

T.C.
UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜŐÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YANLIŞ HİZALANMIŞ RULMANLARIN TİTREŞİM VE GÜRÜLTÜ
DEĞERLERİNİN İZLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERHANCAN COŞKUN

HAZİRAN 2019

UŞAK

T.C.
UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜŐÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YANLIŞ HİZALANMIŞ RULMANLARIN TİTREŞİM VE GÜRÜLTÜ
DEĞERLERİNİN İZLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERHANCAN COŞKUN

UŞAK 2019

Erhancan COŞKUN tarafından hazırlanan “YANLIŞ HİZALANMIŞ RULMANLARIN TİTREŞİM VE GÜRÜLTÜ DEĞERLERİNİN İZLENMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. İsa YEŞİLYURT
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İsa YEŞİLYURT
Makine Mühendisliği, Uşak Üniversitesi

Prof. Dr. Hasan ÖZTÜRK
Makine Mühendisliği, Dokuz Eylül Üniversitesi

Doç. Dr. Kemal MAZANOĞLU
Makine Mühendisliği, Uşak Üniversitesi

Tarih: 13/06/2019

Bu tez ile U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Murat Kemal KARACAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Erhancan COŞKUN



**YANLIŞ HİZALANMIŞ RULMANLARIN TİTREŞİM VE GÜRÜLTÜ
DEĞERLERİNİN İZLENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Erhancan COŞKUN

**UŞAK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2019

ÖZET

Hizalama problemi aynı ekseninde birbirlerine bağlanan iki makina parçalarında karşılaşılan önemli bir problemdir ve bu problem düzeltilmediği takdirde makina parçaları üzerinde yorulmalara, aşınmalara ve fazla güç tüketimine, istenmeyen duruşlara ve maliyet artışlarına neden olur. Bu çalışmada yanlış hizalama problemine sahip rulmandan elde edilen titreşim ve gürültü değerleri Deneysel Mod Ayrıştırma (DMA) yöntemiyle sunulmaktadır. DMA yöntemiyle ayrıştırılan sinyal bileşenlerinin istatistiksel değerlendirilmesiyle yanlış hizalama problemi tespit edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlardan, yanlış hizalama etkisinin açığa çıkarılmasında titreşim verilerinin gürültü verilerine göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Bilim Kodu: 625.01.00.

Anahtar Kelimeler: Rulman Hataları, Yanlış Hizalama, Titreşim Analizi, Gürültü Analizi, Deneysel Mod Ayrıştırma, İçsel Mod Fonksiyonu

Sayfa Adedi: 53

Tez Yöneticisi: Prof. Dr. İsa YEŞİLYURT

**MONITORING OF VIBRATION AND SOUND PARAMETERS ON MISALIGNED
BEARINGS**

(M.Sc. Thesis)

Erhancan COŞKUN

UNIVERSITY of USAK

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2019

ABSTRACT

Misalignment is a common problem which is generally encountered when two mechanical elements whose axes should be parallel are connected to each other. When the misalignment is not corrected, some problems such as fatigue, wear, more power consumption, increased cost, and unexpected machine failures may occur. This thesis presents the application of Empirical Mode Decomposition (EMD) method to the vibration and sound variables which are obtained from a misaligned bearing. Detection of misalignment is achieved using the statistical analysis of decomposed signals by EMD. The obtained results have shown that vibration analysis is more useful than that of sound in revelation of condition indication information signifying the presents of misalignment.

Science Code: 625.01.00.

Keywords: Bearing failures, Misalignment, Vibration Analysis, Sound Analysis, Empirical Mode Decomposition, Intrinsic Mode Function

Number of Pages: 53

Advisor: Prof. Dr. İsa YEŞİLYURT

TEŞEKKÜR

Çalıőmamız boyunca hiç bir yardımı esirgemeyen ve emekleriyle beni yönlendiren kıymetli hocam Prof. Dr. İsa YEŞİLYURT'a ve maddi, manevi destek veren aileme teőekkürü bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	vi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	vii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Yanlış Hizalanmış Rulmanların Titreşim Ve Gürültü Değerlerinin İzlenmesine Giriş	1
1.2. Titreşim Esaslı Durum İzleme	1
1.3. Gürültü Esaslı Durum İzleme	3
1.4. Literatür Araştırması.....	4
1.5. Tezin Amacı	6
1.6. Tezin Organizasyonu	7
2. RULMAN VE YANLIŞ HİZALAMA.....	8
2.1. Rulman Yapısı	8
2.2. Rulman Arızası Temel Nedenleri	9
2.3. Rulman Hata Kademeleri	10
2.4. Rulman Hata Frekansları ve Parametreleri.....	12
2.5. Yanlış Hizalama	14
2.5.1. Yanlış Hizalama Türleri	14
2.5.2. Yanlış Hizalamaya Sebebiyet Verecek Durumlar ve Arızalar	15

2.5.3. Rulmanlarda Yanlış Hizalama.....	16
3. DENEYSEL MOD AYRIşTIRMA YÖNTEMİ (DMA) VE İÇSEL MOD FONKSİYONU (İMF)	18
3.1. İMF'lerin İstatistiksel Değerleri	20
4. DENEYSEL VERİLERİN İNCELENMESİ.....	22
4.1. Deney Düzenegi	22
4.2. Deney Sonuçları	23
4.2.1. Yanlış hizalama Etkisine Sahip Bilyalı Rulman Titreşim ve Gürültü Değerlerinin Zaman ve Frekans Bölgesinde İncelenmesi	23
4.2.2. Yanlış hizalama Etkisine Sahip Bilyalı Rulman Titreşim ve Gürültü Değerlerinin DMA Yöntemiyle İncelenmesi.....	25
4.2.3. İMF'lerin İstatistiksel Parametreleri.....	29
4.3. Sonuçlar	32
4.4. Sonraki Çalışmalara Öneriler	32
KAYNAKLAR.....	34
ÖZGEÇMİş.....	39

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Rulman hataları	10
Çizelge 2.2. Rulman parametreleri	13
Çizelge 2.3. Rulman hata frekansları	13



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen titreşimler.....	24
Şekil 4.2. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen gürültüler.....	24
Şekil 4.3. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen titreşimlerin spektrumları.....	25
Şekil 4.4. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen gürültülerin spektrumları.....	25
Şekil 4.5. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen titreşimlerin İMF'leri	27
Şekil 4.6. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen gürültülerin İMF'leri	27
Şekil 4.7. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen titreşimlerin İMF'lerinin spektrumları.....	28
Şekil 4.8. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen gürültülerin İMF'lerinin spektrumları.....	28
Şekil 4.9. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen titreşimlerin İMF'lerinin RMS değerleri.....	30
Şekil 4.10. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen gürültülerin İMF'lerinin RMS değerleri.....	30
Şekil 4.11. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen titreşimlerin İMF'lerinin Crest Değerleri.....	31
Şekil 4.12. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen gürültülerin İMF'lerinin Crest Değerleri.....	31

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Rulman yapısı.....	8
Resim 2.2. Rulman arızası temel nedenleri	9
Resim 2.3. Rulman hata bölgeleri	12
Resim 2.4. Bilyalı rulman.....	12
Resim 2.5. Açısal yanlış hizalama.....	15
Resim 2.6. Paralel yanlış hizalama.....	15
Resim 2.7. Bileşke yanlış hizalama	15
Resim 2.8. Rulmanda yanlış hizalama.....	17
Resim 2.9. Yanlış hizalamanın iç ve dış bileziğe etkisi	17
Resim 4.1. Deney düzeneği	23

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

B

Açıklama

Genişlik

BD

Yuvarlanma elemanı yarıçapı

C₀

Statik yük taşıma değeri

D

Dış bilezik çapı

d

İç bilezik çapı

d(t)

İçsel mod fonksiyonu

e_{alt}

Alt zarf

e_{üst}

Üst zarf

F_c

Crest faktörü

f_r

İç bilezik hızı

m(t)

Ortalama değer

N

Sinyalin boyutu

n

Yuvarlanma elemanı sayısı

n_r

Devir sayısı

PD

Yuvarlanma yolu çapı

P_p

Tepeden-tepeye değeri

Q

Bileşke yük

r(t)

Artık sinyal

s(t)

Sinyal eleme işlemi

β

Yuvarlanma elemanı temas açısı

Kısaltmalar

Açıklama

BDMA

Bütün deneysel mod ayrıştırma

BPFI

İç bilezik hata frekansı

BPFO

Dış bilezik hata frekansı

BSF

Yuvarlanma elemanı hata frekansı

DMA

Deneysel mod ayrıştırma

FEA	Sonlu elemanlar analizi
FTF	Kafes hata frekansı
IMF	İçsel mod fonksiyonu
ORS	Orta doğu rulman sanayi
RMS	Karekök ortalama değeri
SE	Spike enerji spektrumu yöntemi
TDMA	Takım deneysel mod ayrıştırma



1. GİRİŞ

Bu bölümde rulman arızalarının tespitinde kullanılan yöntemler, rulman arızaları ve yanlış hizalama hakkındaki literatürdeki çalışmalar ile titreşim ve gürültü analizi kısaca tanıtılmış ve irdelenmiştir. Tezin amacı ve organizasyonu anlatılmıştır.

1.1. Yanlış Hizalanmış Rulmanların Titreşim Ve Gürültü Değerlerinin İzlenmesine Giriş

Rulmanlar hemen hemen her makinada yaygın bir şekilde kullanılan makina elemanlarıdır. Bu sebeple rulmanların sağlıklı çalışabilmesi, üretimde istenmeyen duruşlardan kaçınılması, yapılan yatırımların ve şirket sermayesinin korunması ve gereksiz harcamalardan kaçınılması açısından büyük önem arz eder. Makinaların bir çoğunda arızalar rulman kaynaklıdır ve arızalı makinaların bakımı hem zor hem de maliyetlidir. Beklenmeyen arızalarda, makinaların duruşu üretimde aksamaya ve iş kaybına neden olacağı için, rulmanların arızalarının önceden farkedilmesi üretimde oluşması muhtemel kayıpların azaltılmasında büyük ölçüde önemlidir. Rulman arızalarının tespiti için farklı yöntemler kullanılmakla birlikte, bunların en yaygın olanı titreşim esaslı uygulamalardır.

1.2. Titreşim Esaslı Durum İzleme

Hareketli parçalar içeren tüm makinalar titreşir ve bu titreşimler makinanın durumu hakkında önemli bilgiler verir [1]. Denge konumu etrafında salınım yapmakta olan cismin yapmış olduğu harekete titreşim denir [2]. Diğer bir ifadeyle sistemin dinamik kuvvetlere vermiş olduğu cevaptır. Titreşimin muhtemel nedenleri çoğunlukla aşınma, mekanik gevşeklik, dengesizlik, eksantriklik ve hatalı montajdır. Makinanın çalışma hızı ve etki eden kuvvetlerin bir tanesinin frekansı makinanın doğal frekanslarından biriyle çakıştığında ortaya önemli titreşim problemleri çıkar [1, 2]. Bu duruma rezonans denir ve meydana gelen

titreşimlerin genliklerini artırır. Bir makinanın titreşim sinyallerinin analizi aşağıda verilmiş olan arızaların tespitini kolaylaştırır:

Dengesizlik kendisini makinanın dönme hızına eşit bir harmonik zorlanma olarak gösterir. Nedeni ise dönen parçanın kütle merkezinin dönme merkeziyle çakışmamasıdır. Dengesizlik, statik ve dinamik dengesizlik olarak iki başlık altında incelenilir. Dönen bir sistemi dengelemek için özel bir titreşim analizi gerekir. Dengesizlikten farklı olarak yine makinanın çalışma hızında ve bu hızın katlarında (harmoniklerinde) oluşan titreşim bileşenleri mevcuttur.

Birbirine bağlı makinaların dönme eksenleri arasındaki yanlış hizalamadan (misalignment) kaynaklanan titreşimlerin frekansı genellikle makinanın çalışma hızının iki katıdır ve büyük bir eksenel bileşke içerir. Eğik miller ve iyi oturmamış yataklar da benzer titreşimler oluştururlar. Eksantrikliğin belirleyici özelliği ise titreşimin yük ve doğrultuyla değişmesidir.

Mekanik gevşeklik yine makinanın çalışma hızının alt ($1/2$, $1/3$, $1/4$) ve üst katlarında ($1X$, $2X$, $3X$) titreşimlere neden olur. Bu durum makina üzerindeki farklı noktalardan ölçülen hız büyüklükleri yardımıyla saptanabilir.

Rulman arızaları makinalarda görülen en önemli arıza biçimidir. Rulmanlarda görülen arızalar genellikle iç veya dış bilezikte, yuvarlanma yollarında ve kafeste var olan yüksek frekanslı ve düşük enerjili titreşimlerdir. Bu özelliğinden dolayı rulmanlarda meydana gelen bu arızalar sadece gelişmiş ve yüksek duyarlılığa sahip ölçüm aletleriyle tespit edilebilir. Eğer rulman boyutları biliniyorsa, hata frekansları yardımıyla hatanın rulman içindeki konumu tespit edilebilir.

Makinanın çalışma hızı ve etki eden kuvvetlerin bir tanesinin frekansı makinanın doğal frekanslarından biriyle çakıştığında ortaya önemli titreşim problemleri çıkar [1, 2]. Bu duruma rezonans denir ve meydana gelen titreşimlerin genliklerini artırır. Rezonansı etkisini azaltmak için şey ise makinanın titreşim karakteristiğini değiştirmektir.. Bu ise aşağıda verilen üç yoldan biriyle yapılabilir [1, 2]:

1. Makinanın rijitliği arttırarak doğal frekansı yükseltilebilir.
2. Doğal frekansı azaltmak için kütle eklenebilir.
3. Makinaya sönümleyici elemanlar eklenerek titreşim düzeyi düşürülebilir.

1.3. Gürültü Esaslı Durum İzleme

Gürültü; istenmeyen, hoş olmayan ses olarak tanımlanabilir. Ses ölçülebilir nesnel bir kavramken, gürültü ise öznel-dir. Gürültü de bütün sesler gibi normal hava basıncı altında veya üstünde basınç değişiklikleri oluşturan bir titreşim aracılığıyla oluşur. Hava basıncında meydana gelen değişiklikler, işitme organına dalgalar halinde ulaşır ve bunun sonucu ses olarak duyulur [3].

Makinalar çalışırken titreşen ve hareketli parçaları sebebiyle gürültü oluşturur. Makina elemanlarındaki herhangi bir arıza durumunda, gürültüde de değişiklikler meydana gelmesi muhtemeldir. Gürültü mikrofon gibi akustik aparatlarla algılanır. Makinalarda titreşim ve gürültü genellikle aynı kaynaktan doğmaktadır ve her ikisi de makinanın durumu hakkında değerli bilgiler içermektedir. Bununla beraber durum izleme çalışmaları için genellikle titreşim ölçümleri gürültü ölçümlerine göre daha güvenilir ve daha kolaydır.

Gürültü analizinde yapılan ölçümler önemli yer tutar. Gürültü ölçümlerinde amaç gürültünün kaynağını bulmak, belirli bir noktanın gürültü düzeyini saptamak, gürültünün frekans dağılımlarını bulmak ya da darbe gürültüsünü tespit etmek olabilir. En yaygın olarak kullanılan gürültü ölçüm yöntemi, istenilen bir yerin mevcut gürültü düzeyini ölçmektir. Bu ölçümlerde, genelde ortam gürültüsünün standartlara uyup uymadığı ya da endüstriyel gürültü seviyesinin istenilen sınırlar içerisinde olup olmadığını kontrol etmek amacıyla yapılır. Gürültü ölçümü ya kaynağın olduğu ortamda ya da özel test odalarında yapılır. Test odalarındaki ölçümlerde amaç genelde ses kaynağının sesi yayma özelliklerinin saptanması ya da kaynaktaki ses gücü düzeyinin hesaplanmasıdır. Üretim sahasında yapılan ölçümlerde ise kaynağın olduğu ortamdaki gürültünün etkisi saptanır.

1.4. Literatür Araştırması

Rulmanlar endüstride sık kullanılan makina elemanlarıdır. Makinaların arızalanmadan çalışması genellikle rulmanların sağlıklı olmasıyla sağlanır. Bu nedenle rulmanlarda meydana gelmiş veya gelebilecek arızaların önceden tespiti büyük öneme sahiptir. Rulman arızalarının belirlenmesi ve ne tür arıza olduğunun saptanması konusunda günümüze kadar çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu araştırmaların başlıcaları aşağıda özetlenmektedir.

Hai Qui vd. dalgacık ayrıştırma ve dalgacık filtreleme tabanlı sinyallerdeki gürültüyü azaltma yöntemlerinin performansının rulman kusurlarından gelen sinyallerle karşılaştırılması neticesinde dalgacık filtresinin mekanik kaynaklı hataların tespitinde daha güvenli olduğunu görmüşlerdir. Dalgacık ayrıştırmanın ise pürüzsüz sinyal algılamada daha güvenli olduğunu göstermişlerdir. Yapılan deney ve uygulamalı simülasyon etkinliklerinde iki yönteminde geçerliliği ve güvenilirliği desteklenmiştir [4].

Mohit Lal vd. türbin jeneratör sistem modelinde rulmanların hatalara verdikleri yanıtları gözlemek için bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu algoritmanın sağlamlığını deneylerle test etmişlerdir [5].

Jing Liu vd. iki serbestlik derecesine sahip rulman sistemindeki lokal hatayı parçalı yanıt fonksiyonu yöntemiyle simüle ederek analiz gerçekleştirmişler ve elde olan mevcut sonuçlarla kıyaslayarak çalışmalarını doğrulamışlardır [6].

Zhenhuan Ye vd. yüksek hızdaki makaralı rulmanlarda yük dağılımı, temas baskısı ve yanlış hizalama etkilerini yarı dinamik ve FEA yöntemi ile analiz etmişlerdir ve yanlış hizalamanın artmasıyla rulmanlardaki maksimum temas basıncının kademeli olarak arttığını gözlemlemişlerdir [7].

Jing-Shan Zhao vd. konik makaralı rulmandaki hasarlar için jiroskopik momentin etkisini incelemişler ve herhangi bir zarara neden olmadığı sonucundan hareketle, yüksek hızlı konik rulman için yeni bir tasarım ölçütü sunmuşlardır [8].

Huanhuan Liu vd. rulman arızalarını tespit etmek için yerel ortalama ayrıştırma ve çok ölçekli entropi temelli yeni bir arıza tespit yöntemi geliştirmişler, Ye Tian vd. ise rulman arıza tespitinde yerel ortalama ayrıştırma ve tekil değer ayrıştırma yöntemleri ile insan müdahalesini en aza indirmek için makina öğrenme temelli bir yöntem geliştirmişlerdir ve sonuçları mevcut sonuçlarla kıyaslayarak doğruluğunu göstermişlerdir [9,10].

Kıral vd. rulman hatalarını izlemek için Visual Basic tabanlı bir modelleme yapmışlardır ve sonlu elemanlar yöntemi için IDEAS kullanmışlardır. Sağlıklı ve hatalı rulmanlar için dönme hızının etkisini incelemişler ve mevcut sonuçlarla kıyaslamışlardır [11].

Akustik emisyon analizi rulman arızalarını tespit etmekte kullanılan bir yöntemdir. Rulmanda meydana gelen ani değişmeden dolayı yüksek gerilme dalgaları akustik emisyonun oluşmasına neden olur [12]. Arızalı rulmanda meydana gelen gerilme belirli bir seviyeye ulaştığı zaman akustik emisyonuna neden olan elastik dalgaların oluşumu ile sonuçlanan ani bir enerji boşalması olur. Oluşan bu emisyon uygun sensörler yardımıyla ölçülür. Akustik emisyon yöntemi ile yüzey altındaki meydana gelmiş çatlaklar algılanabilirken titreşim metodunda ise çatlak sadece yüzeye ulaştığında algılanabilmektedir. Bu durum akustik emisyon yönteminin titreşim izlemeye olan üstünlüğünü göstermektedir.

Tandon ve Choudhury rulman arızalarını belirlemek için titreşim ve akustik ölçüm ile ilgili çalışmalar yapmıştır [13]. Gürültü ve titreşim ölçümleri gerçekleştirerek rulman hatalarını incelemişlerdir. Al-Ghamd ve Mba rulman hatalarını belirlemek için akustik emisyon ve titreşim analizi yöntemlerini kullanarak çalışmalar yapmış ve sonuçları deneysel olarak karşılaştırmıştır [14].

Literatürde yanlış hizalama (misalignment) etkisinin incelendiği mevcut çok fazla bir çalışma yoktur. Yapılan bu çalışmalar incelendiğinde ise çoğunun simülasyon/modelleme üzerine olduğu görülmektedir.

Misaglinment etkisinin simülasyon/modelleme ile doğrudan mil-rulman sistemleri üzerindeki etkilerini M. Li v.d., Mohit Lal v.d., A. S. Sekhart v.d., K. M. Al-Hussain ve

Paolo Pennacchi v.d., manyetik rulman üzerindeki etkisini Oskari Halminen v.d. incelemiştirler [4, 15-19]. Misalignement etkisi bulunan fakat bu etkiye ek olarak başka etkileri de birlikte inceleyen çalışmalar da şöyledir. Sistemin mikropolar sıvılarla yağlama etkilerini S. Das v.d., yağlama ve mil deformasyonunu Jun Sun v.d., Józef Rybczynski yörünge ve yağlama etkilerini incelemiştirler [20-22]. İzotropik pürüzlülük etkisini S. K. Guha rulman geometrisiyle olan ilişkisini Slim Bouaziz vd., rulman sayısı ile olan ilişkisini ise Zhenhuan Ye vd. incelemiştirler [23-25].

Gerçek bir test düzeneğiyle ilgili yapılan çalışmalar ise şu şekildedir:

Rulman yatakları üzerindeki misalignement etkisini W. Hu vd., rulman-rotor üzerindeki etkisini Y. S Lee vd. incelemiştir [26, 27]. Sistem üzerindeki arıza ve arızanın yerini tespit amaçlı çalışmayı ise Ram Turaga vd. yapmıştır [28].

Yapılan çalışmalarda görüldüğü gibi performans analizi ya da sisteme nasıl etki ettiği incelenmiştir. Yukarıdaki çalışmaların hiçbirinde maruz kalınan yanlış hizalama değerinin şiddeti ve bunun mil ve yataklar üzerinde yaratmış olduğu etkiler dikkate alınmamıştır. Bu çalışmada yanlış hizalama değerinin yansımaları nümerik olarak ifade edilmeye çalışılacaktır.

1.5. Tezin Amacı

Bu çalışmada, rulmanlarda oluşan yanlış hizalamanın titreşim ve gürültü izlenme yardımıyla belirlenmesini amaçlanmaktadır. Literatürde yanlış hizalama şiddetinin rulman üzerindeki etkisine dair bir çalışma bilgim dahilinde yoktur. Ayrıca rulmanlarda farklı yanlış hizalama problemlerinin DMA yöntemiyle incelenmesine literatürde rastlanılmamıştır. Araştırma hedefleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Titreşim ve gürültü esaslı yöntemler kullanılarak yapılan rulman arıza çalışmaları hakkında literatür çalışmalarının özetlenmesi.
- Yanlış hizalanmış rulman için gerçek verilerin izlenmesine olanak sağlayan bir deney düzeneği kurulması ve veri toplama sisteminin detaylandırılması.

- Yanlış hizalama etkisinin ortaya çıkarılması için kullanılan DMA yönteminin detaylandırılması.
- Deney sonuçlarının incelenmesi.
- Bu alanda yapılacak çalışmalara temel teşkil edilmesi ve katkı sağlanması.

1.6. Tezin Organizasyonu

Bu tez, deney sonuçlarıyla beraber araştırma amaçlarının izlenmesinde kullanılan yaklaşımı belgelemektedir. Tez aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir:

Bölüm 1: Rulman arıza tespiti için yapılan titreşim ve gürültü esaslı durum izleme çalışmaları hakkında bilgi vermek.

Bölüm 2: Rulman yapısı, arıza sebepleri ve yanlış hizalama hakkında bilgi vermek.

Bölüm 3: Deneysel aşamada kullanılan titreşim ve gürültü verilerini analiz etmek için istatistiksel analiz ve sinyal işleme yöntemi olan DMA hakkında bilgi vermek.

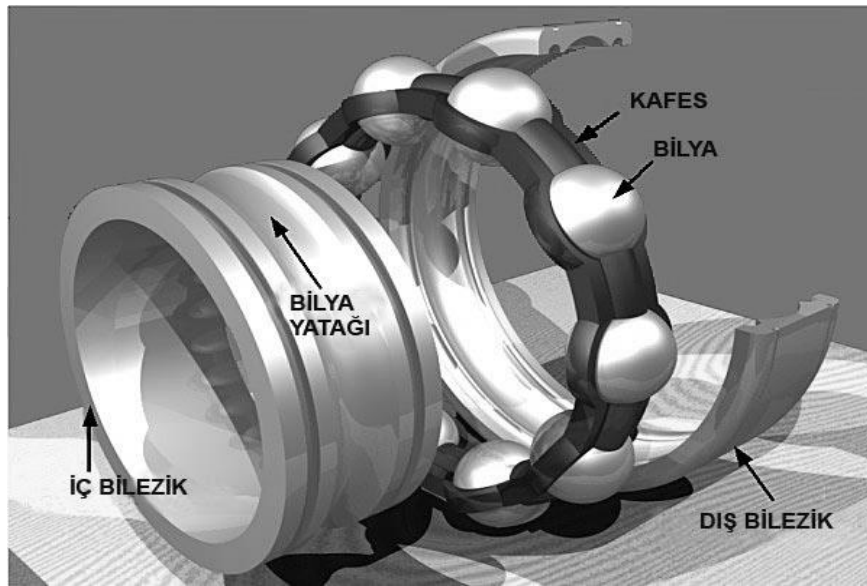
Bölüm 4:Kullanılan deney düzeneği hakkında bilgi vermek, dış bileziği üzerine farklı miktarlarda moment uygulanmış rulman üzerinden titreşim ve gürültü verilerini elde edilmesi ve önerilen yöntemlerle incelenmesi ve söz konusu probleme özgü sonuçların yorumlanması.

2. RULMAN VE YANLIŞ HİZALAMA

Bu bölümde endüstrideki makina elemanlarından yaygın olarak kullanılan rulmanların tanıtımı, hata kademeleri ve yanlış hizalama ile ilgili bilgiler verilmektedir. Yanlış hizalama ve türleri açıklanmaktadır.

2.1. Rulman Yapısı

Rulman, kayma sürtünmesi yerine bir yuvarlanma sürtünmesi sağlayarak enerji kayıplarını azaltmak için kullanılan makina elemanlarıdır [29]. Rulmanlar hareket yolları ile entegreli iki bilezikten meydana gelir ve yuvarlanma elemanları bu bilezikler üzerindedir. Yuvarlanma elemanları bilyalar, silindirik makaralar, iğne makaralar, konik makaralar veya fiçi makaralar olabilir. Yuvarlanma elemanlarını birbirlerinden belirli bir mesafede tutan ve birbirleriyle temas etmelerini önleyen kafes bulunur [30]. Rulmanlar iç bilezik, dış bilezik, kafes, yuvarlanma elemanı ve koruyucu kapak olmak üzere beş ana kısımdan oluşmaktadır. Rulmanın kısımları Resim 2.1. de gösterilmiştir.



Resim 2.1. Rulman yapısı [31]

Bilezikler genellikle çelikten yapılır, sertleştirilir ve taşlanır. Bileziklerden hangisi hareketli parçaya temas ediyorsa bunun bağlantısı sıkı biçimde yapılır.

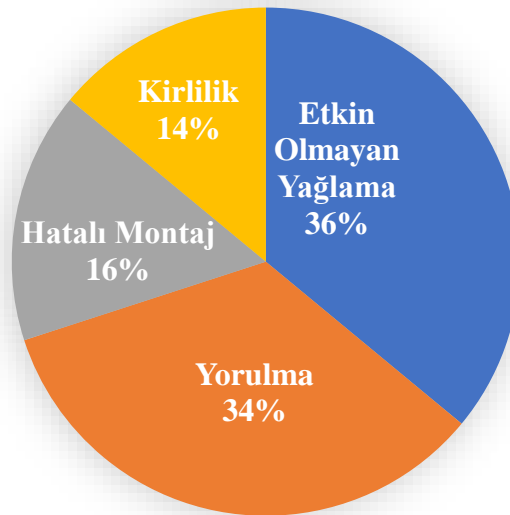
Yuvarlanma elemanı, Sürtünme direncini azaltmak için iç bilezik ile dış bilezik arasında kalan parçadır. Rulmanın yuvarlanma elemanları, mil dönerken kendi eksenleri etrafında dönerler ve i bileziğin çevresinde yuvarlanma hareketi yaparlar. Rulmanlar çeşitli biçimde olduğundan yatağın isimlendirilmesi, bunların şekillerine göre yapılır [32].

Kafes, yuvarlanma elemanlarını çevrede eşit mesafede tutar. Kafes, sürekli rulmanın diğer elemanlarıyla temasta olduğundan, meydana gelebilecek aşınmaların genellikle kafeste oluşması istenir ve bu sebepten dolayı kafes daha yumuşak malzemedendir.

Koruyucu kapak, rulman içerisine dış ortamdan toz, kir vb. yabancı maddelerin girmesini engeller ve yuvarlanma elemanlarını bu maddelere karşı muhafaza eder.

2.2. Rulman Arızası Temel Nedenleri

Rulmandaki arızalar genellikle etkin olmayan yağlama, yorulma, hatalı montaj ve kirlilikten kaynaklanmaktadır ve bu nedenlerin toplam arızalardaki oranları Resim 2.2.'de verilmiştir.



Resim 2.2. Rulman arızası temel nedenleri

Rulman arızalarını operasyon öncesi ve operasyon esnasında oluşan hatalar olmak üzere aşağıda yer alan çizelgedeki gibi ikiye ayırmak mümkündür [33].

Çizelge 2.1. Rulman hataları

Operasyon Öncesi Hatalar	Operasyon Esnasında Oluşan Hatalar
<ul style="list-style-type: none">• Montaj / demontaj esnasında uygun yöntem ve ekipman kullanılmaması• Mil ve delik toleranslarının tutturulması• Statik hizalama hataları• Rulman üzerinden elektrik akımı geçmesi• Taşıma ve depolamadaki yanlışlıklar	<ul style="list-style-type: none">• Etkin olmayan yağlama• Malzeme yorulması• Kirlenme (su / partikül gibi)• Titreşimler• Dinamik misalignment• Radyal iç boşluk miktarı (yağlama, montaj sıkılıkları ve sıcaklık)• Elektrik akımı

2.3. Rulman Hata Kademeleri

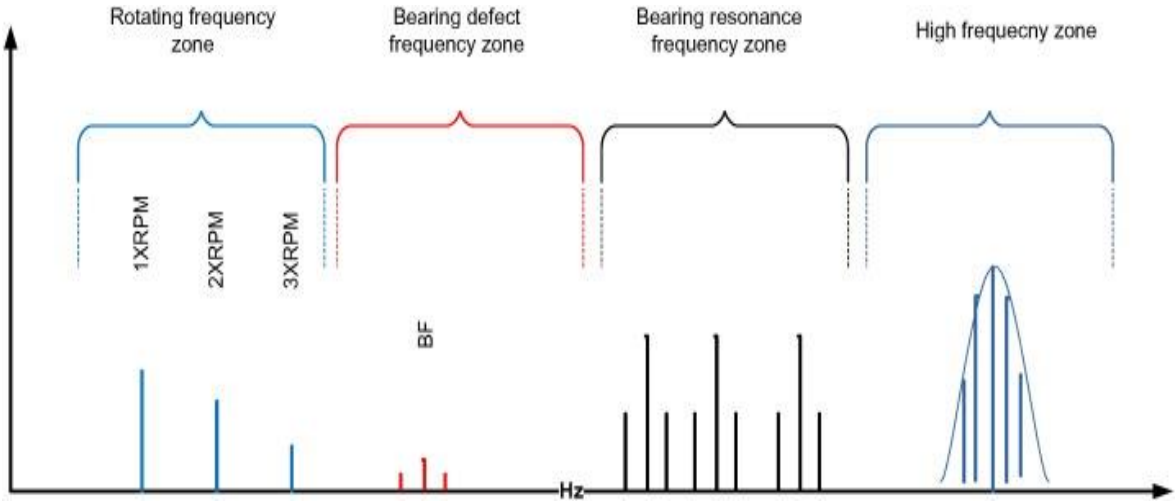
Önceki bölümde ifade edildiği gibi malzeme yorulması, rulman hata sebepleri içerisinde önemli bir yer tutmaktadır. Rulmanın çalışması esnasında yuvarlanma yolları ve yuvarlanma elemanları çok yüksek temas yüklerine maruz kalırlar ve bu zorlamalar temas noktaları civarında yüksek genlikli Hertz gerilmeleri oluşturur. Bu gerilmeler kayma gerilmesi şeklinde olup maksimum değerine temas yüzeyinden yaklaşık 0.3mm – 0.5mm derinlikte erişir. Temas yüzeyinde oluşan mikro bir çatlak, yağlayıcı etkisiyle kayma gerilmesinin maksimum olduğu bölgeye kadar ilerler, bu bölgede devam eder ve en son kopmalar ve yüzeyde oyukçuklar (pitler) oluşturur. Meydana gelen Hertz gerilmelerinden dolayı çatlakların oluşumu bazen yüzey altında da olabilir. Yüzey altında oluşan bu çatlaklar malzeme içerisinde çok yüksek frekanslı gerilme dalgaları oluşturur (yaklaşık 300kHz). Yorulma esaslı oluşan rulman hasarlarının oluşumu ve gelişimi 4 kademeye ayrılabilir ve bu kademeler aşağıda detaylandırılmaktadır [33].

Birinci kademe: Bu kademedeki rulmanın öngörülen ömrünün yaklaşık %20'si kalmıştır. Meydana gelen yüzey altı hataları yüzeyden yaklaşık 0.1-0.5mm derinlikte meydana gelir ve bunlar çok düşük genlikli ve 300kHz-500kHz malzeme içerisinde gerilme dalgaları oluşturur ve bunların tespiti stress wave sensörleri yardımıyla mümkündür. Aynı zamanda yüzeyde oluşan mikro hatalar (oyukçuklar) yuvarlanma elemanı ile teması sırasında çok kısa süreli ve çok düşük genlikli vurunlar (darbeler) meydana getirir ve bunların yansımaları Resim 2.3.'de görüldüğü gibi 20kHz-60kHz frekans aralığında görülür. Bu hasarları tespit etmek için en çok Spike Enerji Spektrumu Yöntemi (SE) kullanılır [33].

İkinci kademe: Bu kademedeki rulmanın öngörülen ömrünün yaklaşık %5-%10'u kalmıştır. Yuvarlanma yollarında gözle görünmeyen mikroskopik (40µm den küçük) oyukçuklar oluşur. Yuvarlanma elemanları bu oyukçuklar üzerinden geçerken çok kısa süreli vurunlar (impact) meydana gelir ve bunların yansımaları Resim 2.3.'de görüldüğü gibi 2kHz - 8kHz frekans aralığında görülür. Elde edilen titreşimlerin zarf eğrileri dikkate alındığında hata frekansları ve harmonikleri net bir biçimde gözlemlenir [33].

Üçüncü kademe: Bu kademedeki rulmanın öngörülen ömrünün yaklaşık %1-%5'i kalmıştır. Yuvarlanma yollarında ve yuvarlanma elemanlarında artık gözle görünen oyukçuklar oluşur. Bu hatalar rulman hata frekanslarında ve doğal frekans bölgelerinde Resim 2.3.'de görüldüğü gibi güçlü titreşim bileşenleri oluşturur [33].

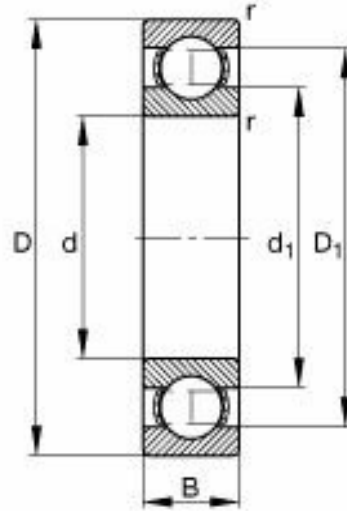
Dördüncü kademe: Bu kademedeki rulmanın öngörülen ömrünün yaklaşık %1'i kalmıştır. Rulman elemanları üzerinde çok sayıda gözle görülebilir kırıklar ve derin oyuklar oluşur. Rulman boşluk değerleri artacağından, mil stabilitesi kötü biçimde bozulur ve aşırı titreşimler meydana gelir. Bunun sonucunda çok sayıda dönme frekanslı harmonikleri gözlemlenir. Hata dağınık bir hal aldığından 2. ve 3. bölgede gözükken hata frekanslarının genlikleri azalır ve bunların yerine geniş bant rastgele (random) bileşenler meydana gelir [33].



Resim 2.3. Rulman hata bölgeleri [33]

2.4. Rulman Hata Frekansları ve Parametreleri

Deneysel uygulama için yanlış hizalanmış rulman kullanılmıştır. Bu uygulama için Orta Doğu Rulman Sanayi (ORS) marka 6307-C4 model bilyalı rulman kullanılmıştır. Rulmanın ölçüleri Resim 2.4.'te parametre değerleri ise Çizelge 2.2.'de verilmiştir.



Resim 2.4. Bilyalı rulman [34]

Çizelge 2.2. Rulman parametreleri

Tanım	Sembol	Değer	Birim
İç Bilezik Çapı	d	35	mm
İç Bilezik Hızı	f_r	33.3	Hz
Dış Bilezik Çapı	D	80	mm
Yuvarlanma Elemanı Sayısı	n	8	Adet
Yuvarlanma Elemanı Yarıçapı	BD	13.487	mm
Yuvarlanma Yolu Çapı	PD	57.48	mm
Genişlik	B	21	mm
Yuvarlanma Elemanı Temas Açısı	β	0	Derece

Burada PD yuvarlanma yolunun ortalama çapını, n yuvarlanma elemanı sayısını, BD yuvarlanma elemanının çapını, f_r iç bilezik dönü hızını ve β temas açısını ifade eder. Rulmanların çalışması esnasında görülen 4 tane karakteristik frekansı vardır. Bunlar yuvarlanma elemanının dış bilezik ve iç bilezik üzerinden geçiş hızları, yuvarlanma elemanının dönüş hızı ve kafes geçiş hızıdır. Bu frekanslar rulmanda meydana gelebilecek hatayı tanımlamada önemlidir ve Çizelge 2.3.'te verilmiştir [35].

Çizelge 2.3. Rulman hata frekansları

Hata Tipi	Hata Frekansı
Dış Bilezik	$f_{BPFO} = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos\beta \right)$
İç Bilezik	$f_{BPF1} = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos\beta \right)$
Yuvarlanma Elemanı	$f_{BSF} = f_r \frac{PD}{BD} \left(1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos\beta \right)^2 \right)$
Kafes	$f_{FTF} = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos\beta \right)$

Yukarıda verilen formüller kullanıldığında deneysel uygulama için frekanslar hesaplanmıştır. dış bilezik yuvarlanma elemanı geçiş frekansı $f_{BPFO} = 3.06f_r$, iç bilezik

yuvarlanma elemanı geçiş frekansı $f_{BPF1} = 4.94f_r$, yuvarlanma elemanı dönme frekansı $f_{BSF} = 4.03f_r$ ve kafes frekansı $f_{FTF} = 0.38f_r$ olarak hesaplanmıştır.

2.5. Yanlış Hizalama

Yanlış hizalama tahrik eden ve tahrik edilen ekipmanların merkez eksenlerinin aynı düzlemde olmadığı ve bu çizgiler arasında sapma açısının olduğu durumlarda meydana gelen bir problemdir ve önemli yer tutar [36, 37]. Genel olarak yanlış hizalamanın rulmanlar, hasarlı contalar miller, onları bağlayan kaplinler, V-kayışları, ara bağlayıcılar arasında olduğu düşünülür ancak milin yataklarında ve makinanın diğer noktalarında da olabilir ve bu elemanlara zarar verir [36, 38].

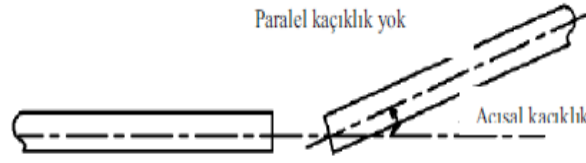
Hassas hizalama, makinaların ömrünü önemli ölçüde artırır. Yanlış hizalama, makina parçaları üzerinde yorulmalara, aşınmalara ve fazla güç tüketimine, istenmeyen duruşlara ve maliyet artışlarına neden olur [38].

Temel olarak açısal ve paralel olmak üzere iki tür yanlış hizalama vardır fakat çoğu zaman bu problem bileşke yanlış hizalama olarak bu iki yanlış hizalamanın kombinasyonu olarak karşımıza çıkar [39].

Yanlış hizalamaya maruz kalmış elemanın titreşim verileri frekans bölgesinde incelendiğinde 1X, 2X, 3X ve 4X'te pikler görülür fakat bu yanlış hizalama etkisi arttıkça 2X baskın biçimde kışkırtılır [40].

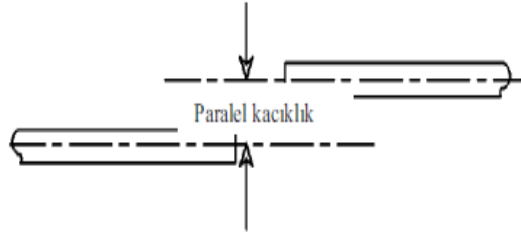
2.5.1. Yanlış Hizalama Türleri

Açısal yanlış hizalama tahrik eden ve tahrik edilen ekipmanların merkez çizgilerinin doğrultuları boyunca uzatıldığında birbirleriyle açı yapacak şekilde tek bir noktada keşiştiği durumdur [36]. Bu yanlış hizalama türü şaft üzerinde eğilme momentine neden olur [38].



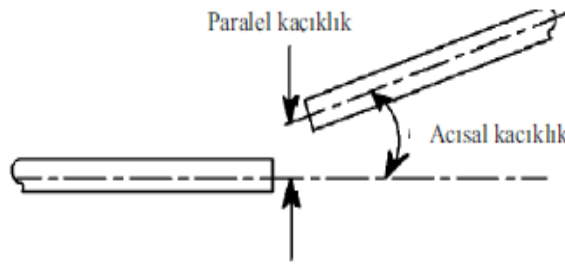
Resim 2.5. Açısal yanlış hizalama [41]

Paralel yanlış hizalama tahrik eden ve tahrik edilen ekipmanların merkez çizgilerinin paralel olduğu fakat herhangi bir kesişimin olmadığı durumdur. Bu yanlış hizalama türü her bir milin bağlı ucunda bir kesme kuvveti ve eğilme momenti üretir [38].



Resim 2.6. Paralel yanlış hizalama [41]

Çoğu yanlış hizalama durumu, açısal ve paralel yanlış hizalamanın bileşkesi şeklinde karşımıza çıkar.



Resim 2.7. Bileşke yanlış hizalama [41]

2.5.2. Yanlış Hizalamaya Sebebiyet Verecek Durumlar ve Arızalar

Makinalarda görülen yanlış hizalamaya neden olacak bazı durumlar aşağıdaki gibidir [38]:

- Motor ve pompa gibi bileşenlerin yanlış montajı.

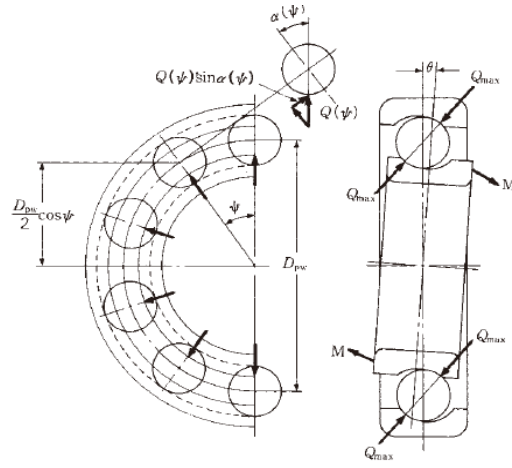
- Dinamik yanlış hizalama.
- Borulardan kaynaklanan kuvvetler nedeniyle bozulma.
- Tork nedeniyle esnek desteklerin bozulması.
- Makina yapısının sıcaklık kaynaklı büyümesi.
- Gevşeklikler.
- Şaft eksenine dik olmayan kaplin yüzü.

Yanlış hizalamaya maruz bırakılmış makinalarda ekipmanların aşırı yük taşımasıyla meydana gelebilecek sonuçlar için örnekler aşağıdaki gibidir [36, 42]:

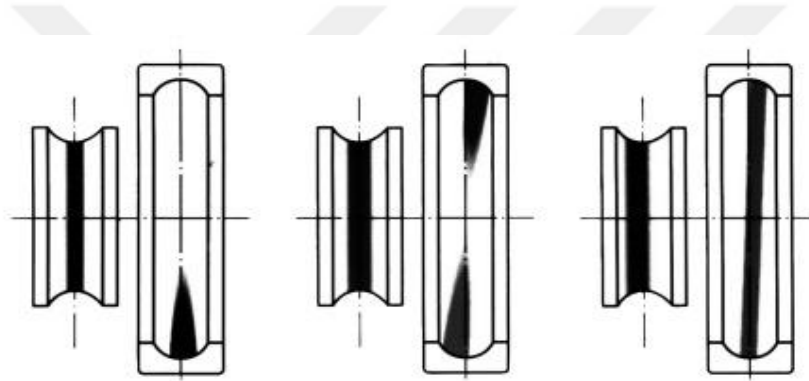
- Yüksek genlikte titreşim.
- Erken yatak, conta, mil veya kaplin arızası.
- Yüksek muhafaza sıcaklığı.
- Gevşek veya kopmuş bağlantı cıvataları.
- Yatak contalarında aşırı miktarda yağ sızıntısı.
- Benzer birkaç parçanın beklenenden kısa ömürlü olması.
- Şaftın kaplin göbeğine veya yataklara yakın yerlerden çatlaması veya kırılması.

2.5.3. Rulmanlarda Yanlış Hizalama

Rulmanlarda yanlış hizalama, rulmanın dizayn değerlerine göre taşıyacağı yükten daha fazla yük taşımasına neden olur. Resim 2.8.'de gösterildiği gibi yanlış hizalama sonucu ortaya çıkan bu Q yükleri rulmanın erken yorulmasına sebebiyet verir. Yanlış hizalama rulmanın dış bileziğinde tespit edilebilir ve bu durumda Resim 2.9.'da görüldüğü gibi yuvarlanma elemanının bilezik üzerindeki izleri merkezden sapar [38, 43]. İleri seviyedeki yanlış hizalama rulmanda aşırı sıcaklık artışına ve rulman kafesin aşınmasına ve hatta dağılmasına sebebiyet verebilir.



Resim 2.8. Rulmanda yanlış hizalama [44]



Resim 2.9. Yanlış hizlamanın iç ve dış bileziğe etkisi [45]

3. DENEYSEL MOD AYRIŞTIRMA YÖNTEMİ (DMA) VE İÇSEL MOD FONKSİYONU (İMF)

Bu bölümde Deneysel Mod Ayırıştırma Yöntemi (DMA) ve bu yöntem sonucunda oluşan İçsel Mod Fonksiyonlarının (İMF) elde edilmesi hakkında bilgiler verilmiştir.

DMA; kompozit, doğrusal olmayan ve durağan olmayan sinyaller için geliştirilmiş ve verimli bir ayırıştırma tekniğidir. Bu metod 1998'de ilk olarak Huang tarafından kullanılmıştır [46]. Wavelet dönüşümü gibi çeşitli seviyelerden süzgeç birikimine sahip olduğu düşünülebilir; ancak bütünüyle incelenecek olunursa sinyale bağımlı, uyarlamalı bir yöntemdir. Gürültüyü giderme durumu başta olmak üzere çok fazla sayıda alan üzerinde başarı ile kullanılmaktadır [47]. DMA temel bir işlev gerektirmeyen, veriye dayalı ve uyarlanabilir bir yöntemdir. DMA analizinde karmaşık bir sinyal; yinelemeli ve uyarlamalı bir işlemde geçirilerek anlık frekans bileşenlerine göre sonlu sayıda İçsel Mod Fonksiyonları (İMF'ler) olarak adlandırılan bir yapıya ayrıştırılır. İMF karakteristik zaman ölçeğini perdeleyen ve sinyalin fiziksel özelliklerini koruyan ortogonal, lokal ve adaptif ayrıştırımdır. DMA doğrusal olmayan ve kararsız sinyalde yüksek derecede etkilidir, çünkü İMF'leri önceden belirlenmiş değildir, bunlar sinyalin kendisi tarafından belirlenen temel fonksiyonlardır. DMA yönteminde veri hakkında hiçbir kabulde bulunulmaz ve sinyali İMF'lerine ve artık (kalan) sinyale ayırıştırır ve bu durum özellikle doğrusal olmayan sinyallerin çözümlenmesinde elverişli bir yöntem olduğunu gösterir. DMA'da herhangi bir filtreleme kullanılmaz, bunun yerine sinyali yerel enerji çözümlenmesiyle ayırıştırır [48]. İMF'ler farklı sinyal pozisyonlarında sinyalin karakteristik özelliklerine bağlı olarak hem yüksek hem de hem de alçak frekans detaylarını içerir.

Wavelet Dönüşümünden ve Fourier Dönüşümünden farklı olarak DMA sinyali oluşturmak için temel fonksiyon kullanmaz. DMA'nın temeli sinyale bağlı olarak üretildiğinden, ayırıştırma, verilerin yerel zaman ölçeklerine dayanır. Böylelikle, DMA zaman serisinde doğrusal olmayan ve kararsız sinyallerden zaman serilerini başarıyla ayırıştırır. Doğrusal

olmayan ve kararsız veri serilerinde yüksek ayrıştırma, etkin zaman ve frekans lokalizasyonu vardır [46].

DMA uygulaması, söylenildiği gibi bir dizi İMF sinyali ile sonuçlanır. Bileşenler, orijinal sinyalden "eleme" adı verilen yineleme ve kaydırma işlemiyle çıkarılır. Bu çıkarılan bileşenlerin, İMF olarak karakterize edilmesi için belirli özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bir İMF, önceden belirlenen iki ölçüt tarafından tanımlanmıştır ve bunlar aşağıda verilmiştir [46]:

1. Eşit sayıda uç noktaya (yerel maksimum ve yerel minimum) ve sıfır geçişlerine sahip olmalı ya da en fazla bir farklı olmalıdır.
2. Yerel maksimum ve minimum tarafından tanımlanan üst zarf ve alt zarf, herhangi bir noktada sıfıra simetrik olmalıdır. Bu koşul, zarfların ortalamasının herhangi bir noktada sıfır olduğunu ifade eder.

Yukarıda ifade edildiği gibi İMF'ler eleme denilen bir süreçle elde edilir. Sinyal eleme işlemi $s(t)$ 4 adımda özetlenebilir:

1. Bütün yerel maksimum ve yerel minimumların adlandırılması.
2. Tüm yerel maksimum ve yerel minimumları kübik spline eğri ile bağlayan sinyalin $s(t)$ üst $e_{üst}(t)$ ve alt zarflarının $e_{alt}(t)$ oluşturulması.
3. Zarfların ortalamasının hesaplanması.

$$m(t) = \frac{e_{üst}(t) + e_{alt}(t)}{2} \quad (3.1)$$

4. Sinyalden ortalama değeri çıkarılarak ilk İMF'in eldesi.

$$d(t) = s(t) - m(t) \quad (3.2)$$

5. $d(t)$ 'nin İMF kriterlerini karşılayıp karşılamadığını kontrol edilmesi. Eğer karşılıyorsa bu bir İMF'tir.

6. Eğer $d(t)$ İMF kriterlerini karşılamıyorsa, $d(t)$ yeni bir $s(t)$ olarak dikkate alınır. Ardından $d(t)$ İMF kriterlerini karşılayana kadar 1 ile 4 arası adımlar tekrarlanır.

7. $İMF1(t)$ 'yi elde ettikten sonra, $r(t)$ 'yi elde etmek için $İMF1(t)$, sinyalden çıkarılır. Ardından sıradaki İMF'i elde etmek için 1 ile 6 arasındaki adımlar tekrarlanır.

$$r(t) = s(t) - İMF1(t) \quad (3.3)$$

Her tekrarlamada o moda ait bir sinyal elde edilir. Son olarak geriye kalan sinyal $r(t)$ artık sinyal olarak isimlendirilir. Ara değerlendirme işlemi için kübik spline eğri uydurma

yaklaşımı en iyi sonucu vermektedir [47]. Genelde eleme sonucunda elde edilen artık sinyalin gücü belirli bir eşik altında olursa tekrarlamalar durdurulur [47]. Bu tekrarlamaya işleminin sonlandırılması için birçok farklı yöntem vardır [46, 49, 50]. Bu durumda n adet İMF elde edilir. (N sinyalin boyutu olmak koşuluyla DMA yönteminde sinyal, İMF'lerinde ayrıştırılmakta ve bu İMF'lerin tekrar toplanmasıyla ana sinyal kayıpsız biçimde yeniden elde edilebilmektedir) [46, 51].

DMA sürecinin sonunda, sinyal;

$$s(t) = \sum_{i=1}^N \text{İMF}(i) + r_N(t) \quad (3.4)$$

DMA'da ilk İMF'ler hızlı salınım modlarını temsil ederken, son İMF'ler yavaş salınım modlarını temsil eder.

Çok değişkene sahip sinyallerin DMA analizinde birçok algoritma geliştirilmiştir [52, 53]. Klasik DMA için geliştirilen algoritma karışık problemler için şekillendirilmiştir. Değişik İMF bileşenlerinde; değişik ölçeklere sahip veya tek bir skalaya sahip sinyaller içeren İMF'nin olabileceği gösterilmiştir. Bu hatadan kaçınmak için DMA'ya dayalı Bütün Deneysel Mod Ayrıştırma (BDMA) ve Takım Deneysel Mod Ayrıştırma (TDMA) olarak isimlendirilmiş yeni yaklaşımlar türetilmiştir [53, 54].

3.1. İMF'lerin İstatistiksel Değerleri

Bir sistemin çalışma karakteristiği hakkında bilgi veren yer değiştirme, ivme, gerilme ve basınç gibi değişkenler zamanla tahmin edilebiliyorsa bu sistemlere kararlı sistemler denilir. Eğer bir sistemde zaman içerisinde bir hata meydana gelirse bu sistemin ileriki zamanlar için davranışlarını tam olarak belirlemek zorlaşır ve bu tip sistemlere de kararsız sistemler denilir. Bununla birlikte, kararsız sistemin davranışları istatistiksel yöntemlerle tahmin edilebilir [55, 56]. Titreşim esaslı durum izleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan istatistiksel parametreler aşağıda verilmiştir [57].

Karekök ortalama değeri (RMS), sinyalin güç içeriğinin belirlenmesinde kullanılır ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt} \quad (3.5)$$

Crest faktörü sinyalin dikliğini belirtmek için kullanılır ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$F_c = \frac{P_p}{RMS} \quad (3.6)$$

Bu eşitlikte P_p sinyalin tepeden-tepeye (maksimum ve minimum değerleri arasındaki fark) değerini sembolize eder ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P_p = \max(x) - \min(x) \quad (3.7)$$

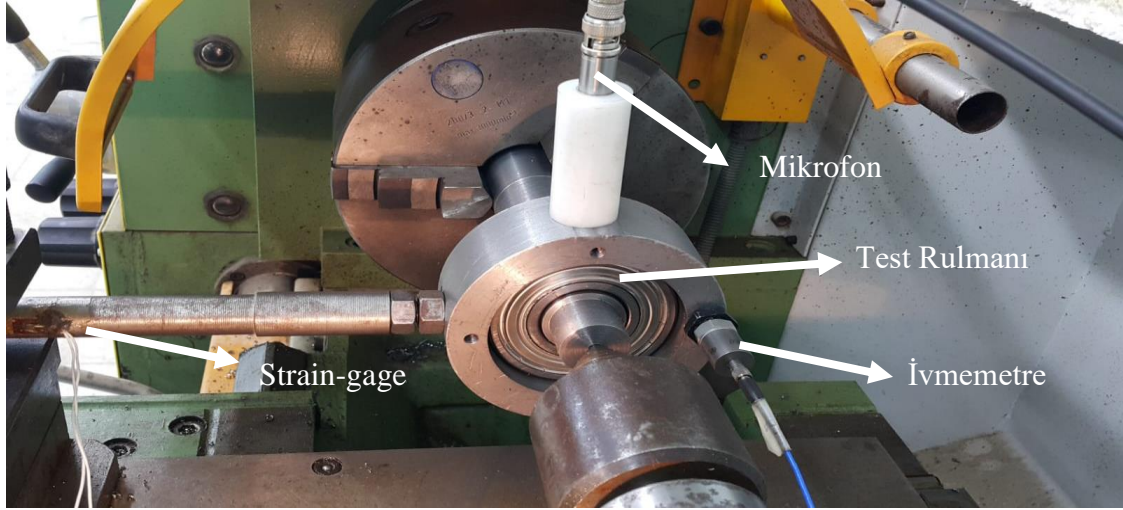


4. DENEYSEL VERİLERİN İNCELENMESİ

Bu bölüm yanlış hizalama etkisi altında çalışan bir bilyalı rulmandaki izlenen titreşim ve gürültü değerlerin zaman, frekans ve DMA analiziyle deneysel olarak incelenmesini içermektedir.

4.1. Deney Düzenegi

Yanlış hizalama (misalignment) etkisine maruz kalmış rulmanda titreşim ve gürültü izlemek için yapılan testler Resim 4.1.'de gösterilen torna tezgâhı üzerinde yapılmıştır. Deney düzeneginin torna tezgâhı üzerinde oluşturulması yük parametresini kolaylıkla değiştirme avantajı sağlamaktadır. Diğer taraftan torna tezgâhı kütesinden dolayı oldukça rijit olduğundan ve zemine düzgün bir biçimde oturduğundan, tornadaki titreşimlerin izlenen titreşimler üzerinde etkisi önemsenecek kadar azdır. Şekilden de görüldüğü gibi, test rulmanı bir ucu torna aynasına diğer ucu ise gezer puntaya tutturulmuş ve hassas olarak işlenmiş bir mil üzerine yerleştirilmiştir. Test rulmanına gerekli radyal yükü ve istenilen miktarda moment uygulayabilmek için dış bilezik üzerine bir yükleme bileziği yerleştirilmiştir. Bu bilezik üzerine oluşan titreşim ve gürültü değerlerini algılamak için ivmemetre ve mikrofon konumlandırılmıştır. Benzer biçimde rulman üzerine radyal yükü ve momenti uygulayabilmek için bir çelik çubuk bağlanmıştır. Çelik çubuk üzerine yükleme değerlerini algılayabilmek için bir adet nominal direnci 120Ω ve gage faktörü 2 olan strain-gage çubuk eksenine doğrultusunda tutturulmuştur. Gerilme değerleri Wheatstone köprüsü yardımıyla çeyrek köprü olacak şekilde elde edilmiştir. Yükleme çubuğunun diğer ucu torna arabasına tutturulmuştur. Bu sayede arabanın enine hareketiyle yükleme çubuğu çekiye maruz kalmakta ve rulman üzerine radyal yük uygulanmaktadır. Benzer biçimde arabanın boyuna hareketiyle yükleme çubuğu eğilmeye maruz kalmakta ve rulmanın dış bileziği üzerine bir moment uygulanmaktadır.



Resim 4.1. Deney düzeneği

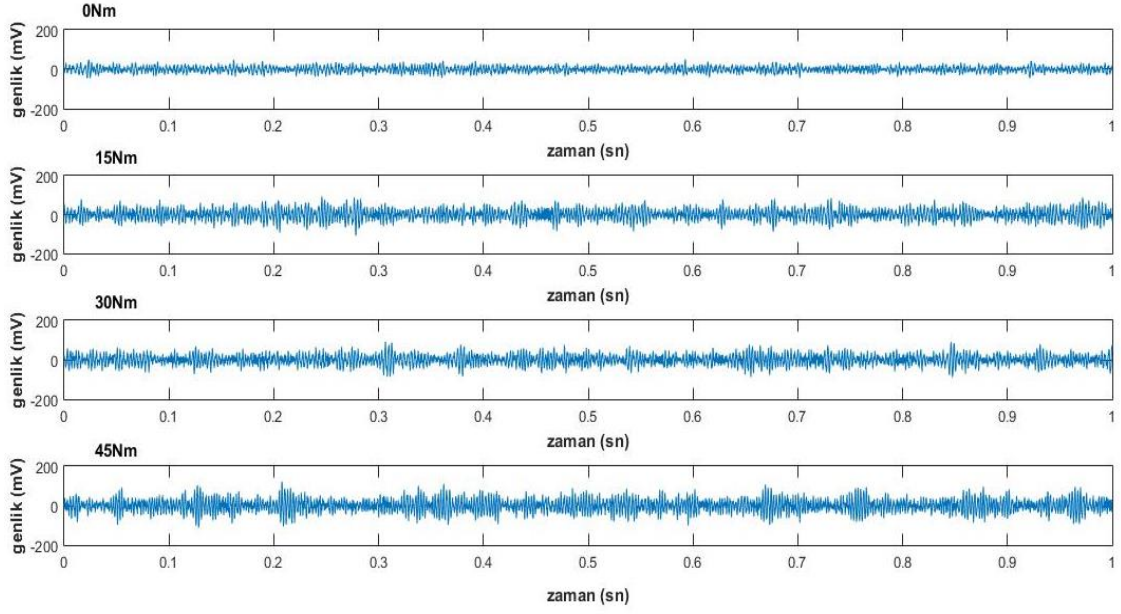
Test rulmanı üzerine, rulmanın statik yük taşıma kabiliyetinin ($C_0=19\text{kN}$) yaklaşık %10'u civarında bir radyal yük uygulanmıştır. Bunun yanında rulman üzerine 0Nm, 15Nm, 30Nm ve 45Nm olacak şekilde momentli değerleri uygulanmıştır ve mil (iç bilezik) hızı 2000dev/dak olarak seçilmiştir. Deneyler sırasında bütün veriler 20kHz örnekleme hızında elde edilmiştir ve örtüşme (aliasing) probleminin önüne geçmek amacıyla köşe frekansı 9kHz olan anti-aliasing filtre kullanılmıştır.

4.2. Deney Sonuçları

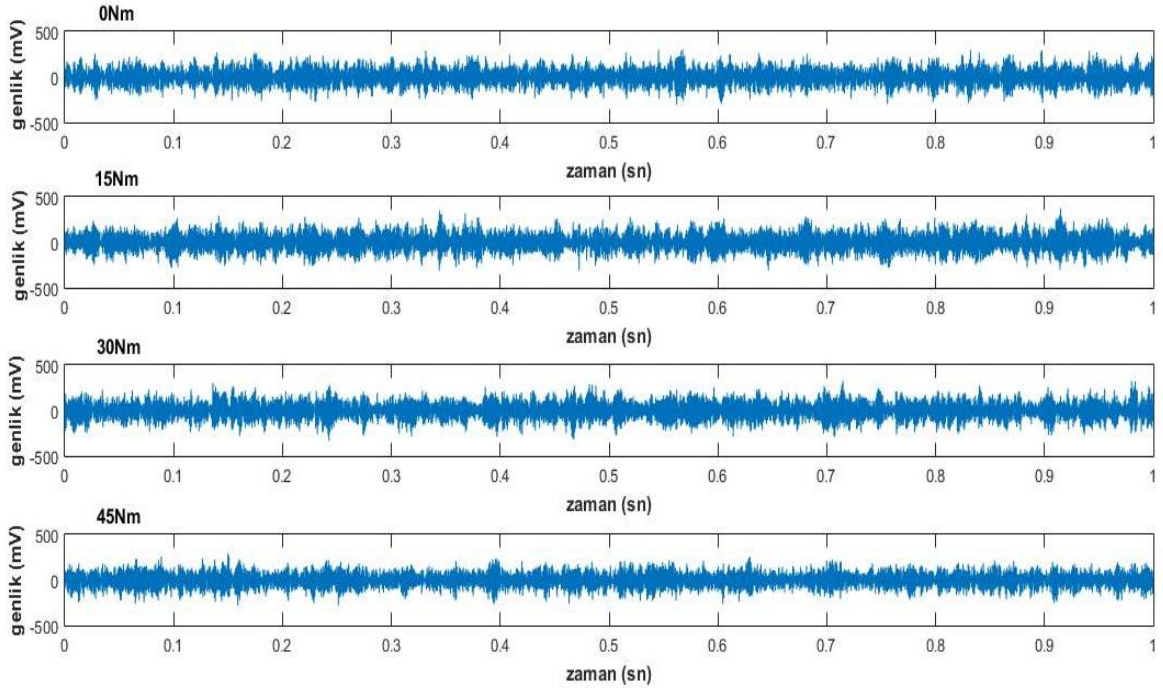
4.2.1. Yanlış hizalama Etkisine Sahip Bilyalı Rulman Titreşim ve Gürültü Değerlerinin Zaman ve Frekans Bölgesinde İncelenmesi

Şekil 4.1., Şekil 4.2., Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'te yanlış hizalama etkisine sahip bilyalı rulman titreşim ve gürültü değerlerinin zaman ve frekans bölgesi görüntüleri verilmektedir. Titreşimlerin ve gürültülerin zamana göre değişimleri, 1sn için elde edilmiştir. Verilen titreşimlerin zamana göre değişimleri dikkate alındığında, artan moment değerleri titreşim genlikleri üzerinde bir artışa neden olmaktadır fakat bu paralellik gürültü verileri üzerinde görülmemektedir. Titreşimlerin ve gürültülerin spektrumları kıyaslandığında, sadece radyal yük etkisi altında (moment olmaksızın) titreşim spektrumu iç bilezik dönme hızı (26.13Hz) ve katlarında frekans aktivitelerinin oluştuğu gözlenmektedir. Rulman üzerindeki moment değeri arttırıldığında mil hızının iki katında (52.26Hz) oluşan titreşim aktiviteleri de moment

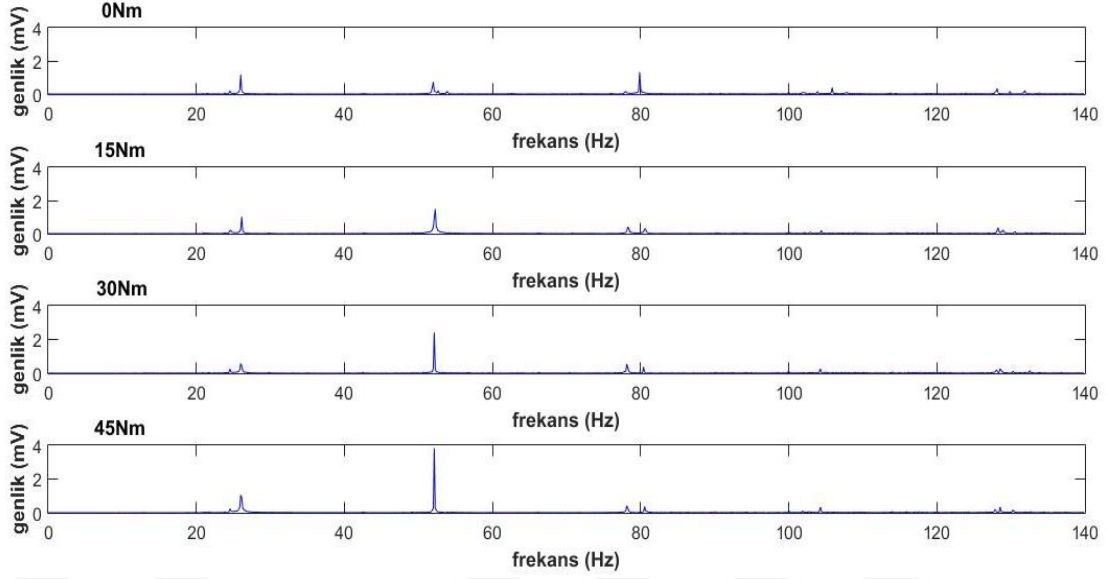
artışına paralel olarak bir artış sergilemektedir. Benzer biçimde rulman gürültü spektrumları incelendiğinde ikinci harmonik genliğinin moment artışına paralel biçimde artış sergilediği anlaşılmaktadır.



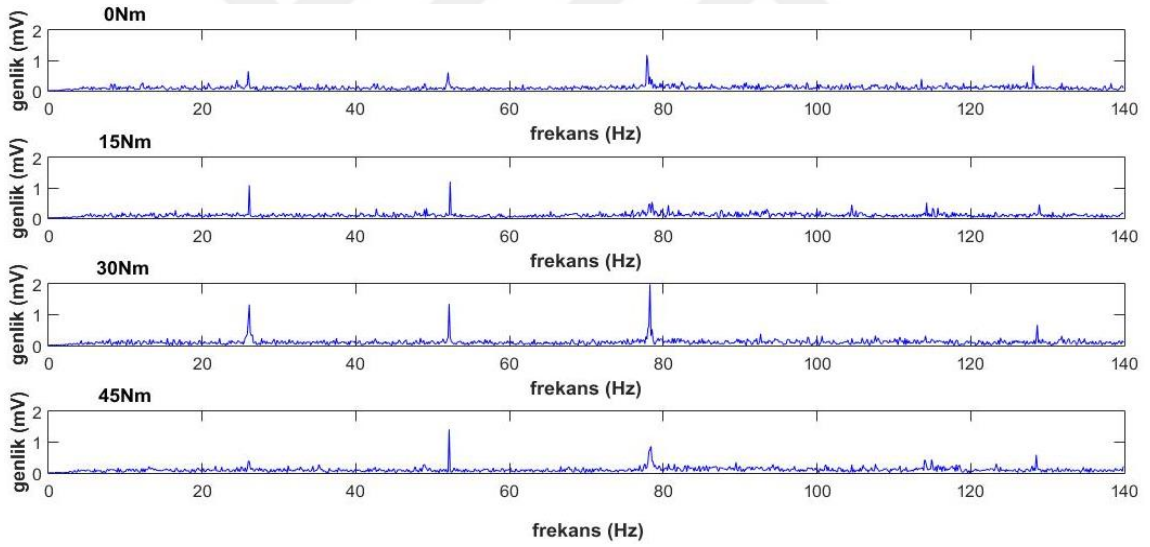
Şekil 4.1. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen titreşimler



Şekil 4.2. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen gürültüler



Şekil 4.3. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen titreşimlerin spektrumları



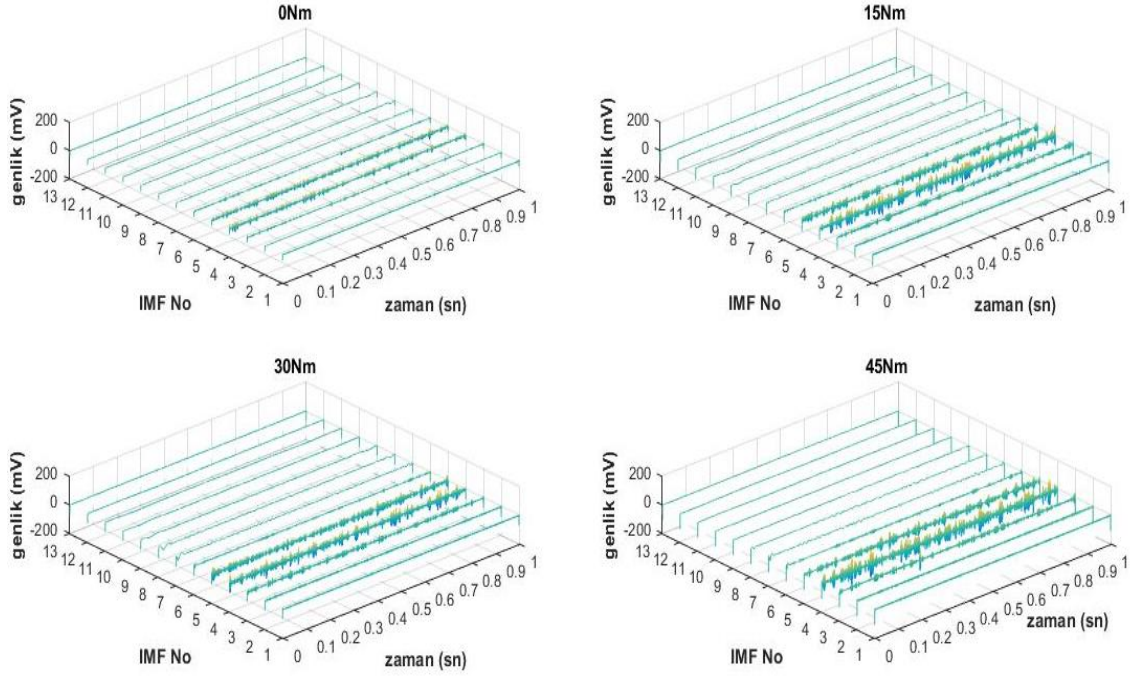
Şekil 4.4. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen gürültülerin spektrumları

4.2.2. Yanlış hizalama Etkisine Sahip Biyalı Rulman Titreşim ve Gürültü Değerlerinin DMA Yöntemiyle İncelenmesi

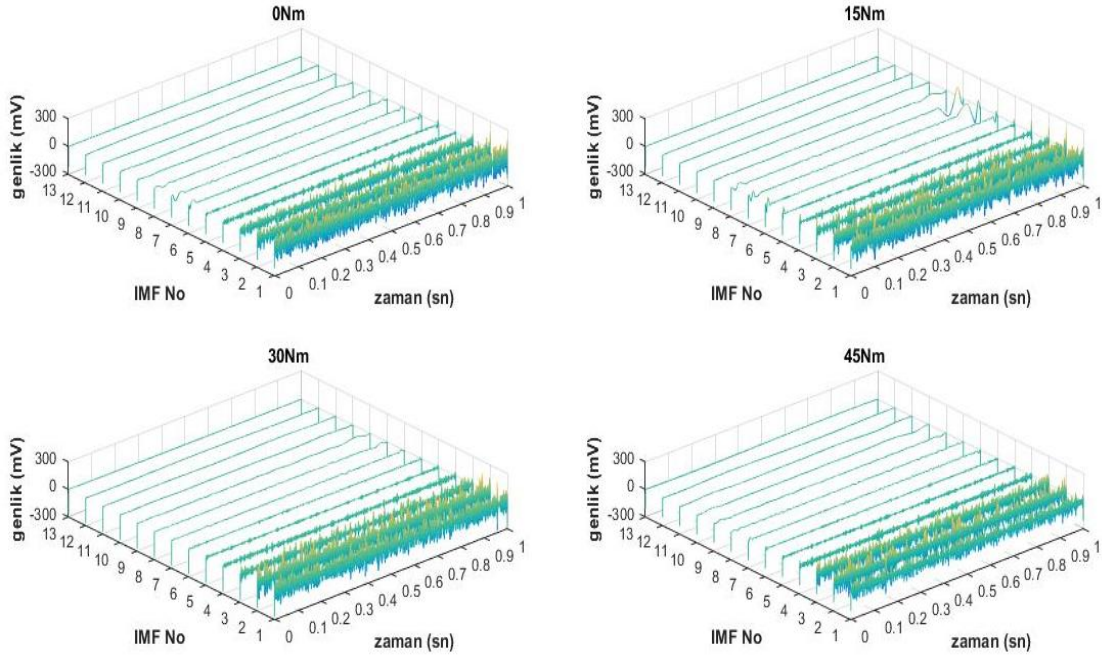
Yanlış hizalama etkisine sahip test rulmanından elde edilen titreşim ve gürültü verileri deneysel mod ayrışımı (DMA) yöntemiyle içsel mod fonksiyonlarına (İMF) ayrıştırılmıştır.

Elde edilen İMF'lerin zamana göre değişimleri Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da gösterilmektedir. Titreşim verilerinden elde edilen İMF'lerin zamana göre değişimleri dikkate alındığında, aynı İMF'lerin genliklerinde moment değişimlerine paralel olarak artış sergilediği gözlemlenmektedir. Bunun aksine, moment artışı gürültü verilerinden elde edilen İMF'lerin genliklerinde dikkate değer bir değişime sebep olmamaktadır.

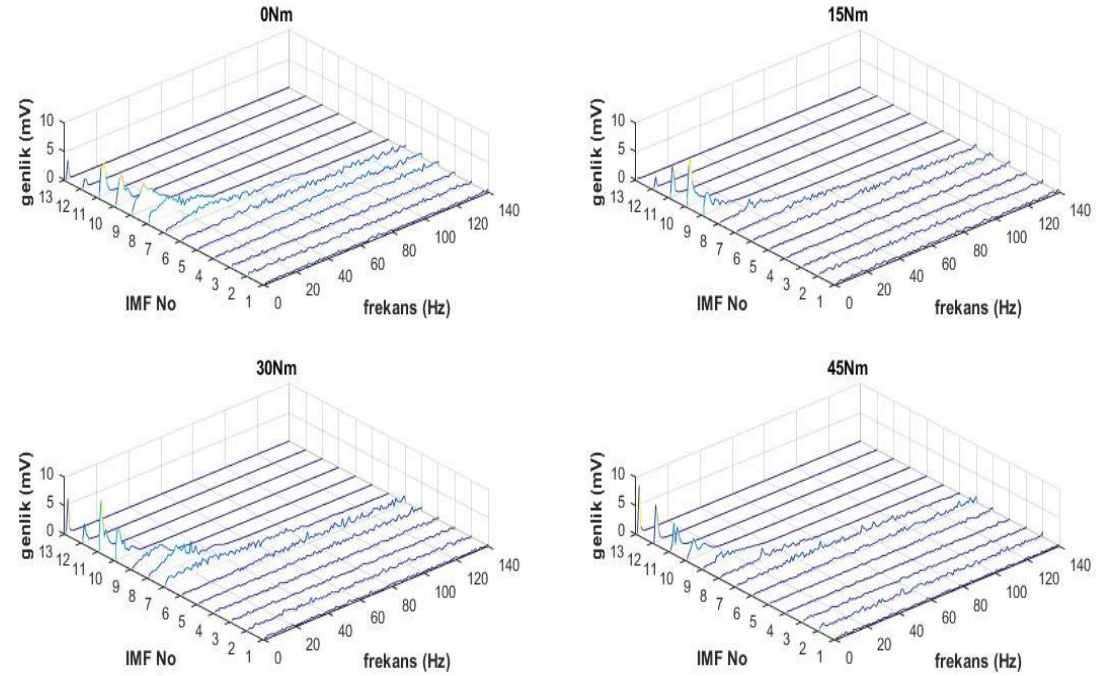
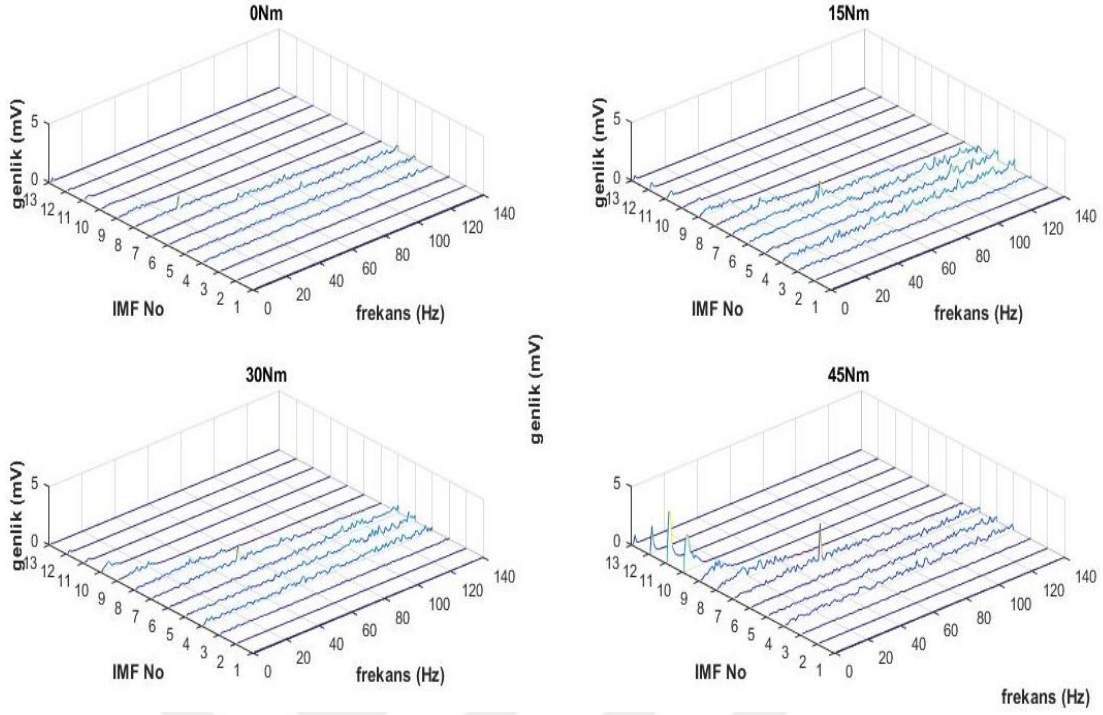
Yanlış hizalama etkisine sahip rulmandan elde edilen titreşim ve gürültü verilerinin frekansa göre değişimleri Şekil 4.7. ve Şekil 4.8.'de gösterilmektedir. Yanlış hizalama etkisi oluşturmak için uygulanan moment değişimleri, titreşim verilerinden elde edilen İMF'lerin frekans bileşenleri üzerinde de özellikle yüksek modlardaki İMF genlikleri üzerinde paralel bir artışa neden olmaktadır. Bunun aksine moment artışı gürültü verilerinden elde edilen İMF'lerin frekans bileşenleri üzerinde kayda değer bir değişim yaratmamıştır.



Şekil 4.5. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen titreşimlerin İMF'leri



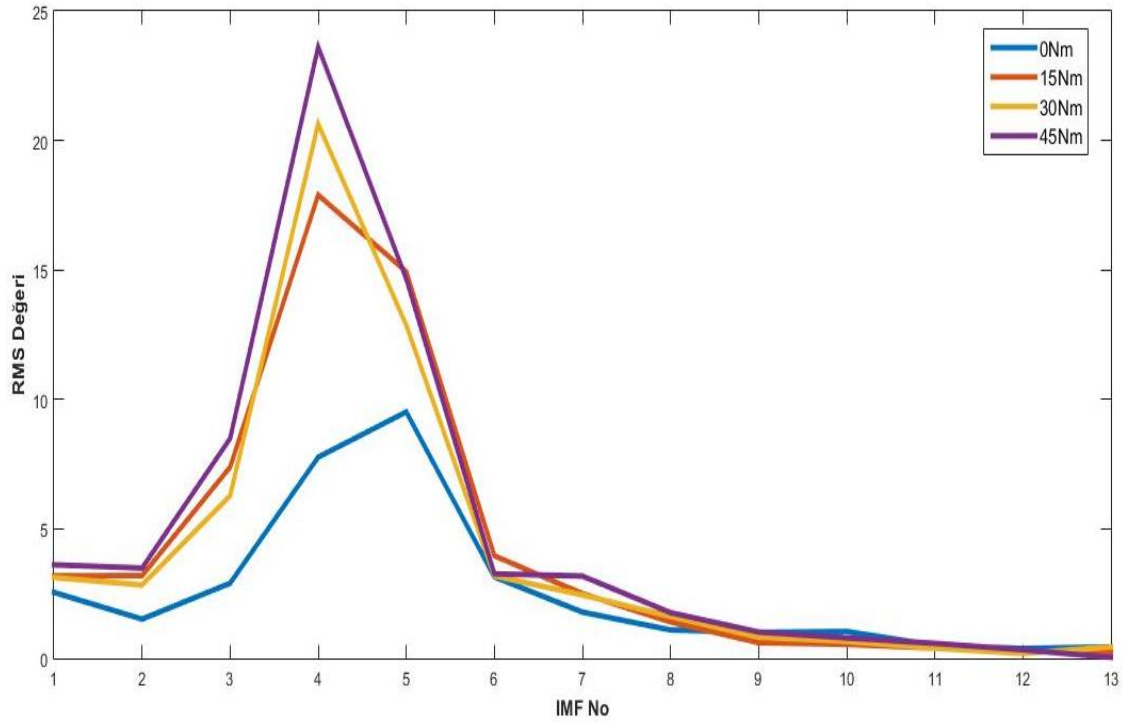
Şekil 4.6. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen gürültülerin İMF'leri



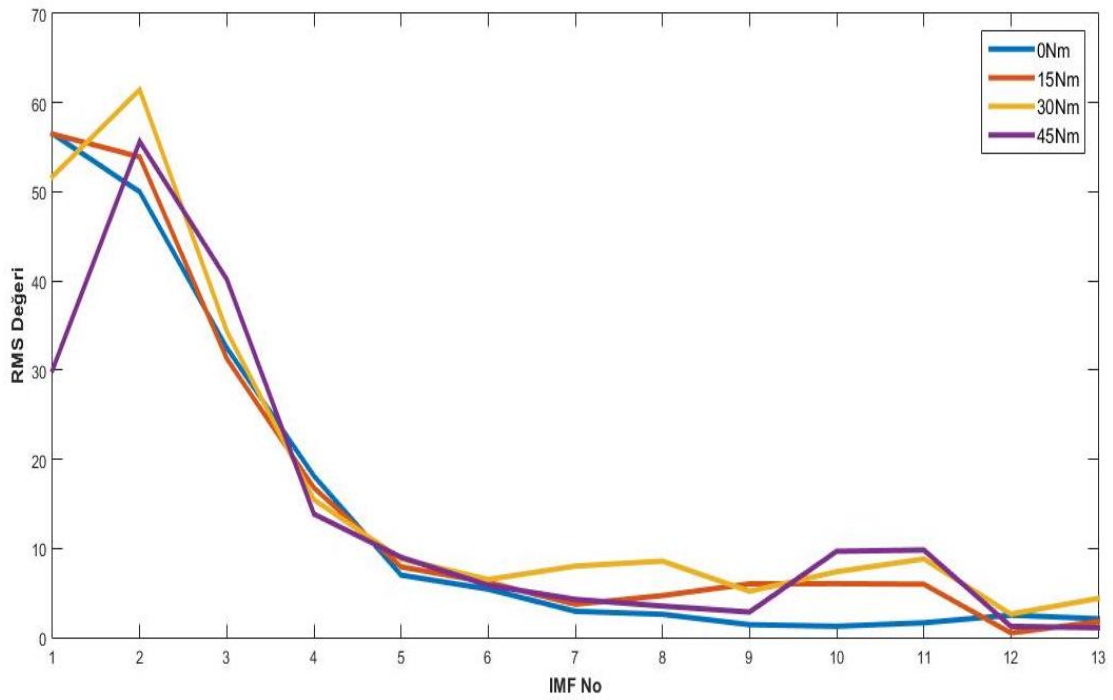
4.2.3. İMF'lerin İstatistiksel Parametreleri

Bu bölümde hata tespitinde sıkça kullanılan istatistiksel parametreler, elde edilen İMF'lere uygulanmıştır. Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.'da elde edilen titreşim ve gürültülere ait İMF'lerin RMS değerlerinin mod sayısına bağlı olarak değişimleri gösterilmektedir. Titreşim verilerinden elde edilen İMF'lerin RMS değerlerinin değişimleri dikkate alındığında, dördüncü moda ait RMS değerleri moment değişimine paralel olarak artış göstermektedir. Buna karşılık gürültü verilerinden elde edilen İMF'lerin RMS değerlerinden moment değişimini yansıtan bir eğilim elde edilememiştir.

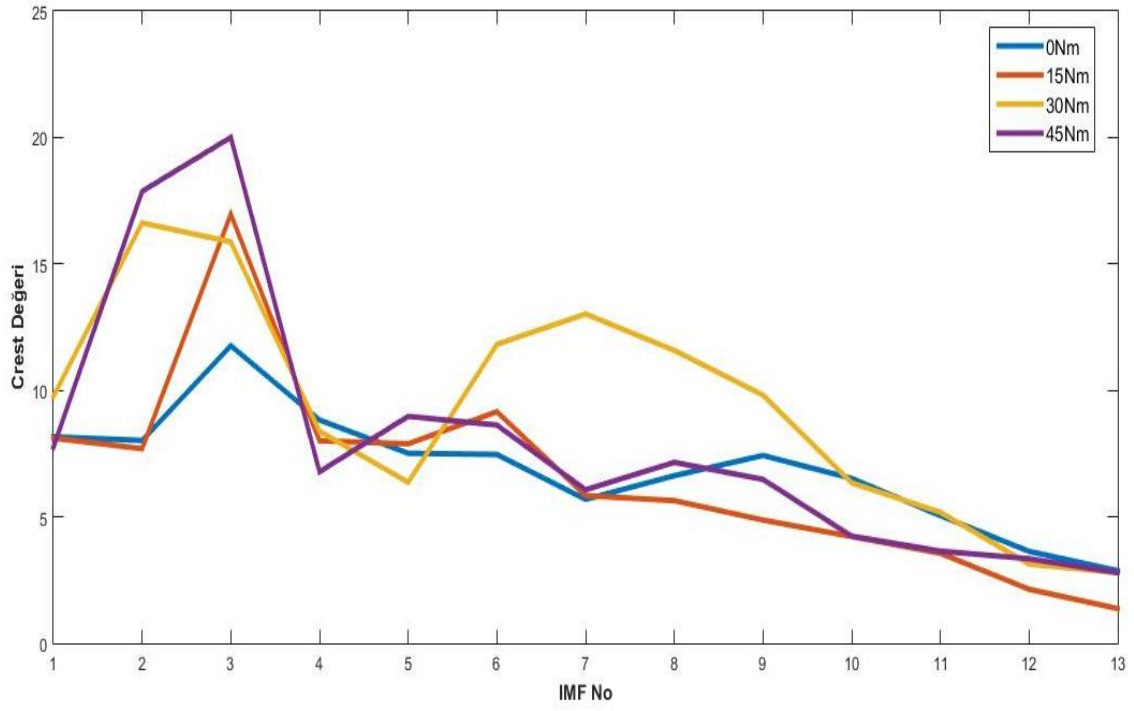
Şekil 4.11. ve Şekil 4.12.'de elde edilen titreşim ve gürültülere ait İMF'lerin Crest faktörü değerlerinin mod sayısına bağlı olarak değişimleri gösterilmektedir. Bu değişimlerden de görüldüğü gibi İMF'lerin Crest faktörlerinden moment değişimini yansıtan net bir eğilim gözlemlenmemektedir. Sonuç olarak rulmana uygulanan moment değişimini titreşim verilerinden elde edilen İMF'lerin RMS değişimleri net bir şekilde ortaya koymaktadır.



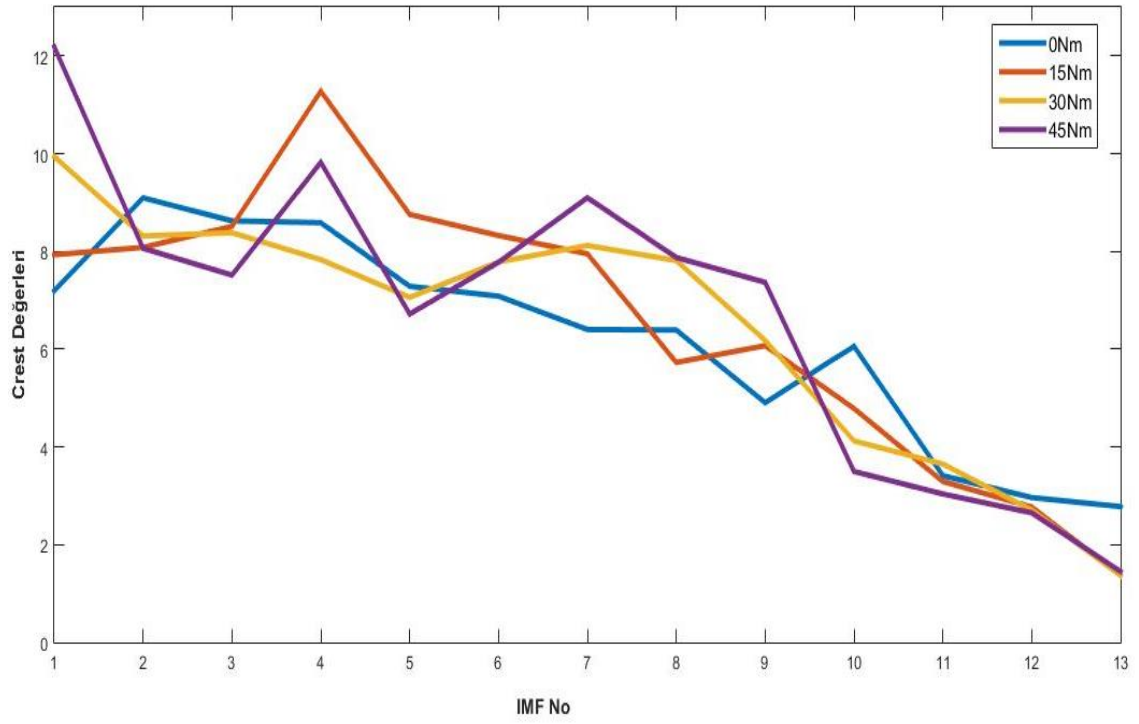
Şekil 4.9. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen titreşimlerin İMF'lerinin RMS değerleri



Şekil 4.10. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen gürültülerin İMF'lerinin RMS değerleri



Şekil 4.11. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen titreşimlerin İMF'lerinin Crest Değerleri



Şekil 4.12. 2kN radyal yük etkisi ve farklı moment değerlerinde elde edilen gürültülerin İMF'lerinin Crest Değerleri

4.3. Sonuçlar

Bu b3l3mde yanlış hizalama etkisine sahip bilyalı rulman için elde edilen titreşim ve g3r3lt3 değerlerindeki yanlış hizalama etkisinin tespit edilmesinde DMA yaklaşımının kullanımı sunulmaktadır.

- Titreşim ve g3r3lt3 değerleri için zaman ve frekans b3lgelerinde yapılan incelemelerde, zaman b3lgesindeki titreşim değerlerinin moment artışına paralel olarak genliklerinin arttığı, bunun aksine g3r3lt3 değerlerinde moment artışıyla birlikte kayda değer bir değişim göstermediği gözlemlenmiştir. Frekans b3lgesindeki titreşim ve g3r3lt3 değerlerinde ise moment artışına paralel olarak değişimlerin ikinci harmoniklerinde (52.26 Hz) genlik artışları gör3lmektedir.
- Bu sonuçlardan titreşim değerlerinin İçsel Mod Fonksiyonlarının rulmana uygulanan moment değişimlerine paralel olarak genlikte artış şeklinde bir duyarlılık gösterdiği fakat bu duyarlılık g3r3lt3 değerlerinin İçsel Mod Fonksiyonlarında gözlemlenmemektedir.
- Titreşim ve g3r3lt3 verilerinden elde edilen İMF bileşenlerinin RMS ve Crest fakt3r3 değerlerine g3re yanlış hizalama etkisinde, istatistiksel analizin titreşim verilerinden elde edilen İMF'lerin RMS değerlerinde moment artışına paralel olarak değişen bir eğilim gözlemlenmektedir fakat bu eğilim Crest değerinde gözlemlenmemektedir. Bunun aksine g3r3lt3 verilerinden elde edilen İMF'lerin RMS ve Crest değerlerinde moment artışına paralel olarak kayda değer değişen bir eğilim gör3lmemektedir.

4.4. Sonraki çalışmalara neriler

- Faz bilgisi yanlış hizalama etkisinin belirlenmesinde önemli bir yer tutmaktadır. Sonraki çalışmalarda yanlış hizalama etkisine sahip rulmandan alınan titreşimlerin faz bilgilerinin DMA yöntemiyle incelenmesi bu konuda önemli bir literat3r açığını kapatacaktır.
- Rulman ve dişli sistemlerindeki oluşan titreşimlerde genellikle dişli titreşimleri daha baskın olmaktadır. Bu sistemlerde olabilecek yanlış hizalama belirtilerinin, güçlü dişli titreşimlerinden ayrıştırılarak tespit edilmesini amaçlayan bir çalışma literat3re katkı sağlayacaktır.

- Rulmanda oluşabilecek iç bilezikteki bir lokal hatanın varlığı durumunda yanlış hizalama etkisinin incelenmesi, sonraki yapılacak çalışmalara temel teşkil etmesi açısından önemli olup incelenmesi faydalı olacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] Egeli, B., 2008, “Çelik malzemelerdeki hataların titreşim analizi ile tespiti”, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon.
- [2] Özkan, Ö., 2015, “Dengesiz yüke maruz silindirik masuralı rulman arızasının titreşim analiziyle belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Uşak.
- [3] Çınar, İ., 2005, “Madencilikte gürültü analizi, modellenmesi ve haritalanması”, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- [4] Qiu, H., Lee, J., Lin, J., & Yu, G., 2006, “Wavelet filter-based weak signature detection method and its application on rolling element bearing prognostics”, *Journal of sound and vibration.*, 289(4): 1066-1090.
- [5] Lal, M., & Tiwari, R., 2012, “Multi-fault identification in simple rotor-bearing-coupling systems based on forced response measurements”, *Mechanism and Machine Theory*, 51: 87-109.
- [6] Liu, J., Shao, Y., & Lim, T. C., 2012, “Vibration analysis of ball bearings with a localized defect applying piecewise response function” , *Mechanism and Machine Theory*, 56: 156-169.
- [7] Ye, Z., Wang, L., Gu, L., & Zhang, C., 2013, “Effects of tilted misalignment on loading characteristics of cylindrical roller bearings”, *Mechanism and Machine Theory*, 69: 153-167.
- [8] Zhao, J. S., Liu, W., Zhang, Y., Feng, Z. J., Ye, J., & Niu, Q. B., 2013, “Effects of gyroscopic moment on the damage of a tapered roller bearing”, *Mechanism and Machine Theory*, 69:185-199.
- [9] Liu, H., & Han, M., 2014, “A fault diagnosis method based on local mean decomposition and multi-scale entropy for roller bearings”, *Mechanism and Machine Theory*, 75: 67-78.
- [10] Tian, Y., Ma, J., Lu, C., & Wang, Z., 2015, “Rolling bearing fault diagnosis under variable conditions using LMD-SVD and extreme learning machine”, *Mechanism and Machine Theory*, 90: 175-186.
- [11] Kiral, Z., & Karagülle, H., 2003, “Simulation and analysis of vibration signals generated by rolling element bearing with defects”, *Tribology International*, 36(9): 667-678.
- [12] Orhan, S., 2002, “Rulmanlarla yataklanmış dinamik sistemlerin titresim analiziyle kestirimci bakımı”, Doktora Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale.

- [13] Tandon, N., & Choudhury, A., 1999, "A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings", *Tribology International*, 32(8): 469-480.
- [14] Al-Ghamd, A. M., & Mba, D., 2006, "A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7): 1537-1571.
- [15] Li, M., Yu, L., 2001, "Analysis of the coupled lateral torsional vibration of a rotor-bearing system with a misaligned gear coupling", *Journal of Sound and Vibration*, 243(2): 283-300.
- [16] Sekhar, A. S., Prabhu, B. S., 1995, "Effects of coupling misalignment on vibrations of rotating machinery", *Journal of Sound and Vibration*, 185(4): 655-671.
- [17] Al-Hussain, K. M., 2003, "Dynamic stability of two rigid rotors connected by a flexible coupling with angular misalignment", *Journal of Sound and Vibration*, 266: 217-234.
- [18] Pennacchi, P., Vania, A., Chatterton, S., 2012, "Nonlinear effects caused by coupling misalignment in rotors equipped with journal bearings", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 30: 306-322.
- [19] Halminen, O., Kärkkäinen, A., Sopenan, J., Mikkola A., 2015, "Active magnetic bearing-supported rotor with misaligned cageless backup bearings: a dropdown event simulation model", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 50: 692-705.
- [20] Das, S., Guha, S.K., Chattopadhyay, A.K., 2002, "On the steady-state performance of misaligned hydrodynamic journal bearings lubricated with micropolar fluids", *Tribology International*, 35: 201-210.
- [21] Sun, J., Changlin, G., 2004, "Hydrodynamic lubrication analysis of journal bearing considering misalignment caused by shaft deformation", *Tribology International*, 37: 841-848.
- [22] Rybczynski, J., 2011, "The possibility of evaluating turbo-set bearing misalignment defects on the basis of bearing trajectory features", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25: 521-536.
- [23] Guha, S. K., 2000, "Analysis of steady-state characteristics of misaligned hydrodynamic journal bearings with isotropic roughness effect", *Tribology International*, 33: 1-12.
- [24] Bouaziz, S., Hili, M., A., Mataar, M., Fakhfakh, T., Haddar, M., 2009, "Dynamic behaviour of hydrodynamic journal bearings in presence of rotor spatial angular misalignment", *Mechanism and Machine Theory*, 44: 1548-1559.

- [25] Ye, Z., Wang, L., Gu, L., Zhang, C., 2013, “Effects of tilted misalignment on loading characteristics of cylindrical roller bearings”, *Mechanism and Machine Theory*, 69: 153–167.
- [26] Hu, W., Miah, H., Feng, N.S., Hahn, E.J., 2000, “A rig for testing lateral misalignment effects in a flexible rotor supported on three or more hydrodynamic journal bearings”, *Tribology International*, 33: 197–204.
- [27] LEE, Y. S., LEE, C. W., 1999, “Modelling and vibration analysis of misaligned rotor-ball bearing systems”, *Journal of Sound and Vibration*, 224(1): 17-32.
- [28] Turaga, R., Sekhar, A. S., & Majumdar, B. C. 1999, “The effect of roughness parameter on the performance of hydrodynamic journal bearings with rough surfaces”, *Tribology International*, 32(5): 231-236.
- [29] <http://rulman.nedir.com/#ixzz2xAcOyCW0>
- [30] [http://www.schaeffler.com.tr/content.schaeffler.tr/tr/products_services/rotativ_products/index.jsp?addedItem=PubLanguage\(386195\)](http://www.schaeffler.com.tr/content.schaeffler.tr/tr/products_services/rotativ_products/index.jsp?addedItem=PubLanguage(386195))
- [31] <http://www.bakimliyiz.com/egitim-ve-ogretim/122006-rulman-yataklarinin-yapisi-nasildir.html>
- [32] “Elektrik Makinelerde Mekanik Arıza Tespiti” megep http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Elektrik%20Makinelerinde%20Mekanik%20Arıza%20Tespiti.pdf
- [33] Tom, K. F., 2015, “A primer on vibrational ball bearing feature generation for prognostics and diagnostics algorithms”, *Army Research Lab Adelphi md. Sensors and Electron Devices Directorate*, ARL-TR-7230.
- [34] http://www.weiku.com/products/9692727/SKF_High_precision_deep_groove_ball_bearing_6207_NSK.html
- [35] Karahan, M. M. F., 2005, “Titreşim analizi ile makinalarda arıza teşhisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa.
- [36] Kayadelen, H. K., 2009, “Şaft layn hesaplarının sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi”, *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [37] Bognatz, S. R., 1995, “Alignment of critical and non critical machines”, *Orbit*, 4: 23-25.
- [38] Mobius Institute, 2011, “Vibration Training Course Book Category II”, Chapter 9: 2-10.

- [39] Chacon, J. L. F., Andicoberry, E. A., Kappatos, V., Asfis, G., Gan, T. H., & Balachandran, W., 2014, "Shaft angular misalignment detection using acoustic emission", *Applied Acoustics*, 85: 12-22.
- [40] Erol, S. S., 2015, "Dinamik sistemlerin kestirimci bakımına etki eden faktörlerin durum bazlı incelenmesi", Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli
- [41] Mobley, R. K., 2004, "Maintenance fundamentals 2nd edition", *Elsevier Butterworth-Heinemann*, Massachusetts.
- [42] Piotrowski, J., 1995, "Shaft alignment handbook 2nd edition", *Marcel Dekker Inc.*, New York - Basel- Hong Kong.
- [43] Orhan, S., 2002, 127394 "Rulmanlarla yataklanmış dinamik sistemlerin titreşim analizi ile kestirimci bakımı", *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale.
- [44] NSK, 2009, "Technical Report", *Japan*, CAT. No. E728g, 160.
- [45] <http://www.car-engineer.com/rolling-bearing-misalignment-explained/>
- [46] Huang, N.E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. L. C., Shih, H. H., Zheng, Q. N., Yen, N. C., Tung, C. C., Liu, H. H., 1998, "The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis", *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 454(1971): 903-995.
- [47] Huang, N. E., Wu, M. L. C., Long, S. R., Shen, S. S. P., Qu, W., Gloersen, P., Fan, K. L., 2003, "A confidence limit for the empirical mode decomposition and Hilbert spectral analysis", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 459(2037): 2317-2345.
- [48] Braun, S., Feldman, M., 2011, "Decomposition of non-stationary signals in to varying time scales: Some aspects of the EMD and HVD methods", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(7): 2608–2630.
- [49] Diop, E. H. S., Alexandre, R., and Moisan, L., 2012, "Intrinsic nonlinear multiscale image decomposition: a 2D empirical mode decomposition-like tool", *Computer Vision and Image Understanding*, 116(1): 102-119.
- [50] Rilling, G., Flandrin, P., and Goncalves, P., 2003, "On empirical mode decomposition and its algorithms", *Proceedings of IEEE EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*, Grado(I), 3(3): 8-11

- [51] Wu, Z., Huang, N. E., 2004, "A study of the characteristics of white noise using the Empirical Mode Decomposition method", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 460(2046): 1597-1611.
- [52] Fleureau, J., Nunes, J. C., Kachenoura, A., Albera, L., Senhadji, L., 2011, "Turning tangent empirical mode decomposition: a framework for mono-and multivariate signals", *IEEE Trans. Signal Process*, 59(3): 1309–1316.
- [53] Torres, M. E., Colominas, M. A., Schlotthauer, G., Flandrin, P., 2011, "A complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise", *In: Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 4144–4147.
- [54] Wu Z., Huang, N.E., 2009, "Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method", *Adv. Adapt. Data Anal.*, 1(01): 1–41.
- [55] D. Dyer, and R.M. Stewart, 1978, "Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis", *Transactions of the ASME, Journal of Mechanical Design*, 100(2): 229-235.
- [56] Martin, H. R., 1992, "Detection of gear damage by statistical vibration analysis", *In Institution of Mechanical Engineers Conference Publications, Medical engineering publications ltd.*, 6: 395-395.
- [57] Broch, T. J., 1973, "Application of the b&k equipment to mechanical vibration and shock measurements", *Bruel & Kjaer*.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : COŞKUN, Erhancan
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 18.01.1993 Malatya
Medeni Hali : Bekar
Telefon : 0 (506) 471 50 64
E-posta : erhancancoskun@gmail.com

Eğitim Derece

Eğitim Birimi

Mezuniyet Tarihi

Yüksek lisans	Uşak Üniversitesi / Makina Müh. Böl.	2019
Lisans	Kocaeli Üniversitesi / Mekatronik Müh. Böl.	2015
Lise	Şehit Abdülkadir Kılavuz A. Ö. L.	2011

İş Deneyimi

UMAK ASANSÖR 12.2017-11.2018
WMM MAKİNA BAKIM 11.2018-03.2019

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

Hobiler

Puzzle, Bilgisayar ve Telefon Teknolojileri, Kitap, Sinema, Satranç, Seyahat