



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KRİYOJENİK İŞLEM GÖRMÜŞ MİLLERİN DİNAMİK
DAVRANIŞLARININ DENEYSEL ANALİZİ**

MENDERES KAM

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. HAMİT SARUHAN**

DÜZCE, 2016

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KRİYOJENİK İŞLEM GÖRMÜŞ MİLLERİN DİNAMİK
DAVRANIŞLARININ DENEYSEL ANALİZİ

Menderes KAM tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Hamit SARUHAN
Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Hamit SARUHAN (Tez Danışmanı)
Düzce Üniversitesi



Doç. Dr. Suat SARIDEMİR
Düzce Üniversitesi



Yrd. Doç. Dr. Fuat KARA
Düzce Üniversitesi



Doç. Dr. Uğur KÖKLÜ
Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi



Yrd. Doç. Dr. Gürcan ATAKÖK
Marmara Üniversitesi



Tez Savunma Tarihi: 25/11/2016

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

25 Kasım 2016

Menderes KAM



TEŞEKKÜR

Doktora tezimin hazırlanması süresince gösterdiği her türlü destek, yönlendirme ve yardımlarından dolayı çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Hamit SARUHAN' a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca katkılarını esirgemeyen Doç. Dr. Suat SARIDEMİR, Yrd. Doç. Dr. Fuat KARA, Doç. Dr. Uğur KÖKLÜ ve Yrd. Doç. Dr. Gürcan ATAKÖK hocalarıma teşekkür ederim. Ayrıca, araştırmalarıma destek olan birlikte çalıştığım Yrd. Doç. Dr. Nursel ALTAN ÖZBEK, Öğr. Gör. Onur ÖZBEK, Öğr. Gör. Erman ZURNACI, Öğr. Gör. Dr. Engin NAS, Öğr. Gör. Gültekin ÇAKIR, Öğr. Gör. Sabri UZUNER, Öğr. Gör. Kudbeddin ARGUN ve Öğr. Gör. Oğuzhan KENDİRLİ' ye ayrı ayrı teşekkür ederim.

Manevi katkılarından dolayı sevgili aileme, eşim Aysun Kam'a, kızım Sinem Mina Kam'a ve oğlum Mehmet Talha Kam'a sevgi ve saygılarımı sunarım.

Doktora tez çalışmam, Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından **BAP-2015.06.05.351** numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir. Katkılarından dolayı Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü birimine ve personeline teşekkür ederim.

25 Kasım 2016

Menderes KAM

ŞEKİL LİSTESİ.....	VII
ÇİZELGE LİSTESİ.....	X
KISALTMALAR	XI
SİMGELER.....	XII
ÖZET	XIII
ABSTRACT.....	XIV
EXTENDED ABSTRACT	1
1. GİRİŞ	3
2. LİTERATÜR.....	6
2.1. MİL-YATAK SİSTEMLERİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	6
2.2. KRİYOJENİK İŞLEM İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	12
2.3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ DEĞERLENDİRİLMESİ	17
3. MİLLERİN ISIL İŞLEMLERİ	20
3.1. GELENEKSEL ISIL İŞLEM.....	21
3.2. TEMPERLEME İŞLEMİ.....	22
3.3. KRİYOJENİK İŞLEM	23
3.3.1. Kriyojenik İşlemin Uygulanması.....	24
4. MİLLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ.....	26
4.1. SERTLİK.....	26
4.1.1. Rockwell Sertlik Ölçme Yöntemi.....	27
4.1.2. Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi	27
4.1.3. Vickers Sertlik Ölçme Yöntemi.....	27
4.2. ÇEKME TESTİ	28
5. YUVARLANMALI YATAKLAR.....	29
5.1. YUVARLANMALI YATAKLARIN SINIFLANDIRILMASI.....	30
5.2. YUVARLANMALI YATAKLARIN ELEMANLARI	31
5.3. YUVARLANMALI YATAKLARDA KUSURLAR.....	31
6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	33

6.1. AISI 4140 ÇELİĞİ MİLLERE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER	34
6.2. DENEY SETİ.....	37
6.3. SERTLİK ÖLÇME TESTLERİ.....	41
6.4. ÇEKME TESTLERİ	42
6.5. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İNCELEMELERİ.....	44
7. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	45
7.1. MİLLERİN DİNAMİK DAVRANIŞ DENEYLERİ BULGULARI.....	45
7.1.1. Bode Eğrileri Grafikleri.....	50
7.1.2. Dört Kanal Titreşim Verileri.....	62
7.1.3. Şelale (waterfall) Grafikleri.....	73
7.1.4. Yörünge (orbit) Grafikleri	84
7.1.5. Zamana Bağlı Genlik Değerleri (Time waveform) Grafikleri.....	90
7.2. SERTLİK ÖLÇME TESTLERİ BULGULARI.....	106
7.3. ÇEKME TESTLERİ BULGULARI.....	109
7.4. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) BULGULARI.....	112
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	115
8.1. SONUÇLAR.....	115
8.2. ÖNERİLER.....	118
KAYNAKLAR	120
ÖZGEÇMİŞ	130

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1. Kriyojenik işlem fırını.	25
Şekil 4.1. Gerilme - birim uzama eğrisi.	28
Şekil 5.1. Yuvarlanmalı yataklar ve elemanları.	31
Şekil 6.1. Akış diyagramı.	33
Şekil 6.2. Deneylerde kullanılan miller.	34
Şekil 6.3. Isıl işlem ve kriyojenik işlem eğrisi.	36
Şekil 6.4. Kriyojenik işlem fırını ve işlemin uygulanması.	36
Şekil 6.5. Deney düzeneği ve dört kanalın gösterimi.	39
Şekil 6.6. Deney düzeneği şematik gösterimi.	39
Şekil 6.7. Deney düzeneğinin çalışması.	40
Şekil 6.8. Mikro yapı ve sertlik analiz numuneleri.	41
Şekil 6.9. Sertlik ölçme cihazı.	41
Şekil 6.10. Çekme testi numunesi.	42
Şekil 6.11. Çekme test cihazı.	43
Şekil 6.12. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).	44
Şekil 7.1. Normal ve kusurlu yataklarda millerin ortalama genlik değerleri.	47
Şekil 7.2. Normal ve kusurlu yuvarlanmalı yatakların ortalama genlik değerleri.	48
Şekil 7.3. Normal yatak destekli miller için Bode eğrisi.	51
Şekil 7.4. Normal yatak destekli miller için Bode eğrisi (devamı).	52
Şekil 7.5. İç bilezik kusurlu yatak destekli miller için Bode eğrisi.	53
Şekil 7.6. İç bilezik kusurlu yatak destekli miller için Bode eğrisi (devamı).	54
Şekil 7.7. Dış bilezik kusurlu yatak destekli miller için Bode eğrisi.	55
Şekil 7.8. Dış bilezik kusurlu yatak destekli miller için Bode eğrisi (devamı).	56
Şekil 7.9. Bilye kusurlu yatak destekli miller için Bode eğrisi.	57
Şekil 7.10. Bilye kusurlu yatak destekli miller için Bode eğrisi (devamı).	58
Şekil 7.11. Hepsi kusurlu yatak destekli miller için Bode eğrisi.	59
Şekil 7.12. Hepsi kusurlu yatak destekli miller için Bode eğrisi (devamı).	60
Şekil 7.13. Normal yatakların titreşim verileri.	63
Şekil 7.14. Normal yatakların titreşim verileri (devamı).	64
Şekil 7.15. İç bileziği kusurlu yatakların titreşim verileri.	65

Şekil 7.16. İç bileziği kusurlu yatakların titreşim verileri (devamı).	66
Şekil 7.17. Dış bileziği kusurlu yatakların titreşim verileri.	67
Şekil 7.18. Dış bileziği kusurlu yatakların titreşim verileri (devamı).	68
Şekil 7.19. Bilye kusurlu yatakların titreşim verileri.	69
Şekil 7.20. Bilye Kusurlu yatakların titreşim verileri (devamı).	70
Şekil 7.21. Hepsi kusurlu yatakların titreşim verileri.	71
Şekil 7.22. Hepsi kusurlu yatakların titreşim verileri (devamı).	72
Şekil 7.23. Normal yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi.	74
Şekil 7.24. Normal yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi (devamı).	75
Şekil 7.25. Bilye kusurlu yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi.	76
Şekil 7.26. Bilye kusurlu yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi (devamı). ..	77
Şekil 7.27. İç bilezik kusurlu yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi.	78
Şekil 7.28. İç bilezik kusurlu yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi (devamı).	79
Şekil 7.29. Dış bilezik kusurlu yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi.	80
Şekil 7.30. Dış bilezik kusurlu yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi (devamı).	81
Şekil 7.31. Hepsi kusurlu yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi.	82
Şekil 7.32. Hepsi kusurlu yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi (devamı). ..	83
Şekil 7.33. Normal yatak destekli miller için orbit titreşim analizi.	85
Şekil 7.34. Bilye kusurlu yatak destekli miller için orbit titreşim analizi.	86
Şekil 7.35. İç bilezik kusurlu yatak destekli miller için orbit titreşim analizi.	87
Şekil 7.36. Dış bilezik kusurlu yatak destekli miller için orbit titreşim analizi.	88
Şekil 7.37. Hepsi kusurlu yatak destekli miller için orbit titreşim analizi.	89
Şekil 7.38. Normal yatak destekli miller için time waveform grafiği.	91
Şekil 7.39. Normal yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı).	92
Şekil 7.40. Normal yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı).	93
Şekil 7.41. Bilye kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği.	94
Şekil 7.42. Bilye kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı). ..	95
Şekil 7.43. Bilye kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı). ..	96
Şekil 7.44. İç bilezik kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği.	97
Şekil 7.45. İç bilezik kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı).	98

Şekil 7.46. İç bilezik kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı).	99
Şekil 7.47. Dış bilezik kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği.	100
Şekil 7.48. Dış bilezik kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı).	101
Şekil 7.49.Dış bilezik kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı).	102
Şekil 7.50. Hepsi kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği.	103
Şekil 7.51. Hepsi kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı). ..	104
Şekil 7.52. Hepsi kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı). ..	105
Şekil 7.53. Millerin sertlik değerlerindeki değişim.	107
Şekil 7.54. Maksimum çekme dayanımı değerleri.	110
Şekil 7.55. Uzama (%) değerleri.....	110
Şekil 7.56. AISI 4140 çeliği numunelerinin mikro yapı görüntüleri (5 μm).	113
Şekil 7.57. AISI 4140 çeliği numunelerinin mikro yapı görüntüleri (4 μm).	114

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 6.1. AISI 4140 (42CrMo4) çeliği kimyasal kompozisyonu.	34
Çizelge 6.2. Isıl işlem ve kriyojenik işlem uygulanan miller.	35
Çizelge 7.1. Yuvarlanmalı yataklarda millerin genlik değerleri (Dikey - Ch 1).	49
Çizelge 7.2. Yuvarlanmalı yataklarda millerin genlik değerleri (Yatay - Ch 2).	49
Çizelge 7.3. Sertlik ölçüm sonuçları (HRc).	107
Çizelge 7.4. Derin kriyojenik işlemin sertlik değerlerine etkisi.	108



KISALTMALAR

AISI	American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
BSD	Brinell Sertlik Değeri
CHT	Conventional Heat Treatment (Geleneksel ısıtım işlemi)
DCT	Deep Cryogenic Treatment (Derin kriyojenik işlem)
DCT12	Deep Cryogenic Treatment (12 saat süreli derin kriyojenik işlem)
DCT24	Deep Cryogenic Treatment (24 saat süreli derin kriyojenik işlem)
DCT36	Deep Cryogenic Treatment (36 saat süreli derin kriyojenik işlem)
DCT48	Deep Cryogenic Treatment (48 saat süreli derin kriyojenik işlem)
DCTT	Deep Cryogenic Treatment and Tempering (Derin kriyojenik işlem ve Temperleme işlemi)
DCTT12	Deep Cryogenic Treatment and Tempering (12 saat bekletme süreli Derin kriyojenik işlem ve Temperleme işlemi)
DCTT24	Deep Cryogenic Treatment and Tempering (24 saat bekletme süreli Derin kriyojenik işlem ve Temperleme işlemi)
DCTT36	Deep Cryogenic Treatment and Tempering (36 saat bekletme süreli Derin kriyojenik işlem ve Temperleme işlemi)
DCTT48	Deep Cryogenic Treatment and Tempering (48 saat bekletme süreli Derin kriyojenik işlem ve Temperleme işlemi)
S	Standart Material (Standart malzeme)
SEM	Scanning Electron Microscopy (Taramalı elektron mikroskobu)
RPM	Revolution Per Minute (Dakikadaki dönme sayısı)
TSE	Türk Standartları Enstitüsü

SİMGELER

Al	Alüminyum
C	Karbon
°C	Santigrat Derece (Celsius)
Cr	Krom
E	Elastikiyet Modülü
Fe	Demir
HP	Beygir Gücü (Horse Power)
HRC	Rockwell Sertliği (Hardness Rockwell)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
gr	Gram
K	Kelvin
Kg	Kilogram
kHz	KiloHertz
mil	0,0254 mm
m	Metre
mm	Milimetre
ml	Mililitre
Mn	Mangan
Mo	Molibden
MPa	Mega Pascal
N	Azot
P	Fosfor
S	Kükürt
Si	Silisyum
μm	Mikron
σ	Gerilme
σ_a	Akma dayanımı
$\sigma_ç$	Çekme dayanımı
σ_k	Kopma dayanımı
σ_e	Elastiklik sınırı
ε	Yüzde birim uzama
%	Yüzde

ÖZET

KRİYOJENİK İŞLEM GÖRMÜŞ MİLLERİN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL ANALİZİ

Menderes KAM
Düzce Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi
Danışman: Prof. Dr. Hamit SARUHAN
Kasım 2016, 146 sayfa

Endüstride dönen makine sistemlerinde istenen yüksek hız ve ağır yük şartları altında güvenli ve kararlı çalışma gereksinimi günden güne artmaktadır. Bu sistemler miller, yuvarlanmalı yataklar ve diskler olmak üzere çeşitli mekanik bileşenlerden oluşmaktadır. Miller, dönen makine sistemlerinin dinamik davranışları için hayati fonksiyona sahiptir. Bu sistemlerin işletmedeki çalışma frekanslarının kendi frekanslarına denk gelmesi veya çok yakın olması, çalışan sistemde tınlaşım (rezonans) durumunu ortaya çıkarır. Böylece milin mekanik enerjisi giderek artar ve bu artan enerjiyi dengeleyecek tedbirler alınmamışsa sonucunda milin kırılması gerçekleşebilir. Bu nedenle makine sistemlerinin dinamik davranışlarının belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Makinelerin dinamik davranışlarının tespit edilmesinde en önemli ve ayrıntılı bilgileri verebilen titreşim analizidir. Titreşim analizi, makine sistemlerinin işletme şartlarındaki performansının belirlenmesi ve mekanik sorunların ortaya çıkarılmasında en önemli faktörleri teşkil eder. Dönen makine sistemlerinde titreşimlerin nispeten azaltılması millerin imalatında uygun malzeme seçimi ve bu malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ile mümkündür. Bu iyileştirme için ise millere ısıtma işlemi, tamamlayıcısı olan derin kriyojenik işlem ve derin kriyojenik işlem sonrası temperleme işlemi uygulanmaktadır. Bu çalışmada, makine ve otomotiv endüstrisinde makine parçaları, krank mili, aks mili, yivli mil, demir yol milleri gibi sünekliliği yüksek parçaların imalatında yaygın kullanım alanına sahip AISI 4140 çeliğinden imal edilmiş miller kullanılmıştır. Bu millere geleneksel ısıtma işlemi, tamamlayıcısı olan derin kriyojenik işlem (-140 °C’ de 12, 24, 36, 48 saat) ve derin kriyojenik işlem sonrası temperleme işlemi (200 °C’ de 2 saat) uygulanmıştır. Bu miller bir normal ve dört farklı kusurlu (iç bilezik, dış bilezik, bilye ve hepsi) yuvarlanmalı yataklarla desteklenmiş, uç kısmına fan takılmış aynı yükleme şartlarında ve 5 farklı mil dönme hızı altında test edilmiştir. Millerden deplasman ölçer ve yuvarlanmalı yataklardan ivme ölçer aracılığıyla elde edilen veriler ayrıntılı olarak analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, derin kriyojenik işlem ve sonrasında temperleme işlemi uygulanmış millerin dinamik davranışlarında önemli farklılıklar olduğunu göstermiştir. Bu millerin daha az salınım yaptığı, daha az rezonansa girdiği ve dolayısı ile daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Dinamik davranış, Kriyojenik işlem, Mil, Titreşim analizi, Yuvarlanmalı yatak.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF CRYOGENIC TREATED SHAFTS DYNAMIC BEHAVIORS

Menderes KAM

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical
Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Hamit SARUHAN

November 2016, 146 pages

Rotating machinery systems play an important role in industry. These machinery systems are composed of various components, such as shafts, disks, and support bearings. The most used component is rotating shaft supported by rolling element bearing. Large amount of use of shafts indicate their vital contribution to the performance of rotating machinery. Due to necessity and vital contribution to most rotating machineries, the requirements on rotating shaft have become stricter everyday. These massive and flexible components dissipate energy through the system when corresponding to critical speeds in the system and produce a unique pattern of a variety of response. Ignoring the occurrence of such dynamic behaviors may lead to catastrophic breakdown of the system. The demanding requirements placed on rotating machinery systems have introduced a need for increasing reliability more than ever before. Rotating machineries must be designed to operate without excessive vibration throughout its range of operating speed. It is important to avoid vibrations in the system because excessive vibration can cause inefficiency and mechanical failure. The vibrations of a rotating machinery systems are influenced by number of parameters. One of parameters is rotating shaft material. Most of breakdowns in rotating machinery systems are due to failure of the materials. The objective of this study is to show that the shaft materials properties have a significant influence on the efficiency of the rotating machinery systems. AISI 4140 steel material for shafts is chosen because of its widely used in the rotating shaft systems such as automotive and machinery industry. It is used extensively in most industry for a wide range of applications such as; machinery parts and components, crankshafts, motor shafts, axle shafts, pump shafts, railway locomotive traction motor shaft. In this study; heat treated shafts were experimentally studied. In this study, ten categories of shafts were employed. The standart material (S) shaft was untreated. Conventional heat treated (CHT) shaft was firstly austenitized and tempered. After tempering, deep cryogenic treated (DCT) shaft was cooled to cryogenic temperature (- 140 °C) held at 12, 24, 36 and 48 hours for having four categories of the DCT shaft. After the DCT process, Deep Cryogenic Treatment and Tempering (DCTT) shafts were tempered at 200 °C for 2 hours. The results obtained for experiments were presented and analyzed in detail. The results showed that the DCT36 and DCTT36 shafts dynamic behavior was well and superior to the other shafts.

Key words : Cryogenic treatment, Dynamic behavior, Rolling element bearing, Shaft, Vibration analysis.

EXTENDED ABSTRACT

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF CRYOGENIC TREATED SHAFTS DYNAMIC BEHAVIORS

Menderes KAM
Düzce University
Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical
Engineering
Doctoral Thesis
Supervisor: Prof. Dr. Hamit SARUHAN
November 2016, 146 pages

1. INTRODUCTION

Rotating machinery systems play an important role in industry. These machinery systems are composed of various components, such as shafts, disks, and support bearings. The most used component is rotating shaft supported by rolling element bearing. Large amount of use of shafts indicate their vital contribution to the performance of rotating machinery. Due to necessity and vital contribution to most rotating machineries, the requirements on rotating shafts have become stricter everyday. These massive and flexible components dissipate energy through the system when corresponding to critical speeds in the system, and produce a unique pattern of a variety of response. Ignoring the occurrence of such dynamic behaviors may lead to catastrophic breakdown of the system. The demanding requirements placed on rotating machinery system have introduced a need for increasing reliability more than ever before. Most of breakdowns in rotating machinery system are due to failure of the materials. Rotating machineries must be designed to operate without excessive vibration throughout its range of operating speed. It is important to avoid vibrations in the system because excessive vibration can cause inefficiency and mechanical failure.

2. MATERIAL AND METHODS

The vibrations of a rotating machinery system are influenced by number of parameters. One of the most important parameter is rotating shaft material. The objective of this study is to show that the shaft materials properties have a significant influence on the

efficiency of the rotating machinery systems. AISI 4140 steel (42CrMo4) material for shafts is chosen because of its widely used in the rotating shaft system such as automotive, machinery and railway industry. AISI 4140 steel is used extensively in most industry for a wide range of applications such as; machinery parts and components, crankshafts, motor shafts, axle shafts, pump shafts, railway locomotive traction motor shaft.

In this study; heat treated shafts were experimentally studied. The effects of cryogenic treatment and tempering on the dynamic behavior of shafts was investigated. Shafts were conventional heat treated and deep cryogenic treated (- 140 °C for 12, 24, 36, 48 hours). After the deep cryogenic treatment, the shafts also were treated at 200 °C for tempering. The vibration data were captured for five shaft running speeds (10, 20, 30, 40, and 50 Hz) for each of the test cases.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

A series of experiments were conducted to observe the behavioral changes of the shaft (S, CHT, DCT and DCTT) supported with healthy and defected rolling element bearings. The vibrations were presented using vibration spectrum, bode plot, orbit plot, waterfall and time waveform plots. The results showed that the DCT36 and DCTT36 shafts have much stabilite compare to the other shafts.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

Rotating shaft is an element with great risk of failure that can effect the whole rotating machinery systems. Most of the breakdowns in these systems are due to failure of shaft material. One way to increase operational reliability of these systems is to use proper materials. In this study, a series of experiments were employed to analyze the dynamic behavior of the shafts (S, CHT, DCT12, DCT24, DCT36, DCT48, DCTT12, DCTT24, DCTT36, and DCTT48) mounted on the healthy and defected rolling element bearings. The results showed that the resonance is not much appearing for the DCTT36 shaft case compare to the others shaft cases. It can be concluded that having more uniform metal structured shaft with deep cryogenic treatment would avoid higher vibration amplitude.

1. GİRİŞ

Endüstride yaygın olarak kullanılan dönerik çalışan makine sistemleri (turbo makineler, jeneratörler, kompresörler, pompalar, buhar ve gaz türbinleri vb.) aşırı yük ve yüksek hız gibi çok ağır koşullar altında çalışmaktadır. Bu sistemlerden beklenen en önemli özellik öngörülen ömrü boyunca sorunsuz olarak çalışmalarıdır. Bu durum sistemlerde kullanılan makine elemanlarında uygun malzeme seçimi ve malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesiyle doğrudan ilişkilidir.

Dönerik makine sistemleri miller, yuvarlanmalı yataklar (rulmanlar) ve diskler olmak üzere çeşitli mekanik bileşenlerden oluşmaktadır. Makine sistemlerinin dinamik davranışları için hayati fonksiyona sahip olan miller, endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerde, milin işletme hızının milin kritik hızlarından birine denk gelmesi veya çok yakın olması sistemde tınlaşım (rezonans) durumunu ortaya çıkarır. Bununla birlikte aşırı yüklerin oluşmasından dolayı istenmeyen titreşimler ortaya çıkabilir. Bu durumda milin mekanik enerjisi giderek artar ve bu artan enerjiyi sönmüleyecek unsurlar yoksa milin yer değiştirmesi söz konusu olur ve dolayısıyla sistemde hasar oluşabilir. Bu nedenle yüksek hızda çalışan millerin bulunduğu makinelerin dinamik performanslarının ve olası sorunların takibi için, sistemin dinamik davranışını karakterize eden çeşitli parametrelerden faydalanmak gerekir. Bu sistemlerin çalışma durumlarının belirlenmesinde en önemli ve ayrıntılı veriler sunan titreşim karakteristikleridir. Titreşim analizi, izleme yöntemleri arasında etkin olanı olarak kabul edilmekte ve bu yöntemle işletme koşullarında makine sistemleri daha doğru ve ekonomik şekilde takip edilebilmektedir.

Bu sistemlerde titreşimlerin tamamen giderilebilmesi mümkün olmamakla birlikte, tasarım ve geliştirme aşamasında alınacak önlemlerle azaltılması mümkündür.

Makine sistemlerinde dönerik makine elemanları imalatında yaygın olarak kullanılan ıslah çelikleri; kimyasal bileşimlerindeki karbon miktarı bakımından sertleştirilmeye elverişli olan ve ıslah işleminde sonunda belirli bir çekme dayanımında yüksek tokluk özelliği gösteren alaşımsız ve alaşımlı imalat çelikleridir. Islah işleminde, çelik malzemeler

üzerine sertleştirme (su verme) ve arkasından temperleme yapılarak yüksek tokluk özelliği kazandırma işlemi olarak tanımlanır. Makine, otomotiv ve raylı sistemler endüstrisinde kullanılan ıslah çeliklerinin en yaygın kullanım alanına sahip olan türü AISI 4140 (42CrMo4) çeliğidir. Bu çelik malzeme ısıtma işlem sonrasında kazandıkları üstün mekanik özelliklerinden dolayı endüstride çeşitli makine ve motor parçaları, krank mili, aks mili, yivli mil, fan milleri ve demir yol milleri gibi sünekliği yüksek makine elemanları imalatında kullanılırlar. Bu bağlamda; yukarıda belirtildiği gibi AISI 4140 çeliğinden imal edilen miller, dönerek çalışan makine sistemlerinde yaygın olarak kullanılmasından dolayı millerle ilgili birçok bilimsel çalışma yapılmış ve günümüzde de bilimsel çalışmalar yapılmaya devam etmektedir.

Malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için, malzemelere genellikle geleneksel ısıtma işlemi uygulanmaktadır. Buna ek olarak son yıllarda kullanılan geleneksel ısıtma işlemi tamamlayıcı bir işlem olan kriyojenik işlem ve kriyojenik işlem sonrası temperleme işlemi uygulanmaktadır. Geleneksel ısıtma işlem çelik malzemeler üzerine sertleştirme ve arkasından temperleme işlemi uygulanarak yüksek tokluk özelliği kazandırma işlemi olarak bilinir. Geleneksel ısıtma işlemin tamamlayıcısı olan soğuk (sıfır altı) işlem yöntemi kriyojenik işlem; son yıllarda çelik malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için kullanılan bir ısıtma işlemidir. Kriyojenik işlemde malzeme belirlenen bir bekleme süresince belirlenen oda sıcaklığının altında -196 °C' ye kadar olan bir sıcaklıkta tutulur ve sonra kademeli olarak oda sıcaklığına kadar ısıtılır. Ayrıca malzemeye uygulanan doğru bir ısıtma işlemle çok çeşitli özellikler kazandırmak mümkündür. Bu bağlamda, düşük sıcaklıklarda genellikle -50 °C ve -100 °C arasında sığ kriyojenik işlem, -125 °C ve -196 °C arasında derin kriyojenik işlem ile yapının tamamının martenzite dönüştürülmesi sağlanır. Bu sayede sertlikten feragat etmeden tokluğu arttırmakta mümkün olur.

Literatürde AISI 4140 çeliğinden imal edilen millerin dinamik davranışları ve kriyojenik işlem ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, kriyojenik işlem görmüş millerin dinamik davranışları ile ilgili çalışma yapılmadığı görülmektedir. Diğer yandan yapılan deneysel çalışmalarda her araştırmacı [1]-[20], farklı amaçlar doğrultusunda çalışmalar yaptığından kendi deney düzeneklerini kurmuş ve dönen makine sistemlerinin dinamik davranışlarının analizini gerçekleştirmiştir. Bu nedenle millerin dinamik davranışlarının deneysel olarak incelenmesi için herkes tarafından kabul görmüş bir deney metodu yoktur.

Bu çalışmada, AISI 4140 çeliğinden imal edilen millere; geleneksel ısıtma işlemi, tamamlayıcısı olan derin kriyojenik işlem (-140 °C’ de 12, 24, 36 ve 48 saat) ve derin kriyojenik işlem sonrası 200 °C’ de 2 saat temperleme işlemi uygulanmıştır. Bu farklı ısıtma işlemli miller; bir normal ve dört farklı kusurlu (iç bilezik, dış bilezik, bilye ve hepsi) yuvarlanmalı yataklarla desteklenmiş, uç kısmına fan takılmış, aynı yükleme şartlarında ve 5 farklı mil dönme hızında (10, 20, 30, 40 ve 50 Hz) deneysel olarak test edilmiştir. Millerden deplasman ölçerler ve yuvarlanmalı yataklardan ivme ölçerler aracılığıyla VibraQuestTM yazılım ve donanım sistemi ile elde edilen veriler ayrıntılı olarak analiz edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca; geleneksel ısıtma işleminin, derin kriyojenik işlemin ve derin kriyojenik işlem sonrası temperleme işlemlerinin millerin dinamik davranışlarına etkileri incelenmiştir.

Bu çalışmayı gerçekleştirerek endüstride yaygın olarak kullanılan millerin teknoloji düzeyini düşürerek ulusal ve uluslararası bazda yenilik içeren yeni uygulamalar ve araştırmalar yapmak, yöntem, ürün, süreç, teknik, sistem iyileştirilmesi yaparak ve ulusal teknolojik bilgi birikimine katkı sağlamak hedefi öngörülmüştür.

Sonuç olarak, bu çalışma ile literatürde daha önceden araştırma yapılmamış derin kriyojenik işlem görmüş millerin dinamik davranışları deneysel olarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, derin kriyojenik işlem ve sonrasında temperleme işlemi görmüş millerin dinamik davranışlarında önemli farklılıklar olduğunu göstermiştir. Derin kriyojenik işlem görmüş miller ve derin kriyojenik işlem sonrası temperleme işlemi görmüş millerde rijitlik daha fazla olduğu için tınlaşma (rezonans) olayı daha az görülmüştür. Millerin çalışma devri arttıkça titreşim genliğinde artma veya azalma meydana geldiğini göstermiştir. Bu durum, sönümlenme katılığının devirle doğru orantılı olarak artışı ile ilişkilendirilmiştir. Derin kriyojenik işlemli ve sonrasında temperleme işlemli millerin, diğer işlemli millere göre daha az salınım yaptığı, daha az rezonansa girdiği ve dolayısı ile daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca derin kriyojenik işlemli miller hem dikey ve hem de yatay yönde daha az salınım yaptığı ve millerin yatay doğrultudaki bileşenlerinin düşey doğrultudaki bileşenlere kıyasla genliklerinde azalma olduğu görülmüştür. Bu sonuç, millerin üzerindeki yükten gelen kuvvetin düşey eksenine daha fazla etkilemesine ve titreşim genliğinde değişim meydana getirmesine bağlanmıştır. Geleneksel ısıtma işlemli millerin titreşim genliklerinin derin kriyojenik işlemli ve temperleme işlemli millere göre belirgin bir şekilde daha değişken olduğu gözlemlenmiştir.

2. LİTERATÜR

Bu bölümde, literatürde mil-yatak sistemleri ve kriyojenik işlem ile ilgili yapılan çalışmaların özetleri sunulmuştur. Ayrıca, yapılan literatür araştırmasının değerlendirilmesine yer verilmiştir.

2.1. MİL-YATAK SİSTEMLERİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Literatürde çok sayıda matematik model bulunmasına rağmen, deneysel çalışma sayısı oldukça azdır. Mil-yatak sistemi alanında ilk ve önemli çalışmayı Rankine [9] gerçekleştirmiş ve bu çalışmasından sonra birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların ortak amacı, mil-yatak sisteminin kritik hızları ve kararlılığı alanında olmuştur. Yataklar üzerinde ilk çalışmalar 1880'li yılların başında deneysel olarak Beauchamp Tower tarafından yapılmıştır. Takip eden yıllarda çalışmaların teorileri Osborne Reynolds tarafından geliştirilmiştir. Greenhill [10] daha önce göz önüne alınmayan mil ataletini de çalışmalarına katmıştır. De Laval [11] mil sistemini kritik hız seviyesinde başarıyla çalıştırabilmiştir. Jefcott [12] mil sisteminde sönümleyici (damper) kullanarak milin kararlılığını incelemiştir. Rodgers [13] mil sisteminde coriolis kuvvetlerini hesaplamalarda göz önüne almıştır. Newkirk [14] ve Kimball [15] çalışmalarında yataklardaki iç sürtünmeleri de hesaplamalara katmışlardır. Mil sistemlerinin kararlılığı için yapılan diğer çalışmaları Robertson [16] ve Smith [17] izlemiştir. Dimentberg [18] dinamik rijitliği hesaplayan metodu tanıtmıştır. Lund ve Strenlicht [19] mil-yatak sistemi çalışmalarına rijitlik ve sönümlenme özellikleri katarak detaylı bir çalışma sunmuştur.

Yapılan birçok çalışmanın ardından 1950'li yıllarda John Boyd ve Albert A. Raimondi tarafından bilgisayar ortamına aktarılarak yatakların tasarım ve analizi için yaklaşımlar öne sürmüşlerdir.

Bu çalışmaların oluşturduğu alt yapıyı esas alıp ilave olarak çeşitli parametreler deneyerek çalışmalar yapan araştırmacılar şunlardır; Gunter [20], Orcutt ve Arvas [21],

Eshleman ve Eubanks [22], Reddi [23], Nicholas [24], Kirk [25], Akkök ve Ettles [26] ve Rouch [27].

Kusurlu yuvarlanmalı yataklar ile ilgili çalışma yapan Taylor, yatak iç bileziğinde, dış bileziğinde ve yuvarlanma elemanlarında oluşan tek kusurun, yatağın birden fazla elemanında oluşan kusurun frekans analizi ile belirlenmesini araştırmıştır. McFadden ve Smith [28] yatak iç bileziğindeki tek ve çoklu kusurların oluşturduğu titreşimi modellemiş, elde edilen sonuçların geçerliliğini deneysel sonuçlarla doğrulamıştır.

Erken uyarıcı bakım ile ilgili çalışma yapan Belek [29] endüstriyel tesislerin bakımında titreşim analizi ile erken uyarıcı dinamik bakım yöntemlerini ele almıştır. Su ve ark. [30] yataklarda yüzey pürüzlülüğünün oluşturduğu titreşimi modellemiş ve deneysel sonuçlarla modelin doğruluğunu ortaya çıkarmıştır.

Mil-yatak sistemleri alanında çalışma yapan Aktürk ve ark. [31] açısız temaslı iki yuvarlanmalı yatak ile desteklenmiş bir mil-yatak sisteminde aksel ve radyal titreşimleri incelemek için matematiksel model oluşturmuştur. Aktürk ve Gohar [32] iki açısız bilyeli yatak ile desteklenmiş bir mil-yatak sisteminde bilye boyutundaki değişimin milin aksel ve radyal titreşimlerine olan etkisini incelemiştir. Tiwari ve ark. [33] bir milin doğrusal olmayan davranışlarını incelemişler, Dai ve ark. [34] çalışmalarında bir milin dinamik davranışlarını analiz etmişlerdir. Saruhan [35] doktora tezinde çeşitli yatakların kullanıldığı mil-yatak sistemine genetik algoritmaları, daha önce Roso [36] tarafından klasik optimizasyon metodu kullanılarak yapılan çalışmaya uyarlamış ve elde ettiği sonuçları karşılaştırmıştır. Yaptığı çalışma ile daha iyi sonuçlar aldığını detaylı bir şekilde göstermiştir.

Bu tez çalışmasında da kullanılan, özellikle kusurlu ve kusursuz yuvarlanmalı yatakların titreşim sinyallerinin analizi alanında yapılan çalışmaları da kısaca özetleyecek olursak; Perret [37] ve Meldau [38] kusursuz yuvarlanmalı yatakların bilye geçişi nedeniyle titreşime maruz kaldığını ileri sürmüşlerdir. Gustafsson ve Tallian [39] kusursuz yuvarlanmalı yatakların yanında bazı kusurlu yatakları da incelemişlerdir. Çalışmalarında yuvarlanmalı yatakların titreşim oluşturan karakteristik özellikleri üzerine yoğunlaşmışlardır. 1960'lı yıllarda bilgisayarın yaygın olarak kullanılmaya başlamasıyla birçok araştırmacı Tamura ve Shimizu [40], Gupta ve ark. [41], Meyer ve ark. [42], Yamamoto ve ark. [43], McFadden ve Smith [44] titreşim karakteristikleri üzerinde çok sayıda çalışma yapmışlardır. Günümüzde de devam eden araştırmalara

rağmen herkes tarafından en iyi olarak kabul gören bir deney metodu oluşmamıştır. Gerçekleştirilen çalışmaların deney düzenekleri farklı olduğundan hep yapılan araştırmalara özel kalmıştır. Bununla birlikte, yapılan çalışmalar yuvarlanmalı yatakların imalatında yeterli olmasalar da yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Kusurlu yuvarlanmalı yatak ile ilgili çalışmalara ek olarak, Brie [45] çalışmasında kusurlu bir yatağın titreşim sinyallerinin matematiksel modelini oluşturmuş ve test düzeneği kullanarak elde ettiği deneysel sonuçları analiz etmiştir. Orhan [46] doktora tez çalışmasında dönen makine sistemlerinde titreşim analizi kullanarak kestirimci bakım uygulamasını gerçekleştirmiştir. Yuvarlanmalı yatak arızalarına ek olarak makinenin kendi yapısından kaynaklanan dengesizlik, eksen kaçıklığı, gevşeklik vb. makineyi arızaya götüren sorunları önlemek için başlangıç aşamasında tehlikeli bir durum oluşmadan ve makinenin çalışmasını durdurmadan arızayı tespit etmeye çalışmıştır. Çalışmasında titreşim analizi ile kestirimci bakım metodu kullanarak, yuvarlanmalı yataklarla desteklenmiş dönen makine elemanlarında kestirimci bakım uygulamasını hayata geçirmiştir. Fan ve pompalardan oluşan makinelerde periyodik titreşim ölçümleri gerçekleştirmiş, elde ettiği titreşim verilerini analiz ederek makinelerde birçok çalışma sonrasında oluşan dengesizlik, eksen kaçıklığı, mekanik gevşeklik ve yatak kusurlarının ilk oluşma anında tespit etmeye çalışmış ve arıza oluşmadan sorunların kestirimci bakım ile belirlenebildiğini görmüştür. Elde ettiği saha ölçüm sonuçlarının diğer araştırmacılar tarafından verilen bilgiler ile uyum içinde olduğunu tespit etmiştir. Orhan [47] çalışmasında, dönen makinelerde oluşan dengesizlik, eksen kaçıklığı, gevşeklik ve yatak arızalarının genel özellikleri ve bu arızaların sebep oldukları titreşimleri incelemiştir. Orhan ve ark. [48] titreşim analizi ile yatak arızalarının belirlenmesini incelemiş ve motor iç yatağından periyodik titreşim ölçümleri kaydederek titreşim analizleri gerçekleştirmiştir.

Arslan ve ark. [49] sağlam ve kusurlu durumdaki açısız temaslı yuvarlanmalı yatakların titreşimini incelemek üzere bir mil-yatak modeli oluşturmuştur. Modelde mil-yatak ikilisi kütle-yay sistemi olarak modellenmiş ve ilave olarak bilyelerin titreşimini incelemek için, yatak bilyelerini kütleli olarak kabul etmiştir. Mil ve yatak için hareket denklemleri elde ederek bilgisayar programı yardımıyla radyal ve eksenel yönde çözmüştür. Simülasyon programı ile mil ve bilyeler için bulunduğu sonuçları zaman ve frekans tanım bölgesinde incelemiş ve yatak bilyelerinin kütleli olarak kabul edilmesinin milin genel titreşimini pek fazla etkilemediğini görmüştür.

Arslan ve ark. [50] sağlam ve kusurlu durumdaki açısal temaslı bilyeli yatakların titreşimini incelemek üzere bir mil-yatak modeli oluşturmuş ve simülasyon programını kullanarak yatak elamanları çalışma yüzeylerindeki (iç bilezik, dış bilezik, bilye) bölgesel kusurların mil ve bilyelerin titreşimine olan etkisini de araştırmıştır. Elde ettikleri sonuçları daha önceki çalışmalarla karşılaştırdıklarında göreceli olarak bir uyum içerisinde olduklarını görmüştür.

Köse [51] titreşim analizi ile mekanik arızaların belirlenmesi ile ilgili çalışma yapmış, Ghafari ve ark. [52] endüstriyel fanlarda titreşim analizi ile durum analizi yaparak fanlarda karşılaşılabilecek balans, oluşan rezonans ve mil sorunlarını incelemiştir. Taplak ve Uzmay [53] dönen mekanik sistemlerin dinamik davranışlarının analizini gerçekleştirmek için bir düz bağlantılı mil sistemi imal ederek, çeşitli işletme şartları için sistem ve titreşim parametreleri yönünden araştırmıştır. Sistemin dinamik davranışını izlemeye yönelik olarak planlanan deneylerden, tek diskli mil sistemi üzerinde çalışarak mil-yatak sisteminde meydana gelebilecek değerlendirmeler yapmıştır.

Arslan ve ark. [54] radyal bilyeli yataklardaki bölgesel yüzey kusurlarını (iç bilezik ve dış bilezik) ve radyal yöndeki mil titreşimlerini deneysel olarak incelemiştir. Bir teorik model oluşturarak bu modele göre sağlam ve kusurlu yatakları analiz edebilen bir simülasyon programı geliştirmiştir. Bu programa, mil-yatak boyutları girerek çalıştırmış, farklı mil dönme hızlarında milin titreşim verilerini elde etmiş ve deneysel sonuçları karşılaştırdığında göreceli olarak bir uyum içerisinde olduğunu görmüştür.

Uygun [55] dört farklı durumdaki yataktan titreşim sinyalleri alarak elde ettiği sonuçları teorik model ile karşılaştırmış ve yorumlamıştır. Kritik frekansları belirleyerek yataklardan titreşim sinyalleri almıştır. Deney verilerini incelemek üzere Matlab ortamına aktararak, hazırlanan program ile bu sinyallere spektrum analizi yapmış ve spektrum grafiklerini oluşturmuştur. Yataklardan aldığı verileri teorik model ile karşılaştırmış, alınan sinyallerin kurulan model ile örtüştüğünü görmüştür. Ancak, dış bileziğinin iç yüzeyine çekiçle vurularak kusur oluşturulmuş yataktan alınan sinyallerin, çok yüksek genlikli olmasından dolayı model ile bağlantısını bulamamıştır.

Karahan [56] ve Mechefske [57] yapmış oldukları çalışmalarda endüstride kullanılan makinelerde titreşim analizi ile makinelerde arıza teşhisini analiz etmişler ve Karaçay

[58] açısız temaslı yataklarla desteklenmiş millerin dinamiği ve yatak kusurlarının deneysel analizini gerçekleştirmiştir.

Uysal [59] çalışmasında pompa mili ve makine elemanlarının titreşim analizlerini yaparak, teorik ve deneysel olarak bu elemanların frekanslarını tespit etmiş ve sonuçları karşılaştırmıştır. Whalley ve Abdul-Ameer [60] bir mil-yatak sisteminin kritik hızını, dönme frekansını ve rezonansını hesaplamıştır.

Arslan [61] sistemde çalışmakta olan bir fanın yedeği ile test standı oluşturmuş, muhtemel arızaların titreşim ölümlerini analiz etmiştir. Yaptığı ölümlerde her arızanın belirli frekanslarda titreşim ürettiğini grmuş ve frekans, genlik eğrisi analizi ile makinedeki arıza eşitleri, boyutları hakkında bilgi sahibi olunabileceğini tespit etmiştir.

Arslan [62] titreşim analizi yöntemi kullanarak radyal bilyeli yatak yuvarlanma elemanındaki bölgesel bir yüzey kusurunun etkisini analitik ve deneysel olarak incelemiştir. Bilyeli yatak yuvarlanma elemanı çalışma yüzeyinde yapay bir bölgesel kusur oluşturmuş ve radyal yöndeki mil titreşimlerini kaydetmiştir. Analitik inceleme için ise teorik bir model oluşturmuş ve bu modele göre sağlam ve kusurlu durumdaki yatakları analiz edebilen bir simülasyon programı geliştirerek, deney setinde kullanılan mil ve yatak boyutlarını girerek çalıştırmış ve farklı mil dönme hızları için milin titreşim verilerini almıştır. Analitik ve deneysel olarak elde ettiği titreşim verilerini karşılaştırdığında iki durumda da benzer sonuçlarla karşılaşmıştır.

Gunduz ve ark. [63] mil-yatak sisteminin özelliklerine göre n yük taşıyan rolünü incelemiştir. Analitik bir modeli aksenal yatak n kuvvetlerinin etkilerini değerlendirmek için geliştirmiştir. Titreşim davranışını etkileyen doğal frekansların rezonans genliklerini önemli lde etkilediğini grmuştir.

Öztürk ve Karabulut [64] tek silindirli dört zamanlı bir dizel motorun piston, biyel, krank ve bloğunun dinamik modelini oluşturarak krank milinin çevrimlik açısal hız değişimleri ve bloğun titreşimlerini incelemiştir. Krank milinin açısal hızındaki değişimlerin motor yüküyle arttığını gözlemiştir. Motor bloğunun krank mili eksenini etrafındaki açısal titreşimlerinin gaz kuvvetlerinden, düşey ve yatay doğrultulardaki doğrusal titreşimlerinin ise piston kütlesi ve krank milinin dengesizliğinden kaynaklandığını tespit etmiştir.

Kumar ve ark. [65] dönen makine sistemlerinde dengesizlik arızası için hazırladıkları bir mil üzerinde, mil dengesizlik durumunda ve normal durumda iken beş farklı mil

dönme hızında çalıştırılarak deneysel çalışma yapmıştır. Yüksek titreşim değerlerine neden olan etkenleri belirlemek için spektrum analizi ve faz analizi yapmışlar ve karşılaştırmıştır.

Taplak ve ark. [66] çalışmalarında mil-yatak sistemini incelemiştir. Sisteme düşey yönde deneysel titreşim analizleri uygulamış ve spektrum izleme grafiklerini titreşim kaynağını teşhis etmek için kullanmıştır. Her yataktan aldığı titreşim değerleri ile titreşim kaynaklarının mekanik gevşeklik ve kaymadan kaynaklandığını tespit etmiştir.

Kılınç ve Saruhan [67] yuvarlanmalı yataklarda oluşan dinamik davranış analizlerini kritik hızlar yönünden deneysel olarak incelemiştir. Yuvarlanmalı yataklar, üç yük düzeyleri ile farklı mil dönme hızları altında test etmiştir. Her üç yük düzeyi için yuvarlanmalı yatakların titreşim sinyallerini ivme ölçerler ile elde ettiği verileri karşılaştırmıştır. Yuvarlanmalı yatakta oluşan dinamik davranış analizlerini özellikle kritik hızlar yönünden sunmuştur. Saruhan ve ark. [68] yuvarlanmalı yatak kusurlarını titreşim analizi ile incelemiştir. Çalışmalarında normal ve kusurlu yataklar iki yük düzeyi ile farklı mil dönme hızları altında test etmiştir. Deneysel çalışma esnasında toplanan verileri analiz etmiş ve ayrıntılı olarak incelemiştir.

Arias-Montiel ve ark. [69] iki diskli bir mil sistemi dengesizliği sorununu analiz etmiştir. Sonlu Elemanlar Metodu ile elde edilen modeli deneysel çalışma ile doğrulamak için kullanmıştır. Mil dinamik analizi, doğal frekans ve mil sisteminin sonlu eleman modelini kullanarak gerçekleştirmiştir.

Uysal ve ark. [70] dönen makinelerdeki dengesizlik arızalarının genel özelliklerini incelemiştir. Dengesizlik arızası tiplerini inceleyerek hangi sınıf dengesizlik arızası olduğunu titreşim analizi ile spektrum grafikleri ve faz açıları yardımıyla tespit etmiştir. Elde ettiği sonuçlardan titreşim analizinin dengesizlik arızasının belirlenmesinde etkili olarak kullanılabileceğini görmüştür.

Nembhard ve ark. [71] mil ile ilgili hatalar için mil yörünge (orbit) üzerinde deneysel çalışma yapmış ve çalışma ile pratik mil arıza teşhisi için yararlı sonuçların yanı sıra görülen mil arızaları ile ilgili analitik çalışmalara kaliteli bilgi sağladığı yönünde sonuç elde etmiştir.

Yıldırım ve Karahan [72] makine sistemlerinde oluşan veya oluşması muhtemel kusurları tespit etmek amacıyla kompresör yataklamasında kullanılan yuvarlanmalı

yatakların titreşim analizi ile yatakların hem dış bilezik kusuru hem de iç bilezik kusurunu tespit etmiştir.

Kam ve ark. [1] ısıtıl işlem görmüş millerin dinamik davranışlarını deneysel olarak incelemiş ve ısıtıl işlemsiz miller ile ısıtıl işlem görmüş millerin titreşim verilerini karşılaştırdığında, ısıtıl işlem görmüş millerin daha iyi sonuçlar verdiğini görmüştür. Kam ve Saruhan [2] kriyojenik işlem görmüş millerin dinamik davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Aynı yükleme ve çalışma şartlarında uç kısmına fan takılmış millerin titreşim analizini yapmış ve sonuçlarını karşılaştırmıştır.

2.2. KRİYOJENİK İŞLEM İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Malzemeye doğru bir ısıtıl işlemle çok çeşitli özellikler kazandırmak mümkündür. Bu bağlamda, soğuk (sıfır altı) işlem yöntemi olan kriyojenik işlem; son yıllarda malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için kullanılan geleneksel ısıtıl işlemi tamamlayıcı bir işlemdir. Kriyojenik işlemde malzeme belirlenen bir bekleme süresince belirlenen sıcaklıkta tutulur ve sonra kademeli olarak oda sıcaklığına kadar ısıtılır. Düşük sıcaklıklarda genellikle $-125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığında derin kriyojenik işlem ile yapının tamamının martenzite dönüştürülmesi sağlanır. Bu sayede sertlikten feragat etmeden tokluğu arttırmakta mümkün olur [73]-[75]. Kriyojenik işlem, kaplamaların aksine parçanın tüm bölümünü etkileyen, bir kereye mahsus yapılan ucuz ve kalıcı bir işlemdir [76].

Senthilkumar ve ark. [77], AISI 4140 çeliğinin kalıntı gerilme durumu üzerine derin kriyojenik işlemin etkisini incelemişlerdir. Su verme ve temperleme işlemi arasında sığ kriyojenik işlem ($-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de 5 saat) ve derin kriyojenik işlem ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' de 24 saat) olmak üzere iki farklı soğutma işlemi gerçekleştirmiştir. Kriyojenik işlem sıcaklığındaki azalma daha fazla östenitin martenzite dönüşmesine yol açmıştır. Bundan dolayı temperleme işlemsiz derin kriyojenik işlem (DCT - Deep Cryogenic Treatment) numunesinde daha büyük basma kalıntı gerilmeleri oluşmuştur.

Kriyojenik işlem, malzemelerin çalışma ömrünü artırmak amacıyla oda sıcaklığının çok altındaki sıcaklıklarda bir soğutma işlemidir. Bu işlem, ilk olarak 1920 ve 1930'lu yıllarda yüksek hız çeliklerine uygulanmış ve malzeme içerisinde geleneksel ısıtıl işleminden sonra kalan ve malzeme ömrünü olumsuz etkileyen yumuşak faz olan kalıntı östenitin sert faz olan martenzite dönüşümünden dolayı bu çeliklerin performanslarının

iyileştiği görülmüştür [78]. 1950 ve 1960'lı yıllarda yapılan çalışmalar genellikle farklı türdeki metallerin elektriksel özelliklerinde düşük sıcaklıkların etkisini belirleme üzerine olmuştur [79]-[83]. Genel olarak kriyojenik işlem ile ilgili yapılan bilimsel çalışmalar çeliklerin aşınma ve yorulma performansı, faz dönüşümlerinin tayini, kalıntı gerilmelerin değişimi ve malzemelerin mekanik özelliklerindeki iyileşmeler üzerine olmuştur.

Kuzmenko ve Grishakov [84] -196°C ve oda sıcaklığında çeliklerin dayanıklılığı üzerinde yüksek yük frekanslarının etkisini incelemiştir. Çekme deneyleri sonucunda -196°C sıcaklıkta, çeliklerin çekme gerilmelerinin arttığı yüzde uzama değerlerinin de azaldığı görülmüştür. Yorulma deneyi sonuçlarına bakıldığında, kriyojenik işlem ile birlikte çeliklerin yorulma direncinin arttığını gözlemiştir.

Stepanov ve Lokhankina [85] krom-mangan çeliğinin mekanik özelliklerine kriyojenik işlemin (-196°C) etkisini araştırmışlardır. Yapılan mekanik testler sonucunda, kriyojenik işlemin yorulma direnci ve çekme mukavemetini artırdığını görmüştür. Collins ve Dormer [86] çeliğin aşınma direnci üzerinde derin kriyojenik işlemin etkisini incelemiştir. DCT için takım çeliği -140°C ile -196°C sıcaklıkları arasında sıvı nitrojen içerisinde bekletmiştir. DCT' den sonra sertlik, tokluk ve aşınma direnci artmıştır. Sertlik artışını kriyojenik işlem ile birlikte yumuşak bir faz olan kalıntı östenitin daha sert bir faz olan martenzite dönüşümüne bağlamıştır. Tokluk ve aşınma direncindeki artışı ise temperleme işlemi sonrasında mikro yapıda karbür tanelerinin daha ince dağılımlı çökmesi ve homojen bir hale dönüşmesi ile ilişkilendirmiştir.

Prabhakaran ve ark. [87] çeliğin darbe dayanımına etkisi bakımından geleneksel ısıt işlem, sığ kriyojenik işlem (-80°C) ve derin kriyojenik işlemi (-196°C) karşılaştırmıştır. Geleneksel ısıt işleme göre kriyojenik işlemde sonra malzemenin darbe dayanımında artış olduğunu tespit etmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışma ile kriyojenik işlemin mekanik özellikleri iyileştirdiği bir kez daha doğrulanmıştır.

Preciado ve ark. [88] dişlilerde kullanılan çeliklerin sertliği ve aşınma direnci üzerine derin kriyojenik işlemin etkisini araştırmıştır. Sertleştirilmiş ve temperleme işlemi uygulanmış çeliklerde derin kriyojenik işlemin (-190°C ' de 22 saat) aşınma direncini artırdığını ve sertlik artışını ise sadece 200°C ' de temperleme işlemi uygulanan çeliklerde görmüştür.

Kayma ve yuvarlanma temasına maruz kalan tüm makine elemanlarında az da olsa aşınma meydana gelir. Bundan dolayı malzemenin ömrünü kısa sürede tamamlamasına yol açan aşınma, önemli bir tribolojik olaydır. Bensely ve ark. [89] aşınma ve çatlaklardan dolayı dişlide sık gözlenen kısa süreli ömür nedeniyle kriyojenik işlemin, çeliğin aşınma direnci üzerine etkisini incelemiştir. Geleneksel ısıtma işlemi, sıg kriyojenik işlem ve derin kriyojenik işlem olmak üzere üç farklı ısıtma işlemi durumunda deney numuneleri için üç farklı yükleme anında ve yedi kayma hızında gerçekleştirmiştir. Aşınma direncinde sıg kriyojenik işleminden dolayı artma olmuş ve geleneksel ısıtma işlemine göre derin kriyojenik işlem ile aşınma direncinde dikkate değer iyileşme görmüştür. Üç farklı işlem arasında en çok önerileni derin kriyojenik işlem olmuştur.

Zhirafar ve ark. [90] kriyojenik işlemin ısıtma çeliği olan AISI 4340 çeliğinin mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerine etkilerini araştırmıştır. Farklı ısıtma işlemli deney numunelerine yorulma, darbe, kırılma ve sertlik gibi mekanik deneyler yapılmış ve elde edilen sonuçları karşılaştırmıştır. Geleneksel ısıtma işlemi uygulanmış numunelerin tokluğu daha düşükken, sertlik ve yorulma dayanımının ise biraz daha yüksek olduğunu görmüştür. Temperleme işlemi esnasında muhtemel karbür oluşumu ile birlikte kriyojenik işlemli numunelerin iyileşen sertliği ve yorulma direncinde en önemli etkenin kalıntı östenitin martenzite dönüşmesi olduğunu görmüştür. Kriyojenik işlem ve temperleme işleminden sonra çeliğin yorulma sınırının iyileştiği yönünde sonuca ulaşmıştır. Bu sonuç malzemenin yüksek sertliği ve mukavemeti ile ilişkilendirmiştir.

Baldissera ve Delprete [91] dişli çeliğinin mekanik özellikleri üzerinde derin kriyojenik işlemin etkisini, sertlik ve çekme deneyleri aracılığıyla araştırmıştır. Derin kriyojenik işlem ve temperleme işleminin sertlik ve çekme dayanımı üzerindeki etkilerini karşılaştırmıştır. Buna ek olarak bekletme zamanı etkisi, ön temperleme ve derin kriyojenik işlem durumlarını istatistiksel olarak analiz etmiştir. Kriyojenik işlemli numunelerin önemli sertlik artışı ve kayda değer çekme dayanımı artışını tespit etmiştir.

Bensely ve ark. [92] çeliğe geleneksel ısıtma işlemi, sıg ve derin kriyojenik işlem olmak üzere üç farklı ısıtma işlemi uygulamıştır. Sıg ve derin kriyojenik işlemli numunelerin, geleneksel ısıtma işlemli numunelere göre yorulma ömründe sırasıyla % 71 iyileşme ve % 26 azalma tespit etmiştir. Kalıntı östenitin ve iyi karbürlerin birleşik bulunması, sıg kriyojenik işlemli numunelerin, geleneksel ısıtma işlemi ve derin kriyojenik işlemli numunelere göre daha iyi yorulma mukavemetine sahip olması ile ilişkilendirmiştir.

Koneshlou ve ark. [93] çeliğin mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerinde düşük sıcaklık (sıfır altı) işlemlerin etkisini incelemiştir. Çeliğe -72 °C' de sıg kriyojenik işlem ve -196 °C' de derin kriyojenik işlem uygulamıştır. İşlem sonucunda malzeme içerisindeki kalıntı östenit martenzite dönüşmüştür. Uygulama sıcaklığı azaldıkça daha fazla kalıntı östenitin martenzite dönüştüğü ve aynı zamanda mikro yapıda daha küçük ve daha homojen karbür dağılımı olduğunu tespit etmiştir. Derin kriyojenik işlem daha homojen ve çok ince karbür parçacıklarının çökmesini sağlamıştır. Mikro yapıda meydana gelen bu değişiklikler çeliğin mekanik özellikleri üzerinde önemli iyileşmeler sağlamıştır.

Akhbarizadeh ve ark. [94] yaptıkları çalışmada 24 saat ve 48 saat derin kriyojenik işlem uygulamış, çeliğin korozyon davranışı ve aşınma dayanımı üzerine bir harici manyetik alan uygulamasının etkisini incelemiştir. -196°C' de derin kriyojenik işlemden sonra aşınma direnci ve korozyon dayanımının arttığını görmüştür. Manyetize edilmiş ve manyetize edilmeyen numuneleri kıyaslamış; manyetize olmuş numunelerde karbür yüzdesinin azaldığını ve karbür dağılımının seyrelerek akabinde korozyon dayanımı ve aşınma direncinin düşmesine neden olduğunu bulmuştur. Kriyojenik sıcaklıklardaki optimum bekletme saatinde (48 saat), daha iyi aşınma ve korozyon direnci elde etmiştir.

Sri Siva ve ark. [95] çeliğin aşınma direncini artırma üzerinde derin kriyojenik işlemin etkisi üzerine çalışmıştır. Derin kriyojenik işlem (DCT) görmüş çeliklerin aşınma direnci geleneksel ısıl işlem (CHT – Conventional Heat Treatment) görmüş numunelere göre % 37 civarında iyileşme olduğunu tespit etmiştir. Bu sonucu kriyojenik işlem ile kalıntı östenitin martenzite dönüşümü, ince karbür çökmesi ve karbürlerin homojen dağılımına bağlamıştır. Bu çalışma ile derin kriyojenik işlemlili çeşitli çeliklerin aşınma direnci, sertlik ve mikro yapısında iyileşmeler olduğunu bulmuştur.

Dixit ve ark. [96] çeliğe uygulanan farklı ısıl işlem ve kriyojenik işlemin sertlik ve aşınma davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Geleneksel ısıl işlem görmüş numuneler, derin kriyojenik işlemden (-185 °C' de 36 saat) önce ve sonra bir, iki ve üç defa olmak üzere temperleme işlemi uygulanmıştır. Kriyojenik işlem gören numuneler geleneksel ısıl işlem görmüş numunelere göre daha iyi mekanik performans gösterdiğini tespit etmiştir. Bu durum, kriyojenik işlem ile kalıntı östenit miktarındaki azalmaya ve sonrasında aşınma direncinin ve sertliğin iyileşmesi ile ilişkilendirmiştir. Derin kriyojenik işlem uygulamasında önce bir kez temperleme işlemi uygulanan numunede sertlik ve aşınma oranı açısından en iyi sonuçları elde etmiştir.

Podgornik ve ark. [97] çeliğin farklı bekletme saatlerinde (25 ve 40 saat) uygulanan derin kriyojenik işlemin ve sonrasında yapılan plazma nitrüleme işleminin mekanik ve tribolojik özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir. Kriyojenik işlem ile birlikte daha yüksek sertlik ve daha düşük kırılma tokluğu elde etmiştir. Plazma nitrüleme işlemi ile yüzey sertliğinde artış görmüştür. Mekanik özellikler bakımından 40 saat bekletilen kriyojenik işlem numuneleri 25 saat bekletilen kriyojenik işlem numunelerine göre daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Geleneksel ısı işlem görmüş numuneler en yüksek sertliği vermemesine rağmen en yüksek yük taşıma kapasitesine bu numuneler ile ulaşılmıştır. Kriyojenik işlem ve plazma nitrüleme işlemi sertliği artırmasına rağmen yük taşıma kapasitesini düşürdüğünü tespit etmiştir.

Gunes ve ark. [98] çeliğin aşınma direnci üzerinde derin kriyojenik işlemin etkisini araştırmak için incelemiş, numunelere 12, 24, 36,48 ve 60 saat bekletme süreli - 145 °C sıcaklıkta derin kriyojenik işlem uygulamışlardır. Optimum bekletme süresinin 36 saat olduğunu ve 36 saat bekletme süreli numunelerde sertliğin en yüksek değerde olduğunu ayrıca aşınma oranının azaldığını bulmuşlardır. DCT numunelerinde önemli mikro yapısal değişiklikler ve tribolojik özelliklerin iyileştiği yönünde sonuç elde ettikleri anlaşılmaktadır.

Senthilkumar ve ark. [99] çeliğin indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi üzerinde derin kriyojenik işlemin etkisini incelemiş ve numunelere derin kriyojenik işlemi - 196 °C sıcaklıkta 24 saat bekletme süresinde uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda, derin kriyojenik işlemi geleneksel yüzey sertleştirme işlemi ile karşılaştırmış ve çeliğin mukavemetini % 39,94 artırdığını ve derin kriyojenik işlemin çeliğin dayanımında bir artış gösterdiğini tespit etmiştir. SEM analizlerinin, DCT ve yüzey sertleştirme numunelerinde martenzitik bir mikro yapı gösterdiği sonucunu elde etmiştir.

Zare ve ark. [100] çeliğin geleneksel ısı işlem ve derin kriyojenik işlem uygulanmasında bekletme süresinin sertliğe etkisini incelemiştir.

Li ve ark. [101] çeliğin mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerinde ısı işlemin ve kriyojenik işlemin etkisini incelemiş ve uygulan işlemlerin numunelerin sertliğini artırırken tokluğunu düşürdüğü yönünde sonuç elde etmiştir.

Idayan ve ark. [102] çeliğin mekanik özellikleri üzerinde derin kriyojenik işlemin etkisini incelemiş ve derin kriyojenik işlemin geleneksel ısı işleme göre numunelerin

sertliğini % 7 oranında artırdığı yönünde sonuç elde etmiştir. Ayrıca numunelerin SEM analizlerini gerçekleştirmiştir.

Khun ve ark. [103] çeliğin tribolojik özellikleri ve mekanik özellikleri üzerinde derin kriyojenik işlemin etkisini incelemiş ve derin kriyojenik işlemin çeliğin tribolojik ve mekanik özelliklerini iyileştirdiği ve sertliğini önemli derecede artırdığını bulmuştur.

Literatür birçok araştırmacı, derin kriyojenik işlemin çeliğin mekanik özelliklerini, aşınma direncini ve sertliğini iyileştirdiğini tespit etmiştir [98]-[105].

Krot ve ark. [106] çeliğin geleneksel ısıtma işlem ve derin kriyojenik işlem sırasında modelleme çalışmasını gerçekleştirmiştir. Numunelere uygulanan derin kriyojenik işlem sonrasında aşınma dirençlerini test etmiş ve etkilerini tartışmıştır.

2.3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Literatürde yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde mil-yatak sistemlerinde ve döner makine sistemlerinde her araştırmacı farklı amaçlar doğrultusunda çalışmalar yaptığından kendi deney düzeneklerini kurmuş ve döner makine sistemlerinin dinamik davranış analizlerini gerçekleştirmiştir. Millerin dinamik davranışlarının deneysel olarak incelenmesi için herkes tarafından kabul görmüş bir deney metodu yoktur. Literatürde çok sayıda matematik model bulunmasına karşın, deneysel çalışma sayısı oldukça azdır.

Literatürde kriyojenik işlem genel olarak, malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için kullanılan geleneksel ısıtma işlemi tamamlayıcı bir işlem şeklinde tanımlanmıştır. Yapılan literatür çalışmalarında kriyojenik işlem sığ kriyojenik işlem ve derin kriyojenik işlem olmak üzere iki grup olarak sınıflandırılmıştır [91], [107]-[108]. 1990'lardan itibaren kriyojenik işlem yarı motor parçaları, özellikle dişliler ve yataklar, petrol kuyusu açma ekipmanları, silah namlusu, cerrahi ve diş ekipmanları gibi birçok farklı ürüne de uygulanmıştır [109]-[111].

Yapılan çalışmalarda genellikle derin kriyojenik işlemlenmiş numuneler, sığ kriyojenik işlem ve geleneksel ısıtma işlemli numunelere göre daha iyi sonuçlar verdiği ortaya çıkmaktadır. Sığ ve derin kriyojenik işlemlenmiş numunelerin, geleneksel ısıtma işlemli numunelere göre yorulma ömründe % 71 iyileşme ve % 26 azalma gözlenmiştir. Bu durum kalıntı östenitin ve ince karbürlerin birleşik bulunması, sığ kriyojenik işlem uygulanmış

numunelerin, geleneksel ısıl işlem ve derin kriyojenik işlemlerle numunelere göre daha iyi bir yorulma mukavemetine sahip olması ile ilişkilendirilmiştir [92].

Kriyojenik işlem, genellikle kriyojenik sıcaklıklara kademeli olarak soğutma, bu sıcaklıklarda bekletme ve oda sıcaklığına kademeli olarak ısıtma-temperleme olmak üzere üç aşamada yapılır [112]-[113]. Bu bağlama kriyojenik işlem, sığ ve derin kriyojenik işlem olmak üzere iki şekilde yapılır. Gerçekleştirilen çalışmalarda farklı bekletme süreleri uygulanmış ve bu farklı bekletme süreli derin kriyojenik işlem uygulanan çalışmalar arasında ise genellikle 36 saat bekletilen numunelerde en iyi sonuçların elde edildiği görülmüştür [116]-[120].

Literatürde yapılan çalışmalar sonucunda kriyojenik işlemin metalik malzemelerde sağladığı iyileşmeler; yumuşak bir faz olan kalıntı östenitin sert bir faz olan martenzite dönüşümü, eta karbürlerin çökmesi, ince karbürlerin çökmesi ve homojen mikro yapı oluşumu, kalıntı gerilmelerin giderilmesi, termal iletkenliğin artması, olarak açıklanmıştır.

Kriyojenik işlemle malzeme üzerinde olumlu iyileşmeler sağlanmaktadır. Aşınma direncinde iyileşme [89] ve [95], malzemelerin aşınma hızında azalma [86] ve [110], makro ve mikro sertlikte iyileşme [90] mukavemetinde iyileşme [115], malzemelerin sünekliğinde azalma [116], malzemelerin uzamasında azalma [117], kırılma tokluğunda azalma [118], yorulma dayanımında iyileşme [90], [92], çekme kalıntı gerilmelerdeki azalma ile basma kalıntı gerilmelerinin yükselmesi [89], [92], gibi çok sayıda iyileşme kriyojenik işlem ile sağlanmaktadır.

Sonuç olarak; yukarıda da bahsedildiği gibi kriyojenik işlemin malzemelere uygulanması ile yapılan çalışmalarda; “sertlik, çekme dayanımı, kırılma tokluğu, aşınma dayanımı, yorulma direnci, mikro yapı” değerlerinde iyileşmeler gerçekleşmiştir. Yapılan literatür çalışması değerlendirildiğinde; farklı malzemelere uygulanan kriyojenik işlem ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmasına rağmen, AISI 4140 çeliğinden imal edilen millerin dinamik davranışlarına kriyojenik işlemin etkisi ile ilgili çalışma yapılmadığı görülmektedir.

Bu çalışma ile hem derin kriyojenik işlem uygulanmış AISI 4140 çeliğinden imal edilen millerin dinamik davranışları üzerinde derin kriyojenik işlemin etkileri deneysel olarak incelenmiş hem de bundan sonraki yapılacak çalışmalar için bir temel teşkil etmiş olacaktır. Ayrıca, literatüre katkı sağlamak amacıyla AISI 4140 çeliğinden imal edilmiş

derin kriyojenik işlem uygulanmış ve sonrasında temperleme işlemi uygulanmış millerin dinamik davranışları deneysel olarak incelenmiş ve karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.



3. MİLLERİN ISIL İŞLEMLERİ

Endüstride dönerek çalışan makine sistemleri aşırı yük ve yüksek hız gibi birçok ağır koşul altında çalışmaktadır. Bu sistemlerden beklenen en önemli özellik bu çalışma koşullarına rağmen sorunsuz olarak çalışmalarıdır. Bu durum sistemde kullanılan makine elemanlarının malzemelerinin uygun seçilmiş olmasıyla mümkündür. Bu nedenle bilimsel çalışmalar, mevcut malzemelerin sınırlarını sürekli genişletme doğrultusunda ilerlemektedir. Bir makine elemanından beklenen en önemli özellik, öngörülen ömrü boyunca sorunsuz olarak çalışmasıdır. Bu da, gereç olarak yapımında kullanılan malzemenin uygun seçilmiş olmasıyla doğrudan ilişkilidir [129].

Günümüzde her amaç için kullanılabilir çok sayıda malzeme mevcuttur. En doğru malzemeyi seçebilmek için malzemeler hakkında bilgi sahibi olmak gerekir ve genellikle en doğru malzeme, genelde istenilen şartları tam anlamıyla sağlayan en ekonomik malzemedir [130]. Çoğu zaman makine elemanının sürekli mukavemeti istenir, bazen ise belirli süre dayanımı yeterli görülür. Malzeme seçiminde öncelikle malzemenin mukavemetli dayanım sergilemesi konusundaki beklentileri sorgulanır. Bu kapsamda akma sınırı, kopma sınırı, elastikiyet modülü, sertliği, aşınmaya dayanımı gibi faktörler incelenir. Buna ek olarak ısıl genleşme özelliği, ısıl kapasite, elektrik iletkenliği, özgül kütle gibi fiziksel ve korozyona dayanım gibi kimyasal özellikler malzeme seçiminde önemli rol oynamaktadır [130].

Islah çelikleri; kimyasal bileşimindeki karbon miktarı bakımından, sertleştirilmeye elverişli olan ve ıslah işlemi sonunda belirli bir çekme dayanımında yüksek tokluk özelliği gösteren, alaşımsız ve alaşımlı makine imalat çelikleridir. Islah işlemi, çelik malzemeler üzerine sertleştirme ve arkasından temperleme işlemi yapılarak yüksek tokluk özelliği kazandırma işlemi olarak tanımlanır [1], [131]-[132]. Islah çelikleri, ıslah işlemi sonunda kazandıkları üstün mekanik özelliklerinden dolayı endüstride otomobil ve uçak yapımında kullanılmaktadır. Özellikle makine parçaları, krank mili, aks mili, yivli mil gibi sünekliği yüksek parçaların imalatında olmak üzere geniş bir kullanım alanına sahiptirler [132]-[134]. Bu nedenle ıslah çelikleri, inşaat ve alaşımsız

çeliklerden sonra en yüksek oranda üretilen ve kullanılan çelik türüdür. AISI 4140 (42CrMo4) çeliği, düşük alaşımlı Cr-Mo'li ıslah çeliklerinin en yaygın kullanım alanına sahip olan türüdür. Kullanım alanları arasında, yukarıda belirtilenlerin yanı sıra soğuk çekme mil ve çubukları, türbin motorları, turbo jeneratörlerin fren halka ve kolları, dişliler, demir yol tekerlekleri ve milleri gibi birçok alan bulunmaktadır [132], [1135].

AISI 4140 çeliği, düşük alaşımlı yapı çelikleri, dövme kalite çelikler, orta karbonlu çelik ve alaşımlı çelik olarak da isimlendirilir. En önemli özelliği, içerdiği Cr ve Mo alaşım elementleri sayesinde, su verme işlemi sonrasında sert martenzitik bir yapı oluşturabilmesi, mukavemet, süneklik ve tokluk gibi mekanik özelliklerin bir arada sağlanmasına imkân vermesidir. ıslah çelikleri; alaşımsız ıslah çelikleri, mangan alaşımlı ıslah çelikleri, krom alaşımlı ıslah çelikleri, krom-molibden alaşımlı ıslah çelikleri şeklinde sınıflandırılabilir. AISI 4140 çeliği aynı gruptan çeliklerle kıyaslandığı zaman orta derecede sertleşebilir ancak onlara nazaran dayanım ve tokluğu ise daha iyidir. Yüksek karbon içerdiğinden dolayı daha iyi sertleşir ve mukavemeti artar. Çekme dayanımları 1650 MPa' a kadar çıkabilir. Sertleştirme ve temperleme ısıl işlemine uygundur [132]. Genel olarak ıslah çeliklerinden, yüksek dayanım ve süneklik birlikte istenir ve sertleştirildikten sonra yüksek sıcaklıkta temperleme işlemi uygulanır, yüksek karbon oranlarına sahiptirler. Kalın kesitlerde, yeterli sertleştirme derinliği ancak alaşımlı çeliklerde sağlanabilir ve çok yönlü olarak kullanılabilirler.

Yukarıda belirtildiği gibi endüstride yaygın kullanım alanına sahip olan AISI 4140 çeliği, içerdiği alaşım elementleri sayesinde yüksek sertleşebilirlik özelliğine sahip olması, malzemenin kimyasal bileşiminin karbon miktarı bakımından sertleştirilmeye elverişli ve ıslah işlemi sonunda belirli yükler altında yüksek tokluk özelliği göstermesidir.

3.1. GELENEKSEL ISIL İŞLEM

Çelik malzemelerin östenitleme sıcaklıklarından hızlı soğutularak sertleştirilme durumları çok eskilere dayanır. Bilimsel olarak açıklanması çok sonraları yapılmış olsa da çeliklerin hızlı soğutularak sertleştirilme işlemleri yüz yıllardan bu yana bilinmektedir. “Su verme” deyimini bu işlemin eskiden sadece su ortamında gerçekleştirildiğinden çeliğin sertleştiği inancından kaynaklanır. Su verme deyimini en

genel anlamıyla çelikte soğuma sonunda sertleşme oluşturacak her türlü soğuma için kullanılır. Dolayısıyla su verme ortamı yalnızca su değil, yağ ve hava da olabilir.

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte çeliklerin yaygın kullanımı ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde, çeliğe uygulanan ısı işlemler önem kazanmaktadır. Literatürde ıslah işlemi, sertleştirme ve bunu takip eden temperleme işlemi olarak tanımlanmıştır. Geleneksel ısı işlem, içyapı ve özellikler bakımından belirli bir durumu elde etmek üzere malzemenin katılma sıcaklığının altında uygun sıra ve süre ile ısıtılıp soğutulmasıdır [132]. Isıl işlemler, malzemenin kompozisyonunu değiştirmeden özellik değişimlerini amaçlayan uygulamalardır.

Çeliklerin ısı işlem özelliklerinin belirlenmesinde önemli temel noktalar; çelikteki % C oranı, alaşım elementlerinin yüzdesi, mekanik özellikler, çeliğin kullanım ortamı ve kullanım alanında maruz kalacağı zorlamalar olarak sıralanabilir. Endüstride bu hususlar dikkate alınarak çeliğe uygulanacak ısı işlem çeşitleri belirlenerek, bu ısı özellikler çerçevesinde birçok farklı ısı işlem yöntemi kullanılarak istenilen özellikler elde edilebilmektedir. Yapılan ısı işlem kademelerinin istenilen özellikleri sağlaması, bir ısı işlemin meydana getirdiği fiziksel özelliği diğer bir ısı işlemin yok etmemesi durumudur. Bu çerçevede gerçekleştirilecek ısı işlemlerin, çeliğin kendine özgü ısı özelliklerin kapsamının dışına çıkmadan, ısı işlem kademelerinin sınırları içerisinde uygulanması gerekir. Ayrıca çelik malzemelere, nihai ürün olarak ısı işlem uygulandıktan dolayı işlem sonunda malzeme dış yapısı herhangi bir değişikliğe uğramamalıdır. Isıl işlem sıcaklıkları malzeme içerisinde bulunan karbon miktarı ile ilişkilidir. Bu sebeple ısı işlemler için belirli bir sıcaklık değeri verilemez. Isıl işlem sıcaklıkları demir- karbon denge diyagramındaki eğrilerle tespit edilebilmektedir.

Çelik malzemelere uygulanan ana ısı işlem yöntemlerini tavlama, sertleştirme ve temperleme işlemleri olarak sıralanabilir.

3.2. TEMPERLEME İŞLEMİ

Çeliklerde su verme işlemi ile elde edilen martenzitik yapı sert ve gevrek yapıdan oluşur. Gevrek malzemeler birçok mühendislik uygulaması için kullanışlı değildir. Ayrıca, martenzitik dönüşüm çelik içerisinde iç gerilmelerin oluşmasına neden olur. Bu nedenlerden dolayı su verilen çelikler genelde kritik sıcaklık çizgisinin altındaki sıcaklıklarda tavlanylabilir. Su verilen çeliklerin gevrekliğini gidermek veya tokluğunu

artırmak amacıyla kritik sıcaklık çizgisinin altındaki sıcaklıklarda uygulanan tavlama işlemine temperleme işlemi denir. Bu işlemde çelik malzeme belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılıp, o sıcaklıkta belirli bir süre tutulduktan sonra havada soğutulur. Bu işlem sırasında su verilen çelikteki iç gerilmeler büyük ölçüde giderilir ve bu nedenle çeliğin süneklik ve tokluğunda artma, sertlik ve mukavemetinde ise azalma meydana gelmektedir [135]-[137].

Temperleme işlemi, normal yoldan sertleştirilmiş çelik için gerekli sıcaklığa yeniden ısıtılır ve bu sıcaklıkta belirli bir süre bekletilir ve daha sonra havada soğutulur. Sıcaklığın sıkı bir kontrolü şarttır, bu amaçla özel temperleme fırınları kullanılır. Temperleme işlemi sertleştirmenin hemen ardından uygulanmalıdır. Temperleme zamanı parçanın çekirdeğinin belirli bir süre, belirli bir sıcaklığa sahip olmasına yetecek kadar uzun olmalıdır. Bu süre parçanın büyüklüğüne göre yarım saatten iki saate kadar değişir. Sıcaklık ne kadar düşük kullanılırsa işlem o kadar uzun zaman alır.

3.3. KRİYOJENİK İŞLEM

Metallerin özelliklerini iyileştirmek için geleneksel ısıl işlemi tamamlayıcı bir soğutma işlemi olan kriyojenik işlem, sıfır altı ısıl işlem olarak da bilinmektedir [138]-[139]. Kriyojenik işlem, malzeme üzerindeki uygulama sıcaklıklarına bağlı olarak sığ kriyojenik ve derin kriyojenik işlem olarak ikiye ayrılmaktadır [140]-[141]. Sığ kriyojenik işlem, su verme işleminden sonra -50 °C ile -80 °C arasında malzemenin sıvı azot veya nitrojen gazında bekletilme işlemidir. Derin kriyojenik işlem ise -125°C' den daha düşük sıcaklıklarda genelde -196 °C' ye kadar malzemelerin soğutulma işlemi olarak tanımlanmaktadır [142].

Geleneksel ısıl işlem akabinde malzemelere sığ veya derin kriyojenik işlem sıcaklıklarında belirlenen bir bekletme süresince tutularak sonrasında oda sıcaklığına kadar kademeli olarak bekletilmektedir. Bu yöntem ile geleneksel ısıl işlem uygulanmış malzeme içerisindeki kalıntı östenitin martenzite dönüşmesi, ince karbür çökeltilerinin oluşumu ve homojen karbür dağılımı sağlanmaktadır [116]-[117], [123], [142]. Buna göre son yıllarda yapılan çalışmalarda, metalik malzemelerin aşınma dayanımı, çekme dayanımı, işlenebilirlik, kalıntı gerilme, mikro yapı, ölçü tamlığı, sertlik, tokluk ve yorulma dayanımı gibi farklı özelliklerin iyileştirilmesinde kriyojenik işlemin önemli rolü olduğu belirtilmiştir [77], [141]-[142]. Ayrıca son yıllarda kriyojenik işlemin metal

ve alaşımların yanı sıra plastikler ve kompozit malzemelere uygulanması ile sertlik, dayanım ve aşınma direncinde önemli iyileşmeler olduğu yönünde sonuç elde edilmiştir [145].

Kriyojenik işlem, çeşitli parçaların performansını artırmak için uzay ve imalat sanayi, spor ve müzik aletleri, ateşli silahlar gibi alanlarda halen kullanılmaktadır. Kriyojenik işlem ile çeliklerin tribolojik özelliklerini iyileştirmek için çok sayıda araştırma yapılmıştır. Rulmanlar, krank milleri ve pistonlar vb. parçalar için ömürlerinde önemli artışlar tespit edilmiştir. Kriyojenik işlem genellikle çelikler için geleneksel ısıl işlem ve temperleme işlemleri arasında yapılmaktadır. Kriyojenik işlem kalıntı östenit miktarındaki belirgin bir düşmeden farklı olarak ikincil karbürlerin çökme davranışında önemli etkilere neden olmaktadır. Bundan dolayı çeliğin tribolojik özellikleri iyileşmektedir. Kriyojenik işlem ile çeliklerin aşınma direncinde iyileşme aşınma deney şartlarına bağlıdır [117].

Kriyojenik işlem östeniti martenzite dönüşümünü sağladığından malzemelerin aşınma direncini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Kriyojenik işlem bir kez uygulanan kalıcı bir işlemdir. Genellikle geleneksel ısıl işlemin sonunda yapılan ve malzemenin tüm kesitini etkileyen bir işlemdir. Bu işlem geleneksel ısıl işlemin yerini alacak bir işlem değil onu tamamlayıcı bir işlemdir. Gelişmiş ülkelerde uzay, otomotiv ve elektronik sanayinde parçaların aşınma direncini ve boyutsal kararlılığını iyileştirmek için üretim hattına bu işlemi entegre etmiştir [140].

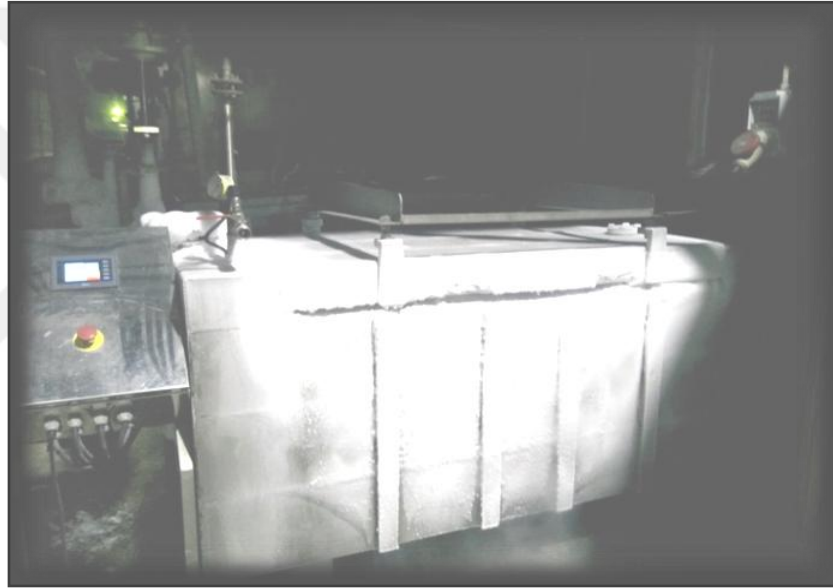
Son yıllarda farklı malzemelere kriyojenik işlem uygulanmasında artan bir ilgi vardır. Araştırmalar kriyojenik işlemin ürün ömrünü artırdığı ve gerilim giderme gibi ilave nitelikler sağladığını göstermiştir. Kriyojenik işlemin eş zamanlı olarak sertlik ve tokluğunu artırdığı bildirilmiştir.

3.3.1. Kriyojenik İşlemin Uygulanması

Gelişen teknolojiyle birlikte sıcaklığın kademeli olarak düşürülmesine olanak tanıyan bilgisayar kontrollü sistemlerin geliştirilmesiyle kriyojenik işlemin daha etkili uygulanmasına imkan sağlanmıştır. Kriyojenik işlem genellikle soğutma, bekletme (ıslatma) ve ısıtma-temperleme olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilir [112]-[113]. Bilgisayar kontrollü olarak kriyojenik işlemin uygulandığı fırın Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Soğutma aşamasında parçalar ortam sıcaklığından kriyojenik sıcaklıklara belirli bir zaman aralığında (derece/saat veya derece/dakika) soğutulmaktadır. Soğutma

aşamasının, işlem gören malzemenin nihai özelliklerine çok az bir etkisinin olduğu belirlenmiştir [146]. Bu nedenle malzemelerin işlem sıcaklığına, işlem zamanını azaltmak ve böylece maliyeti de azaltmak için termal şoklara sebep olmadan mümkün olduğu kadar hızlı bir şekilde soğutulması tavsiye edilmektedir [113].

Bekletme aşamasında, malzemelerin kriyojenik sıcaklıklarda belirlenen sürede bekletilmesi sağlanmaktadır. Bu aşamanın, işlem gören malzemenin nihai özellikleri açısından önemli olduğu belirtilmiştir ve bu aşama genellikle malzeme içerisindeki atomların yeni konumlara yayılması için gerekmektedir [146]. Kriyojenik işlemden sonra yapılan temperleme işlemi, genellikle işlem gören malzemelerin darbe direncini geliştirmek amacıyla istenilen özelliklere bağlı olarak gerçekleştirilmektedir [147].



Şekil 3.1. Kriyojenik işlem fırını.

4. MİLLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Makine ve otomotiv endüstrisinde kullanılan malzemeler için en önemli etken malzemelerin mekanik özellikleridir. Bir malzemeye kuvvet uygulandığı zaman bu kuvvete karşı gösterdiği davranış genellikle şekil değiştirme ve kırılma şeklinde oluşur. Bu nedenle makine sistemlerinin mukavemet hesaplarında bu özelliklerin iyi bilinmesi gerekir.

Bir malzeme kuvvet etkisi altında kalıyorsa, uygulanan kuvvetin etkisi ile öncelikle şekil değişimine uğramaktadır. Sonrasında ise maruz kaldığı kuvvetin etkisi ile önce kırılır ve sonrasında ise kopma gerçekleşir. Bu durumun izlenmesi ile malzemelerin mekanik özellikleri belirlenir. Eğer uygulanan kuvvetler düşüğe ve kuvvet kaldırıldığında cisim önceki haline geri dönüyorsa buna elastik şekil değiştirme, buna karşın kuvvet büyükse ve kaldırıldığında cisim önceki haline geri dönmüyorsa buna da plastik şekil değiştirme denir. Malzeme kalıcı deformasyona uğrayarak kalıcı olarak şekil değiştirmiştir. Elastik şekil değiştirmeye karşı direnç veya rijitlik malzemenin elastikiyet modülü ile belirlenir. Malzemelerin içyapısında kalıcı değişim veya kırılma oluşturan herhangi bir gerilme sınırı mukavemet olarak adlandırılır. Mekanik özelliklerin bazıları içyapıya ve deney koşullarına bağlı değildir. Elastikiyet modülü bu tür bir özellik olup atomlar arası bağlar tarafından belirlenir ve içyapıya duyarlı değildir. Diğer yandan süneklik, mukavemet ve sertlik gibi kavramlar ve değerler içyapıya ve deney koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterirler. Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde sertlik, çekme testi gibi yöntemler kullanılmaktadır [74].

4.1. SERTLİK

Sertlik, malzemelerin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç [148] ve bir malzemenin kendisinden daha sert bir malzemeye karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır [149]. Ayrıca sertlik izafi bir ölçü olup sürtünmeye, çizmeye, kesmeye ve plastik deformasyona karşı direnç olarak da tanımlanabilir. Teknolojide yaygın olarak kullanılan sertlik ölçme yöntemleri, numune üzerinde elde edilen kalıcı iz

büyükliğünün ölçülmesi esasına dayanan yöntemlerdir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan sertlik ölçme yöntemleri aşağıda verilmiştir.

4.1.1. Rockwell Sertlik Ölçme Yöntemi

Rockwell sertlik ölçme yöntemi, sabit yük altında malzeme üzerinde oluşturulan iz derinliğinin ölçülmesi şeklinde olur. Ölçümü yapılacak malzemenin cinsine göre, iz bırakıcı olarak ucu çok az yuvarlatılmış 120° konik elmas uç kullanılır. Yük ise 60, 100 veya 150 kg olarak uygulanır. Her yük iz bırakıcı kombinasyonu farklı bir Rockwell skalasını oluşturur ve her skala farklı malzemelerin sertliğini ölçmek için kullanılır. Sertliği 20-70 HRc arasında olan malzemelerin sertlik ölçümlerinde uygun sonuçlar verir.

4.1.2. Brinell Sertlik Ölçme Yöntemi

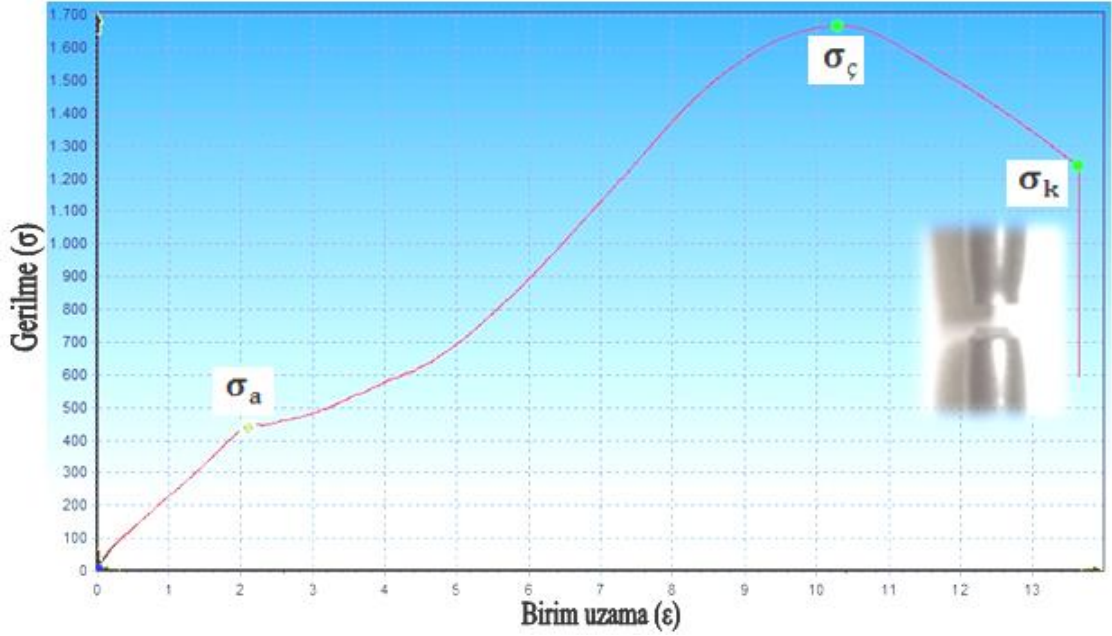
Brinell sertlik ölçme yöntemi, malzeme yüzeyine belirli bir yükün, belirli bir çaptaki sert malzemedan yapılmış bir bilye yardımıyla belirli bir süre uygulanması sonucu yüzeyde kalıcı bir iz meydana getirmek esasına dayanır. Daha sonra oluşan kuvvetin izin küresel yüzey alanına bölünmesiyle Brinell sertlik değeri (BSD) elde edilir. Bu yöntem sonrası sertlik sonucu ifade edilirken BSD işaretinin yanında diğer ölçüm şartları bilye çapı, yük ve uygulama süresi bilgileri eklenir.

4.1.3. Vickers Sertlik Ölçme Yöntemi

Vickers sertlik ölçme yönteminin kullanım alanı çok geniştir. Çok yumuşak ve çok sert malzemeler için uygundur. Vickers sertlik ölçme yöntemi, tabanı kare ve tepe açısı 136° olan standartlaştırılmış piramit şeklinde bir elmas ucun, değişken yükler altında numune yüzeyine batırılması sonucu bir iz oluşturma esasına dayanır. Vickers sertlik değerini bulmak için kare şeklindeki izin köşegenleri mikroskop yardımı ile hassas bir şekilde ölçülür [150].

4.2. ÇEKME TESTİ

Malzemelerin mekanik özelliklerinin tespit edilmesinde yaygın kullanılan yöntemlerden birisi çekme testidir. Bu yöntem standartlara göre hazırlanmış test numunelerinin tek ekseninde belirli bir hızla ve sabit sıcaklıkta kopuncaya kadar çekilmesiyle gerçekleştirilir. Şekil 4.1’de deney sonucunda bir gerilme (MPa) - birim uzama (%), gerilme-gerinim (stress-strain) grafiği elde edilir. Bu grafik mühendislik tasarımlarında malzeme özelliklerinin tespitinde önemli rol oynar [136]-[137].



Şekil 4.1. Gerilme - birim uzama eğrisi.

Türk Standartları Enstitüsü (TSE) standartlarına göre altı çekme numunesi tipi bulunur. Çekme testi ile malzemelere ait elastikiyet modülü (E), elastiklik sınırı (σ_e), akma dayanımı (σ_a), çekme dayanımı ($\sigma_ç$), kopma dayanımı (σ_k), yüzde kopma uzaması (ϵ), rezilyans ve tokluk gibi mekanik özellikleri tespit edilebilir. Çekme testi ile gerilme-birim uzama diyagramları ile malzemenin mekanik özellikleri ve davranışları yönünden malzeme hakkında çok sayıda yararlı bilgilere ulaşılmaktadır.

5. YUVARLANMALI YATAKLAR

Yuvarlanmalı yataklar (rulmanlar), sürtünmeyi azaltmak ve yükleri desteklemek için çoğu dönen makine sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Makinelerin sorunsuz çalışması yuvarlanmalı yatakların sağlıklı çalışması ile doğrudan ilişkilidir. Mil-yatak sistemlerinin dinamik davranışlarının belirlenmesi hayati önem taşımaktadır. Bu bağlamda yuvarlanmalı yatakların durumlarının izlenmesi de çok önem arz etmektedir. Yuvarlanmalı yataklardan titreşimler ölçülerek, titreşim analizi ile makine sistemlerinin içyapısında gelişen olaylar hakkında bilgi edinilebilir [47]-[48].

Yuvarlanmalı yataklar; enerji santralleri, kimya tesisleri, hassas ve etkili performans gerektiren otomotiv endüstrisi gibi sektörlerde kullanılan önemli makine elemanlarından biridir. Ayrıca sürtünmesiz yataklar olarak adlandırılır, yaygın olarak havacılık, inşaat, madencilik, çelik, kağıt, tekstil, demiryolları (raylı sistemler) ve yenilenebilir enerji dahil çeşitli sektörlerde dönen makinelerde kullanılır [151]-[152].

Yataklar, konstrüksiyonlarına göre kaymalı ve yuvarlanma elemanlı olarak sınıflandırılır.

Yataklar makinelerin vazgeçilmez parçaları olarak uzun süredir kullanılmaktadır. Dönen makine elemanlarındaki bozukluklar bütün endüstri dallarında gözle görülebilir bir üretim düşmesine ve yüksek bakım-onarım masraflarına yol açmakta ve ayrıca çalışma zamanı açısından da büyük kayıplara neden olmaktadır. Yataklarda imalat sırasında yüzeylerde üretim hataları, yanlış montaj ve işletme sırasında değişik sebeplerden kaynaklanan kusurlar oluşabilir. Bu hatalar yuvarlanmalı yatakların görevini yerine getirirken sistemin titreşimine, gürültüye ve bazen de görevini tam olarak yerine getirememesine neden olabilir [47]-[48].

Yuvarlanmalı yataklarda yağ filmi tabakası çok incedir ve temas noktalarında radyal doğrultuda bağıl hareket yoktur. Yatağın iç ve dış mobilitesi hemen hemen aynıdır. Bu nedenle yatağın dış yüzeyinde yapılan titreşim ölçümleri, içyapıdaki gelişmeleri en doğru şekilde yansıtır [29]. Dönen makinelerde arızadan kaynaklanan duruşların en önemli sebeplerinden birisi yuvarlanmalı yatak arızalarıdır. Helikopter ve otomatik

işleme makineleri gibi birçok sistemde beklenmedik yatak arızaları yıkıcı ve çok masraflı olabilir [153]. Bu nedenle yuvarlanmalı yataklarla ilgili çok sayıda araştırma yapılmıştır.

Kusurlu yatakların başarısızlığı dolayısıyla önemli ekonomik kayıplara ve bazı durumlarda makinelerin arızalanması ile insan hayatının kaybına bile neden olabilir. Örnek verecek olursak, bir uçak motorunun arıza yapması veya bir trenin raydan çıkması gibi. Yatakların içinde istenmeyen titreşimler hatalı montaj, zayıf bakım vb. gibi işletme hatalarından kaynaklanabilir [154] ve sonunda çeşitli kusurların oluşumuna neden olabilir. Bu değişiklikler, uygun kullanılarak bir kusurun varlığını saptamak için izlenebilir [155].

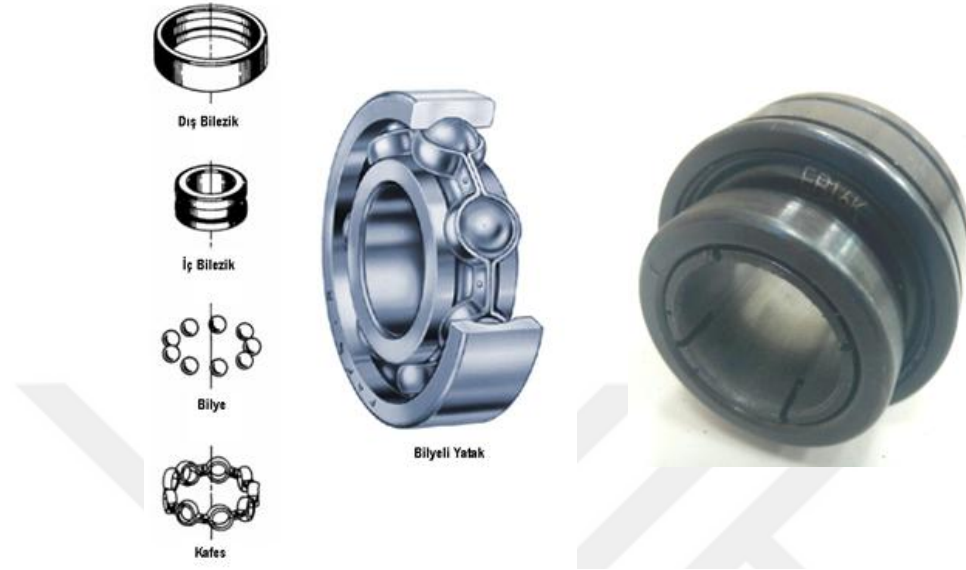
5.1. YUVARLANMALI YATAKLARIN SINIFLANDIRILMASI

Yuvarlanmalı yataklar makinelerde dönel hareketleri sağlamak için kullanılan elemanlardır. Tasarım şekline göre radyal yüklerin yanı sıra aksel ve moment yüklerini de taşıyabilirler. Yuvarlanmalı yataklar bu yükleri taşımak için genellikle iki bilezik (dış bilezik, iç bilezik), belirli sayıda yuvarlanma elemanı (bilye) ve bu elemanları ayıran ve aralarındaki mesafeyi koruyan kafesten oluşmaktadır (Şekil 5.1). Yataklar yuvarlanma elemanlarının yuvarlanma (dönme + kayma) hareketi sayesinde çok az bir sürtünmeyle işlev görürler.

Yük taşıma şekillerine göre radyal ve aksel, yuvarlanma elemanının temas durumuna göre nokta temaslı (bilyeli) ve çizgisel temaslı (makaralı), yuvarlanma elemanına göre bilyeli sabit, oynak, eğik ve dört nokta ve makaralı silindir, oynak ve konik şeklinde sınıflandırılmaktadır.

5.2. YUVARLANMALI YATAKLARIN ELEMANLARI

Yuvarlanmalı yataklar dış bilezik, iç bilezik, yuvarlanma elemanı (bilye) ve kafes olmak üzere dört tane elemandan oluşmaktadır.



Şekil 5.1. Yuvarlanmalı yataklar ve elemanları.

5.3. YUVARLANMALI YATAKLARDA KUSURLAR

Titreşimin temelinde bir mekanik kusur vardır. Bu kusurlar kendilerine özgü titreşim parametreleri üretir ve bu parametrelere dayanılarak mekanik kusur tespit edilmeye çalışılır. Bu konuda en önemli bilgi karakteristik frekanstır. Yuvarlanmalı yataklarda bir kusur oluşumunda kusuru karakterize eden dört çeşit kusur frekansı vardır. Bunlar dış bilezik, iç bilezik, yuvarlanma elemanı ve kafes frekanslarıdır. Bu kusur frekansları göz önünde bulundurularak yuvarlanmalı yatak geometrik boyutlarına göre hesaplanırlar [156].

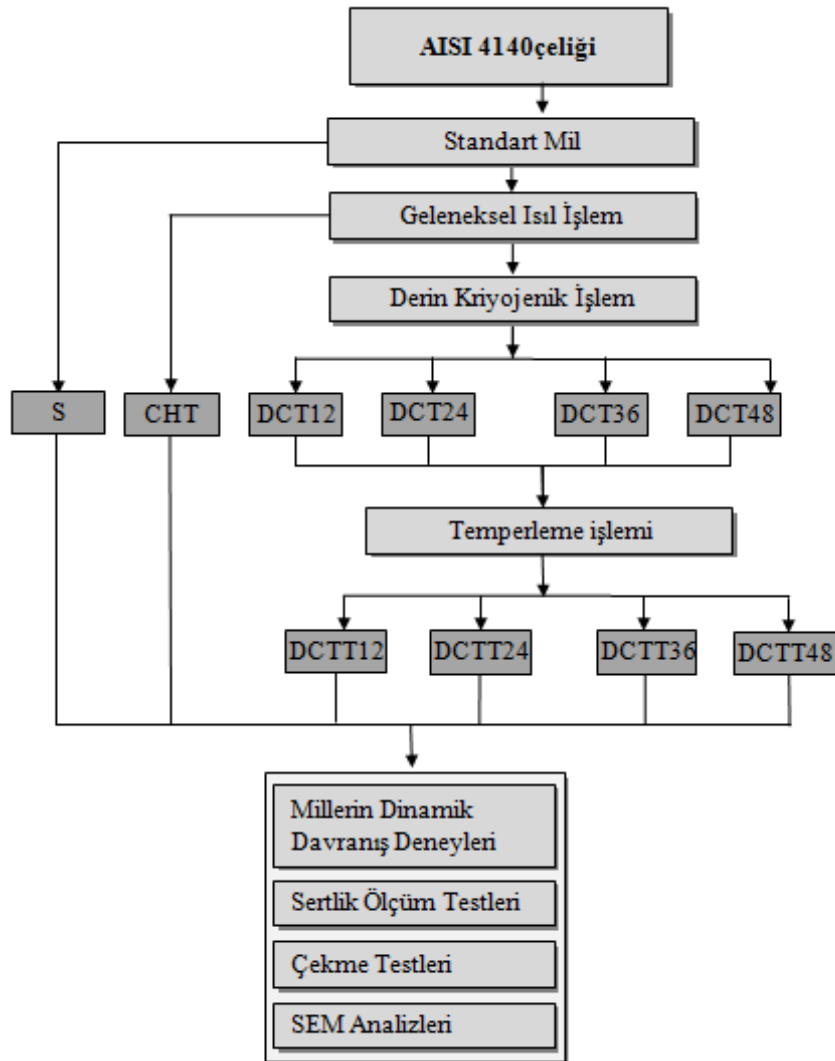
Bilye veya yuvarlanma elemanlarının iç bilezik üzerinde bağıl dönme hareketleri neticesinde oluşan titreşim frekanslarıdır. Eleman geçişi ifadesi ile yuvarlanma elemanlarının iç ve dış bilezik kusuru üzerinden geçmesi sonucu oluşan yuvarlanmalı yatak frekanslarını kapsayan titreşim frekans aralığını tanımlamak için kullanılır.

Her bir bilye veya yuvarlanma elemanı bilezikler etrafında döndüğü için kendi eksenini etrafında da dönmüş olur. Bilye dönme frekansını oluşturan bu dönme hareketi bilye dönmesi olarak adlandırılır. İç bilezik kusurlarında, bilyelerin titreşimi kusurun şeffaf hızıyla dönmelerinden karmaşık bir durum ortaya çıkar. Bilye doğal frekansında

titreşirken kusura temas ettiğinden doğal frekans genliğı maksimum seviyeye ulaşır. Aynı durum bilye üzerindeki kusur bilye ile beraber dönerek bileziklere temas ettiği için olur. Ancak iç bilezik kusur frekansının genliğı dış bilezik kusur frekansına göre daha düşüktür. Bunun nedeni, iç bilezik kusurunun titreşim sinyali ivme algılayıcıya ulaşmıca kadar bilye ve dış bilezikten geçer ve buna bağılı olarak bu geçiş süre zarfında sinyal sönümleşir sinyalin sönümleşmesi ile genlik düşer. Temas açısı arttığında radyal yük kapasitesi düşmektedir fakat eksenel yük kapasitesi artmaktadır. Yuvarlanmalı yatak elemanının yüzeyinde çok küçük düzgünsüzlük diğere bir elemanın üzerine etkisi titreşime sebep olur. Dolayısıyla sağlam durumda yuvarlanmalı yataklarda elde edilen titreşim sinyallerinin kusur frekansları elde edilebilmektedir. Yani yuvarlanmalı yataklar geometrik olarak kusursuz imal edilseler bile titreşim üretmektedirler ve bu titreşimler doğrusal olmayan bir karakteristik gösterirler.

6. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada derin kriyojenik işlem uygulanmış millerin dinamik davranışlarını incelemek amacıyla oluşturulan deney düzeneğinde; aynı çalışma şartlarında ayrı set olacak şekilde beş farklı duruma sahip yuvarlanmalı yatak ile desteklenmiş miller, her biri beş farklı mil dönme hızı altında deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca malzemenin mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla çekme testleri, sertlik ölçüm testleri, mikro yapı incelemeleri için SEM analizleri yapılmıştır. Deney malzemesi olarak AISI 4140 (42CrMo4) çeliğinden imal edilmiş miller kullanılmış ve tez çalışmasına ait akış diyagramı Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Akış diyagramı.

6.1. AISI 4140 ÇELİĞİ MİLLERE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER

AISI 4140 (42CrMo4) çeliği; soğuk çekme mil ve çubukları, türbin motorları, turbo jeneratörlerin fren halka ve kolları, demir yol tekerlekleri ve milleri gibi birçok kullanım alanına sahiptir. Çizelge 6.1’de kimyasal kompozisyonu verilen AISI 4140 çeliğinin en önemli özelliği, içerdiği Cr ve Mo alaşım elementleri sayesinde, su verme işlemi sonrasında sert martenzitik bir yapı oluşturabilmesi, mukavemet, süneklik ve tokluk gibi mekanik özelliklerin bir arada sağlanmasına imkân vermesidir.

Çizelge 6.1. AISI 4140 (42CrMo4) çeliği kimyasal kompozisyonu.

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al
(%)	0,39	0,27	0,74	0,008	0,01	1,06	0,2	0,03

Endüstride yaygın kullanım alanına sahip olan AISI 4140 çeliği, içerdiği alaşım elementleri sayesinde yüksek sertleşebilirlik özelliğine sahip olması, malzemenin kimyasal bileşiminin karbon miktarı bakımından sertleştirilmeye elverişli ve ıslah işlemi sonunda belirli yükler altında yüksek tokluk özelliği göstermesinden dolayı bu çalışmada kullanılmıştır. AISI 4140 çeliği malzemeden imal edilen millerin boyutları ve resmi Şekil 6.2’de verilmiştir. Mikro yapı ve sertlik analizi için, her ısıl işlem ve derin kriyojenik işlem durumu için numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 6.2. Deneylerde kullanılan miller.

Geleneksel ısıl işlem ve derin kriyojenik işlem uygulanan millere ait bilgiler Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Isıl işlem ve kriyojenik işlem uygulanan miller.

No	Mil Kodu	Uygulanan Isıl İşlemler		
1	S	STANDART	-	-
2	CHT	CHT	-	-
3	DCT12	CHT	DCT (12 saat)	-
4	DCT24	CHT	DCT (24 saat)	-
5	DCT36	CHT	DCT (36 saat)	-
6	DCT48	CHT	DCT (48 saat)	-
7	DCTT12	CHT	DCT (12 saat)	Temperleme (2 saat)
8	DCTT24	CHT	DCT (24 saat)	Temperleme (2 saat)
9	DCTT36	CHT	DCT (36 saat)	Temperleme (2 saat)
10	DCTT48	CHT	DCT (48 saat)	Temperleme (2 saat)

S - Standart mil

CHT - Geleneksel ısıl işlemlili mil (Conventional Heat Treatment)

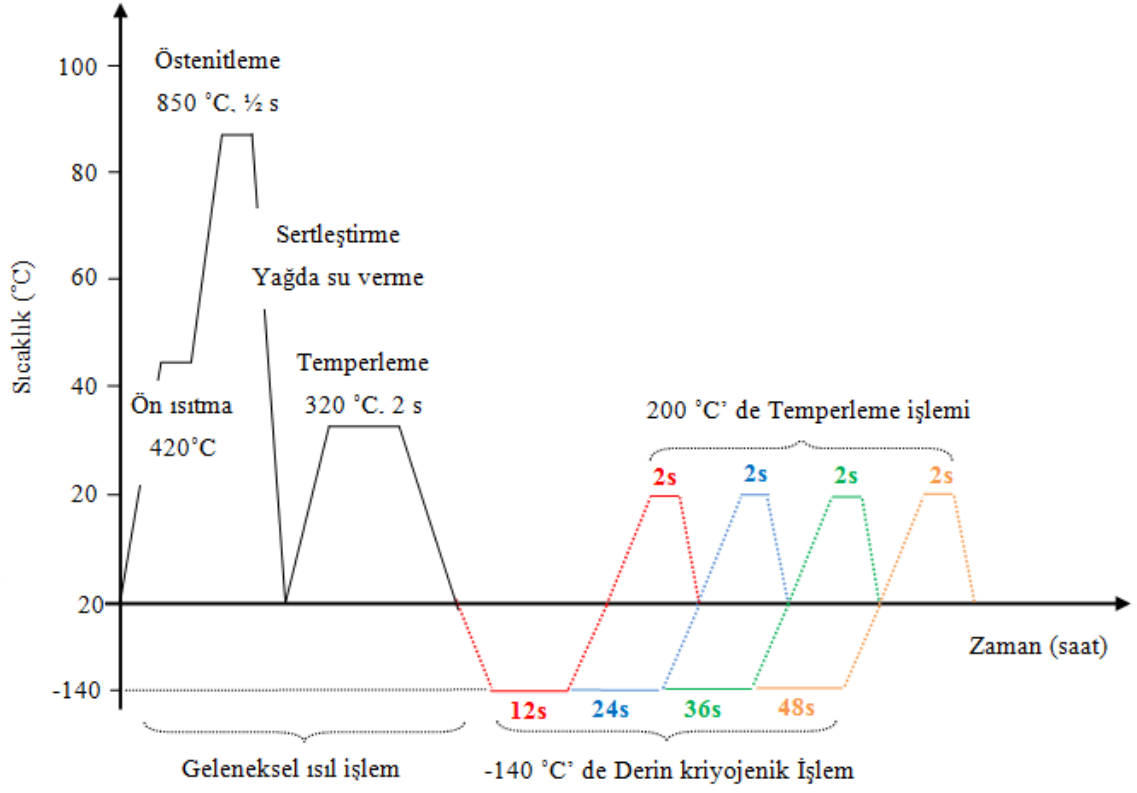
DCT - Derin kriyojenik işlemlili miller (Deep Cryojenic Treatment)

DCTT - Derin kriyojenik işlemlili ve temperleme işlemlili miller

(Deep Cryojenic Treatment - Tempering)

Millere geleneksel ısıl işlem uygulanarak istenilen sertlik değerine getirilmiştir. Geleneksel ısıl işlem (ilk olarak atmosfer kontrollü fırında 420 °C sıcaklığa 30 dakika ısıtılarak ön ısıtma, 850 °C sıcaklığa 30 dakika ısıtılarak östenitleme işlemi ve 70 °C yağda su verme işlemi ile sertleştirilen numuneler, 320 °C sıcaklıkta 2 saat temperleme) uygulanmıştır. Geleneksel ısıl işlem sonrasında millere 12, 24, 36 ve 48 saat bekletme sürelerinde -140 °C sıcaklıkta derin kriyojenik (soğutma) işlem uygulanmıştır. Derin kriyojenik işlem sonrasında ise millere 200 °C'de 2 saat temperleme işlemi uygulanmıştır.

Şekil 6.3'de geleneksel ısıl işlem ve derin kriyojenik işlem eğrisi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi deney numunelerine öncelikle geleneksel ısıl işlem uygulanmış, sonrasında farklı bekletme sürelerinde (12, 24, 36 ve 48 saat) derin kriyojenik işlem ve son olarak temperleme işlemi (200 °C) uygulanmıştır.



Şekil 6.3. Isıl işlem ve kriyojenik işlem eğrisi.

Derin kriyojenik işlemlerin uygulandığı bilgisayar kontrollü kriyojenik işlem fırını Şekil 6.4'de gösterilmiştir. Şekilde görülen fırında derin kriyojenik işlem -140 °C'de uygulanmıştır.



Şekil 6.4. Kriyojenik işlem fırını ve işlemin uygulanması.

6.2. DENEY SETİ

Bu çalışmada kullanılmak üzere makine ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanım alanına sahip AISI 4140 (42CrMo4) çeliğinden imal edilen 25,4 mm çapında ve 320 mm uzunluğunda miller hazırlanmıştır. Bu millerden, bir nolu mil standart olarak kullanılan mil (Standart mil - S) olarak hazırlanmıştır. Diğer millere ise ilk önce geleneksel ısıtma işlemi (Conventional Heat Treatment - CHT) uygulanmıştır. Sertleştirilen millere 320 °C sıcaklıkta 2 saat temperleme işlemi uygulanmıştır. Geleneksel ısıtma işlemi uygulanan üç nolu ve yedi nolu mile, ısıtma işlemi tamamlayıcı bir işlem olan derin kriyojenik işlem (Deep Cryogenic Treatment - DCT12) -140 °C'de 12 saat süre uygulanmıştır. Geleneksel ısıtma işlemi uygulanan dört nolu ve sekiz nolu mile, derin kriyojenik işlem (DCT24) -140 °C'de 24 saat süre uygulanmıştır. Geleneksel ısıtma işlemi uygulanan beş nolu ve dokuz nolu mile, derin kriyojenik işlem (DCT36) -140 °C'de 36 saat süre uygulanmıştır. Geleneksel ısıtma işlemi uygulanan beş nolu ve on nolu mile, derin kriyojenik işlem (DCT48) -140 °C'de 48 saat süre uygulanmıştır. Derin kriyojenik işlem sonrasında yedi nolu (DCTT12), sekiz nolu (DCTT24), dokuz nolu (DCTT36), ve on nolu mile (DCTT48) ise 200 °C'de 2 saat temperleme işlemi (Deep Cryogenic Treatment and Tempering - DCTT) uygulanmıştır.

Deneysel çalışma için 10 farklı ısıtma işlemli mil kullanılarak deney seti oluşturulmuştur. İlk deney serisi için S mil, ikinci deney serisi için CHT mil, üçüncü deney serisi için DCT12 mil ve sırasıyla diğer miller (DCT24, DCT36, DCT48, DCTT12, DCTT24, DCTT36 ve DCTT48) kullanılarak 10 deney serisi oluşturulmuştur. Deneylerin gerçekleştirilmesi için oluşturulan deney seti Şekil 6.5'de gösterilmiştir. Mil, ½ Beygir Gücüne (HP) sahip bir motora, motor tarafından üretilen yüksek frekanslı titreşim etkisini en aza indirmek için bir esnek kaplin ile bağlanmıştır. Üç fazlı alternatif akım (AC) indüksiyon motoru değişik hızların elde edilmesi için bir değişken hız kontrol ünitesine bağlanmıştır. Motor 0–3600 rpm (revolution per minute - dakikadaki dönme sayısı) hız aralığında çalıştırılabilir özelliktedir. Dönen milin devir sayısını kontrol etmek için foto - optik tipi bir dijital takometre kullanılmıştır.

Titreşim genliğini artırmak için ise 126,25 mm çapında ve 5040 gr ağırlığında ve 65 mm çapında 684 gr ağırlığında olmak üzere iki disk yük olarak kullanılmıştır. Deneylerde veriler, VibraQuest™ yazılım ve donanım sistemi kullanılarak

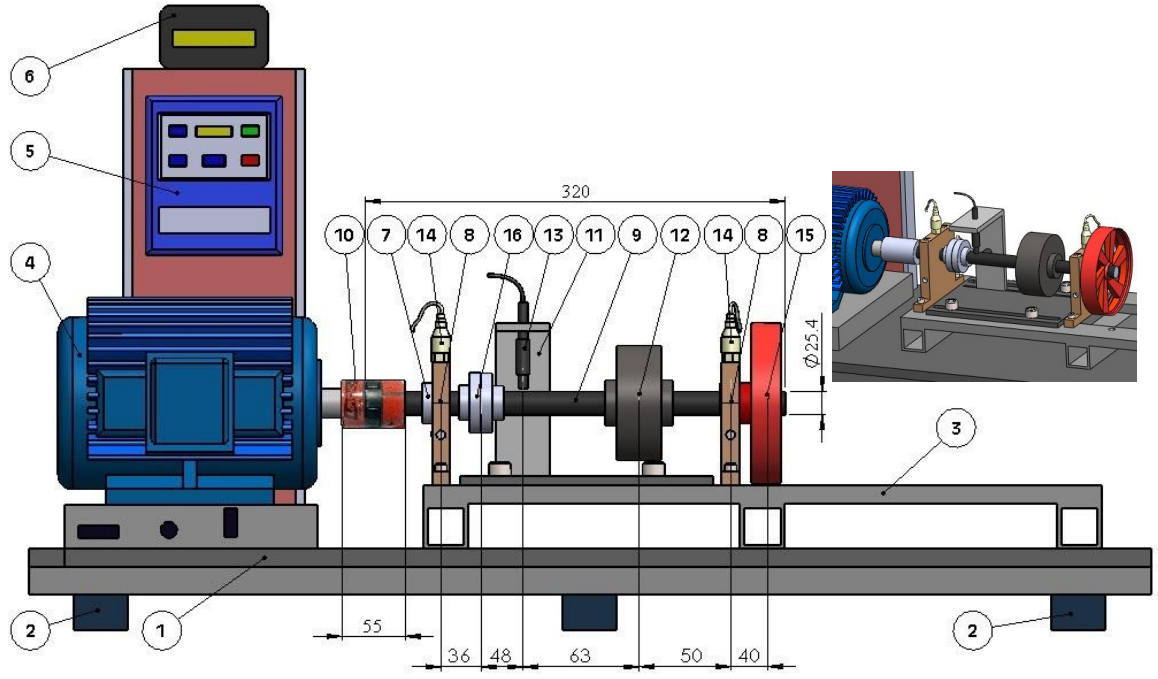
toplanmıştır. Veri toplama sistemi titreşim sinyalleri için tasarlanmış bir yüksek bant genişliği amplifikatörüne sahiptir.

Aynı yükleme ve çalışma şartlarında normal ve dört farklı kusurlu yuvarlanmalı yataklarla desteklenmiş uç kısmına fan takılmış ısıl işlemlili miller kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Millerin performansını belirlemek için deplasman ölçerler kullanılarak 50 adet deney, yuvarlanmalı yataklardan veri almak için ivme ölçerler kullanılarak 250 adet deney olmak üzere toplam 300 adet deney yapılmıştır. Veri toplama sistemi ile elde edilen veriler kaydedilerek bilgisayara aktarılmış ve karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Deney setinde yuvarlanmalı yatakların dikey ve yatay yönde (x ve y) titreşimlerini ölçmek için dört adet ivmeölçer (Ch 1, Ch 2, Ch 3 ve Ch 4) kullanılmış ve yuvarlanmalı yatakların yuvasına 90 derece açı ile monte edilmişlerdir. İvme ölçümleri PCB Piezotronics 608A11 model ölçü sistemi ile kayıt edilip bilgisayara aktarılmıştır. Kullanılan ivme ölçerler maksimum frekans duyarlılığına sahiptir. Sistemde kullanılan DAQ (Data Acquisition) kartı titreşim algısı için dört kanal ve dönme hızı elde etmek için ise bir kanala sahiptir. DAQ kanalları, motora yakın taraftaki yuvarlanmalı yatak için Ch 1, Ch 2 olarak dikey ve yatay yönde yuvaya takılmış iken motordan uzak taraftaki yuvaya yatakların titreşimini algılamak için Ch 3, Ch 4 olarak sırasıyla dikey ve yatay yönde monte edilmiştir. Tüm kanallar eş zamanlı olarak çalışabilmektedir (Şekil 6.6).

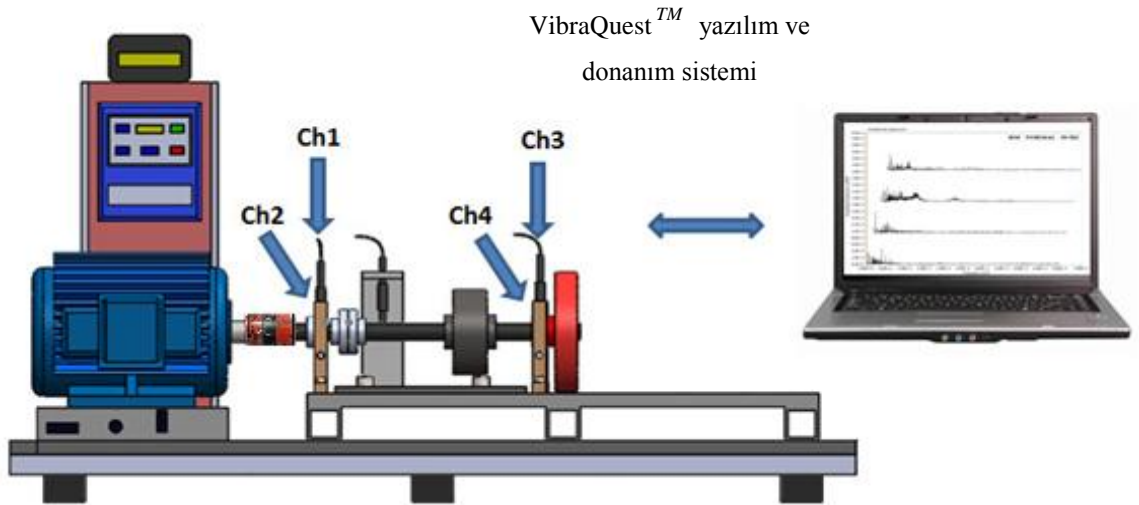
Mil çalışma hızı 10 Hz (600 dev/dak), 20 Hz (1200 dev/dak), 30 Hz (1800 dev/dak), 40 Hz (2400 dev/dak), 50 Hz (3000 dev/dak) için veriler toplanmış ve bilgisayara aktarılmıştır. Millerin yer değiştirme verilerini ölçmek için ise dikey ve yatay yönde olmak üzere 2 adet deplasman ölçer kullanılmıştır. Deplasman ölçerler deplasman ölçme aparatına (11) dikey (Ch 1) ve yatay (Ch 2) yönde takılmıştır (Şekil 6.5).

Deneylerde kusurlu yuvarlanmalı yatak olarak iç bilezik kusurlu (INNER), dış bilezik kusurlu (OUTER), bilye kusurlu (BALL) ve hepsi kusurlu (COMB) olmak üzere 4 farklı kusurlu yuvarlanmalı yatak kullanılmıştır. Motora yakın yatak yuvasında normal yuvarlanmalı yatak sabit olarak kalmış ve motordan uzak yatak yuvasında ise 4 farklı kusurlu yuvarlanmalı yatak sırayla değiştirilerek takılmıştır. İlk deney çalışmasında iki normal yuvarlanmalı yatak millere destek olarak kullanılmış ve miller sırası ile diğer kusurlu yataklarda da test edilmiştir.



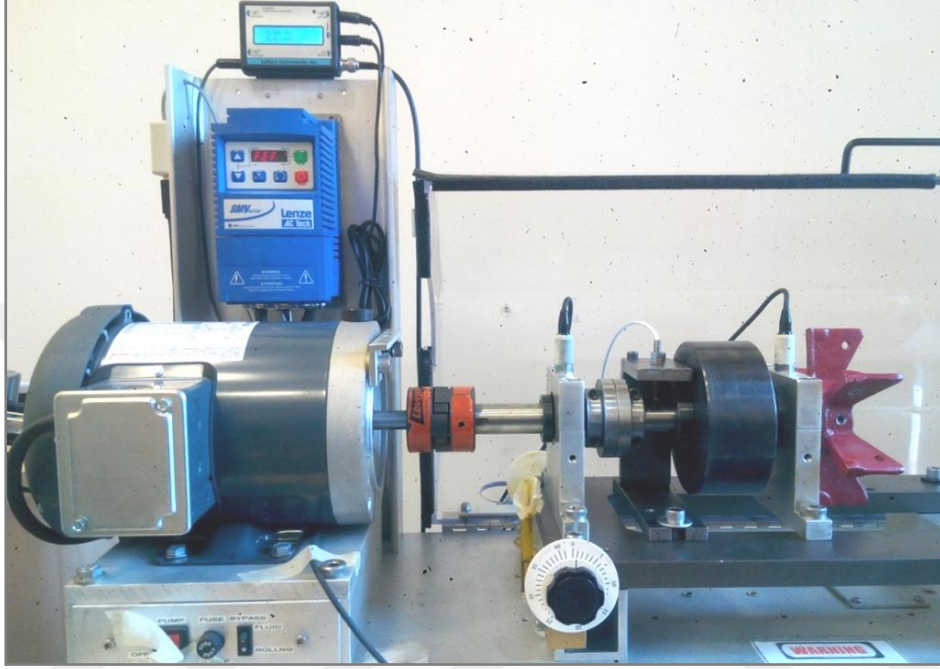
1	Gövde	9	Mil
2	Plastik takoz	10	Esnek kaplin
3	Bilye yatağı desteği	11	Deplasman ölçer aparatı
4	½ HP Motor	12	Disk (5.04 kg)
5	Hız kontrol ünitesi	13	Deplasman ölçer
6	Takometre	14	İvme ölçer
7	Yuvarlanmalı yatak	15	Fan
8	Yatak yuvası	16	Disk (0.684 kg)

Şekil 6.5. Deney düzeneği şematik gösterimi.



Şekil 6.6. Deney düzeneği ve dört kanalın gösterimi.

Şekil 6.7’de deney düzeneğinin çalışması verilmiştir. Deney çalışmasında yuvarlanmalı yatakların dikey ve yatay yöndeki titreşimleri kaydedilmiştir. Kullanılan yuvarlanmalı yataklar, karmaşık bir titreşim sistemini temsil eder. Dikey yönde ölçülen titreşim sinyali analiz yapmada, yatay yönde ölçülen titreşim sinyali ise ölçümleri doğrulamada kullanılmıştır.



Şekil 6.7. Deney düzeneğinin çalışması.

Deney düzeneğinde aynı yükleme ve çalışma şartlarında yuvarlanmalı yataklarla desteklenmiş, uç kısmına fan takılmış millerin ve yuvarlanmalı yatakların titreşim verileri elde edilmiş ve karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

6.3. SERTLİK ÖLÇME TESTLERİ

Deneylerde kullanılan millere ait numunelerin sertlik ölçme cihazında sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri için 13 mm çapında ve 10 mm boyunda deney numuneleri hazırlanmıştır. Sertlik ölçümlerinde, ölçüm sonucu en az 9 sertlik ölçümünün ortalamasını yansıtmaktadır. Sertlik ölçme deneyleri, Düzce Üniversitesi Gümüşova Meslek Yüksekokulu'nda bulunan sertlik ölçme cihazı ile Rockwell (HRC) sertlik ölçme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.8'de mikro yapı ve sertlik analiz numunelerinin boyutları ve Şekil 6.9'da ise sertlik ölçme cihazı resmi verilmiştir.



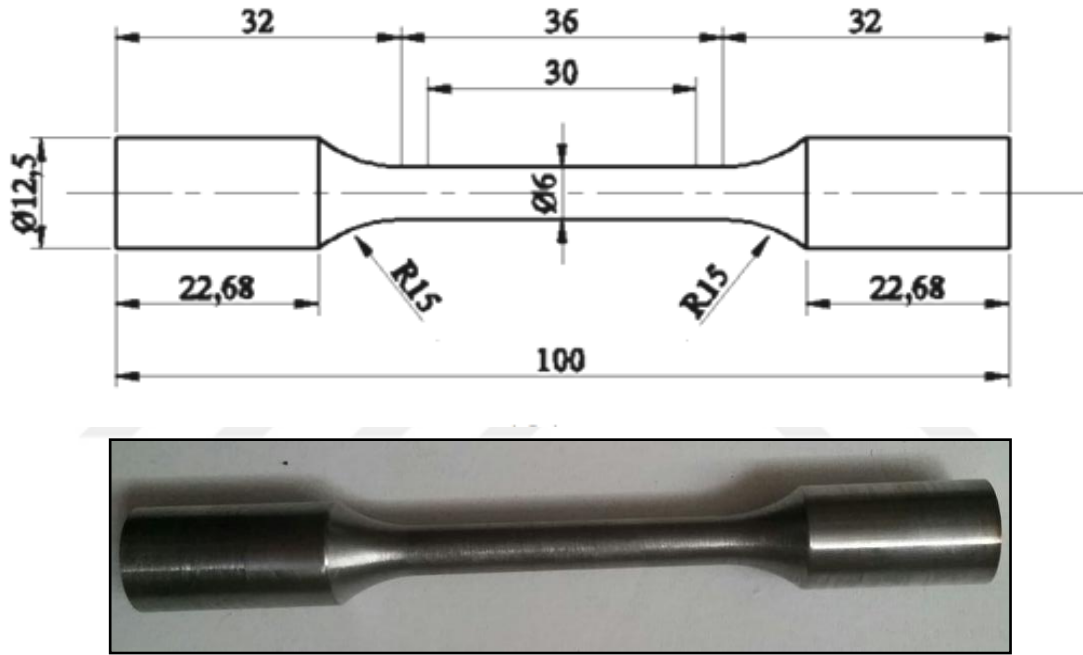
Şekil 6.8. Mikro yapı ve sertlik analiz numuneleri.



Şekil 6.9. Sertlik ölçme cihazı.

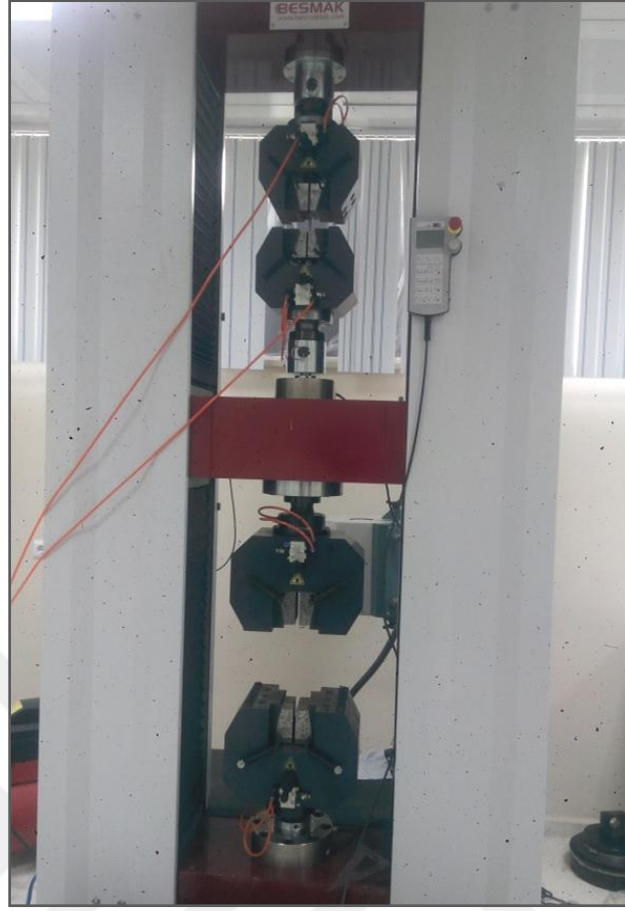
6.4. ÇEKME TESTLERİ

Bu çalışmada AISI 4140 çeliğinden imal edilmiş millerin, geleneksel ısıtma işlemi ve farklı bekletme sürelerinde uygulanan derin kriyojenik işlemin mekanik özelliklerine etkisini tespit etmek amacıyla numunelere çekme testleri uygulanmıştır. Çekme testlerinde çekme hızı 2 mm/dakika olarak alınmıştır. Çekme testlerinde kullanılan TS 138-A normuna göre hazırlanmış daire kesitli silindirik başlı çekme testi numunesi ve teknik resmi Şekil 6.10'da verilmiştir. Çekme testleri için belirtilen standartlara göre 30 adet çekme testi numunesi hazırlanmıştır.



Şekil 6.10. Çekme testi numunesi.

Çekme testleri, Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi (DÜBİT) bünyesinde bulunan 40 Ton kapasiteli çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.11).



Şekil 6.11. Çekme test cihazı.

6.5. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İNCELEMELERİ

Mikro yapı incelemelerinde kullanılmak üzere 13 mm çap ve 10 mm uzunluğunda her ısıl işlem türü için numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler; geleneksel ısıl işlem, derin kriyojenik işlem ve temperleme işlemi sonrasında sırasıyla 120, 240, 600, 800 ve 1200 gritlik SiC zımparalar ile zımparalama işlemi yapıldıktan sonra numune parlatma cihazında parlatılmıştır. Sonrasında % 5 Nital (95 ml etil alkol, 5 ml nitrik asit) ile dağlanarak optik mikroskopta incelenmiş ve Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy - SEM) çekimleri için hazırlanmıştır. SEM görüntüleri Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi (DÜBİT) bünyesinde bulunan taramalı elektron mikroskobu kullanılarak ikincil elektronların oluşturduğu SEM mikrografları alınmıştır.

Şekil 6.12’de görülen SEM cihazı odaklanmış elektron hüzmesiyle numuneyi tarayarak numuneden görüntü meydana getiren bir elektron mikroskobudur. Elektronların örnekteki elektronlarla etkileşimi detekte edilebilen çok çeşitli sinyaller üretir. Bu sinyaller örneğin yüzey topografisi ve kompozisyonu hakkında bilgi içerir. Elektron hüzmesi genellikle tarama örüntüsü biçiminde taranır. Görüntü oluşturmak için hüzmenin pozisyonu detekte edilen sinyalle birleştirilir. SEM’ de numuneler yüksek vakumda ve düşük vakumda incelenebilir.



Şekil 6.12. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde tez çalışmasının deneysel aşamalarında elde edilen bulgulara ve deneysel sonuçlara yer verilmiştir. Ayrıca deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve tartışılmıştır.

7.1. MİLLERİN DİNAMİK DAVRANIŞ DENEYLERİ BULGULARI

Deney setinde mil-yatak sisteminden deplasman ölçerler ve ivme ölçerler ile elde edilen veriler bilgisayara aktarılmış ve bilgisayar ortamında grafiksel veriler oluşturulmuştur. Bu veriler; Bode eğrisi, dört kanal veri grafikleri, şelale (waterfall) grafikleri, yörünge (orbit) grafikleri ve time waveform (zamana bağlı genlik değerleri) grafikleri olarak sunulmuştur. Ayrıca deneylerde elde edilen sayısal veriler, formül ile elde edilen sonuçlardan grafikler oluşturulmuştur.

Deney setinde ivme ölçerler (Ch 1, Ch 2, Ch 3 ve Ch 4) ve deplasman ölçerler (Ch 1, Ch 2) aracılığıyla mil dönme hızı 10 Hz (600 dev/dak), 20 Hz (1200 dev/dak), 30 Hz (1800 dev/dak), 40 Hz (2400 dev/dak), 50 Hz (3000 dev/dak) için veriler toplanmıştır. En kritik verilerin toplandığı mil dönme hızı 50 Hz olduğu için kıyaslama referansı olarak alınmıştır.

Dört kanal veri grafikleri; bir grafikte dört kanal olarak alttan yukarıya doğru sırasıyla Ch 1, Ch 2, Ch 3 ve Ch 4 olmak üzere mil çalışma hızı 50 Hz için toplanan titreşim verileri sunulmuştur. Dikey (Ch 1, Ch 3) ve yatay (Ch 2, Ch 4) yönde olmak üzere dört kanaldan veriler alınmıştır.

Deplasman ölçer (proxy probe) sensörleri ile miller için elde edilen şelale (waterfall) titreşim spektrumları verilmiştir.

Miller için düşey (Ch 1) ve yatay (Ch 2) doğrultuda çalışma hızlarının durma (0 rpm) durumundan 3000 rpm (50 Hz)'e yükselerek tekrar durma noktasına gelmesi sırasında yakalanan titreşim spektrumları alınmıştır. Yörünge (orbit) analizi ile düşey (Ch 1) ve yatay (Ch 2) doğrultuda millerin eksen çizgisinin hareketi yörüngesel olarak elde edilmiştir. Yörünge üzerindeki nokta milin salınım dalgasının başlangıç noktası olarak

kaydedilmiştir. Ayrıca zamana bağlı genlik durumlarını görmek amacıyla time waveform grafikleri verilmiştir.

Deney setinde mil-yatak sisteminden deplasman ölçerler ile millerden (Ch 1, Ch 2) elde edilen 638976 veri ve ivme ölçerler ile yuvarlanmalı yataklardan (Ch 1, Ch 2, Ch 3 ve Ch 4) elde edilen 327680 veri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu analizleri daha kolay gerçekleştirebilmek için kanallardan elde edilen veriler, formüller kullanılarak tek veri haline dönüştürülmüştür.

Deneylerde millerden ve yuvarlanmalı yataklardan elde edilen sayısal veriler aşağıda verilen (7.1) ve (7.2) numaralı formüller [157]-[159] kullanılarak işlem yapılmıştır.

Her deney durumu için (7.1) nolu formül kullanılarak a_{RMS} değerleri hesaplanmıştır.

a_k yer değiştirme değerlerini ve N yer değiştirme değerlerinin toplam sayısını ifade etmektedir. Burada deplasman ölçerler ile alınan verilerden her kanal için N = 638976 ve ivme ölçerler ile alınan verilerden her kanal için N = 327680 yer değiştirme verisi vardır. Yuvarlanmalı yataklardan ve millerden kanallar aracılığı ile alınan veriler hesaplamalarda kullanılmıştır.

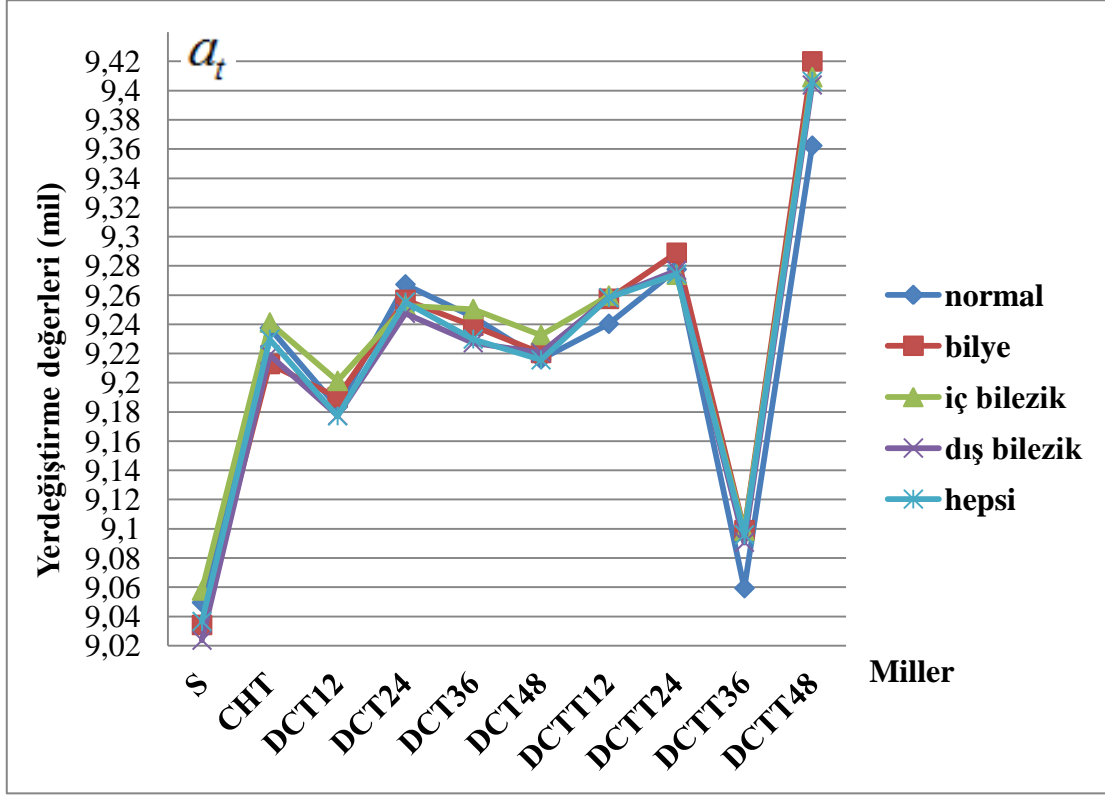
$$a_{RMS} = \sqrt{1/N \sum_{k=1}^N a_k^2} \quad (7.1)$$

$$a_t = \sqrt{ch1^2 + ch2^2 + ch3^2 + ch4^2} \quad (7.2)$$

Verileri karşılaştırmak için, toplam titreşim değerleri (a_t), (7.2) nolu formül ile deplasman ölçerlerle iki kanaldan ve ivme ölçerlerle dört kanaldan elde edilen veriler kullanılarak hesaplanmıştır. RMS yer değiştirme değerleri bütün kanallar için kullanılmıştır. (7.1) ve (7.2) nolu formüller kullanılarak miller için ortalama titreşim genlik değerleri hesaplanmıştır.

Miller için hesaplanan genlik değerlerinin düşük çıkması milin daha az salınım ve daha az yer değiştirme yaptığını göstermektedir. Millerin daha az salınım yapması istenilmektedir [1-8].

Şekil 7.1’de normal ve kusurlu yuvarlanmalı yataklarda millerin ortalama titreşim genlik değerleri verilmiştir. Millerden deplasman ölçerler ile iki kanaldan (Ch 1, Ch 2) alınan verilerin ortalama genlik değerleri (1 mil = 0,0254 mm) hesaplanmıştır. Şekilde görüldüğü gibi S milinden sonra sırasıyla DCTT36, DCT12, DCT48 ve DCT36 milleri en düşük genlik değerlerine sahiptir.

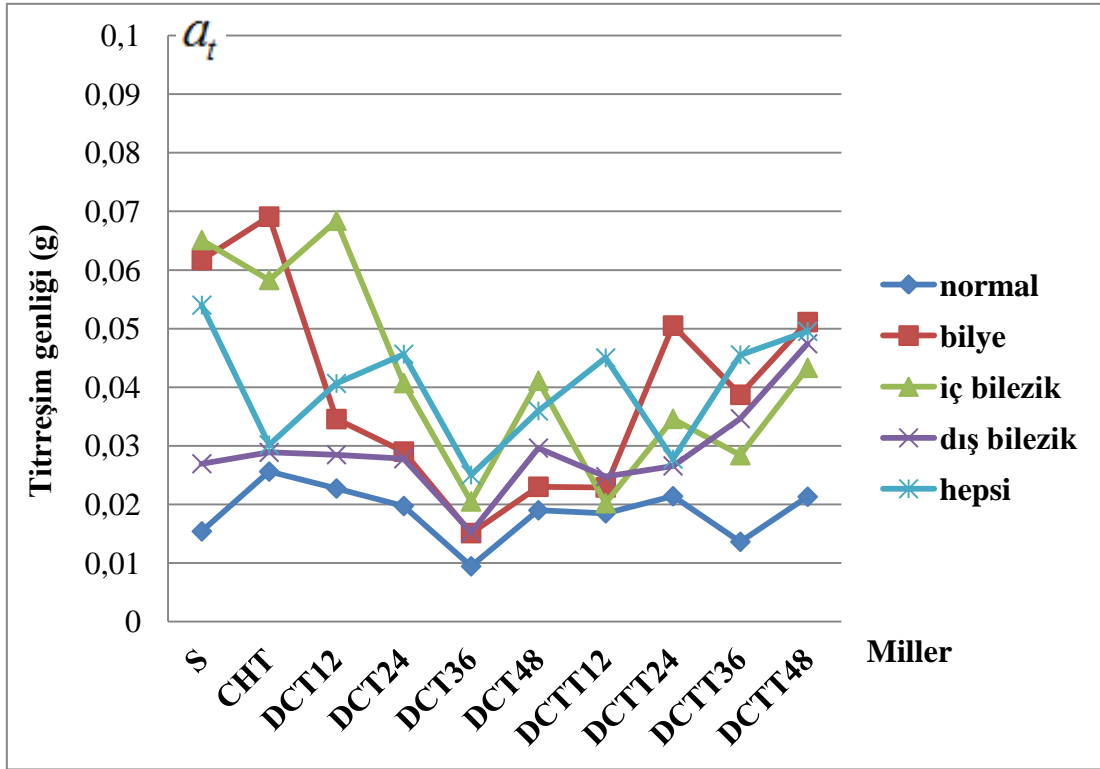


Şekil 7.1. Normal ve kusurlu yataklarda millerin ortalama genlik değerleri.

Millerin yatay doğrultudaki bileşenlerinin düşey doğrultudaki bileşenlere kıyasla genliklerinde azalma olduğu görülmüştür. Bu sonuç, millerin üzerindeki yükten gelen kuvvetin düşey eksenini daha fazla etkilemesine ve titreşim genliğinde değişim meydana getirmesi ile ilişkilendirilmiştir [2], [7]. Ayrıca, DCTT miller, CHT ve DCT işlemlili millere göre daha az salınım göstermiştir. Bu sonuç, DCTT millerinin elastikiyet modüllerinin iyileşmesine bağlı olarak gerçekleştiği öngörülmüştür. Böylece DCTT millerinin rezonans frekansı azalmıştır [7].

Şekil 7.2’ de normal ve kusurlu yuvarlanmalı yatakların ortalama titreşim genlik değerleri verilmiştir. İvme ölçerler ile normal ve kusurlu yataklarda dört kanaldan (Ch 1, Ch 2, Ch 3 ve Ch 4) alınan verilerin ortalama genlik değerleri ($g - m/s^2$) hesaplanmıştır. Şekilde görüldüğü gibi normal yuvarlanmalı yataklarda sırasıyla DCT36, DCTT36, DCTT12 ve

DCT48 milleri en düşük genlik değerlerine sahiptir. Kusurlu yuvarlanmalı yataklarda ortalama titreşim değerleri değişkenlik göstermekle birlikte yine DCT36 ve DCTT36 millerinde belirgin şekilde daha düşük genlik değerlerine sahiptir.



Şekil 7.2. Normal ve kusurlu yatakların ortalama genlik değerleri.

Millerin dinamik davranış deneyleri sonucunda elde edilen verilerde en yüksek devirlerde yakalanan genlik değerleri Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2’de verilmiştir. Burada açık bir şekilde DCT36 mili dikey (0.048 mil) ve yatay (0.047 mil) yönde diğer millere göre daha düşük genlik değerlerine sahip olduğu görülmektedir. DCT36 mili, kusurlu yuvarlanmalı yataklarda da aynı kararlılığı sürdürdüğü görülmüştür.

Çizelge 7.1. Yuvarlanmalı yataklarda millerin genlik değerleri (Dikey - Ch 1).

No	Mil kodu	Normal ve kusurlu yuvarlanmalı yataklar (rpm / mil)				
		Normal	İç bilezik	Dış bilezik	Bilye	Hepsi
1	S	2830,20 /0,106	2817,51/0,112	2793,46/0,114	2660,07/0,107	2950,20/0,107
2	CHT	2095,42 /0,215	2293,84/0,203	2051,78/0,205	2169,47/0,224	2087,71/0,201
3	DCT12	2238,28 /0,188	2295,99/0,193	2300,72/ 0,190	2459,72/0,193	2459,95/0,195
4	DCT24	2317,14 /0,196	2540,95/ 0,194	2580,44/0,189	2943,94/0,197	2882,24/0,196
5	DCT36	2367,53 /0,048	2396,97/0,042	2401,19/0,048	2269,27/0,50	2287,50/0,049
6	DCT48	2230,48 /0,166	2538,49/0,168	2581,02/0,175	2570,53/0,185	2547,29/0,162
7	DCTT12	2961,50 /0,160	2958,83/0,168	2661,76/ 0,168	2961,22/0,159	2498,94/0,156
8	DCTT24	2959,13 /0,116	2957,01/0,126	2958,24/0,126	2680,81/0,126	2960,01/0,125
9	DCTT36	2499,26 /0,229	2540,76/0,228	2260,75/0,223	2482,24/0,238	2411.28/0,214
10	DCTT48	2918,97 /0,032	2537,14/0.032	2917,14/0,072	2935,43/0,051	2950,67/0,065

Çizelge 7.2. Yuvarlanmalı yataklarda millerin genlik değerleri (Yatay - Ch 2).

No	Mil kodu	Normal ve kusurlu yuvarlanmalı yataklar (rpm / mil)				
		Normal	İç bilezik	Dış bilezik	Bilye	Hepsi
1	S	2817,06 / 0,107	2959,31 / 0,113	2964,43 / 0,115	2962,55 / 0,107	2959,16 / 0,110
2	CHT	2315,06 / 0,219	2377,76 / 0,205	2306,32 / 0,208	2502,37 / 0,227	2373,51 / 0,204
3	DCT12	2955,74 / 0,192	2900,33 / 0,196	2954,22 / 0,196	2591,43 / 0,198	2957,17 / 0,200
4	DCT24	2931,15 / 0,198	2951,33 / 0,195	663,78 / 0,190	2915,99 / 0,198	2937,64 / 0,198
5	DCT36	2952,95 / 0,047	2961,33 / 0,044	2475,94 / 0,049	2530,15 / 0,050	2509,22 / 0,050
6	DCT48	2957,05 / 0,169	2959,63 / 0,122	2780,20 / 0,177	2751,19 / 0,188	2926,70 / 0,166
7	DCTT12	2370,73 / 0,160	2761,35 / 0,166	2782,61 / 0,167	2963,34 / 0,159	2961,76 / 0,156
8	DCTT24	590,05 / 0,109	2959,63 / 0,122	2962,66 / 0,121	2914,0 / 0,121	892,37 / 0,121
9	DCTT36	2951,13 / 0,237	2959,52 / 0,236	2560,06 / 0,228	2957,44 / 0,246	2960,46 / 0,223
10	DCTT48	2938,11 / 0,033	2948,08 / 0,031	2938,70 / 0,068	2951,52 / 0,053	2955,42 / 0,064

7.1.1. Bode Eğrileri Grafikleri

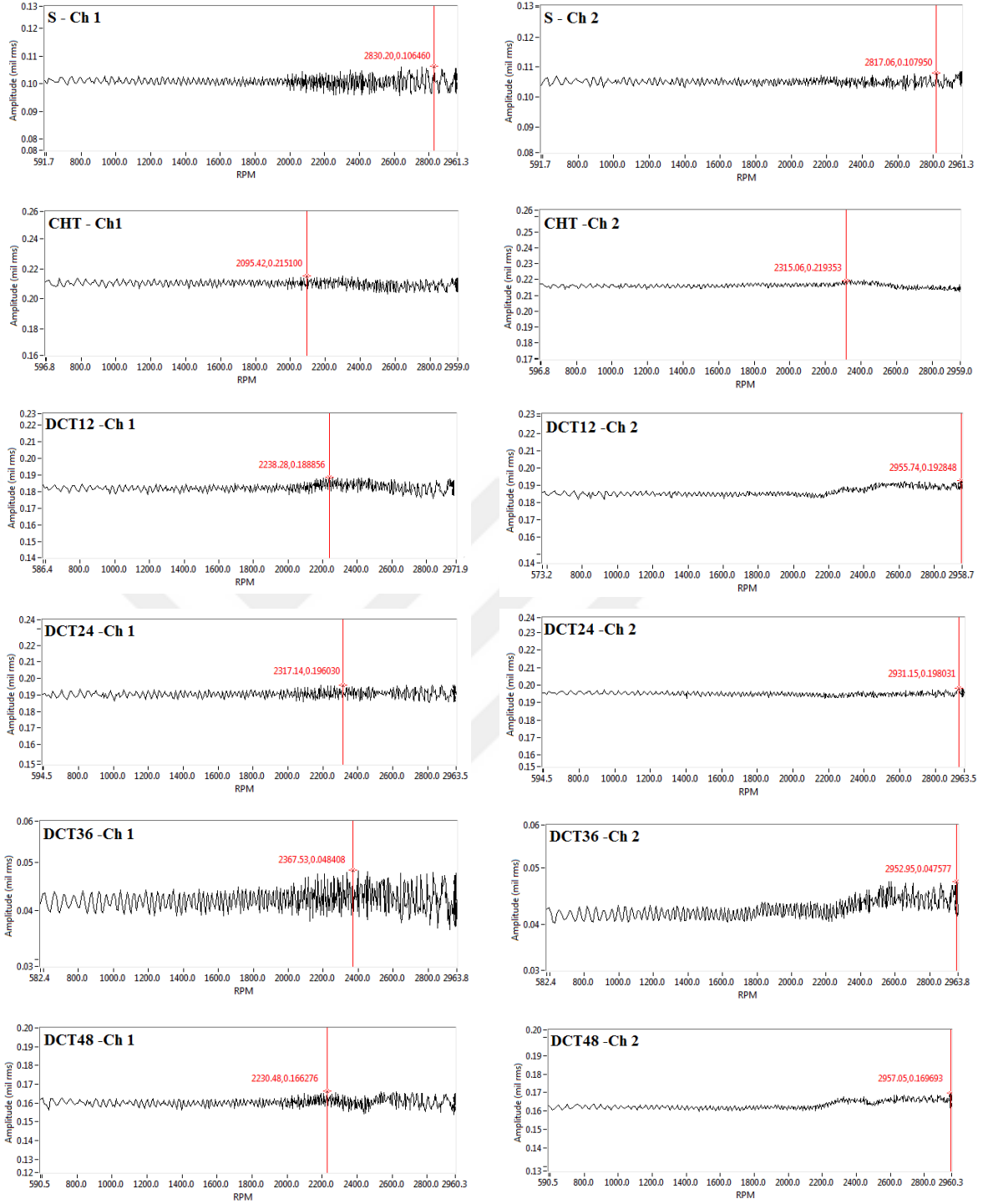
Millerin kritik devrinin belirlenmesi için Bode eğrisi grafiği verilmiştir. Miller için düşey (Ch 1) ve yatay (Ch 2) doğrultuda çalışma hızlarının durma (0 rpm) durumundan 3000 rpm'e yükselerek tekrar durma noktasına gelmesi sırasında yakalanan titreşim spektrumları alınmıştır.

Şekil 7.3 ve Şekil 7.4'de görüldüğü gibi normal yuvarlanmalı yatak destekli miller için düşey doğrultuda (Ch 1) S mili için maksimum titreşim genliği 2830,20 rpm (dakikadaki devir sayısı) 0,106 mil (1 mil = 0,0254 mm), CHT mili 2095,42 rpm'de 0,215 mil, DCT12 mili 2238,28 rpm'de 0,188 mil, DCT24 mili 2317,14 rpm'de 0,196 mil, DCT36 mili 2367,53 rpm'de 0,048 mil, DCT48 mili 2230,48 rpm'de 0,166 mil, DCTT12 mili ise 2961,50 rpm'de 0,160 mil, DCTT24 mili ise 2959,13 rpm'de 0,116 mil, DCTT36 mili 2499,26 rpm'de 0,229 mil, DCTT48 mili ise 2918,97 rpm'de 0,032 mil olarak bulunmuştur.

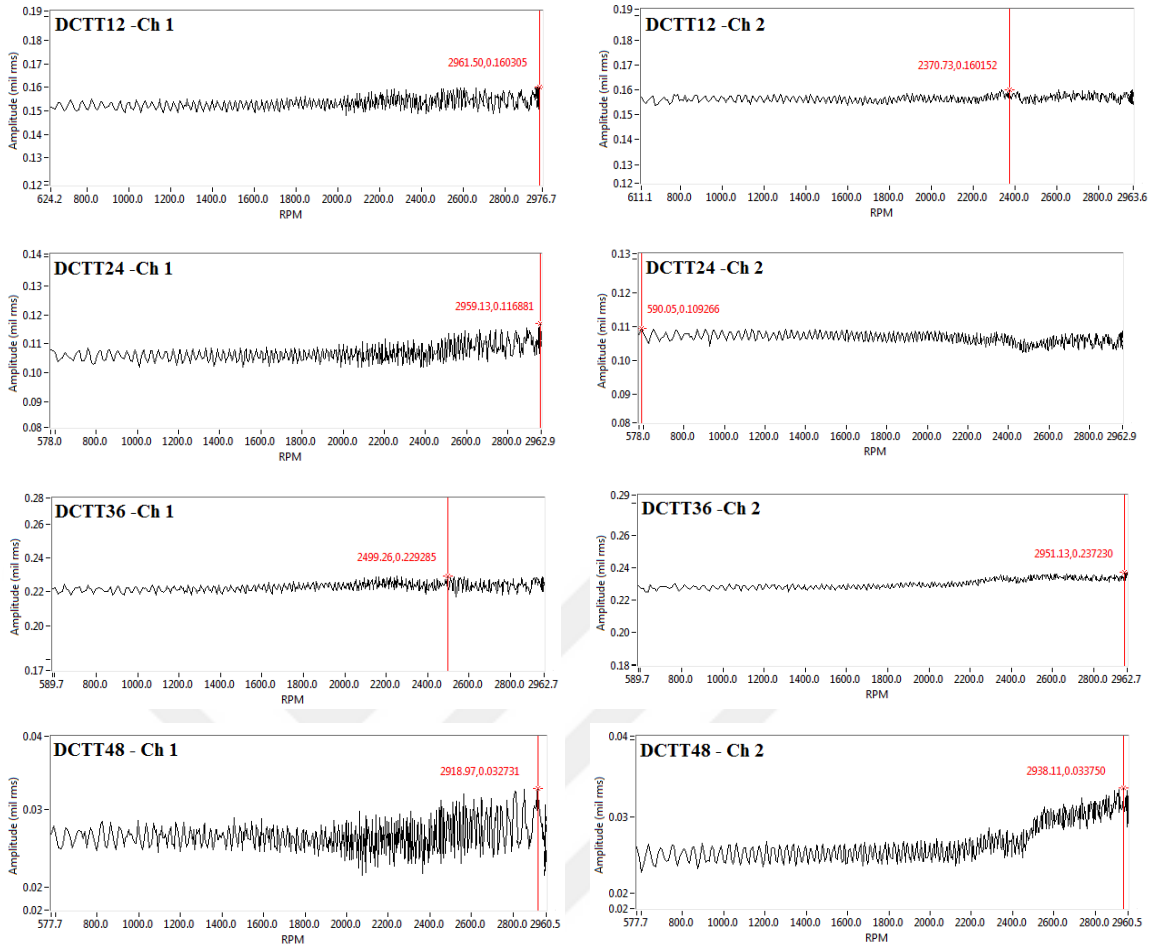
Yatay doğrultuda (Ch 2) ise S mili için maksimum titreşim genliği 2817,06 rpm'de 0,107 mil, CHT mili 2315,06 rpm'de 0,219 mil, DCT12 mili 2955,74 rpm'de 0,192 mil, DCT24 mili 2931,15 rpm'de 0,198 mil, DCT36 mili 2952,95 rpm'de 0,047 mil, DCT48 mili 2957,05 rpm'de 0,169 mil, DCTT12 mili 2370,73 rpm'de 0,160 mil, DCTT24 mili 590,05 rpm'de 0,109 mil, DCTT36 mili 2951,13 rpm'de 0,237 mil ve DCTT48 mili ise 2938,11 rpm'de 0,033 mil olarak bulunmuştur.

Dikey yönde ölçülen titreşimler analiz yapmada, yatay yönde ölçülen titreşimler ise ölçümleri doğrulamada kullanılmıştır. Yatay doğrultuda oluşan titreşim genlikleri dikey doğrultuda oluşan titreşim genliklerini doğrular niteliktedir.

Buradan elde edilen verilere göre hem dikey hem de yatay doğrultuda daha az salınım yapan DCT36 mili en düşük genlik değerine sahip olduğu görülmektedir. DCT36 milini ise DCTT48 mili düşük genlik değeri ile takip etmektedir.



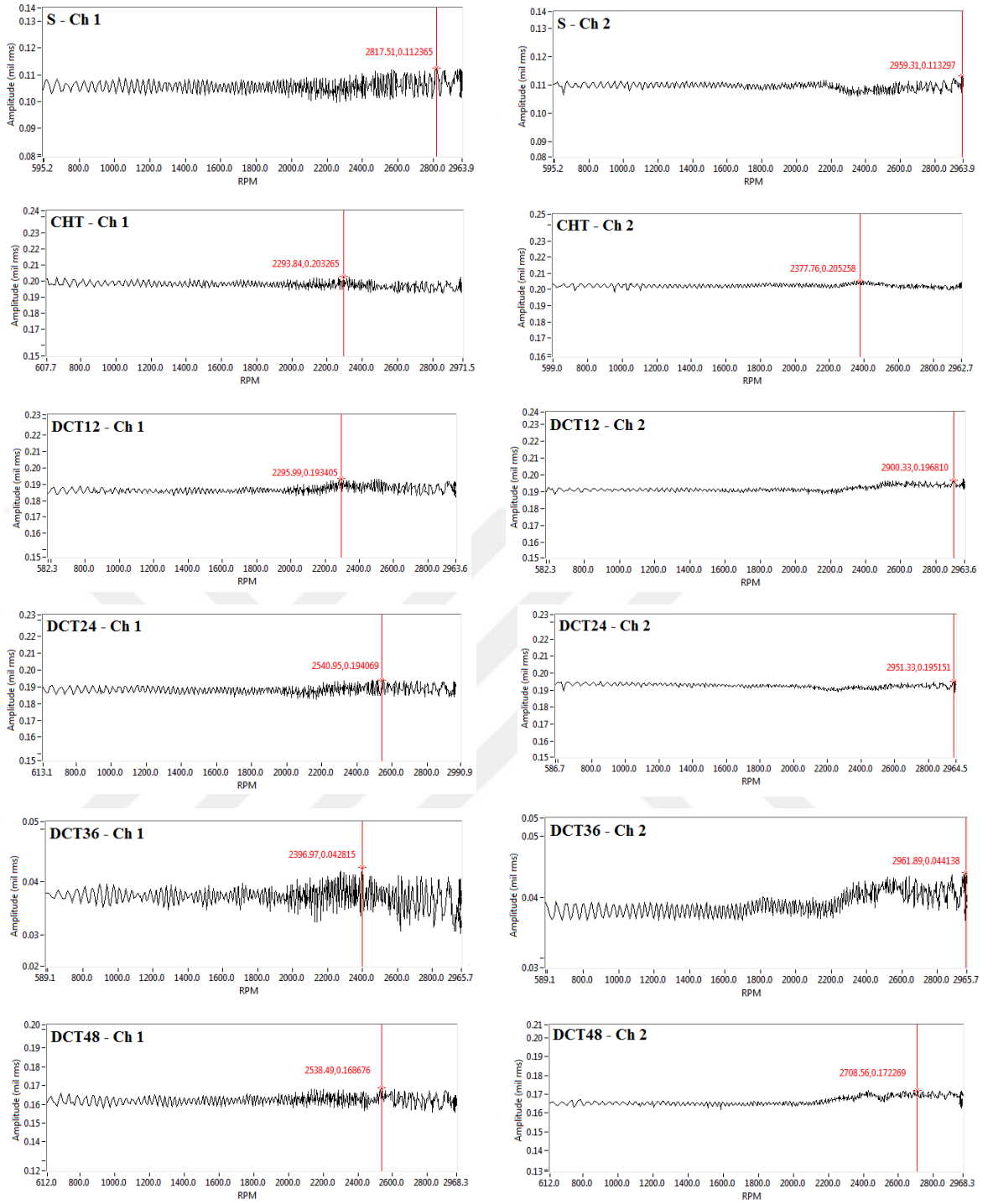
Şekil 7.3. Normal yatak destekli miller için Bode eğrisi.



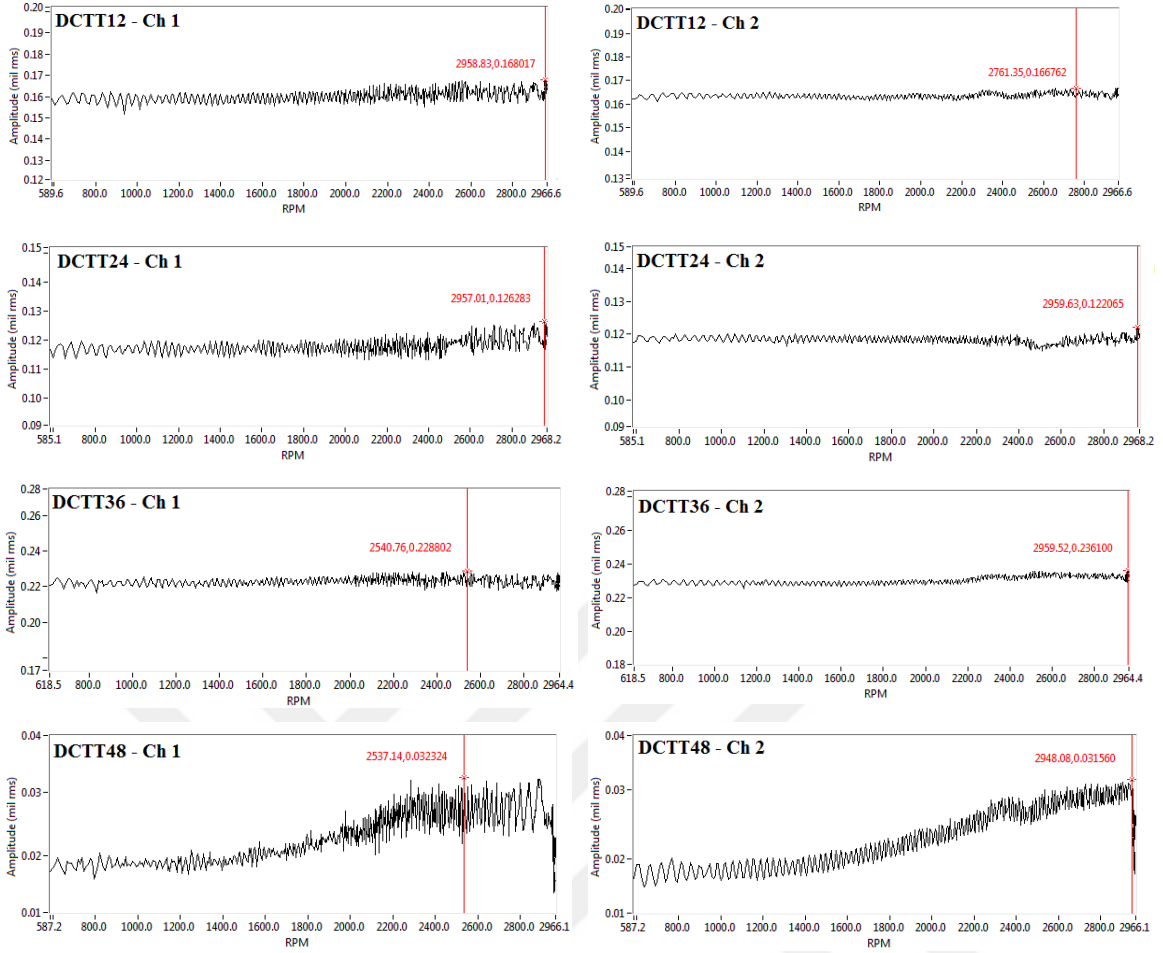
Şekil 7.4. Normal yatak destekli miller için Bode eğrisi (devamı).

Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'da görüldüğü gibi iç bilezik kusurlu yuvarlanmalı yatak destekli miller için düşey doğrultuda (Ch 1) S mili için maksimum titreşim genliği 2817,51 rpm'de 0,112 mil, CHT mili 2293,84 rpm'de 0,203 mil, DCT12 mili 2295,99 rpm'de 0,193 mil, DCT24 mili 2540,95 rpm'de 0,194 mil, DCT36 mili 2396,97 rpm'de 0,042 mil, DCT48 mili 2538,49 rpm'de 0,168 mil, DCTT12 mili ise 2958,83 rpm'de 0,168 mil, DCTT24 mili ise 2957,01 rpm'de 0,126 mil, DCTT36 mili 2540,76 rpm'de 0,228 mil, DCTT48 mili ise 2537,14 rpm'de 0,032 mil olarak bulunmuştur.

Yatay doğrultuda (Ch 2) ise S mili için maksimum titreşim genliği 2959,31 rpm'de 0,113 mil, CHT mili 2377,76 rpm'de 0,205 mil, DCT12 mili 2900,33 rpm'de 0,196 mil, DCT24 mili 2951,33 rpm'de 0,195 mil, DCT36 mili 2961,89 rpm'de 0,044 mil, DCT48 mili 2538,049 rpm'de 0,168 mil, DCTT12 mili 2761,35 rpm'de 0,166 mil, DCTT24 mili 2959,63 rpm'de 0,122 mil, DCTT36 mili 2959,52 rpm'de 0,236 mil ve DCTT48 mili ise 2948,08 rpm'de 0,031 mil olarak bulunmuştur.



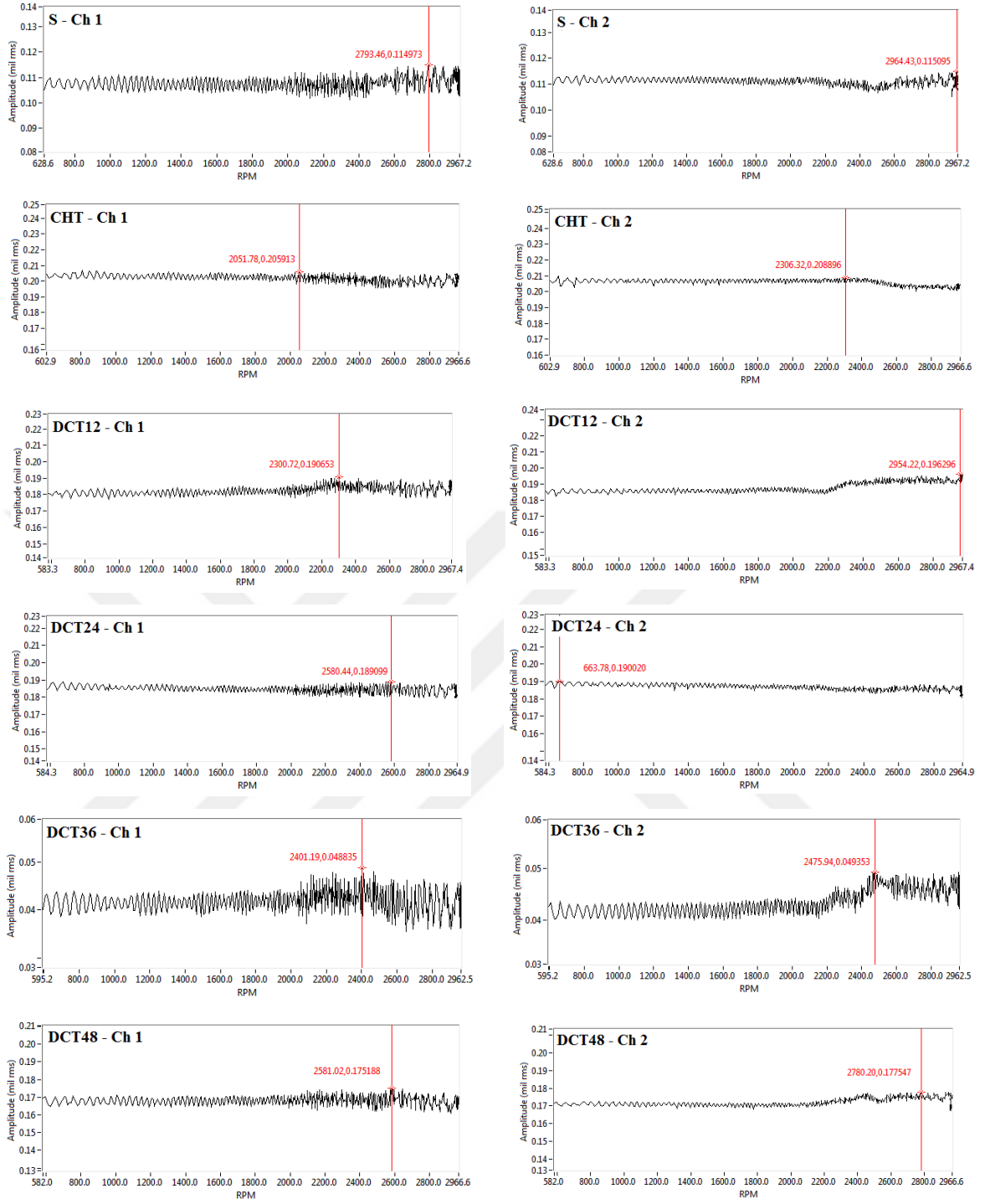
Şekil 7.5. İç bilezik kusurlu yatak destekli miller için Bode eğrisi.



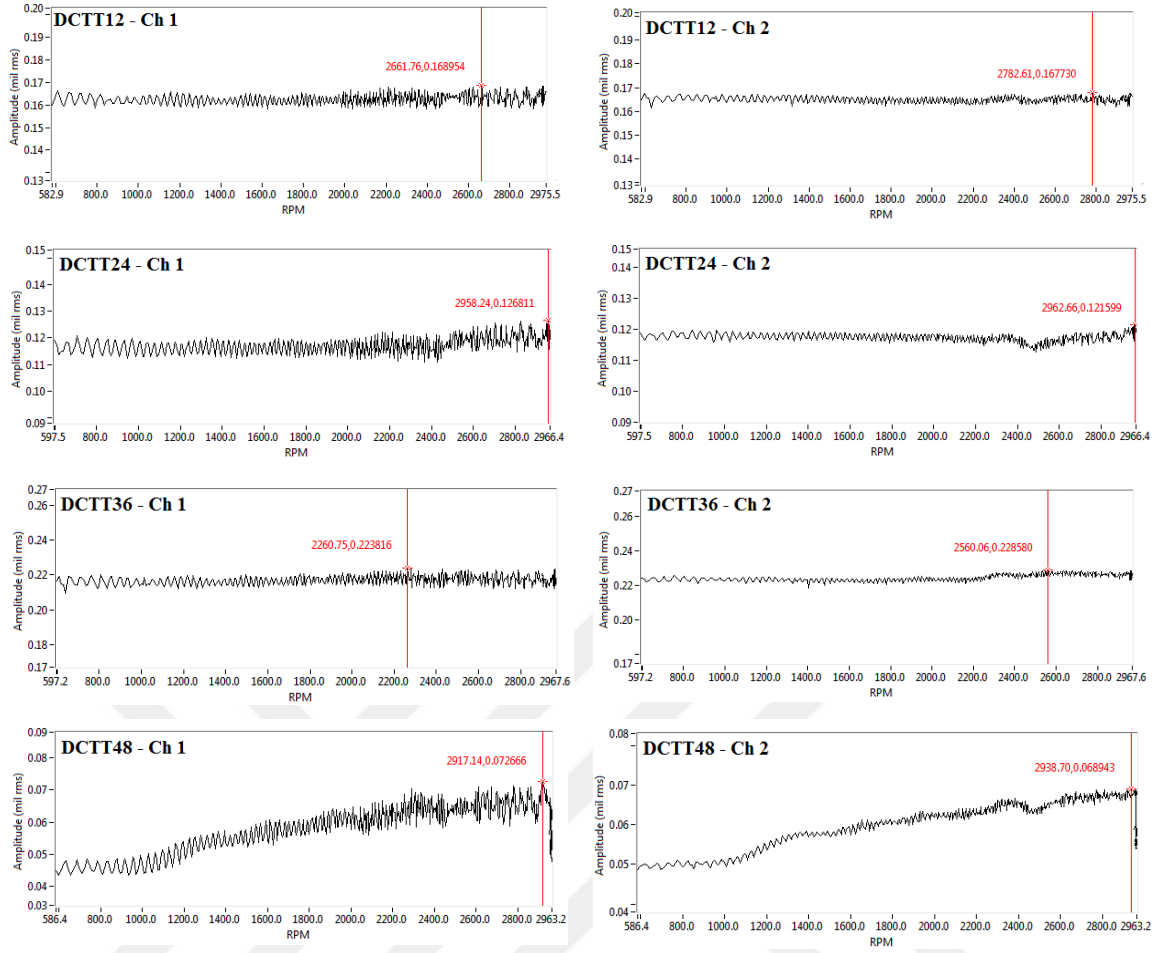
Şekil 7.6. İç bilezik kusurlu yatak destekli miller için Bode eğrisi (devamı).

Şekil 7.7 ve Şekil 7.8’de görüldüğü gibi dış bilezik kusurlu yuvarlanmalı yatak destekli miller için düşey doğrultuda (Ch 1) S mili için maksimum titreşim genliği 2793,46 rpm 0,114 mil, CHT mili 2051,78 rpm’de 0,205 mil, DCT12 mili 2300,72 rpm’de 0,190 mil, DCT24 mili 2580,44 rpm’de 0,189 mil, DCT36 mili 2401,19 rpm’de 0,048 mil, DCT48 mili 2581,02 rpm’de 0,175 mil, DCTT12 mili ise 2661,76 rpm’de 0,168 mil, DCTT24 mili ise 2958,24 rpm’de 0,126 mil, DCTT36 mili 2260,75 rpm’de 0,223 mil, DCTT48 mili ise 2917,14 rpm’de 0,072 mil olarak bulunmuştur.

Yatay doğrultuda (Ch 2) ise S mili için maksimum titreşim genliği 2964,43 rpm’de 0,115 mil, CHT mili 2306,32 rpm’de 0,208 mil, DCT12 mili 2954,22 rpm’de 0,196 mil, DCT24 mili 663,78 rpm’de 0,190 mil, DCT36 mili 2475,94 rpm’de 0,049 mil, DCT48 mili 2780,20 rpm’de 0,177 mil, DCTT12 mili 2782,61 rpm’de 0,167 mil, DCTT24 mili 2962,66 rpm’de 0,121 mil, DCTT36 mili 2560,06 rpm’de 0,238 mil ve DCTT48 mili ise 2938,70 rpm’de 0,068 mil olarak bulunmuştur.



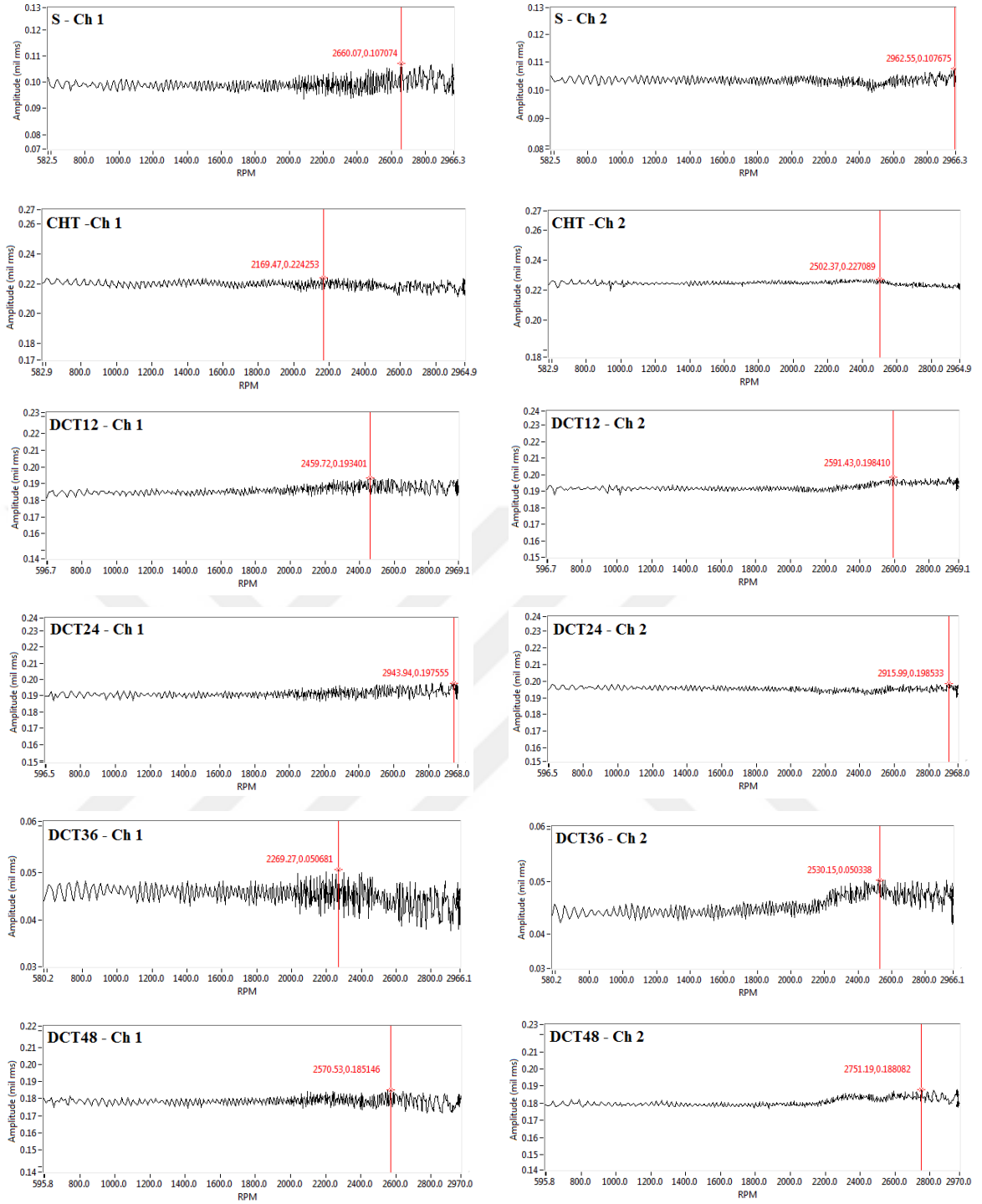
Şekil 7.7. Dış bilezik kusurlu yatak destekli miller için Bode eğrisi.



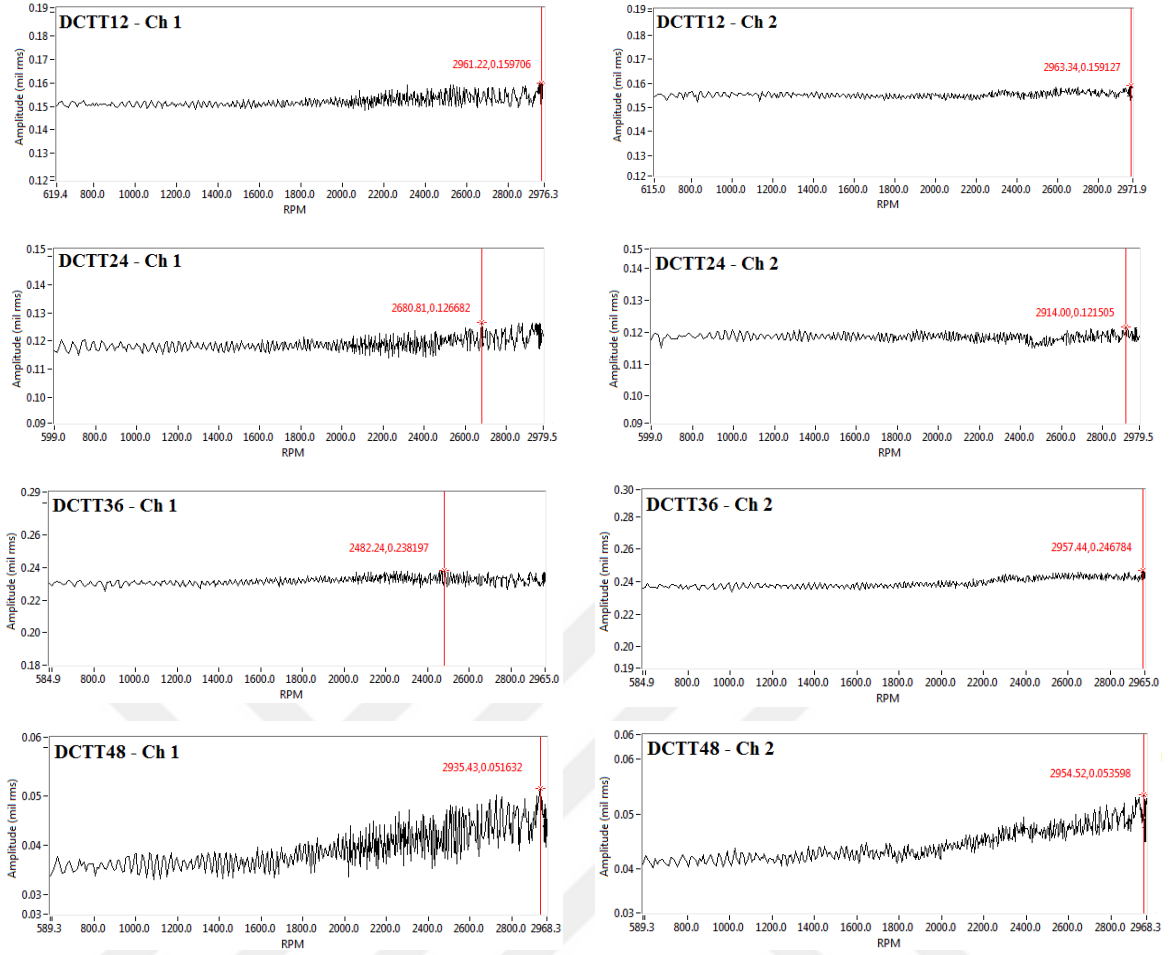
Şekil 7.8. Dış bilezik kusurlu yatak destekli miller için Bode eğrisi (devamı).

Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'da görüldüğü gibi bilye kusurlu yuvarlanmalı yatak destekli miller için düşey doğrultuda (Ch 1) S mili için maksimum titreşim genliği 2660,07rpm 0,107 mil, CHT mili 2169,47 rpm'de 0,224 mil, DCT12 mili 2459,72 rpm'de 0,193 mil, DCT24 mili 2943,94 rpm'de 0,197 mil, DCT36 mili 2269,27 rpm'de 0,050 mil, DCT48 mili 2570,53 rpm'de 0,185 mil, DCTT12 mili ise 2961,22 rpm'de 0,159 mil, DCTT24 mili ise 2680,81 rpm'de 0,126 mil, DCTT36 mili 2482,24 rpm'de 0,238 mil, DCTT48 mili ise 2935,43 rpm'de 0,051 mil olarak bulunmuştur.

Yatay doğrultuda (Ch 2) ise S mili için maksimum titreşim genliği 2962,55 rpm'de 0,107 mil, CHT mili 2502,37 rpm'de 0,227 mil, DCT12 mili 2591,43 rpm'de 0,198 mil, DCT24 mili 2915,99 rpm'de 0,198 mil, DCT36 mili 2530,15 rpm'de 0,050 mil, DCT48 mili 2751,19 rpm'de 0,188 mil, DCTT12 mili 2963,34 rpm'de 0,159 mil, DCTT24 mili 2914,0 rpm'de 0,121 mil, DCTT36 mili 2957,44 rpm'de 0,246 mil ve DCTT48 mili ise 2954,52 rpm'de 0,053 mil olarak bulunmuştur.



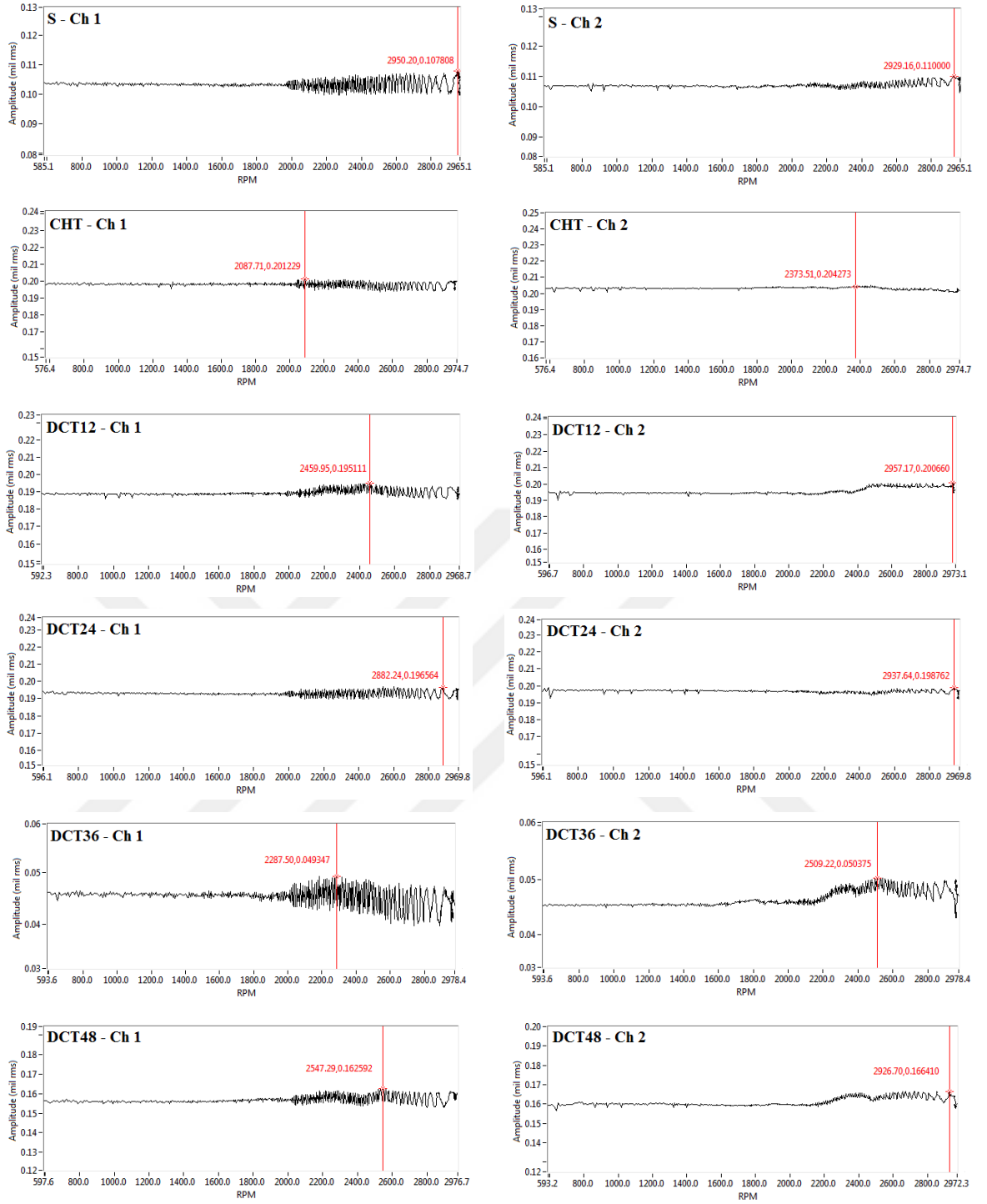
Şekil 7.9. Bilye kusurlu yatak destekli miller için Bode eğrisi.



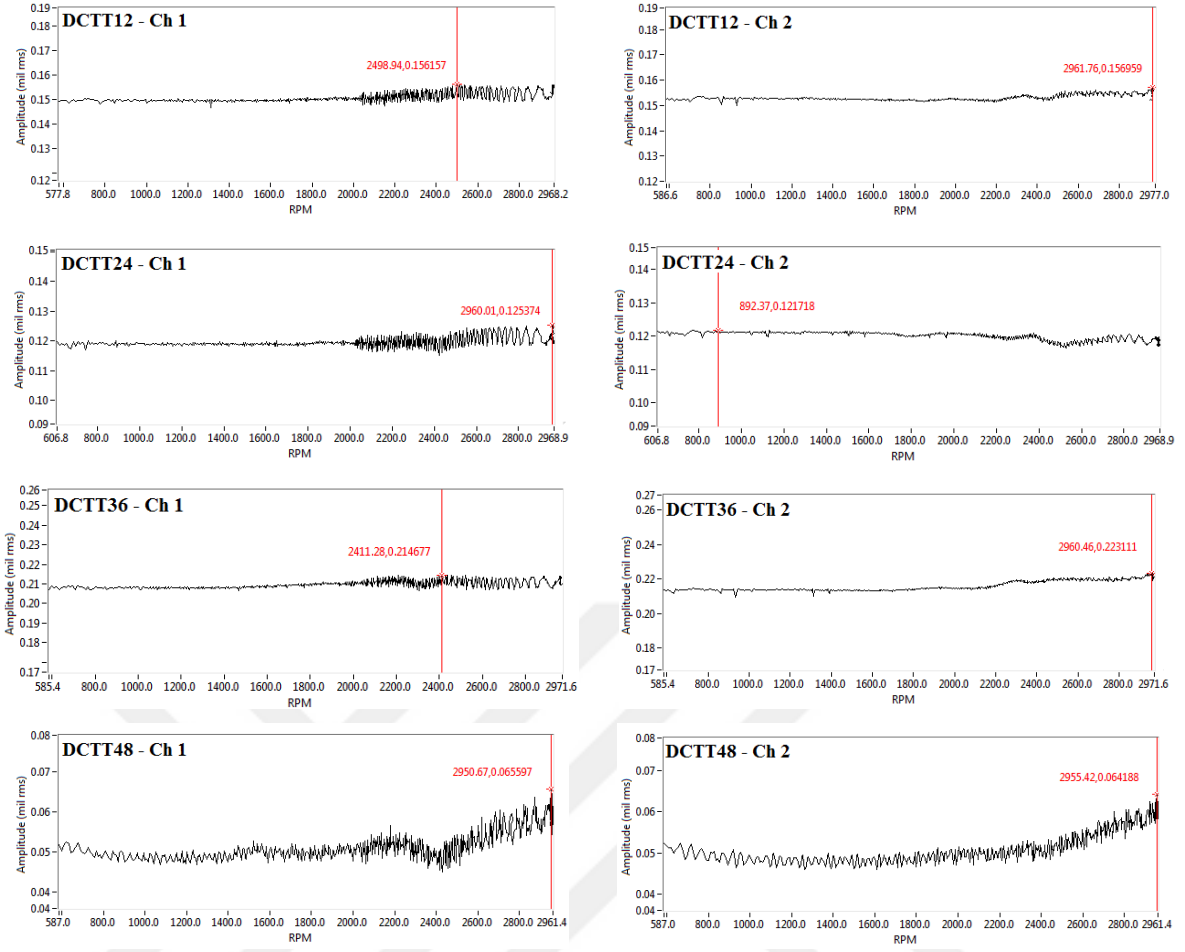
Şekil 7.10. Bilye kusurlu yatak destekli miller için Bode eğrisi (devamı).

Şekil 7.11 ve Şekil 7.12’de görüldüğü gibi hepsi kusurlu yuvarlanmalı yatak destekli miller için düşey doğrultuda (Ch 1) S mili için maksimum titreşim genliği 2950,20 rpm 0,107 mil, CHT mili 2087,71 rpm’de 0,201 mil, DCT12 mili 2459,95 rpm’de 0,195 mil, DCT24 mili 2882,24 rpm’de 0,196 mil, DCT36 mili 2287,50 rpm’de 0,049 mil, DCT48 mili 2547,29 rpm’de 0,162 mil, DCTT12 mili ise 2498,94 rpm’de 0,156 mil, DCTT24 mili ise 2960,01 rpm’de 0,125 mil, DCTT36 mili 2411,28 rpm’de 0,214 mil, DCTT48 mili ise 2950,67 rpm’de 0,065 mil olarak bulunmuştur.

Yatay doğrultuda (Ch 2) ise S mili için maksimum titreşim genliği 2959,16 rpm’de 0,110 mil, CHT mili 2373,51 rpm’de 0,204 mil, DCT12 mili 2957,17 rpm’de 0,200 mil, DCT24 mili 2937,64 rpm’de 0,198 mil, DCT36 mili 2509,22 rpm’de 0,050 mil, DCT48 mili 2926,70 rpm’de 0,166 mil, DCTT12 mili 2961,76 rpm’de 0,156 mil, DCTT24 mili 892,37 rpm’de 0,121 mil, DCTT36 mili 2960,46 rpm’de 0,223 mil ve DCTT48 mili ise 2955,42 rpm’de 0,064 mil olarak bulunmuştur.



Şekil 7.11. Hepsisi kusurlu yatak destekli miller için Bode eğrisi.



Şekil 7.12. Hepsisi kusurlu yatak destekli miller için Bode eğrisi (devamı).

Millerin çalışma devri arttıkça, titreşim genliğinde artma veya azalma meydana gelmektedir. Bu durum, sönümleme katılığının devirle doğru orantılı olarak artışı ile ilişkilendirilmiştir [1], [2], [7]. Derin kriyojenik işlem görmüş miller ve derin kriyojenik işlem sonrası temperleme işlemi görmüş millerde rijitlik daha fazla olduğu için tınlaşma (rezonans) olayı daha az görülmüştür [7]. Ayrıca dikey ve yatay yönde daha az salınım yaptığı görülmüştür.

Millerin yatay doğrultudaki bileşenlerinin düşey doğrultudaki bileşenlere kıyasla genliklerinde azalma olduğu görülmüştür. Bu sonuç, millerin üzerindeki yükten gelen kuvvetin düşey eksenini daha fazla etkilemesine ve titreşim genliğinde değişim meydana getirmesine bağlanmıştır. Ayrıca, ısıtılmış mil (CHT) ve kriyojenik işlem görmüş millerdeki (DCT) titreşimler, kriyojenik işlem sonrası temperleme işlemi görmüş millere (DCTT) göre belirgin bir şekilde daha değişken olduğu gözlemlenmiştir.

Miller kıyaslandığında düşey ve yatay doğrultuda DCTT millerinin CHT ve DCT millerine göre titreşim genliklerinin daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Bu sonucu, literatürde kriyojenik işlem ile ilgili yapılan çalışmalarda en iyi mekanik özellikleri 36 saat derin kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin sağladığı belirtilmiştir [75], [99]. Derin kriyojenik işlemle birlikte AISI 4140 çeliğinin içyapısında bulunan yumuşak bir yapıya sahip olan östenit fazının sert bir yapıya sahip olan martenzit fazına dönüşmesi sonucu daha gevrek bir yapının oluşmasına bağlanmıştır [74], [90]. DCTT millerinde ise derin kriyojenik işlem ile birlikte oluşan sert ve gevrek yapı temperleme işleminin etkisi ile sertlik değerlerinin düşerek tokluk değerlerinin artmasını sağlamıştır. Sertlikten fazla ödün vermeden tokluğun yükselmesi gerçekleşmiştir.

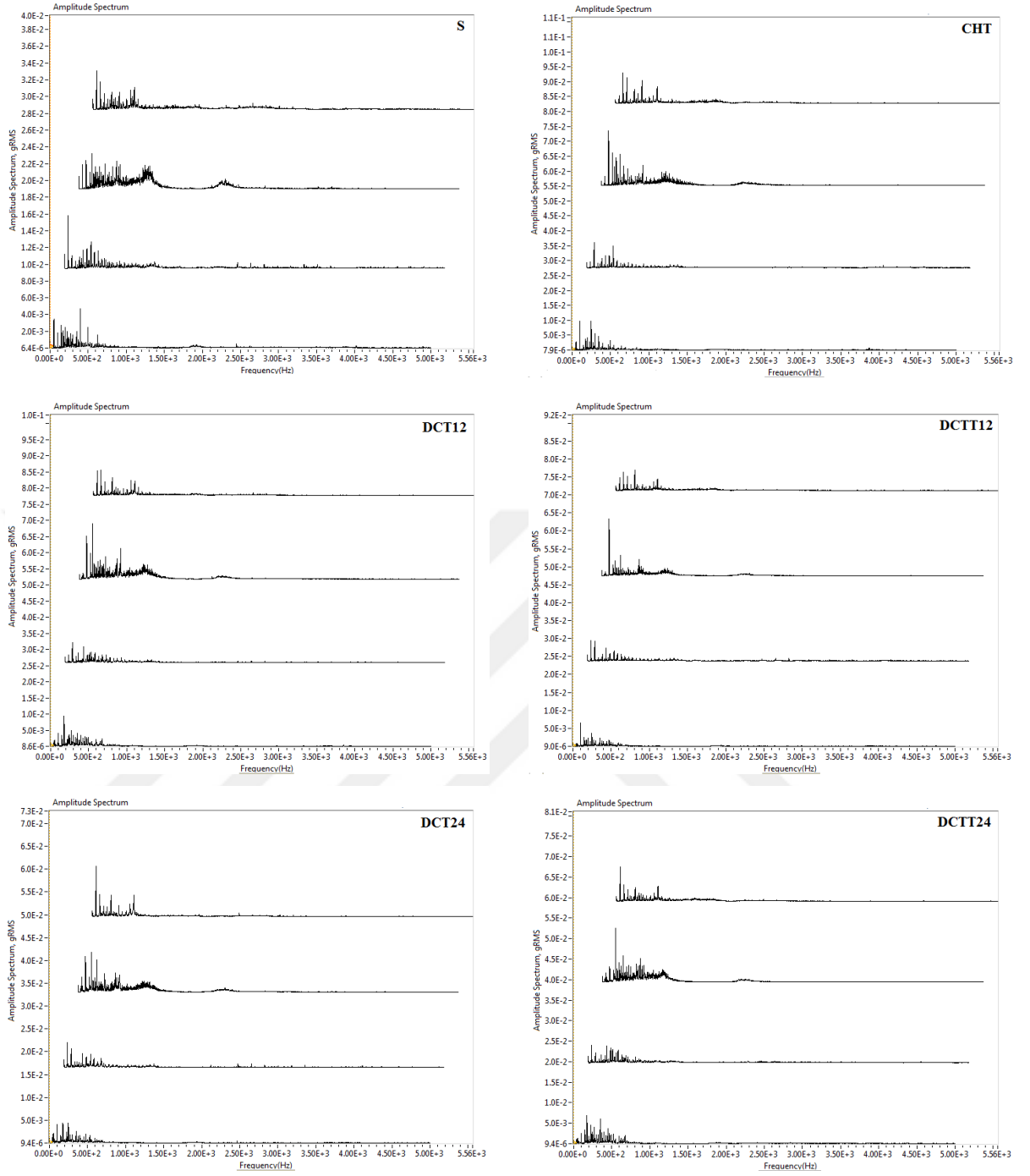
Bu çalışmada derin kriyojenik işlem uygulanmış AISI 4140 çeliğinden imal edilen millerin bekletme sürelerinin (12, 24, 36 ve 48 saat) millerin çalışma kararlılığına etkisine baktığımızda 36 saat bekletme süreli derin kriyojenik işlemli milin (DCT36) diğer millere göre daha az yer değiştirme yaptığı ve daha kararlı olduğu görülmüştür. Derin kriyojenik işlem sonrası temperleme işlemi uygulanmış miller (DCTT12, DCTT24, DCTT36 ve DCTT48) arasında ise 48 saat bekletme süreli derin kriyojenik işlemli ve temperleme işlemli milin (DCTT48) daha az yer değiştirme yaptığı görülmektedir. Ancak, ortalama genlik değeri sonuçlarına göre DCTT36 milinin daha az yer değiştirme yaptığı ve daha kararlı olduğu görülmüştür.

7.1.2. Dört Kanal Titreşim Verileri

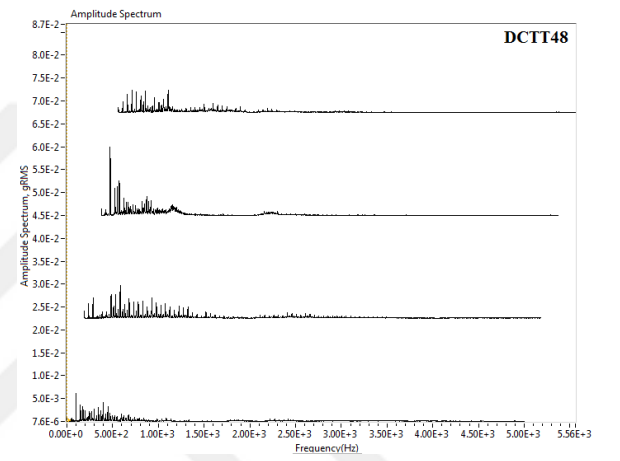
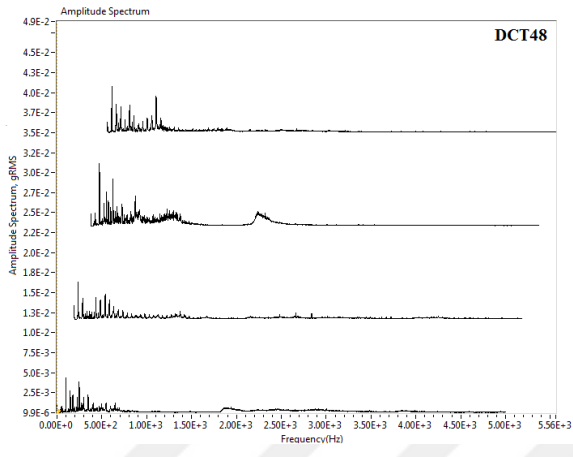
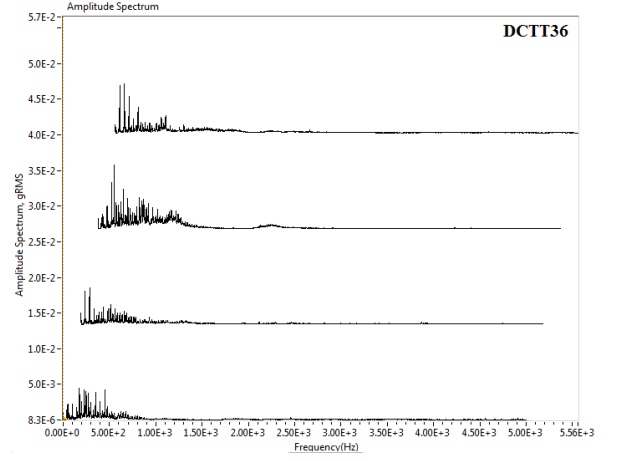
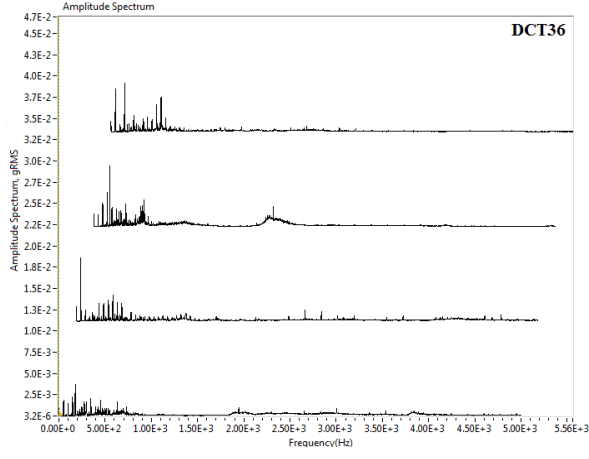
Motora yakın yatak yuvası için düşey doğrultuda (Ch 1) ve yatay doğrultuda (Ch 2) kullanılırken motordan uzak yatak yuvası için düşey doğrultuda (Ch 3) ve yatay doğrultuda (Ch 4) kullanılmıştır. Kanallara bağlı ivme ölçerler aracılığıyla mil çalışma hızı 10, 20, 30, 40 ve 50 Hz için veriler toplanmıştır. En kritik verilerin toplandığı 50 Hz olduğu için kıyaslama referansı olarak alınmıştır.

Şekil 7.13 - Şekil 7.22’de grafiklerde, bir grafikte dört kanal verilmiş ve kanallar alttan sırasıyla Ch 1, Ch 2, Ch 3 ve Ch 4 olmak üzere mil çalışma hızı 50 Hz için toplanan titreşim verileri sunulmuştur. Elde edilen titreşim verilerine göre, yuvarlanmalı yataklarda sırasıyla DCT36 mili, DCTT36 mili diğer millere göre belirgin bir şekilde daha kararlı olduğu görülmektedir. Bu millerin diğer millere göre daha az salınım yaptığı, daha az rezonansa girdiği dolayısı ile daha kararlı oldukları gözlemlenmiştir. Kusurlu yuvarlanmalı yataklarda da aynı kararlılığı sürdürdüğü görülmüş ve DCT36 ve DCTT36 milleri yine daha az salınım yapmıştır.

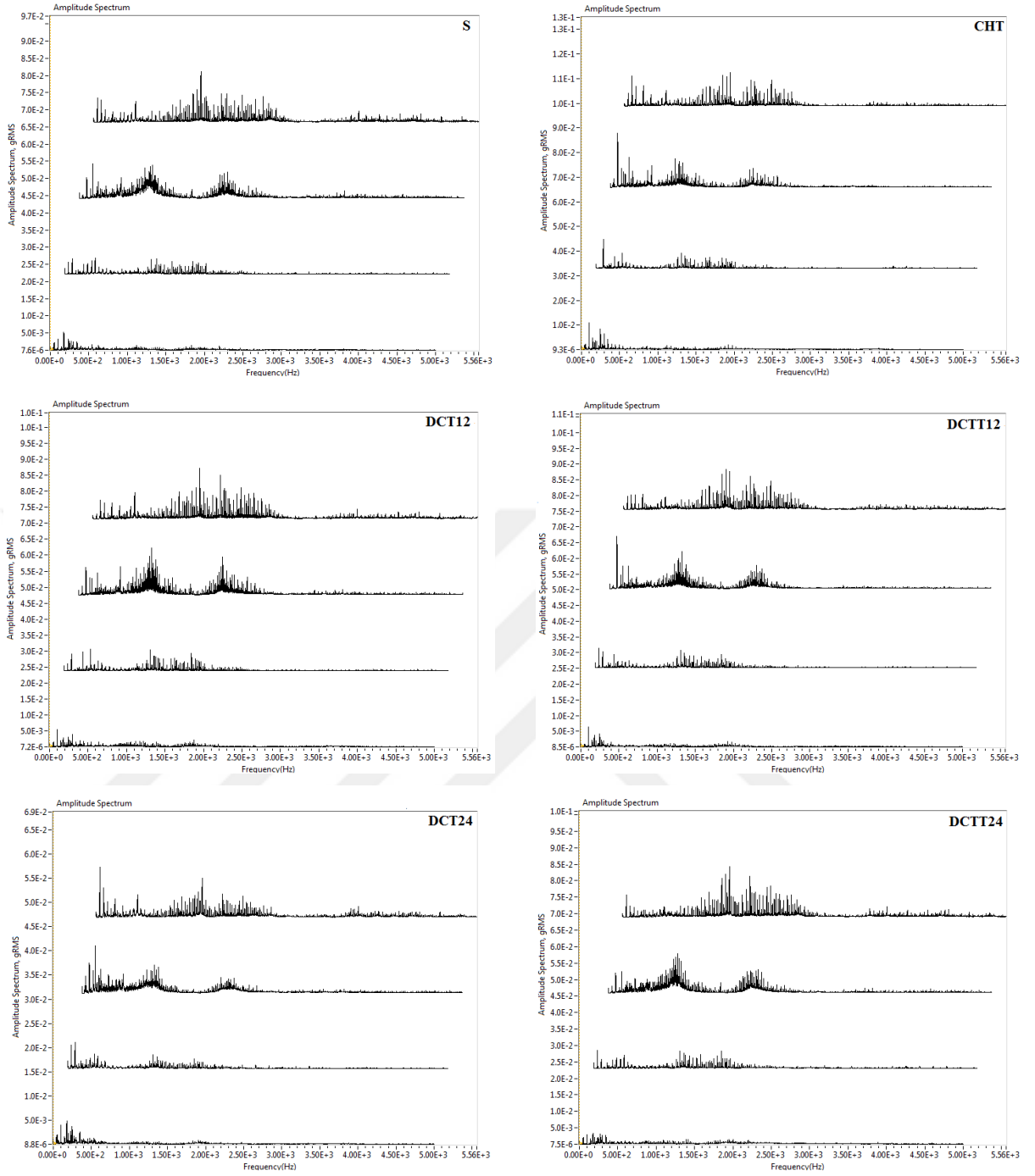
Yuvarlanmalı yataklardan elde edilen verilerden görüldüğü gibi DCT36 mili diğer millere göre titreşim genliklerinin en düşük olduğu mildir.



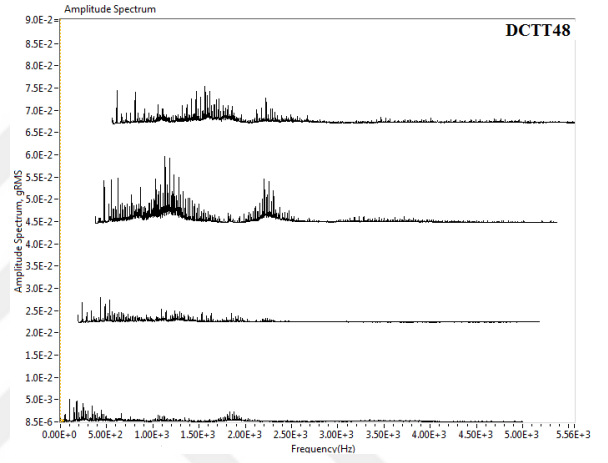
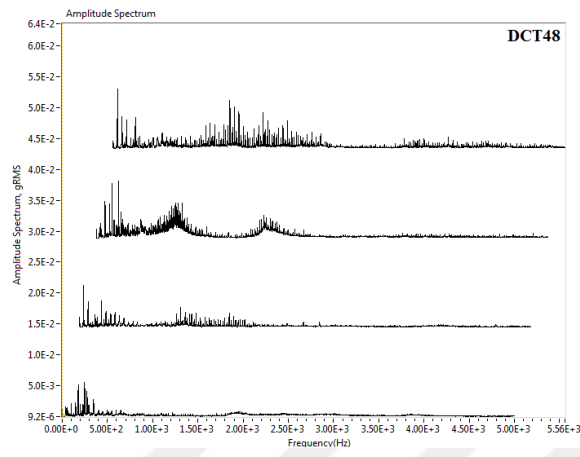
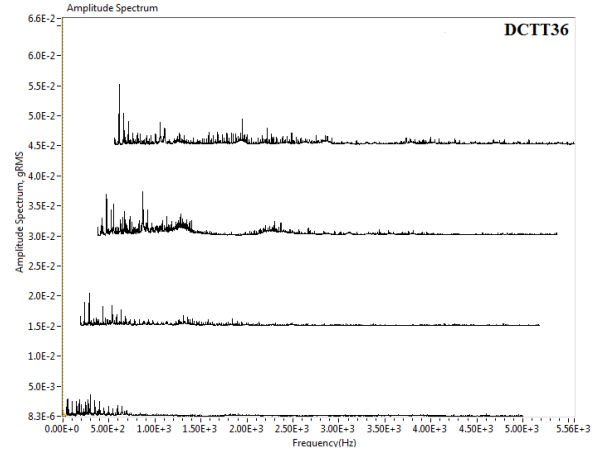
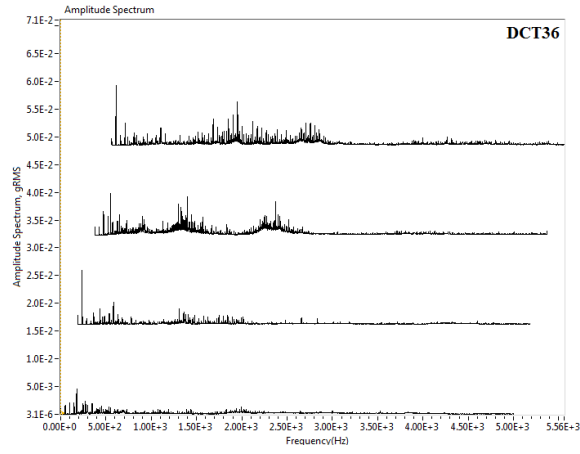
Şekil 7.13. Normal yatakların titreşim verileri.



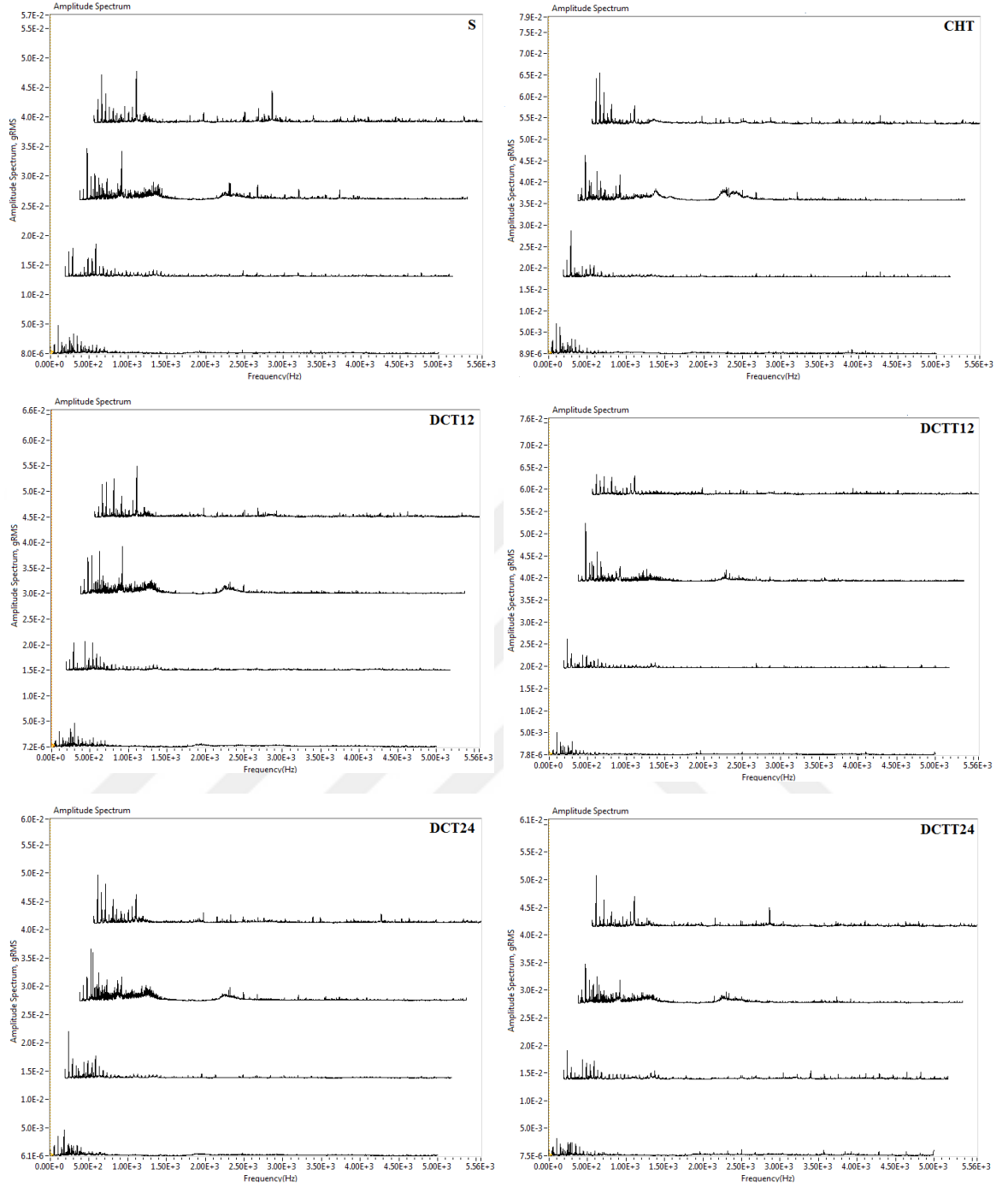
Şekil 7.14. Normal yatakların titreşim verileri (devamı).



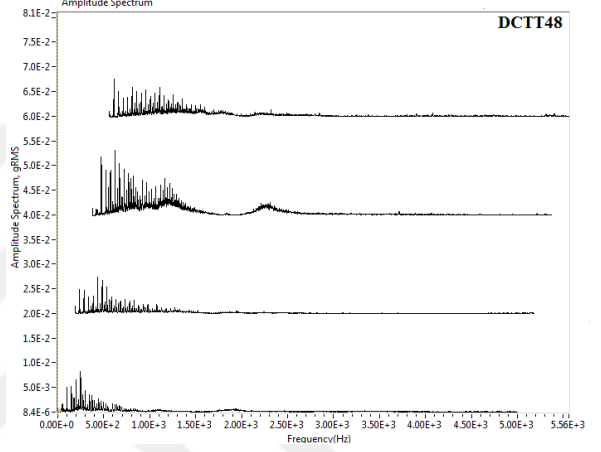
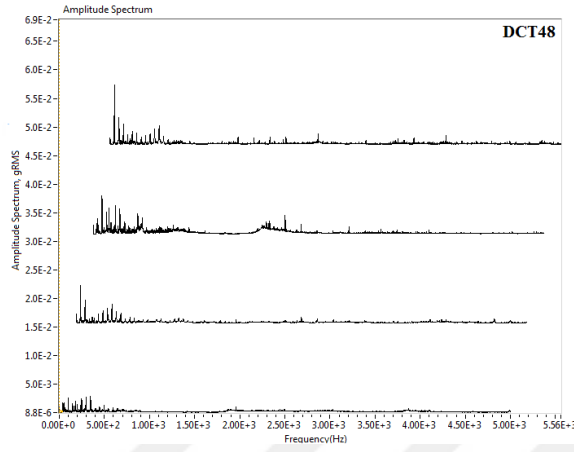
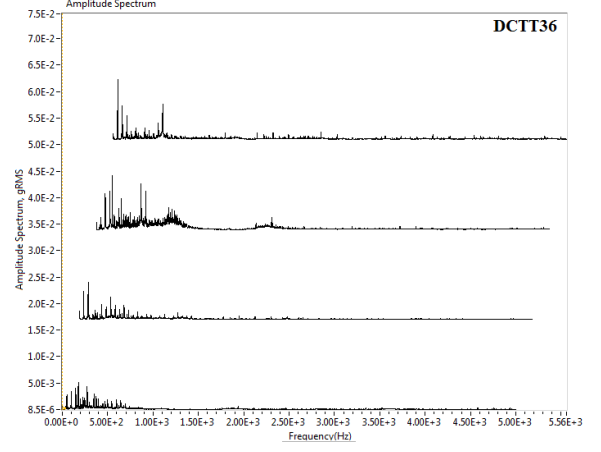
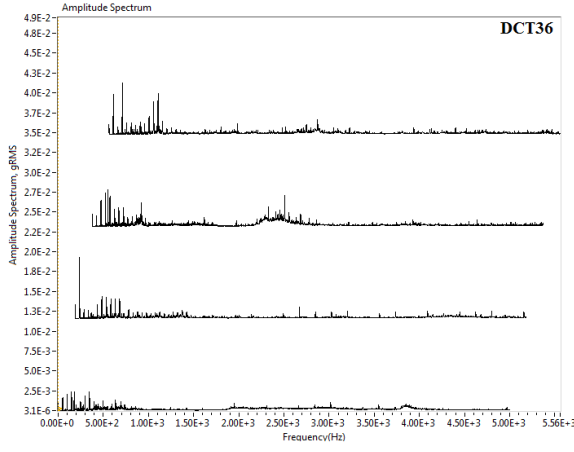
Şekil 7.15. İç bileziği kusurlu yatakların titreşim verileri.



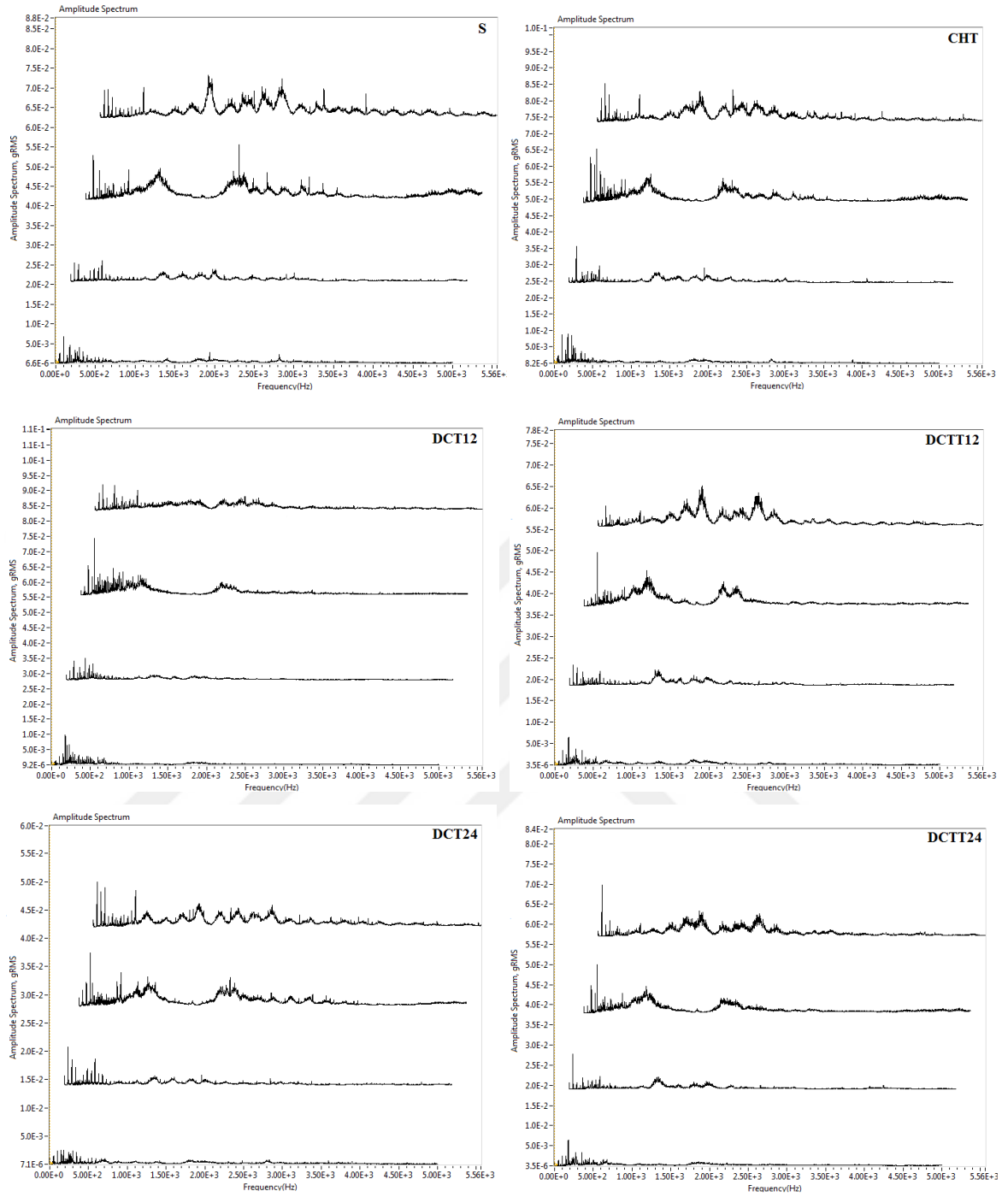
Şekil 7.16. İç bileziği kusurlu yatakların titreşim verileri (devamı).



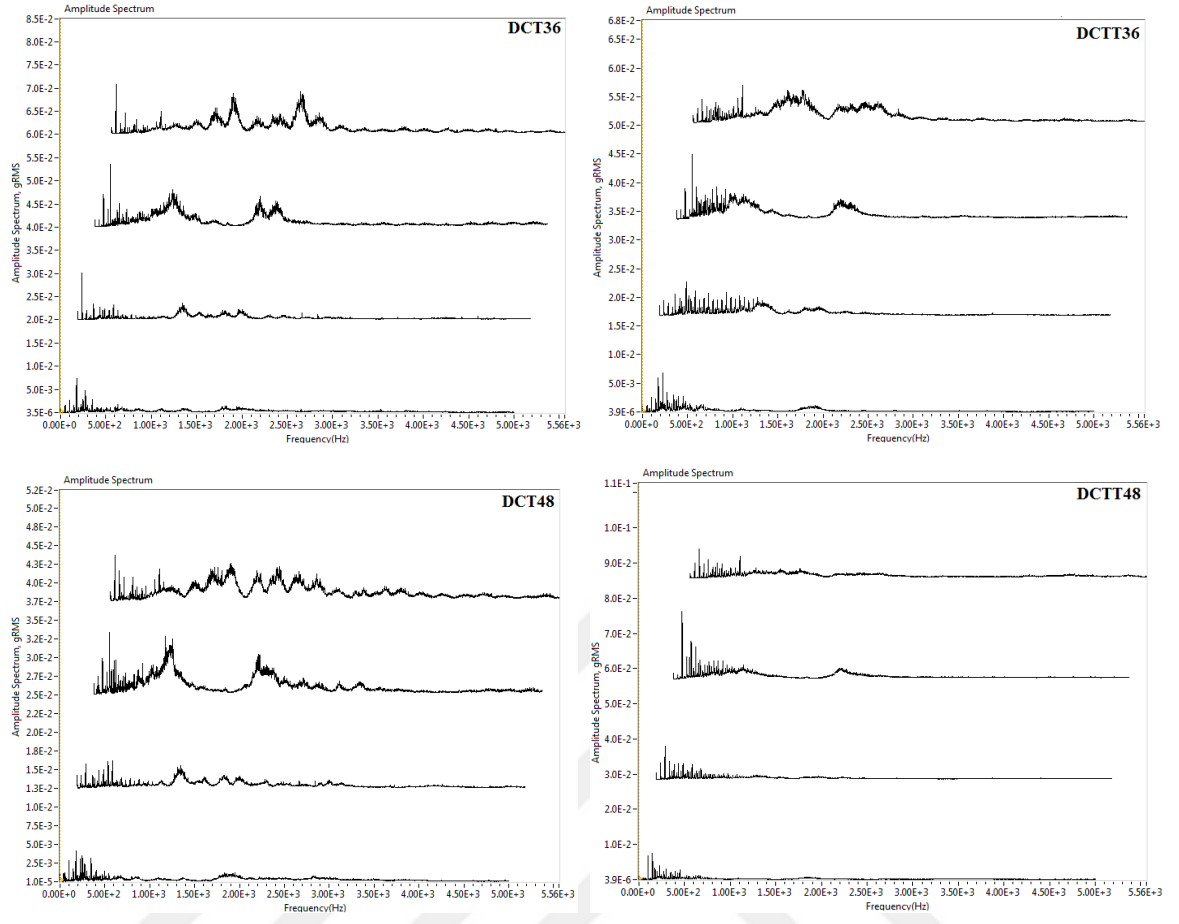
Şekil 7.17. Dış bileziği kusurlu yatakların titreşim verileri.



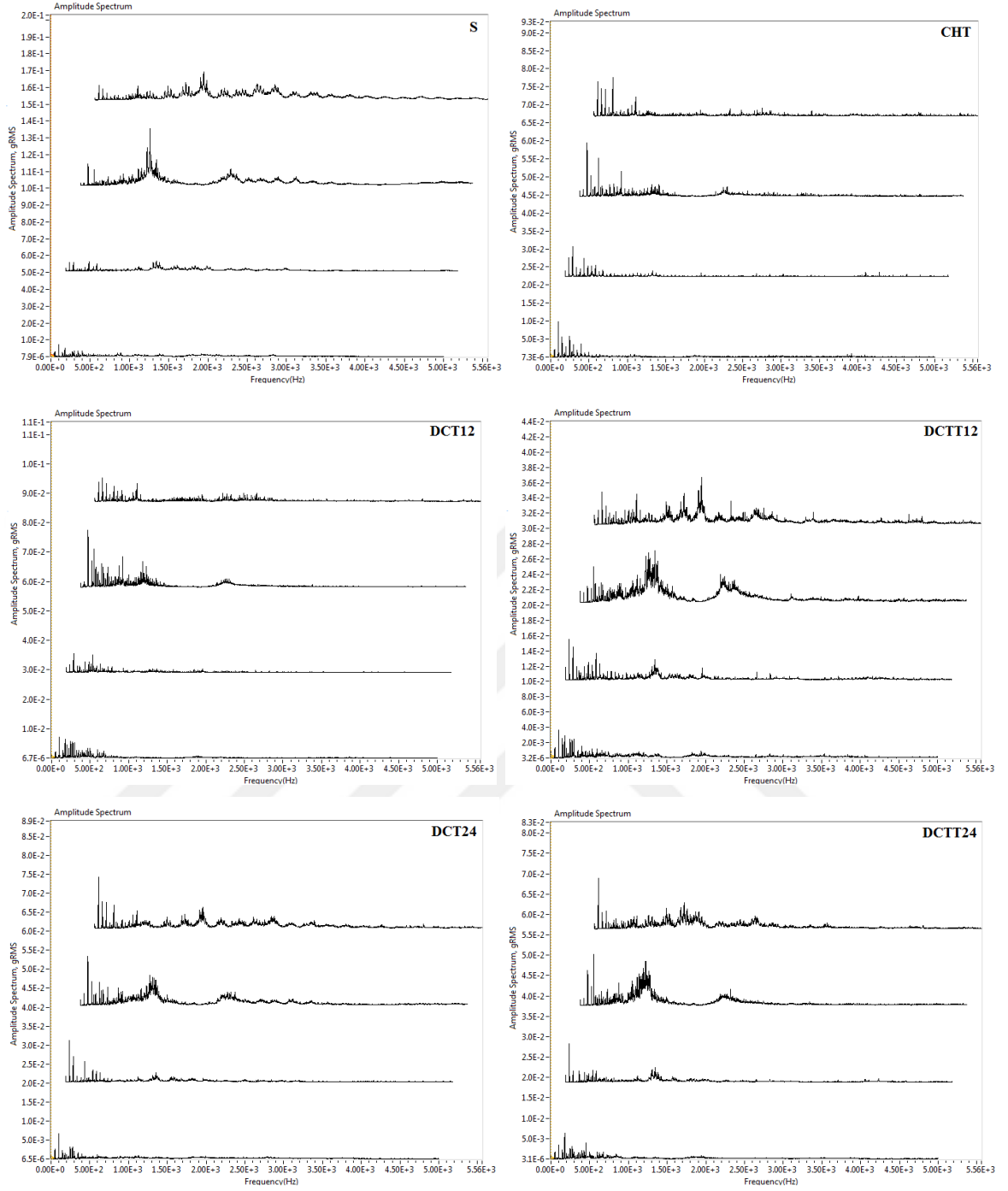
Şekil 7.18. Dış bileziği kusurlu yatakların titreşim verileri (devamı).



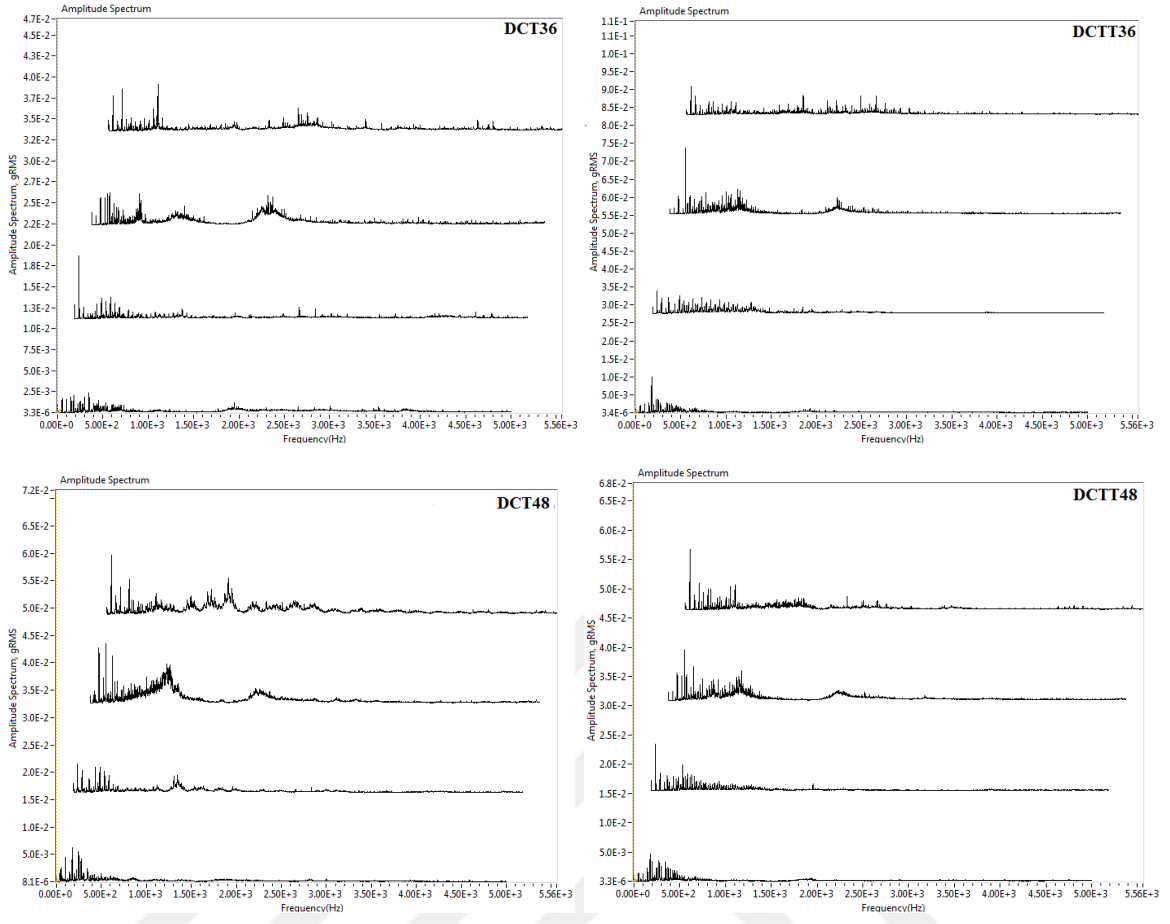
Şekil 7.19. Bilye kusurlu yatakların titreşim verileri.



Şekil 7.20. Bilye Kusurlu yatakların titreşim verileri (devamı).



Şekil 7.21. Hepsisi kusurlu yatakların titreşim verileri.



Şekil 7.22. Hepsi kusurlu yatakların titreşim verileri (devamı).

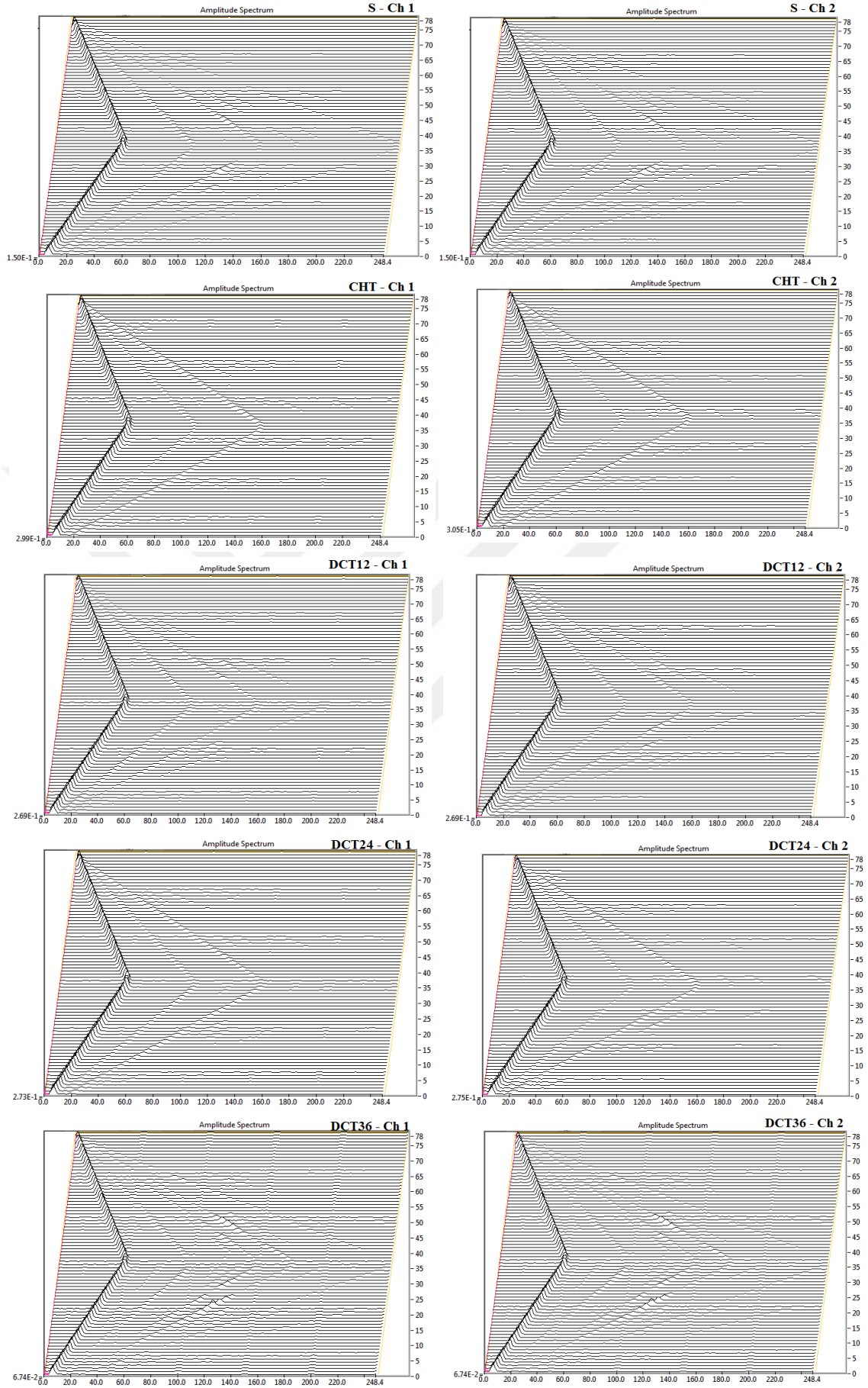
7.1.3. Şelale (waterfall) Grafikleri

Deplasman ölçer (proxy probe) sensörleri ile miller için elde edilen şelale (waterfall) titreşim spektrumları verilmiştir. Miller için düşey (Ch 1) ve yatay (Ch 2) doğrultuda çalışma hızlarının durma (0 rpm) durumundan 3000 rpm'e yükselerek ve tekrar durma noktasına gelmesi sırasında yakalanan titreşim spektrumu verileri elde edilmiştir.

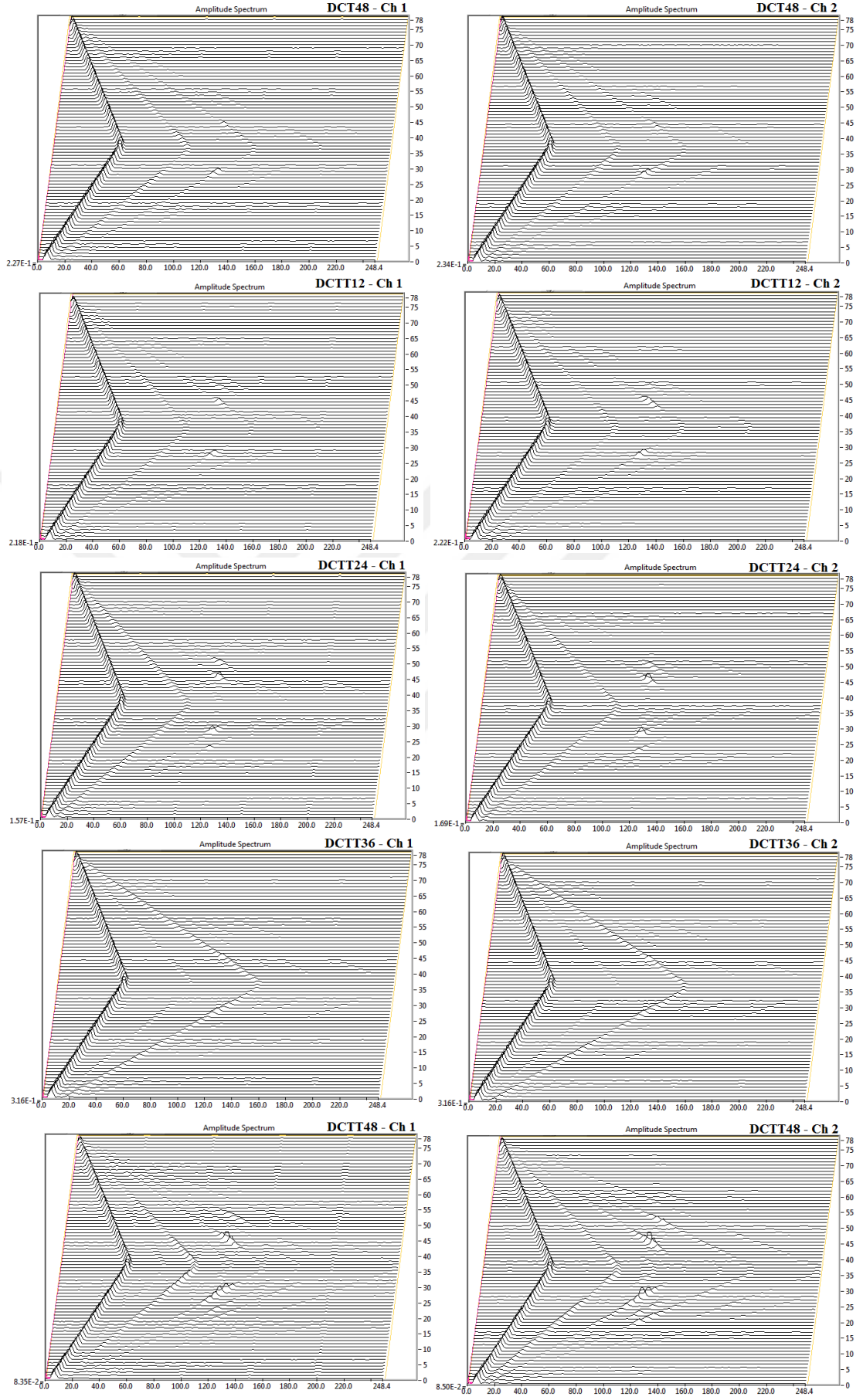
Şekil 7.23 - Şekil 7.32'de grafiklerde waterfall verileri tüm yataklarda iki kanal (düşey - Ch 1 ve yatay - Ch 2) olarak sunulmuştur.

Elde edilen bulgular karşılaştırıldığında sırasıyla DCT36 ve DCTT36 millerinin diğer millere göre daha az rezonansa girdiği görülmektedir. Kusurlu yuvarlanmalı yataklarda da aynı kararlılıklarını sürdürdüğü görülmüştür.

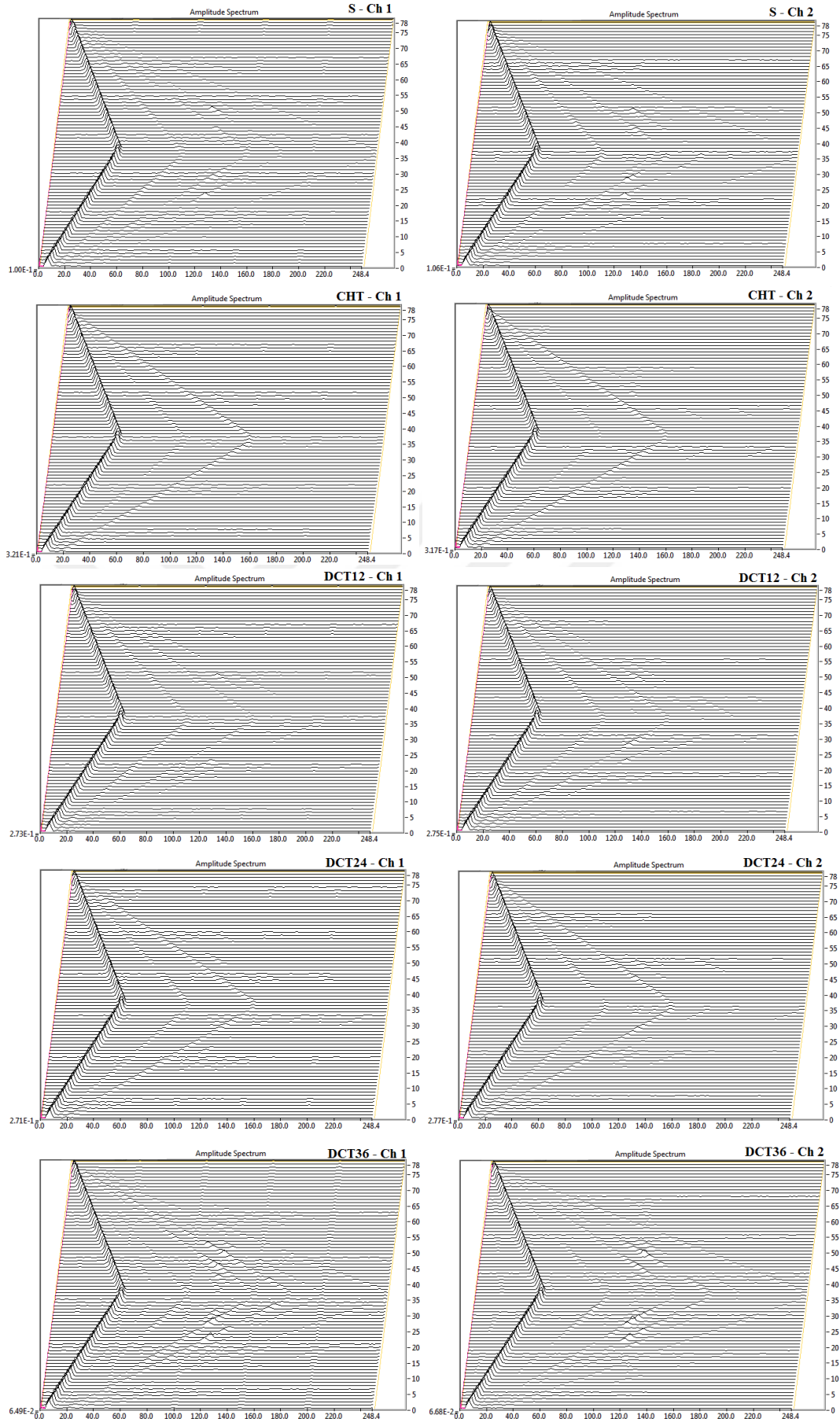




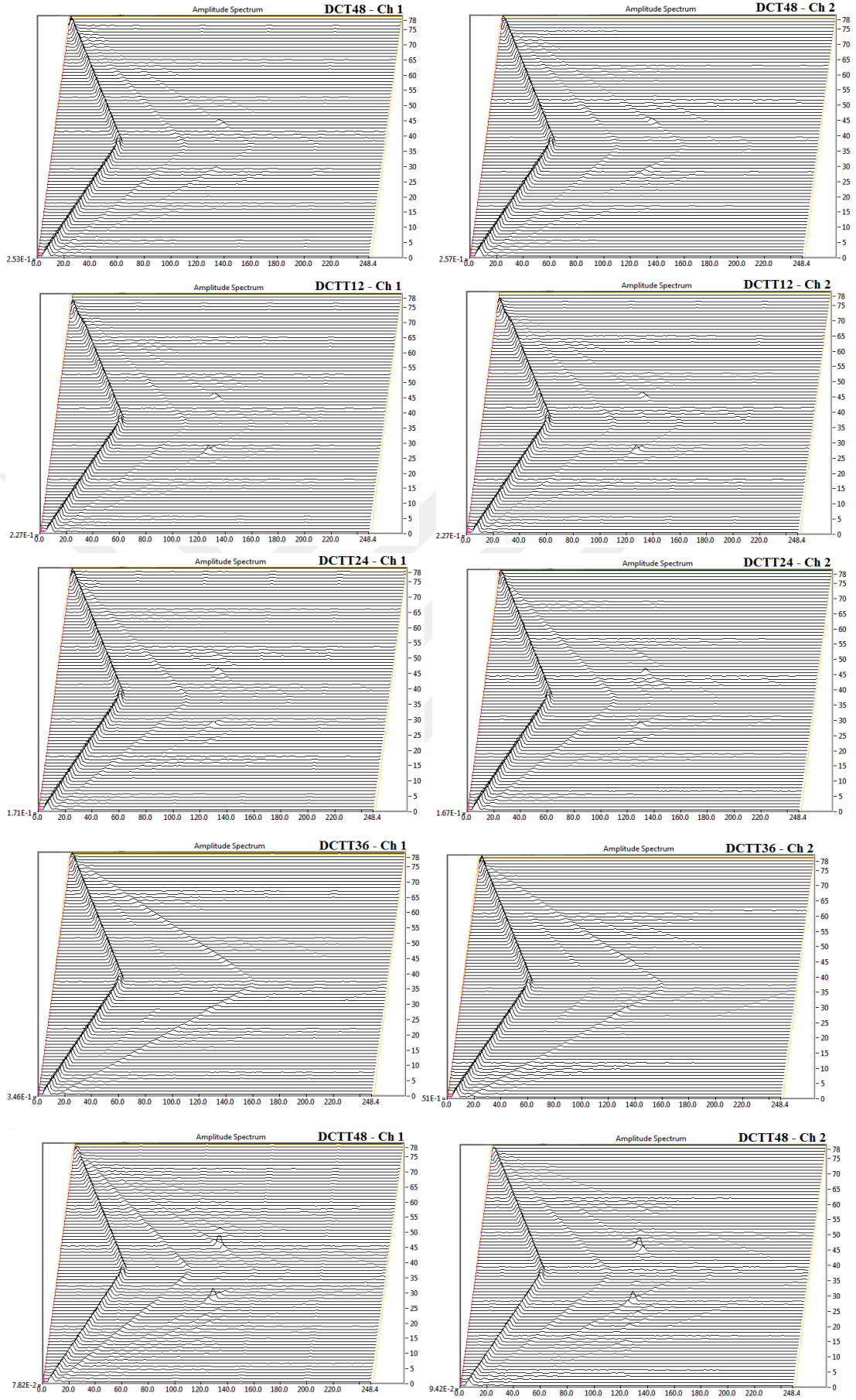
Şekil 7.23. Normal yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi.



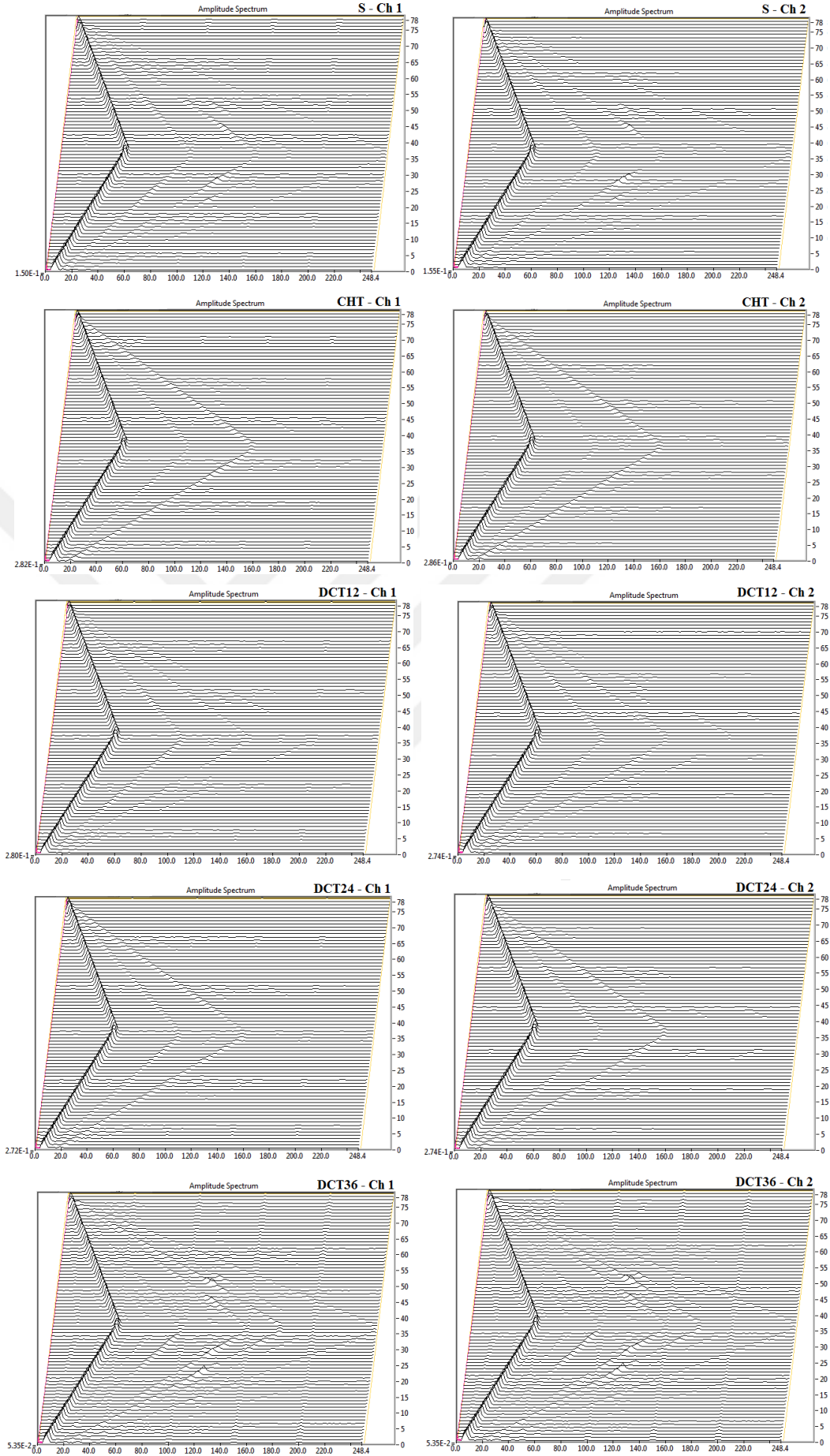
Şekil 7.24. Normal yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi (devamı).



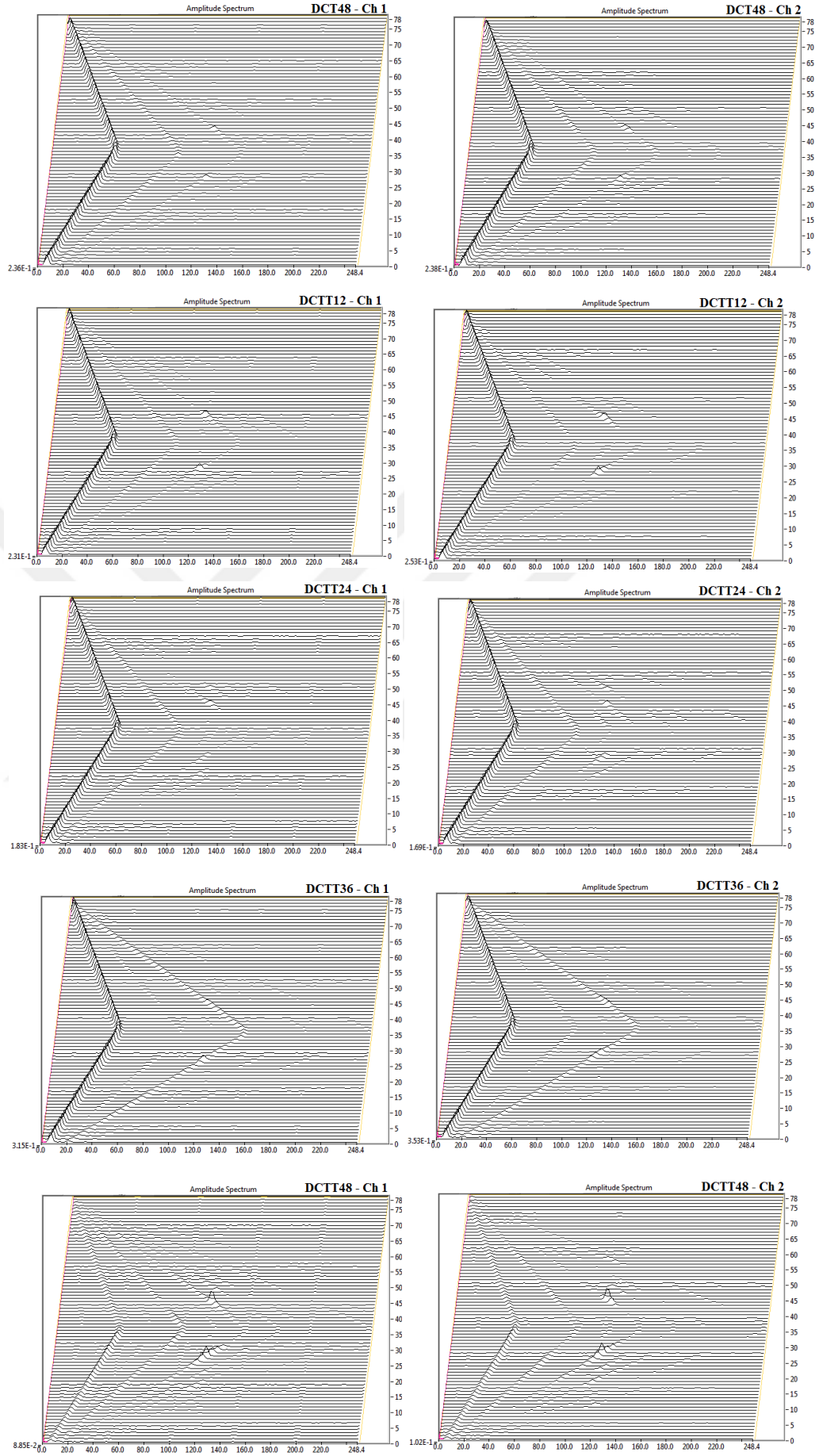
Şekil 7.25. Bilye kusurlu yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi.



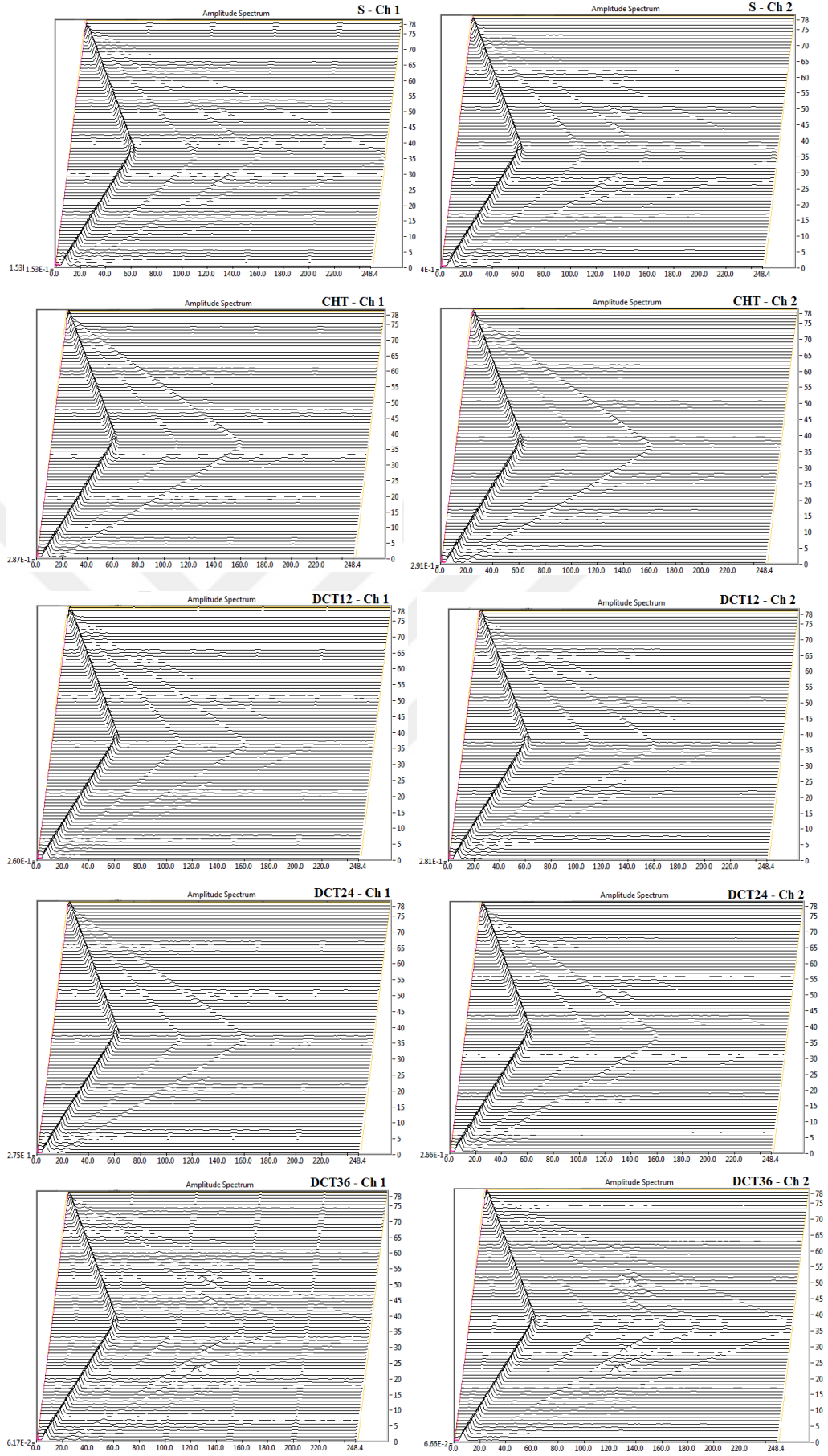
Şekil 7.26. Bilye kusurlu yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi (devamı).



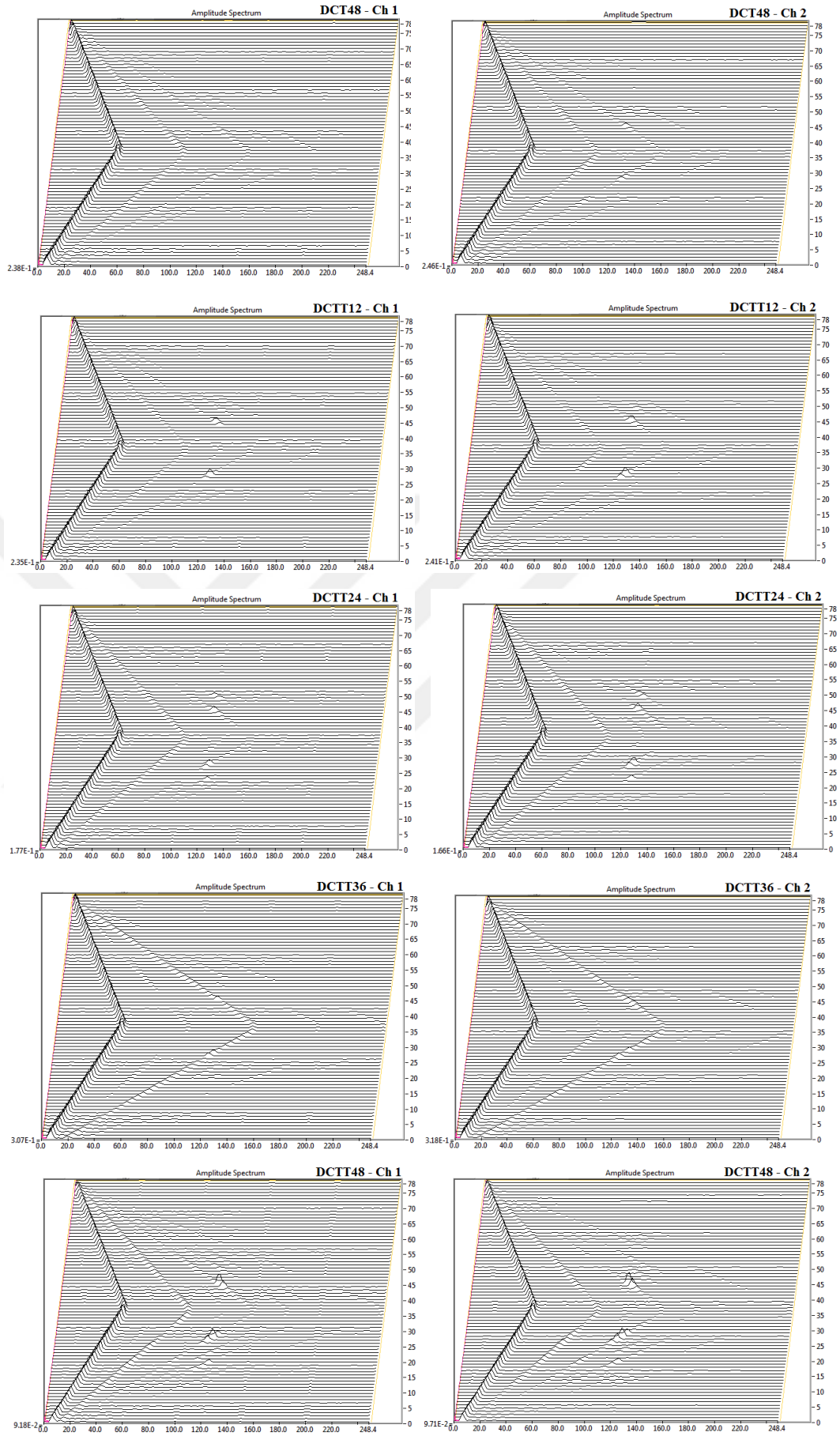
Şekil 7.27. İç bilezik kusurlu yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi.



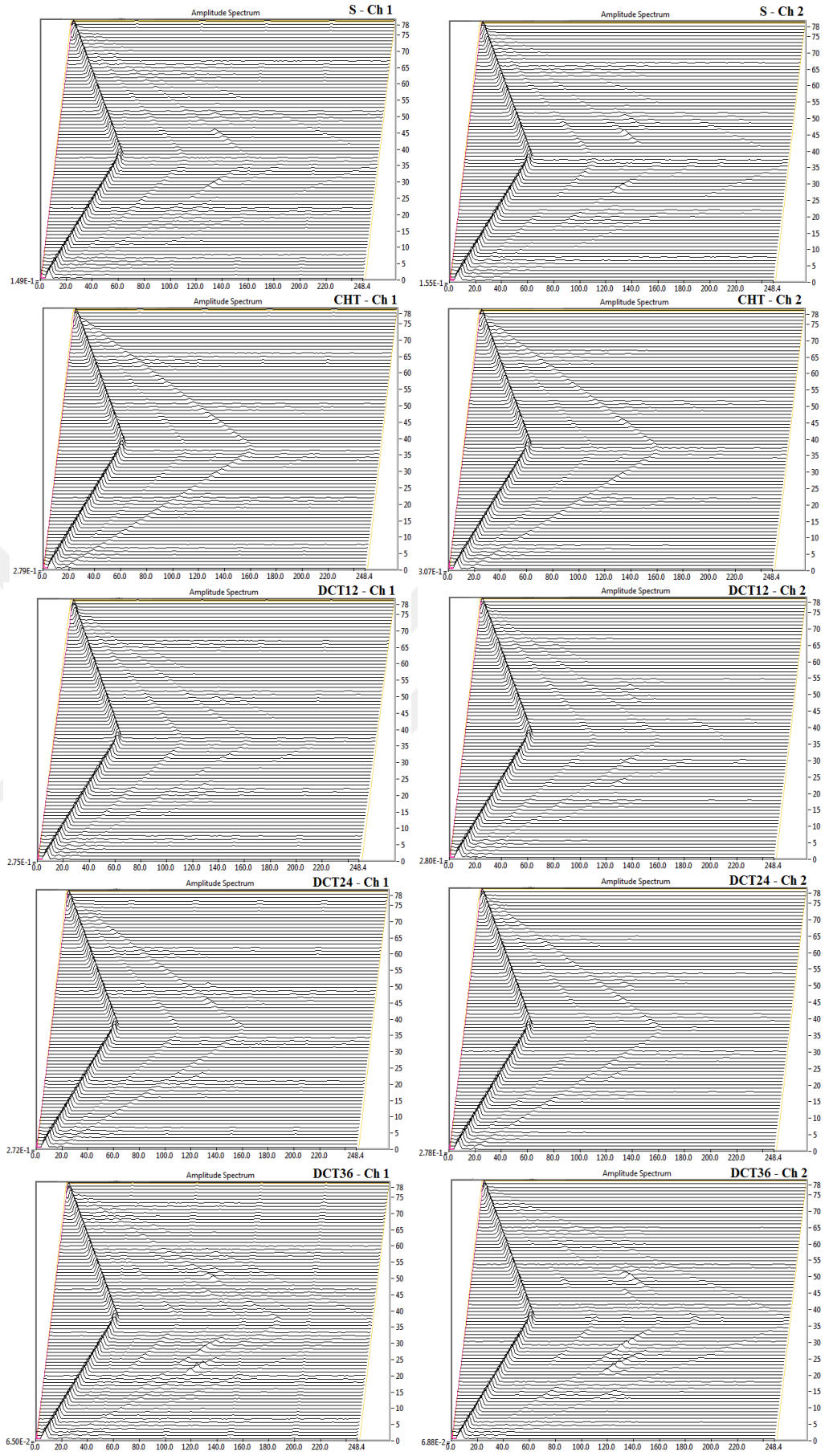
Şekil 7.28. İç bilezik kusurlu yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi (devamı).



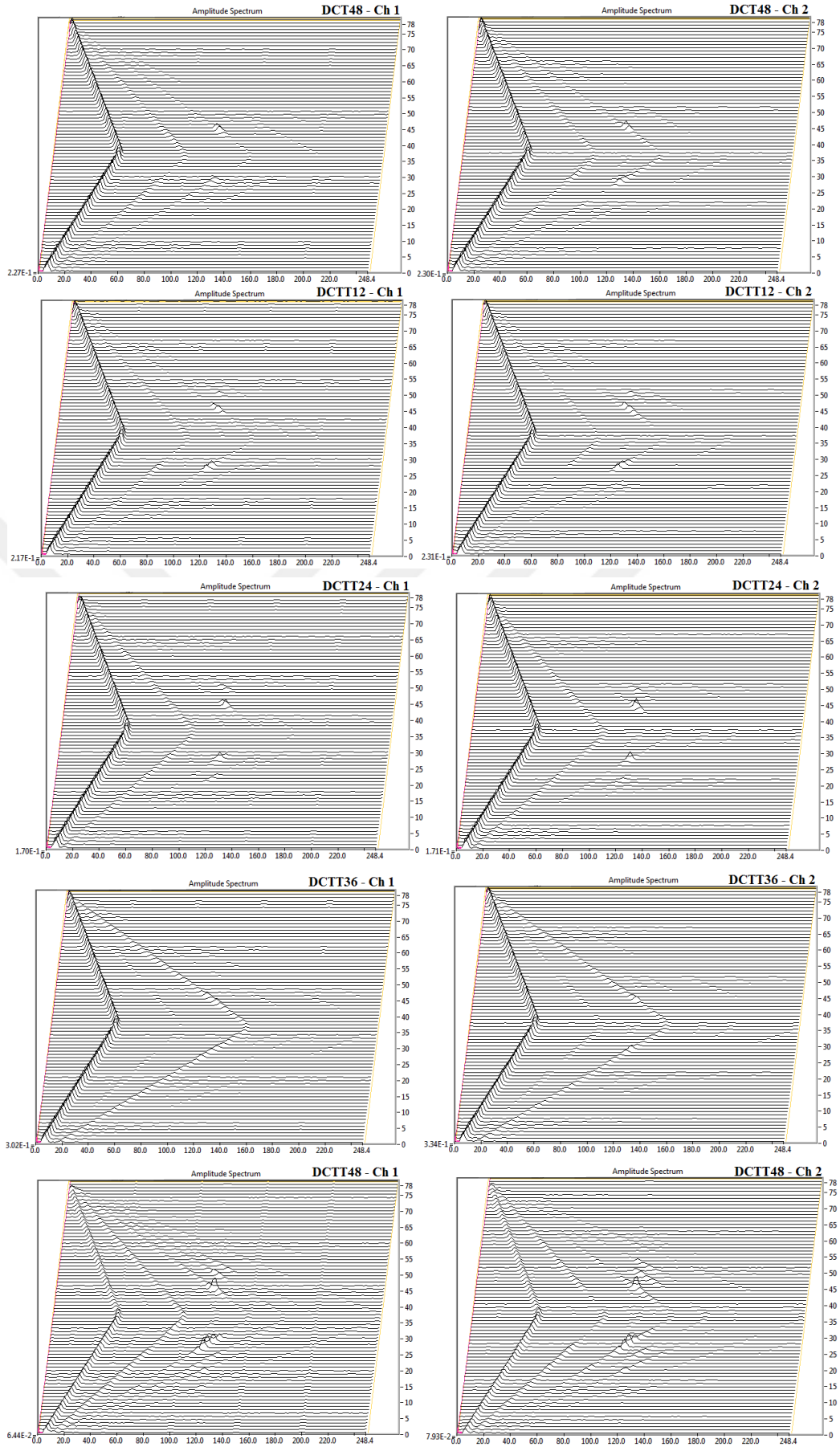
Şekil 7.29. Dış bilezik kusurlu yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi.



Şekil 7.30. Dış bilezik kusurlu yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi (devamı).



Şekil 7.31. Hepsi kusurlu yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi.



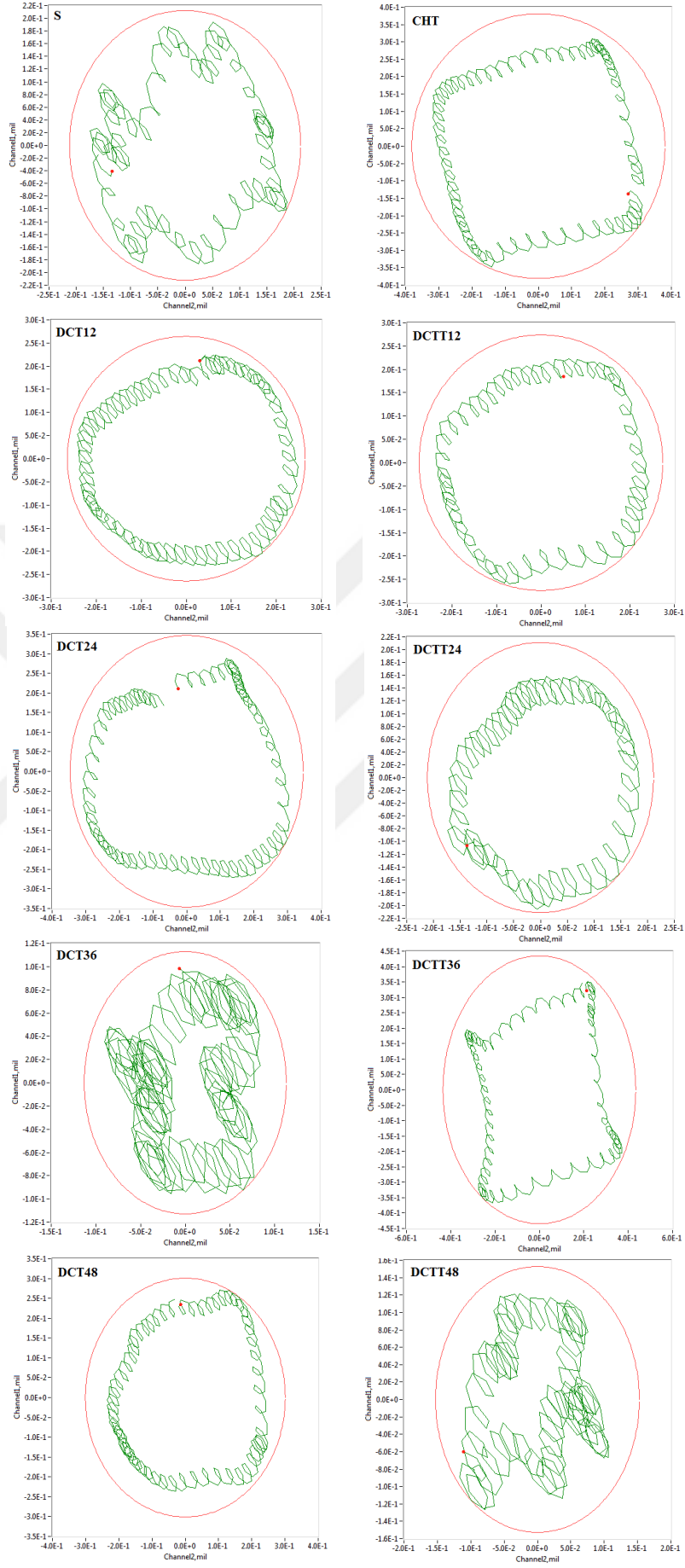
Şekil 7.32. Hepsi kusurlu yatak destekli miller için waterfall titreşim analizi (devamı).

7.1.4. Yörünge (orbit) Grafikleri

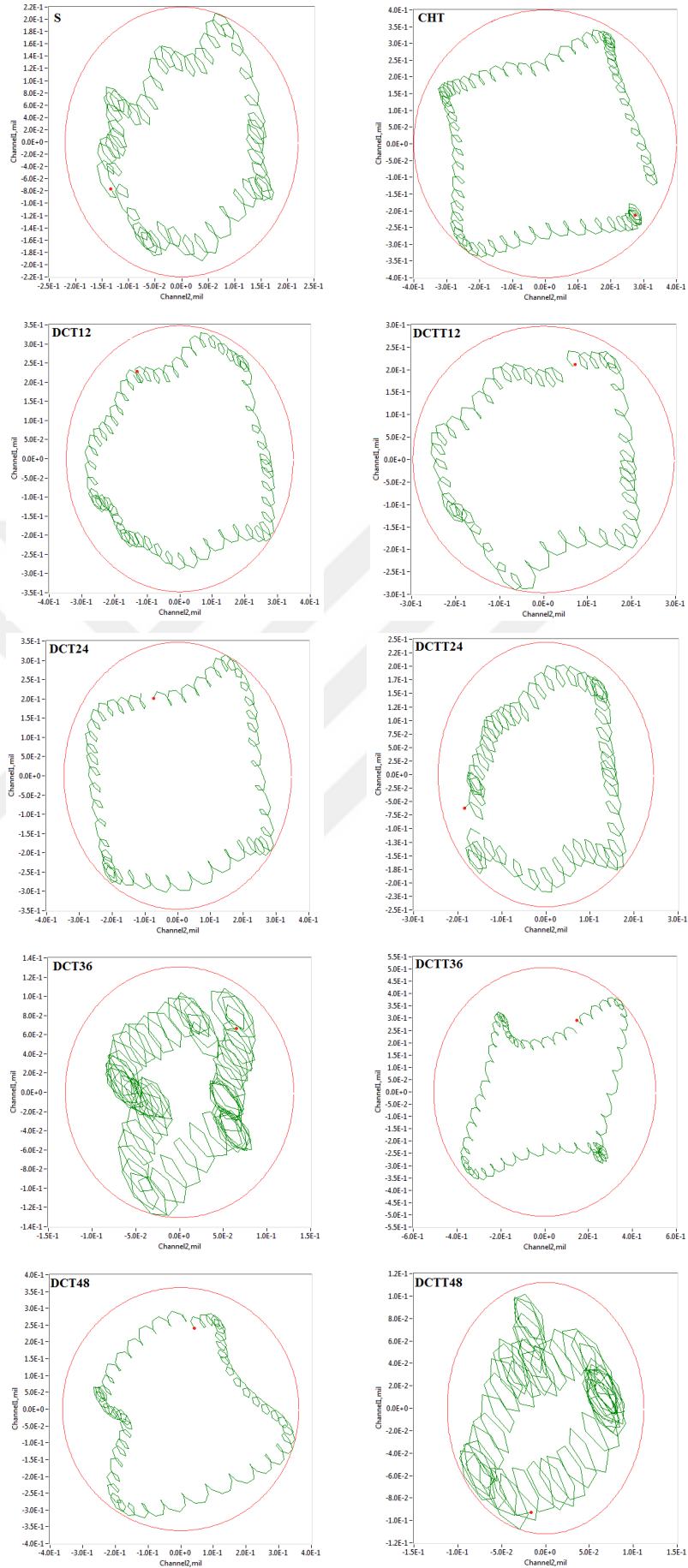
Şekil 7.33 - Şekil 7.36'da bütün miller için yörünge (orbit) analizi ile düşey (Ch 1) ve yatay (Ch 2) doğrultuda mil eksen çizgisinin hareketi yörüngesel olarak verilmiştir. Yörünge üzerindeki nokta milin salınım dalgasının başlangıç noktası olarak kaydedilmiştir. Bir grafikte Ch 1 ve Ch 2 olmak üzere iki kanaldan alınan verilerden elde edilen yörüngeler belirlenmiş ve yuvarlanmalı yatak destekli millerin merkezinin izlediği yörünge (orbit) gösterilmiştir.

Bode grafiklerinde tüm miller için düşey doğrultuda maksimum titreşim genliğinin oluştuğu devirler tespit edilmiş ve bu devirlerde orbit titreşim verileri elde edilmiş ve sunulmuştur. Grafiklerde millerin merkezinin eksenden sapmalarını gösteren milin düşey ve yatay doğrultudaki ileri geri salınımları kıyaslanmıştır.

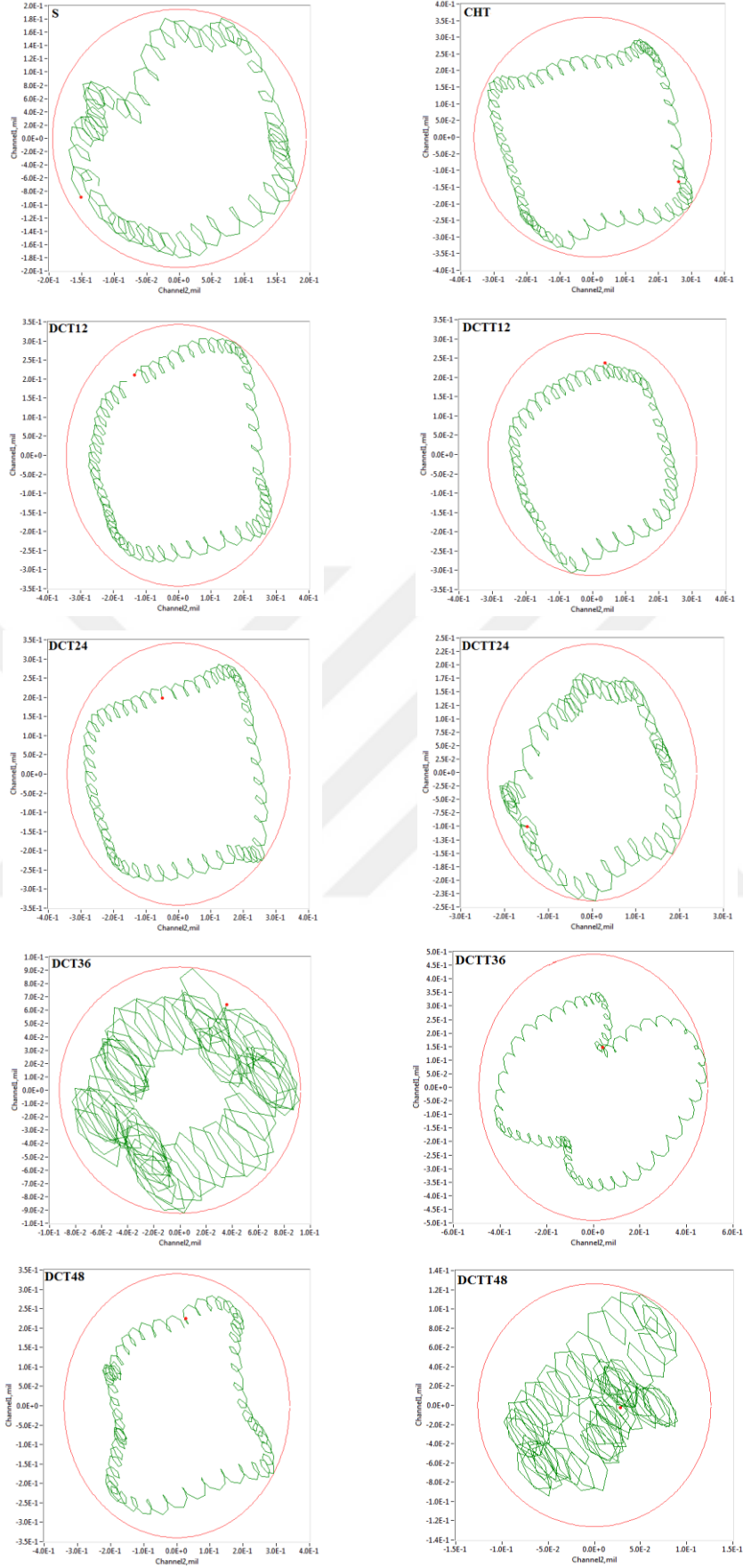
Elde edilen bulgulara göre milin çalışma devri arttıkça titreşim genliğinde artma veya azalma meydana geldiğini göstermiştir. Bu durum, sönümlenme katılığının devirle doğru orantılı olarak artışı ile ilişkilendirilmiştir. Geleneksel ısıtma işlem görmüş ve derin kriyojenik işlem görmüş milde rijitlik daha fazla olduğu için tınlaşma (rezonans) olayı daha az görülmüştür. Orbit bulgularına göre sırasıyla DCT36, DCTT24 ve DCTT48 millerinin izlemiş olduğu yörüngeler diğer millerin hareket yörüngesine göre daha az salınım yaptığı görülmektedir.



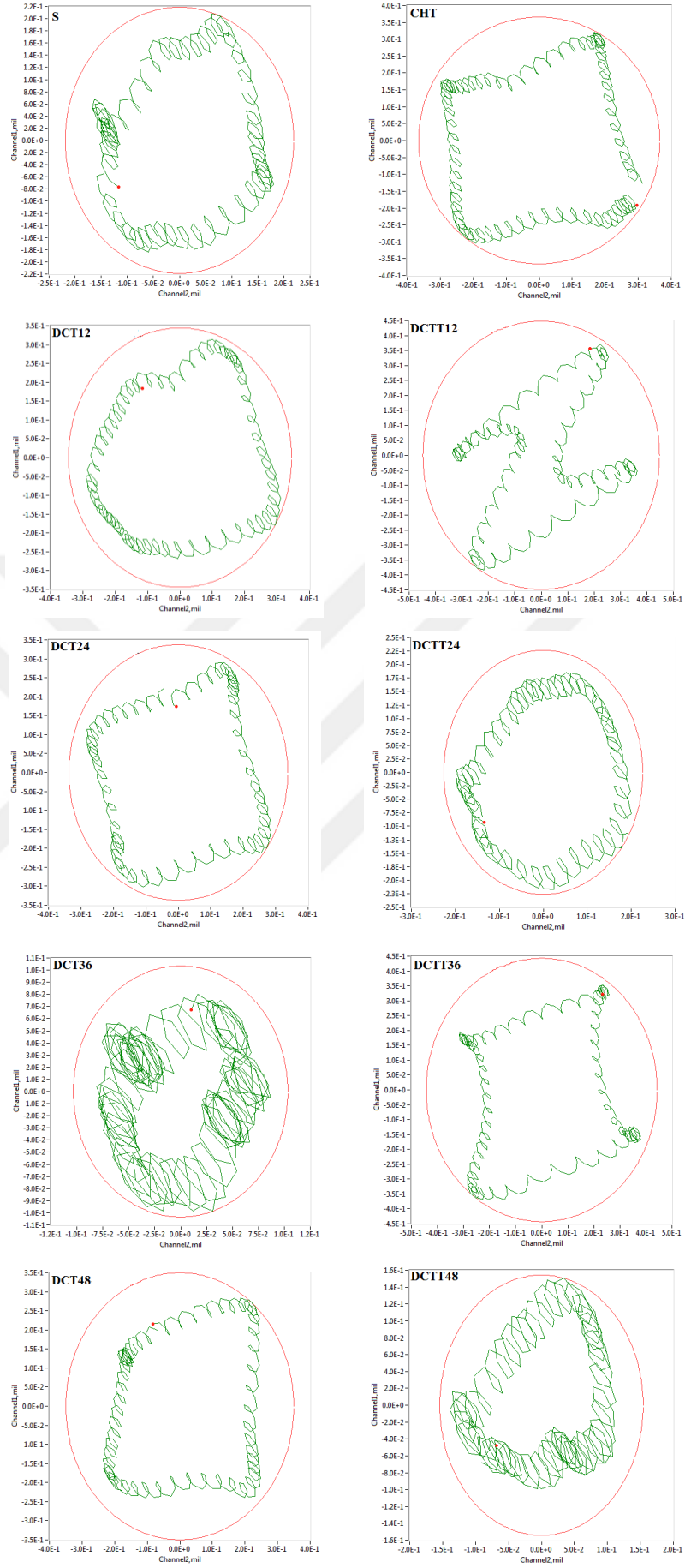
Şekil 7.33. Normal yataklı destekli miller için orbit titreşim analizi.



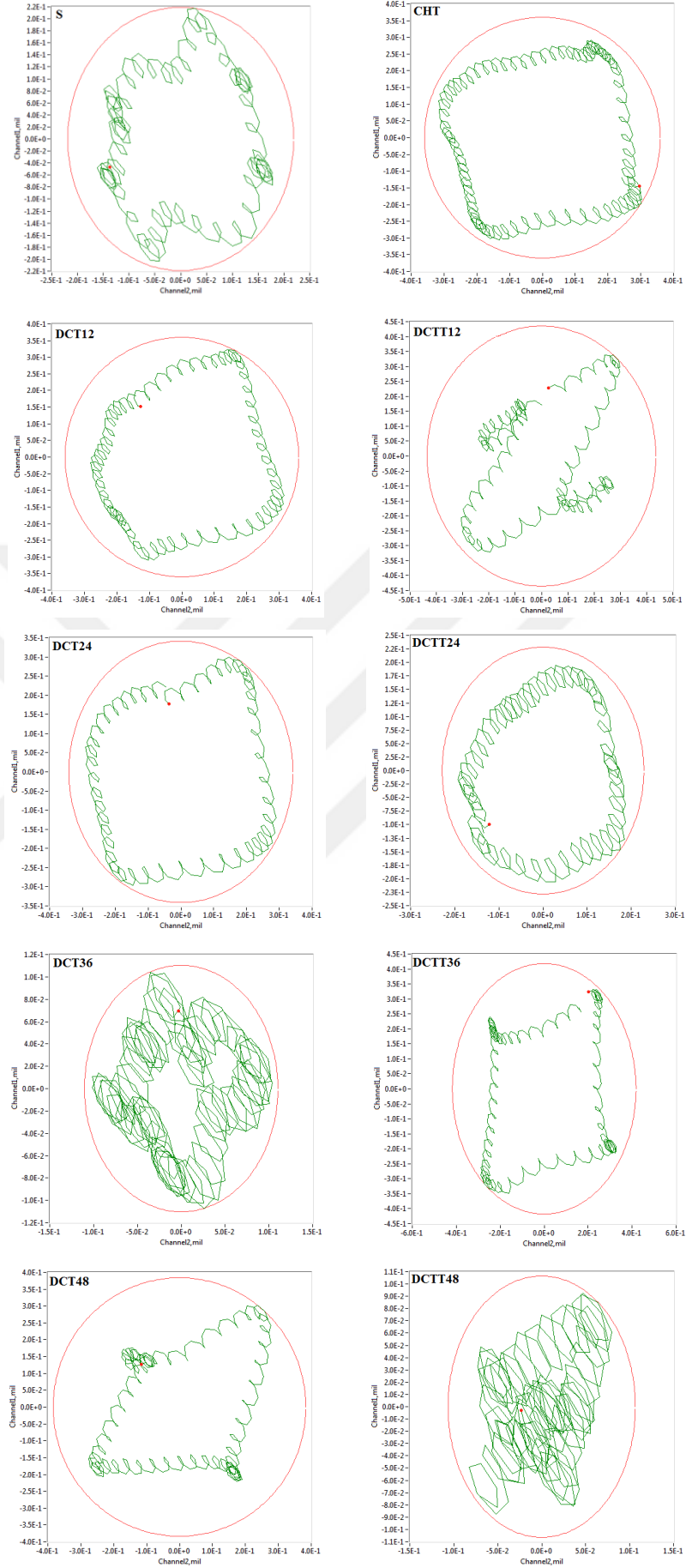
Şekil 7.34. Bilye kusurlu yataklı miller için orbit titreşim analizi.



Şekil 7.35. İç bilezik kusurlu yatak destekli miller için orbit titreşim analizi.



Şekil 7.36. Dış bilezik kusurlu yatak destekli miller için orbit titreşim analizi.



Şekil 7.37. Hepsı kusurlu yatak destekli miller için orbit titreşim analizi.

7.1.5. Zamana Bağlı Genlik Değerleri (Time waveform) Grafikleri

Zamana bağlı genlik değerleri (Time waveform) grafiklerinde dikey (Ch 1) ve yatay (Ch 2) doğrultuda elde edilen zamana bağlı genlik dalgaları gösterilmiştir. Grafiklerde 0.64 saniyede elde edilen bulgular, diğer grafiklerden (bode, orbit, waterfall) elde edilen sonuçları doğrular nitelikte olduğu görülmüştür.

Normal yatak destekli millerin time waveform grafikleri Şekil 7.38, Şekil 7.39 ve Şekil 7.40'da verilmiştir. Bu grafiklere göre en düşük genlik değeri DCT36 milinde ve sırasıyla DCTT48, DCTT24, DCT48, DCTT36 milleri takip etmektedir

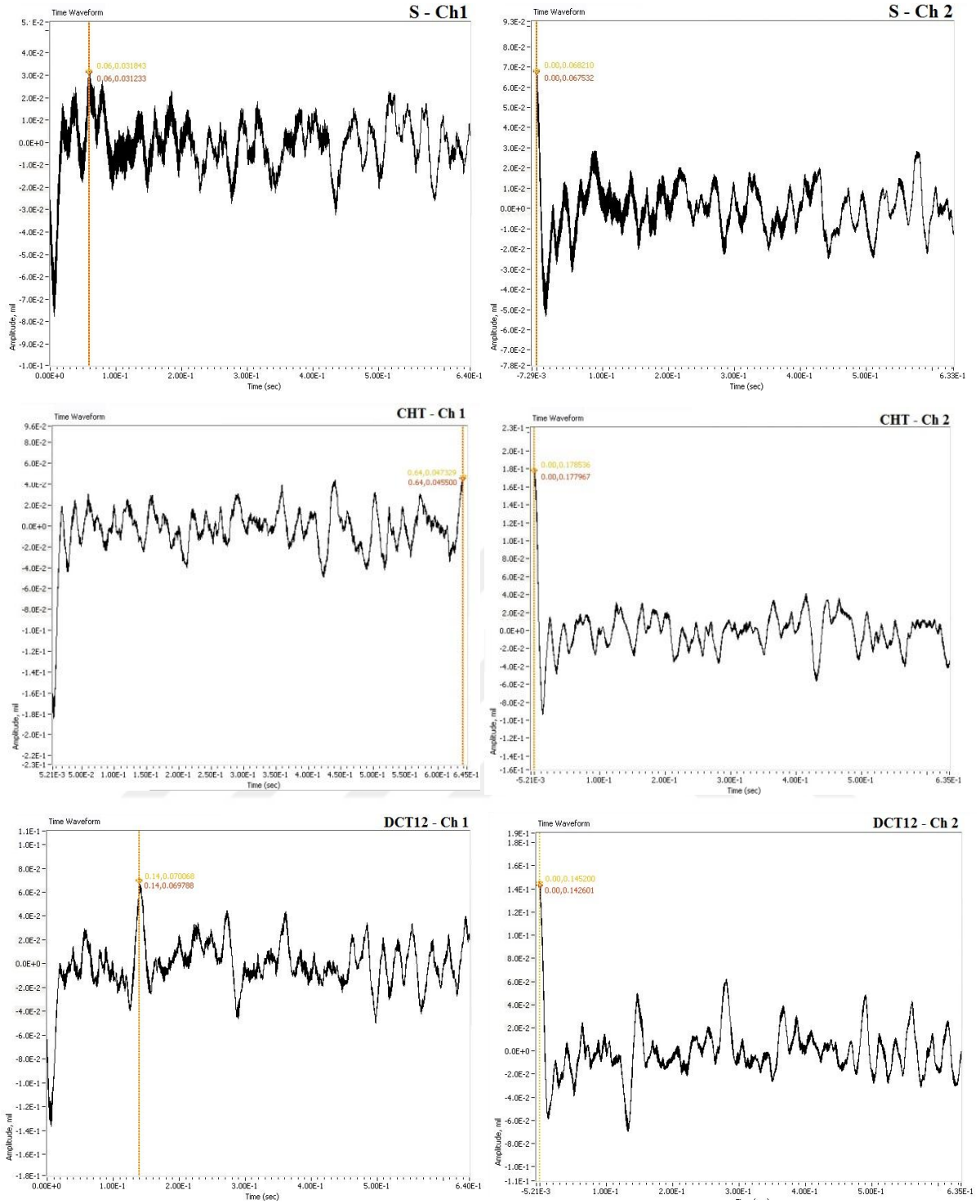
Bilye kusurlu yatak destekli millerin time waveform grafikleri Şekil 7.41, Şekil 7.42 ve Şekil 7.43'de verilmiştir. Bu grafiklere göre en düşük genlik değeri yine DCT36 milinde ve sırasıyla DCTT48, DCTT24, DCT48, DCT24 milleri takip etmektedir.

İç bilezik kusurlu yatak destekli millerin time waveform grafikleri Şekil 7.44, Şekil 7.45 ve Şekil 7.46'da verilmiştir. Bu grafiklere göre en düşük genlik değeri yine DCT36 milinde ve sırasıyla DCTT48, DCT48, DCTT24, DCT24 milleri takip etmektedir.

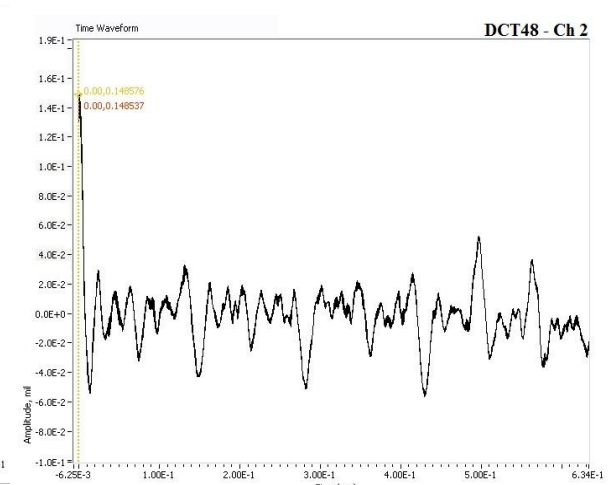
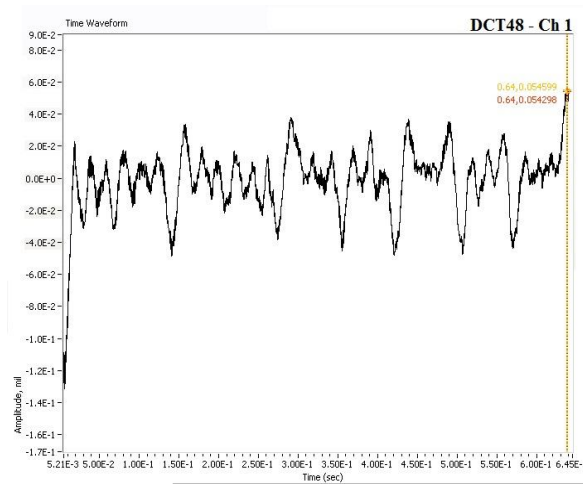
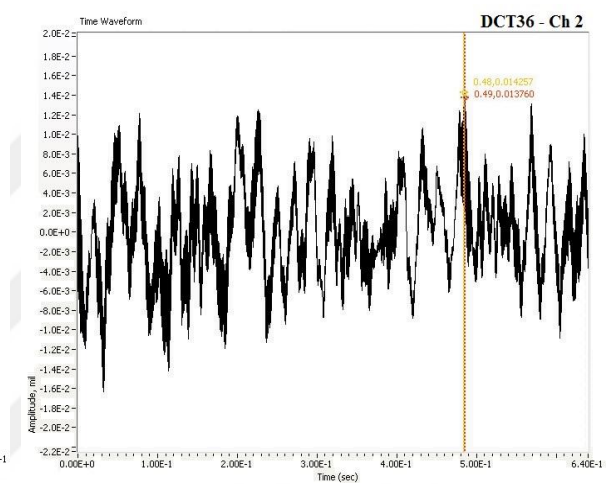
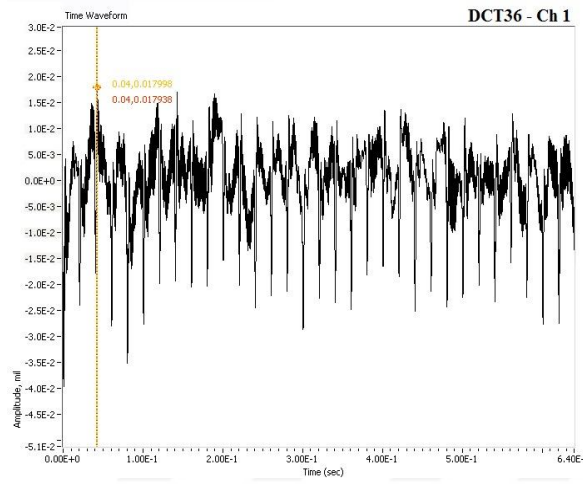
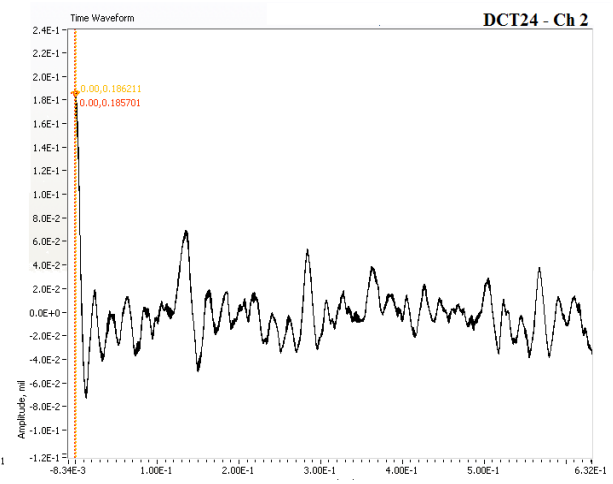
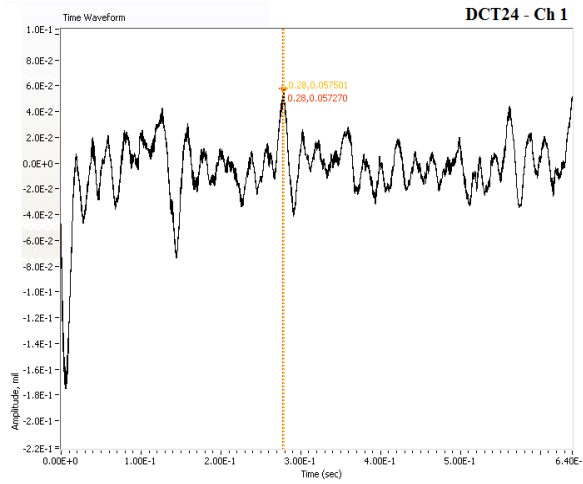
Dış bilezik kusurlu yatak destekli millerin time waveform grafikleri Şekil 7.47, Şekil 7.48 ve Şekil 7.49'da verilmiştir. Bu grafiklere göre en düşük genlik değeri yine DCT36 milinde ve sırasıyla DCTT48, DCT48, DCTT24 milleri takip etmektedir.

Hepsi kusurlu yatak destekli millerin time waveform grafikleri Şekil 7.50, Şekil 7.51 ve Şekil 7.52'de verilmiştir. Bu grafiklere göre en düşük genlik değeri yine DCT36 milinde ve sırasıyla DCTT48, DCTT24, DCT48 milleri takip etmektedir.

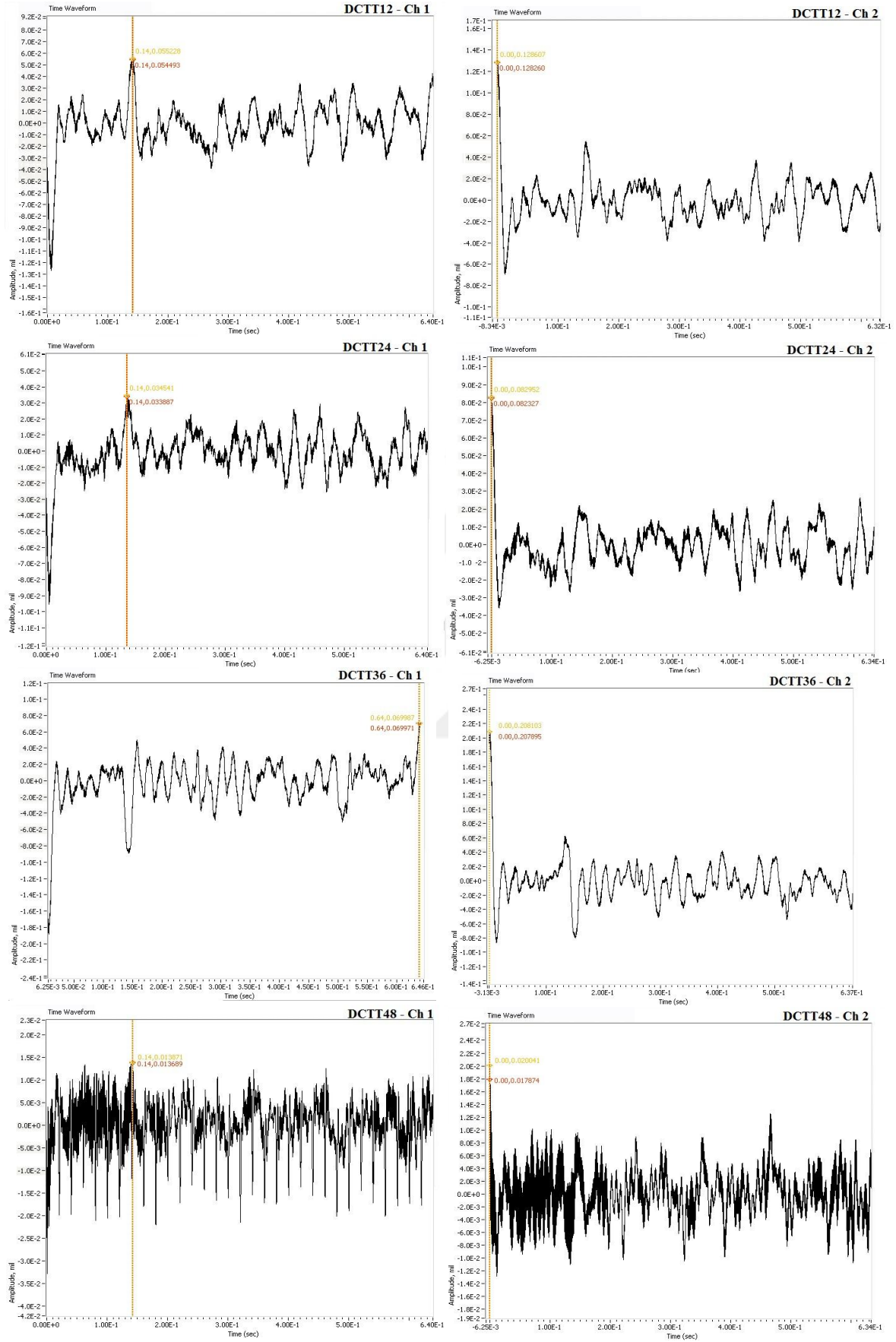
Genel olarak time waveform grafiklerinden elde edilen bulguları değerlendirdiğimizde DCT36 mili tüm yataklarda en düşük genlik değerine sahip olduğu sonucu elde edilmiştir.



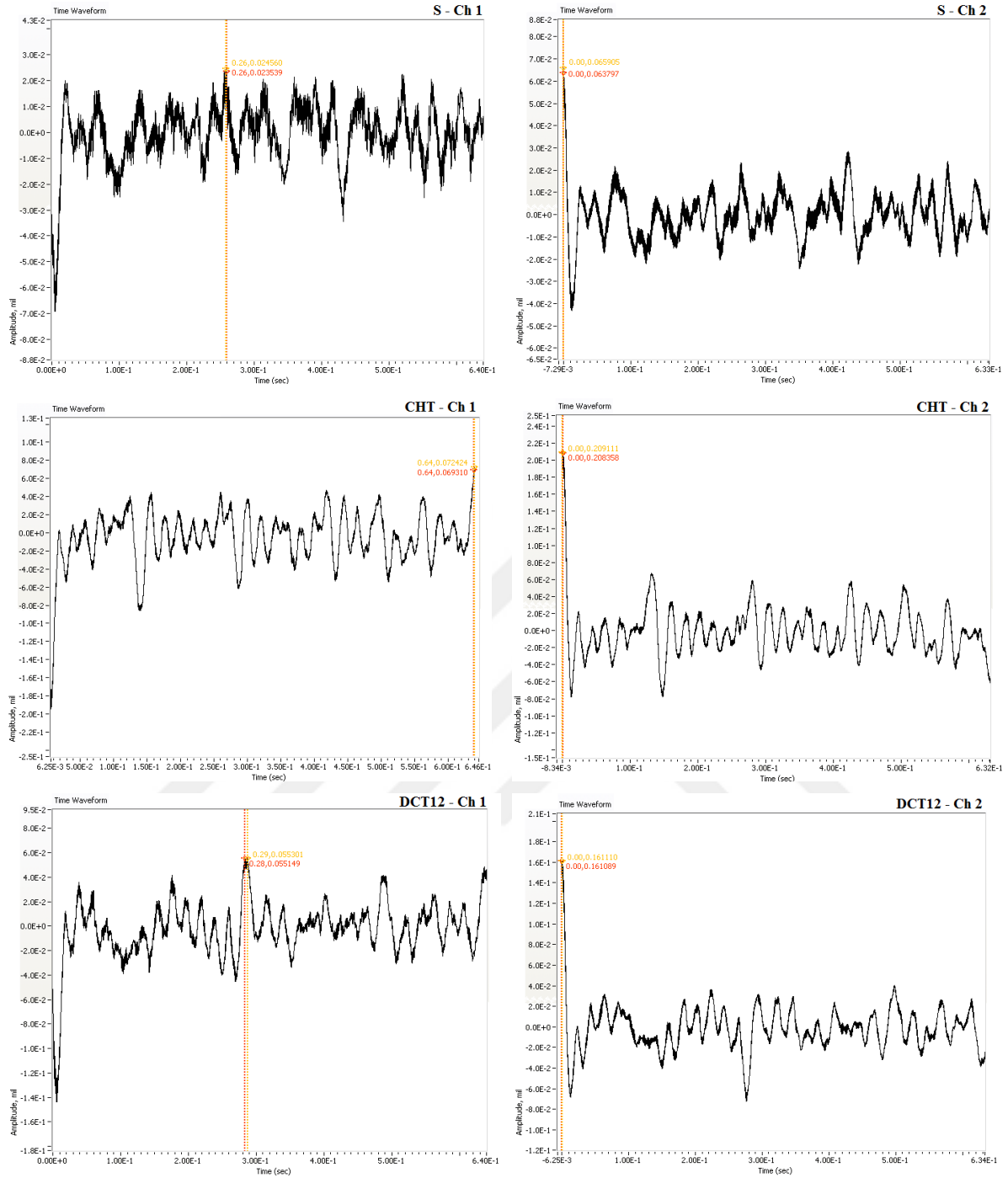
Şekil 7.38. Normal yatak destekli miller için time waveform grafiği.



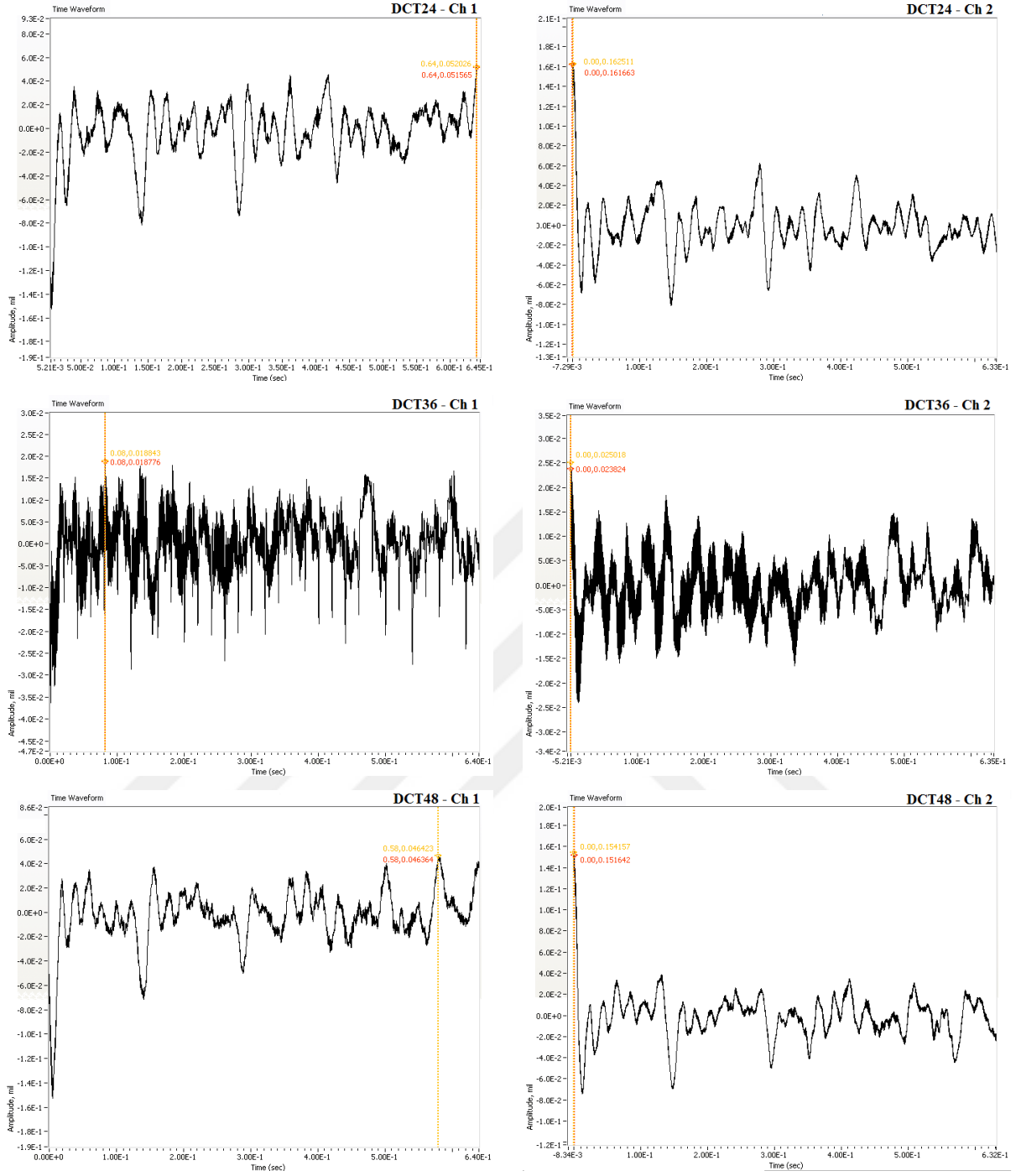
Şekil 7.39. Normal yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı).



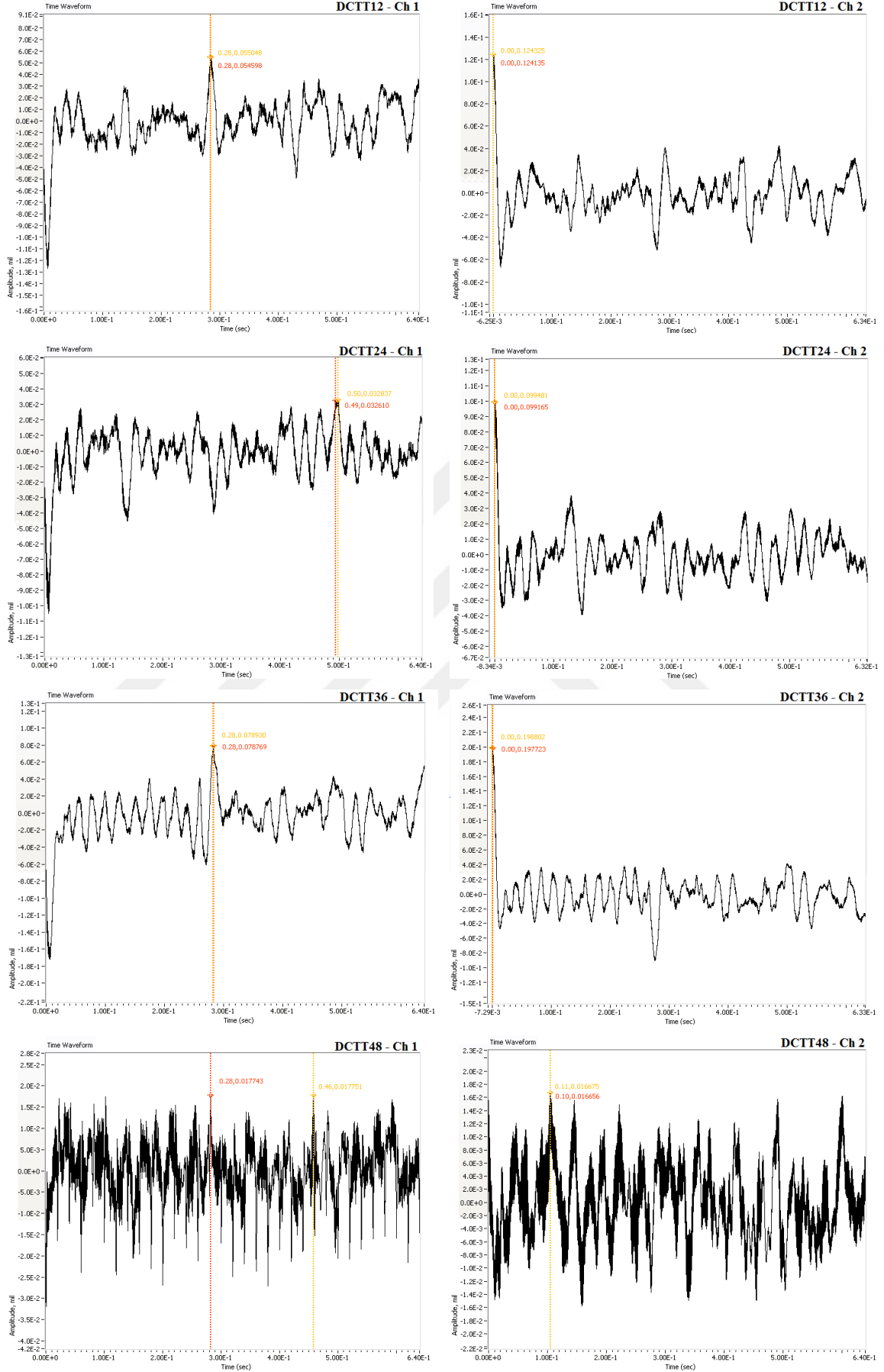
Şekil 7.40. Normal yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı).



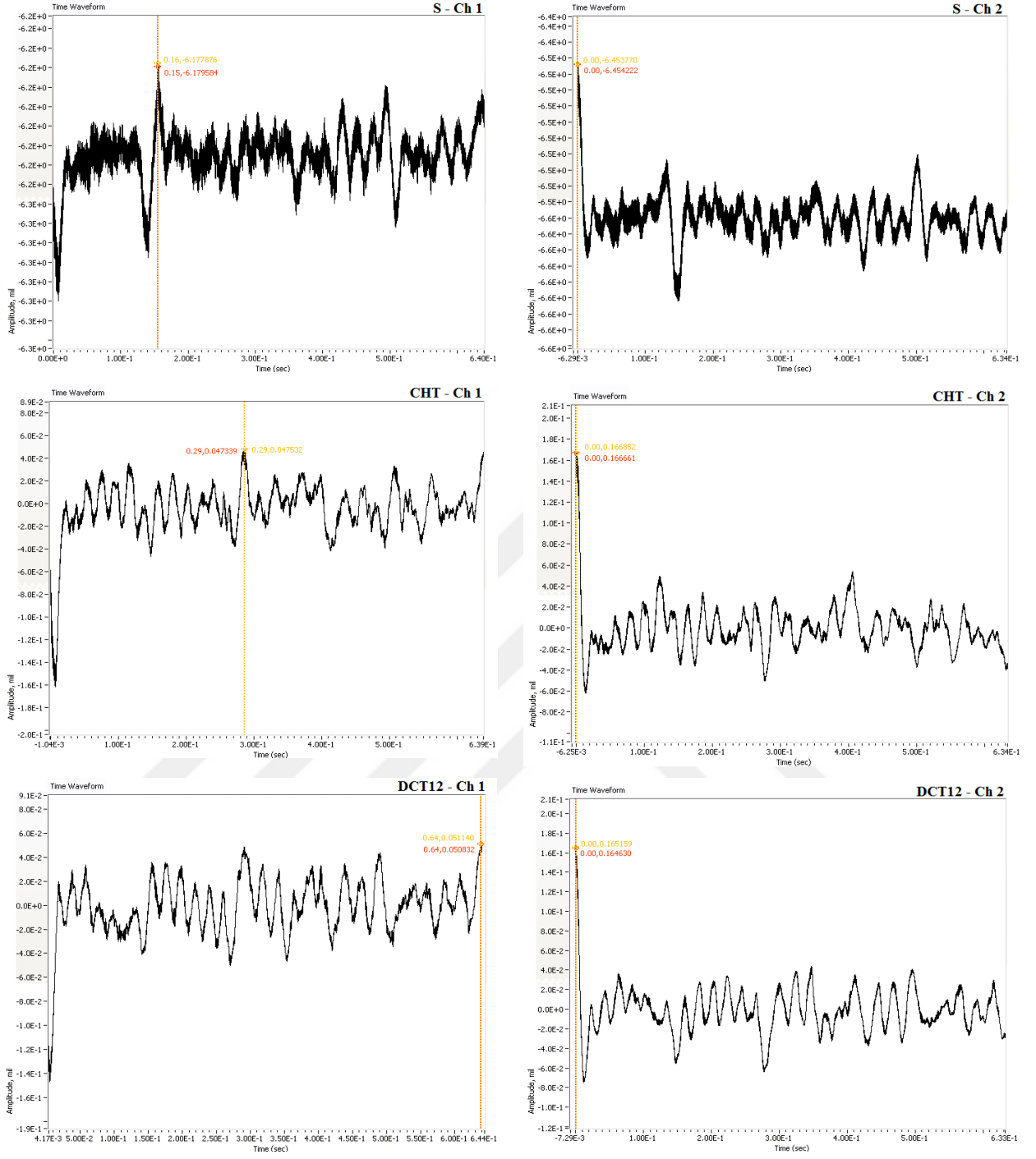
Şekil 7.41. Bilye kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği.



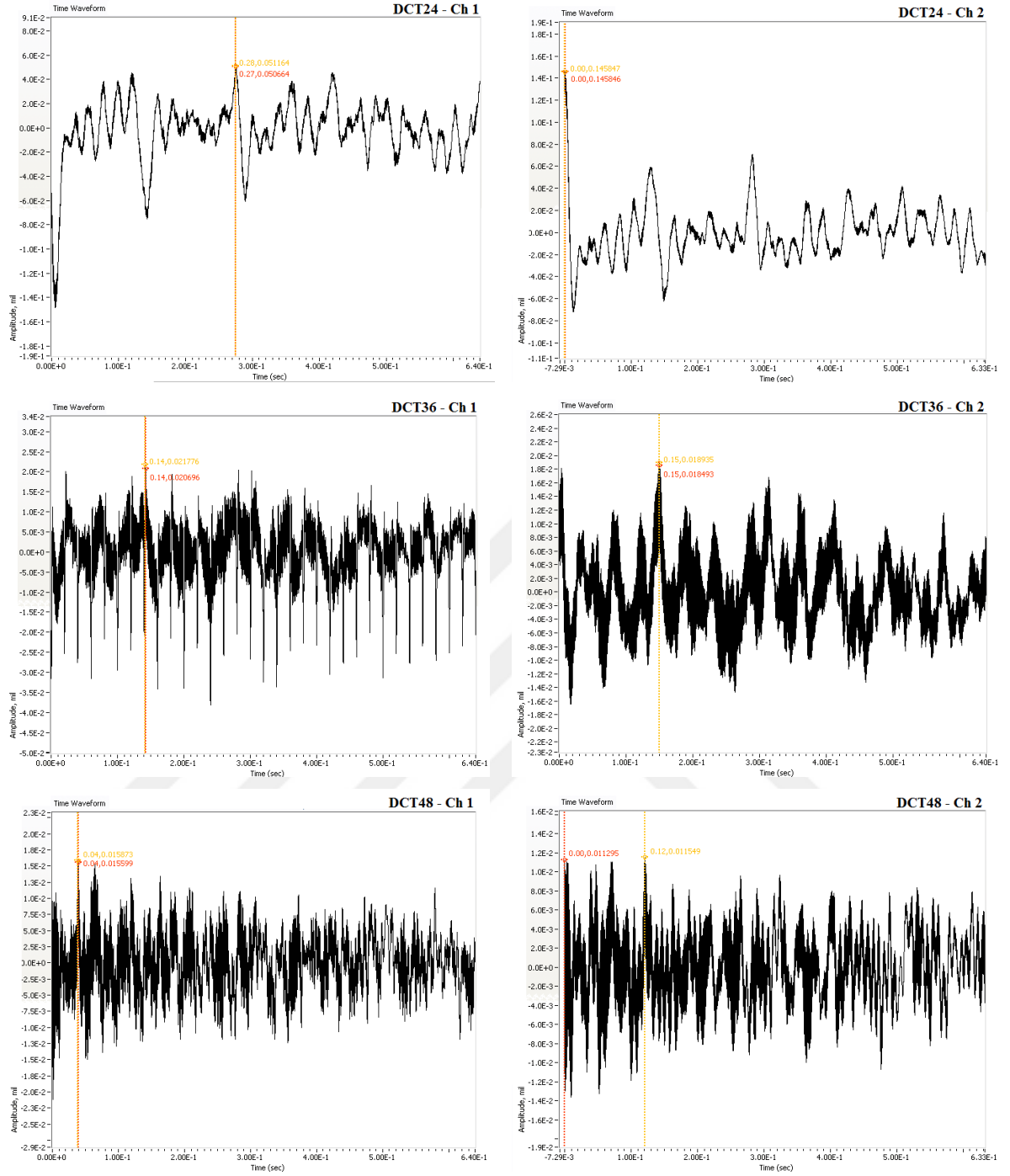
Şekil 7.42. Bilye kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı).



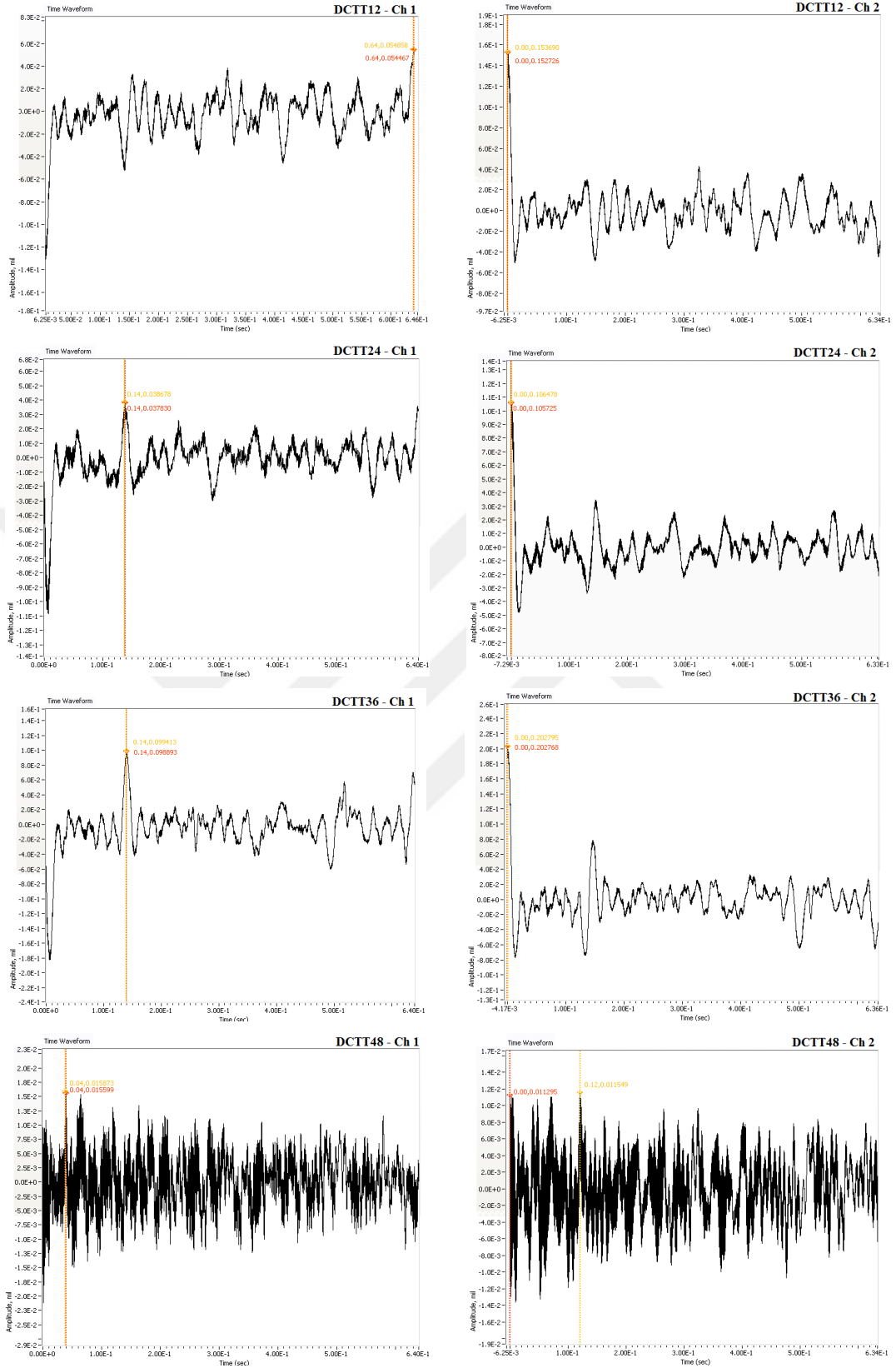
Şekil 7.43. Bilye kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı).



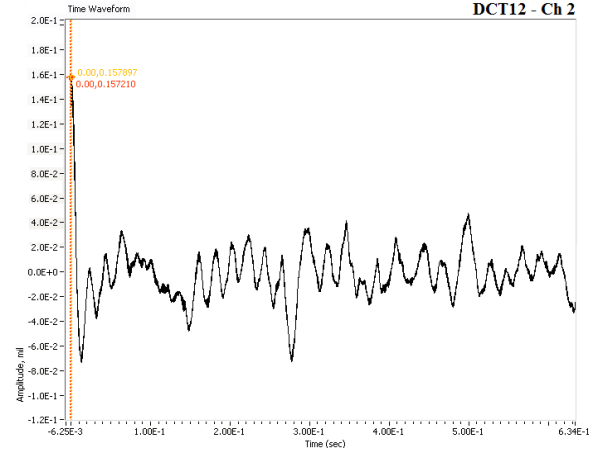
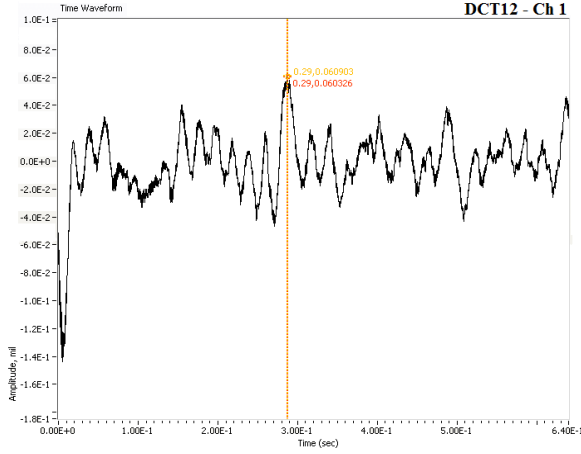
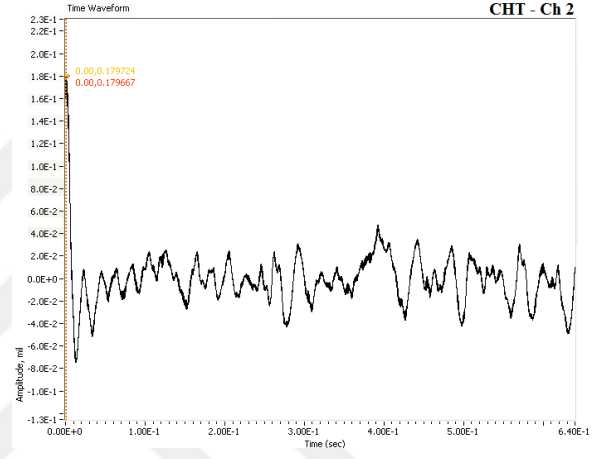
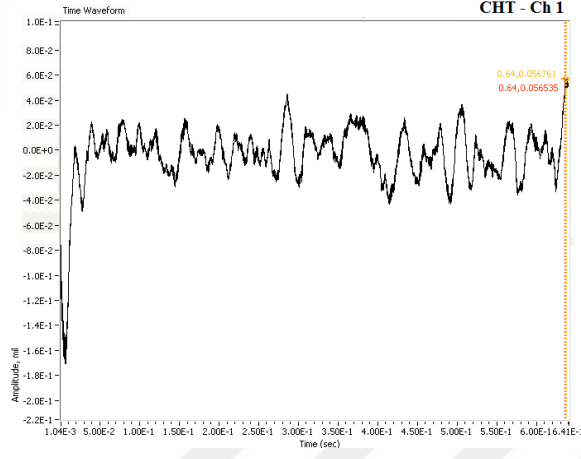
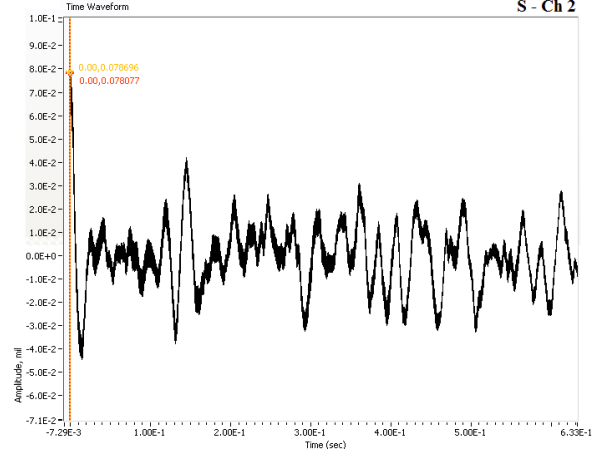
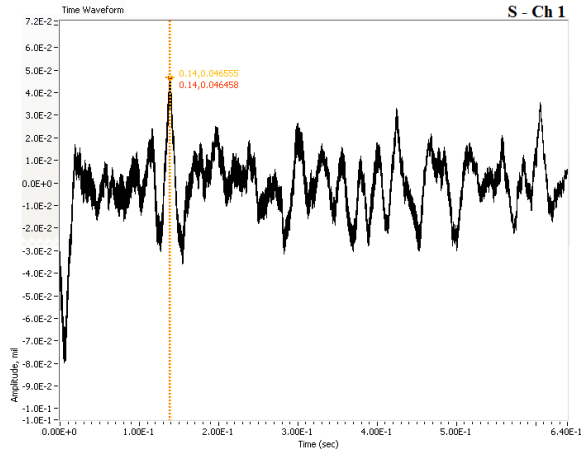
Şekil 7.44. İç bilezik kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği.



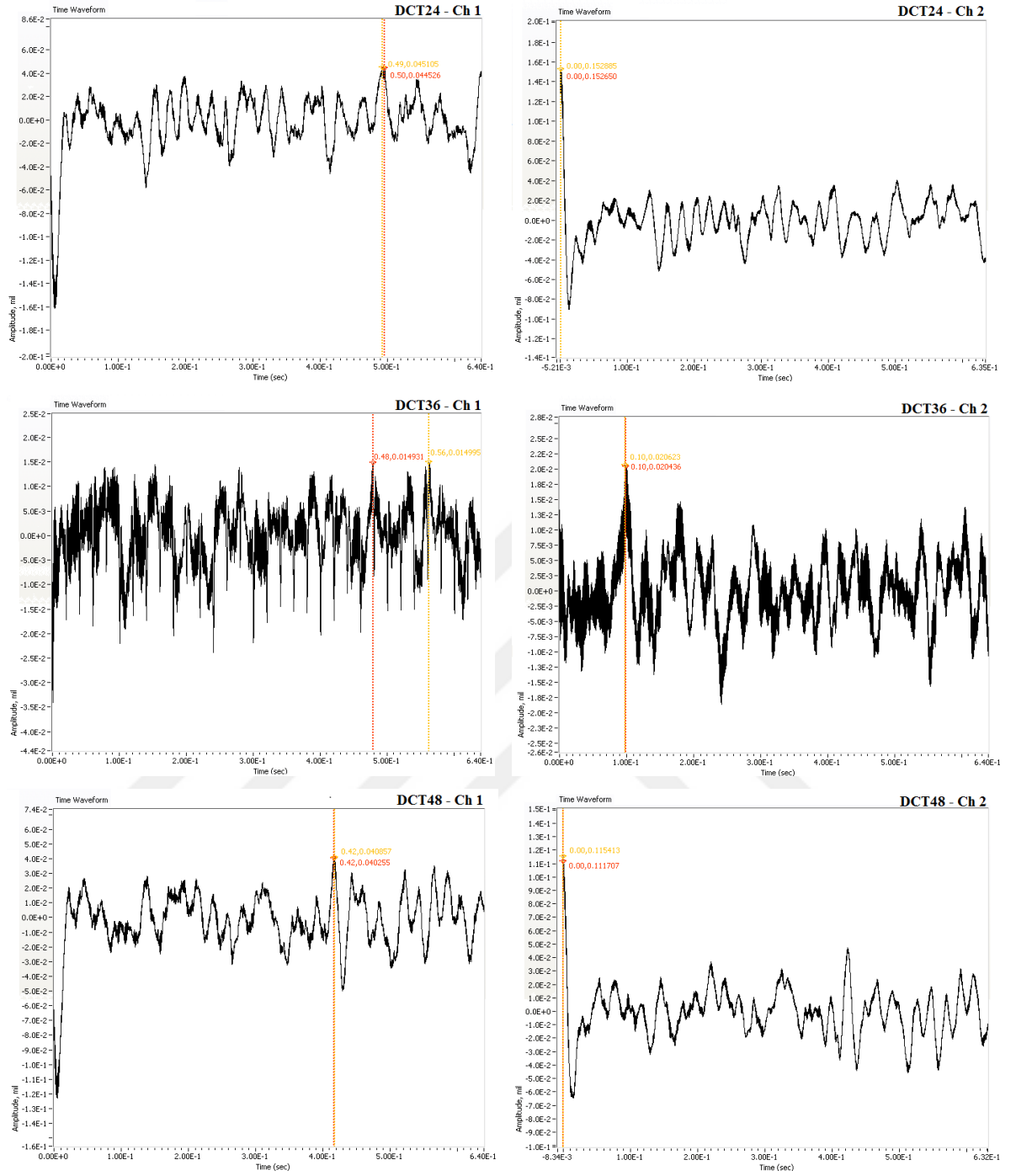
Şekil 7.45. İç bilezik kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı).



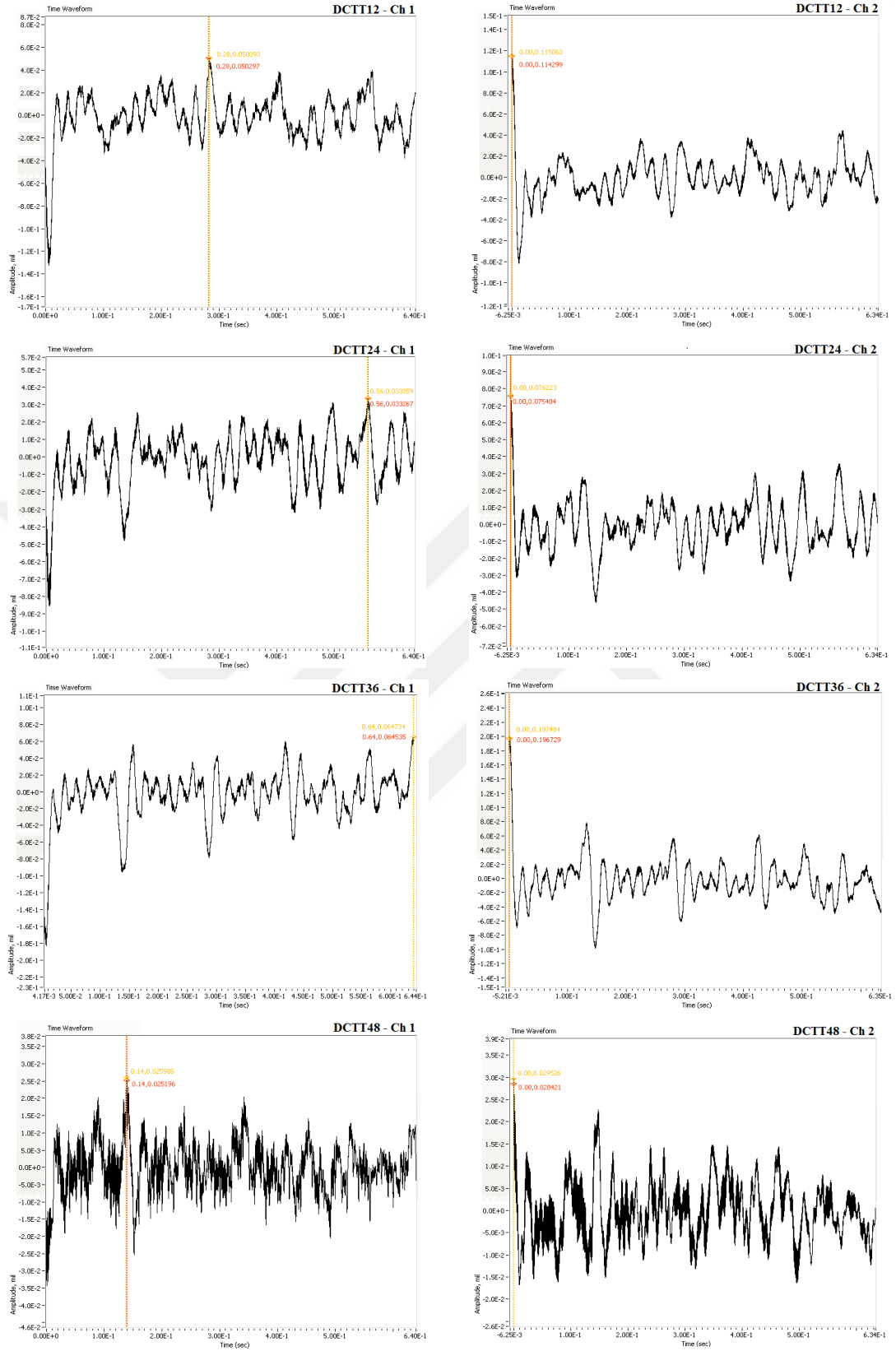
Şekil 7.46. İç bilezik kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı).



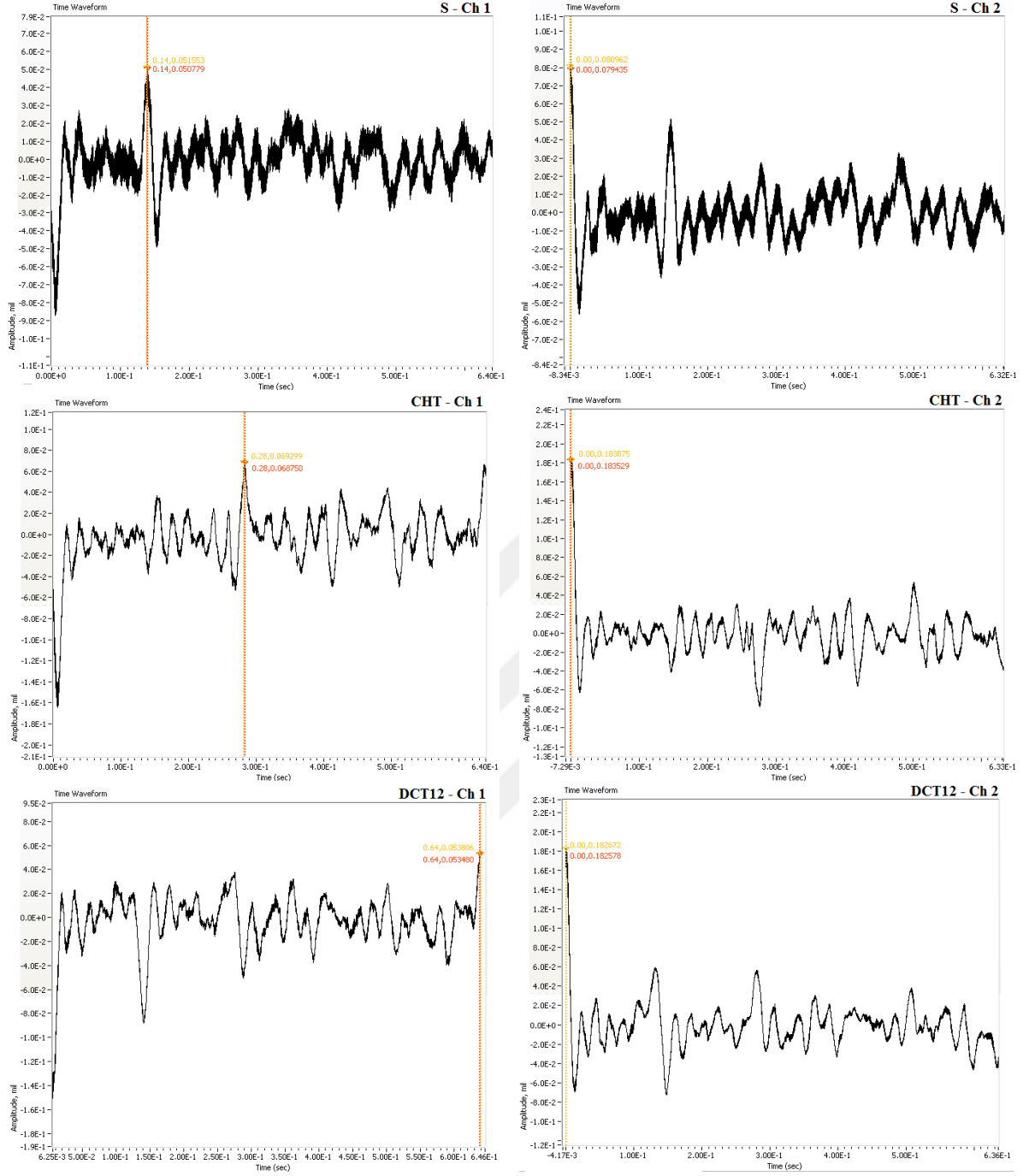
Şekil 7.47. Dış bilezik kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği.



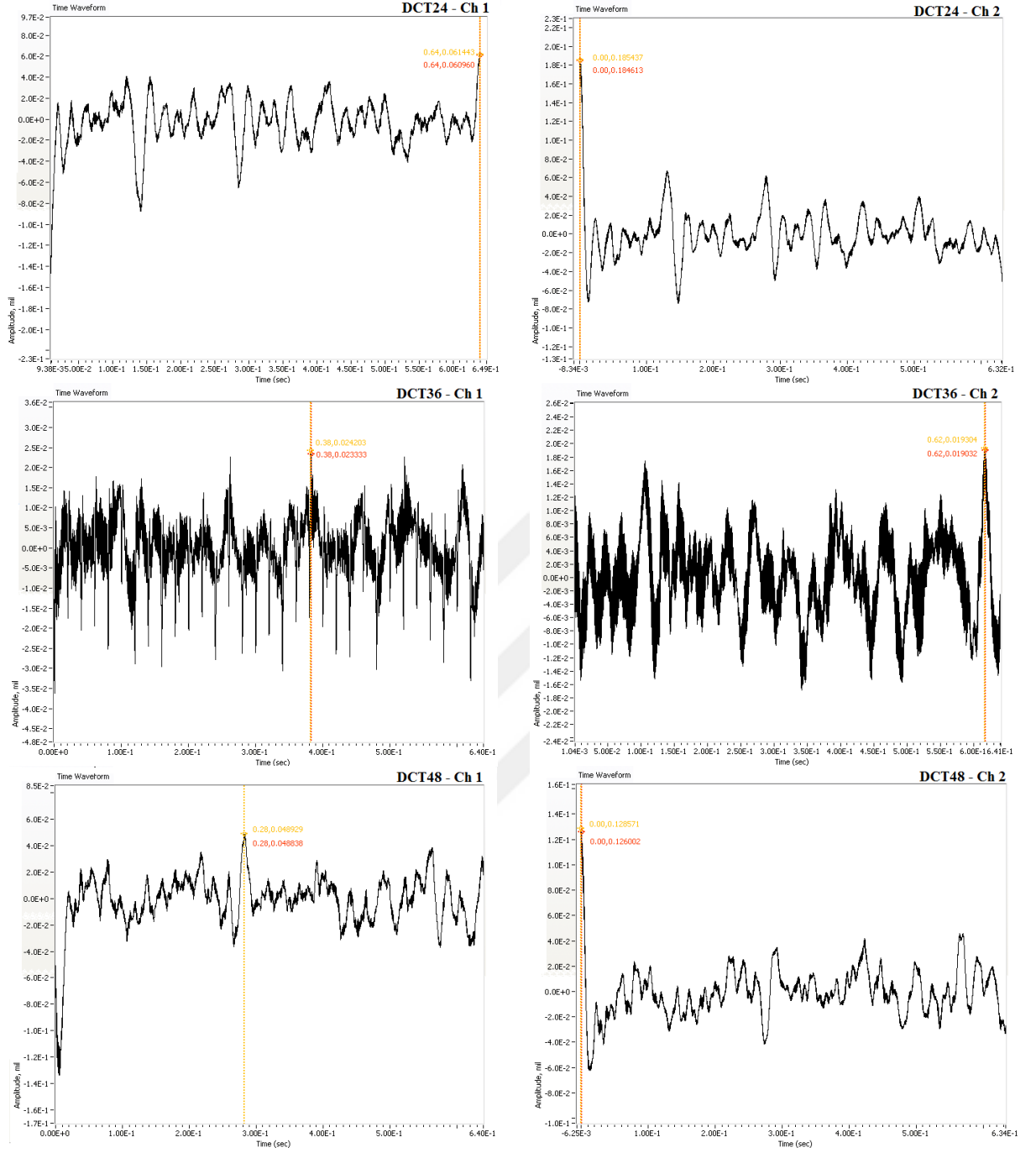
Şekil 7.48. Dış bilezik kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı).



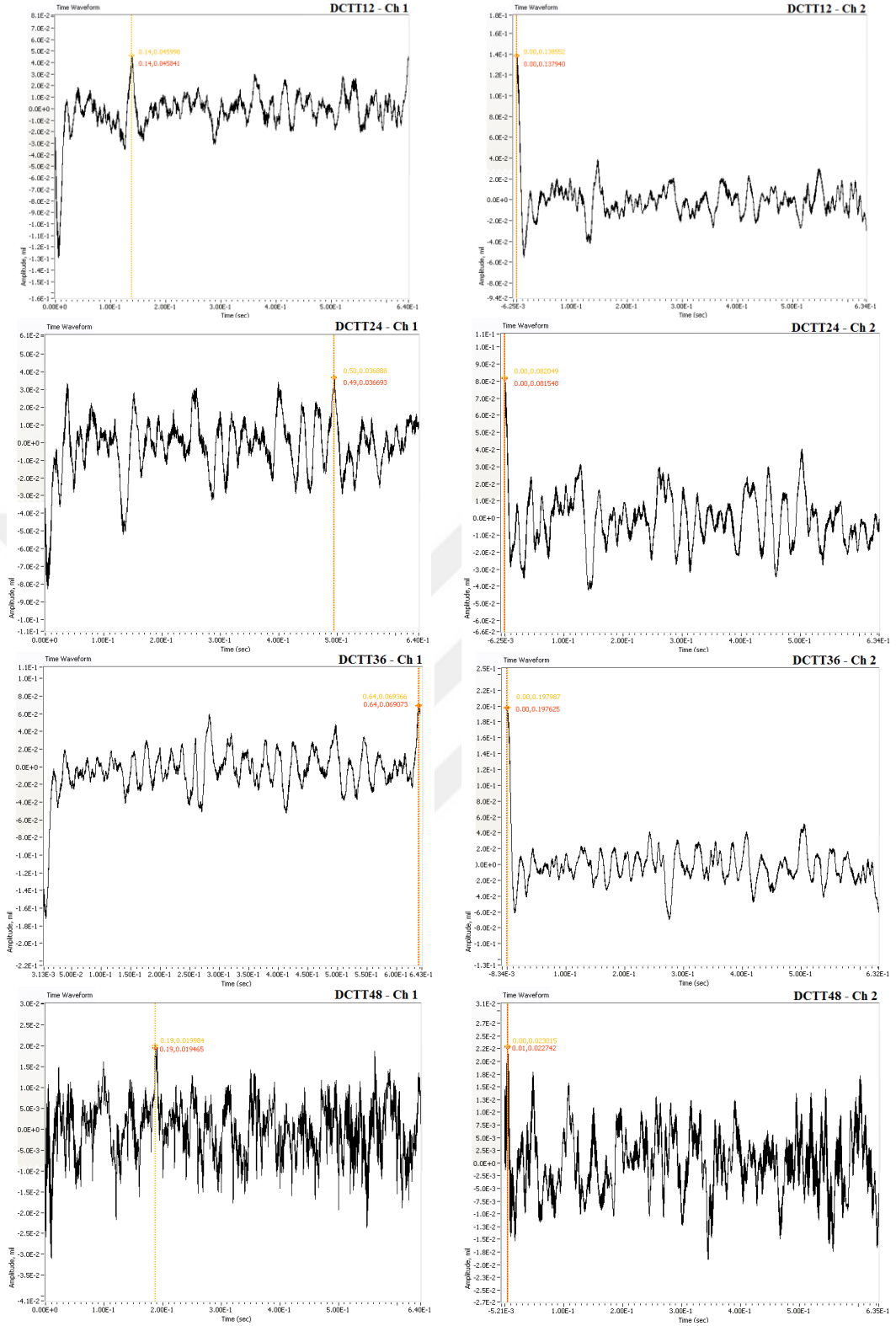
Şekil 7.49. Dış bilezik kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı).



Şekil 7.50. Hepsi kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği.



Şekil 7.51. Hepsi kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı).



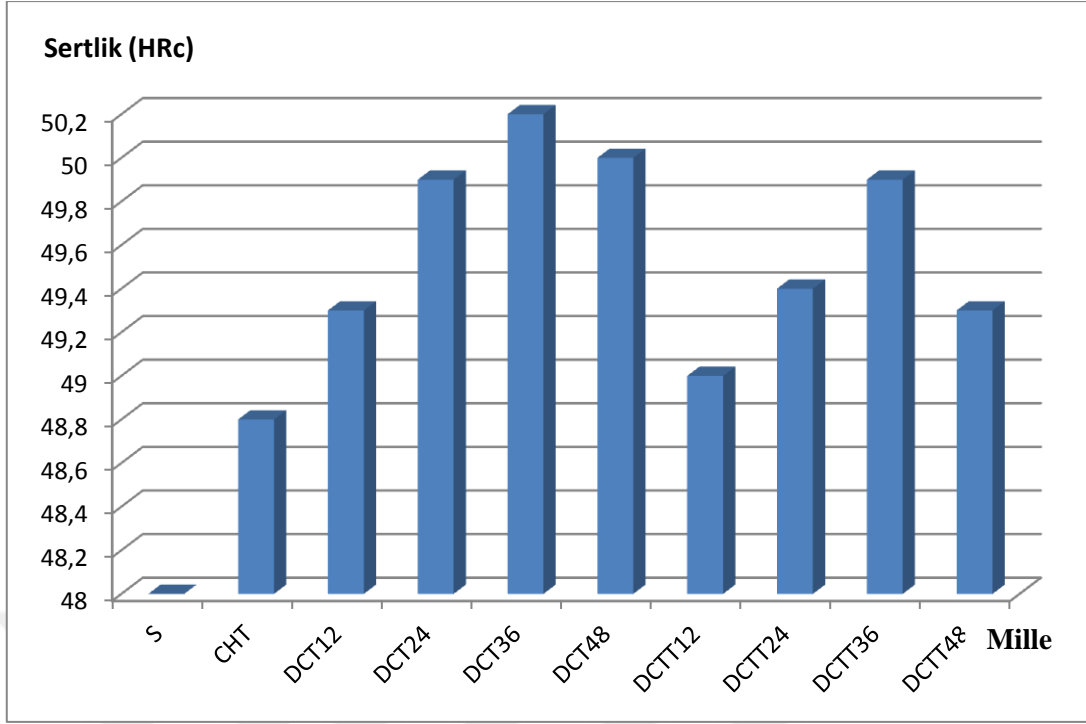
Şekil 7.52. Hepsi kusurlu yatak destekli miller için time waveform grafiği (devamı).

7.2. SERTLİK ÖLÇME TESTLERİ BULGULARI

Mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılan sertlik ölçme testleri diğer yöntemlere göre daha fazla tercih edilmektedir. Bunun nedeni bu yöntemin basit olması ve diğer testlere göre numunelere daha az hasar vermesidir. Bir malzemenin sertliği bilindiğinde malzemenin mekanik özellikleri ile ilgili detaylı değerlendirme yapılabilir.

Test numunelerine geleneksel ısıtma işlemi, farklı bekletme sürelerinde (12, 24, 36 ve 48 saat) derin kriyojenik işlem ve son olarak temperleme işlemi uygulanmıştır. Numunelere uygulanan geleneksel ısıtma işlemi, derin kriyojenik işlem ve temperleme işlemi sonrasında Rockwell (HRC) sertlik ölçüm cihazında sertlik ölçüm testleri yapılmış ve sonuçlar Çizelge 7.3' de sunulmuştur.

Şekil 7.53' de geleneksel ısıtma işlemi ve farklı bekletme sürelerinde derin kriyojenik işlem uygulanmış AISI 4140 çeliğinden imal edilen millerin ısıtma işlemi durumuna göre sertlik değerlerindeki değişim verilmiştir. Sertlik değerlerine baktığımızda sırasıyla en yüksek değerler DCT36, DCT48, DCTT36, DCT24, DCTT24, DCTT48, DCT12, DCTT12, CHT ve S olduğu görülmektedir. DCT millerinde en yüksek sertlik değerlerinin olmasının nedeni, derin kriyojenik işlemle birlikte AISI 4140 çeliğinin içyapısında bulunan yumuşak bir yapıya sahip olan östenit fazının sert bir yapıya sahip olan martenzit fazına dönüşmesi sonucu daha gevrek bir yapının oluşmasına bağlanmıştır [74], [90]. DCTT millerinde ise temperleme işlemi sonucunda temperleme işlemli millerin sertlik değerleri düşerken tokluk değerleri yükselmiştir.



Şekil 7.53. Millerin sertlik değerlerindeki değişim.

Çizelge 7.3. Sertlik ölçüm sonuçları (HRC).

No	Mil Kodu	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	Kabul değer
1	S	35.7	35	36.2	32.5	33.4	33.7	31.9	35.3	35	32.5
2	CHT	49.1	48.6	48.8	48.8	48.3	49.6	48.8	49.4	48.1	48.8
3	DCT12	49.7	49.3	50.2	49.5	49.3	49.6	48.5	49.9	49.6	49.3
4	DCT24	48.8	48.8	49.9	49.3	49.1	46.9	48.3	49.3	49.9	49.9
5	DCT36	49.2	49.6	49.6	49.5	49.9	50.2	50.6	49.6	49	50.2
6	DCT48	49.9	49.5	49	49.3	50	49.4	51.4	50.2	49.2	50
7	DCTT12	49.2	50.1	49	50.2	50.1	50	50.3	49.6	49.9	49
8	DCTT24	48.5	49.9	49.6	50.2	48.9	49.6	48.7	49.4	48.4	49.4
9	DCTT36	49.9	49.9	50.2	49.8	49.6	49.7	49.2	49.3	49.2	49.9
10	DCTT48	47.5	49.8	50.5	49.6	49.3	49.7	46.1	48	49.6	49.3

Elde edilen sertlik sonuçları literatürde yapılan çalışmalar ile eşdeğerlik göstermiştir. Derin kriyojenik işlem görmüş numuneler arasında en yüksek sertlik değeri DCT36 mili ile elde edilmiştir. Bu durum, derin kriyojenik işlemle birlikte malzemenin mikro yapısında gerçekleşen östenit martenzit dönüşümünün diğer DCT millerine göre DCT36 milinde daha yüksek oranda gerçekleşmesi ile ilişkilendirilmiştir. Das ve ark. [117]

yaptıkları çalışmada, farklı bekletme sürelerinde uygulanan derin kriyojenik işlem sonrasında en yüksek sertlik değerlerine 36 saat bekletilen numune ile elde etmişlerdir [117]. Diğer bir çalışmada Amini ve ark. [115] farklı bekletme sürelerinde uygulanan derin kriyojenik işlemin sertliği artırdığını ve en yüksek sertlik değerlerini 36 saat bekletilen numunelerde elde etmişlerdir.

Literatürde yapılan bu çalışmalarda kriyojenik işlemde sonra sertlikteki artış, kalıntı östenitin martenzite dönüşümü ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, 36 saat bekletme süreli DCT36 milinin sertliğinin daha yüksek çıkışı da bu numunedeki kalıntı östenit hacim oranının diğer numunelere göre daha düşük olmasına bağlanmıştır. Bununla birlikte 36 saatin üzerinde yapılan derin kriyojenik işlem ile sertlik artışına sebep olan daha ince karbürlerin çökmesi mümkündür [117], [142]. Çizelge 7.4'te farklı türdeki malzemeler için derin kriyojenik işlem ile sertlikteki maksimum iyileşmeleri görülmektedir. Literatürde, kriyojenik işlemin makro sertlik üzerindeki olumlu iyileşmelerini gösteren çok sayıda çalışma yapılmıştır. Derin kriyojenik işlemin malzemelerin makro sertliğinde olumlu iyileşmeler sağladığı yapılan literatür çalışmaları ile doğrulanmıştır (Çizelge 7.4).

Çizelge 7.4. Derin kriyojenik işlemin sertlik değerlerine etkisi.

Literatür	Malzeme	Maksimum sertlik artışı (%)
Senthilkumar ve ark. 2011	AISI 4140	+ 10 (HRc)
Molinari ve ark. 2001	AISI H13	+ 6,9 (HRc)
Pellizzari ve ark. 2001	AISI H13	+ 6,9 (HRc)
Singh ve ark. 2012	AISI M2	+ 9,2 (HRc)
Yun ve ark. 1998	AISI T1	+ 2,8 (HRc)
Zhirafar ve ark. 2007	AISI 4340	+ 2,4 (HRc)

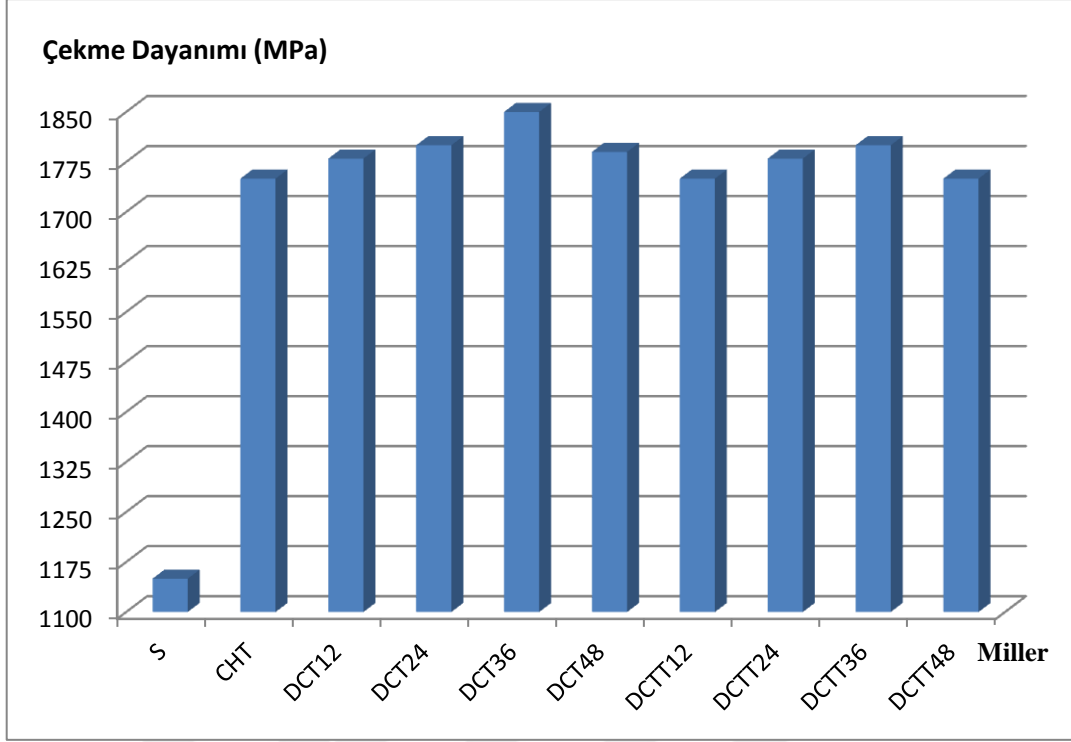
7.3. ÇEKME TESTLERİ BULGULARI

Derin kriyojenik işlemin, malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği yönünde birçok çalışma mevcuttur [114], [120].

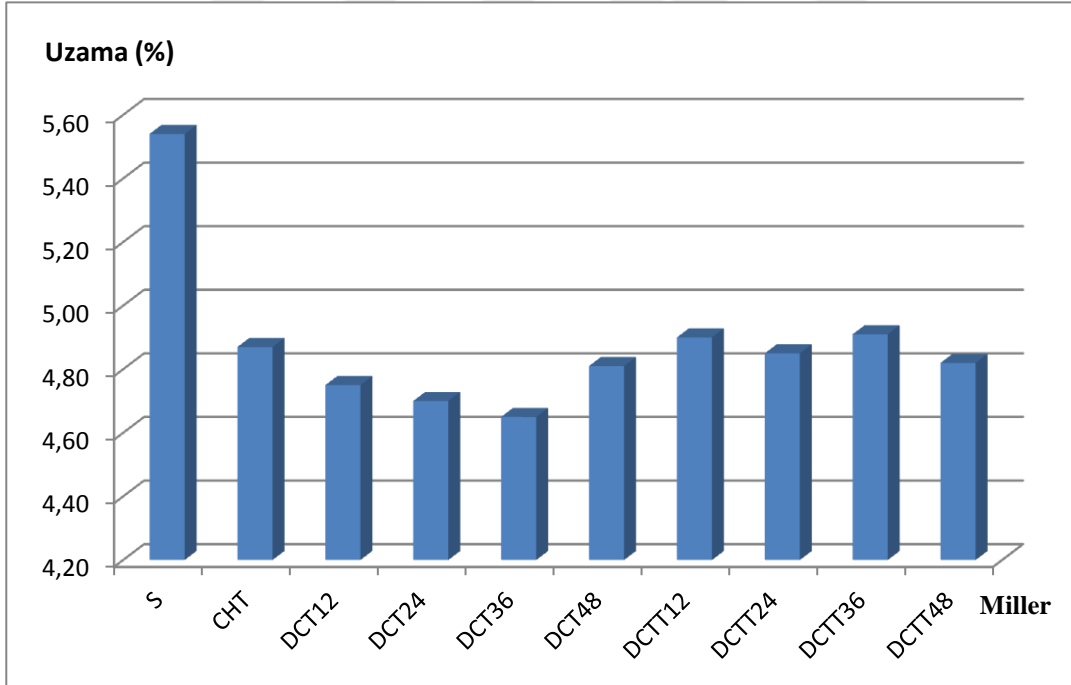
AISI 4140 çeliğinin mekanik özellikleri üzerinde derin kriyojenik işlemin etkisini tespit etmek amacıyla 10 (on) farklı numuneye çekme testi uygulanmıştır. Çekme testleri her bir numune için üç kez tekrarlanmış ve çıkan sonuçların ortalaması alınmıştır. Farklı işlemlerli numunelere ait maksimum çekme dayanımı değerleri Şekil 7.54'te ve uzama değerleri Şekil 7.55'de grafiklerde gösterilmiştir.

Çekme dayanımı sonuçlarına baktığımızda sırasıyla en yüksek değerler DCT36, DCTT36, DCT24, DCT48 numunelerinde olduğu görülmektedir. Çekme testi sonuçlarından da görüldüğü gibi standart ve geleneksel ısıtılma işlem görmüş numuneler ile karşılaştığımızda, derin kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin çekme dayanımları daha yüksek değerlerde bulunmuştur. Burada en yüksek çekme dayanımı değerlerinin DCT numunelerinde olmasının nedeni, derin kriyojenik işlemlerle birlikte AISI 4140 çeliğinin iç yapısında bulunan yumuşak bir yapıya sahip olan östenit fazının sert bir yapıya sahip olan martenzit fazına dönüşmesi, karbür tanelerinin daha düzenli dağılması, daha gevrek bir yapının oluşması ve tokluğun azalmasıdır [89]-[90]. Bu durum önce sertliğin artması sonrasında çekme dayanımlarının S ve CHT numunelerinden daha yüksek değerlerde çıkması ile sonuçlanmıştır.

Derin kriyojenik işlem görmüş numuneler arasında en yüksek çekme dayanımı değerleri DCT36 ve DCTT36 numunesi ile elde edilmiştir. Bu sonuç, derin kriyojenik işlemlerle birlikte malzemenin mikro yapısında gerçekleşen östenit martenzit dönüşümünün diğer DCT numunelerine göre DCT36 numunesinde daha yüksek oranda gerçekleşmesi ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca literatür çalışmalarında da kriyojenik işlemden sonra mekanik özelliklerin iyileştiği bildirilmiştir. Bensely ve ark. [89] yaptıkları çalışmada, -196°C' de 24 saat derin kriyojenik işlem görmüş numunelerin çekme dayanımlarında % 9,34 oranında bir iyileşme tespit etmiştir. Bu bağlamda yapılan çekme testi sonuçlarının literatür sonuçları ile benzer sonuçlar gösterdiğini söylemek mümkündür.



Şekil 7.54. Maksimum çekme dayanımı değerleri.



Şekil 7.55. Uzama (%) değerleri.

Uzama değerleri incelendiğinde en düşük değerlerin sırasıyla DCT36, DCT24, DCT12 ve DCT48 numunelerinde olduğu görülmektedir. Buna göre uzama değerlerinin çekme dayanımlarına göre ters orantılı olarak değişim göstermesi ile açıklanabilir. Bu da malzemelerin gevrek veya sünek olma durumuna bağlıdır. S numunesi diğer

numunelere göre sünek bir yapıya sahip olduğu için diğer DCT numunelerine göre daha fazla uzama yapmış ve daha düşük dayanım değerinde kopmuştur. Ancak DCT48 numunesi daha fazla uzama göstermiştir. elik malzemeler daha düşük sıcaklıklarda daha gevrek bir yapı eğilimi gösterirler. Derin kriyojenik işlemden dolayı sertliği artan DCT numuneleri daha gevrek bir yapıya sahip oldukları için daha büyük dayanım değerlerinde kopmuşlardır ve bu durumla ters orantılı olarak daha az miktarlarda uzamaya maruz kalmışlardır. Bu sonuçlar derin kriyojenik işlemin metalik malzemelerin çekme davranışı üzerine yapılan çalışmalar ile benzerlik göstermiştir. Xiong ve ark. [126], kriyojenik işlem ile çeliğin maksimum çekme dayanımı ve uzama değerlerinde sırasıyla % 38, % 57 ve % 280 oranlarında iyileşmeler elde etmişlerdir [117]. Benzer şekilde Baldissera ve Delprete [160], çeliğe uygulanan derin kriyojenik işlem ile maksimum çekme dayanımında % 11 oranında iyileşme elde etmiştir [160]. Yapılan çalışmalarda mekanik özelliklerdeki iyileşmeler, kalıntı östenitin martenzite dönüşümü ile ilişkilendirilmiştir.

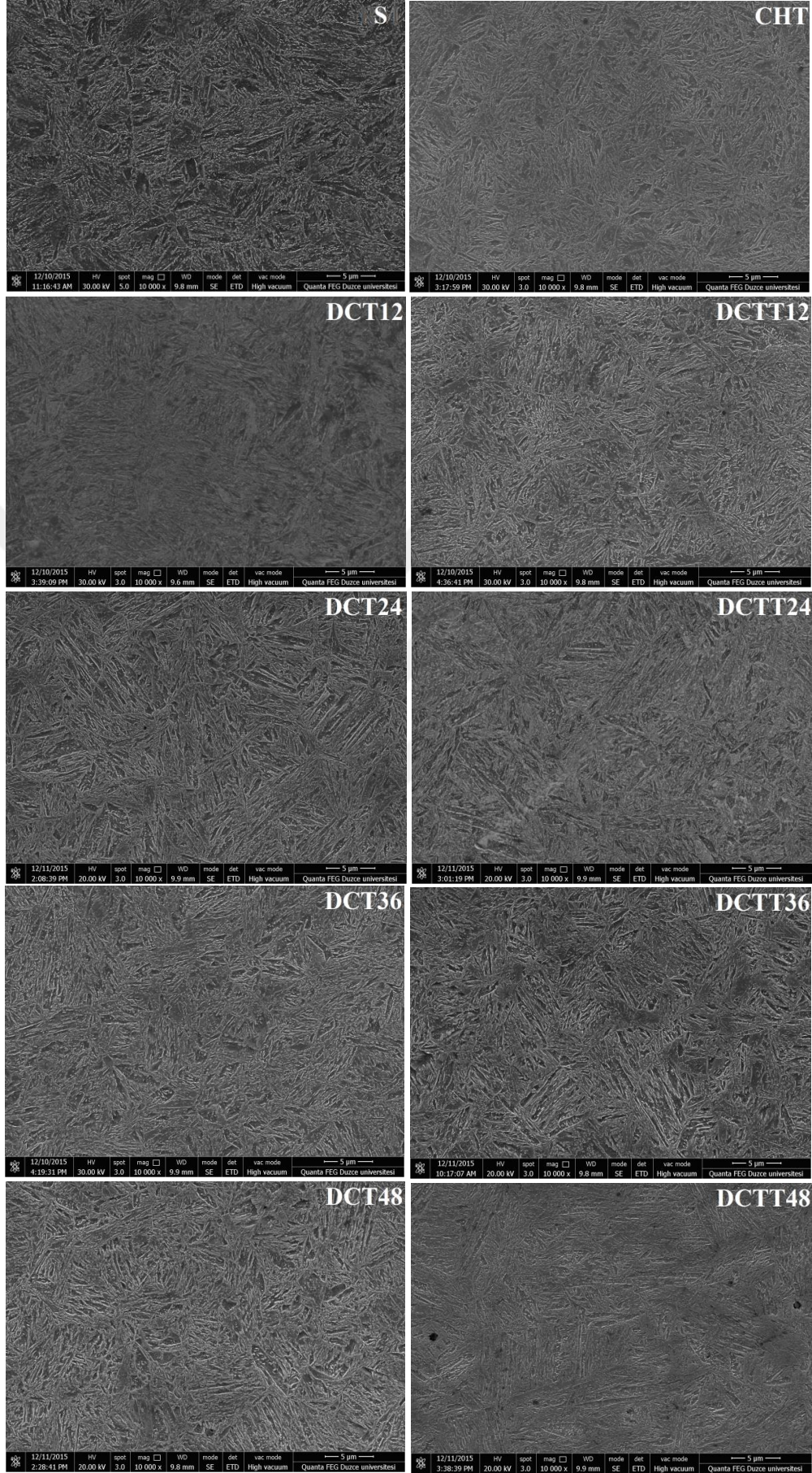
7.4. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) BULGULARI

Kriyojenik işlem malzemelerin mekanik özelliklerini etkilediğinden malzemelerin mikro yapılarının incelenmesi önemlidir.

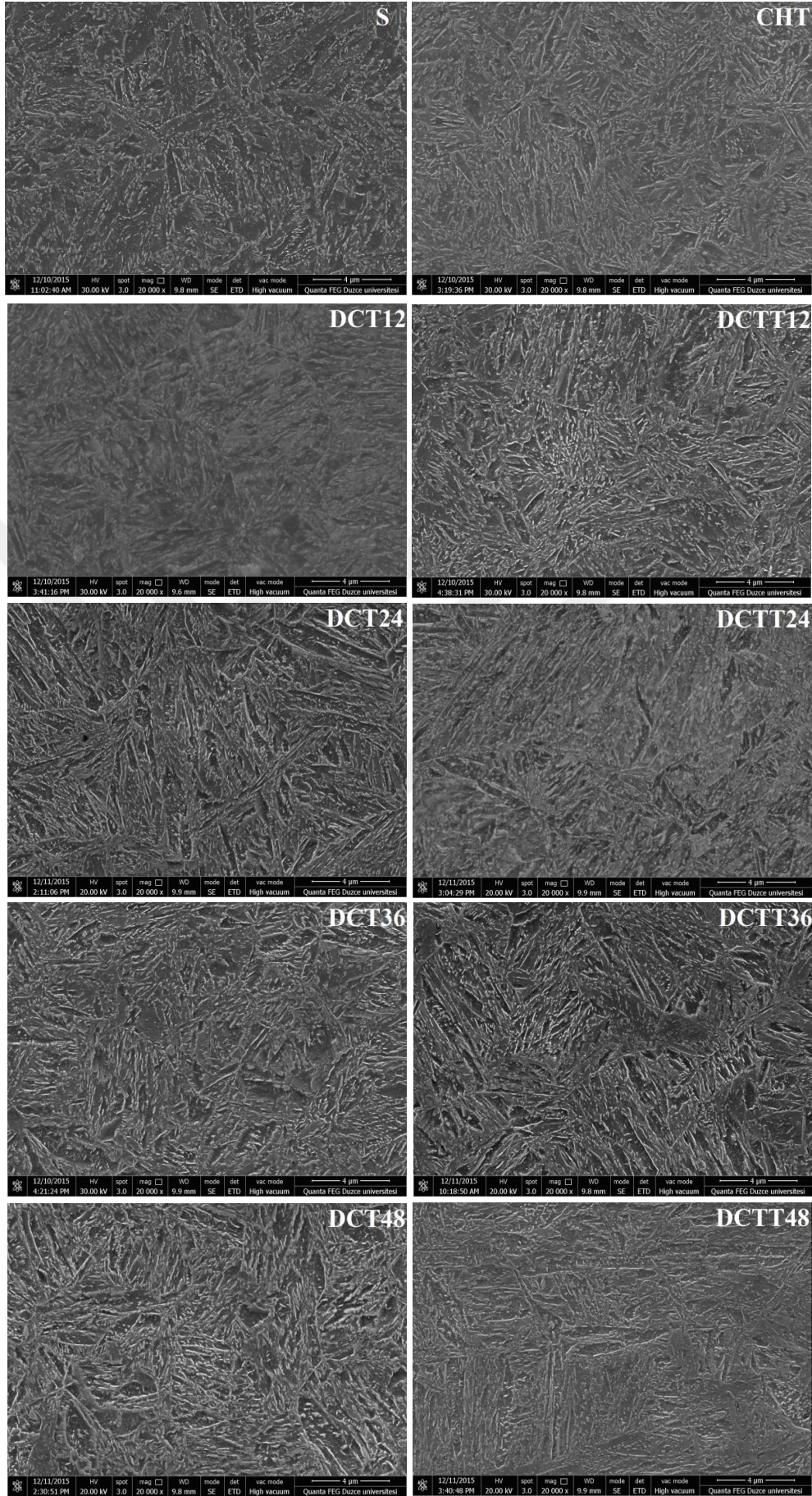
Mikro yapı görüntüleri malzemenin içyapısında geleneksel ısıtma işlemi, derin kriyojenik işlem ve temperleme işlemi ile oluşan değişiklikler hakkında bilgi vermiştir. Literatürde malzeme mikro yapısı iyileşmeleri ile ilgili yapılan çalışmalarda; yumuşak bir faz olan kalıntı östenit fazının, sert bir faz olan martenzite dönüşümü, eta karbürlerin çökmesi, ince karbürlerin çökmesi ve homojen mikro yapı oluşumu olarak açıklanmıştır [73], [75], [90]. AISI 4140 çeliğine uygulanan derin kriyojenik işlem ile daha fazla östenit martenzite dönüşmüştür. DCT numunelerinde martenzitik bir mikro yapı oluşmuş ve diğer numunelere göre daha homojen bir dağılım göstermiştir [99].

AISI 4140 çeliğinden imal edilen millere farklı bekletme sürelerinde uygulanan derin kriyojenik işlemin, geleneksel ısıtma işlemi görmüş ve derin kriyojenik işlem sonrasında temperleme işlemi uygulanmış millere göre mikro yapısında meydana getirdiği değişimleri belirlemek amacıyla Taramalı Elektron Mikroskopu (Scanning Electron Microscopy - SEM) cihazında mikro yapı görüntüleri alınmıştır. SEM cihazı aracılığı ile numunelerden alınan görüntüleri Şekil 7.56'da 10 000 x büyütme (5 μm) ve Şekil 7.57'de ise 20 000 x büyütme (4 μm) durumunda verilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular literatürdeki bilgilerin teyidi mahiyetindedir. AISI 4140 çeliğinin mikro yapısı incelendiğinde Şekil 7.56 ve Şekil 7.57'de mikro yapılarda görüldüğü gibi geleneksel ısıtma işlemi öncesinde (S) yoğun siyah bölgeler perlitik bir yapı ve az olarak görülen beyaz kısımlar ise ferritik yapıyı göstermektedir. Geleneksel ısıtma işlemi ile sertleştirme işlemi sonrasında (CHT) çeliğin östenit olan yapısı görüldüğü gibi büyük oranda martenzitik yapıya dönüşmüştür. Yapıda bulunan perlit ve martenzit dönüşümü sırasında demir yayınamaz; karbon yayınması da oldukça güçleşir [133]. Bundan dolayı bu yapı iğneli beynit şeklini alır. Geleneksel ısıtma işlemi sonrasında ince beynit yapı ile birlikte beyaz olan sementit ve kalıntı östenit kısımların yanında, perlitik bölgeler de yer almaktadır. Yapı genel olarak martenzite dönüşmüştür. Düşük alaşımlı çeliklerdeki çıta martenzit olarak adlandırılan martenzitin ince birim paketleri büyük oranda yönlenebilir ve sertlik artışında önemli bir etkidir [161].



Şekil 7.56. AISI 4140 çeliği numunelerinin mikro yapı görüntüleri (5 µm).



Şekil 7.57. AISI 4140 çeliği numunelerinin mikro yapı görüntüleri (4 μm).

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. SONUÇLAR

Dönen makine sistemlerinde yaygın olarak kullanılan ve makine en önemli elemanlarından biri olan miller, dönen çoğu makine sistemlerinin dinamik davranışı için hayati bir öneme sahiptir. Millerin başarılı bir işlev görebilmeleri ve operasyonel güvenilirliği artırmak için dönen millerin dinamik davranışlarını izlemek gerektiğinden, millerin durumunu izlemek için kullanılacak en etkili yöntemlerden biri titreşim analizidir.

Millerin imalatında kullanılan malzeme seçimleri ve bu malzemeye uygulanan ısı işlemler çok önemlidir. Bu nedenle mil malzemesi olarak; ısı işlem sonrasında kazandıkları üstün mekanik özelliklerinden dolayı endüstride makine parçaları yapımında, krank mili, aks mili, yivli mil, demir yol milleri gibi sünekliği yüksek parçaların imalatında olmak üzere geniş bir kullanım alanına sahip AISI 4140 çeliği seçilmiştir. Millerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için ise geleneksel ısı işlem, derin kriyojenik işlem ve temperleme işlemi uygulanmaktadır. Kriyojenik işlem uygulanan malzemelerde görülen iyileşmeler; sertlikte iyileşme, çekme mukavemetinde iyileşme, sünekliğinde azalma, uzamasında azalma, yorulma dayanımında iyileşme, çekme kalıntı gerilmelerde azalma ve basma kalıntı gerilmelerde artma olmaktadır. Bununla birlikte malzemelerde aşınma direncinde iyileşme, malzeme aşınma hızında azalma ve kırılma tokluğunda azalma vb. gibi çok sayıda iyileşme görülmektedir.

Bu çalışmada temel amaç, yuvarlanmalı yataklarla desteklenmiş ısı işlem, derin kriyojenik işlem ve sonrasında temperleme işlemi uygulanmış millerin (AISI 4140 çeliği) dinamik davranışlarını ve çalışma kararlılıklarını deneysel olarak incelemektir. Farklı ısı işlemleri miller aynı yükleme şartları ve farklı mil dönme hızları (10, 20, 30, 40 ve 50 Hz) altında test edilmiştir. Bu miller; standart mil (S), geleneksel ısı işlem uygulanmış mil (CHT), 12, 24, 36 ve 48 saat derin kriyojenik işlem uygulanmış miller (DCT12, DCT24, DCT36, DCT48) ve derin kriyojenik işlem sonrası temperleme işlemi uygulanmış miller (DCTT12, DCTT24, DCTT34, DCTT48) olmak üzere toplam 10

adet mil kullanılmıştır. Deneysel çalışmada millerin dinamik davranışlarından titreşim sinyalleri verileri deplasman ölçerler ve yuvarlanmalı yataklardan ivme ölçerler aracılığı ile elde edilen bu veriler ayrıntılı olarak analiz edilerek karşılaştırılmıştır.

Sonuçlar; geleneksel ısıtma işlemi, tamamlayıcısı olan derin kriyojenik işlem ve temperleme işlemi uygulanmış AISI 4140 çeliğinden imal edilen millerin dinamik davranışlarında ve çalışma kararlılıklarında önemli farklılıklar olduğunu göstermiştir.

Deneylerden elde edilen verilerden miller için bode, dört kanal veri, şelale (waterfall), yörünge (orbit) ve zamana bağlı genlik değerleri (time waveform) titreşim spektrumu grafikleri elde edilmiştir. Millerin kritik devirlerinin belirlenmesi amacıyla miller için bode grafiği elde edilmiştir. Bu grafiklerde maksimum titreşim genliğinin olduğu devirlere denk gelen durumlarda yörünge (orbit) titreşim spektrumu elde edilerek millerin merkezinin eksenden sapmalarını gösteren milin düşey ve yatay doğrultudaki ileri geri salınımları kıyaslanmıştır. Milin yörünge titreşim spektrumu için veri toplama düşey ve yatay doğrultuda kaydedilmiştir. 0-3000 dev/dak'ya kadar dönerken milin izlediği yörünge verileri toplanmış, yörünge analizi ile X ve Y doğrultularında titreşim ölçümleri yer değiştirme (deplasman) olarak elde edilmiştir. Millerin salınımı daha çok Y doğrultusunda maksimum genlikte olduğu görülmüştür.

Milin dönme devri arttıkça titreşim genliğinde artma veya azalma meydana geldiği görülmüştür. Bu durum, sönümlenme katılığının devirle doğru orantılı olarak artışı ile ilişkilendirilmiştir. Derin kriyojenik işlem görmüş miller ve özellikle derin kriyojenik işlem sonrası temperleme işlemi görmüş millerde rijitlik daha fazla olduğu için tınlaşma (rezonans) olayı daha az görülmüştür. Ayrıca bu millerin dikey ve yatay yönde daha az salınım yaptığı görülmüştür.

Millerin yatay doğrultudaki bileşenlerinin düşey doğrultudaki bileşenlere kıyasla genliklerinde azalma olduğu görülmüştür. Bu sonuç, millerin üzerindeki yükten gelen kuvvetin düşey eksenini daha fazla etkilemesine ve titreşim genliğinde değişim meydana getirmesine neden olduğu görülmüştür. Ayrıca, geleneksel ısıtma işlemli mil (CHT) ve derin kriyojenik işlem görmüş millerin (DCT) titreşimleri, derin kriyojenik işlem sonrası temperleme işlemi görmüş millere (DCTT) göre belirgin bir şekilde daha değişken olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak; DCT millerinin bekletme sürelerinin (12, 24, 36 ve 48 saat), çalışma kararlılığı ve salınımla ilgili etkisine baktığımızda 36 saat bekletme süreli derin

kriyojenik işlemler (DCT36) diğerlerine göre daha az yer değiştirme yaptığı ve daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir. Derin kriyojenik işlem sonrası temperleme işlemleri (DCTT12, DCTT24, DCTT36 ve DCTT48) arasında ise yine 36 saat bekletme süreli derin kriyojenik işlemler ve temperleme işlemler (DCTT36) daha az salınım yaptığı ve daha kararlı olduğu görülmüştür.

DCTT işlemler, diğer işlemlere göre daha az rezonans (tınlaşım) oluştuğunu göstermiştir. Bu sonuç DCTT millerinin elastisite modüllerinin iyileşmesi sonucu olduğu düşünülmektedir. Böylece DCTT millerinin rezonans frekansı azalmıştır.

VibraQuestTM yazılım sistemi aracılığı ile farklı bilgi sunan titreşim grafiklerinden (bode, dört kanal veri, waterfall, orbit, time waveform) elde edilen veriler birbirini doğrular nitelikte olduğu görülmüştür.

8.2. ÖNERİLER

Bu çalışmanın sonuçları; derin kriyojenik işlem ve sonrasında yapılan temperleme işlemi, AISI 4140 çeliğinden imal edilen millerin dinamik davranışlarına ve çalışma kararlılıklarına olumlu etkiler yaptığını göstermiştir. Bu alanda çalışma yapmak isteyen araştırmacılara yapılan öneriler aşağıda verilmiştir.

- Bu çalışmada sadece 200 °C sıcaklıkta temperleme işlemi uygulanmış olan miller incelenmiştir. En iyi sonuç olarak da DCT36 ve DCTT36 işlemlili miller çıkmıştır. Yapılacak çalışmalarda AISI 4140 çeliğine uygulanan kriyojenik işlem sonrasında farklı temperleme sıcaklıklarının (200, 300, 400, 500 ve 600 °C) dinamik davranışlara etkileri incelenebilir.
- Makine ve otomotiv sektöründe AISI 4140 çeliğinin yanı sıra yaygın kullanım alanına sahip AISI 4340 ve AISI 5140 vb. gibi ıslah çeliği olan aynı gruptaki farklı malzemelerden imal edilen millere uygulanan derin kriyojenik işlem ve temperleme işlemlerinin dinamik davranışlara ve çalışma kararlılıklarına etkileri incelenebilir ve sonuçları karşılaştırılabilir.
- AISI 4140 çeliğinden imal edilen millerin yüzey sertleştirme yöntemleri (indüksiyon, alevle yüzey sertleştirme, sementasyon vb.) ile sadece yüzeylerine işlem yapılarak geleneksel ısıl işlem ve kriyojenik işlem ile karşılaştırma yapılabilir.
- Bu farklı işlemlili millerin ve özellikle derin kriyojenik işlemde ideal bekletme süresinin belirlenmesi için taguchi metodu uygulanabilir.
- Mil - yatak sistemlerinde daha yüksek mil dönme ve çalışma hızlarında deney yapılarak karşılaştırma yapılabilir. Yüksek çalışma hızlarında ve farklı yükleme şartlarında deneyler yapılabilir.
- Yuvarlanmalı yataklarla desteklenmiş AISI 4140 çeliğinden imal edilen millerin dinamik davranışları karşılaştırılmış olup, bundan sonra yapılacak çalışmalarda kaymalı yataklarda çalışma kararlılıkları incelenebilir ve sonuçları karşılaştırılabilir.
- İndüksiyonla sertleştirme işlemi uygulanmış millere derin kriyojenik işlem uygulandıktan sonra dinamik davranışları incelenebilir ve sonuçları karşılaştırılabilir.

- AISI 4140 çeliğinden imal edilen millerin yorulma deneyleri yapılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] M. Kam, H. Saruhan ve F. Kara, "Isıl İşlem Görmüş Millerin Dinamik Davranışlarının Deneysel Analizi," *Düzce Üniversitesi İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, c. 5, s. 1, ss. 80-90, 2016.
- [2] M. Kam ve H. Saruhan, "Kriyojenik işlem görmüş millerin titreşim analizi," *1. Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Konferansı (ICETAS2016)*, Afyon, Türkiye, 2016, ss. 1207-1213.
- [3] M. Kam and H. Saruhan, "Experimental vibration analysis of cryogenic treated rotating AISI 4140 steel shafts," *3th International Symposium on Railway Systems Engineering (ISERSE'16)*, Karabük, Türkiye, 2016, ss. 155-162.
- [4] M. Kam, H. Saruhan and U. Kabasakaloglu, "Experimental investigation of vibration generated from the cryogenic treated and induction surface hardened rotating shafts," *3th International Symposium on Railway Systems Engineering (ISERSE'16)*, Karabük, Türkiye, 2016, ss. 140-146.
- [5] M. Kam and H. Saruhan ve F. Kara, "Dynamic behavior analysis of rotor supported by damped rolling element bearing housing," *Gazi Üniversitesi, Politeknik Dergisi*, Basımda, 2016.
- [6] M. Kam ve H. Saruhan, "Kriyojenik ve temperleme işlemi uygulanmış AISI 4140 çeliğinden imal edilen millerin yuvarlanmalı yataklarda çalışma kararlılığının deneysel incelenmesi," *4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2016)*, Antalya, Türkiye, 2016, ss. 364-373.
- [7] M. Kam and H. Saruhan, "Dynamic behaviors of cryogenic treated shafts supported by defected rolling element bearings," *17th International Conference on Machine Design and Production (UMTIK 2016)*, Bursa, Türkiye, 2016.
- [8] M. Kam, H. Saruhan and F. Kara, "Dynamic behavior analysis of rotor supported by damped rolling element bearing housing," *1st International Conference on Tribology (TURKEYTRIB15)*, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [9] W. J. McQ. Rankine, "On the centrifugal force of rotating shafts," *Engineer*, London, England, vol. 27, no. 249, 1869.
- [10] G. Greenhill, "On the strength of the shafts when exposed to botht or sionand thrust," *IMech E*, vol. 36, pp. 182-225, 1883.
- [11] G. DeLaval, "Diary sketches and notes from de laval memorial lectures," *The High Speed and the Gear, Stal-Laval Turbine AB*, Stockholm, 1968.
- [12] H. H. Jeffcott, "The lateral vibration of loaded shafts in the neighborhood of a whirling speed-the effect of want of balance," *Phil. Mag.*, vol. 37, no. 304, 1919.
- [13] C. Rodgers, "On the vibration and critical speeds of mils," *Phil.Mag.*, vol. 44, pp.122-156, 1922.
- [14] B. L. Newkirk, "Shaft whipping," *General Electric Rev.*, vol. 27, no. 169-178, 1924.
- [15] A. L. Kimball, "Internal friction as a cause of shaft whirling," *Phil. Mag.*, vol. 49, pp. 724-727, 1925.
- [16] D. Robertson, "Whirling of a journal in a sleeve bearing," *Phil. Mag.*, vol. 15, pp. 113-130, 1933.

- [17] D. M. Smith, "The motion of a rotor carried by a flexible shaft in flexible bearings," *Proc. Roy. Soc., Series A*, vol. 142, pp. 92-118, 1933.
- [18] F. M. Dimentberg, "Flexural vibrations of rotating shafts," *Butterworth Co.*, London, England, 1961.
- [19] J. W. Lunda and B. Sternlicht, "Rotor-bearing dynamics with emphasis on attenuation," *American Society of Mechanical Engineers*, pp. 61-68, 1961.
- [20] E. J. Gunter and P. E. Allaire "Stabilization of turbo machinery with squeeze film dampers-theory and applications vibration in rotating machinery," *IMEch E. Conference Publications*, pp. 291-300, 1976.
- [21] F. K. Orcutt and E. B. Arwas, "The steady state and dynamic characteristics of a full cylindrical bearing in the laminar and turbulent flow regimes," *Journal of Lubrication Technology*, vol. 89, pp. 143-152, 1967.
- [22] R. L. Eshleman and R. A. Eubanks, "On the critical speeds of continuous rotor," *ASME Journal of Engineering for Industry*, pp. 1180-1188, 1969.
- [23] M. Reddi, "Finite element solution of incompressible lubrication problems," *Journal of Lubrication Technology*, vol. 91, no. 3, pp. 529-533, 1969.
- [24] J. C. Nicholas, "A finite element dynamic analysis of pressure dam and tilting-pad bearings," Ph.D. Thesis, University of Virginia, Charlottesville, VA, 1977.
- [25] R. G. Kirk, "The influence of manufacturing tolerances on multi-lobe bearing performance in turbo machinery," *ASME Topics in Fluid Film Bearing and Rotor Bearing System Design and Optimization*, pp. 108-129, 1978.
- [26] M. Akkk and C. Ettles, "The effect of grooving and bore shapes on the stability of journal bearings," *ASLE Transactions*, vol. 23, no. 4, pp. 431-441, 1980.
- [27] K. E. Rouch, "Dynamics of pivoted pad journal bearings, including pad translation and rotation effects," *ASLE Trans.*, vol. 26, no. 1, pp. 102-109, 1983.
- [28] P. D. McFadden and J. D. Smith, "Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 96, no. 1a, pp. 69-82, 1984.
- [29] T. Belek, "Endstriyel tesislerin bakımında modern yaklaşımlar: dinamik erken uyarıcı bakım yöntemleri," *Mhendis ve Makina*, c. 29, ss. 29-36, 1988.
- [30] Y.T. Su, M.H. Lin and M.S. Lee, "The effects of surface irregularities on roller bearing vibrations," *J. Sound and Vibration*, vol. 165, no. 3, pp. 455-466, 1993.
- [31] N. Aktürk, M. Uneeb and R. Gohar, "The effects of number of balls and preload on vibrations associated with ball bearings," *Journal of Tribology*, vol. 119, pp. 747-753, 1997.
- [32] N. Aktürk and R. Gohar, "The effect of ball size variation on vibrations associated with ball-bearings," *Proc. I. Mech. E.*, pp. 101-109, 1998.
- [33] M. Tiwari, K. Gupta and O. Prakash, "Effect of radial internal clearance of a ball bearing on the dynamics of a balanced horizontal rotor," *J. Sound Vib.*, vol. 238, pp. 723-756, 2000.
- [34] X. Dai, Z. Jin and X. Zhang, "Dynamic behavior of the full rotor/stop rubbing: numerical simulation and experimental verification," *J. Vib. Control*, vol. 251, pp. 807-822, 2002.

- [35] H. Saruhan, "Design optimization of rotor-bearing systems using genetic algorithms," Ph.D. Dissertation, University of Kentucky, Lexington, KY, 2001.
- [36] C. A. Roso, "Design optimization of rotor-bearing systems for industrial turbomachinery applications," Ph.D. Dissertation, University of Kentucky, Lexington, KY, 1997.
- [37] H. Perret, "Die lagerluft als bestimmungsgröße für die beanspruchung eines walzlagers", *Werkstatt Betr.*, vol. 83, no. 4, pp. 131, 1950.
- [38] E. Meldau, "Elastische spielschwingungen konstant belasteter walzlager" *Werkstatt Betr.*, vol. 85, no. 2, pp. 56, 1952.
- [39] O. G. Gustafsson and T. Tallian "Research report on study of the vibration characteristics of bearings," *SKF Ind. Inc.*, 1963.
- [40] H. Tamura ve H. Shimizu, "Vibration of mil based on ball bearing (2nd report, static stiffness of ball bearings containing a small number of balls)," *SME*, vol. 10, no. 41, 1967.
- [41] L. W. Gupta and D. F. Wilcock, "Vibration characteristics of ball bearings P.K.," *Trans. ASME J. of Lubrication Technology*, pp. 284-289, 1977.
- [42] L. D. Meyer, F. F Ahlgren and B. Weichbrodt, "An analytical model for ball bearing vibrations to predict vibration response to distributed defects," *Trans. ASME J. Mechanical Design*, vol. 102, pp. 205-210, 1980.
- [43] T. Yamamoto and Y. Ishida, "The particular vibration phenomena due to ball bearings at the major critical speeds," *Bull. of JSME*, vol. 17, no. 103, pp. 59-67, 1974.
- [44] P. D. McFadden and J. D. Smith, "The vibration produced by a multiple point defect in a rolling element bearing," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 98, no. 2, pp. 263-273, 1985.
- [45] D. Brie, "Modelling of the spalled rolling element bearing vibration signal: an overview and some new results," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 14, no. 3, pp. 353-369, 2000.
- [46] S. Orhan, "Rulmanlarla yataklanmış dinamik sistemlerin titreşim analiziyle kestirimci bakımı," Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Anabilim Dalı, Kırıkkale, Türkiye, 2002.
- [47] S. Orhan, "Dönen makinelerde oluşan arızalar ve titreşim ilişkisi," *Teknoloji*, c. 6, ss. 41-48, 2003.
- [48] S. Orhan, H. Arslan, ve N. Aktürk, "Titreşim analiziyle rulman arızalarının belirlenmesi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 18, s. 2, ss.39-48, 2003.
- [49] H. Arslan, "Şaft-rulman sistemindeki bilyalı rulman hasarlarının titreşim analizi metodu ile tespiti," Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, Türkiye, 2003.
- [50] H. Arslan, S. Orhan, ve N. Aktürk, "Bilyalı rulman hasarlarının neden olduğu titreşimlerin modellenmesi," *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, c. 18, s. 4, ss. 123-146, 2003.
- [51] K. Köse, "Makine arızalarının belirlenmesinde titreşim analizi," *Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi*, 2004, ss. 16-19.

- [52] S. H. Ghafari, F. Golnaraghi and W. Wang, "Condition monitoring of industrial fans," *In 22nd Seminar on Machinery Vibration*, pp. 27-29, 2004.
- [53] H. Taplak ve İ. Uzmay, "Titreşim parametrelerinin dönen mekanik sistem dinamiğine etkilerinin araştırılması," *Teknoloji Dergisi*, c. 7, no. 3, ss. 427-434, 2004.
- [54] H. Arslan, E. Aslan ve N. Aktürk, "Bilyalı rulman hasarlarının titreşim analizi yöntemiyle incelenmesi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 21, no. 3, 2006.
- [55] B. Uygun, "Rulmanlı yataklarda hata analizi," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [56] M. F. Karahan, "Titreşim analiziyle makinalarda arıza teşhisi," Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, Türkiye, 2005.
- [57] C. K. Mechefske, "Machine condition monitoring and fault diagnostic," Queens's University, 2005.
- [58] T. Karaçay, "Açısal temaslı rulmanlarla yataklanmış şaftların dinamiği ve rulman hatalarının deneysel analizi," Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2006.
- [59] Y. Uysal, "Descaler pompa milinin ve rotor gurubunun titreşim ve kritik hız analizi," Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, Türkiye, 2006.
- [60] R. Whalley and A. Abdul-Ameer, "Contoured shaft and rotor dynamics," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 44, no. 4, pp. 772-783, 2009.
- [61] S. Arslan, "Titreşim analizi ile fanlarda arıza teşhisi ve kestirimci bakım," Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, Türkiye, 2010.
- [62] H. Arslan, "Bilyalı rulman yuvarlanma elemanı kusurunun titreşim analizi yöntemiyle incelenmesi," *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, c. 13, no. 2, 2011.
- [63] A. Gunduz, J. T. Dreyer and R. Singh, "Effect of bearing preloads on the modal characteristics of a shaft-bearing assembly: Experiments on double row angular contact ball bearings," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 31, pp. 176-195, 2012.
- [64] E. Öztürk ve H. Karabulut, "Tek silindirli bir dizel motorunun dinamik ve titreşim analizleri," *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 27, s. 3, 2012.
- [65] K. B. Kumar, G. Diwakar and M. R. S. Satynarayana, "Determination of unbalance in rotating machine using vibration signature analysis," *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, vol. 2, no. 5, pp. 3415-3421, 2012.
- [66] H. Taplak, S. Erkaya and Uzmay, I. "Experimental analysis on fault detection for a direct coupled rotor-bearing system," *Measurement*, vol. 46, no. 1, pp. 336-344, 2013.
- [67] S. Kılınç ve H. Saruhan, "Kaymalı ve yuvarlanmalı yataklarda mil kritik hız analizi," *6.Bakım Teknolojileri Kongresi ve Sergisi*, 2013, ss. 209-218.

- [68] H. Saruhan, S. Sarıdemir, A. Çiçek and I. Uygur, "Vibration analysis of rolling element bearings defects," *Journal of Applied Research and Technology*, vol.12, no. 3, pp. 384-395, 2014.
- [69] M. Arias-Montiel, G. Silva-Navarro and A. Antonio-Garcia, "Active vibration control in a rotor system by an active suspension with linear actuators," *Journal of applied research and technology*, vol. 12, no. 5, pp. 898-907, 2014.
- [70] V. Uysal ve Ö. K. Morgül, "Dönen makinelerdeki dengesizlik (balanssızlık) arızasının titreşim analizi ve faz açısı yardımıyla teşhisi," *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 19, s. 3, ss. 245-256, 2015.
- [71] A. D. Nembhard, J. K. Sinha and A. Yunusa-Kaltungo, "Experimental observations in the shaft orbits of relatively flexible machines with different rotor related faults," *Measurement*, vol. 75, pp. 320-337, 2015.
- [72] E. Yıldırım ve M. F. Karahan, "Titreşim analizi ile rulmanlarda kestirimci bakım," *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, c. 11, s. 1, ss. 17-23, 2015.
- [73] D. Senthilkumar and I. Rajendran, "Optimization of deep cryogenic treatment to reduce wear loss of 4140 steel," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 27, no. 5, pp. 567-572, 2012.
- [74] F. Kara, A. Çiçek and H. Demir "Multiple regression and ANN models for surface quality of cryogenically-treated AISI 52100 bearing steel," *J. Balkan Tribol. Assoc*, vol. 19, no. 4, pp. 570-584, 2013.
- [75] F. Kara, "AISI 52100 çeliğinin yorulma ömrü ve taşlanabilirliğine kriyojenik işlem parametrelerinin etkilerinin araştırılması" Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, Türkiye, 2014.
- [76] D. Mohan Lal, S. Renganarayanan and A. Kalanidhi, "Cryogenic treatment to augment wear resistance of tool and die steels," *Cryog.*, vol. 41, pp. 149-155, 2001.
- [77] D. Senthilkumar and I. Rajendran, "Influence of shallow and deep cryogenic treatment on tribological behavior of en 19 steel," *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 18, no. 9, pp. 53-59, 2011.
- [78] R. L. Dowdell and O. E. Harder, "The decomposition of the austenitic structure in steel," Part II, The decomposition of austenite in liquid oxygen," *Trans. Am. Soc. Steel Treat.*, vol. 11, pp. 391-392, 1927.
- [79] H. M. Rosenberg, "The properties of metals at low temperatures," *Prog. Met. Phys.*, vol. 7, pp. 339-354, 1958.
- [80] R. R. Hake, D. H. Leslie and T. G. Berlincourt, "Electrical resistivity, hall effect and superconductivity of some b.c.c. titanium-molybdenum alloys," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 20, pp. 177-186, 1961.
- [81] A. Maimoni, "Electrical resistance of aluminium at low temperatures," *Cryog.*, vol. 2, no. 4, pp. 217-222, 1962.
- [82] A. B. Miller, "An austenitic cast steel for low temperature applications," *Cryog.*, vol. 5, no. 6, pp. 320-324, 1965.
- [83] F. Pawlek and D. Rogalla, "The electrical resistivity of silver, copper, aluminium, and zinc as a function of processing of materials: A review of current status," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 16, no. 6, pp. 829-840, 2001.

- [84] V. A. Kuzmenko and S. V. Grishakov, "Influence of high loading frequency on the endurance of several structural alloys at low (-196°C) and room temperatures," *Strength Mater.*, vol. 6, no. 10, pp. 1195-1200, 1974.
- [85] A. Stepanov and L. K. Lokhankina, "Low-cycle fatigue of chrome-manganese steel at +20 and -196°C," *Strength Mater.*, vol. 11, no. 8, pp. 847-849, 1979.
- [86] D. N. Collins and J. Dormer, "Deep cryogenic treatment of a D 2 cold-work tool steel," *Heat Treatment of Metals(UK)*, vol. 24, no. 3, pp. 71-74, 1997.
- [87] A. Prabhakaran, A. Bensely, G. Nagarajan and D. Mohan Lal, "Effect of cryogenic treatment on impact strength of case carburized steel-EN 353," *Proceedings of IMEC2004 International Mechanical Engineering Conference*, Kuwait, 2004.
- [88] M. Preciado, P. M. Bravo and J. M. Alegre, "Effect of low temperature tempering prior cryogenic treatment on carburized steels," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 176, pp. 41-44, 2006.
- [89] A. Bensely, A. Prabhakaran, D. Mohan Lal and G. Nagarajan, "Enhancing the wear resistance of case carburized steel (En 353) by cryogenic treatment," *Cryogenics*, vol. 45, pp. 747-754, 2006.
- [90] S. Zhirafar, A. Rezaeian and M. Pugh, "Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties 4340 steel," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 186, pp. 298-303, 2007.
- [91] P. Baldissera and C. Delprete, "Deep cryogenic treatment: A bibliographic review," *The Open Mechanical Engineering Journal*, vol. 2, pp. 1-11, 2008.
- [92] A. Bensely, L. Shyamala, S. Harish, D. Mohan Lal, G. Nagarajan, K. Junik and A. Rajadurai, "Fatigue behaviour and fracture mechanism of cryogenically treated En 353 steel," *Mater. Des.*, vol. 30, pp. 2955-2962, 2009.
- [93] M. Koneshlou, K. Meshinchi and F. Khomamizadeh, "Effect of cryogenic treatment on microstructure, mechanical and wear behaviors of AISI H13 hot work tool steel," *Cryog.*, vol. 51, pp. 55-61, 2011.
- [94] A. Akhbarizadeh, A. Shafyei and M. A. Golozar, "Effects of cryogenic treatment on wear behavior of D6 tool steel," *Materials and Design*, vol. 30, no. 8, pp. 3259-3264, 2009.
- [95] R. Sri Siva, M. Arockia Jaswin and D. Mohan Lal, "Enhancing the wear resistance of 100Cr6 bearing steel using cryogenic treatment," *Tribol. Trans.*, vol. 55, pp. 387-393, 2012.
- [96] S. S. Dixit, S. R. Nimbalkar and R. R. Kharde, "Dry sliding wear analysis of D5 tool steel at different heat treatments," *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 2, no. 5, pp. 16-26, 2013.
- [97] B. Podgornik, F. Majdic, V. Leskovsek and J. Vizinti, "Improving tribological properties of tool steels through combination of deep-cryogenic treatment and plasma nitriding," *Wear*, vol. 288, pp. 88-93, 2012.
- [98] I. Gunes, A. Cicek, K. Aslantas and F. Kara "Effect of deep cryogenic treatment on wear resistance of AISI 52100 bearing steel," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 67, no. 6, pp. 909-917, 2014.
- [99] D. Senthilkumar, "Effect of deep cryogenic treatment on residual stress and mechanical behaviour of induction hardened En 8 steel," *Advances in Materials and Processing Technologies*, vol. 1, pp. 10, 2016.

- [100] A. Zare, H. Mansouri and S. R. Hosseini, "Influence of the holding time of the deep cryogenic treatment on the strain hardening behavior of HY-TUF steel," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 1-9, 2015.
- [101] S. Li, X. Yuan, W. Jiang, H. Sun, J. Li, K. Zhao and M. Yang, "Effects of heat treatment influencing factors on microstructure and mechanical properties of a low-carbon martensitic stainless bearing steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 605, pp. 229-235, 2014.
- [102] A. Idayan, A. Gnanavelbabu and K. Rajkumar, "Influence of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of AISI 440C bearing steel," *Procedia Engineering*, vol. 97, pp. 1683-1691, 2014.
- [103] N. W. Khun, E. Liu, A. W. Y. Tan, D. Senthilkumar, B. Albert and D. M. Lal, "Effects of deep cryogenic treatment on mechanical and tribological properties of AISI D3 tool steel," *Friction*, vol. 3, no. 3, pp. 234-242, 2015.
- [104] H. Li, W. Tong, J. Cui, H. Zhang, L. Chen and L. Zuo, "The influence of deep cryogenic treatment on the properties of high-vanadium alloy steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 662, pp. 356-362, 2016.
- [105] K. Amini, A. Akhbarizadeh and S. Javadpour, "Investigating the effect of quench environment and deep cryogenic treatment on the wear behavior of AZ91," *Materials and Design*, vol. 54, pp. 154-160, 2014.
- [106] P.V. Krot, S.V. Bobyr, N.V. Biba and M.O. Dedik, "Modeling of phase transformations in the rolls of the special alloy steels during quenching and deep cryogenic treatment," MCHTSE2016, 2016.
- [107] P. I. Patil and R. G. Tated, "Comparison of effects of cryogenic treatment on different types of steels: A review," *International Conference in Computational Intelligence (ICCI)*, vol. 9, pp. 10-29, 2012.
- [108] S. Singh Gill and J. Singh, "Effect of deep cryogenic treatment on machinability of titanium alloy (Ti-6246) in electric discharge drilling," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 25, no. 6, pp. 378-385, 2010.
- [109] A. Jordine, "Increased life of carburised race car gears by cryogenic treatment," *Int. J. Fatigue*, vol. 18, no. 6, pp. 418-426, 1996.
- [110] F. Meng, K. Tagashira, R. Azuma and H. Sohma, "Role of eta-carbide precipitation's in the wear resistance improvements of Fe-12-Cr-Mo-V-1.4 C tool steel by cryogenic treatment," *ISIJ Int.*, vol. 34, no. 2, pp. 205-210, 1994.
- [111] T. S. Vinothkumar, R. Miglani and L. Lakshminarayanan, "Influence of deep dry cryogenic treatment on cutting efficiency and wear resistance of nickel-titanium rotary endodontic instruments," *J. Endod.*, vol. 33, no. 11, pp. 1355-1358, 2007.
- [112] R. Chillar and S. C. Agrawal, "Cryogenic treatment of metal parts," *Transactions of the International Cryogenic Materials Conference (ICMC)*, Colorado, 2005, pp.77-82.
- [113] Y. Yıldız, "Soğuk ve kriyojenik işlemlerle bakır elektrot ve berilyum-bakır alaşımı iş parçalarının elektro erozyon işleme performansına etkileri," Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2010.

- [114] A. Akhbarizadeh and S. Javadpour, "Investigating the effect of as-quenched vacancies in the final microstructure of 1.2080 tool steel during the deep cryogenic heat treatment," *Mater. Lett.*, vol. 93, pp. 247-250, 2013.
- [115] K. Amini, A. Akhbarizadeh and S. Javadpour, "Investigating the effect of holding duration on the microstructure of 1.2080 tool steel during the deep cryogenic heat treatment," *Vac.*, vol. 86, pp. 1534-1540, 2012.
- [116] K. Amini, A. Akhbarizadeh and S. Javadpour, "Investigating the effect of the quench environment on the final microstructure and wear behavior of 1.2080 tool steel after deep cryogenic heat treatment," *Mater. Des.*, vol. 45, pp. 316-322, 2013.
- [117] D. Das, A. K. Dutta, K. K. Ray, "Optimization of the duration of cryogenic processing to maximize wear resistance of AISI D2 steel," *Cryogenics*, vol. 49, pp. 176-184, 2009.
- [118] S. E. Vahdat, S. Nategh and S. Mirdamadi, "Microstructure and tensile properties of 45WCrV7 tool steel after deep cryogenic treatment," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 585, pp. 444-454, 2013.
- [119] N. B. Dhokey and S. Nirbhavne, "Dry sliding wear of cryotreated multiple tempered D-3 tool steel," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, pp. 1484-1490, 2009.
- [120] K. Gu, H. Zhang, B. Zhao, J. Wang, Y. Zhou and Z. Li, "Effect of cryogenic treatment and aging treatment on the tensile properties and microstructure of Ti-6Al-4V alloy," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 584, pp. 170-176, 2013.
- [121] J. M. Jafferson and P. Hariharan, "Machining performance of cryogenically treated electrodes in microelectric discharge machining: A comparative experimental study," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 28, pp. 397-402, 2013.
- [122] D. Senthilkumar, I. Rajendran, M. Pellizzari and J. Siiriainen, "Influence of shallow and deep cryogenic treatment on the residual state of stress of 4140 steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, no. 3, pp. 396-401, 2011.
- [123] S. G. Singh, J. Singh, R. Singh and H. Singh, "Effect of cryogenic treatment on AISI M2 high speed steel: metallurgical and mechanical characterization," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 21, pp. 1320-1326, 2012.
- [124] M. Arockia Jaswin and D. Mohan Lal, "Effect of cryogenic treatment on the tensile behaviour of EN 52 and 21-4N valve steels at room and elevated temperatures," *Mater. Des.*, vol. 32, pp. 2429-2437, 2011.
- [125] M. M. Morra, I. S. Hwang, R. G. Ballinger and M. O. Hoenig, "Effect of cold work and heat treatment on the 4°K tensile, fatigue and fracture toughness properties of Incoloy 908," *11th International Conference on Magnet Technology (MT-11)*, Japan, 1990, pp. 731-736.
- [126] C. X. Xiong, X. M. Zhang, Y. L. Deng, Y. Xiao, Z. Z. Deng and B. X. Chen, "Effects of cryogenic treatment on mechanical properties of extruded Mg-Gd-Y-Zr (Mn) alloys," *J. Central South Univ. Technol.*, vol. 14, pp. 305-309, 2007.
- [127] Y. B. Chang, S. C. Lee and C. J. Hu, "Low-temperature fracture toughness study of Fe-7Al-27Mn-C alloys," *J. Mater. Sci.*, vol. 30, pp. 4598-4602, 1995.
- [128] E. Kerscher and K. H. Lang, "Increasing the fatigue limit of a high-strength bearing steel by a deep cryogenic treatment," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 240, pp. 1-4, 2010.

- [129] Ş. Ekinci ve A. Akdemir, "Nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğine uygulanan yükün aşınma hızına etkisi," *Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi*, c. 10, s. 1, ss. 39, 2011.
- [130] F. C. Babalık, *Makine Elemanları ve Konstrüksiyon Örnekleri*, 2. baskı, Ankara, Türkiye: Nobel yayıncılık, 2006, ss. 84-87.
- [131] M. A. Topbaş, "*Çelik ve ısıtma işlem el kitabı*," İstanbul, Türkiye: Prestij Yayıncılık Bas. Hiz., 1998, ss. 75-96.
- [132] E. Kesti, "Ç-4140 çeliğinin, mikro yapı ve mekanik özelliklerine su verme ortamının etkilerinin araştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye, 2009.
- [133] B. Pekgöz, S. Sarıdemir, İ. Uygur ve Y. Aslan, "Sementasyon işleminin farklı çeliklerin mikroyapı ve sertlik değerlerine etkileri," *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, c. 10, s. 1, ss. 19-24, 2013.
- [134] M. Uzkut ve İ. Özdemir, "Farklı çeliklere uygulanan değişen ısıtma hızlarının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi," *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, c. 3, s. 3, ss. 65-73, 2001.
- [135] M. Uzkut ve İ. Özdemir, "Farklı çeliklere uygulanan değişen ısıtma hızlarının mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi," *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, c. 3 s. 3, ss. 65-73, 2001.
- [136] T. Savaşkan, "Malzeme Bilgisi ve Muayenesi," Akademi Yayınları, Trabzon, 2004.
- [137] T. Savaşkan, "Malzeme Bilgisi ve Muayenesi," Seçkin Yayınları, Trabzon, 2012.
- [138] A. Stojko, "Sub-zero treatment of tool steels," Master's Thesis, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 2001.
- [139] P. L. Yen, "Effect of cryogenic treatment on the wear resistance of tool steel," Ph.D. Thesis, The Pennsylvania State University, Pennsylvania, U.S.A., 1996.
- [140] J.Y. Huang, Y.T. Zhu, X.Z. Liao, I. J. Beyerlein, M. A. Bourke and T. E. Mitchell, "Microstructure of cryogenic treated M2 tool steel," *Materials Science and Engineering A*, vol. 339, pp. 241-244, 2003.
- [141] A. Çiçek, F. Kara, T. Kıvak and E. Ekici, "Evaluation of machinability of hardened and cryo-treated AISI H13 hot work tool steel with ceramic inserts," *Int. J. Refract. Metal. Hard Mater.*, vol. 41, pp. 461-469, 2013.
- [142] D. Das, A. K. Dutta and K. K. Ray "Sub-zero treatments of AISI D2 steel: Part I. Microstructure and hardness," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 527, pp. 2182-2193, 2010.
- [143] K. E. Thelning, "Çelik ve Isıtma İşlemi," Çeviren: Doç. Dr. Adnan TEKİN, 1987.
- [144] S. Kalia, "Cryogenic processing: A study of materials at low temperatures," *Journal of Low Temperature Physics*, vol. 158, pp. 934-945, 2010.
- [145] W. Reitz, and J. Pendray, "Cryoprocessing of materials: A review of current status," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 16, no. 6, pp. 829-840, 2001.
- [146] E. A. Carlson, "Cold treating and cryogenic treatment of steel," ASM Handbook, vol. 4, ASM International, Pennsylvania, U.S.A., pp. 203-206, 1991.

- [147] S. E. Kısakürek, "Malzeme teknolojisinde sertlik deneyi," *Malzeme Teknolojisinde Deneysel Verilerin Değerlendirilmesi Semineri*, Boğaziçi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İstanbul, Türkiye, 1984.
- [148] M. Gavas, M. Yaşar, M. Aydın ve Y. Altunpak, "Üretim yöntemleri ve imalat teknolojileri", 3. baskı, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2013.
- [149] D. E. Davies, "Practical experimental metallurgy," *Elsevier Publishing*, California, U.S.A., 1966.
- [150] A. Harris Tedric, "Rolling bearing analysis, John Willey and Sons," *Inc*, vol. 4, pp. 6-7, 2001.
- [151] E. Koç, Makina Elemanları, 2. Baskı, Nobel Yayınları, Cilt-II, Adana, 2006.
- [152] W.Y. Lin, "Optimum design of rolling element bearings using genetic algorithm-differential evolution (GA-DE) hybrid algorithm," *J. Mechanical Engineering Science*, vol. 225, pp. 714-721, 2010.
- [153] A. Howard, "Review of rolling element bearing vibration: detection, diagnosis and prognosis, technical report dsto-rr-0013, *Defence Science and Technology Organisation*, Australia, 1994.
- [154] N. Choudhury, "Application of acoustic emission technique for the detection of defects in rolling element bearings," *Tribology International*, vol. 33, no. 1, pp. 39-45. 2000.
- [155] A. Muthukumarasamy and S. Ganeriwala, "The effect of frequency resolution in bearing fault studies," *Technote*, SpectraQuest Inc., 2010.
- [156] A. Taghizadeh-Alisaraei, B. Ghobadian, T. Tavakoli-Hashjin and S. Saeid Montasebi, "Vibration analysis of a diesel engine using biodiesel and petrodiesel and petrodiesel fuel blends," *Fuel*, vol. 102, pp. 414-422, 2012.
- [157] S. Klinchaeam, P. Nivesrangsan and M. Lokitsangthong, "Condition monitoring of a small four-stroke petrol engine using vibration signals," *KMITL Science and Technology Journal*, vol. 9, pp. 9-17, 2009.
- [158] S. Sarıdemir, "The effect of dwell angle on vibration characteristics of camshaft bearing housings," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 27, no. 12, pp. 3571-3577, 2013.
- [159] S. Sarıdemir and H. Saruhan, "Experimental analysis of maximum valve lift effects in camfollower system for internal combustion engines," *Journal of Mechanical Science and Technology (ISI)*, vol. 28, no. 9, pp. 3443-3448, 2014.
- [160] P. Baldissera and C. Delprete, "Effects of deep cryogenic treatment on static mechanical properties of 18NiCrMo5 carburized steel," *Materials and Design*, vol. 30, pp. 1435-1440, 2009.
- [161] M. Erdoğan, Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri, Cilt1., Nobel yayın dağıtım Ltd., Ankara, 2000, s.151.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Menderes KAM
Doğum Tarihi ve Yeri : 1983 - Kıbrısık
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : mendereskam@duzce.edu.tr / mendereskam@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Makine Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2016
Y. Lisans	Makine Eğitimi	Marmara Üniversitesi	2013
Lisans	Makine Mühendisliği	Bülent Ecevit Üniversitesi	2016- ...
Lisans	Makine Eğitimi	Dumlupınar Üniversitesi	2005
Lise	Makine Bölümü	Bolu Merkez İzzet Baysal Anadolu Teknik Lisesi	2001

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2015 - Halen	Düzce Üniversitesi - Cumayeri MYO	Öğr. Gör./Müd. Yrd.
2009 - 2015	EGM-İstanbul	Proje Geliştirme
2006 - 2009	EGM-İstanbul	Ar-Ge
2005 - 2006	Sakarya - Söğütlü Çok Programlı Lisesi	Öğretmen
2003 - 2004	Bolu Filiz Gıda San. Tic. A.Ş.	Makine -Bakım
2002 - 2003	Bolu Arçelik A.Ş.	Makine -Kalıp
2000 - 2001	Bolu Filiz Gıda San. Tic. A.Ş.	Makine -Bakım

YABANCI DİLİ

İngilizce (ÜDS/KPDS/YDS) : 72.00

ESERLER

A. Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

A1. G. Atakok, M. Kam ve M. Kurt, “Preference Based on Reasons of Vocational and Technical Secondary Schools in Turkey,” *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 141, pp. 726-730, 2014.

A2. E. Aslan, M. Otrar, Kam and M. Kam, “A Research on the General Perceptions and Attitudes of House Breaking Victims Towards the Police,” *Ozean Journal of Social Science*, vol. 7, no. 1, 2014.

B. Ulusal hakemli dergilerde makaleler:

B1. M. Kam ve H. Saruhan, “Experimental spectral analysis of split sleeve bearing clearance effect on a rotating shaft system,” *Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknolojik Araştırmalar Dergisi*, yayımlanmak üzere gönderildi, 2016.

B2. M. Kam, H. Saruhan ve T. Guney, "Kriyojenik işlem ve sıcak dövme işlemi uygulanmış millerin deneysel titreşim analizi,” *Düzce Üniversitesi İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, yayımlanmak üzere gönderildi, 2016.

B3. M. Kam, H. Saruhan ve F. Kara, “Dynamic behavior analysis of rotor supported by damped rolling element bearing housing,” *Gazi Üniversitesi, Politeknik Dergisi*, Basımda, 2016.

B4. M. Kam, H. Saruhan ve F. Kara, "Isıl işlem görmüş millerin dinamik davranışlarının deneysel analizi,” *Düzce Üniversitesi İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, c.5, s. 1, ss. 80-90, 2016.

C. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında bildiriler:

C1. M. Kam ve H. Saruhan, “Kriyojenik ve Temperleme İşlemi Uygulanmış AISI 4140 Çeliğinden İmal Edilen Millerin Yuvarlanmalı Yataklarda Çalışma Kararlılığının Deneysel İncelenmesi,” *4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science-ISITES2016*, Antalya, Türkiye, 2016.

C2. M. Kam ve H. Saruhan, “Experimental vibration analysis of cryogenic treated rotating AISI 4140 steel shafts,” *3th International Symposium on Railway Systems Engineering-ISERSE'16*, Karabük, Türkiye, 2016.

C3. M. Kam, H. Saruhan ve U. Kabasakalolu, “Experimental investigation of vibration generated from the cryogenic treated and induction surface hardened rotating shafts,” *3th International Symposium on Railway Systems Engineering-ISERSE'16*, Karabük, Türkiye, 2016.

C4. M. Kam ve H. Saruhan, “Dynamic behaviors of cryogenic treated shafts supported by defected rolling element bearings,” *17th International Conference on Machine Design and Production-UMTIK 2016*, Bursa, Turkey, 2016.

C5. M. Kam ve H. Saruhan, “Kriyojenik İşlem Görmüş Millerin Titreşim Analizi,” *1. Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Konferansı-ICETAS2016*, Afyon, Türkiye, 2016.

C6. M. Kam ve G. Atakok, “Mesleki ve teknik ortaöğretim okullarının tercih edilme nedenleri,” *1. Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Konferansı-ICETAS2016*, Afyon, Türkiye, 2016.

C7. M. Kam, H. Saruhan ve F. Kara, “Dynamic behavior analysis of rotor supported by damped rolling element bearing housing,” *1st International Conference on Tribology-YTU*, İstanbul, Turkey, 2015.

C8. G. Atakok, M. Kam ve M. Kurt, “Preference Based on Reasons of Vocational and Technical Secondary Schools in Turkey,” *4th World Conference on Learning, Teaching and Educational Leadership*, Barcelona, İspanya, 2014.

D. Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında bildiriler:

D1. M. Kam, H. Saruhan ve F. Kara, “Isıl İşlem Görmüş Millerin Dinamik Davranışlarının Deneysel Analizi,” *Düzce Üniversitesi Ulusal Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu-UMAS2015*, Düzce, Türkiye, 2005.

E. Projeler

E1. “Kriyojenik İşlem Görmüş Millerin Dinamik Davranışlarının Deneysel Analizi”, BAP Projesi, 2015.06.05.351, Proje Araştırmacısı, **2015-2016**.

E2. “Prisoners' Opportunity to Educate Children by Telling Stories”, Grundtvig and Leonardo Da Vinci, Proje Araştırmacısı, **2012-2013**.

E3. “Evden Hırsızlık Olayları Araştırması”, EGM Projesi, Proje Araştırmacısı, **2010-2013**.