

# آنالیز ارتعاشات

محمد منصوری ۸۵۴۷۱۱۸۷

مجتبی فاضلی ۸۵۴۷۱۱۲۴

## مقدمه

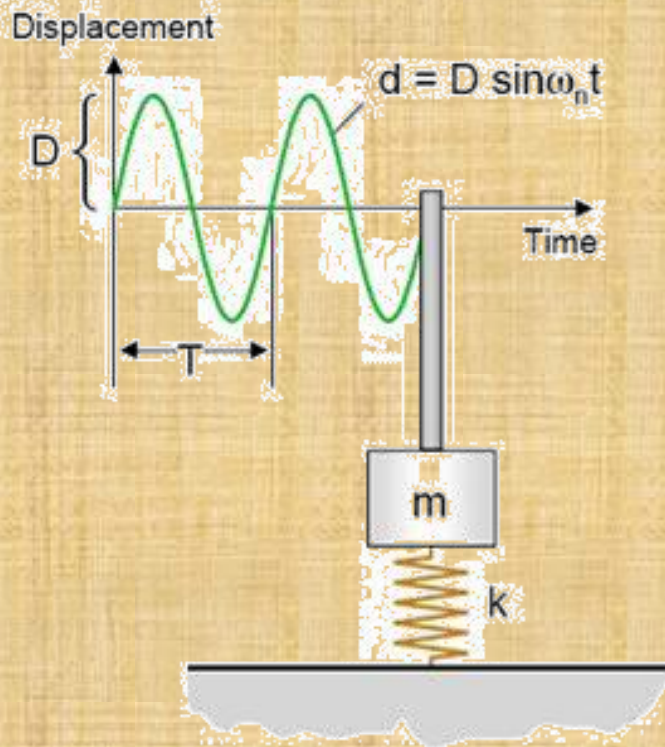
علم ارتعاشات (مشمول بر اندازه‌گیری و تحلیل ارتعاش) کاربردهای زیادی در صنعت دارد که برخی از آن‌ها عبارتند از:

- طراحی دینامیکی ماشین‌آلات و سازه‌ها (تحلیل روتور دینامیک و آنالیز مودال)
- تست‌های کنترل کیفیت
- تست پذیرش تجهیزات پس از نصب
- طراحی سیستم‌های کنترل و ایزوله کردن ارتعاشات
- پایش وضعیت، حفاظت فنی و عیب‌یابی ماشین‌آلات

# مفاهیم اولیه ارتعاشات و حرکت ارتعاشی

ارتعاشات چیست؟

لرزش یا ارتعاشات مکانیکی، نوعی از حرکت‌های سیستم‌های دینامیکی هستند که به شکل نوسانی صورت می‌پذیرند و این عمل در یک بازه زمانی تکرار می‌شود.



این نوع حرکت را در ساده‌ترین شکل می‌توان با یک وزنه و یک فنر شبیه‌سازی کرد. با تغییر مکان اولیه وزنه متصل به فنر و رها کردن آن، حرکت نوسانی رخ می‌دهد که می‌توان دامنه آن را به کمک یک تابع سینوسی بیان نمود.

# مفاهیم اولیه ارتعاشات و حرکت ارتعاشی

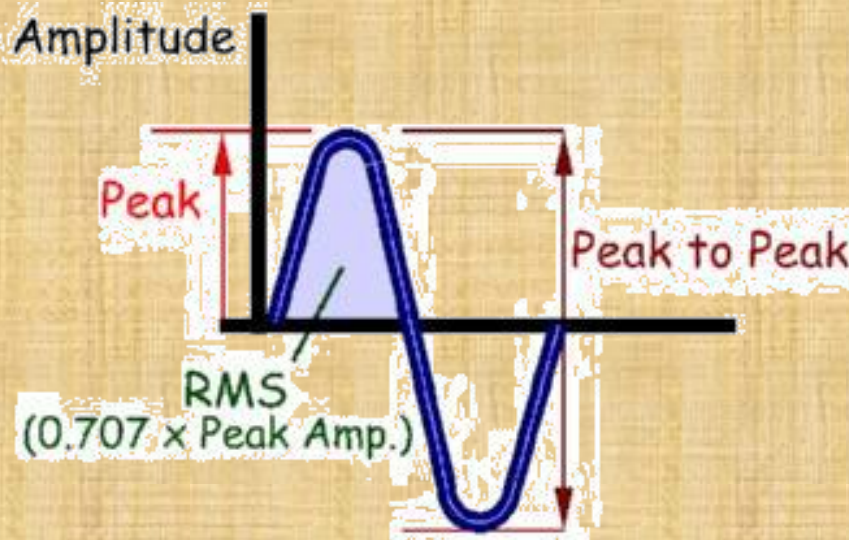
مشخصه‌های مهم حرکت ارتعاشی عبارتند از:

- دامنه که معیاری از شدت ارتعاش است.
  - فرکانس که معیاری از نرخ حرکت در واحد زمان است.
  - فاز که توالی حرکت را نسبت به یک مرجع مشخص می‌سنجد.
- به طور کلی، دامنه هر موج سینوسی را به سه شکل می‌توان تعیین کرد:

- مقدار صفر تا پیک (0-Peak)

- مقدار پیک تا پیک (Peak-Peak)

- مقدار مؤثر (مقدار rms)



# مفاهیم اولیه ارتعاشات و حرکت ارتعاشی

پریود زمانی حرکت، بازه زمانی است که سیستم، سیکل ارتعاشی خود را تکرار می‌کند.

فرکانس ارتعاشات، در واقع عکس پریود زمانی است. معمولاً فرکانس را با واحدی به نام هرتز اندازه‌گیری می‌کنند.

فاز، همیشه نسبت به یک مرجع سنجیده می‌شود و توالی حرکت را نسبت به آن نشان می‌دهد. معمولاً واحد فاز درجه است.

# آنالیز ارتعاشات و پایش وضعیت در ماشین آلات دوار

به طور کلی، دو نوع نیروی استاتیکی و دینامیکی در ماشین آلات 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) عبارتند از:

- محدودیت‌های طراحی
- محدودیت‌های ساخت
- اشکال در نصب اولیه
- اشکال در بهره‌برداری
- بروز اشکالات در حین تعمیرات

# آنالیز ارتعاشات و پایش وضعیت در ماشین آلات دوار

از آن جایی که رسیدن به حالت ایده آل امکان پذیر نیست، همیشه تا حدی لرزش و ارتعاش در ماشین آلات وجود دارد که مجاز شمرده می شوند. اما 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، می توان وضعیت را به حالت قبل برگرداند.

رابطه زیر میزان ارتعاش ماشین را تعیین می کند:

$$\text{Vibration} = \text{Vibratory Force} / \text{Impedance}$$

مقاومت مکانیکی / نیروی ارتعاشی = ارتعاش

# آنالیز ارتعاشات و پایش وضعیت در ماشین آلات دوار

نیروهای ارتعاش‌زا در داخل ماشین و معمولاً در سیستم روتور (بخش در حال دوران ماشین) تولید می‌شوند. امپدانس یا مقاومت مکانیکی از مشخصات هر سیستم مکانیکی است و مسیر انتقال ارتعاش را توصیف می‌کند.

ارتعاشاتی که معمولاً از روی استاتور (بخش ساکن ماشین) اندازه‌گیری می‌شود، تحت تأثیر دو پارامتر فوق است.

حال دو پارامتر فوق؛ یعنی نیروهای ارتعاش‌زا و امپدانس را جداگانه بررسی می‌کنیم.



# آنالیز ارتعاشات و پایش وضعیت در ماشین آلات دوار

برخی از عوامل ایجاد نیروهای ارتعاش‌زا در ماشین‌آلات، عبارتند از:

- عدم تعادل و توازن ماشین

- سایش اجزا و قطعات

- نیروهای آئرودینامیکی و هیدرودینامیکی

- نیروهای الکترومغناطیسی

- تماس قطعات متحرک و ثابت

- اصطکاک

# آنالیز ارتعاشات و پایش وضعیت در ماشین آلات دوار

امپدانس (مقاومت مکانیکی در برابر حرکت) سه مؤلفه دارد که عبارتند از:

- جرم
- سفتی
- میرایی

برخی عوامل بدون این که از خود نیرویی تولید کنند، تنها از طریق تأثیر بر امپدانس، منجر به تشدید ارتعاش می شوند. مهم ترین این عوامل عبارتند از:

- لقی مکانیکی
- تحریک فرکانس های طبیعی اجزا (رزونانس)
- ضعف در فونداسیون و یا شاسی ماشین آلات
- ضعیف بودن سازه

# ارتعاشات به عنوان مشخص کننده وضعیت تجهیز

ارتعاشات هر تجهیز دوار (چه از نظر دامنه و چه از نظر سایر مشخصات ارتعاش) ارتباط مستقیمی با وضعیت آن دارد و هرگونه تغییر در وضعیت تجهیز (هر چند جزئی) با تغییر در وضعیت ارتعاشات آن تجهیز همراه خواهد بود.

منظور از تغییر وضعیت تجهیز، تغییر در شرایط بهره‌برداری تجهیز، بروز اشکال (مکانیکی، الکتریکی و غیره) در تجهیز، تغییر بار وارد بر تجهیز و موارد دیگر می‌باشد.

بنابراین، اندازه‌گیری و تحلیل ارتعاشات یکی از تکنیک‌های اصلی برای پایش وضعیت تجهیزات و ماشین‌آلات دوار به شمار می‌رود.

# برخه عيوب قابل شناسايه از طريق آناليز ارتعاشات

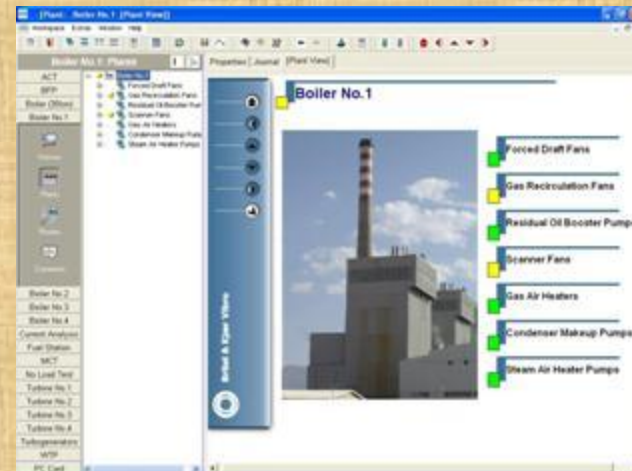
- ناميزاني جرمي
- تشديد (رزونانس)
- لقي مكانيكي
- خرابي بيرينگ
- خرابي چرخ دنده
- فونداسيون معيوب
- اشكالات الكتريكي
- اشكالات ائروديناميكي و هيدروديناميكي
- خرابي كوپلينگ
- خرابي تسمه و پولي
- اشكالات پايپينگ
- اعوجاج پوسته
- خارج از مركزي
- شفت خميده

نكته مهم و كليدي در عيب يابي از طريق تحليل ارتعاشات اين است كه:  
هر عيبي در تجهيزات دوار، لرزش و ارتعاشي با مشخصات خاص خود (از لحاظ دامنه، فرکانس، فاز و غيره) ايجاد مي نمايد.

# امکانات مورد نیاز برای اجرای آنالیز ارتعاشات

حداقل امکاناتی که برای پیاده کردن برنامه مراقبت وضعیت بر مبنای ارتعاش سنجی مورد نیاز هستند، عبارتند از:

- انواع حسگرهای ارتعاش سنجی
- انواع تجهیزات داده برداری
- نرم افزار پردازش و مدیریت اطلاعات



# حسگرهای ارتعاش سنجی

حسگر ارتعاش سنجی اولین وسیله مورد نیاز برای اندازه‌گیری ارتعاشات و ابزاری است که حرکت ارتعاشی را حس کرده و آن را به یک سیگنال الکتریکی AC متناسب با حرکت ارتعاشی، تبدیل می‌کند.

با تبدیل ارتعاشات به سیگنال الکتریکی، امکان ذخیره‌سازی، انجام پردازش‌های بعدی و نیز مشاهده سیگنال از طریق دستگاه‌های الکترونیکی (تجهیزات داده برداری) فراهم می‌شود.

نکاتی که در مورد حسگرها باید دانست، عبارتند از:

- نوع حسگر
- انتخاب صحیح حسگر، با توجه به مشخصات آن (حساسیت، پاسخ فرکانسی، بازه دینامیکی، بازه اندازه‌گیری، ابعاد، وزن، دما و غیره)
- نصب صحیح حسگر
- وضعیت مناسب اتصالات حسگر و کابل آن

# حسگرهای ارتعاش سنج

با توجه به مکانیزم کاری و پارامتر اصلی اندازه‌گیری، حسگرهای ارتعاش‌سنجی در سه گروه دسته‌بندی می‌شوند:

- جابه‌جایی سنج
- سرعت سنج
- شتاب سنج

هر یک از دسته‌های فوق، خود به انواع مختلفی تقسیم‌بندی می‌شوند. به عنوان مثال، شتاب‌سنج‌ها به سه زیرگروه زیر تقسیم می‌شوند:

- شتاب‌سنج‌های پیزوالکتریک
- شتاب‌سنج‌های پیزورسیستيو
- شتاب‌سنج‌های خازنی



# بررسی روش‌هاک اجراک آنالیز ارتعاشات

برخی از روش‌های رایج تحلیل ارتعاشات در کاربردهای مختلف و به ویژه موضوع پایش وضعیت تجهیزات دوار عبارتند از:

- تحلیل مقدار کلی ارتعاشات
- پارامترها و مشخصه‌های بیرینگ‌های غلتشی مانند BP، BCU، SEE، Crest، Peak Value، K-Factor
- آنالیز طیف فرکانسی (آنالیز FFT یا Spectrum)
- تحلیل شکل موج زمانی ارتعاش
- آنالیز Envelope
- تحلیل زاویه فاز
- آنالیز Orbit
- تحلیل Run Up و Coast Down (منحنی مرکز شفت، منحنی آبشاری و غیره)



# تحلیل مقدار کله ارتعاشات

این روش به عنوان ساده‌ترین تکنیک برای ارزیابی وضعیت ماشین‌آلات دوار به کار می‌رود. استانداردهای مختلفی نیز برای تعیین مقادیر مجاز ارتعاشات وجود دارند که متداول‌ترین آن ISO 10816 است.

در واقع، در این روش، برای هر یک از قسمت‌های مختلف تجهیز میزان مجازی برای ارتعاش در نظر می‌گیرند و اگر ارتعاش اندازه‌گیری شده بالاتر از حد مجاز شد به معنای وجود عیب در تجهیز است.

در استاندارد ISO 10816 ارتعاشات مجاز در هر سه بعد طولی، عرضی و ارتفاع ثبت شده است.

# آنالیز فرکانس

عیوب مختلفی که برای ماشین آلات دوار رخ می دهند، هر کدام همراه با رفتار دینامیکی خاص خود و به تعبیر دیگر با مشخصه های ارتعاشی ویژه ای رخ می دهند. یکی از مشخصه های مهم ارتعاش، فرکانس ارتعاشی است.

معمولاً ارتعاش اندازه گیری شده از روی ماشین، یک سیگنال پیچیده و ترکیبی از چندین سیگنال ارتعاشی با فرکانس های مختلف است. آنالیز فرکانسی که به آن آنالیز اسپکتروم یا FFT نیز می گویند، یک فرآیند پردازش سیگنال است که به کمک آن محتوای فرکانسی سیگنال ارتعاشی به دست می آید. در منحنی های FFT، محور افقی، فرکانس و محور عمودی، دامنه ارتعاش را نشان می دهد. به طور کلی، عیوب مختلف، منجر به ایجاد طیف های فرکانسی خاص خود می شوند و از این طریق می توان به تشخیص اشکالات موجود در تجهیز پرداخت.

# آنالیز فرکانس

در بسیاری از عیوب، فرکانس ارتعاشات ایجاد شده با دور ماشین ارتباط دارد و در واقع مضارب صحیحی از دور ماشین در منحنی FFT دیده می شود. این مضارب را به شکل  $1^*rpm$ ،  $2^*rpm$  و  $3^*rpm$  نشان می دهند.

جداول زیادی وجود دارند که مشخصات فرکانسی عیوب رایج را بیان می نمایند. یک نمونه ساده شده از این جداول در ادامه می آید.

# مشخصات فرکانس عیوب رایج

نوع عیب	فرکانس عیب	جهت و رفتار دامنه ارتعاش
نامیزانی جرمی	1*rpm	شعاعی / ارتعاش با دامنه ثابت
شفت خمیده	1~2*rpm	محوری / ارتعاش بالا
خرابی بیرینگ‌های غلتشی	فرکانس‌های چهارگانه خاص خود	اثر نامحسوس بر روی دامنه کلی ارتعاش
سایش بیرینگ‌های لغزشی	1*rpm	شعاعی
ناهم‌راستایی کوپلینگ	1~3*rpm	شعاعی / ارتعاش بالا برای Offset محوری / ارتعاش بالا برای Angular
خرابی تسمه	1~3*rpm	محل اتصال مرکز دو پولی / ارتعاش بالا
خرابی چرخ‌دنده	فرکانس درگیری چرخ‌دنده‌ها	بسته به بار غالب (محوری یا شعاعی)
لقی مکانیکی	1*rpm	
تشدید (رزونانس)	فرکانس خاص هر سیستم	ارتعاش با دامنه بسیار بالا

# تحلیل شکل موج زمانه ارتعاش

شکل موج ارتعاشات، در واقع سیگنال ارتعاشات بدون تقریباً هیچ‌گونه پردازشی است. بنابراین، در تحلیل دینامیکی ماشین از اهمیت خاصی برخوردار است. در واقع، برخی عیوب نظیر شکستگی چرخ‌دنده‌ها، ارتعاشات ضربانی، پدیده مدولاسیون از طریق تحلیل شکل موج ارتعاش، آسان‌تر تشخیص داده می‌شوند.

# تحلیل زاویه فاز

از طریق مقایسه مقادیر زاویه فاز ارتعاش در نقاط و جهات مختلف اندازه‌گیری بر روی تجهیز، می‌توان اطلاعاتی از چگونگی حرکت اجزای مختلف تجهیز نسبت به یک‌دیگر به دست آورد. در برخی موارد، مشخصات فرکانسی ارتعاش ناشی از عیوب مختلف، مشابه یک‌دیگر می‌باشند و لذا تمایز بین این عیوب تنها از طریق منحنی فرکانسی امکان‌پذیر نخواهد بود. در این‌گونه موارد باید از سایر مشخصات سیگنال ارتعاشی مانند زاویه فاز برای تفکیک عیوب از هم استفاده کرد؛ زیرا برخلاف تشابه منحنی‌های فرکانسی، الگوی زاویه فاز در مورد اشکالات مختلف، متمایز می‌باشد.

# تحلیل زاویه فاز

به طور کلی، برخی از کاربردهای زاویه فاز عبارتند از:

- تشخیص ترک در شفت
- تعادل دینامیکی
- تشخیص تشدید (رزونانس) و سرعت بحرانی
- به دست آوردن شکل حالت‌های مختلف (Moods)
- تشخیص نامیزانی جرمی، ناهمراستایی و شفت خمیده از یکدیگر