



Rulman Hasarlarının Titreşim ve Gürültü Analizi ile Tespiti

Habibe Gürsoy Demir^{1*}, Ozan Müştak²

^{1*} İskenderun Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Hatay, Türkiye (ORCID: 0000-0002-7705-9516)

² Ortadoğu Rulman Sanayi ve Ticaret A.Ş., Ankara, Türkiye (ORCID: 0000-0001-8859-3872)

(İlk Geliş Tarihi 27 Ocak 2021 ve Kabul Tarihi 8 Temmuz 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.869285)

ATIF/REFERENCE: Gürsoy Demir, H. & Müştak, O. (2021). Rulman Hasarlarının Titreşim ve Gürültü Analizi ile Tespiti. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (25), 571-581.

Öz

Rulmanlar, yüksek hızlarda ağır yüklerin taşınmasını sağlayan, aynı zamanda çok düşük yuvarlanma kayıplarına sahip olan dönel makinaların vazgeçilmez parçası olarak endüstride yaygın olarak kullanılan makine parçalarıdır. Bu sebeple rulman hasarlarının erken teşhisi makinanın sağlıklı çalışmasını sağlamak amacıyla son derece önemlidir. Bu çalışmada ORS 6208 plastik kafesli sabit bilyalı rulmanda oluşan farklı tip hasarların titreşim analizi ve gürültü ölçümü metotları kullanılarak tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ORS 6208 plastik kafesli sabit bilyalı üç ayrı rulmanın, dış bilezik yuvarlanma yoluna, iç bilezik yuvarlanma yoluna ve bilyasına hasar verilerek rulman hasarları oluşturulmuş ve eş zamanlı titreşim ve gürültü ölçümü yapılmıştır. Titreşim ve gürültü ölçümü sonucu alınan veriler zaman ve frekans bölgesinde incelenmiş, bunlara ek olarak Hilbert dönüşümü kullanılarak zarf analizi yapılmış ve bu analizler sonucunda rulman hasarları tespit edilmiştir. Farklı tip hasarlara sahip rulmanlara ait titreşim analizleri kıyaslandığında Hilbert dönüşümünün rulman üzerindeki hasarı tespit etmede daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda ses ölçüm cihazından alınan değerler kullanılarak rulmanların teorik olarak Ses Basınç Düzeyi, Ses Şiddeti Düzeyi, Ses Gücü Düzeyi, Yönelme ve Yönelme Katsayısı hesaplanmıştır. Sağlıklı rulman ve hasarlı rulman arasındaki gürültü değerleri dB cinsinden karşılaştırıldığında bilya hasarına sahip rulmanın gürültü seviyesinin en düşük, dış bilezik yuvarlanma yolu hasarlı rulmanın ise en yüksek gürültü seviyesine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rulman, Hasar Tespiti, Zarf Analizi, Gürültü Ölçümü, Titreşim Ölçümü

Fault Detection of Bearing by Vibration and Noise Analysis

Abstract

Bearings are machine parts that are widely used in the industry as an indispensable part of rotary machines that allow heavy loads to be transported at high speeds and also have very low rolling losses. For this reason, early diagnosis of bearing faults are extremely important in order to ensure the healthy operation of the machine. In this study, it is aimed to detect different types of faults in ORS 6208 plastic cage deep groove ball bearing using vibration analysis and noise measurement methods. For this purpose, bearing fault was created by damaging the outer race, inner race and ball of three separate ORS 6208 plastic caged deep groove ball bearings, and simultaneous vibration and noise measurements were made. The data obtained as a result of vibration and noise measurements were examined in the time and frequency region, in addition to these, envelope analysis was performed using Hilbert transform and bearing faults were determined as a result of these analyzes. Comparing the vibration analysis of bearings with different types of damage, it has been determined that Hilbert transformation is more successful in detecting the damage on the bearing. At the same time, using the values obtained from the sound measuring device, the theoretical Sound Pressure Level, Sound Intensity Level, Sound Power Level, Directionality and Directional Coefficient of the bearings were calculated. The noise values between healthy bearing and faulty bearing are compared in dB. When the noise values between healthy bearing and damaged bearings are compared in dB, it is found that the noise level of the bearing with ball damage is the lowest, and the bearing with the outer race has the highest noise level.

Keywords: Bearing, Fault Detection, Envelope Analysis, Noise Measurement, Vibration Measurement

*İskenderun Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Hatay, Türkiye (ORCID: 0000-0002-7705-9516)
(habibe.gursoydemir@iste.edu.tr)

1. Giriş

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle beraber yeni makineler üretilmektedir. Üretilen makinelerde yaygın olarak kullanılan makine elemanlarından birisi de rulmanlardır. Makinelerin arızasız bir şekilde çalışmaları rulmanların sağlıklı bir şekilde çalışmaları ile doğrudan orantılıdır. Rulmanlarda meydana gelen herhangi bir hasar üretimin durmasına neden olabilir ve bunun sonucunda da seri imalat yapan yerlerde üretim, zaman ve maliyet kayıpları meydana gelebilmektedir. Bir makinenin maksimum verimde çalışmasını sağlamak ve üretimin kayıplarını minimum düzeyde tutabilmek için bugüne kadar değişik yaklaşımlar benimsenmiştir. Bu yaklaşımlardan birisi de Kestirimci Bakım anlayışı olmuştur. Kestirimci Bakım anlayışında arıza tahminleri yapılırken titreşim analizi temel metotlardan birisi olarak kullanılmaktadır. Buna ek olarak ses titreşim sonucu oluşmaktadır. Bu sebeple gürültünün izlenmesi için kullanılan akustik yöntemlerde arıza tespitinde kullanılmaktadır. Burada amaç, olası arızaların henüz başlangıç aşamasında iken tespit edilebilmesidir. Rulmanlarda meydana gelen lokal hatalar, periyodik olarak titreşim darbelerine neden olurlar ve bunun sonucunda makineler rezonansa girebilir. Titreşim izleme yöntemleriyle oluşan bu darbe etkileri kolaylıkla tespit edilebildiğinden, rulmanlarda meydana gelen arızaların belirlenmesinde titreşim uygulamaları yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Titreşim analizi ile hasarlı olduğu düşünülen rulmanlardan alınan titreşim sinyalleri zaman veya frekans düzleminde incelenerek sağlıklı bir rulmanın sahip olduğu bilgilerden farklılığına göre rulman arızalı veya arızasız olarak nitelendirilmektedirler. Rulmanlarda meydana gelebilecek arızaları önceden tespit etmek ve oluşan arızaları en aza indirmek için bu alanda birçok çalışma yapılmıştır.

Yeşilyurt ve Özdemir (2015) dengesiz yüke maruz silindirik masuralı rulman hasarını titreşim sinyallerini kullanarak dengesizlik ve hata belirtilerini tespit etmeyi amaçlamışlardır. Rulmana ait titreşim verileri belirli bir çalışma yükü ve hızı altında toplanmış ve kısa zamanlı Fourier dönüşümü yardımıyla hasar tespit edilmiştir. Kırıl ve Karagülle (2005) olası rulman hasarlarını tespit etmek amacıyla dış bilezikte oluşan hasarı modellemiş ve titreşim analizi yardımıyla hatayı tespit etmişlerdir. Titreşim analizi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Rubini ve Meneghetti (2001) rulman hasarlarını tespit etmek amacıyla zarf analizi ve dalgacık dönüşümü yöntemlerinden yararlanmışlar ve hasarlı rulmanlara ait titreşim sinyallerinden hatayı başarılı bir şekilde tespit etmişlerdir. Ho ve Randall (2000) zarf analizi yöntemini kullanarak rulman hasarlarını tespit etmeyi amaçlamışlardır. Rulmanda yuvarlanma elemanlarının boşluklardan dolayı oluşturduğu darbelerle oluşan titreşim sinyalleri incelenerek hasar tespiti sağlanmıştır. Liu, Cheng ve Wen (2019) kısa süreli Fourier dönüşümü (STFT) ve geliştirilmiş anlık frekans tahmin algoritması aracılığıyla yeni bir rulman arıza teşhis yöntemi önermişlerdir. Hem rulman arızası hem de rulman arızasının yerinin tespitinde önerilen yöntem başarılı olmuştur. Wang ve arkadaşları (2020) titreşim ve akustik sinyalleri kullanarak rulman arızalarını teşhis etmeyi amaçlayan CNN tabanlı bir algoritma önermişlerdir. Önerilen yöntemin hata sınıflandırılması ve hata tespitinde yüksek performans sağladığı kanıtlanmıştır. Glowacz ve arkadaşları (2016) rulman arızalarını tespit etmek amacıyla akustik emisyon tabanlı yeni bir teknik önermişlerdir. 4 farklı rulman arızası bu yöntemle başarılı bir şekilde tespit edilmiştir. Özkat (2021) çalışmasında rulmanlarda sağlık göstergesinin

belirlenmesi amacıyla titreşim sinyallerine welch yöntemini kullanarak zaman alanından frekans alanına dönüştürmüştür. Titreşim sinyallerinden çıkarılan öznelikler ve makine öğrenmesi metodolojisi kullanılarak yüksek hızlı rulmanlarda sağlık göstergeleri belirlenmiştir. Arslan ve diğerleri (2006) titreşim analizi yöntemini kullanılarak bilyeli rulmanlardaki bölgesel yüzey kusurlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Hazırlanan bir rulman-mil deney seti ile sağlam ve iç ve dış bileziği yapay kusurlu rulmanlara ait titreşimleri kaydetmişlerdir. Ayrıca sitem için teorik bir model oluşturularak sağlam ve kusurlu rulmanları analiz etmek için bir simülasyon programı geliştirmişlerdir. Simülasyon programından elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında bir uyum içerisinde oldukları gözlemlenmiştir. Aliustaoğlu ve diğerleri (2007) titreşim analizine dayalı rulman hata tespiti üzerine bir inceleme gerçekleştirmişlerdir. Bu maksatla bir rulman test düzeneği oluşturularak, rulman iç ve dış bileziklerine yapay hasarlar verilmiş ve ölçümler ile titreşim verileri toplanmıştır. Bu verileri incelediklerinde, hata frekans bileşenlerinin hatanın varlığını; bu bileşenlere ait genliklerin ise hatanın gelişme durumunu gösterdiği sonucuna varmışlardır. Boukhobza ve diğerleri (2013) rulman hatlarının yerinin tespiti ve büyüklüğünün tespiti için yapay sinir ağları metodu üzerinde durmuşlardır. Çalışmalarında rulman iç bileziği, dış bileziği ve bilye üzerine değişik ebatlarda yapay hatalar vererek yapay sinir ağları metodunun rulmandaki hataların ciddiyetini belirleme üzerindeki etkinliğini araştırmışlardır. Williams ve diğerleri (2001) rulmanların çalışma süresini belirlemek maksadıyla bir test düzeneği kullanmışlardır. Yapılan birçok çalışmadan farklı olarak rulmanlara yapay kusurlar vermek yerine sağlam rulmanları bu test düzeneğinde çalıştırarak farklı devirlerde, hasar oluşuncaya kadar teste tabi tutmuşlar ve elde ettikleri titreşim verilerini kaydetmişlerdir. Jayaswal ve Wadhvani (2009) titreşim analiziyle hata teşhisi kapsamında yapay sinir ağları, bulanık mantık ve dalgacık dönüşümü tekniklerini irdelemişler ve bu yöntemlerin özellikle döner makinelerin en önemli parçalarından olan rulmanlar üzerindeki uygulamaları ve kullanım alanlarını araştırmışlardır. Bayram ve diğerleri (2014) farklı ebatlarda iç bileziği, dış bileziği ve bilyesi yapay hasarlı rulmanları kullanarak titreşim verilerini toplayıp, elde edilen sinyallere dalgacık dönüşümü uygulayarak gürültüden arındırmışlardır. Gürültülü ve gürültüsüz sinyallerin enerjilerini hesaplayıp orantılayarak dalgacık katsayılarını elde etmişlerdir. Dalgacık dönüşümü yöntemi sonucu elde edilen katsayılar tekniği yönteminin etkinliğini, rulman elemanları üzerindeki farklı ebatlardaki hataları sınıflandırmada kullanılabilirliğini vurgulamışlardır. Literatürde var olan çalışmalar incelendiğinde rulmanda oluşan farklı tip hasarların tespiti aşamasında zaman, frekans bölgesi analiz yöntemlerinin kullanıldığı ve hata tespitinin başarıyla yapıldığı görülmüştür. Ancak titreşim analizinin yanında ses ölçümünün de yapıldığı ve elde edilen gürültü değerlerinin hatanın varlığını tespit etmede kullanıldığı çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada 6208 tipi plastik kafesli sabit bilyalı üç ayrı rulmanda dış bilezik yuvarlanma yoluna, iç bilezik yuvarlanma yoluna ve bilyasına hasar verilerek rulman hasarları oluşturulmuştur. Her rulman için ayrı ayrı eş zamanlı olarak titreşim ve gürültü verileri toplanmıştır. Elde edilen titreşim ve gürültü verilerine zaman, frekans ve zarf analizi uygulanmış ve rulman hasarları tespit edilmiştir. Zaman ve frekans analizi hatanın karakteristiğini belirlemede yetersiz kalırken zarf analizi ile karakteristik arıza frekansları elde edilmiştir. Deneysel olarak elde edilen arıza frekans değerleri ile hesaplanan arıza frekans değerleri kıyaslanmış ve sonuçlar örtüşmüştür. Ayrıca ses ölçüm

cihazı ile toplanan veriler kullanılarak sağlıklı ve hasarlı rulmanların teorik olarak Ses Basınç Düzeyi, Ses Şiddeti Düzeyi, Ses Gücü Düzeyi, Yönelme ve Yönelme Katsayısı hesaplanmıştır. Sağlıklı rulman ve hasarlı rulmanlar arasındaki gürültü değerleri dB cinsinden karşılaştırılmıştır. Bilya hasarına sahip rulmanın gürültü seviyesinin en düşük, dış bilezik yuvarlanma yolu hasarlı rulmanın ise en yüksek gürültü seviyesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Gürültü ölçüm değerlerinin de hatanın varlığını tespit ederken kullanılabilir olduğu görülmüştür. Ayrıca sağlıklı ve hasarlı rulmanlara ait zaman bölgesi gösterimleri kıyaslandığında hesaplanan ses basınç düzeyi ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Titreşim Analizi ile Hata Tespiti Teknikleri

Rulmanlarda oluşan hasaları belirlemek için literatürde çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bu çalışmada ise rulmanda görülen farklı hata tiplerini tespit ederken zaman bölgesi ve frekans bölgesi analizlerinden yararlanılmıştır.

2.1.1. Zaman Bölgesi Analizi

Sinyale ait zaman bölgesi analizi, rulman hasarlarını belirlemede yaygın olarak kullanılan metotlardan birisidir. Rulmanlarda oluşan hasarları tespit etmek için zaman bölgesindeki sinyalin tepe değeri, sinyalin enerjisi, istatistiksel özellikler ve modülasyon gibi özelliklerini içeren titreşim parametrelerinden yararlanılmaktadır. Bu parametrelerden istatistiksel özellikler rulman hasarlarının tespitinde sıkça kullanılmaktadır.

2.1.1.1 İstatistiksel Analiz

Yaygın olarak kullanılan istatistiksel özellikler ortalama değer, RMS (etkin değer), tepeden-tepeye değer, maksimum ve minimum değer, crest faktörü ve kurtosis (basıklık) olup aşağıda kısaca açıklanmaktadır.

RMS değeri; sinyal anlık değerlerinin karelerinin ortalamasının karekökü olarak tanımlanır ve Eşitlik (1) ile ifade

$$rms = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt} \quad (1)$$

Bu eşitlikteki $x(t)$ ve T sırasıyla analiz edilen zaman sinyalinin ve bu sinyalin periyodunu ifade etmektedir.

Tepeden tepeye değeri (P_p); sinyalin maksimum ve minimum değerleri arasındaki fark olarak tanımlanır ve Eşitlik (2) ile ifade edilmektedir:

$$P_p = \max(x) - \min(x) \quad (2)$$

Ortalama değer (\bar{x}); sinyalin anlık değerlerinin bir periyottaki ortalaması olarak tanımlanır ve Eşitlik (3) ile ifade edilmektedir:

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (3)$$

Crest Faktörü, sinyalin darbe içeriğini tespit etmede kullanılmakta ve zaman sinyalinin içerisindeki en büyük değer

RMS'e oranı olarak tanımlanmaktadır. Crest faktörü eşitlik (4) ile hesaplanmaktadır.

$$F_c = \frac{P_p}{rms} \quad (4)$$

Kurtosis (Kr); (basıklık) Kurtosis, bir veri grubunun, ortalama değer etrafındaki dağılımını gözlemek amacıyla kullanılan istatistiksel bir ölçüdür. Yani crest faktör gibi, sinyalin darbe içeriğini tespit etmekte kullanılır. Darbe içeriği daha hassastır. Kurtosis matematiksel olarak eşitlik (5) ile hesaplanmaktadır.

$$Kr = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} [x(t) - \bar{x}]^4 dt}{rms^4} \quad (5)$$

2.1.2. Frekans Bölgesi Analizi

Frekans bölgesi analizinde, titreşim genliği frekansa karşı temsil edilir. Fourier analizi, sinyali zaman bölgesinden frekans bölgesine dönüştüren bir yöntemdir ve sinyalin spektral içeriğini belirlemek için kullanılır. Bir sistemin titreşim cevabı, sistemi oluşturan parçalar ve çalışma parametreleri (yük, hız) tarafından belirlenir. Bu sebeple her sistemin titreşim cevabı o sisteme özgüdür. Çalışma kuvvetleri ve hızı değişmiyorsa titreşim seviyesi de değişmez. Bu nedenle hatasız durumda elde edilen titreşim spektrumuna makinanın imzası denir. Eğer makina içerisinde bir hata (arıza) meydana gelirse, makina titreşimleri ve dolayısıyla spektrumu da değişir. Bir sistemin hasarlı durumdaki frekans spektrumu ile sağlıklı durumdaki referans frekans spektrumu karşılaştırılarak sistemde meydana gelen hata tespit edilebilir.

Frekans bölgesi analizi hata tespitine temel teşkil etmesinin yanında, modülasyonlar ve harmonik içerik gibi bazı temel sinyal özelliklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlar. Bu özellikler zaman bölgesi analizinde kolayca belirlenemez. $x(t)$ sinyaline ait Fourier dönüşümü Eşitlik (6)'da verilmektedir:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (6)$$

Bu eşitlikte f ve $X(f)$ sırasıyla frekansı ve sinyalin Fourier dönüşümünü ifade etmektedir.

Sinyaller içerisindeki frekans bilgilerinin elde edilmesi için kullanılan en yaygın metot Fourier Dönüşümüdür. Rulman hasarları ilk oluşum aşamasında oldukça küçük hasar frekansları bileşenlerine sahiptir bu sebeple doğrudan spektrum grafiğinden belirlenmesi zordur. Bu nedenle küçük, tekrarlı hasar frekansları sinyalleri "zarf tekniği" kullanılarak kuvvetlendirilip kolayca analiz edilebilmektedir.

2.1.2.1. Zarf Analizi

Zarf analizi, hatalı rulmandan elde edilen titreşim sinyaline ait karakteristik frekansları çıkarmada ve rulmanda oluşan hasarların tespitinde kullanılan önemli bir sinyal işleme tekniğidir. Bu analizle rulmanda hasarların çıkışını tanımlamak mümkün olurken, aynı zamanda hatanın kaynağı da belirlenebilmektedir.

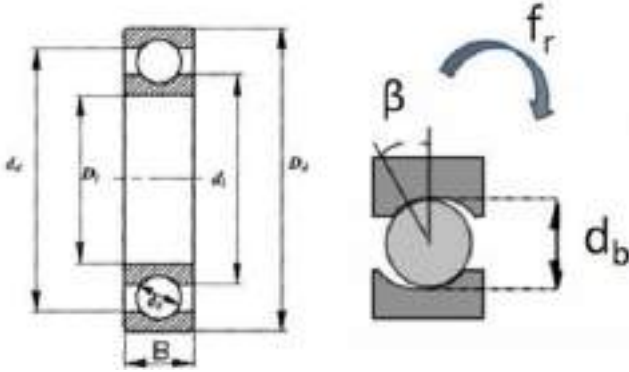
Zaman tanım bölgesi analizinin geliştirilmiş hali olan Zarf Analizi, dengesizlik, eksen kaçıklığı, mekanik gevşeklik, rulman

arızasından kaynaklanan titreşim frekans sinyallerini rezonans frekansı civarındaki yüksek frekansları geçiren bir filtre uygulayarak ayıklayan bir metottur. Zarf analizinde uygulama 3 adımdan oluşmaktadır. İlk önce karmaşık sinyaller yüksek geçiş bant filtresinden geçirilir. Filtre uygulaması sonrasında elde edilen titreşim zaman sinyallerine zarf uygulanır ve son adım olarak da zarf uygulanan sinyaller FFT işlemine tabi tutularak spektrum elde edilir. İncelenen sinyalde hata yoksa sinyale ait zarf spektrumu gürültü, hata varsa rulman frekanslarını yükselten harmonikler içerir. Hata büyüdükçe, bu tepe noktalarının genlikleri artacak, rulman arızası son aşamaya geldiğinde ise bu tepe noktalarını içine alacaktır.

2.2. Rulmanlarda Karakteristik Arıza Frekansları

Rulman, sürtünme sonucu aşındığında veya üzerinde hasar oluştuğunda, farklı frekanslarda titreşim üretmektedir. Rulmanın fiziksel ve geometrik yapısına bağlı olarak iç bilezik, dış bilezik ve yuvarlanma elemanları (bilya) üzerinde birbirinden bağımsız frekans bileşenleri oluşur. Şekil 1’de yapılan deneylerde kullanılan rulman ait geometrik yapı ve genel hata frekans denklemleri verilmiştir.

Rulmanlarda herhangi bir arıza oluştuğunda arızayı belirlenmesini sağlayan dış bilezik, iç bilezik, yuvarlanma elemanı ve kafes frekansları şeklinde dört çeşit frekans vardır. Tablo 1’de bu çalışmada kullanılan rulmana ait karakteristik arıza frekansları verilmiştir.



Şekil 1. Rulman Geometrisi

$$PD = \frac{Di+Dd}{2} \quad BD = \frac{Di-Dd}{2} \quad (7)$$

$$f_{BPFO} = \frac{n}{2} f_r \left[1 - \frac{PD}{BD} \cos \beta \right] \quad (8)$$

$$f_{BPFI} = \frac{n}{2} f_r \left[1 + \frac{PD}{BD} \cos \beta \right] \quad (9)$$

$$f_{BSF} = \frac{1}{2} f_r \frac{PD}{BD} \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (10)$$

2.3. Ses ve Gürültü Kavramları

Ses, dalgalar halinde yayılan bir enerjidir. Sesin doğuşu ve yayılması ortamdaki parçacıkların titreşimi ve bu titreşimlerin komşu parçacıklara iletilmesiyle olur. Ortamdaki parçacıkların titreşmesiyle oluşan dalgalar havada basınç değişiklikleri oluşturur. Bu değişim miktarı ses basıncı denir.

2.3.1 Ses Basınç Düzeyi

Ses, kulak zarıyla temasta bulunan havanın basıncının değişmesiyle algılandığından, bir ses kaynağının ses gücünden daha çok, belli bir noktada yarattığı ses basıncı değişimi önemlidir. 0.00002 Newton/m²’lik standart referans ses basınç düzeyine oranlanan ses basınç düzeyinin birimi desibel (dB) dir.

Ses basınç düzeyi Eşitlik (11)’deki gibi hesaplanır.

$$SPL = L_p = 20 \log \frac{P}{P_{ref}} \quad P_{ref} = 2 \times 10^{-5} \quad (11)$$

Burada P , ses basıncının karelerinin ortalamasının kareköküdür.

2.3.2. Ses Şiddeti ve Ses Şiddeti Düzeyi

Sesin, kaynağın bulunduğu ortamın akustik ve geometrik özellikleriyle, kaynaktan olan uzaklığa bağlı olarak değişen bir diğer özelliğine de ses şiddeti denir. Ses şiddeti eşitlik (12)’deki gibi hesaplanır.

$$I = \frac{P^2}{\rho c} \quad (12)$$

Burada P , ses basıncının karelerinin ortalamasının kareköküdür, sesin iletiği ρ ortamın yoğunluğu ve c ise sesin ortamdaki yayılma hızıdır.

Ses şiddeti düzeyi ise; Ses şiddeti bulduktan sonra Eşitlik (13)’den hesaplanmaktadır. Birimi desibel (dB) dir.

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_{ref}} \quad I_{ref} = 1 \times 10^{-12} \quad (13)$$

Tablo 1. 6208 plastik kafesli rulmanın dış bilezik, iç bilezik ve bilya için karakteristik arıza frekanslarının sayısal değerleri

Rulman Tipi	Dönü Frekansı, (f_r)	Bilya Çapı, (d_b)	Bölüm Dairesi, (d_d)	Yük Geçiş Açısı, (B)	Bilya Sayısı	BSF	BPFI	BPFO
6208	30 Hz	11,906 mm	60 mm	0 °	9 adet	72,62 Hz	161,79 Hz	108,21 Hz

2.3.3. Ses Gücü ve Ses Düzeyi

Ses gücü, birim zaman başına bir gürültü kaynağının yaydığı ve havayla taşınan ses enerjisidir. Birimi Watt (W)'dır. Ses gücü, Eşitlik (14)'den hesaplanmaktadır.

$$W = I \times A \quad (14)$$

Ses gücü, incelenen ses kaynağının yaydığı ses gücünün, referans ses gücüne oranının 10 tabanlı logaritmasının on katıdır. Birimi desibeldir. Eşitlik (15) ile hesaplanmaktadır.

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_{ref}} \quad W_{ref} = 1 \times 10^{-12} \quad (15)$$

2.3.4. Yönelme ve Yönelme Katsayısı

Ses kaynağından çıkan ses dalgaları her yönde farklılık gösterir. Bir noktadaki *yönelme katsayısı Q*; o noktadaki ses şiddetinin, sesin düzgün yayılması durumunda aynı noktada oluşturacağı ses şiddetine oranı olarak tanımlanır ve Eşitlik (16) ile hesaplanır.

$$Q = \frac{I}{I_t} \quad (16)$$

Burada I ses şiddeti, I_t ise aynı noktada, sesin küresel dalgalar halinde yayılması durumunda elde edilecek teorik ses şiddetidir.

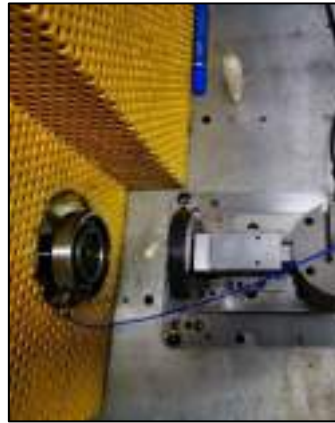
Her yönde değişik yönelme katsayısına sahip bir ses kaynağının herhangi bir yöndeki yönelme katsayısı, o yönde bir noktada ölçülen ses basıncı düzeyi ile kaynağa aynı uzaklıktaki ortalama ses basıncı düzeyinden yararlanarak eşitlik (17) ile hesaplanır.

$$Q = 10^{(L_p - L_p)} \quad (17)$$

3. Deney Düzenegi



Şekil 2. Deney Düzenegi sol yan Görünüş



Şekil 3. Deney Düzenegi üstten Görünüş

Rulmanlarda oluşan hatayı tespit etmek için şekilde görülen deney düzenegi oluşturulmuştur. Deneyler esnasında hasarsız ve

kasıtlı olarak hasar verilmiş ORS firmasına ait 6208 tipi plastik kafesli sabit bilyalı rulmanlar kullanılmıştır. Deneyler, ORS'nin Ar-Ge Merkezinde bulunan sessiz odada gerçekleştirilmiştir. Gürültü ve titreşim verileri eş zamanlı alınmıştır. Rulmanlarda titreşim analizi ile hata tespiti için PCB markalı ivmeölçer kullanılmıştır. İvmeölçer, rulmanlarda oluşturulan hasarların yakınına yapıştırılmıştır. Böylece titreşim analizi ile arıza tespitinde daha belirgin hata tespiti yapılması sağlanmıştır. Elde edilen titreşim verileri ORS veri toplama sistemi ile toplanmıştır ve alınan verilerin analizleri MATLAB programındaki sinyal işleme metotları ile gerçekleştirilmiştir. Her bir titreşim ölçümünde Fs= 25600 Hz örnekleme frekansında 10'ar saniye boyunca veri toplanmıştır. Gürültü ölçümü için ise 01dB ses ölçüm cihazı National Instruments firmasına ait veri toplama kartı kullanılmıştır. Deneyler; sağlıklı, dış bilezik yuvarlanma yolu, iç bilezik yuvarlanma yolu ve bilya hasarına sahip rulmanlar için 1800 RPM hızında verilerin elde edilmesiyle gerçekleştirilmiştir.

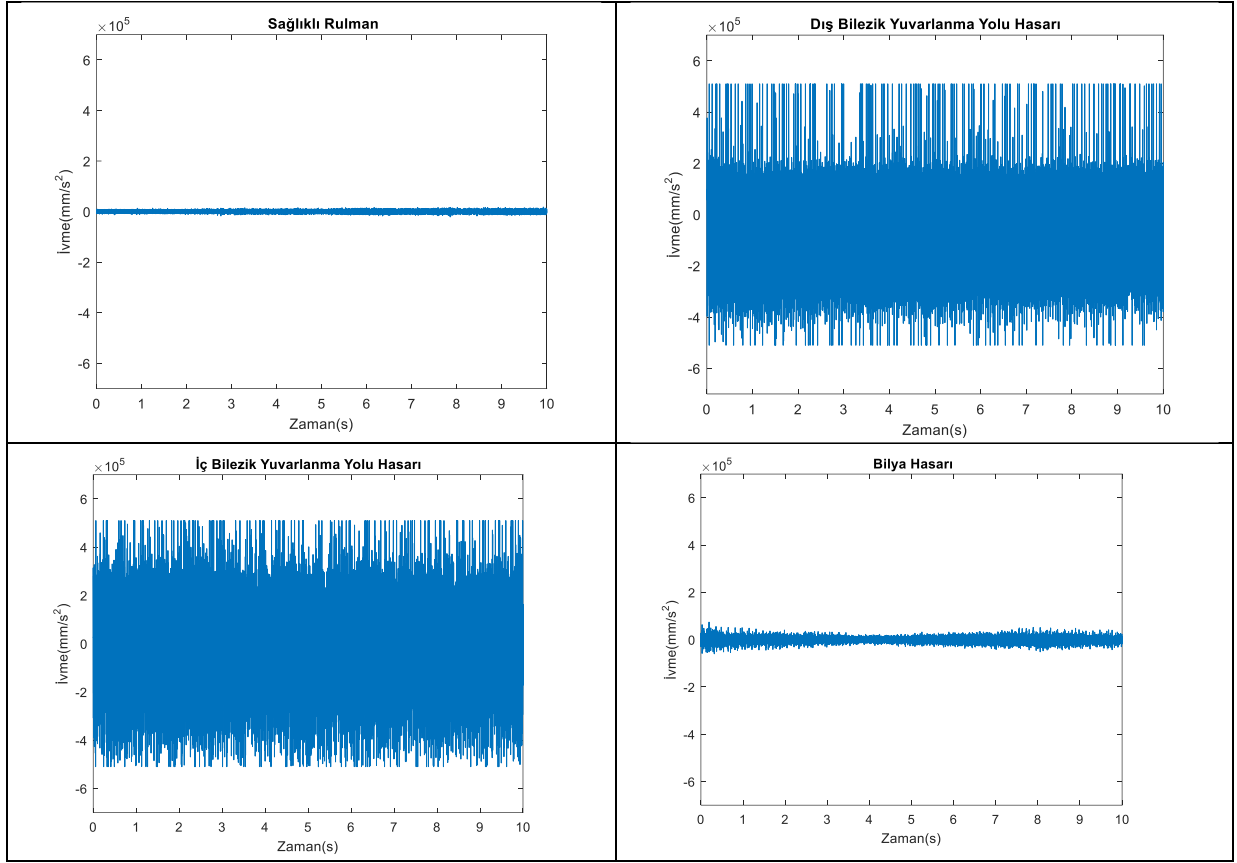
Gürültü ölçümünde yönelme katsayısını bulmak için mikrofon 30°, 60°, 90°, 120° ve 150° aralıklarla yarım küre oluşturulacak şekilde konumlandırılmıştır. ISO 3744 standartına göre yarım küre ölçümleri yapılırken, yarım kürenin yarıçapı, numunenin en büyük uzunluğunun iki katı veya ortalama yüksekliğinin dört katı kadar olmak zorundadır. 6208 tipi rulmanın dış çapı 80 mm olduğu için mikrofon 160 mm uzaklığa yerleştirilerek gürültü ölçümleri alınmıştır.

4. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada öncelikle hatasız rulmanın zaman ve frekans karakteristiği belirlenmiştir. Sağlıklı ve hatalı rulmanlara ait titreşim ve gürültü verileri incelenmiş ve hata tespiti yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle sağlıklı rulman, dış bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman, iç bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman ve Bilya hasarına sahip rulman titreşimlerinin zaman bölgesi analizleri yapılmıştır.

Zaman bölgesinde, sinyallerin zaman değişimlerine bakılmıştır ve sağlıklı ve hasarlı rulmanların titreşim biçimleri şekil 4'te gösterilmiştir. Şekil 4'teki (a) ve (b, c, d) titreşim biçimleri zaman bölgesinde karşılaştırıldığında, hatanın varlığı titreşim biçimleri üzerinde kendisini belli bir periyotta tekrar eden ve hızla sönen geçiş sinyallerinin oluşmasından anlaşılmaktadır.

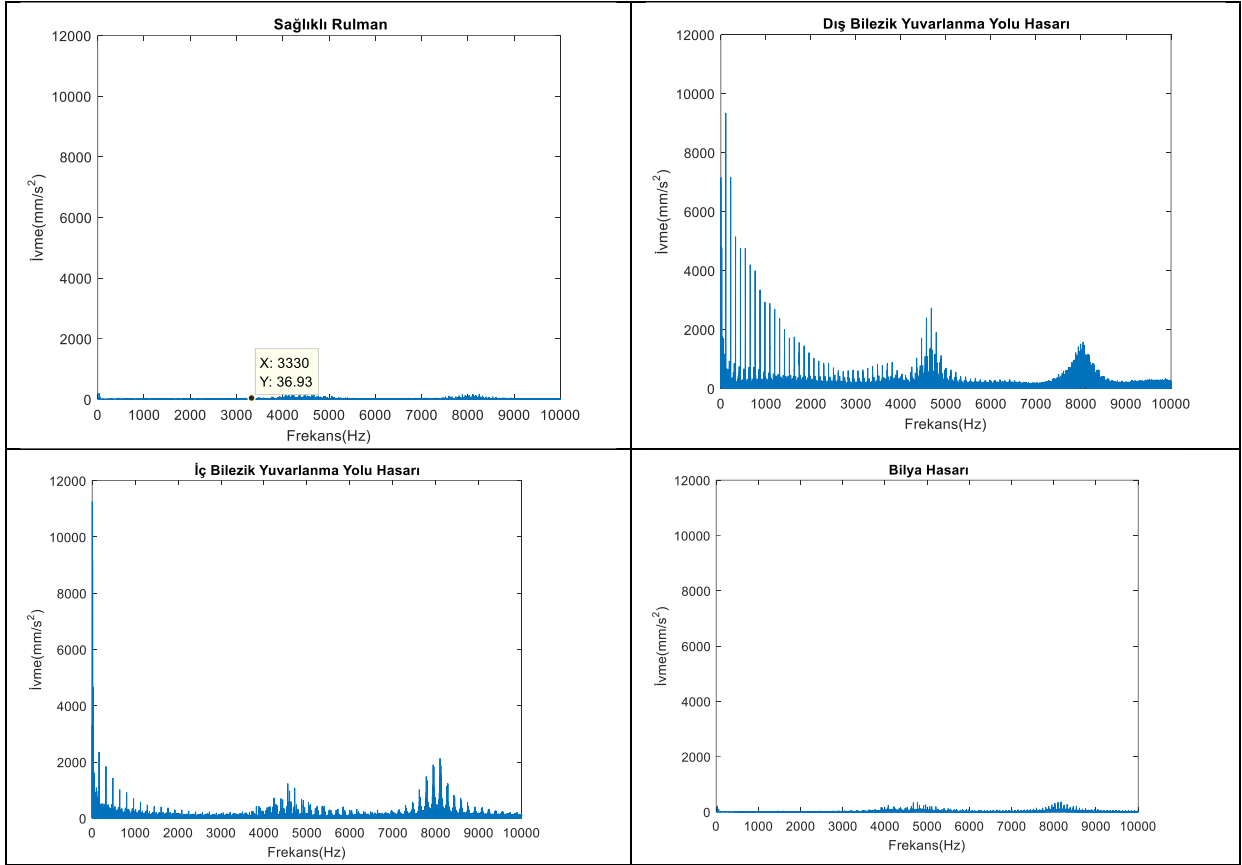
Sağlıklı rulman, dış bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman, iç bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman ve bilya hasarına sahip rulman titreşim verilerinin frekans spektrumları şekil 5'te gösterilmiştir. Frekans spektrumu incelendiğinde ve sağlıklı ve hasarlı rulmanlar kıyaslandığında bir hatanın varlığı görülmektedir ancak karakteristik frekansları şekil 5'teki frekans spektrumuna bakınca görme ihtimalimiz oldukça düşüktür. Sinyallerin frekans içerikleri zamana göre değişim gösterdiği durumlarda Fourier Dönüşümü tek başına sinyal davranışlarını ifade etmede yetersiz kalmaktadır. Karakteristik frekansları zarf spektrumunda görme şansımız vardır. Bunun için de Hilbert Dönüşümü kullanılarak zarf analizi yapılmış ve zarf spektrumu elde edilmiştir. Rulmanlara ait karakteristik arıza frekansları 1800 RPM'de çalışan rulmanın titreşimi için öncesinde hesaplanmış ve Tablo 1'de verilmiştir.



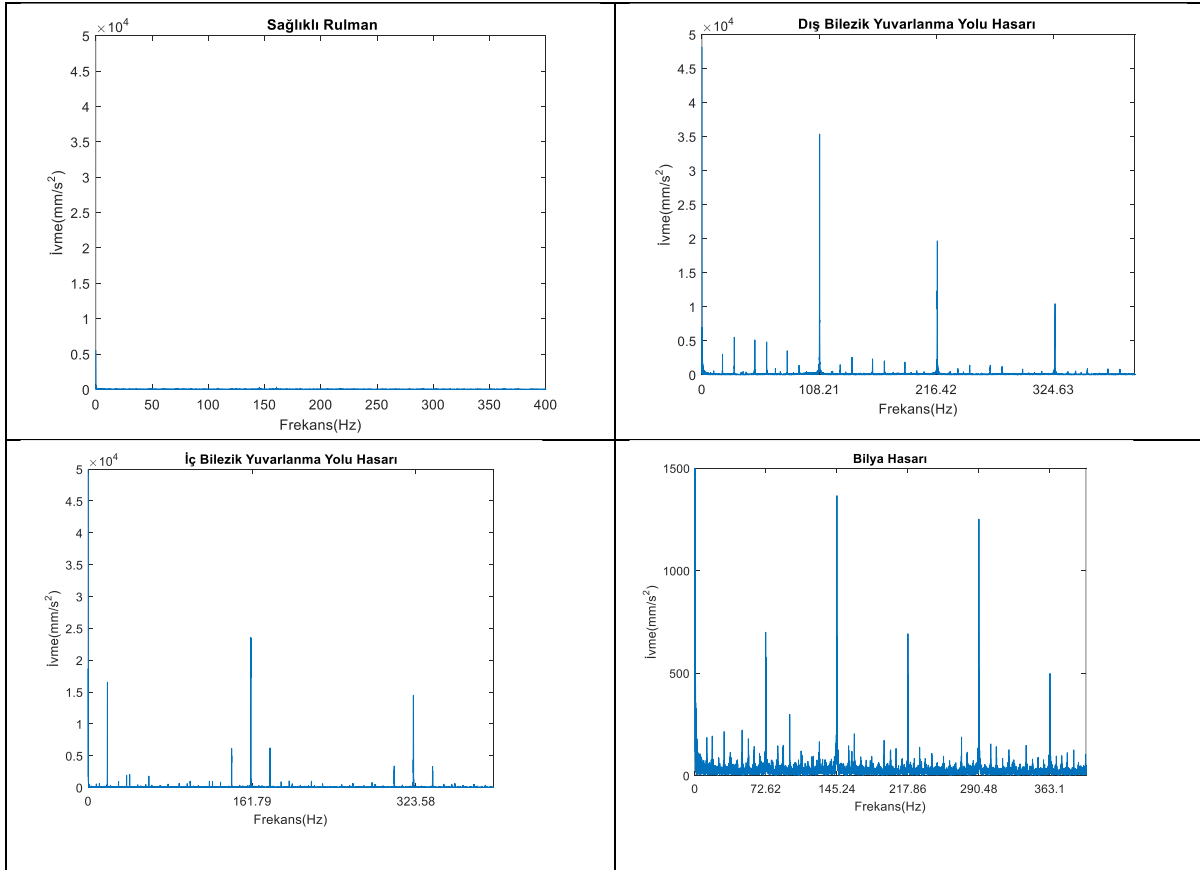
Şekil 4. Sağlıklı rulman (a), Dış bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman (b), Dış bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman (b), İç bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman (c), Bilya hasarına sahip rulman (d) titreşiminin zaman bölgesi analizi gösterimleri

Şekil 6'deki (a) ve (b, c, d) spektrumları karşılaştırıldığında (b)'de zarf spektrumu üzerinde yaklaşık 108,21 Hz aralıklarla oluşan küçük yan bant frekans aktiviteleri oluşmaktadır ve hata devam ettikçe oluşan titreşim spektrumunda ise yan bant aktivitelerinin daha da güçlendiği gözlemlenmiştir. Bu değer tablo dış bilezik yuvarlanma yolu arıza frekansı olduğu görülmektedir. Bu hasara benzer olarak Tablo 1'deki sayısal değerlere göre iç bilezik hata frekansı 161,79 Hz, bilya hata frekansı ise 72,62 Hz'dir ve bu frekansların katlarında harmonikler olduğu gözlemlenmiştir. Titreşim analizine benzer şekilde deneyler sırasında elde edilen gürültü verilerinin zaman ve frekans bölgesi analizleri yapılmıştır. Öncelikle sağlıklı ve hasarlı rulmanlara ait gürültü verilerinin zaman bölgesi değişimlerine bakılmış ve titreşim biçimleri şekil 7'de gösterilmiştir. Sağlıklı rulman ile hasarlı rulmanların gürültü seviyeleri karşılaştırıldığında, bilya hasarına sahip rulmanın

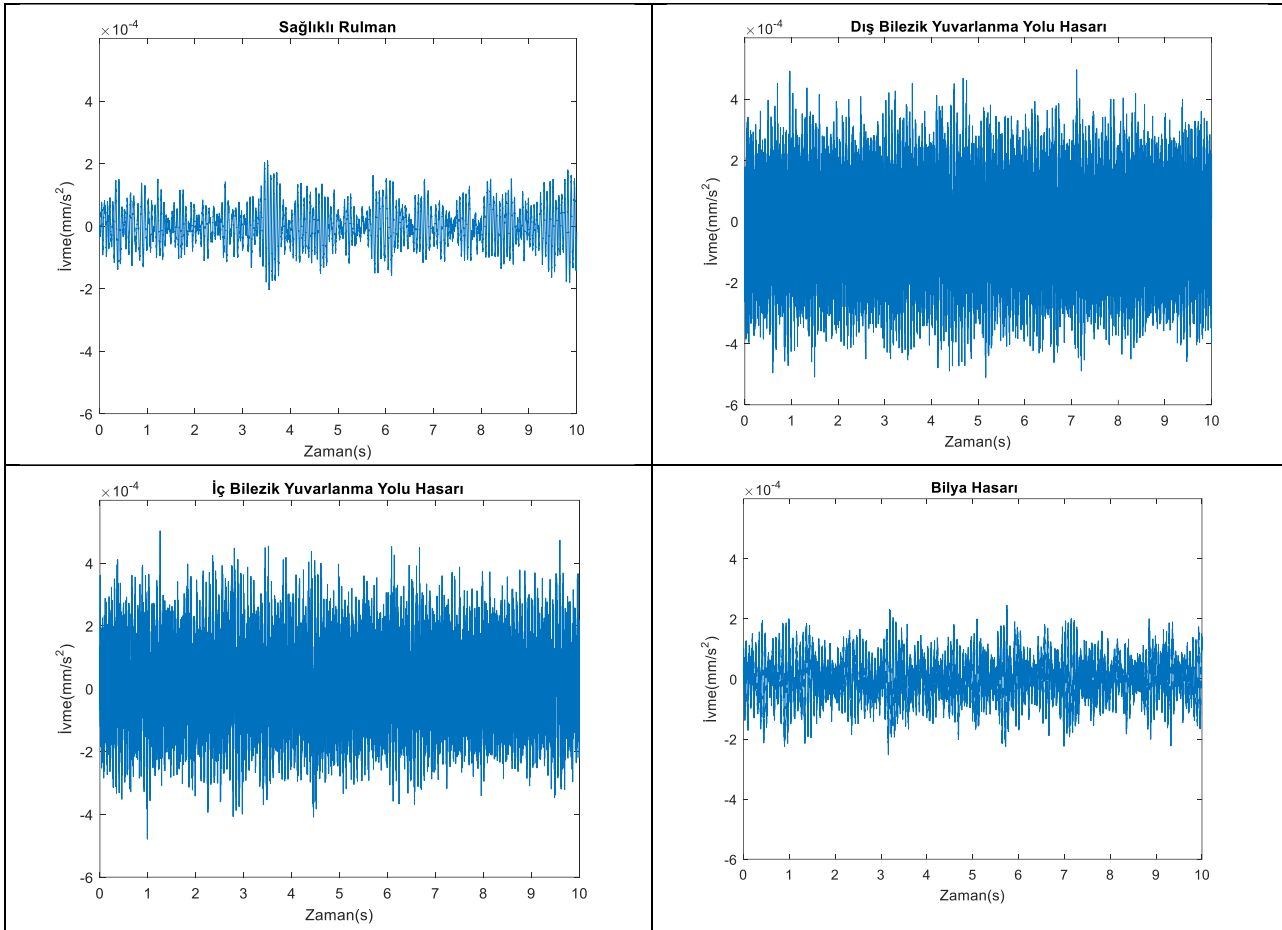
gürültü seviyesinin en düşük, dış bilezik yuvarlanma yolu hasarlı rulmanın ise en yüksek gürültü seviyesine sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Sağlıklı rulman (a), Dış bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman (b), Dış bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman (b), İç bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman (c), Bilya hasarına sahip rulman (d) titreşiminin frekans bölgesi analizi gösterimleri



Şekil 6. Sağlıklı rulman (a), Dış bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman (b), Dış bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman (b), İç bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman (c), Bilya hasarına sahip rulman (d) titreşiminin zarf analizi gösterimleri



Şekil 7. Sağlıklı rulman (a), Dış bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman (b), Dış bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman (b), İç bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman (c), Bilya hasarına sahip rulman (d) gürültü verisi zaman bölgesi analizi gösterimleri

Sağlıklı ve hasarlı rulmanlara ait gürültü verilerinin frekans spektrumları Şekil 8’de gösterilmiştir. 4 farklı frekans spektrumu incelendiğinde hatanın varlığı görülmekle beraber karakteristik frekanslarla ilgili bakıldığında ise karakteristik frekanslarla ilgili bilgi elde edilememektedir. Bu sebeple gürültü verilerine de zarf analizi uygulanmış ve zarf spektrumları çizdirilmiştir. Şekil 9’da görülen zarf spektrumları incelendiğinde ve kıyaslandığında her farklı hata tipinin karakteristik frekansında ve katlarında harmonikler gözlemlenmiştir. Hata frekansları dışında, rulmanın bağlı olduğu milin dönme frekansı rulman hata frekansları ile birleşerek yan bantlar oluşturmuştur. Titreşimler düzenli olarak izlendiğinde rulman bilezikleri ve bilyalardaki aşınmanın

ilerlemesine bağlı olarak, hata frekansları ve yan bantlarındaki bileşenlerin genliğinde bir artış görülmüştür.

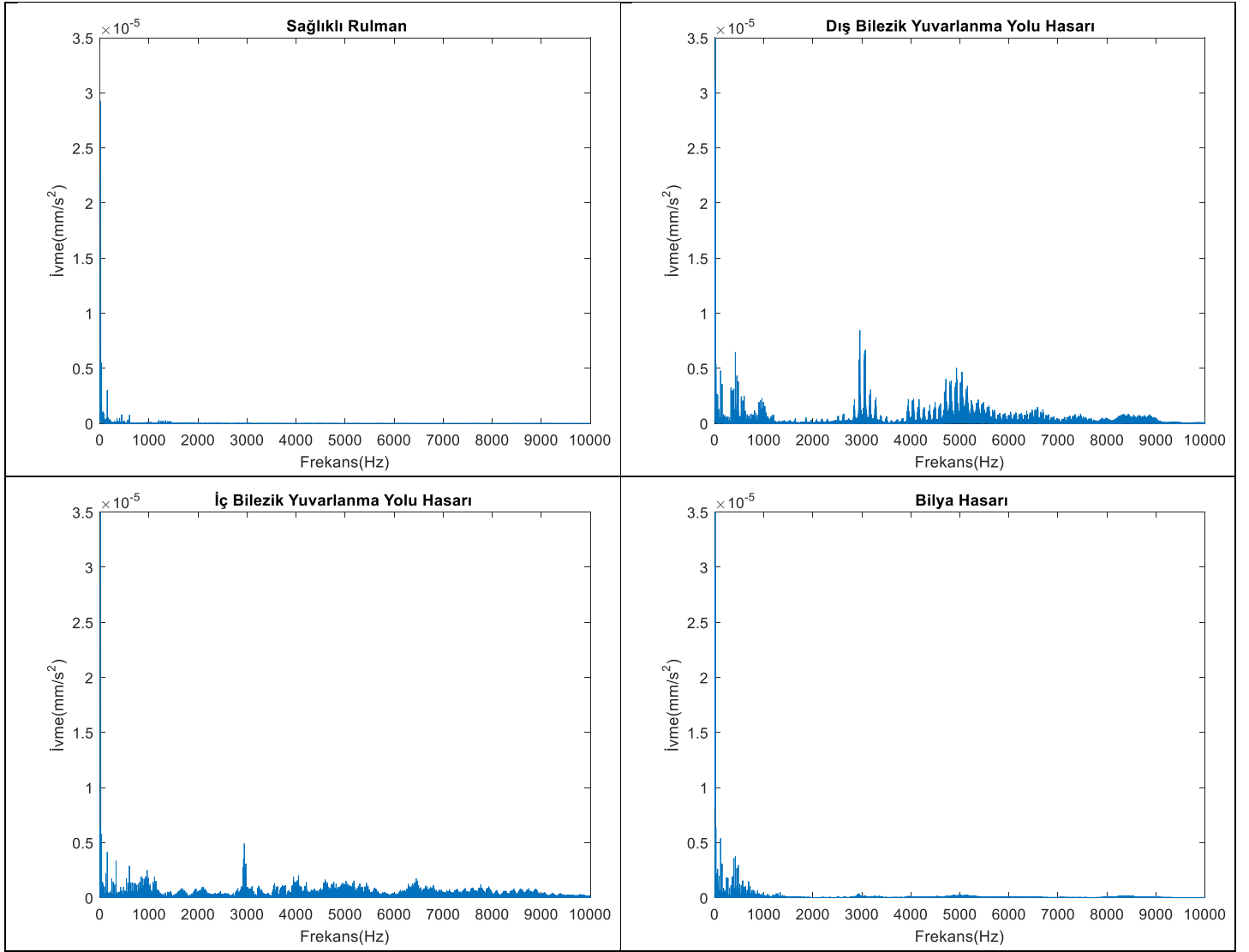
Gürültü ölçümü yarım küre oluşturularak yapıldığı için Tablo 3’de bu açılardaki gürültünün dB cinsinden sayısal değerleri verilmiştir. Farklı hasarlara sahip rulmanların meydana getirdiği gürültü seviyeleri karşılaştırılmıştır. Tablo 3’deki SPL değerlerine bakılıp, sağlıklı rulman ile hasarlı rulmanların gürültü seviyeleri karşılaştırıldığında, bilya hasarına sahip rulmanın gürültü seviyesinin en düşük, dış bilezik yuvarlanma yolu hasarlı rulmanın ise en yüksek gürültü seviyesine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 2. Farklı açılarda yapılan gürültü ölçümünün sayısal değerleri (dB)

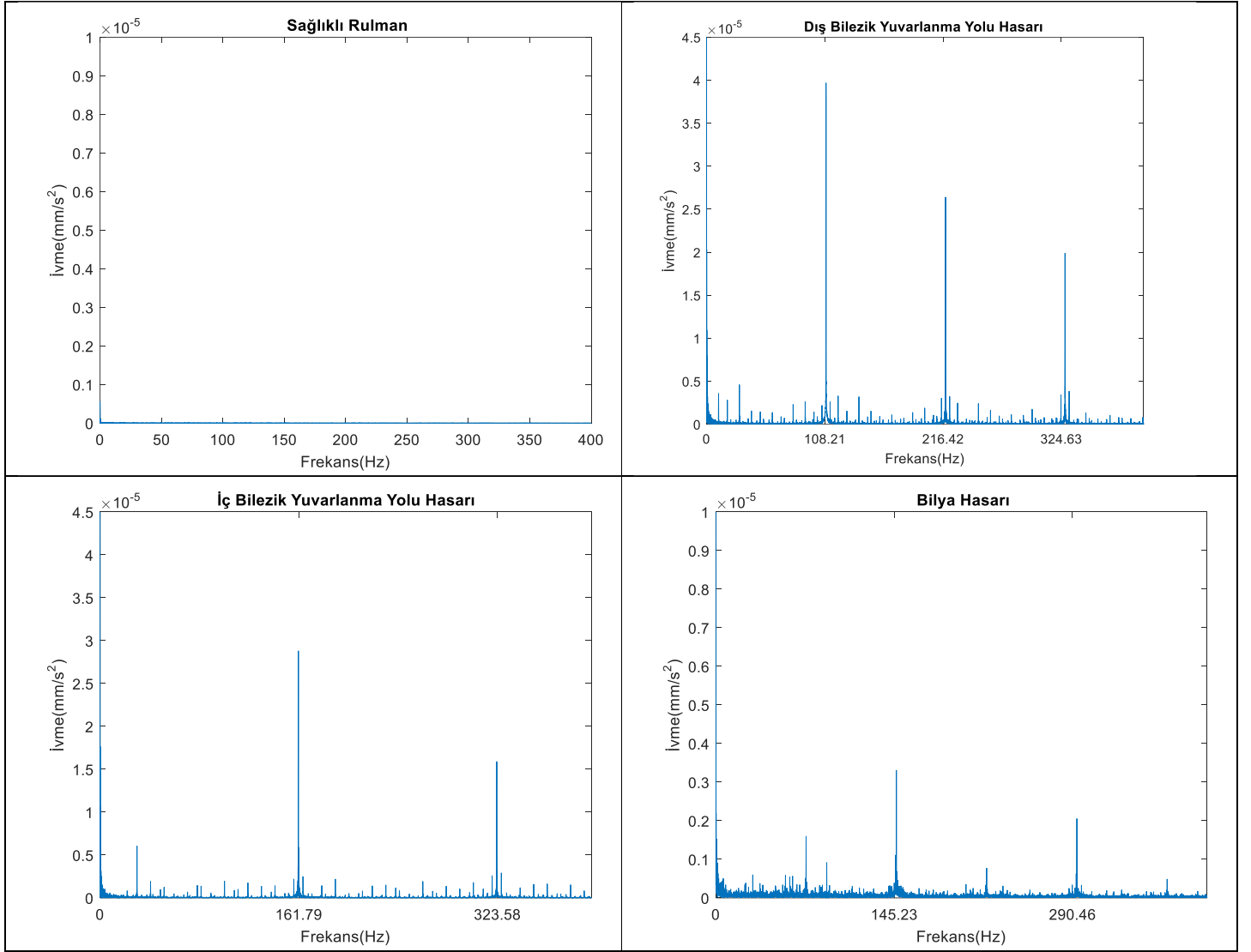
Mikrofon İle Rulman Arasındaki Aç					
Rulman Tipi	30°	60°	90°	120°	150°
Sağlıklı Rulman	57,6	56,6	56,4	56,4	56,3
Dış Bilezik Yuvarlanma Yolu Hasarlı Rulman	69,6	69,2	74,5	70,7	76,3
İç Bilezik Yuvarlanma Yolu Hasarlı Rulman	70,4	66,7	67,7	65,9	66
Bilya Hasarlı Rulman	59	59,2	58,4	56,7	54,9

Tablo 3. Sağlıklı ve hasarlı rulmanlarda ses ve gürültü değerleri

Rulman Tipi	SPL (dB)	P (Pa)	I (W)	Watt	L ₁ (dB)	L _w (dB)	Q (Yönelme Katsayısı)
Sağlıklı Rulman	58	0,016	6	4,4	57,8	56,4	1,81
Dış Bilezik Yuvarlanma Yolu Hasarlı Rulman	67,7	0,05	5,7	4,1	77,5	66,2	1,86
İç Bilezik Yuvarlanma Yolu Hasarlı Rulman	74,5	0,1	2,7	2	74,3	73	2,13
Bilya Hasarlı Rulman	58,4	0,02	6,7	4,8	58,2	56,8	1,2



Şekil 8. Sağlıklı rulman (a), Dış bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman (b), Dış bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman (b), İç bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman (c), Bilya hasarına sahip rulman (d) gürültü verisi frekans bölgesi analizi gösterimleri



Şekil 9. Sağlıklı rulman (a), Dış bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman (b), Dış bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman (b), İç bilezik yuvarlanma yolu hasarına sahip rulman (c), Bilya hasarına sahip rulman (d) gürültü verisi zarf analizi gösterimleri

5. Sonuç

Bu çalışmada sağlıklı ve hasarlı sabit bilyalı rulmanlarda titreşim ve gürültü analizi ile hata tespitine yönelik deneyler yapılmıştır. Bu amaçla üç ayrı rulmanda dış bilezik yuvarlanma yolu, iç bilezik yuvarlanma yolu ve bilya hasarı oluşturulmuştur. Önceden bilinen bu hataların karakteristik arıza frekans değerleri ve ses basınç düzeyleri hesaplanmış ve deney sonuçları ile uyumluluğu incelenmiştir. Hem titreşim hem de gürültü verilerinin zaman ve frekans bölgesi gösterimlerinde hatanın varlığı ile ilgili bilgi edinilirken hatanın karakteristiği ile ilgili yeterli bilgi elde edilememiştir. Bu sebeple Hilbert dönüşümünden yararlanılarak zarf analizi yapılmış ve zarf spektrumları çizdirilmiştir. Zarf spektrumları incelendiğinde ise arıza frekansları ve katlarında harmonikler oluşmuştur. Oluşan harmonik değerleri ile hesaplanan arıza frekans değerleri örtüşmüştür. Ayrıca ses basınç düzeyi (SPL) değerlerine bakılıp, sağlıklı rulman ile hasarlı rulmanların gürültü seviyeleri karşılaştırıldığında, bilya hasarına sahip rulmanın gürültü seviyesinin en düşük, dış bilezik yuvarlanma yolu hasarlı rulmanın ise en yüksek gürültü seviyesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak sağlıklı ve hasarlı rulmanların titreşim ve gürültü verilerine bakıldığında hatanın varlığı görülmüş, zarf

analizi ile de arıza karakteristiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada literatürde var olan diğer çalışmalardan farklı olarak rulman hasar tespitinde gürültü ölçümü metotları tercih edilmiştir. Gürültü ölçümü ile elde edilen sağlıklı ve hasarlı veriler kıyaslandığında gürültü ölçümü ile de hatanın varlığının tespit edilebildiği görülmüştür. Buradan yola çıkarak gelecek çalışmalarda elde edilen gürültü sinyallerine zaman frekans bölgesi analiz yöntemleri uygulanıp hatanın yerinin de tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Ek olarak titreşim sinyallerine birleşik zaman frekans bölgesi analiz yöntemleri uygulanarak hasarın yerinin tespit edilmesi amaçlanmaktadır.

6. Teşekkür

Bu çalışma Ortadoğu Rulman Sanayi ve Ticaret A.Ş. Ar-Ge Merkezi'nde oluşturulan deney düzeneğinde yapılmıştır. Bu bildirinin yazarları, katkılarından dolayı Ortadoğu Rulman Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasına teşekkür ederler.

Kaynakça

Ho, D. ve Randall, R.B. (2000). Optimisation of bearing diagnostic techniques using simulated and actual bearing

- fault signals. *Mechanical systems and signal processing*, 14(5): 763-788.
- Williams, T., Ribadeneira, X., Billington S. ve Kurfess, T. (2001). Rolling Element Bearing Diagnostics in Run-to-Failure Lifetime Testing, *Mechanical System and Signal Processing*, Cilt 15(5): 979-993.
- Rubini, R. ve Meneghetti U. (2001). Application of the envelope and wavelet transform analyses for the diagnosis of incipient faults in ball bearings. *Mechanical systems and signal processing*, 15(2): 287-302.
- Kıral, Z.ve Karagülle, H. (2005). Rulmanlı Yatak Geometrilerinde Bölgesel Hata Adedinin Titreşim Sinyalleri Üzerindeki Etkisinin Zaman Ve Frekans Ortamlarında İncelenmesi. 12. *Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, Kayseri, Türkiye 9-11 Haziran 2005*.
- Arslan, H., Aslan, E. ve Aktürk, N. (2006). Bilyalı Rulman Hasarlarının titreşim analizi yöntemiyle incelenmesi. *Gazi Üni. Müh. ve Mim. Fak. Dergisi*, Cilt 21(3): 541-552.
- Aliustaoğlu, C., Ocak, H. ve Ertunç, H., M. (2007). Rulman Titreşim Analizi ile Bölgesel Hataların İncelenmesi, *TOK '07 Bildiriler Kitabı*.
- Jayaswal, P. and Wadhvani, A.K (2009). Application of Artificial Neural Networks Fuzzy Logic and Wavelet Transform in Fault Diagnosis via Vibration Signal Analysis: A review, *Australian Journal of Mechanical Engineering*, Cilt 7(2): 157-171.
- Boukhobza, M.E., Derouiche, Z., Foitih,Z., A. (2013). Location and Evaluation Of Bearings Defects By Vibration Analysis And Neural Networks, *Mechanics*, Cilt 19(4): 459-465.
- Bayram, S., Kaplan, K., Kuncan, K. ve Ertunç. H. M. (2014). Rulman Hatalarının Dalgacık Dönüşümü Yöntemi Kullanarak Elde Edilen Katsayılara Etkisi, *IEEE 22nd Signal Processing, Communication and Applications Conference*.
- Yeşilyurt, İ. ve Özdemir, Ö. (2015). Dengesiz Yüke Maruz Silindirik Masuralı Rulman Arızasının Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü Yardımıyla Belirlenmesi. *Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu, İzmir, Türkiye 14-17 Haziran 2015*.
- Glowacz A, Glowacz W, Glowacz Z, Kozik J (2018). Early fault diagnosis of bearing and stator faults of the single-phase induction motor using acoustic signals. *Measurement* 113, (1-9).
- Wang, X., Mao, D. ve Li, X. (2020). Bearing fault diagnosis based on vibro-acoustic data fusion and 1D-CNN network. *Measurement*, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108518>.
- Ozkat, E. C. (2021). Makine Öğrenmesi Metodolojisi Kullanılarak Yüksek Hızlı Rulmanlarda Sağlık Göstergesinin Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (22), 176-183.