



اصلاح و بهبود ارتعاشات فن‌های هوایی با افزایش سختی و تغییر فرکانس‌های طبیعی سازه

بهمن پورمحمد^۱، عرفان میرشکاری^{۲*}

۱. کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲. استادیار گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: Erfan.mirshekari@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۱

چکیده

در این پژوهش به بررسی علل ارتعاشات بیش از حد مجاز فن‌های هوایی سیستم خنک کننده کمپرسورهای تزریق گاز پرداخته شده است. با بررسی طیف ارتعاشی سازه مشخص گردید، فرکانس غالب مربوط به یک برابر دور الکتروموتور می باشد و با بررسی عوامل ایجاد کننده آن، عامل اصلی ارتعاشات، نزدیک بودن فرکانس طبیعی به فرکانس یک برابر دور الکتروموتور شناسایی شد. بیشترین مقدار ارتعاشات بر اساس سوابق اندازه گیری مربوط به فن C به میزان $RMS \frac{mm}{s} 36/96$ بود. سپس با استفاده از اندازه گیری ارتعاشات سازه و انجام آنالیز تغییر شکل و مودال حین کارکرد و استفاده از نرم افزارهای مربوطه فرکانس‌های طبیعی سازه استخراج و با استفاده از نرم افزار و روش اجزاء محدود، مدل هندسی سازه فن، ترسیم و نزدیکترین مدل به شرایط واقعی شبیه سازی گردید. با مقایسه فرکانس‌های طبیعی سازه در مدلسازی هندسی و روش تجربی از صحت مدلسازی اطمینان به عمل آمد. به منظور اصلاح سازه و کاهش ارتعاشات، کم هزینه ترین روش اصلاح با افزایش سختی سازه از طریق جوشکاری بخشی از سازه در مدل نرم افزاری اعمال و با توجه به مثبت بودن نتایج، اصلاحات مد نظر به صورت عملی بر روی سازه فن‌های هوایی اعمال شد. اصلاحیه عملی منجر به تغییر دومین فرکانس طبیعی از $24/53$ هرتز به $28/22$ هرتز و ایجاد فاصله مطمئن از فرکانس تحریک گردید. اصلاحیه مذکور منجر به کاهش مقدار ارتعاشات از $rms \frac{mm}{s} 36/96$ به $rms \frac{mm}{s} 3/87$ گردید و طبق استاندارد ایزو ۱۴۶۹۴ در محدوده قابل قبول قرار گرفت.

واژه های کلیدی

فن هوایی، فرکانس یک برابر دور، آنالیز تغییر شکل، آنالیز مودال حین کارکرد، فرکانس‌های طبیعی

مقدمه

یکی از متداول ترین تجهیزاتی که در اکثر واحدهای صنعت نفت در جهان برای کاهش دمای سیالات مورد استفاده قرار می گیرد، فن‌های هوایی می باشند. در این مبدل‌ها برای کاهش دمای سیال داخل لوله‌ها، از هوای محیط استفاده می کنند. اجزای اصلی این مبدل‌ها شامل لوله، فن، الکتروموتور، کنترل کننده سرعت چرخش فن و تجهیزات لازم برای هدایت جریان می باشد. در این مبدل‌ها جریان سیال گرم پس از عبور از یک نازل وارد لوله‌ها می شود و با توجه به پره‌هایی که روی دیواره بیرونی لوله قرار دارند، کار انتقال حرارت را سریع تر انجام می دهند. از مهم ترین مزایای استفاده از فن‌های هوایی می توان به مواردی همچون در دسترس بودن سیال خنک کننده هوا در مقادیر نامحدود، عدم وجود اثرات منفی زیست محیطی، سهولت در انتخاب جنس مبدل تنها بر اساس نوع سیال فرآیندی به دلیل غیرخورنده بودن هوا و مقرون به صرفه بودن هزینه نگهداری کولرهای هوایی اشاره نمود. در تمامی صنایع که به نحوی با ارتعاشات در ارتباط می باشند، تجزیه و تحلیل ارتعاشات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و بنا به موقعیت اقتصادی و توسعه یافتگی صنایع، روش‌های مختلفی برای انجام فرآیند تجزیه و تحلیل وجود دارد که از روش سعی و خطا گرفته تا استفاده از سخت



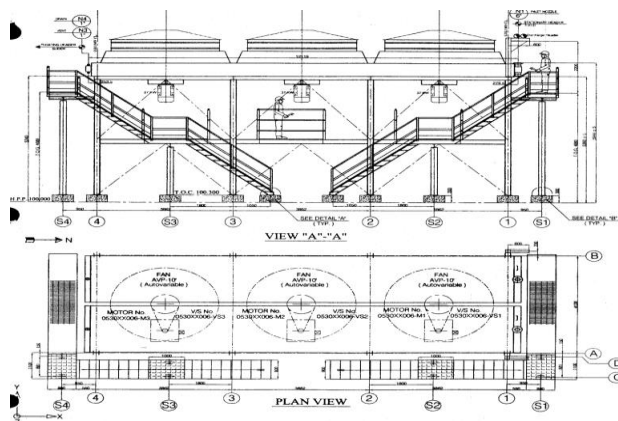
افزار و نرم افزارهای تحلیلی را شامل می‌شود. ارتعاشات تجهیزات دوار ارتباط مستقیمی با وضعیت آنها دارد و هرگونه تغییر هر چند جزئی در وضعیت تجهیز با تغییر در وضعیت ارتعاشات آن همراه خواهد بود. امروزه طراحی سازه‌های پیچیده مکانیکی به گونه‌ای است که علاوه بر مقاومت بالا باید دارای وزن کم و انعطاف پذیری باشند. این نیازهای جدید در طراحی، پتانسیل بروز ارتعاشات ناخواسته را افزایش می‌دهد. از این‌رو بررسی علل ارتعاشی و یافتن راه حل‌هایی برای کاهش آن، از اهمیت ویژه‌ای در افزایش طول عمر و راندمان تجهیزات دوار از جمله فن‌های هوایی برخوردار است. ارتعاش تجهیزات مکانیکی منجر به سایش یاتاقان‌ها، ترک خوردگی، لق شدن اتصالات و بروز اختلال در رله‌های الکتریکی می‌شود. ارتعاشاتی که منجر به خرابی و شکست می‌شوند، باید شناسایی و اصلاح شوند. از نظر آماری بیشترین کار نگهداری و تعمیرات روی تجهیزات دوار از قبیل پمپ‌ها، کمپرسورها، توربین‌ها، فن‌ها و الکتروموتورها انجام می‌شود و ارتعاش می‌تواند نشانه‌ای از یک عیب داخلی باشد و پیش بینی کننده‌ای خیلی حساس و سریع برای پیشرفت عیوب می باشد. بنی هاشمی و همکاران [۱] شبیه سازی تحلیل مودال یک پمپ عمودی خط نورد گرم فولاد مبارکه اصفهان را در نرم افزار آباکوس انجام داده و فرکانس‌های طبیعی حاصل را با نتایج تجربی حاصل از دستگاه ارتعاش سنج $64XR$ مقایسه نمودند. ایشان دریافتند که یکی از فرکانس‌های طبیعی سیستم نزدیک به دور کاری پمپ می‌باشد. ایشان با اضافه نمودن تعدادی بوش به عنوان تکیه‌گاه، فرکانس طبیعی سیستم را تغییر داده و از وقوع پدیده تشدید جلوگیری نمودند. ابراهیمی و همکاران [۲] به بررسی راهکارهای غیر سازه‌ای و اصلاحات سازه‌ای برای کاهش ارتعاشات فن‌های با گرداننده دور متغیر پرداختند. ایشان در بررسی‌های خود با در نظر گرفتن شرایط کاری و اندازه گیری‌های انجام شده، تشدید را به عنوان علت ارتعاشات در سازه فن تشخیص دادند. راهکار غیرسازه‌ای پیشنهاد شده، مبتنی بر حذف منبع ارتعاش بود و در این مورد، عدم کارکرد فن در محدوده دور بحرانی پیشنهاد گردید. در این بررسی برای کاهش ارتعاشات سازه فن بیشتر بر روی تغییرات سازه‌ای تکیه شده است. بر این اساس پیشنهاد شد با افزودن تیرهای ضربدری در صفحه افقی و تیرهای قطری ضربدری و در نتیجه افزایش سفتی سازه را در راستای ارتعاشات ناخواسته، فرکانس طبیعی سازه افزایش یافته و بدین طریق نیروی تحریک که از فن ناشی می‌شود در محدوده کارکرد آن توانایی ایجاد چنان ارتعاشاتی را نخواهد داشت. اولریکسون و همکاران [۳] به تحلیل مودال حین کارکرد تیغه‌های بلند توربین بادی پرداختند. ایشان به منظور بررسی خرابی به تجزیه و تحلیل شکل‌های مود از انتقال موجک به صورت پیوسته و یک بعدی پرداختند. ایده اساسی روش ایشان این بود که آسیب‌ها و خرابی‌های سازه‌ای باعث ایجاد شکل‌های مود بی‌نظم محلی می‌شوند. ایشان به این نتیجه رسیدند که با توجه به ماهیت روش پیشنهاد شده نتایج حاصل بسیار بستگی به تعداد نقاط اندازه‌گیری دارند. در واقع در نظر گرفتن تعداد محدودی نقاط اندازه‌گیری در آزمایش تجربی نتایج را محدود کرده و منجر به شناسایی مود حساس به تنها یک خرابی مشخص می‌شود. ریزو پاترون و همکاران [۴] به تحلیل مودال حین کارکرد تیغه روتور هلیکوپتر با استفاده از همبستگی تصاویر دیجیتال پرداختند. ایشان در پژوهش خود از یک روتور با قطر دو متر استفاده کردند. تصاویر دیجیتالی در دور ۹۰۰ دور در دقیقه با استفاده از یک جفت دوربین با سرعت ۱۰۰۰ فریم بر ثانیه ثبت شدند. با استفاده از این تصاویر تغییر شکل در نتیجه خم شدن پره‌ها اندازه‌گیری و پارامترهای مودال شامل فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها با کمک روش ابراهیم تایم دومین^۱ بدست آوردند. ایشان نتایج حاصل را با مدل‌سازی عددی انجام شده مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که نتایج حاصل از آزمایش تجربی و مدل‌سازی عددی همخوانی خوبی با هم دارند، به گونه‌ای که فرکانس‌های طبیعی بدست آمده در بهترین حالت ۲٪ و در بدترین حالت ۱۰٪ با هم اختلاف داشتند. پراوول و همکاران [۵] به بررسی تجربی و تحلیل عددی پاسخ لرزه‌های یک توربین بادی ۶۵ کیلوواتی با ارتفاع ۲۳ متر پرداختند. ایشان در مدل‌سازی عددی خود از دو مدل متفاوت استفاده کردند. ایشان در مدل‌سازی اول توربین را به صورت یک ستون عمودی که دارای یک جرم متمرکز در بالای آن بود مدل کردند و در مدل‌سازی دوم قسمت روتور و پره‌ها را با جزئیات بیشتری در نظر گرفتند. ایشان پس از مقایسه نتایج تجربی و تحلیل عددی به این نتیجه رسیدند که برای اولین مود خمشی

¹ Ibrahim Time Domain



نتایج تجربی و عددی همخوانی خوبی با هم دارند اما برای دومین مود که در حدود ۱۰ هرتز بود، همخوانی بین نتایج تجربی و عددی تا حدودی کم بود.

در این پژوهش علل ارتعاشات بیش از حد مجاز فن‌های هوایی سیستم خنک کننده کمپرسورهای تزریق گاز مورد بررسی قرار می‌گیرد. این پژوهش در یکی از واحدهای بهره‌برداری نفت و گاز ایران، در جنوب استان خوزستان، انجام گرفته است. فن‌های هوایی مطابق شکل (۱)، دارای تنوره‌ای با قطر ۳۰۴۸ میلیمتر بوده که به عنوان خنک کننده آب الکتروموتورهای کمپرسورهای تزریق گاز واحد بهره‌برداری نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند. این فن از نوع فن‌های دمنده با تعداد ۴ عدد پره و دور نامی ۳۱۰ دور بر دقیقه می‌باشد و یاتاقان‌های آن از نوع UCF 316 و ۲۲۳۱۶ می‌باشند. جهت راه‌اندازی این فن‌ها از الکتروموتور ۴۰۰ ولتی با توان ۳۷ کیلو وات و دور نامی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه استفاده شده است. یاتاقان‌های الکتروموتور به ترتیب ۳۱۳ NU برای سمت محرک و -Z- ۶۲۱۳C3 برای سمت متحرک می‌باشد. انتقال قدرت در این فن به وسیله یک عدد تسمه تایمینگ انجام می‌گیرد. در زمان کارکرد دو یا سه دستگاه از الکتروموتورهای مذکور، ارتعاشات الکتروموتور فن‌ها نوسانی بوده و در دامنه ارتعاشات بین ۲ تا ۳۷ میلیمتر بر ثانیه نوسان می‌کند. لازم به ذکر است که بر اساس استاندارد ایزو ۱۴۶۹۴ سطح هشدار برای ارتعاشات فن‌های هوایی مورد استفاده در صنایع $11/8 \frac{mm}{s} rms$ می‌باشد. ولی در زمان کارکرد یک فن، بیشینه ارتعاشات در جهت عمود بر تسمه در حدود $36/96 \frac{mm}{s} rms$ است که بسیار بیشتر از سطح ارتعاشات مجاز در استاندارد فوق می‌باشد.

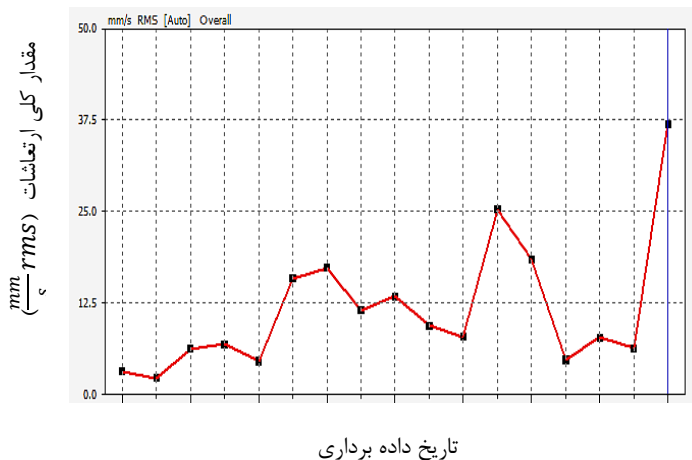


شکل ۱: نقشه نحوه قرارگیری فن‌های هوایی

مهمترین اهداف پژوهش حاضر بررسی عوامل مؤثر بر ارتعاشات الکتروموتورهای هوایی، محاسبه و تعیین فرکانس‌های طبیعی سیستم و مقایسه با فرکانس تحریک، انجام اصلاحات بر روی سازه فن یا فن هوایی جهت کاهش ارتعاشات و بهبود شرایط کارکردی و کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات و کاهش زمان خرابی می‌باشد.

روش تحقیق

بر اساس استاندارد ایزو ۱۰۸۱۶-۲ داده برداری ارتعاشی از تجهیزات باید در نزدیکترین نقطه از محل نصب یاتاقان‌ها و در سه جهت عمودی و افقی (بر مبنای تسمه) و محوری (بر مبنای شافت) که به ترتیب با V ، H و A نشان داده می‌شوند، انجام گیرد. نام‌گذاری جهت‌های اندازه‌گیری برای تجهیزاتی که به صورت عمودی نصب می‌شوند، مانند الکتروموتورهای فن‌های هوایی کاملاً قراردادی می‌باشد. بررسی سابقه ارتعاشی الکتروموتور فن A که بیشترین مقدار ارتعاشات نسبت به الکتروموتور فن‌های B و C را داشته است نشان‌دهنده نوسانی بودن ارتعاشات آن از زمان نصب می‌باشد که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: روند ارتعاشات الکتروموتور فن A

با توجه به بالا بودن ارتعاشات الکتروموتور فن A، دو عامل تاثیر جریان هوای ورودی و عملکرد سایر فن‌ها بر ارتعاشات آن مورد بررسی قرار گرفت.

بررسی تأثیر جریان هوا

طبق مدارک فنی سازنده، زاویه حمله پره‌های فن بین 5° و $5^\circ+$ نسبت به سطح افق می‌تواند تغییر کند. به این منظور زاویه پره‌های فن شماره A در محدود مجاز فوق‌الذکر تغییر داده شد و در هر مرحله از الکتروموتور فن داده برداری انجام و نتایج مطابق جدول (۱) ثبت گردید.

جدول ۱: ارتعاشات در زوایای مختلف حمله پره‌های فن

ارتعاشات در زوایای مختلف پره (mm/s rms)					نقطه داده برداری
5°	2°	0°	-5°	-5°	
۲/۵ ~ ۲۶/۸	۳ ~ ۲۷	۲/۷ ~ ۲۶/۳	۲/۵ ~ ۲۶	۲ ~ ۲۶	جهت عمود بر تسمه

بنابراین بر اساس نتایج بدست آمده از تغییر زاویه حمله پره‌های فن مشخص گردید که حجم جریان هوای عبوری از روی پره‌ها تأثیری بر روی ارتعاشات الکتروموتور فن هوایی ندارد.

بررسی تأثیر عملکرد سایر فن‌ها

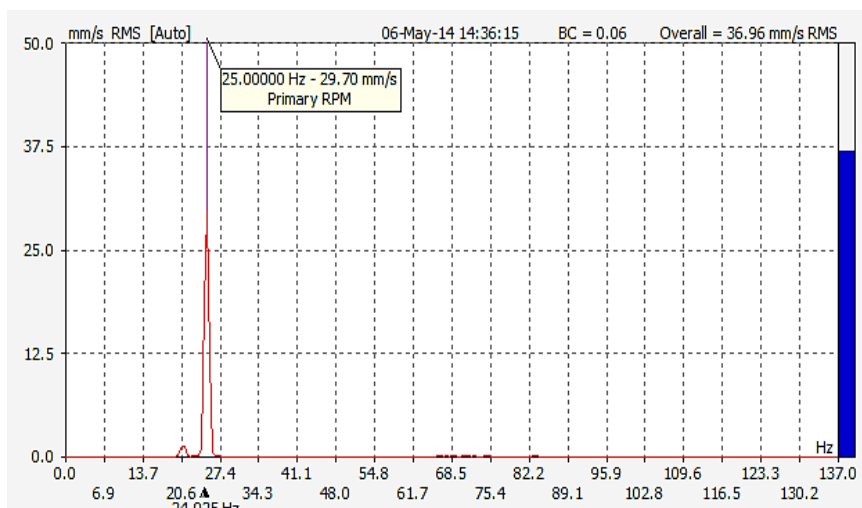
در حالتی که فن‌های A و B در سرویس باشد میزان ارتعاشات در جهت عمود بر تسمه الکتروموتور A به صورت نوسانی از $2 \frac{mm}{s} rms$ تا $18/5 \frac{mm}{s} rms$ تغییر می‌کند. در حالتی که فن‌های A و C در سرویس باشد مقدار ارتعاشات همان نقطه در الکتروموتور فن A تقریباً ثابت و در حدود $9 \frac{mm}{s} rms$ می‌باشد. بنابراین کارکرد فن B تأثیر بیشتری بر ارتعاشات فن A داشته و باعث افزایش مقدار ارتعاشات می‌گردد. با توجه به نتیجه حاصل از کارکرد فن C بر روی فن A مشاهده گردید که با افزایش فاصله، تأثیر کارکرد سایر فن‌ها بر ارتعاشات فن A کمتر می‌شود. یکی از مهم‌ترین عوامل وقوع چنین اتفاقی می‌تواند ضعیف بودن سازه باشد.



بررسی عیوب احتمالی سازه فن

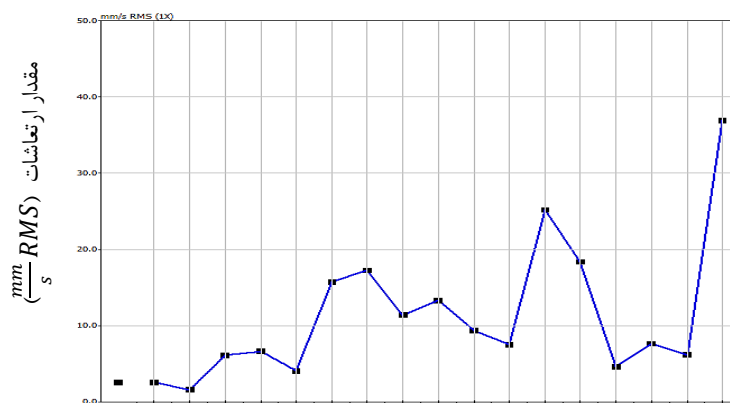
بررسی طیف ارتعاشی الکتروموتور فن A مطابق شکل (۳) نشان می‌دهد که فرکانس غالب ارتعاشات مربوط به سرعت کاری یا فرکانس یک برابر دور الکتروموتور فن می‌باشد. سرعت کاری الکتروموتور فن‌های هوایی ۱۵۰۰ دور در دقیقه و فرکانس یک برابر دور الکتروموتور (سرعت کاری بر دقیقه) برابر ۲۵ هرتز می‌باشد.

بیشترین مقدار ارتعاشات در الکتروموتور در جهت عمود بر تسمه به میزان $\frac{36}{96} \text{ mm/s}$ ثبت شد.



شکل ۳: طیف ارتعاشات الکتروموتور فن A

مقدار ارتعاشات در فرکانس یک برابر دور الکتروموتور (۲۵ هرتز) با استفاده از نرم افزار اسپکتراپرو^۱ فیلتر گردید و روند تغییرات در فرکانس یک برابر دور الکتروموتور در گذشته مطابق شکل (۴) بوده است.



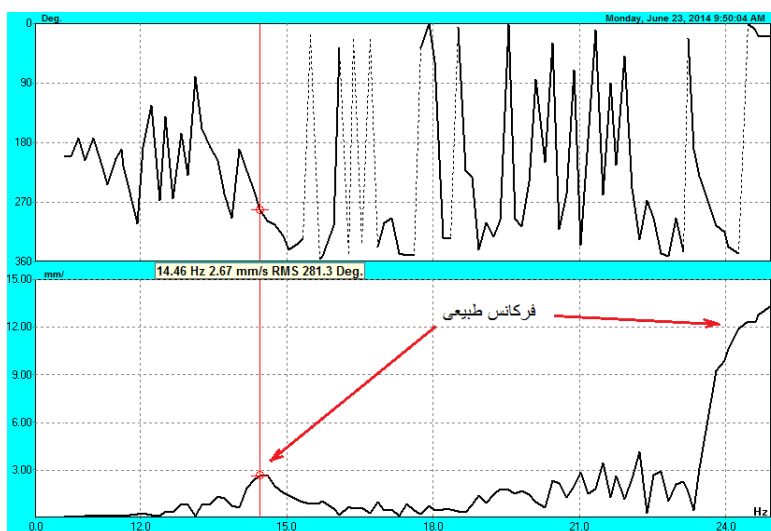
شکل ۴: روند ارتعاشات یک برابر دور الکتروموتور فن A فیلتر شده با نرم افزار اسپکتراپرو

با توجه به مشابهت بسیار زیاد روند ارتعاشات در شکل‌های (۲) و (۴) می‌توان نتیجه گرفت که علت ارتعاشات بوجود آمده ناشی از ارتعاش یک برابر دور الکتروموتور فن بوده است.



آزمون ران دان (Run Down)

به طور معمول انتظار می‌رود با خاموش شدن تجهیز سطح لرزش با نرخ مشخص و ثابتی کاهش یابد. بنابراین در صورتی که سطح لرزش تجهیز از زمان خاموش شدن تا توقف کامل در هر زمانی افزایش یابد و اختلاف فاز در دو سمت آن حدود ۱۸۰ درجه باشد، سرعت و یا به عبارت بهتر فرکانسی که در آن افزایش سطح ارتعاشات اتفاق می‌افتد فرکانس طبیعی تجهیز می‌باشد. برای انجام این تست از دستگاه لرزش سنج استفاده شد و به منظور مشاهده بهتر دامنه ارتعاشات در نمودار حاصل، الکتروموتور به وسیله چند وزنه نامیزان شد. پس از ایجاد نابالانسی، الکتروموتور روشن و پس از رسیدن به دور نامی خاموش و تا زمان توقف کامل اطلاعات مورد نیاز توسط دستگاه لرزش سنج ثبت گردید. به منظور افزایش صحت اطلاعات این عمل در چند نقطه انجام گرفت که یکی از نمودارها در شکل (۵) آورده شده است.



شکل ۵: نمودار Run Down الکتروموتور فن A

بنابراین همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود احتمال وجود دو فرکانس طبیعی در فرکانس‌های ۱۴/۴۶ و ۲۵ هرتز وجود دارد. با توجه به اینکه سازه هر سه فن نصب شده در کنار هم شبیه به یکدیگر هستند و در هر سه آنها فرکانس طبیعی ۲۵ هرتز باعث افزایش ارتعاشات گردیده، احتمال وقوع پدیده ضربان به علت انتقال ارتعاشات از فن‌های مجاور و در نتیجه تغییر دامنه ارتعاشات به صورت نوسانی از $5 \frac{mm}{s} rms$ تا $37 \frac{mm}{s} rms$ تقویت می‌شود. لذا به منظور بررسی بیشتر و یافتن دقیق فرکانس‌های طبیعی و مودهای ارتعاشی، آنالیزهای تغییر شکل و مودال حین کارکرد بر روی سازه فن انجام گردید.

آماده سازی اندازه گیری

مهم‌ترین عیوبی که باعث ایجاد ارتعاشات در یک برابر دور دستگاه می‌شوند، نامیزانی و فرکانس طبیعی می‌باشد. برای انجام میزان لرزش، از دستگاه لرزش سنج استفاده شد و به منظور مشاهده بهتر دامنه ارتعاشات در نمودار حاصل، الکتروموتور به وسیله چند وزنه نامیزان شد. پس از ایجاد نامیزانی، الکتروموتور روشن و پس از رسیدن به دور نامی خاموش و تا زمان توقف کامل اطلاعات مورد نیاز توسط دستگاه لرزش سنج ثبت گردید.



به منظور بررسی بیشتر و یافتن دقیق فرکانس‌های طبیعی و مودهای ارتعاشی، آنالیزهای تغییر شکل حین کارکرد و مودال حین کارکرد بر روی سازه فن انجام گردید. جهت آماده‌سازی و اجرای اندازه‌گیری باید بازه فرکانسی، وضوح و پنجره‌ها به درستی انتخاب گردد. یک شرط مهم برای اندازه‌گیری توجه به رابطه بین حداکثر فرکانس سیگنال و حداقل فرکانس نمونه‌برداری می‌باشد. می‌بایستی برای بازسازی سیگنال دیجیتال، فرکانس نمونه‌برداری f_s بایستی بزرگتر یا مساوی دو برابر فرکانس بزرگترین جزء موجود در سیگنال اندازه‌گیری باشد. این بدین معناست که هر جزء ارتعاشی بایستی در محدوده فرکانسی انتخاب شده، حداقل دو بار در هر دوره نمونه برداری شود. هر گونه عدول از این تئوری، اثر آلیاسینگ را در پی خواهد داشت. اثر آلیاسینگ یک اثر ناخواسته در سیگنال است که باعث کاهش کیفیت آن می‌شود. زمانی که سیگنال نمونه برداری شده بازسازی می‌شود، اجزاء فرکانسی که در سیگنال اصلی وجود ندارد، در طیف فرکانسی ظاهر خواهند شد. برای خنثی سازی این اثر نامطلوب، بایستی تمام اجزاء سیگنال با فرکانسی بزرگتر از نصف فرکانس نمونه برداری حذف گردند. این عمل با استفاده از یک فیلتر پایین گذر که فیلتر آنتی آلیاس نامیده می‌شود انجام می‌گردد. پارامترهای نمونه‌برداری صحیح در آنالیز با پهنای باند صفر تا ۳۲۰۰ هرتز انتخاب گردید. براساس پهنای باند و تعداد خطوط طیف انتخاب شده به میزان ۶۴۰۰ خط، آنالیزر به صورت اتوماتیک بهترین پارامترهای نمونه‌برداری را انتخاب می‌کند و برای محاسبه پاسخ، تبدیل فوریه گسسته مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تبدیل با این فرض مورد استفاده قرار می‌گیرد که سیگنال اندازه‌گیری شده به صورت پررودیک می‌باشد. اگر سیگنال اندازه‌گیری شده پررودیک نباشد خطای ناشی پیش خواهد آمد و به منظور کاهش این خطا از تابع پنجره استفاده می‌شود. تابع پنجره طوری عمل می‌نماید که سیگنال اندازه‌گیری شده به سیگنال پررودیک تبدیل شود. در این آزمون از تابع پنجره هنینگ استفاده شده است.

آنالیز تغییر شکل حین کارکرد

آنالیز تغییر شکل حین کارکرد را می‌توان حرکت اجباری دو یا سه نقطه از سازه دانست. با مشخص شدن حرکت و جابجایی دو یا چند نقطه از سازه، شکل سازه مشخص می‌شود. به بیان دیگر، شکل سازه با مشخص شدن جابجایی یک نقطه نسبت به سایر نقاط مشخص می‌شود. برای اطمینان از صحت اندازه‌گیری فرکانس‌های طبیعی سازه و مشخص کردن محل اصلاح سازه در راستای تغییر در فرکانس طبیعی باید شکل حرکتی سازه را بدست آورد. به این منظور علاوه بر نقاطی که در داده برداری روتین الکتروموتور استفاده می‌شود، ۵۰ نقطه دیگر بر روی سازه که در شکل (۶) نشان داده شده است، تعیین و از آنها داده برداری ارتعاشی انجام گرفت. ضمناً به دلیل انطباق کامل نتایج، رفتار سازه پایدار فرض شد. جهت اندازه‌گیری شکل مود حین کارکرد از نیروی تحریک ایجاد شده توسط کارکرد فن استفاده گردید و به همین دلیل فن در دور ثابت قرار داده شد. بدیهی است در این شرایط غالب نیروهای تحریک در فرکانس کارکرد دستگاه عبارتند از فرکانس دوران الکتروموتور، فرکانس دوران فن، فرکانس گذر پره و فرکانس چرخش تسمه.



شکل ۶: نقاط اندازه‌گیری روی سازه فن

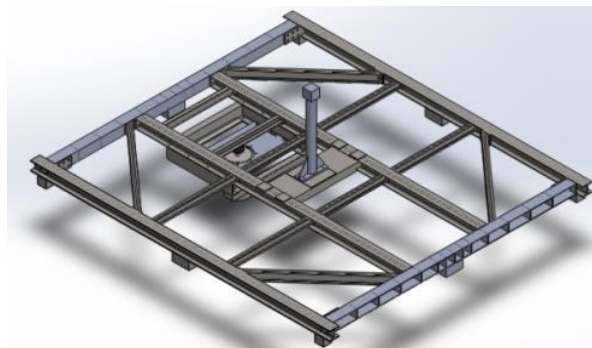


تجهیزات اندازه گیری

تجهیزات مورد استفاده در اندازه‌گیری آزمون‌ها و آنالیزهایی که مورد استفاده قرار گرفته است عبارتند از دستگاه ارتعاش‌سنج دو کاناله ساخت شرکت VMI مدل Easy Viber، سنسور دور سنج شرکت PPERL+FUCHS مدل CP18LDNL^۲، سنسور شتاب‌سنج پیزوالکتریک ساخت شرکت CTC مدل AC1021A با حساسیت 100 mV/g، الکتروموتور ساخت شرکت مارلی موتور با توان ۳۷ کیلو وات، الکتروموتور ساخت شرکت موتوژن با توان ۰/۵۵ کیلو وات و دستگاه تنظیم‌دور الکتروموتور مدل ic ۵LS

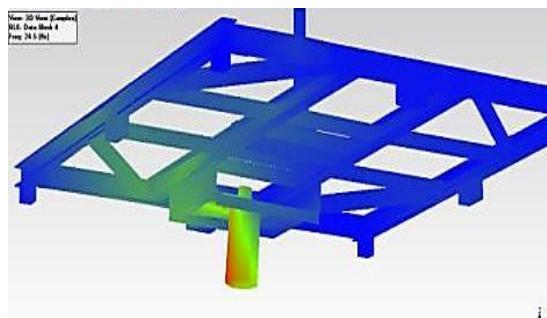
ترسیم شکل سازه در نرم افزارهای طراحی سه بعدی

به منظور آنالیز تغییر شکل سازه ابتدا باید شکل سازه را ترسیم نمود که برای این منظور از نرم افزار سالیدورکس^۱ استفاده گردید و خروجی مطابق شکل (۷) می باشد.



شکل ۷: مدل سازه در نرم افزار سالیدورکس

شکل سازه ترسیم شده در نرم افزار سالیدورکس را به نرم افزار ام ای اسکوپ^۲ منتقل کرده و سیگنال زمانی نقاط اندازه‌گیری شده برای همان نقاط تعریف می‌گردد. با ایجاد ارتباط بین داده‌های ارتعاشی و مدل سازه در نرم افزار ام ای اسکوپ تغییر شکل سازه در هر فرکانس به صورت انیمیشن نمایش داده می‌شود. با بررسی الگوی رفتاری سازه در نرم افزار ام ای اسکوپ دو فرکانس ۱۲/۵ هرتز و ۲۴/۵ هرتز موجب تغییر شکل سازه می‌شوند و مطابق شکل (۸) فرکانس ۲۴/۵ هرتز بیشترین نقش را در ایجاد تغییر شکل سازه دارد.



شکل ۸: تغییر شکل سازه در نرم افزار ام ای اسکوپ

^۱ Solid Works

^۲ Mescope Software



آنالیز مودال حین کارکرد

هدف از انجام آنالیز مودال حین کارکرد استخراج فرکانس‌های طبیعی سازه و حصول اطمینان از نتایج حاصل از مدل اجزاء محدود می‌باشد. چنانچه مقادیر و اطلاعات بدست آمده از آزمون تجربی با مقادیر و اطلاعات اجزاء محدود مغایرت داشته باشد لازم است مدل اجزاء محدود اصلاح گردد. با استفاده از آنالیز تغییر شکل حین کارکرد مهمترین فرکانسی که باعث افزایش ارتعاشات سازه در حین کارکرد می‌گردد شناسایی شد و در ادامه مقایسه آن با فرکانس‌های طبیعی سازه بررسی می‌شود. با توجه به آنکه دور کاری الکتروموتور فن ۲۵ هرتز می‌باشد، تمام فرکانس‌های طبیعی سازه تا فرکانس ۲۵ هرتز تحریک می‌شود. برای انجام آنالیز مودال حین کارکرد و بدست آوردن فرکانس‌های طبیعی سازه روش‌های مختلفی وجود دارد. یک روش تحریک سازه، استفاده از یک دستگاه کنترل دور، یک دستگاه موتورالکتریکی و یک عدد پولی ساخته شده است که توسط جرم خارج از مرکز (پیچ و مهره) نامیزان شده که در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۹: موتور الکتریکی به همراه جرم نامیزان و دستگاه کنترل دور

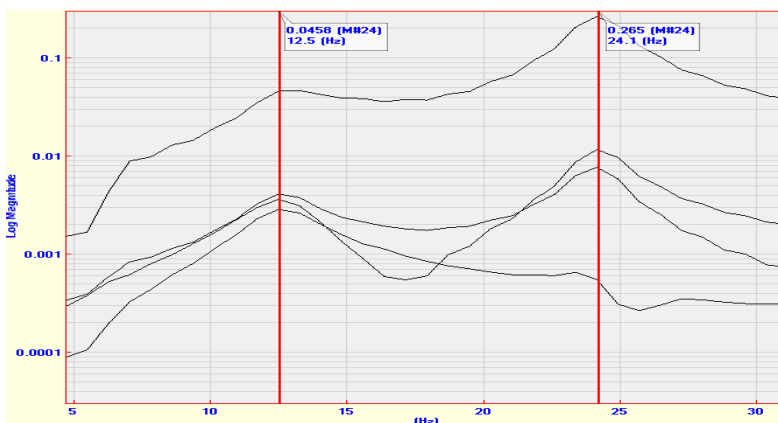
موتورالکتریکی با جرم نامیزان که به الکتروموتور فن هوایی مطابق شکل (۱۰) متصل شده است را با دور نامی استارت کرده و سپس در مدت زمان ۶۰ ثانیه دور موتور را کم کرده و به صفر می‌رسانیم. در هنگام عبور از فرکانس طبیعی دامنه ارتعاشات افزایش می‌یابد، لذا کاهش سرعت بایستی به کندی انجام شود تا بهتر بتوان فرکانس‌های طبیعی را تشخیص داد.



شکل ۱۰: چگونگی اتصال موتورالکتریکی با جرم نامیزان به الکتروموتور فن



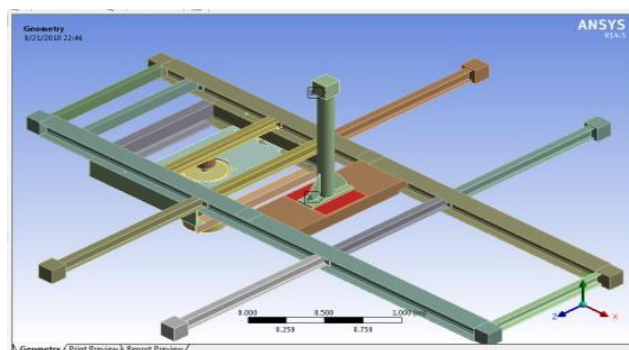
با استفاده از تحلیل مودال تجربی فرکانس‌های طبیعی سازه در فرکانس‌های ۱۲/۵ هرتز و ۲۴/۱ هرتز مطابق نمودار شکل (۱۱) مشخص می‌شوند.



شکل ۱۱: فرکانس طبیعی‌های حاصل در آنالیز مودال حین کارکرد

مدل‌سازی هندسی و شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود

بر اساس نقشه‌های سازه فن‌های هوایی برای نگهداری فن از تیرهای U شکل و H شکل استفاده شده است و الکتروموتور بر روی یک ورق مستطیلی نصب می‌باشد. در مدل‌سازی انجام شده از ابعاد و اندازه‌های واقعی مندرج در نقشه‌های سازه استفاده شده است. در مدل‌سازی انجام شده، سازه فن در چند نقطه به اسکلت اصلی متصل شده است که این نقاط به عنوان نقاط ثابت در نظر گرفته شده‌اند. مهم‌ترین قسمتی که تاثیر زیادی بر روی جواب دارد، نحوه اتصال کانال هوایی و سازه فن می‌باشد. کانال هوایی در بالای سازه فن قرار گرفته است و در مدل‌سازی اتصال بین سازه فن و کانال هوایی به صورت جوش در نظر گرفته شد. همین عامل باعث افزایش سختی سازه شده و اولین فرکانس طبیعی به دست آمده از مدل‌سازی ۱۵ هرتز می‌باشد. در مدل کردن نحوه اتصال کانال هوایی به سازه فن و به منظور کاهش حجم محاسبات و افزایش دقت، کانال هوایی از مدل حذف به جای آن فنر و جرم متمرکز در سازه اعمال گردید. وزن کانال هوایی ۲۰۰ کیلوگرم است و اتصال آن با سازه فن در چهار قسمت می‌باشد. بنابراین چهار وزنه ۵۰ کیلو گرمی در این چهار قسمت قرار داده شد و فن‌هایی با سختی‌های مختلف جهت اصلاح سختی کانال در مدل آزمایش گردید. پره‌های فن از جنس آلومینیوم و جرم هر پره ۲۷ کیلوگرم می‌باشد که به دلیل اضافه نکردن سختی به سیستم بصورت جرم متمرکز در نظر گرفته شده‌اند. فن هوایی مورد بررسی دارای ۴ پره بوده، بنابراین به جای پره‌ها و هاب، وزنه‌ای به جرم ۱۰۸ کیلوگرم در مدل در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۲) مدل نهایی از فن مشاهده می‌شود.



شکل ۱۲: مدل نهایی به همراه جرم متمرکز به جای کانال هوایی



برای تحلیل مودال فرکانس طبیعی معیار همگرایی^۱ انتخاب می‌گردد. نتایج آزمون همگرایی در جدول (۲) ارائه شده است و با توجه به مقدار خطای نسبی ناچیز، اندازه‌ی المان ۱/۵ میلیمتر مطلوب می‌باشد.

جدول ۲: فرکانس طبیعی به ازای اندازه‌های متفاوت المان (مش بندی)

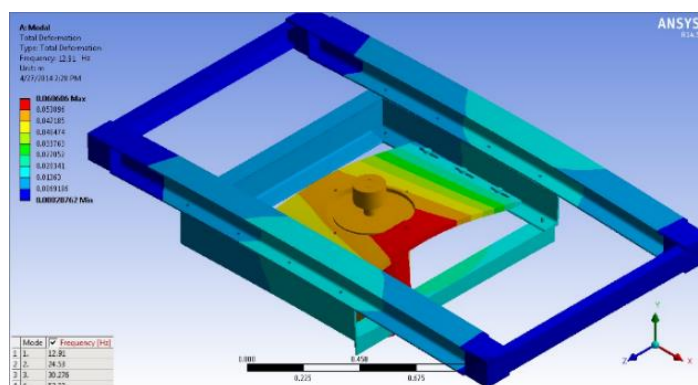
اندازه‌ی المان (میلیمتر)	فرکانس طبیعی اول (هرتز)	فرکانس طبیعی دوم (هرتز)	فرکانس طبیعی سوم (هرتز)
۳	۲۸/۰۱	۳۲/۱۲	۴۸/۰۸
۲	۲۶/۲	۲۹/۱۶	۳۱/۰۴
۱/۵	۱۴/۰۶	۲۶/۴۴	۳۰/۹۸
۱/۴	۱۴/۰۴	۲۶/۲۶	۳۰/۳۷

پس از انتخاب المان‌های مناسب بر اساس شرایط مرزی و تعیین سایز مناسب برای مش بندی انجام شده، فرکانس‌های طبیعی سازه با استفاده از نرم افزار انسیس استخراج و در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳: فرکانس‌های طبیعی سازه بدست آمده به کمک نرم‌افزار انسیس

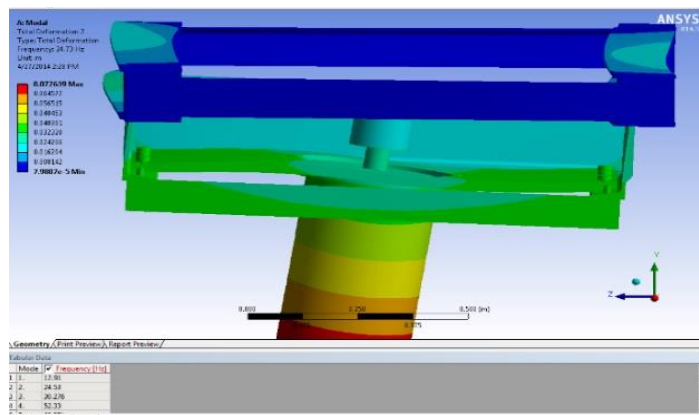
شماره مود ارتعاشی	فرکانس (هرتز)
۱	۱۲/۹۱
۲	۲۴/۵۳
۳	۳۰/۲۷
۴	۵۲/۳۳

همچنین در نرم افزار انسیس شکل موده‌های ارتعاشی اول و دوم سازه مطابق شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۳: تغییر فرم سازه تحت اولین مود ارتعاشی

¹ Converge



شکل ۱۴: تغییر فرم سازه تحت دومین مود ارتعاشی

مقایسه فرکانس‌های طبیعی بدست آمده از آنالیز مودال و اجزاء محدود

به منظور اعتبار سنجی فرکانس‌های طبیعی بدست آمده از مدلسازی عددی به روش اجزاء محدود و آزمون مودال حین کارکرد نتایج هر دو روش را در جدول (۴) ارائه و مقایسه شده است.

جدول ۴: مقایسه فرکانس‌های طبیعی سازه بدست آمده از آنالیز مودال حین کارکرد و روش اجزاء محدود

شماره	فرکانس طبیعی توسط آزمون مودال حین کارکرد	فرکانس طبیعی توسط اجزاء محدود	قدر مطلق خطا نسبی
۱	۱۲/۵	۱۲/۹۱	٪ ۳/۲
۲	۲۴/۱	۲۴/۷۳	٪ ۲/۵
۳	-	۳۰/۲۷	-
۴	-	۵۲/۳۳	-

بر اساس مقایسه نتایج مندرج در جدول (۴) مقدار قدر مطلق خطای نسبی فرکانس‌های آزمون مودال حین کارکرد و روش اجزاء محدود ناچیز است. بنابراین از صحت مدلسازی انجام شده در نرم افزار اطمینان حاصل شد و مدل بدست آمده می‌تواند رفتار سازه را در برابر نیروهای مختلف با خطای جزئی نشان دهد.

اصلاح سازه الکترو فن

پس از حصول اطمینان از صحت مدل نرم افزاری و شناسایی فرکانس‌های طبیعی سازه و فرکانس تحریک و به منظور رفع مشکل ارتعاشات سازه باید اصلاحاتی انجام می‌گردد. تغییرات لازم در مدل نرم‌افزاری بر اساس کم هزینه‌ترین و ساده‌ترین روش که تغییر در اتصال سازه فلزی الکتروموتور به سازه نگهدارنده تیوب‌ها می‌باشد بررسی گردید. بر اساس جوش دادن سازه‌های الکتروموتور و نگهدارنده تیوب‌ها که در شکل (۱۵) نشان داده شده است و قبل از اقدام عملی، تغییرات در مدل نرم‌افزاری اعمال گردید و فرکانس‌های طبیعی سازه بصورت جدول (۵) بدست آمد.



شکل ۱۵: محل ایجاد اتصال جدید در سازه الکترو فن

جدول ۵: فرکانس‌های طبیعی سازه قبل و بعد از اعمال تغییرات در مدل نرم افزاری

شکل ارتعاشی	فرکانس طبیعی سازه قبل از اعمال تغییرات (هرتز)	فرکانس طبیعی سازه بعد از اعمال تغییرات (هرتز)
۱	۱۲/۹۱	۱۸/۱۱
۲	۲۴/۵۳	۲۸/۵۵
۳	۳۰/۲۷	۳۴/۸۴
۴	۵۲/۳۳	۵۴/۵۷

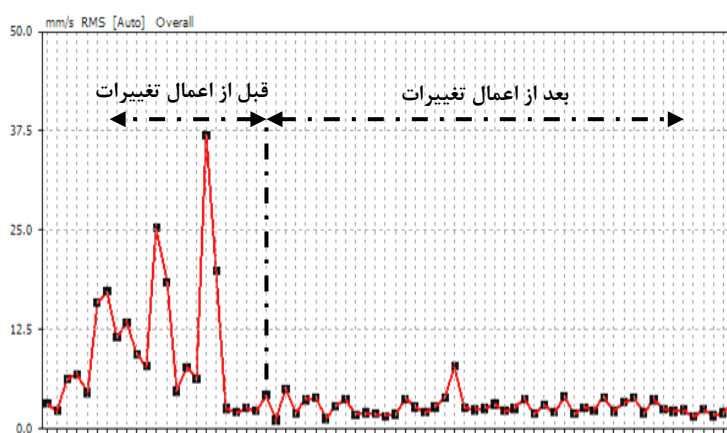
پس از انجام تغییرات مجدد از سازه اندازه گیری بعمل آمد و دومین فرکانس طبیعی از ۲۴/۵۳ هرتز به ۲۹ هرتز تغییر پیدا کرد و از فرکانس تحریک سازه که فرکانس یک برابر دور الکتروموتور به میزان ۲۵ هرتز می باشد فاصله پیدا کرد. پس از اتصال سازه نگهدارنده الکتروموتور به بدنه اصلی سازه نگهدارنده تیوب‌ها، میزان بیشینه ارتعاشات تجهیز از $RMS \frac{mm}{s}$ ۳۶/۹۶ به $RMS \frac{mm}{s}$ ۳/۸۷ کاهش پیدا کرد که طبق استاندارد ایزو ۱۴۶۹۴ برای فن هوایی مورد نظر در محدوده قابل قبول می باشد.

نتیجه‌گیری

بررسی سوابق ارتعاشی الکترو فن‌های هوایی نشان‌دهنده مشابهت روند ارتعاشات کلی الکترو فن با روند ارتعاشات در فرکانس یک برابر دور الکتروموتور (۲۵ هرتز) می‌باشد. از این رو عوامل موثر بر ارتعاشات یک برابر دور دستگاه از قبیل نامیزانی و فرکانس طبیعی مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از اندازه‌گیری انجام شده از ارتعاشات الکتروموتور در حالت چرخش آزاد و عدم وجود اختلاف فاز ۹۰ درجه در دو جهت عمود بر هم در اطراف الکتروموتور، احتمال وجود نامیزانی در الکتروموتور مردود و تعیین فرکانس‌های طبیعی پیگیری گردید. جهت شناسایی فرکانس‌های طبیعی سازه به صورت تجربی از آزمون ران‌دان و آزمون تغییر شکل حین کارکرد استفاده شد. با انجام آزمون ران‌دان فرکانس‌های ۱۴/۴۶ هرتز و ۲۵ هرتز به عنوان اولین و دومین فرکانس‌های طبیعی سازه مشخص شدند. همچنین با انجام آزمون تغییر شکل حین کارکرد مشخص گردید که فرکانس‌های ۱۲/۵ هرتز و ۲۴/۵ هرتز اولین و دومین فرکانس‌های طبیعی سازه می‌باشند و فرکانس ۲۴/۵ هرتز بیشترین نقش را در تغییر شکل سازه دارد. با توجه به فرکانس‌های طبیعی بدست آمده از آزمایش‌های تجربی مشخص گردید که عامل اصلی بالا و نوسانی بودن ارتعاشات الکتروموتور فن‌های هوایی، نزدیک بودن فرکانس طبیعی به فرکانس یک برابر دور الکتروموتور می‌باشد. از میان فرکانس‌های طبیعی بدست آمده، دومین مود ارتعاشی



دارای فرکانسی نزدیک به فرکانس دور الکتروموتور داشت. همچنین این مود ارتعاشی باعث ارتعاش الکتروموتور در جهت عمود بر تسمه و رسیدن ارتعاشات به بیشترین مقدار اندازه‌گیری می‌گردید. شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود در نرم افزار انجام و فرکانس‌های طبیعی سازه محاسبه شدند. نزدیکترین فرکانس طبیعی محاسبه شده در روش اجزاء محدود به فرکانس تحریک سازه، فرکانس $24/53$ هرتز و فرکانس طبیعی حاصل از آنالیز مودال حین کارکرد $24/1$ هرتز می‌باشد. لذا با توجه به اختلاف کم ($2/5$ درصد) نتایج حاصل از آزمایشات تجربی و مدلسازی عددی، مدل اجزاء محدود تهیه شده مدل مناسبی ارزیابی گردید و با استفاده از آن رفتار سازه تحت بارهای مختلف بررسی شد. با بررسی مدل شبیه‌سازی شده در نرم افزار مشخص شد که با افزایش قیود سیستم از طریق اتصال سازه نگهدارنده الکتروموتور به سازه نگهدارنده تیوب‌ها، دومین فرکانس طبیعی سیستم از $24/53$ هرتز به $28/55$ هرتز تغییر می‌یابد و در فاصله مطمئن از فرکانس تحریک سیستم که همان فرکانس کارکرد الکتروموتور می‌باشد قرار می‌گیرد. روند تغییرات قبل و بعد از اصلاحات انجام شده مطابق روند نشان داده شده در شکل (۱۶) می‌باشد.



شکل ۱۶: روند ارتعاشات الکتروموتور فن A قبل و بعد از اعمال تغییرات

مراجع

- [۱] بنی‌هاشمی، م.، قاسمی، ا.، یزدچی، م.، ۱۳۹۰، شبیه‌سازی آنالیز مودال در نرم‌افزار آباکوس و مقایسه آن با نتایج تجربی، در پمپ عمودی خط نوورد گرم فولاد مبارکه اصفهان، سومین کنفرانس مهندسی ساخت و تولید.
- [۲] ابراهیمی، ع.، الندی، ح.، همتی، م.، ۱۳۸۶، کاهش ارتعاشات سازه فن با گرداننده دور متغیر، دومین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب‌یابی ماشین‌آلات.
- [3] Ulriksen, M., D., Tcherniak, D., Hirkegaard, P., H., Damkilde, L., (2016), Structural Health Monitoring, "Operational Modal Analysis and Wavelet Transformation for Damage identification in wind turbine blades", 15(4), Doi 10.1177/1475921715586623.
- [4] Rizo-Patron, S., Sirohi, J., (2016), Operational Modal Analysis of a Helicopter Rotor Blade Using Digital Image Correlation, Experimental Mechanics, Doi 10.1007/s11340-016-0230-6.
- [5] Prowell, I., Veletzos, M., Elgamal, A., Restrepo, J., (2009), Experimental and Numerical Seismic Response of a 65 KW Wind Turbine, Journal of Earthquake Engineering, 13, pp 1172-1190.