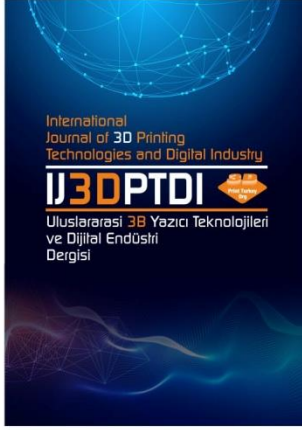




ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ

INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

ENDÜSTRİDE BULUT BİLİŞİM TABANLI KESTİRİMCİ BAKIM VE DENETİMSİZ TİTREŞİM ANALİZİ UYGULAMASI

CLOUD-BASED PREDICTIVE MAINTENANCE IN
INDUSTRY: AN APPLICATION OF UNSUPERVISED
VIBRATION ANALYSIS

Yazarlar (Authors): Emin Ozturk^{ID}, Aziz Kubilay Ovacikli^{ID*}

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Ozturk E., Ovacikli A. K., “Endüstride Bulut Bilişim Tabanlı Kestirimci Bakım ve Denetimsiz Titreşim Analizi Uygulaması” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 9(3): 448-461, (2025).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.1731806

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

ENDÜSTRİDE BULUT BİLİŞİM TABANLI KESTİRİMCİ BAKIM VE DENETİMSİZ TİTREŞİM ANALİZİ UYGULAMASI

Emin Ozturk^a , Aziz Kubilay Ovacikli^b 

^aEnvironics Uygulamalı Bilimler A.Ş., Namık Kemal Üniversitesi Teknopark, Tekirdağ, TÜRKİYE

^bİstanbul Arel Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

* Sorumlu Yazar: eminozturk@environics.com.tr

(Geliş/Received: 01.07.25; Düzeltme/Revised: 22.08.25; Kabul/Accepted: 04.10.25)

ÖZ

Kestirimci bakım, endüstriyel üretim sürecindeki gelişmeler sonucunda ortaya çıkan bir bakım stratejisidir. Bu çalışmada beyaz kağıt üreten bir fabrikada 3000 devir/dk. dönen vakum fanları üzerinde uygulanan otonom kestirimci bakım yaklaşımları ele alınmıştır. Çalışmada üç eksenle titreşim verisi toplayan kablosuz ivme sensörü kullanılarak balanssızlık ve rulman arızası belirlemek hedeflenmiştir. İvme sensörlerinden toplanan veriler nesnelerin interneti teknolojilerinden yararlanılarak bulut ortamına gönderilmiştir. Bulut ortamına aktarılan veriler crest factor, skewness, kurtosis gibi ham veri analizi için istatistiksel yöntemler ile değerlendirilmiş, bu değerlendirme enerji analizi ve denetimsiz öğrenme üzerinden rulman analizleri ile desteklenmiştir. Elde edilen sonuçlar kullanıcılar ile paylaşılan web arayüzünde görselleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda balanssızlık ve rulman arızaları başarılı bir şekilde tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kestirimci Bakım, Titreşim Analizi, Denetimsiz Öğrenme, Rulmanlar, Döner Ekipmanlar, Bulut Bilişim.

CLOUD-BASED PREDICTIVE MAINTENANCE IN INDUSTRY: AN APPLICATION OF UNSUPERVISED VIBRATION ANALYSIS

ABSTRACT

Predictive maintenance is a maintenance strategy that has emerged as a result of advancements in the industrial production process. This study focuses on autonomous predictive maintenance approaches applied to vacuum fans rotating at 3000 RPM in a white paper production factory. This work aims to detect imbalance and bearing faults using a wireless accelerometer that collects vibration data across three axes. The data collected from the accelerometers is transmitted to a cloud environment using Internet of Things (IoT) technologies. The data transferred to the cloud were evaluated using statistical methods for raw data analysis, such as crest factor, skewness, and kurtosis. This evaluation was supported by energy analysis and unsupervised learning for bearing analysis. The obtained results were visualized on a web interface shared with users. As a result of this study, unbalance and bearing faults were successfully detected.

Keywords: Predictive Maintenance, Vibration Analysis, Unsupervised Learning, Rolling Element Bearings, Rotating Machinery, Cloud Computing.

1. GİRİŞ

Sanayi devrimi, insanlık tarihindeki en önemli gelişmelerin başında gelmektedir. Bu dönemde insan odaklı/kol emeği üretim tipinden öncelikle makine ve sonrasında otomasyon

odaklı üretime geçilmiş ve fabrikaların üretim kapasitesi önemli ölçüde arttırılmıştır. Makinelerin üretim süreçlerindeki etkinliği bakım ve arıza yönetimi konularında yeni ihtiyaçları da beraberinde getirmiştir.

İmalat sanayinde döner ekipmanlarda meydana gelen mekanik arızaların üretim sürecine olan olumsuz etkisi daha belirgin hale gelmiştir. Plansız duruşlar, zaman ve üretim kaybı, maliyet artışı ve iş güvenliği gibi sonuçlar bakım metotlarının daha etkin hâle getirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Arızı ve periyodik bakım yöntemlerinin yetersiz kalması, kestirimci bakım kavramının ortaya çıkmasına neden olmuştur [1-3].

Özellikle döner ekipmanlarda oluşan ve mekanik bileşenlerin hareketinden, zaman içerisinde yıpranmasından ve yorulmasından kaynaklanan titreşimler makine sağlığı hakkında çıkarım yapmak için önemli ve kullanılabilir veriler sunmaktadır [3]. Zaman içerisinde titreşim seviyelerinde meydana gelen değişimlerin (genel anlamda trendlerin) doğru yöntemlerle analiz edilmesi oluşabilecek sorunların erken aşamada tespit edilmesini sağlamaktadır [3-5].

Sanayide dijitalleşme ve nesnelerin interneti (IoT) çözümleri, gerek ölçüm teknolojisinin gerekse de endüstriyel ortamda haberleşme sağlayan cihazların maliyetlerinin düşmesi ile bu noktada öne çıkmaktadır. IoT teknolojileri kullanarak makinelerden anlık titreşim verisi alınabilmektedir [6]. Alınan veriler bulut bilişim yöntemleri kullanılarak analiz edilmekte ve anlamlı hale getirilmektedir [7-8]. Endüstri 4.0 ile birlikte dijitalleşen fabrikalar, bakım maliyetlerinin düşürülmesini ve rekabet avantajının artmasını sağlamaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI VE GEÇMİŞ ÇALIŞMALAR

Makinelerin sağlıklı ve düzenli bir şekilde çalışabilmesi için sürekli olarak izlenmesi ve doğru bakım yöntemlerinin uygulanması son derece önemlidir. Kestirimci bakım ve titreşim analizi, makinelerde oluşabilecek arızaların erken aşamalarda belirlenmesi ve giderilmesi için en sık kullanılan önemli yöntemlerdendir [5].

Geçmişte yapılan çalışmalar kestirimci bakım ve titreşim analizinin imalat tesislerine önemli avantajlar sunduğunu ve bakım maliyetlerinin önemli ölçüde düştüğünü göstermiştir [5,8-9].

Demir vd. [10] yaptığı çalışmada rulmanlarda meydana gelebilecek hasarları belirlemek için Hilbert dönüşümünü kullanarak zarflama

analizi yapmıştır. Bunlara ek olarak ses ölçüm cihazları kullanılmış ve rulmanların sesleri kaydedilerek sağlıklı rulmanlar ile karşılaştırılmıştır.

Yaman vd. [11] endüstride sıvı aktarımı için kullanılan pompalar üzerinde titreşim analizi yöntemini kullanarak kestirimci bakım uygulaması gerçekleştirmiştir. Titreşim verileri üzerinde FFT yöntemi kullanılarak spektrum analizi yapılmıştır. Uygulama ile kontrolsüz ve plansız duruşların önüne geçmeyi amaçlamıştır.

Günindi vd. [12] hava fanlarında oluşabilecek yapısal esneklik arızaları önceden belirlemek için kestirimci bakım uygulaması geliştirmişlerdir. Uygulamada toplanan verilerin hız, ivme ve zarflama spektrumları oluşturulmuştur. Spektrumlarda meydana gelen değişiklikler izlenerek sorunların erken tespiti üzerinde çalışılmıştır.

Aydın vd. [13] çimento fabrikasında kestirimci bakım uygulaması ile arızaları belirleme ve maliyetleri düşürmek için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada titreşim, sıcaklık, basınç gibi değerler toplanarak trendler oluşturulmuştur. Toplanan veriler görselleştirilerek uzman kişiler tarafından değerlendirilmiş ve makine sağlığı hakkında fikir elde etmek amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, kestirimci bakım uygulamaları kapsamında durum izleme ve titreşim analizine dayalı örnek bir endüstriyel ekipman setindeki (vakum fanları) uygulama üzerinden yöntemin esasları ve işletmelere sağladığı katkılar ele alınacaktır. Trakya Bölgesindeki bir beyaz kağıt üretim tesisinde kritik önemde ve üretimin durmasına neden olacak hızlı dönen ekipmanlarda temel mekanik arızaların tespiti gerçekleştirilmiş ve sunulmuştur.

İmalat tesislerinde, fabrikalarda aktif olarak kullanılan sistemlerin ve literatürde tartışılan metotların yanında, denetimsiz öğrenme ile rulman arızası tespiti, dairesel dalga ve titreşim kaynağı analizi gibi yöntemler endüstriyel ortamda ilk defa yerli bir çözüm içerisinde denenmiş ve bu çalışmada detaylandırılmıştır. Takip eden bölümlerde sistemin genel çalışma prensipleri, donanım ve yazılımın temel aldığı yöntem ve teori tartışılacak, ayrıca kullanılan yöntemler pratik örnekler ile desteklenecektir.

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, bir beyaz kağıt üretim fabrikasına kurulan kestirimci bakım donanım ve yazılımı üzerinde durulmuştur. Makinelardan veri toplama aşamasından başlayarak titreşim analizi süreçleri incelenmiştir. Teorik arka plan ilgili referanslar ile ele alınmıştır.

3.1. Veri Toplama

Veri toplamak için Wi-Fi ile haberleşebilen Ascribo marka IP67 sınıfı Able-Sens model 3-eksenli MEMS (Micro-electro mechanical systems) ivme-ölçer sensör kullanılmıştır. İvme sensörü her 3 ekseninde $\pm 16g$ aralıkta, 5 KHz bant genişliğinde, en fazla 16 saniyelik gözlem uzunluğunda ve 16 bit çözünürlükte titreşim verileri toplama kapasitesine sahiptir. Ölçüm parametreleri aşağıda detaylandırılacağı üzere ekipmanın devir, rulman, güç aktarma organı özelliklerine göre belirlenmelidir.



Şekil 1. Kayış/kasnak ile tahrik edilen bir vakum fanının kasnak tarafı yataklamasına monte edilmiş Able-Sens 3-eksenli kablosuz endüstriyel ivme sensörü.

Şekil 1’de sistem yöneticisi tarafından periyodu belirlenen (60 dk.) titreşim verilerini toplamak için kullanılan ivme sensörünün makine üzerindeki görüntüsü yer almaktadır. İvme sensörü analiz edilmek istenen mekanik bileşen(ler)e en yakın konuma ve titreşimlerde sönümlendirme olmayacak şekilde monte edilmelidir [14]. Yerleştirilen ivme sensöründen toplanan verinin makineyi temsil etmesi için örnek sayısı ve veri toplama süresinin mekanik bileşenlerin geometrisine ve eksenlerdeki dönüş hızına uygun olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bu değerleri belirlemek için makinenin nominal RPM (devir/dak.) değeri ve rulman tipi bilgileri gerekmektedir. Analiz edilen yatak ortalama 2220 RPM’de tahrik edilmekte ve SKF 2213 EKTN9 tipi rulman kullanılmaktadır.

Dış bileziği sabit ve iç bileziği dönen standart rulmanlar dört bileşenden oluşmaktadır. İç bilezik, dış bilezik, kafes ve bilya. Titreşim verileri toplanırken bant genişliğini ifade eden F_{max} değerini belirlemek için rulmanın en yüksek mertebede arıza frekansı üreten bileşeni olan iç bilezik geometrisi baz alınır, zira en yüksek frekanstaki titreşim modları bu bileşenden ortaya çıkacaktır. Rulman iç bileziğinin makine RPM değerindeki arıza frekansı (BPFI) belirlenir. Doğru arıza tespitleri yapabilmek için gerekli harmonik sayısına (N_{har}) - ivme sensörünün lineerliği bozulmadan ulaşabileceği en yüksek bant genişliği kapasitesi de göz önünde bulundurularak - karar verildikten sonra olabilecek en düşük örnekleme sıklığı hesaplanabilmektedir [1,15], formülize etmek gerekirse:

$$BPFI = \frac{Z * n}{2 * 60} \left(1 + \frac{d}{D} * \cos \alpha\right)$$

d = Bilya çapı (mm)

D = Bilyaların merkezden geçtiği dairenin çapı (mm)

Z = Bilya sayısı

α = Temas açısı (derece)

n = Milin dönüş hızı (rpm – dakikadaki devir sayısı)

$$BPFI = 324.704 H_z$$

$$F_{max} = 324.704 * N_{har} \quad (1)$$

Çıkan sonuçtan yüksek en küçük F_{max} değeri seçilir. Bahsi geçen rulman iç bilezik arıza frekansı ve en az 5 harmoniği (N_{har}) içerecek şekilde veri toplamak istendiğinde, devirin değişken ve üretime bağlı olarak yükselme ihtimali de göz önünde bulundurulursa, rulman arızalarının tespit ve doğrulanması için bu uygulamada en az 3.5 kHz bant genişliği gereklidir. Buna bağlı olarak, Nyquist kriterini sağlayacak şekilde örnekleme sıklığını (saniyede alınan örnek sayısını) belirlemek gerekecektir. Ekipman ve mekanik bileşenine has ölçüm süresini (genellikle saniye mertebesinde) hesaplayabilmek içinse rulmanın en düşük frekansta (dolayısıyla en yüksek periyotta) arıza sinyali üreten bileşeni olan dış bilezik baz alınır. Benzer şekilde burada da makine RPM değerine karşılık gelen dış bilezik arıza frekans değeri (BPFO) üzerinden hesaplamalar gerçekleştirilir.

$$BPFO = \frac{Z * n}{2 * 60} \left(1 - \frac{d}{D} * \cos \alpha \right)$$

$$BPFO = 230.296 \text{ Hz}$$

$$\frac{1}{230.296} = 0.00434223782 \text{ saniye} \quad (2)$$

Bu birim periyot hesabından sonra, titreşim ölçümlerinin kaç periyodu (N_{per}) kapsayacağına karar verilir ve toplam ölçüm süresi her eksen için aynı olacak şekilde hesaplanır:

$$\text{Ölçüm süresi} = 0.00434223782 * N_{per} \quad (3)$$

Çıkan sonuçtan yüksek en düşük süre seçilir. Bahsi geçen rulman için, yine olası arızaların tespitinde gerekli olan gözlem periyodunun, örneğin $N_{per} = 200$ olduğunu varsayarak gerekli en düşük ölçüm penceresi boyutu 0.87 saniye olacaktır. Arızaların tespiti için gerekli harmonik sayısı ve ölçüm süresi; ekipmanın alt bileşenleri, arıza geçmişi, dönüş devri, ivme ölçümlerinin alındığı sensörün ve/veya analizörün karakteristikleri gibi faktörler tarafından da belirlenmektedir. Bu ve benzeri faktörler göz önünde bulundurularak makine için en uygun ölçüm parametreleri tanımlanabilir. Tüm bunların yanında, ölçüm periyodu ise ekipmanın üretimdeki kritikliği, dönüş devri, arıza geçmişi gibi etkenler göz önünde bulundurularak belirlenir.

3.2. Veri Transferi

3-eksenli MEMS ivme sensörü periyodik olarak topladığı titreşim verilerini bir endüstriyel ağ geçidine iletir. Bu iletim kablosuz haberleşme ile gerçekleşir, haberleşme mesafesi endüstriyel koşullarda değişebilmektedir, fakat bu makalede bahsi geçen ekipmandan 50 metre uzaklıktaki bir ağ geçidi ile sorunsuz veri toplanabilmektedir.

Kablosuz haberleşme, fiziksel bağlantı olmaksızın verilerin cihazlar arasında aktarılmasını için kullanılan bir haberleşme teknolojisidir. İvme sensörü ve endüstriyel ağ geçidi Wi-Fi protokolü ile haberleşmektedir. Wi-Fi protokolü kısa mesafelerde (0.3 m ile 100 m arası) yüksek hızda veri iletimi için idealdir [16].



Şekil 2. Endüstriyel çift antenli ağ geçidine Power-over-Ethernet (PoE) ile güç beslemesi sağlanmaktadır.

Şekil 2’de endüstriyel kestirimci bakım sisteminde kullanılan ağ geçidi yer almaktadır. Ağ geçidine ulaşan titreşim verileri bir bilgisayar yazılımı aracılığı ile buluta gönderilir ve titreşim analizi yerel sunucuda gerçekleştirilir. Sunucuya ulaşan verilerin analizi için Python programlama dili ile yazılmış fonksiyon blokları kullanılmaktadır. Elde edilen sonuçlar kullanıcıların kendilerine özel tanımlanmış bilgiler ile girdikleri bir web arayüzünde sunulmakta ve tüm verilere erişebilmek mümkün olmaktadır.

3.3. Titreşim Analizi

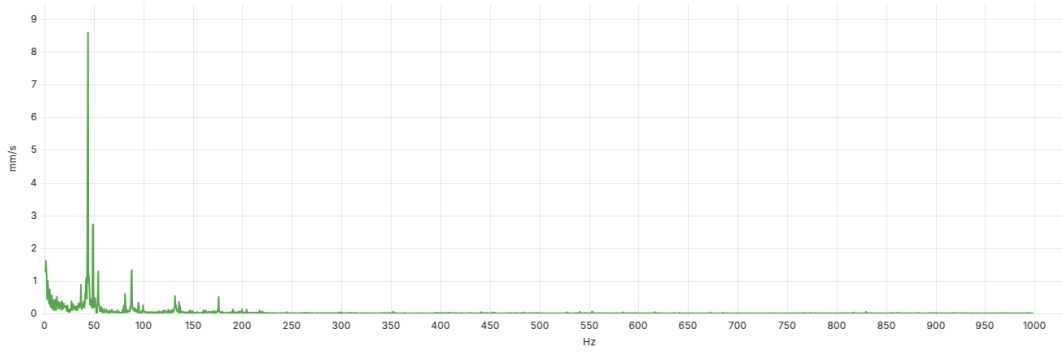
Titreşim, bir sistemin denge konumu etrafında yaptığı salınım hareketini ifade etmektedir. Makinelerde dönme hareketini kolaylaştıran bileşenler yük altında çalıştıkça mekanik yorulmaya ve dolayısıyla aşınmaya maruz kalmaktadır [17]. Yağlama rejiminin aksatılması, ortamdaki toz ve buhar olası mekanik arızanın gelişimini özellikle yüksek devirlerde hızlandırır. Bu durum makinenin denge durumunu bozmakta ve normal çalışma koşullarına kıyasla daha yüksek titreşim seviyelerinin oluşmasına neden olmaktadır [18].

Dönen bileşenlerin sürekli olarak denge konumunda çalışmaları mümkün değildir. Farklı etkenlere bağlı olarak sürekli, düzenli ve belirli frekanslarda titreşimler yaratırlar. Titreşim davranışı tüm eksenlerde ve değişen yük ve üretim koşullarında sürekli izlenmeli ve olası arıza ilerledikçe kritik seviyelere ulaşmadan önce gereken tedbirler alınmalıdır. Bunun için kullanılabilecek en yaygın ve bilinen yöntem titreşim analizidir. Titreşim analizi, döner ekipmanlardan toplanan ivme verilerini kullanarak makinedeki sorunları tespit etmek için kullanılan yaygın bir yöntemdir [5].

Dönen bileşenlerden oluşan titreşim rulman ve dişli gibi makine parçalarından kaynaklanabileceği gibi, bunları yataklayan kısımlardan veya doğrudan şaseden kaynaklanabilir. Bu parçaların bulunduğu bölgelere yerleştirilen endüstriyel ivme sensörleri oluşan titreşimleri zaman ve frekans alanında toplayabilir [19].

3.4. Bulut Tabanlı Veri Analizi

Veri analizi, makinelerden toplanan verilerin bulut ortamında çeşitli hesaplama yöntemleri ile analiz edilmesi ve görselleştirilmesini kapsamaktadır [6]. Analizlerin yapılabilmesi için ilk olarak fiziksel ortamda yer alan makinelerin bulut ortamında dijital bir ikizi oluşturulur. Dijital ikiz yaklaşımı fiziksel makineye ait bilinen tüm özelliklerin bulut ortamına aktarılmasını ve elde edilen verilerin bu özellikler dikkate alınarak analiz edilmesini sağlamaktadır [20].



Şekil 3. Titreşim hız (mm/s) spektrumu özellikle balanssızlık, hizasızlık, mekanik gevşeklik gibi devir ile ilişkili arızaların tespitinde kullanılmaktadır.

Şekil 3'de düzenli ölçüm alınan vakum fanlarından birinin titreşim verisine ait hız spektrumu yer almaktadır. Bu hız spektrumunda özellikle devir ile ilişkili arızalar tespit edilebilmektedir [22]. Örneğin bu spektrumda devir (yaklaşık 45 Hz) bileşeni baskın ve genliği tehlike sınırının üzerindedir.

3.4.2. Skewness

Skewness (olasılık dağılımındaki asimetri), titreşim sinyalinin örneklem toplamının simetrik bir yapıya sahip olup olmadığını gösteren yüksek kademeli bir istatistik verisidir. Denklem (4)'de yer alan n toplanan veri

Titreşim verisi üzerinden çıkarım yapmak için kullanılan çok sayıda yöntem mevcuttur. Bulut ortamında çalışan algoritma bu yöntemlerden en faydalı olanları kullanarak veri üzerinde analizler yapmaktadır. Analiz işlemleri sonucunda elde edilen sonuçlar kullanıcılar için geliştirilen arayüzden incelenmektedir.

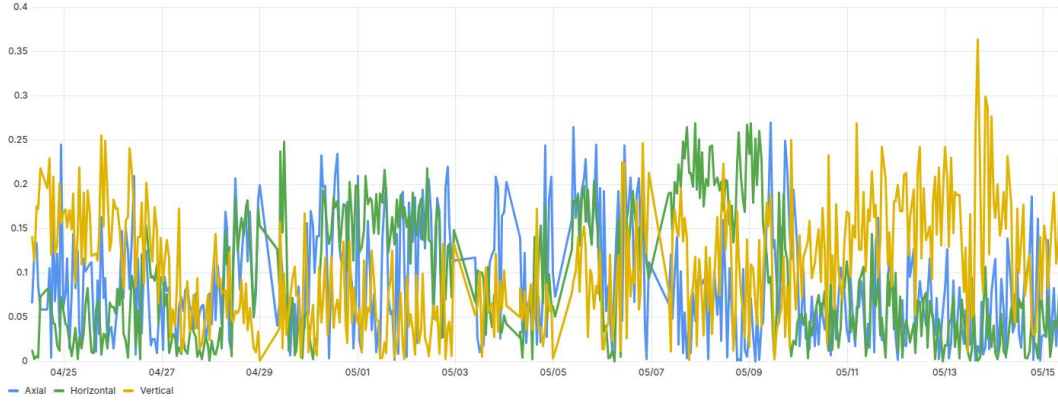
3.4.1. Hızlı fourier dönüşümü

Toplanan ham titreşim verileri öncelikle yüksek ve düşük frekans bandındaki arızaları ayrı ayrı ele alabilmek adına ivme (g) ve hız (mm/s) türevlerine ayrılır. Bu birbiri ile ilişkili iki parametreye ait verilerin Fast Fourier Transform (FFT) ile lineer bir dönüşüm sonrasında elde edilen frekans ve genlik bilgisi üzerinden makinenin genel durumu hakkında ilk bakışta kaba bir bilgi edinilmesi mümkündür. [21].

sayısını, x_i 'inci gözlem değerini, $\bar{x}$, verilerin aritmetik ortalamasını, s , verinin standart sapma değerini ifade eder.

$$Skewness = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3 \quad (4)$$

Sonucun pozitif olması dağılımın sola yatık olduğunu, negatif olması sağa yatık olduğunu ifade etmektedir. Sağlıklı makinelerde bu değer genellikle 0'a yakındır. Skewness değerinin sıfırdan pozitif veya negatif yönde uzaklaşması sinyalde bir dengesizlik olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 4. Vakum fanı için üç eksendeki skewness grafiği.

Bu dengesizliğe bakılarak makinenin durumu hakkında çıkarımlar yapılabilir. Şekil 4'te örnek bir skewness grafiği yer almaktadır. Skewness değerine bakarak makinede rulman arızası, dişli hatası gibi sorunlar olabileceği yorumu yapılabilir. Yukarıdaki her 3 eksen için verilen trendler dikkate alınacak olursa, ekipmanda düzenli tekrar eden vurgusal titreşimlerin baskın olduğu herhangi bir arıza bulunmadığı sonucuna varılmaktadır.

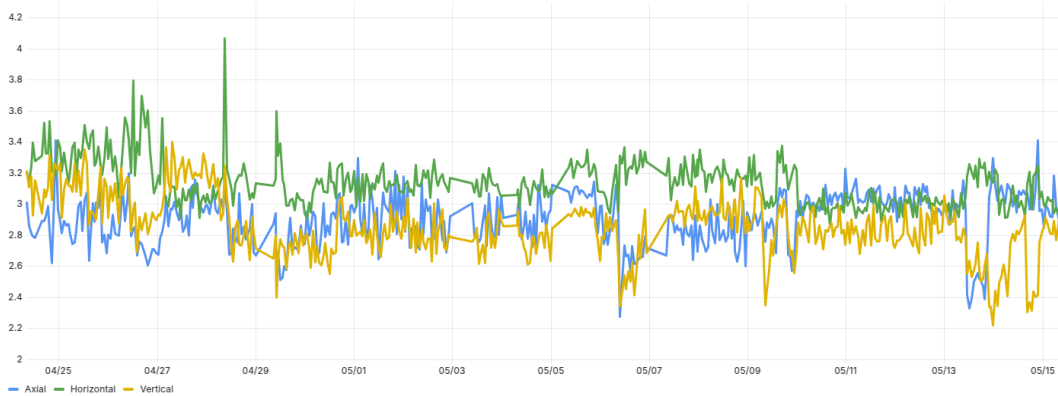
3.4.3. Kurtosis

Kurtosis (olasılık dağılımındaki ortalamadan en uzak noktaların nicelenmesi), titreşim

sinyalindeki darbeleri niceleyen yüksek kademeli bir istatistik verisidir. Denklem (5)'de yer alan n , toplanan veri sayısını, x_i , i 'inci gözlem değerini, $\bar{x}$, verilerin aritmetik ortalamasını, s , verinin standart sapma değerini ifade eder.

$$Kurtosis = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 \quad (5)$$

Sonucun 3'ten büyük olması yüksek kurtosis, düşük olmasına düşük kurtosis olarak isimlendirilmektedir. Sağlıklı makinelerde bu değer 3'e yakındır.



Şekil 5. Vakum fanı için üç eksendeki kurtosis grafiği.

Şekil 5'te örnek bir kurtosis grafiği yer almaktadır. Yüksek kurtosis, yüksek enerjili, ani ve düzensiz darbeler olduğunu göstermektedir. Düşük kurtosis ise düşük enerjili ve genelde tehlikeli arızası olmayan ekipmanlarda gözlenir.

Titreşim analizi yaparken kurtosis değeri önemli bir rol oynamaktadır. Bu değeri takip ederek mikro seviyelerde olan rulman ve dişli arızaları erken aşamalarda tespit edilebilir.

3.4.4. RMS ivme

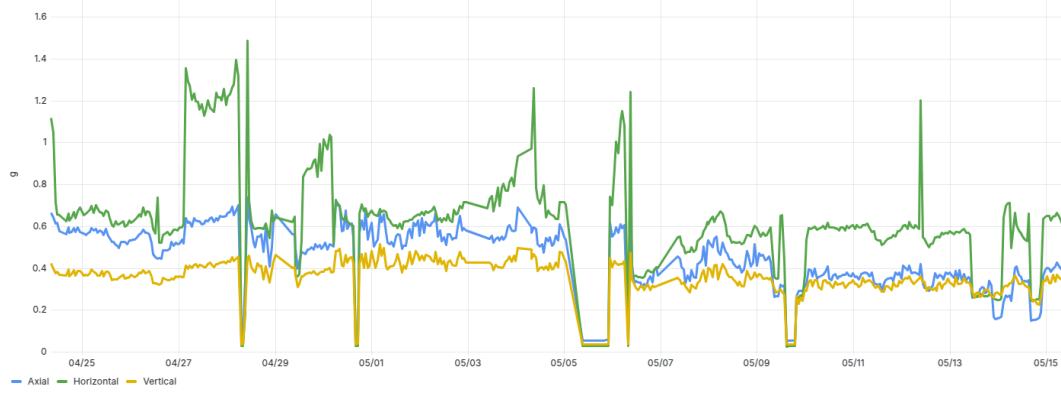
RMS (Root Mean Square), sinyalin ortalama enerjisini ifade etmektedir. Denklem (6)'da RMS değerinin nasıl hesaplandığı gösterilmektedir.

Denklemdaki a_i , her bir ivme değerini, n ise toplam veri sayısını ifade etmektedir.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i^2} \quad (6)$$

Düşük ivme-RMS seviyesi makinenin kararlı bir şekilde çalıştığı anlamına gelmektedir. Yüksek ivme-RMS seviyesi makinenin yüksek seviyelerde titreştiğini göstermektedir. Bu durum makinede dengesizlik, gevşeklik veya

aşınma gibi arızaların varlığına ve bu arızaların alt bileşenlere (rulman, dişli vb.) etki etmeye başladığına işaret etmektedir.



Şekil 6. Vakum fanı için üç eksenli ivme-RMS grafiği.

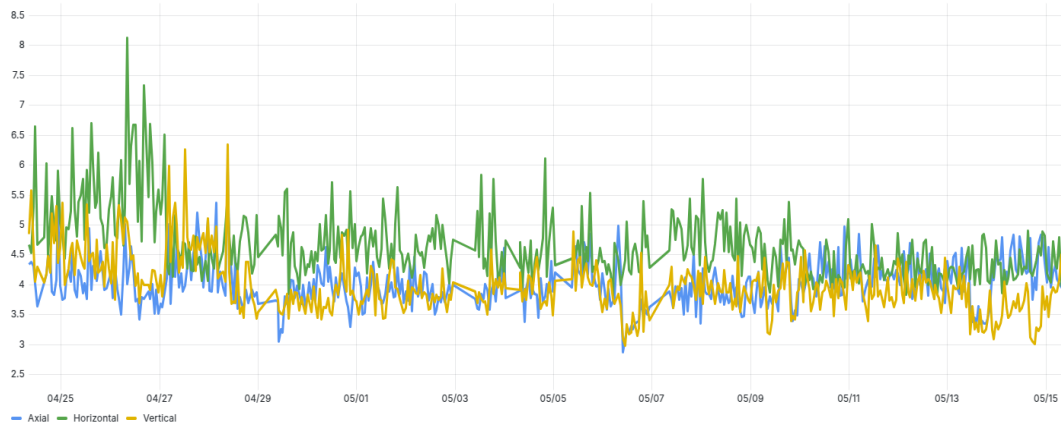
RMS değerindeki zamanla oluşan değişimler makinenin durumu hakkında yorum yapmak için kullanılabilir. Şekil 6'da üç eksenle toplanan verinin ivme-RMS grafiği yer almaktadır. Grafiğe dikkatli bakılırsa yatay eksenle RMS seviyesinin yüksek olduğu rahatlıkla görülmektedir. Burada sadece yakınsanan değerlerin sistematik veya monoton yükselmesi değil, bu davranışın hangi eksen/eksenlerde meydana geldiği arızanın tespitinde önemli ipuçları vermektedir. Örneğin hız-RMS seviyesindeki yatay ve dikey eksenlerde hemen hemen aynı orandaki kararlı bir yükselme milde salgı veya rotor ağırlık merkezinin dönüş eksenine ile çakışmamasından kaynaklanan balanssızlık probleminin en temel göstergesidir. Uygulama örneklerinde bu ve benzeri arızalardan bahsedilecektir.

3.4.5. Crest factor

Makine çalışması sırasında oluşan kısa süreli ve yüksek genliğe sahip darbeleri tespit etmek için kullanılan bir yöntemdir. Denklem (7)'de yer alan tepe değer, verinin sıfır noktasından ulaştığı en yüksek genlik değeridir.

$$Crest\ Factor = \frac{Tepe\ Değeri}{RMS\ Değeri} \quad (7)$$

Genellikle 1.4 ile 5 arasında bir değere sahiptir. Düşük değerler makinenin genel olarak sağlıklı olabileceğine işaret ederken, yüksek değerler ise makinedeki rulmanlarda çapak, kırık veya bölgesel hasarlar olabileceği ihtimalini vurgular. Şekil 7'de örnek bir grafik yer almaktadır.



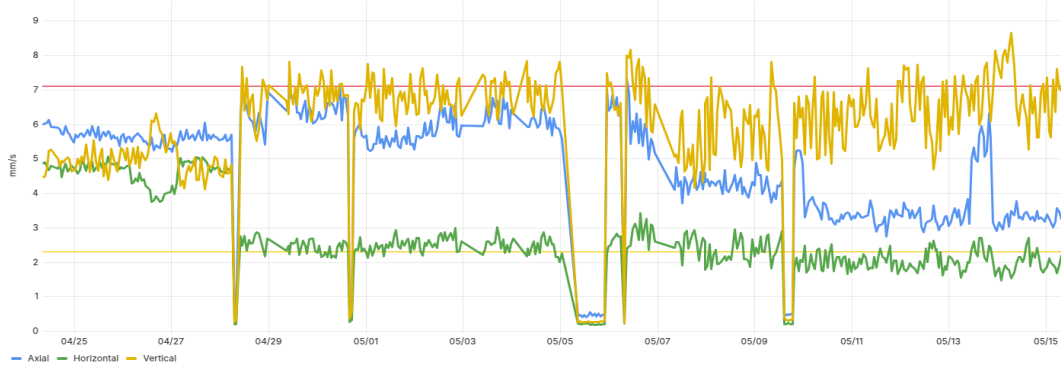
Şekil 7. Vakum fanı için üç eksenli crest faktör grafiği.

3.4.6. RMS hız

Titreşim verisini kullanarak makinenin genel durumunu izlemek ve analiz etmek için kullanılan bir değişkendir. Denklem (8)'de yer alan v_i her bir hız değerini ifade ederken n değeri toplam veri sayısını ifade eder.

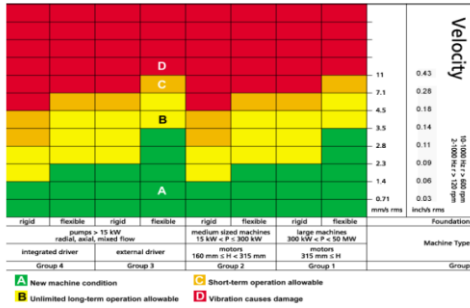
$$RMS\ Velocity = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (8)$$

Bu değer sistemin genel titreşim seviyesini ifade eder. Titreşim seviyesinin artması makinede dengesizlik, hizasızlık, gevşeklik gibi sorunların arttığına işaret eder.



Şekil 8. Vakum fanında üç eksen için elde edilen genel titreşim seviyesinin zamanla değişimi.

Şekil 8'de üç eksen de toplanan genel titreşim seviyeleri yer almaktadır. Kritik seviyeler her makine için farklılık göstermektedir. Bu seviyelerin doğru tanımlanması sorunların erken aşamalarda tespit edilebilmesi için önemli bir rol oynamaktadır. Bu seviyelerin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için ISO 10816-3 standardı geliştirilmiştir [23].



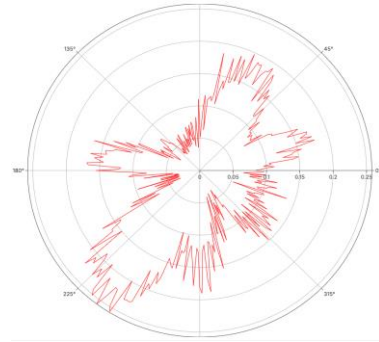
Şekil 9. ISO 10816 standardı; en güncel versiyonuna ISO 20816 üzerinden ulaşılabilir.

Şekil 9'da makine için uygun seviyelerin belirlendiği ISO 10816 standardı yer almaktadır. Titreşim seviyeleri analiz edilmek istenilen makinenin güç kapasitesi, montaj tipi ve fiziksel boyutuna uygun şekilde belirlenmelidir.

3.4.7. Dairesel Dalga

Titreşim verisi içerisinde bulunan ve bir devir boyunca tekrar eden titreşim örüntülerini görselleştirmek için kullanılan bir yöntemdir. Veriyi zaman yerine açısal olarak göstermek milin yatağa göre izafi konumunun temsiliyeti

elde edilir. Bu sayede her dönüşte tekrar eden arızalar daha net ortaya çıkmaktadır. Kaskak, kaplin, dişli gibi döner parçalarda oluşabilecek arızaları tespit etmek için etkili bir yöntemdir. Şekil 10'da titreşim verisinden elde edilen dairesel dalga yer almaktadır.



Şekil 10. Titreşim verisinin dönme periyoduna göre açısal olarak gösterimi.

Zaman sinyalini açısal veriye çevirmek için ilk olarak örnekleme frekansı ve RPM kullanılarak bir tam dönüşte kaç adet veri olduğu hesaplanır. Daha sonra titreşim sinyali normalize edilir ve otokorelasyon yöntemi kullanılarak faz kaymaları önlenir. Zamanla senkron ortalama (TSA) yöntemi kullanılarak [17] her devirdeki benzer noktaların ortalaması hesaplanır. Genlik yarıçap, zaman ise açı olarak kullanılır ve veri kutupsal koordinatlara aktarılır. Bu yöntem ile devir ve harmoniklerinde tekrar eden arızalar net bir şekilde belirlenebilir. Şekil 11'de dairesel dalga yönteminin genel yapısını ifade eden algoritma yer almaktadır.

```

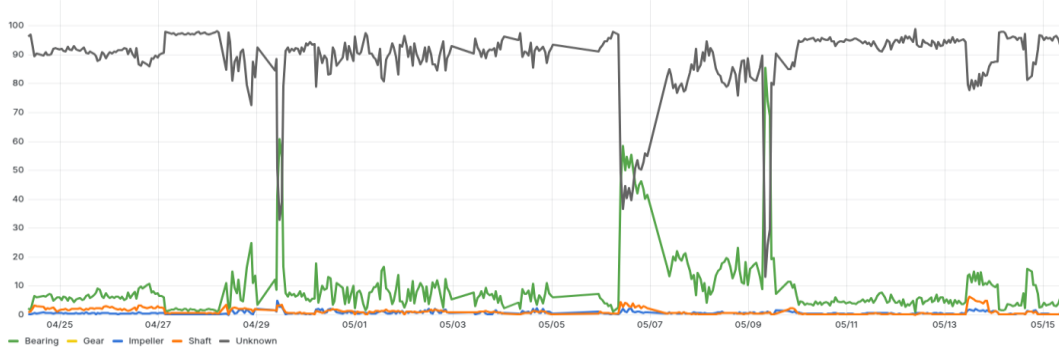
CIRC_PLOT(x, fs, rpm)
N ← ROUND(fs * 60 / rpm)
x_norm ← NORMALIZE(x)
x_aligned ← ALIGN(x_norm)
theta ← 0..360 range with N values
tsa ← AVERAGE(x_aligned) every N steps
radius ← SCALE(tsa)
RETURN(theta, radius)

```

Şekil 11. Dairesel dalga algoritması.

3.4.8. Enerji analizi

Makinedeki sorunların hangi döner alt bileşenden kaynaklandığını olasılıksal olarak belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada makinede yer alan şaft, rulman ve rotor kanatları incelenerek bir analiz yapılmıştır. Şekil 12’de yapılan çalışma sonucu elde edilen enerji analizinin zamanla değişimi yer almaktadır.



Şekil 12. Rulman, şaft ve kanat bileşenlerinin zamana göre ham verideki enerji dağılımı analizi.

Enerji kaynağı analizinde ilk olarak titreşim verisinin frekans alanındaki toplam enerjisi hesaplanır. Daha sonra her bir makine parçasının bu enerjideki payının yakınsanması için titreşim gücü hesaplanır ve toplam titreşim enerjisine oranlanır. Bu sayede makinedeki arazının hangi parçadan kaynaklandığı, dolayısıyla arızalanan kök nedeni tespit edilebilir. Şekil 13’te enerji analizi yöntemi için kullanılan fonksiyonların genel yapısını ifade eden algoritma yer almaktadır. Endüstride bilinen uygulamalar içinde ve literatürde bu yöntem bulut tabanlı bir sistemde ilk defa kullanılmış ve bu makalede detaylandırılmıştır.

```

CALCULATE_TRENDS(sig, f_vec, fs, faults)
bands ← DEFINE_BANDS(faults)
total ← TOTAL_POWER(sig, f_vec)

for comp in [shaft, gear, bearing, impeller]
  f_bands ← GET_BANDS(comp, bands)
  power ← BAND_POWER(sig, f_vec, f_bands)
  pct ← POWER_PCT(power, total)
  if comp == gear
    sig ← NOTCH_FILTER(sig, fs, f_bands)

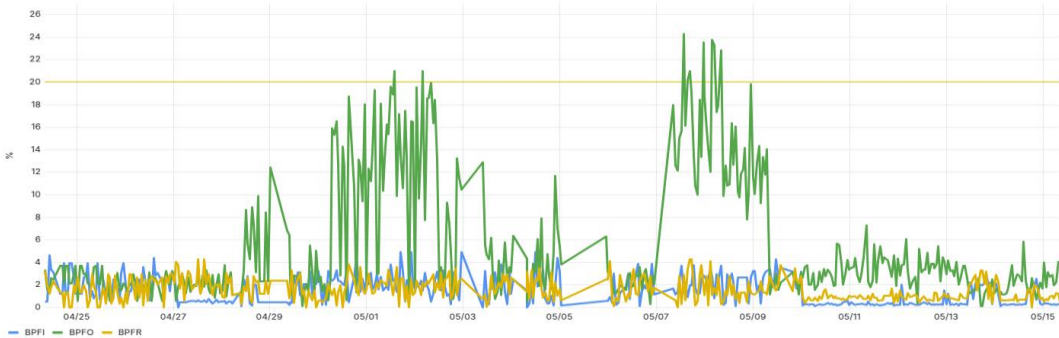
unknown ← CALC_UNKNOWN(pct)
RETURN pct + unknown

```

Şekil 13. Enerji analizi algoritması.

3.4.9. Rulman arızaları

Rulmanlar makinelerdeki döner bileşenlerin hareketini kolaylaştırmak ve sürtünmeyi azaltmak için kullanılan mekanik bileşenlerdir [15]. Yetersiz yağlama, aşırı yüklenme veya mekanik yorulma gibi nedenlerden dolayı zamanla rulman bileşenlerinde hasarlar meydana gelmekte ve plansız duruşlar yaşanabilmektedir.



Şekil 14. Rulman alt bileşen arızalarının zamana bağlı değişimi.

Şekil 14’de rulman bileşenlerinden iç bilezik (BPFI), dış bilezik (BPFO) ve bilya (BPFR) arızalarının enerji analizine benzer şekilde hesaplanan normalize edilmiş değerlerinin zamanla değişimi yer almaktadır.

4. DENEYSEL BULGULAR

Bu bölümde yapılan analizler sonucunda elde edilen bulgular balanssızlık ve rulman arızaları tespitleri ilgili verilerden yola çıkarak değerlendirilmiştir. Endüstriyel ortamda ve değişken koşullarda (yük, devir, arızanın şiddeti) kontrollü deneyler yapılamadığından, eldeki endüstriyel ekipman ve rulmanlarında gözlenebilen arıza durumları incelenmiştir.

4.1. Balanssızlık Tespiti

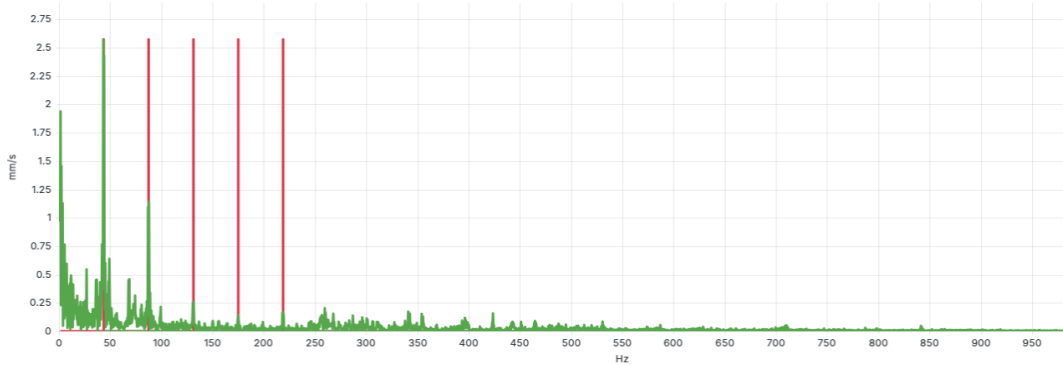
Balanssızlık, endüstriyel döner makinelerde, özellikle fanlarda sıklıkla karşılaşılan statik kuvvetlerden biridir. Genellikle kütlenin dengesiz dağılmasından, yani kütle merkezi ile dönme ekseninin çakışmamasından kaynaklanmaktadır. Bu dengesizlik makinenin çalışma esnasında normalin üzerinde ve dönüş hızı ile ilişkilendirilebilen titreşimlere maruz kalmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada fan rotorundaki statik balanssızlık ele alınmaktadır.

Yapılan analizlerde titreşim seviyesinin yalnızca dikey eksenle sistematik olarak

yükseldiği belirlenmiştir. Değerler makine için belirlenen ISO 10816 standardının üzerindedir. Dikey eksenle meydana gelen titreşimler yataklarda oluşan boşluklar ya da gevşemelerden kaynaklanabileceği gibi fan kanatlarında biriken kirden veya balanssızlık gibi nedenlerden ötürü gözlenebilmektedir.

Crest factor, skewness ve kurtosis değerleri normal aralıklar içerisinde kaldığı belirlenmiştir. Bu durum sinyalin simetrik olduğunu, en azından ham veride görünür şekilde rulman ve kasnakta herhangi bir kırık veya kopmaya bağlı ani darbe üreten arızalar olmadığını göstermektedir.

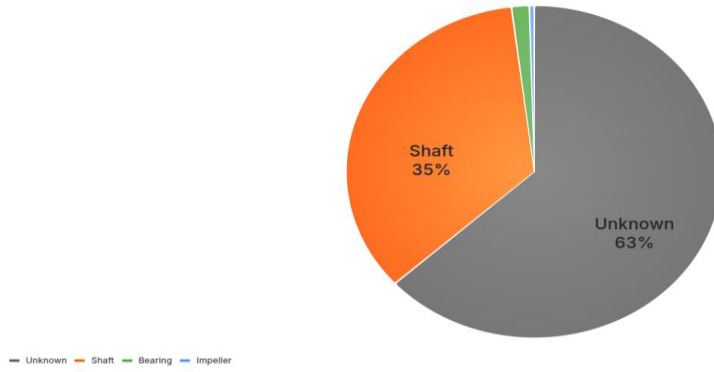
Bahsedilen yöntemler tek başına balanssızlık tespiti için yeterli değildir. Daha kesin kararlar verebilmek için spektrum analizi ve enerji analizinden de faydalanılmalıdır. Şekil 15’de toplanan veriler ile elde edilmiş hız (mm/s) FFT grafiği yer almaktadır. Kırmızı çizgiler şaft dönüş frekansı ve harmoniklerini (katlarını) göstermektedir. Bu değerlerin spektrumdaki genliği yüksek noktalar ile birebir örtüşmesi sorunun sadece rotordaki balanssızlıktan değil, aynı zamanda yatak ve kasnak boşluklarından, hatta titreşim takozlarının işlevini yitirmesinden kaynaklandığını göstermektedir.



Şekil 15. Hız sinyali için FFT grafiği devir ve harmonikleri ile birlikte gösterilmiştir.

Şekil 16’da bileşenlerin titreşim verisi üzerindeki enerji dağılımı yer almaktadır. Enerji analizi sonucunda titreşim verisi

içerisindeki en yüksek enerjinin şafttan geldiği belirlenmiştir.



Şekil 16. Balanssızlık tespiti için kullanılan bileşenlerin titreşim toplam enerjisine katkı yüzdeleri.

Gerçekleşecek ilk planlı duruş esnasında shaftın özellikle dikey ekseninde serbest bir şekilde hareket edip etmediği mekanik olarak değerlendirilmeli ve aşınma veya boşluk olup olmadığı belirlenmelidir. Ayrıca fan kanatları temizlenmeli ve titreşimi sönmölemek için kullanılan takozlarda sertleşme, deformasyon ve görevini yerine getirip getirmediği gibi durumlar kontrol edilmelidir.

Analizler sonucunda belirlenen sistematik yükselmeler, anlık artışlardan ziyade zamanla gelişen yapısal ve mekanik arızaları ifade etmektedir. Bu nedenle balanssızlık tespit etmek için makine tahrik eden ve edilen kısımları içerecek şekilde bir bütün olarak analiz edilmelidir

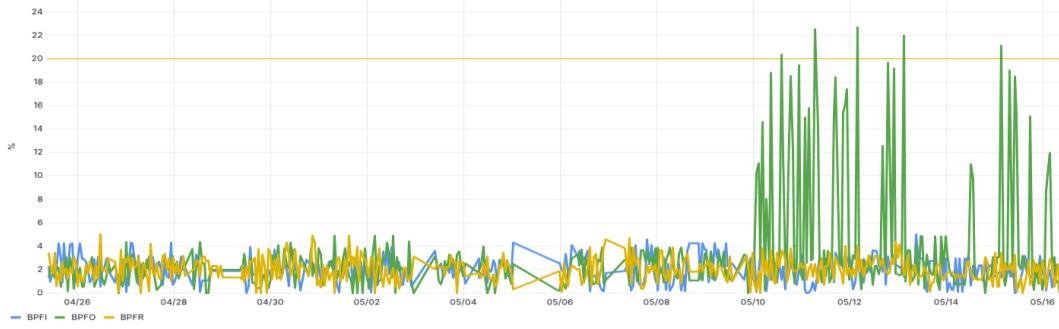
4.2. Rulman Arıza Tespiti

Rulman arızaları endüstride en sık karşılaşılan kritik sorunlardan bir tanesidir. Şekil 17’de çalışma kapsamında incelenen ve ivme sensörünün doğrudan yatağına monte edildiği rulmanın görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 17. SKF 2213 EKTN9 tipi rulmanın yataktaki yapısal görünümü.

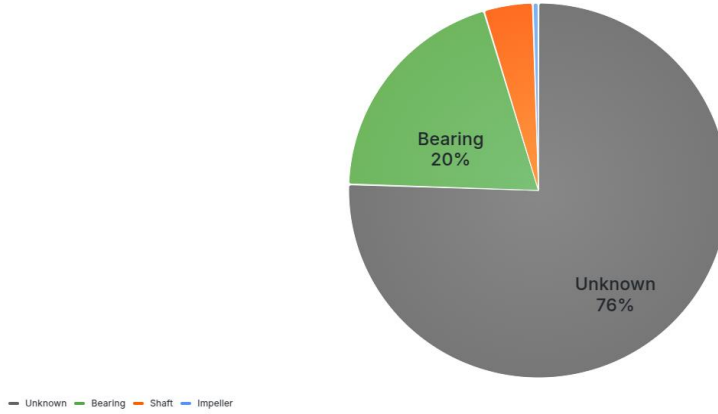
Rulman üzerinde yapılan analizler sonucunda dış bilezik arızası tespit edilmiştir. Ham titreşim verileri, yinelemeli bir optimizasyon algoritması ile ilintisiz gürültü ve diğer titreşimlerden temizlenerek, altta yatan maskelenmiş rulman arıza sinyaline denetimsiz öğrenme yöntemi ile ulaşılmıştır. Detaylandırmak gerekirse, arızalı rulmanlardan ortaya çıkan vurgusal titreşimler, ekipmandaki ilintisiz diğer sinyaller, gürültü ve arıza sinyalin rulman-sensör arasındaki seyahati sonucu bozulmaya uğrarlar. Bu nedenle, ekipmanın şasesinden alınan titreşim ölçümlerinde (ham veride) arızaya ait karakteristik titreşimler gözlenemez. Rulman arıza sinyali ile ilintisiz ve bu sinyali bozucu etkisi olan tüm istenmeyen titreşimlerin, eş zamanlı olarak adaptif lineer filtrelerin ham verinin olasılık yoğunluk fonksiyonundaki asimetriyi geri kazanmak üzere tasarlanması ve optimizasyonu ile tamamen ortadan kaldırılması ve bastırılması yöntemi ile ulaşılabilir. Bu analizlerin detayları ilgili referansta bulunabilir [15]. Şekil 18’de BPFO (rulman dış bilezik) değerinin zaman zaman %20 olarak belirlenen uyarı seviyesini geçtiği tespit edilmiştir. Bu durum dış bilezikte bir arıza olabileceğini ifade etmektedir.



Şekil 18. BPFI, BPFO ve BPFR arıza frekanslarının zamana bağlı eğilimleri.

Yapılan enerji analizi de bu bulguyu doğrular niteliktedir. Şekil 19'da enerji analizi sonucu elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Bu sonuçlardan yola çıkarak en fazla titreşim enerjisi üreten bileşenin rulman olduğu tespit

edilmektedir. Planlı duruş esnasında rulman yatağı üst kapağı açılarak yapılan incelemelerde, rulman tespit bileziğinin fazla sıkıldığı ve tanelerdeki bu baskının dış bileziğe yansıdığı tespit edilmiştir.



Şekil 19. Rulman arıza tespiti için kullanılan bileşenlerin enerji katkı yüzdeleri.

Elde edilen sonuçlar, geliştirilen sistemin rulman arızalarını tespit etmede başarılı olduğunu göstermektedir.

5. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında 3-eksenli kablosuz ivme sensörlerinden elde edilen endüstriyel veriler kullanılarak balanssızlık ve rulman arızalarını belirlemek hedeflenmiştir. Makineye yerleştirilen 3-eksenli tek bir ivme sensörü sayesinde toplanan veriler crest factor, skewness, kurtosis, gibi farklı istatistiksel hesaplamalar ile değerlendirilmiştir. Geliştirilen yazılım benzerlerinden farklı olarak enerji analizi yöntemini de kullanmaktadır. Bu sayede tek bir ivme sensöründen toplanan veri kullanılarak sadece arıza oluşumunu değil hangi makine bileşenlerinden kaynaklandığını da başarılı bir şekilde tespit etmektedir.

Çalışmanın uygulandığı firmada uygulamanın yerleştirildiği tarihten sonra gelişmeye başlayan milde salgı ve rulman arızası erken aşamada

tespit edilmiştir. Başka bir makinede oluşmaya başlayan balanssızlık sorunu da başarılı bir şekilde tespit edilmiştir.

Kestirimci bakım ile plansız duruşlar en aza indirilmiş, zaman, yedek parça ve iş gücünden tasarruf sağlanmıştır. Bu yönü ile geleneksel bakım stratejilerine göre avantajlı olduğu anlaşılmaktadır.

IoT teknolojileri makinelerin sürekli olarak izlenmesini, ivme sensörlerinden gerçek zamanlı veri almayı ve alınan verilerin bulut ortamına aktarılmasını mümkün kılmaktadır. Bulut ortamında geliştirilen sistem sayesinde makine sağlığı sürekli olarak izlenebilmekte ve arıza başlangıcı tespit ettiğinde otomatik olarak mail göndererek kullanıcıları uyarmaktadır. Bu sayede kullanıcılar plansız duruşa sebep olmadan önce sorunları görerek önlem alabilmektedir.

TEŞEKKÜR

Öncelikle çalışmanın temellendiği Tekirdağ Muratlı yerleşkesindeki endüstri partnerimize, sonrasında ürünlerini kullandığımız Ascribo firmasına ve katkı sağlayan diğer tüm kişi ve kurumlara teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Romanssini, M.; de Aguirre, P. C.; Compassi-Severo, L.; Girardi, A. G., "A review on vibration monitoring techniques for predictive maintenance of rotating machinery", Eng, Vol 4, Issues 3, Pages 1797-1917, 2023.
2. Sunetcioglu, S., Arsan, T., "Predictive Maintenance Analysis for Industries", Cirpan, H., Hokelek, I., Shakir, M., 2024 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), Pages 344-347, IEEE, Gürcistan, 2024.
3. Chu, T., Nguyen, T., Yoo, H., Wang, J., "A review of vibration analysis and its applications", Heliyon, Vol. 10, Issues 2, Pages 1-13, 2024.
4. Pinheiro, A. A., Brandao, I. M., Da Costa, C., "Vibration analysis in turbomachines using machine learning techniques", European Journal of Engineering and Technology Research, Vol. 4, Issues 2, Pages 12-16, 2019.
5. Arora, J. K., Rajagopalan, S., Singh, J., Purohit, A., "Low-frequency adaptation-deep neural network-based domain adaptation approach for shaft imbalance fault diagnosis", Journal of Vibration Engineering & Technologies, Vol. 12, Issues 1, Pages 375-394, 2024.
6. Gürsoy, M.Ü., Çolak, U.C., Gökçe, M.H., Akkulak, C., Ötleş, S., "Endüstri için kestirimci bakım", International Journal Of 3D Printing Technologies And Digital Industry, Cilt 3, Sayı 1, Sayfa 56-66, 2019.
7. ASCRIBO Applied Sciences Inc., "ABLE System", <https://www.ascrigo.io/products/able-system>, May 20, 2025.
8. Yuan, X., He, Y., Wan, S., Qiu, M., Jiang, H., "Remote vibration monitoring and fault diagnosis system of synchronous motor based on internet of things technology", JMobile Information Systems, Vol. 2021, Issues 1, Pages 345-624, 2021.
9. Tandon, N., Yadava, G.S., Ramakrishna, K.M., "A comparison of some condition monitoring techniques for the detection of defect in induction motor ball bearings", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, Issues 1, Pages 244-256, 2007.
10. Demir, H.G., Müştak, O., "Rulman hasarlarının titreşim ve gürültü analizi ile tespiti", Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Sayı 25, Sayfa 571-581, 2021.
11. Yaman, G., Karadayı, H.M., "Titreşim analizi ile pompalarda arıza tesbiti ve kestirimci bakım için örnek bir çalışma", Tesisat Mühendisliği, Sayı 140, Sayfa 36-51, 2014.
12. Günindi, Z.Ö., Kurban, A.O., Danışmaz, M., "Soğutma fanının kestirimci bakım yöntemi uygulaması ile titreşim analizi ve yapısal esneklik arızasının giderilmesi", Icontech International Journal Of Surveys, Engineering, Technology, Vol. 6, Issue 1, Pages 33-41, 2022.
13. Aydın, G., Meral, C., "Çimento Sektöründe Kestirimci Bakımla Arıza Teşhisi ve Önlenmesi", Mühendis ve Makina , Cilt 59, Sayı 692, Sayfa 48-67, 2018.
14. Daniel, C.K., Michael, L. T., "An Optimal placement of triaxial accelerometers for modal vibration tests", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 18, Issues 1, Pages 29-41, 2003.
15. Ovacıklı, A.K., Paajarvi, P., LeBlanc, J.P., Carlson, J.E., "Recovering Periodic Impulsive Signals Through Skewness Maximization", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 64, Pages 1586-1596, 2016.
16. Baloğlu, A., Karademiroğlu, O., "Akıllı şehirlerde kablosuz haberleşme teknolojileri ve doğru teknoloji seçimi", İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt 1, Sayı 1, Sayfa 25, 2019.
17. Randall, R.B., Antoni, J., "Rolling element bearing diagnostics - A tutorial", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 25, Issues 2, Pages 485-520, 2011.
18. Kam, M., Gülle, S., "Fan kanatlarındaki dengesizliğin ve yuvarlanmalı yatak arızasının titreşime etkisi", International Journal Of 3D Printing Technologies And Digital Industry, Cilt 7, Sayı 1, Sayfa 1-8, 2023.
19. Alçelik, N., Kam, M., "Dönen makinelerde eksenel kaçıklık ve dengesizliğin titreşim analizi", BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 7, Sayfa 256-296, 2020.
20. Eraslan, B., Uysal, A., "Endüstri 4.0 çağında Türkiye: akıllı fabrikaların yükselişi ve mekânsal dinamikler", Mavi Atlas, Cilt 12, Sayı 2, Sayfa 505-517, 2024.

21. Albayrak, A., Kaynaklı, M., “Kestirimci bakım teknolojileri”, Sayfa 10-11, Duvar Yayınları, İzmir, 2024.
22. Ovacikli, A.K., Yağcıoğlu, M., Demircioğlu, S., Kocatekin, T., Birtane, S., “Supervised Learning-Based Fault Classification in Industrial Rotating Equipment Using Multi-Sensor Data”, MDPI Vol. 15, Issues 13, Pages 1-27, 2025.
23. ISO, “ISO 10816-1:1995 - Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 1: General guidelines”, <https://www.iso.org/standard/18866.html>, May 20, 2025.