

بررسی و تشخیص پدیده OIL WHIRL وابسته به بار در توربوژنراتور ۵ مگاواتی با استفاده از تحلیل FFT و ORBIT

حدیث مومن^۱، محمد حسن کاشی ها^۲، رضا محمدی^۳

^۱ حدیث مومن کارشناس CM شرکت بهره برداری و پشتیبانی فنی نفت و گاز مپنا

^۲ محمد حسن کاشی ها مدیر واحد ارتعاشات شرکت بهره برداری و پشتیبانی فنی نفت و گاز مپنا

^۳ رضا محمدی کارشناس واحد سرویس شرکت بهره برداری و پشتیبانی فنی نفت و گاز مپنا

پست الکترونیکی : momen.hadis@Mogs.Mapnagroup.com

چکیده

پدیده ناپایداری فیلم روغن (Oil Whirl) یکی از ناپایداری‌های مهم در یاتاقان‌های ژورنال توربوماشین‌ها است که موجب افزایش قابل توجه ارتعاشات و خطر آسیب مکانیکی می‌شود. در این مطالعه، تحلیل جامعی از رفتار ارتعاشی یک توربوژنراتور ۵ مگاواتی انجام شده است، که به دلیل نادر بودن وقوع Oil Whirl در یاتاقان‌های مشابه، یافته‌های آن حائز اهمیت است. اندازه‌گیری‌های ارتعاشاتی در شرایط کاری مختلف انجام و از طریق تحلیل طیف فرکانسی (FFT) و نمودارهای اربیت (Orbit Plot) استخراج و تحلیل شدند تا مشخصات فرکانسی و دینامیکی پدیده شناسایی گردد. نتایج نشان می‌دهد که ناپایداری فیلم روغن در محدوده‌ای خاص از سرعت دوران و بار عملیاتی ظاهر می‌شود و موجب تشدید دامنه ارتعاشات یاتاقان‌ها می‌گردد. تطابق دقیق حرکت روتور تحت عیب در نمودارهای اربیت با مدل‌های معتبر صحت روش‌های تحلیل استفاده شده را تایید می‌کند. این رویکرد تحلیلی می‌تواند به عنوان راهکاری مؤثر در سامانه‌های پایش وضعیت و تشخیص زودهنگام ناپایداری‌ها به کار گرفته شده و به بهره‌برداران و مهندسان حوزه ارتعاشات کمک نماید تا عیوب مشابه را در تجهیزات مشابه با دقت و سرعت بیشتری شناسایی کنند. بنابراین، استفاده از این روش‌ها قادر است نقش مهمی در بهبود قابلیت اطمینان و ارتقاء عملکرد توربوماشین‌ها ایفا نماید.

کلمات کلیدی: Oil Whirl؛ FFT؛ Orbit؛ ناپایداری فیلم روغن؛ آنالیز ارتعاشات.

۱- مقدمه

پدیده ناپایداری فیلم روغن یکی از مشکلات متداول در توربین‌های گازی و بخار به شمار می‌رود که ریشه در ناپایداری‌های هیدرودینامیکی فیلم روغن دارد. این پدیده می‌تواند سبب افزایش ارتعاشات روتور، آسیب‌دیدگی بلبرینگ‌ها و کاهش طول عمر تجهیزات شود که معمولاً در فرکانس‌های ۰,۴ تا ۰,۶ برابر سرعت دوران رخ می‌دهد [۱,۲].

پایش و آنالیز ارتعاشات یکی از روش‌های مؤثر در شناسایی ناپایداری فیلم روغن محسوب می‌شود. بررسی‌های پیشین نشان داده‌اند که تحلیل فرکانسی و اربیت به عنوان ابزارهای اصلی تشخیص ناپایداری فیلم روغن مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۳,۴]. با وجود تحقیقات متعدد، همچنان نیاز به ارائه گزارش داده‌های عملیاتی واقعی از توربین‌ها وجود دارد تا فهم دقیق‌تری از شرایط بروز این پدیده فراهم شود [۵].

تجهیز مورد بررسی یک توربوژنراتور تک محوره با ظرفیت ۵ مگاوات و سرعت کاری ۱۷۴۰۰ RPM است که مجهز به دو یاتاقان ژورنال است. هدف این مطالعه، تحلیل داده‌های ارتعاشی این توربوژنراتور ۵ مگاوات است که منجر به شناسایی نشانه‌ها و فرکانس‌های عیب ناپایداری فیلم روغن و همچنین بررسی چالش‌های موجود در فرآیند شناسایی است؛ علاوه بر این، اهمیت رفع این عیب و ارائه راهکارهای پایش پیشگیرانه بررسی می‌شود. این مقاله با بهره‌گیری از نمودارهای FFT و اربیت، رفتار روتور را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و شرایط بحرانی را شناسایی می‌کند. تشخیص زودهنگام این شرایط می‌تواند به بهبود عملکرد و ارتقای ایمنی توربوژنراتور کمک شایانی نماید.

۲- شرح مسئله

این مقاله به بررسی یک توربوژنراتور با توان نامی ۵ مگاوات و دور کاری ۱۷۴۰۰ RPM که برای مدتی با افزایش غیر عادی سطح ارتعاشات و دریافت هشدار همراه بوده است، می‌پردازد. با وجود انجام چندین نوبت تحلیل ارتعاشات در ادوار گذشته و اجرای اقدامات اصلاحی نظیر تراز (الایمنت) و حتی انجام تعمیرات اساسی، توسط سایر شرکت‌ها، همچنان میزان ارتعاشات در محدوده مجاز قرار نگرفت و تداوم این وضعیت باعث نگرانی درباره سلامت و پایداری دستگاه شد. از این رو مأموریت یافتیم تا با رویکردی دقیق‌تر به شناسایی و ریشه‌یابی منبع مشکل پردازیم.

فرآیند تحلیل از طریق برداشت داده‌های ارتعاشی با استفاده از دستگاه آنالایزر پرتابل آغاز شد. این توربوژنراتور دارای دو یاتاقان ژورنال تیل‌تینگ پد (Tilting Pad Journal Bearing) می‌باشد که در هر کدام دو سنسور جابجایی (Displacement Sensor) با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم نصب شده‌اند. این آرایش امکان ثبت داده‌های مختلف ارتعاشی از جمله نمودارهای اربیت را فراهم می‌کند. در طی عملیات برداشت داده، ارتعاشات روتور در دوره‌های مختلف عملیاتی ثبت و بررسی شدند. افزون بر تحلیل مقدار کلی ارتعاش، داده‌های مربوط به طیف فرکانسی (FFT) و نمودارهای اربیت نیز جهت تشخیص دقیق‌تر نوع و منشأ عیب تهیه و آرشیو گردید. این اقدامات با هدف شناسایی الگوهای غیرعادی و تعیین دقیق علل افزایش ارتعاشات صورت گرفت تا مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی اقدامات پیشگیرانه و اصلاحی آتی فراهم گردد.

۳- بررسی علائم مشاهده شده و تشخیص عیب

در مراحل ابتدایی، بررسی داده‌های ارتعاشی بیانگر آن بود که یاتاقان نخست دارای سطوح بالای ارتعاش است. به دلیل محدودیت‌های مرتبط با شرایط بهره‌برداری، امکان ثبت داده‌ها در وضعیت بارگذاری کامل و سرعت نامی (FSFL) وجود نداشت. از این رو، داده‌برداری و ثبت ارتعاشات در شرایط سرعت نامی و بدون بار (FSNL) انجام پذیرفت.

¹ Full Speed Full Load

² Full Speed No Load

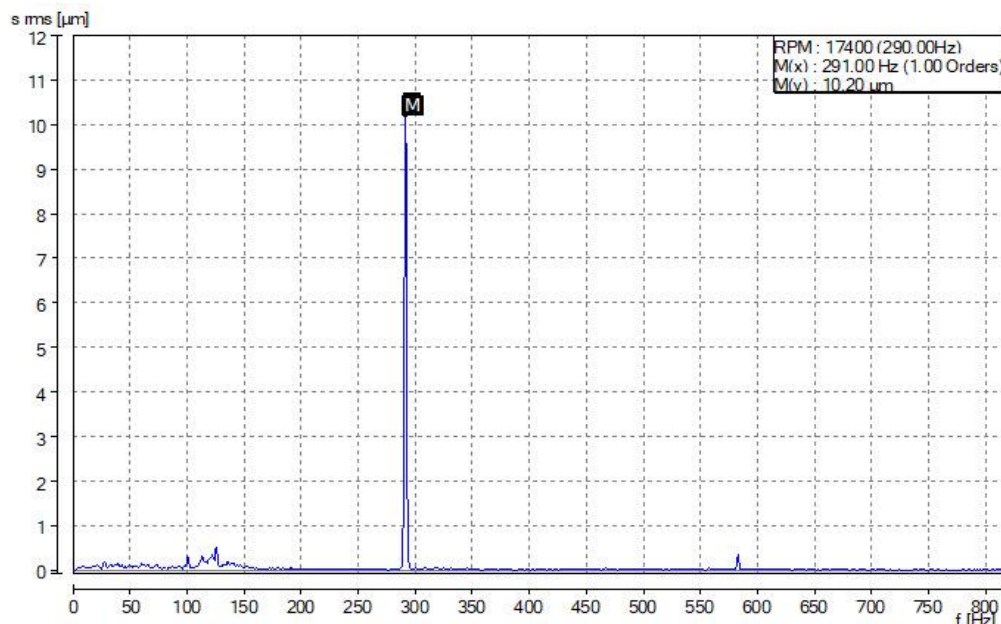
در این مرحله، تحلیل بر روی دو گروه داده کلیدی صورت گرفت:

۱. نمودار طیف فرکانس (FFT)،

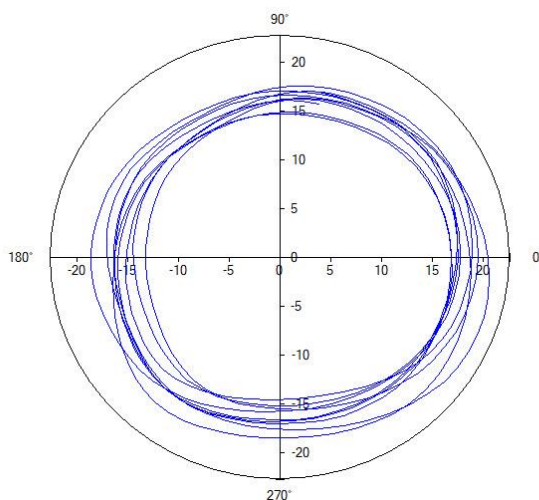
۲. نمودار اربیت،

شکل ۱ نمودار FFT در وضعیت FSNL را نشان می‌دهد که در آن، دامنه فرکانسی غالب مربوط به یک برابر سرعت دوران

۱X است. این ویژگی بیانگر وجود بیشترین انرژی ارتعاشی در فرکانس دوران روتور است.



شکل ۱: نمودار FFT در FSNL



شکل ۲: نمودار Orbit در FSNL

شکل ۲ نمودار اربیت را در همان شرایط به تصویر می‌کشد؛ فرم اربیت عملاً به صورت دایره‌ای مشاهده شد که شاخص

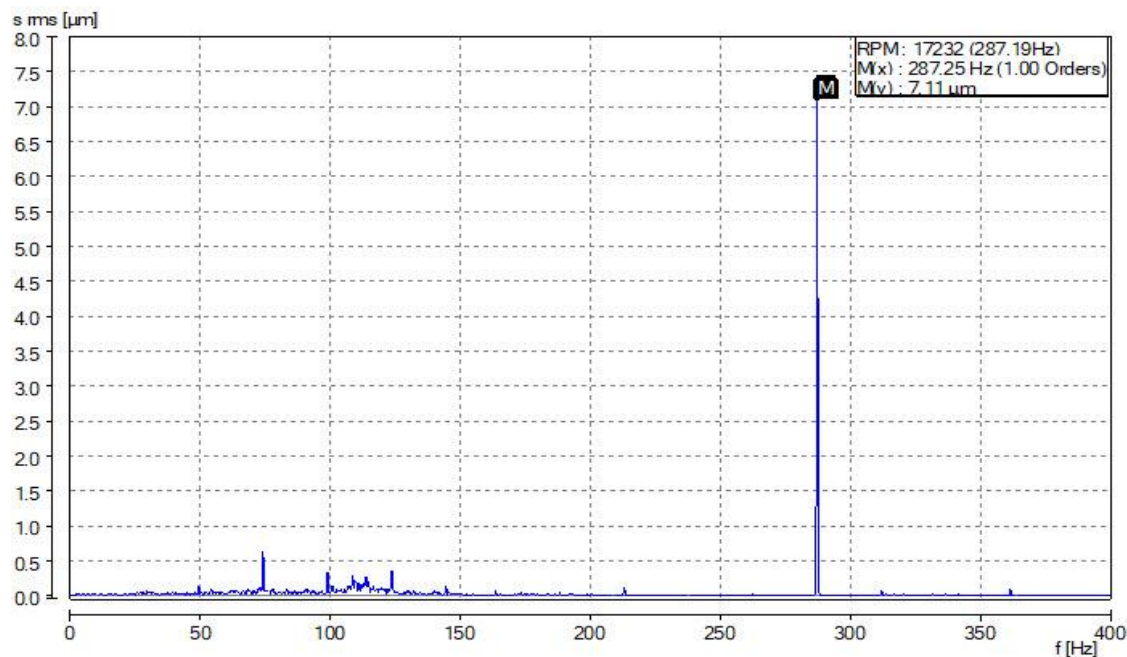
مشخصی از نابالانسی روتور در این مرحله می‌باشد.

ترکیب سیگنال غالب ۱X در طیف فرکانسی و شکل دایره‌ای اربیت، به طور قطعی احتمال نابالانسی روتور را به عنوان منشأ

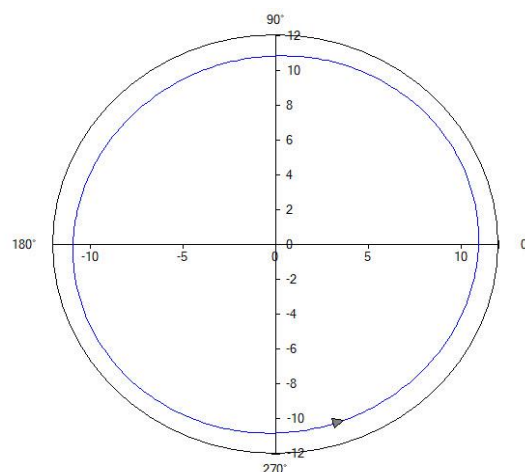
اصلی ارتعاشات زیاد مطرح می‌کرد. بر این اساس و با توجه به الگوهای استاندارد عیب یابی ارتعاشاتی، انجام بالانس تجهیز به عنوان

نخستین اقدام اصلاحی مورد توصیه قرار گرفت تا در مراحل بعدی، در صورت لزوم، سایر عوامل مؤثر نیز مورد بررسی قرار گیرند.

پس از بالانس و راه اندازی تجهیز، داده‌برداری ارتعاشات در سرعت کاری و در حالت بدون بار تکرار شد. و نمودارهای FFT و اربیت به ترتیب در شکل های ۳ و ۴ برای این تجهیز ثبت شدند. به‌رغم انجام عملیات بالانس، سطح ارتعاشات تجهیز پس از راه‌اندازی مجدد، همچنان در سطح نامطلوبی باقی ماند. تحلیل داده‌های ارتعاشی جدید که در سرعت کاری و بدون بار ثبت گردید، کاهش جزئی دامنه را تأیید کرد، اما این بهبود برای رسیدن به شرایط مطلوب کافی نبود. این مشاهده که عملیات بالانس تأثیر معناداری بر کاهش مؤلفه غالب ۱X نداشته است، یک نتیجه‌گیری فنی کلیدی را به همراه داشت: برخلاف تصور اولیه، نابالانسی، اگرچه به عنوان یک عیب ثانویه حضور داشت، اما منشأ اصلی این پیک فرکانسی، نابالانسی نبود. لذا، علت اصلی ارتعاشات بالا باید در سایر عیوب مکانیکی که می‌توانند خود را به صورت پیک ۱X نشان دهند، جستجو شود.



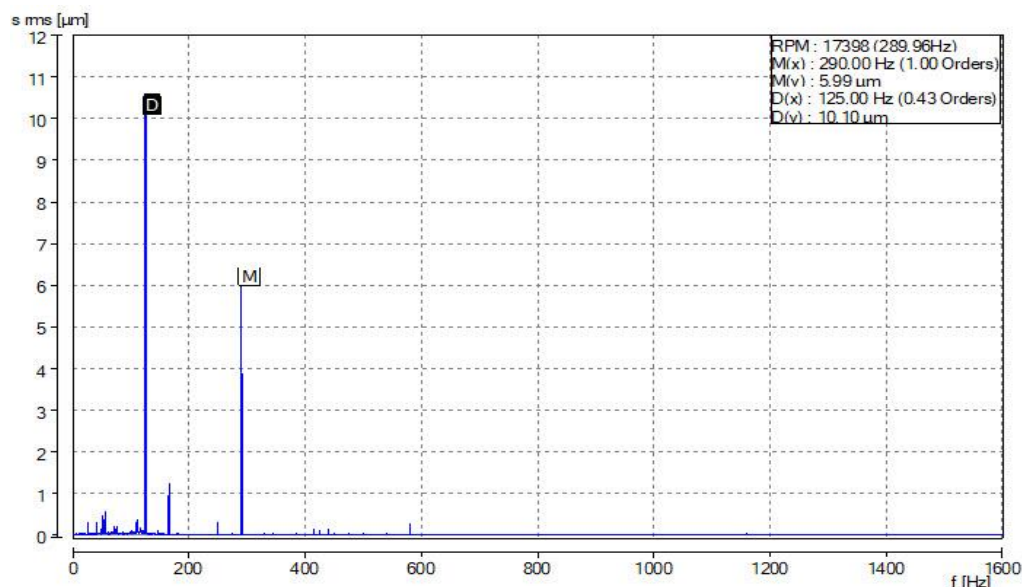
شکل ۳: نمودار FFT بعد از بالانس در شرایط FSNL



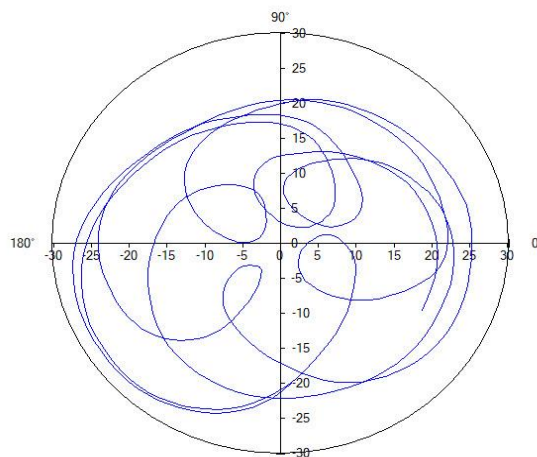
شکل ۴: نمودار Orbit پس از بالانس در شرایط FSNL

اگرچه بخشی از ارتعاشات مشاهده شده در توربوژنراتور ناشی از نابالانسی بود و انجام فرایند بالانس ضروری بود، اما تحلیل‌هایی که پس از فرایند بالانس انجام پذیرفت حاکی از آن بود که منبع اصلی ارتعاشات، عاملی غیر از نابالانسی است. بدین منظور، فرآیند جمع‌آوری و تحلیل داده‌های ارتعاشی، علاوه بر سرعت‌های دورانی مختلف، تحت شرایط بارگذاری متغیر نیز صورت پذیرفت. شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب نمودارهای FFT و اربیت را در بارگذاری کامل و سرعت نامی (FSFL) ارائه می‌دهند. بررسی نمودار FFT نشان داد که علاوه بر مؤلفه فرکانسی سنکرون $1X$ ، یک مؤلفه فرکانسی غالب در محدوده زیرسنکرون با مقدار دقیق $0.43X$ سرعت دوران وجود دارد. نکته حائز اهمیت این است که دامنه این مؤلفه فرکانسی به مراتب فراتر از دامنه مؤلفه $1X$ است. این پدیده به طور مشخص معرف برهم‌کنش دینامیکی میان روتور و فیلم روغن در یاتاقان‌های ژورنال بوده و به عنوان پدیده گردابه روغن شناخته می‌شود. فرکانس‌های مشخصه این عیب معمولاً در محدوده $0.4X$ تا $0.5X$ مشاهده می‌گردند [۷،۸].

به منظور تأیید این یافته‌ها و تحلیل دقیق‌تر، نمودار اربیت نیز مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده تکرار حرکت شکل مارپیچی یا حلقه‌ای با فرکانسی کمتر از دور روتور در این نمودار، که امضای پدیده ناپایداری فیلم روغن است، تشخیص اولیه را به قطعیت تأیید نمود. الگوی مشاهده‌شده در نمودار اربیت، که جزئیات دقیقی از دینامیک حرکت روتور را به نمایش می‌گذارد، با مدل‌های تحلیلی پیش‌بینی‌شده برای این عیب و نتایج مطالعات مشابه پیشین سازگاری بالایی داشت [۹] و صحت تشخیص را بیش از پیش مستند ساخت.



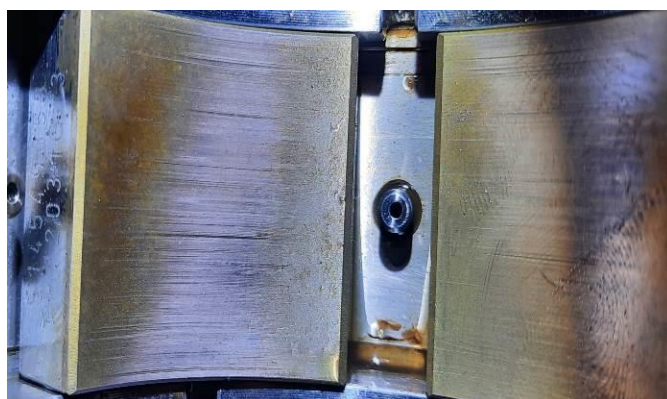
شکل ۵: نمودار FFT بعد از بالانس در شرایط FSFL



شکل ۶: نمودار Orbit بعد از بالانس در شرایط FSFL

۴- اقدامات اصلاحی

در نهایت، پس از تأیید قطعی وقوع عیب ناپایداری فیلم روغن، مجموعه‌ای از اقدامات اصلاحی پیشنهاد گردید که شامل بازنگری در مشخصات روانکار (ویسکوزیته)، تنظیم لقی (Clearance) یاتاقان و بازرسی و تعمیر یاتاقان‌ها بود. در راستای اجرای اقدامات اصلاحی مبتنی بر تشخیص عیب ناپایداری فیلم روغن، فرآیندهای رفع عیب به صورت مرحله‌ای دنبال شد. در گام نخست، به منظور بررسی وضعیت روانکار، نمونه‌برداری و آنالیز روغن انجام پذیرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که خواص فیزیکی و شیمیایی روانکار در وضعیت مطلوبی قرار دارد و مطابق با استانداردهای تعریف‌شده است؛ بنابراین، نیازی به تعویض روغن تشخیص داده نشد. لذا، تمرکز بر بازرسی اجزای مکانیکی یاتاقان‌ها معطوف گردید. طی این بازرسی، پدهای یاتاقان مورد ارزیابی دقیق و تست های PT و UT قرار گرفتند. نتایج حاکی از فرسودگی و وجود خط و خش بر روی پدها بود که طبق مدارک سازنده و استاندارد منجر به مردود شناخته شدن آن‌ها گردید. شکل ۷ تصویر پدهای معیوب را نشان می‌دهد که آثار خط و خش به وضوح قابل مشاهده است. بر این اساس، مجموعه پدهای موجود با پدهای جدید و استاندارد جایگزین شدند. علاوه بر این، به منظور افزایش پایداری دینامیکی روتور و مهار ناپایداری فیلم روغن، لقی یاتاقان‌ها به صورت محدودتر تنظیم گردید.



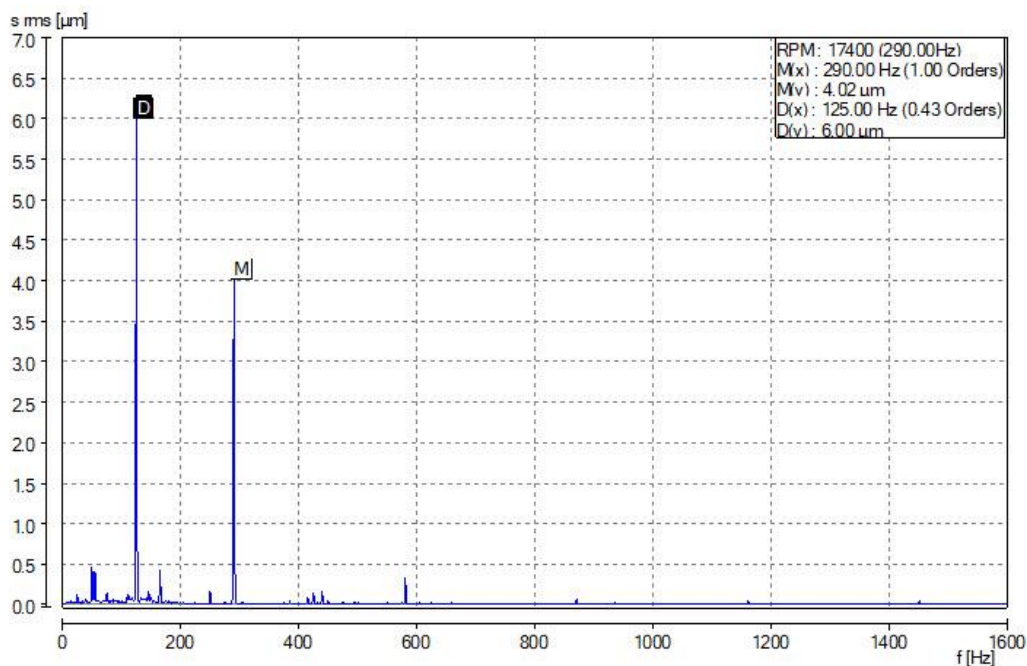
شکل ۷: وجود آثار خط و خش خارج از رنج مجاز بر روی پدهای یاتاقان

۵- بحث و نتایج

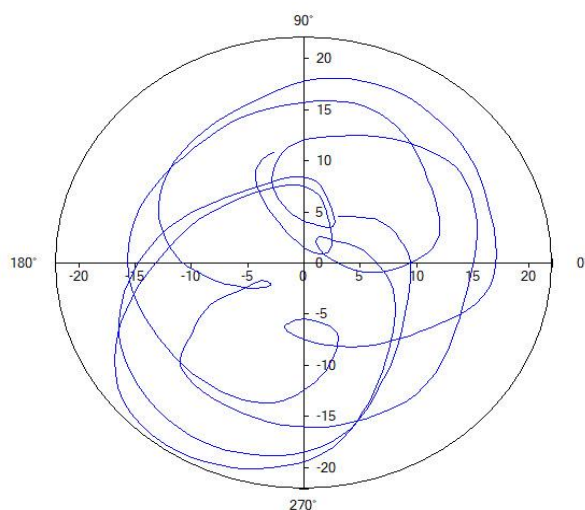
پس از اتمام فرآیندهای اصلاحی، توربوژنراتور مجدداً راه‌اندازی و داده‌برداری ارتعاشی در دور کاری و تحت شرایط بارگذاری تکرار شد. شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب نمودارهای FFT و اربیت در بارگذاری کامل و سرعت کاری (FSFL) سیستم را پس از انجام اقدامات اصلاحی نمایش می‌دهند. ارزیابی نتایج جدید حاکی از موفقیت اقدامات اصلاحی در کنترل و مهار ناپایداری فیلم روغن بود. مهم‌ترین دستاورد، کاهش سطح کلی ارتعاشات و قرار گرفتن آن در محدوده عملیاتی مجاز و ایمن بود. سطح ارتعاشات از $63 \mu\text{m P-P}$ به $30 \mu\text{m P-P}$ کاهش یافت که هدف اصلی این فرآیند اصلاحی را محقق ساخت.

یاتاقان‌های تیل‌تینگ پد به دلیل طراحی خاص خود، یعنی پدهایی که می‌توانند در مقایسه با یاتاقان‌های ساده ژورنالی مقاومت بیشتری در برابر ناپایداری‌های فیلم روغن نشان می‌دهند. با این حال، تحت شرایط کاری خاص مانند سرعت بالا، بارگذاری نامناسب، یا تغییرات غیرعادی در فیلم روغن، پدیده ناپایداری فیلم روغن می‌تواند در یاتاقان‌های تیل‌تینگ پد نیز اتفاق بیفتد. بنابراین، اگرچه تیل‌تینگ پد طراحی شده است تا پایداری دینامیکی بیشتری را فراهم کند، اما وقوع ناپایداری فیلم روغن در آن غیرممکن نیست.

تحلیل و بررسی دقیق نمودار FFT شکل ۸ یک نکته کلیدی را آشکار می‌سازد: اگرچه سطح ارتعاشات به طور قابل توجهی کاهش یافت اما مؤلفه فرکانسی $0.43X$ همچنان به عنوان فرکانس غالب در طیف فرکانسی باقی مانده است، اما دامنه مطلق آن به میزان چشمگیری کاهش یافته است. این امر نشان می‌دهد که پدیده ناپایداری فیلم روغن به طور کامل حذف نشده، بلکه به سطح قابل قبولی سرکوب شده است.



شکل ۸: نمودار FFT بعد از اصلاح کلیرنس و در شرایط FSFL



شکل ۹: نمودار Orbit بعد از تغییر کلیرنس در شرایط FSFL

این بهبود در نمودار اربیت شکل ۹ نیز کاملاً مشهود است. الگوی حرکت محور، در مقایسه با قبل از انجام اقدامات اصلاحی با کاهش دامنه و تعداد حلقه‌های درونی، به یک مسیر پایدار و منظم‌تر تبدیل شده است. با این حال همچنان اثراتی از ناپایداری و حلقه های درونی هرچند محدود دیده می شود.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهند که اقدامات انجام‌شده، با افزایش صلبیت و میرایی فیلم روغن، توانسته‌اند ناپایداری فیلم روغن را به طور مؤثری کنترل کرده و عملکرد تجهیز را به وضعیتی پایدار و قابل اطمینان بازگردانند.

۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مقاله، یک مطالعه موردی بر روی فرآیند عیب‌یابی ارتعاشات یک توربوژنراتور ۵ مگاواتی ارائه گردید. تحلیل داده‌های ارتعاشی به نتایج کلیدی زیر منجر شد:

تشخیص و تحلیل ناپایداری فیلم روغن در یاتاقان‌های تیل‌تینگ پد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است چرا که وقوع این پدیده در چنین یاتاقان‌هایی به دلیل طراحی هندسی و مکانیزم خودتنظیم پدها، نادر و به مراتب پیچیده‌تر است. تیل‌تینگ پد به دلیل توانایی خود در تطبیق با شرایط بارگذاری و توزیع بهتر فیلم هیدرودینامیکی، معمولاً مقاومت بالاتری در برابر ناپایداری‌های دینامیکی از جمله ناپایداری فیلم روغن نشان می‌دهد. با این حال، در سرعت‌های بالا، بارهای نامتعادل یا تغییرات غیرمنتظره در ضخامت فیلم روغن، این ناپایداری می‌تواند حتی در این یاتاقان‌های پیشرفته بروز کند که تشخیص دقیق آن نیازمند تحلیل‌های دقیق طیفی و دینامیکی از جمله استفاده از نمودارهای FFT و اربیت می‌باشد. در این مطالعه استفاده همزمان از نمودارهای FFT و اربیت برای تشخیص قطعی عیب ضروری بود. در حالی که FFT فرکانس مشخصه ناپایداری را شناسایی کرد، نمودارهای اربیت با نمایش حرکت غیرعادی و حلقوی محور، تاییدی بصری و غیرقابل انکار بر وقوع پدیده ناپایداری فیلم روغن ارائه دادند. که این نتایج با مدل‌های نظری موجود مطابقت کامل داشت. [۱۰، ۱۱، ۱۲]

این تحقیق به وضوح نشان داد که برخی از ناپایداری‌های دینامیکی مانند پدیده ناپایداری فیلم روغن، به شدت به شرایط کاری تجهیز وابسته هستند. در حالت بدون بارگذاری، سیستم رفتاری متفاوت از خود نشان می‌داد و فرکانس غالب $1X$ ، تشخیص اولیه را به سمت نابالانسی هدایت می‌کرد. و تنها تحت شرایط بارگذاری بود که مؤلفه فرکانسی زیرسنگرون در $0.43X$ ظاهر شد و ماهیت واقعی عیب را آشکار ساخت. این امر اهمیت حیاتی داده‌برداری و تحلیل در شرایط عملیاتی را برای تشخیص صحیح اثبات می‌کند. اقدامات اصلاحی (شامل تعویض پدها و تنظیم لقی یاتاقان) در مهار ناپایداری و کاهش سطح کلی ارتعاشات به محدوده مجاز، موفقیت‌آمیز بود. اجرای اصلاحات منجر به افزایش صلبیت سیستم و افزایش میرایی فیلم روغن شده و بدین ترتیب توانسته است پدیده ناپایداری فیلم روغن را به طور مؤثری کنترل نماید و عملکرد یاتاقان تیل‌تینگ پد و روتور را به وضعیت پایدار و قابل اطمینان بازگرداند.

پس از اجرای فرآیندهای اصلاحی، توربوژنراتور مجدداً راه‌اندازی شد و اندازه‌گیری‌های ارتعاشی تحت شرایط عملیاتی و بارگذاری مشابه، مجدداً انجام گردید. تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از نمودارهای FFT و اربیت نشان‌دهنده اثربخشی اقدامات اصلاحی در مهار ناپایداری فیلم روغن بود؛ به‌طوری‌که مقدار کلی ارتعاشات از $63 \mu m P-P$ به حدود $30 \mu m P-P$ کاهش یافت و در محدوده مجاز و ایمن عملکردی قرار گرفت. بر اساس یافته‌های این تحقیق اگرچه دامنه فرکانسی به شکل قابل توجهی کاهش یافته بود، اما فرکانس غالب مربوط به ناپایداری (حدود 0.43 ، برابر سرعت دوران) همچنان در طیف فرکانسی قابل مشاهده بود که این امر بیانگر سرکوب موثر اما عدم حذف کامل پدیده ناپایداری فیلم روغن می‌باشد و نشانه‌هایی محدود از ناپایداری همچنان باقی مانده است. بنابراین سیستم همچنان مستعد پیشرفت مجدد این ناپایداری تحت شرایط عملیاتی خاص قرار دارد. این مشاهده نشان می‌دهد که علت وقوع عیب ممکن است پیچیده‌تر بوده و عواملی فراتر از وضعیت یاتاقان نیز در آن دخیل باشند.

مراجع

1. Childs, D.W., Turbomachinery Rotor dynamics, 2nd Edition, Wiley, 2011.
2. Muszynska, A., Rotor Dynamics, CRC Press, 2005.
3. Rao, S.S., Mechanical Vibrations, 6th Edition, Pearson, 2017.
4. Harris, T.A., Shock and Vibration Handbook, McGraw-Hill, 2001.
5. Ehrich, F.F., Handbook of Rotor dynamics, McGraw-Hill, 1999.
6. Nelson, H.D., Vibration Analysis of Rotors, ASME Journal, 2010.

7. Palm, H., Oil Whirl in Journal Bearings, Tribology International, 2008.
8. Harris, C.M., Mechanical Vibrations, 4th Edition, McGraw-Hill, 2002.
9. D. E. Bently, C. Hatch, Bob Grissom Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics Published 1 March 2003 · Engineering.
10. Muszynska, A., Journal Bearing Whirl and Whip Phenomena, Mechanical Systems and Signal Processing, 1996.
11. Childs, D.W., The Dynamics of Rotor-Bearing Systems, ASME, 2001.
12. Wong, V.W., Oil Whirl Case Studies in Gas Turbines, Journal of Turbomachinery, 2005.