

Araştırma Makalesi / Research Article

Titreşim Spektrum Analizi ve İvme Ölçümleri ile Rulman Sağlığı Değerlendirmesi: Deneysel Bir İnceleme

Ahmet KÖKEN^{1*}, Sultan Seda ÜLGER², Abdurrahman KARABULUT³

^{1*} Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Kütahya, Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7047-5832>, ahmet.koken@dpu.edu.tr

² Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyonkarahisar, Türkiye

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0580-5900>, s.sedaa@hotmail.com

³ Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye,

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7663-2579>, akarabulut@aku.edu.tr

Geliş/ Received: 13.12.2024;

Revize/Revised: 04.02.2025

Kabul / Accepted: 09.03.2025

ÖZET: Bu çalışma, rulman sağlığının değerlendirilmesinde ve hasar tespitinde titreşim spektrum analizleri ve ivme ölçümlerinin etkinliğini araştırmaktadır. Deneysel analizler, sağlam (A1 ve B1) ve iç bileziği hasarlı (A2 ve B2) rulmanlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sağlam rulmanların titreşim spektrumlarında düşük genlikli ve belirgin olmayan pikler gözlemlenirken, hasarlı rulmanlarda karakteristik frekanslarda yüksek genlikli pikler ve ivme ölçümlerinde önemli hata sapmaları tespit edilmiştir. A2 rulmanında 15,4 Hz, 27 Hz, 48,2 Hz ve 136,9 Hz frekanslarında belirgin pikler gözlemlenmiştir. B2 rulmanında ise 80 Hz ve 160 Hz frekanslarındaki ivme ölçümleri, rulman hasarının neden olduğu önemli sapmaları ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, titreşim analizinin rulman arızalarının erken teşhisi için güvenilir bir yöntem olduğunu ve düzenli bakımın rulman ömrünü uzatabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Titreşim analizi, Rulman sağlığı, Hasar tespiti, İvme ölçümü

*Sorumlu yazar / Corresponding author: ahmet.koken@dpu.edu.tr

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Vibration Spectrum Analysis and Acceleration Measurements for Bearing Health Assessment: An Experimental Investigation

ABSTRACT: This research explores the efficacy of vibration spectrum analysis and acceleration measurements for evaluating bearing health and detecting faults. Experimental investigations were performed on both healthy (A1 and B1) and inner race damaged (A2 and B2) bearings. The vibration spectra of healthy bearings exhibited low-amplitude and indistinct peaks, whereas damaged bearings demonstrated high-amplitude peaks at characteristic frequencies, along with significant error deviations in acceleration measurements. Notable peaks were observed in bearing A2 at frequencies of 15.4 Hz, 27 Hz, 48.2 Hz, and 136.9 Hz. Moreover, acceleration measurements at 80 Hz and 160 Hz for bearing B2 revealed substantial deviations attributable to the bearing damage. These findings suggest that vibration analysis offers a reliable approach for the early diagnosis of bearing failures, and that routine maintenance can contribute to prolonging bearing service life.

Keywords: Vibration analysis, Bearing health, Fault detection, Acceleration measurement

1. GİRİŞ

Dönen makinelerin temel bileşenlerinden biri olan rulmanların sağlık durumu, makinenin titreşim analizleri ile doğrudan ilişkilidir. Makine yataklarından ölçülen titreşim verileri, rulmanlarda meydana gelebilecek olası sorunlar hakkında kritik bilgiler sağlamaktadır. Rulmanlarda, üretim hataları, yetersiz yağlama, aşındırıcı partiküller ve nem gibi faktörler nedeniyle çeşitli arızalar ortaya çıkabilmektedir (Çimen, 2015). Bu arızaların erken tespiti ve önlenmesi amacıyla titreşim analizi yöntemi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntemde, makinelerden periyodik olarak alınan titreşim sinyalleri analiz edilerek, arızanın türü ve şiddeti belirlenmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, makine için bakım planlaması yapılması veya arızalı parçanın değiştirilmesi gibi önlemler uygulanmaktadır. Titreşim verilerinin düzenli olarak toplanması ve analiz edilmesi, makinelerin ömrünü uzatırken, plansız duruşları ve gereksiz parça değişimlerini önlemektedir.

Mekanik sistemlerin titreşim analizinin amacı, sistem davranışlarını farklı dinamik koşullar altında elde etmektir (Çaşka ve ark., 2023; De Luca ve Book, 2016). Farklı dinamik koşullar altında sönüm oranı, artık titreşimler ve doğal frekanslar gibi sistem davranışlarını elde etmek, mekanik sistemlerde titreşim analizinin amaçlarındandır (Yavuz ve ark., 2018). Titreşim analizi, bakım stratejilerinde öngörücü bakıma geçişi sağlayarak bakım maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır. Mobley (1990) tarafından yapılan araştırmaya göre, üretim maliyetleri içerisinde bakım maliyetlerinin payı sektörlere bağlı olarak %15 ile %40 arasında değişmektedir. Gereksiz bakım faaliyetleri, toplam bakım maliyetlerinin yaklaşık üçte birini oluşturmaktadır. Bu nedenle, titreşim analizi yoluyla arızaların erken teşhisi, planlı bakım uygulamalarının yaygınlaştırılması ve bakım maliyetlerinin optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Rulmanlarda titreşim analizi yoluyla arıza tespiti, 1950'lerden bu yana mühendislik literatüründe yoğun bir şekilde incelenen bir konudur. Bu alandaki ilk çalışmalar, rulmanların titreşim özelliklerinin matematiksel olarak modellenmesi ve elde edilen verilerin çeşitli sinyal işleme teknikleri kullanılarak analiz edilmesine odaklanmıştır. Bu süreç, rulman arızalarının erken teşhisi için önemli bir veri tabanının oluşturulmasına katkı sağlamıştır. Literatürde bu konuda gerçekleştirilen çalışmalardan bazıları şu şekildedir: Darmo ve ark. (2022), burç yatak arızaları, yağ dışı pompalarında temel arıza nedenlerinden biri olarak belirtilmiştir. Burç yatak veya düz yatak iç

halkasında meydana gelen aşınma, gevşemeye neden olmakta ve bu durum dişlilerin zarar görmesine yol açmaktadır. Bu tür arızalar, dönme hızı frekansının harmonikleri ile tespit edilebilmekte olup, bu harmonikler arızanın hem belirtisi hem de nedeni olarak ifade edilmektedir. Jamaludin ve ark. (2002), akustik emisyon yöntemi kullanılarak düşük devirlerde çalışan rulmanlardaki hasarların tespitinde bu yöntemin etkinliğini ortaya koymuşlardır. Çalışmada, 1,2 dev/dk açısal hızıyla dönen bir rulmanda yuvarlanma elemanı, iç bilezik, dış bilezik hasarı, gevşek iç bilezik ve gevşek dış bilezik durumları için titreşim ölçümleri yapmışlar ve analiz etmişlerdir. Williams ve ark. (2001), rulmanların ömrünü belirlemek amacıyla sağlıklı rulmanları sabit ve değişken devirlerde hasar oluşuncaya kadar test etmişlerdir. Bu deneysel çalışma, rulmanların farklı çalışma koşullarındaki dayanımını değerlendirmeyi hedeflemiştir. Madar ve ark. (2022), sadece iç halka, dış halka, bilyeler ve kafeste rulman arıza sıklığını göstermekle kalmamış, aynı zamanda doğal frekans uyarımının da rulmana zarar verebileceğini ve arıza belirtilerine yol açabileceğini belirtmişlerdir. Sıvı halka kompresör için titreşim analizi ve sinyal işleme yöntemleri kullanılarak, doğal frekansların rulman arıza analizinde nasıl kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır. Dron ve ark. (2001), bilyeli rulmanlardaki titreşim analizinde parametrik spektrum analiz yöntemini kullanmış ve hasar teşhisi için yüksek çözünürlüklü bir teknik uygulamışlardır. Bu yöntem sayesinde, rulmanlardaki hasarların daha detaylı ve doğru bir şekilde tespit edilebileceğini belirtmişlerdir. Aktürk ve ark. (2000), açısal temaslı iki rulman üzerine yataklanmış bir mil sistemi oluşturarak, rulman kaynaklı titreşimlerin oluşum mekanizmalarını incelemişlerdir. Bu çalışmada, hem sağlıklı rulmanların neden olduğu titreşim frekansları hem de rulmanlardaki üretim hatalarının titreşimlere olan etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmişlerdir. Hemati ve ark. (2023), rulmanların statik ve dinamik yükleri tolere eden hayati bir bileşen olduğunu belirtmişlerdir. Rulmanların kalan ömrünü hesaplamak için birçok faktörün önemli olduğunu vurgulamışlardır. Oluklu arıza ve kaçak akım gibi etkenlerin rulmanların arızalanmasına neden olduğunu ifade etmişlerdir. Rulman oluklu arızası için titreşim analizi ve sinyal işleme yöntemlerini kullanarak rulman arıza analizini araştırmışlardır. Brie (2000), tek noktadan hasarlı bir rulmandaki titreşim sinyallerini matematiksel olarak modellemiştir. Rubini ve ark. (2001), normal çalışma koşullarında rulmanlardaki yorulma hasarlarının tespiti için klasik spektrum ve zarf analizi yöntemlerinin yaygın olarak kullanıldığını belirtmişlerdir. Ancak bu araştırmacılar, bu yöntemlerin her zaman yeterli olmadığını ve bazı durumlarda rulmanlardaki yorulma hasarlarının tam olarak tespit edilemeyeceğini vurgulamışlardır. Mishra ve ark. (2022), santrifüj pompadaki bilyeli rulman arıza analizini araştırmışlardır. MATLAB yazılımını kullanarak, toplanan deneysel verilere dayalı olarak arıza analizi gerçekleştirmişlerdir. Rulman içine su girişinin, rulman ömrü üzerinde zararlı bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Yıldırım ve Karahan (2015), kompresör rulmanlarında gerçekleştirilen titreşim analizi sayesinde hem dış hem de iç bileziklerde oluşan hasarların tespit edildiğini ve bu analizlerin kestirimci bakım çalışmalarına veri sağladığını belirtmişlerdir. Ghazwani ve Pham (2024), bilyeli yatakların teorik frekansını hesaplamak için Hertz temasına dayalı bir matematiksel model kullanmışlardır. İğne yatağının değişken hareketi nedeniyle, iki darbe arası süreyi dikkate alarak arızalı darbe frekansını tahmin etmek için yeni bir matematiksel model önermişlerdir.

Mühendislik sistemlerinin modellenmesinde deneysel yöntemlerden gün geçtikçe daha fazla faydalanılmaktadır (Çaşka ve Dokuz, 2022). Bu çalışmada, rulman arızalarının titreşim analizi yöntemiyle belirlenmesine yönelik bir deneysel düzenek tasarlanmıştır. Referans olarak sağlıklı rulmanlardan elde edilen temel titreşim verileri, iç bilezik bilye yuvarlanma yolu hatası bulunan rulmanlardan toplanan verilerle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sayesinde, bahsi geçen hasarın

titreşim sinyalleri üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sonuçlar, grafiksel olarak sunularak kapsamlı bir değerlendirme yapılması sağlanmıştır.

1.1 Frekans Analizi

Rulmanlar, operasyon esnasında doğal yıpranma veya yapısal defektler nedeniyle karakteristik frekanslarda titreşimler üretirler. İç bilezik, dış bilezik ve yuvarlanma elemanlarındaki (bilyeler) hasarlar, rulmanın geometrik özelliklerine bağlı olarak farklı frekans bileşenlerinin ortaya çıkmasına neden olur. Bu frekans bileşenlerinin analizi, arızanın türü ve ilerleme durumu hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Titreşim spektrumunda, frekans değeri arızanın tipini belirtirken, genlik değeri arızanın şiddetini yansıtır. Arıza frekansları, motorun dönme hızı ile doğrudan ilişkilidir; motor devri değiştikçe, yuvarlanma elemanlarının hasarlı bölge üzerinden geçme sıklığı da değişir ve bu durum arıza frekanslarında kaymaya yol açar. Rulmanlara ilişkin genel arıza frekansları Eşitlik 1, 2, 3 ve 4'te sunulmuştur (Aliustaoğlu ve ark., 2007).

$$\text{Temel Frekans (TF)} = \frac{f_s}{2} \left[1 - \frac{R_b}{d_m} \right] \quad (1)$$

$$\text{Bilye Dönme Frekansı (BD)} = \frac{f_s d_m}{2 R_b} \left[1 - \left[\left(\frac{R_b}{d_m} \right)^2 \right] \right] \quad (2)$$

$$\text{Dış Bilezik Frekansı} = N (TF) \quad (3)$$

$$\text{İç Bilezik Frekansı (İB)} = N (f_s - TF) \quad (4)$$

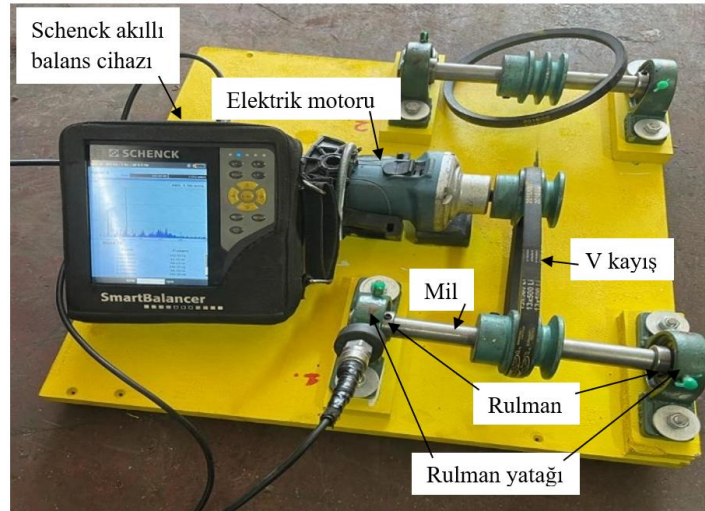
Eşitlik 1-4 de belirtilen f_s parametresi dönme frekansını, R_b parametresi bilye çapını ve d_m parametresi ise bilye merkezleri arasındaki mesafeyi temsil etmektedir.

Rulman arıza frekansları; rulman geometrisindeki varyasyonlar, temas açısı, kayma hareketi ve mil dönme hızı gibi çeşitli faktörlerden etkilenebilir. Bu sebeple, deneysel olarak ölçülen titreşim frekansları ile teorik olarak hesaplanan frekanslar arasında küçük farklılıkların oluşması olasıdır. Hasarlı bir rulmanın titreşim spektrumunda gözlemlenen evreler, aşağıdaki şekilde tanımlanabilir (Orhan ve ark., 2003):

- **Erken Evre:** Spektrum analizlerinde, temel arıza frekansının kendisinden ziyade, bu frekansın harmonik bileşenleri ön plana çıkar. Bu aşamada temel arıza frekansının belirginliği düşüktür.
- **Orta Evre:** Arızanın ilerlemesiyle birlikte, arıza frekansının daha yoğun harmonikleri tespit edilir. Arıza frekansları, mil dönme hızı ile modülasyona uğrayarak yan bantların oluşmasına yol açar. Yan bant genliklerinin, temel frekansın genliğini aşması, arızanın kritik bir düzeye ulaştığının göstergesidir.
- **Geç Evre:** Spektrumda, arıza frekansının harmonik ve yan bantlarına ek olarak, temel arıza frekansı da belirgin bir şekilde ortaya çıkar.
- **İleri Evre:** Rulmanın sürekli bozulması, iç boşlukların artmasına sebep olur. Bu durum, rulman elemanları arasındaki çarpışmaları şiddetlendirir. Bu çarpışmalar, spektrumda geniş bantlı bir gürültü oluşumuna yol açar. Titreşim genlikleri azalabilir ve bu geniş bantlı gürültünün ayırt edilmesi güçleşebilir.

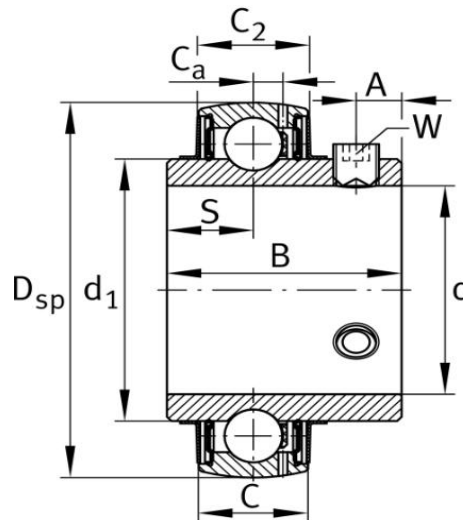
2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu araştırmada, rulman arızalarının titreşim analizi ile teşhisi amacıyla deneysel bir çalışma yürütülmüş ve Şekil 1'de görülen bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Deney düzeneği, rulmanların operasyonel koşullarını simüle etmek için basit bir shaft-rulman sisteminden oluşmaktadır. Sistem, bir elektrik motoru vasıtasıyla tahrik edilen V kayışlar aracılığıyla döndürülmektedir. Rulman yatakları ve mil, rulmanların uygun şekilde konumlandırılması için tasarlanmıştır. Sistemdeki titreşimleri minimize etmek amacıyla, V kayış gerginliği optimize edilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneğinin tüm bileşenlerini gösteren genel bir görünüm

Bu deneyde, rulmanların titreşim analizlerinin gerçekleştirilmesi için Schenck akıllı balans cihazı kullanılmıştır. Elektrik motoruna bağlı mil-rulman sisteminde meydana gelen titreşimler, balans ölçer aracılığıyla ölçülerek veri toplama sistemine aktarılmıştır. Rulman yataklarına konumlandırılan titreşim sensörleri vasıtasıyla, sağlam ve hasarlı rulmanlara ait titreşim verileri karşılaştırılmıştır. Deney düzeneğinde analiz edilen UC204 tipi rulmanların geometrik özellikleri Şekil 2'de, boyutları ise Çizelge 1'de sunulmuştur.



Şekil 2. UC204 test rulmanına ait geometrik özellikler

Çizelge 1. Rulman boyutları (mm)

Boyutlar	Sembol	Değer
Dış çap	D_{sp}	47
İç çap	d	20
Genişlik	B	31
Dış halka genişliği	C	17
İç halka kaburga çapı	d_1	27,56
Yuvarlanma yolu mesafesi	S	12,7
Dış mesafesi	A	5
Conta toplam genişliği	C_2	16,8
Yağlama deliğine mesafe	C_a	4,2
Düz yüzey genişliği	W	3

Bu çalışmada, rulman arızalarının erken teşhisine yönelik titreşim analizi yöntemi kullanılmıştır. Elektrik motoruna bağlı bir test düzeneğinde farklı kondisyondaki rulmanlardan elde edilen titreşim verileri, ivmeölçer ve hız transdüseri aracılığıyla kaydedilmiştir. Elde edilen verilerin frekans spektrumu analizi, rulman arızalarına özgü karakteristik frekansların belirlenmesinde kullanılmıştır. Deney sonuçlarının, titreşim sensörünün konumlandırılması ve işletme koşulları gibi faktörlerden etkilenebileceği dikkate alınmalıdır.

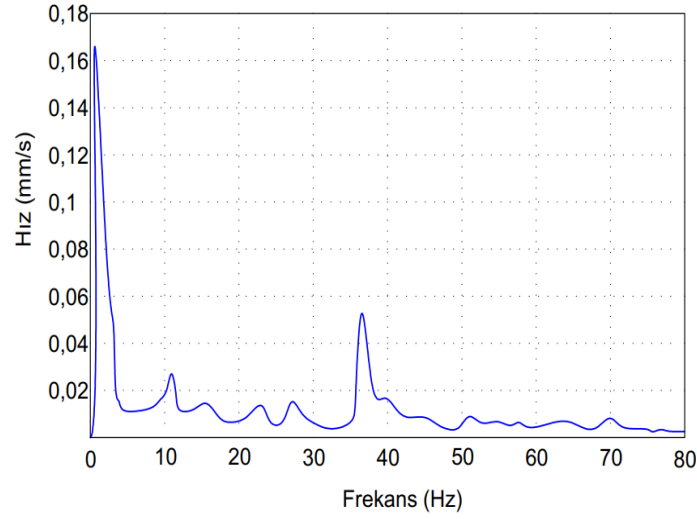
Rulmanların güvenilirliği ve ömrü, endüstriyel uygulamalar için kritik öneme sahiptir. Bu araştırmada, rulman arızalarının titreşim analizi ile tespitine yönelik deneysel bir inceleme yapılmıştır. Farklı hasar seviyelerindeki rulmanlardan elde edilen titreşim verileri, frekans ortamında analiz edilerek, arızanın türü ve şiddeti hakkında bilgi elde edilmiştir. Çalışma sonuçları, rulmanların güvenilirliğini artırma ve bakım stratejilerini geliştirme konusunda önemli veriler sunmaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yeni üretilen rulmanlarda bile, yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan hata frekansları gözlemlenmiştir. Rulman bileziğindeki mikroskobik pürüzler, düşük genlikli frekans bileşenleri oluşturarak, titreşim analizlerinde belirginleşmiştir. Bu düşük genlikli frekans bileşenleri, hasarın ilerlemesi sürecinde önemli bir gösterge olarak kullanılabilir.

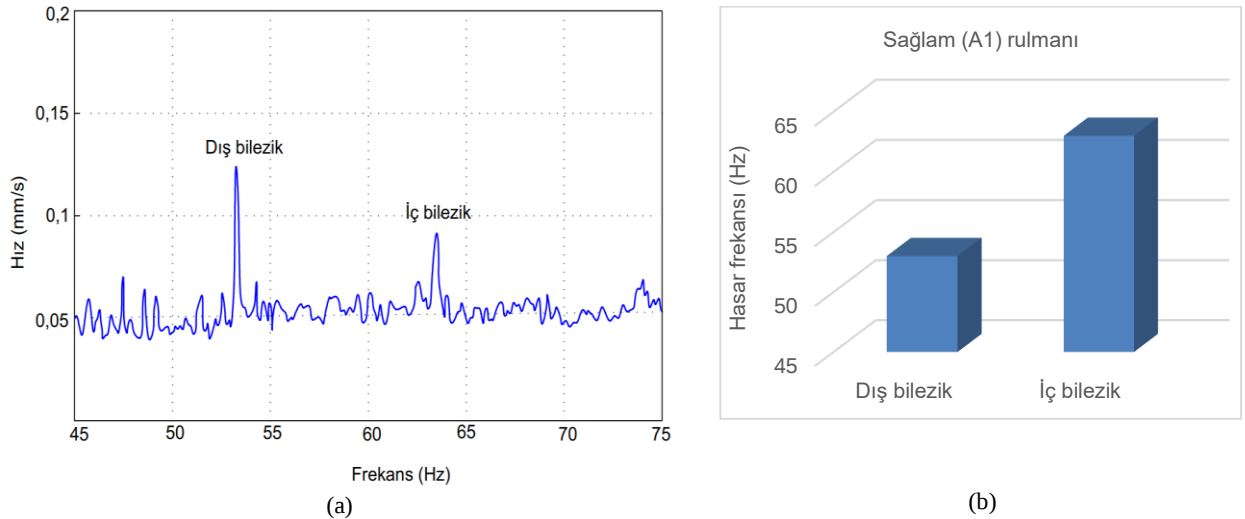
3.1 Sağlam Rulman Analizleri

Sağlam (A1) rulmanının titreşim spektrumu analizine ait sonuçlar Şekil 3'te sunulmaktadır. Spektrum incelemesinde 0,5 Hz, 11,23 Hz, 26,8 Hz ve 37,3 Hz frekanslarında belirgin pikler gözlemlenmiştir. Bu piklere karşılık gelen genlik değerleri sırasıyla 0,164 mm/s, 0,027 mm/s, 0,014 mm/s ve 0,049 mm/s olarak tespit edilmiştir. 0,5 Hz'deki pik, çevresel titreşimler veya sistemin yavaş hareketleri gibi mekanik olmayan etkilerden kaynaklanabilir. Diğer frekanslardaki (11,23 Hz, 26,8 Hz ve 37,3 Hz) pikler ise rulmanın dönüş hızı veya sistemdeki diğer mekanik bileşenlerin etkileşimleri ile ilişkili olabilir. Tüm piklerin genlik değerleri oldukça düşüktür ve bu, rulmanın sağlam olduğunu ve herhangi bir ciddi hasar belirtisi göstermediğini ortaya koymaktadır. Spektrumda harmonikler veya yan bantlar gibi hasar belirtileri gözlemlenmemiştir. Bu bulgular, rulmanın düzgün çalıştığını ve sağlam durumunu koruduğunu göstermektedir. Rulmanın bu durumunu sürdürmek için düzenli bakım ve titreşim analizi önerilmektedir.



Şekil 3. Sağlam rulman (A1) titreşimleri

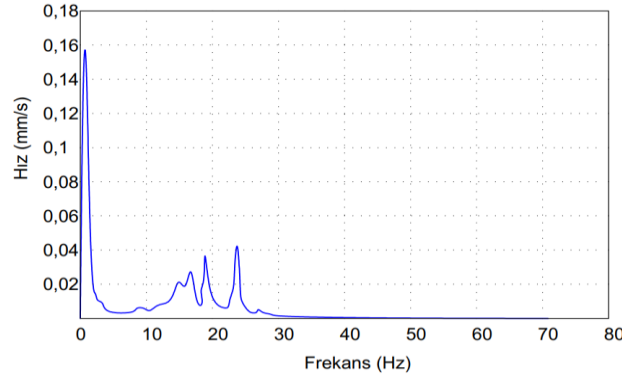
Sağlam (A1) rulmanının titreşim analizleri sonucunda elde edilen dış ve iç bilezik hata frekansları, Şekil 4(a)'da gösterilmekte olup, bu bulgular Şekil 4(b)'de grafiksel olarak sunulmuştur. Elde edilen ölçüm değerlerine göre, dış bilezik arıza frekansı yaklaşık 53 Hz, iç bilezik arıza frekansı ise yaklaşık 63 Hz olarak belirlenmiştir. Yeni üretilmiş rulmanlarda dahi, idealden sapmalar nedeniyle bölgesel hata karakteristikleri tespit edilebilir. Bu durum, rulman yüzeylerinin mutlak pürüzsüzlükten uzak olmasından kaynaklanmaktadır. Nitekim, Şekil 4'te sunulan sağlam bir rulmana ait titreşim verileri üzerinde yapılan analizler, rulman hata frekanslarının varlığını ortaya koymaktadır. İç ve dış bileziklerde bulunan mikroskobik yüzey kusurları, düşük genlikli frekans bileşenlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Bu genlik değerleri, hasar gelişiminin izlenmesinde temel referans noktaları olarak değerlendirilmelidir. Bu bulgular ışığında, tamamen titreşimsiz bir mekanik sistemin varlığının teorik bir ideal olduğu söylenebilir.



Şekil 4. Sağlam (A1) rulmanı; (a) titreşim frekans spektrumu, (b) hata frekansları

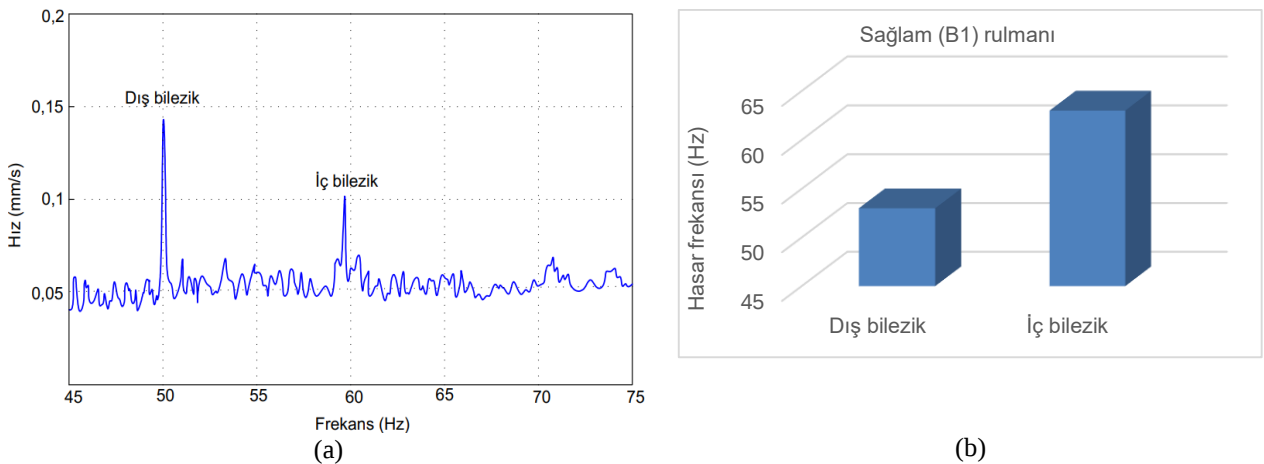
Sağlam (B1) rulmanına ait titreşim spektrumu analiz sonuçları Şekil 5'te gösterilmektedir. Spektrumda 0,5 Hz, 14,7 Hz, 18,6 Hz ve 24,38 Hz frekanslarında belirgin pikler tespit edilmiştir. Bu piklerin genlik değerleri sırasıyla 0,159 mm/s, 0,027 mm/s, 0,038 mm/s ve 0,042 mm/s olarak ölçülmüştür. 0,5 Hz'deki pik, çevresel titreşimler veya sistemin yavaş hareketleri gibi mekanik olmayan etkilerden kaynaklanabilir. Diğer frekanslardaki (14,7 Hz, 18,6 Hz ve 24,38 Hz) pikler ise

rulmanın dönüş hızı veya sistemdeki diğer mekanik bileşenlerin etkileşimleri ile ilişkili olabilir. Tüm piklerin genlik değerleri oldukça düşüktür ve bu, rulmanın sağlam olduğunu ve herhangi bir ciddi hasar belirtisi göstermediğini ortaya koymaktadır. Spektrumda harmonikler veya yan bantlar gibi hasar belirtileri gözlemlenmemiştir. Bu bulgular, rulmanın düzgün çalıştığını ve sağlam durumunu koruduğunu göstermektedir. Rulmanın bu durumunu sürdürmek için düzenli bakım ve titreşim analizi önerilmektedir.



Şekil 5. Sağlam (B1) rulman titreşim spektrum analizi

Sağlam (B1) rulmanına ait dış ve iç bileziklerdeki olası arıza frekansları, titreşim analizi ile tespit edilmiş olup (Şekil 6(a)), elde edilen bu bulgular Şekil 6(b)'de grafiksel olarak ifade edilmiştir. Ölçümler sonucunda, dış bilezik hasar frekansının yaklaşık 50 Hz, iç bilezik hasar frekansının ise yaklaşık 59 Hz olduğu tespit edilmiştir. Yeni üretilen rulmanlarda dahi, ideal yüzey pürüzlülüğünden sapmalar nedeniyle bölgesel hata karakteristikleri gözlemlenebilir. Şekil 6'da sunulan titreşim analizleri, sağlam bir rulmanda bile rulman hata frekanslarının bulunduğunu göstermektedir. İç ve dış bileziklerdeki mikroskobik kusurlar, düşük genlikli frekans bileşenlerine yol açarak, hasar gelişiminin izlenmesinde referans noktası olarak kullanılabilecek veriler sunmaktadır. Bu nedenle, tamamen titreşimsiz bir mekanik sistemin varlığı, teorik bir ideal olarak kabul edilebilir.



Şekil 6. Sağlam (B1) rulmanı; (a) titreşim frekans spektrumu, (b) hata frekansları

Spektrum analizlerinde (Şekil 3 ve 5), düşük genlikli fakat belirgin pikler, rulman yüzeyindeki mikroskobik pürüzlülüklerin neden olduğu harmonik frekansları işaret etmektedir. Bu durum, makroskobik olarak sağlam kabul edilen rulmanlarda dahi yüzey kalitesinde idealden sapmalar olduğunu göstermektedir. Döner makinelerde sıklıkla karşılaşılan küçük seviyedeki dengesizlikler, teorik olarak titreşimsiz olması beklenen sistemlerde pratikte kaçınılmazdır. Rulman yatağında tam

kavrama sağlanamaması sonucu oluşan mekanik gevşeklik, milin dengelenmesinde yetersizlik olduğunu ortaya koymaktadır. Bu tür mekanik gevşeklikler, titreşim seviyelerini yükselterek rulmanların hizmet ömrünü kısaltma potansiyeline sahiptir.

RMS (karekök ortalama), bir sinyalin genel büyüklüğünü veya enerjisini ölçer. Titreşim analizinde, sistemin titreşim seviyesini ifade etmek için kullanılır. *RMS* değerleri Eşitlik 5 kullanılarak hesaplanabilir.

$$RMS = \sqrt{\frac{A_0^2}{2} + \sum_{i=1}^{k-1} A_i^2 + \frac{A_k^2}{2}} \quad (5)$$

Burada;

A_0 = Sinyalin sabit bileşeninin genliği,

A_i = Sinyalin i . harmonik bileşeninin genliği,

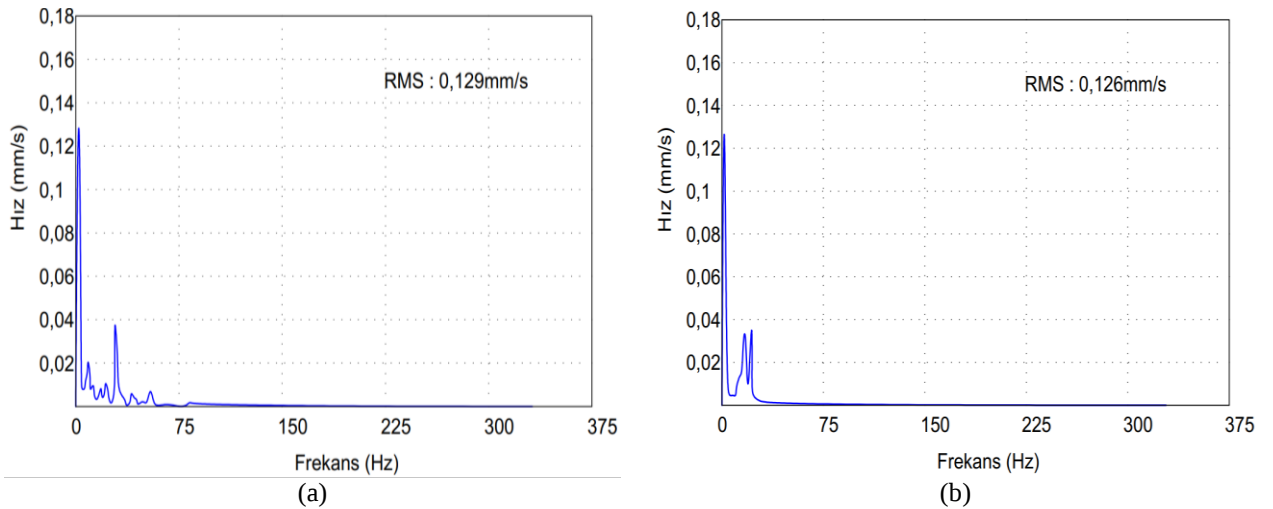
A_k = Sinyalin son harmonik bileşeninin genliği,

$\sum_{i=1}^{k-1} A_i^2 = 1$. harmonikten $(k-1)$. harmonik bileşenine kadar olan genliklerin karelerinin toplamı.

Eğer A_k , 2. harmonikten sonraki bir bileşeni temsil ediyorsa, k en az 3 olmalıdır. Örneğin, eğer $A_k = A_3$ ise, $k = 3$ olur.

Spektral bir çizginin genliği “A” ile gösterilmiştir. Sağlam (A1) rulmanı için, Eşitlik 5’te, $A_0 = 0,164$ mm/s, $A_1 = 0,027$ mm/s, $A_2 = 0,014$ mm/s, $A_k = 0,049$ mm/s ve $k = 3$ alındığında $RMS = 0,1288$ mm/s olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, Şekil 7(a)’da sunulan test cihazı ölçümünde elde edilen 0,129 mm/s’lik *RMS* değeri ile uyumluluk göstermektedir.

Sağlam B1 rulmanı için, Eşitlik 5’te, $A_0 = 0,159$ mm/s, $A_1 = 0,027$ mm/s, $A_2 = 0,038$ mm/s, $A_k = 0,042$ mm/s ve $k = 3$ alındığında, $RMS = 0,1264$ mm/s olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuç, Şekil 7(b)’de gösterilen test cihazı ölçümünde saptanan 0,126 mm/s *RMS* değeri ile teyit edilmiştir.



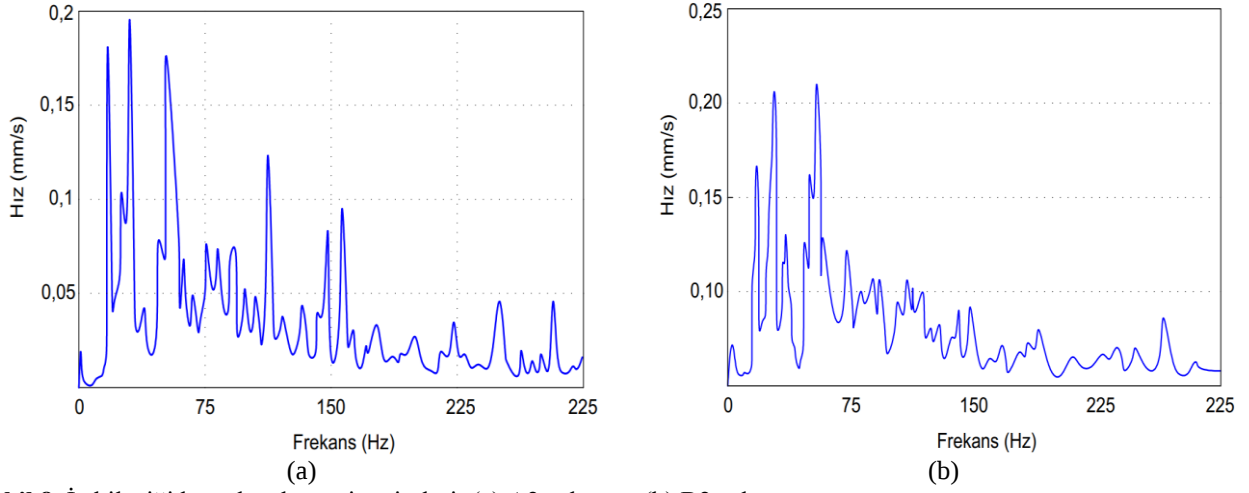
Şekil 7. Sağlam rulman titreşimleri; (a) A1 rulmanı, (b) B1 rulmanı

3.2 İç Bileziği Hasarlı Rulman Analizleri

Şekil 8(a)’da iç bileziğinde hasar bulunan rulmana (A2) ait frekans spektrumu analiz sonuçları gösterilmektedir. Titreşim frekansı ve harmonikleri spektrumda 15,4 Hz, 27 Hz, 48,2 Hz ve 136,9 Hz frekanslarında titreşim yoğunluğunun arttığı belirlenmiştir. Bu frekanslardaki titreşim genlikleri ise

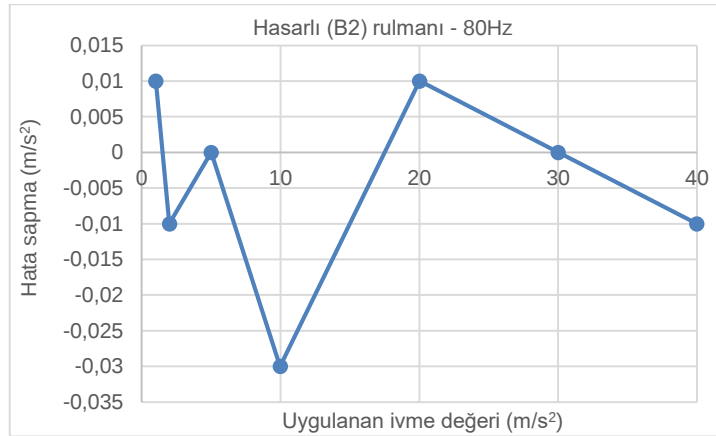
sırasıyla 0,186 mm/s, 0,198 mm/s, 0,178 mm/s ve 0,122 mm/s olarak ölçülmüştür. 15,4 Hz'deki pik, rulmanın karakteristik iç bilezik hasar frekansı (BPFI) olarak değerlendirilebilir ve bu frekans, ana harmonik bileşeni temsil etmektedir. 27 Hz'deki pik, 15,4 Hz'deki ana harmonik frekansın ikinci harmonik bileşeni olabilir ve bu durum, iç bilezik hasarının periyodik doğasını göstermektedir. 48,2 Hz'deki pik ise üçüncü harmonik bileşen olarak yorumlanabilir. 136,9 Hz'deki daha düşük genlikli pik (0,122 mm/s), sistemin doğal frekansı veya rezonans frekansı ile ilişkili olabilir. Bu frekans, rulman hasarı ile doğrudan ilişkili olmayan bir bileşen olarak değerlendirilebilir, ancak bu frekansta bir genlik artışı gözlemlenmesi, sistemin bu frekans civarında rezonansa girebileceğini düşündürmektedir. Spektrumda gözlemlenen frekanslar, sistemin farklı modal frekanslarına da karşılık gelebilir. Özellikle 15,4 Hz ve 27 Hz'deki yüksek genlikler, sistemin bu frekanslarda modal titreşimler ürettiğini gösterebilir. Bu modal frekanslar, rulmanın iç bileziğindeki hasarın etkisiyle daha belirgin hale gelmiş olabilir. Özellikle 15,4 Hz ve 27 Hz frekanslarındaki yüksek genlikler (0,186 mm/s ve 0,198 mm/s), rulmanın iç bileziğinde ciddi bir hasarın varlığına işaret etmektedir. Bu frekanslar, rulmanın karakteristik iç bilezik hasar frekansı (BPFI) ve bunun ikinci harmonik bileşeni ile uyumlu olabilir. 136,9 Hz'deki daha düşük genlikli pik (0,122 mm/s) ise rulman hasarı ile doğrudan ilişkili olmayan bir bileşen olarak değerlendirilebilir. Bu bulgular, rulmanın iç bileziğinde ciddi bir hasar olduğunu göstermekte olup, rulmanın durumunun daha detaylı incelenmesi ve gerekli bakım veya değişim işlemlerinin planlanması önerilmektedir.

Şekil 8(b)'de sunulan iç bileziği hasarlı rulman (B2) titreşimlerine ait spektrum analizi grafiğinde, bilye geçiş titreşim frekansı ve harmonikleri 15,9 Hz, 28,3 Hz, 49,5 Hz ve 75 Hz frekanslarında belirgin pikler saptanmıştır. Bu piklerin genlik değerleri ise sırasıyla 0,167 mm/s, 0,216 mm/s, 0,219 mm/s ve 0,122 mm/s olarak ölçülmüştür. 15,9 Hz'deki pik, rulmanın karakteristik bilye geçiş frekansı (BPFI) olarak değerlendirilebilir ve bu frekans, ana harmonik bileşeni temsil etmektedir. 28,3 Hz ve 49,5 Hz'deki pikler, 15,9 Hz'deki ana harmonik frekansın sırasıyla ikinci ve üçüncü harmonik bileşenleri olabilir ve bu durum, iç bilezik hasarının periyodik doğasını göstermektedir. 75 Hz'deki daha düşük genlikli pik (0,122 mm/s), sistemin doğal frekansı veya rezonans frekansı ile ilişkili olabilir. Bu frekans, rulman hasarı ile doğrudan ilişkili olmayan bir bileşen olarak değerlendirilebilir, ancak bu frekansta bir genlik artışı gözlemlenmesi, sistemin bu frekans civarında rezonansa girebileceğini düşündürmektedir. Spektrumda gözlemlenen frekanslar, sistemin farklı modal frekanslarına da karşılık gelebilir. Özellikle 28,3 Hz ve 49,5 Hz'deki yüksek genlikler, sistemin bu frekanslarda modal titreşimler ürettiğini gösterebilir. Bu modal frekanslar, rulmanın iç bileziğindeki hasarın etkisiyle daha belirgin hale gelmiş olabilir. Özellikle 28,3 Hz ve 49,5 Hz frekanslarındaki yüksek genlikler, rulmanın iç bileziğinde bir hasarın varlığına işaret etmektedir. Bu frekanslar, rulmanın karakteristik bilye geçiş frekansı (BPFI) ve bunun harmonik bileşenleri ile uyumlu olabilir. 75 Hz'deki daha düşük genlikli pik ise rulman hasarı ile doğrudan ilişkili olmayan bir bileşen olarak değerlendirilebilir. Bu bulgular, rulmanın iç bileziğinde ciddi bir hasar olduğunu göstermekte olup, rulmanın durumunun daha detaylı incelenmesi ve gerekli bakım veya değişim işlemlerinin planlanması önerilmektedir.



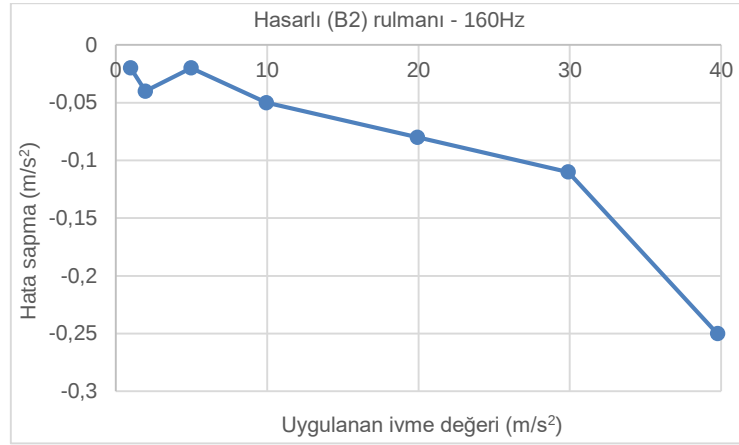
Şekil 8. İç bileziği hasarlı rulman titreşimleri; (a) A2 rulmanı, (b) B2 rulmanı

İç bileziği hasarlı (B2) rulman için 80 Hz frekansında ölçülen ivme değerleri ve hata sapmaları Şekil 9'da sunulmuştur. Uygulanan ivme değerleri ile ölçülen ivme değerleri arasındaki fark, rulman hasarının sistem üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. Büyük hata sapmaları, rulmanın iç bileziğindeki hasarın ciddi boyutlarda olduğunu ve sistemde önemli titreşimlere neden olduğunu işaret etmektedir. Bu sapmalar, rulmanın düzgün çalışmasını engelleyerek sistemin dinamik performansını olumsuz etkilemektedir. Bu bulgular, rulmanın acil bakım veya değişim gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Rulmanın durumunu daha iyi değerlendirmek için, farklı frekanslarda benzer ölçümler yapılması ve zaman dalga formu analizi gibi ek yöntemlerin kullanılması önerilmektedir. Bu sayede, hasarın nedenleri daha detaylı incelenebilir ve olası arızalar önlenabilir.



Şekil 9. İç bileziği hasarlı rulmandan (B2) 80 Hz'de ölçülen ivme değerleri

İç bileziği hasarlı (B2) rulman için 160 Hz frekansında ölçülen ivme değerleri ve hata sapmaları Şekil 10'da sunulmuştur. İç bileziği hasarlı rulman (B2) için 160 Hz'de ölçülen ivme değerleri ve büyük hata sapmaları, rulman hasarının sistem üzerinde ciddi titreşimlere ve dinamik performans kaybına neden olduğunu göstermektedir. Özellikle 160 Hz gibi yüksek frekanslarda gözlemlenen bu sapmalar, rulman hasarının mekanik sistem üzerinde yarattığı stresin bir göstergesidir. Bu bulgular, rulmanın acil bakım veya değişim gerektirdiğini ortaya koyarken, hasarın detaylı analizi için farklı frekanslarda ölçümler ve zaman dalga formu analizi gibi ileri yöntemler önerilmektedir.



Şekil 10. İç bileziği hasarlı rulmandan (B2) 160 Hz’de ölçülen ivme değerleri

4. SONUÇ

Bu çalışmada, sağlam ve hasarlı rulmanların titreşim spektrum analizleri ve ivme ölçümleri incelenmiş, rulman sağlığının belirlenmesi ve hasar tespiti açısından önemli bulgular elde edilmiştir.

Sağlam rulmanların (A1 ve B1) titreşim spektrumlarında, düşük genlikli ve belirgin olmayan pikler gözlemlenmiştir. Örneğin, A1 rulmanında 0,5 Hz, 11,23 Hz, 26,8 Hz ve 37,3 Hz frekanslarında sırasıyla 0,164 mm/s, 0,027 mm/s, 0,014 mm/s ve 0,049 mm/s genlik değerlerinde pikler tespit edilmiştir. B1 rulmanında ise 0,5 Hz, 14,7 Hz, 18,6 Hz ve 24,38 Hz frekanslarında sırasıyla 0,159 mm/s, 0,027 mm/s, 0,038 mm/s ve 0,042 mm/s genlik değerlerinde pikler gözlemlenmiştir. Bu piklerin genlik değerleri oldukça düşüktür ve sağlam rulmanların herhangi bir ciddi hasar belirtisi göstermediğini ortaya koymaktadır.

İç bileziği hasarlı rulmanların (A2 ve B2) titreşim spektrumlarında ise karakteristik frekanslarda belirgin ve yüksek genlikli pikler gözlemlenmiştir. Örneğin, A2 rulmanında 15,4 Hz, 27 Hz, 48,2 Hz ve 136,9 Hz frekanslarında sırasıyla 0,186 mm/s, 0,198 mm/s, 0,178 mm/s ve 0,122 mm/s genlik değerlerinde pikler tespit edilmiştir. B2 rulmanında ise 80 Hz ve 160 Hz frekanslarında yapılan ivme ölçümleri, uygulanan ivme değerleri ile ölçülen ivme değerleri arasında önemli hata sapmaları olduğunu göstermiştir. Bu sapmalar, rulman hasarının sistemde ciddi titreşimlere ve dinamik bozulmalara neden olduğunu doğrulamaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, titreşim analizi ve ivme ölçümlerinin rulman sağlığını değerlendirmede etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir. Sağlam rulmanların titreşim spektrumlarında düşük genlikli pikler gözlemlenirken, hasarlı rulmanlarda karakteristik frekanslarda yüksek genlikli pikler ve önemli hata sapmaları tespit edilmiştir. Rulmanların ömrünü uzatmak ve olası arızaları önlemek için düzenli bakım ve titreşim analizi önerilmektedir. Ayrıca, benzer çalışmalarda zaman dalga formu analizi ve farklı frekanslarda ölçümler yapılarak, rulman sağlığının daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi mümkündür.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın deneysel çalışmaları ORMEC Mühendislik tarafından desteklenmiş ve tesislerinde gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, çalışmaya katkılarından dolayı Sn. Cem DENİZ'e içten teşekkürlerini sunar.

6. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

7. YAZAR KATKISI

Bu çalışmada Ahmet KÖKEN araştırmanın kavramsal çerçevesinin oluşturulması, metodolojik tasarımı ve makale taslağının hazırlanmasından sorumlu olmuştur; Sultan Seda ÜLGER çalışmanın kavramsal yapısının geliştirilmesi, tasarım süreçlerinin yönetimi, veri toplama ve bilimsel içeriğin eleştirel analizini gerçekleştirmiştir; Abdurrahman KARABULUT ise verilerin analizi, yorumlanması ve makalenin akademik içeriğinin bilimsel değerlendirmesini üstlenmiştir. Tüm yazarlar çalışmanın her aşamasına aktif katılım sağlamış, makalenin nihai versiyonunu incelemiş, onaylamış ve çalışmadan tam sorumluluğu paylaşmışlardır.

8. KAYNAKLAR

- Aktürk N., Üzkurt İ., Yüksel Ş., Titreşim Analiziyle Rulmanların Çalışabilirlik Durumlarının Belirlenmesi, Mühendis ve Makina, TMMOB, 41(481), 28-33, 2000.
- Aliustaoğlu C., Ocak H., Ertunç H. M., Rulman Titreşim Analizi ile Bölgesel Hataların İncelenmesi, TOK'07 Bildiriler Kitabı, İstanbul, 5-7 Eylül 2007.
- Brie D., Modelling of the Spalled Rolling Element Bearing Vibration Signal: An Overview and Some New Results; Mechanical Systems and Signal Processing 14(3), 353-369, 2000.
- Çaşka S., Dokuz M. E., Ankastre Bir Kirişin Ayrık Zamanlı Titreşim Modelinin Meta-sezgisel Optimizasyon Yöntemleri Kullanılarak Elde Edilmesi. BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 9(1), 32-41, 2022.
- Çaşka S., Dokuz M. E., Aydın M., İlman M. M., Yavuz Ş., System Identification and Vibration Analysis of Rotating Beam with Lattice Structures, Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind., 7(2), 322-327, 2023.
- Çimen M., Bilyeli Rulman Hasarlarının Titreşim Analizi ile Tespiti ve Gemi Makinelerinde Kestirimci Bakım Uygulaması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış), 2015.
- Darmo S., Bahiuddin I., Handoko P., Rizki Priatomo H., Kuncoro M., Priyambodo S., Haryanto, Fatah Rahman N., Kanosri M., Winarno A., Failure analysis of double-row tapered roller bearing outer ring used in Coal Wagon Wheelset. Eng. Fail. Anal. 135, 106153, 2022.
- De Luca A., Book W.J., Robots with Flexible Elements BT - Springer Handbook of Robotics, Springer International Publishing, Cham, pp. 243-282, 2016.
- Dron J.P., Rasolofondraibe L., Bolaers F., Pavan A., High Resolution Methods in Vibratory Analysis: Application to Ball Bearing Monitoring and Production Machines, International Journal of Solids and Structures 38, 4293-4313, 2001.
- Ghazwani M.H., Pham V.V., Investigating Behavior of Slider-Crank Mechanisms with Bearing Failures Using Vibration Analysis Techniques, Mathematics MDPI, 12, 544, 2024.
- Hemati A., Shooshtari A., Bearing Failure Analysis Using Vibration Analysis and Natural Frequency Excitation. J. Fail. Anal. Preven. 23, 1431-1437, 2023.
- Jamaludin N., Mba D., Monitoring Extremely Slow Rolling Element Bearings: Part I; NDT&E International 35(6), 349-358, 2002.

- Madar E., Galiki O., Klein R., Bortman J., Nickell J., Kirsch M., A New Model for Bearing Spall Size Estimation Based on Oil Debris. *Eng. Fail. Anal.* 134, 106011, 2022.
- Mobley R.K., *An Introduction to Predictive Maintenance*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- Mishra L., Kumar M., Chandrawanshi M.L., Failure Analysis of Ball Bearing in Centrifugal Pump Using Envelope and Demodulation Techniques. *Mater. Today: Proc.* 56, 760–767, 2022.
- Orhan S., Arslan H., ve Aktürk N., Titreşim Analiziyle Rulman Arızalarının Belirlenmesi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 18(2), 39-48, 2003.
- Rubini R., Meneghetti U., Application of Envelope and Wavelet Transform Analyses for Diagnosis of Incipient Faults in Ball Bearings, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15(2), 287-302, 2001.
- Williams T., Ribadeneira X., Billington S., Kurfess T., Rolling Element Bearing Diagnostics in Run-To-Failure Lifetime Testing; *Mechanical Systems and Signal Processing*, 15(5), 979-993, 2001.
- Yavuz Ş., Uyar M., Malgaca L., Karagülle H., Eşdeğer Kütle-Yay-Sönüm Elemanı Kullanılan Ankastre Kompozit Bir Kirişin Titreşim Analizi, *DÜMF Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(60), 946 – 954, 2018.
- Yıldırım E., Karahan M.M.F., Titreşim Analizi ile Rulmanlarda Kestirimci Bakım, *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1), 17-23, 2015.