تشخیص عیب نابالانسی جرمی در موتورهای هوایی با استفاده از تحلیل داده‌های ارتعاش

فاطمه راعی

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی برق الکترونیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران،
fatemeraei1374@gmail.com

چکیده

موتورهای هوایی یکی از اجزای مهم هواپیما در ایجاد نیروی جلوبرندگی است. بنابراین پایش وضعیت آن قبل، حین و بعد از پرواز اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از پارامترهای مورد استفاده در پایش وضعیت موتورهای هوایی استفاده از داده‌های ارتعاش است. تحلیل داده‌های ارتعاش می‌تواند اطلاعات مناسبی از وضعیت موتور ارائه دهد. از جمله آن‌ها می‌توان به تشخیص بروز برخی عیوب در موتورهای هوایی اشاره کرد. در صورتی که عیب تشخیص داده شده، از میزان استاندارد تعیین شده فراتر رود، باید عملکرد موتور توسط گروه تعمیر و نگهداری بررسی شود. این فرآیند می‌تواند از تشدید عیب و در نهایت خرابی جلوگیری کرده و ایمنی را افزایش دهد. از جمله عیوب ایجاد شده در موتورهای هوایی نابالانسی است که می‌توان آن را به کمک تحلیل داده‌های ارتعاش دریافتی از تجهیزات ابزار دقیق تشخیص داد. در این مقاله، این نوع عیب و شیوه تشخیص آن در حوزه فرکانس بررسی می‌شود. در ادامه با ارائه یک نمونه آزمایشگاهی به تحلیل تشخیص این نوع عیب بر اساس استانداردهای موجود پرداخته می‌شود.

واژه‌های کلیدی: *پایش وضعیت- موتورهای هوایی- ارتعاشات- تشخیص عیب- نابالانسی*

۱- مقدمه

پایش وضعیت در ماشین‌آلات دوار، نظارت پیوسته بر عملکرد آن‌ها در شرایط مختلف است. این مسئله تضمین‌کننده بهره‌برداری بهینه از چنین سیستم‌هایی است. یکی از این ماشین‌آلات دوار، موتورهای هوایی است. پایش وضعیت موتورهای هوایی با استفاده از تحلیل داده‌های اخذ شده از تجهیزات ابزار دقیق انجام می‌شود. یکی از داده‌های مهم، ارتعاشات موتور است که تحلیل آن می‌تواند اطلاعات مفیدی از وضعیت موتور در شرایط کاری مختلف در اختیار گروه‌های تعمیر و نگه‌داری قرار دهد. تحلیل ارتعاشات می‌تواند به دو شکل انجام شود. حالت اول تحلیل با استفاده از چند داده محدود است. در این حالت تصمیم‌گیری در مورد وضعیت موتور با دریافت چند داده و در یک بازه زمانی محدود انجام می‌شود. در حالت دوم با استفاده از یک بانک اطلاعاتی از داده‌های ارتعاش، رفتار موتور در شرایط مختلف تحلیل می‌شود. در این حالت حجم داده‌های مورد استفاده، بیشتر از حالت اول است و زمان بیشتری برای تحلیل داده‌ها در دسترس است. در این مقاله حالت اول در نظر گرفته می‌شود.

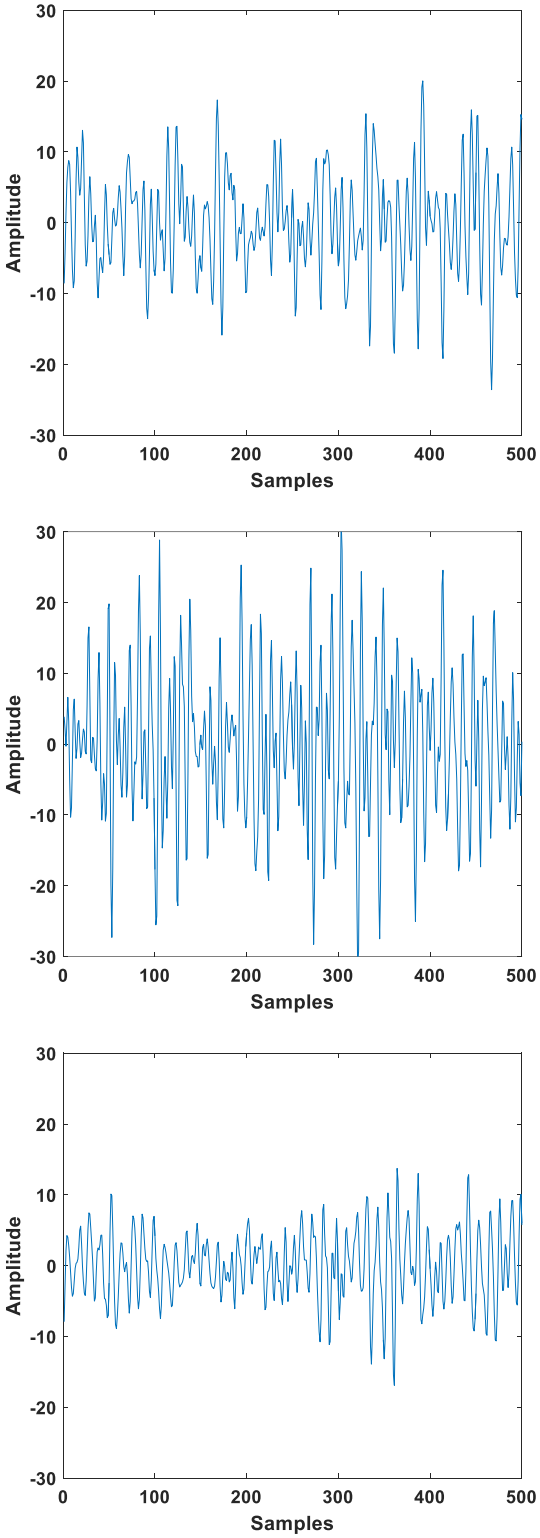
گام اول در تحلیل داده‌های ارتعاش، بررسی عملکرد موتور و پاسخ به این پرسش است که این سیستم در شرایط عملکرد مطلوب قرار دارد یا خیر؟ برای پاسخ به این سؤال، ارتعاشات در موتورهای هوایی را می‌توان به دو دسته کلی سالم و معیوب دسته‌بندی کرد. تفکیک بین حالت سالم و معیوب با استفاده از سطوح آستانه استاندارد انجام می‌شود.

در موتور هواپیما همواره سطحی از ارتعاشات وجود دارد که اگر از مقدار استاندارد تعیین شده در شرایط معین بیشتر نشود، حالت سالم در نظر گرفته می‌شود. در مواردی نیز ممکن است مقدار ارتعاشات به شکل گذرا از مقدار استاندارد فراتر رود اما در بازه زمانی کوتاهی به وضعیت استاندارد بازگردد. به عنوان مثال هنگامی که هواپیما در وضعیت پرواز و در زمان‌های برخاست (Take off) و نشست (Landing) باشد، ارتعاشات به صورت افزایش در دامنه داده‌های دریافتی در یک بازه زمانی محدود همراه است. چنین حالاتی معمولاً نشان‌دهنده بروز نقص در هواپیما یا موتور آن نمی‌باشد و می‌توان آن را به عللی نظیر پرواز در زمان توربولانس (Turbulence)، تغییر ارتفاع پرواز یا در زمان باز یا بسته شدن ارابه فرود (Landing gear) دانست. شکل ۱ افزایش ارتعاشات بیرون یک هواپیما را در اثر صعود از ارتفاع ۲۳۰۰۰ پا به ۴۰۰۰۰ پا نشان می‌دهد [۱]. در حالی که عیبی در سیستم رخ نداده است.

در مورد ارتعاشات معیوب، یک نقص یا یکسری شرایط مکانیکی غیرعادی وجود دارد که اگر اصلاح نشود می‌تواند منجر به تشدید عیب و در نهایت خرابی موتور بیانجامد. از جمله عوامل بروز ارتعاش در هواپیما می‌توان به نابالانسی در موتور اشاره کرد. این ارتعاشات نامطلوب می‌تواند باعث خرابی در اجزا (Component) و سازه (Structure) هواپیما شود. عوامل مختلفی نظیر تعویض قطعات دوار موتور، سایش و خوردگی طبیعی یا عواملی نظیر برخورد پرنده (Bird strike) می‌تواند منجر به تغییر در توزیع جرم در طول زمان و در نتیجه بروز عیب نابالانسی شود.

در زمینه تشخیص عیب نابالانسی پژوهش‌های مختلفی انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. در [۲] تشخیص نابالانسی جرمی در موتور و پروانه مالتی‌کوپتر (Multicopter) با فرض مشخص بودن مدل دینامیکی پرنده و به کار گیری داده‌های ارتعاش در حوزه زمان ارائه شده است. تشخیص نابالانسی موتور هواپیما با الگوریتم شبکه عصبی و استفاده از داده‌های تست پرواز واقعی در [۳] بررسی شده است. در [۴] تشخیص نابالانسی روی یک ماشین دوار با بلبرینگ مغناطیسی مجهز به عملگر پیزوالکتریک با استفاده از داده‌های ولتاژ و جریان در دو وضعیت ایستان (stationary) و گذرا (transient) انجام شده است. در [۵] یک روش غیرتماسی برای تشخیص نابالانسی جرمی در روتور در فضای سه بعدی با استفاده از پردازش تصاویر دو دوربین سنکرون ارائه شده است. مقایسه بین برخی روش‌های تشخیص عیب نابالانسی روتور در سیستم درایو موتورهای آهنربای دائم سنکرون شامل الگوریتم‌های fast Fourier

transform (FFT)، bi-spectrum، full spectrum و orbit shape analysis با استفاده از داده‌های ارتعاش در [۶] انجام شده است.



شکل ۱-بالا: ارتعاشات یک هواپیما در ارتفاع ۲۳۰۰۰ پا. وسط: افزایش ارتعاشات هواپیما در اثر صعود به ارتفاع ۴۰۰۰۰ پا. پایین: کاهش ارتعاشات در اثر تثبیت در ارتفاع ۴۰۰۰۰ پا [۱]

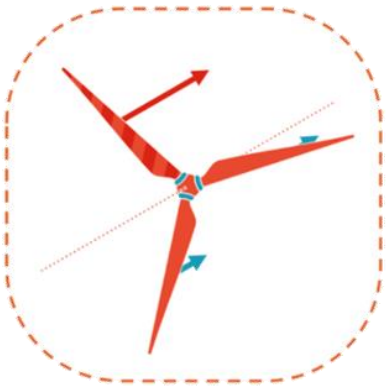
ادامه مقاله بدین صورت دنبال می‌شود. در بخش دوم مقاله انواع عیب نابالانسی شامل نابالانسی آیرودینامیکی و نابالانسی جرمی معرفی می‌شوند. سپس در بخش سوم مقاله تشخیص نابالانسی جرمی با استفاده از الگوریتم تبدیل فوریه گسسته (Discrete Fourier Transform) بررسی می‌شود. در بخش چهارم با استفاده از یک سامانه شبیه‌ساز عیب در موتور الکتریکی، داده‌های عیب نابالانسی جرمی با استفاده از الگوریتم تبدیل فوریه گسسته تحلیل شده و به کمک استاندارد مربوط به نوع موتور بکار رفته، بروز عیب در آن تشخیص داده می‌شود. این مقاله با ارائه نتیجه‌گیری در بخش پنجم به اتمام می‌رسد.

۲- نابالانسی

نابالانسی را می‌توان یکی از شایع‌ترین علل لرزش موتور دانست. عوامل مختلفی می‌توانند منجر به نابالانسی شوند. در ادامه برخی منابع به وجود آورنده نابالانسی در موتور هواپیما ارائه شده است.

۱-۱- نابالانسی آیرودینامیکی

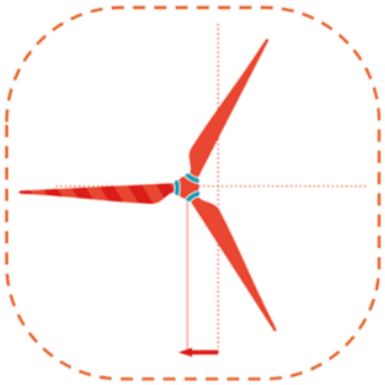
نابالانسی آیرودینامیکی یا استاتیکی یکی از عوامل بروز ارتعاشات در موتور هواپیما است. این نوع نابالانسی هنگامی رخ می‌دهد که یک یا چند پره از پروانه (propeller) بازده آیرودینامیکی متفاوتی نسبت به سایر پره‌ها داشته باشد (شکل ۲). این مسئله می‌تواند ناشی از پروفایل آیرودینامیکی متفاوت پره‌ها، ساییدگی در لبه پیشرو (leading edge) یا در بیشتر موارد، انحراف پره از موقعیت بهینه آن باشد. در چنین وضعیتی مرکز جرم پروانه منطبق بر محور نیست.



شکل ۲- نمایش نابالانسی آیرودینامیکی. پره ناهمراستا یک مؤلفه محوری با سرعت چرخش موتور ایجاد می‌کند [۷].

۱-۲- نابالانسی جرمی

نابالانسی جرمی یا دینامیکی یکی دیگر از عوامل بروز ارتعاش است. این نوع نابالانسی هنگامی رخ می‌دهد که وزن یکی از پره‌ها متفاوت با وزن دیگر پره‌ها باشد. هنگامی که چنین حالتی ایجاد شود، توزیع جرم روتور منطبق بر محور گردش نخواهد بود. در چنین شرایطی دامنه ارتعاشات افزایش می‌یابد. این افزایش دامنه ارتعاشات می‌تواند به سایر بخش‌های موتور هواپیما نظیر بلبرینگ‌ها و گیربکس‌ها آسیب برساند. از جمله پدیده‌های به وجود آورنده نابالانسی جرمی می‌توان به پروانه معیوب، خطای سازنده، مشکلات نصب، ضعف در تعمیر و نگهداری، رطوبت و خوردگی اشاره کرد. در ادامه الگوریتم تشخیص نابالانسی جرمی ارائه می‌شود.



شکل ۳- نمایش نابالانسی جرمی. پره سنگین‌تر یک مؤلفه شعاعی با سرعت چرخش موتور ایجاد می‌کند [۷].

۳- تشخیص عیب نابالانسی جرمی

یکی از روش‌های تشخیص بروز عیب، بررسی داده‌های ارتعاش موتور در حوزه فرکانس است. این کار با استفاده از تبدیل فوریه گسسته امکان‌پذیر است. در صورتی که n داده گسسته زمانی با x_i نشان داده شود، می‌توان آن را به صورت

$$X_k = \sum_{i=0}^{n-1} x_i e^{\frac{j2\pi ik}{n}} \quad k = 0,1,2,\dots,n-1 \qquad (۱)$$

نوشت که در آن X_k مؤلفه فرکانسی k ام است. پس از پیاده‌سازی تبدیل فوریه گسسته روی داده‌های ارتعاش، دامنه مؤلفه‌های فرکانسی نسبت به یک یا چند سطح آستانه مقایسه می‌شوند. در صورت عبور از مقادیر تعریف شده می‌توان آن را نشانه‌ای از بروز عیب دانست.

به منظور تعیین نوع عیب در حوزه فرکانس، می‌توان طیف فرکانسی را به چند زیر بازه (باند) تقسیم و سپس برای هر زیر بازه سطح آستانه مشخصی تعیین کرد. تقسیم‌بندی طیف فرکانسی، بر اساس مشخصات موتور الکتریکی مثل سرعت موتور و سطح آستانه هر باند متناسب با توان موتور تعریف می‌شود. عبور مؤلفه فرکانسی متناظر با عیب از سطح آستانه تعریف شده می‌تواند معیاری برای تشخیص عیب باشد.

با بررسی طیف فرکانسی ارتعاشات، می‌توان عیب نابالانسی را تشخیص داد. زمانی که این عیب در موتور پدید می‌آید، دامنه مؤلفه ارتعاشات موتور در فرکانس

$$f_{unbalance} = f_{rotation} \qquad (۲)$$

افزایش می‌یابد، که در آن $f_{rotation}$ دور موتور بر حسب هرتز است. برای بررسی عیب نابالانسی لازم است تا دامنه طیف در فرکانس پیش‌گفته پایش شود. خلاصه الگوریتم تشخیص عیب نابالانسی با استفاده از الگوریتم تبدیل فوریه در شکل ۴ نشان داده شده است.

Algorithm

1. Collecting vibration data
2. Discrete Fourier Transform
3. Band definition (for imbalance fault 0.8 … 1.2X)
4. Setting threshold according to related standard
5. If maximum amplitude of the band > defined threshold
   Fault detects
   Else
   No fault detects

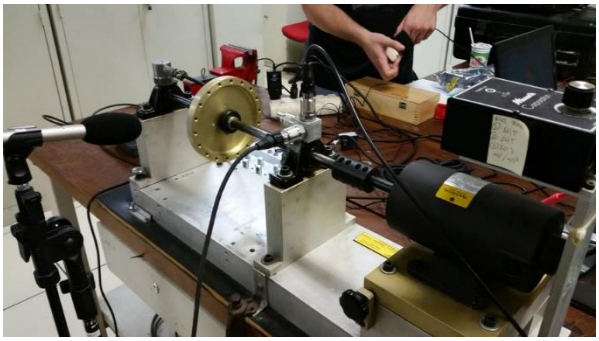
شکل ۴- خلاصه الگوریتم تشخیص عیب نابالانسی جرمی

۴- شبیه‌سازی نابالانسی جرمی

در این مقاله از داده‌های ارتعاش یک سامانه شبیه‌ساز عیب در موتور الکتریکی استفاده شده است [۸]. در این سامانه برای اندازه‌گیری، از سه حس‌گر ارتعاش در سه راستای محوری، شعاعی و مماسی، یک تاکومتر و یک میکروفون استفاده شده است. مشخصات سخت‌افزارهای مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

داده‌های دریافتی از این سامانه را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی نمود. دسته اول داده‌های مربوط به حالت سالم سیستم است که در آن موتور در وضعیت عادی کار می‌کند. دسته دوم نیز داده‌های حالت معیوب سیستم است. برای ایجاد عیب نابالانسی جرمی در این سامانه از وزنه‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ گرمی متصل به شفت موتور، استفاده شده است. به ازای هریک از وزنه‌ها، دور موتور از فرکانس ۲۰ تا ۶۰ هرتز با گام ۱۰ هرتز افزایش داده می‌شود. در شکل ۶ نمونه‌ای از سیگنال زمانی ارتعاشات موتور در وضعیت سالم و معیوب در فرکانس دوران ۶۰ هرتز نشان داده شده است. با در نظر گرفتن فرکانس دوران ۶۰ هرتز و زمان نمونه‌برداری ۵۰ کیلوهرتز، یک دوره تناوب شامل ۸۳۳ نمونه می‌شود. همان طور که مشاهده می‌شود، دامنه مؤلفه سینوسی برابر با دور موتور در حالت معیوب نسبت به وضعیت سالم افزایش داشته است. در جدول ۲ دامنه ارتعاشات مؤلفه فرکانسی متناظر با دورهای مختلف موتور به ازای جرم‌های نابالانس ۱۰، ۲۰ و ۳۰ گرمی ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در یک سرعت ثابت، با افزایش جرم نابالانس (تشدید عیب)، دامنه مؤلفه فرکانسی متناظر با دور موتور افزایش می‌یابد. این مطلب در شکل ۷ نیز نشان داده شده است. از طرف دیگر به ازای یک جرم نابالانس ثابت، هرچه دور موتور افزایش می‌یابد، مؤلفه فرکانسی متناظر با آن افزایش می‌یابد. این مطلب در شکل ۸ نیز نشان داده شده است.

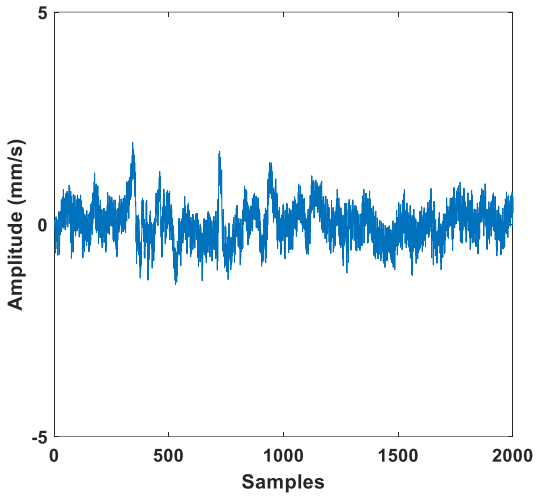
در جدول ۳ دو سطح آستانه استاندارد برای محدوده فرکانس دور موتور (باند ۱) ارائه شده است. از این باند می‌توان برای تشخیص عیب نابالانسی استفاده کرد. طبق استاندارد ISO 10816 [۹] سطوح آستانه مربوط به عیب نابالانسی برای نوع موتور الکتریکی بکار رفته، ۲,۵۲ و ۳,۷۸ میلی‌متر بر ثانیه تعریف شده است. با مقایسه جدول ۲ و جدول ۳ مشاهده می‌شود که در وضعیت سالم مقدار مؤلفه فرکانسی مربوط به دور موتور از مقادیر سطح آستانه عبور نکرده است. به ازای وزنه نابالانس ۱۰ گرمی و دور ۲۰ هرتز، عیب نابالانسی در سطوح آستانه تعریف شده قابل تشخیص نبوده ولی با افزایش دور به ۳۰ هرتز، این عیب قابل تشخیص می‌شود. با افزایش جرم نامتعادل به ۲۰ گرم، در دور ۲۰ هرتز، عیب نابالانسی با استفاده از سطوح آستانه تعریف شده قابل تشخیص است.

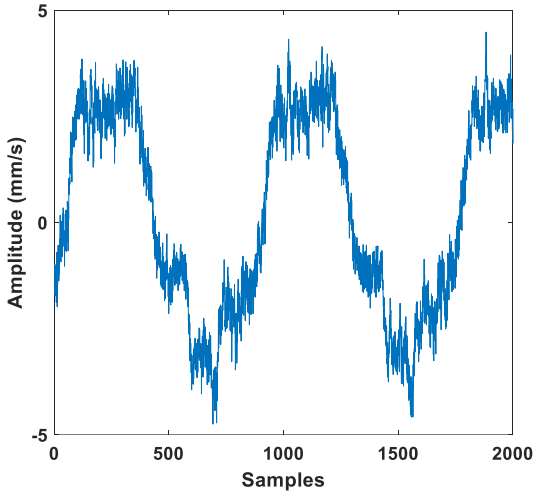


شکل ۵- سامانه شبیه‌ساز بروز عیب در موتور الکتریکی [۸]

جدول ۱- مشخصات سخت‌افزار آزمایشگاهی

مشخصه	مقدار
نوع موتور	1/4 CV DC
محدوده سرعت موتور	700-3600 rpm
مدل شتاب سنج اول	601A01
حساسیت حس‌گر اول	100 mV per g
بازه فرکانسی حس‌گر اول	0.27-10.000 Hz
بازه اندازه‌گیری حس‌گر اول	±50 g
مدل شتاب سنج دوم	604B31
حساسیت حس‌گر دوم	100 mV per g
بازه فرکانسی حس‌گر دوم	0.5-5.000 Hz
بازه اندازه‌گیری حس‌گر دوم	±50 g
کارت نمونه‌بردار	NI 9234
نرخ نمونه‌برداری	50 kHz

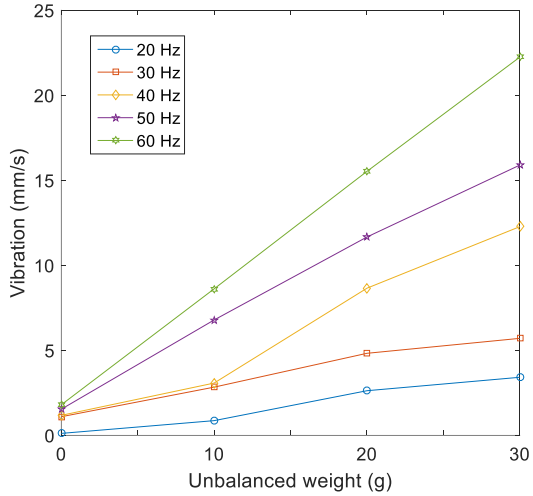




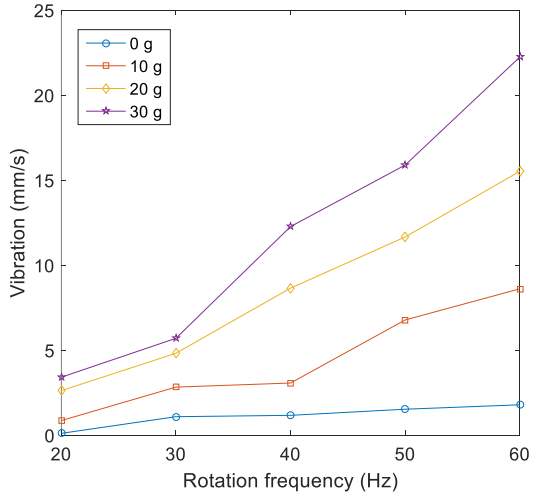
شکل ۶: نمونه‌ای از سیگنال زمانی ارتعاشات در فرکانس دوران ۶۰ هرتز. حالت سالم (بالا) و حالت معیوب با وزنه نابالانس ۳۰ گرمی (پایین)

جدول ۲- نتایج آزمایش

دور موتور (Hz)	حالت سالم بدون وزنه (mm/s)	عیب با وزنه ۱۰ گرمی (mm/s)	عیب با وزنه ۲۰ گرمی (mm/s)	عیب با وزنه ۳۰ گرمی (mm/s)
۲۰	۰,۱۱	۰,۸۶	۲,۶۲	۳,۴۱
۳۰	۱,۰۹	۲,۸۳	۴,۸۲	۵,۷
۴۰	۱,۱۷	۳,۰۷	۸,۶۵	۱۲,۲۷
۵۰	۱,۵۳	۶,۷۸	۱۱,۶۶	۱۵,۸۹
۶۰	۱,۷۹	۸,۶۱	۱۵,۵۲	۲۲,۲۴



شکل ۷- منحنی تغییرات ارتعاشات با افزایش جرم وزنه نابالانس به ازای سرعت‌های مختلف



شکل ۸- منحنی تغییرات ارتعاشات با افزایش دور موتور به ازای وزنه‌های نابالانس مختلف

جدول ۳- سطوح آستانه استاندارد تعریف شده برای باند ۱

Attributes		Band 1
Band name	Fault frequency	1x
	Indicated fault or fault qualification	Unbalance
Frequency range		0.8 … 1.2x
% of overall level		90%
Alarm 1 mm/s		2.52
Alarm 2 mm/s		3.78

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ارتعاشات سالم و معیوب موتورهای هوایی معرفی و ارتعاش ناشی از نابالانسی به عنوان یکی از انواع ارتعاشات معیوب بررسی شد. در ادامه دو نوع نابالانسی آیرودینامیکی و جرمی در موتور تشریح و برخی عوامل بوجود آورنده این عیوب معرفی شد. سپس روش تشخیص نابالانسی جرمی در حوزه فرکانس با استفاده از الگوریتم تبدیل فوریه گسسته تشریح شد. در ادامه یک نمونه داده آزمایشگاهی مربوط به ارتعاشات یک موتور الکتریکی با عیب نابالانسی جرمی ترسیم و نحوه تشخیص این نوع عیب بر اساس استاندارد ISO 10816 ارائه شد.

۶- مراجع

[1] "Free Vibration Analysis Files | enDAQ." https://endaq.com/pages/free-vibration-analysis-files (accessed Mar. 21, 2022).

[2] B. Ghalamchi, Z. Jia, and M. W. Mueller, "Real-Time Vibration-Based Propeller Fault Diagnosis for Multicopters," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 25, no. 1, pp. 395–405, 2020, doi: 10.1109/TMECH.2019.2947250.

[3] X. Hu, J. Vian, J. R. Slepski, and D. C. Wunsch, "Vibration Analysis Via Neural Network Inverse Models to Determine Aircraft Engine Unbalance Condition," *Proc. Int. Jt. Conf. Neural Networks*, vol. 4, pp. 3001–3006, 2003, doi: 10.1109/ijcnn.2003.1224049.

[4] R. Ambur and S. Rinderknecht, "Unbalance detection in rotor systems with active bearings using self-sensing piezoelectric actuators," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 102, pp. 72–86, 2018, doi: 10.1016/j.ymssp.2017.09.006.

[5] H. Deng *et al.*, "Three-dimensional identification for unbalanced mass of rotor systems in operation," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 2, 2018, doi: 10.3390/app8020173.

[6] P. Ewert, C. T. Kowalski, and M. Jaworski, "Comparison of the Effectiveness of Selected Vibration Signal Analysis Methods in the Rotor Unbalance Detection of PMSM Drive System," *Electron.*, vol. 11, no. 11, 2022, doi: 10.3390/electronics11111748.

[7] "How to detect a rotor imbalance on a wind turbine - Sereema." https://www.sereema.com/news/how-to-detect-rotor-imbalance-on-wind-turbine (accessed Nov. 18, 2022).

[8] M. Diagnosis, "Machinery Fault Simulator," Accessed: Feb. 24, 2021. [Online]. Available: http://www02.smt.ufrj.br/~offshore/mfs/index.html#TOC1.

[9] R. Istchenko and O. No, "Iso 10816-1," vol. 2005, p. 22674, 2006.