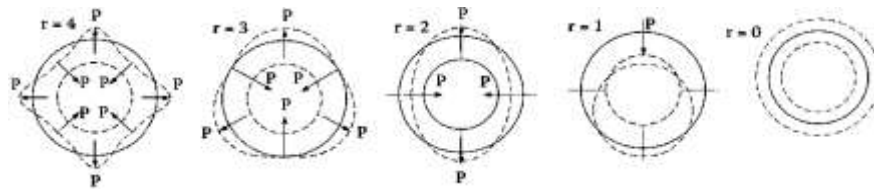
سرعت ارتعاش پوسته استاتور به دامنه نیرو، مرتبه نیرو و پاسخ فرکانسی ساختار مکانیکی بستگی دارد. سرعت ارتعاش پوسته استاتور در اثر اعمال نیروی شعاعی با فرکانس  $f_r$  بصورت تقریبی توسط رابطه (۳-۴) قابل محاسبه است. و توان صوت حاصل از این ارتعاش در اثر اعمال نیروی شعاعی شامل تنها یک فرکانس است، از رابطه (۳-۵) قابل محاسبه است [۱۰]، [۵۴].

$$v_{fr} = \sqrt{2} f_r \frac{12 F_{rad} R_m \left(\frac{R_m}{h_s}\right)^3}{j^4 E \sqrt{\left\{1 - \left(\frac{f_r}{f_{res}}\right)^2\right\}^2 + \left(\frac{D f_r}{\pi f_m}\right)^2}} \quad (۳-۴)$$

$$W_{fr} = \rho c S_{rad} \sigma_r v_{fr}^2 \quad (۳-۵)$$

در دو رابطه بالا  $f_r$  فرکانس نیروی شعاعی (Hz)،  $F_{rad}$  دامنه نیرو شعاعی (N)،  $f_{res}$  فرکانس تشدید یا فرکانس طبیعی پوسته استاتور،  $R_m$  شعاع متوسط یوغ استاتور (برحسب متر m)،  $E$  ضریب کشسانی یانگ،  $D$  ضریب میرایی می‌باشد برای اجسام با جنس‌ها و اشکال مختلف، متفاوت است. نحوه محاسبه  $D$  برای استاتور ماشین‌های شار شعاعی در [۱۰] بررسی شده است.  $h_s$  مجموع ضخامت یوغ استاتور و پوسته استاتور،  $W_{fr}$  توان صوت ایجاد شده توسط نیروی شعاعی با فرکانس  $f_r$ ،  $v_{fr}$  سرعت ارتعاش پوسته استاتور و  $j$  شماره مود یا مرتبه نیرو می‌باشد. شماره مود در واقع نشان‌دهنده تعداد پیک‌هایی است که در اثر ارتعاش پوسته استاتور ایجاد می‌شود. همان‌طور که در رابطه بالا مشاهده می‌شود دامنه ارتعاش ( $\Delta d$ ) و همچنین سرعت ارتعاش بصورت رابطه (۳-۶) با معکوس توان چهارم مرتبه نیرو، متناسب است. بنابراین در تحلیل نویز و ارتعاشات، نیروهایی که مرتبه آن‌ها بیشتر از ۵ باشد نادیده گرفته می‌شود. شکل مود ارتعاش استاتور در اثر نیروهایی با مرتبه مختلف در شکل (۳-۳) نشان داده شده است.

$$\Delta d \propto \frac{1}{r^4} \quad (۳-۶)$$



شکل (۳-۳): شکل مودهای ارتعاشی پوسته استاتور در اثر اعمال نیروهایی با مرتبه مختلف [۱۱]

همان‌طور که اشاره شد، نیروهای ماکسول در اثر تغییرات چگالی شار فاصله‌های هوایی ایجاد می‌شوند. چگالی شار فاصله‌های هوایی برآیند چگالی شار روتور و استاتور می‌باشد و وجود آن‌ها برای عملکرد ماشین اجباری است. بنابراین وجود نیروهای شعاعی غیرقابل‌انکار است. عوامل مختلفی مانند وجود شیارهای استاتور و روتور، ناهم‌محوری، نا تعادلی روتور و اشباع هارمونیک‌های چگالی شار و در نتیجه هارمونیک‌های نیرو را غنی‌تر می‌کنند علاوه بر این احتمال ایجاد نیروهایی با فرکانس برابر با فرکانس طبیعی ارتعاش پوسته استاتور را افزایش می‌دهد و در حالت کلی توان صوتی منتشرشده را افزایش می‌دهد. با این وجود می‌توان با استخراج فرکانس نیروهای حاصل از عوامل مختلف و همچنین فرکانس‌های طبیعی پوسته استاتور، از این امر جلوگیری کرد.

---

# فصل ۴: تحلیل و مقایسه مشخصه‌های صوتی

## موتور القایی روتور سیم‌پیچی شده و موتور سنکرون

---

### ۴-۱- مقدمه

همان‌طور که در فصل ۱ نیز اشاره شد ماشین مورد آزمایش یک ماشین القایی روتور سیم‌پیچی شده است که می‌توان با تحریک صحیح سیم‌پیچی‌های روتور، از این ماشین به‌عنوان ماشین سنکرون قطب‌صاف استفاده کرد. در این فصل هارمونیک‌های چگالی شار برای این نوع موتور مورد بررسی قرار خواهد گرفت و فرکانس هارمونیک‌های چگالی شار استاتور و روتور پیش‌بینی خواهد شد و همچنین تأثیر عوامل مختلف (مانند اثر شیار، ناهم‌محوری، اشباع) بر چگالی شار روتور و استاتور بررسی شده و فرکانس هارمونیک‌های حاصل از آن‌ها نیز پیش‌بینی خواهد شد. در ادامه نحوه ایجاد نیروهای شعاعی بر اساس تنسور مغناطیسی ماکسول بیان شده و فرکانس نیروهای حاصل از هارمونیک‌های چگالی شار روتور و استاتور پیش‌بینی می‌شود. سپس فرکانس نیروهای حاصل از عوامل مختلف مانند هارمونیک‌های روتور، هارمونیک‌های استاتور، اثر متقابل بین هارمونیک‌های روتور و استاتور، ناهم‌محوری و اشباع تفکیک می‌شود. سپس فرکانس نویز حاصل از عوامل دیگر مانند الاستیسیته مغناطیسی و نامتعادلی ولتاژ بررسی خواهد شد. در ادامه تأثیر استفاده از درایو بر نویز صوتی بررسی شده و فرکانس نویز ایجاد شده در اثر هارمونیک‌های جریان درایو مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت با طراحی یک آزمایش، نویز صوتی حاصل از موتور مورد بررسی اندازه‌گیری شده و تأثیر رژیم

عملکردی موتور (سنکرون و یا آسنکرون) بر نویز صوتی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. این آزمایش به‌گونه‌ای طراحی و تحلیل می‌شود که منجر به استخراج فرکانس‌های طبیعی ارتعاش قسمت‌های مختلف موتور و همچنین تفکیک آن‌ها شود.

## ۴-۲- هارمونیک‌های فضایی چکالی شار استاتور و روتور موتور القایی

با در نظر گرفتن جریان سینوسی برای سیم‌پیچی استاتور، توزیع MMF حاصل از سیم‌پیچی فاز A بصورت (۲-۴) خواهد بود [۱۱].

$$i_A = \sqrt{2}I \cos(\omega t) \quad (1-4)$$

$$F_A(\alpha, t) = \sum_{v=1,3,5,\dots}^{\infty} F_{mv} \cos(\omega t) \cos(v p \alpha) \quad (2-4)$$

رابطه بالا را می‌توان بصورت زیر شامل مؤلفه‌های چپ‌گرد و راست‌گرد نوشت.

$$F_A(\alpha, t) = \frac{1}{2} \sum_{v=1,3,5,\dots}^{\infty} F_{mv} \cos(\omega t - v p \alpha) + \frac{1}{2} \sum_{v=1,3,5,\dots}^{\infty} F_{mv} \cos(\omega t + v p \alpha) \quad (3-4)$$

در روابط بالا  $\omega$  فرکانس زاویه جریان استاتور،  $p$  تعداد قطب‌های ماشین،  $F_A(t, \alpha)$  موج MMF فاز A استاتور بر حسب زمان ( $t$ ) و زاویه فضایی ( $\alpha$ ) و  $F_{mv}$  دامنه هارمونیک  $v$  ام می‌باشد که می‌توان بصورت (۴-۴) محاسبه کرد.

$$F_{mv} = \frac{2\sqrt{2}N_1 k_{wsv}}{\pi v p} \quad (4-4)$$

در رابطه بالا  $N_1$  تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز است و  $k_{wsv}$  ضریب سیم‌پیچی می‌باشد که محاسبه ضریب سیم‌پیچی در [۲] بصورت کامل توضیح داده شده است. با در نظر گرفتن جریان سیم‌پیچی‌های سه فاز استاتور بصورت کاملاً سینوسی و متعادل، بصورت (۵-۴) توزیع فضایی هارمونیک  $v$  ام MMF فازهای استاتور بصورت (۶-۴) خواهد بود [۸].



$$\begin{aligned} i_A &= \sqrt{2}I \sin(\omega t) \\ i_B &= \sqrt{2}I \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ i_C &= \sqrt{2}I \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (5-4)$$

بنابراین داریم:

$$\begin{aligned} F_{Av}(\alpha, t) &= \frac{1}{2} F_{mv1} \cos(\omega t - v p \alpha) + \frac{1}{2} F_{mv} \cos(\omega t + v p \alpha) \\ F_{Bv}(\alpha, t) &= \frac{1}{2} F_{mv1} \cos((\omega t - v p \alpha) + (v-1) \frac{2\pi}{3}) + \frac{1}{2} F_{mv} \cos((\omega t + v p \alpha) - (v+1) \frac{2\pi}{3}) \\ F_{Cv}(\alpha, t) &= \frac{1}{2} F_{mv1} \cos((\omega t - v p \alpha) + 2(v-1) \frac{2\pi}{3}) + \frac{1}{2} F_{mv} \cos((\omega t + v p \alpha) - 2(v+1) \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (6-4)$$

با توجه به معادله (۶-۴) برای هارمونیک‌های  $v=3k$  مجموع MMF های حاصل از سه فاز برابر با صفر خواهد بود بنابراین هارمونیک‌های  $v=3k$  در سیستم سه فاز ظاهر نمی‌شوند. بنابراین در سیستم سه فاز، هارمونیک‌های راست‌گرد برای  $v=1, 7, 13, \dots$  و هارمونیک‌های چپ‌گرد برای  $v=5, 11, 17, \dots$  وجود خواهند داشت. در نتیجه MMF حاصل از سیم‌پیچی سه فاز بصورت (۷-۴) خواهد بود.

$$F_s(\alpha, t) = \sum_{v=6k \pm 1}^{\infty} F_{mv} \cos(\omega t \mp v p \alpha) \quad (7-4)$$

در رابطه بالا MMF استاتور می‌باشد. با در نظر گرفتن اثر شیارهای روتور و استاتور و همچنین ناهم‌محوری استاتیک و دینامیک، گذردهی الکترومغناطیسی فاصله هوایی ( $\Lambda_g$ ) تابعی از زمان ( $t$ ) و زاویه فضایی ( $\alpha$ ) خواهد بود. بنابراین می‌توان چگالی شار استاتور را بصورت (۸-۴) نوشت.

$$B_s(\alpha, t) = F_s(\alpha, t) \Lambda_g(\alpha, t) = \sum_{v=6k \pm 1}^{\infty} B_{mv} \cos(v p \alpha \mp \omega t) \quad (8-4)$$

در رابطه بالا  $B_s(\alpha, t)$  چگالی شار استاتور بر حسب زمان و موقعیت و  $B_{mv}$  دامنه هارمونیک  $v$  ام می‌باشد. با توجه به معادله بالا تمام هارمونیک‌های  $v=6k \pm 1$  در چگالی شار فاصله هوایی وجود خواهند داشت. با این وجود بررسی‌های انجام‌شده در [۸]، [۱۰]، [۱۱] نشان می‌دهد که هارمونیک‌های  $v=2m_1 q_1 k \pm 1$  نقش مهم‌تری در ایجاد نویز الکترومغناطیسی دارند. که  $m_1$  تعداد

فازهای سیم‌پیچی استاتور،  $q_1$  تعداد شیار بر قطب بر فاز استاتور و  $k=1, 2, 3, \dots$  اثبات این موضوع با در نظر گرفتن اثر شیارهای روتور و استاتور ممکن است. که در این تحقیق به اثبات تحلیلی این موضوع پرداخته نشده است. با این وجود نتایج حاصل از آزمایش‌ها انجام‌شده در فصل ۵ و تحلیل آن‌ها درستی این موضوع را نشان خواهند داد.

با تحلیل مشابه برای چگالی شار استاتور می‌توان نشان داد که چگالی شار روتور موتورهای القایی قفس سنجابی و روتور سیم‌پیچی شده بصورت رابطه (۹-۴) خواهد بود.

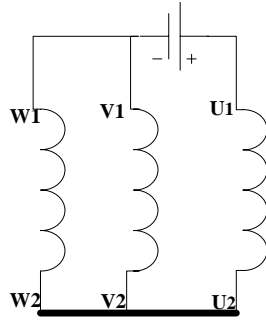
$$B_r(\alpha, t) = F_r(\alpha, t) \Lambda_g(\alpha, t) = \sum_{\mu=6k \pm 1}^{\infty} B_{m\mu} \cos(\mu p \alpha \mp \omega_{\mu} t + \phi_{\mu}) \quad (9-4)$$

$B_r(t, \alpha)$  موج چگالی شار روتور،  $B_{m\mu}$  دامنه هارمونیک  $\mu$  ام چگالی شار روتور و  $\omega_{\mu} = \mu p \Omega$  که سرعت مکانیکی روتور می‌باشد.

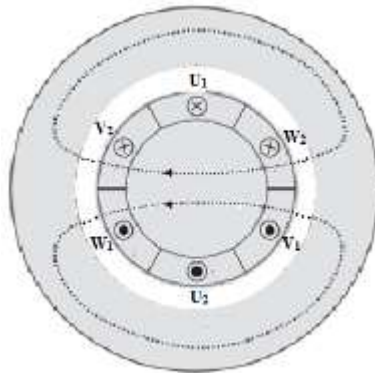
#### ۴-۳- هارمونیک‌های چگالی شار روتور موتور مورد آزمایش در رژیم سنکرون

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد ماشین، مورد بررسی در واقع یک ماشین القایی روتور سیم‌پیچی شده است که سیم‌پیچی روتور آن مطابق با شکل (۱-۴) توسط یک منبع DC تغذیه شده است. بنابراین رابطه (۱۰-۴) بین جریان فازهای سیم‌پیچی‌های روتور برقرار خواهد بود. شکل (۲-۴) شماتیکی از مسیر شار و جریان‌های روتور را برای حالتی که سیم‌پیچی روتور مطابق با شکل (۱-۴) تغذیه شود، نشان می‌دهد.

$$I_w = I_v = -\frac{1}{2} I_u \quad (10-4)$$



شکل (۱-۴): مدار تغذیه سیم‌پیچی روتور موتور القایی



شکل (۲-۴): شماتیکی از مسیر شار و جریان‌های روتور

مشابه با رابطه ارائه شده در (۲-۴) برای MMF حاصل از یک فاز استاتور، می‌توان MMF حاصل

از یک فاز روتور را بصورت زیر نوشت:

$$F_U(\alpha, t) = \sum_{v=1,3,5,\dots}^{\infty} F_{m\mu 1} \cos(\omega t) I_U \quad (11-4)$$

بنابراین برای هارمونیک فضایی  $\mu$  ام خواهیم داشت:

$$F_{U\mu}(\alpha, t) = F_{m\mu 1} \cos(\omega t) (I_U)$$

$$F_{V\mu}(\alpha, t) = F_{m\mu 1} \cos(\omega t) \left(-\frac{1}{2} I_U\right) \quad (12-4)$$

$$F_{W\mu}(\alpha, t) = F_{m\mu 1} \cos(\omega t) \left(-\frac{1}{2} I_U\right)$$

که در رابطه بالا  $F_{U\mu}$ ،  $F_{V\mu}$  و  $F_{W\mu}$  به ترتیب هارمونیک  $\mu$  ام فازهای  $U$ ،  $V$  و  $W$  روتور هستند.

بنابراین برای هارمونیک  $\mu$  ام MMF روتور خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}
 F_{r,\mu}(t, \alpha) &= F_{m\mu 1} \cos(\mu\omega t - \mu p\alpha) \\
 &\quad - \frac{1}{2} F_{m\mu 1} \cos\left(\mu\omega t - \mu(p\alpha - \frac{2\pi}{3})\right) \\
 &\quad - \frac{1}{2} F_{m\mu 1} \cos\left(\mu\omega t - \mu(p\alpha - \frac{4\pi}{3})\right) \\
 &= \frac{3}{2} F_{m\mu 1} \cos(\mu\omega t - \mu p\alpha) \\
 &\quad - \frac{1}{2} F_{m\mu 1} \left[ \cos(\mu\omega t - \mu p\alpha) + \cos\left(\mu\omega t - \mu(p\alpha - \frac{2\pi}{3})\right) + \cos\left(\mu\omega t - \mu(p\alpha - \frac{4\pi}{3})\right) \right] \\
 &= \begin{cases} \frac{3}{2} F_{m\mu 1} \cos(\mu\omega t - \mu p\alpha), & \mu = 6k \pm 1 \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{۱۳-۴}$$

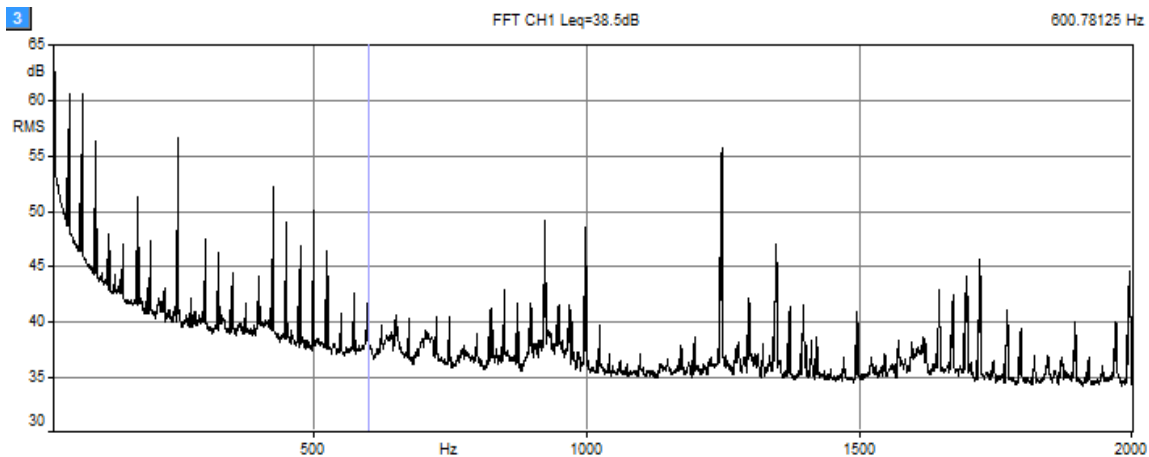
به ازای  $\mu=3k$  رابطه فوق برابر با صفر خواهد بود. بنابراین تنها به ازای  $\mu = 6k \pm 1$  مقدار  $F_{r,\mu}$  غیر صفر خواهد شد. از آنجایی که ساختار ماشین نسبت به حالت عملکرد آن در رژیم آسنکرون تغییر نکرده است، گذردهی الکترومغناطیسی فاصله هوایی نیز ثابت است. بنابراین چگالی شار روتور نیز در این حالت تغییری نخواهد کرد. و برای چگالی شار روتور در این حالت خواهیم داشت:

$$B_r(\alpha, t) = F_r(\alpha, t) \Lambda_g(\alpha, t) = \sum_{\mu=6k \pm 1}^{\infty} B_{m\mu} \cos(\mu p\alpha \mp \mu\omega t + \phi_\mu) \tag{۱۴-۴}$$

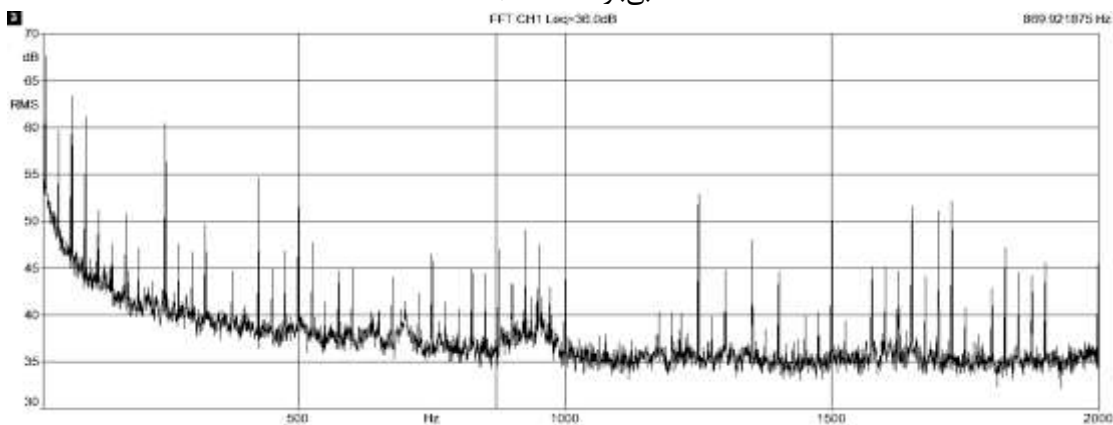
#### ۴-۴ - مقایسه نویز الکترومغناطیسی موتور سنکرون و آسنکرون

همان‌طور که ملاحظه شد طیف فرکانسی چگالی شار موتور مورد بررسی در رژیم عملکردی سنکرون و آسنکرون تفاوت چندانی ندارد و تنها تفاوت آن‌ها اختلاف در سرعت مکانیکی روتور می‌باشد. که در نتیجه آن نقاط پیک طیف فرکانسی جابجایی بسیار کمی (در حد لغزش در رژیم آسنکرون) خواهند داشت. با این وجود به دلیل متفاوت بودن جریان‌های روتور و استاتور دامنه آن‌ها در دو رژیم عملکردی متفاوت خواهد بود. عوامل تأثیرگذار بر دامنه و فرکانس نویز حاصل از منابع آیرودینامیکی و مکانیکی در دو رژیم عملکردی یکسان است، بنابراین نویز این منابع در دو رژیم یکسان خواهند بود. بنابراین می‌توان پیش‌بینی کرد که موقعیت نقاط پیک در طیف فرکانسی فشار صوت منتشرشده از موتور مورد بررسی در دو رژیم عملکردی یکسان خواهند بود. که نتایج حاصل از اندازه‌گیری نویز صوتی نیز این موضوع را نشان می‌دهند. شکل (۳-۴) و شکل (۴-۴) به ترتیب، طیف

فرکانسی فشار صوت منتشرشده از موتور مورد بررسی را در رژیم عملکردی آسنکرون و سنکرون در حالت بی‌باری نشان می‌دهند. پارمترهای نامی موتور مورد بررسی در جدول (۲-۳) ارائه شده است. جزئیات بیشتر در مودر موتور مورد بررسی و همچنین جزئیات دقیق سیستم و تجهیزات اندازه‌گیری در فصل ۵ به‌طور کامل ارائه شده است.



شکل (۳-۴): طیف فرکانسی فشار صوتی در فاصله ۲۰ cm از موتور مورد بررسی در رژیم عملکرد آسنکرون و بصورت بی‌بار ( $V_t=250\text{ V}$ )



شکل (۴-۴): طیف فرکانسی فشار صوت در فاصله ۲۰ cm از موتور مورد بررسی در رژیم عملکرد سنکرون و بصورت بی‌بار ( $V_t=250\text{ V}$ ,  $I_t=5\text{ A}$ )

در رژیم سنکرون می‌توان جریان تحریک روتور را تغییر داد. بنابراین ضریب توان موتور، جریان استاتور و در نتیجه دامنه هارمونیک‌های موجود در طیف فرکانسی فشار صوت تغییر خواهند کرد. در صورت تغذیه سیم‌پیچی استاتور با ولتاژ ۲۵۰ ولت و تغذیه سیم‌پیچی تحریک موتور با جریان ۹ آمپر، ضریب توان برابر با یک خواهد شد (نتایج حاصل از اندازه‌گیری عملی این موضوع را نشان داده است).

نویز صوتی موتور مورد بررسی در شرایط عملکردی آسنکرون با ولتاژ ترمینال ۲۵۰ ولت اندازه‌گیری شده و در شکل (۳-۴) نشان داده شده است. نویز صوتی موتور مورد بررسی در شرایط عملکردی سنکرون با جریان تحریک ۵ آمپر در شکل (۴-۴) نشان داده شده است. علاوه بر این در یک آزمایش عملی بر روی موتور مورد بررسی در رژیم سنکرون، مشاهده شد که با افزایش جریان تحریک موتور از ۱ آمپر تا ۹ آمپر (به ازای این جریان تحریک ضریب توان موتور برابر با یک شده و جریان استاتور کمینه می‌شود) علاوه بر اینکه دامنه مؤلفه اصلی جریان استاتور کاهش پیدا می‌کند، دامنه سایر هارمونیک‌های جریان استاتور نیز تغییر می‌کنند بطوریکه THD جریان استاتور به ازای جریان تحریک ۹ آمپر بیشینه می‌شود. فشار صوت کلی به ازای جریان‌های تحریک مختلف در جدول (۴-۱) ارائه شده است. اگر در حالت آسنکرون مقدار ولتاژ ترمینال کمتر از ۲۵۰ انتخاب شود لغزش بیشتر شده و قابل مقایسه با شرایط نامی نخواهد بود. بنابراین ولتاژ ترمینال برابر با ۲۵۰ ولت انتخاب شده است. برای حفاظت از سیم‌پیچ‌های موتور مورد بررسی، جریان تحریک را نمی‌توان بالاتر از ۹ آمپر انتخاب کرد و از موتور مورد بررسی در شرایط پیشفاز استفاده کرد. با این وجود واضح است که با افزایش جریان تحریک به مقداری بیشتر از ۹ آمپر علاوه بر جریان تحریک، جریان استاتور نیز افزایش خواهد یافت و در نتیجه نویز صوتی حاصل از هارمونیک‌های چگالی شار نیز افزایش خواهند یافت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نویز صوتی موتور سنکرون در حالت پیشفاز نسبت به عملکرد با ضریب توان یک بیشتر خواهد بود. با این وجود در حالت عملکردی پسفاز با کاهش جریان روتور، جریان استاتور افزایش پیدا می‌کند بنابراین در حالت کلی با قطعیت نمی‌توان گفت که نویز صوتی چه تغییری می‌کند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های عملی نشان می‌دهند که در شرایط عملکردی پسفاز، با کاهش جریان تحریک میزان نویز صوتی منتشرشده از موتور سنکرون افزایش پیدا می‌کند. با مشاهده نتایج ارائه شده در جدول (۴-۱) و توجه به این نکته که نویز صوتی موتور سنکرون در حالت عملکردی با ضریب توان واحد نسبت به حالت‌های پسفاز و پیشفاز کمتر است (نتایج ارائه شده در بالا این موضوع

را نشان می‌دهند)، می‌توان نتیجه گرفت که در حالت کلی نویز صوتی در شرایط عملکردی آسنکرون نسبت به شرایط عملکردی سنکرون کمتر است.

جدول (۴-۱): فشار صوت موتور مورد آزمایش در رژیم‌های عملکردی مختلف

فشار صوت (dB)	جریان تحریک (A)	رژیم عملکردی
۸۲/۸	$I_f = 9 \text{ A}$	سنکرون (ضریب توان واحد)
۸۳/۷	$I_f = 8 \text{ A}$	سنکرون (پس‌فاز)
۸۸	$I_f = 5 \text{ A}$	سنکرون (پس‌فاز)
۸۲	-----	آسنکرون (پس‌فاز)

#### ۴-۵- ایجاد نیروهای شعاعی

طبق تئور مغناطیسی ماکسول، نیروی مغناطیسی وارد بر واحد سطح پوسته استاتور یا فشار

مغناطیسی در هر نقطه از فاصله هوایی، بصورت رابطه (۴-۱۵) قابل محاسبه است [۸]، [۱۱].

$$p_r = \frac{1}{2\mu_0} [B^2(t, \alpha) - B_i^2(\alpha, t)] \quad (۴-۱۵)$$

،  $B(t, \alpha)$  بیان کننده مؤلفه شعاعی چگالی شار فاصله هوایی بر حسب زمان  $(t)$  و زاویه فضایی  $(\alpha)$  ،

$\mu_0$  ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هوا،  $B(t, \alpha)$  مؤلفه مماسی چگالی شار و  $p_r$  بیان کننده فشار

مغناطیسی شعاعی وارد بر استاتور است. به دلیل گذردهی بالای مواد فرومغناطیس (هسته استاتور)

نسبت به هوا، مؤلفه مماسی چگالی شار فاصله هوایی در مقایسه با مؤلفه شعاعی آن، بسیار ناچیز

است. بنابراین رابطه (۴-۱۵) را می‌توان بصورت (۴-۱۶) نوشت.

$$p_r = \frac{B^2(t, \alpha)}{2\mu_0} \quad (۴-۱۶)$$

چگالی شار فاصله هوایی را می‌توان به دو مؤلفه چگالی شار روتور و استاتور تفکیک کرد و رابطه

(۴-۱۶) را بصورت رابطه (۴-۱۷) نوشت.

$$p_r = \frac{[B_s(t, \alpha) + B_r(t, \alpha)]^2}{2\mu_0} \quad (17-4)$$

$$= \frac{B_s^2(t, \alpha) + B_r^2(t, \alpha) + 2B_s(t, \alpha)B_r(t, \alpha)}{2\mu_0}$$

ترم اول در رابطه بالا مربوط به هارمونیک‌های چگالی شار استاتور می‌باشد. با در نظر گرفتن چگالی شار استاتور بصورت (۹-۴) فشار مغناطیسی حاصل از اثر متقابل بین هارمونیک‌های فضایی استاتور نسبت به زمان ثابت بوده و باعث ارتعاش پوسته استاتور و در نتیجه نویز صوتی نخواهند شد. فشار مغناطیسی حاصل از هرکدام از هارمونیک‌های چگالی شار استاتور بصورت زیر خواهد بود:

$$p_{rv}(\alpha, t) = \frac{[B_{mv} \cos(v p \alpha \mp \omega t)]^2}{2\mu_0} = \frac{B_{mv}^2}{4\mu_0} [1 + \cos(2v p \alpha \mp 2\omega t)] \quad (18-4)$$

به همین صورت می‌توان فشار مغناطیسی حاصل از هارمونیک‌های چگالی شار روتور را نیز محاسبه کرد.

$$p_{r\mu}(\alpha, t) = \frac{[B_{m\mu} \cos(\mu p \alpha \mp \omega_\mu t + \phi_\mu)]^2}{2\mu_0} = \frac{B_{m\mu}^2}{4\mu_0} [1 + \cos(2\mu p \alpha \mp 2\omega_\mu t + 2\phi_\mu)] \quad (19-4)$$

ترم سوم مربوط به اثر متقابل بین هارمونیک‌های روتور و استاتور می‌باشد.

$$p_{rv\mu}(\alpha, t) = \frac{2B_{mv} \cos(v p \alpha \mp \omega t) B_{m\mu} \cos(\mu p \alpha \mp \omega_\mu t + \phi_\mu)}{2\mu_0} =$$

$$= \frac{1}{2\mu_0} B_{mv} B_{m\mu} [\cos(p\alpha(v - \mu) \mp (\omega - \omega_\mu)t - \phi_\mu) + \cos(p\alpha(v + \mu) \mp (\omega + \omega_\mu)t + \phi_\mu)] \quad (20-4)$$

در روابط بالا فشار مغناطیسی حاصل از هارمونیک‌های استاتور، فشار مغناطیسی حاصل از هارمونیک‌های روتور و فشار مغناطیسی حاصل از اثر متقابل بین هارمونیک‌های روتور و استاتور می‌باشد. سایر مؤلفه‌های فشار مغناطیسی که در روابط بالا نادیده گرفته شده‌اند اثر کمتری در ایجاد نویز صوتی دارند [۸]، [۱۰]، [۱۱]، [۲۳]. مرتبه نیروهای حاصل از ترم سوم نسبت به دو ترم دیگر کمتر بوده و با توجه به رابطه (۳-۶) این ترم تأثیر بیشتری در ایجاد نویز الکترومغناطیسی خواهند



داشت. در [۲۱] نویز الکترومغناطیسی یک موتور مغناطیس دائم در محیط نرم‌افزاری اجزاء محدود بررسی شده و نویز حاصل از این ترم به‌عنوان منبع اصلی نویز معرفی شده است. تحلیل و بررسی نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های فشار صوت منتشرشده از موتور مورد بررسی در فصل ۵ از این تحقیق نیز نتیجه مشابهی خواهد داشت.

## ۴-۶- فرکانس و مرتبه نیروهای شعاعی ناشی از هارمونیک‌های فضایی چگالی شار

عوامل متعددی باعث ایجاد هارمونیک در چگالی شار فاصله هوایی استاتور می‌شوند. که از جمله این عوامل می‌توان هارمونیک‌های MMF استاتور و یا روتور، هارمونیک‌های ناشی از اشباع و یا نا هم‌محوری را نام برد.

### ۴-۶-۱- نیروهای شعاعی حاصل از هارمونیک‌های فضایی استاتور

مطابق با معادله (۴-۱۸)، فرکانس نیروی الکترومغناطیسی حاصل از تمام هارمونیک‌های فضایی استاتور دو برابر فرکانس تغذیه است. با این وجود مرتبه آن‌ها متفاوت بوده و بصورت زیر قابل محاسبه است.

$$r = 2vp \quad (۴-۲۱)$$

به ازای  $v = ks_1/p \pm 1$  مرتبه هارمونیک‌های شیار بصورت زیر قابل محاسبه است.

$$r = 2(ks_1 \pm p) \quad (۴-۲۲)$$

در رابطه بالا  $p$  تعداد جفت قطب‌های ماشین،  $s_1$  تعداد شیارهای استاتور،  $r$  مرتبه نیرو و  $k=1, 2, 3, \dots$

**۴-۶-۲- نیروهای شعاعی حاصل از هارمونیک‌های فضایی روتور**

مطابق با رابطه (۴-۱۹) فرکانس و مرتبه نیروهای شعاعی حاصل از هارمونیک‌های چگالی شار

روتور بصورت زیر است [۱۱]:

$$f_r = 2f \left( 1 \pm k \left( \frac{s_2}{p} \right) (1-s) \right) \quad (۴-۲۳)$$

$$r = 2(ks_2 \pm p) \quad (۴-۲۴)$$

در رابطه بالا  $s_2$  تعداد شیارهای روتور و  $s$  برابر با لغزش است. که در ماشین‌های سنکرون  $s=0$

خواهد بود. این رابطه با در نظر گرفتن  $s_2=2=2p$  برای ماشین‌های سنکرون قطب برجسته بصورت زیر صادق خواهد بود.

$$f_r = 2(1 \pm 2k)f \quad (۴-۲۵)$$

$$r = 2p(1 \pm 2k) \quad (۴-۲۶)$$

**۴-۶-۳- نیروهای شعاعی حاصل از اثر متقابل بین هارمونیک‌های روتور و استاتور**

همان‌طور در رابطه (۴-۱۸) مشاهده می‌شود، در هر نقطه از فاصله هوایی فرکانس زمانی تغییرات

هارمونیک‌های فضایی چگالی شار استاتور دو برابر فرکانس تغذیه است. در یک ماشین القایی فرکانس

هارمونیک‌های شیار روتور بصورت زیر است [۱۰]، [۱۱].

$$f_\mu = f \left[ 1 \pm \frac{ks_2}{p} (1-s) \right] \quad (۴-۲۷)$$

بنابراین مطابق با رابطه (۴-۲۰) فرکانس و مرتبه نیروی حاصل از اثر متقابل بین هارمونیک‌های شیار

استاتور و روتور بصورت زیر خواهد بود:

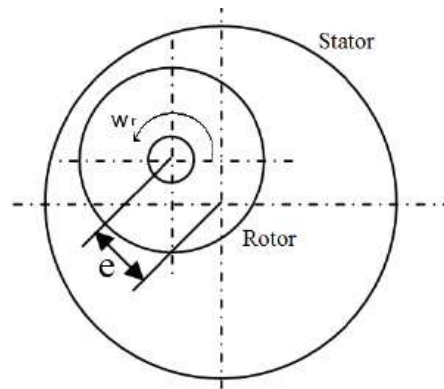
$$f_r = f k \frac{s_2}{p} (1-s) \quad \text{and} \quad f_r = f \left[ k \frac{s_2}{p} (1-s) \pm 2 \right] \quad (۴-۲۸)$$

$$r = ks_1 \pm ks_2 \pm 2p$$

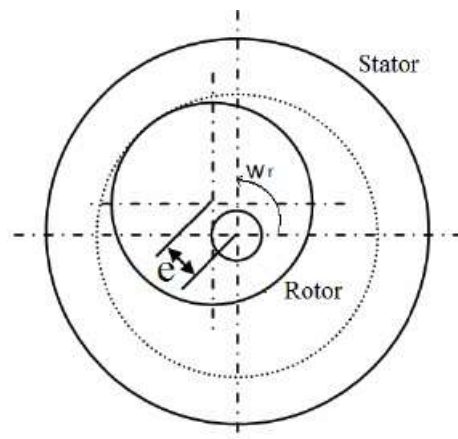
(۲۹-۴)

#### ۴-۶-۴- نبروهای شعاعی حاصل از تأثیر ناهم‌محوری بر چگالی شار فاصله هوایی

ناهم‌محوری (لنگی) روتور عامل دیگری است که سبب می‌شود شکل موج چگالی شار فاصله هوایی غیر سینوسی (هارمونیکی) گردد. لنگی روتور در یک ماشین الکتریکی بدین معناست که مرکز هندسی روتور بر مرکز دایره استاتور منطبق نباشد. در حالت کلی دو نمونه از لنگی وجود دارد. در نمونه اول که ناهم‌محوری استاتیک نامیده می‌شود، با وجود جدایی مرکز هندسی روتور از مرکز دایره استاتور، محور چرخش روتور همچنان بر مرکز هندسی آن منطبق است، شکل (۴-۵). اما در نمونه دوم که از آن با عنوان لنگی دینامیک یاد می‌شود، محور چرخش روتور از مرکز هندسی آن جدا شده و بر نقطه دیگری (همچون مرکز دایره استاتور) انطباق می‌یابد، شکل (۴-۶).



شکل (۴-۵): ناهم‌محوری استاتیک روتور [۵۵]



شکل (۴-۶): ناهم‌محوری دینامیک روتور [۵۵]

تحلیلی فرکانس هارمونیک‌های نیروهای شعاعی حاصل از ناهم‌محوری با در نظر گرفتن هارمونیک‌های فضایی چگالی شار روتور و استاتور بسیار پیچیده است. با این وجود در  $[۸]$ ،  $[۱۰]$ ،  $[۱۱]$ ،  $[۲۰]$ ،  $[۲۳]$ ،  $[۵۶]$  فرکانس‌های پیشنهاد شده برای هارمونیک‌های حاصل از ناهم‌محوری و مرتبه آن‌ها بصورت زیر است.

- ناهم‌محوری استاتیک

$$f_{re} = f \left[ 2 + k \frac{s_2}{p} (1-s) \right] \quad \text{and} \quad f_{re} = f k \frac{s_2}{p} (1-s) \quad (۳۰-۴)$$

$$r = 1 \quad \text{and} \quad r = 2 \quad (۳۱-۴)$$

- ناهم‌محوری دینامیک

$$f_{re} = f \left[ 2 \pm \frac{1}{p} (1-s) + k \frac{s_2}{p} (1-s) \right] \quad \text{and} \quad f_{re} = f \left[ \frac{1}{p} (1-s) + k \frac{s_2}{p} (1-s) \right] \quad (۳۲-۴)$$

$$r = 1 \quad \text{and} \quad r = 2 \quad (۳۳-۴)$$

#### ۴-۶-۵- نیروهای شعاعی حاصل از پدیده اشباع

فرکانس و مرتبه نیروهای شعاعی ناشی از پدیده اشباع بصورت زیر است:

$$f_r = \left[ k \frac{s_2}{p} (1-s) + 4 \right] f \quad \text{and} \quad f_r = \left[ k \frac{s_2}{p} (1-s) + 2 \right] f \quad (۳۴-۴)$$

$$r = ks_1 + ks_2 + 4p \quad \text{and} \quad r = ks_1 - ks_2 + 2p \quad (۳۵-۴)$$

#### ۴-۶-۶- نامتعادلی ولتاژ تغذیه

نامتعادلی ولتاژ تغذیه باعث ایجاد ارتعاش با فرکانس دو برابر فرکانس تغذیه خواهد شد.

$$f_r = 2f \quad (۳۶-۴)$$

#### ۴-۷- نیروی‌های شعاعی حاصل از هارمونیک‌های جریان استاتور

در صورت تغذیه سیم‌پیچی استاتور با جریان غیر سینوسی، محتوای هارمونیک‌های نیروی شعاعی وارد بر پوسته استاتور غنی‌تر می‌شود و در نتیجه نویز صوتی حاصل از موتور افزایش می‌یابد. در صورت تغذیه موتور با (VFD) ولتاژ و جریان ورودی موتور غیر سینوسی خواهند بود. جریان ورودی شامل هارمونیک‌های بالایی خواهد بود که به دلیل سوئیچینگ ایجاد می‌شوند. با تحلیل مشابه به آنچه که در بخش ۲ ارائه شد می‌توان فرکانس نیروهای حاصل از هارمونیک جریان را نیز محاسبه کرد. دو گروه مهم از نیروهای شعاعی ایجاد شده توسط هارمونیک‌های جریان عبارتند از [۱۱]:

(۱) موج نیروی حاصل از اثر متقابل بین توزیع غیریکنواخت فاصله هوایی و هارمونیک فضایی MMF حاصل از هارمونیک جریان که به دلیل توزیع سیم‌پیچی ایجاد می‌شود. فرکانس نیرو شعاعی ایجاد شده و مرتبه آن بصورت زیر است.

$$f_r = \begin{cases} |\pm f_k - f| \\ f_k \pm f \left[ 1 + k \frac{s_2}{p} \right] \end{cases} \quad r = 0, 2 \quad (۳۷-۴)$$

$f_k$  فرکانس هارمونیک  $k$  ام جریان استاتور است. دامنه این دسته از نیروها که به دلیل توزیع غیر سینوسی سیم‌پیچی استاتور ایجاد می‌شوند، با افزایش بار موتور بیشتر می‌شود.

(۱) موج نیروی حاصل از اثر متقابل بین هارمونیک حاصل از سوئیچینگ و سایر هارمونیک‌های

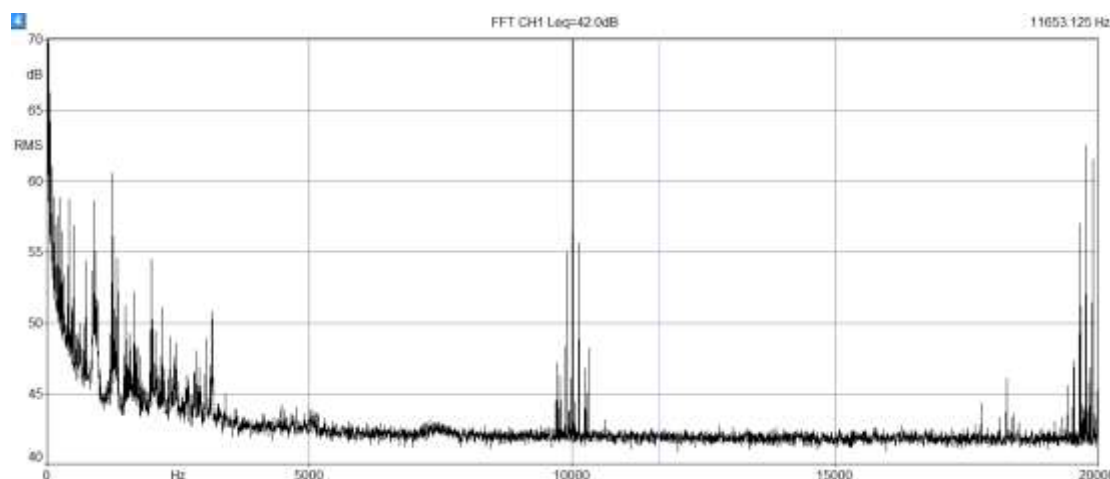
جریان استاتور

$$f_r = |\pm f_n - f| \quad (۳۸-۴)$$

$$f_n = |n_1 f_{sw} + n_2 f| \quad (۳۹-۴)$$

$f_{sw}$  فرکانس کلیدزنی درایو است.  $n_1$  و  $n_2$  اعداد صحیح هستند بطوریکه حاصل  $n_1 + n_2$  یک عدد فرد است. همان‌طور که در شکل (۴-۷)، (طیف رنگی حاصل از اندازه‌گیری فشار صوت منتشر شده از موتور

سنکرون مورد آزمایش در صورت استفاده درایو با فرکانس کلیدزنی ۱۰ kHz مشاهده می‌شود. فرکانس‌های نویز صوتی حاصل از هارمونیک‌های فضایی چگالی شار فاصله هوایی در بازه صفر تا حدود ۱۰ kHz می‌باشند. در صورتی که فرکانس نویز صوتی حاصل از هارمونیک‌های جریان استاتور و درایو در بازه محدودی در اطراف فرکانس کلیدزنی درایو و ضرایب صحیحی از آن پراکنده شده است.



شکل (۴-۷): طیف فرکانسی فشار صوت در فاصله ۲۰ cm از موتور مورد بررسی در رژیم عملکرد آسنکرون و بصورت بی‌بار و با استفاده درایو فرکانس متغیر ( $V_i=380\text{ V}$ )

با کاهش فرکانس سوئیچینگ درایو، فرکانس نویز حاصل از آن با فرکانس نویز حاصل از سایر منابع نویز تلاقی خواهد کرد که این موضوع باعث افزایش میزان نویز صوتی خواهد شد. از طرف دیگر با کاهش فرکانس سوئیچینگ درایو تعداد ضرایب فرکانس سوئیچینگ که در بازه صفر تا kHz ۲۰ (محدوده شنوایی گوش انسان) قرار می‌گیرند افزایش می‌یابد و در نتیجه میزان نویز صوتی حاصل از آن افزایش می‌یابد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فرکانس سوئیچینگ درایو، نویز صوتی منتشر شده از موتور کاهش خواهد یافت بطوریکه با انتخاب فرکانس سوئیچینگ بیشتر از kHz ۲۰ می‌توان نویز صوتی حاصل از درایو را به صفر رساند.

---

# فصل ۵: اندازه‌گیری و تحلیل نویز صوتی موتور

## سنکرون در شرایط عملکردی مختلف

---

### ۵-۱- مقدمه

در بخش‌های قبل تأثیر پارامترهای ابعادی و ساختاری بر نویز صوتی منتشرشده از ماشین‌های سنکرون و القایی بررسی شد. روش‌های تحلیل و پیش‌بینی نویز صوتی منتشرشده از ماشین‌های الکتریکی معرفی شد و همچنین نقاط ضعف و قوت آن‌ها بیان شد. در ادامه روابط تحلیلی برای استخراج فرکانس‌های نویز صوتی ارائه شد و با اندازه‌گیری عملی نویز صوتی منتشرشده از موتور مورد بررسی در دو رژیم سنکرون و القایی، با ساختار مکانیکی کاملاً یکسان تأثیر شرایط عملکردی و همچنین رژیم عملکردی بر مشخصه‌های صوتی به‌طور اجمالی بررسی شد.

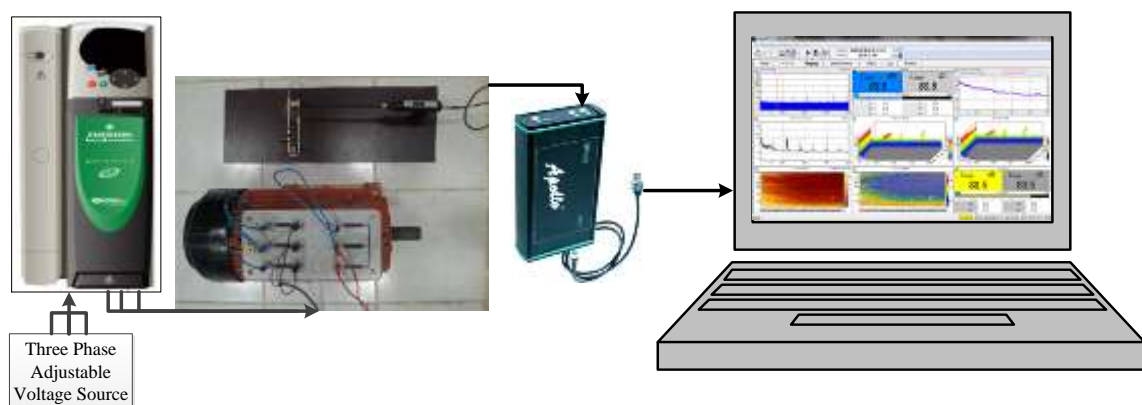
همان‌طور که در فصل ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، عوامل مختلفی در ایجاد نویز صوتی مؤثر هستند. از جمله این عوامل می‌توان بلبرینگ، نامتعادلی شفت روتور، فلوی جریان هوای خنک‌کننده ماشین، چرخش پره‌های فن، نامتعادلی ولتاژ تغذیه، ناهم‌محوری استاتیک، ناهم‌محوری دینامیک، اثر شیار روتور و استاتور، هارمونیک‌های فضایی چگالی شار استاتور، هارمونیک‌های چگالی شار روتور، اثر متقابل بین هارمونیک‌های فضایی روتور و استاتور، اشباع، هارمونیک‌های جریان ورودی و همچنین اینورتر را نام برد. هرکدام از این منابع یک یا چند فرکانس در نویز صوتی ایجاد می‌کنند. بنابراین برای بررسی اثر شرایط عملکردی بر منابع نویز صوتی باید ابتدا منابع هرکدام از فرکانس‌های موجود در طیف فرکانسی فشار صوت منتشر شده از موتور مورد بررسی تعیین گردد. به‌عنوان مثال برای بررسی

اثر جریان استاتور بر میزان نویز صوتی حاصل از ناهم‌محوری باید ابتدا مشخص گردد که کدام یک از فرکانس‌های موجود در طیف فرکانسی فشار صوت، مربوط به ناهم‌محوری هستند و سپس با تغییر جریان استاتور و اندازه‌گیری همزمان فشار صوت، تأثیر جریان استاتور بر نویز حاصل از ناهم‌محوری بررسی شود. که این موضوع هدف اصلی این فصل است. همان‌طور که اشاره شد موتور مورد بررسی در این آزمایش یک موتور القایی می‌باشد که می‌توان با اتصال صحیح سیم‌پیچی روتور به یک منبع تغذیه DC از آن به‌عنوان موتور سنکرون استفاده کرد.

## ۵-۲- انجام آزمایش عملی و استخراج نتایج اولیه

اندازه‌گیری‌های انجام شده در این بخش در سه مود سرعت متغیر، جریان تحریک متغیر و ولتاژ ترمینال متغیر انجام می‌شود. بنابراین باید سیستم تست قادر به انجام این آزمایشات باشد.

## ۵-۲-۱- معرفی سیستم اندازه‌گیری و تجهیزات مورد نیاز برای انجام آزمایش



شکل (۵-۱): تجهیزات مورد نیاز برای انجام آزمایش



همان‌طور که در شکل (۵-۱) نشان داده شده است، سیستم اندازه‌گیری برای انجام آزمایش و استخراج نتایج موردنیاز برای دستیابی به اهداف این تحقیق، شامل تجهیزات زیر است:

۱- یک موتور روتور سیم‌پیچی شده با قطب‌های روتور صاف و مشخصات نامی ارائه شده در جدول (۵-۱). موتور مورد آزمایش در واقع یک موتور القایی روتور سیم‌پیچی شده می‌باشد که سیم‌پیچی‌های روتور با اتصال ستاره به یکدیگر متصل شده و سه سر خروجی آن توسط حلقه‌های لغزان قابل‌دسترسی است. همان‌طور که در فصل چهار نیز اشاره شد اگر سیم‌پیچی‌های روتور با اتصال خاصی بصورت جدول (۵-۱) توسط منبع تغذیه DC تغذیه شوند می‌توان از این موتور در رژیم عملکردی سنکرون نیز استفاده کرد.

۲- منبع ولتاژ سه فاز قابل تنظیم، سینوسی و بدون هارمونیک بطوریکه قادر به ایجاد حداکثر دامنه ولتاژ ۴۵۰ ولت باشد

جدول (۵-۱): پارامترهای نامی موتور روتور سیم‌پیچی شده قطب صاف

پارامتر	مقدار	نماد	واحد
مدل	Siemens	-	-
توان خروجی	6.3	P	kW
تعداد فاز	3	$m$	-
ولتاژ نامی (ولتاژ خط)	360	$V_T$	V
نوع اتصال	Y	-	-
فرکانس نامی	50	$f_n$	Hz
تعداد جفت قطب	2	$p$	-
تعداد شیار استاتور	36	$s_1$	-
تعداد شیار روتور	48	$s_2$	-
بلبرینگ	Ball Bearing 6208-C3	-	-
تعداد توپی‌های بلبرینگ	9	$N_b$	-
تعداد پره‌های فن	10	$N_{bl}$	-

۳- یک ژنراتور DC کوپل شده با یک موتور القایی برای تأمین جریان DC موردنیاز برای تغذیه سیم‌پیچ تحریک موتور سنکرون. ژنراتور DC باید در یک محیط کامل ایزوله از لحاظ صوتی قرار

داده شود تا اینکه صوت حاصل از آن تأثیری بر روی نتایج اندازه‌گیری صوت موتور مورد آزمایش نداشته باشد. علاوه بر این باید قادر به حمل جریان ۱۵ آمپر در سیم‌پیچی‌های استاتور خود باشد.

۴- درایو فرکانس متغیر (VFD) با فرکانس سوئیچینگ 3 kHz. پارامترهای این درایو باید قابل تنظیم بوده و نرخ افزایش فرکانس در مود VVVF قابلیت کاهش تا مقدار 0.5 Hz را داشته باشد.

۵- میکروفن اندازه‌گیری، با قابلیت اندازه‌گیری صوت منتشرشده از ماشین‌های الکتریکی. این میکروفن بر روی یک پروب اندازه‌گیری شدت صوت نصب‌شده و محصول شرکت SINUS Messtechnik GmbH, Leipzig می‌باشد.

۶- ماژول رابط بین میکروفن و کامپیوتر ApolloTM محصول شرکت SINUS Messtechnik GmbH. این ماژول در حقیقت یک مبدل آنالوگ به دیجیتال است که از سیگنال خروجی میکروفن نمونه‌برداری کرده و پردازش می‌کند و نتایج حاصل را از طریق پورت USB به کامپیوتر منتقل می‌کند.

۷- یک کامپیوتر به همراه نرم‌افزار مورد استفاده برای کالیبره کردن میکروفن، همچنین جمع‌آوری و پردازش اولیه داده‌های صوتی (SAMURAI) (با در نظر گرفتن میزان حساسیت میکروفن‌های اندازه‌گیری) و همچنین نرم‌افزار MATLAB برای پردازش‌های مور نیاز خارج از توانایی‌های نرم‌افزار SAMURAI

۸- کالیبراتور فشار صوت برای کالیبره کردن میکروفن و تعیین حساسیت میکروفن با در نظر گرفتن شرایط محیطی مانند دمای هوا، و فشار هوا

۹- سنسورهای اثر هال برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان و همچنین اسیلوسکوپ با نرخ نمونه‌برداری بالا با قابلیت نمایش طیف فرکانسی، برای نمایش و ذخیره اطلاعات ولتاژ و جریان

## ۵-۲-۲- آزمایش در مود سرعت متغیر<sup>۱</sup>

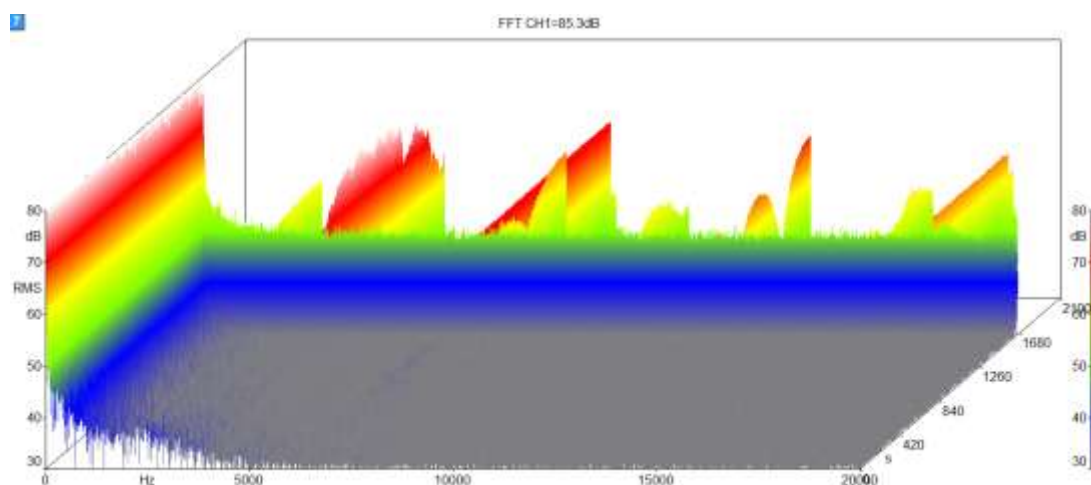
ابتدا یک ژنراتور DC با یک موتور القایی قفس سنجابی کوپل شده و موتور القایی توسط درایو فرکانس متغیر شماره ۱ تغذیه می‌شود. سپس سیم‌پیچی تحریک موتور سنکرون مورد آزمایش بصورت نشان داده شده در جدول (۴-۱) به ترمینال خروجی ژنراتور DC متصل می‌شود. از این طریق، جریان تحریک موتور سنکرون توسط ژنراتور DC تأمین می‌شود و سیم‌پیچی استاتور موتور سنکرون به خروجی درایو فرکانس متغیر شماره ۲ متصل می‌شود. درعین حال جریان تحریک، جریان استاتور و ولتاژ ترمینال موتور سنکرون با نرخ نمونه‌برداری بالا (5 GHz) نمونه‌برداری شده و بر روی اسیکوسکوپ نمایش داده می‌شود. سرعت موتور قفس‌سنجابی توسط درایو فرکانس متغیر شماره ۱ افزایش داده می‌شود (بنابراین سرعت ژنراتور DC و ولتاژ خروجی آن افزایش پیدا می‌کند در نتیجه جریان تحریک موتور سنکرون افزایش پیدا می‌کند) تا جایی که جریان تحریک موتور سنکرون برابر با ۸ آمپر شود (هنگامی که سیم‌پیچی استاتور موتور سنکرون مورد آزمایش با ولتاژ ۲۳۰ ولت و فرکانس ۵۰ هرتز تغذیه شود، در صورت تغذیه سیم‌پیچی تحریک آن با جریان ۸ آمپر، ضریب توان موتور برابر با یک خواهد بود).

حال سیم‌پیچی‌های استاتور توسط VFD تغذیه می‌شوند و سرعت موتور سنکرون شروع به افزایش می‌کند. VFD به‌گونه‌ای تنظیم می‌شود که فرکانس خروجی آن بسیار آهسته و با نرخ Hz/s ۰/۰۵ از صفر تا ۱۶۰٪ فرکانس نامی (۸۰ هرتز) بصورت خطی با زمان افزایش پیدا می‌کند. به‌عبارت‌دیگر، کل زمان شتاب‌گیری موتور و در نتیجه زمان آزمایش ۱۶۰۰ ثانیه خواهد بود. با توجه به سرعت بسیار پایین شتاب‌گیری موتور، در هر لحظه از زمان شتاب‌گیری می‌توان با تقریب خوبی نرخ تغییرات همه پارامترهای عملکردی ماشین را برابر با صفر در نظر گرفت و عملکرد موتور را با عملکرد حالت دائمی برابر دانست. فرکانس بیشینه برای تغذیه موتور سنکرون به‌گونه‌ای انتخاب شده است که

1 - Variable Speed Mode

موتور موردنظر از لحاظ مکانیکی دچار آسیب نشود. در طول زمان شتاب‌گیری موتور سنکرون، فشار صوت در فاصله ۲۰ cm از آن و با موقعیت نشان داده شده در شکل (۵-۱) اندازه‌گیری می‌شود. نرخ نمونه‌برداری از سیگنال فشار صوت خروجی از میکروفن ۱۰۲ kHz می‌باشد. بنابراین می‌توان فشار صوت در بازه صفر تا ۴۰ kHz قابل‌اندازه‌گیری می‌باشد.

سیگنال زمانی فشار صوت در طول ۱۶۰۰ ثانیه در اختیار خواهد بود که شامل حجم عظیمی از اطلاعات می‌باشد. حال می‌توان با در نظر گرفتن پنجره‌های کوچکی (با بازه‌های زمانی کوتاه ۰/۲۵ ثانیه) بر روی سیگنال خروجی، طیف فرکانسی قسمتی از سیگنال فشار صوت را که در داخل پنجره قرار دارد با استفاده از تکنیک‌های تبدیل فوریه سریع محاسبه کرد. بنابراین طیف فرکانسی فشار صوت به ازای تمام سرعت‌های موتور سنکرون در دسترس خواهد بود. حال اگر با افزایش سرعت، تمام طیف‌های حاصل‌شده کنار هم چیده شوند، گراف سه‌بعدی نشان داده شده در شکل (۵-۲) ایجاد خواهد شد.



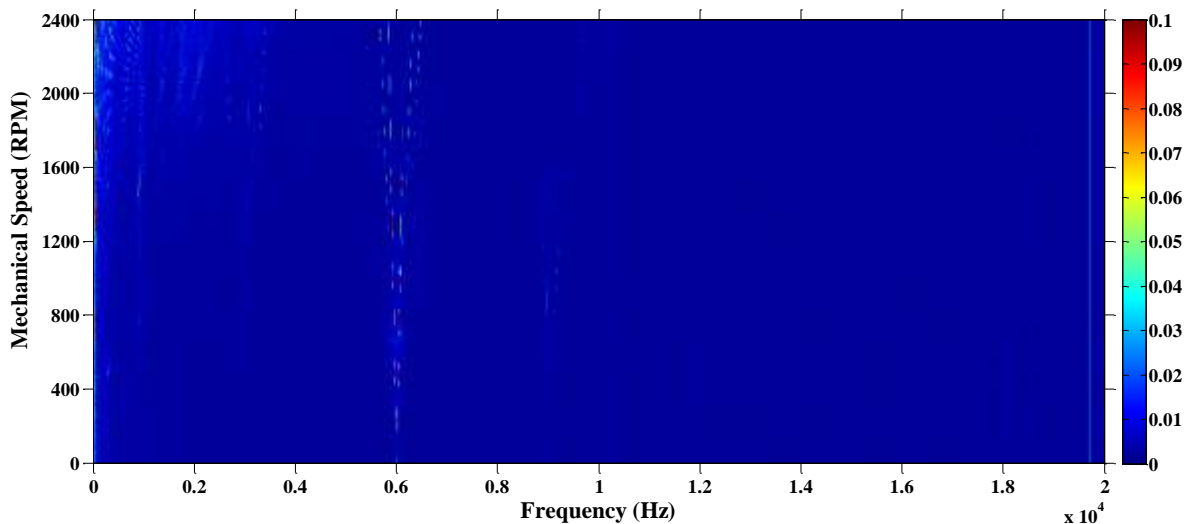
شکل (۵-۲): طیف فرکانسی سه بعدی

گراف نشان داده شده در شکل (۵-۲) را می‌توان بدون از دست رفتن اطلاعات بصورت طیف رنگی سه‌بعدی نشان داده شده در شکل (۵-۳) نشان داد. این طیف، تحت عنوان طیف رنگی سه‌بعدی سرعت<sup>۱</sup> نام‌گذاری می‌شود. همان‌طور که پیش‌از این اشاره شد، فشار صوت در بازه صفر تا ۴۰ kHz

1 - 3D- color map of speed

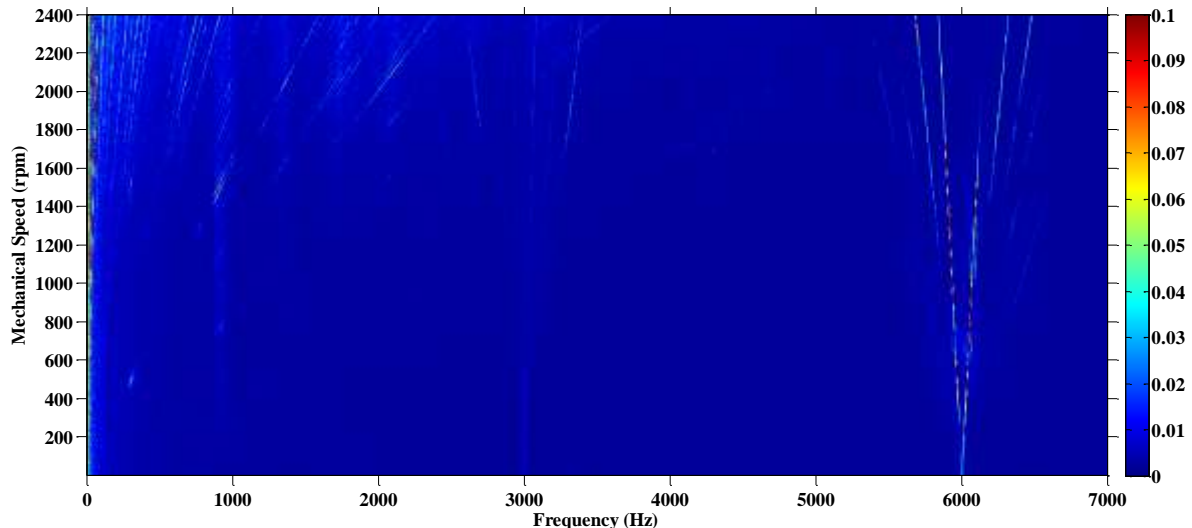
بصورت دقیق قابل‌اندازه‌گیری است. با توجه به اینکه گوش انسان قادر به شنیدن فرکانس‌های بیشتر از ۲۰ kHz نیست برای کاهش حجم اطلاعات و حجم پردازش‌هایی که در مراحل بعدی معرفی خواهند شد، این اطلاعات تنها در بازه صفر تا ۲۰ kHz ذخیره‌شده و پردازش خواهند شد.

در شکل (۳-۵) محور عمودی نشان‌دهنده سرعت مکانیکی روتور، محور افقی نشان‌دهنده فرکانس طیف فشار صوت و رنگ صفحه نیز نشان‌دهنده دامنه فشار صوت می‌باشد. فرکانس‌های غالب در طیف فشار صوت بصورت نقاطی با رنگ روشن در طیف رنگی ظاهر شده‌اند.



شکل (۳-۵): طیف رنگی سه‌بعدی در مود سرعت متغیر

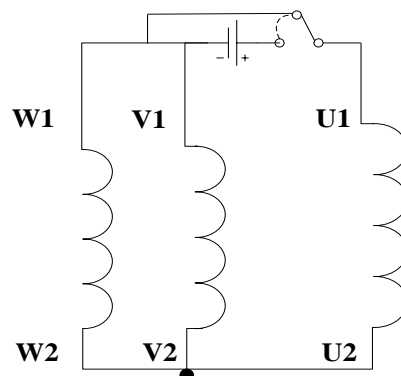
روابط ارائه شده در فصل ۳ و ۴ برای فرکانس نویز صوتی حاصل از منابع مختلف نشان می‌دهند که فرکانس‌های غالب در فشار صوت وابسته به سرعت مکانیکی موتور هستند. بنابراین با افزایش سرعت موتور نقاط پیک موجود در طیف فرکانسی فشار صوت جابجا خواهند شد. روابط تحلیلی ارائه شده نشان می‌دهند که فرکانس نویز صوتی منابع مختلف تابع خطی از سرعت مکانیکی موتور هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود مکان هندسی نقاط پیک طیف فرکانسی بصورت خطوط مورب در طیف رنگی سرعت ظاهر شده‌اند. برای وضوح بیشتر خطوط مورب موجود در طیف رنگی سرعت، بزرگنمایی قسمتی از آن در شکل (۴-۵) نشان داده شده است.



شکل (۴-۵): طیف رنگی سرعت و خطوط مورب موجود در آن

### ۵-۲-۳- آزمایش در مود تحریک متغیر<sup>۱</sup>

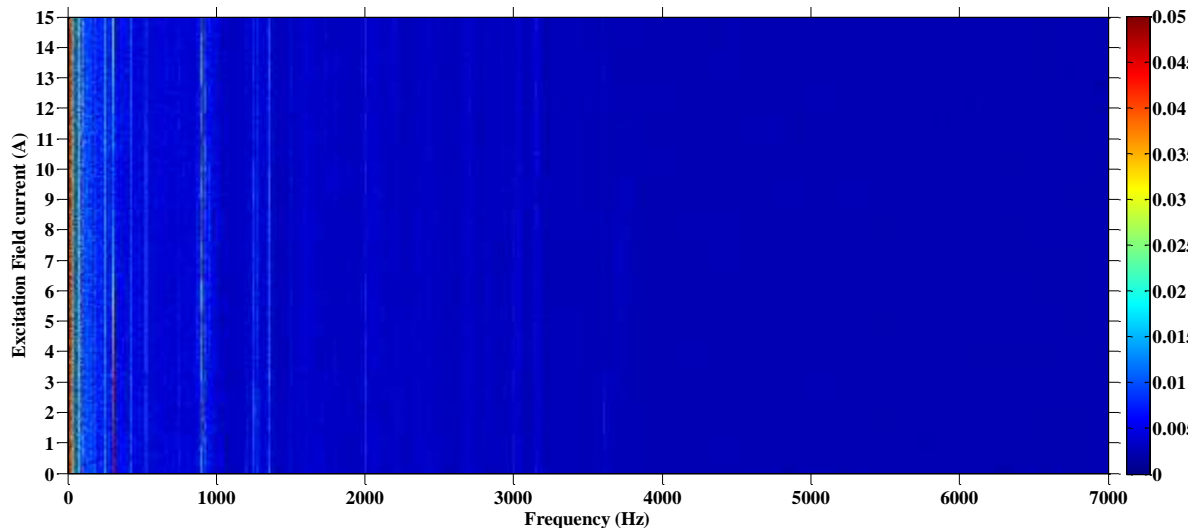
در این آزمایش ابتدا سیم‌پیچی‌های روتور با استفاده از مدار نشان داده شده در شکل (۵-۵) اتصال کوتاه می‌شوند. سیم‌پیچی‌های استاتور با ولتاژ ۲۳۰ ولت و ۵۰ هرتز، تغذیه شده و موتور مورد بررسی بصورت القایی راه‌اندازی می‌شود و به سرعت نامی خود می‌رسد. حال کلید قرار داده شده در مدار عمل کرده و منبع تغذیه DC، سیم‌پیچی‌های روتور را بصورت نشان داده شده در شکل (۵-۵) تغذیه می‌کند. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، منبع تغذیه DC در واقع یک ژنراتور DC می‌باشد. همان‌طور که در فصل ۴ اشاره شد، در این حالت موتور مورد بررسی بصورت موتور سنکرون عمل خواهد کرد.



شکل (۵-۵): مدار سیم‌پیچی‌های روتور مورد بررسی با هدف استفاده از آن به‌عنوان موتور سنکرون

ژنراتور DC با یک موتور القایی قفس سنجابی (در یک اتاق ایزوله) کوپل شده است و موتور القایی قفس سنجابی توسط VFD تغذیه می‌شود. سرعت موتور القایی و در نتیجه ولتاژ خروجی ژنراتور DC و جریان تحریک موتور سنکرون را می‌توان با استفاده از VFD تغییر داد. VFD به گونه‌ای تنظیم می‌شود که با صرف زمان ۱۰۰۰ ثانیه جریان تحریک را بصورت خطی باز زمان افزایش داده و از صفر به ۱۵ آمپر برساند. همزمان با افزایش جریان تحریک، فشار صوت نیز اندازه‌گیری می‌شود. سرعت موتور مورد بررسی با استفاده از دورسنج نوری اندازه‌گیری شده و مشاهده می‌شود که در ابتدا موتور بررسی همچنان بصورت القایی عمل می‌کند و بعد از صرف حدود ۴۰ ثانیه جریان تحریک به مقداری می‌رسد که موتور مورد بررسی بتواند در رژیم سنکرون عمل کند (۰/۶ آمپر). موتور سنکرون در ابتدا پس‌فاز بوده و جریان استاتور زیاد است هنگامی که جریان استاتور به ۸ آمپر می‌رسد ضریب توان برابر با یک شده و جریان استاتور کمینه می‌شود. با افزایش جریان تحریک از ۸ آمپر تا ۱۵ آمپر، ضریب توان کم شده و موتور سنکرون پیش‌فاز خواهد شد.

طیف رنگی حاصل از این آزمایش در شکل (۵-۶) نشان داده شده است که محور عمودی همانند طیف رنگی سرعت، نشان‌دهنده فرکانس نویز و محور عمودی نشان‌دهنده جریان تحریک می‌باشد. همان‌طور که گفته شد، فرکانس نویز حاصل از منابع مختلف، به سرعت مکانیکی موتور وابسته است و به جریان تحریک وابسته نیست. بنابراین در این آزمایش (که سرعت مکانیکی موتور سنکرون مورد بررسی ثابت است) با افزایش جریان تحریک، فرکانس‌های غالب در فشار صوت تغییر نخواهند کرد و تنها دامنه آن‌ها ممکن است تغییر کند. بنابراین مکان هندسی فرکانس‌های غالب در طیف فشار صوت بصورت خطوط عمودی در طیف رنگی تحریک ظاهر خواهند شد که نتیجه حاصل از آزمایش نیز این موضوع را نشان می‌دهد.



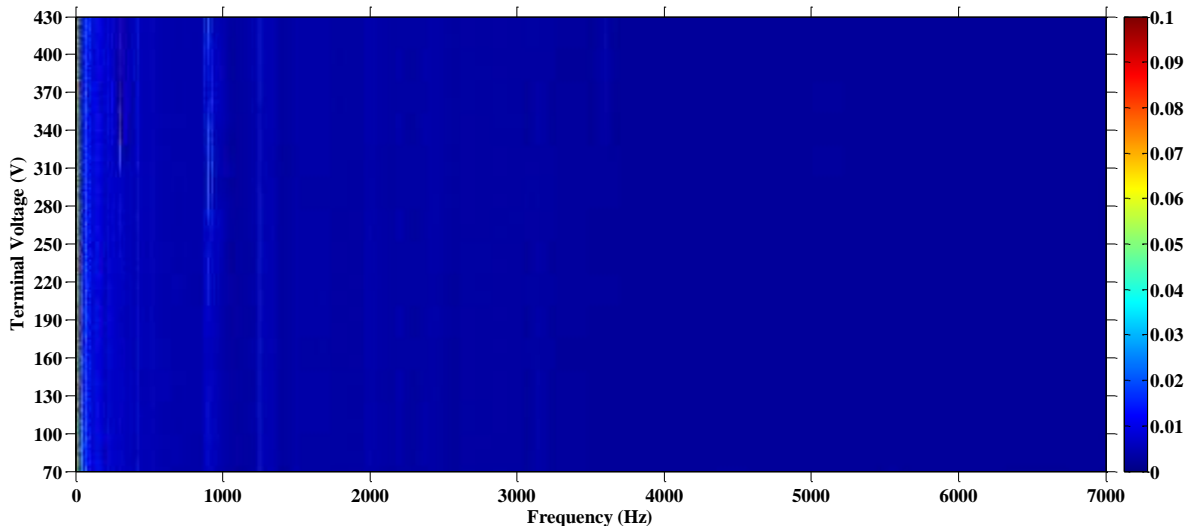
شکل (۵-۶): طیف رنگی در مود تحریک متغیر

### ۵-۲-۴- آزمایش در مود ولتاژ متغیر<sup>۱</sup>

این آزمایش شباهت زیادی به آزمایش تحریک متغیر دارد. با این تفاوت که در این آزمایش، جریان تحریک ثابت بوده و ولتاژ ترمینال ماشین سنکرون متغیر است. روند انجام آزمایش به این صورت است که ابتدا جریان تحریک ۸ آمپر توسط ژنراتور DC به سیم‌پیچی‌های روتور اعمال می‌شود. سپس مطابق با روش ارائه شده در آزمایش تحریک متغیر، موتور مورد بررسی بدون استفاده از درایو بصورت سنکرون راه‌اندازی شده و به سرعت سنکرون می‌رسد. در این شرایط درحالی‌که فرکانس ولتاژ ترمینال ثابت است، دامنه ولتاژ بصورت خطی با زمان از ۷۰ تا ۴۳۰ ولت افزایش پیدا می‌کند. و همزمان با افزایش ولتاژ ترمینال، فشار صوت نیز اندازه‌گیری می‌شود. شکل (۵-۷) طیف فرکانسی فشار صوت را با تغییرات ولتاژ ترمینال نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مکان هندسی فرکانس‌های غالب در ایجاد نویز صوتی در این مود، بصورت خطوط عمودی در طیف رنگی ظاهر می‌شوند. با حرکت بر روی هر کدام از خطوط ظاهر شده در طیف رنگی می‌توان تغییرات دامنه نویز ایجاد شده در هر فرکانس را مشاهده کرد.

1- Variable Voltage Mode

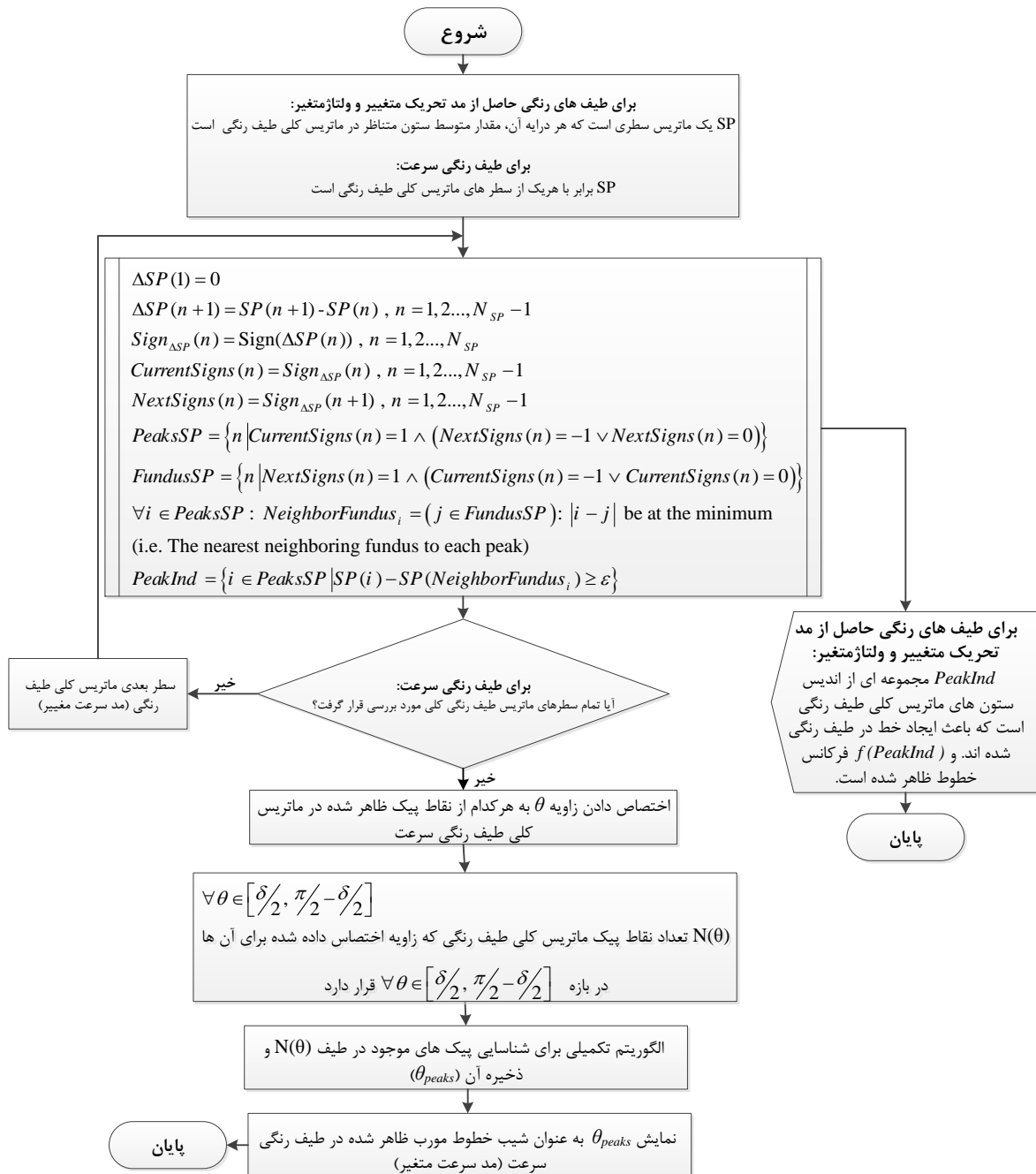




شکل (۵-۷): طیف رنگی در مود ولتاژ متغیر

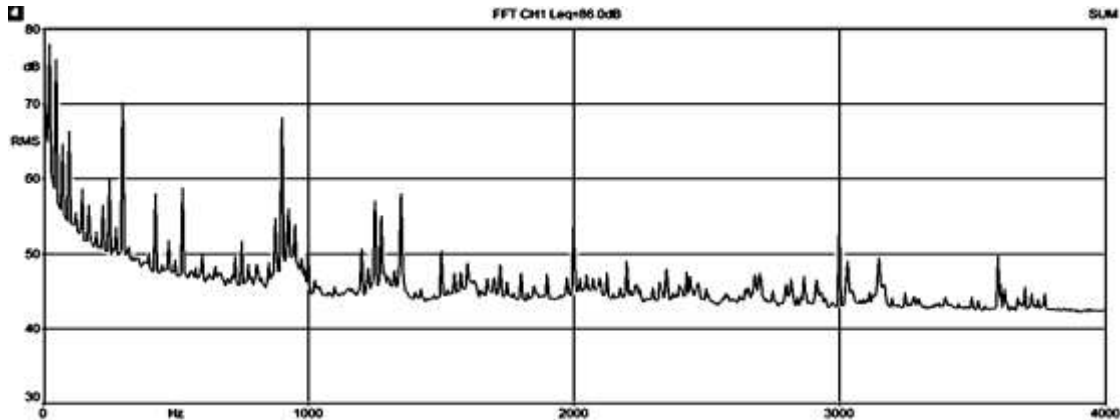
### ۵-۳- داده‌کاوی و استخراج اطلاعات موجود در طیف رنگی

همان‌طور که مشاهده می‌شود مکان هندسی فرکانس‌های غالب در فشار صوت بصورت خطوط مورب در طیف رنگی سرعت و بصورت خطوط عمودی در طیف رنگی تحریک و ولتاژ ظاهر شده‌اند. در این مرحله داده‌های حاصل از اندازه‌گیری در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار MATLAB پردازش می‌شوند و معادله خطوط ظاهر شده در طیف رنگی استخراج می‌شود. حال می‌توان با حرکت برو روی هر کدام از خطوط رفتار آن را با تغییر جریان تحریک، دامنه ولتاژ ترمینال و سرعت مکانیکی روتور مشاهده کرد. فلوجارت الگوریتم استخراج معادله خطوط، به همراه شبه کد الگوریتم کلی در شکل (۵-۸) نشان داده شده است. فلوجارت ارائه شده شامل دو روش برای استخراج معادله خطوط موجود در طیف‌های رنگی می‌باشد.



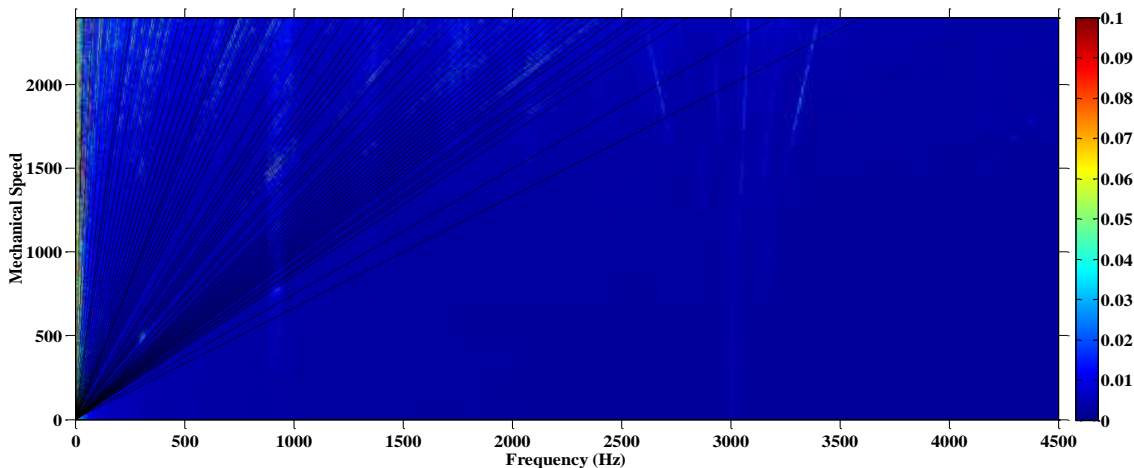
شکل (۵-۸): فلوجارت الگوریتم پردازش تصویر مورداستفاده برای استخراج معادله خطوط ظاهر شده در طیف رنگی طیف‌های رنگی ایجاد شده در آزمایش‌های سرعت متغییر، تحریک متغییر و ولتاژ ترمینال متغییر در واقع ماتریسی از اعداد با ابعاد تقریبی  $6400 \times 6670$  می‌باشد. به‌عنوان مثال طیف رنگی تحریک را در نظر بگیرید که در ماتریس مربوط به آن هر سطر از ماتریس در واقع طیف فرکانسی فشار صوت به ازای جریان تحریک متناظر با آن سطر می‌باشد. همان‌طور که در طیف رنگی تحریک مشاهده می‌شود، فرکانس نقاط پیک موجود در طیف فرکانسی سرعت با افزایش جریان تحریک ثابت بوده و دامنه آن

متغیر است. برای تشخیص خطوط عمودی، ابتدا تمام سطرهای ماتریس با یکدیگر جمع شده و نتیجه حاصل بصورت شکل (۹-۵) خواهد بود. حال با استفاده از الگوریتم ارائه شده در شکل (۸-۵) (شبه کد اصلی) نقاط پیک، و در نتیجه معادله خطوط عمودی تشخیص داده می‌شود.



شکل (۹-۵): طیف فرکانسی متوسط فشار صوت در طول آزمایش تحریک متغیر

اما برای تشخیص خطوط مورب موجود در طیف رنگی سرعت، باید ابتدا نقاط پیک در هر کدام از سطرهای ماتریس مربوط به آن تشخیص داده شود. سپس مختصات نقاط پیک از محیط دکارتی به محیط قطبی تبدیل شود. این عمل برای تمام سطرها انجام شده و ماتریسی مشابه با ماتریس مربوط به طیف رنگی تحریک ایجاد می‌شود. سپس با الگوریتم مشابه با الگوریتم ارائه شده برای تشخیص خطوط عمودی در طیف رنگی تحریک، معادله خطوط مورب موجود در طیف رنگی سرعت تشخیص داده می‌شود، شکل (۱۰-۵).



شکل (۱۰-۵): خطوط مورب تشخیص داده شده توسط الگوریتم پردازش تصویر

## ۵-۴- استخراج فرکانس‌های طبیعی ارتعاش ساختار مکانیکی

با توجه به روابط ارائه شده در فصل ۴ برای فرکانس نیروهای حاصل از هارمونیک فضایی چگالی شار فاصله هوایی ناشی از مؤلفه اصلی جریان استاتور و جریان تحریک روتور، مشاهده می‌شود که فرکانس نیروهای شعاعی وارد بر استاتور ضرایب صحیحی از سرعت مکانیکی روتور هستند. منابع مختلف ایجاد نویز صوتی در جدول (۵-۲) دسته‌بندی و نام‌گذاری شده‌اند و همچنین معادله فرکانس حاصل از هر کدام از منابع به همراه مرتبه نیروی هر کدام ارائه شده است. بنابراین می‌توان فرکانس‌های نیروی حاصل از هارمونیک‌های فضایی چگالی شار فاصله هوایی را بصورت (۵-۱) نوشت.

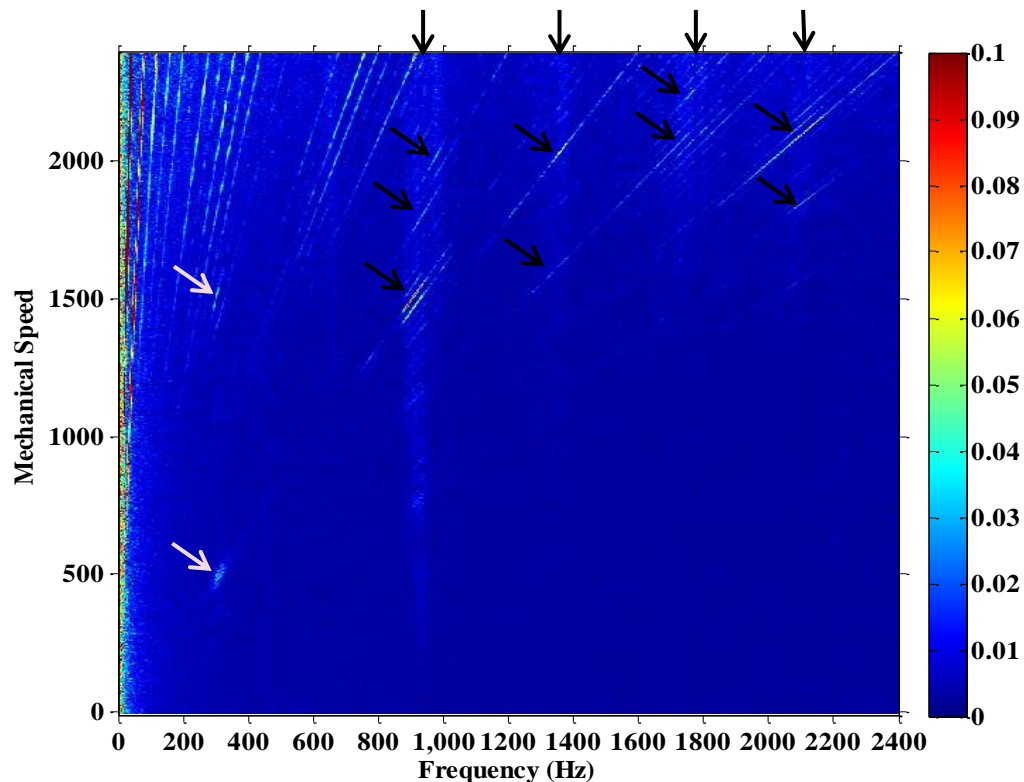
$$f_r = Kn \quad , K \in \left\{ \begin{array}{l} (p/30), (p/60)(ks_2/p \pm 2), (p/30)(1 \pm ks_2/p), \\ (p/60)(ks_2/p), (p/60)(2 \pm 1/p + ks_2/p) \\ (p/60)(1/p + ks_2/p), (p/60)(ks_2/p + 4) \end{array} \right\} \quad k \in N \quad (5-1)$$

جدول (۵-۲): فرکانس و مرتبه نویز الکترومغناطیسی محتمل

مرتبۀ نیروی شعاعی ( $k=0, 1, 2, \dots$ )	فرکانس نیروی شعاعی ( $k=0, 1, 2, \dots$ )	منابع نویز		شماره منبع
$r=2(2km_1 \pm 1)p$	$f_r=(p/30)n$	عمومی	هارمونیک‌های فضایی چگالی شار استاتور	۱
$r=2(ks_1 \pm p)$	$f_r=(p/30)n$	برجسته		
$r=2(6k \pm 1)p$	$f_r=(p/30)(1 \pm 6k)n$	عمومی	هارمونیک‌های فضایی چگالی شار روتور	۲
$r=2(ks_2 \pm p)$	$f_r=(p/30)(1 \pm ks_2/p)n$	برجسته		
$r=(2km_1 \pm 6k \pm 2)p$	$f_r=(p/60)(6k \pm 2)n$ $f_r=(p/60)(6k)n$	عمومی	اثر متقابل بین هارمونیک‌های استاتور و روتور	۳
$r=ks_1 \pm ks_2 \pm 2p$	$f_r=(p/60)(ks_2/p \pm 2)n$ $f_r=(p/60)(ks_2/p)n$	برجسته		
$r=1$ $r=2$	$f_r=(p/60)(6k \pm 2)n$ $f_r=(p/60)(6k)n$	عمومی	ناهم‌محوری استاتیک روتور و استاتور	۴
	$f_r=(p/60)(ks_2/p \pm 2)n$ $f_r=(p/60)(ks_2/p)n$	برجسته		
$r=1$ $r=2$	$f_r=(p/60)(2 \pm 1/p + 6k)n$ $f_r=(p/60)(1/p + 6k)n$	عمومی	ناهم‌محوری دینامیک	۵
	$f_r=(p/60)(2 \pm 1/p + ks_2/p)n$ $f_r=(p/60)(1/p + ks_2/p)n$	برجسته		
$r=(2km_1 + 6k + 4)p$ $r=(2km_1 - 6k + 2)p$	$f_r=(p/60)(6k + 4)n$ $f_r=(p/60)(6k + 2)n$	عمومی	اشباع مغناطیسی	۶
$r=ks_1 + ks_2 + 4p$ $r=ks_1 - ks_2 + 2p$	$f_r=(p/60)(ks_2/p + 4)n$ $f_r=(p/60)(ks_2/p + 2)n$	برجسته		

در روابط بالا  $n$  سرعت مکانیکی بر حسب  $RPM$ ،  $p$  تعداد جفت قطب،  $s_2$  تعداد شیارهای روتور،  $s_1$  تعداد شیارهای استاتور،  $f_r$  فرکانس نیروی شعاعی و  $r$  مرتبه آن می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فرکانس نیروهای شعاعی و در نتیجه فرکانس‌های موجود در طیف فشار صوت، با تغییر سرعت موتور بصورت خطی تغییر خواهند کرد که نتایج اندازه‌گیری مود سرعت متغیر نیز این حقیقت را نشان می‌دهد.

در شکل (۵-۱۱) مشاهده می‌شود که ۴ خط عمودی در فرکانس‌هایی حدود  $920\text{ Hz}$ ،  $1360\text{ Hz}$ ،  $1750\text{ Hz}$  و  $2120\text{ Hz}$  بصورت ذرات نمک فلفلی در طیف رنگی ایجاد شده‌اند به طوری که تعدادی از خطوط مورب در نقاط تلاقی با این خطوط رؤیت پذیر می‌شوند و بعد از عبور از این نقاط دوباره ناپدید می‌شوند. تعدادی از نقاط تلاقی خطوط مورب و خطوط عمودی در شکل (۵-۱۱) نشان داده شده است. با توجه به آنچه بیان شد، می‌توان این چهار فرکانس را به‌عنوان کاندید برای فرکانس طبیعی معرفی کرد. علاوه بر این چهار فرکانس یا همان چهار خط عمودی که به‌عنوان فرکانس طبیعی معرفی شده‌اند فرکانس دیگری (به‌عنوان مثال فرکانس  $310\text{ Hz}$ ) نیز وجود دارد که خط عمودی در طیف رنگی ایجاد نکرده است. با این حال در شکل (۵-۱۱) مشاهده می‌شود که تعدادی از خطوط مورب در لحظه عبور از این فرکانس، ظاهر شده‌اند و بعد از عبور از این فرکانس ناپدید شده‌اند. بنابراین فرکانس  $310\text{ Hz}$  نیز می‌تواند به‌عنوان کاندید برای فرکانس طبیعی در نظر گرفته شود. با توجه به آنچه تاکنون بیان شد، ۵ فرکانس به‌عنوان فرکانس طبیعی معرفی شدند با این وجود این فرکانس‌ها بصورت تقریبی تعیین شده‌اند و هنوز بصورت قطعی نمی‌توان آن‌ها را به‌عنوان فرکانس طبیعی معرفی کرد. برای تعیین دقیق فرکانس‌های طبیعی تحلیل دقیق‌تری در ادامه ارائه خواهد شد.



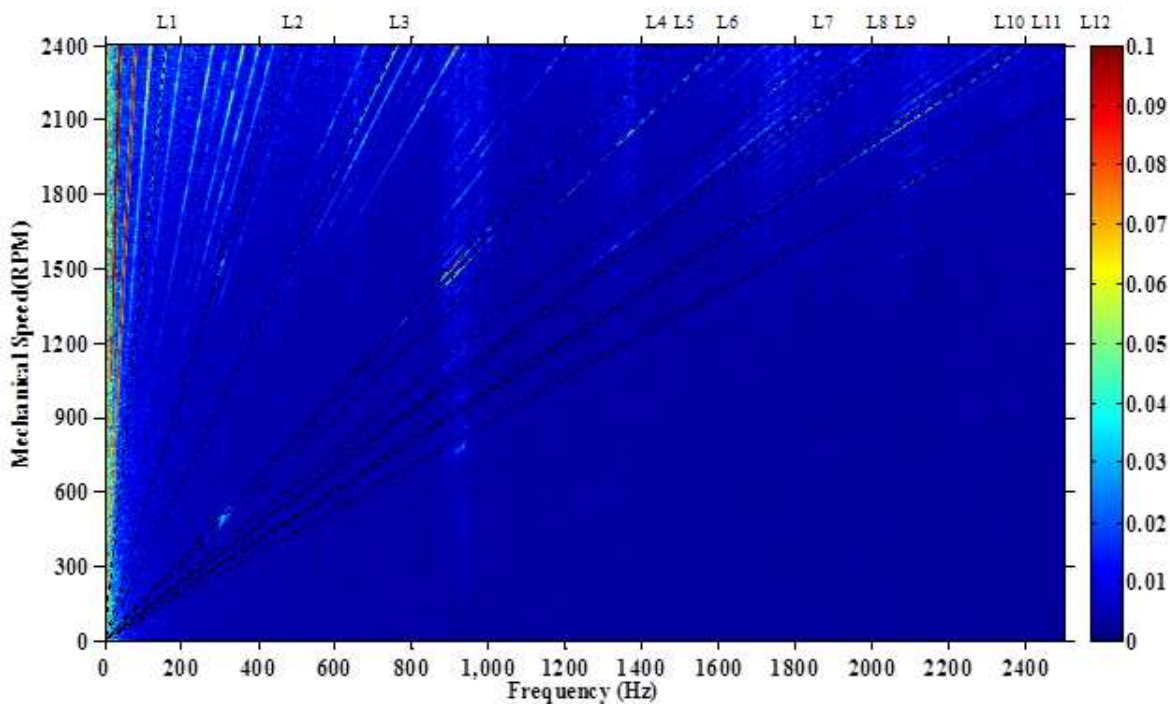
شکل (۵-۱۱): تعیین اولیه فرکانس‌های طبیعی

#### ۵-۴-۱- استخراج و تفکیک فرکانس‌های طبیعی با استفاده از پردازش تصویر

مطابق با آنچه در فصل ۳ بیان شده است منابع نویز صوتی منتشرشده از یک ماشین الکتریکی شار شعاعی را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد. دسته اول منابعی هستند که باعث ایجاد هارمونیک زمانی و یا فضایی در چگالی شار فاصله هوایی می‌شوند. این دسته از منابع نویز، با ایجاد نیروی‌های شعاعی باعث ارتعاش پوسته استاتور و در نتیجه ایجاد نویز صوتی می‌شوند. مانند هارمونیک‌های چگالی شار روتور و استاتور، ناهم‌محوری استاتور و روتور، اشباع. دسته دوم: منابعی هستند که بدون ایجاد ارتعاش در پوسته استاتور باعث ایجاد نویز صوتی می‌شوند. مانند منابع آیرودینامیکی، بلبرینگ‌ها و زغال‌ها.

عامل ایجاد هر کدام از خطوط مورب موجود در طیف رنگی، یکی از منابع نویز ذکر شده در جدول (۵-۲) و یا یکی از منابع مکانیکی یا آیرودینامیکی می‌باشد. با این وجود با مطالب بیان‌شده تاکنون

نمی‌توان منابع دقیق هرکدام از خطوط مورب را مشخص کرد. بنابراین ابتدا معادله تمام خطوط مورب موجود در طیف رنگی استخراج شده است که این الگوریتم تعداد ۱۳۲ خط مورب گذرنده از مبدأ را در طیف رنگی فشار صوت تشخیص داده است. تعدادی از این خطوط که نقش مهمی در تعیین فرکانس‌های طبیعی ایفا می‌کنند، در شکل (۵-۱۲) نشان داده شده‌اند. حال می‌توان با مقایسه خطوط تشخیص داده شده توسط الگوریتم پردازش تصویر با روابط تحلیلی ارائه شده در جدول (۵-۲) همچنین روابط ارائه شده برای فرکانس نویز صوتی ایجاد شده توسط منابع مکانیکی و آیرودینامیکی در فصل ۳ (معادلات (۳-۲) و (۳-۳))، برای هرکدام از خطوط ظاهر شده در طیف رنگی فشار صوت، یک یا چند منبع نویز را به‌عنوان منابع کاندید معرفی کرد. شیب هرکدام از این خطوط به همراه منابع کاندید برای آن در جدول (۵-۳) ارائه شده است.



شکل (۵-۱۲): خطوط تشخیص داده شده توسط الگوریتم پردازش تصویر

جدول (۳-۵): منابع کاندید برای هرکدام از خطوط و شیب آن‌ها

شماره خط	شیب خط (درجه)	منبع ایجادکننده خط	
		شماره منابع الکترومغناطیسی	منبع مکانیکی
L1	۸۶/۱۸۲	۳،۴،۵	*
L2	۷۶/۶۲۲	۳،۴	*
L3	۷۲/۴۲۵	-	*
L4	۵۹/۰۰۵	۳،۴	*
L5	۵۸/۳۲۳	۵	*
L6	۵۶/۲۷۵	۳،۴،۶	*
L7	۵۱/۹۲۹	-	*
L8	۴۹/۶۰۵	۵	*
L9	۴۹/۰،۶۲	۳،۴	*
L10	۴۵/۴۴۴	-	*
L11	۴۴/۹۷۶	۳،۴	*
L12	۴۱/۳۷۸	۳،۶	*

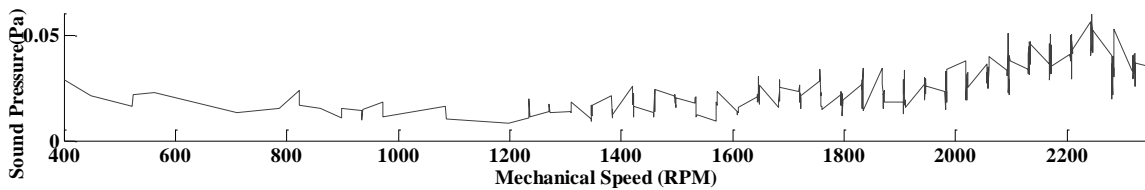
همان‌طور که در جدول (۳-۵) مشاهده می‌شود منابع مکانیکی به‌عنوان کاندید برای ایجاد تمام خطوط می‌باشند. حال می‌توان با حرکت بر روی هرکدام از خطوط ظاهر شده در طیف رنگی تغییرات دامنه فشار صوت را مشاهده کرد و با بررسی رفتار فشار صوت هرکدام از خطوط، با تغییرات سرعت مکانیکی موتور، خطوط ایجاد شده توسط منابع مکانیکی و یا آیرودینامیکی را از خطوط ایجاد شده توسط منابع الکترومغناطیسی تفکیک کرد.

همان‌طور که در شکل (۱۲-۵) مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت مکانیکی موتور، فشار صوت برو روی خط L1 افزایش می‌یابد و تغییر ناگهانی در فشار صوت مشاهده نمی‌شود. تغییرات فشار صوت بر روی خط L1 با افزایش سرعت مکانیکی موتور در شکل (۱۳-۵) نشان داده شده است. بنابراین منبع این خط از نوع مکانیکی است.

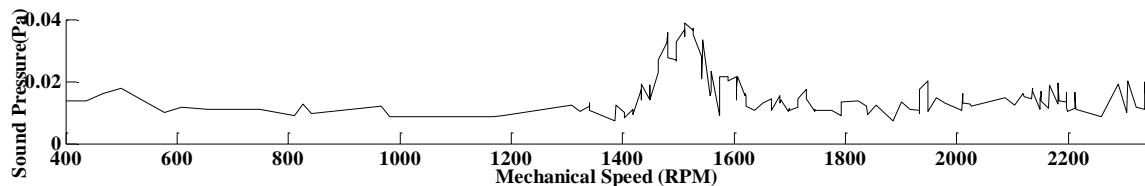
فرکانس هارمونیک صوت ایجاد شده توسط منبع خط L2 در سرعت ۱۵۰۰ RPM برابر با ۳۱۰ HZ است. همان‌طور که در شکل (۱۴-۵) مشاهده می‌شود. فشار این هارمونیک صوت در فرکانس



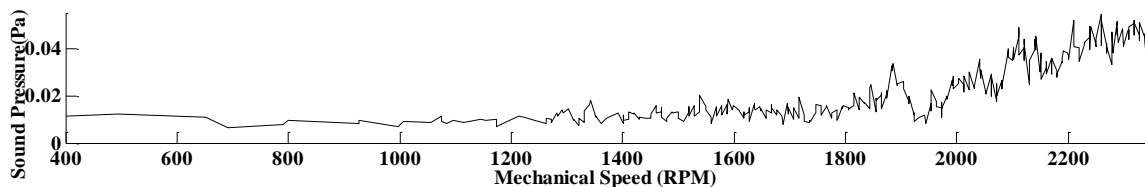
۳۱۰ Hz به‌طور ناگهانی افزایش یافته و بعد از عبور از این فرکانس کاهش یافته است به‌طوری‌که حتی در سرعت‌های بالاتر نیز اثری از این خط نیست. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این خط از یک منبع الکترومغناطیسی نشأت گرفته است و با ایجاد نیروی شعاعی در فرکانس ۳۱۰ Hz باعث تشدید ارتعاش پوسته استاتور شده است. خط L3 نیز رفتاری مشابه با خط L1 دارد و فشار صوت بر روی این خط مطابق با شکل (۵-۱۵) با افزایش سرعت مکانیکی ماشین افزایش می‌یابد.



شکل (۵-۱۳): تغییرات فشار صوت بر روی خط L1 با افزایش سرعت مکانیکی موتور



شکل (۵-۱۴): تغییرات فشار صوت بر روی خط L2 با افزایش سرعت مکانیکی موتور



شکل (۵-۱۵): تغییرات فشار صوت بر روی خط L2 با افزایش سرعت مکانیکی موتور

خطوط L4, L5, L6, L10, L11, L12 نیز رفتاری مشابه با خط L2 دارند. بطوریکه افزایش سرعت مکانیکی موتور تأثیری بر میزان فشار صوت ندارد. تنها عامل افزایش فشار صوت برو روی این خطوط، تلاقی آن‌ها با فرکانس طبیعی پوسته استاتور است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که منابع الکترومغناطیسی باعث ایجاد این خطوط شده‌اند. فرکانس طبیعی تحریک‌شده توسط این خطوط در جدول (۴-۵) ارائه شده است. بنابراین، فرکانس‌های  $f_{res} \{ 2120 \text{ Hz}, 1360 \text{ Hz}, 920 \text{ Hz}, 310 \text{ Hz} \}$  فرکانس‌های طبیعی ارتعاش پوسته استاتور هستند.

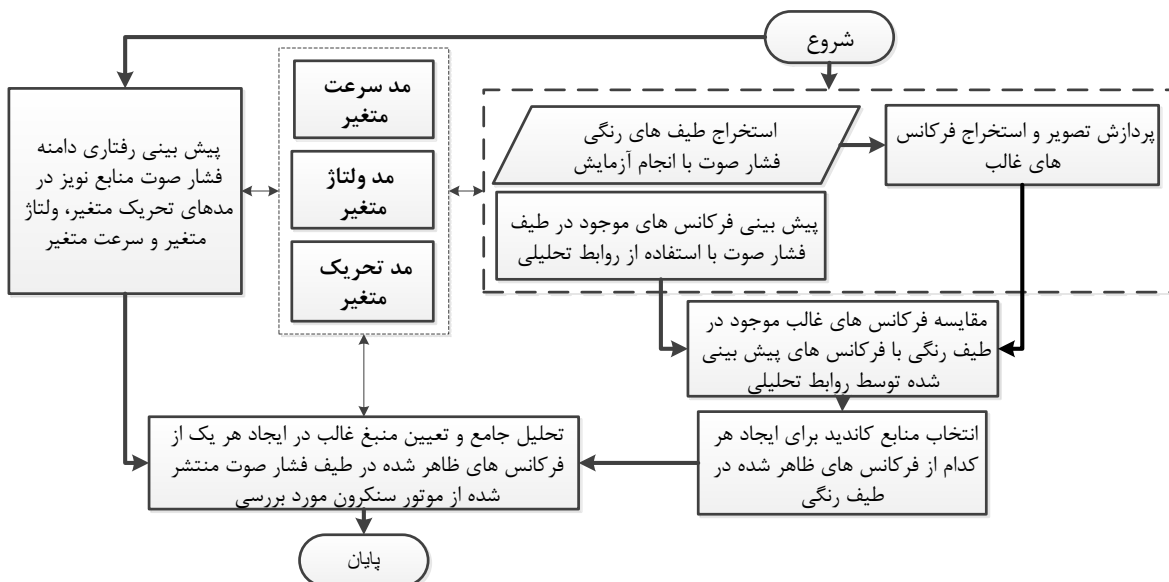
مطابق با جدول (۳-۵) تنها منبع کاندید برای ایجاد خط L7 منابع مکانیکی می‌باشد. علاوه بر این، در شکل (۱۱-۵) و شکل (۱۲-۵) مشاهده می‌شود که فشار صوت خط L7 تنها در فرکانس ۱۷۵۰ Hz تشدید شده است. و در فرکانس‌های ۱۳۶۰ Hz و ۲۱۲۰ Hz، که در همسایگی فرکانس ۱۷۵۰ Hz قرار دارند تحریک نشده است. علاوه بر این، خطوط L10, L11, L12 که ناشی از منابع الکترومغناطیسی هستند، در فرکانس ۱۷۵۰ Hz تشدید نشده‌اند. بنابراین فرکانس ۱۷۵۰ Hz فرکانس طبیعی ارتعاش پوسته استاتور نیست. با این وجود تعدادی از خطوط موجود در طیف رنگی فشار صوت هنگام تلاقی با فرکانس ۱۷۵۰ Hz تشدید می‌شوند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فرکانس ۱۷۵۰ Hz فرکانس طبیعی سایر قسمت‌های تشکیل‌دهنده موتور مورد بررسی (مانند بلبرینگ‌ها، درپوش‌ها، درپوش فن) می‌باشد.

جدول (۴-۵): منابع ایجاد خطوط در طیف رنگی و فرکانس‌های تشدید شده توسط آن‌ها

شماره خط	منبع	فرکانس تشدید (Hz)
L1	مکانیکی یا آیرودینامیکی	-
L2	الکترومغناطیسی	۳۱۰
L3	مکانیکی یا آیرودینامیکی	-
L4	الکترومغناطیسی	۳۱۰، ۹۲۰
L5	الکترومغناطیسی	۳۱۰، ۹۲۰
L6	الکترومغناطیسی	۹۲۰، ۱۳۶۰
L7	مکانیکی یا آیرودینامیکی	۱۷۵۰
L8	مکانیکی	۱۷۵۰
L9	مکانیکی	۱۷۵۰
L10	مکانیکی و الکترومغناطیسی	۲۱۲۰، ۱۷۵۰
L11	الکترومغناطیسی	۲۱۲۰
L12	الکترومغناطیسی	۲۱۲۰

## ۵-۵- روش جدید ارائه شده برای تشخیص منابع نویز صوتی موتور سنکرون

در فصول قبل منابع مختلف نویز صوتی در ماشین‌های الکتریکی معرفی شدند و روابطی برای پیش‌بینی نویز صوتی حاصل از آن‌ها ارائه شد. در این فصل، پیش‌ازاین نتایج حاصل از اندازه‌گیری نویز صوتی موتور مورد بررسی در شرایط مختلف ارائه شد. سپس با استفاده از الگوریتم پردازش تصویر ارائه شده در این فصل رفتار دامنه و فرکانس نویز حاصل از منابع مختلف، با تغییر سرعت، جریان تحریک و ولتاژ ترمینال استخراج شد. در این بخش تحلیل جامعی بر تمام روابط تحلیلی ارائه شده و نتایج حاصل شده تاکنون ارائه خواهد شد و سایر روابط تحلیلی موردنیاز نیز به اثبات خواهند شد. تحلیل جامع انجام‌شده در قالب روشی برای تعیین دقیق منابع هرکدام از فرکانس‌های ظاهرشده در طیف فرکانسی فشار صوت منتشرشده از موتور سنکرون ارائه خواهد شد. الگوریتم ارائه شده شامل چهار مرحله اصلی می‌باشد که در ادامه به معرفی این مراحل پرداخته شده است. فلوجارت این الگوریتم در شکل (۵-۱۶) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۶): فلوجارت الگوریتم ارائه شده برای تشخیص منابع نویز صوتی

**مرحله ۱:** سه آزمایش مستقل سرعت متغیر، جریان تحریک متغیر و ولتاژ ترمینال متغیر بر روی موتور سنکرون مورد بررسی انجام می‌شود. و طیف فرکانسی فشار صوت در طول انجام هر سه آزمایش

اندازه‌گیری می‌شود. در هرکدام از آزمایش‌های انجام‌شده یکی از پارامترهای عملکردی ماشین به‌عنوان پارامتر متغیر انتخاب شده و بصورت خطی با زمان تغییر داده می‌شود. در هرکدام از آزمایش‌های انجام‌شده یک طیف رنگی سه‌بعدی به دست می‌آید که ارائه‌دهنده نحوه تغییرات طیف فشار صوت، با تغییر پارامتر مستقل می‌باشد. همان‌طور که در بخش‌های قبلی دیده شد، مکان هندسی نقاط پیک در طیف فرکانسی فشار صوت بصورت خطوط مورب و یا عمودی در طیف رنگی فشار صوت ظاهر خواهند شد. نتایج حاصل از آزمایش در شکل (۳-۵)، شکل (۴-۵) و شکل (۷-۵) ارائه شده است.

**مرحله ۲:** با استفاده از الگوریتم پردازش تصویر ارائه شده در بخش قبل معادله تمام خطوط ظاهرشده در طیف رنگی سرعت، تحریک ولتاژ ترمینال استخراج می‌شود. سپس به ازای تمام خطوط مورب گذرنده از مبدأ که در طیف رنگی سرعت ظاهرشده‌اند، خط عمودی متناظر با آن در طیف رنگی تحریک و ولتاژ تشخیص داده شده و به آن خط اختصاص داده می‌شود. هر خط (خطوط مورب گذرنده از مبدأ در طیف رنگی سرعت و یا خطوط عمودی متناظر با آن‌ها در طیف رنگی تحریک و ولتاژ) ممکن است ناشی از یک یا چند منبع نویز باشد. که با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده در این مرحله می‌توان بر روی هرکدام از خطوط مورب گذرنده از مبدأ در طیف رنگی سرعت و همچنین بر روی خطوط عمودی متناظر با آن‌ها در طیف رنگی تحریک و ولتاژ حرکت کرده و رفتار هرکدام را با تغییر سرعت، جریان تحریک و ولتاژ ترمینال مشاهده کرد.

**مرحله ۳:** فرمول‌های ارائه شده در جدول (۲-۵) در واقع فرکانس‌هایی را که احتمال ظاهر شدن آن‌ها در طیف فرکانسی فشار صوت وجود دارد پیش‌بینی می‌کند. تمام این فرکانس‌ها لزوماً در طیف فرکانسی فشار صوت ظاهر نخواهند شد. بنابراین لازم است که با استفاده از الگوریتم پردازش تصویر ارائه شده در بخش‌های قبل، معادله تمام خطوط ظاهرشده در طیف رنگی فشار صوت حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده استخراج شود. سپس معادله‌های هرکدام از خطوط با تمام روابط ارائه شده در جدول (۲-۵) مقایسه شود و در صورتی که معادله تحلیلی ارائه شده در جدول (۲-۵) با معادله مستخرج

از پردازش نتایج حاصل از آزمایش یکسان شود، منبع ارائه شده در جدول (۵-۲) به‌عنوان منبع ایجاد خط ظاهرشده در طیف رنگی فشار صوت در نظر گرفته می‌شود. تعداد ۱۳۲ خط توسط الگوریتم پردازش تصویر تشخیص داده شده است. همان‌گونه که در مشاهده می‌شود، برای هر یک از منابع نویز دو دسته خطوط ارائه شده است که اول معرف تمام فرکانس‌ها یا خطوطی است که احتمال ایجاد آن‌ها وجود دارد و دسته دوم زیرمجموعه‌ای از دسته اول است که احتمال ظهور آن‌ها در طیف فرکانسی فشار صوت بیشتر است. برای موتور مورد بررسی نتیجه حاصل یک ماتریس با ابعاد  $29 \times 132$  خواهد بود. با در نظر گرفتن دسته خطوط عمومی، نتیجه حاصل از بررسی تعدادی از خطوط در جدول (۵-۵) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شیب خطوط، شماره خطوط و همچنین مقدار  $k$  که به ازای آن معادله خطوط ارائه شده در روابط و معادله خطوط تشخیص داده شده توسط الگوریتم پردازش تصویر یکسان می‌شوند، در این جدول ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول (۵-۵) مشاهده می‌شود، برای هرکدام از خطوط ظاهرشده در طیف رنگی یک یا چند منبع نویز به‌عنوان منابع ایجاد آن در نظر گرفته شده است و با اطلاعات به‌دست‌آمده تاکنون نمی‌توان منبع دقیق هر خط را مشخص کرد. بنابراین برای تشخیص دقیق منبع ایجاد هر خط یک تحلیل جامعی موردی نیاز است. تحلیل جامع برای تشخیص منبع هر خط در مرحله بعدی ارائه شده است.

**مرحله ۴:** در مراحل قبل برای هرکدام از خطوط ظاهرشده در طیف رنگی یک یا چند منبع به‌عنوان کاندید برای ایجاد آن خط معرفی شد. تعدادی از خطوط ظاهرشده در طیف رنگی تأثیر بسزایی در فشار صوت کلی منتشرشده از موتور مورد بررسی دارند به‌صورتی که فشار صوت کلی رفتاری مشابه با این خطوط از خود نشان می‌دهند و می‌توان آن‌ها را به‌عنوان منابع غالب در ایجاد نویز معرفی کرد. همان‌گونه که در ادامه مشاهده خواهد شد، معمولاً می‌توان از بین دو یا چند منبع کاندید برای هرکدام از خطوط ظاهرشده در طیف رنگی، یک منبع را به‌عنوان منبع غالب در ایجاد آن خط معرفی کرد. در این مرحله رفتار هرکدام از خطوط با تغییر شرایط عملکردی مورد بررسی قرار خواهد گرفت و

منبع دقیق هر کدام از خطوط تشخیص داده خواهد شد.

تغییرات مقدار مؤثر فشار صوت کلی منتشرشده از موتور سنکرون مورد بررسی بدون وزن دهی فرکانس‌هایی که گوش انسان نسبت به آن‌ها حساس‌تر است، در شکل (۵-۱۷) نشان داده شده است. این نمودار با اندازه‌گیری فشار صوت کلی در آزمایش سرعت متغیر به دست آمده است. ابتدا داده‌های حاصل از اندازه‌گیری توسط نرم‌افزار جمع‌آوری و پردازش داده‌های صوتی (SAMURAI) جمع‌آوری شده و پردازش‌های لازم برای نمایش بهتر نتایج، در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود این تغییرات این نمودار بعد از سرعت حدود ۱۵۰۰ rpm با شیب زیادی افزایش پیدا کرده است که دلیل این شیب زیاد وابستگی شدید نویز مکانیکی و آیرودینامیکی به سرعت مکانیکی می‌باشد [۱۰]. به دلیل افزایش شدید مقدار مؤثر فشار صوت کلی موتور مورد بررسی در سرعت‌های بالاتر از ۱۵۰۰ rpm، می‌توان برای ماشین مورد بررسی سرعت ۱۵۰۰ rpm را از نقطه‌نظر صوتی به‌عنوان سرعت بحرانی در نظر گرفت. سرعت بحرانی را می‌توان با انتخاب بلبرینگ مناسب و همچنین طراحی مناسب پره‌های فن تا حدودی افزایش داد.

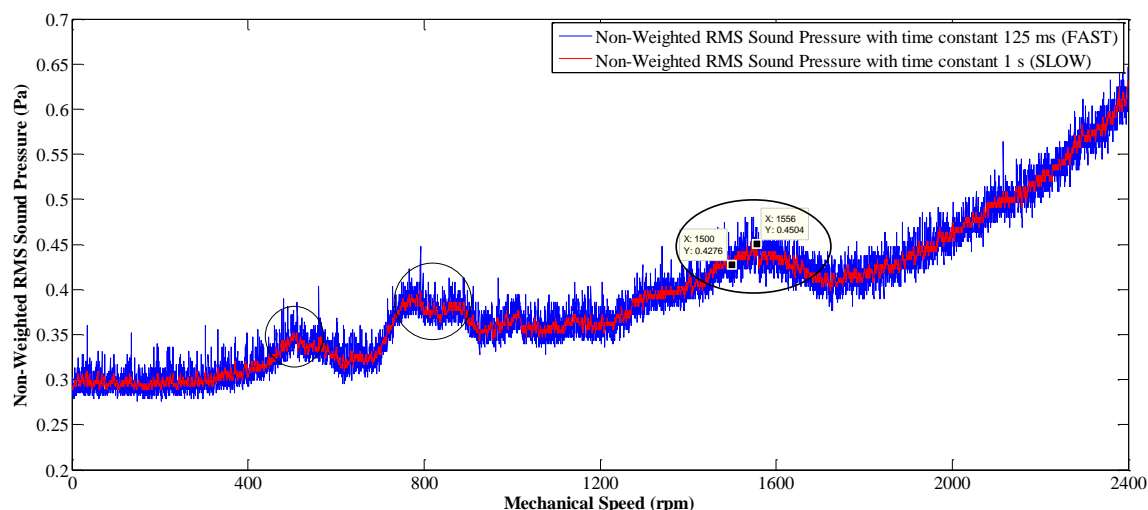
جدول (۵-۵): خطوط تشخیص داده توسط الگوریتم پردازش تصویر به همراه منبع اختصاص داده شده برای هر کدام

شماره خط	شیب خط	مکانیکی و آیرودینامیکی	بلبرینگ	$f_1 = (p/60)(6k+2)n$	$f_2 = (p/60)(6k+4)n$	$f_3 = (p/60)(1/p+6k)n$	$f_4 = (p/60)(2-1/p+6k)n$	$f_5 = (p/60)(2+1/p+6k)n$	$f_6 = (p/60)(6k)n$	$f_7 = (p/60)(6k+2)n$	$f_8 = (p/60)(6k)n$	$f_9 = (p/60)(6k-2)n$	$f_{10} = (p/60)(6k+2)n$	$f_{11} = (p/30)(1-6k)n$	$f_{12} = (p/30)(1+6k)n$	$f_{13} = (p/30)n$
۱	۸۹/۹۲	۰	۰	-	-	-	-	-	۰	-	-	-	-	-	-	-
۲	۸۹/۰۲۴	۱	-	-	-	۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۳	۸۸/۵۵۶	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۴	۸۸/۱۱۱	۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۵	۸۷/۱۴۷	۳	۱	-	-	-	۰	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۶	۸۶/۱۸۲	۴	-	۰	-	-	-	-	-	۰	-	-	-	۰	۰	۰
۷	۸۵/۲۲۶	۵	-	-	-	-	-	۰	-	-	-	-	-	-	-	-
۸	۸۴/۲۸۱	۶	۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

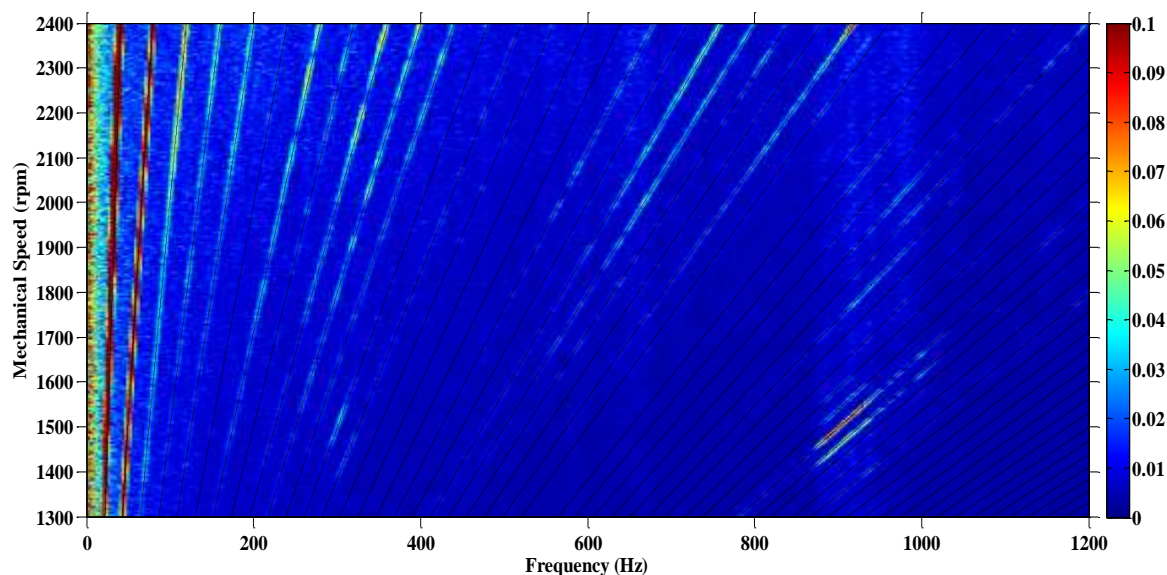
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۸۳/۸۹۶	۹		
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۷	۸۳/۳۳۷	۱۰	
-	-	-	-	۱	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	۸	۸۲/۴۰۵	۱۱	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۳	-	۹	۸۱/۴۵۲	۱۲	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۰	۸۰/۵۲۷	۱۳	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۱	۷۹/۶۰۳	۱۴	
-	-	-	-	-	۱	-	۱	-	-	-	-	-	-	-	۴	۱۲	۶۶۲۷۸	۱۵
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۷۸/۱۷۵	۱۶
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱	-	-	-	-	۱۳	۷۷/۷۶۲	۱۷	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۴	۷۶/۸۵۹	۱۸	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	۱	-	-	-	-	-	۵	۱۵	۷۵/۹۵۳	۱۹
-	-	-	۱	-	-	۱	-	-	-	-	-	۱	-	-	۱۶	۷۵/۰۵۱	۲۰	

همان‌گونه که در شکل (۵-۱۷) مشاهده می‌شود، سه قله در نمودار فشار صوت کلی دیده می‌شود که یکی از قله‌ها در اطراف سرعت نامی موتور سنکرون (۱۵۰۰ rpm) ظاهر شده است. این امر نشان می‌دهد که سرعت ۱۵۰۰ rpm (سرعت نامی موتور سنکرون) از نقطه‌نظر نویز صوتی سرعت مناسبی برای ماشین مورد بررسی نیست. بنابراین در ادامه به بررسی منابع غالب در ایجاد نویز صوتی در اطراف سرعت ۱۵۰۰ rpm پرداخته شده است. و بررسی تمام خطوط ظاهرشده در طیف رنگی سرعت با استفاده از نتایج حاصل از بررسی این منابع، ممکن است.

الگوریتم پردازش تصویر معرفی‌شده در بخش‌های، قبلی نتایج حاصل از آزمایش سرعت متغیر (طیف رنگی سرعت) را پردازش کرده و ۱۳۲ خط را در این طیف رنگی تشخیص داده است که شیب و منابع اولیه تشخیص داده شده برای تعدادی از این خطوط در جدول (۵-۵) ارائه شده است. قسمتی از طیف رنگی سرعت در اطراف سرعت ۱۵۰۰ rpm به همراه خطوط تشخیص داده شده توسط الگوریتم پردازش تصویر بزرگنمایی شده و در شکل (۵-۱۸) نشان داده شده است. تعدادی از خطوط (۷ خط) نسبت به سایر خطوط نقش بیشتری در فشار صوت کلی منتشرشده از موتور مورد بررسی دارند. در ادامه به دلیل خلاصه نویسی، این خطوط تحت عنوان "خطوط غالب" شناخته می‌شوند.



شکل (۵-۱۷): تغییرات مقدار مؤثر فشار صوت منتشرشده از موتور سنکرون مورد بررسی نسبت به تغییرات سرعت مکانیکی



شکل (۵-۱۸): بزرگنمایی قسمتی از طیف رنگی سرعت در اطراف سرعت ۱۵۰۰ rpm به همراه خطوط تشخیص داده شده توسط الگوریتم پردازش تصویر

نتیجه حاصل از استخراج و مقایسه معادله این خطوط با معادلات ارائه شده در جدول (۵-۲) به همراه منابع احتمالی آن‌ها در جدول (۵-۶) ارائه شده‌اند. شماره هرکدام از منابع (شماره هرکدام از منابع در ستون اول جدول (۵-۲) ارائه شده است. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، عامل هرکدام از خطوط ممکن است یکی از منابع الکترومغناطیسی، مکانیکی و یا آیرودینامیکی باشد. در صورتی که منابع تشخیص داده شده برای خطوط از نوع الکترومغناطیسی باشد مرتبه نیروی شعاعی (نیروی که از منبع تشخیص داده شده ناشی شده و باعث ارتعاش پوسته استاتور و در نتیجه ایجاد نویز صوتی شده



است) نیز با استفاده از روابط ارائه شده در جدول (۵-۲) برای هرکدام از منابع تشخیص داده شده محاسبه می‌شود. منابع مکانیکی، بلبرینگ‌ها و منابع آیرودینامیکی باعث ارتعاش پوسته استاتور نمی‌شوند بنابراین محاسبه مرتبه نیرو برای این منابع بی‌معنی است. برای سادگی در بررسی‌های انجام‌شده در این بخش، خطوط غالب بصورت نشان داده شده در جدول (۵-۶) شماره‌گذاری شده‌اند. در جدول (۵-۶) علاوه بر شماره خطوط، منابع تشخیص داده شده به‌عنوان کاندید برای هرکدام از آن‌ها به همراه مرتبه آن‌ها و همچنین فرکانس نویز صوتی ناشی از هرکدام از خطوط در سرعت rpm ۱۵۰۰ نشان داده شده است.

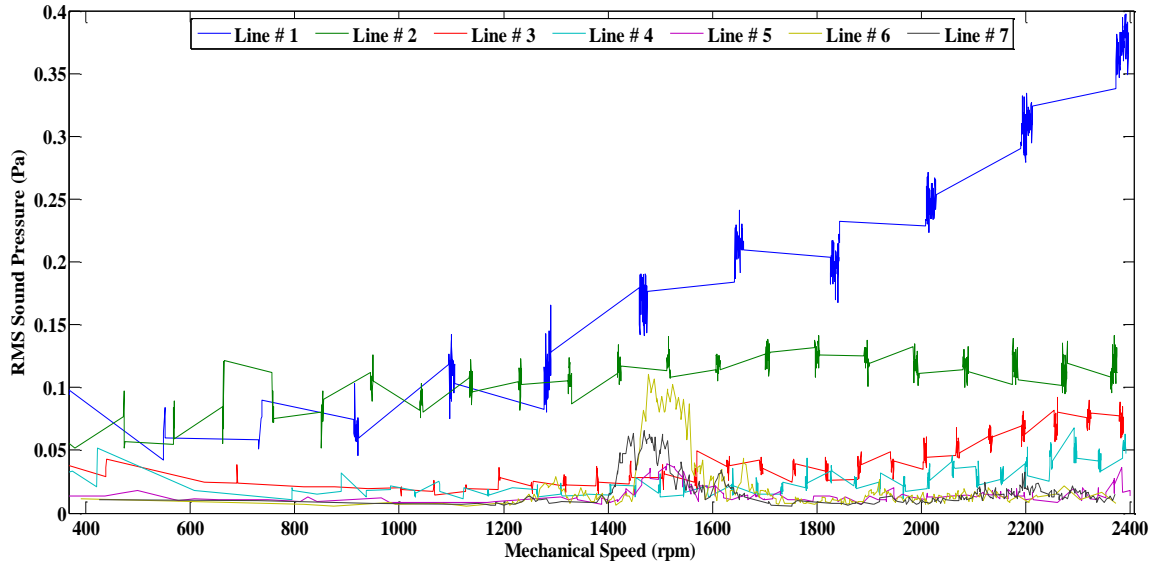
جدول (۵-۶): شماره خطوط غالب در سرعت rpm ۱۵۰۰ به همراه منابع تشخیص داده شده برای آن‌ها

شماره خط	شماره منبع نویز فرکانس در سرعت ۱۵۰۰ RPM	نویز الکترومغناطیسی						بلبرینگ و مکانیکی	
		۱	۲	۳	۴	۵	۶	بلبرینگ	مکانیکی
۱	۲۵ Hz	-	-	-	-	۲	-	-	*
۲	۵۰ Hz	-	-	-	-	-	-	-	*
۳	۷۵ Hz	-	-	-	-	۱	-	*	*
۴	۱۰۰ Hz	۴	۴	۴	۱	-	۴	-	*
۵	۳۰۰ Hz	-	-	۴	۲	-	-	*	*
۶	۹۰۰ Hz	-	-	۴	۲	-	-	*	*
۷	۹۲۰ Hz	-	-	-	-	۲	-	-	*

همان گونه که در جدول (۵-۶) مشاهده می‌شود، برای اکثر خطوط غالب، بیش از یک منبع پیش‌بینی شده است که پیش‌ازاین نیز به این موضوع اشاره شد. بنابراین برای تشخیص منبع غالب برای هرکدام از منابع یک تحلیل جامع موردنیاز است. روش انتخاب شده در این تحقیق برای تعیین منابع غالب به این صورت است که در هر سه مد اندازه‌گیری بر روی هرکدام از خطوط غالب حرکت کرده و رفتار آن با تغییر پارامترهای اختیاری (سرعت مکانیکی، جریان تحریک و دامنه ولتاژ ترمینال)،

مشاهده شده و از لحاظ تئوری نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت یکی از منابع پیشنهادی به‌عنوان منبع غالب معرفی می‌شود. تغییرات فشار صوت تمام خطوط غالب با تغییر سرعت مکانیکی با رنگ‌های مختلف در شکل (۵-۱۹) نشان داده شده است. این نمودار با حرکت بر روی خطوط غالب با تغییرات سرعت در طیف رنگی سرعت استخراج شده است.

همان‌گونه که در شکل (۵-۱۸) مشاهده می‌شود، سه خط (خطوطی که فرکانس نویز ناشی از آن‌ها در سرعت ۱۵۰۰ rpm برابر با ۳۰۰ Hz، ۹۰۰ Hz و ۹۲۰ Hz است.) تنها در نزدیکی سرعت rpm ۱۵۰۰ ظاهر شده‌اند و در سرعت‌های دیگر اثری از این سه خط نیست. همان‌گونه که در شکل (۵-۱۹) نیز مشاهده می‌شود، مقدار مؤثر فشار صوت ناشی از این سه خط در اطراف سرعت rpm ۱۵۰۰ بصورت ناگهانی افزایش پیدا کرده و در سرعت بالاتر دوباره کاهش پیدا کرده و به این صورت یک قله در اطراف سرعت rpm ۱۵۰۰ ایجاد کرده‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که این خطوط ناشی منابع مکانیکی، بلبرینگ و منابع آیرودینامیکی نیستند. به دلیل اینکه فشار صوت ناشی از آن‌ها با افزایش سرعت مکانیکی بصورت صعودی افزایش پیدا نکرده است. با این وجود می‌توان نتیجه گرفت که این خطوط از منابع الکترومغناطیسی ناشی شده و در سرعت rpm ۱۵۰۰ فرکانس نیروی شعاعی حاصل از آن‌ها برابر با فرکانس طبیعی ارتعاش پوسته استاتور شده و باعث تشدید ارتعاش استاتور شده‌اند. فرکانس‌های طبیعی ارتعاش پوسته استاتور و خطوط تشدیدکننده هر فرکانس در بخش قبلی استخراج شده و در جدول (۵-۴) ارائه شده‌اند.



شکل (۵-۱۹): تغییرات مقدار مؤثر فشار صوت با حرکت بر روی هر کدام از خطوط غالب با تغییرات سرعت مکانیکی

برای سه خط اشاره شده در بالا (خط شماره ۵، خط شماره ۶ و خط شماره ۷) می‌توان گفت که این خطوط ناشی از منابع الکترومغناطیسی هستند با این وجود با مطالب گفته شده تاکنون نمی‌توان به‌طور عوامل الکترومغناطیسی ایجاد کننده هر کدام را بطور دقیق مشخص کرد. این هدف با بررسی بیشتر رفتار خطوط، قابل دستیابی است. رابطه (۴-۱۷) به‌منظور محاسبه فشار الکترومغناطیسی وارد بر استاتور، در فصل ۴ ارائه شده است. ترم سوم راست این معادله  $B_r(t, \alpha)B_s(t, \alpha)$ ، بصورت حاصل ضرب چگالی شار روتور و استاتور است. این ترم مربوط به اثر متقابل بین چگالی شار روتور و استاتور است که در صورت وجود ناهم‌محوری، فرکانس نویز ناشی از ناهم‌محوری نیز در این ترم ظاهر خواهد شد [۱۰]، [۵۶]. همان‌گونه که در روابط ارائه شده در جدول (۵-۲) مشاهده می‌شود، فرکانس نویز حاصل از اثر متقابل بین چگالی شار روتور و استاتور و همچنین نویز حاصل از ناهم‌محوری با هم برابر هستند. با این وجود بررسی‌های انجام‌شده در این تحقیق روشی را برای تفکیک خطوط ناشی از این دو منبع ارائه کرده است.

ترم سوم رابطه (۴-۱۷) را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$B_r(t, \alpha)B_s(t, \alpha) = F_r(t, \alpha)F_s(t, \alpha)\Lambda_g^2(\alpha) \quad (۲-۵)$$

با صرف‌نظر از اثر شیارهای روتور و استاتور و همچنین اثر ناهم‌محوری دینامیک روتور، توزیع فضایی گذردهی الکترومغناطیسی فاصله هوایی  $\Lambda_g(\alpha)$  تنها با در نظر گرفتن ناهم‌محوری استاتیک بصورت زیر خواهد بود [۱۰]، [۵۶].

$$\Lambda_g(\alpha) = \frac{\mu_0}{gk_c} [1 + e \cos(\alpha)] \quad (۳-۵)$$

در رابطه فوق  $g$  طول فاصله هوایی بدون در نظر گرفتن ناهم‌محوری،  $k_c$  ضریب کارتر، و ضریب  $e$  ناهم‌محوری می‌باشد، شکل (۴-۵). با جایگذاری رابطه (۳-۵) در رابطه (۲-۵) خواهیم داشت:

$$B_r(t, \alpha) B_s(t, \alpha) = \frac{\mu_0}{gk_c} \left( \sum_{v=2km_1+1} F_{mv} \cos(\omega t - v p \alpha) + \sum_{v=2km_1-1} F_{mv} \cos(\omega t + v p \alpha) \right) \times \quad (۴-۵)$$

$$\left( \sum_{\mu=6k \pm 1} \frac{3}{2} F_{m\mu} \cos(\mu \omega t - \mu p \alpha + \varphi_\mu) \right) (1 + e \cos(\alpha))^2$$

با بسط آخرین ترم سمت راست رابطه (۴-۵) خواهیم داشت:

$$B_r(t, \alpha) B_s(t, \alpha) = \frac{\mu_0}{gk_c} \left( \sum_{v=2km_1+1} F_{mv} \cos(\omega t - v p \alpha) + \sum_{v=2km_1-1} F_{mv} \cos(\omega t + v p \alpha) \right) \times \quad (۵-۵)$$

$$\left( \sum_{\mu=6k \pm 1} \frac{3}{2} F_{m\mu} \cos(\mu \omega t - \mu p \alpha + \varphi_\mu) \right) \left( 1 + \frac{e^2}{2} + 2e \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \cos(2\alpha) \right)$$

با در نظر گرفتن  $K_3 = \frac{\mu_0}{2gk_c}$  و  $K_2 = \frac{2\mu_0 e}{gk_c}$ ،  $K_1 = \frac{\mu_0}{gk_c} \left( 1 + \frac{e^2}{2} \right)$  خواهیم داشت:

$$\begin{aligned}
& B_r(t, \alpha) B_s(t, \alpha) = \\
& K_1 \left( \sum_{v=2km_1+1} F_{mv} \cos(\omega t - v p \alpha) + \sum_{v=2km_1-1} F_{mv} \cos(\omega t + v p \alpha) \right) \\
& \times \left( \sum_{\mu=6k \pm 1} \frac{3}{2} F_{m\mu} \cos(\mu \omega t - \mu p \alpha + \varphi_\mu) \right) \\
& + K_2 \left( \sum_{v=2km_1+1} F_{mv} \cos(\omega t - v p \alpha) + \sum_{v=2km_1-1} F_{mv} \cos(\omega t + v p \alpha) \right) \\
& \times \left( \sum_{\mu=6k \pm 1} \frac{3}{2} F_{m\mu} \cos(\mu \omega t - \mu p \alpha + \varphi_\mu) \right) \cos(\alpha) \\
& + K_3 \left( \sum_{v=2km_1+1} F_{mv} \cos(\omega t - v p \alpha) + \sum_{v=2km_1-1} F_{mv} \cos(\omega t + v p \alpha) \right) \\
& \times \left( \sum_{\mu=6k \pm 1} \frac{3}{2} F_{m\mu} \cos(\mu \omega t - \mu p \alpha + \varphi_\mu) \right) \cos(2\alpha) \tag{۶-۵}
\end{aligned}$$

با کمی دقت در دو رابطه بالا، مشاهده می‌شود که از بین سه ترم ظاهر شده در رابطه بالا، ترمی که شامل ضریب  $K_1$  است در صورت وجود و عدم وجود ناهم‌محوری وجود خواهد داشت. با این وجود دو ترم دیگر که شامل ضرایب  $K_2$  و  $K_3$  هستند، تنها در صورت وجود ناهم‌محوری استاتیک وجود خواهند داشت و نیروی شعاعی با مرتبه ۱ یا ۲ ایجاد خواهند کرد. می‌توان اثبات کرد که تغییرات دامنه نیروی شعاعی (و در نتیجه آن نویز صوتی) حاصل از این ترم با تغییرات پارامترهای عملکردی (جریان تحریک و ولتاژ ترمینال)، رفتاری مشابه به تغییرات  $F_{1r} F_{1s}$  (حاصل ضرب مؤلفه اصلی MMF روتور و استاتور) خواهد داشت. بنابراین می‌توان دامنه فشار مغناطیسی حاصل از این ترم را بدون در نظر گرفتن ناهم‌محوری استاتیک، بصورت تابعی از مؤلفه اصلی MMF روتور، به دست آورد.

فرضیات انجام‌شده به این صورت است که ولتاژ ترمینال موتور سنکرون ثابت است و با این فرض جریان تحریک روتور (و یا مؤلفه اصلی MMF روتور) به‌عنوان پارامتر متغیر انتخاب شده و حاصل عبارت  $F_{1r} F_{1s}$  به‌عنوان تابعی از  $F_{1r}$  (مؤلفه اصلی MMF روتور) به دست آمده است. نتیجه حاصل در رابطه زیر ارائه شده است.

$$p_{rs} \propto B_{1r} B_{1s} \propto F_{1r} \cdot F_{1s} = F_{1r} \sqrt{\left(F_{net} - \sqrt{F_{1r}^2 - F_0^2}\right)^2 + F_0^2} \quad (7-5)$$

برای مشاهده اثبات کامل این رابطه به پیوست B مراجعه کنید.  $F_{1s}$  دامنه مؤلفه اصلی MMF استاتور است و بصورت رابطه (8-5) تابعی از مؤلفه اصلی MMF روتور می‌باشد.

$$F_{1s} = \sqrt{\left(F_{net} - \sqrt{F_{1r}^2 - F_0^2}\right)^2 + F_0^2} \quad (8-5)$$

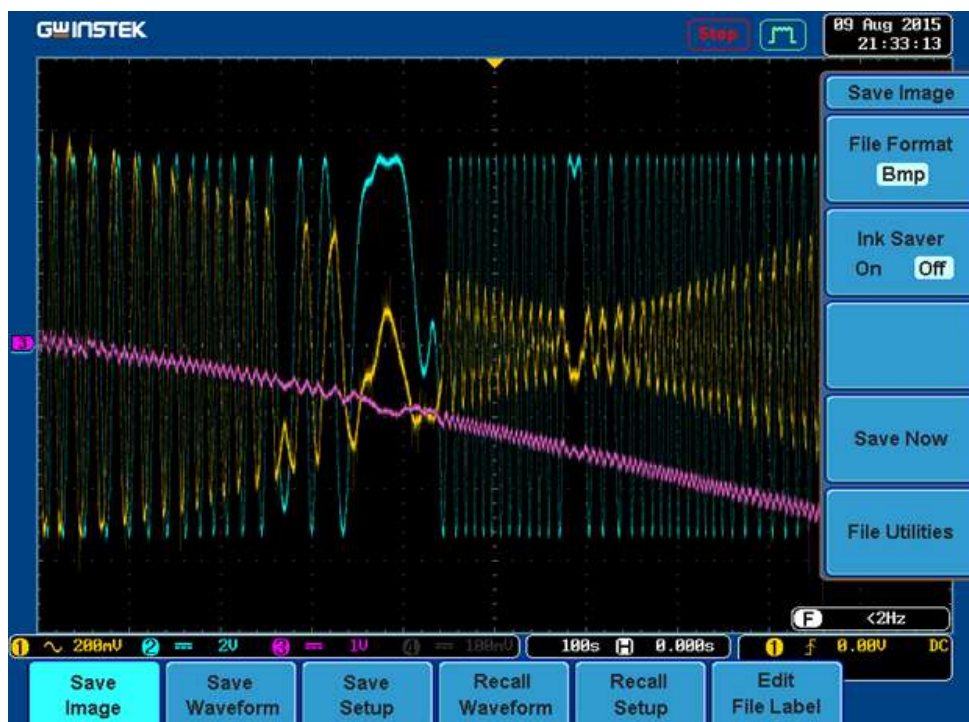
در رابطه بالا  $F_0$  بصورت (9-5) قابل محاسبه است.

$$F_0 = \frac{60P_{out}}{np\pi^2 D L F_{net}} \quad (9-5)$$

در رابطه فوق  $P_{out}$  توان خروجی موتور سنکرون،  $D$  شعاع داخلی استاتور،  $L$  طول یوغ استاتور و  $F_{net}$  در واقع MMF برآیند فاصله هوایی می‌باشد. در این بررسی نیاز به تعیین دقیق این پارامترها نیست. به دلیل اینکه در این بررسی تنها رفتار متغیرها مهم هستند نه مقدار دقیق آن‌ها. مطابق با رابطه (7-5) به ازای  $F_{1r} = \sqrt{F_0^2 + F_{net}^2}$  مقدار  $p_{rs}$  (فشار مغناطیسی) و همچنین  $F_{1s}$  کمینه می‌شود. در واقع می‌توان گفت که با تغییر جریان تحریک موتور سنکرون، فشار مغناطیسی حاصل از اثر متقابل بین چگالی شار روتور و استاتور هنگامی کمینه می‌شود که دامنه چگالی شار استاتور (یا دامنه MMF استاتور و یا جریان استاتور) کمینه شود به عبارت دیگر ضریب توان موتور مورد بررسی برابر با واحد شود.

در طول آزمایش تحریک متغیر، جریان سیم‌پیچی استاتور توسط سنسور جریان اثر هال با رنج فرکانسی صفر تا 50 kHz و رنج دامنه 0 تا 200 آمپر اندازه‌گیری شده است و با رنگ زرد در شکل (5-20). نشان داده شده است. جریان روتور نیز با عبور جریان تحریک از مقاومت 0/1 اهم و اندازه‌گیری افت ولتاژ دوسر مقاومت قابل اندازه‌گیری است، رنگ آبی در شکل (5-20). ولتاژ ترمینال نیز توسط سنسور اثر هال اندازه‌گیری شده و با رنگ بنفش در شکل (5-20) نشان داده شده است.

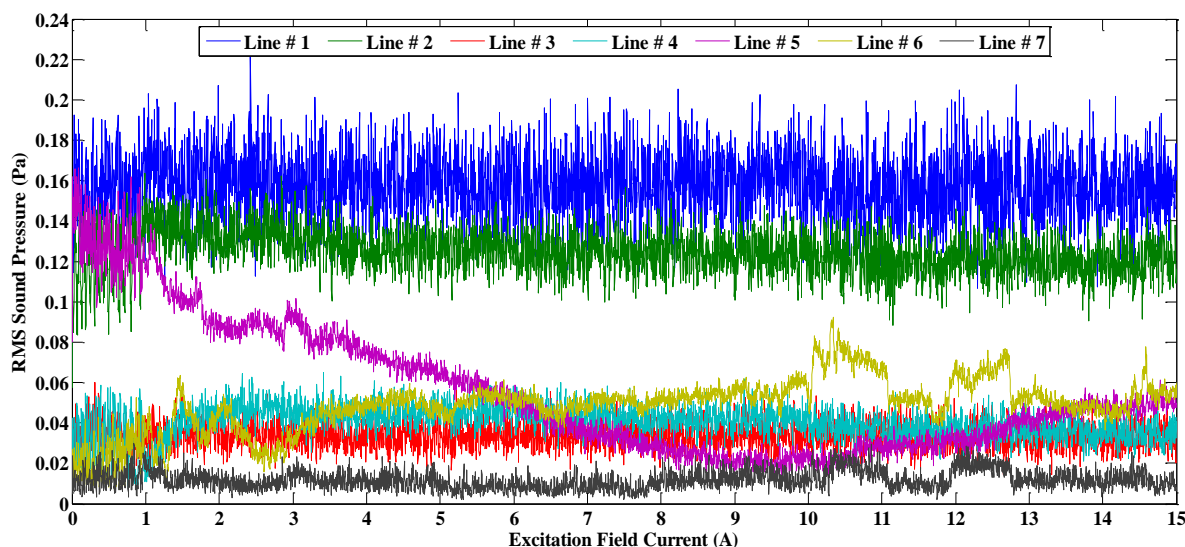
مطابق با آزمایش تحریک متغیر جریان تحریک از صفر تا ۱۵ آمپر افزایش پیدا کرده است. هنگامی که جریان تحریک برابر با ۹ آمپر می‌شود جریان استاتور کمینه می‌شود. نتایج حاصل از اندازه‌گیری جریان‌های استاتور و روتور این حقیقت را نشان می‌دهند، شکل (۵-۲۰). همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد بازه زمانی آزمایش تحریک متغیر ۱۰۰۰ ثانیه می‌باشد که صفحه نمایش اسیلوسکوپ قادر به نمایش تمام مقادیر نمونه‌برداری شده در این بازه زمانی نیست. و از شکل نشان داده در شکل (۵-۲۰) تنها می‌توان پوش دامنه متغیرها را در بازه زمانی آزمایش مشاهده کرد.



شکل (۵-۲۰): نمایش جریان تحریک روتور، جریان استاتور و ولتاژ ترمینال ورودی موتور مورد بررسی در آزمایش تحریک متغیر

در شکل (۵-۲۱) مشاهده می‌شود که هنگامی که جریان تحریک برابر با ۹ آمپر می‌شود مقدار مؤثر فشار صوت بر روی خط شماره ۵ (خطی که فرکانس حاصل از آن در سرعت ۱۵۰۰ rpm برابر با ۳۰۰ Hz می‌شود) کمینه می‌شود. همان‌گونه که از لحاظ تئوری اثبات شد، با تغییر جریان تحریک روتور مقدار مؤثر نویز صوتی حاصل از اثر متقابل بین چگالی شار روتور و استاتور تنها در یک نقطه کمینه می‌شود و مقدار کمینه هنگامی رخ می‌دهد که جریان استاتور کمینه شود. بنابراین با مشاهده

رفتار خطوط غالب با تغییر جریان تحریک روتور در شکل (۵-۲۱) و همچنین منابع کاندید برای خطوط غالب در جدول (۵-۶) می‌توان به‌سادگی نتیجه گرفت که در بین خطوط غالب، تنها خط شماره ۵ ناشی از اثر متقابل بین روتور و استاتور است.



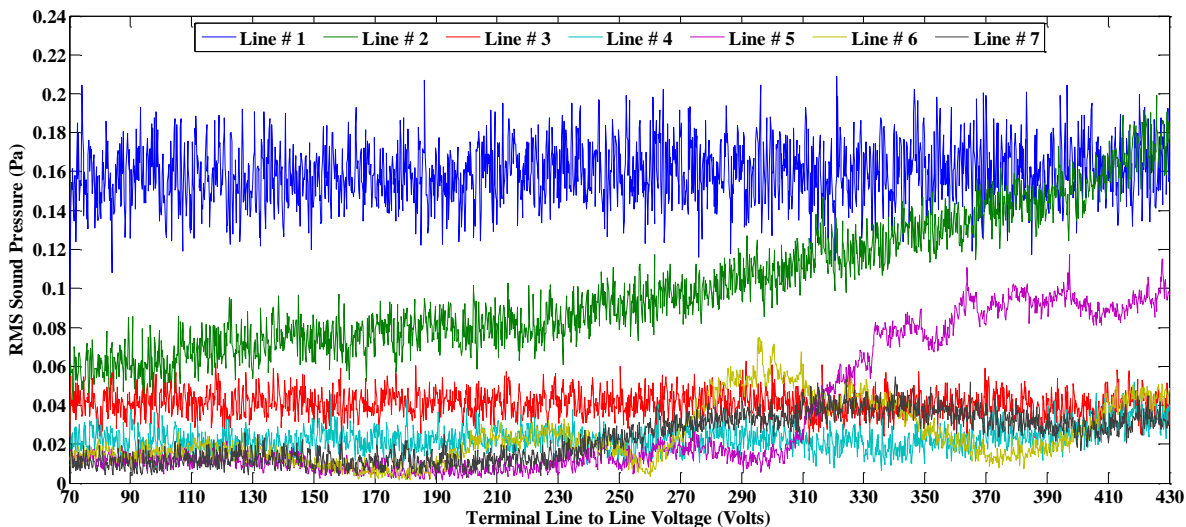
شکل (۵-۲۱): تغییرات مقدار مؤثر فشار صوت با حرکت بر روی هرکدام از خطوط غالب با تغییرات جریان تحریک

همان‌گونه که در شکل (۵-۲۱) مشاهده می‌شود خط شماره ۶ با تغییرات جریان تحریک رفتاری مشابه با خط شماره ۵ از خود نشان نمی‌دهد بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که منابع ایجادکننده این دو خط یکسان نیستند. از این طرف دیگر همان‌گونه که پیش‌ازین بحث شد، منابع مکانیکی و آیرودینامیکی نیز عامل ایجاد این خط نیستند بنابراین می‌توان با قطعیت نتیجه گرفت که این خط ناشی از ناهم‌محوری استاتیک می‌باشد.

در رابطه با خط شماره ۷ می‌توان گفت که منابع کاندید برای ایجاد این خط ناهم‌محوری دینامیک و منابع مکانیکی و آیرودینامیکی می‌باشند. همان‌گونه که پیش‌ازین نیز در مورد ویژگی‌های خطوط ناشی از منابع مکانیکی و آیرودینامیکی بحث شد، این خط نمی‌تواند ناشی از این منابع باشد و تنها منبع کاندید برای ایجاد این خط ناهم‌محوری دینامیک می‌باشد. رفتار دامنه مؤلفه نویز ناشی از منابع مکانیکی با تغییرات دامنه چگالی شار فاصله هوایی در [۸] مورد بررسی قرار گرفته است که



مطابق با آن، یکی از اثرات غیرقابل انکار ناهم‌محوری دینامیک پدیده "کشش مغناطیسی یک‌طرفه" است. مطابق با این بررسی، نویز صوتی حاصل از ناهم‌محوری دینامیک با افزایش ولتاژ ترمینال افزایش پیدا می‌کند تا جایی که افزایش ولتاژ باعث اشباع هسته شود. اشباع هسته استاتور، نویز صوتی حاصل از این پدیده را کاهش می‌دهد. این موضوع با استفاده از نتایج عملی و بدون اثبات در [۸] مورد بررسی قرار گرفته است. رفتار تمام خطوط غالب با افزایش ولتاژ ترمینال در شکل (۵-۲۲) نشان داده شده است که رفتار پیش‌بینی شده برای خط شماره ۹ در این شکل مشاهده می‌شود.

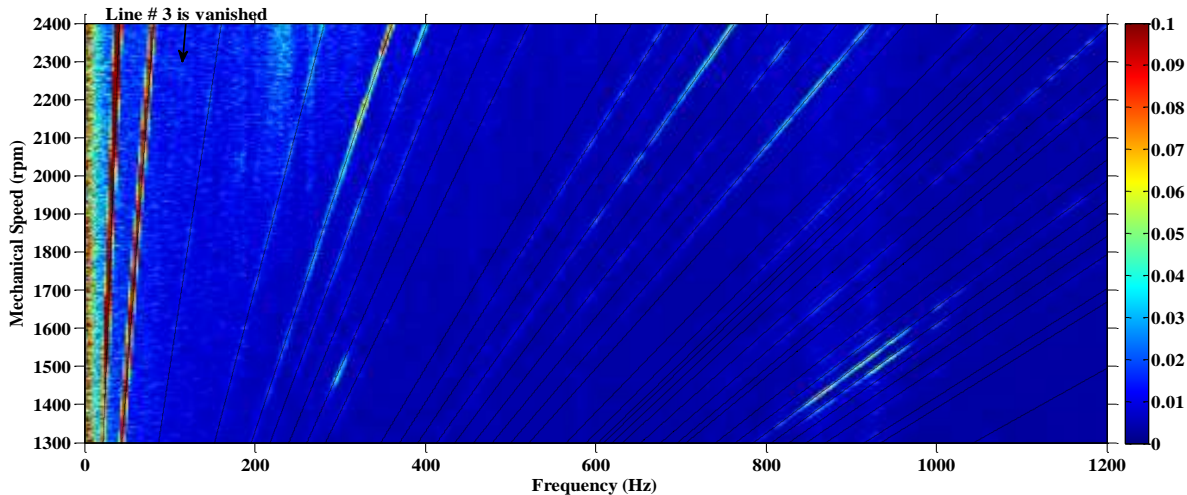


شکل (۵-۲۲): تغییرات مقدار مؤثر فشار صوت با حرکت بر روی هر کدام از خطوط غالب با تغییرات ولتاژ ترمینال

تاکنون خطوط شماره ۵، ۶ و ۷ مورد بررسی قرار گرفت و منابع ایجاد هر کدام از آن‌ها بصورت دقیق تعیین شد. با این وجود خطوط شماره ۱ تا ۴ تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. مطابق با شکل (۵-۱۹)، شکل (۵-۲۱) و شکل (۵-۲۲)، مشاهده می‌شود که فشار صوت خط شماره ۱ (خطی که فرکانس حاصل از آن در سرعت ۱۵۰۰ rpm برابر با ۲۵ Hz می‌شود) تنها با تغییرات سرعت مکانیکی بصورت صعودی افزایش پیدا می‌کند و تغییرات جریان تحریک و ولتاژ ترمینال (پارامترهایی که چگالی شار فاصله هوایی و در نتیجه نیروهای شعاعی را تحت تأثیر قرار می‌دهند) تأثیری بر مقدار مؤثر فشار صوت این خط ندارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عامل ایجاد این خط از نوع مکانیکی می‌باشد.

مطابق با جدول (۵-۶) تنها منبع کاندید برای ایجاد خط شماره ۲ (خطی که فرکانس حاصل از آن در سرعت ۱۵۰۰ rpm برابر با ۵۰ Hz می‌شود) منابع مکانیکی می‌باشد. با این وجود با مشاهده رفتار این خط با تغییرات سرعت مکانیکی در شکل (۵-۱۹)، مشاهده می‌شود که فشار صوت حاصل از این خط با افزایش سرعت مکانیکی تغییر نمی‌کند. بنابراین این خط ناشی از منابع مکانیکی نیست. علاوه بر این، با تغییر جریان روتور و ثابت نگه‌داشتن ولتاژ ترمینال مشاهده می‌شود که فشار صوت این خط تغییری نمی‌کند. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که ظهور نویز صوتی با فرکانسی برابر با فرکانس تغذیه سیم‌پیچی‌های استاتور به دلیل کشش مغناطیسی یک‌طرفه ایجاد می‌شود. این پدیده نادر به دلیل وجود ناهم‌محوری دینامیک ایجاد شده و باعث خم شدن شفت روتور می‌شود که احتمال ظهور آن در موتورهای القایی روتور سیم‌پیچی شده وجود دارد. با افزایش ولتاژ ترمینال، نیروی شعاعی حاصل از این پدیده بصورت صعودی افزایش پیدا می‌کند [۸]، [۱۰]. رفتار فشار صوت این خط را با افزایش ولتاژ ترمینال می‌توان در شکل (۵-۲۲) مشاهده کرد.

برای تفکیک نویز صوتی حاصل از منابع مکانیکی و آیرودینامیکی آزمایشی مشابه با آزمایش سرعت متغیر موردنیاز است. با این تفاوت که در این آزمایش درپوش فن با استفاده از کاغذ پوشانده شده و مسیر عبور فلوی هوای فن بسته شده است. بزرگنمایی قسمتی از طیف رنگی حاصل از این آزمایش به همراه خطوط تشخیص داده شده توسط الگوریتم پردازش تصویر در شکل (۵-۲۳) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که خط شماره ۳ (خطی که فرکانس حاصل از آن در سرعت ۱۵۰۰ rpm برابر با ۷۵ Hz می‌شود) در این آزمایش ظاهر نشده است و از سوی دیگر فشار صوت این در آزمایش تحریک متغیر و ولتاژ متغیر ثابت است و در آزمایش سرعت متغیر بدون پوشاندن درپوش فن، با افزایش سرعت مکانیکی بصورت صعودی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این خط ناشی از فلوی هوای ایجاد شده توسط فن می‌باشد.



شکل (۵-۲۳): بزرگنمایی قسمتی از طیف رنگی سرعت در صورتی که درپوش فن توسط کاغذ پوشانده شده است

خط شماره ۴ (خطی که فرکانس حاصل از آن در سرعت 1500 rpm برابر با 100 Hz می‌شود) در چندین معادله ارائه شده در جدول (۵-۲) صدق می‌کند. مشاهده رفتار فشار صوت این خط با تغییرات سرعت مکانیکی، جریان تحریک و ولتاژ ترمینال نشان می‌دهد که هیچ‌کدام از این پارامترها تأثیری بر فشار صوت حاصل از این خط ندارند. با توجه به مطالب ارائه شده تاکنون می‌توان نتیجه گرفت که عامل ایجاد این خط هیچ‌کدام از عوامل معرفی شده در جدول (۵-۶) نیست. عامل اصلی ایجاد این خط در واقع نامتعادلی ولتاژ تغذیه سه فاز سیم‌پیچی‌های استاتور می‌باشد که باعث ایجاد ریپل گشتاور با فرکانسی برابر با دو برابر فرکانس تغذیه شده و صوتی با این فرکانس ایجاد خواهد کرد [۵۶]، [۵۷].



---

## فصل ۶: نتیجه گیری و پیشنهادات

---

### ۶-۱- نتیجه گیری

یکی از اهداف اصلی این تحقیق بررسی تاثیر شرایط عملکردی ماشین‌های القایی و سنکرون بر نویز صوتی منتشر شده از این دو نوع ماشین و مقایسه مشخصه‌های صوتی آن‌ها بوده است. بنابراین یک موتور القایی روتور سیم‌پیچی شده برای رسیدن به این هدف انتخاب شد که می‌توان با اتصال صحیح سیم‌پیچی‌های روتور به یک منبع DC خارجی از آن به عنوان موتور سنکرون نیز استفاده کرد. بنابراین می‌توان در یک ساختار کاملاً یکسان، تاثیر رژیم عملکردی سنکرون و القایی را بر مشخصه‌های صوتی ماشین مورد آزمایش بررسی کرد. ابتدا روابط تحلیلی برای پیش‌بینی فرکانس نیروهای شعاعی موتور سنکرون با ساختار استفاده شده در این آزمایش استخراج شد و با روابط ارائه شده برای ماشین‌های القایی مقایسه شد. سپس با انجام آزمایش‌های عملی درستی روابط ارائه شده تصدیق شد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که در حالت کلی فرکانس‌های ظاهر شده در طیف فرکانسی فشار صوت منتشر شده از ماشین‌های الکتریکی وابسته به ساختار و سرعت است و میزان جریان روتور و ولتاژ ترمینال تاثیر چندانی بر طیف فرکانسی ندارد. با این وجود دامنه هارمونیک‌های موجود در طیف فشار صوت، وابسته به شرایط عملکردی می‌باشد. آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که در حالت کلی سطح فشار صوت منتشر در رژیم عملکردی القایی نسبت به رژیم سنکرون کمتر است.

آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق بگونه‌ای ترتیب داده شده اند که تحلیل دقیق نتایج حاصل از آنها منجر به استخراج فرکانس‌های طبیعی ارتعاش موتور مورد بررسی، می‌شود. از مزیت‌های این

روش نسبت به روش‌های ارائه شده تاکنون این است که در این روش تاثیر تمام اجزای تشکیل دهنده موتور بر فرکانس‌های طبیعی دیده می‌شود. درحالی که اکثر روش‌های ارائه شده برای تشخیص فرکانس‌های طبیعی تنها استاتور را بصورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌دهند. مزیت بعدی این روش نسبت به سایر روش‌ها در این است که با استفاده از این روش می‌توان علاوه بر فرکانس طبیعی ارتعاش استاتور، فرکانس طبیعی سایر قسمت‌ها نظیر درپوش‌ها را نیز تشخیص داد.

در فصل ۵ از این تحقیق یک سیستم تست و اندازه‌گیری همه جانبه‌ای طراحی و پیاده شد که قادر به اندازه‌گیری هم‌زمان مشخصه‌های صوتی و پارامترهای الکتریکی می‌باشد. با استفاده از این سیستم می‌توان هر کدام از پارامترهای سرعت، جریان تحریک و ولتاژ ترمینال را بصورت مستقل و خطی با زمان تغییر داده و هم‌زمان با تغییر هر کدام از این پارامترها، فشار صوت منتشر شده و جریان‌های روتور و استاتور را اندازه‌گیری کرده و ذخیره کرد. نتایج حاصل بصورت تصاویر رنگی استخراج شده و با بهره‌گیری از ابزار پردازش تصویر، پردازش شد. با استفاده از روابط تحلیلی ارائه شده برای ماشین‌های سنکرون و نتایج حاصل از پردازش نتایج حاصل از اندازه‌گیری، منابع کاندید برای ایجاد نویز صوتی غالب پیش‌بینی شد. سپس با استفاده از تحلیل دقیق و همه جانبه منابع غالب در ایجاد نویز صوتی بصورت دقیق پی‌بینی شده‌اند. در این روش نقاط ضعف روش‌های پیشین تا حد ممکن پوشش داده شده است. چرا که روش‌های ذکر شده تا کنون قادر به تشخیص دقیق تمام منابع غالب نبوده و تنها قادر به تعیین مکان ایجاد صوت و یا نوع آن بوده‌اند.

## ۶-۲- پیشنهادات

۱- امروزه استفاده از درایو برای کنترل موتورهای الکتریکی گسترش زیادی پیدا کرده است. اثر متقابل هارمونیک‌های جریان حاصل از درایو با هارمونیک‌های فضایی فاصله هوایی باعث ایجاد نیروهای شعاعی و در نتیجه ارتعاش و نویز صوتی می‌شود که در طیف فشار صوت، فرکانس آنها در

اطراف فرکانس سوئیچینگ و ضرایب صحیحی از آن پراکنده شده است. در این پایان نامه به تشخیص منابع این فرکانس‌ها پرداخته نشده است که می‌توان با فرآیندی مشابه با آنچه در این پایان‌نامه ارائه شد، منابع ایجاد این فرکانس‌ها را نیز تشخیص داد.

۲- موضوع دیگری که امروزه در کاهش نویز صوتی حاصل از درایو مورد توجه قرار گرفته است استفاده از روش‌های RPWM در سوئیچ‌زنی درایو است. بنابراین می‌توان به‌جای ایجاد هارمونیک در جریان استاتور با فرکانسی برابر با فرکانس سوئیچینگ و ضرایب صحیحی از آن، طیف پیوسته‌ای از هارمونیک‌ها را با دامنه بسیار کمتر ایجاد کرد و حتی در محدوده‌های فرکانسی حساس دامنه هارمونیک‌ها را به صفر رساند. این روش مستلزم پیش‌بینی دقیق نویز حاصل از منابع مختلف است. که این کار بسیار پیچیده و تقریباً غیر ممکن است. با این وجود می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری تقویتی<sup>۱۵</sup> فرآیند سوئیچ‌زنی را بصورت بهینه کنترل کرد.

## مراجع

- [1] J. P. A. Bastos and N. Sadowski, *Electromagnetic modeling by finite element methods*. CRC press, 2003.
- [2] J. Pyrhönen, T. Jokinen, and V. Hrabovcová, *Design of Rotating Electrical Machines*. New Delhi, India: John Wiley & Sons, 2008.
- [3] Q. Graham, S. Beckwith, and F. H. Milliken, “Magnetic noise in synchronous machines,” *Electr. Eng.*, vol. 50, no. 5, pp. 344–346, 1931.
- [4] W. J. Morrill, “Harmonic theory of noise in induction motors,” *Am. Inst. Electr. Eng. Trans.*, vol. 59, no. 8, pp. 474–480, 1940.
- [5] P. L. Alger, “The Magnetic Noise of Polyphase Induction Motors [includes discussion],” *Power Appar. Syst. Part III. Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 73, no. 1, 1954.
- [6] E. Erdelyi, “Predetermination of Sound Pressure Levels of Magnetic Noise of Polyphase Induction Motors,” *Power Appar. Syst. Part III. Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 74, no. 3, pp. 1269–1280, 1955.
- [7] H. Jordan, *Geräuscharme Elektromotoren*. W. Girardet, 1950.
- [8] B. Heller and V. Hamata, *Harmonic field effects in induction machines*. Elsevier Science & Technology, 1977.
- [9] S. J. Yang, *Low-noise electrical motors*, vol. 13. Oxford University Press, USA, 1981.
- [10] P. L. Timar , A. Fazekas, J. Kiss, A. Miklos and S. J. Yang, *Noise and vibration of electrical machines*, vol. 34, no. December. Amesterdam: Elsevier, 1989.
- [11] J. F. Gieras, C. Wang, and J. C. Lai, *Noise of polyphase electric motors*. CRC Press Taylor & Francis Group, 2005.
- [12] S. L. Nau and H. G. G. Mello, “Acoustic noise in induction motors: causes and solutions,” in *Petroleum and Chemical Industry Conference, 2000. Record of Conference Papers. Industry Applications Society 47th Annual*, 2000, pp. 253–263.



- [13] B. Kaku, I. Miyashita, S. Sone., B. Kaku, I. Miyashita, and S. Sone, “A novel prediction method of acoustic magnetic noise based on induction motor’s NHCC function,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 46, no. 2, pp. 398–406, 1999.
- [14] W. C. Lo, C. C. Chan, Z. Q. Zhu, L. Xu, D. Howe, and K. T. Chau, “Acoustic Noise Radiated by PWM Controlled Induction Machine Drives,” *{IEEE} Trans. on {I}ndustrial {E}lectronics*, vol. 47, no. 4, pp. 880–889, 2000.
- [15] C. Grabner, “Variable Speed Drive Application Based Acoustic Noise Reduction Strategy,” *Proc. World Congr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 2, 2010.
- [16] H. Tischmacher, I. P. Tsoumas, B. Eichinger, and U. Werner, “Case studies of acoustic noise emission from inverter-fed asynchronous machines,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 5, pp. 2013–2022, 2011.
- [17] P. L. Timar, “Acoustic noise of electromagnetic origin in an ideal frequency-converter-driven induction motor,” *IEE Proc. - Electr. Power Appl.*, vol. 141, no. 6, pp. 341–346, 1994.
- [18] M. Donát and D. Dušek, “Eccentrically mounted rotor pack and its influence on the vibration and noise of an asynchronous generator,” *J. Sound Vib.*, vol. 344, pp. 503–516, 2015.
- [19] D.-J. Kim, H.-J. Kim, J.-P. Hong, and C.-J. Park, “Estimation of Acoustic Noise and Vibration in an Induction Machine Considering Rotor Eccentricity,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 2, pp. 857–860, 2014.
- [20] A. Rezig, M. R. Mekideche, and A. Djerdir, “Effect of rotor eccentricity faults on noise generation in permanent magnet synchronous motors,” *Prog. Electromagn. Res. C*, vol. 15, pp. 117–132, 2010.
- [21] Y. Li, X. Jiang, J. Xia, S. Li, and F. Zhang, “Research of vibration and noise source identification method of surface-mounted permanent magnet synchronous motor,” in *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2013 International Conference on*, 2013, pp. 42–45.
- [22] N. KR and R. KR, “Noise and Vibration Reduction in Permanent Magnet

- Synchronous Motors-A Review.,” *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 2, no. 3, 2012.
- [23] P. Vijayraghavan, S. Member, R. Krishnan, and S. Member, “Noise in Electric Machines : A Review,” vol. 35, no. 5, pp. 1007–1013, 1999.
- [24] J.-P. Lecointe, R. Romary, J.-F. Brudny, and T. Czapla, “Five methods of stator natural frequency determination: case of induction and switched reluctance machines,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 18, no. 5, pp. 1133–1159, 2004.
- [25] Z.-Q. Zhu, *The electromagnetic performance of brushless permanent magnet DC motors - with particular reference to noise and vibration*. The University of Sheffield, 1991.
- [26] Z. Q. Zhu, L. Xu, and D. Howe, “Influence of the fan cowl on the acoustic noise radiated from PWM controlled induction machines,” in *Electric Machines and Drives Conference, 2001. IEMDC 2001. IEEE International*, 2001, pp. 218–224.
- [27] F. Blaabjerg, J. K. Pedersen, E. Ritchie, P. Nielsen, and S. Member, “Determination of Mechanical Resonances in Induction Motors by Random Modulation and Acoustic Measuremen,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, no. 4, pp. 823–829, 1995.
- [28] “Determination of sound power levels of noise sources: Survey method using a reference sound source.” International Standard ISO 3746 Acoustics, 1987.
- [29] “Determination of sound power levels of noise sources: Precision methods for discrete-frequency and narrow-band sources in reverberation rooms.” International Standard ISO 3746 Acoustics, 1988.
- [30] “Determination of the sound power levels of noise sources using sound intensity measurements.” International Standard ISO 9614-2 Acoustics, 1993.
- [31] “Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity, Part 1: Measurement at discrete points.” International Standard

- ISO 9614-2 Acoustics, 1993.
- [32] “Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure: Engineering method in an essentially freefield over a reflecting plane.” International Standard ISO 3746 Acoustics, 1994.
- [33] “Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure: Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane.” International Standard ISO 3746 Acoustics, 1995.
- [34] “Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity, Part 2: Measurement by scanning.” International Standard ISO 9614-2 Acoustics, 1996.
- [35] “Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure: Precision methods for reverberation rooms.” International Standard ISO 3746 Acoustics, 1999.
- [36] “Determination of sound power levels of noise sources: Guidelines for the use of basic standards.” International Standard ISO 3740 Acoustics, 2000.
- [37] “Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure: Comparison method in situ.” International Standard ISO 3746 Acoustics, 2000.
- [38] “Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity, Part 3: Precision method for measurement by scanning.” International Standard ISO 9614-2 Acoustics, 2002.
- [39] “Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure: Precision methods for anechoic and Semi-anechoic rooms.” International Standard ISO 3746 Acoustics, 2003.
- [40] “Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure: Engineering methods for small, movable sources in reverberant fields.” International Standard ISO 3746 Acoustics.
- [41] “Rotating electrical machines – Part 9: Noise limits.” International Standard CEI/IEC 60034-9, 2003.
- [42] “Part 9: Rotating Electrical Machines—Sound power limits and

- measurement procedures.” NEMA General standards applying to all machines, 1998.
- [43] “IEEE Test Procedure for Airborne Sound Measurements on Rotating Electric Machinery.” IEEE, 1980.
- [44] W. Zai-zhou, Z. Chun-xiang, J. Ren-pu, W. Zhong-liang, S. Qiang, and Z. Cheng-ning, “Research on noise spectrum characteristics of traction motor system for electric buses based on sound intensity,” in *Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on*, 2008, pp. 656–659.
- [45] A. Cavagnino, S. Saied, and S. Vaschetto, “Experimental identification and reduction of acoustic noise in small brushed DC motors,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 1, pp. 317–326, 2014.
- [46] Q. Wang, K. Yan, and H. Li, “Motor Noise Source Identification Based on Frequency Domain Analysis,” in *International Conference on mechatronics and Automation*, 2009, pp. 2373–2377.
- [47] C. Ma, Q. Liu, D. Wang, Q. Li, and L. Wang, “A Novel Black and White Box Method for Diagnosis and Reduction of Abnormal Noise of Hub Permanent Magnet Synchronous Motors for Electric Vehicles,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 0046, no. 4, pp. 1–1, 2015.
- [48] M. Sarrazin, S. Gillijns, K. Janssens, H. V. A. N. D. E. R. Auweraer, and K. Verhaeghe, “Vibro-acoustic measurements and techniques for electric automotive applications,” *INTER-NOISE NOISE-CON Congr. Conf. Proc.*, vol. 249, no. 2, pp. 1–10, 2014.
- [49] C. Ma and S. Zuo, “Black-Box Method of Identification and Diagnosis of Abnormal Noise Sources of Permanent Magnet Synchronous Machines for Electric Vehicles,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 10, pp. 5538–5549, 2014.
- [50] M. Söderback, “DETERMINATION OF SOUND POWER LEVELS USING SOUND INTENSITY.” VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, p. 89 + 4 Appendices, 2009.

- 
- [51] M. Schroeder, T. D. Rossing, F. Dunn, W. M. Hartmann, D. M. Campbell, and N. H. Fletcher, "Springer handbook of acoustics," 2007.
- [52] F. J. Fahy, "International standards for the determination of sound power levels of sources using sound intensity measurement: An exposition," *Appl. Acoust.*, vol. 50, no. 2, pp. 97–109, 1997.
- [53] W. T. W. B. Cory, *Fans & Ventilation A Practical Guide*. Elsevier, 2005.
- [54] M. N. Anwar and I. Husain, "Radial force calculation and acoustic noise prediction in switched reluctance machines," *Ind. Appl. IEEE Trans.*, vol. 36, no. 6, pp. 1589–1597, 2000.
- [55] A. Rezig, M. R. Mekideche, and A. Djerdir, "Impact of eccentricity and demagnetization faults on magnetic noise generation in Brushless Permanent Magnet DC Motors," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 3, pp. 356–363, 2011.
- [56] J. C. L. Jacek F. Gieras, Chong Wang, *Noise of Polyphase Electric Motors*. CRC press(Publisher: Taylor & Francis), 2006.
- [57] D. Mirabbasi, G. Seifossadat, and M. Heidari, "Effect of unbalanced voltage on operation of induction motors and its detection," *2009 Int. Conf. Electr. Electron. Eng. - ELECO 2009*, pp. 189–192, 2009.
- [58] P. S. Bimbhra, *Electrical Machinery: Theory, Performance and Applications*. Khanna, 1979.

## A پیوست

محاسبه شاخص‌های میدان صوت مطابق با استاندارد ISO 6914-1

### A.1 General

Evaluate field indicators according to equations (A.1) to (A.9) for each measurement surface and array used, in each frequency band used for the determination of sound power level.

### A.2 definition of field indicators

#### A.2.1 temporal variability indicator of the sound field

Evaluate a typical value of the temporal variability indicator,  $F_1$  of the sound field at an appropriate position selected on the measurement surface and calculated from equation (A.1):

$$F_1 = \frac{1}{I_n} \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (I_{nk} - \bar{I}_n)^2} \quad (A.1)$$

Where

$\bar{I}_n$  is the mean value of  $I_n$  for  $M$  short-time average samples  $I_{nk}$  calculated from equation (A.2):

$$\bar{I}_n = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M I_{nk} \quad (A.2)$$

NOTE  $M$  will normally take a value of 10. Are commended short averaging time is between 8 s and 12 s, or any integer number of cycles for periodic signals.

#### A.2.2 surface pressure-intensity indicator

Calculate the surface pressure-intensity indicator,  $F_2$  from equation (A.3):

$$F_2 = \bar{L}_p - \bar{L}_{I_n} \quad (A.3)$$

Where  $\bar{L}_p$  is the surface sound pressure level, in decibels, calculated from equation (A.4):

$$\bar{L}_p = 10 \log \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0.1L_{pi}} \right) \text{ dB} \quad (A.4)$$

And

$\bar{L}_{I_n}$  is the surface normal intensity level, in decibel, calculated from equation (A.5):

$$\bar{L}_{|I_n|} = 10 \log \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |I_{ni}| / I_0 \right) \text{ dB} \quad (A.5)$$

Where  $|I_{ni}|$  is the unsigned normal sound intensity at measurement position  $i$ .

#### A.2.3 Negative power indicator

Calculate the negative partial power indicator  $F_3$ , from equation (A.6):

$$F_3 = \bar{L}_p - \bar{L}_{I_n} \quad (A.6)$$

Where

$\bar{L}_p$  is the surface sound pressure level, in decibel calculated from equation (A.4):

$\bar{L}_{I_n}$  is the surface normal signed intensity level, in decibels, calculated from equation (A.7):

$$\bar{L}_{I_n} = 10 \log \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{ni} / I_0 \right| \text{ dB} \quad (A.7)$$

And

$I_{ni}$  is the signed magnitude of the normal sound intensity component measured at position  $I$  on the measurement surface.

$I_0$  is the reference sound intensity ( $= 10^{-12}$  W/m<sup>2</sup> .)

If the normal sound intensity component level  $L_{I_n}$  at position i expressed as XX dB, calculate the value of  $I_{ni}$  from the equation

$$I_{ni} = I_0 \times 10^{XX/10}$$

If the normal sound intensity component level  $L_{I_n}$  at position i expressed as (-) XX dB, calculate the value of  $I_{ni}$  from the equation

$$I_{ni} = -I_0 \times 10^{XX/10}$$

If  $\sum_{i=1}^N I_{ni} / I_0$  is negative in any frequency band, the test condition do not satisfy the requirements of this part of ISO 9614 in that frequency band.

#### A.2.4 field non-uniformity indicator

Calculate the field non-uniformity indicator,  $F_4$ , from equation (A.8)

$$F_4 = \frac{1}{I_n} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (I_{ni} - \bar{I}_n)^2} \quad (A.8)$$

Where  $\bar{I}_n$  is the surface normal sound intensity calculated from equation (A.9):

$$\bar{I}_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{ni} \quad (A.9)$$

#### A.3 Pressure-residual intensity index $\delta_{pI}$

The difference between the  $L_p$  and the indicated  $L_{In}$  when the intensity prob is placed and oriented in a sound field such

that the sound intensity is zero. it is expressed in decibels.

Details for determining  $\delta_{pI}$  are given in IEC 1043. In this case only, the subscript “n” indicates the direction of the probe axis.

$$\delta_{pI} = (L_p - L_{In}) \quad (A.10)$$

#### A.4 dynamic capability index, $L_d$

$$L_d = \delta_{pI} - K \quad (A.11)$$

It is expressed in decibels.

The value of K is selected according to the grade of accuracy required (see table1).

Table 1 – Bias error factor, K

Grade of accuracy	Bias error factor dB
Orecision (grade 1)	10
Engineering(grade 2)	10
Survey (grade 3)	7

Table 2- values for factor C

Octave band	One-third-octave band	Grade		
		1	2	3
63-25	50-60	19	11	
250-500	200-63	29	19	
1000-4000	800-5000	57	29	
	6300	19	14	
A-weighte				8

## پیوست B

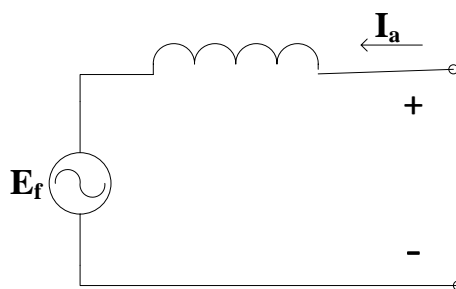
تأثیر جریان تحریک بر نویز الکترومغناطیسی ناشی از اثر متقابل بین چگالی شار روتور و

### چگالی شار استاتور

با تغییر جریان تحریک روتور چگالی شار روتور تغییر کرده و در نتیجه آن چگالی شار استاتور نیز تغییر می‌کند. بنابر این می‌توان فشار مغناطیسی ناشی از اثر متقابل بین چگالی شار روتور و استاتور را بصورت تابعی از چگالی شار روتور تعریف کرد. شار مغناطیسی ناشی از اثر متقابل بین روتور و استاتور بصورت زیر است:

$$p_{sr}(B_r) = B_r B_s(B_r) \quad (B.1)$$

در رابطه بالا  $B_s$  چگالی شار استاتور بوده و تابع چگالی شار روتور ( $B_r$ ) است. و فشار مغناطیسی ناشی از اثر متقابل بین چگالی شار روتور و استاتور است. حال باید تابع  $B_s(B_r)$  استخراج شود. با در نظر گرفتن مدار معادل یک فاز موتور سنکرون بصورت شکل (B.1)، دیاگرام فازوری برای عمل کرد پسفاز بصورت نشان داده شده در شکل (B.2) خواهد بود.

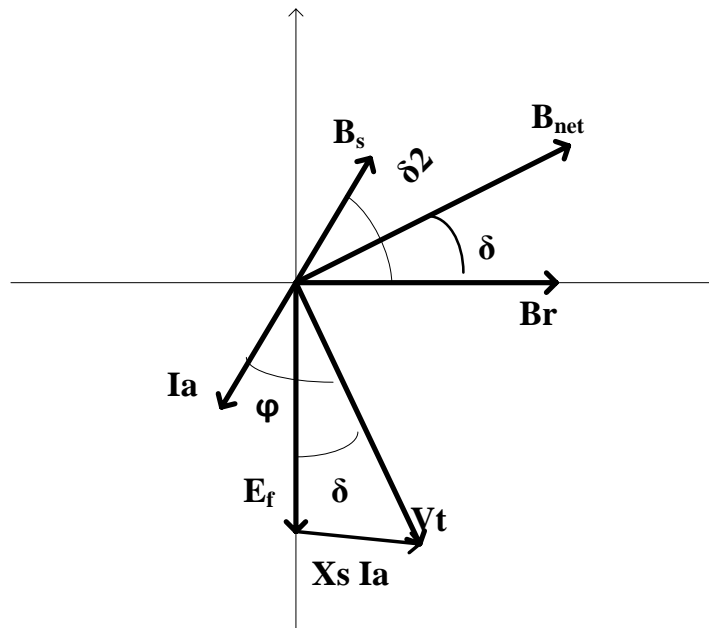


شکل (B.1): مدار معادل تک فاز موتور سنکرون

$I_a$  جریان سیم‌پیچی استاتور،  $V_t$  ولتاژ ترمینال و  $E_f$  ولتاژ القایی داخلی است. مطابق با دیاگرام فازوری،

رابطه ( ) بین چگالی شار فاصله هوایی، چگالی شار روتور و چگالی شار استاتور برقرار است.





شکل (B.2): دیاگرام فازوری موتور سنکرون در شرایط عمل کردی پسفاز

$$B_s^2 + B_r^2 + 2B_s B_r \cos(\delta_2) = B_{net}^2 \quad (B.2)$$

در رابطه بالا باید  $\delta_2$  بصورت تابعی از  $B_r$  نوشته شود. در این صورت می توان با حل معادله بالا  $B_s$  را بر حسب  $B_r$  نوشت.  $B_{net}$  دامنه چگالی شار فاصله هوایی است. در شرایط عملکردی بی بار، توان خروجی موتور صرف تلفات اصطکاکی می شود و تغییر دامنه چگالی شار روتور تاثیری بر میزان تلفات مکانیکی ندارد. بنابراین با تغییر دامنه چگالی شار روتور، توان و گشتاور خروجی ثابت هستند. برای به دست آوردن  $\delta_2$  بر حسب  $B_r$  بصورت می توان بصورت زیر عمل کرد [۵۸].

$$T = K_\tau B_r B_{net} \sin(\delta) \quad (B.3)$$

رابطه بالا  $T$  گشتاور موتور است و  $K_\tau$  یک ضریب ثابت است. رابطه بالا را می توان بصورت زیر نیز نوشت.

$$\sin(\delta) = \frac{K_1}{B_r} \quad (B.4)$$

که در رابطه بالا  $K_1 = \frac{\mu_0 P_{out}}{2\pi^2 R L B_{net} g f}$  است. از طرف دیگر داریم:

$$\begin{cases} p_{out} = V_t I_a \cos(\varphi) \\ p_{out} = \frac{E_f V_t}{X_s} \sin(\delta) \end{cases} \Rightarrow \cos(\varphi) = \frac{E_f}{X_s I_a} \sin(\delta) \quad (\text{B.5})$$

$$\left. \begin{aligned} \vec{E}_f &= -jk\vec{B}_r \\ \vec{V}_t &= -jk\vec{B}_{net} = -jk(\vec{B}_r + \vec{B}_s) = \vec{E}_f - jk\vec{B}_s \\ \vec{V}_t &= \vec{E}_f + j\vec{X}_s I_a \end{aligned} \right\} \Rightarrow jX_s \vec{I}_a = -jk\vec{B}_s \quad (\text{B.6})$$

با استفاده از دو رابطه بالا می‌توان نوشت:

$$\cos(\varphi) = \frac{B_r}{B_s} \sin(\delta) \quad (\text{B.7})$$

از طرفی با توجه به دیاگرام فازوری داریم:

$$\delta_2 = 90 + \delta - \varphi \quad (\text{B.8})$$

با جایگذاری  $\varphi$  از رابطه (B.7) در (B.8) می‌توان نوشت:

$$\delta_2 = 90 + \delta - \cos^{-1}\left(\frac{B_r}{B_s} \sin(\delta)\right) - \delta \quad (\text{B.9})$$

بنابراین داریم:

$$\cos(\delta_2) = \sin\left(\cos^{-1}\left(\frac{B_r}{B_s} \sin(\delta)\right) - \delta\right) \quad (\text{B.10})$$

می‌توان متغیر  $\alpha$  را به صورت زیر تعریف کرد و رابطه (B.10) را بصورت (B.12) نوشت.

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{B_r}{B_s} \sin(\delta)\right) - \delta \quad (\text{B.11})$$

$$\cos(\delta_2) = \sin(\alpha) \quad (\text{B.12})$$

حال می توان  $\sin(\alpha)$  را بصورت زیر بسط داد:

$$\begin{aligned}\sin(\alpha) &= \sin\left(\cos^{-1}\left(\frac{B_r}{B_s}\sin(\delta)\right) - \delta\right) \\ &= \sin\left(\cos^{-1}\left(\frac{B_r}{B_s}\sin(\delta)\right)\right)\cos(\delta) - \frac{B_r}{B_s}\sin^2(\delta)\end{aligned}\quad (\text{B.13})$$

متغیر  $\gamma$  بصورت (B.14) تعریف می شود. با استفاده از (B.14) می توان (B.13) را بصورت (B.15) نوشت.

$$\frac{B_r}{B_s}\sin(\delta) = \cos(\gamma) \Rightarrow \sin(\gamma) = \sqrt{1 - \frac{B_r^2}{B_s^2}\sin^2(\delta)} \quad (\text{B.14})$$

$$\sin(\alpha) = \sqrt{1 - \frac{B_r^2}{B_s^2}\sin^2(\delta)} \times \cos(\delta) - \frac{B_r^2}{B_s^2}\sin^2(\delta) \quad (\text{B.15})$$

با جای گذاری  $\sin(\delta)$  از رابطه (B.4) در (B.15)، داریم:

$$\sin(\alpha) = \sqrt{1 - \frac{B_r^2 K_1^2}{B_s^2 B_r^2}} \times \sqrt{1 - \frac{K_1^2}{B_r^2} - \frac{B_r^2 K_1^2}{B_s^2 B_r^2}} \quad (\text{B.16})$$

با استفاده از (B.12) و (B.16) می توان رابطه ( ) را بصورت زیر نوشت:

$$B_s^2 + B_r^2 + 2B_r B_s \left( \sqrt{\frac{B_s^2 - K_1^2}{B_s^2}} \times \sqrt{\frac{B_r^2 - K_1^2}{B_r^2} - \frac{K_1^2}{B_r B_s}} \right) = B_{net}^2 \quad (\text{B.17})$$

حال می توان با استفاده از رابطه (B.17) چگالی شار استاتور  $B_s$  را بر حسب چگالی شار

روتور  $B_r$  بصورت زیر به دست آورد.

$$B_s^2 + B_r^2 + 2\sqrt{(B_s^2 - K_1^2)(B_r^2 - K_1^2)} - 2K_1^2 = B_{net}^2$$

$$(B_s^2 - K_1^2) + (B_r^2 - K_1^2) + 2\sqrt{(B_s^2 - K_1^2)(B_r^2 - K_1^2)} = B_{net}^2$$

$$\sqrt{(B_s^2 - K_1^2)} + \sqrt{(B_r^2 - K_1^2)} = B_{net}$$

بنابراین داریم:

$$B_s = \sqrt{\left(B_{net} - \sqrt{B_r^2 - K_1^2}\right)^2 + K_1^2} \quad (\text{B.18})$$

برای عمل کرد پیشیغاز نیز می‌توا بصورت بالا عمل کرد. و  $B_s$  را بصورت زیر نوشت.

$$B_s = \sqrt{\left(-B_{net} + \sqrt{B_r^2 - K_1^2}\right)^2 + K_1^2} \quad (\text{B.19})$$

با صرف نظر اثر شیار می‌توان نوشت:

$$p_{rs} = B_r B_s \propto F_r \cdot F_s = F_r \sqrt{\left(F_{net} - \sqrt{F_r^2 - F_0^2}\right)^2 + F_0^2} \quad (\text{B.20})$$

$$F_0 = \frac{60P_{out}}{np\pi^2 DLF_{net}} \quad (\text{B.21})$$

## **Abstract**

In many of the previous researches about the acoustic noise radiated from electrical machines, the effects of structural parameters are discussed. Nevertheless, there is a great debate about the effect of operational parameters on acoustic noise characteristics radiated from the electrical machines. This research aims to study the effect of operational parameters and brief comparison between the acoustic noise radiated from induction and synchronous motors. For this purpose, a wound-rotor induction motor has been chosen as a test motor. Consequently, with the aim of investigating the effect of operational parameters, the analytical formulae are represented and then evaluated with experimental results. Moreover, this research studies the noise source identification methods. Firstly, the dominant noise source of the test motor has been located by scanning the sound pressure values over the surrounding area around the test motor. This method has been used in many researches. Furthermore, a novel method has been presented to identify the dominant noise sources. In the proposed method, the experiments have been accomplished in three different modes. In each mode, one of the operational parameters including speed, terminal voltage, and field current has been considered as independent variable whose value varies linearly with time in a predetermined range. Simultaneously, the sound pressure radiated from the test motor has been measured and saved. The post-processing analysis then accurately determined the dominant noise sources of the test motor.

**Keywords:** Electrical machines, synchronous motor, acoustic noise measurement, natural frequency, acoustic noise sources identification, machine noise response analysis



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Electrical and Robotic Engineering**

**Thesis Submitted for the Degree of Master of Science**

**Analysis and comparison of acoustic noise  
characteristics of a wound-rotor induction motor and a  
synchronous motor**

**Saeed Akbarpour**

Supervisor:

**Dr. Ahmad Darabi**

Advisor:

**Dr. Hossein Marvi**

**February  
2016**