



Döner ekipmanlarda dairesel dalga yöntemi ile arıza tespiti Fault detection in rotating equipment using the circular plot

Emin Öztürk^{1,*} , Aziz Kubilay Ovacıklı² 

¹ Environics Uygulamalı Bilimler A.Ş, Namık Kemal Üniversitesi Teknopark, 59850, Tekirdağ Türkiye

² İstanbul Arel Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, 34537, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, döner makinelerden elde edilen titreşim verilerinin mekanik arızanın kök nedenini açıklayacak bir biçimde analiz edilebilmesi amacıyla dairesel dalga yöntemine dayalı yenilikçi bir yaklaşım geliştirilmiştir. Döner ekipmanlarda meydana gelen arızalar açısız olarak tekrar eden titreşim karakteristiği sergilediği için, zaman veya frekans düzlemindeki ham verilerin yorumlanması çoğu durumda yetersiz kalmaktadır. Bu kısıtlamayı aşmak amacıyla, titreşim sinyallerini devir senkronlu polar grafiklere dönüştüren ve yüksek frekanslı gürültüleri elimine eden bir analiz algoritması tasarlanmıştır. Geliştirilen yöntem, saha koşullarında 2700 rpm vakum fanları, 1425 rpm akuple toz emiş fanları ve 1500 rpm tahrikli krank-şaft mekanizmalı pistonlu pompalar üzerinde test edilerek doğrulanmıştır. Elde edilen dairesel dalga grafikleri, geleneksel FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) analizinin "faz körü" (phase-blind) yapısı nedeniyle ayırt edemediği, mildeki mikro seviyeli salgı, motor ön kapak aşınmasından kaynaklanan yatak gevşemesi ve krank-şaft mekanizmalarındaki dişli boşluğu (backlash) gibi karmaşık arızaları %90'ı aşan bir doğrulukla teşhis etmiştir. Sonuç olarak, dairesel dalga yaklaşımının kestirimci bakım süreçlerinde hem kök neden analizindeki görselleştirme kabiliyeti hem de arıza tespit hassasiyeti açısından geleneksel yöntemlere güçlü bir alternatif ve tamamlayıcı çözüm sunduğu kanıtlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Kestirimci bakım, Dairesel dalga, Bulut bilişim

1 Giriş

Üretim süreçleri içerisinde önemli yer tutan motor, fan, türbin, pompa gibi döner bileşenlerden oluşan makinelerin kesintisiz ve verimli bir şekilde çalışması işletmeler için kritik öneme sahiptir. Makinelerde oluşacak beklenmeyen arızalar yalnızca üretim kaybına değil, aynı zamanda ciddi güvenlik risklerine de neden olmaktadır. Riskleri en aza indirmek ve oluşabilecek arızaları erken aşamalarda tespit edebilmek için makinelerin sürekli olarak izlenmesi gerekmektedir.

Geleneksel bakım yöntemlerinde bakım faaliyetleri periyodik olarak ya da arıza meydana geldikten sonra uygulanmaktadır. Endüstri 4.0 ve nesnelerin interneti (IoT) alanlarından yaşanan gelişmeler ile birlikte üretim süreçleri dijitalleşmiş, sensör teknolojilerinde önemli ilerlemeler

Abstract

In this study, an innovative approach based on the circular wave method has been developed to analyze vibration data from rotating machinery and reveal the root cause of mechanical faults. Because faults in rotating equipment exhibit angularly repetitive vibration characteristics, interpreting raw data in the time or frequency domain is, in most cases, insufficient. To overcome this limitation, an analysis algorithm was designed that transforms vibration signals into revolution-synchronous polar plots while eliminating high-frequency noise. The developed method was tested and validated under field conditions on 2700 rpm vacuum fans, 1425 rpm coupled dust extraction fans, and 1500 rpm crankshaft-driven piston pumps. The resulting circular wave plots successfully diagnosed complex faults—such as micro-level shaft runout, bearing looseness caused by motor front cover wear, and gear backlash in crankshaft mechanisms—with an accuracy exceeding 90%, which traditional FFT (Fast Fourier Transform) analysis fails to distinguish due to its "phase-blind" nature. Consequently, the circular wave approach has proven to be a robust alternative and a complementary solution to traditional methods in predictive maintenance, offering superior visualization capabilities for root cause analysis and high sensitivity in fault detection.

Keywords: Predictive maintenance, Circular plot, Cloud computing

sağlanmıştır. Böylece gözleme dayalı bakım yöntemleri yerini veriye dayalı bakım yöntemlerine bırakmaya başlamıştır [1].

IoT ile birlikte makinelere yerleştirilen sensörler sayesinde titreşim, sıcaklık, akustik, basınç, debi gibi veriler toplanarak üretim süreçlerindeki kritik ekipmanlar bulut tabanlı kestirimci bakım algoritmaları tarafından analiz edilebilmektedir [2-4].

Kestirimci bakım, makinelerin çalışması sırasında toplanan gerçek zamanlı verilerin analiz edilerek arızaların duruşa sebep olmadan önce tespit edilmesini ve bu arızaların gelişim süreçlerini gözlemlemeyi hedefleyen bir bakım yöntemidir [5, 6]. Özellikle titreşim analizi gibi teknikler ile birlikte kullanıldığında, döner bileşenlerin davranışlarını analiz etmede güçlü bir araç olmaktadır [7-9]. Titreşim

verilerinin analizi ile makinede meydana gelen eksenel kaçıklık (misalignment), dengesizlik ve parçalar arasındaki bağlantıların rijitliğini kaybetmesiyle ortaya çıkan gevşeklik gibi mekanik arızalar erken aşamalarda tespit edilebilir.

Toplanan titreşim verilerinin dairesel dalga formunda görselleştirilmesi, dönme hareketi sırasında oluşan titreşim genliğinin analiz edilmesini ve dönme hareketine temel oluşturan bileşenlerin (şaft, pompa veya fan kanadı, dişliler) yataklarına izafi konumlarının görülebilmesini mümkün hale getirmektedir. Özellikle yüksek hızda dönen bileşenlerde arızanın yönü ve büyüklüğünü tespit etmeye yardımcı olmaktadır.

2 Literatür taraması

İşletmelerin kesintisiz bir şekilde üretim yapabilmesi için makine sağlığı kritik bir öneme sahiptir. Makine sağlığını izlemek için geliştirilen çoğu sistem kestirimci bakım yöntemine dayanmaktadır. Yapılan çalışmalar kestirimci bakımın işletmelere olan katkılarını net bir şekilde göstermektedir [10, 11].

İlgın vd. [12] paketleme fabrikasındaki üretim performansını değerlendirmek için istatistiksel yöntemler kullanan bir kestirimci bakım uygulaması geliştirmişlerdir. Makinelere toplanan sıcaklık ve basınç gibi değerlerin analiz edilmesiyle plansız üretim duruşlarını önlemeyi hedeflemiştir.

Pirge vd. [13] plansız duruşları önlemek için makine öğrenmesi temelli kestirimci bakım sistemi geliştirmişlerdir. Makine öğrenmesi yöntemlerinden olan k-en yakın komşu, karar ağacı, Naive Bayes gibi algoritmalar kullanılarak toplanan sıcaklık, titreşim ve nem değerleri analiz edilmiştir. Bu yaklaşım ile oluşabilecek arızaları erken aşamalarda tespit etmek amaçlanmıştır.

Sındır vd. [14] asenkron motordan elde ettikleri verileri kullanarak bulanık mantık sistemi geliştirmiştir. Bu sistemin amacı sorunun ne olduğunu tespit etmekten çok sorun olup olmadığını belirlemek ve motor sağlığı hakkında tahminde bulunmaktır.

Santrifüj fanların aerodinamik kararlılığı üzerine yapılan çalışmalar, giriş boşluğu oranlarının tonal gürültü ve performans üzerindeki etkilerini vurgulamaktadır [15, 16]. Benzer şekilde, sistemdeki kararsız akış rejimlerinin deneysel analizi ve çark üzerindeki eksen kaçıklığı gibi geometrik kusurların spektral karakteristiklerde yol açtığı değişimler literatürde detaylandırılmıştır [17, 18].

Literatürdeki mevcut çalışmalar incelendiğinde, titreşim analizinin büyük oranda FFT spektrumu ve zaman-frekans düzlemindeki dönüşümlere odaklandığı görülmektedir. Ancak geleneksel yöntemler arıza kaynaklı sinyal değişimlerini mildeki açılma konumuyla doğrudan ilişkilendirmekte ve faz bilgisini görselleştirmede kısıtlı kalmaktadır. Bu çalışma kapsamında, literatürdeki bu eksikliği gidermek amacıyla, Zaman Senkronlu Ortalama (TSA) ile polar izdüşümü birleştiren dairesel dalga analizi yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşım, arıza karakteristiklerini bir geometrik imza olarak sunarak, geleneksel spektrum analizinde fark edilmesi güç olan durumların doğrudan görsel teşhisine imkân tanımaktadır.

3 Yöntem

Bu bölümde geliştirilen kestirimci bakım sisteminin işleyişi ele alınacaktır. Makinelere veri toplama yöntemi, istatistiksel veri analiz süreçleri ve dairesel dalga yöntemi incelenecektir.

3.1 Veri toplama süreci

Çalışma kapsamında makinelere veri toplamak için Ascribo markasına ait 3 eksenli ivme sensörü olan Able Sens ve endüstriyel ağ geçidi kullanılmıştır. Söz konusu sistemler, endüstride yaygın olarak kullanılan farklı tahrik mekanizmalarını temsil edecek şekilde seçilmiştir. İlk uygulamada motor, bir kayış-kasnak mekanizması aracılığıyla vakum fanını tahrik etmektedir. Sensör, fanın tahrik tarafındaki (kasnak tarafı) tek rulmanlı yataklama ünitesi üzerine, dikey, yatay ve eksenel ölçüm alacak şekilde yerleştirilmiştir. Buna ek olarak, yöntem doğrudan motor miline bağlı (akuple) toz emiş fanları ve karmaşık bir dişli/krank-şaft mekanizmasına sahip pistonlu pompalar üzerinde de uygulanmıştır. Her bir makine grubunda sensörler, mekanik arızaların en net hissedildiği yataklama noktalarına konumlandırılarak veri toplama süreci standardize edilmiştir. MEMS (Micro-electro-mechanical systems) ivme sensörü, sistemin otonom çalışma yapısı sayesinde bir saat arayla otomatik olarak makinelere 12800 Hz örnekleme hızı (sampling rate) ile her bir ölçüm periyodunda 2 saniye boyunca toplam 25600 örnekten oluşan titreşim verisi toplayarak endüstriyel ağ geçidine göndermektedir. Sistemin sahip olduğu yüksek örnekleme kapasitesi, analizlerde 5 kHz seviyesinde doğrusal (flat) bir bant genişliği elde edilmesine olanak tanımaktadır. Veri toplama aşamasında toplanan verinin tam olarak makineyi ifade etmesi için doğru ölçüm süresini ve örnek sayısını belirlemek, analiz performansı için kritik bir öneme sahiptir. Yetersiz veri sayısı veya düşük ölçüm süresi, dairesel dalga grafiklerinde eksik veya yanıltıcı desenlerin oluşmasına neden olmaktadır. [19]. Şekil 1'de veri toplamak için kullanılan sensör yer almaktadır.

Endüstriyel ağ geçidine ulaşan veriler buradan bulut ortamındaki kestirimci bakım sistemine gönderilir. Python programlama dilinin 3.12 versiyonu ile geliştirilmiş uygulama tarafından analiz edilen veriler kullanıcılar için hazırlanmış olan web arayüzünde görselleştirilmektedir.



Şekil 1. Vakum fanında kasnak tarafı yataklamaya yerleştirilmiş 3 eksenli Able Sens ivme sensörü

3.2 Analiz yöntemleri

Titreşim verileri motor, fan, pompa, redüktör gibi döner makinelerin davranışlarında meydana gelen değişiklikleri doğrudan temsil ettiği için kestirimci bakım sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Toplanan veriler kestirimci bakım uygulaması içerisinde yer alan titreşim analizi yöntemleri kullanılarak analiz edilmektedir. Geliştirilen çalışmada makine sağlığı hakkında yorum yapmayı sağlayan farklı titreşim analizi yöntemleri kullanılmıştır.

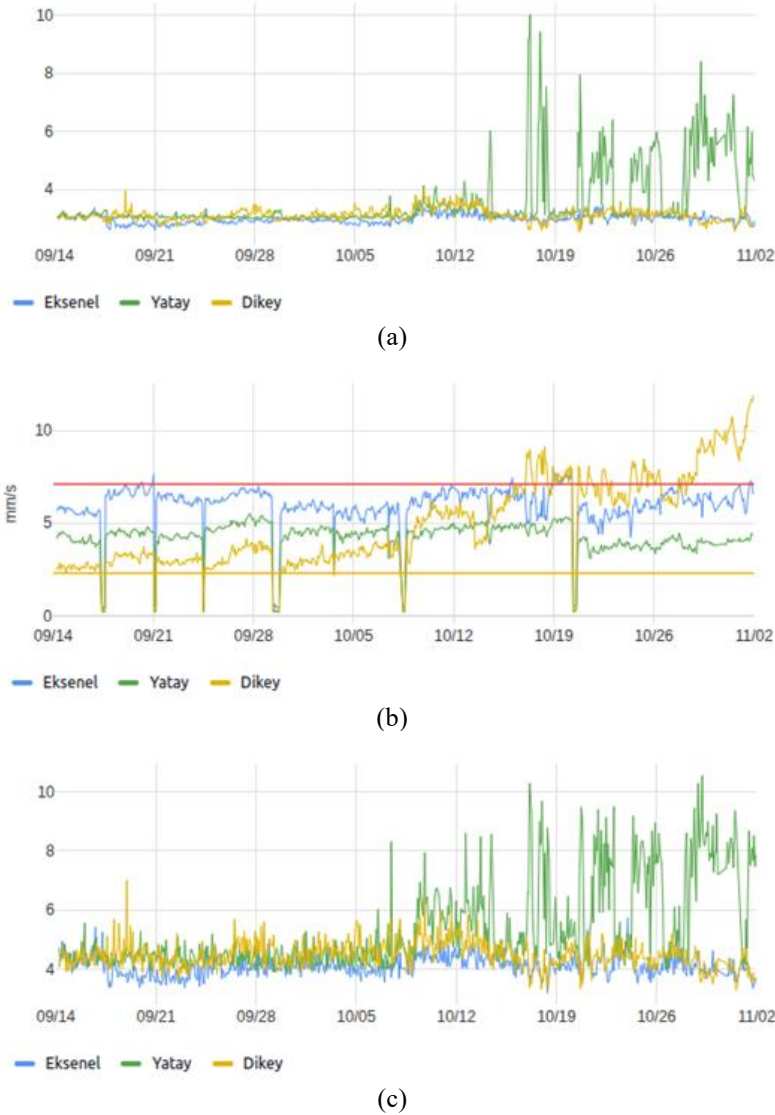
3.2.1 İstatistiksel analiz yöntemleri

Makinelere toplanan veriler toplandıkları haliyle (ham veri) analiz yapılamayacak kadar karmaşık yapıdadır [20]. İstatistiksel analiz yöntemleri verinin karmaşıklığını görece azaltmak için kullanılmaktadır. Veriden elde edilmek istenen sonuca bağlı olarak literatürde farklı arıza karakterlerini temsil eden pek çok istatistiksel gösterge tanımlanmıştır.

Bu göstergeler arasında en sık kullanılanları kurtosis, crest factor ve RMS hız (mm/s) yöntemleridir.

Özellikle devir ile ilintili ve RMS hız değerinde (genel titreşim seviyesi) sistematik bir yükselmeye sebep olan eksenel kaçıklık, balanssızlık ve mekanik gevşeklik gibi sinüs benzeri dalga formu olarak modellenilebilecek arızalar kurtosis değerinin de yükselmesine neden olmaktadır. Kurtosis, sinyal dağılımındaki sivrilik derecesini ölçerek bu tür yapısal bozulmaları erken aşamada fark etmeye olanak tanır. Bu arızaların zaman içerisinde yarattıkları fazladan açısal yük nedeniyle taşıyıcı rulmanlarda yorulma ve noktasal bilezik arızaları oluşmaktadır [21]. Bu tür rulman arızaları ise crest factor değerlerinde özellikle yatay ve dikey eksenlerde yükselmeye neden olmaktadır [22].

Kurtosis değeri sağlıklı bir makinede 3 civarındadır. Bu değer üstünde olması makinede gevşeklik veya rulman arızasının olabileceği anlamına gelmektedir [23]. Bu yöntemin seçilme nedeni, sinyaldeki ani ve kısa süreli genlik artışlarına karşı standart sapmadan daha duyarlı bir istatistiksel yapı sunmasıdır.



Şekil 2. Vakum fanından alınan titreşim verilerinin zaman içerisindeki istatistiksel değişimi (a) kurtosis, (b) RMS (mm/s), (c) crest factor

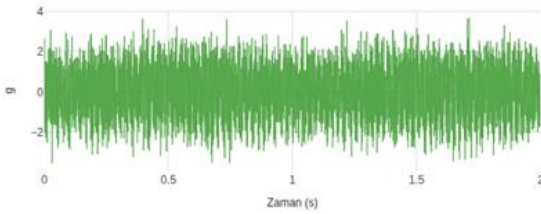
Şekil 2a'da örnek bir vakum fanı üzerinden toplanan değerler ile elde edilen kurtosis grafiği, Şekil 2b'de genel titreşim seviyesi değerinin zamana göre değişimi yer almaktadır. Crest factor, titreşim verisi içerisindeki tepe değerlerinin ortalama enerjiye göre oranını göstermektedir. Sağlıklı bir makinede bu değer 1.4-5 arasındadır. Değerin yüksek olması makinede rulman arızasına bağlı ani darbelerin olabileceği anlamına gelebilir. Tepe değerinin RMS değerine oranlanmasıyla elde edilen bu parametre, darbe şiddetini normalize ettiği için erken aşamada arıza tespiti için kritik bir seçimdir [23]. Şekil 2c'de crest factor değerinin zamana göre değişimi yer almaktadır.

3.2.2 Dairesel dalga analizi

Yüksek örnek sayısına sahip titreşim verilerinin (özellikle gürültülü ham verinin) zaman ekseninde incelenmesi oldukça zordur. Toplanan veride yer alan genlik değişimleri makinenin dönme hareketine bağlı olmasına rağmen, veri içerisindeki gürültüler nedeniyle bu ilişki zaman düzleminde net bir şekilde görülmez.

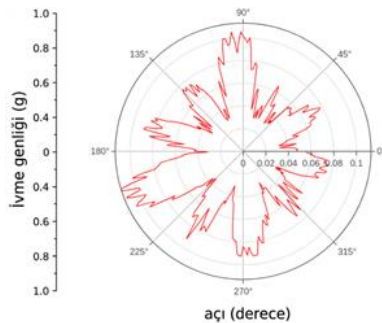
Dairesel dalga yöntemi, zaman ekseninde yer alan titreşim verisinin dönme hareketinden kaynaklanan genlik dağılımına göre polar koordinat sistemine aktarılmasını sağlamaktadır.

Bu sayede makine bileşenlerinin dönüşü sırasında oluşan titreşim değişiklikleri açısal olarak incelenerek makinedeki arızalar tespit edilebilir. Geliştirilen sistem, üç eksenli ivme sensörü üzerinden gelen eksenel, yatay ve dikey titreşim bileşenlerini eşzamanlı olarak işlemekte ve her bir eksen verisi için bağımsız dairese dalga grafikleri oluşturmaktadır.



Şekil 3. Vakum fanından yatay eksenden elde edilen ham titreşim sinyali

Şekil 3'te zaman ekseninde yer alan titreşim sinyali, Şekil 4'te ise titreşim sinyalinin polar koordinat sisteminde görselleştirilmesi yer almaktadır.



Şekil 4. Vakum fanından yatay eksenden elde edilen ham titreşim sinyali

Dairesel dalga yönteminin doğru sonuç verebilmesi için makinenin dönüş devrinin doğru tespit edilmesi gerekmektedir. Devir sayısı rpm (revolutions per minute - dakikadaki devir sayısı) ile ifade edilir ve makinede yer alan milin dakikada yaptığı dönüş sayısını ifade etmektedir. Doğru devir sayısının belirlenmesi zaman eksenindeki sinyalin dönme periyoduna göre hizalanması için kritik öneme sahiptir.

Bu nedenle ilk olarak kullanıcıdan makineye ait yaklaşık bir devir bilgisi alınır (etiket bilgisi). Ardından bu değeri doğrulamak amacıyla hız spektrumu üzerinde yaklaşık devire karşılık gelen frekans bileşeni ± 5 Hz aralığında incelenir. Bu bölgede anlamlı bir tepe tespit edilirse, ilgili frekansın harmonikleri olup olmadığı kontrol edilir. Harmoniklerin varlığı doğrulandıktan sonra, ilk harmonik frekans 60 ile çarpılarak makinenin gerçek devir hızı kesin olarak belirlenir. Burada elde edilen devir sayısı dairese dalga algoritmasına girdi olarak verilir.

Bu çalışmada kullanılan dairese dalga yöntemi, sinyalin her bir devirdeki faz bilgisini koruyarak zamansal veriyi açısal düzleme taşımaktadır. Bu yaklaşım, özellikle cyclostationary (döngüsel durağan) sinyallerin analizinde kullanılan polar gösterim teknikleriyle paralellik göstermektedir [24]. Bu yöntem sayesinde, mildeki salgı veya mekanik gevşeklik gibi arızalar, spektrumdaki enerji dağılımından ziyade, geometrik form bozuklukları olarak teşhis edilebilmektedir.

Analiz sürecinde, zaman ortamındaki titreşim verilerinin devir tabanlı bir yapıya dönüştürülmesi için öncelikle bir tam devire karşılık gelen örnek sayısı belirlenir. Bu değer, Denklem 1 kullanılarak hesaplanmaktadır

$$N_r = \frac{f_s * 60}{rpm} \quad (1)$$

Burada;

- N_r = Bir tam devirdeki örnek sayısı,
- f_s = Örnekleme frekansı (Hz),
- rpm = Makinenin dakikadaki dönme sayısıdır.

Farklı çalışma koşullarında (devir ve yük gibi) ortaya çıkan genlik değişkenliğini ortadan kaldırmak ve sinyalleri kıyaslanabilir hale getirmek için normalizasyon işlemi uygulanmıştır. Bu işlemle, titreşim sinyalinin mutlak genlik etkilerinden arındırılarak analiz adımlarının kararlı ve güvenilir şekilde gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Denklem 2'de veri üzerinde yapılan normalizasyon işlemi yer almaktadır [24]

$$x_n(t) = \frac{x(t)}{\max|x(t)|} \quad (2)$$

Burada;

- $x_n(t)$ = Normalize edilmiş titreşim sinyali,
- $x(t)$ = Ham titreşim sinyali,
- $\max|x(t)|$ = Ham titreşim sinyalinin mutlak maksimum genlik değeridir.

Normalize edilen sinyalin dönme periyoduna uygun olarak hizalanması ve sinyal içerisindeki periyodik bileşenlerin baskınlığının belirlenmesi için otokorelasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Otokorelasyon işlemi, sinyalin kendisiyle τ örnek kaydırılmış hali arasındaki benzerliği ölçmektedir. Ayrık zamanlı sinyal üzerinde hesaplanan otokorelasyon işlemi **Denklem 3**'te yer almaktadır.

$$R_{xx}(\tau) = \sum_{t=0}^{N-1-\tau} x_n(t) * x_n(t + \tau) \quad (3)$$

Burada;

- $R_{xx}(\tau) = \tau$ örnek kaydırma (lag) miktarına bağlı otokorelasyon katsayısı,
- $\tau =$ Sinyal üzerindeki örnek kaydırma miktarı,
- $N =$ Toplam örnek sayısıdır.

Hesaplanan otokorelasyon fonksiyonu üzerinden, sinyaldeki periyodik tekrarların en güçlü olduğu noktayı belirlemek amacıyla maksimum otokorelasyonun gerçekleştiği gecikme süresi tespit edilir. Bu değer, sinyalin temel dönme periyoduna karşılık gelmektedir ve **Denklem 4** ile hesaplanmaktadır.

$$\tau_{max} = \operatorname{argmax}_{\tau} R_{xx}(\tau) \quad (4)$$

Burada;

- $\tau_{max} =$ Maksimum otokorelasyon değerine karşılık gelen gecikme süresi,
- $\operatorname{argmax} =$ Fonksiyonu maksimum yapan bağımsız değişken değerini veren operatördür.

Tespit edilen τ_{max} gecikme süresi kullanılarak, titreşim sinyali periyodik faz yapısına uygun şekilde hizalanmaktadır. Bu hizalama işlemi, sinyaldeki periyodik bileşenlerin her devirde aynı açısal konumdan başlamasını sağlamaktadır. Faz hizalama işlemi **Denklem 5**'te yer alan formül ile hesaplanmaktadır

$$x_a(t) = x_n(t + \tau_{max}) \quad (5)$$

Burada;

- $x_a(t) =$ Faz hizalaması yapılmış titreşim sinyali,
- $t =$ Örnek indisidir.

Faz hizalaması yapılan titreşim sinyali üzerindeki gürültülerin elenmesi ve periyodik arıza bileşenlerinin belirginleştirilmesi amacıyla Zaman Senkronlu Ortalama (TSA) işlemi uygulanır. Aynı açısal konumdaki tüm titreşim değerlerinin, bir devri temsil eden örnekler içerisindeki örnek indeksi için, toplam devir sayısına göre ortalaması **Denklem 6**'da yer alan formül ile hesaplanır [25].

$$s(\theta_i) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} x_a(i + kN_r) \quad (6)$$

Burada;

- $s(\theta_i) = i.$ örnek indeksi için hesaplanan ortalama titreşim genliği,
- $K =$ Ortalama işlemine dahil edilen toplam devir sayısı,

- $i =$ Bir devir içerisindeki örnek indeksi ($1 \leq i \leq N_r$),

Dairesel dalga grafiğinin oluşturulmasında, her bir titreşim örneğinin mil üzerindeki açısal karşılığını belirlemek amacıyla bir tam devirdeki örnekler arasında eşit açısal dağılım sağlanır. Bir tam devri temsil eden örnekler için ardışık iki örnek arasındaki açısal artış miktarı **Denklem 7**'de yer alan formül ile hesaplanır.

$$\theta_i = \frac{360}{N_r} \quad (7)$$

Burada;

- $\theta_i =$ Ardışık iki örnek arasındaki açısal artış.

Hesaplanan $s(\theta_i)$ değerleri, $[0, 1]$ aralığına normalize edilmiş genlik verilerini içermektedir. Ancak polar grafiklerde tüm verilerin doğrudan merkez noktasından ($r=0$) başlatılması, özellikle düşük genlikli bölgelerde verilerin birbirine karışmasına ve karakteristik arıza desenlerinin ayırt edilmesine engel olmaktadır.

Bu geometrik yığılmayı (sıkışıklığı) önlemek ve görsel analiz kabiliyetini artırmak amacıyla, titreşim verilerinden dairesel bir halka düzleminde (annulus) iz düşümü alınmıştır.

Bu süreçte, normalize edilmiş minimum genlik değeri (0), belirlenen bir iç yarıçap (r_{in}) değerine; maksimum genlik değeri (1) ise dış yarıçap (r_{out}) değerine lineer bir haritalama ile aktarılır. Burada r_{in} , dairesel dalganın merkezde tek bir noktada toplanarak karmaşa yaratmasını engelleyen güvenli boşluk mesafesini; r_{out} ise dairesel dalganın ulaşabileceği maksimum dış sınırı temsil etmektedir. Bu çalışmada, mildeki salgı ve dengesizlik gibi arıza desenlerinin merkezdeki parazitlerden arındırılarak net bir şekilde gözlemlenebilmesi için r_{in} değeri toplam yarıçapı 0.03, r_{out} değeri ise 1 olarak belirlenmiştir.

Normalize edilmiş titreşim genlik değerlerinin dairesel halka düzlemindeki izdüşüm oranı, **Denklem 8**'de yer alan lineer dönüşüm yaklaşımı ile ifade edilir. Bu formül, verilerin belirlenen iç (r_{in}) ve dış (r_{out}) yarıçap sınırları arasındaki bağıl konumunu belirlemektedir.

$$\frac{r(\theta_i) - r_{in}}{r_{out} - r_{in}} = |s(\theta_i)| \quad (8)$$

Burada;

- $|s(\theta_i)| = \theta_i$ açısal konumundaki normalize edilmiş ortalama titreşim genliğinin mutlak değeri,
- $r(\theta_i) = \theta_i$ açısına karşılık gelen nihai yarıçapı,
- $r_{in} =$ Görselleştirme için tanımlanan iç yarıçapı,
- $r_{out} =$ Görselleştirme için tanımlanan dış yarıçapı,
- $\theta_i = i.$ örneğin açısal konumudur.

Denklem 8'de verilen eşitlikten nihai yarıçap değeri çekildiğinde, görselleştirme sürecinde her bir örnek için kullanılan nihai ölçekleme formülü **Denklem 9**'daki gibi elde edilir.

$$r(\theta_i) = |s(\theta_i)| * (r_{out} - r_{in}) + r_{in} \quad (9)$$

Gerçekleştirilen bu dönüşüm ve ölçekleme adımları sonucunda, zaman ortamındaki karmaşık titreşim verileri açısız tabanlı bir geometriye aktarılmış olur. Elde edilen dairesel form, sinyalin sadece genlik değişimlerini değil, aynı zamanda bu değişimlerin devir ile ilişkili açısız konumunu ve periyodik karakterini de eşzamanlı olarak temsil etmektedir.

Bu yapı, mildeki düşük düzeydeki dinamik değişimlerin görsel bir imza haline gelmesini sağlayarak, faz bilgisinin yitirildiği geleneksel spektrum analizlerinde gözden kaçabilecek karakteristik arıza desenlerinin daha yüksek hassasiyetle ayırt edilmesine olanak tanımaktadır.

```
Nr ← Yuvarla(fs * 60 / rpm)
xn(t) ← x(t) / Maksimum(x|t|)
Rxx(τ) ← Otokorelasyon(xn, xn)
τ_tepe ← MaksimumKonumu(Rxx(τ))
xa(t) ← DaireselKaydır(xn, τ_tepe)
K ← Taban(Uzunluk(xa) / Nr)
S_tsa ← Nr uzunluğunda sıfırlardan oluşan dizi

i = 0'dan Nr - 1'e kadar
  Toplam ← 0
  k = 0'dan K - 1'e kadar
    Toplam ← Toplam + xa(i + k * Nr)
  S_tsa[i] ← Toplam / K

i = 0'dan Nr - 1'e kadar
  θ[i] ← i * (360 / Nr)
  r[i] ← |S_tsa[i]| * (rout - rin) + rin

(θ, r) değerlerini döndür
```

Şekil 5. Dairesel dalga yönteminin uygulama aşamaları

Şekil 5'te sunulan dairesel dalga algoritması, zaman düzleminde karmaşık ve gürültülü bir yapıda bulunan titreşim verilerini, mekanik arıza desenlerinin görselleştirilebileceği anlamlı bir polar forma dönüştürmek amacıyla tasarlanmıştır. Algoritma, ham sinyalin içerisindeki periyodik bileşenleri ayırtmak ve gürültüleri filtrelemek için istatistiksel ve matematiksel bir dizi ardışık işlem gerçekleştirmektedir. Bu doğrultuda, dairesel dalga hesaplama sürecinin temelini oluşturan kod yapısı şu aşamalardan meydana gelmektedir:

- **Segmentasyon:** Kesintisiz titreşim verisi, belirlenen devir hızına göre her biri tam bir turu temsil eden periyotlara bölünür.
- **Faz Hizalama:** Her bir devir periyodunun başlangıç noktası makine hızındaki anlık değişimler (jitter) nedeniyle kayabilir. Bu kaymayı gidermek için otokorelasyon yöntemi kullanılarak sinyaller aynı fazda hizalanır.
- **Zaman Senkronlu Ortalaması:** Hizalanmış sinyallerin ortalaması alınarak, rastgele gürültü bileşenleri elimine edilir ve arızayı temsil eden karakteristik dalga formu ortaya çıkarılır.

Bu işlem adımları, ham verinin polar koordinatlara aktarılmasından önce gürültüden arındırılmasını ve arıza karakteristiğini temsil eden sinyalin belirginleşmesini sağlar.

Böylece, spektral gürültü tabanının minimize edilmesiyle birlikte, arıza karakteristiğini temsil eden sinyalin ayırt edici geometrik formu belirginleşir.

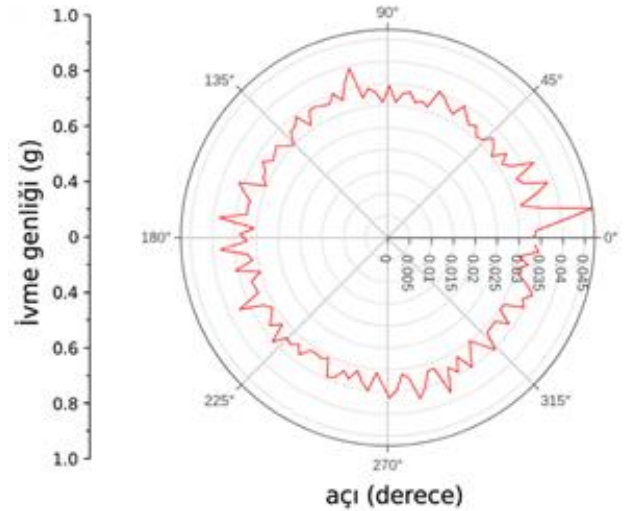
4 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde, dairesel dalga analizi yardımıyla tespit edilen farklı arızalar incelenmiştir. Teorik olarak polar düzlemdeki dairesel dalga desenleri, mekanik arızanın devir frekansıyla olan ilişkisine göre çok çeşitli geometrik formlar alma potansiyeline sahiptir. Bu çalışmada, endüstriyel tesislerde en sık karşılaşılan ve makine sağlığını doğrudan tehdit eden kritik arıza tiplerine odaklanılmıştır. Makinelere toplanan verilerin polar koordinat sisteminde görselleştirilmesi ile tespit edilen arızaların oluşturduğu desenler analiz edilmiş ve yöntemin etkinliği değerlendirilmiştir.

4.1 Sağlıklı çalışma durumu

Sağlıklı çalışan bir makineye ait dairesel dalga grafiği Şekil 6'da yer almaktadır. Şekilde genlik değerlerinin homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Genliklerin dengeli dağılımı fanın, rulmanın ve kasnağın sağlıklı olduğunu, kanatlarda herhangi bir kırık veya kire bağlı bir dengesizlik olmadığını göstermektedir.

Geometrik açıdan bu durum, titreşim sinyalinin devir boyunca düşük varyans sergilemesi ve baskın bir harmonik bileşenin bulunmaması nedeniyle dairesel dalga grafiğinin formunu koruduğunu göstermektedir.



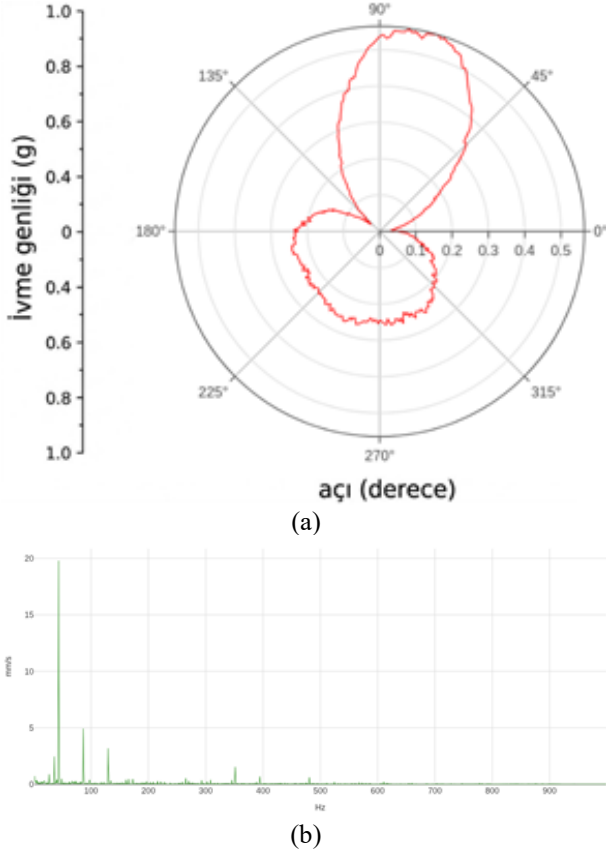
Şekil 6. Arıza bulunmayan makineye ait dairesel dalga grafiği

4.2 Deneysel: 2700 rpm kayış/kasnak tahrikli vakum fanı

Teorik olarak bir kütle dengesizliği durumunda, milin her tam dönüşünde ağır noktanın oluşturduğu merkezkaç kuvveti nedeniyle genlik değerlerinde tek yönlü bir artış beklenir. Dairesel dalga grafiği üzerindeki genlik dağılımı incelendiğinde, sinyalin belirli bir açısız konumda dışarı doğru genişlediği, zıt açıda ise merkeze yaklaştığı görülmektedir.

Dairesel grafikteki bu form değişikliği, sinyalin devir frekansıyla senkronize şekilde genlik değiştirdiğini kanıtlamaktadır. Matematiksel olarak, saf dengesizlik

durumunda ortaya çıkan bu devir frekansı bileşeni, polar koordinatlarda merkezden tek yöne doğru bir kayma (offset) oluşturarak grafiğin eliptik veya yumurta benzeri bir form almasına neden olmaktadır. Şekil 7a'daki desen, kütle dengesizliğinin dairesel düzlemdeki doğrudan geometrik yansıması olup, arıza şiddetine bağlı olarak bu eliptik formun merkezden kaçıklığı artış göstermektedir.



Şekil 7. Dengesiz makineye ait dairesel dalga grafiği (a), arıza durumuna ait FFT spektrumu (b)

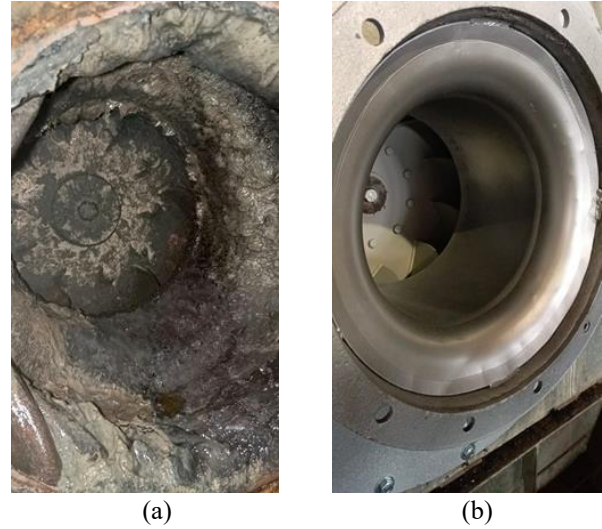
Şekil 7b'de dairesel dalgaya karşılık gelen FFT spektrumu yer almaktadır. FFT spektrumu, sinyalin frekans bileşenlerini ve genliklerini başarıyla gösterse de faz körü yapısı (phase-blind) [26] nedeniyle yetersiz kalmaktadır. Bu durum, özellikle mildeki salgı, hizasızlık veya gevşeklik gibi doğrudan açısal konuma bağlı gelişen arızaların ayırt edilmesini zorlaştırmaktadır.

Dairesel dalga yöntemi ise titreşim genliğini devir senkronlu bir faz düzlemine taşıyarak, arızanın çevrim içindeki tam konumunu ve karakteristiğini görselleştirmektedir. FFT'nin aksine zamansal ve açısal bilgiyi koruyan bu yaklaşım, spektrumda sadece yüksek genlikli bir devir katı olarak görünen karmaşık sinyallerin arkasındaki mekanik kök nedenin (örneğin kayış-kasnak sistemindeki bir eksen kaçıklığının) net bir şekilde teşhis edilmesine olanak tanımaktadır.

Analiz sonuçlarında görülen bu karakteristik sapmaların kök nedenini belirlemek amacıyla yapılan saha incelemesinde, vakum fanının emiş hunisinde delinme olduğu ve bu açıklıktan giren yabancı maddelerin fan

gövdesi içerisinde katılarak biriktiği tespit edilmiştir. İncelenen vakum fanı Şekil 8'de yer almaktadır. Fan kanatları ve gövde arasında biriken bu katı kütle, dönme ekseninde ciddi bir karşı yük oluşturarak dikey ve eksenal titreşimleri artırmıştır.

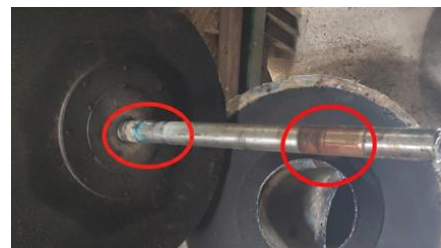
Oluşan bu aşırı yük ve dengesiz kütle dağılımı, milin dönme eksenini periyodik olarak saptırarak milde salgı arızasını tetiklemiştir. Şekil 9'da gösterilen mil üzerindeki aşınma izleri, dairesel dalga analizinde görülen salgı karakteristiğini fiziksel olarak doğrulamaktadır. Dolayısıyla Şekil 7a'daki görsel, sadece basit bir dengesizliği değil, kütle birikiminin mile bindirdiği yük sonucu oluşan zorlanma ve salgı durumunu temsil etmektedir.



Şekil 8. Bakım öncesi emiş hunisi (a), bakım sonrası emiş hunisi (b)

Makine içerisinde biriken katı kütle oluşturduğu aşırı yük ve dairesel dalga analizinde tespit edilen salgı durumu, mil üzerinde periyodik bükülme gerilmelerine ve yataklama noktalarında tolerans kayıplarına neden olmuştur.

Yüksek genlikli titreşimlerin devamlılığı, rulman iç bileziği ile mil arasındaki sıkı geçme toleransının bozulmasına ve mikron seviyesindeki izafi hareketlere yol açmıştır. Bu durum, temas yüzeylerinde sürtünme kaynaklı aşınma (fretting wear) ve fiziksel hasar meydana getirmiştir. Şekil 9'da, salgı kaynaklı bu mekanik gevşemenin mil yüzeyinde oluşturduğu karakteristik hasar izleri açıkça görülmektedir. İşaretlenen bölgelerde, milin uç noktalarında ve yataklama yüzeylerinde meydana gelen aşınmalar sonucunda belirgin bir çaptan düşme (geometrik deformasyon) olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 9. Mil üzerinde oluşan aşınmalar

4.3 Deney 2: 1425 rpm akuple toz emiş fanı

Geliştirilen uygulama, akuple (motor ve fan milinin doğrudan aktarma organı olmadan bağlandığı) 1425 rpm'de çalışan toz emiş fanına uygulanmıştır. Bu tip ekipmanlar, özellikle tozlu ve partiküllü hava transferi yaptıkları için mil üzerinde birikme ve buna bağlı olarak mekanik zorlanmalara oldukça açıktır. Analiz edilen ekipmanın genel görünümü Şekil 10'da yer almaktadır.

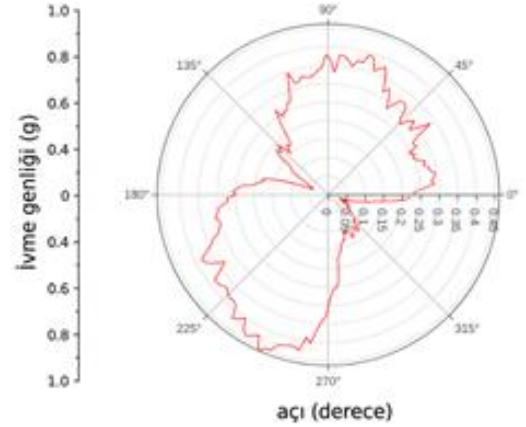


Şekil 10. Dairesel dalga yönteminin sınıandığı hijyenik kumaş üreten bir tesisteki akuple toz emiş fanı

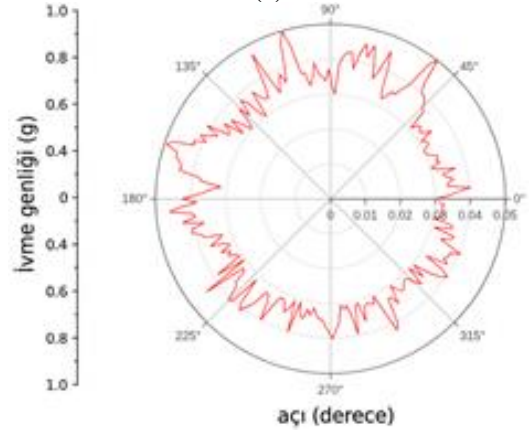
Söz konusu fandan alınan ölçümlerde, FFT değeri yüksek titreşim genliği gösterse bile arızanın karakteristiğini ve tam konumunu net olarak açıklamakta yetersiz kalmaktadır.

Şekil 11c'de arıza esnasında alınan ölçüme ait FFT spektrumu yer almaktadır. FFT spektrumundaki yüksek devir genliği sistemde mekanik bir gevşeklik olduğunu ifade etse de, bu gevşemenin motor tarafında mı yoksa fan tarafında mı olduğu konusunda faz bilgisi eksikliği nedeniyle yetersiz kalmaktadır.

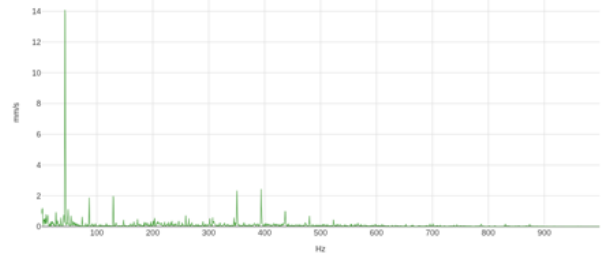
Dairesel dalga yönteminin FFT'ye göre en büyük avantajı, titreşimi sadece frekans bazında ayrıştırmakla kalmayıp, bu titreşimin devir içerisindeki açısal konumunu ve geometrik formunu korumasıdır. Yapılan analizlerde, dairesel dalga grafiğinin belirli bir yöne doğru asimetric olarak genişlediği ve merkez kaçıklığının arttığı gözlemlenmiştir. Bu görsel veri, milin en uç noktasındaki momentin akuple fanda düşük olması ve milin salığı yapmak için görece kısa olması nedeniyle bakım mühendislerini doğrudan motorun yataklama bileşenleri üzerine yoğunlaştırmıştır. Yapılan fiziksel incelemede, motor ön kapağındaki yatak yuvasının aşındığı ve rulman dış bileziği ile yuva arasındaki toleransın bozulduğu (loose fit) tespit edilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 11. Bakım öncesi motor ön kapak aşınması (a), bakım sonrası dengeli durum (b), arıza durumuna ait FFT spektrumu

Motor ön kapak aşınması sonucu oluşan bu boşluk, milin her devrinde rulmanın yuva içerisinde periyodik olarak savrulmasına neden olmaktadır. FFT grafiğinde sadece harmonik olarak görünen sinyal, dairesel dalga grafiğinde arızanın yönünü ve şiddetini gösteren net bir geometrik bozulmaya dönüşmektedir. Şekil 11a'da bakım öncesi arızalı durumun dairesel dalga formu, Şekil 11b'de ise yatak revizyonu sonrası elde edilen stabil ve dengeli dairesel dalga formu yer almaktadır.

Dairesel dalga grafiklerinden elde edilen sayısal veriler incelendiğinde, bakım öncesinde yaklaşık 0.4 seviyesinde olan maksimum radyal sapma değerinin, bakım sonrasında 0.04 seviyesine gerileyerek maksimum titreşim genliğinde %90 oranında bir iyileşme sağladığı görülmektedir. FFT spektrumunda ayırt edilemeyen mikron seviyesindeki bu

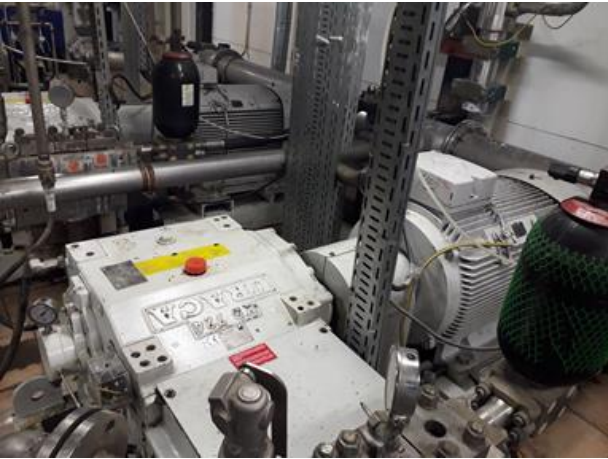
yatak boşlukları, dairesel grafiklerin form analizi sayesinde bakım ekipleri için somut ve hızlı bir karar destek mekanizmasına dönüşmüştür.

Sistemin sürekliliğini ve kararlılığını test etmek amacıyla, makineden bir saat arayla otomatik olarak veri toplanmış ve analizler tüm setlere ayrı ayrı uygulanmıştır. İstatistiksel analizler, kapaktaki aşınma kaynaklı form bozulmasının gün içerisindeki tüm ölçümlerde benzerlik sergilediğini kanıtlamıştır. Bu durum, dairesel dalga yönteminin sadece bir anlık görüntü olmadığını, mekanik arızaların (gevşeme, aşınma vb.) takibinde son derece kararlı ve tekrarlanabilir bir metot olduğunu ortaya koymaktadır.

Deney koşullarının sabitliğini sağlamak adına, sensörün makine üzerindeki konumu ve yönü tüm süreç boyunca (bakım öncesi ve sonrası) sabit tutulmuştur. Sensörden kaynaklı %3'lük cihaz hata payı göz önüne alındığında bile, ölçülen değerler arasındaki farkın bu hata sınırlarının çok dışında kalması, yöntemin deneysel olarak kesinliğini kanıtlamaktadır.

4.4 Deney 3: 1500 rpm krank-şaft tahrikli pistonlu pompa

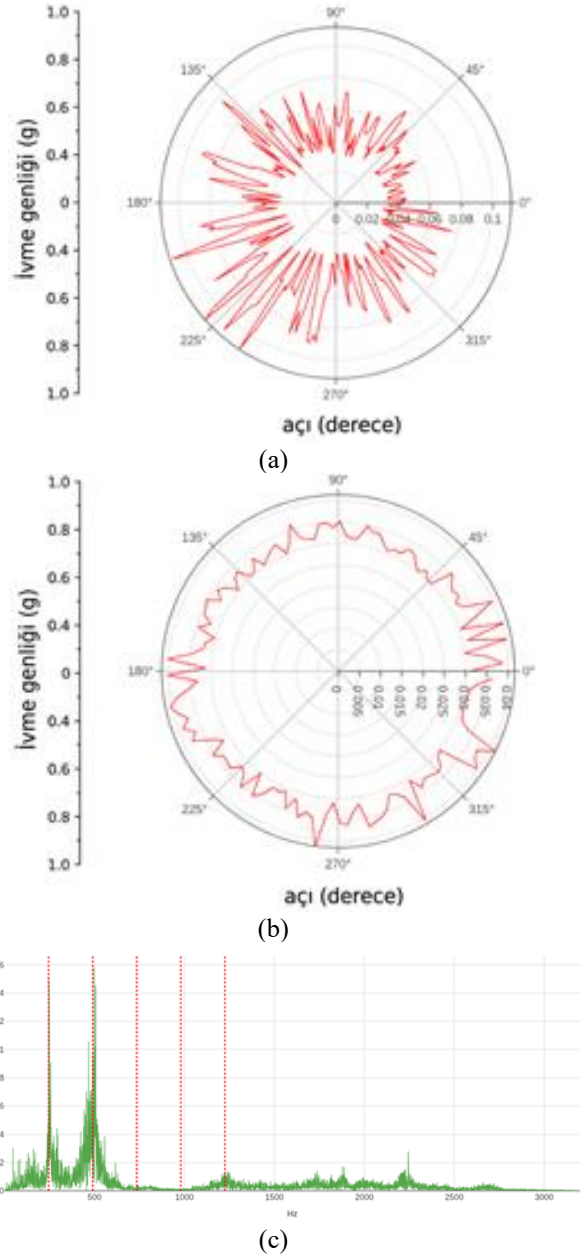
Pistonlu makinelerde titreşim karakteristiği, döner ekipmanlara göre daha karmaşık, doğrusal olmayan ve darbeli bir yapı sergilemektedir. Bu deneyde, üretimin kumaşın tipine bağlı olarak ihtiyaç duyduğu basınca göre sürücü ile kontrol edilerek 735 rpm motor hızıyla tahrik edilen, 20 dişli bir pinyonun 84 dişli büyük dişliyi döndürdüğü 4 pistonlu bir pompa sistemi üzerinden 6 aylık kesintisiz veri toplanmıştır. Sistemde ana yataklama elemanı olarak QJ313MA tipi dört nokta temaslı bilyalı rulman kullanılmaktadır. Şekil 12'de kullanılan pistonlu pompa yer almaktadır.



Şekil 12. Veri toplama çalışmalarının yürütüldüğü krank-şaft mekanizmalı pistonlu pompa

İzleme sürecinde, krank-şaft bileşenlerinde meydana gelen aşınma ve buna bağlı olarak oluşan mekanik boşluklar (backlash) dairesel dalga desenlerinde karakteristik bozulmalara yol açmıştır. Şekil 13a'da sunulan arızalı durum grafiği incelendiğinde, dairesel formun sadece merkezden kaçmakla kalmayıp aynı zamanda belirli bir açısal yöne doğru belirgin bir kayma (offset) sergilediği görülmektedir.

Bu kayma, dişli mekanizmasındaki yük dağılımının asimetrikleştirdiğini ve mekanik boşluğun belirli bir faz aralığında yığıldığını göstermektedir. Krank milindeki bu boşluğun her bir devirde yarattığı anlık darbeler, dairesel form üzerinde düzensiz ve keskin genlik artışları (spikes) olarak gözlemlenmiştir. Dairesel dalga deseni üzerinde izlenen bu radyal genişlemeler, piston strokları esnasında meydana gelen anlık tork dalgalanmalarının krank mekanizması üzerindeki dinamik etkisini yüksek hassasiyetle yansıtmaktadır.



Şekil 13. (a) Bakım öncesi mekanik boşluk kaynaklı kayma ve keskin genlik artışları, (b) Bakım sonrası kararlı dairesel form, (c) Arıza durumuna ait FFT spektrumu

Arızalı duruma ait FFT spektrumu Şekil 13c'de yer almaktadır. FFT spektrumu incelendiğinde görülen dişli geçiş frekansı ve ikinci harmoniği, bu frekans bileşenlerinin

yüksek sayıdaki ve kuvvetleri dengesiz olan yan bantları ile dairesel dalga üzerindeki darbelerin frekans bazında tam bir örtüşme sergilediği tespit edilmiştir. Ancak dairesel dalga yöntemi, FFT'nin aksine, bu darbelerin devrin hangi aşamasında meydana geldiğini ve sistemin hangi yöne doğru mekanik bir kayma yaşadığını görsel olarak göstermektedir. Bu açısız ayrıştırma kabiliyeti, bakım ekiplerinin arızayı sadece dişli kaynaklı olarak tanımlamasının ötesine geçerek, sorunun krank milinin hangi fazında şiddetlendiğini doğrudan teşhis etmelerine imkan tanımaktadır.

Pompa üzerinde gerçekleştirilen revizyon, piston ve rulman bakımının ardından elde edilen dairesel dalga grafiği Şekil 13b'de yer almaktadır. Dairesel dalga formunun tekrar dengeli, merkeze konumlanmış ve düşük genlikli yapısına döndüğü tespit edilmiştir. Bu sonuç, geliştirilen yöntemin sadece fan sistemlerinde değil, pistonlu ve darbeli çalışan karmaşık dişli/rulman mekanizmalarında da güvenilir bir teşhis aracı olduğunu kanıtlamaktadır.

4.5 Yöntemin karşılaştırmalı analizi

Dairesel dalga analizinin istatistiksel yöntemlerine göre en temel üstünlüğü, veriyi sadece büyüklük (genlik) bazlı değil, faz-zaman-mekân ilişkisi içerisinde sunmasıdır. İstatistiksel yöntemler arızanın varlığına dair sayısal bir eşik değeri sunarken, arızanın fiziksel karakteristiği (örneğin mildeki salgının hangi açıda yoğunlaştığı veya dengesizliğin geometrik formu) hakkında bilgi vermemektedir. Geliştirilen yöntem, zaman senkronlu ortalama kullanarak rastgele gürültüleri elimine etmekte ve arızayı doğrudan makinenin fiziksel dönme hareketiyle eşleştirmektedir. Bu durum, özellikle faz bilgisini içermeyen FFT spektrumunda karmaşık görünen düşük frekanslı arızaların, dairesel dalga grafiği üzerinde geometrik bir form (yumurta veya sekiz şekli gibi) olarak uzman olmayan operatörler tarafından bile kolayca teşhis edilmesini sağlamaktadır.

5 Sonuç

FFT tabanlı titreşim analizi, makinedeki arızalara ait baskın frekans bileşenlerinin ve enerji yoğunluğunun tespit edilmesinde standart bir yöntemdir. Ancak bu yöntem, titreşim genliğinin dönme hareketi içerisindeki açısız dağılımını ve faz bilgisini doğrudan göstermemektedir. Özellikle 2700 rpm vakum fanları, 1425 rpm toz emiş fanları ve 735 rpm krank-şaft mekanizmalı pistonlu pompalar gibi farklı kinematik karakteristiklere sahip ekipmanlarda, dengesizlik, mil eğikliği ve mekanik boşluk gibi arızalar her tam dönüşte belirli açısız konumlarda tekrarlayan genlik değişimleri oluşturmaktadır. FFT spektrumunda bu durum genellikle karmaşık harmonik dizileri ve yan bantlar üzerinden dolaylı olarak yorumlanırken, dairesel dalga yöntemi bu bileşenleri doğrudan birer geometrik şekil olarak görselleştirmektedir.

Dairesel dalga analizi, titreşim sinyalinin makinenin devir bilgisini kullanarak polar koordinat sistemine dönüştürmekte ve yüksek frekanslı gürültüleri elimine ederek arızaya özgü açısız desenleri ortaya koymaktadır. Yapılan nicel karşılaştırmalarda, geleneksel spektrum analizinde yan bantlar arasında gizlenen düşük genlikli darbelerin dairesel düzlemde radyal sapmalar şeklinde çok daha yüksek bir ayırt edicilikle tespit edildiği görülmüştür.

Sonuç olarak, dairesel dalga yöntemi görsel yorumlanabilirlik, açısız arıza karakteristiklerinin fiziksel konumla ilişkilendirilmesi ve bakım süreçlerinde sunduğu pratik kullanım avantajlarıyla literatüre katkı sağlamaktadır. Çalışma kapsamında incelenen endüstriyel fanlarda ve pistonlu pompa sistemlerinde, bakım öncesi 0.4 seviyesinde olan radyal sapma değerlerinin bakım sonrası 0.04 seviyesine inmesiyle sağlanan %90'lık iyileşme, yöntemin hassasiyetini gerçek ekipmanlardan toplanmış saha verileriyle sayısal olarak doğrulamıştır. Geliştirilen algoritma sayesinde bakım ekipleri, sadece bir arızanın varlığını değil, arızanın makinenin kinetik döngüsü içerisindeki tam yerini tespit ederek karar verme süreçlerini hızlandırmış ve plansız duruş sürelerini azaltmaya yardımcı olmuştur.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] M. Yağcıoğlu, A.K. Ovacıklı, S. Demircioğlu, T. Kocatekin, S. Birtane, A deep learning framework for severity-aware fault diagnosis in industrial suction fans using multi-modal sensing. *IEEE Access*, 13, 212407-212420, 2025. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3643754>.
- [2] M.Ü. Gürsoy, U.C. Çolak, M.H. Gökçe, C. Akkulak, S. Ötleş, Endüstri için kestirimci bakım. *International Journal Of 3D Printing Technologies And Digital Industry*, 3(1), 56-66, 2019.
- [3] ASCRIBO Applied Sciences Inc., ABLE System, <https://www.ascrigo.io/products/able-system>, 29 Ocak 2026 tarihinde erişildi.
- [4] X. Yuan, Y. He, S. Wan, M. Qiu, H. Jiang, Remote vibration monitoring and fault diagnosis system of synchronous motor based on internet of things technology. *JMobile Information Systems*, 2021(1), 345-624, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/3456624>.
- [5] M. Romanssini, P.C. de Aguirre, L. Compassi-Severo, A.G. Girardi, A review on vibration monitoring techniques for predictive maintenance of rotating machinery. *Eng.*, 4(3), 1797-1917, 2023. <https://doi.org/10.3390/eng4030102>.
- [6] T. Chu, T. Nguyen, H. Yoo, J. Wang, A review of vibration analysis and its applications. *Heliyon*, 10(2), 1-13, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26282>.
- [7] M. Younsi, F. Bakir, S. Koudri, R. Rey, Numerical and experimental study of unsteady flow in a centrifugal fan. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 221(7), 1025-1036, 2007. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE445>.
- [8] T. Meakhaïl, S.O. Park, A study of impeller-diffuser-volute interaction in a centrifugal fan. *J. Turbomach.*, 127(1), 84-90, 2005. <https://doi.org/10.1115/1.1812318>.

- [9] M. Bai, Z. Liu, Y. Ling, H. Tan, Effect of impeller structure on aerodynamic performance and noise reduction of a small multi-blade centrifugal fan. *Journal of Thermal Science*, 33(2), 602-610, 2024. <https://doi.org/10.1080/23744731.2024.2357526>.
- [10] J.K. Arora, S. Rajagopalan, J. Singh, A. Purohit, Low-frequency adaptation-deep neural network-based domain adaptation approach for shaft imbalance fault diagnosis. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 12(1), 375-394, 2024. <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00848-7>.
- [11] N. Tandon, G.S. Yadava, K.M. Ramakrishna, A comparison of some condition monitoring techniques for the detection of defect in induction motor ball bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(1), 244-256, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2005.08.005>.
- [12] M.A. İlgin, D. Söyler, K. Sözen, İstatistiksel süreç kontrolü prensiplerini kullanarak bir kestirimci bakım bilgi sisteminin geliştirilmesi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 9(2), 55-61, 2016.
- [13] İ.G. Pirge, İ. Baştürk, Endüstriyel tesislerde makine öğrenmesi ile kestirimci bakım ve arıza analizleri. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 15(1), 119-133, 2025. <https://doi.org/10.7212/karaelmasfen.1568736>.
- [14] E. Sındır, V. Özkaner, Asenkron motorlu sistemde bulanık mantık çıkarımı ile kestirimci bakım. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 6(2), 181-188, 2022.
- [15] W. Songbai, W. Yadong, C. Yong, C. Zhipeng, Experimental and numerical investigation of non-synchronous blade vibration excitation in a transonic axial compressor. *Journal of Thermal Science*, 33(2), 602-610, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11630-024-1936-x>.
- [16] C. Hariharan, M. Govardhan, Effect of inlet clearance on the aerodynamic performance of a centrifugal blower. *International Journal of Turbo and Jet-Engines*, 33(3), 215-228, 2016. <https://doi.org/10.1515/ijj-2015-0026>.
- [17] L. An, S. Shao, Two-phase flow noise in refrigeration systems: Recent advances and state-of-the-art review. *International Journal of Refrigeration*, 178, 418-443, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2025.07.014>.
- [18] C. Jian, H. Yuan, G. Li, W. Canxing, C Liu, L. Yuanrui, Aerodynamic noise prediction of a centrifugal fan considering the volute effect using IBEM. *Applied Acoustics*, 132, 182-190, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2017.10.015>.
- [19] E. Öztürk, A.K. Ovacıklı, Endüstride bulut bilişim tabanlı kestirimci bakım ve denetimsiz titreşim analizi uygulaması. *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 9(3), 448-461, 2025. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1731806>.
- [20] A.K. Ovacıklı, P. Pääjärvi, J.P. LeBlanc, J.E. Carlson, Recovering periodic impulsive signals through skewness maximization. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 64(6), 1586-1596, 2016. <https://doi.org/10.1109/TSP.2015.2502549>.
- [21] C. Xu, H. Zhou, Y. Mao, Analysis of vibration and noise induced by unsteady flow inside a centrifugal compressor. *Aerospace Science and Technology*, 107(1), 106286, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106286>.
- [22] S. Wu, Z. Wang, H. Li, Z. Yang, S. Tian, R. Yan, S. Wang, X. Chen, Blade crack detection using blade tip timing. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70(1), 1-13, 2021. <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.3046926>.
- [23] E. Öztürk, A.K. Ovacıklı, IoT ve Bulut Bilişim Tabanlı Kestirimci Bakım, *Yapay Zekâ Tabanlı Sistemler: Teori, Uygulama ve Gelecek Perspektifleri-1*, 67-76, 2025. <https://doi.org/10.70269/10.70269/1821584663>.
- [24] J. Antoni, Cyclostationarity by examples. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(4), 987-1036, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2008.10.010>.
- [25] P.D. McFadden, A technique for calculating the time domain averages of the vibration of the individual planet gears and the sun gear in an epicyclic gearbox. *Journal of Sound and Vibration*, 144(1), 163-172, 1991. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(91\)90739-7](https://doi.org/10.1016/0022-460X(91)90739-7).
- [26] S.M. Kay, S.L. Marple, Spectrum analysis-A modern perspective. *IEEE*, 69(11), 1380-1419, 1981. <https://doi.org/10.1109/PROC.1981.12184>.

