

The effects of temperature on vibration amplitude by thermography and vibration analysis

Abstract

In this study, The effects of temperature on vibration amplitude of rotary machines is experimentally investigated. Theoretical contexts are expressed based on fundamental vibration approaches. Experiments have been carried out on a test rig using two different revolution speeds. Vibrational data and heat spectrums are recorded. Related viscosities are extracted using a viscosity-temperature diagram and vibrational spectrums are analyzed based on respected viscosities. Results show that in vibration analysis, significant variations of environmental temperature should be seriously taken into account.

Keywords: vibration analysis, thermography, viscosity

بررسی تأثیر دما بر دامنه ارتعاشات به کمک ترموگرافی و آنالیز ارتعاشات

چکیده

در مقاله حاضر به بررسی تأثیر افزایش دما بر دامنه ارتعاشات پرداخته شده است. مبحث نظری به کمک اصول ارتعاشات مطرح شده است. سپس آزمایشاتی که بر روی دستگاه مورد مطالعه در دو دور کارکرد مختلف صورت پذیرفته است بیان شده‌اند. داده‌های ارتعاشاتی و طیف‌های حرارتی مربوطه تهیه شده‌اند. سپس با استفاده از نمودار ویسکوزیته-دما، ویسکوزیته حالات مربوطه استخراج شده و به کمک آن‌ها به بررسی طیف‌های ارتعاشی پرداخته شده است. نتایج حاصله نشان دادند که در استفاده از آنالیز ارتعاشات، تغییرات قابل توجه دمائی محیط نیز باید در نظر گرفته شوند.

واژه‌های کلیدی: آنالیز ارتعاشات، ترموگرافی، ویسکوزیته،

مقدمه

امروزه آنالیز ارتعاشات یکی از ابزارهای قدرتمند در عیب یابی می‌باشد. با یک نگاه کلی به تمامی ماشین آلات دوار در می‌یابیم که ارتعاشات یکی از اجزای جدانشدنی کارکرد ماشین است. بنابراین استفاده از آن در تشخیص عیب، باعث صرفه جویی در وقت و هزینه می‌گردد. به کمک تحلیل ارتعاشات عیوب مختلفی را می‌توان شناسایی کرد. زیرا هر عیب مشخصه منحصر به خود را داراست. از جمله این عیوب می‌توان به تشخیص نامیزانی، عدم هم راستایی، خرابی یاتاقان‌ها، خمیدگی شفت و... اشاره کرد.

ارزیابی ارتعاشات ماشین‌ها در دو وضعیت صورت می‌گیرد:

الف- تعیین وضعیت ماشین: تحلیل‌گر ارتعاشات باید پس از اندازه‌گیری ارتعاشات از نقاط مختلف ماشین بر اساس نوع توان و دور ماشین و همینطور میزان انعطاف پذیری آن، وضعیت ماشین را معین کند و به بهره بردار یا کارشناس تعمیراتی اعلام نماید.

ب- تشخیص عیب ماشین: تحلیل‌کننده ارتعاشات باید با رویت طیف‌های ارتعاشی در جهات مختلف ماشین و همینطور با استفاده از سوابق ارتعاشی و تعمیراتی ماشین و نیز بهره بردن از توان کارشناسی و تجارب خود عیب ماشین را شناسایی کند [۱].

ترموگرافی با اشعه مادون قرمز از جمله روش‌های جدید برای تشخیص عیب می‌باشد. در این روش به وسیله عکس‌های تولید شده توسط دوربین ترموگراف می‌توان درجه حرارت قسمت‌های مختلف دستگاه را اندازه‌گیری نمود. به کمک طیف گرفته شده از این دوربین عیب و یا خاصیت ویژه‌ای از مواد زیر سطح تشخیص داده می‌شود [۲]. بارزترین توانایی که این ابزار به عیب یاب می‌دهد ایجاد طیف دمایی و تشخیص دمای نقاط مختلف دستگاه بدون تماس با آن می‌باشد، چراکه اساسا با ابزار دیگری نمی‌توان درجه حرارت قسمت‌های دوار را به‌دست آورد. در هنگام تهیه داده‌های ارتعاشی سیستم، یکی از عواملی که می‌تواند بر روی این داده‌ها اثر بگذارد تغییرات قابل توجه دمای محیط است. اهمیت این عامل، بیشتر، هنگام بررسی ترند (trend) نمایان می‌شود. بدین ترتیب در ترند ارتعاشاتی دستگاه دیده خواهد شد که دامنه ارتعاشات در زمان‌های خاصی افزایش داشته است. این افزایش دامنه ممکن است وجود عیب را برای تحلیلگر تداعی نماید در حالیکه ممکن است این امر به دلیل تاثیر پذیری از تغییرات دمایی محیط بوده باشد. متأسفانه مطالعه کاملی در مورد اینکه تاثیرات افزایش و کاهش درجه حرارت تا چه حد بر روی دامنه ارتعاشات تاثیر می‌گذارد صورت نپذیرفته است. در این مقاله سعی در بررسی این عامل داریم.

مبحث نظری

معادله حرکت یک سیستم میرا که تحت نیروی هارمونیک $F(t) = F_0 \cos \omega t$ قرار دارد، بصورت رابطه زیر است [۳].

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cos \omega t \quad (1)$$

حل خصوصی معادله (۱) عبارت است از:

$$x_p(t) = X \cos(\omega t - \phi) \quad (2)$$

از معادلات (۱) و (۲) نتیجه می‌شود:

$$X[(k - m\omega^2) \cos(\omega t - \phi) - c\omega \sin(\omega t - \phi)] = F_0 \cos \omega t \quad (3)$$

اکنون روابط مثلثاتی زیر را در نظر می‌گیریم:

$$\cos(\omega t - \phi) = \cos \omega t \cos \phi + \sin \omega t \sin \phi \quad (4)$$

$$\sin(\omega t - \phi) = \sin \omega t \cos \phi - \cos \omega t \sin \phi \quad (5)$$

با جایگذاری روابط فوق در معادله (۳) و مساوی قرار دادن ضرایب $\cos \omega t$ و $\sin \omega t$ نتیجه می‌شود:

$$X[(k - m\omega^2) \cos \phi + c\omega \sin \phi] = F_0 \quad (6)$$

$$X[(k - m\omega^2) \sin \phi - c\omega \cos \phi] = 0 \quad (7)$$

از روابط (۶) و (۷) دامنه جابجایی و فاز به شکل روابط زیر بدست می‌آید:

$$X_d = \frac{F_0}{[(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{c\omega}{k - m\omega^2}\right) \quad (9)$$

با مشتق‌گیری از رابطه (۲) نسبت به زمان $\dot{x}(t)$ به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\dot{x}_p(t) = -X\omega \sin(\omega t - \phi) \quad (10)$$

همینطور با دو بار مشتق‌گیری از رابطه (۲) نسبت به زمان $\ddot{x}(t)$ نیز بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\ddot{x}_p(t) = -X\omega^2 \cos(\omega t - \phi) \quad (11)$$

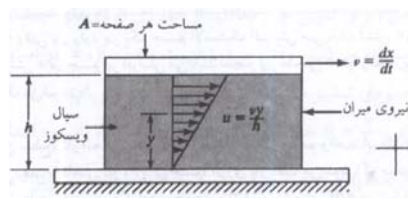
با توجه به رابطه (۶)، (۱۰) و (۱۱) دامنه سرعت و شتاب به شکل روابط (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌گردند.

$$X_v = \frac{F_0\omega}{[(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (12)$$

$$X_a = \frac{F_0\omega^2}{[(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (13)$$

با توجه به معادله (۵) دامنه ارتعاشات جابجائی تابع ω ، $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ و c است که در آن ω سرعت زاویه‌ای نیروی خارجی، ω_n فرکانس طبیعی سیستم و c ثابت میرایی می‌باشند.

با استفاده از دو صفحه موازی که در فاصله h از یکدیگر قرار دارند و بین آنها سیال با ویسکوزیته μ قرار دارد می‌توان یک میران ویسکوز مدل کرد که تصویر آن در شکل ۲ نشان داده شده است. یکی از صفحات ثابت و سرعت صفحه دیگر v فرض شده است. لایه‌هایی از سیال که با صفحه متحرک تماس دارند نیز با سرعت v حرکت می‌کنند و لایه‌هایی که با صفحه ثابت در تماسند، ساکن هستند. فرض می‌شود سرعت لایه‌های میانی از ۰ تا v تغییر می‌کند. طبق قانون ویسکوزیته نیوتن، تنش برشی موجود در یک لایه از سیال، که در فاصله y از صفحه ثابت قرار دارند، طبق رابطه زیر بیان می‌شود:



شکل ۱: صفحات موازی که بین آنها سیال ویسکوز قرار دارد

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (14)$$

که در آن، $\frac{du}{dy} = \frac{v}{h}$ شیب سرعت است. نیروی مقاومت F که بر صفحه متحرک وارد می‌شود نیز طبق رابطه (۱۵) بدست می‌آید.

$$F = \tau A = \frac{\mu A v}{h} = c v \quad (15)$$

که در آن A مساحت سطح صفحه متحرک است و ضریب c همان ثابت میرایی است که از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$c = \frac{\mu A}{h} \quad (16)$$

اگر میران غیر خطی باشد با استفاده از فرایند خطی سازی، ثابت معادل به کمک رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$c = \left. \frac{dF}{dv} \right|_{v^*} \quad (17)$$

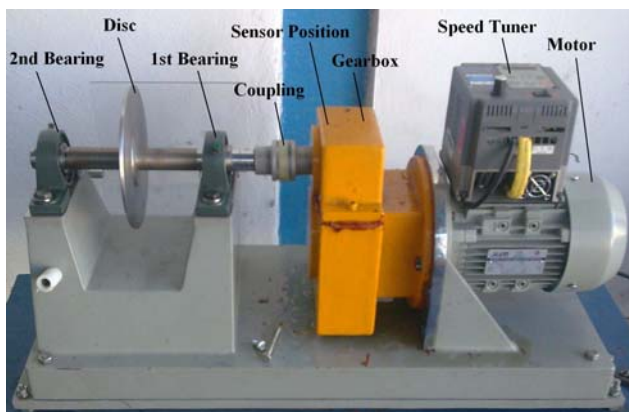
با جایگذاری رابطه (۱۶) در روابط (۸)، (۱۲) و (۱۳)، روابط زیر حاصل می‌شوند.

$$X_d = \frac{F_0}{[(k - m\omega^2)^2 + \frac{\mu^2 A^2}{h^2} \omega^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (18)$$

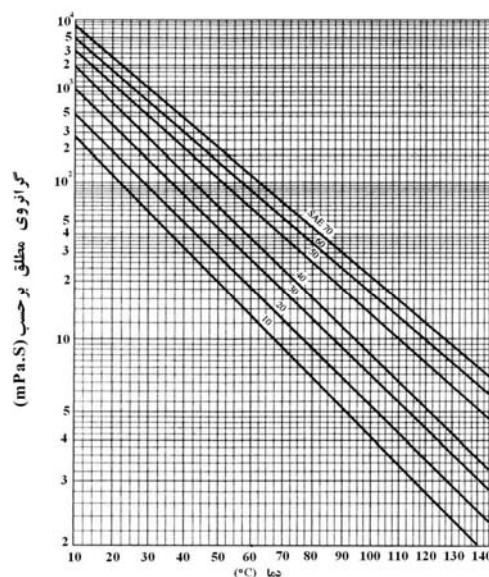
$$X_v = \frac{F_0 \omega}{[(k - m\omega^2)^2 + \frac{\mu^2 A^2}{h^2} \omega^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (19)$$

$$X_a = \frac{F_0 \omega^2}{[(k - m\omega^2)^2 + \frac{\mu^2 A^2}{h^2} \omega^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (20)$$

از رابطه (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) پیداست که دامنه جابجائی، سرعت و شتاب، با ویسکوزیته سیال رابطه معکوس دارند. ویسکوزیته سیال کاملاً وابسته به تغییرات دما است. با توجه به شکل ۲ می‌توان دریافت که با افزایش دما ویسکوزیته به شدت کاهش می‌یابد. به عنوان مثال برای روغن SAE30 افزایش دما از ۱۵ درجه سلسیوس به ۳۰ درجه، باعث کاهش ویسکوزیته از ۵۸۰ mPa.s به حدود ۱۶۰ mPa.s می‌رسد. این کاهش ویسکوزیته به ازای افزایش ۱۵ درجه‌ای دما قابل توجه است.



شکل ۳: تصویر دستگاه مورد آزمایش



شکل ۲: نمودار ویسکوزیته بر حسب دما

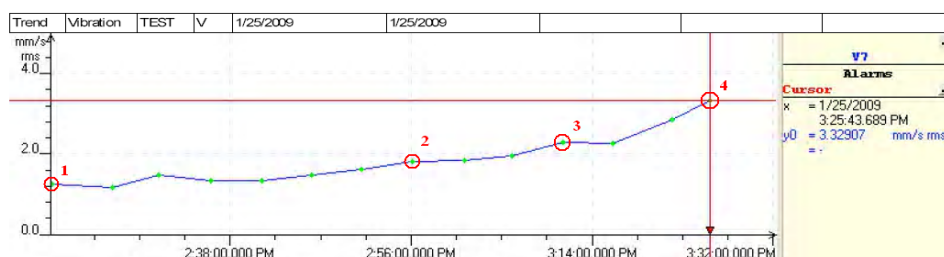
نتایج تجربی

شکل ۳ دستگاه مورد مطالعه در این تحقیق را نشان می‌دهد. دستگاه دارای یک موتور الکتریکی همراه با تنظیم کننده دور می‌باشد که قادر است دورهای بین صفر تا ۱۵۰۰ دور بر دقیقه را تولید کند. بعد از موتور جعبه دنده‌ای با نسبت افزایشی ۲/۷۵ قرار دارد که داخل محفظه چرخ‌دنده‌ها با روغن SAE30 پر شده است. بعد از جعبه دنده کوپلینگ و در نهایت شفت قرار دارد که بر روی دو یاتاقان غلتشی واقع شده است که آنها نیز با روغن SAE30 روان سازی گشته‌اند. در روی شفت نیز دیسکی تعبیه شده است.

داده‌های ارتعاشاتی توسط دستگاه VT60 ساخته شرکت Bruel&Kjaer تهیه شده است. سنسور مورد استفاده از نوع سنسور سرعت بوده و محل نصب آن با توجه به شکل ۳ روی جعبه دنده به صورت عمودی نصب شده است. طیف‌های حرارتی با دستگاه Guide Ir Analyser V1.7 ساخته Wuhan Guide Infrared Technology Co تهیه شده‌اند. این دستگاه طیف دمایی شیئی هدف را ثبت نموده سپس به کمک نرم‌افزار دمای نقاط دلخواه آن به دست آمده است. آزمایشات برای دو دور مختلف شفت، یعنی دور ۳۰۹۳rpm و ۱۲۷۵rpm انجام شده‌اند. اندازه‌گیری ارتعاشات و تهیه عکس‌های مادون قرمز در بازه‌های زمانی پنج دقیقه تکرار شده و آزمایش‌ها تا زمانی انجام شده‌اند که درجه حرارت دستگاه به حالت پایا رسیده باشد. به منظور جلوگیری از اطاله مطلب، در این مقاله تنها تعداد مشخصی از طیف‌های دمایی نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که در تحلیل دمایی، دمای نقاطی ثبت شده که در آن‌ها سیال روغن وجود داشته است.

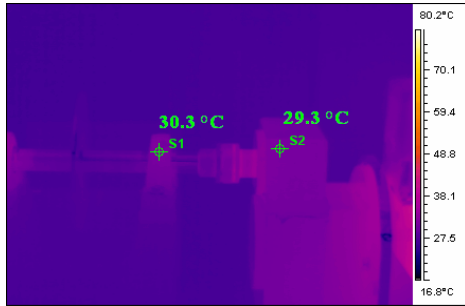
نتایج آزمایشات دور اول (۱۲۷۵ دور بر دقیقه):

در شکل ۴ نمودار ترند ارتعاشی سیستم نمایش داده شده است که نشان دهنده افزایش ارتعاشات با گذشت زمان می‌باشد. به منظور بررسی دقیق‌تر تأثیر دما بر افزایش دامنه سرعت، چهار نقطه دلخواه از این نمودار در نظر گرفته شده و نمودارهای ترموگرافی آنها استخراج گردیده است. چهار نقطه مورد بررسی در شکل ۴ مشخص شده‌اند.

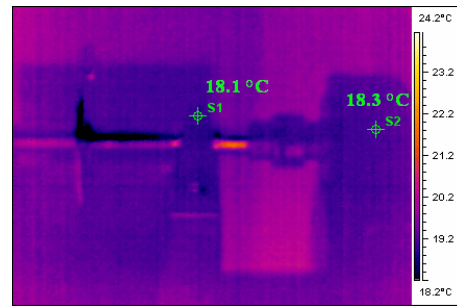


شکل ۴: نمودار ترند ارتعاشی سیستم برای دور ۱۲۷۵rpm

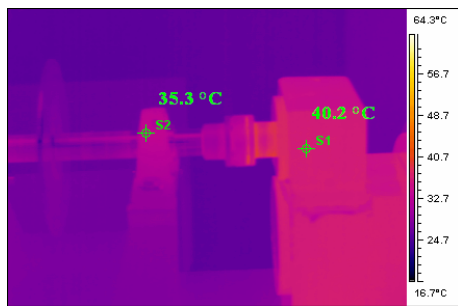
نمودارهای ترموگرافی مربوط به این زمان‌های خاص در شکل‌های ۵، ۶، ۷ و ۸ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۶: نمودار ترموگرافی نقطه ۲ در دور ۱۲۷۵rpm



شکل ۵: نمودار ترموگرافی نقطه ۱ در دور ۱۲۷۵ rpm



شکل ۸: نمودار ترموگرافی نقطه ۴ در دور ۱۲۷۵rpm

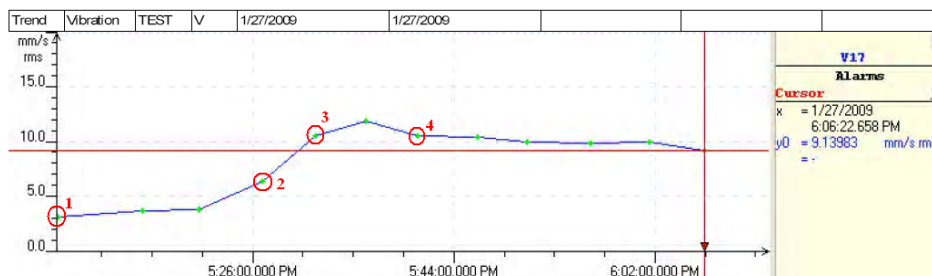


شکل ۷: نمودار ترموگرافی نقطه ۳ در دور ۱۲۷۵rpm

همانطور که از این شکل‌ها پیداست ارتعاشات با دامنه $1/2 \text{ mm/s}$ در دمای $19/7^\circ\text{C}$ آغاز شده است. هنگامی که دما به 30°C ، 35°C و 40°C می‌رسد، دامنه ارتعاشات سرعت نیز به ترتیب به $1/8 \text{ mm/s}$ ، $2/2 \text{ mm/s}$ و $3/2 \text{ mm/s}$ می‌رسند. بنابراین می‌توان دید که با افزایش دمای حدود 20°C دامنه ارتعاشات برای این دور 2 mm/s افزایش داشته است.

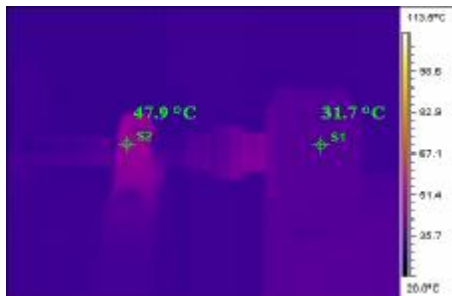
آزمایشات دور دوم (۳۰۹۲ دور بر دقیقه)

شکل ۹ نمودار ترند ارتعاشی دور دوم را نمایش می‌دهد. در این شکل نیز چهار نقطه جهت بررسی تأثیر دما بر تغییرات دامنه سرعت مشخص شده است



شکل ۹: نمودار ترند در دور ۳۰۹۲rpm

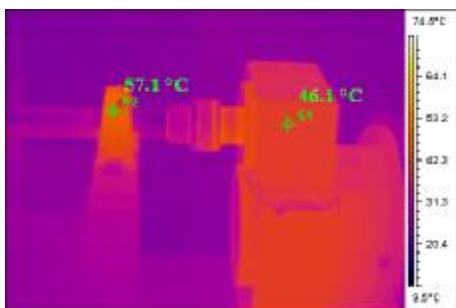
شکل‌های ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ نیز طیف حرارتی ۴ نقطه مشخص شده در شکل ۹ را نشان می‌دهند.



شکل ۱۱: نمودار ترموگرافی نقطه ۲ در دور ۳۰۹۳rpm



شکل ۱۰: نمودار ترموگرافی نقطه ۱ در دور ۳۰۹۳rpm



شکل ۱۳: نمودار ترموگرافی نقطه ۴ در دور ۳۰۹۳rpm



شکل ۱۲: نمودار ترموگرافی نقطه ۳ در دور ۳۰۹۳rpm

با توجه به این نمودارها می توان دید که دامنه ارتعاشات سرعت از 3 mm/s در دمای 20°C شروع شده در دماهای 31°C ، 45°C و 46°C به ترتیب به 6 mm/s ، 11 mm/s و $11/1$ رسیده است. بدین معنی که به ازای افزایش دمای 26°C دامنه ارتعاشات سرعت 8 mm/s افزایش داشته است.

بررسی و تحلیل نتایج:

با توجه به رابطه (۱۹) مشخص می گردد که مقدار ویسکوزیته بر دامنه سرعت ارتعاشات موثر بوده و کاهش آن باعث افزایش دامنه سرعت می گردد. همینطور شکل ۲ گویای این مطلب است که با افزایش دما ویسکوزیته روغن پائین می آید. بنابراین انتظار است که با افزایش دما دامنه ارتعاشات افزایش یابد که شکل های ۴ و ۹ این مطلب را تایید می کنند. برای دور اول افزایش دما از حالت شروع به کار دستگاه تا رسیدن به دمای پایا، 20°C افزایش یافته است که با توجه به شکل ۲ میزان ویسکوزیته از $350\text{ mPa}\cdot\text{s}$ به $75\text{ mPa}\cdot\text{s}$ رسیده است. این کاهش $275\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ویسکوزیته باعث افزایش 2 mm/s در دامنه ارتعاشات سرعت شده است. در مورد دور دوم میزان افزایش دما 28°C بوده است که این میزان افزایش دما با توجه به شکل ۲ باعث کاهش میزان ویسکوزیته از $350\text{ mPa}\cdot\text{s}$ به $45\text{ mPa}\cdot\text{s}$ می شود. بنابراین کاهش $305\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ویسکوزیته، افزایش 8 mm/s دامنه ارتعاشات سرعت را در پی دارد. جداول شماره ۱ و ۲ میزان دمای هر نقطه و ویسکوزیته و و دامنه ارتعاشی مربوط به آن را برای این دو حالت، نشان می دهند.

جدول شماره ۲: بررسی جزئیات دور دوم

شماره نقاط	دما (°C)	ویسکوزیته (mPa.s)	دامنه ارتعاشات سرعت (mm/s)
۱	۲۰/۱	۳۵۰	۳
۲	۳۱/۷	۱۳۰	۶
۳	۴۵/۸	۵۰	۱۱
۴	۴۶/۱	۴۵	۱۱/۱

جدول شماره ۱: بررسی جزئیات دور اول

شماره نقاط	دما (°C)	ویسکوزیته (mPa.s)	دامنه ارتعاشات سرعت (mm/s)
۱	۱۹/۷	۳۵۰	۱/۲
۲	۲۹/۳	۱۶۰	۱/۸
۳	۳۵/۲	۱۱۰	۲/۲
۴	۴۰/۲	۷۵	۳/۲

با اینکه تغییرات ویسکوزیته در دور اول نسبت به دور دوم اختلاف زیادی ندارد اما مشاهده می‌گردد که افزایش دامنه ارتعاشات در دور دوم بسیار بیشتر از دور اول (حدود ۴ برابر) است. علت این رویداد را می‌توان به کمک رابطه (۱۹) بیان نمود. در صورت رابطه (۱۹) ω وجود دارد که نقش تعیین کننده‌ای در اندازه دامنه سرعت بازی می‌کند. از آنجائی که سرعت دور دوم ۲/۴۲ برابر سرعت دور اول است، بنابراین کاهش ویسکوزیته در حالت دوم تاثیر ملموس تری را نسبت به حالت اول داراست. شایان توجه است که اگر به جای دامنه سرعت، دامنه شتاب مورد بررسی قرار می‌گرفت تاثیرات کاهش ویسکوزیته بر دامنه ارتعاشات در دورهای بالا نسبت به دورهای پائین بسیار واضح تر رخ می‌نمود چراکه دامنه ارتعاشات شتاب با ω^2 رابطه دارد.

نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تاثیر تغییرات دما بر روی دامنه ارتعاشات پرداخته شد. آزمایشات بر روی یک مدل شبه صنعتی صورت پذیرفت و طیف‌های دمائی و ارتعاشاتی برای دو دور کارکرد مختلف تهیه شد. برای دور کارکرد اول (۱۲۷۵rpm) مشاهده شد که به ازای تغییر 20°C دما، دامنه ارتعاشات سرعت 2mm/s افزایش پیدا کرد و با توجه به جدول تغییرات ویسکوزیته نسبت به دما، مقدار کاهش ویسکوزیته برای این حالت 275mPa.s محاسبه شد. برای دور کارکرد دوم (۳۰۹۳rpm) به ازای افزایش 28°C ، دامنه ارتعاشات 8mm/s افزایش یافت. برای این حالت، کاهش ویسکوزیته 305mPa.s گزارش شد. سپس با توجه به روابط مطرح شده افزایش بیشتر دامنه ارتعاشات برای دور دوم نسبت به دور اول با وجود اختلاف کم در تغییر ویسکوزیته توجیه گردید. با در نظر گرفتن مباحث مطرح شده مشخص شد که اولاً باید تغییرات دمائی محیط را در بررسی نمودارهای ترند ارتعاشی در نظر گرفت. ثانیاً هر چه دور کارکرد دستگاه بالاتر باشد، تاثیر تغییرات دما در دامنه سرعت خود را بیشتر نمایان می‌کند. بدیهی است اگر آنالیز ارتعاشات بر حسب دامنه شتاب صورت پذیرد تاثیر تغییر دما بسیار واضح تر خواهد بود. بنابراین در مناطقی که تغییرات درجه آب و هوا زیاد می‌باشد باید در انتخاب نوع سنسور و نوع آنالیز ارتعاشات (جابجائی، سرعت و شتاب) دقت بیشتری کرد و همچنین در هنگام بررسی نمودار ترند عامل تغییرات دمائی محیط را لحاظ نمود.

مراجع

[۱] م، بهزاد، اصول و مبانی ارتعاشات در نگهداری، تعمیرات و عیب‌یابی ماشین‌های دوار، انتشارات شرکت ملی صنایع پتروشیمی، تهران، ۱۳۸۶.

[2] D.J. Titman, "Applications of thermography in non-destructive testing of structures," NDT&E International, 34, p149, 2001.

[3] S.S. Rao, Mechanical Vibrations, Addison-Wesley, 1995.