مقاله

بررسی روش‌های بالانس ملخ‌های هوایی

امید مطهری فرد
کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک
دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه جامع امام حسین (ع)
kpomotahar@ ihu.ac.ir

سید علی موسوی*
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک
دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه جامع امام حسین (ع)
amousavi@ihu.ac.ir

محمود کفاش میرزارحیمی
مربی گروه مهندسی مکانیک
دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه ایوانکی
m.kaffash.r@gmail.com

علی اصغر خارستانی
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک
دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه جامع امام حسین (ع)
a.kharestany@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۰

چکیده

در این مقاله روش‌های بالانس ملخ‌های دو پره و سه پره هوایی ارائه شده است. به‌طورکلی هدف آشنایی با تئوری، نحوه انجام عملی و روش‌های رایج مورد استفاده در زمینه بالانس ملخ هوایی و به‌طور خاص بررسی روش‌های استاتیکی و دینامیکی موجود، جهت بالانس ملخ‌ها به خصوص ملخ‌های چوبی است. ابتدا به معرفی مقدماتی در مورد بالانس ملخ و توضیحاتی در مورد انواع ملخ، اجزاء رایج ملخ و ... پرداخته‌ایم، پس از آن مروری کوتاه بر تئوری‌های مقدماتی بالانس داریم و سپس به صورت مرحله به مرحله بالانس استاتیکی ملخ‌های ۲ و ۳ پره توضیح داده شده است. همچنین ابزارهای مورد نیاز جهت بالانس دینامیکی و مراحل استفاده از آنها معرفی شده‌اند.

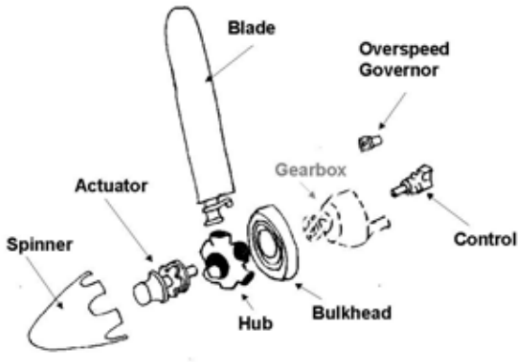
واژگان کلیدی: بالانس استاتیکی، بالانس دینامیکی، ملخ هوایی، نابالانسی استاتیکی، نابالانسی دینامیکی

۱. مقدمه

با پیشرفت فناوری و امکان دستیابی به سرعت‌های چرخشی بسیار بالا اهمیت بالانس کردن قطعات چرخان به شدت احساس می‌شود. در اغلب موارد بالانس نبودن سیستم سبب ایجاد لرزش‌های بیشتر از حد مجاز می‌شود. بنابراین دانش مربوط به روش‌های از بین بردن و یا کاستن این لرزش‌ها بسیار مهم و کاربردی است. دقیق‌ترین دستگاه‌های آنالیز طیفی و قوی‌ترین نرم‌افزارهای عیب‌یابی نیز به تنهایی توانایی پاسخ به مسائل ارتعاشی را ندارند. از این‌رو وجود افراد ماهر و باتجربه برای آنالیز داده‌های حاصل از دستگاه‌های اندازه‌گیری و نهایتا مشکلات موجود لازم و ضروری است.

بالانس یک مکانیسم شامل حذف نیروی اینرسی و کوپل اینرسی است. در بیشتر مکانیسم‌ها با اضافه کردن جرم‌های بالانس کننده مناسب می‌توانیم نیرو و کوپل اینرسی را تقلیل دهیم. ولی معمولا فراهم کردن وسیله‌ای که بتواند آنها را کاملا حذف کند در عمل ممکن نیست.

ملخ یا پروانه شامل چندین تیغه یا پره است که توسط مرکزی به نام هاب نگهداری می‌شود. هاب، پره‌ها را کنار هم نگه می‌دارد و ملخ را توسط شفت به گیربکس موتور متصل می‌کند. ملخ‌های مدرن در هواپیماهای توربوپراپ بزرگ دارای ۴ تا ۶ تیغه هستند. اجزای اصلی معمول که یک ملخ می‌تواند داشته باشد در شکل ۱ نشان داده شده است [۱].



شکل ۱. اجزای اصلی ملخ [۱]

همیشه سعی بر این است که تلرانس مورد استفاده در تولید تجهیزات دوار نزدیک‌ترین مقدار ممکن انتخاب شود، اما هزینه‌های تولید با افزایش این دقت، بسیار بالا می‌رود. به‌طورکلی تولید تجهیزات با دقت کمتر و سپس استفاده از روش‌های بالانس اقتصادی‌تر است. از تجهیزاتی که معمولا به این روش ساخته می‌شوند می‌توان میل‌لنگ‌ها، آرمیچرهای الکتریکی، توربو ماشین‌ها، غلطک‌های پرینتر، سانتریفیوژها، فلایویل و ... را نام برد. از عوامل رایجی که در طی تولید باعث ایجاد تلرانس می‌شود عبارتند از، خطاهای ماشین‌کاری، خطاهای مونتاژ، خطاهای ناشی از حرارت، ایجاد حفره‌ها در حین ریخته‌گری، غیرهمگن بودن مواد، و غیره. به دلیل این خطاها محور چرخش هندسی با محور اصلی که از مرکز جرم می‌گذرد یکسان نخواهد بود که این باعث ایجاد یک نیروی متغیر می‌شود که ارتعاشات سیستم را به دنبال دارد. به منظور حذف این ارتعاشات و ایجاد کارکرد مناسب سیستم از روش‌های بالانس استفاده می‌شود. نیروی ایجاد شده در اثر نابالانسی با مربع سرعت دورانی رابطه مستقیم دارد. از این‌رو انجام بالانس در تجهیزات با سرعت بالا نظیر ملخ‌ها امری حیاتی است [۲].

اعتقاد بر این است که نخستین مقاله در مورد بالانس در سال ۱۸۷۰ در کانادا توسط آقای مارتینسون چهار سال پس از اختراع دینام توسط زیمنس به ثبت رسیده است [۳]. در ابتدای قرن، فناوری بالانس توسط آکیموف در آمریکا و استودولا در سوئیس دگرگونی یافت؛ اما نه به آن اندازه که در سال ۱۹۰۷، مقاله دستگاه بالانس دو صفحه‌ای توسط لاوزک و دارمستاد ارائه شد، و پس از آن توسط شنک به شکل اصلاح شده‌ای ساخته و به صورت صنعتی به کار گرفته شد [۴].

در سال ۱۹۶۰ کار ارزیابی حالت نابالانسی روتورها آغاز شد و این امر منجر به ایجاد رهنمود VDI-۲۰۶۰ (انجمن مهندسین مکانیک آلمان) یعنی استانداردهای ارزیابی حالت نابالانسی روتورهای صلب چرخان گردید [۵]. برای درک بهتر فناوری بالانس (به ویژه بر اساس مبانی جهانی) ISO-۱۹۲۵ «فرهنگ لغات بالانس» کمک بزرگی است. این استاندارد تمام اصطلاحات استفاده شده در فناوری بالانس را تعریف می‌کند [۶]. در ISO-۲۹۵۳ «دستگاه‌های بالانس- تشریح و ارزیابی» مقدمه‌ای بر مشخصات کامل و ارزیابی دستگاه‌های بالانس آورده شده است [۷].

ISO-۵۴۰۶ «بالانس مکانیکی روتورهای انعطاف‌پذیر» شیوه بالانس روتورها را بر اساس ویژگی‌های آنها، به بالانس سرعت پایین و سرعت بالا طبقه‌بندی می‌کند [۸].

روش بالانس به‌طورکلی به دو صورت استاتیکی و دینامیکی انجام می‌شود. هیچ یک از این روش‌ها نمی‌تواند جایگزین دیگری شود چون هر یک از آنها برای اهداف مختلفی استفاده می‌شود.

۲. نابالانسی

عدم تعادل یا نابالانسی هنگامی اتفاق می‌افتد که محور اصلی جرم عضو در حال دوران که به آن محور اینرسی نیز گفته می‌شود، با محور دوران منطبق نیست. این عامل باعث ایجاد نیرو خارج از مرکز می‌شود که ارتعاشات را به دنبال دارد، هدف از بالانس کاهش این ارتعاشات ناخواسته است که باعث کاهش صدا و افزایش عمر سیستم می‌شود.

هنگامی‌که قسمتی از یک ماشین در حال دوران است، هر یک از جرم‌های در حال دوران یک نیروی گریز از مرکز

ایجاد می‌کنند، اگر برآیند بردار همه این نیروها صفر شود، هیچ نیروی دینامیکی به بیرینگ وارد نمی‌شود و روتور به صورت کامل بالانس است، اما اگر برآیند این نیروها صفر نباشد یک نیروی گریز از مرکز باقی می‌ماند که باعث ایجاد ارتعاش می‌شود. در شکل ۲ بردارهای نیرو در حالت بالانس و نابالانس نشان داده شده است [۹].

الف- یک بردار خنثی نشده باعث عدم توازن می‌شود (نابالانس)

ب- همه بردارها همدیگر را خنثی می‌کنند (بالانس)

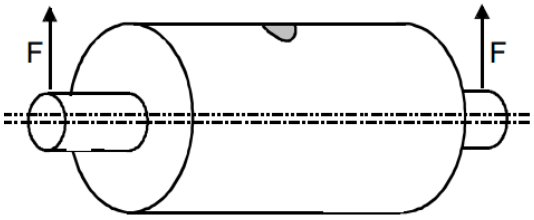
شکل ۲. بردارهای نیرو در حالت بالانس و نابالانس [۹]

دلیل نابالانسی، جرم دوار خارج از محور دوران است، نابالانسی عبارت است از حاصل ضرب این جرم در فاصله از محور دوران، به عنوان مثال میلی‌متر در گرم می‌تواند یک واحد برای نابالانسی باشد.

با توجه به اینکه نابالانسی با افزایش سرعت دورانی افزایش می‌یابد و شدت ارتعاش آن بیشتر می‌گردد؛ در نتیجه یکی از راه‌های تشخیص نابالانسی ارتعاشات مربوط به فرکانس 1x روتور است در غیر این ممکن است که ارتعاشات ناشی از دیگر موارد یا اقلام سیستم مانند ناهم‌راستایی، خرابی یاتاقان‌ها و .... باشد. لازم به ذکر است که نابالانسی یک کمیت برداری است، بنابراین جهت بردار نیز برای تعریف آن مورد نیاز است که در دستگاه قطبی مختصات نقطه نابالانسی مشخص می‌شود. نابالانسی به انواع زیر تقسیم می‌شود:

۲-۱. نابالانسی استاتیکی

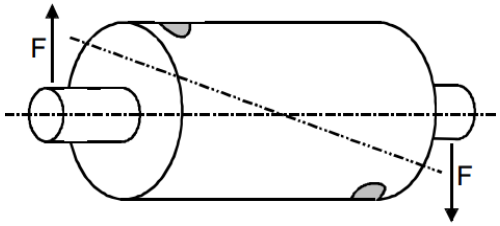
به حالتی گفته می‌شود که محور جرم بر محور دوران منطبق نباشد و موازی با محور دوران باشد. این نوع نابالانسی را به عنوان نابالانسی صفحه‌ای نیز می‌شناسیم که در شکل ۳ نشان داده شده است [۹]. در این حالت نیروهای یکسانی به یاتاقان‌های دو طرف وارد می‌شود.



شکل ۳. نابالانسی استاتیکی [۹]

۲-۲. نابالانسی کوپل

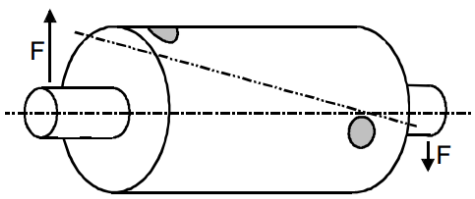
به حالتی گفته می‌شود که محور جرم منطبق بر محور دوران نیست و آن را در مرکز قطع می‌کند. بردارهای نیروی ایجاد شده در این حالت بر روی یاتاقان‌های دو طرف برابر اما در خلاف جهت هم هستند که در شکل ۴ آمده است.



شکل ۴. نابالانسی کوپل [۹]

۲-۳. نابالانسی دینامیکی

در این حالت محور جرم بر محور دوران منطبق نیست و موازی با محور دوران نیز نبوده و آن را در مرکز قطع نمی‌کند. این حالت را نابالانسی دو صفحه‌ای نیز می‌گویند، در واقع نابالانسی دینامیکی ترکیب نابالانسی استاتیکی و کوپل است و همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نیروهای وارد بر دو یاتاقان یکسان نیستند.



شکل ۵. نابالانسی دینامیکی [۹]

۳. استاندارد ISO۱۹٤۰

استاندارد ۱۹۴۰ یک مرجع شناخته شده برای انتخاب کیفیت بالانس روتور صلب و میزان نابالانسی پسماند محسوب می‌شود که با استانداردهای انگلیسی و آلمانی نیز منطبق است. مراحل استفاده از استاندارد در ذیل آمده است [۱۰]:

۱- تعیین کیفیت بالانس (G) بر اساس نوع روتور مطابق جدول شماره ۱.

۲- استفاده از شکل شماره ۶ جهت تعیین مقدار نابالانسی پسماند مجاز (با توجه به سرعت روتور روی محور افقی به صورت عمودی رو به بالا تا خط G مربوطه حرکت نموده و سپس به صورت افقی به سمت چپ تا محور e_{per} حرکت نموده و عدد آن را به دست می‌آوریم سپس e_{per} را در وزن روتور برای یافتن نابالانسی پسماند مجاز (U_{per}) ضرب می‌کنیم).

۳- تخصیص U_{per} به صفحات تصحیح بالانس بر اساس شکل روتور.

انجام گام ۱ به سادگی نیازمند آن است که کاربر، نوع روتوری را که نیازمند بالانس است را مشخص کند. گام ۲ نیز با استفاده از گراف‌های آورده شده در شکل ۶ انجام می‌شود. اما نکته اساسی در انجام گام ۳ بوده که دارای فهم بسیار پیچیده‌ای است.

در جدول ۱ متداول‌ترین انواع روتورها با هم در گروه‌هایی قرار گرفته‌اند و درجه کیفیت‌های گوناگون به آنها اختصاص داده شده است. این طبقه‌بندی پیشنهادهایی که تاکنون بر مبنای تجربه کسب شده است را نشان می‌دهد. اگر اندازه‌های پیشنهادی مناسب باشند، به احتمال زیاد عملکرد بدون ارتعاش خواهد بود.

۳-۱. درجه کیفیت بالانس

جدول شماره ۱، انواع کیفیت‌های بالانس را برای انواع روتورهای مختلف نشان می‌دهد. عدد G محصول عدم تعادل مخصوص و سرعت زاویه‌ای روتور در بیشترین سرعت عملکرد و نیز برای روتورهای از همان نوع ثابت است.

$$G = e \times \omega = constant \qquad (۱)$$

این موضوع بر این اساس است که روتورهای از لحاظ هندسی متشابه و با سرعت یکسان، تنش‌های مشابهی بر روی روتور و یاتاقان‌ها دارند. درجه کیفیت بالانس با یک ضریب ۲/۵ از هم جدا می‌شوند. اعداد G با مقادیر متوسط، جهت استفاده در ملزومات خاصی به کار می‌روند.

تعیین نابالانسی پسماند مجاز

$$U_{\text{per}} = e_{\text{per}} \times m(\text{rotor mass}) \qquad (۲)$$

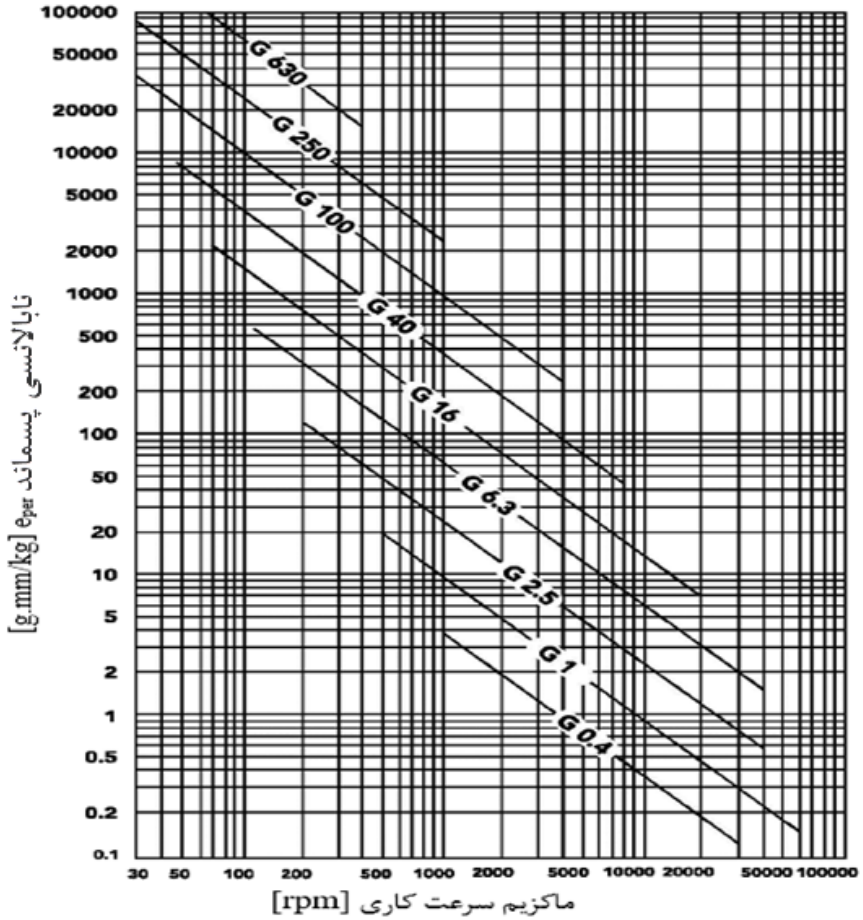
عدم تعادل باقیمانده مجاز تابعی از عدد G، وزن روتور و بیشترین سرعت چرخش است. به جای استفاده از گراف جهت یافتن عدم تعادل مخصوص در ازای عدد G و دور روتور در دقیقه و ضرب آن در وزن روتور، U_{per} استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$U_{\text{per}}(\text{g.mm}) = 9549 \times G \times \frac{W}{N}(\text{W in kg}) \qquad (۳)$$

که در آن G درجه کیفیت بالانس، W وزن روتور و N بیشترین سرعت عملکردی است.

جدول ۱. مرتبه کیفیت بالانس برای گروه‌های مختلف روتور [۴]

درجه کیفیت بالانس	$e_{\mathrm{per}} \times \omega$ mm/s	انواع روتور- نمونه‌های عمومی
G۴۰۰۰	۴۰۰۰	میل‌لنگ با نیروی محرک موتورهای دیزلی دریایی و با حرکت‌های آهسته که به صورت صلب نصب شده و تعداد سیلندرهای آن فرد است.
G۱۶۰۰	۱۶۰۰	میل‌لنگ با نیروی محرک موتورهای دو زمانه که به صورت صلب نصب شده است.
G۶۳۰	۶۳۰	میل‌لنگ با نیروی محرک موتورهای چهار زمانه که به صورت صلب نصب نشده است، میل‌لنگ با نیروی محرک موتورهای دیزلی دریایی که به صورت الاستیک نصب شده است.
G۲۵۰	۲۵۰	میل‌لنگ با نیروی محرک موتورهای دیزلی چهار سیلندر که با حرکت‌های سریع که به صورت الاستیک نصب شده است.
G۱۰۰	۱۰۰	میل‌لنگ با نیروی محرک موتورها دیزلی سریع با ۶ سیلندر یا بیشتر، موتورهای کامل (بنزینی یا دیزلی) برای اتومبیل‌ها، کامیون‌ها و لوکوموتیوها
G۴۰	۴۰	چرخ‌های اتومبیل، طوقه‌های چرخ، قطعات چرخ، شفت‌های متحرک میل‌لنگ با نیروی محرک موتورهای (بنزینی) یا (دیزلی) شش سیلندر یا بیشتر با حرکت‌های سریع که به‌طور الاستیک نصب شده‌اند، میل‌لنگ با نیروی محرک موتورهای اتومبیل، کامیون و لوکوموتیو
G۱۶	۱۶	شفت‌های انتقال قدرت (شفت ملخ‌ها، میل گاردان‌ها) با شرایط ویژه، اجزاء ماشین‌های سنگ‌شکن، اجزاء ماشین‌آلات کشاورزی، قسمت‌های مجزای موتورهای (بنزینی یا دیزلی) برای اتومبیل‌ها، کامیون‌ها و لوکوموتیوها، میل‌لنگ با نیروی محرک موتورهای شش سیلندر یا بیشتر با شرایط ویژه
G۶/۳	۶/۳	اجزاء دستگاه فرآوری نباتات، چرخ‌دنده‌های بزرگ توربین دریایی (خدمات تجاری)، لوله-های گریز از مرکز، غلطک‌های ماشین‌های کاغذسازی، غلطک‌های چاپ، دمنده‌ها، روتورهای مونتاژ شده توربین گازی هواپیما، چرخ طیارها، پمپ‌های پروانه‌ای، ماشین ابزار و قسمت‌های عمومی ماشین‌آلات، آرمیچرهای بزرگ و متوسط (موتورهای الکتریکی با طول شفت بیشتر از ۸۰mm) بدون شرایط ویژه، آرمیچرهای الکتریکی کوچک، بیشتر جرم‌های تولید شده در کاربردهایی که به ارتعاش حساس نیستند و یا اجزایی که به صورت عایق نسبت به ارتعاش نصب شده‌اند، قطعات مجزای موتورها در شرایط ویژه.
G۲/۵	۲/۵	توربین‌های بخار و گاز شامل توربین‌های بزرگ دریایی، روتور توربو ژنراتورهای صلب، دیسک‌ها و درام‌های حافظه کامپیوتر، توربو کمپرسورها، قوای محرکه ماشین ابزارها، آرمیچرهای الکتریکی بزرگ و متوسط با شرایط ویژه، آرمیچرهای کوچک که در یک یا هر دو شرط مشخص شده برای درجه کیفیت بالانس G۶/۳ قرار نمی‌گیرند، پمپ‌هایی با سیستم محرکه توربین
G۱	۱	نیروی محرک ضبط صوت‌ها و گرامافون‌ها، نیروی محرک دستگاه سنگ‌زنی، آرمیچرهای الکتریکی کوچک یا شرایط ویژه، اسپیندل‌ها، دیسک‌ها و آرمیچرهای دستگاه سنگ، ژیروسکوپ‌ها



شکل ۶. نابالانسی پسماند مجاز برحسب اینچ [۴]

– تخصیص U_{per} به صفحات تصحیح کننده:

همان‌طورکه می‌دانیم U_{per} عدم تعادل باقیمانده مجاز کل است و باید به صفحات تصحیح کننده بالانسی که بر اساس ابعاد و شکل روتور مورد استفاده قرار می‌گیرند، اختصاص یابد. برای روتورهایی که در یک صفحه بالانس می‌شوند، تمامی مقدار U_{per} به همان صفحه اعمال می‌شود.

برای روتورهایی که در دو صفحه بالانس می‌شوند U_{per} باید به هر یک از صفحات بر اساس شکل و ابعاد روتور اختصاص یابد.

٤. واژگان بالانس

– **مرکز ثقل** نقطه‌ای است در بدنه روتور که برآیند وزن تمامی اجزا در تمامی جهات است.

– **صفحات تصحیح:** صفحه عمود بر محور شفت روتور که در آنها تصحیحات لازم جهت عدم تعادل اعمال می‌شود.

– **سرعت بحرانی:** سرعتی که در آن پدیده رزونانس در سیستم اتفاق می‌افتد. رزنانس می‌تواند از یاتاقان‌گردها یا انعطاف‌پذیری روتور باشد.

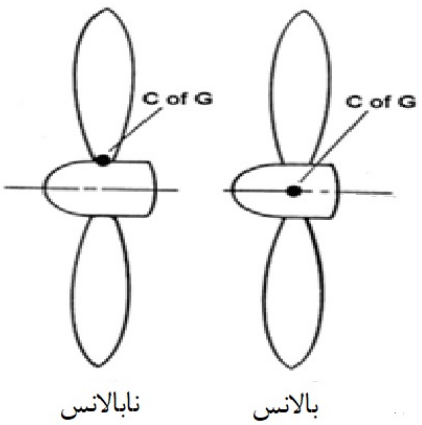
– **روتور صلب:** بیشتر روتورها به روشی ساخته می‌شوند که وضعیت عدم بالانس آنها تا سرعت کاری روتور زیاد تغییر نکند و یا اینکه به مقدار ناچیزی تغییر کند. این روتورها به عنوان روتورهای صلب شناخته می‌شوند. این بدان معناست که عدم بالانس روتور می‌تواند به عنوان یک مقدار ثابت بدون درنظر گرفتن سرعت دورانی مشخص بیان شود. این‌گونه روتورها می‌توانند در هر سرعت دورانی دلخواه تا سرعت عملکردی‌شان بالانس شوند.

– **روتورهای انعطاف‌پذیر:** روتوری که به خاطر انعطاف الاستیکی، تعریف روتور صلب را ارضاء نمی‌کند.

۵. بالانس استاتیکی ملخ

یک ملخ بالانس شده می‌تواند با کاهش ارتعاشات باعث کاهش فرسایش و افزایش طول عمر هواپیما شود و از شکست‌های زود هنگام قطعات جلوگیری کند. امروزه بالانسرهای مختلف برای انواع ملخ با توجه به نوع و سایز آنها وجود دارد، اما مراحل و نحوه استفاده از تمام آنها یکسان است.

هنگامی‌که توزیع وزن حول محور پروانه برابر است، پروانه در هر موقعیتی که بر روی استند تست بالانس استاتیکی قرار بگیرد ثابت می‌ماند، در این صورت گفته می‌شود که ملخ تعادل استاتیکی دارد. در حالت تعادل استاتیکی مرکز جرم مجموعه ملخ بر روی محور دوران قرار می‌گیرد که در شکل۷ قابل مشاهده است.



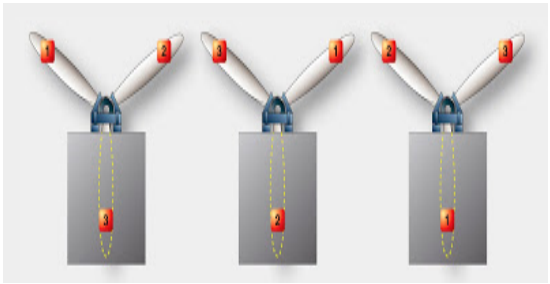
شکل ۷. نابالانسی استاتیکی

۵-۱. مراحل بالانس استاتیکی ملخ سه پره

کلیت بررسی بالانس ملخ‌های سه پره مطابق شکل ۸ است، در این ملخ‌ها هر بار یکی از پره‌ها را در موقعیت عمودی رو به پایین قرار می‌دهیم. درصورتی‌که ملخ بالانس باشد باید در موقعیت خود ثابت بماند. دو روش جهت بالانس پره‌ها وجود دارد.

روش اول برداشتن ماده (تراشیدن) از روی پره‌ی سنگین‌تر تا زمانی که ملخ بر روی بالانسر به حالت افقی باقی بماند، و روش دوم اضافه کردن جرم به طرف سبک‌تر ملخ. در حالت برداشتن ماده مقدار ماده تراشیده شده معمولا بسیار اندک است. از انواع سمباده برای این منظور می‌توان استفاده کرد. پس از سنباده، خاک اره باقی مانده را قبل از بررسی مجدد پاک‌کنید.

انتخاب اینکه از جرم ملخ کم کنیم یا به جرم آن اضافه کنیم بستگی به جرم ملخ دارد که باید از یک مقدار استاندارد کمتر باشد. در مورد ملخ‌های چوبی معمولا اضافه کردن جرم جهت بالانس می‌تواند مناسب‌تر باشد. برای این منظور درصورتی‌که میزان اضافه وزن یک طرف مقدار قابل توجهی نباشد، به خصوص برای ملخ‌های با سایز کوچک می‌توان از ژل CA[1] و اسپری کلیر استفاده کرد.



شکل ۸. موقعیت‌های مورد بررسی در بالانس ملخ سه پره

در فرایند بررسی بالانس استاتیکی باید همه پره‌ها دارای زاویه‌ای یکسان باشند. پس از بررسی حالت‌های ذکر شده برای بالانس در صورت نیاز موقعیت‌های میانی نیز بررسی می‌شوند.

درصورتی‌که ملخ بالانس نباشد مطابق شکل ۹ سنگین‌ترین پره در پایین‌ترین موقعیت و سبک‌ترین پره در بالاترین موقعیت قرار می‌گیرد. بهتر است پره‌ها را به‌منظور جلوگیری از اشتباه نام‌گذاری کنیم.

شکل ۹. موقعیت قرارگیری پره‌ها در ملخ نابالانس سه پره

ابتدا پره با وزن متوسط را با ملخ سنگین بالانس می‌کنیم، پس از بالانس باید ملخ سبک در موقعیت عمودی ثابت بماند. که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.

شکل ۱۰. پس از بالانس کردن پره متوسط و سنگین

در مرحله‌ی بعد پره سبک را با یکی از ملخ‌های سنگین یا متوسط که حالا هر دو بالانس هستند بالانس می‌کنیم.

بهتر است عمل اضافه کردن یا برداشتن جرم از روی هاب انجام شود زیرا هاب حساسیت کمتری دارد و امکان آسیب دیدن آن کمتر است. محل اضافه کردن جرم هرچه به مرکز هاب نزدیک‌تر باشد نیاز به جرم بیشتری است.

پس‌از انجام مراحل بالا و بالانس شدن ملخ در حالت افقی لازم است که تعادل ملخ در زوایای دیگر نیز مانند شکل ۱۱ بررسی شود.

شکل ۱۱. بررسی تعادل ملخ در زوایای دیگر

۵-۲. بالانس هاب

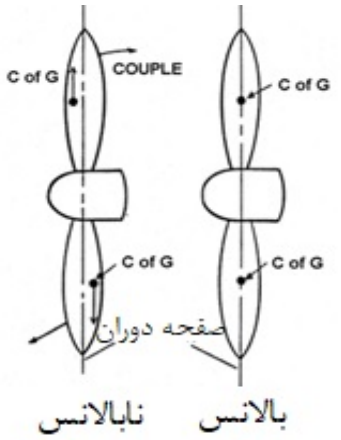
در گام اول همیشه سعی می‌شود که تغییرات بر روی هاب انجام گیرد تا ملخ بالانس شود و نیاز به تغییر در ملخ نباشد. درصورتی‌که میزان وزن یکی از پره‌ها خیلی بیشتر از پره دیگر باشد، استفاده از ژل نمی‌تواند کارایی کافی را داشته باشد، در این موارد نیاز به سوراخ کردن هاب و اضافه کردن جرم (معمولا فلزی) است. معمولا در ملخ‌های با سایز بزرگ‌تر سازنده حفره‌هایی جهت انجام بالانس هاب روی آن قرار داده است که در شکل۱۲ نمونه‌ای از این حفره‌ها را مشاهده می‌کنید. درصورتی‌که مکان این حفره‌ها مناسب نباشد می‌توان با دریل حفره جدیدی ایجاد کرد و جرم اضافه (معمولا مهره‌های فلزی) که بهتر است به‌صورت یک تکه باشد را درون آن قرار داد.

شکل ۱۲. حفره‌هایی جهت انجام بالانس هاب توسط سازنده قرار داده شده

٦. بالانس دینامیکی

گاهی انجام بالانس استاتیکی کافی نیست و همچنان ملخ دارای ارتعاشات قابل توجهی است.

ملخ بالانس استاتیکی شده ممکن است به دلیل عدم توزیع یکسان جرم حول محور مانند شکل ۱۳ دارای ارتعاشاتی باشد. ملخ هنگامی بالانس دینامیکی شده است که مرکز جرم پره‌ها در صفحه‌ی دوران قرار بگیرند.



شکل ۱۳. نابالانسی دینامیکی به دلیل در یک صفحه نبودن مرکز جرم پره‌ها

بالانس دینامیکی توسط کیت‌های بررسی بالانس دینامیکی انجام می‌شود. برخی هواپیماها خود دارای سیستم سخت‌افزاری جهت این کار هستند و در دیگر هواپیماها نیاز به نصب چند حسگر و ... جهت شروع بالانس دینامیکی است. بالانس مجموعه‌ی پیشرانه می‌تواند باعث کاهش اساسی ارتعاشات و صداهای منتقل شده به کابین شود و از آسیب دیدن دیگر اجزای هواپیما و موتور جلوگیری کند. نابالانسی دینامیکی می‌تواند به صورت نابالانسی جرمی یا ایرودینامیکی باشد. بالانس دینامیکی تنها ارتعاشات ناشی از نابالانسی جرمی در عضو بیرونی سیستم پیشران (ملخ) را کاهش می‌دهد و تأثیری در سطح ارتعاشات موتور یا بدنه هواپیما که ممکن است در وضعیت مطلوب مکانیکی باشد ندارد.

همه سیستم‌های بالانس دینامیکی اساس کارکرد یکسانی دارند. همه این سیستم‌ها باید موارد زیر را همراه داشته باشند [۱۱]:

۱- ابزاری جهت اندازه‌گیری سطح ارتعاشات
۲- ابزاری جهت اندازه‌گیری عامل زاویه‌ای ارتعاشات
۳- ابزاری جهت تخمین جرم لازم جهت کاهش ارتعاشات سیستم

روش انجام کار در سیستم‌های الکتریکی و دستگاه‌های بالانس مختلف متفاوت است که در دستورالعمل آنها ذکر می‌شود [۱۲]. پس‌از اندازه‌گیری دامنه ارتعاشات سیستم موتور و ملخ برحسب اینچ بر ثانیه (ips)، با توجه به اینکه

دامنه ارتعاشات در کدام محدوده است مطابق جدول ۲ عمل می‌شود.

٦-١. بالانس تک صفحه‌ای و دو صفحه‌ای

انتخاب بالانس در یک یا دو صفحه‌ای به دو عامل اصلی بستگی دارد، عامل اول نسبت طول به قطر روتور است. عامل دیگر سرعت دوران است. جدول ۳ محدوده تقریبی هر یک از این دو نوع بالانس را مشخص می‌کند [۱۳]. همان‌طورکه مشخص است برای حالت تک صفحه‌ای برای بالانس به یک جرم و برای حالت دو صفحه‌ای به دو جرم نیاز است.

۷. بالانس تک صفحه‌ای

بالانس تک صفحه‌ای کاربرد بسیار زیادی در صنعت دارد و اغلب سعی بر آن است که با ساده‌سازی‌های اجزای موجود بر قطعات آنها را به صورت تک صفحه‌ای بالانس نمود.

۷-۱. محاسبه حداقل جرم پسماند در بالانس تک صفحه‌ای

برای محاسبه جرم در صفحه‌ی داده شده رویه زیر برای تک صفحه‌ی بالانس انجام می‌شود.

۱- محاسبه $e_{\text{per}} = G/\omega$

۲- محاسبه

$$U_{\text{per}} = 1000 \times e_{\text{per}} M(\text{g.mm})$$

که ضریب ۱۰۰۰ برای تبدیل کیلوگرم به گرم است.

۳- برای بالانس تک صفحه‌ای جرم اصلاح بر حسب گرم به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{جرم اصلاح } m_1 = \frac{U_{\text{per}}}{R} \qquad (۴)$$

R: شعاع افزودن جرم تصحیح است.

به عنوان نمونه یک روتور دراز و باریک به وزن ۲۵ کیلوگرم در سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه کار می‌کند. جرم اصلاح آن در شعاع ۱۵۰ میلی‌متر برای درجه بالانس ۲/۵ میلی‌متر بر ثانیه برابر:

$$\omega = 2\pi \times \frac{1500}{60} = 157 \text{rad/sec}$$

$$e_{\text{per}} = \frac{2.5}{157} = 0.01592 \qquad (۵)$$

$$U_{\text{per}} = 1000 \times 0.01592 \times 25 = 398 \text{g.mm}$$

$$m_1 = \frac{398}{150} = 2.65 \text{g}$$

۷-۲. بالانس تک صفحه‌ای به روش برداری[۲]

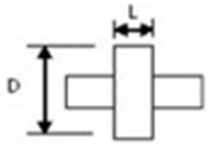
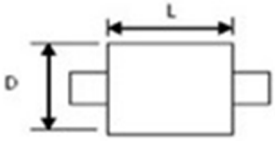
ساده‌ترین روش بالانس، بالانس تک صفحه‌ای تک سرعته است، در این روش یک وزنه آزمایش یا کالیبراسیون بر روی شفت نصب می‌گردد و ارتعاش روتور پس از نصب وزنه ثبت می‌گردد. تغییرات ارتعاشی بـه وزنه آزمایش تقسیم گردیده و مقدار ضریب تأثیر را تغییر می‌دهد. ضریب اثر بیانگر پاسخ روتور به وزنه آزمایش واحد در یک سرعت ثابت خواهد بود. نکته مهم آن است که ضریب اثر یک بردار بوده و دارای دامنه و زاویه فاز است. زاویه فاز بیانگر فاز نسبی بین تابع نیرو و ارتعاش اندازه گرفته شده است.

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 Trim Balancing می‌گویند.

جدول ۲. محدوده ارتعاشات گزارش شده و اقدام مورد نیاز [۱۲]

اقدام مورد نیاز	وضعیت	دامنه ارتعاشات (ips)
لازم است ملخ جدا و بالانس استاتیکی انجام شود.	خطرناک	≥۱/۲۵
عملکرد در این مقدار ارتعاشات می‌تواند باعث آسیب شود، ملخ می‌تواند به‌طور دینامیکی بالانس شود اما نیاز به جرم اصلاحی زیادی دارد.	خیلی نامناسب	≥۱
کارکرد طولانی در این حالت می‌تواند باعث فرسودگی شود، پروانه نیاز به بالانس دینامیکی دارد.	نامناسب	≥۰/۵
بالانس دینامیکی راحتی مسافران را افزایش می‌دهد.	کمی نامناسب	≥۰/۲۵
حداکثر مقدار مجاز برای ارتعاشات پس از بالانس دینامیکی است.	نسبتاً خوب	≥۰/۱۵
ارتعاشات کمتر از این مقدار توسط خلبان و مسافران احساس نمی‌شود.	عالی	≥۰/۰۷

جدول۳. انتخاب صفحه مناسب بالانس [۱۳]

روتور	نسبت L/D	محدوده سرعت (RPM)	
		تک صفحه ای	دو صفحه ای
	Less than 0.5	0 - 1000	Above 1000
	More than 0.5	0 - 500	Above 500

مشکل عمده در این نوع بالانس این است که با وجود اینکه 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 به‌کارگیری بوده و پس از محاسبه ضریب اثر در بالانس‌های بعدی دیگر نیازی به محاسبه ضریب اثر و اضافه کردن وزنه آزمایش نخواهد بود و به همین دلیل گاهی Method of One-Shot Balancing نیز می‌گویند.

نابالانسی جرم[۳] به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست، از موقعیت زاویه‌ای نقطه پیک ارتعاشات به منظور تشخیص مکان نابالانسی استفاده می‌شود. در حل مسائل بالانس دو مورد باید مشخص شود:

۱- مقدار جرم مورد نیاز

۲- زاویه مناسب جهت افزودن جرم

برای تعیین میزان جرم آزمایشی معمولا ۱۰ درصد جرم روتور برای سرعت کمتر از ۳۰۰۰ دور در دقیقه و ۵ درصد برای روتورهای با سرعت بیش از ۳۰۰۰ دور در دقیقه را به عنوان جرم آزمایشی اولیه درنظر می‌گیرند، برخی روابط تجربی نیز بدین منظور وجود دارد که یکی از آنها در زیر ارائه شده است:

$$W_T = 56375.5 \frac{W}{N^2 r} \qquad (۶)$$

که در آن:

$W_T =$ وزن جرم آزمایش

$r = (in)$ خارج از مرکزیت جرم آزمایش

$W = (lb)$ وزن استاتیکی روتور

$N = (RPM)$ سرعت روتور

هدف از جرم آزمایشی ایجاد یک تغییر در دامنه و فاز ارتعاشات روتور است که در محاسبات بالانس مورد استفاده قرار گیرد.

۷-۳. بالانس تک صفحه‌ای با استفاده از مؤلفه‌های استاتیکی و دینامیکی

این روش همانند روش بالانس تک صفحه‌ای با استفاده از روش برداری است، با این تفاوت که اندازه‌گیری ارتعاشی در دو انتهای شفت صورت می‌گیرد. ارتعاش ثبت شده در دو انتها به صورت برداری جمع و تفریق شده و مؤلفه‌های استاتیکی و یا دینامیکی محاسبه می‌گردند. اگر مقدار و یا مؤلفه‌های خارج از فاز[۴] بزرگ باشند، آنگاه دو وزنه با اختلاف فاز درجه ۱۸۰ نصب می‌گردند. در واقع این یک روش ساده شده مودال با استفاده از روش ضرایب اثر است.

۷-٤. بالانس تک صفحه‌ای با استفاده از روش ضریب اثر و استفاده از کاهش خطی

در بالانس تک‌صفحه‌ای با روش ضریب اثر در یک سرعت ممکن بود که با افزایش و یا کاهش دور آن روتـور بـالانس نباشد. روش کاهش خطی بالانس ساده‌ترین حالت در بالانس روتور با روش کاهش مربع خطاها [۵] است. در این روش به‌جای اندازه‌گیری ارتعاشی در یک سرعت، ارتعاش در بازه‌ای از سرعت‌ها اندازه‌گیری می‌شود. با روش کاهش خطی، دامنه درجه بالانس برای روتور تعیین می‌گردد که با توجه به سایر سرعت‌ها، ارتعاش بالایی به وجود نخواهد آمد. مقدار بالانس محاسبه شده با این روش همیشه از مقدار محاسبه شده با روش تک صفحه‌ای اثر کوچک‌تر خواهد بود.

این روش برای بالانس روتورهایی با خمیدگی زیاد مناسب خواهد بود. برخلاف روش بالانس تک صفحه‌ای که در یک سرعت ثابت و خاص صورت می‌گیرد در این روش ممکن است از تعداد سرعت‌های زیاد به جای صفحات بالانس زیاد استفاده گردد. این روش منجر به انطباق بهتر داده‌های بالانس شده و برای روتورهای بزرگ نظیر روتور توربین ژنراتورها کاربرد دارد. حسن این روش آن است که به مشخصات دینامیکی محور نیاز نخواهد بود. شاخه‌های مختلفی از این روش کلی بالانس نیز توسعه یافتند که ازجمله آنها روش حداقل مربع خطای وزن داده شده است که تأکید آن بیشتر بر روی تابع وزن یک ارتعاش خاص جهت کاهش یا حذف آن است.

۸. بالانس دو صفحه‌ای

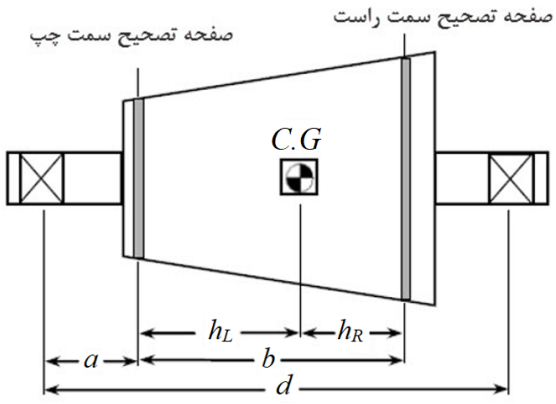
در این مورد، نابالانسی مجاز محاسبه شده باید بر روی دو صفحه قرار گیرد.

۱. روتورها با صفحات تصحیح داخلی

با درنظر گرفتن فرضیات زیر در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

الف- صفحات تصحیح در بین ساپورت‌ها قرار دارند.

ب- فاصله b از $d/3$ بزرگ‌تر است.



شکل۱۴: روتورها با صفحات تصحیح داخلی [۱۳]

که نابالانسی مجاز در صفحات تصحیح چپ و راست به صورت زیر محاسبه می‌شود.

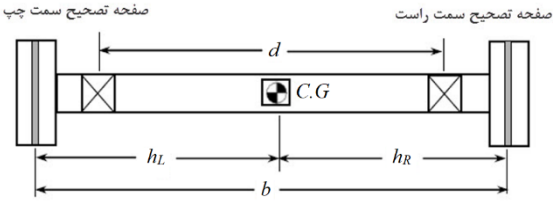
$$U_{\mathrm{per},L} = U_{\mathrm{per}}\left(\frac{h_R}{b}\right)$$
$$U_{per,R} = U_{\mathrm{per}}\left(\frac{h_L}{b}\right) \quad (۷)$$

که مقدار $U_{\mathrm{per},L}$ و $U_{\mathrm{per},R}$ نباید از ۳۰ درصد U_{per} کمتر و نباید از ۷۰ درصد آن بیشتر باشد. در غیر این صورت باید از قانون روتور باریک استفاده شود.

۲. روتور با صفحات تصحیح خارجی

این روش در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در این مورد، فاصله بین صفحات تصحیح (b) از فاصله بین ساپورت‌ها (d) بزرگ‌تر است، بنابراین مقدار نابالانسی مجاز باید به وسیله (d/b) تعدیل شود.

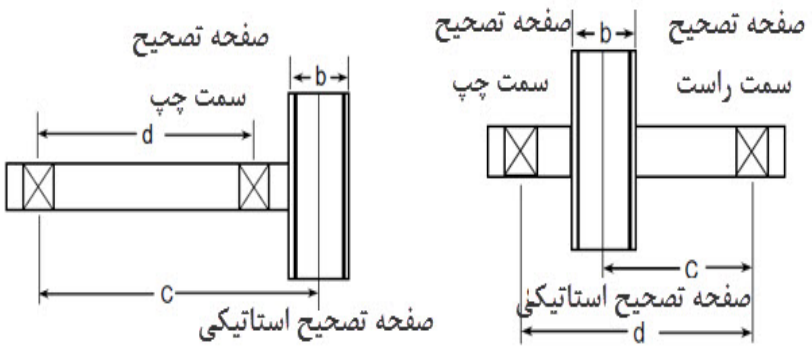
$$U_{\mathrm{per},L} = U_{\mathrm{per}}\left(\frac{h_R}{b}\right)\left(\frac{d}{b}\right)$$
$$U_{\mathrm{per},R} = U_{\mathrm{per}}\left(\frac{h_L}{b}\right)\left(\frac{d}{b}\right) \quad (۸)$$



شکل۱۵: روتور با صفحات تصحیح خارجی [۱۳]

۳. روتورهای باریک و یک طرفه

در این مورد فاصله بین صفحات تصحیح کمتر از یک سوم فاصله بین ساپورت‌ها است که در شکل ۱۶ مشاهده می‌کنید.



شکل۱۶: روتورهای باریک و یک طرفه [۱۳]

روابط مربوط به این روتورها به صورت زیر است:

الف- فاصله بین صفحات تصحیح کمتر از ۱/۳ فاصله بین بیرینگ‌ها است.

ب- فرض کنید نیروهای دینامیکی بیرینگ‌ها برابر هستند.

پ- کوپل تصحیح‌ها، یک زاویه ۱۸۰ درجه مجزا، در صفحات مربوط به خودشان می‌سازند.

ت- برای تصحیحات استاتیکی ممکن است صفحه سوم یا هر یک از صفحات استفاده شده برای تصحیحات کوپل باشد.

ج- نابالانسی استاتیکی یا باقیمانده کوپل به‌صورت U_{per} در نظر گرفته می‌شود.

$$U_{\mathrm{per,static}} = \frac{U_{\mathrm{per}}}{2}\frac{d}{2C} \quad (۹)$$

نابالانسی موجود در صفحات چپ و راست می‌تواند با استفاده از روابط زیر به معادل نابالانسی استاتیکی و نابالانسی کوپل تبدیل شود.

$$U_{\mathrm{per,couple}} = \frac{U_{\mathrm{per}}}{2}\frac{3d}{4b} \quad (۱۰)$$

نتایج بالانس زمانی پذیرفته می‌شود که دامنه $\vec{U}_{\text{static}}$ از $U_{\text{per,static}}$ و نابالانسی کوپل از $U_{\text{per,couple}}$ کمتر باشد. توجه کنید که نابالانسی کوپل در صفحه راست با نابالانسی کوپل در صفحه چپ از نظر مقدار برابر است اما از نظر جهت باهم مخالف‌اند.

۸-۱. بالانس دو صفحه‌ای با روش ضرایب اثر

در بیشتر روتورها بالانس در یک صفحه کفایت نخواهد کرد. به‌کارگیری 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 که این روش را ابداع کرد تیرل[۶] است. در این روش به دو بار نصب وزنه آزمایش جهت تعیین ضرایب اثر نیاز خواهد بود.

۸-۲. 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 اندازه‌گیری در محل سیگنال مرجع و یا سیگنال دور و همچنین قیمت نسبتا بالای آنالایزرهای موجود باقابلیت اندازه‌گیری دور و دامنه ارتعاش، بالانس آنها درست انجام نمی‌پذیرد. در این روش بالانس این روتورها به روش اندازه‌گیری دامنه ارتعاش به ازای جابه‌جایی وزنه‌های آزمایشی ارائه می‌گردد. روش بالانس تک صفحه‌ای بدون زاویه فاز یک روش شناخته شده بوده و در دورهای پایین قابل استفاده است. این روش به بالانس دو صفحه‌ای تعمیم داده شده است. در ابتدا برای برقراری تشابه با روش شناخته شده ضریب اثر، معادلات بالانس روش ضریب اثر دو صفحه‌ای ارائه گردیده است.

$$\begin{Bmatrix}\vec{Z}_1\\ \vec{Z}_2\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}\alpha_{11} & \alpha_{12}\\ \alpha_{21} & \alpha_{22}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\vec{U}_1\\ \vec{U}_2\end{Bmatrix} \qquad (۱۱)$$

در رابطه فوق، $\overrightarrow{Z_1}$ و $\overrightarrow{Z_2}$ بردارهای پاسخ، $\overrightarrow{U_1}$ و $\overrightarrow{U_2}$ بردارهای نامیزانی در صفحات 1 و 2 و α_{ij} نیز ضرایب اثر هستند. در روش بالانس بدون زاویه فاز، دامنه بردارهای $\overrightarrow{Z_1}$ و $\overrightarrow{Z_2}$ قابل اندازه‌گیری *(i, j =1,2)* بوده اما زوایای فاز آنها در دسترس نیستند. 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 اندازه‌گیری ثبت می‌گردند. در این حالت می‌توان نوشت:

$$Z_j^k - Z_j^0 = \alpha_{ji} W_k \begin{pmatrix} k = 1,2,3; \\ j = 1,2 \end{pmatrix} \qquad (۱۲)$$

W_k وزنه آزمایشی و Z_j^0 میزان نابالانسی اولیه است.

سمت چپ معادله شامل دو بردار با دامنه مشخص اندازه‌گیری شده و زاویه فاز مجهول و سمت راست معادله شامل بردار نامشخص دامنه و فاز است. حال بردارهای فوق ابتدا به اندازه زاویه نصب وزنه آزمایشی چرخانده و سپس به اندازه زاویه نامشخص بردار پاسخ اولیه دوران داده می‌شود. بردار حاصل را جهت به دست آوردن نامیزانی به اندازه ۱۸۰ درجه دوران داده و سپس در راستای برداری که مثلا $\vec{n}$ تصویر می‌کنند حاصل جمع دوران‌های فوق به شرح زیر خواهد بود:

$$Z_j^k \frac{\left(\vec{n}\vec{z}_j^0\overrightarrow{W_k}\right)}{Z_j^k} + Z_j^0 W_k = \alpha_{ji} W_k \left(\frac{n z_j^0}{\vec{\alpha}_{ij}}\right) \qquad (۱۳)$$

سمت چپ معادله شامل برداری با طول و جهت مشخص بوده که بردار مشخصی بدان اضافه گردیده است. مکان هندسی مجموع این بردارها دایره‌هایی به شعاع و مرکز مشخص خواهد بود.

حال با ترسیم دایره‌هایی به شعاع ارتعاش اولیه و رسم دوایر دیگر به فواصل فاز نصب وزنه‌های آزمایشی، حال با ترسیم سه دایره، جهت بردار نامیزانی نزدیک‌ترین نقطه محل تلاقی دوایر، خواهد بود. طول و زاویه این بردار در واقع بیانگر بردار سمت راست معادله ۱۳ یا $\alpha_{ji} W_k \left(\frac{nz_j^0}{\vec{\alpha}_{ij}}\right)$ خواهد بود. حال با اندازه‌گیری در نقطه اندازه‌گیری دوم، ضرایب اثر دوم نیز حاصل خواهد شد. سپس برای بردار صفحه دوم نیز این مراحل انجام می‌پذیرند و به این ترتیب چهار ضریب اثر محاسبه می‌گردند. بدین ترتیب هفت بار اندازه‌گیری و شش بار نصب وزنه آزمایشی لازم خواهد بود [۱۴].

۸-۳. بالانس چند صفحه‌ای با استفاده از تکنیک‌های برنامه‌نویسی خطی[۷]

روش بالانس چند صفحه‌ای با استفاده از تئوری برنامه‌نویسی خطی در یک قالب شبیه به روش حداقل مربعات خطا در یافتن ضرایب اثر است، با وجود اینکه در برنامه‌نویسی خطی، ممکن است یک باند بالا یا قید، بر روی دامنه و یا وزنه‌های بالانس محاسبه شده، قرار داده شود (در یک موقعیت خاص) این روش توسط لیتل[۸] ارائه و توسط فویلس[۹] و گانتر[۱۰] برای کاربرد عملی در میکروکامپیوترها برنامه‌ریزی شدند. نتایج این روش با روش حداقل مربعات خطا در اکثر سیستم‌های شناخته شده یکسان است.

۸-٤. بالانس مودال[۱۱]

روتورهای انعطاف‌پذیر که چندین برابر بالای سرعت بحرانی کار می‌کنند (نظیر ژنراتورها) توسط روش بالانس مودال، بالانس می‌گردند. در این روش باید شکل مدهای متناظر با سرعت‌های بحرانی روتور از روش تئوری یا تجربی مشخص باشند. وزنه‌ای که روی روتور قرار داده می‌شود، متناظر با شکل مد روتور هستند.

هر توزیع مودال برای بالانس یک مود در یک لحظه استفاده می‌گردد. محاسبه وزنه‌های مودال توسط روش ضرایب اثر تعیین می‌گردد که توسط دارلوس[۱۲] ارائه گردید.

۸-۵. روش بالانس سه وزنه آزمایشی[۱۳]

در بسیاری مواقع امکان اندازه‌گیری زاویه فاز به‌طور دقیق وجود ندارد. بلیک[۱۴] روشی را به نام روش چهار بار راه‌اندازی یا سه وزنه بالانس، ابداع کرد. با به‌کارگیری یک وزنه آزمایش در سه موقعیت، محل نامیزانی شامل اندازه و موقعیت آن تعیین خواهد شد. این روش از دقت خوبی به‌خصوص در مواقعی که سیستم غیرخطی باشد برخوردار است. این روش به محاسبه گرافیکی یا کامپیوتری، جهت محاسبات نیاز نخواهد داشت.

۸-٦. بالانس تریم کوپلینگ[۱۵]

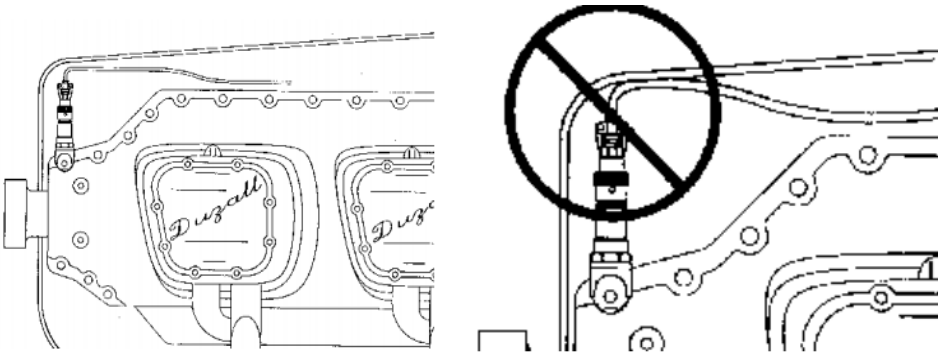
در بسیاری از مواقع اتفاق می‌افتد که دو ماشین به‌طور مجزا به خوبی بالانس شده‌اند ولی پس از اتصال آنها با کوپلینگ، ارتعاش بالا می‌رود. چون روتورهای دو قسمت، در ابتدا خوب بالانس شده‌اند دیگر نیازی به بالانس مجدد مجموعه نخواهد بود. درروش بالانس کوپلینگ که توسط وینکلر[۱۶] بیان گردید کوپلینگ به اندازه ۱۸۰ درجه چرخانده می‌شود و از موقعیت جدید کوپلینگ و ارتعاش حاصله، محل بهینه برای قراردهی کوپلینگ جهت تریم بالانس استفاده می‌گردد.

۹. نحوه بالانس دینامیکی و منابع اندازه‌گیری و ابزارهای مورد نیاز

دو سنسور اصلی (مابقی سنسورها در بهبود نتیجه کمک می‌کنند) که برای بالانس ضروری است عبارتند از سنسور ارتعاشات و سنسور تاکومتر (چشمی)[۱۷] که این دو را در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مشاهده می‌کنید.

شکل ۱۷. سنسور ارتعاشات

شکل ۱۸. تاکومتر



شکل ۱۹. کابل سنسور ارتعاشات با بال و رولینگ ارتباط نداشته باشد [۱۱]

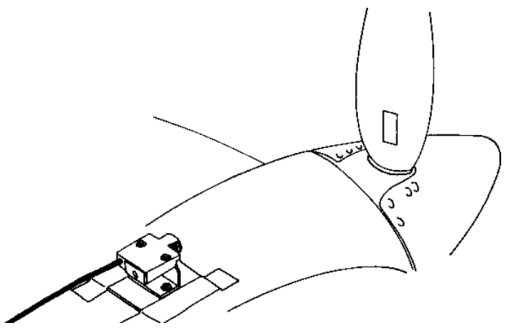
حسگر اندازه‌گیری ارتعاش، به قسمت جلوی موتور و تا حد ممکن نزدیک به بیرینگ جلویی موتور نصب می‌گردد.

سنسور باید به اندازه کافی از اجزای دوار فاصله داشته باشد و کاربر باید مطمئن گردد که کابل متصل به سنسور ارتعاشات با بافل یا کولینگ تماس نداشته باشد که باعث انتقال گزارش غلط گردد. این کابل سنسور ارتعاشات در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود.

حسگر ارتعاشات به صورت عمودی و نزدیک به خط وسط موتور باید نصب گردد به صورتی که کابل سنسور در بالای آن قرار گیرد. در صورتی‌که نمی‌توان سنسور را در مکانی روی خط میانی موتور نصب کرد می‌توان آن را به پیچ‌های نگهدارنده بیرینگ جلویی متصل نمود.

سنسور ارتعاشات را در خط سیلندرها قرار ندهید که ارتعاشات ناشی از احتراق درون سیلندر را در پاسخ منتقل نماید.

سنسور تاکومتر را بر بالای موتور یا کولینگ و با فاصله ۱۲ تا ۱۸ اینچ پشت ملخ نصب کنید. پایه باید به اندازه کافی محکم باشد تا از ارتعاشات سنسور جلوگیری کند. توجه شود که کابل سنسورها دور از اجزای دوار موتور، منیوفولدهای داغ و خطوط روغن داغ باشد. در شکل‌های۲۰ و ۲۱ نحوه نصب سنسور تاکومتر و نمونه‌ای از نصب آن را مشاهده می‌کنید [۱۱].



شکل ۲۰. موقعیت نصب سنسور تاکومتر (اپتیکال) [۱۱]

شکل ۲۱. نمونه‌ای از نصب سنسور تاکومتر و نوار انعکاس [۱۱]

ملخ را با دست بچرخانید تا یکی از پره‌ها دقیقا مقابل سنسور تاکومتر قرار گیرد. سنسور را روشن کنید. سنسور تاکومتر با نور معمولا قرمز محل نصب مناسب، نوار منعکس‌کننده (یک نوار صیقلی به عرض ۲ اینچ) را مشخص می‌کند. روشن شدن چراغ چشمک‌زن پشت سنسور نشان‌دهنده این است که سنسور نوار را دیده است.

نوار انعکاسی باید پس از اتمام بالانس برداشته شود. این کار موجب جلوگیری از خوردگی تیغه‌های پشت نوار به دلیل رطوبت می‌شود.

۹-۱. مراحل اصلی بالانس دینامیکی

مراحل اصلی بالانس دینامیکی به ترتیب زیر است:

۱-مطمئن شوید که تمام دستورالعمل‌های مناسب برای شروع بالانس هواپیما را انجام داده‌اید. (مکان بالانس هواپیما و ...)

۲-شما باید مونتاژ پروانه را برای نوک، ریشه، ترک و غیره بازبینی کنید. *FAA Consultative Circular 20-37E* باید به عنوان مرجع برای بازرسی پروانه استفاده شود.

۳-وزنه‌های مربوط به بالانس دینامیکی قبلی را جدا کنید. (توجه کنید که وزنه‌های مربوط به بالانس استاتیکی را جدا نکنید.)

۴-برای انتخاب *RPM* بالانس، ابتدا *RPM* پیشنهاد شده توسط سازنده بالانسر را اعمال کنید. اگر این سرعت را نمی‌دانید از سرعتی دلخواه و یا سرعت کروز استفاده کنید (سرعت حالت گشت‌زنی). سرعت کروز حالتی است که هواپیما بیشتر وقت خود را در این حالت طی می‌کند و معمولاً بالانس در این حالت مطلوب است.

۵-بالانسر را در کابین قرار دهید و سنسور ارتعاشات و تاکومتر را نصب کنید، کابل آنها را به کابین برده به دستگاه بالانسر وصل کنید.

۶-بالانسر را روشن کنید. (نصب نوار انعکاسی و ...)

۷-موتور را در مکان مناسب روشن کنید و اجازه دهید در دور کم به دمای معمول برسد.

۸-اطلاعات مورد نیاز مانند قدرت موتور (HP) و دور موتور (RPM) را همان‌گونه که در شکل ۲۲ دیده می‌شود در دستگاه وارد کنید.

۹-پس از گرم شدن، دور موتور را به RPM تعیین شده برای بالانس افزایش دهید. وقتی داده‌ها توسط بالانسر ثبت شد دور موتور را کاهش داده و پس از کمی سرد شدن آن، موتور را خاموش کنید.

شکل ۲۲. دریافت اطلاعات در بالانسر

۱۰- وزن آزمایشی پیشنهاد شده را نصب کنید. به عنوان مثال در شکل ۲۲ مشاهده می‌کنید، بالانسر میزان ارتعاشات را ۰/۸۴ IPS تشخیص داده است و می‌خواهد جرمی در زاویه ۸۱ درجه نسبت به نوار انعکاسی وصل شود. وزن نصب شده بر حسب گرم و زاویه آن بر حسب درجه را در بالانسر وارد کنید.

شکل ۲۳. نصب جرم آزمایشی

۱۱- پس از ثبت اطلاعات بالانسر، بار دیگر موتور را روشن کنید. اجازه دهید موتور به دمای معمول برسد سپس دور را تا RPM مورد نظر برای بالانس افزایش دهید. پس از ثبت اطلاعات توسط بالانسر دور را کاهش دهید و اجازه دهید دمای موتور کاهش یابد سپس موتور را خاموش کنید.

۱۲- جرم قبلی پیشنهاد شده را بردارید و جرم جدید را اضافه کنید، جرم بر حسب گرم و زاویه بر حسب درجه را در بالانسر وارد کنید.

۱۳- مراحل باید تا جایی تکرار شود که سطح ارتعاشات به پایین‌تر از IPS ۰/۰۷ برسد، هنگامی‌که ارتعاشات به پایین‌تر از این مقدار آمد جرم (به صورت پیچ و مهره) را همان‌طورکه در شکل ۲۳ می‌بینید، به صورت دائمی وصل کنید [۱۱].

۱۰. نتیجه‌گیری

بالانس ادوات دوار ازجمله مهم‌ترین بخش‌هایی است که در کلیه صنایع از اهمیت قابل‌توجهی برخوردار است و از جمله اعمال حیاتی قبل از راه‌اندازی و به‌کارگیری این ادوات است. در این مقاله سعی شد تا گوشه‌ای از روش‌های بالانس ملخ‌های هوایی معرفی گردد. توجه به نکات زیر در بالانس ملخ‌های هوایی حائز اهمیت است:

۱. تعیین و بررسی اینکه آیا ارتعاشات مربوط به فرکانس $1x$ روتور است، یا خیر. درغیر این صورت ممکن است ارتعاشات ناشی از دیگر موارد یا اقلام سیستم مانند ناهم‌راستایی، خرابی یاتاقان‌ها و .... باشد.

۲. توجه نمایید که در صورت وجود نابالانسی در سیستم با افزایش سرعت دورانی دامنه فرکانس $1x$ نیز افزایش می‌یابد.

۳. تعیین استاندارد و میزان حد مجاز نابالانسی سیستم.

۴. بررسی نوع روتور و نحوه بالانس آن.

۵. انجام بالانس استاتیکی در همه موارد مورد نیاز است.

۶. انتخاب روش و انجام بالانس دینامیکی بعد از بالانس استاتیکی.

۷. مآخذ

[1] Team, Commercial Aviation Safety, "Propeller operation and malfunctions basic familiarization for flight crews", *CAST,* 2011. www.cast-safety.org/pdf/4propeller_fundamentals.pdf.

[2] Nisbett, K., "Dynamic balancing of rotating machinery experiment", *Missouri University of Science and Technology, Laboratory Experiment,* 1996, pp.53-61.

[3] Rieger, Neville F. "*Balancing of rigid and flexible rotors",* STRESS TECHNOLOGY INC ROCHESTER NY, 1986.

[۴] سلگی، م.، درویش، ر.، *"فناوری بالانس"*، انتشارات یا مهدی (عج)، ۱۳۸۶.

[5] VDI 2060:1966-10, "*Standards of evaluation for the state of balance of rotating rigid bodies"*, 1996, https://www.beuth.de/en/technical-rule/vdi-2060/1527349

[6] ISO 1925:1990, *"Mechanical vibration — Balancing — Vocabulary"*, 1990, https://www.iso.org/standard/6620.html
[7] ISO 2953:1985, *"Balancing machines — Description and evaluation", 1985,* https://www.iso.org/standard/8001.html.
[8] ISO 5406:1980, *"The mechanical balancing of flexible rotors"*, 1980, https://www.iso.org/standard/11448.html
[9] Weber, Manfred. "*Metra Mess-und Frequenztechnik in Radebeul eK.*", 2011.
[10] ISO 1940-2:1997, *"Mechanical vibration — Balance quality requirements of rigid rotors - Part 2: Balance errors",* 1997, https://www.iso.org/standard/6636.html
[11] 10737 Lexington Drive, *ACES Systems Guide to Propeller Balancing*, 1996 https://www.acessystems.com/wp-content/uploads/2015/10/Aces-Guide-Propeller-Balancing.pdf
[12] Smart Avionics, *"PB-2 Propeller Balancer User Manual",* 2003-1012. https://smartavionics.co.uk/pb2/pb2_manual.pdf
[13] Alsalaet, Jaafar. "Dynamic Balancing and Shaft Alignment". Online, 2015. (https://www.researchgate.net/publication/319164861_Dynamic_Balancing_and_Shaft_Alignment)
[14] Everett, Louis J. "*Two-plane balancing of a rotor system without phase response measurements*." J. Vib., Acoust, Stress, and Reliab. 109(2): 162-167, Apr 1987.

پی‌نوشت:

1. Cyanoacrylates Adhesives
2. Single-Plane Balancing by the Vector Method
3. heavy spot
4. Out-of-Phase
5. Least- Squared –Error
6. Thearle
7. Multiplane Balancing Using Linear Programming Techniques
8. Little
9. Foiles
10. Gunter
11. Modal Balancing
12. Darlous
13. Three-Trial-Weight Method of Balancing
14. Blake
15. Coupling Trim Balancing
16. Winkler
17. photo tach