

کاهش ارتعاشات لوله کشی صنعتی کمپرسورهای فرایند احیا مستقیم به کمک

تحلیل ارتعاشات و تحلیل مودال

سعید شیروانی شاه‌عنایتی*

کارشناس ارشد پایش وضعیت

شرکت راه اندازی و بهره برداری صنایع نفت

s.shirvani.17947@oico.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۵

چکیده

کمپرسورهای لوب^۱ یکی از مهم‌ترین کمپرسورهای مورد استفاده در صنعت فولاد هستند. بی‌توجهی به پایش وضعیت دقیق کمپرسورهای لوب منجر به رشد دامنه ارتعاشات کمپرسور و همچنین تجهیزات مجاور و لوله‌کشی^۲ شده و افزون بر ایجاد ناهمراستایی بین کمپرسور، گیربکس و الکتروموتور، منجر به خرابی یاتاقان‌ها و شکست اتصالات ابزار دقیق و انشعاب‌های خطوط لوله‌کشی در بالادست و پایین‌دست کمپرسورها خواهد شد. این مسئله علاوه بر پیامدهای منفی بر افزایش هزینه تعمیرات و کاهش میزان تولید، مخاطراتی از قبیل نشتی گاز فرایند و انفجار را در پی خواهد داشت. در مقاله حاضر به مطالعه و رفع مشکل ارتعاشی تجهیز مذکور در یکی از مجتمع‌های فولادسازی کشور پرداخته شده است.

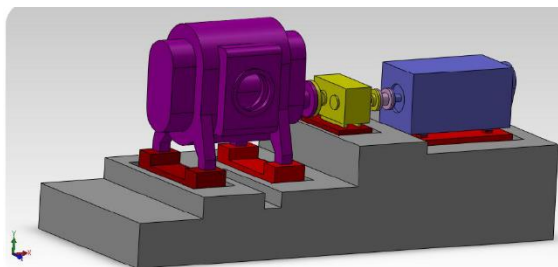
واژگان کلیدی: پایش وضعیت، ارتعاشات لوله‌کشی، تحلیل مودال، ارتعاشات کمپرسور لوب.

۱. مقدمه

در تجهیزات دوار بدنه تجهیزات و فونداسیون در اثر وجود نیروهای نابالانسی، ناهمراستایی، گشتاور ژيروسکوپی، وزن ناشی از گرانش و ... تحت تأثیر بارهای استاتیکی و دینامیکی قرار می‌گیرد. بنابراین در مرحله طراحی و نصب تجهیزات دوار، انجام تحلیل مودال ضروری است.

همچنین نوسانات در محدوده فرکانس طبیعی سازه، موجب افزایش دامنه نوسانی و در نتیجه افزایش خطر خرابی سازه خواهد گردید. بنابراین باید سازه به گونه‌ای طراحی گردد که ضمن برخورداری از وزن مناسب و استحکام لازم، تا حد امکان از محدوده فرکانس طبیعی دور باشد.

در پروژه حاضر ضمن تحلیل مودال بر روی کمپرسورهای فرایند احیا مستقیم فولادسازی، مودهای ارتعاشی هر یک از تجهیزات به‌طور کامل بررسی شده و سپس با انجام تحلیل دینامیکی، مشخصه‌های ارتعاشی و سازه‌ای تجهیزات مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه با بازرسی میدانی و شناسایی نواقص و رفع آن نسبت به بهبود وضعیت ارتعاشات تجهیزات اقدام گردیده است. از دستاوردهای پروژه حاضر می‌توان به کاهش ارتعاشات تجهیزات دوار، کاهش توان مصرفی الکتروموتورها و افزایش عمر گیربکس و کمپرسور در اثر کاهش بارهای دینامیکی اشاره نمود.



شکل ۱. نمایی کلی از تجهیز مورد مطالعه در نرم‌افزار سالیدورک

شبکه‌بندی مدل‌های سه بعدی پیچیده، همواره یکی از سخت‌ترین بخش‌های مدل‌سازی به روش اجزاء محدود بوده است. هریک از نرم‌افزارهای پیش‌پردازش اجزاء محدود که در زمینه تولید شبکه به کار می‌روند، روش متفاوتی برای ایجاد شبکه سه بعدی استفاده می‌کنند. در اغلب این نرم‌افزارها مانند هایپرمش^۵ ابتدا سطوح رویه تشکیل‌دهنده حجم با المان‌های رویه شبکه‌بندی شده و با استفاده از این المان‌های رویه، شبکه سه بعدی تولید می‌شود. در نرم‌افزار آباکوس از قابلیت تقسیم‌بندی استفاده می‌شود.

با استفاده از این قابلیت، حجم‌های پیچیده تا حد امکان و با تشخیص کاربر، با استفاده از خطوط و صفحات مجازی، با حجم‌های کوچکتر و منظم‌تر به لحاظ هندسی تقسیم می‌شوند. بدین ترتیب، نرم‌افزار با شبکه‌بندی حجم‌های ساده و نسبتاً منظم، شبکه سه بعدی را تولید می‌کند. در شکل ۲ نمایی از صفحات مجازی ایجاد شده بر روی مدل هندسی الکتروموتور، گیربکس، کمپرسور و فونداسیون که برای شبکه‌بندی استفاده شده، نمایش داده شده است. همچنین در شکل‌های ۳ و ۴ یک نمای کلی از شبکه‌بندی تجهیزات و فونداسیون در نرم‌افزار آباکوس نمایش داده شده است.

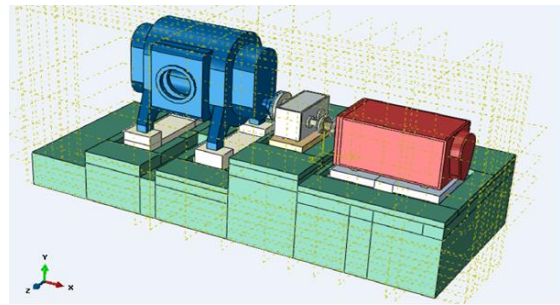
۲. تحلیل مدل کمپرسورهای فرایند احیاء مستقیم

ارتعاشات یک پدیده دینامیکی بوده و مطالعه ارتعاشات به حرکت نوسانی اجسام و نیروهای وابسته به آنها مربوط می‌گردد. تمام اجسام دارای جرم و خاصیت الاستیسیته، قادر به ارتعاش هستند. بنابراین اغلب تجهیزات و سازه‌ها تا اندازه‌ای تحت تأثیر ارتعاش هستند. کاهش و یا کنترل ارتعاشات، مهم‌ترین خواسته‌ای است که یک مهندس طراح سازه باید به آن توجه کند تا از سازه در برابر بارهای دینامیکی مزاحم محافظت گردد. در مطالعه حاضر مشخصه‌های ارتعاشی و دینامیکی یک الکتروموتور، گیربکس و کمپرسور بررسی شده است. با توجه به اینکه بررسی مشخصه‌های ارتعاشی و سازه‌ای تحقیق حاضر به روش‌های کلاسیک تحلیلی، دشوار و معمولاً غیرممکن است و از طرفی دسترسی به روش‌های آزمایشگاهی و تجربی نیز هزینه‌بر است، از روش‌های عددی برای شبیه‌سازی سیستم استفاده شده است.

مدل‌سازی اجزاء محدود عبارت است از مدل‌سازی با استفاده از المان و گره که اجزای سازنده نمایش عددی مدل هستند. در مدل‌سازی اجزاء محدود جنس، خواص بارگذاری و شرایط مرزی تعریف می‌شوند. از آنجاکه پروژه حاضر دارای یک فاز کلان مدل‌سازی است به منظور سهولت و افزایش کارایی، بخشی از فاز مدل‌سازی در محیط نرم‌افزار سالیدورک^۳ انجام شده است. از این‌رو مدل سه بعدی الکتروموتور، گیربکس و کمپرسور به همراه فونداسیون توسط نرم‌افزار سالیدورک مدل‌سازی شده و برخی از جزئیات هندسی شامل پیچ‌ها، سوراخ‌ها، پرچ‌ها و درزهای مربوط به جوشکاری به دلیل عدم شبکه‌بندی در محیط نرم‌افزار آباکوس^۴ حذف شده و سپس وارد محیط آباکوس شده است. در شکل ۱ نمایی کلی از تجهیز مورد مطالعه به همراه فونداسیون که در نرم‌افزار سالیدورک مدل‌سازی شده، نمایش داده شده است.

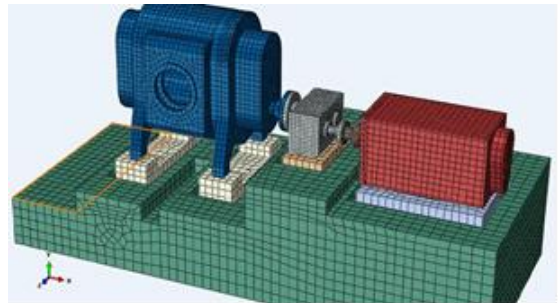
پیش از اعمال بار دینامیکی اصلی به سازه، ابتدا باید تحلیل استاتیکی با فعال بودن اثرات پیش تنش، تنش‌های حاصله بر اثر گرانش را محاسبه نموده و در ادامه تحلیل دینامیکی کلی صورت پذیرد. در حل استاتیکی، سازه در حالت اولیه خود قرار داشته و نیروهای وزن تجهیزات و گرانش برای اعمال وزن سازه در نظر گرفته می‌شود. زمان در انتهای این حل برابر با یک ثانیه است. از آنجا که تنها نیاز به اطلاعات در انتهای این مرحله داریم، فقط یک نقطه داده مربوط به انتهای حل در فایل نتایج ذخیره می‌شود. بارگذاری‌ها در این مرحله به صورت افزایشی تدریجی از صفر به مقدار نهایی در زمان یک ثانیه اعمال شده است. در مرحله حل دینامیکی بار هارمونیک ناشی از نابالانسی در مدت زمان یک ثانیه به تجهیزات اعمال می‌گردد. در این مرحله، گام‌های داده‌برداری برابر با یک میلی‌ثانیه اعمال شده است. در نتیجه در مرحله حل دینامیکی ۱۰۰۰ نقطه داده از وضعیت کل سازه در فایل نتایج ثبت می‌گردد تا بتوان اطلاعات دقیق‌تری از تغییرات پارامترهای مختلف از قبیل سرعت و تنش در نقاط مختلف تجهیز ثبت شود. یکی از مسائل مهم در طراحی تجهیزات دوار بررسی اثرات مختلف بارهای استاتیک و دینامیک بر روی سازه است. این بارها از طریق محور به یاتاقان‌ها و از آنجا به فونداسیون منتقل می‌گردد.

آزمون‌های انجام شده بر روی تجهیزات دوار نشان می‌دهد بیشتر نقص‌های به وجود آمده در فونداسیون تجهیزات دوار که منجر به خرابی و تخریب تجهیزات شده، ناشی از بارهای ارتعاشی و نزدیکی فرکانس‌های دور و هارمونیک‌های آن به فرکانس‌های طبیعی بوده است. فقط در صورت اعمال شبیه‌سازی‌های دقیق از تمام حالات ممکن به همراه انجام آزمون‌های مودال ارتعاشی در آزمایشگاه می‌توان از عملکرد صحیح تجهیزات در شرایط واقعی مطمئن شد. بنابراین مدل‌سازی‌ها و شبیه‌سازی‌ها کاملاً ضروری است. یکی از تحلیل‌های لازم، تحلیل دینامیکی و مودال برای دستیابی به فرکانس‌های بحرانی و تشدید سازه است. تحلیل مودال،



شکل ۲. نمایی از صفحات مجازی ایجاد شده بر روی مدل

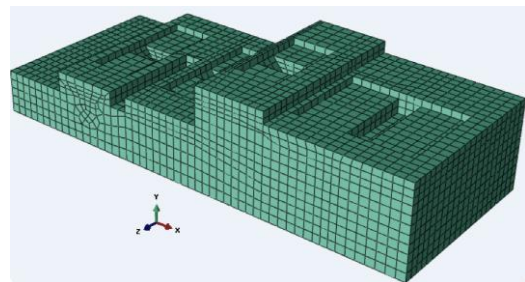
هندسی



شکل ۳. نمایی کلی از شبکه‌بندی تجهیز مورد مطالعه در نرم‌افزار

آباکوس

مهم‌ترین نکته در پیش‌پردازش و تولید شبکه، کیفیت المان‌های تولیدی است. در حالت ایده‌آل، المان‌های رویه باید نزدیک به شکل مربع و المان‌های سه بعدی باید شکلی نزدیک به مکعب مربع داشته باشند. هرچه شکل هندسی المان‌ها از این حالت ایده‌آل دورتر باشند، دقت حل اجزاء محدود کمتر خواهد بود. این مطلب به‌ویژه در حل‌های دینامیکی و مسائل شامل تغییر شکل‌های بزرگ و غیرخطی دارای اهمیت است. به همین علت باید به پارامترهایی از قبیل ژاکوبین، نسبت منظر، بزرگترین ضلع و کوچکترین ضلع دقت گردد.



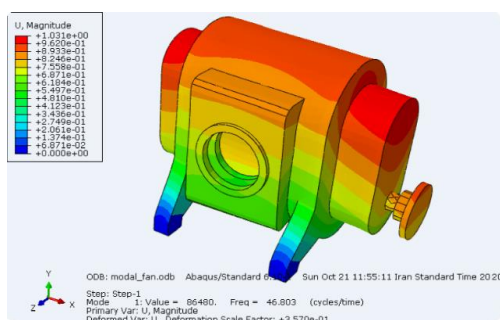
شکل ۴. مدل شبکه‌بندی فونداسیون در آباکوس

فرایند تعیین خواص دینامیکی سازه جهت تعیین فرکانس‌های طبیعی، شکل مودها و ضرایب میرایی است. با انجام تحلیل مودال و مشخص شدن فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای آن می‌توان نقاط حساس را تعیین نمود. هنگام آزمایش مودال که به منظور ایجاد یک مدل ریاضی معتبر برای پیش‌بینی رفتار دینامیکی سازه انجام می‌شود، نیاز به انتخاب نقاط اندازه‌گیری و یا تحریک سازه است. موقعیت و تعداد نقاط را برحسب تجربه کاری نیز می‌توان تعیین نمود، اما آنچه مسلم است آنها کمترین و بهترین نقاط نخواهند

بود. با در دست داشتن شکل مودهای حاصل از نتایج نرم‌افزار اجزاء محدود می‌توان دید بهتری نسبت به انتخاب نقاط تحریک و پاسخ اقدام نمود. همچنین به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی و اعمال قیود و نیز تعریف صحیح خواص مواد به کار رفته در سازه، انجام تحلیل مودال ضروری است. در جدول ۱ مودهای ارتعاشی تجهیز ارائه شده است. شایان ذکر است که در صورت وجود فایل نرم‌افزاری از این سازه می‌توان تحلیل مودهای ارتعاشی و فرکانس‌های طبیعی را روی آن انجام داد.

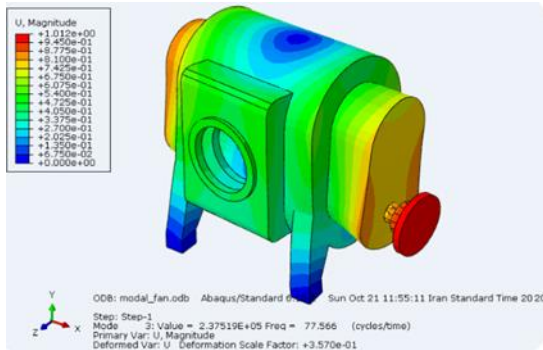
جدول ۱. فرکانس‌های طبیعی احتمالی و تشدیدهای محلی^۶ سازه، الکتروموتور، گیربکس و کمپرسور

مود	فرکانس (هرتز)	مود ارتعاشی
۱	۳۸/۷	کمپرسور و گیربکس
۲	۴۱/۸	کمپرسور و گیربکس
۳	۵۷/۵۸	کمپرسور و گیربکس
۴	۶۴/۴۲	گیربکس
۵	۶۸/۹۹	گیربکس
۶	۷۳/۸۱	کمپرسور و گیربکس
۷	۸۲/۹۹	کمپرسور و گیربکس و الکتروموتور
۸	۸۵	گیربکس و الکتروموتور
۹	۸۸	گیربکس و الکتروموتور
۱۰	۹۳	کمپرسور و گیربکس و الکتروموتور

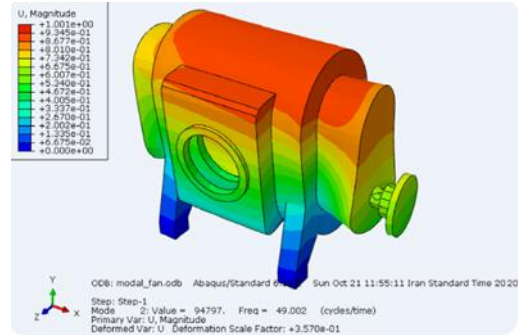


شکل ۵. مود اول ارتعاشی کمپرسور

همچنین در شکل‌های ۵ تا ۷ سه مود اول ارتعاشی کمپرسور نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است مود اول که مود اصلی سیستم محسوب می‌گردد در راستای محوری است که مقدار آن ۴۶/۸ هرتز است. مود دوم ۴۹ هرتز و به صورت خمشی در راستای افقی است. همچنین مود سوم به صورت پیچشی در راستای محور قائم با مقدار ۷۷/۵۶ هرتز است.



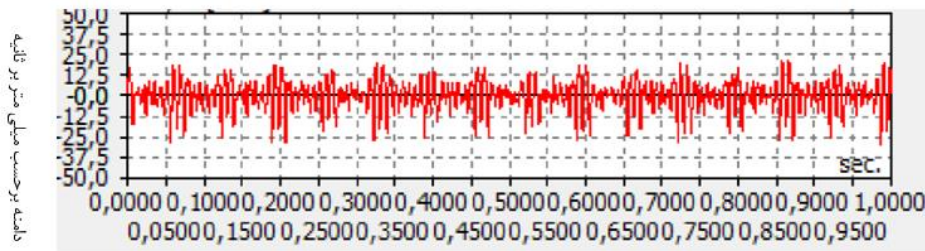
شکل ۷. مود سوم ارتعاشی کمپرسور



شکل ۶. مود دوم ارتعاشی کمپرسور

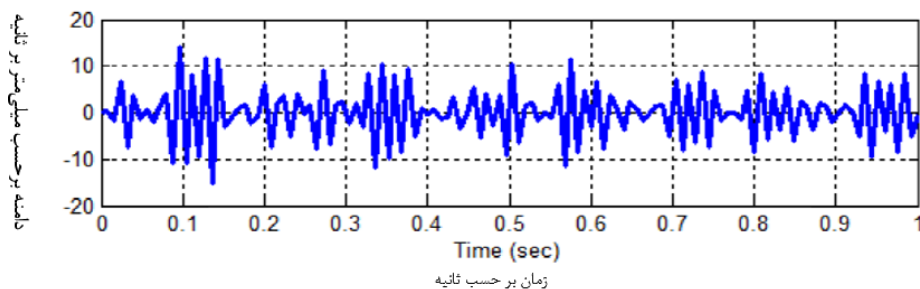
از این رو نتایج به دست آمده بایستی اعتبارسنجی شود. به منظور اعتبارسنجی نتایج، راهکارهای مختلفی وجود دارد.

باتوجه به اینکه در تحلیل اجزاء محدود سازه‌ها، تحلیل به صورت عددی انجام می‌شود، عواملی وجود دارد که باعث می‌گردد نتایج از دقت بالایی برخوردار نباشد.



زمان بر حسب ثانیه

شکل ۸. پاسخ ارتعاشی کمپرسور به صورت عملی در جهت افقی



زمان بر حسب ثانیه

شکل ۹. پاسخ ارتعاشی کمپرسور به صورت عددی در جهت افقی

نتایج اندازه‌گیری پارامتر سرعت در راستای افقی با نتایج تحلیل مقایسه شده است. همان‌گونه که در تصاویر فوق مشخص است همگرایی خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و عملی وجود دارد و اختلاف مشاهده شده نیز به علت صرف نظر کردن از نیروهای اصطکاکی، ناهمراستایی، ژیرسکوپی و ...

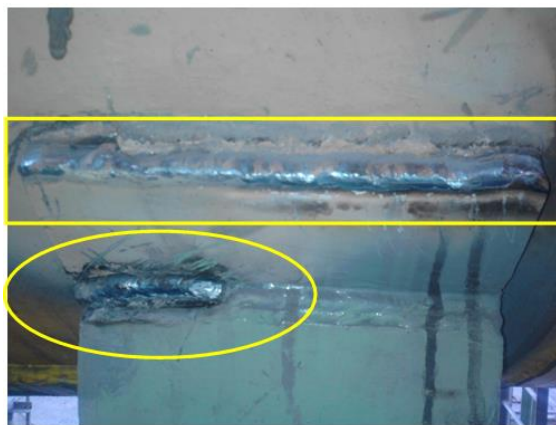
در این پروژه به منظور اعتبارسنجی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج حاصل از ارتعاش‌سنجی نقاط مختلف تجهیز به کمک دستگاه تحلیل‌گر ارتعاشات مقایسه شده است. بیشترین مقادیر ارتعاشات بر روی کمپرسور در نقطه NDE و در جهت افقی ثبت شده است. در شکل‌های ۸ و ۹

است درحالی‌که در تحلیل حاضر تنها نیروی نابالانسی و گرانس لحاظ شده‌اند. لازم به ذکر است مقایسه نتایج سایر

نقاط نیز نشان از همگرایی خوب تحلیل عددی با نتایج داده-برداری برون خط دارد.



شکل ۱۱. شکستگی در محل اتصال لچکی‌های تکیه‌گاه



شکل ۱۰. بروز شکستگی در تکیه‌گاه خط مکش کمپرسور ۵۱ در اثر ارتعاشات شدید خط

۳. نتایج ارتعاش‌سنجی و بازرسی بصری از وضعیت لوله‌کشی و ساختار

در بازرسی میدانی مشخص شد ارتعاشات محوری روی تکیه‌گاه خط مکش کمپرسور بیش از ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه است. این مقدار ارتعاش باعث بروز شکستگی در تکیه‌گاه شده بود که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این شکستگی را می‌توان در محل اتصال خط ورودی و در قسمت بالای سازه ضلع غربی و در اتصالات لچکی تکیه‌گاه نیز مشاهده نمود که در شکل ۱۱ آمده است. اسپکتروم ارتعاشی نقاط ورودی به کمپرسور فرایند در دو سر اتصال خط ورودی، بدنه کمپرسور، خط خروجی در دو سر

اتصال خط خروجی و سازه اطراف آن دارای پیک فرکانسی مشترک هستند که نتیجه تحریک تجهیز دوار و انتقال آن به سازه اطراف است. ارتعاشات ثبت شده از سازه ریفمر در طبقات اول تا سوم دارای پیک غالب در فرکانس‌های ۱۳/۵ و ۱۸/۵ هرتز است. با توجه به اینکه فرکانس طبیعی سازه‌ها معمولاً زیر ۲۰ هرتز هستند، این فرضیه تقویت می‌شود که فرکانس‌های یاد شده، فرکانس‌های طبیعی سازه باشد که در اثر وجود نیروی نوسانی تحریک شده باشد. همچنین در خط خروجی کمپرسور و دو سر اتصال خط اختلاف ارتفاع مشهود است که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۲. ناهمراستایی بین خطوط

این وضعیت می‌تواند باعث از بین رفتن لاستیک بین لوله و اتصال خط شود که نتیجه آن نشستی گاز فرایند به محیط خواهد بود.

وضعیت نقطه ورودی به‌گونه‌ای است که خمیدگی در پیچ‌های اتصال خط به راحتی قابل مشاهده است که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود.

یکی از اشکالات اصلی موجود در خط ورودی کمپرسور، وضعیت تکیه‌گاه آن بود که در اثر اعمال بار شدید از سوی کمپرسور به شدت خم شده و نیروی بسیاری به کمپرسور وارد می‌نمود. مقدار عددی اختلاف ارتفاع یا عدم تطابق دو خط (دو سر اتصال خط)، در خط ورودی برابر با ۱۰ میلی‌متر و در خط خروجی برابر با ۱۱ میلی‌متر بود.

این درحالی است که بیشترین مقدار مجاز ناهمراستایی یا عدم تطابق جانبی طبق مستندات موجود باید ۲ میلی‌متر باشد.



شکل ۱۳. ناهمراستایی بین خطوط

در اثر وضعیت پیش آمده برای اتصال خط، تکیه‌گاه روی خط ورودی به شدت تحت تنش قرار گرفته به گونه‌ای که راهنماها در یک سمت کاملاً آزاد و در سمت دیگر تحت تنش شدید هستند که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. این مقدار تنش به قدری زیاد است که تکیه‌گاه از یک سمت خم شده است. شایان ذکر است که مقدار ارتعاشات کلی محوری در تکیه‌گاه یاد شده برابر با 7 mm/s rms ۳۷ است. این مسئله درحالی‌است که ارتعاشات در بدنه کمپرسور حداکثر ۸/۵ میلی‌متر بر ثانیه است. با بررسی نقشه ایزومتریک لوله‌کشی مورد بررسی، مشخص شد که چندین تکیه‌گاه

خارج از نقشه نصب گردیده است. همچنین، بررسی نقشه‌های ایزومتریک خطوط متصل به سایر کمپرسورهای فرایند نشان می‌دهد که تنها در کمپرسورهای ۴۸A و ۷۱ از تکیه‌گاه استفاده شده است و کمپرسورهای ۴۸B و ۵۱ فاقد هرگونه تکیه‌گاه در ورودی و خروجی هستند. تکیه‌گاه ورودی به کمپرسور ۷۱ از نوع لغزشی بوده و در جهت عمود بر راستای خط راهنما شده است که در شکل ۱۵ آمده است. این درحالی‌است که تکیه‌گاه نصب‌شده روی کمپرسور ۵۱ در راستای خط محدود شده است.



شکل ۱۵. نوع متفاوت تکیه‌گاه کمپرسور ۷۱

نکته دیگر، نصب غیراصولی تکیه‌گاه‌ها است. به عنوان نمونه، برخی از تکیه‌گاه‌ها به سازه جوش شده‌اند و در برخی موارد تک جوش زمان ساخت واحد، همچنان روی بدنه تکیه‌گاه

وجود داشته و حرکت خط را محدود کرده است. این موضوع باعث اعمال تنش سنگین روی خط می‌گردد که در شکل ۱۶ و ۱۷ آورده شده است.



شکل ۱۶. وجود تک جوش از زمان ساخت



شکل ۱۷. جوش شدن پایه‌ها

از این رو، بار خط روی نقاط دیگری خواهد افتاد. تصاویر ۱۸ تا ۲۳، برخی از مشکلات موجود در تعدادی از تکیه‌گاه‌های واحد را نشان می‌دهد.

در برخی موارد تکیه‌گاه‌ها از روی پایه بلند شده و بین تکیه‌گاه و سازه، فاصله افتاده است. بروز این مشکل برابر با حالتی است که هیچ تکیه‌گاهی روی خط نصب نشده باشد و



شکل ۱۸. وجود فاصلہ بین سازه کمپرسور ۴۸ و تکیہ گاہ



شکل ۱۹. وجود فاصلہ بین تکیہ گاہ و سازه کمپرسور ۵۱



شکل ۲۰. وجود فاصلہ بین تکیہ گاہ و سازه کمپرسور ۷۱



شکل ۲۱. خمیدگی ناودانی در اثر فشار خط و تماس با Bracing



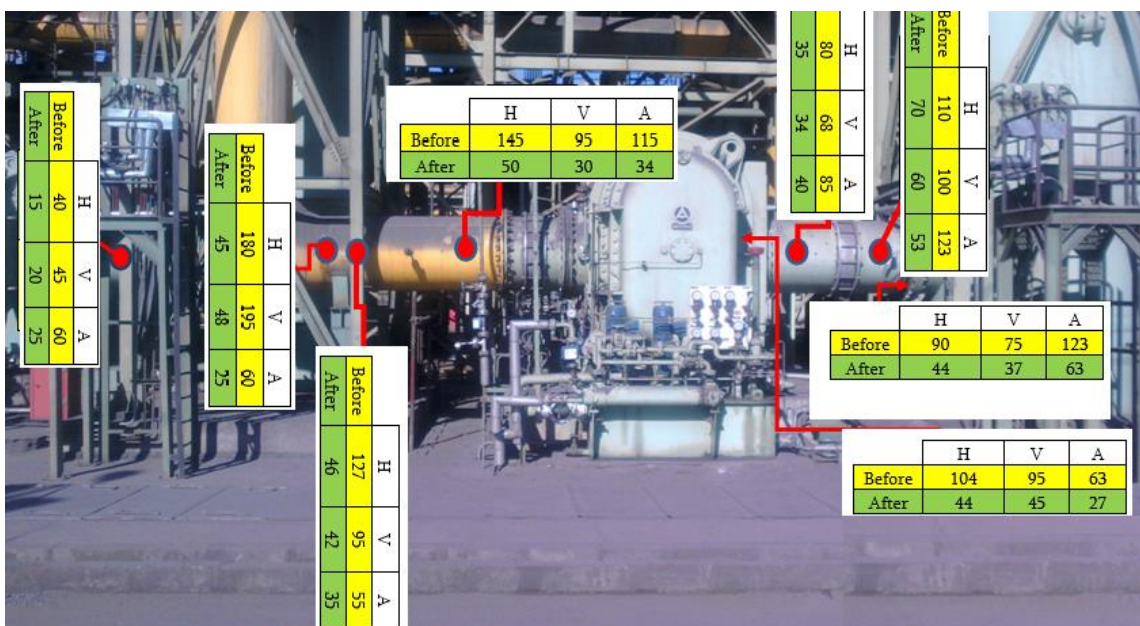
شکل ۲۲. خمیدگی تکیه گاه غیراصولی



شکل ۲۳. حرکت خط و محدود شدن

پیرامون آن مشخص و از آنها داده‌برداری شد که نتایج حاصل از داده‌برداری پیش از اقدامات اصلاحی و پس از اقدامات اصلاحی در شکل ۲۴ ارائه شده است. مقادیر نشان داده شده که برحسب جابه‌جایی و در مقیاس بیانگر بهبود وضعیت ارتعاشات کمپرسور و لوله‌کشی متصل به آن پس از اقدامات اصلاحی است.

پس از ارائه گزارش در خصوص وضعیت خطوط و سازه‌های پیرامون کمپرسور و همچنین ارائه راهکار زمان‌بندی شده به کارفرما، طی یک توقف برنامه‌ریزی شده، نسبت به اصلاح وضعیت موارد مذکور اقدام گردید. به‌منظور ارزیابی کلی وضعیت تجهیزات پس از راه‌اندازی واحد، نقاطی بر روی بدنه کمپرسور و خطوط و سازه‌های



شکل ۲۴. مقایسه ارتعاشات در نقاط مختلف کمپرسور ۵۱ برحسب جابه‌جایی در مقیاس میکرون (قبل و بعد از اقدامات اصلاحی)

جدول ۲. مقادیر کلی ارتعاشات الکتروموتور، گیربکس و کمپرسور پیش از اقدامات اصلاحی

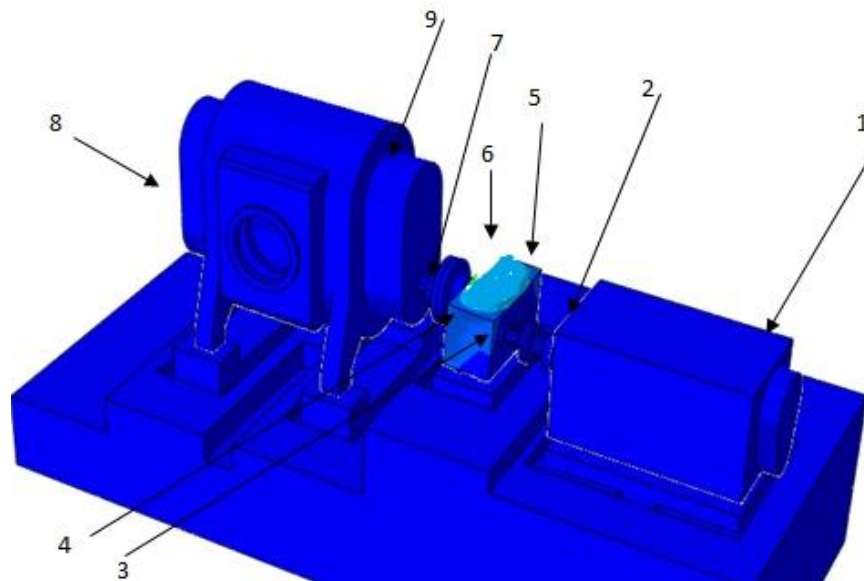
	موتور		گیربکس				کمپرسور			
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
عمودی	۱/۴	۱/۸	۴/۲	۳/۳	۳/۴	۴/۲	۴/۸	۵/۶	۶/۳	۶/۹
افقی	۲/۹	۲/۹	۳/۸	۷/۷	۳/۷	۴/۱	۶/۱	۸/۲	۴/۸	۶/۱
محوری	***	۲/۵	۴/۹	۵/۲	۳/۵	۳/۶	۵/۶	۵/۳	۵/۱	۵/۶

جدول ۳. مقادیر کلی ارتعاشات الکتروموتور، گیربکس و کمپرسور پس از اقدامات اصلاحی

	موتور		گیربکس				کمپرسور			
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
عمودی	۱	۱/۲	۲/۵	۲/۵	۳/۴	۲/۵	۳/۹	۴	۴/۱	۴/۵
افقی	۱/۶	۱/۴	۳/۷	۲/۵	۲/۵	۳/۴	۴/۱	۴/۲	۴/۳	۴/۲
محوری	***	۱/۴	۳/۳	۳/۴	۳/۴	۳	۳/۸	۳/۹	۳/۵	۳/۹

اصلاحی در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. لازم به ذکر است نقاط داده‌برداری در تصویر ۲۵ مشخص شده است.

در خصوص وضعیت ارتعاشی تجهیز (الکتروموتور، گیربکس و کمپرسور) مقادیر کلی ارتعاشات، پیش و پس از اقدامات



شکل ۲۵. نمای شماتیک از الکتروموتور، گیربکس و کمپرسور به همراه نقاط داده‌برداری

۴. نتیجه گیری

اجرای برنامه پایش وضعیت باید در یک کلاس جهانی پیگیری شود. غلبه بر مشکلات ارتعاشی خاص و بهبود شرایط ممکن است گاهی امری زمان‌بر باشد. این قبیل مشکلات بایستی با شکیبایی و به دور از اظهار نظرهای غیرفنی، شناسایی و با راهکارهای علمی و مناسب مرتفع گردد.

بنابراین ارتعاشات الکتروموتور، گیربکس، کمپرسور و لوله‌کشی در اکثر نقاط کاهش قابل توجهی داشته است. لازم به یادآوری است که ارتعاشات محوری تکیه‌گاه خط مکش کمپرسور ۵۱ از ۴۰ میلی‌متر بر ثانیه به ۱۲ میلی‌متر بر ثانیه کاهش یافت. کاهش مقدار کلی چنین ارتعاشات مخربی تا این سطح، مهم‌ترین دستاورد انجام این اصلاحات به شمار می‌رود.

۵. مأخذ

- [1] Bathe, Klaus-Jürgen, *Finite element procedures*, Klaus-Jurgen Bathe, 2006.
- [2] Nithiarasu, P., R. Taylor, J. Zhu, and O. Zienkiewicz, "The finite element method, Vol.3", 1977.
- [3] Shymanskyi, Volodymyr, and Yaroslav Sokolovskyy, "Variational formulation of the stress-strain problem in capillary-porous materials with fractal structure", In *2020 IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, 2020, Vol.1, pp.1-4, IEEE.
- [4] Bathe, Klaus Jürgen, Eduardo Dvorkin, and Lee W. Ho, "Our discrete-Kirchhoff and isoparametric shell elements for nonlinear analysis—an assessment", *Computers & Structures*, 1983, Vol.16, no.1-4, pp.89-98.

- [5] Gadala, M. S., GA'E. Oravas, and M. A. Dokainish, "A consistent Eulerian formulation of large deformation problems in statics and dynamics", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 1983, Vol.18, no.1, pp.21-35.
- [6] Ewins, David J., *Modal testing: theory, practice and application*, John Wiley & Sons, 2009.
- [7] Yang, J-G., T. M. Murray, and R. H. Plaut, "Three-dimensional finite element analysis of double angle connections under tension and shear", *Journal of Constructional Steel Research*, 2000, Vol.54, no.2, pp.227-244.
- [8] Wijker, Jaap, and Jaap Wijker, "Modal Analysis", *Mechanical Vibrations in Spacecraft Design*, 2004, pp.73-93.

پی نوشت:

1. Lube Compressor
2. Piping
3. Solid work
4. Abaqus
5. HyperMesh
6. Local Resonance
7. RMS (Root Mean Square) is a family member of Vibration Analysis