سال ۲۹، شماره ۱۳۲، صفحات ۱۴–۲۳، نوع مقاله: ترویجی

مجله علمی مهندسی مکانیک

ISSN: 1605-9719

تشخیص عیب در توربوکمپرسورهای ایستگاه‌های تقویت فشار گاز با بکارگیری روش آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی تجربی

مسعود مینائی[۱ و *]، شاپور پرویزی حمزه‌خانلو[۲]

[۱] استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

[۲] کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، مؤسسه آموزش عالی نبی اکرم (ص)، تبریز، ایران

*مسئول مکاتبات: ac.minaei@azaruniv.ac.ir

◄ چکیده

ایستگاه‌های تقویت فشار گاز جهت افزایش فشار گاز و نیز جلوگیری از افت فشار آن در فواصل مشخصی از خطوط انتقال گاز احداث شده و مورد بهره‌برداری واقع می‌شوند. به دلیل افت فشار ایجادشده در نتیجه انبساط گاز، وجود تلفات اصطکاکی، تغییر در ارتفاع و یا نوسانات دما و به منظور جبران تلفات فشار در این ایستگاه‌ها، از توربوکمپرسورها جهت متراکم کردن گاز و افزایش فشار آن استفاده می‌شود. در مقاله حاضر با استفاده از روش آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی به بررسی و پایش وضعیت توربوکمپرسورهای ایستگاه‌های تقویت فشار گاز و همچنین شناسایی عیوب ایجادشده در این تجهیزات پرداخته می‌شود. بدین منظور، سیگنال‌های ارتعاشی به صورت تجربی و با استفاده از سنسورهای شتاب‌سنج نصب‌شده روی بدنه توربوکمپرسور به کمک سیستم داده‌برداری ثبت می‌شود. سپس با استفاده از آنالیز طیف فرکانسی و بر اساس استاندارد ISO 10816، به بررسی وجود عیب و نوع آن در توربوکمپرسورهای ایستگاه‌های مختلف تقویت فشار شامل ایستگاه‌های قلعه‌جوق، نکا، نور، مرگنلر و تبریز پرداخته می‌شود.

◄ واژگان کلیدی

تشخیص عیب
ایستگاه تقویت فشار گاز
توربوکمپرسور
روش آنالیز سیگنال ارتعاشی تجربی
تبدیل فوریه سریع

◄ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۳/۲۵
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

۱ مقدمه

امروزه انرژی به طور تعیین‌کننده‌ای بر اقتصاد، پیشرفت و حیات کشورهای در حال توسعه تأثیرگذار است. ایستگاه‌های تقویت فشار خطوط انتقال گاز نقش عمده‌ای را در تأمین انرژی در سطح کشور بر عهده دارند. تعداد زیادی ایستگاه تقویت فشار در اندازه و ظرفیت‌های مختلف با عمر متفاوت در داخل کشور مشغول به کار هستند. بسیاری از این ایستگاه‌ها که عمر مفید خود را طی نموده و وارد مرحله فرسایش و خستگی شده‌اند احتیاج بیشتری به مراقبت و تعمیرات صحیح دارند. در همین راستا تکنیک‌های مختلف پایش وضعیت روی توربوکمپرسورها توسط محققان مختلف اجرا شده است [۱–۳]. به طوری که امروزه هر واحد دارای توربوکمپرسور از حداقل تکنیک‌های وضعیت‌سنجی بهره می‌برد. این در حالی است که برای بسیاری از توربوکمپرسورهای نیروگاه‌های پیشرفته تکنیک‌های مختلف وضعیت‌سنجی بطور همزمان بکار گرفته می‌شود. نگهداری بر اساس پایش وضعیت، بطور عمده بر قابلیت اطمینان واحدهای صنعتی افزوده و از طرفی باعث کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیر این واحدها شده است [۴–۷].

کنترل ارتعاشات برای تشخیص ارتعاشات غیرعادی حاصل از نواقص، یکی از روش‌های پایش وضعیت ماشین‌آلات دوار است [۸]. در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه عیب یابی ماشین‌آلات دوار از قبیل درایو شافت‌ها، چرخ‌دنده‌ها و یاتاقان‌ها از طریق آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی صورت گرفته است. وانگ و مک فادن [۹] به بررسی کاربردهای تبدیل موجک در تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی چرخ‌دنده پرداخته و نشان دادند که این تبدیل، قابلیت تشخیص عیب در مراحل اولیه و همچنین انواع عیب را دارا است. به منظور شناسایی عیب و پایش وضعیت روش‌های مختلفی ارائه شده که پایش وضعیت بر مبنای تحلیل ارتعاشات یکی از ایمن‌ترین و دقیق‌ترین روش‌ها در این زمینه است. با توجه به اینکه سیگنال‌های ارتعاشی گرفته‌شده از ماشین حاوی اطلاعات مفیدی هستند [۱۰] بنابراین با بررسی ویژگی‌های فیزیکی سیگنال‌های ارتعاشی و استخراج ویژگی‌های آن می‌توان به وجود عیب در بخش‌های مختلف ماشین‌آلات پی‌برد. راجسواری و همکاران [۱۱] از حوزه زمان–فرکانس برای استخراج ویژگی‌های آماری سیگنال‌های ارتعاشی مربوط به چرخدنده‌های معیوب استفاده نمودند. آنها با به کارگیری تبدیل موجک به عنوان یک پردازنده، سیگنال را به حوزه زمان–فرکانس بردند. سپس ویژگی‌های آماری را استخراج کرده و به علت وجود ویژگی‌های زیاد سیگنال‌ها در روش تبدیل موجک، از الگوریتم اکتشافی ژنتیک برای کاهش ابعاد و انتخاب ویژگی‌های مناسب‌تر سیگنال‌ها استفاده نمودند. در سال ۲۰۱۶، تاری‌نژاد و پورقلی [۱۲] روشی برای شناسایی مودال سدهای بتنی قوسی شهید رجایی و سد پاکویما تحت عنوان شناسایی زیرفضای تصادفی متعادل‌شده پیشنهاد کردند. در واقع روش پیشنهادی از روشهای حوزه زمان بوده که نتایج بیانگر دقت بالای آن در شناسایی فرکانس‌ها و ضرایب میرایی است. روش پیشنهادی ایشان قابلیت بالایی از لحاظ زمان لازم برای فرآیند شناسایی دارد بطوریکه منجر به کاهش ۵۰ درصدی در زمان تحلیل می‌شود.

در مقاله حاضر هدف، بررسی وضعیت توربوکمپرسورهای موجود در

ایستگاه‌های مختلف تقویت فشار گاز کشور و تعیین عیوب و نواقص آن با استفاده از روش آنالیز ارتعاشی تجربی است. توربوکمپرسورهای ایستگاه‌های انتقال گاز بر اساس میزان مصرف کشوری در مدار قرار می‌گیرند. همچنین نقطه کاری کمپرسور شامل سرعت ماشین، فشار و دبی بر اساس نیاز شبکه متغیر است. به منظور اینکه در بازدید از ایستگاه‌های تقویت فشار اندازه‌گیری از حداکثر تعداد توربوکمپرسور انجام شود، کلیه داده‌برداری‌های ارتعاشی در فصل زمستان انجام شد. اندازه‌گیری‌ها مربوط به پنج توربوکمپرسور در ایستگاه‌های قلعه‌جوق، نکا، نور، مرگنلر و تبریز، از مجموع ده توربوکمپرسور موجود در خطوط انتقال گاز کشور در منطقه شمال غرب کشور است. اندازه‌گیری ارتعاشات در کلیه ایستگاه‌ها به کمک سنسورها و تجهیزات پرتابل ارتعاشی انجام شده و سپس تجزیه و تحلیل روی داده‌ها صورت گرفته است. در ادامه با استفاده از آنالیز طیف فرکانسی و بر اساس استاندارد ISO 10816، به بررسی وجود یا عدم وجود عیب به همراه نوع آن در توربوکمپرسورهای ایستگاه‌های مختلف پرداخته شده است.

۲ اهمیت عیب‌یابی در ایستگاه‌های تقویت فشار گاز

امروزه انرژی به طور تعیین‌کننده‌ای بر اقتصاد، پیشرفت و حیات کشورهای در حال توسعه تأثیرگذار است. ایستگاه‌های تقویت فشار خطوط انتقال گاز نقش عمده‌ای در تأمین انرژی کشور بر عهده دارند. تعداد زیادی ایستگاه تقویت فشار در اندازه و ظرفیت‌های مختلف با عمر متفاوت در داخل کشور مشغول به کار هستند. بسیاری از این ایستگاه‌ها که عمر مفید خود را طي نموده و وارد مرحله فرسایش و خستگی شده‌اند، احتیاج بیشتری به مراقبت و تعمیرات صحیح دارند. علاوه بر این برای جبران افت فشار، ایستگاه‌های جدید در حال ساخت نیازمند برنامه تعمیراتی هستند. معمولاً به خاطر عدم وابستگی به انرژی برق، در ایستگاه‌های تقویت فشار از توربوکمپرسورها استفاده می‌شود. توربین‌های گازی به لحاظ برخورداری از سرعت و دمای کارکرد بالا دارای حساسیت ویژه‌ای بوده و نیاز به روش‌های دقیق تعمیر و نگهداری دارند. از این رو تکنیک‌های مختلف پایش وضعیت روی توربوکمپرسورها اجرا می‌شود. امروزه هر واحد دارای توربوکمپرسور از حداقل تکنیک‌های وضعیت‌سنجی بهره می‌برد. این در حالی است که برای بسیاری از توربوکمپرسورهای نیروگاه‌های پیشرفته، تکنیک‌های مختلف وضعیت‌سنجی به طور همزمان بکار گرفته می‌شود. نگهداری بر پایه وضعیت بر قابلیت اطمینان واحدهای صنعتي افزوده و از طرفی باعث کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیر این واحدها شده است. در حالت کلي متداول‌ترین عیوب مکانیکی که سبب تغییر رفتار ارتعاشی و در نتیجه تغییر پاسخ ماشین‌های دوار می‌شود، در جدول ۱ نشان داده شده است. نامیزانی شامل نامیزانی جرمی، خمیدگی شفت، شل شدن قطعات دوار نظیر پره‌ها و ... است. نصب نادرست شامل عدم هم محوری در اثر نشست تکیه‌گاه‌ها و فونداسیون، خرابی کوپلینگ‌ها و عدم نصب صحیح یاتاقان‌ها است. تشدید و ناپایداری در اجزای مختلف ماشین شامل ناپایداری در یاتاقان‌ها، ناپایداری آیرودینامیکی، تماس و سایش است. ارتعاشات ناشی از کاویتاسیون، جریان در لوله‌ها، کوپل ارتعاشات خمشی و پیچشی و... از سایر عوامل ارتعاشی محسوب می‌گردند [۵]. با توجه به اینکه هدف از مقاله حاضر بررسی وضعیت توربوکمپرسورهای موجود در ایستگاه‌های تقویت فشار گاز کشور و تعیین عیوب و نواقص آن است، بنابراین به منظور اینکه در بازدید از ایستگاه‌های تقویت فشار، حداکثر توربوکمپرسورهای در حال کارکرد مورد مطالعه قرار گیرند، با توجه به پای خط بودن ماکزیمم تعداد توربوکمپرسورها در فصل زمستان، داده‌برداری در این فصل انجام شد. اندازه‌گیری‌ها مربوط به پنج توربوکمپرسور از مجموع ده توربوکمپرسور موجود در خطوط انتقال گاز کشور در منطقه شمال غرب کشور است. در شکل ۱ نمونه‌ای از توربوکمپرسورها تحت بررسی در ایستگاه نکا نشان داده شده است.

جدول ۱: دسته‌بندی عیوب مکانیکی و درصد وقوع آنها [۵].

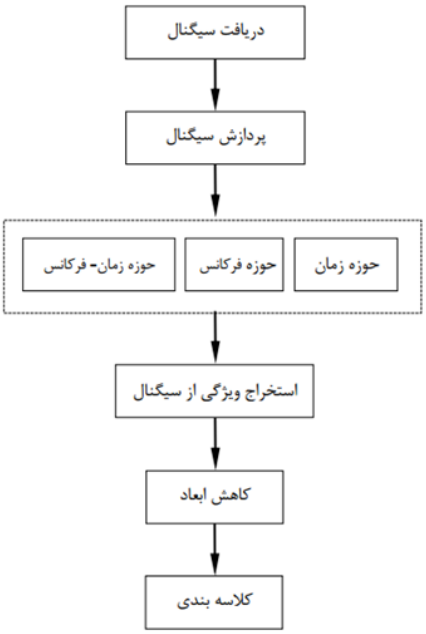
ردیف	نوع عیب (عامل ارتعاشات)	درصد وقوع
۱	نامیزانی	۴۰
۲	نصب نادرست	۳۰
۳	تشدید و ناپایداری	۲۰
۴	سایر عوامل	۱۰

شکل ۱: نمونه‌ای از توربوکمپرسورهای تحت بررسی.

۳ روش‌های آنالیز سیگنال ارتعاشی تجربی، کاربردها و استانداردها

امروزه انواع تکنیک‌های تحلیل ارتعاشی برای تشخیص نقص هر یک از اجزای ماشین‌آلات دوار مورد بررسی قرار می‌گیرد. تکنیک‌های تحلیل ارتعاشی با دو هدف اصلی جدا کردن سیگنال مربوط به اجزای مختلف ماشین از یکدیگر و نیز تشخیص موقعیت جزء مورد اشکال و بکار برده می‌شود. به طور کلی روند عیب‌یابی ارتعاشی را می‌توان در شکل ۲ مشاهده نمود. تکنیک‌های تشخیص که بر اساس ارتعاش پایه‌گذاری شده‌اند به دلیل سهولت اندازه‌گیری، مطلوب‌ترین تکنیک‌های پایش وضعیت بوده‌اند. آنالیز ارتعاشی قبلاً در جهت تشخیص نواقص و شرایط بحرانی مورد استفاده قرار می‌گرفت در صورتی که امروزه آنالیز ارتعاشی برای پایش وضعیت و کاهش تکرار نقص دستگاه و همچنین استفاده مؤثرتر از منابع موجود مورد استفاده قرار می‌گیرد. تکنیک‌های آنالیز ارتعاشی به سه حوزه زمان، فرکانس و زمان ـ فرکانس تقسیم می‌شوند. هر کدام از این حوزه‌ها مزایایی نسبت به دیگری دارد. در خصوص

ارتعاشات ناشی از تحریک‌های طبیعی باید توجه داشت که هر چند در برخی از موارد امکان اندازه‌گیری ورودی وجود دارد ولی به دلیل ورود به ناحیه غیرخطی، بسیاری از روش‌های شناسایی عمومی و رایج قابل استفاده نیستند. روش‌های زمان–فرکانس برای سیستم‌های متغیر با زمان مثل سدهای آسیب دیده برای اطلاع از زمان شروع آسیب یا روند تغییرات فرکانسی با گسترش ترک در مقابل زمان مناسب است. در مقاله حاضر از روش تبدیل فوریه سریع (FFT) که زیرمجموعه تکنیک‌های آنالیز ارتعاشی در حوزه فرکانس است، استفاده می‌شود. حوزه فرکانس نه تنها نواقص را در ماشین‌آلات دوار تعیین می‌کند، بلکه دلیل نقص را نیز مشخص می‌سازد.



شکل ۲: دیاگرام روند عیب‌یابی ارتعاشی.

۱.۳ روش تبدیل فوریه سریع

آنالیز فرکانسی که به آن آنالیز اسپکتروم یا FFT نیز می‌گویند، یک فرآیند پردازش سیگنال است که به کمک آن محتوای فرکانسی سیگنال ارتعاشی به دست می‌آید. در منحنی‌های FFT، محور افقی، فرکانس و محور عمودی، دامنه ارتعاش را نشان می‌دهد. برای یک سیگنال گسسته خواهیم داشت:

$$x(t)\sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k e^{jk\omega t} \qquad (۱)$$

که در آن ضریب ثابت به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$a_k = \frac{۱}{T}\int_{-T/۲}^{T/۲} x(t)e^{-jk\omega t}dt \qquad (۲)$$

با توجه به اینکه در عمل سیگنال‌های ثبت‌شده به صورت گسسته هستند، بنابراین به منظور اعمال تبدیل فوریه به داده‌های گسسته باید از تبدیل فوریه گسسته با زمان استفاده نمود. با توجه به روابط فوق، تبدیل فوریه یک سیگنال گسسته در زمان را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$F\{h[n]\}=\sum_{n=۰}^{N-۱} h[n]e^{-۲\pi j\frac{m}{N}n},\ m=۰,۱,۲,\ldots,N-۱ \qquad (۳)$$

که در آن:

$$h[n]=F^{-۱}\{H(e^{j\omega})\}=\frac{۱}{۲\pi}\int_{-\pi}^{\pi} H(e^{j\omega})e^{j\omega n}d\omega \qquad (۴)$$

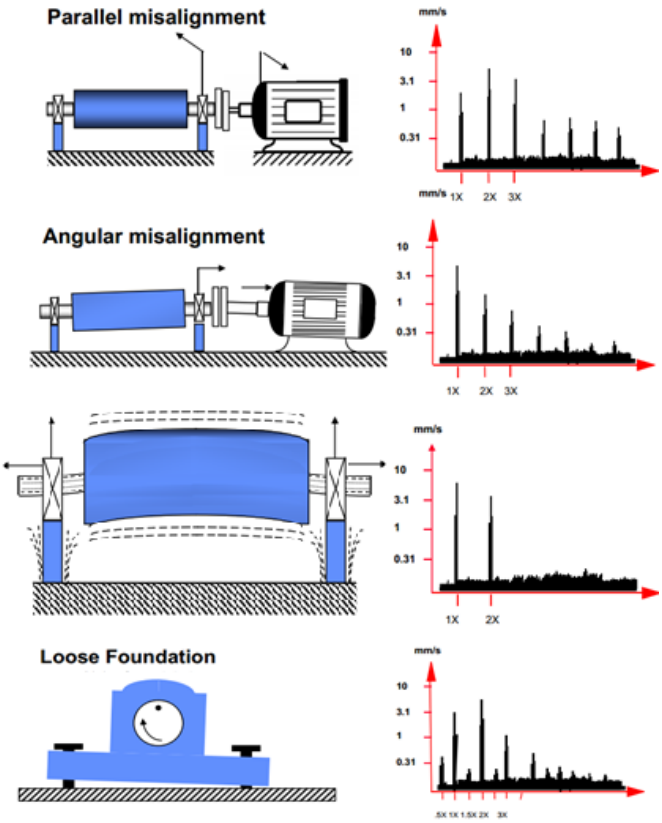
۲.۳ کاربرد روش‌های آنالیز سیگنال ارتعاشی تجربی

محورهای دوار یکی از تجهیزات مورد استفاده در صنایع مختلف هستند. یکی از عیوب متداول در محورها خمیدگی محور است که می‌تواند موقتی یا دائمی باشد. خمیدگی موقت محور می‌تواند یک عیب گذرا بر اثر سایش محور باشد. دلیل دیگر خمیدگی محور تغییرات حرارتی است که ممکن است براثر فرآیند ناصحیح راه‌اندازی سیستم، فقدان روانکار و اشتباهات نصب ایجاد شود. بررسی اوج به اوج سیگنال ارتعاشی در سرعت دورانی پایین، یکی از شاخص‌های بسیار مفید در تشخیص خمیدگی محورها محسوب می‌شود. اختلاف زاویه فاز سیگنال ارتعاشی در نقاط روبروی دو طرف محور دوار یکی دیگر از نشانه‌های وجود خمیدگی در محور دوار محسوب می‌شود. نابالانسی جرمی یکی دیگر از عیوب محورهاست که به علت ماشینکاری نامناسب، ناهمگنی ماده اولیه یا عملیات نگهداری به وجود می‌آید. نابالانسی جرمی به عنوان یکی از عوامل مخرب در ماشین‌های صنعتی است که می‌تواند باعث خرابی اجزای جانبی محور نظیر موتور و یاتاقان‌ها شود. نابالانسی جرمی باعث ایجاد پیک در نمودار FFT می‌شود که فرکانس آن دقیقاً برابر فرکانس دوران محور بوده و دامنه آن متناسب با مقدار نابالانسی است. محورهای دوار معمولاً تحت بار دینامیکی قرار می‌گیرند و از این لحاظ رشد ترک در محور می‌تواند عامل مخربی محسوب شود. این نوع خرابی در ماشین‌های صنعتی باعث صرف هزینه زیادی جهت تعمیر می‌شود. از این رو معرفی روشی مناسب جهت پایش وضعیت محور و بررسی رشد ترک بسیار ضروری است. تحقیقات نشان داده است که با رشد ترک در محور ضمن انتقال اوج سیگنال ارتعاشی به سمت فرکانس‌های پایین‌تر، دامنه سیگنال ارتعاشی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین با استفاده از نمودار فرکانسی می‌توان به خوبی روند رشد ترک را در محورهای دوار زیر نظر داشت. با بررسی طیف فرکانسی دستگاه‌ها می‌توان علاوه بر محدوده عملکردی دستگاه، در مورد برخی از عیوب ایجادشده در تجهیزات قضاوت نمود. برای نمونه، در شکل ۳ رفتار کلی تابع پاسخ فرکانسی به همراه عیوب متناظر نشان داده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که عمده عیوب شایع در توربوکمپرسورهای ایستگاه‌های تقویت فشار گاز ناهمراستایی محوری، نابالانسی و لقی فونداسیون هستند.

۳.۳ استاندارد ISO 10816

به طور کلی در ماشین‌آلات دو نوع نیرو شامل نیروهای استاتیکی و نیروهای دینامیکی وجود دارد. نیروهای ارتعاش‌زا از نوع نیروهای دینامیکی هستند که بر اثر وجود کاستی‌هایی در ماشین ایجاد می‌شوند. برخی از زمینه‌های بروز کاستی (انحراف از حالت ایده‌آل) عبارت از محدودیت‌های طراحی و محدودیت‌های ساخت، اشکال در نصب اولیه، اشکال در بهره‌برداری و بروز اشکالات در حین تعمیرات است. چون رسیدن به حالت ایده‌آل ممکن نیست، همیشه تا حدی لرزش و ارتعاش در ماشین‌آلات وجود دارد که مجاز شمرده

می‌شوند. با گذشت زمان و بر اثر بروز اشکالات بعدی، ممکن است میزان ارتعاشات نسبت به حد مجاز افزایش یابد که با آنالیز ارتعاشات و انجام اقدامات اصلاحی مناسب، می‌توان وضعیت را به حالت قبل برگرداند.



شکل ۳: رفتار کلی تابع پاسخ فرکانسی به همراه عیوب متناظر [۱۳].

میزان ارتعاش ماشین نسبت نیروی حاصل از ارتعاش بر امپدانس مکانیکی آن است. به منظور ارزیابی عملکرد ماشین‌آلات، استانداردهای معتبر زیادی مانند DIN-120، ISO-10816، ISO-2372، VDI2056، ISO-7919 و... وجود دارند. معمولاً در این استانداردها نحوه اندازه‌گیری، مقادیر مجاز، حدود آلارم و خطر بر حسب نوع و توان تجهیز و نحوه نصب آن طبقه‌بندی شده است. در شرایطی که سابقه‌ای از دستگاه در دسترس نباشد، استفاده از این استانداردها توصیه می‌گردد. یکی از معتبرترین استانداردهای مورد استفاده به منظور پایش وضعیت در توربوکمپرسورها، استاندارد ISO-10816 است. در این استاندارد کلیه ملزومات و نکات مهم در زمینه پایش وضعیت ماشین‌آلات بر اساس ارتعاش‌سنجی مطرح شده است.

البته شایان ذکر است که موضوع عیب‌یابی توسط این استاندارد پوشش داده نشده و صرفاً ارزیابی وضعیت به صورت کلی آورده شده است. استاندارد فوق با توجه به نوع ماشین آلات به شش بخش تقسیم شده که عناوین آن در جدول ۲ آمده است. در این استاندارد مشخصات مورد نیاز برای دستگاه اندازه‌گیری، محل‌های اندازه‌گیری مناسب و شرایط کاری لازم، مورد بحث قرار گرفته است. لازم به ذکر است که این استاندارد منطبق بر استاندارد ملی ایران با کد ISIRI-9810 است.

بر اساس این استاندارد به عنوان یک قاعده کلی در آنالیز ارتعاشات ماشین‌آلات، برای ماشین‌ها با دور کمتر از ۶۰۰ rmp، از دامنه جابه‌جایی، برای ماشین‌ها با دور ۶۰۰ rmp تا ۶۰۰۰ rmp از دامنه سرعت و برای ماشین‌ها با دور بیشتر از ۶۰۰۰ rpm، از دامنه شتاب بایستی استفاده گردد.

جدول ۲: عناوین سری استانداردهای ISO 10816.

ردیف	موضوع
ISO 10816-1	راهنمایی‌های کلی
ISO 10816-2	توربین‌های بخار بزرگ‌تر از ۵۰ MW
ISO 10816-3	ماشین‌آلات صنعتی با توان بیشتر از ۱۵ KW و سرعت دورانی ۱۲۰ تا ۱۵۰۰۰ دور بر دقیقه
ISO 10816-4	توربین‌های گازی (به غیر از موتور هواپیما)
ISO 10816-5	توربوژنراتورهای برق آبی و ماشین‌آلات ایستگاه‌های پمپاژ
ISO 10816-6	ماشین‌آلات رفت و برگشتی با توان بیشتر از ۱۰۰ KW

از طریق آنالیز ارتعاشات می‌توان به شناسایی عیوب مختلفی مانند نامیزانی جرمی، تشدید (رزونانس)، لقی مکانیکی، خرابی بیرینگ، خرابی چرخ‌دنده، فونداسیون معیوب، اشکالات الکتریکی، اشکالات آئرودینامیکی و هیدرودینامیکی، خرابی کوپلینگ، خرابی تسمه و پولی، اشکالات پایپینگ، اعوجاج پوسته، خارج از مرکزی و نیز شفت خمیده پی برد. نکته مهم و کلیدی در عیب‌یابی از طریق تحلیل ارتعاشات این است که هر عیبی در تجهیزات دوار، لرزش و ارتعاشی با مشخصات خاص خود (از لحاظ دامنه، فرکانس، فاز و غیره) ایجاد می‌نماید. عیوب مختلفی که برای ماشین‌آلات دوار رخ می‌دهند، هرکدام همراه با رفتار دینامیکی خاص خود و به تعبیر دیگر با مشخصه های ارتعاشی ویژه‌ای رخ می‌دهند. یکی از مشخصه‌های مهم ارتعاش، فرکانس ارتعاشی است. معمولاً ارتعاش اندازه‌گیری‌شده از روی ماشین، یک سیگنال پیچیده و ترکیبی از چندین سیگنال ارتعاشی با فرکانس‌های مختلف است. طبق آخرین استاندارد ارزیابی ارتعاشات (ISO 10816) برای ماشین‌ها چهار وضعیت تعریف می‌شود. وضعیت A یا خوب، که برای ماشین های نو یا تازه تعمیر شده می‌باشد. وضعیت B یا مجاز که در این حالت کارکرد طولانی مدت ماشین بلامانع است. وضعیت C یا هشدار که در این حالت ماشین تا اولین فرصت تعمیراتی می تواند به کار خود ادامه دهد. وضعیت D یا خطر که در این حالت ادامه کار ماشین باعث تخریب آن می‌شود. تحلیل‌گر ارتعاشات باید پس از اندازه‌گیری ارتعاشات از نقاط مختلف ماشین بر اساس نوع، توان و دور ماشین و همچنین میزان انعطاف‌پذیری آن وضعیت ماشین را مشخص کند و به بهره‌بردار و یا کارشناس تعمیراتی ماشین اعلام نماید. اگر وضعیت ماشین در محدوده C و یا D قرار گرفت، تحلیل‌گر ارتعاشات باید با رؤیت طیف‌های ارتعاشی در نقاط و جهات مختلف ماشین و همچنین استفاده از سوابق ارتعاشی و تعمیراتی ماشین و نیز بهره بردن از توان کارشناسی و تجارب خود عیب ماشین را شناسائی نماید. بهترین مرجع جهت تعیین میزان ارتعاش قابل قبول و یا عادی ماشین اطلاعات سازنده آن است معمولاً سازندگان بر اساس تجربه از میزان ارتعاشات معمول محصولات خود مطلع هستند. لذا در صورت عدم وجود تجربه شخصی و یا تاریخچه گذشته ماشین، بهتر است از توصیه سازنده ماشین استفاده گردد. در میان معیارهای ارزیابی ارتعاشات استاندارد ISO و API اهمیت بیشتری در ارزیابی ارتعاشی ماشین‌آلات دارند. در جدول ۳

مقادیر مجاز ارتعاشات که مربوط به اطلاعات دریافتی از سازنده است، برای برخي از این توربوکمپرسورها نشان داده شده است. با توجه به استاندارد ISO 10816، در جدول ۳ مرز این نواحی برای توربین‌های گازی نشان داده شده است.

جدول ۳: مقادیر ارتعاشات در مرز نواحی مختلف با توجه به استاندارد ISO 10816.

ردیف	سرعت ارتعاشات (mm/s)	مرز نواحی
۱	۴/۵	A/B
۲	۹/۳	B/C
۳	۱۴/۷	C/D

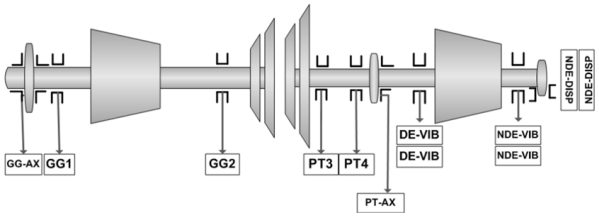
بر اساس استاندارد، مقدار هشدار باید ۲۵ درصد پایین‌تر از مرز ناحیه C قرار گیرد. مقدار توقف نیز در بین نواحی C و D قرار می‌گیرد. با توجه به کاتالوگ‌های شرکت‌های مختلف تولیدکننده توربوکمپرسور، در جدول ۴ مقدار متوسط ارتعاشات در مدل‌های مختلف توربین و کمپرسور مورد استفاده در ایستگاه‌های تقویت فشار گاز آورده شده است. مقدار ارتعاش محاسبه شده، متوسط کلی برای تمام نقاط اندازه‌گیری در یک مدل توربوکمپرسور بوده که شامل تمامی توربوکمپرسورهای موجود از همان مدل در ایستگاه‌های تقویت فشار است.

جدول ۴: مقدار متوسط ارتعاشات توربوکمپرسورهای ایستگاه‌های انتقال گاز

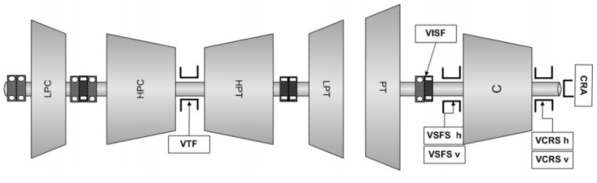
ردیف	توربین / کمپرسور	مقدار متوسط ارتعاشات در یک توربو کمپرسور	
		دامنه سرعت یاتاقان (mm/s)	جابجایی شفت (μm)
۱	ROLLS-ROYCE (AVON) / COOPER-B (COBERRA-154)	۴/۶۹	–
۲	SIEMENS (EM-85) / CLARK (0408-2)	۱/۲۹	۲۳/۴۵
۳	SIEMENS (GT10B) / SIEMENS	۱/۹۰	۲۴/۱۵
۴	N.PIGNONE (MS5002C) / N.PIGNONE (PCL-802-3)	۰/۸۸	۱۵/۳۲
۵	N.PIGNONE (MS5002C) / N.PIGNONE (PCL-802)	۱/۰۵	۱۳/۲۰
۶	ZAVOD (GTK-10-3) / NEVMACH (26010-13-1)	۱/۲۰	–
۷	MAN-GHH (THM1304/11) / MAN-TURBO (RV050/04)	۱/۴۸	۲۴/۷۹
۸	D.RAND (DR-990) / D.RAND (553P3)	۰/۳۸	۳۵/۰۸
۹	MOTOR-SICH (D-336-2-8) / SUMY (GPA-C-8A)	۴/۲۵	۲۲/۲۱
۱۰	MOTOR-SICH (D-336-2) / SUMY (GC2-6.3/74)	۶/۱۶	۱۵/۴۶

۴ معرفی انواع توربوکمپرسورهای مورد مطالعه

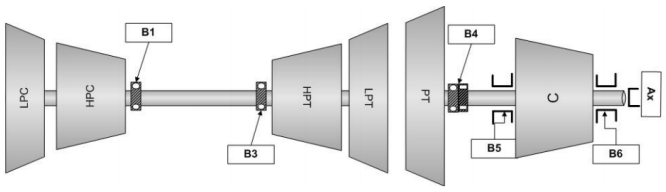
بر اساس اعلام شرکت ملی گاز ایران، در ایستگاه‌های تقویت فشار گاز کشور، مجموعاً از پانزده مدل توربین از ده سازنده مختلف و بیست و یک مدل کمپرسور از ده سازنده مختلف دیگر استفاده شده است. به منظور حفاظت و پایش وضعیت توربوکمپرسورهای موجود در ایستگاه‌های تقویت فشار گاز از سنسورهای ارتعاشی مختلفي با محل نصب متفاوت استفاده می‌شود. در شکل‌های ۴ تا ۶ نمایی از چند نمونه توربوکمپرسورهای مورد استفاده در ایستگاه‌های تقویت فشار به همراه نوع و محل نصب سنسورها نشان داده شده است. در جدول‌های ۵ تا ۷، نوع و محل نصب سنسورهای مورد استفاده در اندازه‌گیری ارتعاشات این تجهیزات آورده شده است.



شکل ۴: شماتیک توربین SIMENS مدل GT10B و کمپرسور SIMENS مدل 10MV2A.



شکل ۵: شماتیک توربین ZORYA مدل DJ59L2 و کمپرسور SUMY مدل GPU-16.



شکل ۶: شماتیک توربو کمپرسور MOTOR-SICH مدل SUMY.

علاوه بر مدل‌های نشان داده شده در شکل‌های ۴ تا ۶، انواع دیگری از توربوکمپرسورها نیز در ایستگاه‌های تقویت فشار مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جدول ۵: نوع و محل نصب سنسورهای مورد استفاده در اندازه‌گیری ارتعاشات توربین SIMENS مدل GT10B

نوع سنسور	محل نصب	تعداد
Proximity Probe (جابجایی سنج)	NDE-VIB, DE-VIB, NDE-DISP	۳
Proximity Probe (جابجایی سنج)	PT-AX, GG-AX	۴
Acceleration Probe (شتاب سنج)	GG1, GG2, PT3, PT4	۲

جدول ۶: نوع و محل نصب سنسورهای مورد استفاده در اندازه‌گیری ارتعاشات توربین ZORYA مدل DJ59L2.

نوع سنسور	محل نصب	تعداد
Acceleration Probe (شتاب سنج)	PT, GG	۲
Proximity Probe (جابجایی سنج)	CRSV, CRSH, CESH, CESV	۴
جابجایی سنج محوری	CRA	۱

جدول ۷: نوع و محل نصب سنسورهای مورد استفاده در اندازه‌گیری ارتعاشات توربین SIMENS مدل GT۱۰B

نوع سنسور	محل نصب	تعداد
Probe Acceleration (شتاب سنج)	B1, B2, B4	۳
Proximity Probe (جابجایی سنج)	B6, B5	۴
جابجایی سنج محوری	Compressor Thrust-Ax	۲

۵ اندازه‌گیری ارتعاشات و انجام تست‌های تجربی

توربوکمپرسورهای ایستگاه های انتقال گاز بر اساس میزان مصرف در مدار قرار می‌گیرند. همچنین نقطه کاری کمپرسور شامل سرعت ماشین، فشار و دبی بر اساس نیاز شبکه متغیر است. توربوکمپرسورهای مورد استفاده در خطوط انتقال گاز دارای دور متغیر بوده و بر اساس فشار و جریان مورد درخواست خط سرعت کمپرسور، تنظیم می‌گردد. با توجه به اینکه دامنه ارتعاشات توربین و کمپرسور با تغییرات دور و بار ماشین تغییر می‌کند، لازم است شرایط بهره‌برداری ماشین در زمان اندازه‌گیری لحاظ شود. از طرف دیگر با توجه به محدودیت زمان حضور برای اندازه‌گیری در هر ایستگاه و محدودیت‌های اعمال شده از طرف مرکز بهره‌برداری خطوط لوله، امکان تغییر و مانور بار روی توربوکمپرسور میسر نبود. بر این اساس، اندازه‌گیری ارتعاشات در هر ایستگاه در شرایط بهره‌برداری نرمال ماشین و با اطمینان از ثابت بودن وضعیت انجام گرفته و در هر ماشین، پارامترهای مشخصه کارکرد ماشین در زمان اندازه گیری ثبت می‌گردد. در هر ماشین، اندازه‌گیری ارتعاشات معمولاً به دو طریق انجام گرفت. اول اندازه‌گیری با دستگاه پرتابل و نصب موقت سنسور با پایه مغناطیسی که در نقاط قابل دسترسي در هر ماشین انجام شد. دوم، اندازه‌گیری با دستگاه پرتابل و سنسورهای موجود روی ماشین که در صورت دسترسي به سیگنال خام خروجی از سنسور از طریق پورت BNC انجام شد. در این حالت برای تبدیل سیگنال ولتاژ به یک واحد فیزیکی ارتعاش نظیر mm/s باید ضریب حساسیت سنسور لحاظ گردد. به این منظور مقادیر ارتعاش قرائت شده هر واحد از روی مانیتور اتاق کنترل، به منظور مقایسه و استخراج ضرایب حساسیت سنسور ثبت گردید. علاوه بر این شرایط کاری ماشین شامل دور، فشار و جریان نیز برای هر واحد ثبت شده است. در مونیتورینگ ارتعاشات به روش آفلاین، اندازه‌گیری ارتعاشات در فاصله‌های زمانی مشخص انجام می‌شود. در روش آفلاین، از تجهیزات پرتابل برای اندازه‌گیری استفاده می‌شود و سنسور به صورت موقت روی ماشین نصب و یا از خروجی سنسورهای نصب‌شده روی ماشین استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در مقاله حاضر از روش آفلاین استفاده می‌گردید، در ادامه تجهیزات مورد نیاز برای این روش معرفی می‌گردد. اجزای اصلي مورد نیاز برای اندازه‌گیری ارتعاشات ماشین‌ها به روش آفلاین عبارت از سنسور یا ترانسدیوسر، دیتاکالکتور و نرم‌افزار کامپیوتری است. حسگر ارتعاش‌سنج اولین وسیله مورد نیاز برای اندازه‌گیری ارتعاشات بوده و ابزاری است که حرکت ارتعاشی را حس کرده و آن را به یک سیگنال الکتریکی متناسب با حرکت ارتعاشی تبدیل می‌کند. سنسورهای مورد استفاده در تحقیق حاضر، همانگونه که در شکل ۷ نشان داده شده است، از نوع جابجایی و شتاب هستند. دیتاکالکتور پرتابل که به نام دیتالاگر نیز شناخته می‌شود، وسیله کوچک و قابل حملی است که برای ضبط موقت و انتقال داده‌ها به کامپیوتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. تجهیزات پرتابل استفاده شده جهت ثبت داده‌های ارتعاشی، دستگاه VibroTest60 ساخت شرکت Brüel & Kjær است. این دیتالاگر در شکل ۷ نشان داده شده است.

شکل ۷: دیتالاگر مدل VibroTest60.

در شکل ۸ سنسورهای ارتعاشی مختلف روی توربوکمپرسور ایستگاه نکا نصب شده است. در شکل ۸الف سنسور بر روی توربین نصب شده که به منظور اندازه‌گیری ارتعاشات افقی استفاده می‌شود. در شکل ۸ب سنسور سرعت‌سنج واقع در انتهای توربین که جهت ثبت ارتعاشات شفت مجموعه به کار رفته نشان داده شده است. همچنین در شکل ۸ج سرعت‌سنج نصب‌شده در موقعیت بالایی کمپرسور نشان داده شده است. بر اساس استاندارد ایزو از این موقعیت به منظور ثبت ارتعاشات در راستای قائم توروبوکمپرسور استفاده می‌شود.

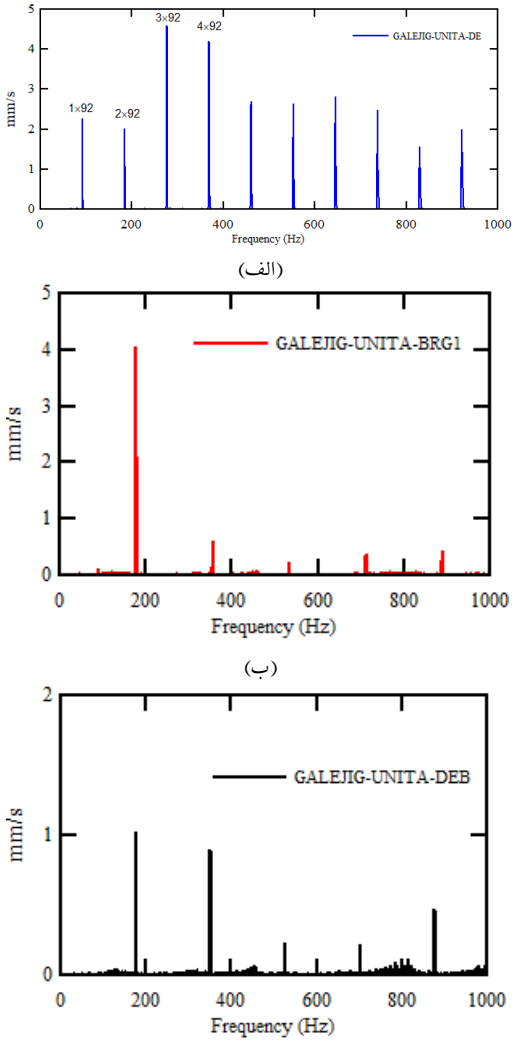
(ب) (الف)

(ج)

شکل ۸: سنسورهای ارتعاشی مختلف نصب‌شده بر روی توربوکمپرسور ایستگاه نکا (الف) سنسور ارتعاشی افقی قسمت خروجی توربین (ب) سنسور ارتعاشی افقی قسمت ورودی توربین و (ج) سنسور ارتعاشی عمودی قسمت خروجی توربین.

۶ استخراج طیف فرکانسی توربوکمپرسورهای ایستگاه‌های مختلف و شناسایی عیوب

در این قسمت به بررسی داده‌های ارتعاشی توربوکمپرسورهای مورد استفاده در ایستگاه‌های قلعه‌جوق، نکا، نور، مرگنلر و تبریز و همچنین عیب‌یابی هر کدام پرداخته می‌شود. در شکل ۹ طیف فرکانسی ارتعاشات نقاط مختلف توربوکمپرسور ایستگاه قلعه‌جوق ارائه شده است. این نتایج به ازای فرکانس کاری ۱۷۸ Hz ثبت و ارائه شده‌اند. با بررسی طیف فرکانسی استخراج‌شده در نقاط مختلف توربوکمپرسور، مشاهده می‌شود که محل نصب سنسورهای اندازه‌گیری و همچنین موقعیت داده‌برداری، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر اندازه سرعت و همچنین تعداد فرکانس‌های موجود در تابع پاسخ فرکانسی دارد. با بررسی نتایج مشاهده می‌شود که در طیف فرکانسی به دست آمده از نقاط BRG1 و DEB، فقط فرکانس‌های فرد در تابع پاسخ فرکانسی ظاهر شده‌اند و اثری از فرکانس‌های زوج دیده نمی‌شود. این در حالی است که در تابع پاسخ فرکانسی به دست آمده از نقطه DE تمام فرکانس‌های طبیعی سیستم وجود دارد.



شکل ۹: طیف فرکانسی ارتعاشات نقاط مختلف توربوکمپرسور ایستگاه قلعه‌جوق (الف) نقطه DE، (ب) نقطه BRG1 و (ج) نقطه DEB.

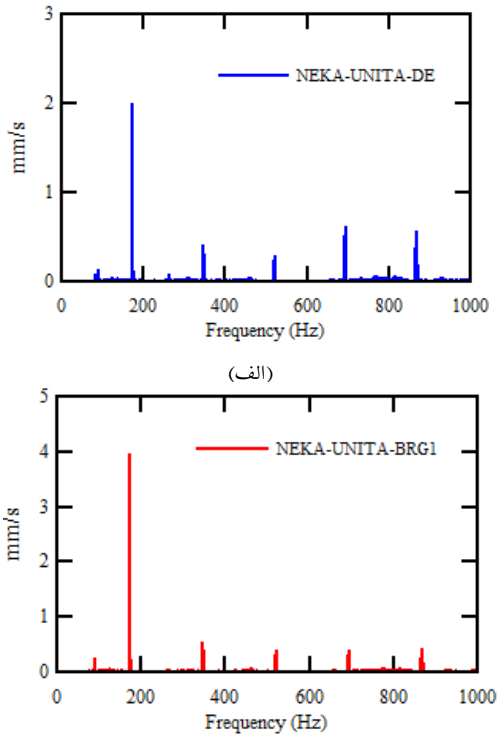
با توجه به شکل ۹ب مشاهده می‌شود که فرکانس‌های اول تا سوم این نوع توربوکمپرسور به ترتیب برابر با ۹۲ Hz، ۱۸۵ Hz و ۲۷۸ Hz هستند. ضمناً بر اساس داده‌های ثبت‌شده، ملاحظه می‌شود حداکثر سرعت نوسانات ثبت‌شده توربوکمپرسور ایستگاه قلعه‌جوق برابر با ۴/۵۸ mm/s است. بنابراین با توجه به مقادیر ارائه‌شده در جدول ۳ مشاهده می‌شود که در این حالت، توربوکمپرسور در ناحیه B/C قرار دارد. بر این اساس با توجه به استاندارد ISO 10816 می‌توان نتیجه گرفت چون ارتعاشات توربوکمپرسور در ناحیه C قرار دارد، لذا این توربوکمپرسور برای کارکرد بلند مدت مناسب نیست و بایستی عملکرد آن مورد بازبینی قرار گرفته و تعمیرات آن مورد توجه قرار گیرد. با بررسی وضعیت دستگاه و با توجه به اینکه فرکانس‌های ایجادشده در طیف فرکانسی به صورت $1x$، $2x$ و $3x$ است، بنابراین با توجه به شکل ۳، پیش‌بینی می‌شود احتمال اریب یا غیر مسطح بودن شفت وجود دارد. به علاوه، در این وضعیت کارکرد توربوکمپرسور احتمال تأثیر توربولانس جریان گاز بر ارتعاشات سیستم وجود دارد.

در شکل ۱۰ طیف فرکانسی ارتعاشات نقاط مختلف توربوکمپرسور ایستگاه نکا نشان شده است. مشاهده می‌شود فرکانس‌های طبیعی اول تا سوم این توربوکمپرسور به ترتیب برابر ۱۷۰ Hz، ۳۷۴ Hz و ۵۱۹ Hz به دست آمده است. علاوه بر این، دامنه سرعت در نقاط DE و BRG1 این توربوکمپرسور به ترتیب برابر ۱/۹۸ mm/s و ۳/۹۵ mm/s به دست می‌آید. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که حداکثر سرعت نقطه BRG1 در حدود ۵۰ درصد بیشتر از حداکثر سرعت نقطه DE است. با توجه به اینکه حداکثر سرعت این توربوکمپرسور کمتر از ۴/۵ mm/s است، بنابراین مطابق استاندارد ISO 10816 می‌توان گفت که این دستگاه در محدوده ایمن قرار داشته و می‌تواند به صورت بلند مدت مورد استفاده قرار گیرد.

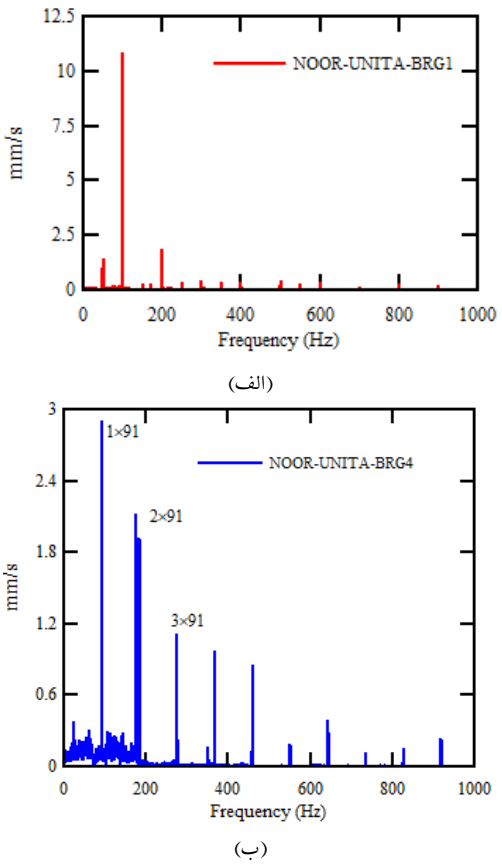
در شکل ۱۱ طیف فرکانسی ارتعاشات نقاط مختلف توربوکمپرسور ایستگاه نور آورده شده است. مشاهده می‌شود فرکانس‌های طبیعی اول تا سوم این توربوکمپرسور به ترتیب برابر ۵۰ Hz، ۱۰۰ Hz و ۲۰۲ Hz است. علاوه بر این، حداکثر دامنه سرعت در نقاط BRG1 و BRG4 به ترتیب برابر با ۱۰/۸۸ mm/s و ۲/۹۲ mm/s است. با دقت در نتایج، حداکثر سرعت نقطه BRG1، حدوداً ۳/۷ برابر حداکثر سرعت ثبت‌شده در نقطه BRG4 است. با توجه به اینکه حداکثر سرعت این توربوکمپرسور بیشتر از ۹/۳ mm/s است، بنابراین مطابق استاندارد ISO 10816 می‌توان گفت که این دستگاه در ناحیه D قرار داشته و ارتعاشات در این ناحیه برای کارکرد ماشین برای مدت کم نیز مضر بوده و احتمال خرابی‌های جدی وجود دارد.

با مقایسه نتایج طیف فرکانسی شکل ۱۱ب با نمونه‌های شکل ۳ می‌توان گفت چون فرکانس‌های ظاهرشده در طیف فرکانسی توربوکمپرسور به صورت $1x$، $2x$ و $3x$ بوده و دامنه فرکانس‌های بالا به صورت کاهشی است، بنابراین توربوکمپرسور این ایستگاه دارای ناهم‌راستایی محوری است که شدت نابالانسی بیشتر بوده و باید سریعاً تعمیرات این ایستگاه انجام شود. البته لازم به ذکر است که در چنین سیستم‌هایی، دارا بودن همه مضارب صحیح از فرکانس کارکرد، نشان‌دهنده مؤلفه‌های دینامیکی طبیعی ماشین‌های رفت و برگشتی بوده که در اکثر موارد این مسأله امری طبیعی است. وجود

مؤلفه‌های $1x$ و $2x$ از مشخصه‌های طبیعی همه سیستم‌های رفت و برگشتی و ناشی از نابالانسی ذاتی این سیستم‌ها است.



شکل ۱۰: طیف فرکانسی ارتعاشات نقاط مختلف توربوکمپرسور ایستگاه نکا (الف) نقطه DE و (ب) نقطه BRG1.



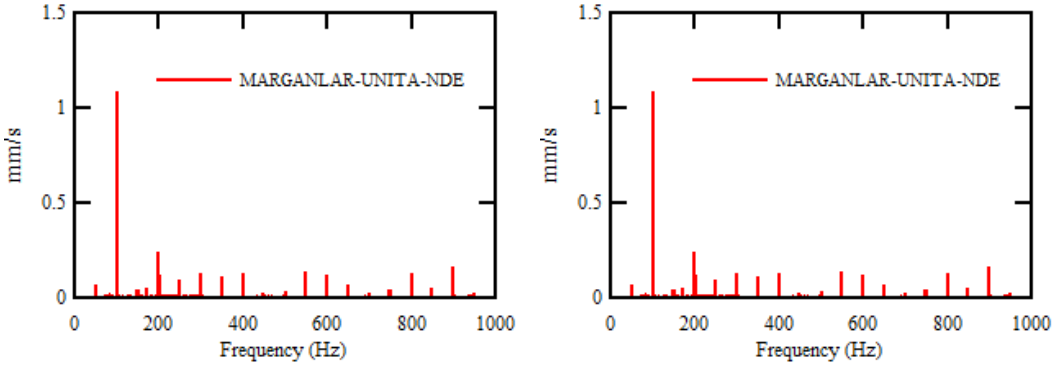
شکل ۱۱: طیف فرکانسی ارتعاشات نقاط مختلف توربوکمپرسور ایستگاه نور (الف) نقطه BRG1 و (ب) نقطه BRG4.

به منظور پایش وضعیت و عیب‌یابی در توربوکمپرسورهای مورد استفاده در ایستگاه تقویت فشار گاز مرگنلر، در شکل ۱۲ طیف فرکانس نقاط مختلف توربوکمپرسور نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که فرکانس‌های اول تا سوم این توربوکمپرسور به ترتیب برابر با ۵۰ Hz، ۱۰۰ Hz و ۱۵۰ Hz است. شکل ۱۲ب نشان می‌دهد که در این شرایط عملکردی، شکل مود ارتعاشی دوم و چهارم توربوکمپرسور دامنه بیشتری داشته و این شکل مودهای ارتعاشی اثر غالبی روی پاسخ ارتعاشی سیستم خواهند داشت. همچنین اندازه‌گیری و ثبت نوسانات این کمپرسور نشان می‌دهد که حداکثر سرعت ثبت‌شده در نقاط NDE و ND به ترتیب برابر با ۱٫۰۸ mm/s و ۰٫۴ mm/s به دست می‌آید. مطابق استاندارد ISO 10816 می‌توان گفت که چون حداکثر دامنه سرعت نوسانات توربوکمپرسور کمتر از ۴٫۵ mm/s است، لذا این توربوکمپرسور در وضعیت فعلی در شرایط ایمن قرار دارد. نظر به اینکه طیف فرکانسی این توربوکمپرسور به صورت $0.5x$، $1x$، $1.5x$ و $2x$ بوده و شامل ساب‌هارمونیک‌ها است، این امر می‌تواند نشان دهنده نامیزانی در توربین یا کمپرسور باشد. علاوه بر این، عدم همترازی کمپرسور نیز ممکن است یکی دیگر از عوامل این عیب باشد. با توجه به اطمینان از وضعیت بالانس این سیستم، و نظر به اینکه احتمال ناهم محوری بیشتر بوده و بررسی آن آسان‌تر بود، پیشنهاد شد در این ایستگاه، هم محورسازی موتور و گیربکس با دقت بالا انجام شود.

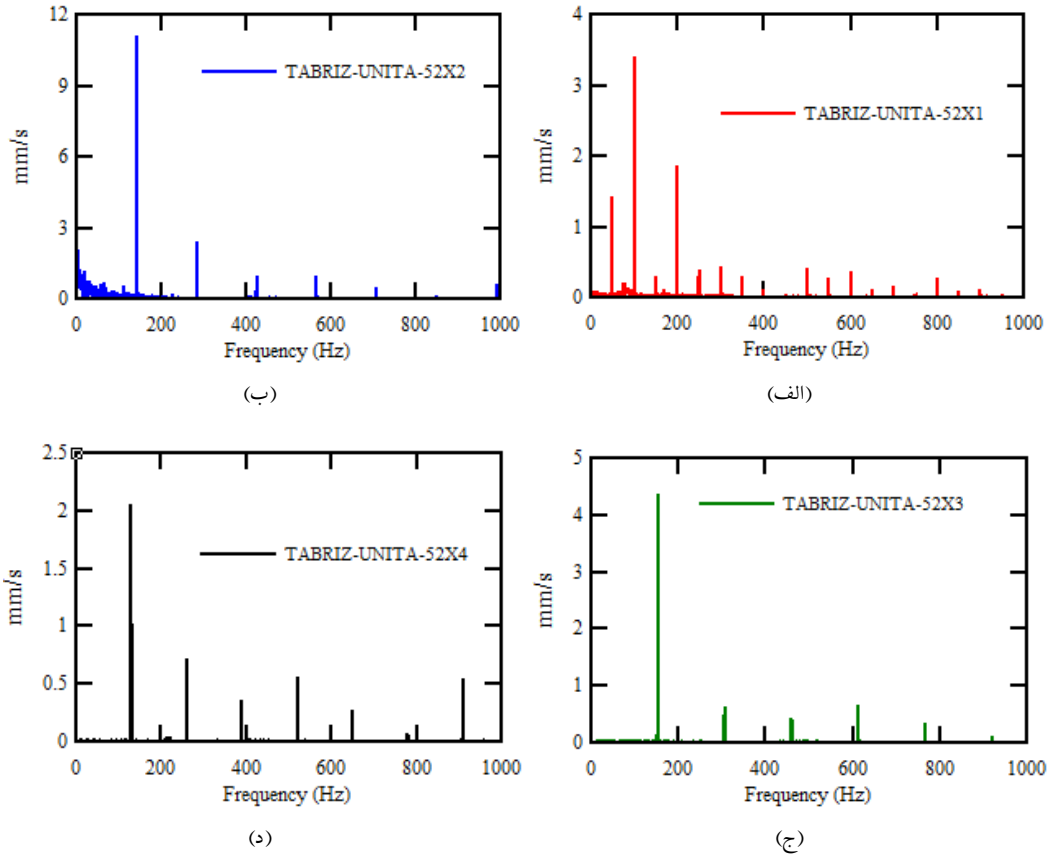
در شکل ۱۳ طیف فرکانسی ارتعاشات نقاط مختلف توربوکمپرسور ایستگاه تبریز ارائه شده است. این نتایج به ازای فرکانس کاری ۱۵۸ Hz ثبت و ارائه شده‌اند. با بررسی طیف فرکانسی استخراج‌شده در نقاط مختلف توربوکمپرسور مشاهده می‌شود که در توربوکمپرسور ایستگاه تبریز، محل نصب سنسورهای داده‌برداری تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر اندازه سرعت و همچنین تعداد فرکانس‌های موجود در تابع پاسخ فرکانسی دارد. با بررسی نتایج طیف فرکانسی به دست آمده از نقطه 52X1 (شکل ۱۳الف) مشاهده می‌شود که در طیف‌های فرکانسی این نقطه، تمام فرکانس‌های طبیعی سیستم در پاسخ فرکانسی ظاهر شده‌اند. این در حالی هست که در تابع پاسخ فرکانسی به دست آمده از سایر نقاط، تمام فرکانس‌های طبیعی سیستم در تابع پاسخ فرکانسی وجود ندارد. با توجه به شکل ۱۳الف مشاهده می‌شود که فرکانس‌های طبیعی اول تا سوم این نوع توربوکمپرسور به ترتیب برابر با ۴۵ Hz، ۱۰۵ Hz و ۱۵۸ Hz هستند. به علاوه مشاهده می‌شود که حداکثر سرعت نوسانات ثبت‌شده در موقعیت 52X2 بوده و مقدار آن برابر با ۱۱٫۵۸ mm/s است. بنابراین با توجه به مقادیر مندرج در جدول ۳ می‌توان گفت که در این حالت، توربوکمپرسور در ناحیه C/D قرار دارد. لذا مطابق استاندارد ISO 10816 می‌توان نتیجه گرفت که ارتعاشات این توربوکمپرسور در ناحیه C قرار داشته و برای کارکرد بلندمدت مناسب نیست. از این رو بایستی عملکرد این ایستگاه مورد بازبینی قرار گرفته و تعمیرات آن مورد توجه قرار گیرد.

در شکل ۱۴ طیف فرکانسی ارتعاشات نقطه ۵۲X۱ توربوکمپرسور ایستگاه تبریز نشان داده شده است. پیک‌های طیف فرکانسی در این موقعیت به صورت $0.5x$، $1x$، $1.5x$ و $2x$ است. لذا احتمال دارد توربوکمپرسور این

ایستگاه دارای لقی در فونداسیون باشد. این امر با توجه به بیش از حد بودن ارتعاشات این توربوکمپرسور می‌بایست سریعاً رفع شود.



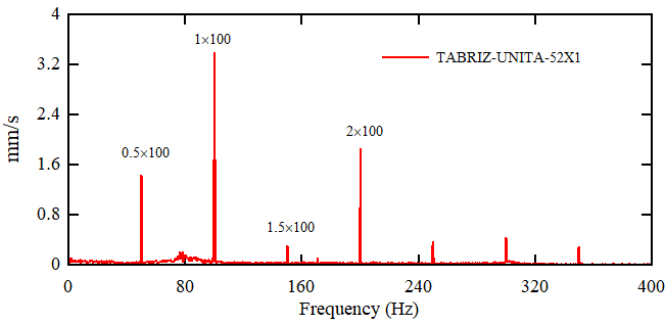
شکل ۱۲: طیف فرکانسی ارتعاشات نقاط مختلف توربوکمپرسور ایستگاه مرگنلر (الف) نقطه NDE و (ب) نقطه ND.



شکل ۱۳: طیف فرکانسی ارتعاشات نقاط مختلف توربوکمپرسور ایستگاه تبریز (الف) نقطه 52X1 و (ب) نقطه 52X2، (ج) نقطه 52X3 و (د) نقطه 52X4.

۷ نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر تحلیل ارتعاشی به عنوان روشی کارآمد جهت پایش وضعیت ماشین‌آلات صنعتی معرفی شده است. در مقاله حاضر، ارزیابی وضعیت ارتعاشی توربوکمپرسورهای تقویت فشار خطوط انتقال گاز شرکت ملی گاز ایران انجام شده است. با توجه به اینکه در اکثر توربوکمپرسورهای ساخت شرکت‌های مطرح، نواحی مختلف مجاز ارتعاشات توربوکمپرسورها بر مبنای استاندارد ISO 10816 مشخص می‌شود، از این رو در این مقاله، همین استاندارد مورد استناد قرار گرفته است. در ادامه با استفاده از



شکل ۱۴: طیف فرکانسی ارتعاشات نقطه 52X1 توربوکمپرسور ایستگاه تبریز

روش آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی بر مبنای داده‌های تجربی ثبت‌شده، عملکرد توربوکمپرسورهای مورد استفاده در ایستگاه‌های تقویت فشار ایستگاه‌های قلعه‌جوق، نکا، نور، مرگنلر و تبریز مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به استاندارد ISO 10816، خلاصه‌ای از نتایج بررسی به شرح زیر هستند:

- بر اساس داده‌های ثبت‌شده توربوکمپرسور ایستگاه قلعه‌جوق، مشاهده شد که حداکثر سرعت نوسانات ثبت‌شده برابر با ۴/۵۸ mm/s است. بنابراین ارتعاشات کمپرسور در ناحیه C قرار داشته و این توربوکمپرسور برای کارکرد بلند مدت مناسب نیست. لذا می‌بایست عملکرد این ایستگاه مورد بازبینی قرار گرفته و تعمیرات آن مورد توجه قرار گیرد.
- فرکانس‌های طبیعی اول تا سوم توربوکمپرسور ایستگاه نکا به ترتیب برابر ۱۷۰ Hz، ۳۷۴ Hz و ۵۱۹ Hz بوده و حداکثر دامنه سرعت توربوکمپرسور مورد استفاده در ایستگاه نکا، برابر ۳/۹۵ mm/s به دست آمد. بنابراین کارکرد این ایستگاه در محدوده ایمن قرار داشته و می‌تواند به صورت بلند مدت مورد استفاده قرار گیرد.
- اندازه‌گیری و ثبت نوسانات توربوکمپرسور ایستگاه تقویت فشار گاز مرگنلر نشان می‌دهد که حداکثر سرعت ثبت‌شده برابر با ۱/۰۸ mm/s به دست می‌آید. بر این اساس توربوکمپرسور در وضعیت فعلی در شرایط ایمن قرار دارد.
- با بررسی طیف فرکانسی استخراج‌شده در نقاط مختلف توربوکمپرسور ایستگاه تبریز، مشاهده شد که فرکانس‌های طبیعی اول تا سوم این نوع توربوکمپرسور به ترتیب برابر با ۴۵ Hz، ۱۰۵ Hz و ۱۵۸ Hz هستند. علاوه بر این، با توجه به داده‌های ثبت‌شده حداکثر سرعت نوسانات ۱۱/۵۸ mm/s به دست آمد. از این رو به دلیل آنکه ارتعاشات کمپرسور در ناحیه C قرار دارد، این توربوکمپرسور برای کارکرد بلند مدت مناسب نبوده و بایستی اقدامات لازم برای تعمیر آن انجام گیرد.
- بررسی سیگنال‌های توربوکمپرسور ایستگاه نور نشان داد که حداکثر دامنه سرعت در نقاط BRG1 و BRG4 توربوکمپرسور، به ترتیب ۱۰/۸۸ mm/s و ۲/۹۲ mm/s هستند. مشاهده می‌شود که حداکثر سرعت نقطه BRG1، حدوداً ۳/۷ برابر حداکثر سرعت ثبت‌شده در نقطه BRG4 است. با توجه به اینکه حداکثر سرعت مجاز این توربوکمپرسور بیشتر از ۹/۳ mm/s است، لذا این سیستم در ناحیه D قرار داشته و ارتعاشات در این ناحیه برای کارکرد ماشین برای مدت کم نیز مضر بوده و احتمال خرابی اساسی وجود دارد.

قدردانی

در پایان مراتب تشکر و قدردانی خود را از همکاری صمیمانه کارکنان محترم منطقه هشت عملیات انتقال گاز کشور و نیز مسئولان محترم ایستگاه تقویت فشار گاز اردبیل در استخراج داده‌های تجربی ایستگاه‌های مختلف، اعلام می‌داریم.

مراجع

[1] Davies, Alan. *Handbook of condition monitoring: techniques and methodology*. Springer Science & Business Media, 2012.

[2] Delvecchio, Simone, Bonfiglio, Paolo, and Pompoli, Francesco. Vibro-acoustic condition monitoring of internal combustion engines: A critical review of existing techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 99:661–683, 2018.

[3] Vanraj, Dhami, SS, and Pabla, BS. Optimization of sound sensor placement for condition monitoring of fixed-axis gearbox. *Cogent Engineering*, 4(1):1345673, 2017.

[4] Franco-Piña, J Alejandro, Contreras, Luis, and Jauregui, Juan C. Real time conditioning monitoring for failure prediction. in *ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, pp. V009T49A019–V009T49A019. American Society of Mechanical Engineers, 2017.

[5] Milovančević, Miloš, Nikolić, Vlastimir, and Anđelković, Boban. Analyses of the most influential factors for vibration monitoring of planetary power transmissions in pellet mills by adaptive neuro-fuzzy technique. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 82:356–375, 2017.

[6] Yang, Dong, Li, Hui, Hu, Yaogang, Zhao, Jie, Xiao, Hongwei, and Lan, Yongsen. Vibration condition monitoring system for wind turbine bearings based on noise suppression with multi-point data fusion. *Renewable energy*, 92:104–116, 2016.

[7] Yan, Ruqiang, Chen, Xuefeng, and Mukhopadhyay, Subhas Chandra. *Structural health monitoring*. Springer, 2017.

[8] Mucchi, Emiliano and Vecchio, Antonio. Acoustical signature analysis of a helicopter cabin in steady-state and run up operational conditions. *Measurement*, 43(2):283–293, 2010.

[9] Wang, WJ and McFadden, PD. Application of the wavelet transform to gearbox vibration analysis. 1993.

[10] de Azevedo, Henrique Dias Machado, Araújo, Alex Maurício, and Bouchonneau, Nadège. A review of wind turbine bearing condition monitoring: State of the art and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56:368–379, 2016.

[11] Rajeswari, C, Sathiyabhama, B, Devendiran, S, and Manivannan, K. A gear fault identification using wavelet transform, rough set based ga, ann and c4. 5 algorithm. *Procedia Engineering*, 97:1831–1841, 2014.

[12] Tarinejad, Reza and Pourgholi, Mehran. Modal identification of arch dams using balanced stochastic subspace identification. *Journal of Vibration and Control*, 24(10):2030–2044, 2018.

[13] McFadden, PD. A revised model for the extraction of periodic waveforms by time domain averaging. *Mechanical systems and signal processing*, 1(1):83–95, 1987.