



موضوع سمینار: روش های بالانس بدون توقف تجهیز

نگارش

حمید باب

استاد راهنما

دکتر بهزاد

خرداد 1403

چکیده:

در این سمینار، ابتدا به اهمیت مفهوم نابالانسی پرداخته شد. نابالانسی در تجهیزات می‌تواند منجر به افزایش ارتعاشات غیرمطلوب، فرسایش زودرس قطعات، و کاهش عمر مفید تجهیزات شود. این مشکلات نه تنها باعث کاهش کارایی تجهیزات می‌شوند بلکه هزینه‌های تعمیر و نگهداری را نیز افزایش می‌دهند. عدم توازن و نابالانسی در تجهیزات مکانیکی می‌تواند عواقب جدی بر عملکرد و ایمنی تجهیزات داشته باشد.

در ادامه، در فصل اول انواع نابالانسی‌ها مورد بررسی قرار گرفت و اهمیت حفظ توازن و بالانس صحیح در تجهیزات مکانیکی تأکید شد.

در فصل دوم، به روش‌های مختلف بالانس کردن تجهیزات پرداخته شد. روش‌هایی از جمله بالانس تک صفحه‌ای، بالانس دو صفحه‌ای، بالانس مودال، و روش‌های دیگر با شرح مختصری مورد بررسی قرار گرفت. همچنین یک نمونه آزمایش واقعی نیز در این سمینار بررسی شد.

در فصل سوم، به شرکت‌های فعال در حوزه بالانس تجهیزات اشاره شد و دامنه فعالیت‌های آن‌ها شرح داده شد. این بخش اطلاعات مفیدی را درباره شرکت‌هایی که در زمینه بالانس تجهیزات فعالیت می‌کنند، ارائه کرد. این سمینار به موضوع اهمیت بالانس تجهیزات مکانیکی و روش‌های مختلف بالانس کردن پرداخته و نکات کلیدی در این زمینه را بررسی کرده است.

کلید واژه‌ها: بالانس، نامیزانی، روتور

فهرست مطالب

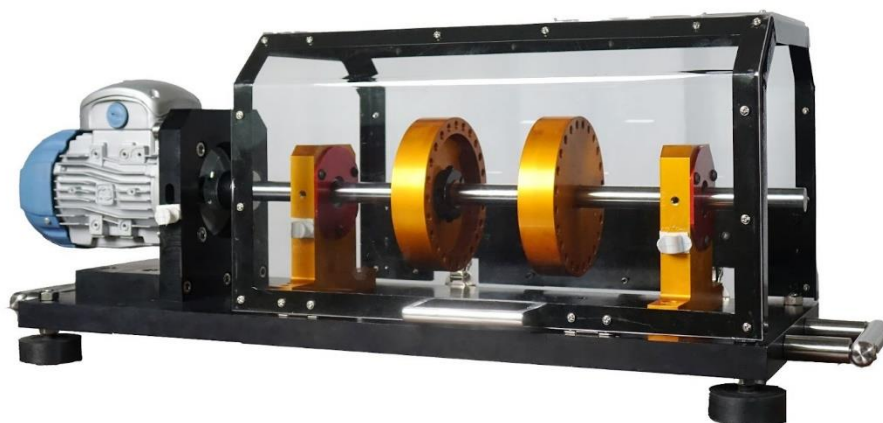
چکیده.....	2
فصل 1: مفهوم نابالانسی و عواقب آن.....	4
1-1 مفهوم نامیزانی.....	4
2-1 انواع نامیزانی.....	6
3-1 معایب نامیزانی	8
فصل 2: روش های بالانس بدون توقف تجهیز	10
1-2 بالانس تک صفحه ای	10
2-2 بالانس دو صفحه ای	11
3-2 بالانس مودال	12
4-2 روش بالانس سه وزنه آزمایشی.....	13
5-2 روش بالانس تریم کوپلینگ.....	13
6-2 روش بالانس دو صفحه‌ای بدون زاویه فاز.....	14
7-2 روش بالانس بدون وزنه آزمایشی.....	15
1-7-2 آزمایش عملی روش بالانس بدون وزنه آزمایشی	16
فصل 3: شرکت های فعال در این حوزه.....	18
منابع.....	20

فصل 1: مفهوم نابالانسی و عواقب آن

نابالانسی در تجهیزات به عدم توازن در وزن یا توزیع جرم در سیستم‌ها یا قطعات اشاره دارد. این مشکل می‌تواند به عواقب جدی مانند افزایش ارتعاشات، فرسایش زودرس قطعات، و کاهش عمر مفید تجهیزات منجر شود. ایجاد نابالانسی معمولاً به دلیل عواملی مانند عدم صحیح بودن توازن وزنی، خرابی در قطعات، یا ناهماهنگی در توزیع جرم در سیستم رخ می‌دهد.

1-1) مفهوم نامیزانی

وقتی یک قطعه در یک ماشین یا تجهیزات نابالانس باشد، ارتعاشات غیرمطلوبی ایجاد می‌شود که می‌تواند به فرسایش زودرس قطعات و کاهش کارایی تجهیزات منجر شود. این مشکل معمولاً در صنایع مختلف از جمله صنایع خودروسازی، هواپیماسازی، و صنایع تولیدی دیگر رخ می‌دهد.



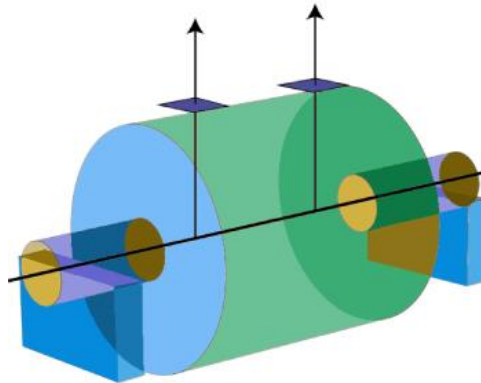
تصویر 1-1) بررسی نامیزانی در سیستم‌های دوار بسیار مهم و حیاتی می‌باشد.

نابالانسی می‌تواند اثرات منفی زیادی بر روی عملکرد و عمر مفید تجهیزات داشته باشد. برای جلوگیری از این مشکل، توازن وزنی صحیح و توزیع جرم مناسب در سیستم‌ها و قطعات حائز اهمیت است. استفاده از روش‌های بالانس بدون توقف تجهیزات می‌تواند به بهبود عملکرد و کاهش ارتعاشات تجهیزات کمک کند که در این سمینار به آن می‌پردازیم.

1-2) انواع نامیزانی

نابالانسی استاتیکی^۱:

عدم تعادل استاتیکی خروج از مرکز ثقل روتور است که توسط جرم نقطه ای در شعاع معینی از مرکز دوران ایجاد می شود. جرم مساوی در طرف مقابل (180 درجه) روتور را متعادل می کند.



تصویر 1-2) نابالانسی استاتیکی

عدم تعادل استاتیکی به عنوان عدم تعادل تک صفحه طبقه بندی می شود، به این معنی که با یک کمیت بردار منفرد نشان داده می شود و با یک جرم اصلاحی منفرد که در مقابل محل عدم تعادل و در صفحه محوری مرکز جرم روتور اعمال می شود، تصحیح می شود. هنگامی که هیچ راهی برای اضافه کردن (یا حذف) جرم در همان صفحه با عدم تعادل وجود ندارد.

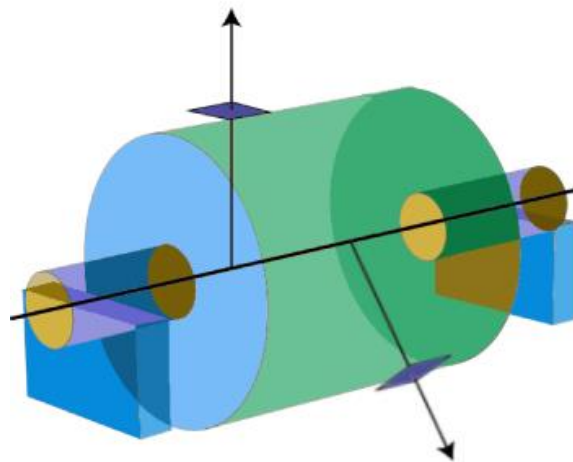
نابالانسی دینامیکی^۲:

عدم تعادل دینامیکی ترکیبی از عدم تعادل ایستا و کوپل است و رایج ترین نوع عدم تعادل است که در روتورها یافت می شود. برای اصلاح عدم تعادل دینامیکی، لازم است در حین کار دستگاه، اندازه گیری ارتعاش انجام شود و جرم های متعادل کننده در دو صفحه اضافه شود.

¹ Static Unbalance

² Dynamic Unbalance

عدم تعادل دینامیک از همان شرایطی پیروی می کند که عدم تعادل کوپل است و تنها زمانی که قطعه در حال چرخش است قابل اندازه گیری است. عدم تعادل دینامیکی زمانی وجود دارد که محور اصلی اینرسی مرکزی نه موازی باشد و نه با محور شفت در مرکز جرم قطع شود. این فقط در دو یا چند صفحه قابل اصلاح است. عدم تعادل پویا حالت کلی ترکیبی از عدم تعادل استاتیکی و کوپل است.



تصویر 3-1) نابالانسی دینامیکی

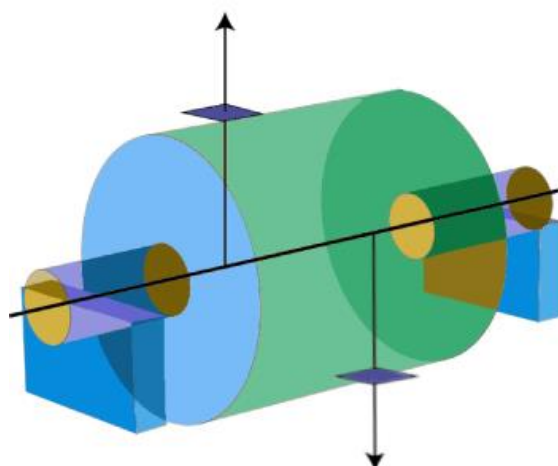
. در عدم تعادل شبه استاتیکی، ترکیب خاصی از عدم تعادل استاتیکی و کوپل وجود دارد به طوری که موقعیت زاویه ای یک زوج با موقعیت زاویه ای عدم تعادل استاتیک منطبق است. اگر بتوان از محل محوری نامتعادل برای تصحیح عدم تعادل استفاده کرد، آنگاه یک اصلاح واحد امکان پذیر است. در غیر این صورت، باید مانند عدم تعادل پویا رفتار شود. در برخی موقعیت های تولید، تصحیح را می توان در یک صفحه منفرد به اندازه کافی نزدیک به منبع عدم تعادل انجام داد تا تصحیح موازنه کارآمد در محدوده تحمل مورد نیاز امکان پذیر شود. این مورد نادر از عدم تعادل کوپل و استاتیک در تصویر 3-1 نشان داده شده است.

گاهی اوقات زمانی که مواد یا فضای کافی برای انجام تمام اصلاحات عدم تعادل لازم وجود ندارد، تعادل چند صفحه ای مورد نیاز است. در این حالت، یک عملیات پیش متعادل در یک یا دو صفحه کمکی، مقدم بر تعادل نهایی است. در برخی از کاربردها که روتورها انعطاف پذیر هستند، از بالانس چند صفحه ای برای به حداقل رساندن تنش های خمشی داخلی روتور استفاده می شود.

نابالانسی کوپل^۱:

ممکن است در روتوری که قطر آن کمتر از 7 تا 10 برابر عرض آن است، چند جرم نامیزان کننده وجود داشته باشد. در مورد یک استوانه، ممکن است دو جرم مساوی به طور متقارن در اطراف مرکز ثقل قرار گیرند، اما در 180 درجه از یکدیگر قرار گیرند. روتور در تعادل استاتیکی است (مرکز ثقل خروج از مرکز وجود ندارد)، اما هنگامی که روتور می چرخد، دو جرم باعث جابجایی در محور اینرسی می شوند، به طوری که دیگر با محور چرخش هم تراز نیست و منجر به ارتعاشات قوی می شود.

عدم تعادل را فقط می توان با اندازه گیری ارتعاش با چرخش روتور و اضافه کردن جرم های اصلاحی در دو صفحه اصلاح کرد. روتور عدم تعادل زوج ثابت است، توده های انتهایی یکدیگر را متعادل می کنند. با این حال، هنگامی که می چرخد، یک نامیزانی تجربه می شود.



تصویر 4-1) نابالانسی کوپل

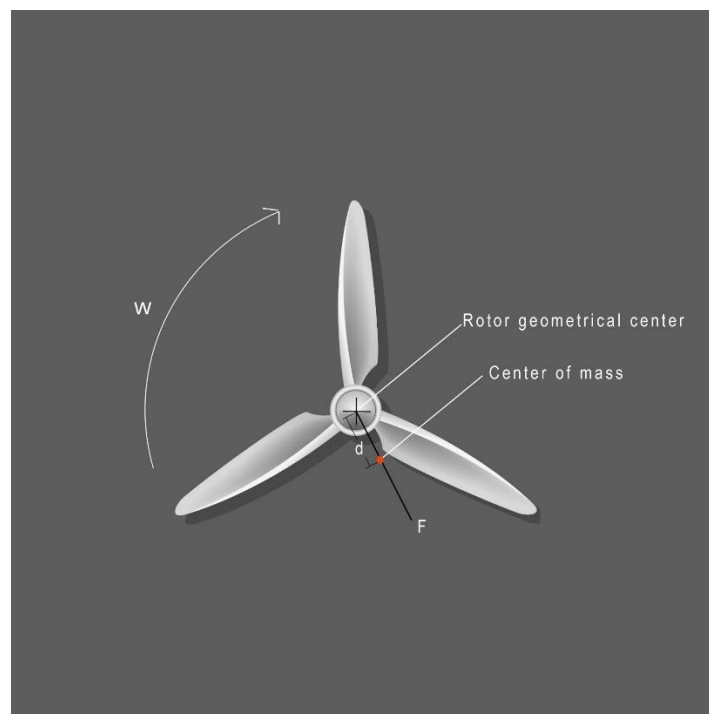
عدم تعادل کوپل شرایطی است که در آن محور اصلی با محور شفت در مرکز جرم قطع می شود (که به این معنی است که عدم تعادل استاتیکی وجود ندارد) اما در یک زاویه نسبت به محور یا تاقان متمایل است، همانطور که در تصویر 4-1 نشان داده شده است.

¹ Couple unbalance

نابالانسی کوپل (همچنین نامتعادل لحظه ای^۱ نیز نامیده می شود) دارای عدم تعادل های مساوی است که در فاصله 180 درجه از یکدیگر، در انتهای مخالف قرار دارند. به طور کلی، عدم تعادل زوج نتیجه این است که هر صفحه یاتاقان دقیقاً بر محور چرخش عمود نیست. هنگامی که روتور می چرخد، با یک حرکت چرخشی می لرزد. عدم تعادل زوج را نمی توان در یک صفحه اصلاح کرد. دو اصلاح لازم است.

1-3) معایب نامیزانی

در این بخش به چند نکته بسیار مهم از معایب نامیزانی اشاره خواهیم کرد تا به بررسی روش های بالانس بدون توقف تجهیز و اهمیت آن بپردازیم.



تصویر 1-5) نابالانسی در پروانه ها که احتمال وقوع آن بسیار بالا می باشد، خطرناک شمرده می شود.

کاهش عمر مفید تجهیزات تولیدی

وقتی یک تجهیزات نامتعادل باشد، بهترین عملکرد خود را نخواهد داشت. به خصوص اگر هدف آن تولید ماشین ابزار باشد که بیشتر بر کیفیت خروجی آن تأثیر می گذارد. به عنوان مثال، یک ماشین نجاری با سرعت بالا در صورتی که ابزار و دوک بر اساس آن متعادل نشده باشند، مواد رد شده بیشتر و محصولات سطحی ضعیف تولید می کند و سپس کاهش کیفیت محصولات تولیدی خواهد شد.

^۱ moment unbalance

کاهش طول عمر

به دلیل تنش‌های زیاد ناشی از ارتعاش در نتیجه «نابالانسی»، قطعاتی مانند یاتاقان‌ها، پایه‌ها، روتورها، محفظه‌ها، سیستم تعلیق در نهایت فرسوده می‌شوند. به نوبه خود، این بر سلامت کلی تجهیزات تأثیر می‌گذارد و طول عمر آن را تا حد زیادی کاهش می‌دهد.

کاهش ایمنی تجهیز که سبب کاهش ایمنی محیط کار خواهد بود.

ارتعاشات بیش از حد می‌تواند چسبندگی اصطکاکی اتصالات گیره و پیچ را کاهش دهد و در نهایت باعث شل شدن قطعات شود. به طور مشابه، سایر موارد نیز شامل خراب شدن کلیدهای الکتریکی و شکستگی لوله‌ها و کابل‌ها در اتصالات است.

به بیان ساده، «نابالانسی» بر عملکرد استاندارد دستگاه تأثیر می‌گذارد و به نوبه خود، ایمنی عملکرد آن را کاهش می‌دهد و احتمال آسیب رساندن به کارکنان و دستگاه را افزایش می‌دهد.

لرزش زیاد و صداهای بلند و نامنظم باعث کاهش جذابیت تجهیزات می‌شود. و اینها زمانی که محصول در بازار به فروش می‌رسد تأثیر منفی بر روی آن می‌گذارد و در نتیجه فروش ناموفقی را به همراه خواهد داشت. از این رو، نیاز به بهبود توزیع جرم تجهیزات با انجام تعادل دینامیکی وجود دارد.

همانطور که در بخش 1-2 گفته شده است انواع مختلفی از نابالانسی وجود دارد و باید به درستی شناسایی شود تا یکباره مشکل برطرف شود. در چنین مواقعی، مهندس مورد اعتماد شما باید برای تشخیص نوع دقیق عدم تعادل فراخوانی شود. به عنوان مثال، اگر با یک موتور الکتریکی سر و کار دارید - احتمالاً ایده خوبی است که چرخش موتور الکتریکی را به عنوان سرویس خود در نظر بگیرید.

در فصل بعدی به روش‌های بالانس بدون توقف تجهیز خواهیم پرداخت.

فصل 2: روش های بالانس بدون توقف تجهیز

بالانس ماشینهای دوار به دو دسته کلی تقسیم میگردند. در دسته اول بالانس در کارخانه یا کارگاه بر روی یاتاقانهای صلب یا انعطاف پذیر است. این روند توسط سازنده انجام شده و ممکن است اجزای مختلف بطور جداگانه در ابتدا بالانس شده و در نهایت مجموعه با هم بالانس گردند. اگر اجزای مختلف به طور جداگانه به بخوبی قبل از نصب نهایی بالانس گردند در این صورت حتی روتورهای انعطافپذیر بزرگ (طویل) نیز ممکن است بخوبی در شرایط نصب نهایی بکار گرفته شوند. برای برخی دسته های خاص از انواع روتورها (نظیر روتور ژنراتورها و موتورهای بزرگ الکتریکی)، ممکن است بالانس روتور در شرایط خاص در یک مجموعه بالانس (نظیر بالانس در خلاء) لازم باشد. این نوع بالانس برای روتورهای منعطف بوده که بالای چند سرعت بحرانی بکار گرفته میشوند. این نوع پروسه بالانس غالباً بسیار گران و وقتگیر بوده و تعداد کارگاههای موجود برای این منظور نیز بسیار محدود میباشند.

در دسته دوم بالانس، بالانس در محل یا روی نشیمنگاه اصلی روتور صورت میگیرد. در بالانس در محل، روتور بر روی یاتاقانهای خود بالانس شده و ابزارهای لازم بر روی شفت، یاتاقان، پوسته و یا فونداسیون جهت مانیتورینگ وضعیت سیستم نصب میگردد. برای محاسبات بالانس در طی سالهای گذشته روشهای مختلفی بکار گرفته شده است. این روشها تابع نوع بالانس، نوع روتور و همچنین امکانات اندازه گیری بوده اند.

روشهای مختلف بالانس در صنعت با توجه به تنوع روتورهای صنعتی و محدودیتهای مختلف آنها در بالانس، روشهای مختلفی در طی سالهای طولانی برای این منظور ارائه گردیده است. مشخصات این روشها و مزایا و محدودیتهای آنها را می توان در منابع مختلف مشاهده نمود. در ادامه به بررسی برخی از روشهای متداول روشهای بالانس پرداخته می شود.

1-2) بالانس تک صفحه ای:

ساده ترین روش بالانس، بالانس تک صفحه های تک سرعت می باشد، در این روش یک وزنه آزمایش یا کالیبراسیون بر روی شفت نصب میگردد و ارتعاش روتور پس از نصب وزنه ثبت میگردد. تغییرات ارتعاشی به وزنه آزمایش تقسیم گردیده و مقدار ضریب تأثیر را میدهد. ضریب اثر بیانگر پاسخ روتور به وزنه آزمایش واحد در یک سرعت ثابت خواهد بود. نکته مهم آن است که مقدار ضریب اثر بردار بوده و دارای دامنه و زاویه فاز میباشد. زاویه فاز بیانگر فاز نسبی بین تابع نیرو و ارتعاش اندازه گرفته شده میباشد. در این حالت فرض میگردد که روتور خطی بوده و یک مقدار وزنه برحسب میزان ضریب اثر بر روی روتور نصب میگردد به این نوع بالانس گاهی نیز Balancing - Trim میگویند.



تصویر 1-2) دستگاه ستاپ دو صفحه ای با روش ضرایب اثر¹

مشکل عمده در این نوع بالانس این است که با وجود که ارتعاش نقطه خاصی از روتور کاهش محسوسی مییابد ولی ممکن است در سایر نقاط ارتعاش بالا باشد و همچنین ممکن است در سایر سرعتها روتور بالانس نباشد. از مزایای این روش این است که به سرعت در محل قابل بکارگیری بوده و پس از محاسبه ضریب اثر در بالانسهای بعدی دیگری نیازی به محاسبه ضریب اثر و اضافه کردن وزنه آزمایش نخواهد بود و به همین خاطر بدان گاهی One-Shot Method of Balancing میگویند.

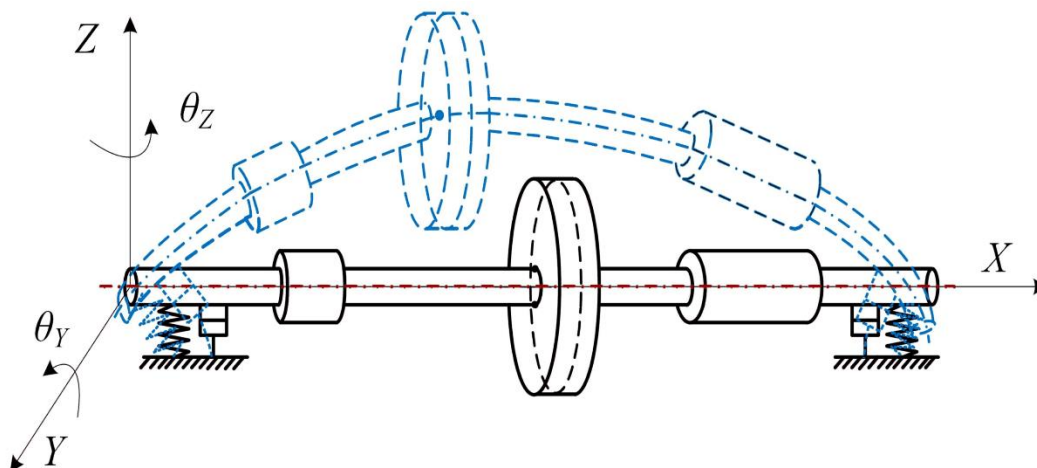
2-2) بالانس دو صفحه ای:

در بیشتر روتورها بالانس در یک صفحه کفایت نخواهد کرد. بکارگیری بالانس در یک نقطه یا صفحه ممکن است سبب افزایش ارتعاش در دیگر نقاط روتور گردد. در این شرایط باید دو صفحه جهت بالانس روتور توسط روش ضرایب اثر به کار گرفته شود. پدر بالانس درمحل امروزی که این روش را ابداع کرد Thearle میباشد. در این روش به دوبار نصب وزنه آزمایش جهت تعیین ضرایب اثر نیاز خواهد بود.

¹ Single-Plane Balancing by the Vector Method

3-2) بالانس مودال

بالانس مودال یک روش پیشرفته و دقیق برای بالانس کردن روتورهای انعطاف‌پذیر است که در شرایطی که روتورها بالای چندین سرعت بحرانی کار می‌کنند، مانند ژنراتورها، استفاده می‌شود. در این روش، شکل مدهای متناظر با سرعت‌های بحرانی روتورها از روش تئوری یا تجربی مشخص می‌شود.



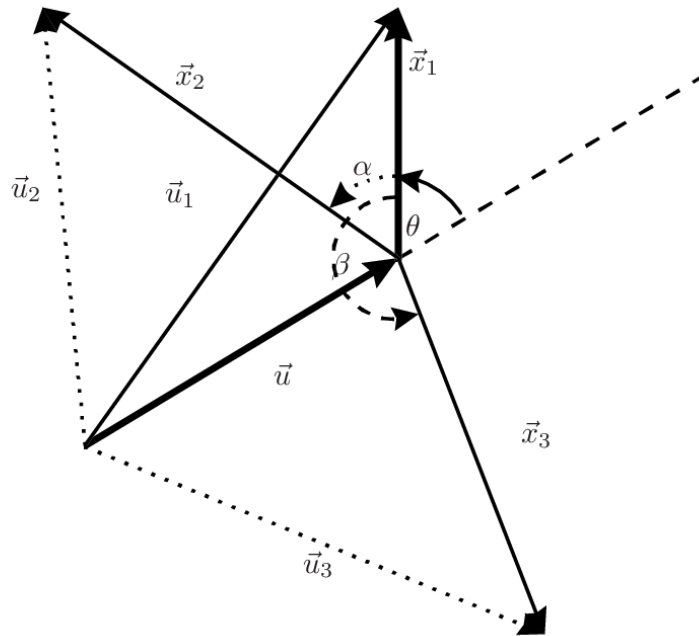
تصویر 2-2) بالانس مودال

در بالانس مودال، وزنه‌هایی که بر روتور قرار داده می‌شوند، با شکل مدهای متناظر با روتور مطابقت دارند. هر توزیع مودال برای بالانس یک مود در یک لحظه استفاده می‌شود. محاسبه وزنه‌های مودال توسط روش ضرائب اثر تعیین می‌شود که توسط Darlous.M ارائه شده است.

در این روش، با تعیین شکل مدهای متناظر با سرعت‌های بحرانی روتورها و محاسبه وزنه‌های مودال، امکان بالانس دقیق تر و بهبود عملکرد و کارایی روتورها فراهم می‌شود. این روش به دلیل دقت بالا و قابلیت اعمال تنظیمات دقیق برای بالانس، در صنایعی که از روتورهای انعطاف‌پذیر با سرعت‌های بحرانی استفاده می‌کنند، بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد.

2-4) روش بالانس سه وزنه آزمایشی¹

در بسیاری مواقع امکان اندازه گیری زاویه فاز به طور دقیق وجود ندارد. Blake روشی را به نام سه وزنه بالانس ابداع کرد. با بکارگیری یک وزنه آزمایش در سه موقعیت، محل نامیزانی شامل اندازه و موقعیت آن تعیین خواهد گردید.



تصویر 2-2) تصویر گرافیکی بالانس سه وزنه آزمایشی

این روش از دقت خوبی بخصوص در مواقعی که سیستم غیرخطی باشد برخوردار است. این روش محاسبه گرافیکی یا ترسیمی به کامپیوتر جهت محاسبات نیاز نخواهد داشت.

2-5) روش بالانس تریم کوپلینگ

بالانس تریم کوپلینگ در بسیاری از مواقع اتفاق میافتد که دو ماشین به طور مجزا به خوبی بالانس شده‌اند ولی پس از اتصال آنها توسط کوپلینگ ارتعاش بالا می‌رود. چون روتورهای دو ماشین در ابتدا خوب بالانس شده‌اند دیگر نیازی به بالانس مجدد مجموعه نخواهد بود. در روش بالانس کوپلینگ که توسط Winkler بیان گردید کوپلینگ به اندازه 180 درجه چرخانده می‌شود و از موقعیت جدید کوپلینگ و ارتعاش حاصله محل بهینه برای قراردادی کوپلینگ برای تریم بالانس استفاده می‌گردد.

¹ Three-Trial-Weight Method of Balancing

2-6) روش بالانس دو صفحه‌ای بدون زاویه فاز

در صنعت روتورهای مختلفی وجود دارند که نیاز به بالانس در دو صفحه یا بالانس دینامیکی دارند. اما به دلیل محدودیتهای اندازه گیری در محل سیگنال مرجع و یا سیگنال دور و همچنین قیمت نسبتاً بالای آنالیزهای موجود با قابلیت اندازه‌گیری مدور و دانه ارتعاش، بالانس آنها درست انجام نمیپذیرد.

روش بالانس تک صفحه‌ای بدون زاویه فاز یک روش شناخته شده بوده و در دوره‌های پایین قابل استفاده می‌باشد و این روش به بالانس دو صفحه‌ای تعمیم داده شده است. در این سمینار به مواردی از آن می‌پردازیم.

$$\begin{Bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{Bmatrix}$$

در رابطه فوق، Z_1, Z_2 بردارهای پاسخ، U_1, U_2 بردارهای نامیزانی در صفحات 1 و 2 و i, j نیز ضرایب اثر می‌باشند.

در روش بالانس بدون زاویه فاز، دامنه بردارهای Z_1 و Z_2 قابل اندازه گیری می‌باشند ولی زوایای فاز آنها در دسترس نمی‌باشند. حال برای محاسبه ضرایب اثر که اعضای آن نیز بردار می‌باشند لازم است تا وزنه‌های آزمایشی استفاده شوند.

همانند روش بالانس تک صفحه وزنه آزمایشی ثابتی انتخاب می‌گردد. این وزنه در سه موقعیت بر روی هر یک از صفحات بالانس نصب گردیده و دامنه ارتعاش در نقاط اندازه گیری ثبت می‌گردند.

$$Z_j^k - Z_j^0 = \alpha_{ji} W_k \quad (k=1,2,3; j=1,2)$$

سمت چپ معادله شامل دو بردار با دامنه مشخص اندازه گیری شده و زاویه فاز مجهول و سمت راست معادله شامل بردار نامشخص دامنه و فاز می‌باشد. حال بردارهای فوق ابتدا به اندازه زاویه نصب وزنه آزمایشی چرخانده و سپس به اندازه زاویه نامشخص بردار پاسخ اولیه دوران 180 درجه دوران داده و سپس در راستای بردار یک‌ه مثلاً n داده می‌شود. بردار حاصل را جهت بدست آوردن نامیزانی به اندازه تصویر میکنند حاصل جمع دورانهای فوق به شرح زیر خواهد بود:

$$Z_j^k \frac{(\bar{n} \bar{z}_j^0 \bar{w}_k)}{Z_j^k} + Z_j^0 W_k = \alpha_{ji} W_k \left(\frac{n z_j^0}{\bar{\alpha}_{ij}} \right)$$

در نهایت بردار نامیزانی به صورت زیر بدست خواهد آمد.

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Z_1^0 \\ Z_2^0 \end{Bmatrix}$$

7-2) روش بالانس بدون وزنه آزمایشی

در روتورهای خاص و برخی موتورها، امکان نصب وزنه آزمایشی وجود ندارد. نمونه این مسئله در بالانس ایمپلر کمپرسورها، توربینها و انواع توربوشارژرها و توربوآکسلندرهای می باشد. در عمل نیز حالت های زیادی پیش می آید که نصب وزنه های آزمایشی یا غیر ممکن و یا حساسیت بالا داشته و هزینه زیادی دربردارند نمونه آن بالانس روتورهای نیروگاهی می باشد.

برای یافتن راه حلی جهت بالانس این نوع روتورها از روشهای تخمین پارامترهای دینامیکی مجموعه ماشین از پاسخ ارتعاشی آنها در دور متغیر استفاده میگردد. در سالهای اخیر تلاش فراوانی برای تخمین پارامترهای دینامیکی روتورهای در دوره ای متغیر بکار گرفته شده است تا بتوان از تغییر دور سیستم و یا فرکانس های گذرا خواص سیستم را تخمین زد.

معادله حرکت ارتعاشی خطی یک روتور را میتوان به صورت زیر نشان داد.

$$M\ddot{Z} + C\dot{Z} + KZ = \hat{e}_u \omega^2 e^{j\omega t}$$

میتوان پاسخ سیستم را به صورت زیر بدست آورد:

$$Z = \frac{\omega^2}{k - \omega^2 M + ic\omega} \hat{e}_u$$

حال میتوان در دورهای مختلف بخصوص در توقف یا راهاندازی ماشین، پاسخ سیستم را به شکل زیر نشان داد.

$$m\omega_i^2 \hat{e}_{uk}^0 = Z_i (K_1 - \omega_i^2 M + jC_1^0 \omega_i)$$

i نیز تعداد سرعت هایی است که دامنه آنها در یک محدوده سرعت اندازه گیری شده است و k محدوده سرعت ماشین می باشد؛ همچنین سایر پارامترها عبارتند از M جرم موتور، k1 سختی روتور، C1 ضریب میرایی wi سرعت های مختلف و Zi دامنه در سرعت های مختلف می باشد.

حال اگر فرض گردد مثلاً برای یک مد روتور بالانس میگردد به شکل ماتریسی میتوان نوشت:

$$\begin{Bmatrix} \hat{e}_u \\ k \\ C \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} M\omega_1^2 & -Z_1 & -j\omega_1 \\ M\omega_2^2 & -Z_2 & -j\omega_2 \\ M\omega_3^2 & -Z_3 & -j\omega_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} -Z_1\omega_1^2 \\ -Z_2\omega_2^2 \\ -Z_3\omega_3^2 \end{Bmatrix}$$

حال با داشتن جرم روتور میتوان با اندازه گیری Z_i و ω_i مقادیر نامیرایی را در محدوده سرعت ω_1 - ω_2 - ω_3 و همچنین سختی محور و ضرایب میرایی آن را در محدوده سرعت بدست آورد.

2-7-1) آزمایش عملی روش بالانس بدون وزنه آزمایشی

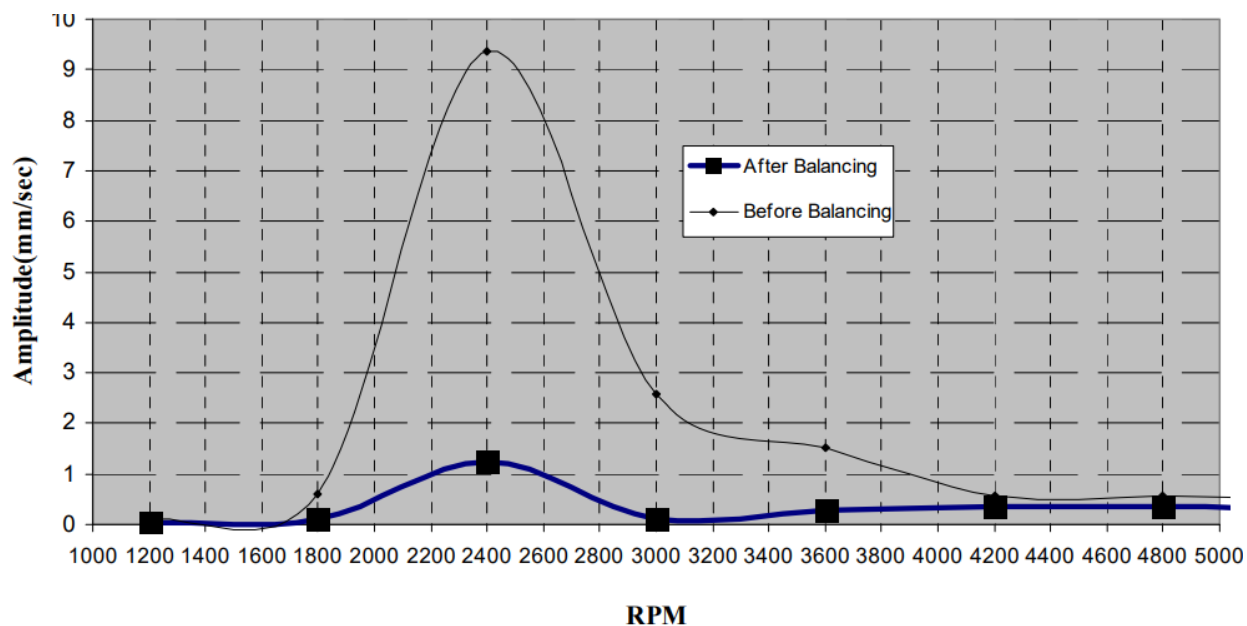
یکی از مقالات مرتبط با پروژه‌هشگاه نیرو، آزمایش عملی بر روی روتور بخش مکانیکی آن انجام شده است. به دلیل دور و حساسیت بالای ساخت و مونتاژ، امکان وزنه گذاری بر روی روتور وجود ندارد. مشخصات ارتعاشی روتور میکروتوربین شامل کمپرسور توربین شعاعی که به صورت Overhang میباشد به شرح زیر میباشد. جرم مجموعه حدود 10 کیلوگرم می باشد.



تصویر 2-3) نمای فیزیکی روتور

دور	دامنه ارتعاش	فاز ارتعاش
1800	0.6	58
2400	9.35	142
3000	2.58	120

جدول 2-1) اندازه گیری مقادیر مختلف



نمودار 1-2) نتایج بالانس در نمودارهای راه اندازی و توقف روتور در گذر از سرعت بحرانی اول

همانطور که از نمودار 1-2 مشخص می‌باشد وضعیت روتور در حالت بالانس بهتر می‌باشد و بهبود پیدا کرده است.

با استفاده از معادلات موجود، مقدار $eu = 0.0101$ خواهد بود که حال با داشتن جرم محاسبه شده در موقعیت تعیین شده، از محل مور نظر جرم برداشته شده و پس از سه بار تکرار نتایج ارتعاش نهایی به مقدار قابل قبول در مقایسه با مقدار توصیه شده استاندارد ISO برای این نوع روتورها کاهش یافته است.

در این فصل سعی شده است روش های مختلف برای بالانس یک مجموعه را شرح دهیم، در فصل آخر شرکت های مشغول در این حوزه را معرفی و به اهمیت آن میپردازیم.

فصل 3: شرکت های فعال در این حوزه

اگر بخواهیم که عملکرد سیستم های مکانیکی که در صنعت فعالیت را دارند بهبود دهیم، باید عوامل اصلی خرابی آنها را بشناسیم. غالب مشکلات سیستم های مکانیکی بسته به نوع کارکرد آن متفاوت است ولی در سیستم های دوار نابالانسی بسیار پراهمیت می باشد. اگر مبنای 30-70 را در نظر بگیریم یکی از موضوعاتی که باید تمرکز خوبی بر روی آن داشت شمرد.

شرکت های متفاوتی در این حوزه فعالیت دارند که در ادامه به مواردی از آن میپردازیم.

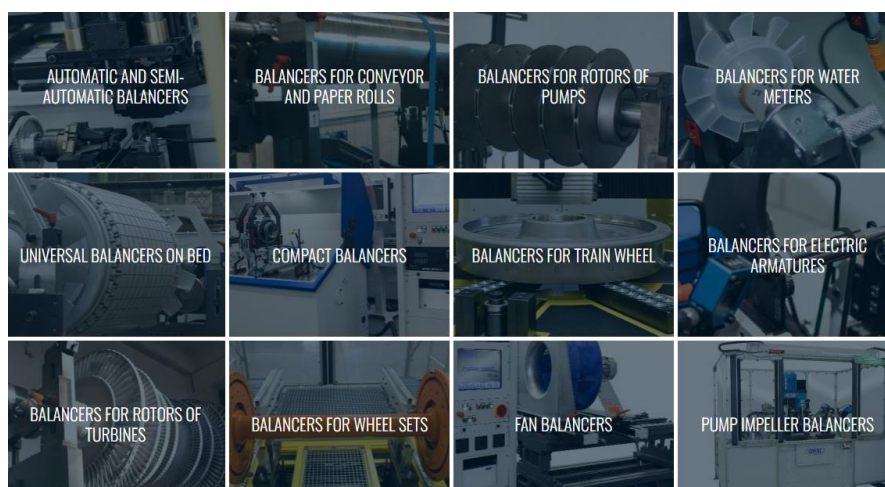
Schenck RoTec (آلمان):

حوزه فعالیت: این شرکت در زمینه بالانس تجهیزات مکانیکی و دینامیکی است. آنها به طور گسترده در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هواپیماسازی، و صنایع تولیدی فعالیت دارند.

تجهیزات بالانس: تجهیزات بالانس مکانیکی و دینامیکی ارائه می دهد که برای بالانس قطعات مختلف از جمله روتورها، شفت ها، و قطعات پیچیده دیگر استفاده می شوند.

Hines Industries (ایالات متحده):

این شرکت، شرکتی برجسته در زمینه بالانس تجهیزات مکانیکی و دینامیکی است که مقر آن در ایالات متحده آمریکا قرار دارد. این شرکت به عنوان یکی از پیشگامان در زمینه بالانس تجهیزات صنعتی شناخته می شود و فعالیت گسترده ای در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هواپیماسازی، و صنایع تولیدی دارد؛ در تصویر 1-3 خدمات مختلف این شرکت مشخص شده است .



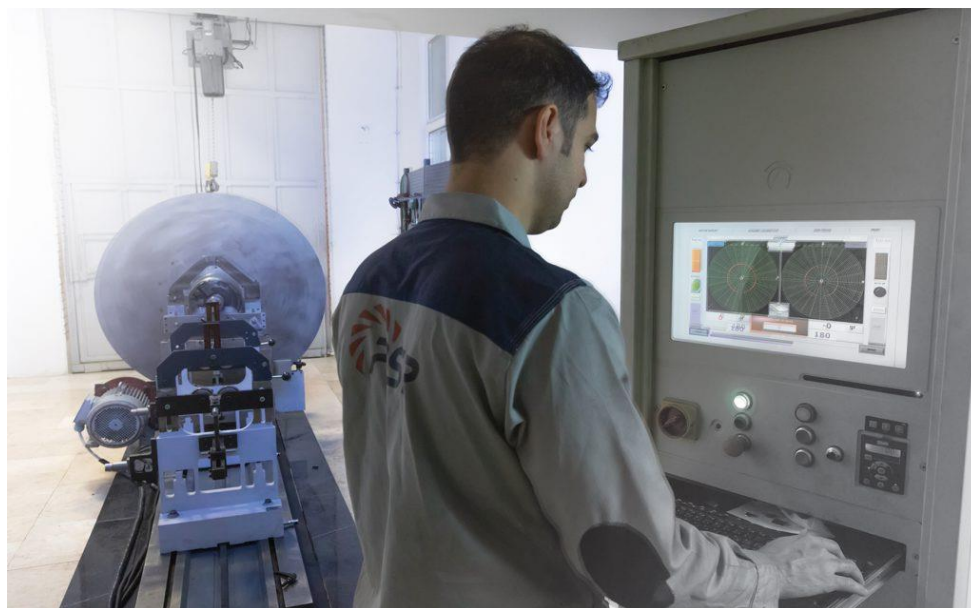
تصویر 1-3 (خدمات مختلف شرکت که در سایت آن در دسترس است.

انواع تجهیزات بالانس مکانیکی و دینامیکی برای بالانس قطعات صنعتی و موتورهای الکتریکی است. این شرکت با استفاده از تکنولوژی پیشرفته و تجربه بیش از دهه‌ها، به مشتریان خود راهکارهای بالانس مناسب و بهینه برای بهبود عملکرد و کارایی تجهیزات صنعتی ارائه می‌دهد.

با تمرکز بر کیفیت، دقت و نوآوری، به عنوان یکی از شرکت‌های پیشرو در زمینه بالانس تجهیزات مکانیکی در ایالات متحده شناخته شده است و به تلاش برای ارتقاء صنعت بالانس تجهیزات مکانیکی متعهد است.

شرکت ویستا پایش (ایران)

شرکت ویستا پایش خدمات بالانس را برای دامنه وسیعی از تجهیزات دوار ارائه می‌نماید؛ این شرکت که ایرانی می‌باشد؛ بالانس انواع روتورهای انعطاف پذیر، بالانس انواع روتورهای صلب و بالانس انواع ایمپلر فن ها و پمپ در سایزها و وزنهای مختلف را انجام می‌دهد.



تصویر 2-3) کارگاه های شرکت ویستا پایش

این شرکت خدمات بالانس در کارگاه انواع روتور تجهیزات دوار (الکترو موتور، پمپ ، فن ، ژنراتور ، کمپرسور...) با سرعتهای کارکردی مختلف (۱۰۰-۲۰۰۰۰ rpm) و از وزن ۵۰۰ گرم تا ۵۰۰۰ کیلوگرم و از قطر ۱ سانتی متر تا قطر های ۲۰۰ سانتی متر مطابق استاندارد ISO-1940 را در کمترین زمان و بالاترین دقت به صنایع مختلف ارائه می‌نماید.

- 1] <https://www.rokadegroup.com/blog/static-couple-and-dynamic--unbalance.php#:~:text=Unbalance%20is%20a%20result%20of,together%20generates%20a%20centrifugal%20force>
- 2] <https://www.mes.com.sg/2019/07/23/dynamic-balancing-what-is-it-/consequences-of-not-doing-it>
- 3] Goodman, T. P., "A least-squares method for computing balance corrections," Journal of Engineering for Industry
- 4] Gunter, E. J., Allaire, P. E. and Foiles, W. C., "Balancing a 1150 MW Turbine-generator" 7th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery, Nottingham, UK
- 5] <https://www.tieraonline.in/what-is-unbalance-in-rotating-machines-and-why-is-it-a-major-threat-to-the-durability-of-your-machine/>