

**ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN DAİMİ MİKNATISLI
SENKRON MOTORUN ROTOR MİLİNİN TİTREŞİM VE
GÜRÜLTÜ ANALİZİ**

SERDAR ALBAYRAK

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. HAMİT SARUHAN**

DÜZCE, 2025

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN DAİMİ MİKNATISLI
SENKRON MOTORUN ROTOR MİLİNİN TİTREŞİM VE
GÜRÜLTÜ ANALİZİ

Serdar ALBAYRAK tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim 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
Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. İlyas UYGUR
Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ
Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Arif ÖZKAN
Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Oğuz KOÇAR
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 07/01/2025

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.

07 Ocak 2025

Serdar ALBAYRAK

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Hamit SARUHAN'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. İlyas UYGUR ve Prof. Dr. Uğur GÜVENÇ'e şükranlarımı sunarım.

Büyük zorluklarla beni bugünlere getiren yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen rahmetli babam Hikmet ALBAYRAK ve annem Meryem ALBAYRAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deney millerinin imalatında ve montaj işlemlerinin yapılmasında destek olan Veltech Mühendislik ailesine teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2021.06.05.1188 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

07 Ocak 2025

Serdar ALBAYRAK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR.....	ix
SİMGELER	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
EXTENDED ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM	9
3.1. MODAL ANALİZ.....	9
3.2. OPERASYONEL SAPMA ŞEKLİ.....	10
3.3. GÜRÜLTÜ EMİSYONU.....	11
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	12
4.1. DENEY ROTOR MİLLERİNİN HAZIRLANMASI	12
4.2. DENEYSEL MODAL ANALİZ	14
4.3. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....	15
4.4. OPERASYONEL SAPMA ANALİZİ (OPERATIONAL DEFLECTION SHAPE - ODS)	16
4.5. GÜRÜLTÜ EMİSYONU.....	17
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	19
5.1. MODAL ANALİZ.....	19
5.2. ODS ANALİZİ	23
5.3. GÜRÜLTÜ EMİSYONU ANALİZİ.....	55
6. SONUÇLAR.....	60
7. KAYNAKLAR.....	62
ÖZGEÇMİŞ	73

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 4.1. Rotor mili söküm işlemleri.	12
Şekil 4.2. Deney millerinin imalat işlemleri.	13
Şekil 4.3. Deneysel modal analiz düzeneği.	14
Şekil 4.4. Rotor mili üzerindeki vuruş noktaları.	15
Şekil 4.5. SEM ağ örgüsü görüntüsü	15
Şekil 4.6. ODS deney düzeneği.	17
Şekil 4.7. Gürültü emisyonu analiz deney düzeneği.	17
Şekil 5.1. DMA'ya göre doğal frekanslar.	20
Şekil 5.2. DMA ve SEM'e göre mod şekilleri	21
Şekil 5.3. DMA'dan elde edilen FYF grafikleri.	22
Şekil 5.4. DMA'dan elde edilen tutarlılık grafikleri.	22
Şekil 5.5. DMA'dan elde edilen sönümleme oranları.	23
Şekil 5.6. ODS geometri 1Y, 2Y, 3X ve 4X noktaları ve sapma görüntüsü.	25
Şekil 5.7. 1Y ivmeölçer AISI 4340 900 d/d 6kW için sapma görüntüsü	26
Şekil 5.8. 1Y ivmeölçer AISI 4140 600 d/d 8 kW.	27
Şekil 5.9. 1Y ivmeölçer AISI 4340 600 d/d 8 kW.	27
Şekil 5.10. 1Y ivmeölçer AISI 4340 600 d/d 8 kW.	28
Şekil 5.11. 1Y ivmeölçer AISI 4140 900 d/d 6 kW.	28
Şekil 5.12. 1Y ivmeölçer AISI 4340 900 d/d 6 kW.	29
Şekil 5.13. 1Y ivmeölçer AISI 5140 900 d/d 6 kW.	29
Şekil 5.14. 1Y ivmeölçer AISI 4140 1200 d/d 8 kW.	30
Şekil 5.15. 1Y ivmeölçer AISI 4340 1200 d/d 8 kW.	30
Şekil 5.16. 1Y ivmeölçer AISI 5140 1200 d/d 8 kW.	31
Şekil 5.17. 1Y ivmeölçer AISI 4140 1500 d/d 8 kW.	31
Şekil 5.18. 1Y ivmeölçer AISI 4340 1500 d/d 8 kW.	32
Şekil 5.19. 1Y ivmeölçer AISI 5140 1500 d/d 8 kW.	32
Şekil 5.20. 2Y ivmeölçer AISI 4340 600 d/d 8 kW için sapma görüntüsü	34
Şekil 5.21. 2Y ivmeölçer AISI 4140 600 d/d 2 kW.	34
Şekil 5.22. 2Y ivmeölçer AISI 4340 600 d/d 2 kW.	35
Şekil 5.23. 2Y ivmeölçer AISI 5140 600 d/d 2 kW.	35
Şekil 5.24. 2Y ivmeölçer AISI 4140 900 d/d 0 kW.	36
Şekil 5.25. 2Y ivmeölçer AISI 5140 900 d/d 0 kW.	36
Şekil 5.26. 2Y ivmeölçer AISI 5140 900 d/d 0 kW.	37
Şekil 5.27. 2Y ivmeölçer AISI 4140 1200 d/d 8 kW.	37
Şekil 5.28. 2Y ivmeölçer AISI 4340 1200 d/d 8 kW.	38
Şekil 5.29. 2Y ivmeölçer AISI 5140 1200 d/d 8 kW.	38
Şekil 5.30. 2Y ivmeölçer AISI 4140 1500 d/d 8 kW.	39
Şekil 5.31. 2Y ivmeölçer AISI 4340 1500 d/d 8 kW.	39
Şekil 5.32. 2Y ivmeölçer AISI 5140 1500 d/d 8 kW.	40
Şekil 5.33. 3X ivmeölçer AISI 4340 1500 d/d 6 kW için sapma görüntüsü	41
Şekil 5.34. 3X ivmeölçer AISI 4140 600 d/d 2 kW.	42
Şekil 5.35. 3X ivmeölçer AISI 4340 600 d/d 2 kW.	42
Şekil 5.36. 3X ivmeölçer AISI 5140 600 d/d 2 kW.	43
Şekil 5.37. 3X ivmeölçer AISI 4140 900 d/d 8 kW.	43
Şekil 5.38. 3X ivmeölçer AISI 4340 900 d/d 8 kW.	44
Şekil 5.39. 3X ivmeölçer AISI 5140 900 d/d 8 kW.	44

Şekil 5.40. 3X ivmeölçer AISI 4140 1200 d/d 8 kW.....	45
Şekil 5.41. 3X ivmeölçer AISI 4340 1200 d/d 8 kW.....	45
Şekil 5.42. 3X ivmeölçer AISI 5140 1200 d/d 8 kW.....	46
Şekil 5.43. 3X ivmeölçer AISI 4140 1500 d/d 8 kW.....	46
Şekil 5.44. 3X ivmeölçer AISI 4340 1500 d/d 8 Kw.....	47
Şekil 5.45. 3X ivmeölçer AISI 5140 1500 d/d 8 kW.....	47
Şekil 5.46. 4X ivmeölçer AISI 4340 1500 d/d 4 kW için sapma görüntüsü	49
Şekil 5.47. 4X ivmeölçer AISI 4140 600 d/d 2 kW.....	49
Şekil 5.48. 4X ivmeölçer AISI 4340 600 d/d 2 kW.....	50
Şekil 5.49. 4X ivmeölçer AISI 5140 600 d/d 2 kW.....	50
Şekil 5.50. 4X ivmeölçer AISI 4140 900 d/d 8 kW.....	51
Şekil 5.51. 4X ivmeölçer AISI 4340 900 d/d 8 kW.....	51
Şekil 5.52. 4X ivmeölçer AISI 5140 900 d/d 8 kW.....	52
Şekil 5.53. 4X ivmeölçer AISI 4140 1200 d/d 8 kW.....	52
Şekil 5.54. 4X ivmeölçer AISI 4340 1200 d/d 8 kW.....	53
Şekil 5.55. 4X ivmeölçer AISI 5140 1200 d/d 8 kW.....	53
Şekil 5.56. 4X ivmeölçer AISI 4140 1500 d/d 8 kW.....	54
Şekil 5.57. 4X ivmeölçer AISI 4340 1500 d/d 8 kW.....	54
Şekil 5.58. 4X ivmeölçer AISI 4340 1500 d/d 8 kW.....	55
Şekil 5.59. 0 kW yükte gürültü tepe değerleri.	57
Şekil 5.60. 2 kW yükte gürültü tepe değerleri.	57
Şekil 5.61. 4 kW yükte gürültü tepe değerleri	58
Şekil 5.62. 6 kW yükte gürültü tepe değerleri	58
Şekil 5.63. 8 kW yükte gürültü tepe değerleri	59

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 4.1. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.....	13
Çizelge 4.2. Kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri.....	13
Çizelge 5.1. DMA ve SEM'e göre doğal frekanslar.....	19
Çizelge 5.2. ODS doğal frekans değerleri.	24
Çizelge 5.3. 1Y ivmeölçer en düşük genlik tepe değerleri.	26
Çizelge 5.4. 2Y ivmeölçer en düşük genlik tepe değerleri.	33
Çizelge 5.5. 3X ivmeölçer en düşük genlik tepe değerleri	41
Çizelge 5.6. 4X ivmeölçer en düşük genlik tepe değerleri.	48
Çizelge 5.7. Mod frekanslarına göre gürültü tepe değerleri.	56

KISALTMALAR

AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (American Iron and Steel Institute)
DMSM	Daimi Mıknatıslı Senkron Motor (Permanent Magnet Synchronous Motor)
DOF	Serbestlik derecesi (Degree of Freedom)
DMA	Deneyisel Modal Analiz (Experimental Modal Analysis)
Dns	Yoğunluk (Density)
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu (Finite Element Method)
FFT	Fast Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
FYF	Frekans Yanıt Fonksiyonu (Frequency Response Function)
ODS	Operasyonel Sapma Şekli (Operational Deflection Shape)
D/D	Dakikadaki Devir Sayısı (Revolutions per Minute)

SİMGELER

$A(f)$	Modal test giriş fonksiyonu
$B(f)$	Modal test çıkış fonksiyonu
dB	Desibel
f	Doğal frekans (Hz)
$H(f)$	Yanıt fonksiyonu
Hz	Hertz
k	Sertlik
m	Kütle
N	Newton
t	Zaman
ζ	Modal sönüm oranı
ω_n	Doğal frekans (rad/sn)

ÖZET

ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN DAİMİ MİKNATISLI SENKRON MOTORUN ROTOR MİLİNİN TİTREŞİM VE GÜRÜLTÜ ANALİZİ

Serdar ALBAYRAK

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Hamit SARUHAN

Ocak 2025, 72 sayfa

Daimi mıknatıslı senkron motorlar (DMSM), yüksek güvenilirlikleri ve yüksek dinamik performansları nedeniyle hassas robotlar, havacılık ve elektrikli kara, hava ve deniz araç endüstrileri gibi birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Avantajlarına rağmen, titreşimin DMSM'nin performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır. DMSM'nin verimli ve güvenilir performansını sağlamak için rotor mili için doğru malzeme seçimi kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan DMSM'nin rotor milinin motor titreşim ve gürültüsüne olan etkilerini karşılaştırmak için üç farklı rotor mili malzemesi (AISI 4140, AISI 4340 ve AISI 5140) kullanılmıştır. Deneyler, deneysel modal analiz, operasyonel sapma şekli (ODS) analizi ve gürültü analizi olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Doğal frekanslar, mod şekilleri ve rotor millerinin sönümleme miktarı gibi modal parametreler olarak adlandırılan dinamik özellikleri belirlemek için Deneysel Modal Analiz (DMA) yapılmıştır. DMA ile elde edilen sonuçları doğrulamak için Sonlu Elemanlar Analizi (SEM) kullanılmıştır. ODS analizinde deneyler, DMSM üzerine belirlenmiş noktalara yerleştirilen ivmeölçerler üzerinden 600 d/d, 900 d/d, 1200 d/d ve 1500 d/d hız ve 0 kW, 2 kW, 4 kW, 6 kW ve 8 kW yük altında yapılmıştır. Gürültü analizi için ses ölçüm cihazı DMSM'den ölçüm yapmak üzere uygun konuma yerleştirilmiştir. En yüksek (1500 d/d) rotor mili çalışma hızında ve 0 kW, 2 kW, 4 kW, 6 kW ve 8 kW yük altında yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar rotor mili malzemesinin seçimi DMSM'nin titreşim ve gürültüsünü azaltmada önemli bir rol oynayabileceğini göstermiştir.

Anahtar Sözcükler: Elektrikli Araç, DMSM, Rotor Mili, Modal Analiz, ODS, Gürültü

ABSTRACT

VIBRATION AND NOISE ANALYSIS OF ROTOR SHAFT OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR USED IN ELECTRIC VEHICLES

Serdar ALBAYRAK

Düzce University

Graduate School, Department of Mechanical Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Hamit SARUHAN

January 2025, 72 pages

Permanent magnet synchronous motors (PMSM) are widely used in many industrial applications such as precision robots, electric land, air and marine vehicle industries due to their high reliability and high dynamic performance. Despite their advantages, vibration has a significant impact on the performance of PMSM. To ensure efficient and reliable performance of PMSM, the correct material selection for the rotor shaft is critical. In this study, three different rotor shaft materials (AISI 4140, AISI 4340 and AISI 5140) were used to compare the effects of the rotor shaft of PMSM used in electric vehicles on engine vibration and noise. The experiments were carried out in three stages: experimental modal analysis, operational deflection shape (ODS) analysis and noise analysis. Experimental Modal Analysis (DMA) was carried out to determine the dynamic characteristics called modal parameters such as natural frequencies, mode shapes and the amount of damping of the rotor shaft. Finite Element Method (SEM) was used to verify the results obtained by DMA. In the ODS analysis, the experiments were carried out at speeds of 600 rpm, 900 rpm, 1200 rpm and 1500 rpm and under loads of 0 kW, 2 kW, 4 kW, 6 kW and 8 kW using accelerometers placed on the PMSM at specified points. For noise analysis, the sound measuring device was placed in the appropriate position to make measurements from the PMSM. The experiments were carried out at the highest rotor shaft operating speed (1500 rpm) and under 0 kW, 2 kW, 4 kW, 6 kW and 8 kW loads. The overall results show that material selection can play an important role in reducing the vibration and noise of PMSM.

Keywords: Electric Vehicle, DMSM, Rotor Shaft, Modal Analysis, ODS, Noise

EXTENDED ABSTRACT

VIBRATION AND NOISE ANALYSIS OF ROTOR SHAFT OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR USED IN ELECTRIC VEHICLES

Serdar ALBAYRAK

Düzce University

Graduate School, Department of Mechanical Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Hamit SARUHAN

January 2025, 72 pages

1. INTRODUCTION

A significant portion of today's transportation is provided by road, and the number of vehicles in traffic continues to increase with the increasing urban population. The impact of vehicles on environmental pollution is also increasing with the increasing number of vehicles. 40% of air pollution in cities originating from internal combustion engine vehicles constitute [1]. Due to environmental pollution, which is a global problem, the European Union has adopted the European Green Deal project and aimed to combat climate change and improve environmental conditions. In this way, it has accepted the proposal that aims to reduce greenhouse gas emissions by 55% compared to 1990 values by 2030. One of the primary goals is to reach zero emission values by 2050 [2]. For this reason, the spread of electric vehicles that do not pollute the environment is important. The emergence of electric vehicles dates back to the 1800s. It was first made by Professor Stratingh in the Netherlands in 1835 [3]. Electric motors, which are widely used in the machinery and manufacturing sectors today, have also started to be used in vehicles with the emergence of electric vehicles. For this reason, the parts that make up the electric motor must have sufficient resistance according to the road, load and seasonal effects that can constantly change. The electric motor, which is one of the most important parts of electric vehicles, provides the necessary movement to the powertrain. The electric motor must operate stably in situations such as instantaneous speed changes of the rotor shaft. In this study, three different rotor shaft materials (AISI 4140, AISI 4340 and AISI 5140) were used to compare the effects of the Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) used in electric vehicles on the engine vibration and noise of the rotor shaft. The experiments were carried out in three stages: experimental modal analysis (EMA), operational deflection shape (ODS) analysis and noise analysis. The EMA was performed to determine the dynamic properties called modal parameters such as natural frequencies,

mode shapes and damping amount of the rotor shaft. Finite Element Method (FEM) was used to verify the results obtained with the EMA. Accelerometers were placed at the designated points on the PMSM for measurements in the ODS analysis. The experiments were carried out at 600 rpm, 900 rpm, 1200 rpm and 1500 rpm speeds and 0 kW, 2 kW, 4 kW, 6 kW and 8 kW loads. For noise analysis, the sound measuring device was placed in a suitable position to make measurements from the PMSM. It was carried out at the highest speed (1500 rpm), rotor shaft operating speed and 0 kW, 2 kW, 4 kW, 6 kW and 8 kW loads.

2. MATERIAL AND METHODS

By means of the experimental modal analysis method, tests were carried out on the operating rules experimental setup to determine the characteristics of the parameters of the AISI 4140, AISI 4340 and AISI 5140 rotor controls. The samples were hung on elastic hangers to simulate the free boundary conditions. Modal effect resonance frequencies, damping ratios and mode characteristics were extracted. The ODS analysis, various rotor shaft operating speeds such as 600 RPM, 900 RPM, 1200 RPM, 1500 RPM and 0 kW, 2kW, 4kW, 6kW, 8kW loadings are used when the rotor shaft features on the PMSM are used. Unit tests, noise measurement for non-luminous brightness of the test motor is available in a box structure covered with 50 Dns acoustic fireproof egg sponge in 30 mm size. The experiments were carried out at the highest rotor shaft operating speed (1500 rpm) and under 0 kW, 2 kW, 4 kW, 6 kW and 8 kW loads.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

In the modal analysis, in general, the natural frequencies measured by the EMA are in good agreement with those obtained by the FEM. The natural frequencies are verified to be 1.86% - 2.98% for AISI 4140, 0.21% - 3.78% for AISI 4340 and 2.34% - 3.65% for AISI 5140 rotor shafts, respectively. The natural frequencies measured by the EMA are generally lower than those obtained by the FEM. One reason for this may be that the shafts are not sufficiently perfect compared to computer modeling due to greater stiffness or smaller mass. It is seen that the AISI 5140 shaft has higher natural frequencies than the AISI 4140 and AISI 4340 shafts for all modes. The peaks correspond to the resonance frequencies, indicating the existence of natural frequencies of the tested rotor shafts.

Resonance occurs when the excitation frequency of the rotor shaft matches one of its natural frequencies, causing a significant increase in the vibration amplitude. It shows the consistency measurement graphs to measure the quality of the FRF measurement. The consistency is a dimensionless function that indicates how linearly the structure vibration response (output) signal is related to the applied external force (input) signal. The amplitude of the consistency varies between 0 and 1. A consistency close to 1 indicates a strong correlation between the structure output and the input signals. The damping ratios of all three materials are compared through mode shapes. It can be seen that the AISI 4340 rotor shaft has a higher damping ratio than the AISI 4140 and AISI 5140 rotor shafts. Since materials with low stiffness generally have high damping, it is seen that the lower modulus of elasticity, which causes lower stiffness, contributes to the increase in damping. It was used to identify the dominant frequencies and deflection shapes detected during the steady-state operation at the actual speed and load conditions determined for PMSM. The experiments were carried out under four different speeds and five different loads under the ODS analysis. It was determined that there were abnormal deviations in accelerometers 1 and 2 on the Y axis and in accelerometers 3 and 4 on the X axis. Therefore, the focus was on the values obtained from accelerometers 1 and 2 on the Y axis and 3 and 4 on the X axis. The general results show that lower amplitude values were obtained for PMSM using AISI 4340 rotor shaft compared to AISI 4140 and AISI 5140 rotor shafts. It can be concluded that PMSM using AISI 4340 rotor shaft operates more structurally. Noise analysis was performed to examine the effect of rotor shaft material characteristics on the noise level in the PMSM. It is observed that the noise values increase significantly at resonance frequencies. It is observed that the noise level decreases when high frequencies are reached for all load conditions. AISI 4340 rotor shaft decreased more steadily compared to AISI 4140 and AISI 5140.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

The dynamic properties of the rotor shaft, called modal parameters, such as natural frequencies, mode shapes and damping amount, are valuable for understanding the vibration behavior, which has a significant impact on the performance of PMSM used in electric vehicles. The overall results showed that AISI 4340 rotor shaft has higher damping ratio than AISI 4140 and AISI 5140 rotor shafts. Thus, the internal damping of the AISI 4340 rotor shaft can significantly reduce the amplitude at natural frequencies

and play an important role when the motor drive passes through natural frequencies. The results obtained from the experiments on the PMSM operating with the ODS analysis are in agreement with the rotor shaft modal analysis damping ratios. It has been determined that only changing the rotor shaft material affects the stable operation of the motor and the motor operating in the most stable condition among the rotor shaft materials used is AISI 4340 shaft material. AISI 4340 rotor shaft is more stable than AISI 4140 and AISI 5140 rotor shafts, especially at high frequencies. Noise levels also increased significantly at the most significant resonant frequencies. The overall results show that the results obtained from the EMA and the ODS analysis are in agreement with the noise analysis results. It has been shown that although there are many factors affecting motor noise, material selection can play an important role in reducing motor noise.



1. GİRİŞ

Günümüz ulaşımının önemli bir kısmı karayolu ile karşılanmakta ve artan kent nüfusu ile trafikteki araç sayısı artışı sürdürmektedir. Artan araç sayısı ile araçların çevre kirliliğine olan etkisi de artış göstermektedir. Şehirlerdeki hava kirliliğinin büyük çoğunluğunu içten yanmalı motorlu araçlar oluşturmaktadır [1]. Küresel bir sorun olan çevre kirliliğinden dolayı Avrupa Birliği, Avrupa Yeşil Mutabakatı projesi kabul ederek iklim değişikliği ile mücadele ve çevresel koşulların iyileştirilmesi amaçlamıştır. Bu sayede sera gazı emisyonlarının 2030 yılına kadar 1990 yılı değerleri ile karşılaştırıldığında %55 oranında azaltılmasını hedefleyen öneriyi kabul etmiştir. Birincil hedeflerden biri 2050 yılına kadar sıfır emisyon değerlerine ulaşmaktır [2]. Bu nedenle çevreyi kirliletmeyen elektrikli araçların yaygınlaşması önem arz etmektedir. Elektrikli araçların ortaya çıkması 1800'li yıllara dayanmaktadır. İlk olarak 1835' de Hollanda'da Profesör Stratingh tarafından yapılmıştır [3]. Devamında 1838' de Robet Davidson ilk elektrikli lokomotifin üretimini yapmıştır [4]. 1882' de Siemens ilk elektrik ile çalışan trolleybüsü, 1895'te İngiltere'de Elektrobats adında olmak üzere çeşitli elektrikli araçlar üretilmiştir. Bu gelişmelere paralel olarak içten yanmalı motorlu araçların yaygınlaşması elektrikli araçların yaygınlaşmasını olumsuz etkilemiştir. Bu durumun temel sebebi içten yanmalı araçların maliyetinin düşük olması, karayolu ağının gelişmesiyle menzil sorunu, elektrikli araç şarj süresinin uzun olması ve elektrikli araç hızının düşük olması başlıcalarıdır [5]. Günümüzde elektrikli araçların genel araçlar içerisindeki oranı düşük olsa da hızla artmaktadır. Fosil kökenli yakıtların yakın gelecekte tükenmesi ile birlikte otomotiv sektörünün sürdürülebilirlik sorunu yaşamaya başlaması olasıdır. İçten yanmalı motorlu araçlarda kullanılan fosil kökenli yakıtlardan kaynaklı çevre kirliliği yaklaşık olarak %20 seviyelerindedir [6], [7]. Çevre kirliliğinin azaltılması için küresel mücadele edilmesi amacıyla 1992'de 'Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve sözleşmesi', 1997'de Kyoto Protokolü ve 2015'te Paris anlaşması imzalanmıştır. Bu anlaşma çerçevesinde 2050 yılına kadar sıfır emisyon hedefine ulaşılması amaçlanmaktadır. Türkiye bu hedefe 2053 yılında ulaşmak amacıyla yeşil dönüşüm üzerine eylem planları ve stratejilere sahiptir [8], [9]. Elektrikli araçların açıklanan hedeflere ulaşılmasına katkı sağlayabileceği düşünülmektedir. Elektrikli araçların yaygınlaşması ile birlikte otomotiv

sektörü de sürekliliğini sağlayabilecektir [10]. Elektrikli araçlar doğuştan elektrikli veya hibrit araçlar olmak üzere iki çeşitte olmaktadır. Doğuştan elektrikli araçlar elektrik motoru, sürücü ve aktarma organlarından oluşurken, hibrit araçlarda bunların yanında jeneratör de bulunmaktadır. Ayrıca mevcut içten yanmalı motorlu araçların gerekli değişimler yapılarak elektrikli araçlara dönüşümü yapılabilmektedir. Özellikle toplu taşıma araçları yük kamyonlarında kısmi değişimlerle dönüşümü yapılabilmekte ve batarya yerleştirmek için uygun alanın fazla olması tek şarjda uzun menzil sağlamada avantaj sağlayabilmektedir [11]. Kara araçlarının yanı sıra elektrikli hava araçları ve deniz araçlarına olan ilgi artmaktadır. Basit enerji yönetimi, düşük bakım maliyeti ve çevre kirliliğine neden olan emisyonları olmaması geleneksel uçaklara göre avantajlı kılmaktadır. Almanya'da Antares 20E, 23E, DLR-H2 ve E-genius, Avrupa Birliği (AB) öncülüğünde Rapid 200 FC Amerika Birleşik Devletleri'nin E-Spyder'ı ve Boeing'in Elmas HK36 Süper Dimona ve Slovenya'nın Taurus G2 ve G4 ve Alpha electro gibi elektrikli insanlı uçak geliştirmektedir [12], [13]. DMSM elektrikli uçak tahrik sistemleri, hibrit ve tam elektrikli araçlarda ve elektrikli deniz araçlarında başarılı uygulamalar sağlanmıştır [14]. Günümüzde makine ve imalat sektöründe yaygın olarak kullanılan elektrik motorları elektrikli araçların ortaya çıkmasıyla araçlarda da kullanılmaya başlanmıştır. Bu nedenle elektrik motorunu oluşturan parçaların sürekli olarak değişkenlik gösterebilen yol, yük ve mevsimsel etkilere göre dayanımlarının yeterli olması gerekmektedir. Elektrikli araçların en önemli parçalarından olan elektrik motoru güç aktarma organlarına gerekli olan hareketi sağlamaktadır. Elektrik motorunun rotor mili anlık hız değişimleri gibi durumlarda kararlı çalışması gerekmektedir. Daimi mıknatıslı senkron motor (DMSM) rotor milinin dinamik kuvvetlere karşı dayanımı araçlarda karşılaşılabilecek dinamik kuvvetlere uyumlu hale getirilmesi önemlidir. Bu çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan DMSM'nin rotor milinin motor titreşim ve gürültüsüne olan etkilerini karşılaştırmak için üç farklı rotor mili malzemesi (AISI 4140, AISI 4340 ve AISI 5140) kullanılmıştır. Deneyler, deneysel modal analiz, operasyonel sapma şekli (Operational Deflection Shape - ODS) analizi ve gürültü analizi olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Doğal frekanslar, mod şekilleri ve rotor milinin sönümleme miktarı gibi modal parametreler olarak adlandırılan dinamik özellikleri belirlemek için Deneysel Modal Analiz (DMA) yapılmıştır. DMA ile elde edilen sonuçları doğrulamak için Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEM) kullanılmıştır. ODS analizinde ölçümler için DMSM üzerine belirlenmiş noktalara ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Deneyler 600 d/d, 900 d/d, 1200 d/d ve 1500 d/d hız ve 0 kW, 2 kW, 4

kW, 6 kW ve 8 kW yük altında yapılmıştır. Gürültü analizi için ses ölçüm cihazı DMSM'den ölçüm yapmak üzere uygun konuma yerleştirilmiştir. Parazit gürültüyü engellemek için yük motoru ve diğer ekipmanlardan izole edilmiştir. En yüksek (1500 d/d) hızda, rotor mili çalışma hızında ve 0 kW, 2 kW, 4 kW, 6 kW ve 8 kW yük altında yapılmıştır. Genel sonuçlar malzeme seçimi DMSM'nin rotor milindeki titreşim ve gürültüyü azaltmada önemli bir rol oynayabileceği görülmüştür. Rotor millerindeki titreşimi azaltarak, DMSM yapısındaki titreşim dönüşümü de önlenecek ve böylece elektrikli araçların performansı artacaktır.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Son dönemde sıfır karbon hedefleri doğrultusunda elektrikli araçların kullanımı yaygınlaşmaktadır. Elektrikli araçların ihtiyacı olan döndürme hareketi elektrikli motorlar ile sağlanmaktadır. Kullanılan motorlardan en çok bilinenler daimi mıknatıslı senkron motorlar, fırçasız DC motorlar ve endüksiyon motorlarıdır [15]. DMSM küçük boyut, düşük ağırlık, yüksek güç yoğunluğu ve verimliliğinden dolayı elektrikli kara, hava ve deniz araçlarında çekiş sistemi olarak yüksek oranda kullanılmaktadır [16]-[24]. Üstün özelliklerinin yanı sıra karmaşık yapısından dolayı maliyeti yüksektir [25]. Bu nedenle motor performansına olumlu katkı sağlayacak teknikler elektrikli araç endüstrisi için önemlidir. Rotordaki daimi mıknatısların yerleştirilme şekline göre yüzeye monte DMSM ve iç DMSM olmak üzere genel olarak iki türü bulunmaktadır [26]. Aynı boyutta, iç DMSM'nin aşırı yük kapasitesi daha yüksektir [27]-[29]. Avantajlarına rağmen diğer makineler gibi çalışma yük değişimleri, farklı çalışma koşullarında ortaya çıkan çeşitli gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu etkiler nedeniyle istenmeyen titreşimler ve gürültü ortaya çıkmaktadır. DMSM' nin titreşim ve gürültüsü elektrikli araçların sürüş konforunu ve çalışma güvenliğini olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple titreşim ve gürültü kaynaklarının tespit edilmesi oldukça önemlidir. Bu sayede elektrikli araçların konfor, güvenilirlik ve kararlılığını arttırmaya yönelik olarak DMSM tasarımının iyileştirilmesine katkı sağlayabilir [30]-[33]. Titreşimlerin etkilediği yüzeyler tarafından gürültünün üretildiğinden DMSM'de ortak bir sorun olarak ele alınabilir [34]. DMSM'lerde ana titreşim kaynakları, elektromanyetik, aerodinamik ve mekanik etkilerdir [35]. Elektromanyetik titreşimler radyal kuvvetlerin neden olduğu titreşimler ve vuruş torku ve tork dalgalanması kaynaklı titreşimler olarak sınıflandırılabilir [36], [37], [38]. Kalıcı mıknatısların kenar şekillerinin optimize edilmesiyle titreşimlerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır [39]. Sonlu elemanlar yönteminin (SEM) uygulama kolaylığı sağlaması, yöntemin geniş bir alanda problem çözümü için kullanışlı hale getirmiştir [40]. Bunun yanında elektromanyetik kuvvet kaynaklı oluşan titreşimi hesaplamak için analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Elektromanyetik-yapısal birleştirilmiş analiz yöntemi ile stator dış yüzey kaynaklı radyal yönlü elektromanyetik kuvvet 2D elektromanyetik alan analizi ile hesaplandıktan sonra elektromanyetik kuvvet kaynaklı titreşim 3D sonlu

elemanlar metodu (SEM) tabanlı frekans analizi ile türetilmektedir. Bu sayede motor tasarım optimizasyonu yapılarak yeniden tasarım ile titreşim ve gürültü etkisi azaltılabildiği görülmüştür [41], [42], [43], [44], [45]. Stator dış modülasyonunun DMSM üzerindeki radyal titreşimleri tespit etmek için analitik modeller kullanılmaktadır. Sayısal analiz ve deneysel testler analitik modeli doğrulamak için kullanılmaktadır. Bu sayede stator radyal titreşimlerinde tasarım parametrelerinin etkileri tespit edilebilir [46]. Kutup / yuva seçimi ile titreşimleri azaltmak için gerekli ayrıntılı tasarım parametreleri olmadan da elde edilebilir [47]. Radyal kuvvetlerin harmonik analizi ile titreşimleri azaltmak için rotor kutbunun harmonik bileşenlerinin integral katı olan yarı sayı tercih edilmektedir [48]. Aerodinamik titreşimler hava boşluğundaki basınç değişimleri nedeniyle ortaya çıkar [49]. Elektrikli araçlarda kullanılan DMSM'ler hava veya su soğutmalı olduğundan aerodinamik titreşimlerin etkisi göz ardı edilebilir [35]. Mekanik titreşimler ve gürültü, rotor, yataklar ve rotor mili gibi motor bileşenlerinin dönüşü sonucu ortaya çıkar [50]. DMSM'de mekanik titreşimleri azaltmak için kullanılan yöntemlerden biri bi-quad filtre kullanılmasıdır. Yapılan deneysel ve simülasyonlar bi-quad filtre ile mekanik titreşimleri azaltmada etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir [51]. Burulma titreşimleri ve mil torku mekanik titreşimlerin artmasına etki etmektedir. Bu sorunun üstesinden gelmek için mil tork kompensatörleri kullanılan yöntemlerdendir. Bu yöntem ile mil torkunun güvenli sınırlar içerisinde çalışması sağlanabilir ve motorun dinamik performansının artmasına katkı sağlar [52]. Güç yoğunluğu yüksek olan DMSM' de çalışma koşulları, elektromekanik bağlantı dinamiğinin kararlılığına etkisi büyüktür. Motorun elektromanyetik durumu ve dış yükler sistemin kararsız çalışmasına neden olabilmektedir [53]. Elektromanyetik ve mekanik parametrelerinin mekanik titreşimlere etkisi olmaktadır. DMSM rotor kuplaj dinamik modeli Lagrange-Maxwell teorisi kullanılarak türetilmesi ile parametre rezonans kararlılığı ve rotor üzerindeki etkileri analiz edilmektedir. Motorun çoklu elektromekanik kuplaj titreşimi, DMSM yapısal parametreleri optimize edilerek bastırılabilir [54]. Hibrit elektrikli araçlarda farklı güç kaynaklarından dolayı güç aktarma organlarında şiddetli titreşimlere neden olmakta ve aktarma sisteminin kararlı çalışmasını olumsuz etkilemektedir. Hibrit elektrikli araçlarda iletim sistemi kararlılığı tespiti için içten yanmalı motor ve jeneratör elektromekanik bağlantısında Lagrangian teorisi ile matematiksel bir model oluşturulur. Hibrit elektrikli araçlarda kararlılık değişimleri genlik-frekans tepki eğrileri kullanılarak detaylandırılabilmektedir. Bu model ile birden fazla çekicinin bir arada kullanılmasının çoklu kararlılığın varlığını gösterebilmektedir [55]. Dişli şanzıman sistemi dahil

elektromekanik kuplaj dinamiği modeli oluşturularak tek motorlu ve çift motorlu sürüş modlarındaki kararlı durum ve darbe yükü koşulları altında analizi yapılmaktadır. Darbe yükü iletim sisteminde burulma titreşimlerine sebep olmakta ve stator akımı sinyalinde görünmektedir. Ek olarak tek motorlu sürüş moduna göre çift motorlu sürüş modundaki hız senkronizasyon hataları burulma titreşimlerini arttırmaktadır. Bu durum hız senkronizasyon hatasının azaltılması sağlanarak bastırılabilir [56]. Elektrikli araçlarda yüksek verimlilik ve düşük bakım maliyetleri gibi avantajlarından dolayı doğrudan tahrikli şanzıman sistemleri yeni akıllı şanzıman teknolojisi olarak kullanılmaktadır. DMSM ve doğrudan tahrikli şanzıman sistemi elektromekanik kuplajında görülen sistem burulma titreşimleri kararsızlık özelliklerini analiz etmek için Lagrange-Maxwell denklemi kullanılmaktadır. Bu yöntem ile burulma titreşim tepkisinin iletim sistemi boşluğu etkisi ile sistem burulma titreşim tepkisi, sistem burulma titreşim tepkisi genliklerinin artması ve çatallanması ile kendini gösteren doğrusal olmayan özellikleri görülebilir [57]. Elektromanyetik torkun frekans özellikleri karmaşık olmakta ve kararlı çalışma koşulunda elektromanyetik ve mekanik titreşim etkisi daha da artmaktadır. Değişken hız ve değişken yük koşulları altında DMSM ile elektrikli tahrik sisteminin elektromekanik kuplajının kararlı durum, hızlanma koşulları altındaki dinamik tepkisi elektromekanik kuplaj dinamik özellikleri ideal olmayan faktörleri dikkate alan dinamik bir modelleme yöntemi ile analiz edilmektedir [58]. DMSM'nin maruz kaldığı titreşimlerin belirlenmesinde modal analiz yöntemi de kullanılmaktadır. Modal test DMSM'nin titreşim modlarını tespit etmenin hızlı ve ekonomik bir yolu olarak kullanılmaktadır. DMSM'nin modları rezonans titreşimini tanımlamanın basit ve etkili bir yol olarak tercih edilmektedir. Titreşim sorununu doğru anlamak için bir DMSM'nin rezonanslarının ölçülmesi gerekmektedir [59]. Ayrıca sessiz ve daha az titreşimli motor tasarlamak için modal özelliklerinin doğru tespit edilmesi önemlidir. Literatürde DMSM'nin tasarım parametrelerinin belirlenmesi üzerine yapılan çalışmalarda modal analiz yönteminden yararlanılmıştır [60]-[63]. Bu yöntemde titreşimleri tahmin etmek için modal analiz yapılmalı ve analiz sonucu doğal frekanslar belirlenmelidir. Bu sayede harmonik tepkinin rezonansı tahmin edilebilmesi ile tasarımın optimizasyonu sağlanabilir. Analitik modal denklem ile motoru oluşturan malzemelerin analitik denklemleri türetilmekte ve malzemelerin etkisi oluşturulan modele eklenmektedir. Analitik modelin doğrulanması için doğal frekanslar hesaplanmakta, doğrulanmakta ve SEM sonuçları ile kıyaslanmaktadır [64]. İlk aşamada modelin teorik analizi yapılmıştır. Sonrasında kurulan sonlu elemanlar analiz modeli ile doğrulanmıştır. Devamında çekiç

testi yapılmış ve SEM'in geçerliliği doğrulanmıştır [65]. DMSM modal sönümleme oranlarının deneysel yöntemle tespiti ve elde edilen bilgiler ile titreşim davranışının tahmini için SEM tabanlı yapısal simülasyonları rafine etmek amacıyla kullanılmasına dayalı yapılan çalışmada modal sönümleme oranlarına etkilerini sınıflandırmak için iki farklı yapısal tasarım üzerinde titreşimin azaltılması amaçlanmış ve simülasyon ve deneysel olarak analiz edilmiştir. Simülasyon ve deneysel çalışmalar arasında benzerliğin iyi seviyede olduğu belirtilmiştir [66]. Yapı ile ilgili titreşimlerin incelenmesinde DMA ve ODS yıllardır uygulanmaktadır. Ancak bu yöntemler araç dinamik davranışının incelenmesinde de oldukça faydalıdır. Modal analiz ile benzerliklerinin yanında yapının çalışma esnasında ölçüm yapılabilmesi sayesinde zaman ve maliyet avantajı sağlayan ODS analizi ile titreşimler belirlenebilmektedir. Birçok durumda, kompleks bir yapının tam bir sayısal modellenmesi, eklem modellemesi ve sınır koşullarının belirlenmesi gerekliliğinden çok zor olabilmesi nedeniyle sonuçlar hatalı olabilmektedir [67]. Hızlı Fourier Dönüşümünün (FFT) doğrusal bir dönüşüm olduğu ve modların doğrusal sistemlerdeki matematiksel tanımlar olduğu bilindiğinden, doğrusal bir titreşim probleminde ODS ve mod şekillerini tanıtmak ve tanımlamak daha kolaydır [68], [69]. ODS analizi ile dönen mildeki anormal sapmalar deney seti geometrisi izlenerek tespit edilebilmektedir. Tespit edilen sapmalar dönen bileşenlerde dengesizlik olduğunun göstergesi olmaktadır. Aynı zamanda titreşim verileri FFT kullanılarak belirlenen çalışma şartlarında ölçülmektedir. Sonrasında teorik hesaplama ve FFT den elde edilen veriler kıyaslanmaktadır. Bu sayede çalışan yapılarda basit yöntemle sistemin kontrolü yapılabilmektedir [70]. Rotor sisteminin frekans yanıt fonksiyonu (FYF) ve ODS değerleri ile sistemdeki balanssızlığı tahmin etmek mümkündür. Rotor dönme dengesizliğinin tersine tahmini FYF ve frekans alanı yanıtı kullanılarak elde edilir. Bu yöntemle %01'den daha düşük sonuçlar elde edilebilmiştir [71]. Literatürde DMSM'nin çalışması sonucu oluşan titreşim ve gürültünün azaltılması üzerine birçok farklı çalışma bulunmasına rağmen bu çalışmanın konusu olan rotor mili malzemesinin DMSM'nin titreşim ve gürültüsüne olan etkisi üzerine bilindiği kadarıyla çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, elektrikli araçlarda kullanılan DMSM'nin rotor milinin motor titreşim ve gürültüsüne olan etkilerini karşılaştırmak için üç farklı rotor mili malzemesi (AISI 4140, AISI 4340 ve AISI 5140) kullanılmıştır. Deneyler, deneysel modal analiz, operasyonel sapma şekli (ODS) analizi ve gürültü analizi olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Doğal frekanslar, mod şekilleri ve rotor milinin sönümleme miktarı gibi modal parametreler olarak adlandırılan dinamik özellikleri belirlemek için Deneysel Modal

Analiz (DMA) yapılmıştır. DMA ile elde edilen sonuçları doğrulamak için Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEM) kullanılmıştır. ODS analizinde ölçümler için DMSM üzerine belirlenmiş noktalara ivmeölçerler yerleştirilmiştir. Deneyler 600 d/d, 900 d/d, 1200 d/d ve 1500 d/d hız ve 0 kW, 2 kW, 4 kW, 6 kW ve 8 kW yük altında yapılmıştır. Gürültü analizi için ses ölçüm cihazı DMSM'den ölçüm yapmak üzere uygun konuma yerleştirilmiştir. Parazit gürültüyü engellemek için yük motoru ve diğer ekipmanlardan izole edilmiştir. 600 d/d, 900 d/d, 1200 d/d ve 1500 d/d hız ve 1500 d/d hız ve 0 kW, 2 kW, 4 kW, 6 kW ve 8 kW yük altında yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar rotor mili için malzeme seçimi DMSM'nin rotor milindeki titreşim ve gürültüyü azaltmada önemli bir rol oynayabileceğini göstermiştir. Rotor milindeki titreşimi azaltarak, DMSM yapısındaki titreşim dönüşümü de önlenecek ve böylece elektrikli araçların performansı artacaktır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. MODAL ANALİZ

Modal analiz (MA), bir yapının doğal frekanslar, sönümlenme ve mod şekillerinin doğal dinamik özelliklerini tespit edilmesidir. MA, doğal titreşim modları olarak anılan bir dizi harmonik hareketin doğrusal bir kombinasyonunun titreşim tepkisidir. Modlar dinamik sistemlerin doğal özelliği olmakla beraber kütle, sertlik ve sönümlenme gibi fiziksel özellikleri ve bu özelliklerin uzamsal dağılımları ile belirlenir. Mod şekli, doğal frekans, modal sönümlenme ve karakteristik yer değiştirme modeli olarak tanımlanır [72]. Sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılarak MA'nın geçerliliğini doğrulamak ve sistemin performansını iyileştirecek kütle, sertlik veya sönümlenme değişikliklerini belirlemek gibi amaçlar için kullanılır [73]. Genellikle doğal frekanslar, gerçek mod şekli vektörleri, modal kütleleri, modal kinetik, gerinim enerjileri ve modal sönümlenme oranları karşılaştırılan modal özelliklerdir. SEM'in azaltılmış mertebesinde veya tam mertebesinde yapılabilir [74]. Dinamik bir sistem birden fazla doğal frekansa sahip olabilir ve bunların uzamsal titreşim modeli olan mod şekilleri vardır. Bunlar yapının sertliğine ve kütesine bağımlı bir özdeğer denklemi belirlenir. Sönümlenme özelliklerinin eklenmesi ile uygulanan yük koşullarında dinamik tepki tam olarak tespit edilir [75].

3.1.1 Doğal Frekans

Doğal frekans, bir salınım sisteminin bozulma olmadığında salınma eğilimi gösterme hızıdır.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ (rad/s cinsinden doğal frekans)} \quad (3.1)$$

Burada ω_n doğal frekans, k sertlik ve m kütle temsil etmektedir.

3.1.2 Frekans Yanıt Fonksiyonu

DMA'dan elde edilen ana sonuç FYF'lerdir. FYF'ler, çıkış tepki hareketi ile giriş uyarma kuvveti arasındaki ilişkinin ölçüleridir. Zamana bağlı fonksiyonlar olan FYF değerleri Hızlı Fourier Çevrimi (Fast Fourier Transform, FFT) ile frekansa bağlı fonksiyonuna dönüştürülür ve ölçülen frekans aralığında FYF işlevleri sağlar. FYF'lerin tepe noktaları rezonansı gösterir ve aynı zamanda bu noktalardan sönümlenme oranları tespit edilir. Modal modeller (doğal frekans, sönümlenme ve mod şekilleri) FYF verilerine dayalı

olduğundan yüksek kaliteli FYF verileri modal testin doğruluğunun yüksek olduğunu gösterir.

$$H(f) = \frac{B(f)}{A(f)} \quad (3.2)$$

Denklemden $H(f)$ yanıt fonksiyonu, $B(f)$ çıkış tepki hareketi ve $A(f)$ giriş uyarma kuvvetini ifade eder.

3.1.3 Tutarlılık

Tutarlılık verileri, modal testin kalitesini doğrulamak için kullanışlıdır. Tutarlılık, bir DOF'un veya bir DOF grubunun başka bir DOF ile nasıl ilişkili olduğunu gösterir.

3.1.4 Sönümleme Oranı

Sönümleme, sistemdeki salınım enerjisinin dağılarak kaybolmasıdır [76]. Sistemdeki salınımların nasıl bozulduğunu boyutsuz bir ölçü olan sönümleme oranı, sönümleme katsayısının kritik sönümleme katsayısına oranı olarak tanımlanabilir [77].

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (3.3)$$

Burada, ζ sönümleme oranı, c sönümleme katsayısı ve c_c kritik sönümleme katsayısıdır.

Tipik olarak, $0 < \zeta < 1$ ile ζ yüzde birkaç gibi küçük değerler alır.

3.2. OPERASYONEL SAPMA ŞEKLİ

Bir sistem veya makinedeki iki veya daha fazla noktanın rastgele bir hareketi ODS olarak tanımlanmaktadır. ODS, belirli bir frekansta ya da zaman alanında herhangi bir titreşim değerinden tanımlanabilmelerinin yanında rastgele, dürtüsel ya da sinüzoidal farklı zaman yanıtlarından elde edilebilir. Ayrıca FFT'ler, otomatik ve çapraz güç spektrumları (XPS), frekans yanıt fonksiyonları (FYF) gibi farklı frekans alanı fonksiyonlarından elde edilir [78]. Tüm verilerin eş zamanlı veya doğru büyüklük ve fazlarını sağlayan şartlarda ölçülmeleri gerekir. Genel olarak bir ODS, bir makine veya yapı üzerinde ölçülen her bir DOF için bir büyüklük ve faz değeri ile tanımlanır. Bu, ya tüm yanıtların eş zamanlı olarak ölçülmesini ya da birbirlerine göre doğru büyüklük ve fazlarını garanti eden koşullar altında ölçülmelerini gerektirir. Eşzamanlı ölçüm, tüm yanıtları aynı anda alabilen çok kanallı bir alım sistemi gerektirir [79]. ODS ile bir zaman aralığındaki zaman alanı değerleri (rastgele, impulsif, sinüzoidal, ortam) ya da belirli bir frekanstaki frekans

alanı değerleri (doğrusal spektrumlar (FFT), otomatik güç spektrumları, çapraz güç spektrumları, FYF ve ODS FYF) elde edilir [80].

3.2.1 Zaman ODS

Zaman ODS, genlik seviyelerini ve referans DOF'lar ile ilgili fazı elde etmek için DOF'ların ölçülen zaman sinyallerini kullanır. Yapının sapmasını gerçek zamanlı olarak görselleştirmesini sağlar.

3.3. GÜRÜLTÜ EMİSYONU

Ses gücünün ölçülmesi, gürültü emisyona değerinin belirlenmesi bakımından önem taşımaktadır. Ses gücü, bir sesin kaynağının yüzeylerinden yayılan ses gücünün seviyesidir. Bir kaynağın ses gücü W olduğunda o kaynağın ses gücü seviyesi L_w olarak gösterilmektedir. Ses gücü uluslararası olarak kabul edilen $10^{-12}W$ değerini referans alınarak hesaplanır [81].

$$L_w = 10 \log \frac{W}{10^{-12}} \text{ (dB)} \quad (3.4)$$

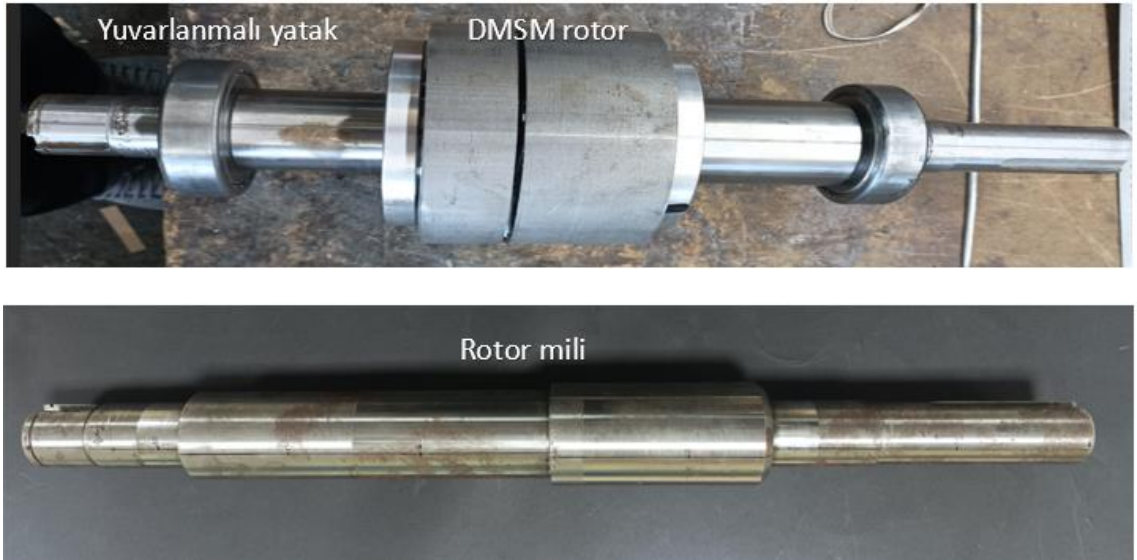
Bir sistemin ses gücü, bu sistemin toplam gücünün toplam gücüne göre çok küçük bir oranı olarak yayılan kısımdır. Ses basıncı, sesin belli bir noktada ortaya çıkardığı ses titreşimlerinin basıncı ile ilişkilidir. Uluslararası olarak kabul edilen p_0 20 μPa değerini referans alınarak hesaplanır [81].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

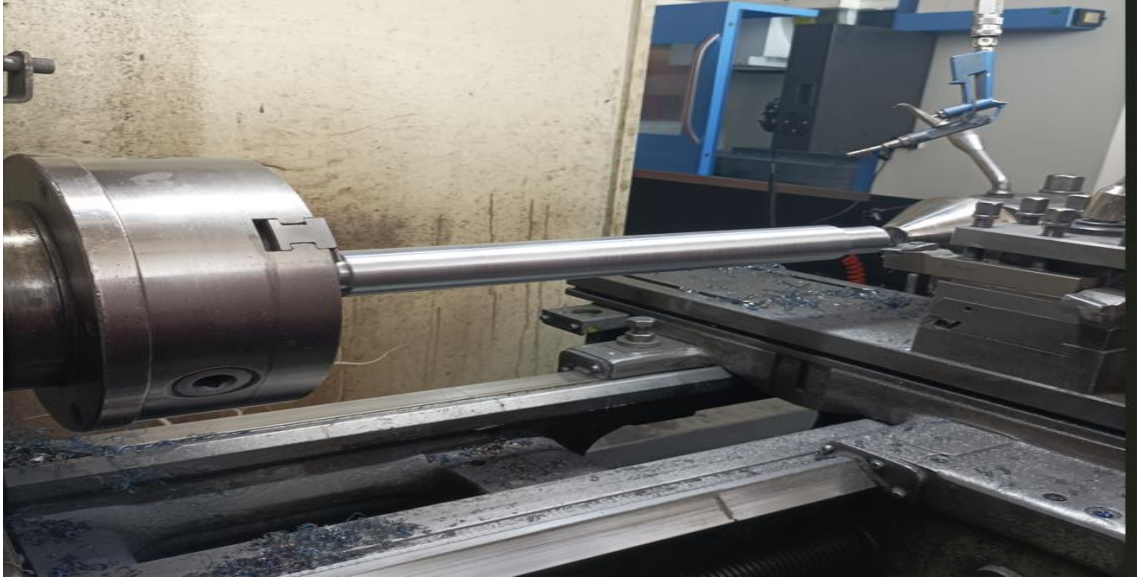
Deneyisel çalışmalar, DMA, ODS ve gürültü emisyonu olmak üzere üç aşamada gerçekleştirildi. İlk aşamada, DMSM'ye ait AISI 4140 çelik malzemeden üretilmiş olan rotor milinin ölçüleri ile aynı ölçülerde AISI 4340 ve AISI 5140 çelik rotor mili imalatı yapılmıştır. Deney şartlarına uygun hazırlanan deney düzeneğinde sırasıyla modal analizleri yapıldı. İkinci aşamada, sırasıyla deney motoruna rotor millerinin montajı yapılarak belirlenen yük ve hız koşullarında ODS analizleri yapıldı. Üçüncü aşamada, deney motoru üzerinde uygun konumda yerleştirilen mikrofona kullanılarak gürültü analizleri yapılmıştır. Yapılan tüm deneyler Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Makine Dinamiği laboratuvarında yapılmıştır.

4.1. DENEY ROTOR MİLLERİNİN HAZIRLANMASI

Deney motorunun Şekil 4.1'de görülen AISI 4140 çelik rotor mili motordan çıkarılmıştır. Ölçülendirme yapıldıktan sonra AISI 4340 ve AISI 5140 rotor millerinin imalatı yapılmıştır. Deneylerde kullanılan millerin imalatı Şekil 4.2'de görülmektedir.



Şekil 4.1. Rotor mili söküm işlemleri.



Şekil 4.2. Deney millerinin imalat işlemleri.

Deneylerde rotor mili olarak kullanılmak üzere imalatı yapılan AISI 4140, AISI 4340 ve AISI 5140 üstün mekanik özellikleri sayesinde taşıtlarda kullanılan krank mili, aks mili gibi parçaların yapımında kullanılmaktadır [82]-[84]. Çizelge 4.1’de deneylerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri görülmektedir.

Çizelge 4.1. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri [82]-[86].

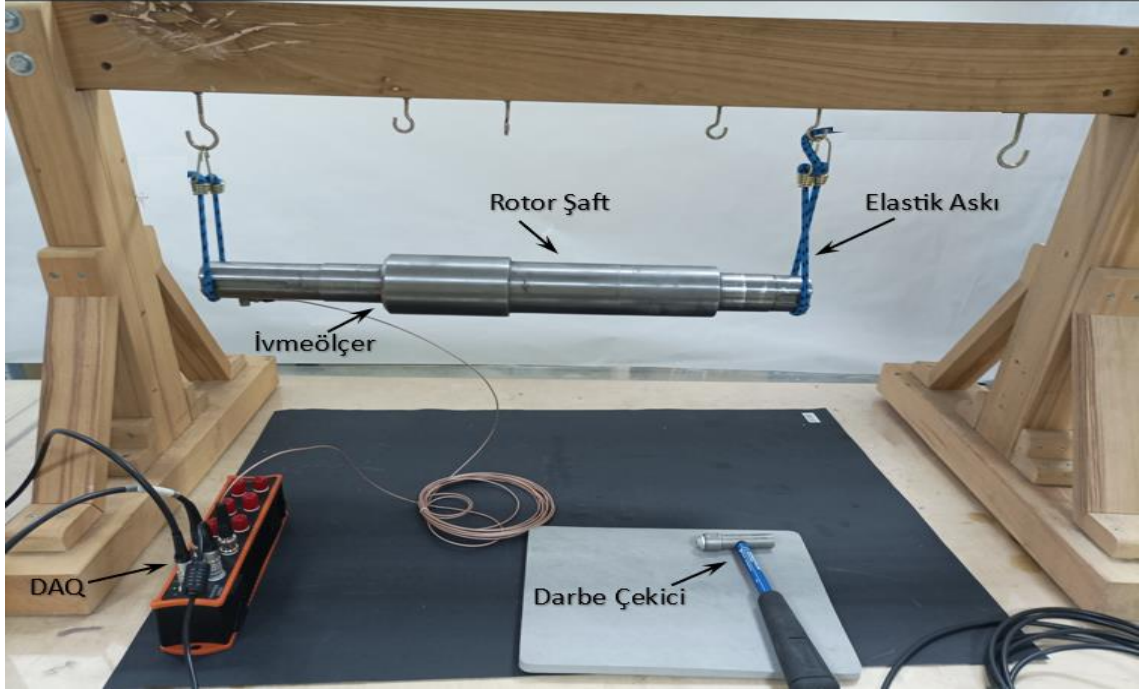
Mekanik Özellikler	Malzeme		
	AISI 4140	AISI 4340	AISI 5140
Elastikiyet Modülü (Gpa)	205	200	210
Poisson Oranı	0,27	0.3	0.3
Akma Gerilmesi (Mpa)	417,1	800	1165
Çekme Gerilmesi (Mpa)	655	1200	1310
Sertlik (HRC)	32,4	30,4	32

Çizelge 4.2. Kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri [82], [87].

Malzeme	Kimyasal Kompozisyon (%)						
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
AISI 4140	0,38 - 0,45	0,75 - 1,00	0,035	0,04	0,15 - 0,30	0,80 - 1,10	0,15 - 0,25
AISI 4340	0,44	0,65	0,19	1,01	0,02	0,02	0,16
AISI 5140	0,38	0,63	0,21	1,13	1,54	0,001	0,015

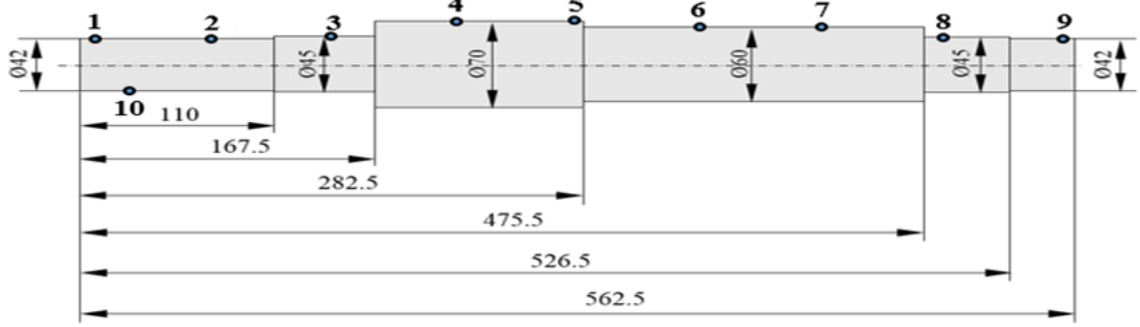
4.2 DENEYSEL MODAL ANALİZ

Deneyisel modal analiz yöntemi kullanılarak AISI 4140, AISI 4340 ve AISI 5140 rotor millerinin titreşim karakteristiklerini belirlemek için Şekil 4.3'de görülen deney düzeneğinde deneyler yapılmıştır. Numunelerin serbest serbest sınır koşullarını simüle etmek amacıyla elastik askılara asılmıştır. Rotor millerinin uygun tahrik noktalarının tespiti için deneme testleri yapılmıştır.



Şekil 4.3. Deneyisel modal analiz düzeneği.

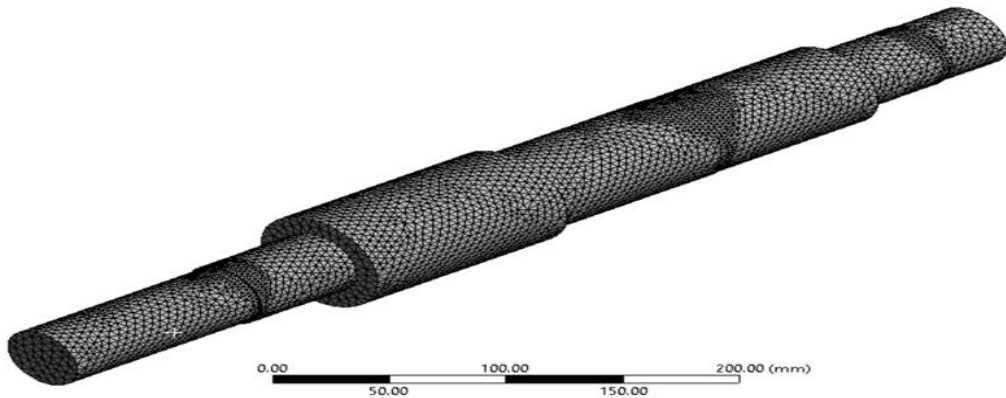
Rotor milleri üzerinde Şekil 4.4'de görüldüğü gibi dokuz vuruş noktası seçildi. Rotor mili üzerinde önceden belirlenmiş noktalar üzerine Dytran tipi kuvvet dönüştürücüleri (Model: 5800B3T, Hassasiyet: 11,24 mV/N) ile vuruş yapılarak uyarıldı. En iyi ölçüm kalitesi sağlamak için çelik tipte (model: 6250A) bir darbeli çekiç ucu kullanıldı. Tepki ölçümleri, 10 numaralı noktada rotor miline yapıştırılmış 0,2 Hz ila 20 kHz frekans tepkisine sahip olan tek eksenli bir ivmeölçer (MMF Tipi, Model: KS78C.100, hassasiyet: 100 mV/g) kullanıldı. Verileri toplamak için kanal başına 20 kHz'e kadar örnekleme hızına sahip çok kanallı bir veri toplama (DAQ) cihazı KRYPTON-8xACC kullanıldı. Modal parametreler - rezonans frekansları, sönümlleme oranları ve mod şekilleri - Dewesoft donanım ve yazılımı kullanılarak oluşturulan FYF çıkarıldı.



Şekil 4.4. Rotor mili üzerindeki vuruş noktaları.

4.3 SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

Deneyisel modal analiz frekans sonuçlarının doğrulanması için ANSYS programında sonlu elemanlar analizi (SEM) analizi yapılmıştır. Sonlu elemanlar metodunun uygulanma kolaylığı sayesinde mühendisliğin geniş alanında kullanılmasını sağlamıştır. Çözülmesi gereken probleme yaklaşımda seçilen sayısal analiz programının uygun olması gerekmektedir [88]. Deneylerde kullanılan rotor millerinin Solidworks CAD programında çizimleri yapılmıştır. Yapılan çizimler part dosyası (SLDPRT) olarak kaydedilmiştir. Devamında Rotor mili çizimleri analiz programına aktarılmak üzere STEP dosyası(.step) olarak kaydedilmiştir [89][90]. Rotor millerinin ANSYS programında Ağ Örgüsü (Mesh) ataması yapılırken çözüm süresini artırmasına rağmen doğruluğu artırmak adına ağ örgü sıklığı arttırılmıştır. Eleman boyutu 5 mm hexagonal olarak seçilmiştir. Malzeme ataması Çizelge 4.1'deki elastikiyet modülü ve poisson oranı değerleri kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan rotor millerine açıklanan işlemler sırasıyla uygulanmıştır. Ağ örgüsü Şekil 4.5'te görülmektedir.



Şekil 4.5. SEM ağ örgüsü görüntüsü

4.4 OPERASYONEL SAPMA ANALİZİ (OPERATIONAL DEFLECTION SHAPE - ODS)

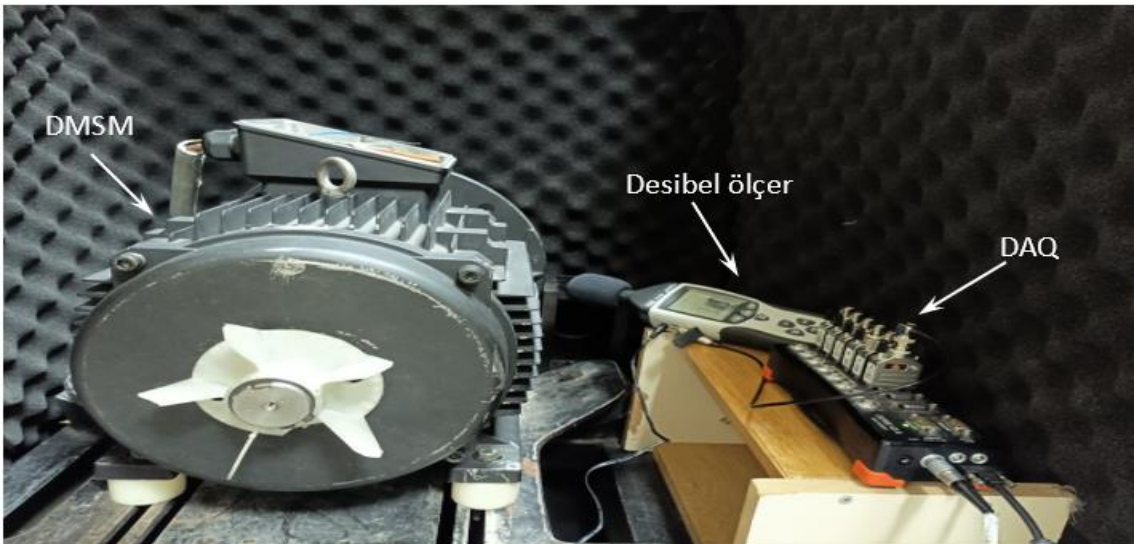
ODS analizi, DMSM rotor milinin çalışma koşullarında titreşimlerinin tespit edilmesi amacıyla yapılmıştır. DMSM’de titreşim ölçümleri için belirlenen noktalara X ve Y eksenlerinde sekiz adet tek eksenli ivmeölçer (MMF Tipi, Model: KS78C.100) ile tespit edilmiştir. Sabit hız ve yük şartlarında 15 saniyelik zaman aralıklarında doğal frekans modelleri çıkarılmıştır. Deneyler Şekil 4.6’de gösterildiği gibi bir test düzeneği üzerinde gerçekleştirilmiştir. Test düzeneğinde kullanılan tahrik motoru 4 kutuplu üç fazlı 18,5 kW DMSM’dir (Marka: Yunsheng, Model: 160YS-K15FWJ183 Nominal dönüş hızı: 1500 rpm). DMSM, kapalı döngü hız kontrolörlü dahili bir değişken frekans sürücüsüne sahiptir. DMSM, elektrik çıkışı sağlayan bir fırçasız üç fazlı AC senkron jeneratör (Marka: HANGYU , Model: MDF Nominal dönüş hızı: 1500 rpm) ile birleştirilmiştir. Araç çalışma yükünü simüle etmek için elektriksel özelliklere sahip bir kaynak olan bir yük bankası (Marka: Hilkar, Nominal Güç: 10 kW), gücü dağıtmak için DC jeneratörünün çıkışına bağlanmıştır. Güç, her biri 2 kW olan beş dirençli yük bankasındaki dirençli ısıtma elemanları tarafından ısıya dönüştürülmüştür. DMSM ve bir yük bankasına bağlı bir AC jeneratörü üzerindeki çeşitli uygun noktalarda elde edilen çoklu ivmeölçer sinyallerinden türetilen ODS, 600 RPM, 900 RPM, 1200 RPM, 1500 RPM gibi çeşitli rotor mili çalışma hızları ve 0 kW (yüksüz), 2kW, 4kW, 6kW, 8kW yükler altında DMSM üzerindeki rotor mili titreşim özellikleri etkilerini değerlendirmek için kullanılmıştır [91], [92], [93]. ODS'den veri toplama sırasında kanal başına 20 kHz'e kadar frekans ölçebilen Dewesoft marka çok kanallı Veri Toplama (DAQ) cihazı (DEWE 43 A ISO-POWER) ve DewesoftX analiz yazılım paketi kullanılmıştır.



Şekil 4.6. ODS deney düzeneği.

4.5 GÜRÜLTÜ EMİNYONU

Gürültü deneyleri Şekil 4.7’da görülen deney düzeneğinde yapılmıştır. Gürültü ölçüm kalitesini iyileştirmek için deney motorunun dışı 30mm 50 Dns akustik yanmaz yumurta sünger ile kaplanmış akustik oda oluşturulmuştur [94]. Gürültü ölçümleri 30dB~130dB aralığında, ± 1.4 dB hassasiyetinde ve 31.5HZ ~ 8KHZ frekans aralığında ölçüm yapabilen CEM DT-8852 marka desibelmetre kullanılmıştır.



Şekil 4.7. Gürültü emisyonu analiz deney düzeneği.

Gürültü analizleri Şekil 4.7’da gösterildiği gibi bir deneysel test düzeneği üzerinde gerçekleştirilmiştir. Test düzeneğinde kullanılan tahrik motoru 4 kutuplu üç fazlı 18,5 kW DMSM'dir (Marka: Yunsheng, Model: 160YS-K15FWJ183 Nominal dönüş hızı: 1500 rpm). DMSM, kapalı döngü hız kontrolörlü dahili bir değişken frekans sürücüsüne sahiptir. DMSM, elektrik çıkışı sağlayan bir fırçasız üç fazlı AC senkron jeneratör (Marka: HANGYU, Nominal dönüş hızı: 1500 rpm) ile birleştirilmiştir. Araç çalışma yükünü simüle etmek için elektriksel özelliklere sahip bir kaynak olan bir yük bankası (Marka: Hilkar, Nominal Güç: 10 kW), gücü dağıtmak için AC jeneratörünün çıkışına bağlanmıştır. Güç, her biri 2 kW olan beş dirençli yük bankasındaki dirençli ısıtma elemanları tarafından ısıya dönüştürülmüştür. 1500 RPM rotor mili çalışma hızında ve 0 kW, 2kW, 4kW, 6kW, 8kW yükler altında üzerindeki gürültü etkilerini değerlendirmek için kullanılmıştır [91], [95].

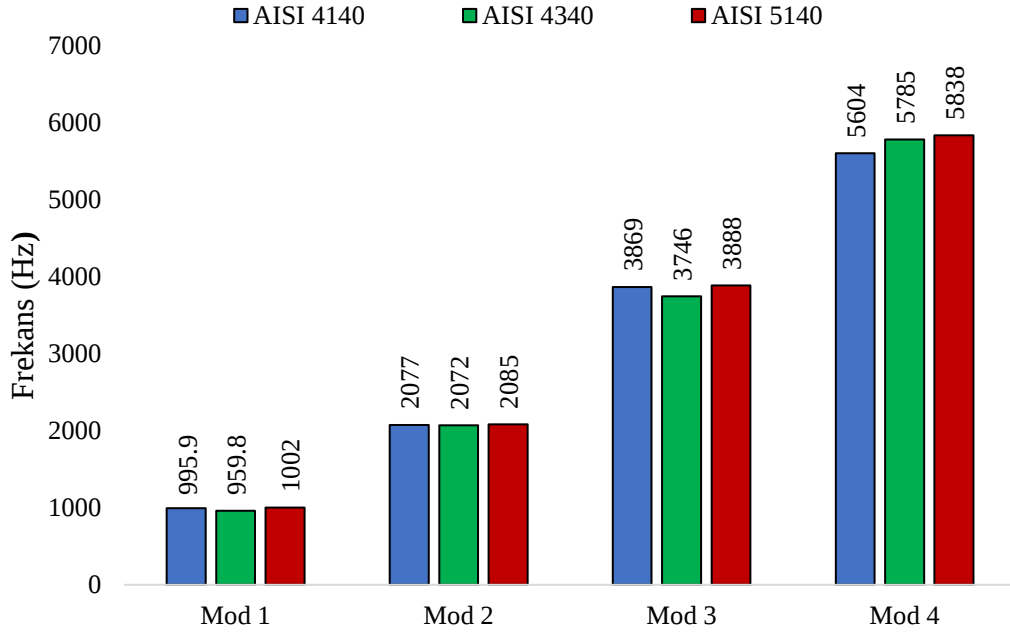
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. MODAL ANALİZ

Modal parametreler, yani doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönümlleme miktarı, rotor mili üzerinde işaretlenen uyarma noktaları ve tepki noktası arasındaki FYF ölçümleri kümesinden belirlenmiştir. Sertlik ve kütle dağılımının bir fonksiyonu olan doğal frekanslar, FYF'nin büyüklüğündeki tepe noktaları olarak tanımlanır. Elde edilen FYF'nin genliği, titreşim modeli olan mod şekillerini ve milin tepkisine bir sınır koyan sönümlleme miktarını belirlemek için kullanılır. Çizelge 5.1'de AISI 4140, AISI 4340 ve AISI 5140 rotor millerinin DMA ile ölçülen ve doğrulama için SEM ile elde edilen ilk dört doğal frekansı gösterilmektedir. Genel olarak, DMA tarafından ölçülen doğal frekanslar SEM tarafından elde edilenlerle iyi bir uyum içindedir. Doğal frekanslar sırasıyla AISI 4140 için %1,86 - %2,98, AISI 4340 için %0,21 - %3,78 ve AISI 5140 rotor milleri için %2,34 - %3,65 arasında doğrulanmıştır. DMA ve SEM sonuçları arasındaki fark çok küçüktür ve ihmal edilebilir. DMA tarafından ölçülen doğal frekanslar genellikle SEM tarafından elde edilenlerden daha düşüktür. Ancak, Mod 4'teki AISI 4140 rotor mili ve Mod 3'teki AISI 4340 mili hariç, DMA tarafından ölçülen doğal frekansların SEM tarafından elde edilenlerden daha yüksek olduğu belirtilmelidir. Bunun bir nedeni, rotor millerinin daha büyük sertlik veya daha küçük kütle nedeniyle bilgisayar modellemesine kıyasla yeterince mükemmel üretilmemesi olabilir. Şekil 5.1'de gösterilen sonuçlardan, AISI 5140 milinin tüm modlar için AISI 4140 ve AISI 4340 rotor millerinden daha yüksek doğal frekanslara sahip olduğu görülmektedir.

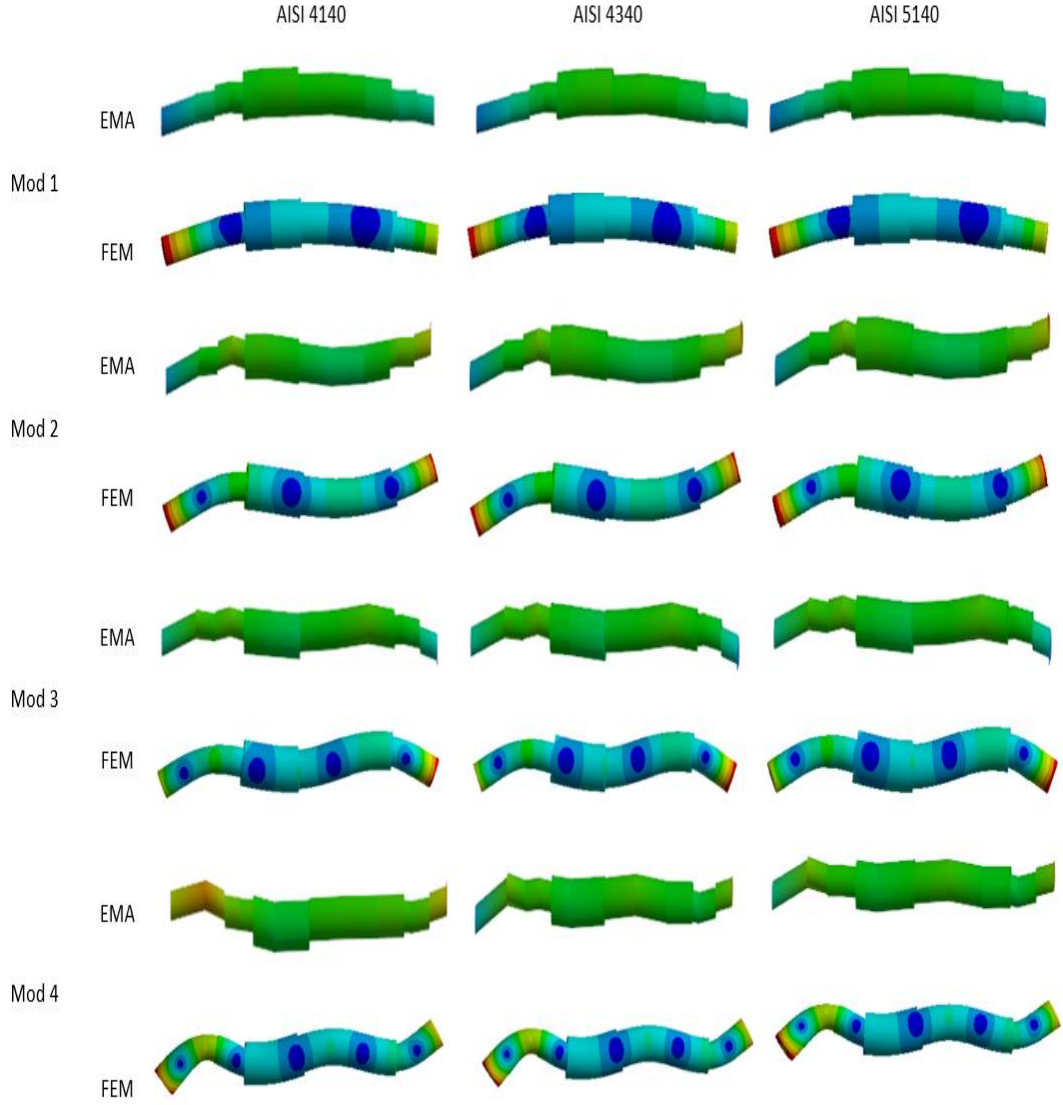
Çizelge 5.1. DMA ve SEM'e göre doğal frekanslar.

Mod	AISI 4140		AISI 4340		AISI 5140	
	DMA	SEM	DMA	SEM	DMA	SEM
Frekans (Hz)						
1	995.9	967.1	959.8	956.2	1002	965.4
2	2077	2016.3	2072	1993.6	2085	2012.8
3	3869	3796.7	3746	3753.9	3888	37900
4	5604	5711	5785	5646.3	5838	5701.1



Şekil 5.1. DMA'ya göre doğal frekanslar.

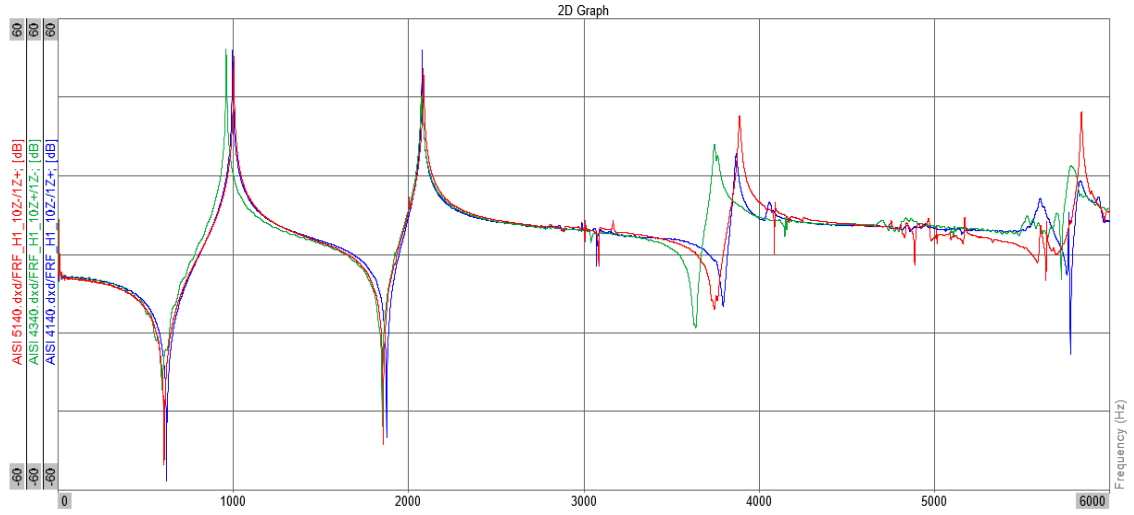
Bir rotor milinin sürekli modalitesi sonsuz sayıda mod şekline sahip olsa da rotor milinin dinamik davranışını anlamak için ilk birkaç mod şekline sahip olmak yeterlidir. Her doğal frekans, harici uyarma kuvveti altında rotor milinin neden olduğu titreşim modelini ifade eden bir mod şekli ile ilişkilidir. Kullanılan DAQ cihazının örnekleme hızı sınırlaması nedeniyle, ilk dört mod şekli sırasıyla DMA ve SEM kullanılarak ölçülmüş ve elde edilmiş ve Şekil 5.2’de sunulmuştur. DMA tarafından çizilen mod şekilleri SEM tarafından çizilenler kadar düzgün değildir. Bunun nedeni deneysel mod şekillerinin ayrık test uyarım noktalarına dayanmasıdır. Bununla birlikte, grafiksel gösterim rotor millerinin mod şekillerinin niteliksel olarak benzer olduğunu göstermiştir.



Şekil 5.2. DMA ve SEM'e göre mod şekilleri

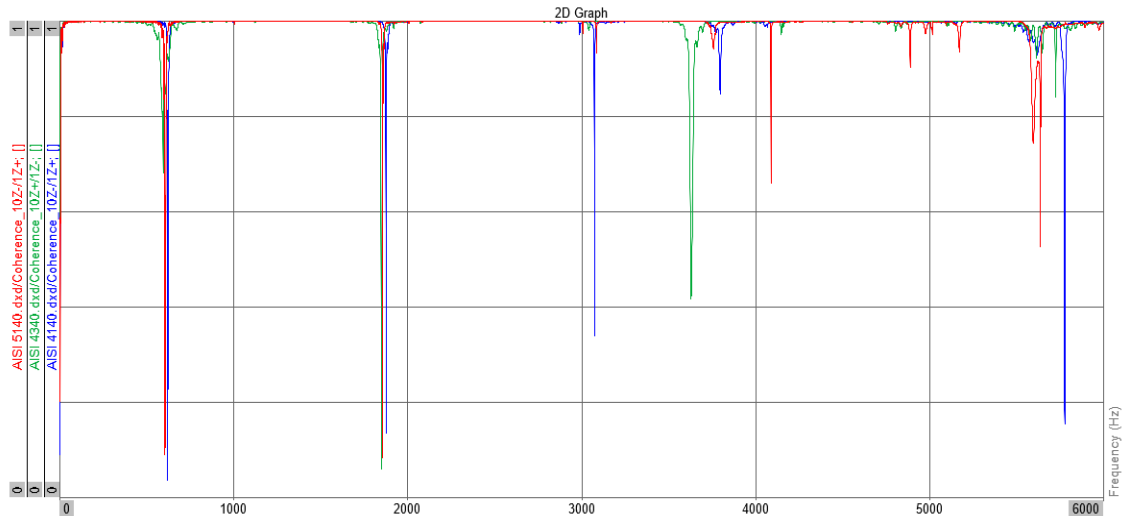
Şekil 5.3'te 6000 Hz'e kadar olan frekans bandına karşı ivme/kuvvet ile sunulan FYF grafiklerinin büyüklüğü, rotor milleri üzerinde işaretlenen 10 numaralı noktadan ölçülen titreşim tepkisi hakkında bilgi sağlamak için kullanılmaktadır. Grafikte AISI 4140 rotor mili için 52,1 dB (995,9 Hz) , 52 dB (2077 Hz), 25,6 dB (3869 Hz) ve 14,3 dB (5604 Hz), AISI 4340 rotor mili için sırasıyla 53,1 dB (959,8 Hz), 42,1 dB (2072 Hz), 29,2 (3746 Hz) ve 22,7 dB (5785 Hz), AISI 5140 rotor milleri için 50,4 dB (1002 Hz), 47,3 dB (2085 Hz), 35,3 dB (3888 Hz) ve 36,4 dB (5838 Hz) olmak üzere dört farklı tepe noktası elde edilmiştir. Tepe noktaları, test edilen rotor millerinin doğal frekanslarının varlığını gösteren rezonans frekanslarına karşılık gelmektedir. Rezonans, rotor milinin uyarma frekansı doğal frekanslarından biriyle eşleştiğinde meydana gelir ve titreşim genliğinde

önemli bir artışa neden olur.



Şekil 5.3. DMA'dan elde edilen FYF grafikleri.

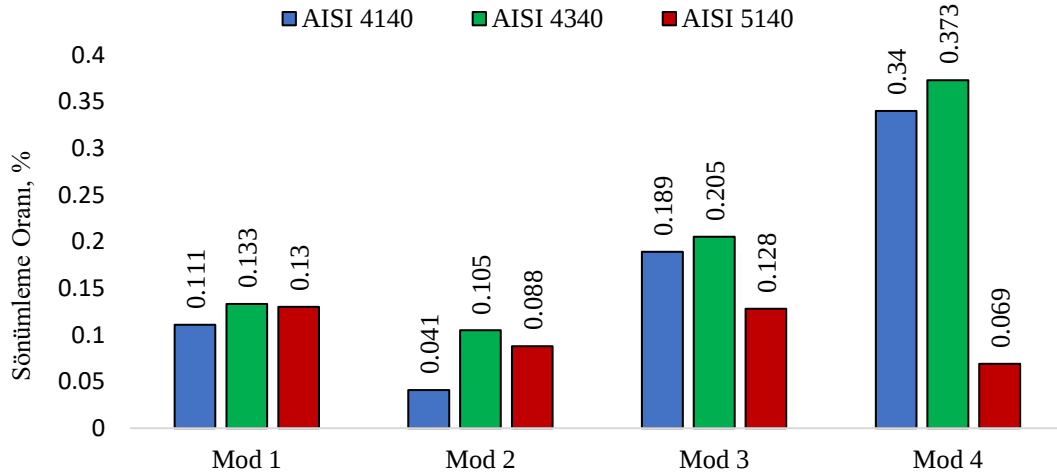
Şekil 5.4'te, her frekansta FYF ölçümünün kalitesini ölçmek için tutarlılık ölçüm grafiklerini göstermektedir. Tutarlılık, yapı titreşim tepkisi (çıkış) sinyalinin uygulanan harici kuvvet (giriş) sinyaliyle ne kadar doğrusal ilişkili olduğunu gösteren boyutsuz bir fonksiyondur. Tutarlılığın genliği 0 ile 1 arasında değişir. Tutarlılığın 1'e yakın olması, yapı çıkışı ile giriş sinyalleri arasında güçlü bir korelasyon olduğunu gösterir. Ancak, anti rezonansda tutarlılığın düşük olduğu bilinmektedir. Çizimlerde genel olarak tutarlılığın frekans aralığı boyunca 1'e yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 5.4. DMA'dan elde edilen tutarlılık grafikleri.

FYF grafikleri ayrıca, tepki tepe noktalarının genişliğiyle orantılı olan (rezonans tepe noktalarından yaklaşık 3 dB aşağı) yarım güç bant genişliğini kullanarak rotor millerinin

doğal frekanslarına karşılık gelen her mod şekliyle ilişkili sönüm oranını hesaplamak için kullanılır. Dolayısıyla, FYF'deki genlik tepe noktaları tepe noktasına göre genişledikçe sönümleme artar. Tepe noktası ne kadar geniş olursa sönümleme de o kadar yüksek olur ve bu da rotor milinin harici bir kuvvet tarafından çıkıldığında vereceği tepkiye bir sınır koyar. Her üç malzemenin sönümleme oranları mod şekilleri aracılığıyla karşılaştırılmıştır. Şekil 5.5'de AISI 4340 rotor milinin AISI 4140 ve AISI 5140 rotor millerinden daha yüksek sönüm oranına sahip olduğu görülmüştür. Düşük sertliğe sahip malzemeler genellikle yüksek sönüme sahip olduğundan, daha düşük sertliğe neden olan daha düşük elastisite modülünün sönümün artmasına katkıda bulunduğu görülmektedir. Malzemelerin bir çok mekanik, fiziksel ve teknolojik özellikleri, malzeme türüne, imalat ve üretim yöntemleri ve parametrelerine bağlıdır. Mikroyapıdaki değişimler malzemelerin, aşınma, yorulma, korozyon, sertlik, elastik modül, tokluk gibi özellikleri çok ciddi olarak etkilemektedir [96]-[101].



Şekil 5.5. DMA'dan elde edilen sönümleme oranları.

5.2. ODS ANALİZİ

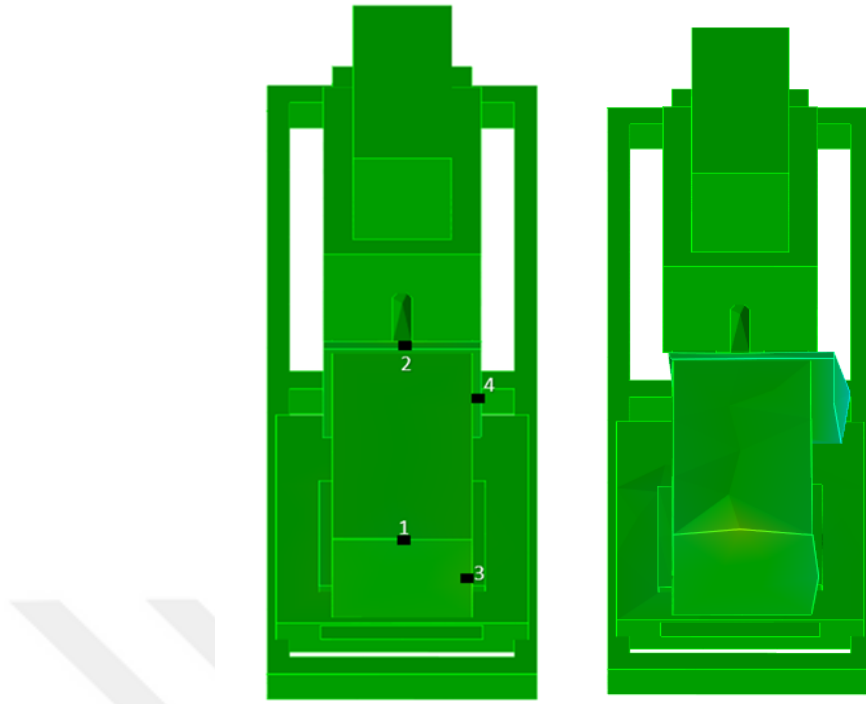
ODS, DMSM için belirlenen gerçek hız ve yük koşullarında kararlı durum çalışması esnasında tespit edilen baskın frekansları ve sapma şekillerini tanımlamak için kullanılmıştır. Deneyler dört farklı hız ve beş farklı yük altında yapılmıştır. Deney düzeneği üzerinde belirlenen uyarma noktalarından elde edilen genlik değerleri belirli frekanslarda ve zaman içinde bir andaki sapma şekilleri olan ODS FYF değerleri elde edilmiştir. ODS analiz çalışan bir yapı üzerinde gerçekleştirildiğinde ODS FYF değerleri modal analiz FYF değerleri arasında kısmi farklar olabilmektedir. Rezonans frekanslarına

yakın olan ODS'ler doğruluğu yüksek iken rezonans frekansından uzakta olan ODS'lerin doğruluğu düşük olmaktadır. Bu nedenle sadece rezonansa yakın olan ODS'ler baskın olma eğilimindedir [102]. Elde edilen verilerden rezonans frekansına yakın olan ODS FRF değerleri ele alınmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, ODS FYF değerleri AISI 4140 rotor mili kullanılan DMSM'de 942 Hz, 2023 Hz, 3938 Hz, 5640 Hz, AISI 4340 rotor mili kullanılan DMSM'de 960 Hz, 2073 Hz, 3752 Hz, 5780 Hz, AISI 5140 rotor mili kullanılan DMSM'de 990 Hz, 2040 Hz, 3930 Hz ve 5797 Hz olduğu tespit edilmiştir. Tespit edilen ODS doğal frekans değerleri Çizelge 5.'de sunulmuştur.

Çizelge 5.2. ODS doğal frekans değerleri.

Mod	AISI 4140			AISI 4340			AISI 5140		
	DMA	ODS	SEM	DMA	ODS	SEM	ODS	DMA	SEM
Frekans (Hz)									
1	995.9	942	967.1	959.8	960	956.2	990	1002	965.4
2	2077	2023	2016.3	2072	2073	1993.6	2040	2085	2012.8
3	3869	3938	3796.7	3746	3752	3753.9	3930	3888	3790
4	5604	5640	5711	5785	5780	5646.3	5797	5838	5701.1

ODS sonuçları incelendiğinde Y ekseninde 1 ve 2 nolu ivmeölçerlerde, X ekseninde 3 ve 4 nolu ivmeölçerlerde büyük sapmalar olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle Y ekseninde 1 ve 2 nolu ve X ekseninde 3 ve 4 nolu ivmeölçerlerden alınan değerlere odaklanılmıştır. Şekil 5.6'de ODS geometri sapma görüntüsü sunulmuştur.



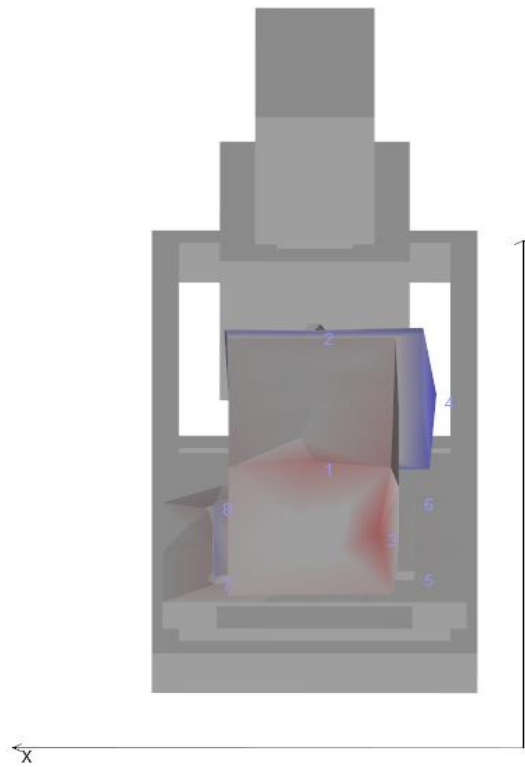
Şekil 5.6. ODS geometri 1Y, 2Y, 3X ve 4X noktaları ve sapma görüntüsü.

1Y ivmeölçerden doğal frekans noktalarında alınan sonuçlar incelendiğinde 900 d/d 4 kW yük şartında elde edilen genlik tepe değeri dışında tüm hız ve yük şartlarında AISI 4340 malzemeden üretilen rotor mili kullanılan DMSM’de diğer rotor mili malzemelerine göre daha düşük genlik tepe değerleri elde edilmiştir. 1Y ivmeölçerden elde edilen doğal frekans noktaları üzerinden alınan tüm genlik tepe değerleri içerisinde en düşük genlik tepe değerleri 600 d/d hız ve 8 kW yük altında 0.0102 m/s^2 , 900 d/d hız ve 6 kW yük altında 0.0111 m/s^2 , 1200 d/d hız ve 8 kW yük altında 0.0108 m/s^2 ve 1500 d/d hız ve 8 kW yük altında 0.0278 m/s^2 AISI 4340 malzemeden üretilen rotor mili kullanılan DMSM’de olduğu tespit edilmiştir. 1Y ivmeölçerden elde edilen tüm genlik tepe değerleri içerisinde en düşük genlik tepe değeri, 900 d/d hız ve 6 kW yük altında 0.0077 m/s^2 AISI 4340 rotor milinde tespit edilmiştir. 1Y ivmeölçerden alınan sonuçlar Çizelge 5.’de sunulmuştur. En düşük genlik tepe değerlerinin AISI 4340 malzemeden üretilen rotor milinde elde edildiği görülmektedir. Bu durum AISI 4340 rotor milinin AISI 4140 ve AISI 5140’a kıyasla daha kararlı çalıştığını göstermiştir. Ek olarak modal analiz sönümlleme oranlarından elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12, Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15, Şekil 5.16, Şekil 5.17, Şekil 5.18ve Şekil 5.19’de 1Y ivmeölçerden alınan genlik değerleri sunulmuştur. 1500 d/d hız ve 6 kW yük altında elde edilen sapma görüntüsü Şekil 5.7’de

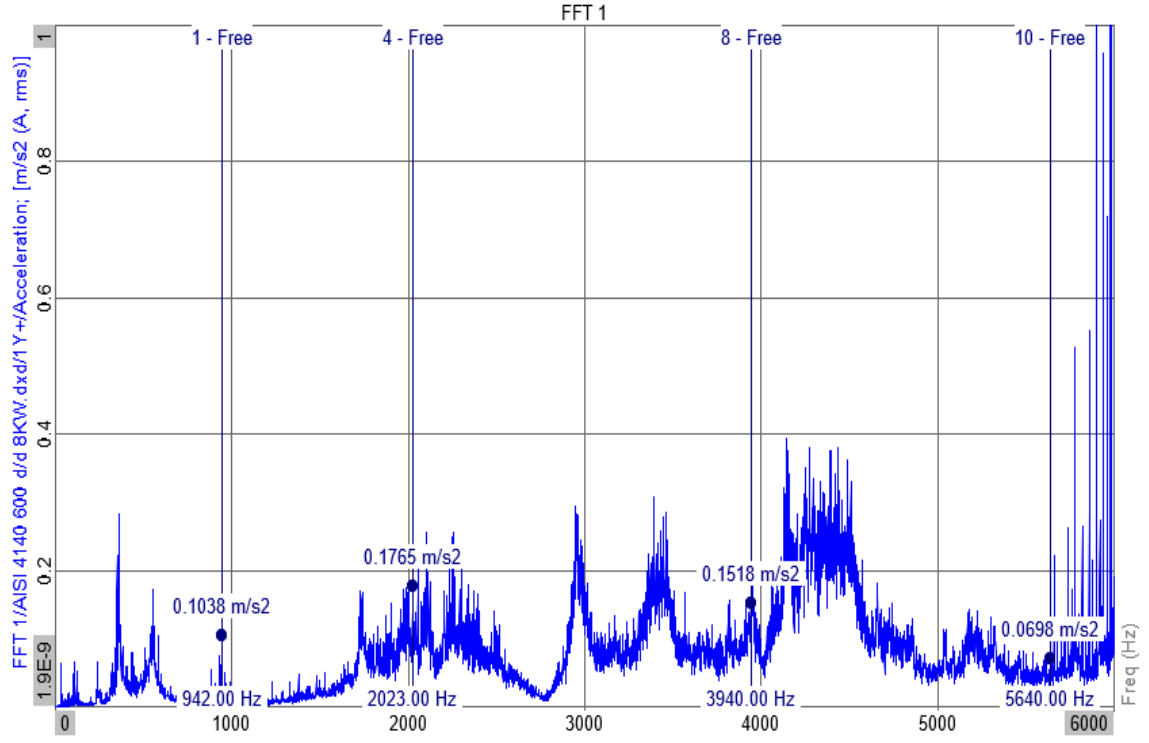
görülmektedir.

Çizelge 5.3. 1Y ivmeölçer en düşük genlik tepe değerleri.

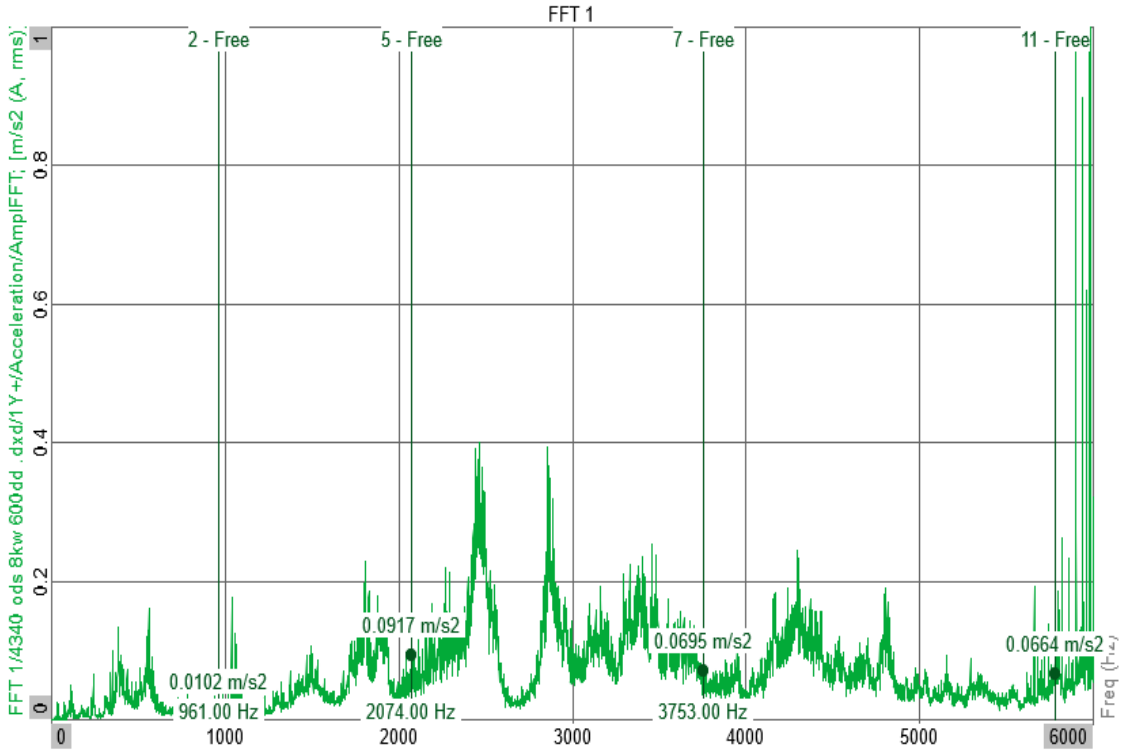
Hız (d/d)		Yük (kW)				
		0	2	4	6	8
		Genlik (m/s ²)				
AISI 4140	600	0.1388	0.0671	0.1236	0.0777	0.0698
	900	0.0544	0.0805	0.0292	0.0570	0.0770
	1200	0.0865	0.0639	0.0773	0.0592	0.0737
	1500	0.1769	0.1877	0.1626	0.2185	0.2160
AISI 4340	600	0.0825	0.0773	0.0125	0.0119	0.0102
	900	0.5640	0.0114	0.0408	0.0111	0.0121
	1200	0.0468	0.0277	0.0297	0.0077	0.0108
	1500	0.0457	0.0125	0.0119	0.0461	0.0278
AISI 5140	600	0.1730	0.0809	0.0772	0.1300	0.1325
	900	0.1057	0.0824	0.0572	0.0915	0.0630
	1200	0.2149	0.3169	0.376	0.3929	0.2906
	1500	0.1746	0.2393	0.2135	0.2068	0.1663



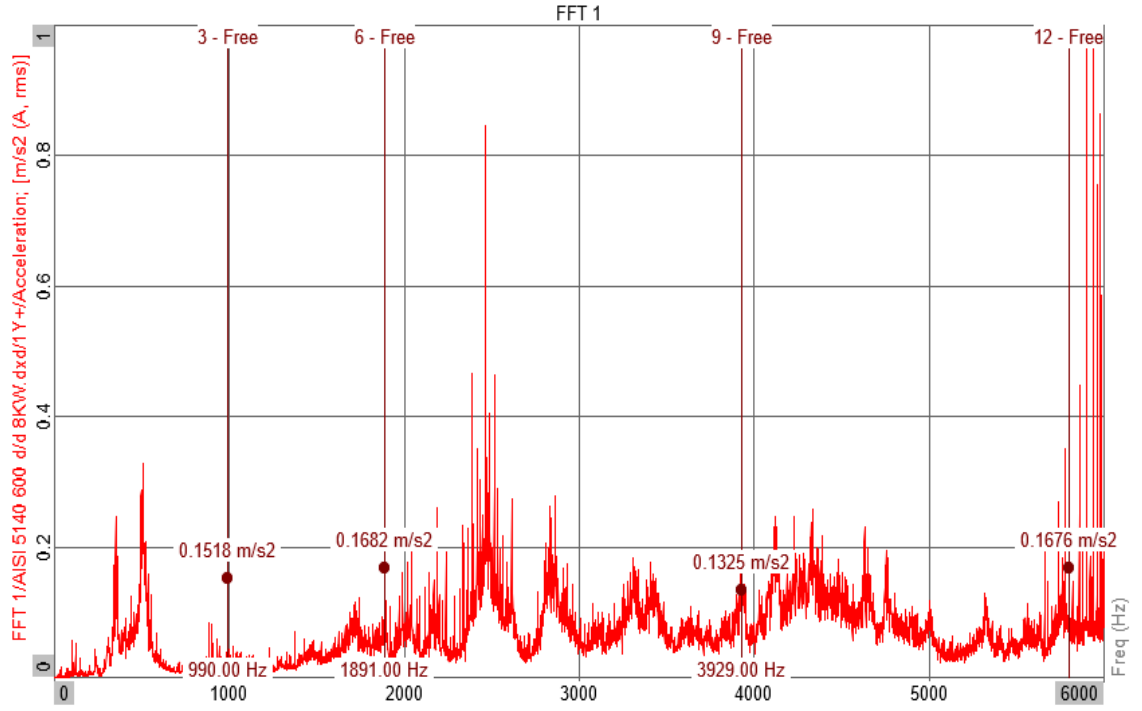
Şekil 5.7. 1Y ivmeölçer AISI 4340 900 d/d 6kW için sapma görüntüsü



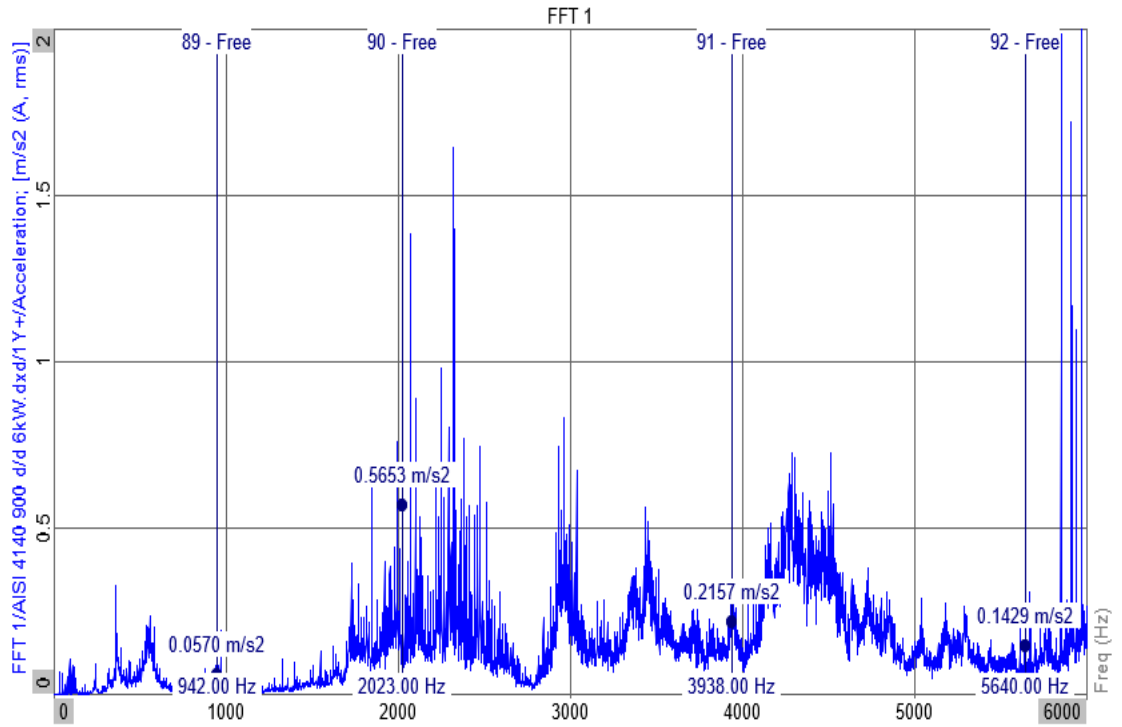
Şekil 5.8. 1Y ivmeölçer AISI 4140 600 d/d 8 kW.



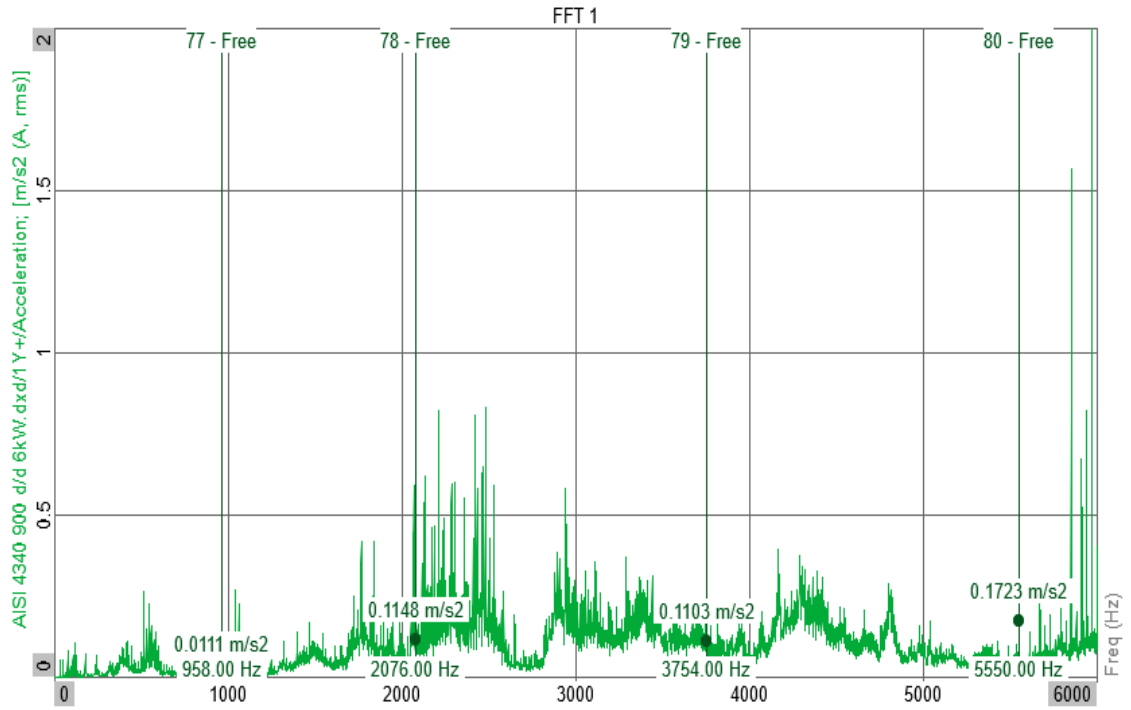
Şekil 5.9. 1Y ivmeölçer AISI 4340 600 d/d 8 kW.



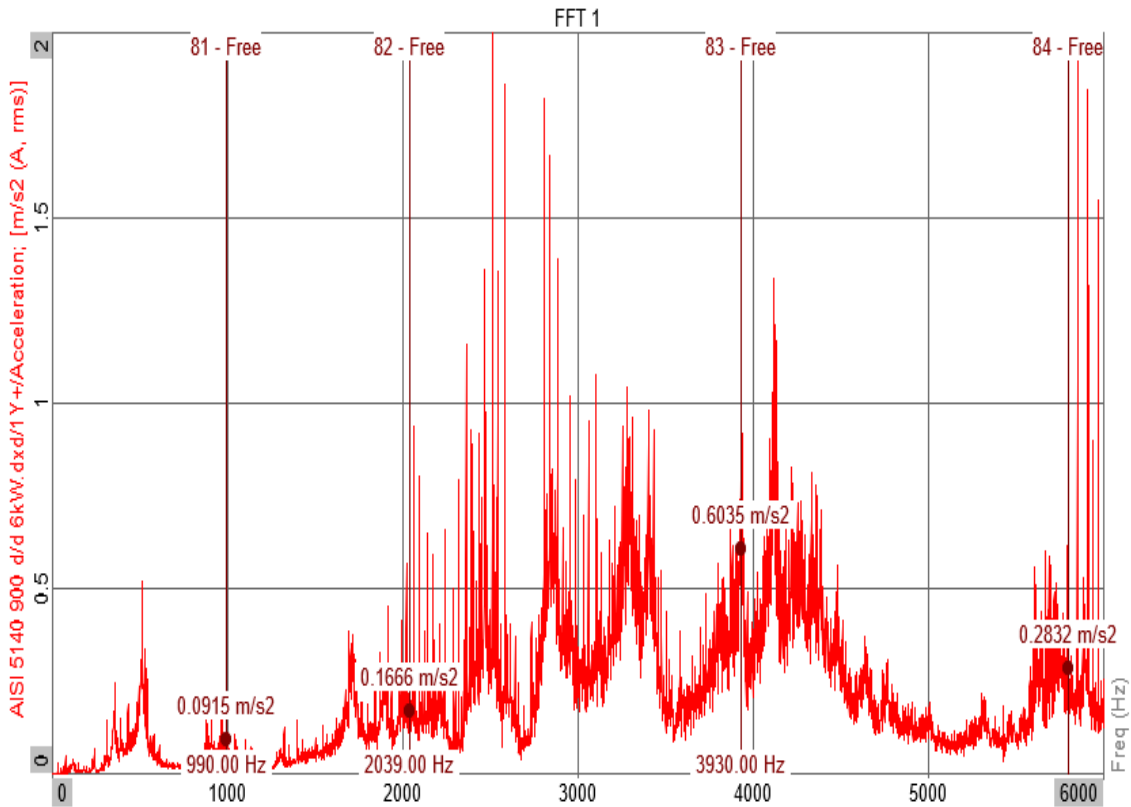
Şekil 5.10. 1Y ivmeölçer AISI 4340 600 d/d 8 kW.



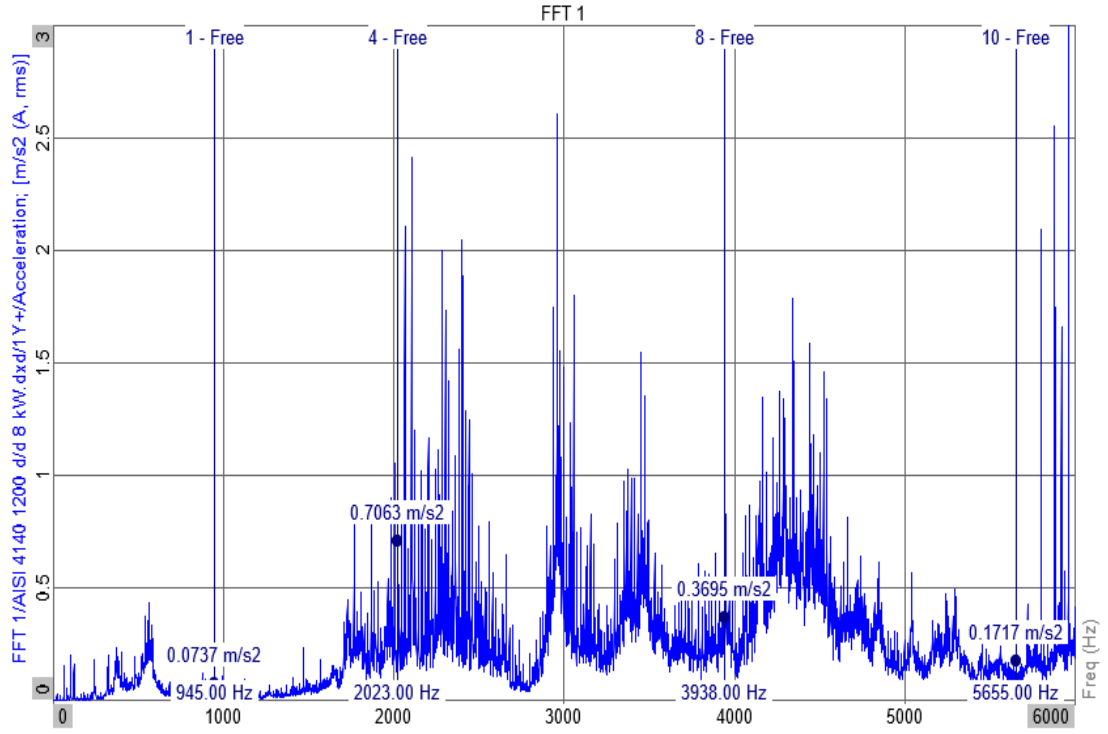
Şekil 5.11. 1Y ivmeölçer AISI 4140 900 d/d 6 kW.



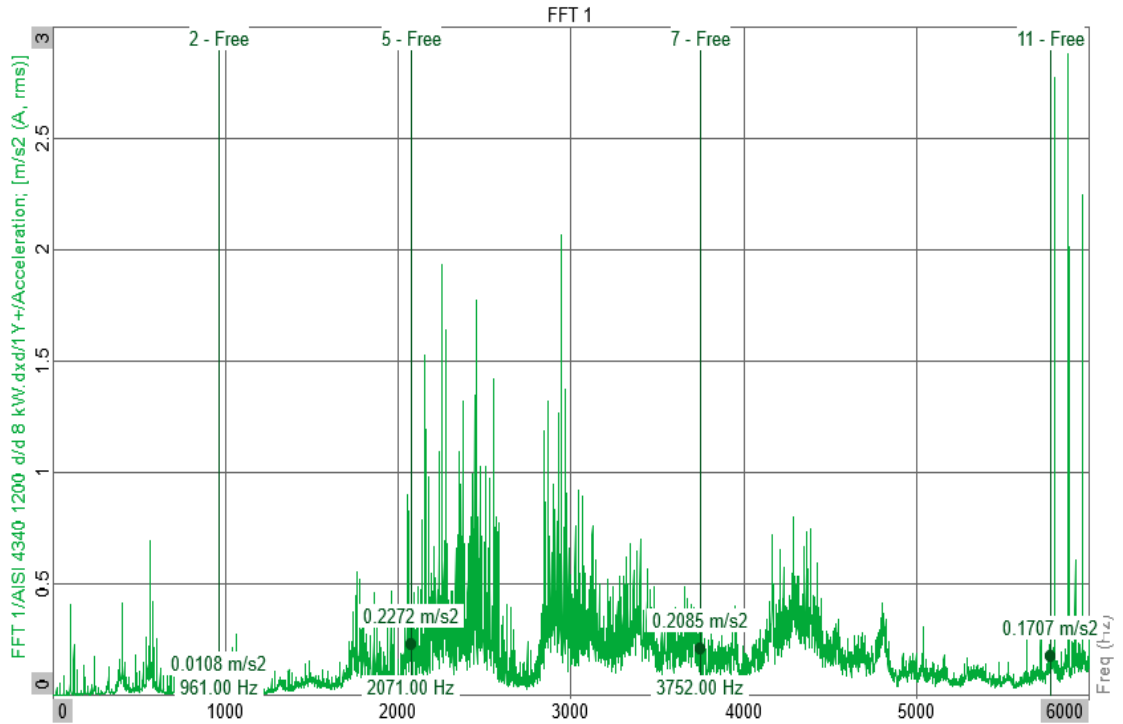
Şekil 5.12. 1Y ivmeölçer AISI 4340 900 d/d 6 kW.



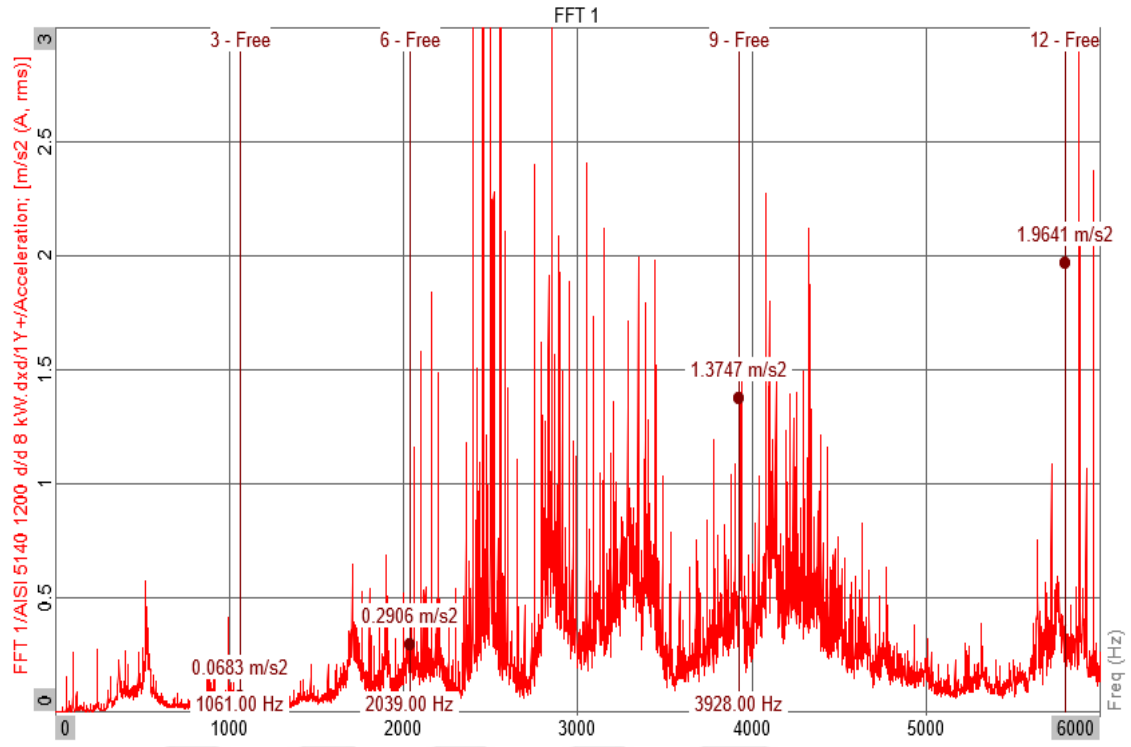
Şekil 5.13. 1Y ivmeölçer AISI 5140 900 d/d 6 kW.



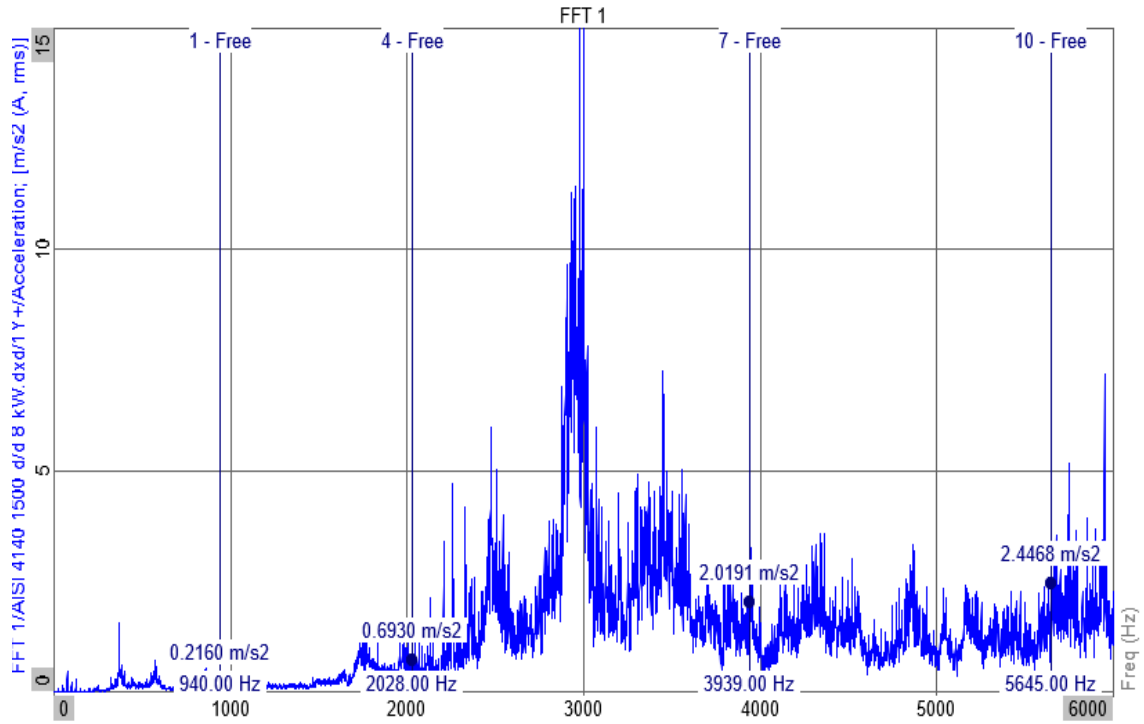
Şekil 5.14. 1Y ivmeölçer AISI 4140 1200 d/d 8 kW.



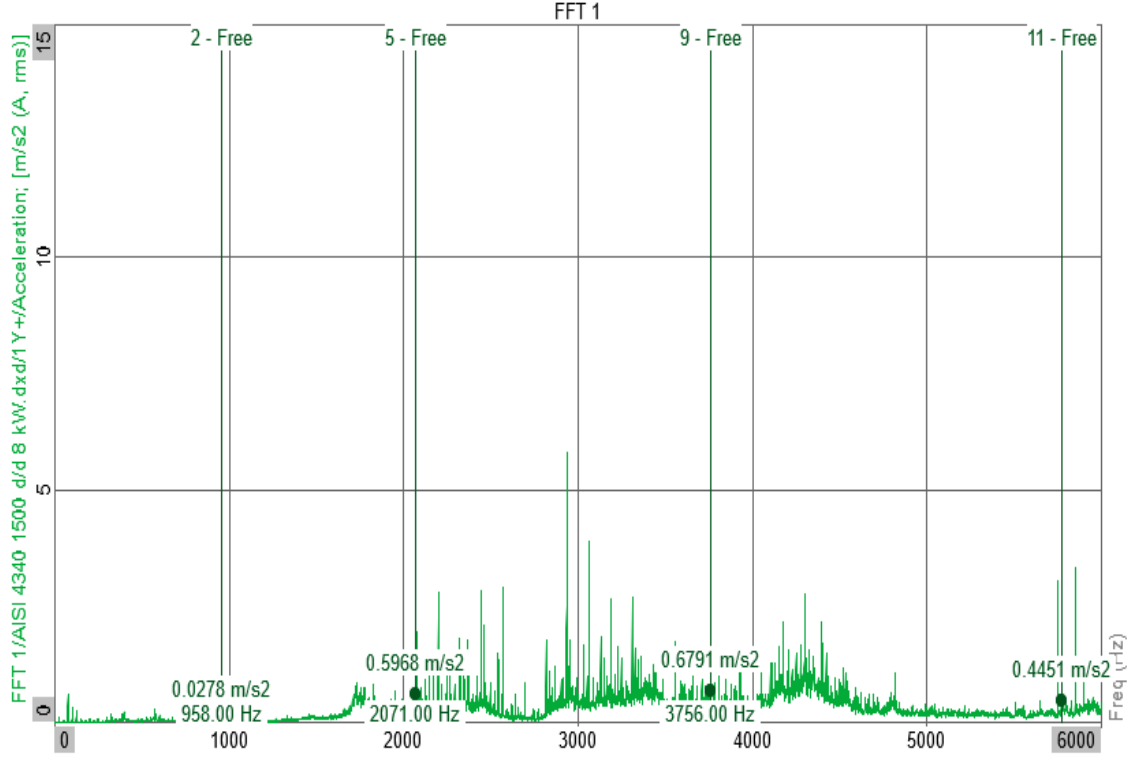
Şekil 5.15. 1Y ivmeölçer AISI 4340 1200 d/d 8 kW.



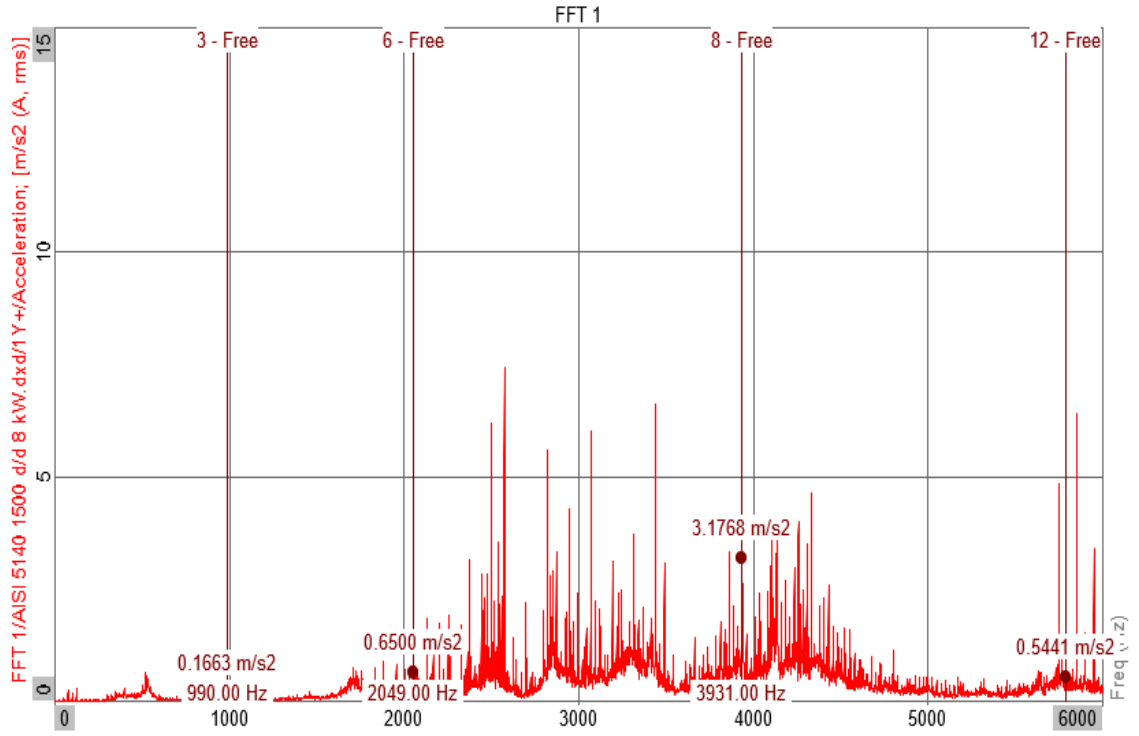
Şekil 5.16. 1Y ivmeölçer AISI 5140 1200 d/d 8 kW.



Şekil 5.17. 1Y ivmeölçer AISI 4140 1500 d/d 8 kW.



Şekil 5.18. 1Y ivmeölçer AISI 4340 1500 d/d 8 kW.

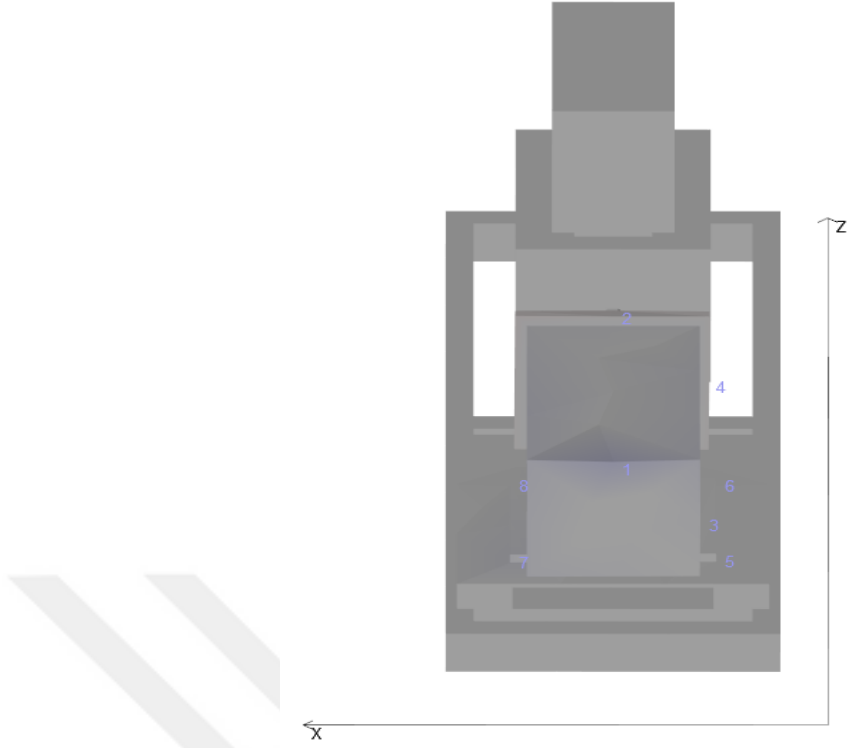


Şekil 5.19. 1Y ivmeölçer AISI 5140 1500 d/d 8 kW.

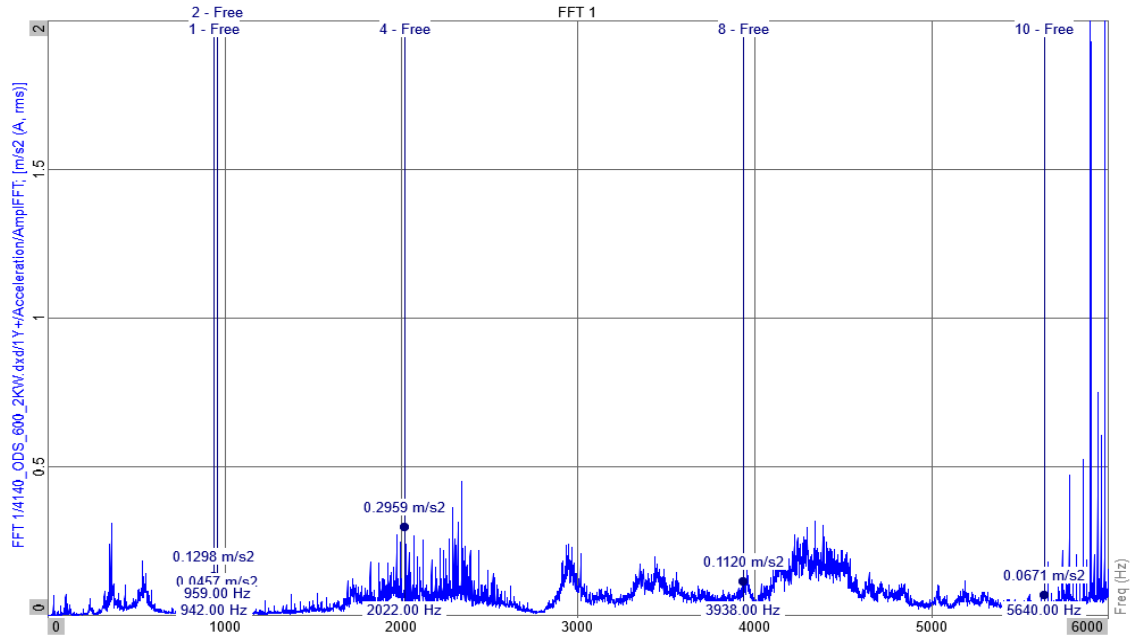
2Y ivmeölçerde doğal frekans noktalarından alınan sonuçlar incelendiğinde AISI 4140 900 d/d 4 kW yük şartında elde edilen genlik tepe değeri dışında 600 d/d, 900 d/d ve 1200 d/d'da tüm yük şartlarında AISI 5140 malzemeden üretilen rotor mili kullanılan DMSM'de diğer rotor mili malzemelerine göre daha düşük genlik tepe değerleri elde edilmiştir. 1500 d/d'da tüm yük şartlarında ise AISI 4340 malzemeden üretilen rotor mili kullanılan DMSM'de elde edilmiştir. 2Y ivmeölçerden elde edilen doğal frekans noktaları üzerinden alınan tüm genlik tepe değerleri içerisinde en düşük genlik tepe değerleri 600 d/d hız ve 2 kW yük altında 0.0098 m/s^2 , 900 d/d hızda 0 kW ve 8kW yük altında 0.0188 m/s^2 , 1200 d/d hız ve 8 kW yük altında 0.0209 m/s^2 AISI 5140 malzemeden üretilen rotor mili kullanılan DMSM'de ve 1500 d/d hız ve 8 kW yük altında 0.0184 m/s^2 AISI 4340 malzemeden üretilen rotor mili kullanılan DMSM'de olduğu tespit edilmiştir. 2Y ivmeölçerden elde edilen tüm genlik tepe değerleri içerisinde en düşük genlik tepe değeri, 600 d/d hız ve 8 kW yük altında 0.011 m/s^2 AISI 4340 rotor milinde tespit edilmiştir. 2Y ivmeölçerden alınan sonuçlar Çizelge 5.'te sunulmuştur. Şekil 5.21, Şekil 5.22, Şekil 5.23, Şekil 5.24, Şekil 5.25, Şekil 5.26, Şekil 5.27, Şekil 5.28, Şekil 5.29, Şekil 5.30, Şekil 5.31 ve Şekil 5.32'de 2Y ivmeölçerden alınan en düşük genlik tepe değerleri sunulmuştur. 600 d/d hız ve 8 kW yük altında elde edilen sapma görüntüsü Şekil 5.20'de görülmektedir.

Çizelge 5.4. 2Y ivmeölçer en düşük genlik tepe değerleri.

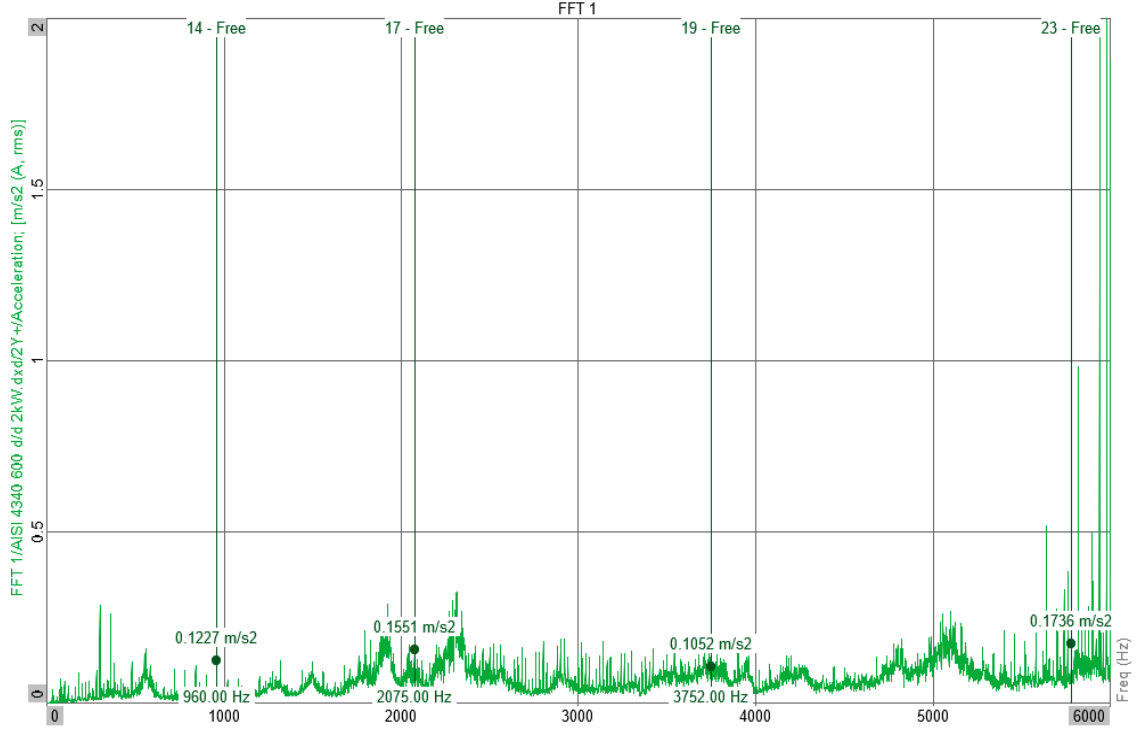
		Hız (d/d)				
		Yük (kW)				
		0	2	4	6	8
		Genlik (m/s^2)				
AISI 4140	600	0.0544	0.0469	0.0509	0.0465	0.0389
	900	0.0284	0.0239	0.0171	0.0248	0.0294
	1200	0.0462	0.0390	0.0390	0.0511	0.0433
	1500	0.0617	0.0748	0.0689	0.0927	0.2143
AISI 4340	600	0.0805	0.1052	0.0864	0.1118	0.1174
	900	0.1466	0.0274	0.1108	0.0915	0.1026
	1200	0.2174	0.1196	0.1212	0.1182	0.1162
	1500	0.0193	0.0241	0.0184	0.0258	0.0269
AISI 5140	600	0.0279	0.0098	0.0110	0.0132	0.0110
	900	0.0162	0.0188	0.0367	0.0225	0.0188
	1200	0.0251	0.0216	0.0306	0.0213	0.0209
	1500	0.0354	0.0480	0.0584	0.0493	0.0209



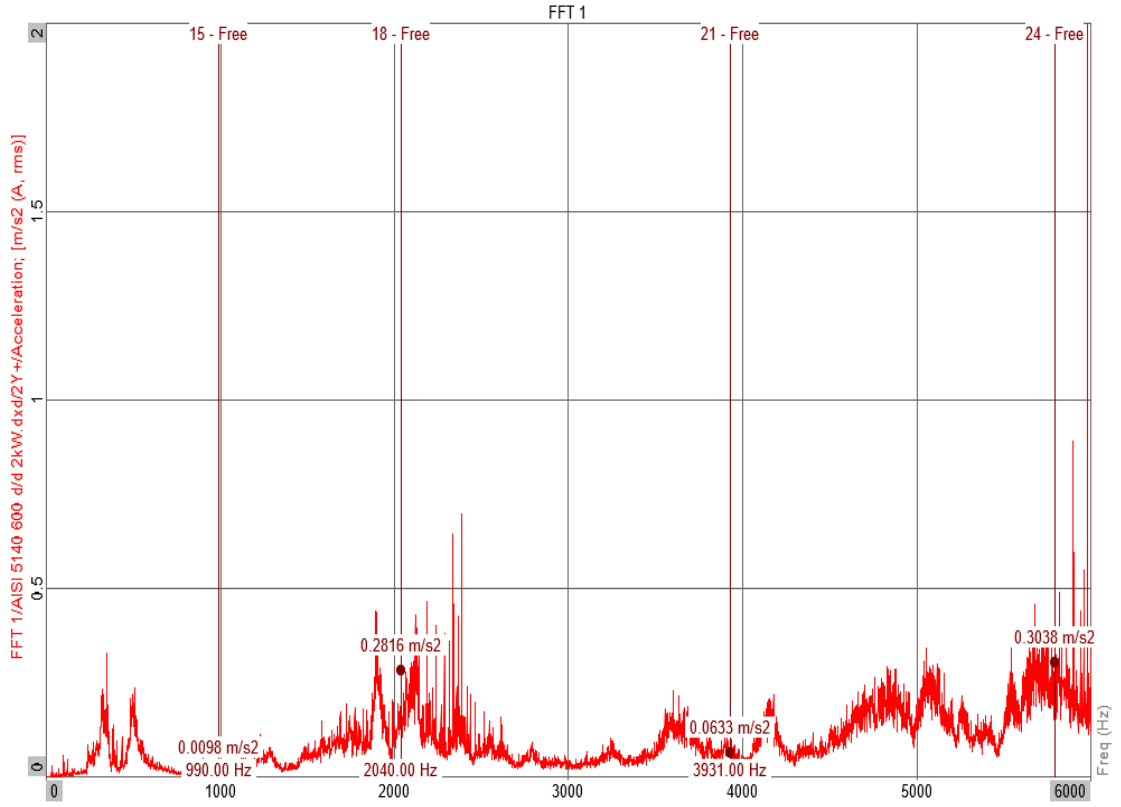
Şekil 5.20. 2Y ivmeölçer AISI 4340 600 d/d 8 kW için sapma görüntüsü



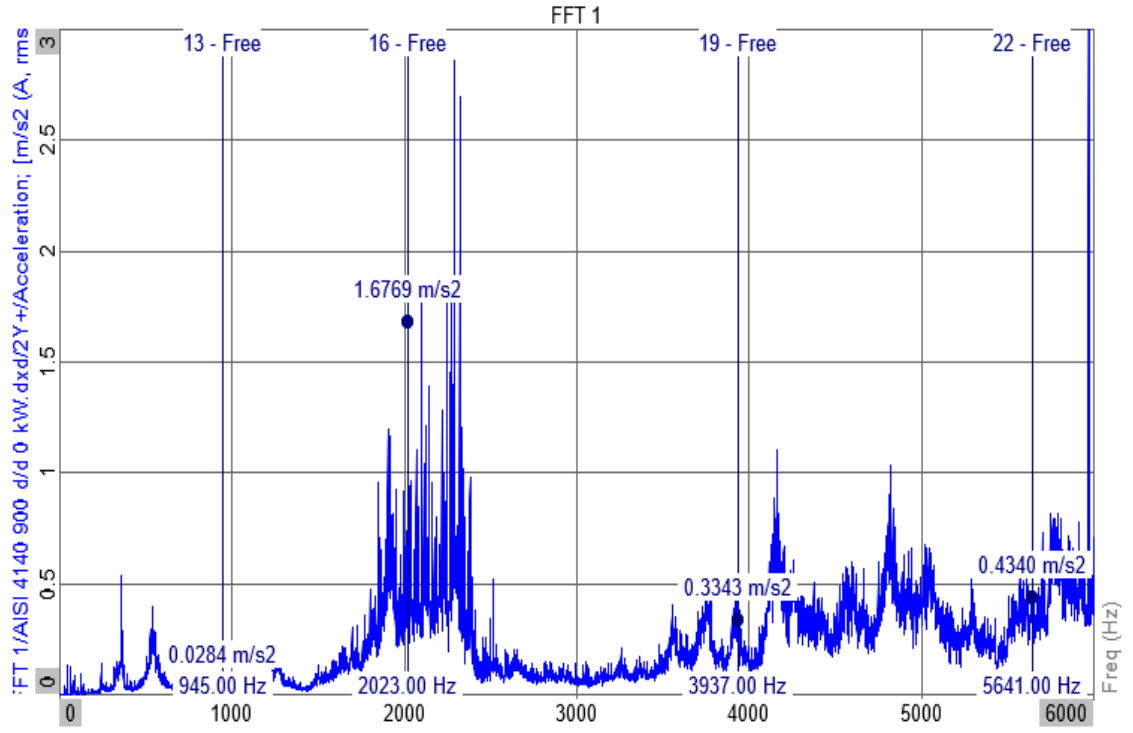
Şekil 5.21. 2Y ivmeölçer AISI 4140 600 d/d 2 kW.



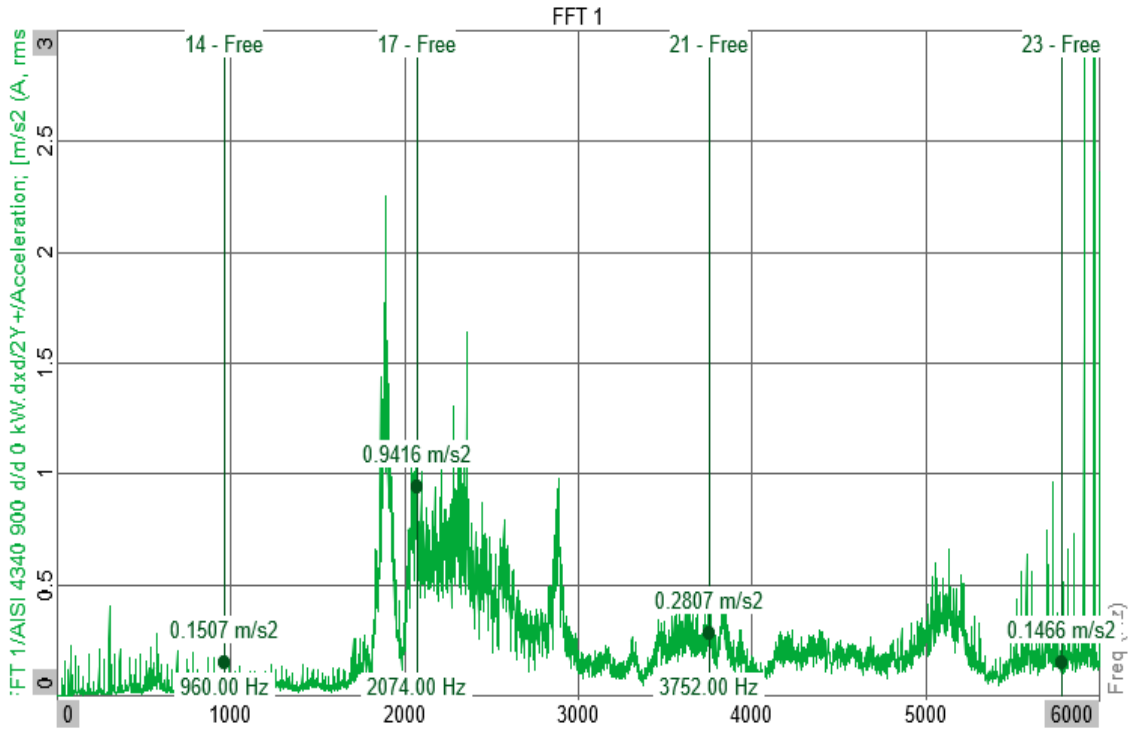
Şekil 5.22. 2Y ivmeölçer AISI 4340 600 d/d 2 kW.



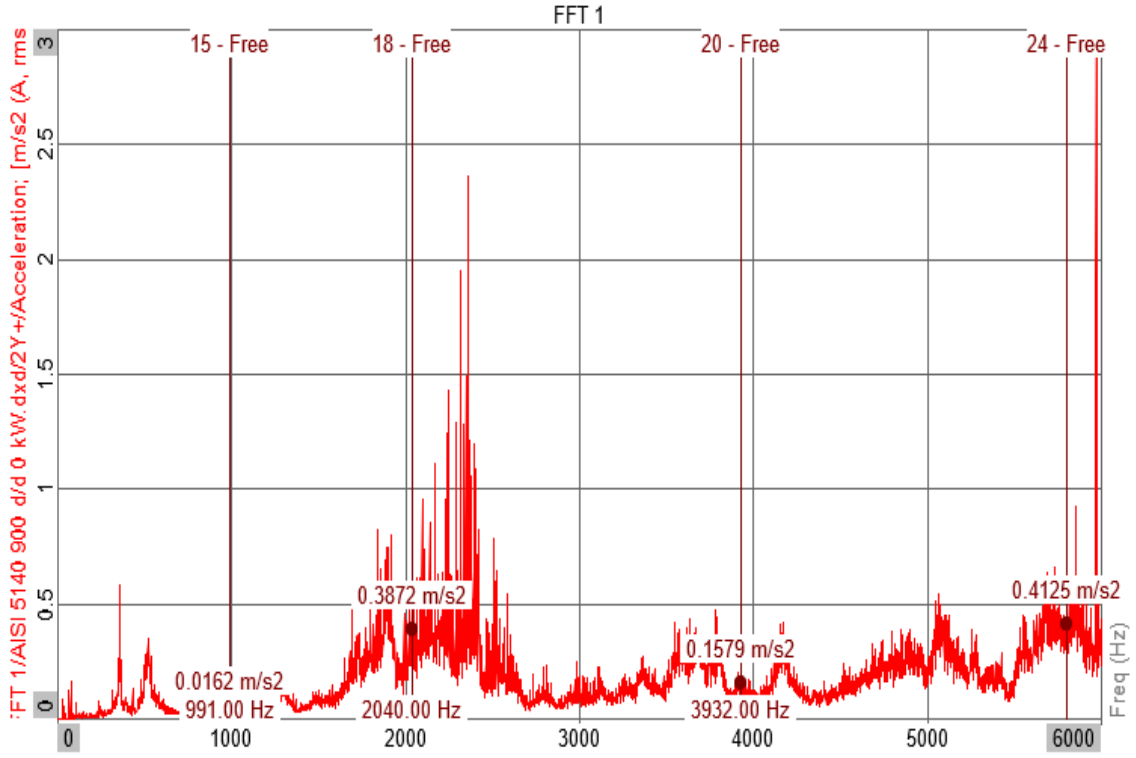
Şekil 5.23. 2Y ivmeölçer AISI 5140 600 d/d 2 kW.



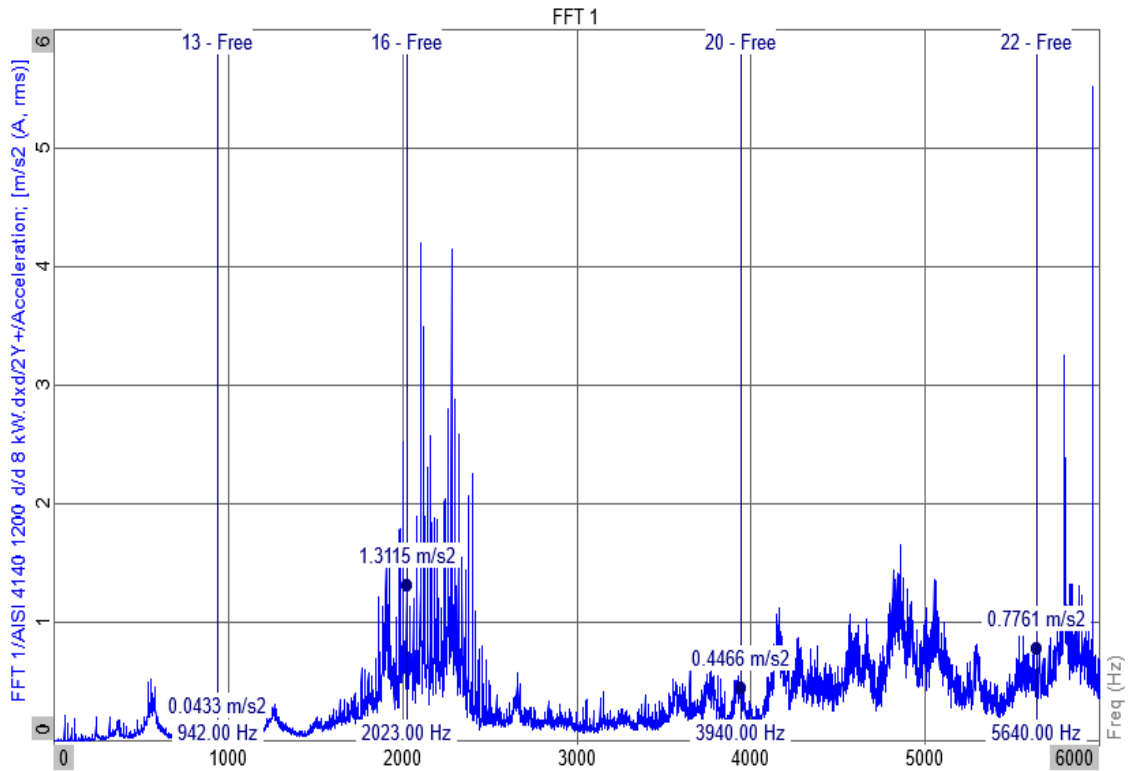
Şekil 5.24. 2Y ivmeölçer AISI 4140 900 d/d 0 kW.



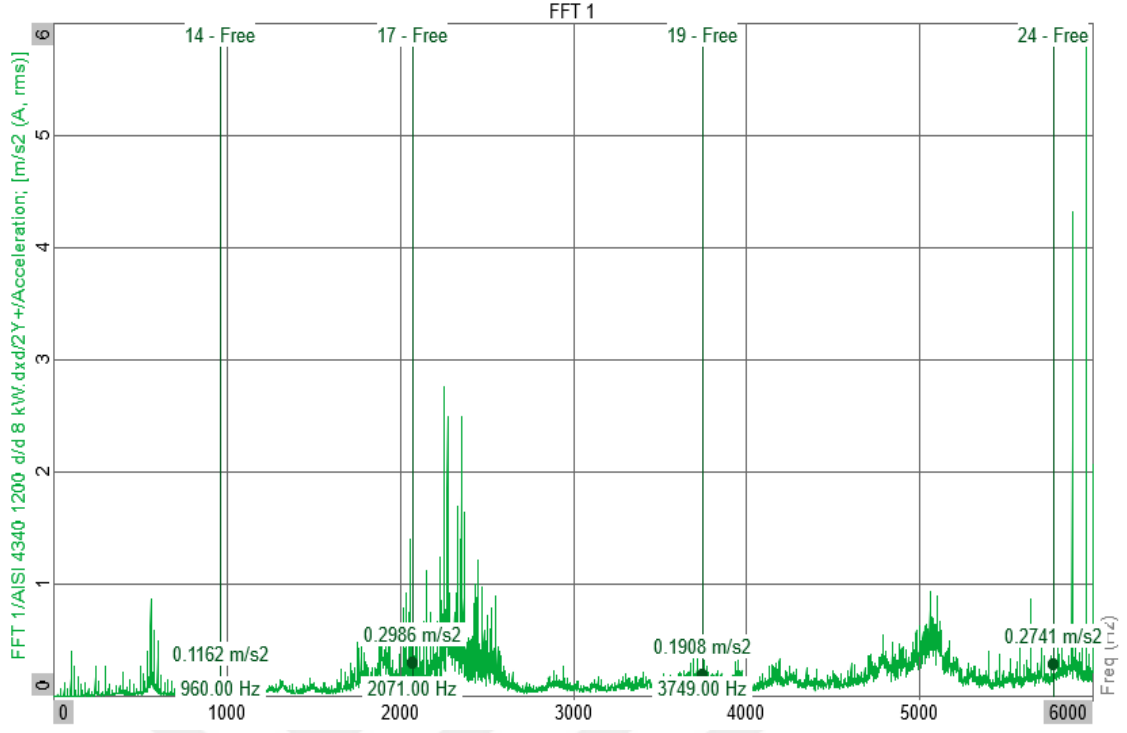
Şekil 5.25. 2Y ivmeölçer AISI 5140 900 d/d 0 kW.



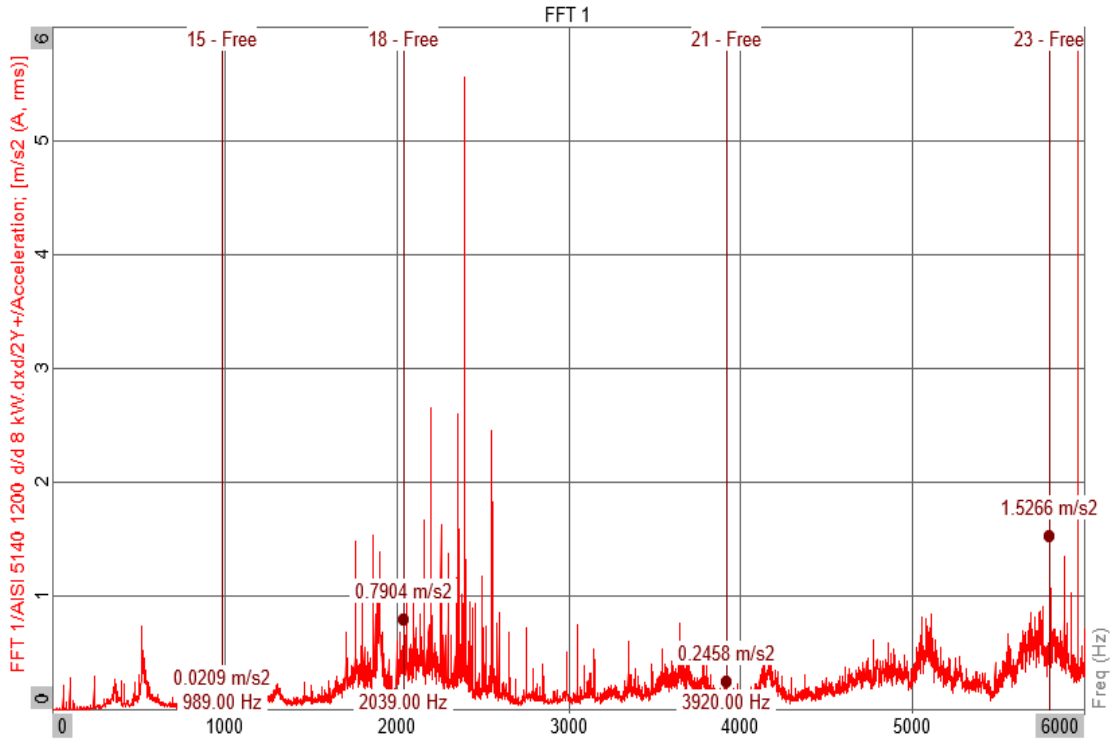
Şekil 5.26. 2Y ivmeölçer AISI 5140 900 d/d 0 kW.



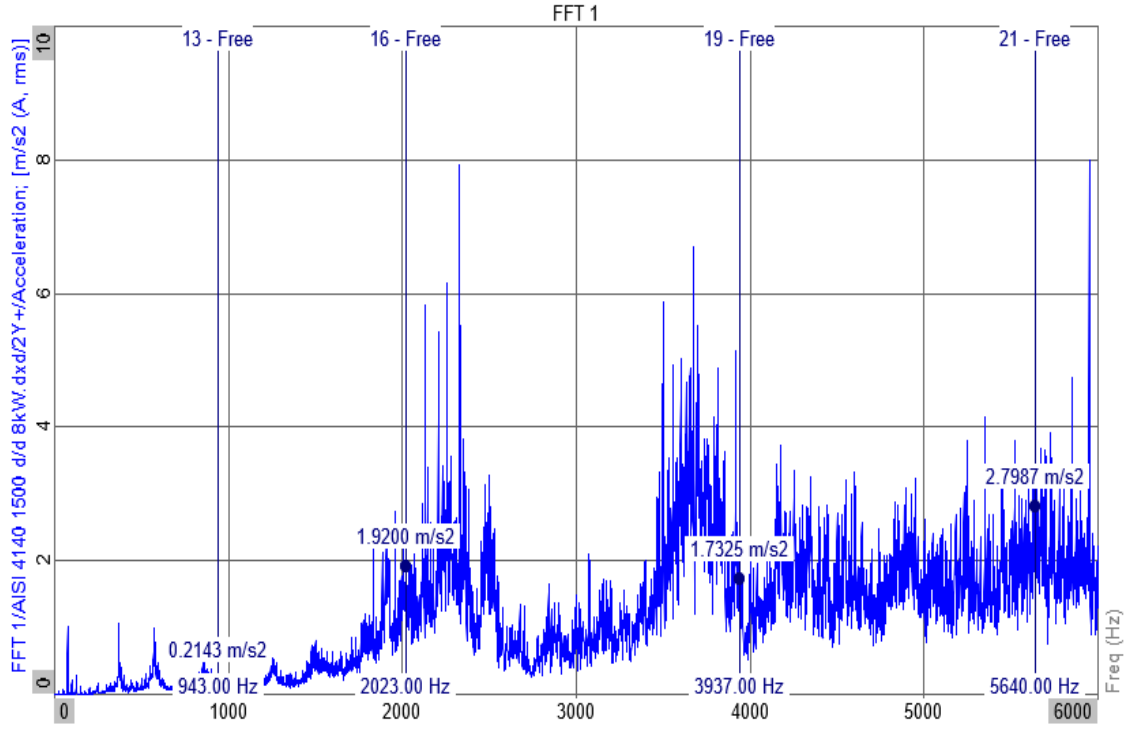
Şekil 5.27. 2Y ivmeölçer AISI 4140 1200 d/d 8 kW.



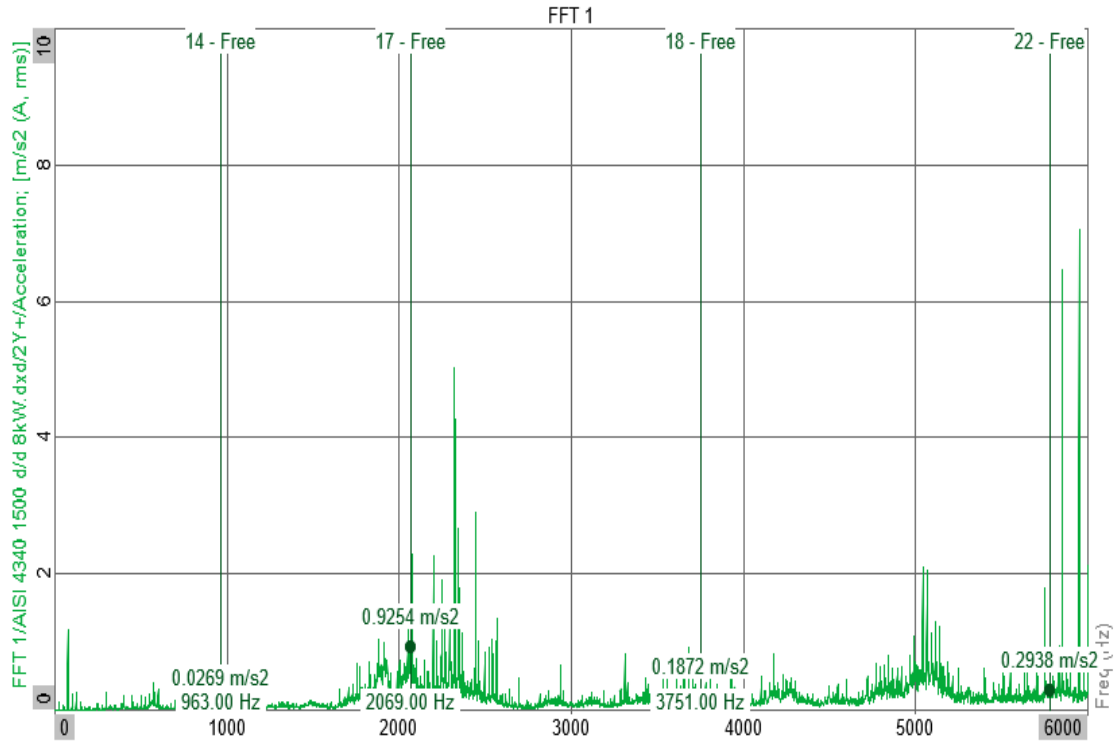
Şekil 5.28. 2Y ivmeölçer AISI 4340 1200 d/d 8 kW.



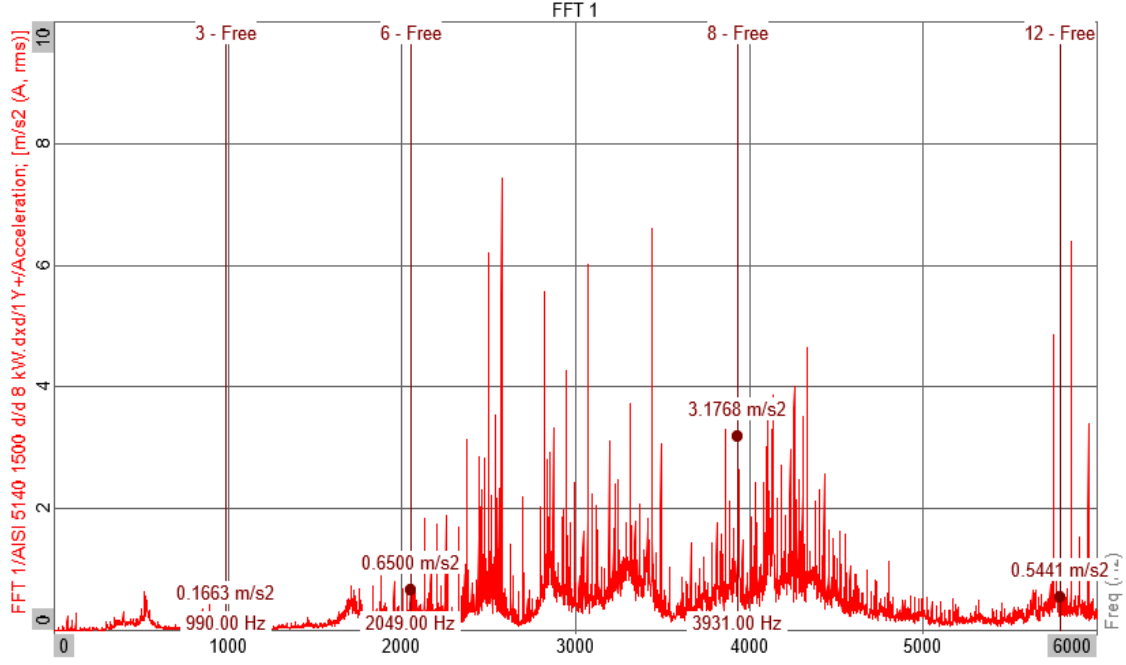
Şekil 5.29. 2Y ivmeölçer AISI 5140 1200 d/d 8 kW.



Şekil 5.30. 2Y ivmeölçer AISI 4140 1500 d/d 8 kW.



Şekil 5.31. 2Y ivmeölçer AISI 4340 1500 d/d 8 kW.

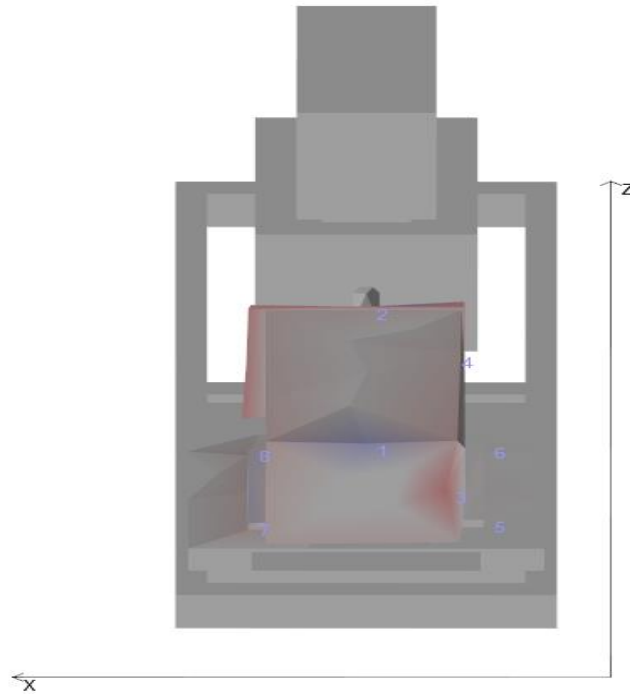


Şekil 5.32. 2Y ivmeölçer AISI 5140 1500 d/d 8 kW.

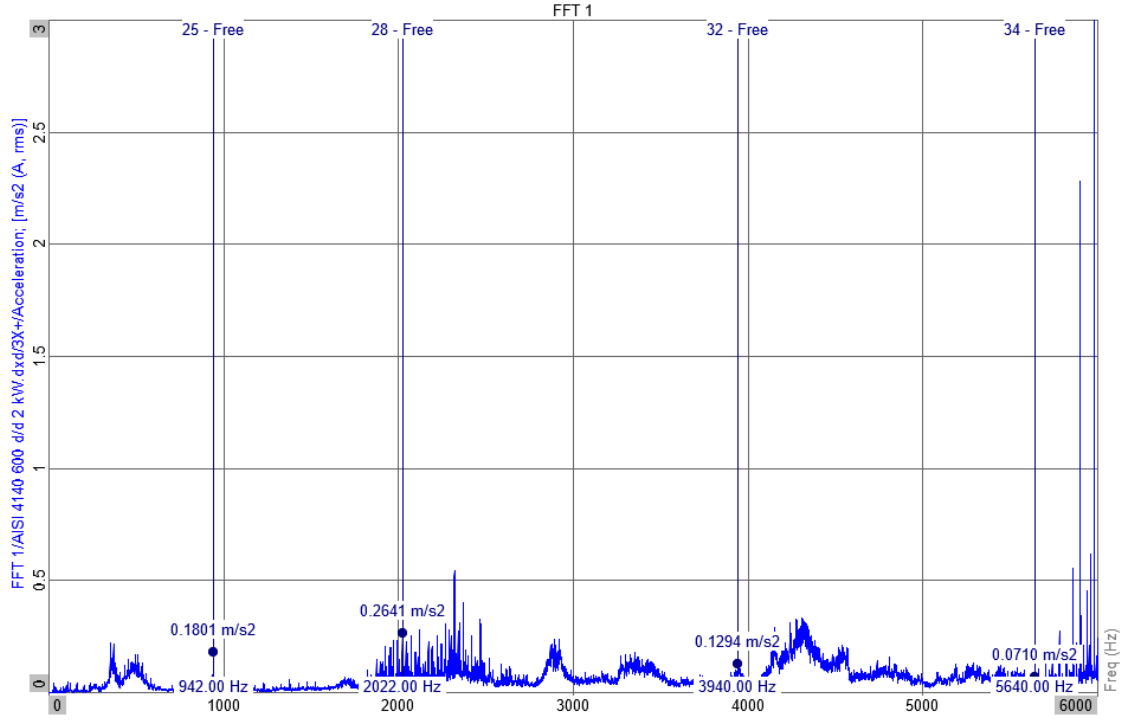
3X ivmeölçerden doğal frekans noktalarından alınan sonuçlar incelendiğinde en düşük genlik tepe değerleri, AISI 4140 malzemeden üretilen rotor mili kullanılan DMSM’de 1200 d/d 0 kW yük şartında ve AISI 5140 malzemeden üretilen rotor mili kullanılan DMSM’de 600 d/d 4 kW, 900 d/d 2 kW ve 6 kW dışında AISI 4340 malzemeden üretilen rotor mili kullanılan DMSM’de elde edilmiştir. Tüm genlik tepe değerleri içerisinde en düşük genlik tepe değerleri 600 d/d hız ve 2 kW yük altında 0.0474 m/s^2 , 900 d/d hız ve 8 kW yük altında 0.0772 m/s^2 , 1200 d/d hız ve 8 kW yük altında 0.092 m/s^2 ve 1500 d/d hız ve 8 kW yük altında 0.0394 m/s^2 olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 5.’te 3X ivmeölçerden alınan en düşük genlik tepe değerleri sunulmuştur. Şekil 5.33’te de görüldüğü üzere 3X ivmeölçerden elde edilen tüm genlik tepe değerleri içerisinde en düşük genlik tepe değeri, 1500 d/d hız ve 6 kW yük altında 0.0394 m/s^2 AISI 4340 rotor milinde tespit edilmiştir. 3X ivmeölçerden alınan sonuçlar Şekil 5.34, Şekil 5.35, Şekil 5.36, Şekil 5.37, Şekil 5.38, Şekil 5.39, Şekil 5.40, Şekil 5.41, Şekil 5.42, Şekil 5.43, Şekil 5.44 ve Şekil 5.45’de 3X ivmeölçerden alınan en düşük tepe değerleri sunulmuştur. 1500 d/d hız ve 6 kW yük altında elde edilen sapma görüntüsü Şekil 5.33’de görülmektedir.

Çizelge 5.5. 3X ivmeölçer en düşük genlik tepe değerleri

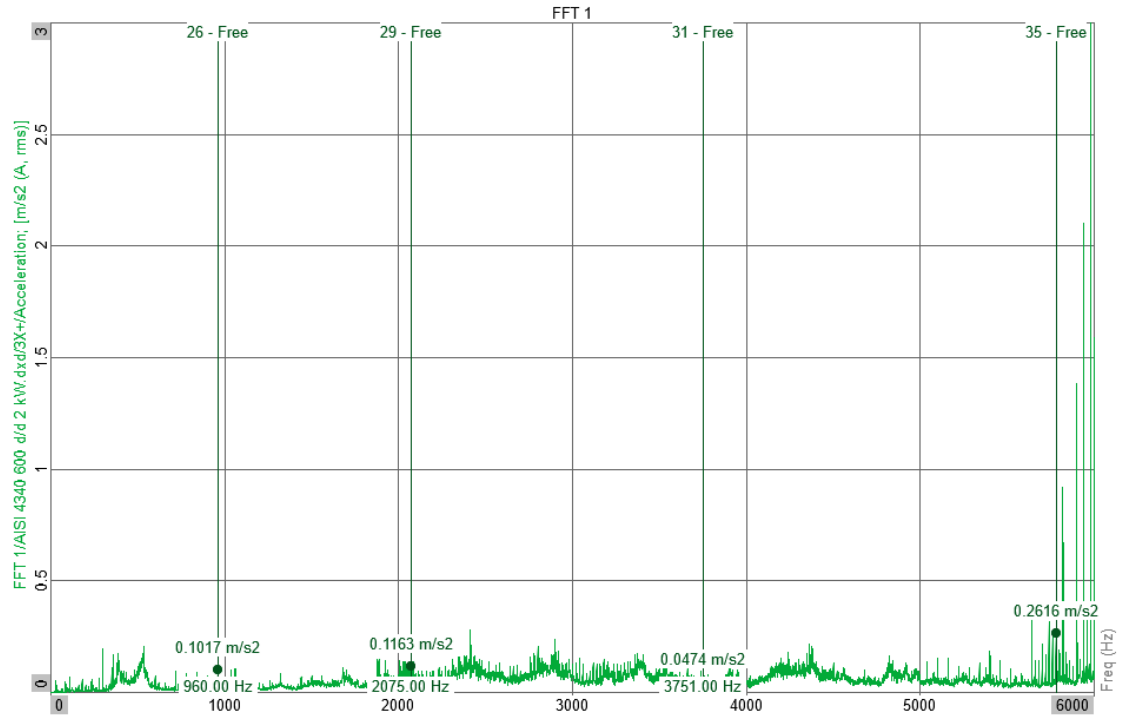
Hız (d/d)		Yük (kW)				
		0	2	4	6	8
		Genlik (m/s ²)				
AISI 4140	600	0.0747	0.0710	0.0574	0.0821	0.1001
	900	0.0984	0.1096	0.1065	0.1118	0.1077
	1200	0.1224	0.1127	0.1306	0.1328	0.1180
	1500	0.1751	0.1926	0.1909	0.1620	0.3815
AISI 4340	600	0.0653	0.0474	0.0539	0.0651	0.0764
	900	0.0740	0.0782	0.0871	0.0774	0.0772
	1200	0.1620	0.1040	0.1110	0.1023	0.0920
	1500	0.0398	0.0441	0.0405	0.0394	0.0450
AISI 5140	600	0.1170	0.0648	0.0339	0.0670	0.0715
	900	0.0954	0.0250	0.1304	0.0609	0.1090
	1200	0.2320	0.3108	0.4351	0.3956	0.4283
	1500	0.1605	0.2185	0.2085	0.2159	0.1939



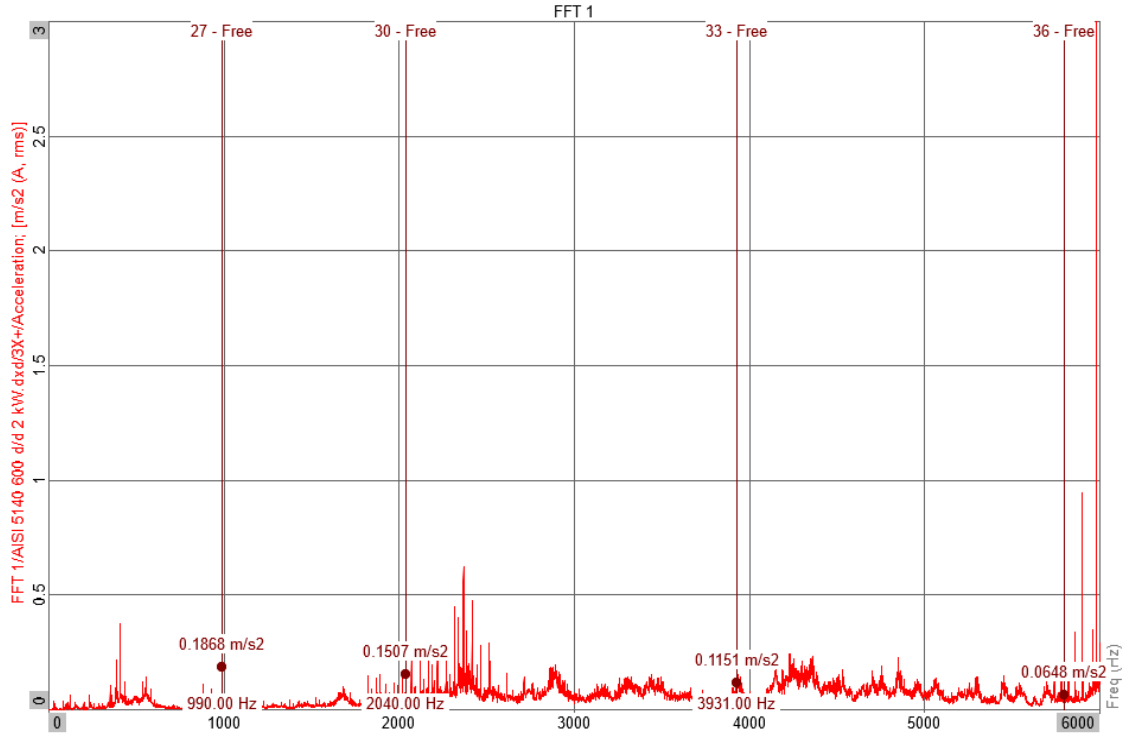
Şekil 5.33. 3X ivmeölçer AISI 4340 1500 d/d 6 kW için sapma görüntüsü



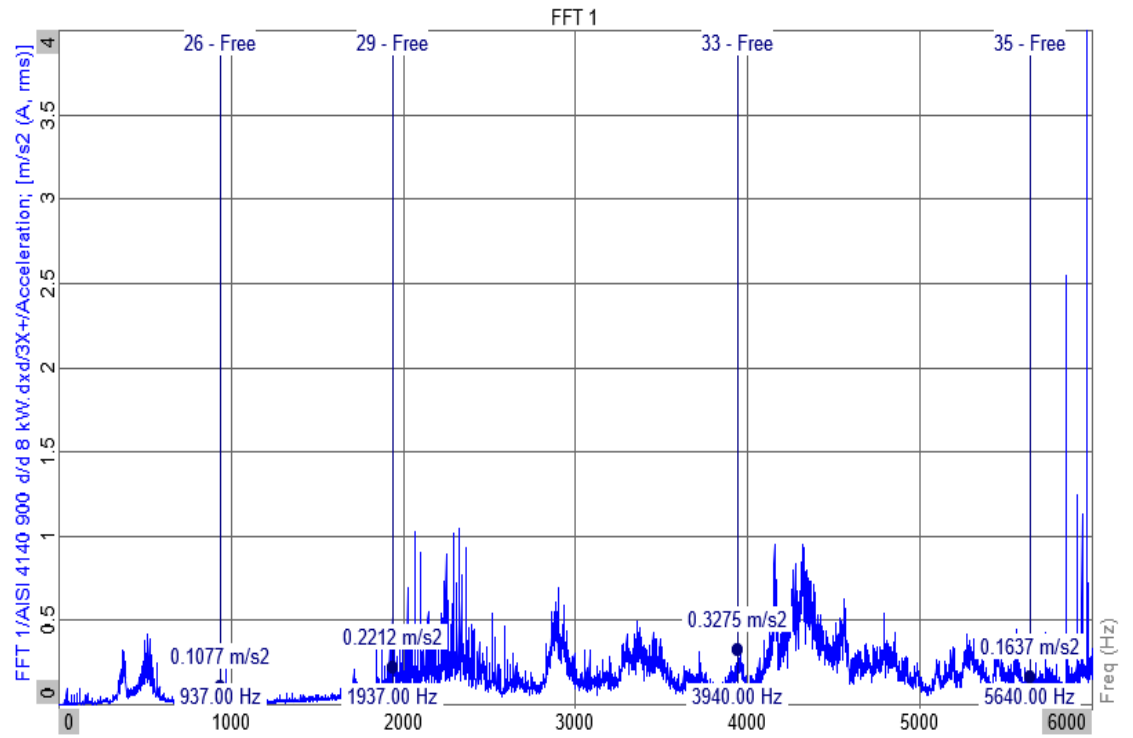
Şekil 5.34. 3X ivmeölçer AISI 4140 600 d/d 2 kW.



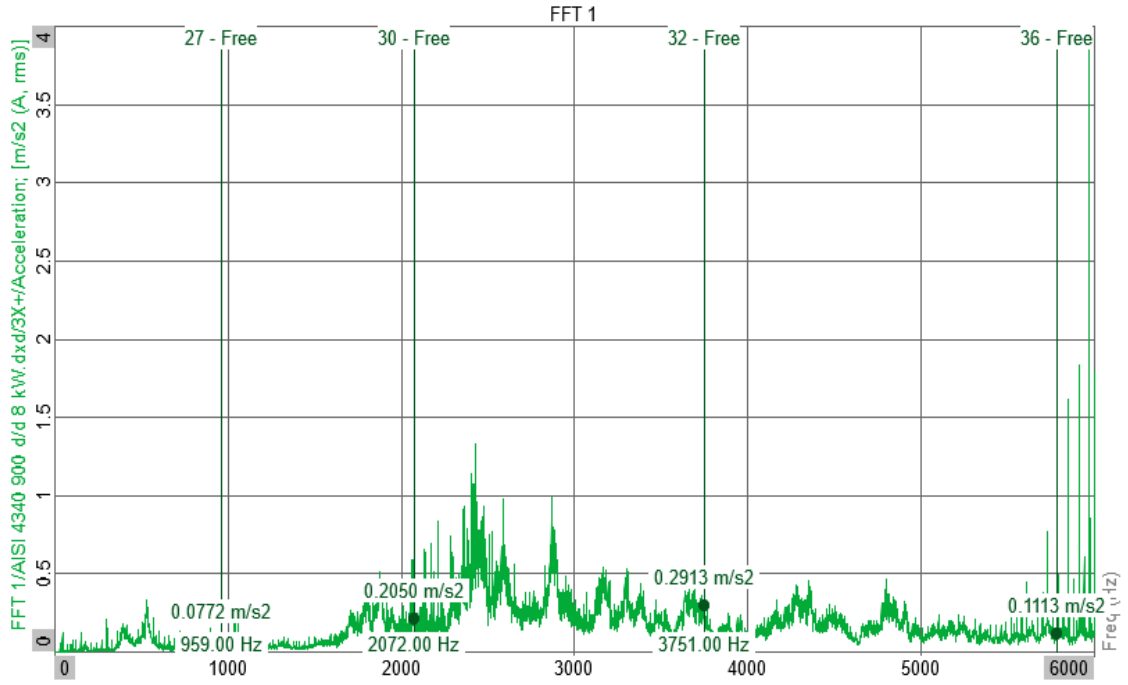
Şekil 5.35. 3X ivmeölçer AISI 4340 600 d/d 2 kW.



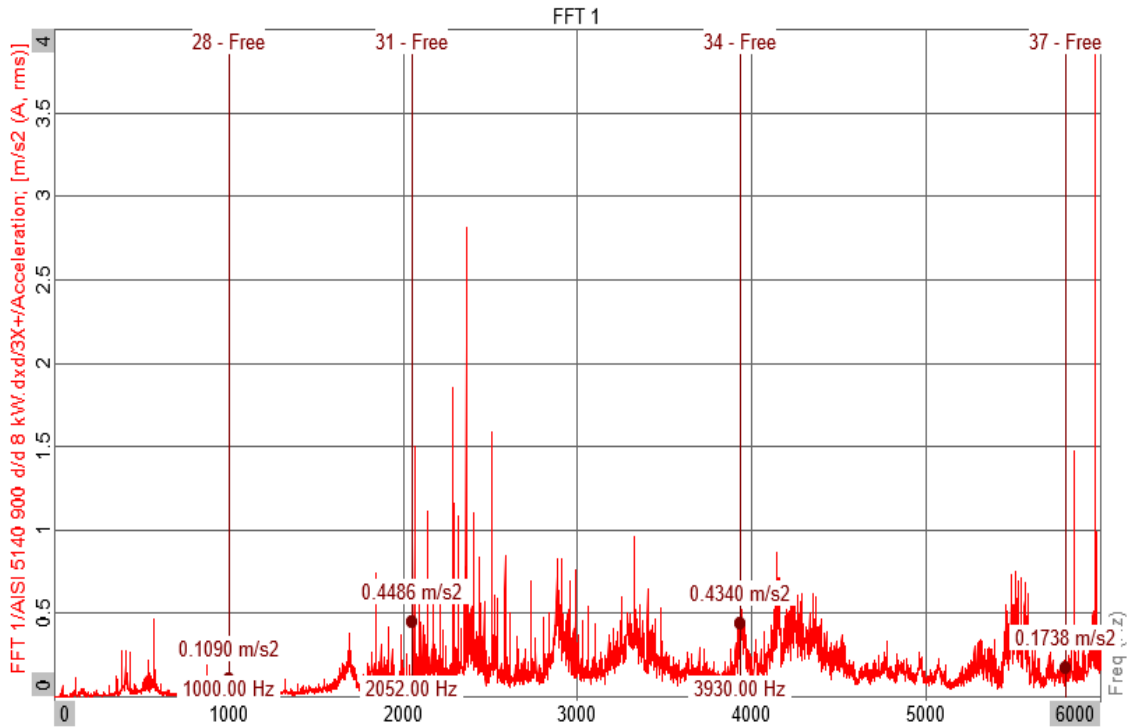
Şekil 5.36. 3X ivmeölçer AISI 5140 600 d/d 2 kW.



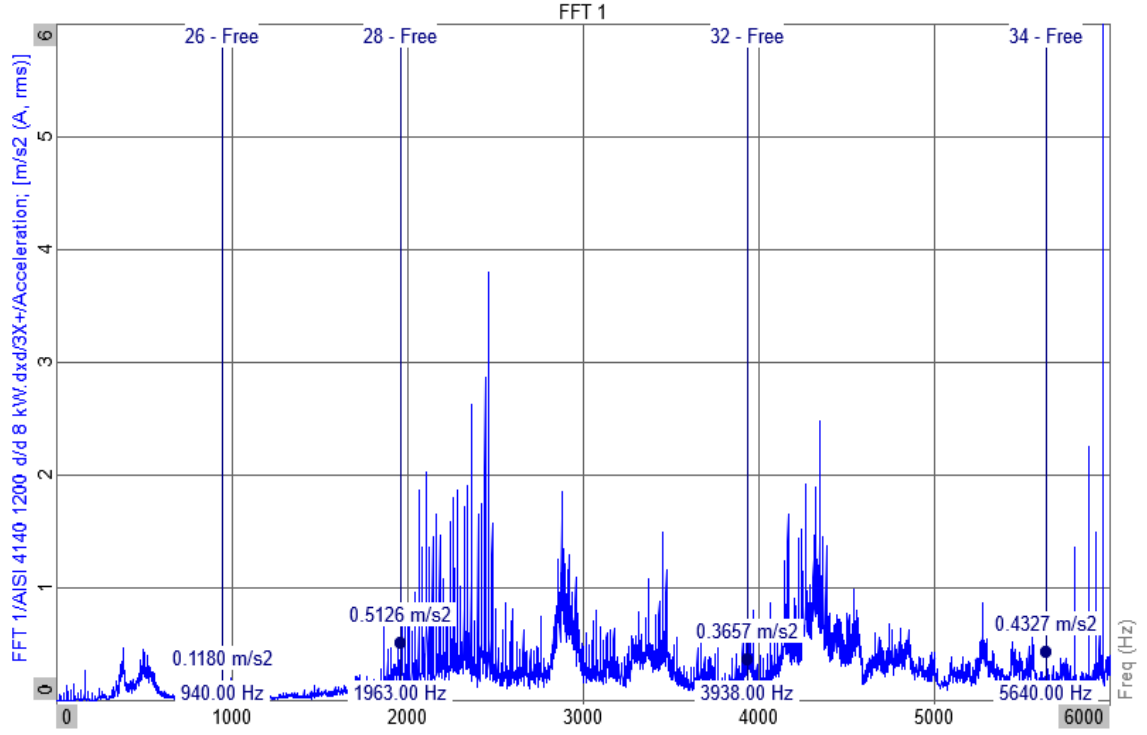
Şekil 5.37. 3X ivmeölçer AISI 4140 900 d/d 8 kW.



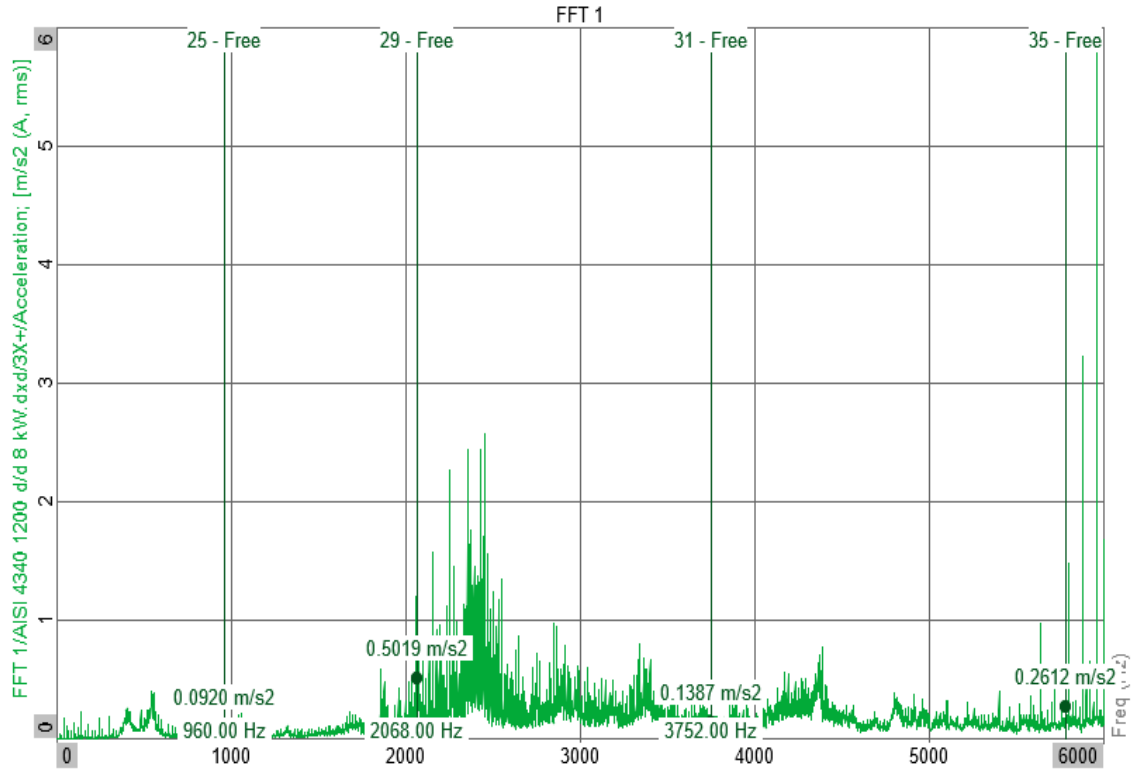
Şekil 5.38. 3X ivmeölçer AISI 4340 900 d/d 8 kW.



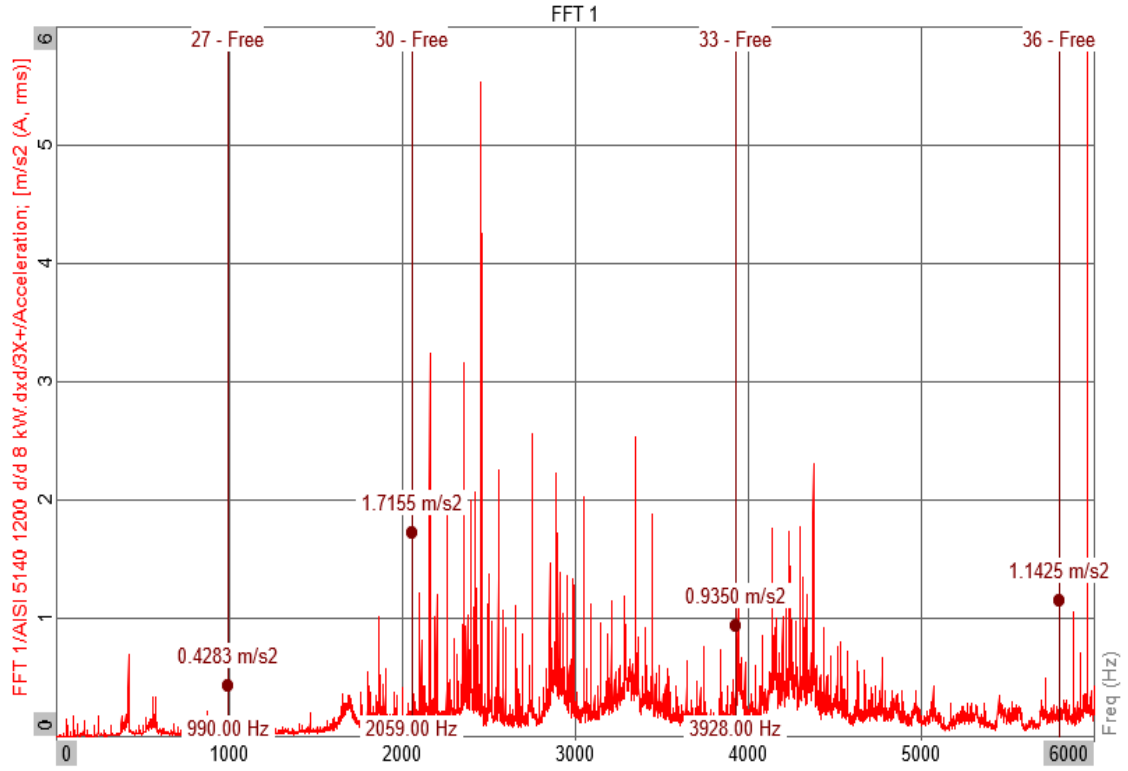
Şekil 5.39. 3X ivmeölçer AISI 5140 900 d/d 8 kW.



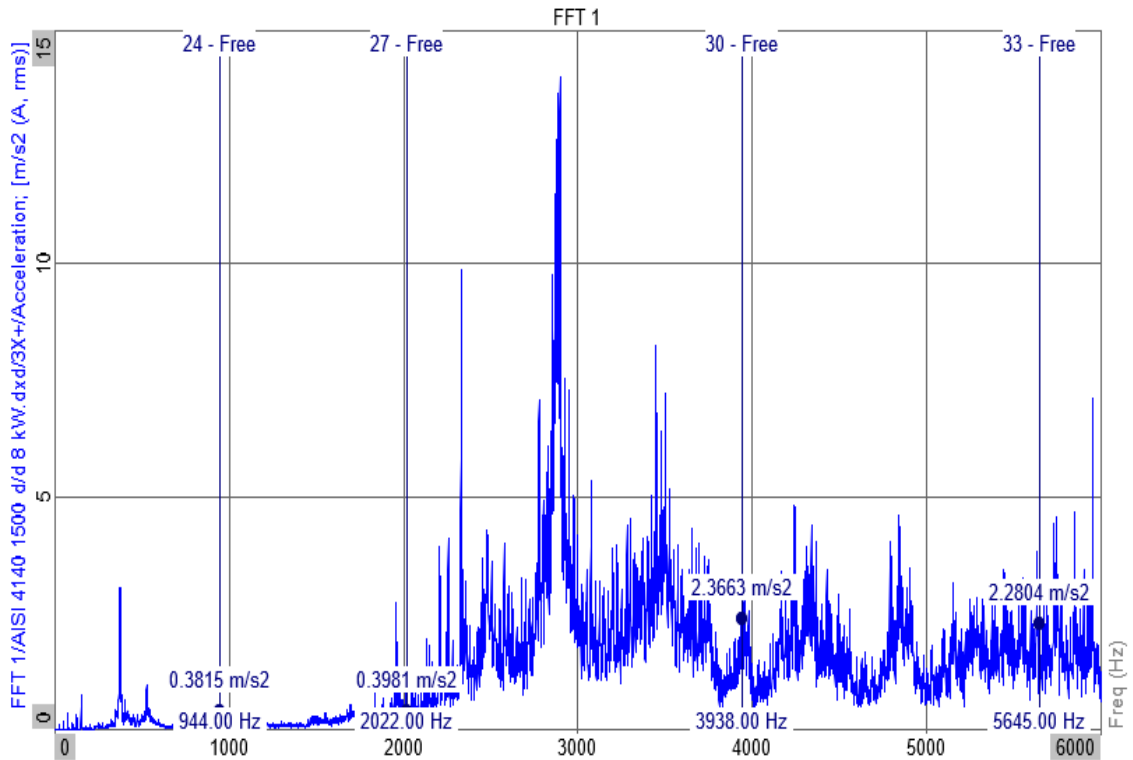
Şekil 5.40. 3X ivmeölçer AISI 4140 1200 d/d 8 kW.



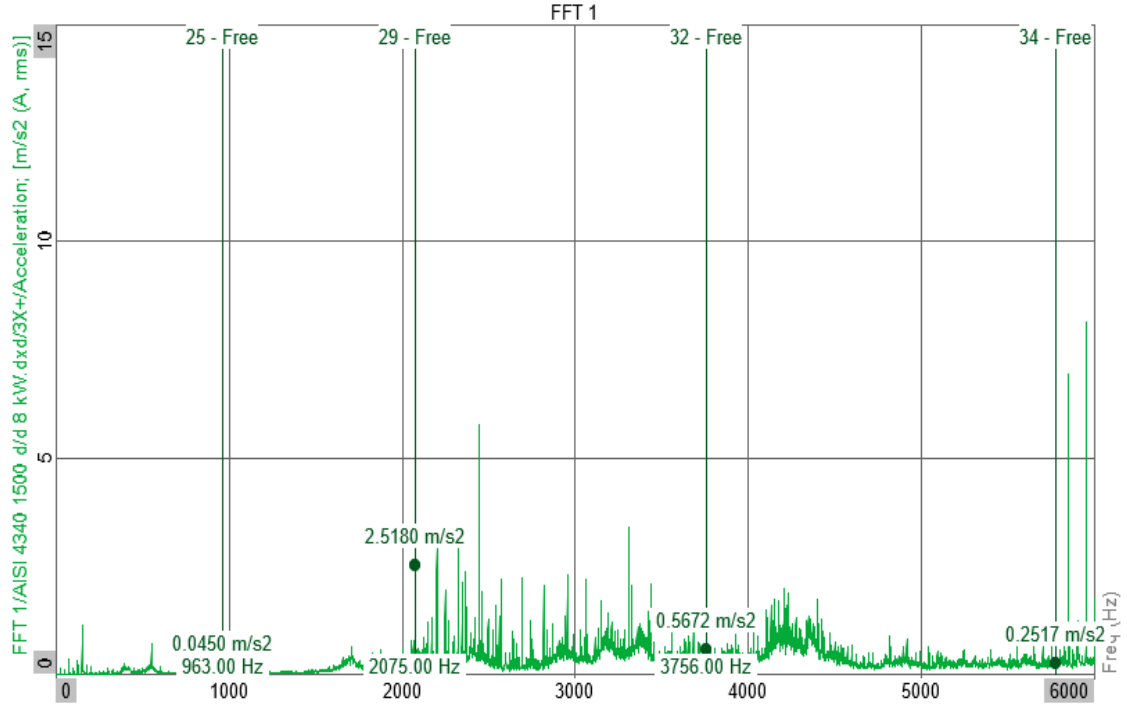
Şekil 5.41. 3X ivmeölçer AISI 4340 1200 d/d 8 kW.



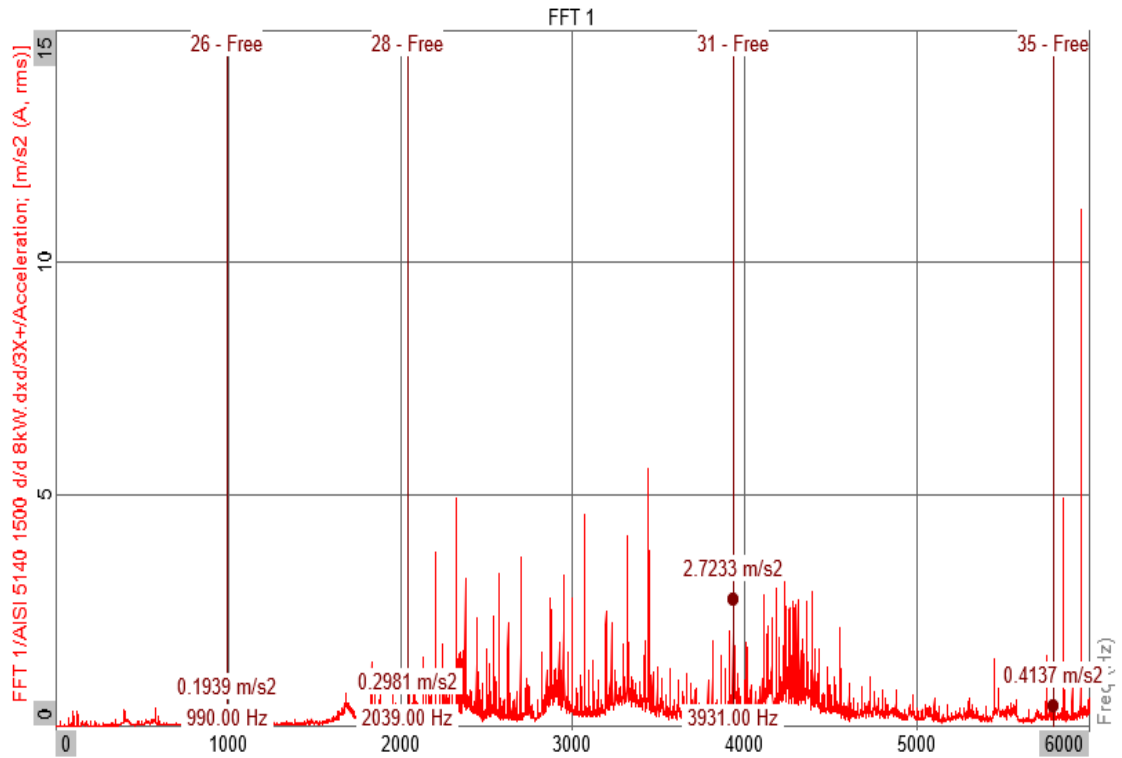
Şekil 5.42. 3X ivmeölçer AISI 5140 1200 d/d 8 kW



Şekil 5.43. 3X ivmeölçer AISI 4140 1500 d/d 8 kW



Şekil 5.44. 3X ivmeölçer AISI 4340 1500 d/d 8 Kw

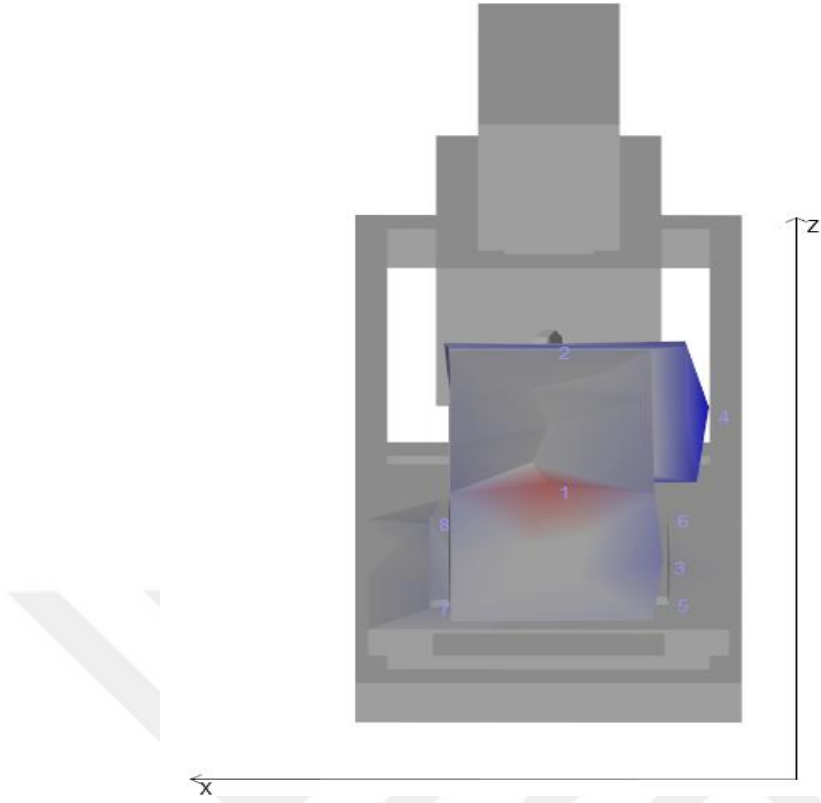


Şekil 5.45. 3X ivmeölçer AISI 5140 1500 d/d 8 kW

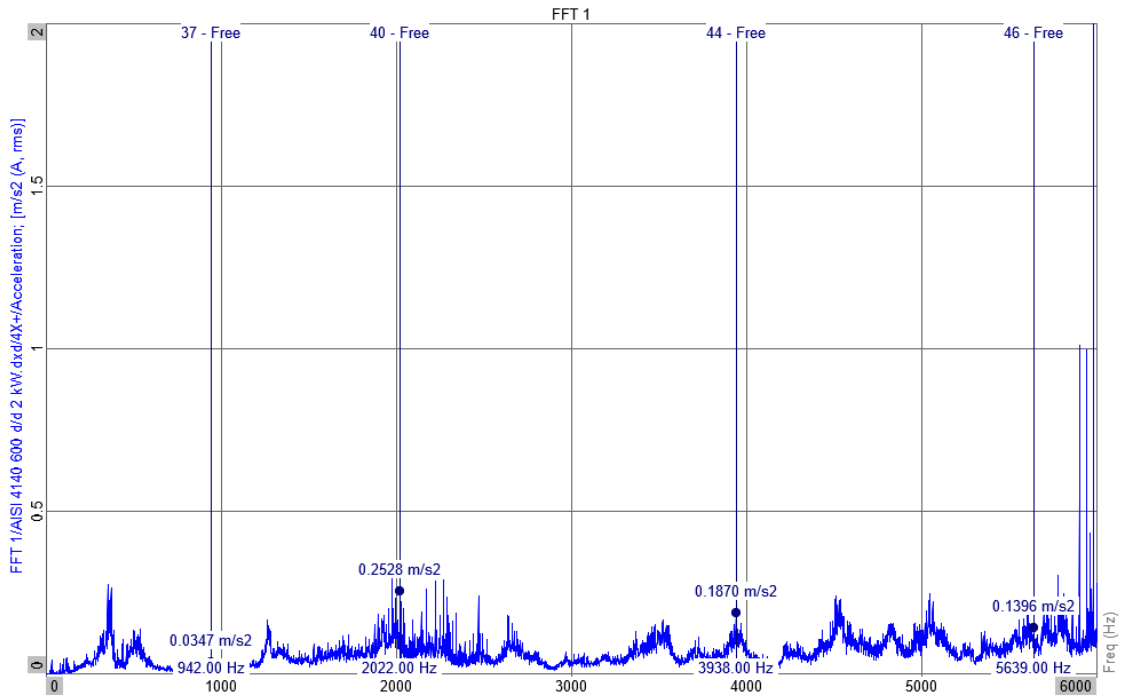
4X ivmeölçerden doğal frekans noktalarından alınan sonuçlar incelendiğinde en düşük genlik tepe değerleri, 600 d/d ve 1200 d/d hızlarında ve tüm yük şartlarında AISI 4140 malzemeden üretilen rotor mili kullanılan DMSM’de, 900 d/d hız ve tüm yük şartlarında AISI 5140 malzemeden üretilen rotor mili kullanılan DMSM’de ve 1500 d/d hız ve tüm yük şartlarında AISI 4340 malzemeden üretilen rotor mili kullanılan DMSM’de elde edilmiştir. 4X ivmeölçerden alınan tüm genlik tepe değerleri içerisinde en düşük genlik tepe değerleri 600 d/d hız ve 2 kW yük altında 0.0098 m/s^2 , 900 d/d hızda 0 kW ve 8kW yük altında 0.0188 m/s^2 , 1200 d/d hız ve 8 kW yük altında 0.0209 m/s^2 AISI 5140 malzemeden üretilen rotor mili kullanılan DMSM’de ve 1500 d/d hız ve 8 kW yük altında 0.0184 m/s^2 AISI 4340 malzemeden üretilen rotor mili kullanılan DMSM’de olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.46’da görüldüğü üzere 4X ivmeölçerden elde edilen tüm genlik tepe değerleri içerisinde en düşük genlik tepe değeri, 1500 d/d hız ve 4 kW yük altında 0.0167 m/s^2 AISI 4340 rotor milinde tespit edilmiştir. 4X ivmeölçerden alınan sonuçlar Çizelge 5.’te sunulmuştur. Şekil 5.47, Şekil 5.48, Şekil 5.49, Şekil 5.50, Şekil 5.51, Şekil 5.52, Şekil 5.53, Şekil 5.54, Şekil 5.55, Şekil 5.56, Şekil 5.57ve Şekil 5.58’de 2Y ivmeölçerden alınan en düşük RMS değerleri sunulmuştur. 1500 d/d hız ve 4 kW yük altında elde edilen sapma görüntüsü Şekil 5.46’da görülmektedir.

Çizelge 5.6. 4X ivmeölçer en düşük genlik tepe değerleri.

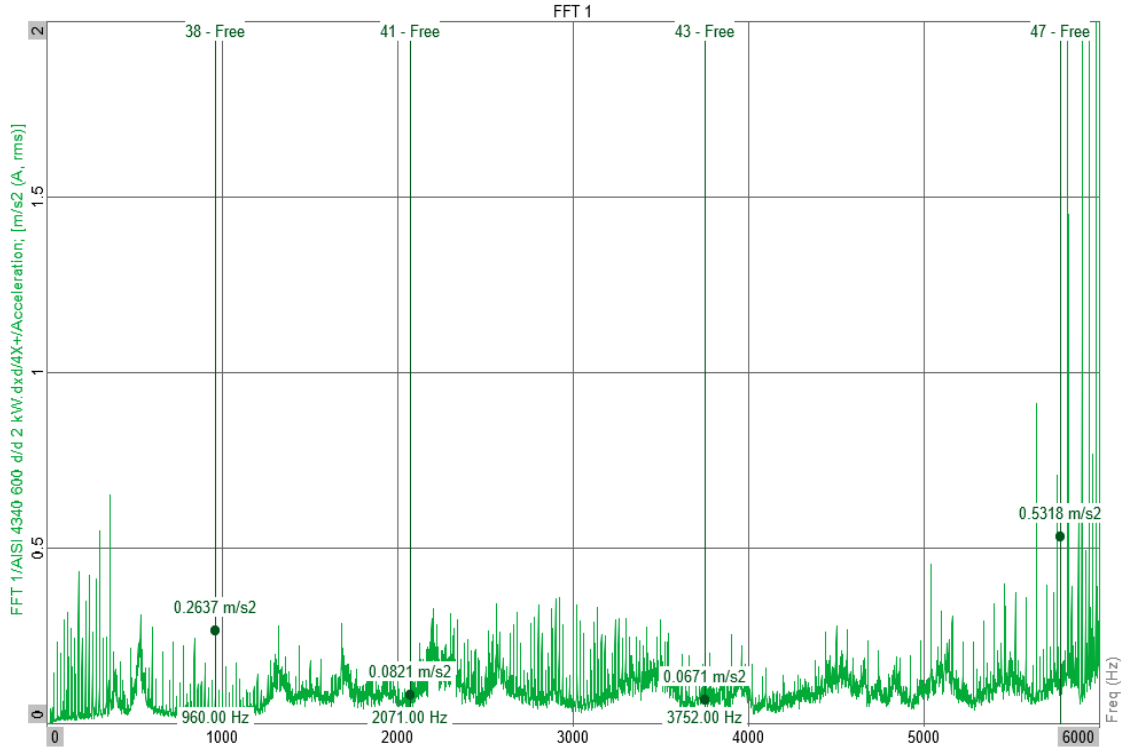
Hız (d/d)		Yük (kW)				
		0	2	4	6	8
		Genlik (m/s^2)				
AISI 4140	600	0.0368	0.0347	0.0288	0.0286	0.0254
	900	0.0368	0.0246	0.0375	0.0340	0.0449
	1200	0.0353	0.0486	0.0368	0.0410	0.0663
	1500	0.1074	0.1070	0.0743	0.0748	0.2248
AISI 4340	600	0.0730	0.0671	0.0819	0.0773	0.0784
	900	0.1755	0.0859	0.1311	0.1024	0.2225
	1200	0.1761	0.1196	0.1833	0.1290	0.1111
	1500	0.0377	0.0305	0.0167	0.0529	0.0284
AISI 5140	600	0.0445	0.0517	0.0487	0.0456	0.0388
	900	0.0317	0.0180	0.0245	0.0185	0.0255
	1200	0.0957	0.1406	0.1010	0.0876	0.0897
	1500	0.0443	0.0546	0.0590	0.0632	0.0573



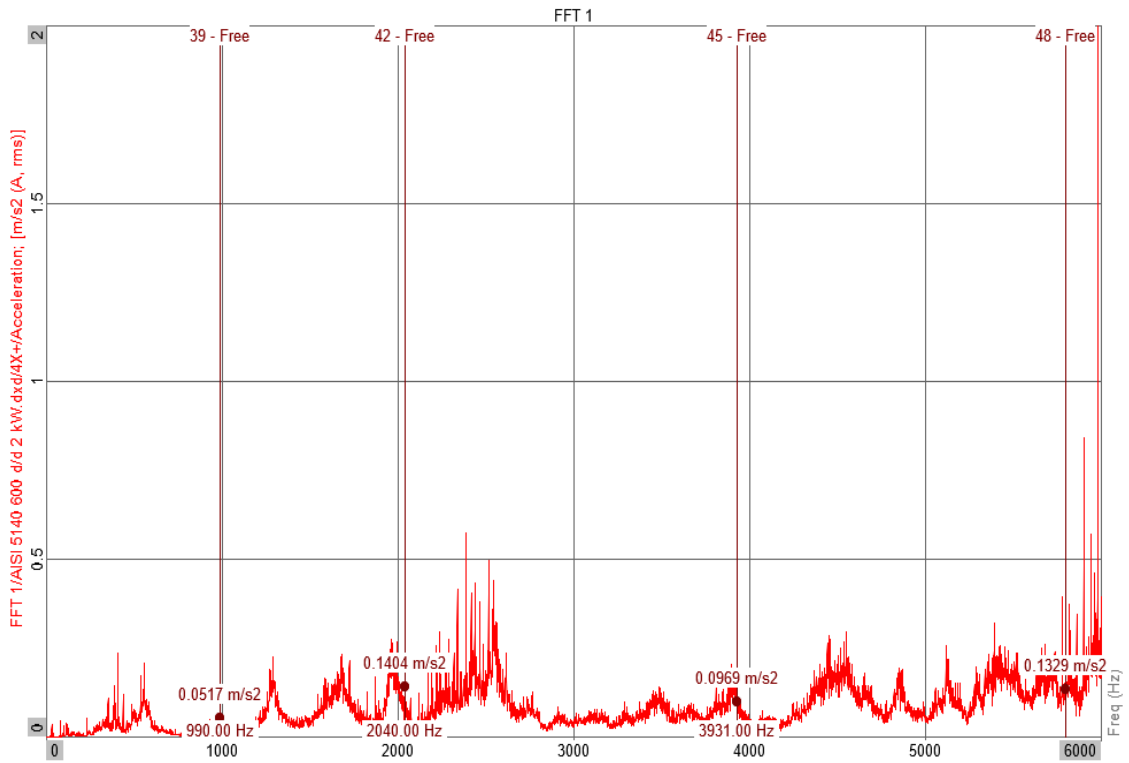
Şekil 5.46. 4X ivmeölçer AISI 4340 1500 d/d 4 kW için sapma görüntüsü



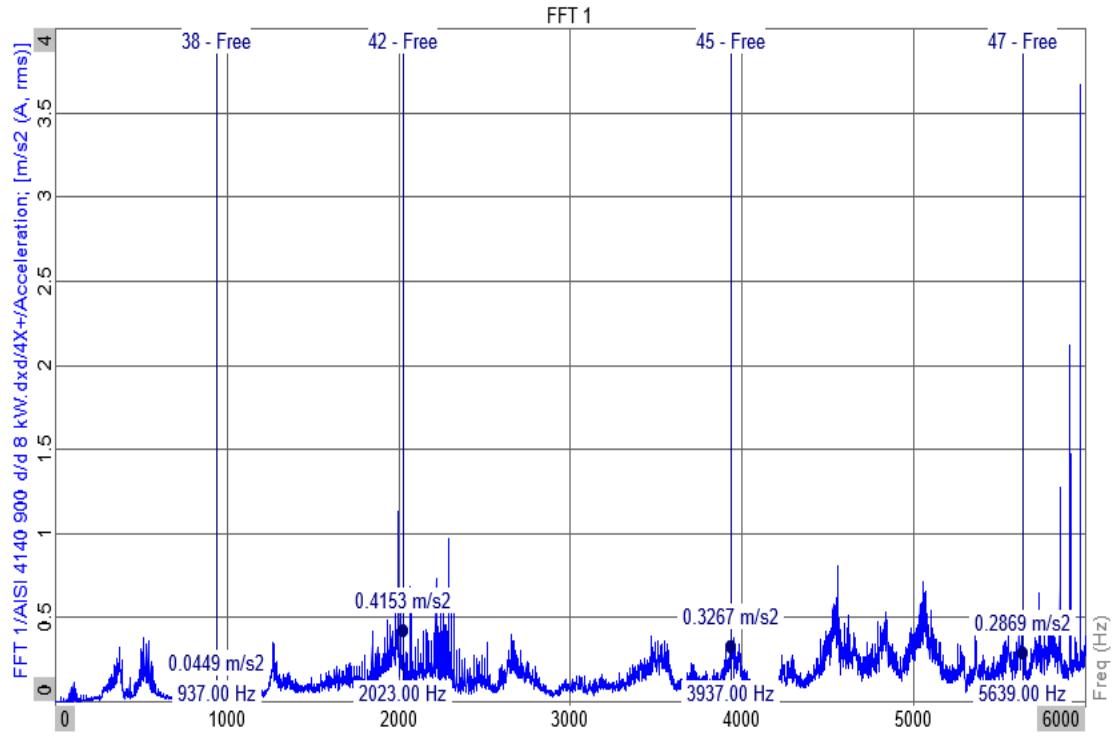
Şekil 5.47. 4X ivmeölçer AISI 4140 600 d/d 2 kW.



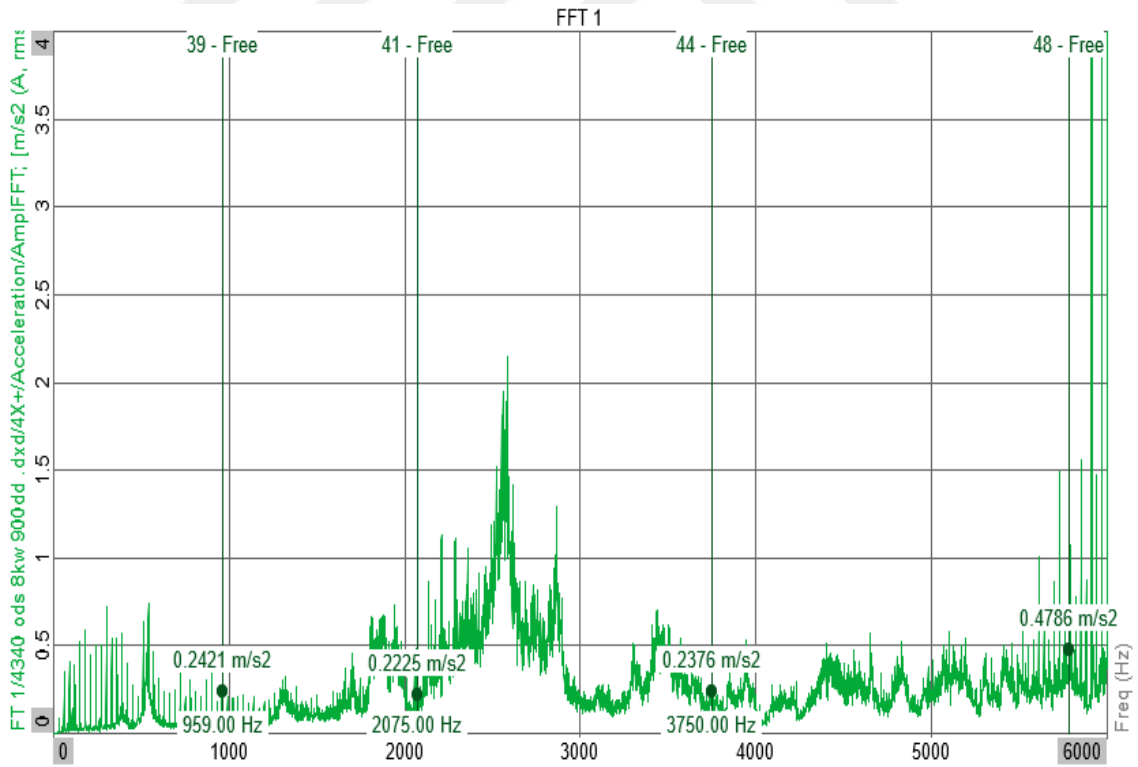
Şekil 5.48. 4X ivmeölçer AISI 4340 600 d/d 2 kW.



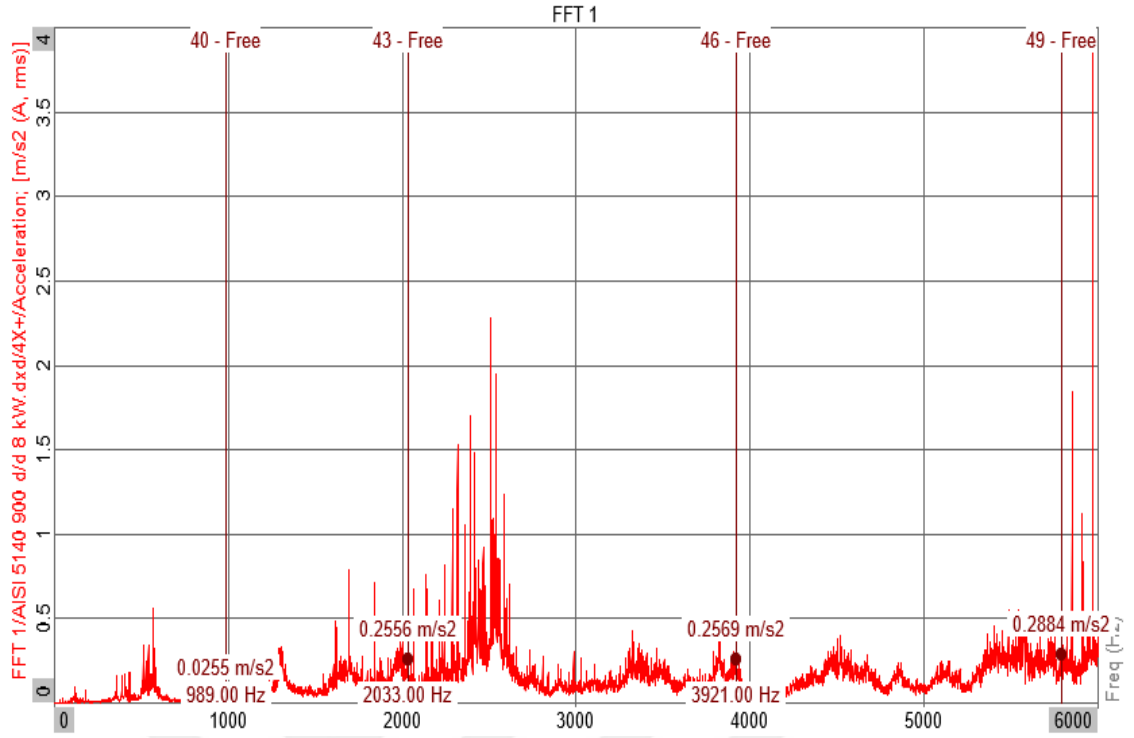
Şekil 5.49. 4X ivmeölçer AISI 5140 600 d/d 2 kW.



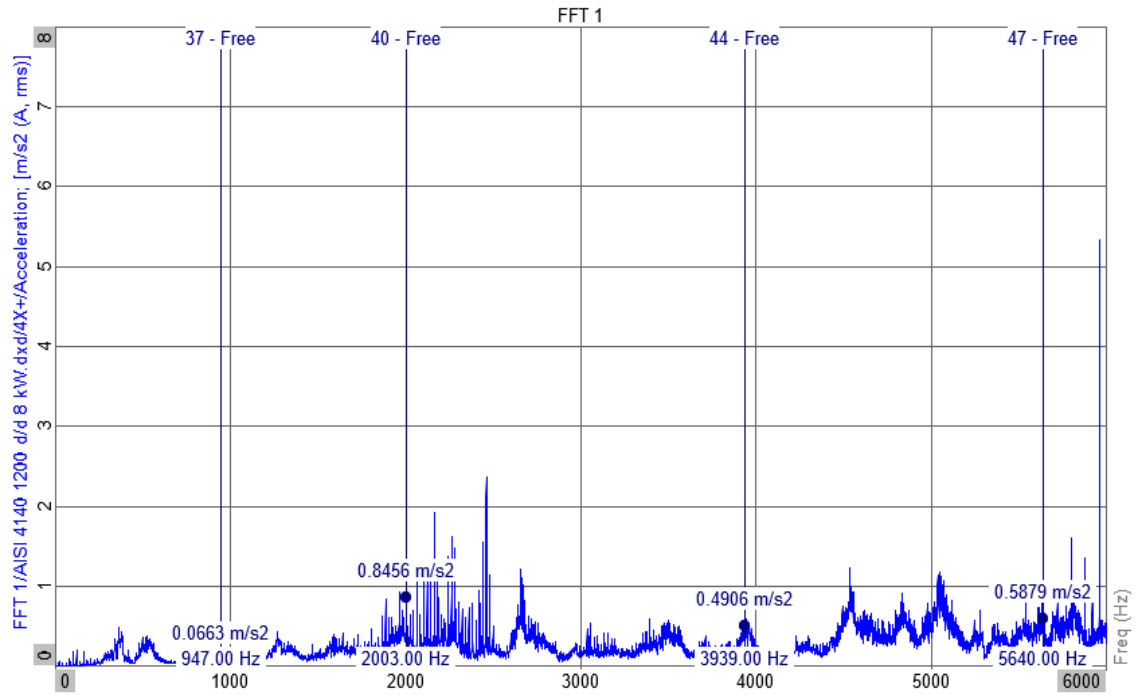
Şekil 5.50. 4X ivmeölçer AISI 4140 900 d/d 8 kW.



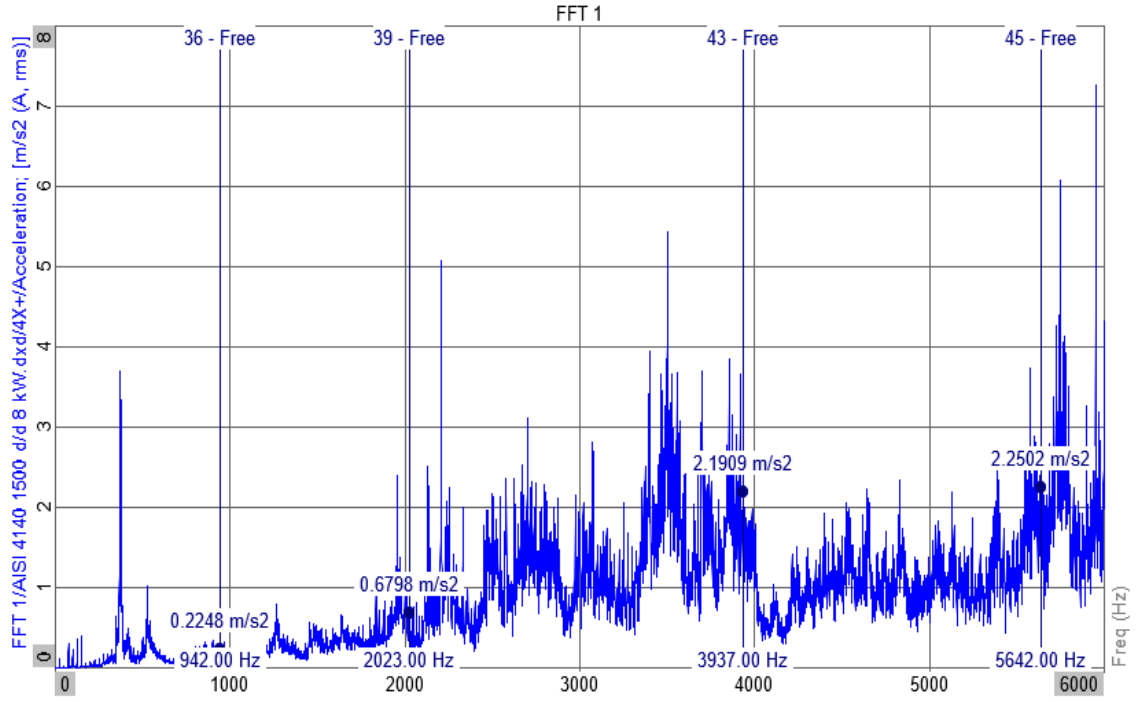
Şekil 5.51. 4X ivmeölçer AISI 4340 900 d/d 8 kW.



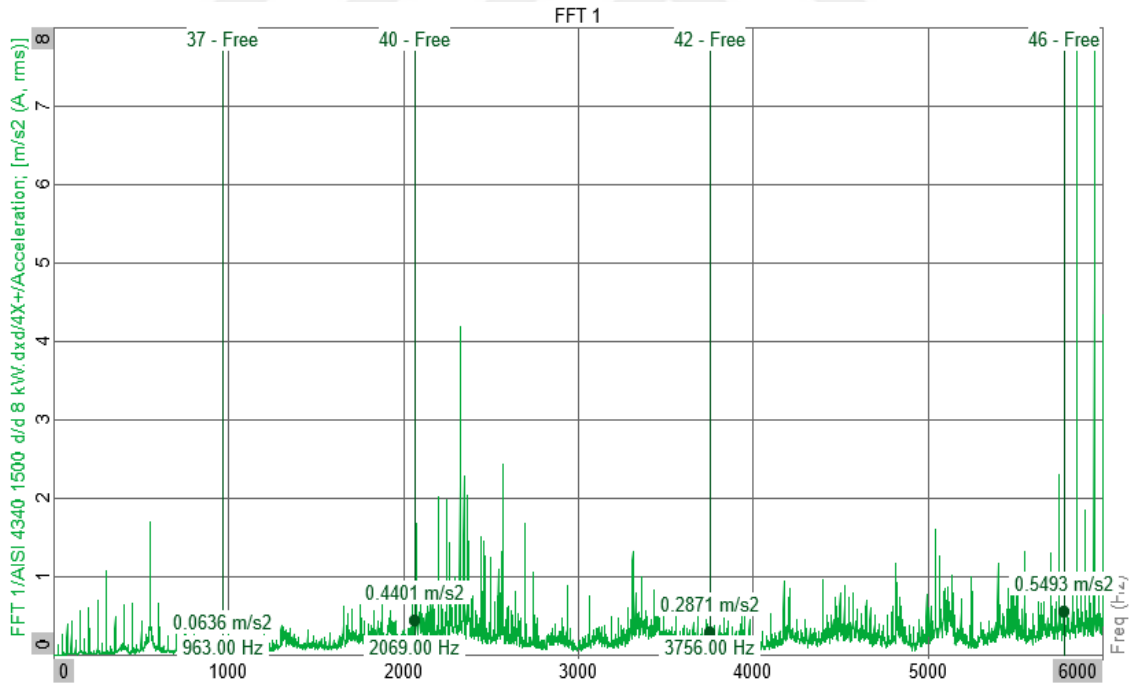
Şekil 5.52. 4X ivmeölçer AISI 5140 900 d/d 8 kW.



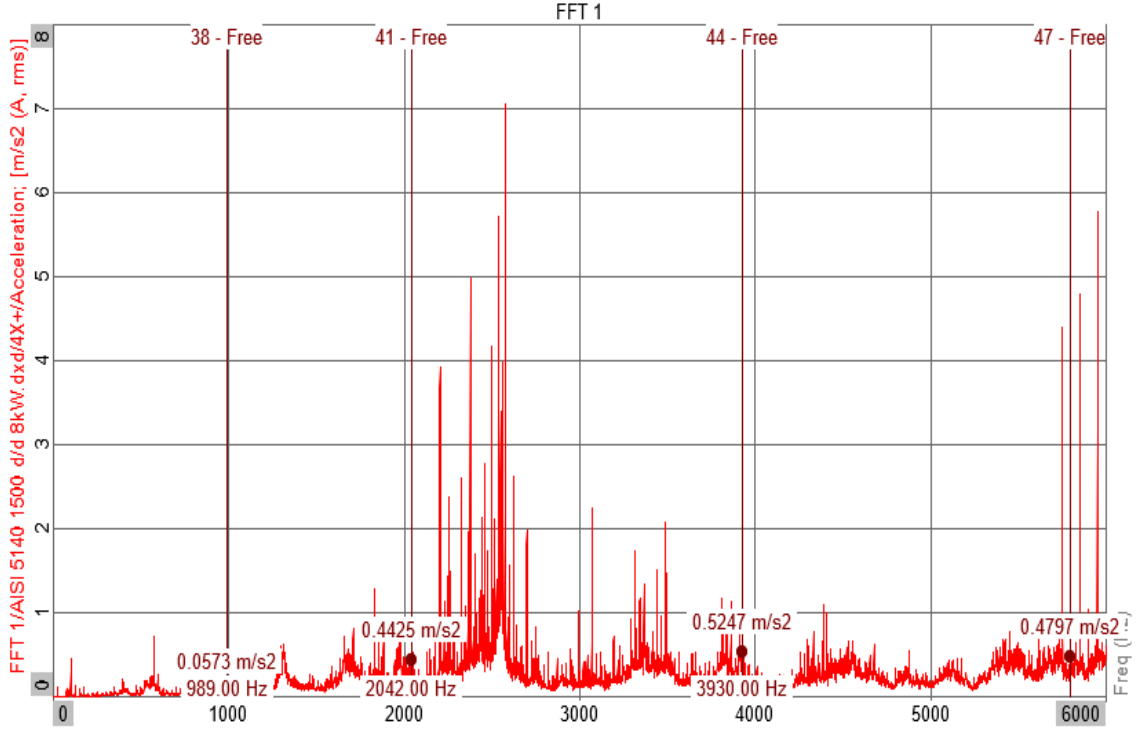
Şekil 5.53. 4X ivmeölçer AISI 4140 1200 d/d 8 kW.



Şekil 5.56. 4X ivmeölçer AISI 4140 1500 d/d 8 kW.



Şekil 5.57. 4X ivmeölçer AISI 4340 1500 d/d 8 kW.



Şekil 5.58. 4X ivmeölçer AISI 4340 1500 d/d 8 kW.

ODS'ler bir dizi zaman alanı tepkilerinden hesaplanan bir dizi frekans alanı fonksiyonundan elde edildi. Bir rezonans tepe noktasında veya yakınında, ODS bir mod tarafından domine edilir. Bu nedenle, ODS yaklaşık olarak mod şekline eşittir [103]. Doğal frekans noktalarından elde edilen tepe değerlerinden alınan sonuçlarda, Şekil 5.8-Şekil 5.58 incelendiğinde AISI 4340 rotor mili kullanılan DMSM'de AISI 4140 ve AISI 5140 rotor milleri kullanılan DMSM'ye göre daha düşük genlik tepe değerleri elde edildiği görülmektedir. ODS analizinden elde edilen sonuçlar modal analizden elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

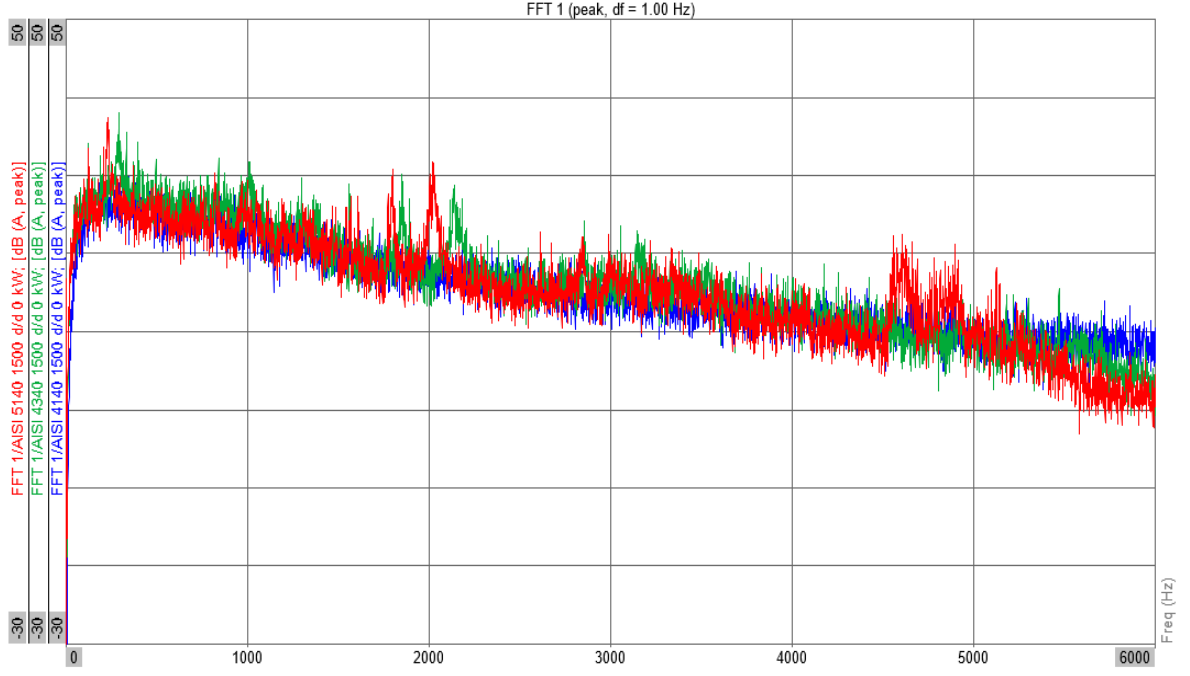
5.3. GÜRÜLTÜ EMİSYONU ANALİZİ

DMSM'de rotor mili malzeme karakteristiğinin gürültü seviyesine etkisini incelemek için gürültü analizi yapılmıştır. En yüksek gürültü seviyeleri düşük frekanslarda ortaya çıkmıştır. En yüksek tepe değerleri sırasıyla 0 kW yükte AISI 4140'te 29.8 dB, 2 kW yükte AISI 5140'ta 36.7 dB, 4 kW yükte AISI 4340'ta 35.9 dB, 6 kW yükte AISI 4140'ta 38.7 dB ve 8 kW yükte AISI 5140'ta 37.5 dB olarak ölçülmüştür. Çizelge 5.'de de görüldüğü üzere en belirgin rezonans frekans değerlerinde en düşük gürültü tepe

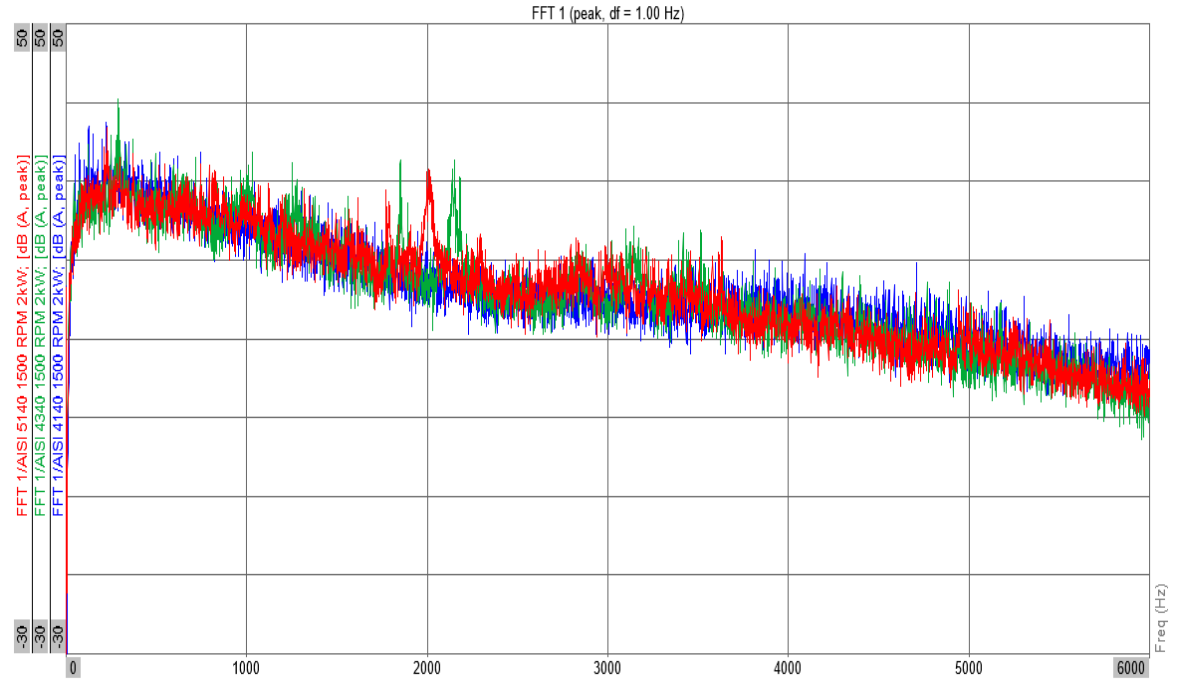
değerleri, 996 Hz’de AISI 4140’da, 2077 Hz’de 8kW yük durumu dışında AISI 4140’da, 3746 Hz’de AISI 4340’da, 5785 Hz’de 2 kW ve 4 kW yük durumu dışında AISI 4340 rotor mili kullanılan DMSM’de olduğu görülmüştür [91]. Gürültü değerlerinin rezonans frekanslarında önemli miktarda arttığı görülmektedir [104]. Şekil 5.59, Şekil 5.59, Şekil 5.60, Şekil 5.61, Şekil 5.62 ve Şekil 5.63 incelendiğinde tüm yük şartları için yüksek frekanslara gidildiğinde gürültü seviyesinin azaldığı görülmektedir [105] AISI 4340 rotor milinin AISI 4140 ve AISI 5140’a göre daha kararlı olarak azalmıştır.

Çizelge 5.7. Mod frekanslarına göre gürültü tepe değerleri.

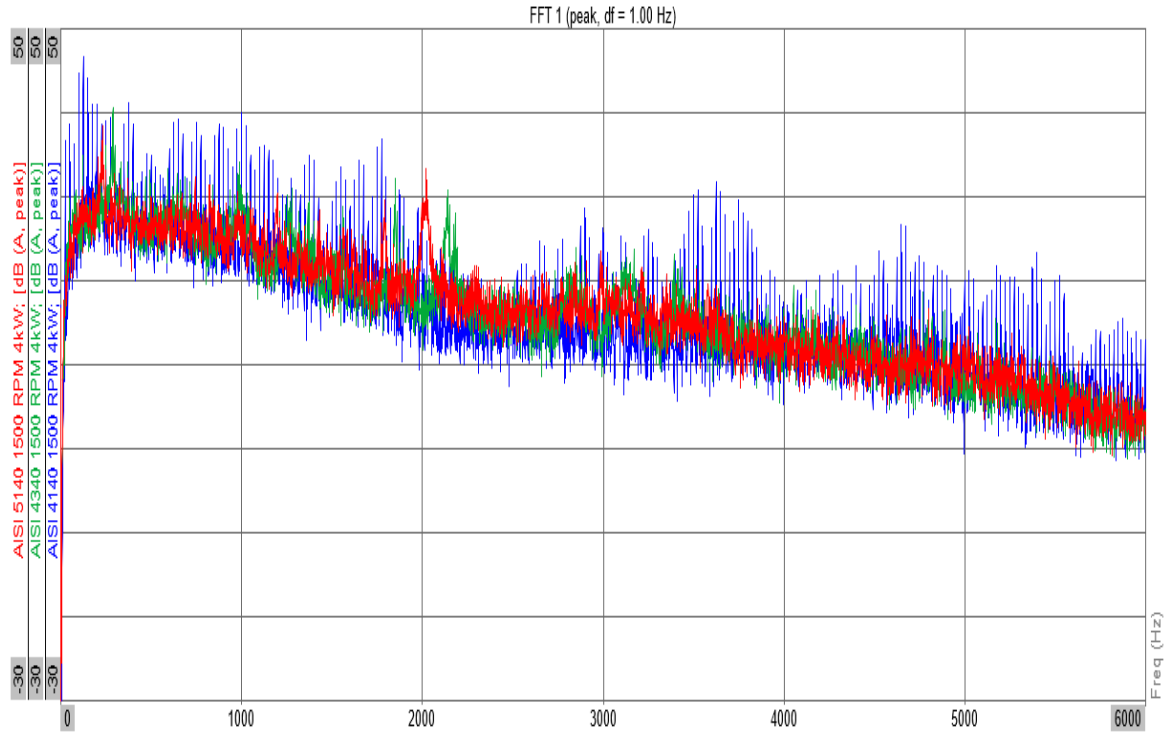
		Yük (kW)				
		0	2	4	6	8
		Gürültü (dB)				
	Frekans (Hz)					
AISI 4140	996	22.8	23.9	23.5	25.4	23.5
	2077	16.3	15	14.5	17.1	19
	3869	14.1	16.4	13.1	11.8	15.5
	5604	9	6	7	12.6	8.6
AISI 4340	960	28.6	27.1	27.7	27.2	27.6
	2072	18.9	17.2	19.1	20.5	19.1
	3746	12.5	11.4	11.6	13.7	13.8
	5785	4.9	2.4	2.7	2.8	3.1
AISI 5140	1002	28.5	27	27.8	26.3	26.8
	2085	19.2	18	18.4	19.2	18.5
	3888	11.3	13	11.9	14.3	10.7
	5838	3.9	2.2	5.3	3.9	3.1



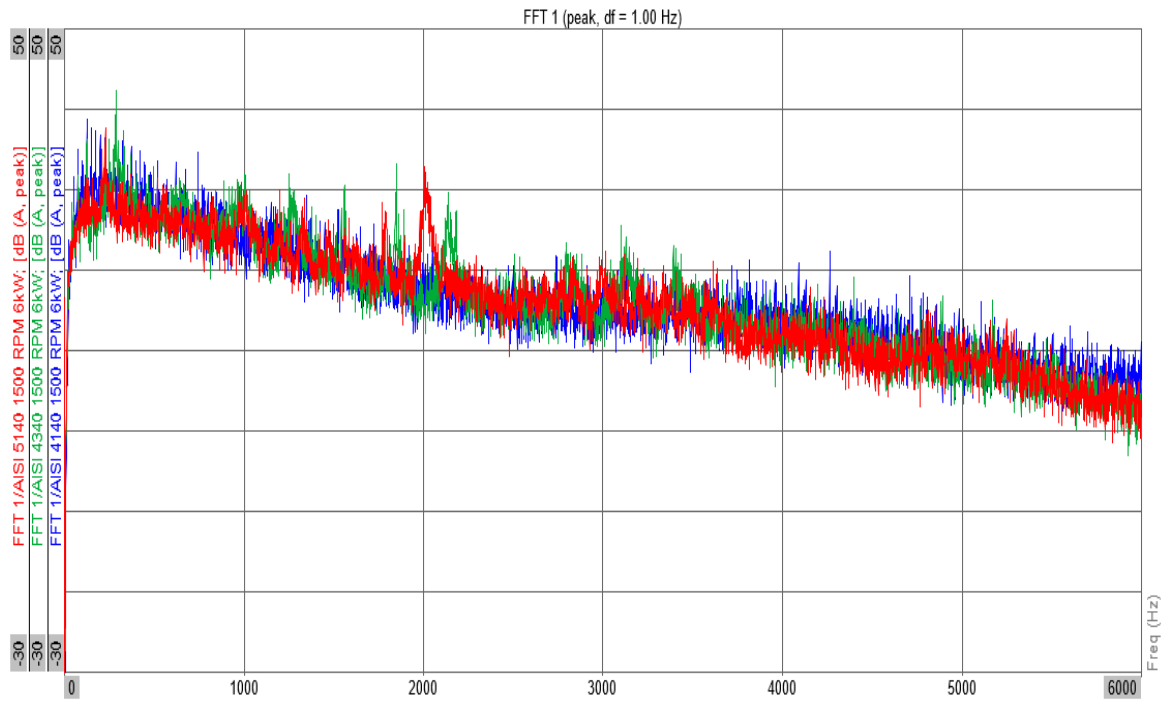
Şekil 5.59. 0 kW yükte gürültü tepe değerleri.



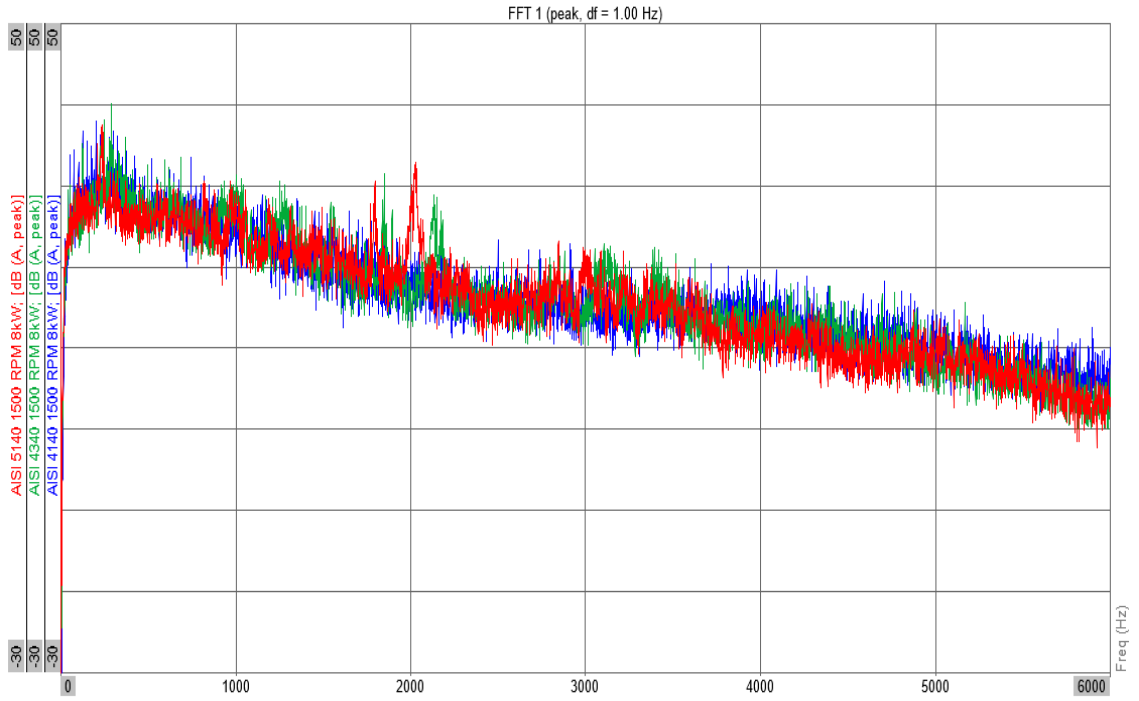
Şekil 5.60. 2 kW yükte gürültü tepe değerleri.



Şekil 5.61. 4 kW yükte gürültü tepe değerleri



Şekil 5.62. 6 kW yükte gürültü tepe değerleri



Şekil 5.63. 8 kW yükte gürültü tepe değerleri

Doğal frekans noktalarından elde edilen tepe değerleri incelendiğinde her üç rotor mili malzemesinde de gürültü seviyelerinin arttığı görülmüştür [104]. Yüksek frekanslara gidildikçe gürültü seviyesi azalmaktadır [106]. Kararlı çalışma bakımından incelendiğinde yük artışının DMSM'nin kararlı çalışmasını olumsuz etkilediği görülmüştür [107]. Yük artışından AISI 4340 rotor milinin AISI 4140 ve AISI 5140 rotor millerine göre daha az etkilendiği ve daha kararlı çalıştığı görülmüştür.

6. SONUÇLAR

Tez çalışması üç aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada, deneylerde kullanılan rotor milleri üzerinde modal analiz yapılarak modal parametreler elde edilmiştir. İkinci aşamada, deney motoru üzerinde farklı hız ve yük şartlarında ODS analizi yapılmıştır. Üçüncü aşamada deney motoru, yük motoru ve diğer ekipmanlardan izole edilerek gürültü analizi yapılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Rotor milinin doğal frekansları, mod şekilleri ve sönümlleme miktarı gibi modal parametreler olarak adlandırılan dinamik özellikler, elektrikli araçlarda kullanılan DMSM'nin performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olan titreşim davranışını anlamak için çok değerlidir. Her biri sırasıyla AISI 4140, AISI 4340 ve AISI 5140 olmak üzere farklı malzemelere sahip üç adet rotor mili imalatı yapılmış ve deneylerde test edilmiştir. Genel sonuçlar, AISI 4340 rotor milinin AISI 4140 ve AISI 5140 rotor millerinden daha yüksek sönümlleme oranına sahip olduğunu göstermiştir. Böylece, AISI 4340 rotor milinin iç sönümlmesi doğal frekanslardaki genliği önemli ölçüde azaltabilir ve motor tahriki doğal frekanslardan geçerken önemli bir rol oynayabileceğini göstermiştir.

-ODS analizi sonucunda geometri incelendiğinde 1Y,2Y,3X ve 4X noktalarında anormal sapmalar tespit edilmiştir. Bu nedenle sonuçlar 1Y,2Y,3X ve 4X ivme ölçerlerden alınan değerlerin incelenmesine karar verilmiştir. ODS analizi ile çalışan DMSM üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar rotor mili modal analiz sönümlleme oranları ile uyumludur. ODS analizi ile elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır. Farklı hız ve yük koşullarında DMSM çalıştırılmış ve AISI 4140, AISI 4340 ve AISI 5140 rotor milleri kullanılarak deneyler aynı koşullarda tekrarlanmıştır. Sadece rotor mili malzeme değiştirilmesi ile motor kararlı çalışmasına etki ettiği ve kullanılan rotor mili malzemeleri arasında en kararlı durumda çalışan motorun AISI 4340 mil malzemesi kullanılan DMSM olduğu tespit edilmiştir.

-Gürültü analizi sonuçlarında, en yüksek gürültü seviyeleri düşük frekanslarda ortaya çıkmış ve yük miktarı arttıkça artış göstermiştir. AISI 4340 rotor milinin AISI 4140 ve AISI 5140 rotor millerine göre özellikle yüksek frekanslarda daha kararlı yapıda azalmıştır. En belirgin rezonans frekanslarında gürültü seviyeleri de önemli miktarda

artmıştır. Genel sonuçlar, modal analiz ve ODS analizinden elde edilen sonuçlar ile gürültü analizi sonuçlarının uyumlu olduğunu göstermiştir. Motor gürültüsünü etkileyen birçok faktör olmasının yanında malzeme seçiminin motor gürültüsünün azaltılmasında önemli rol oynayabileceğini göstermiştir.



7. KAYNAKLAR

- [1] F. Kelen, “Motorlu taşıt emisyonlarının insan sağlığı ve çevre üzerine etkileri”, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 19, sayı 1-2, ss. 80-87, 2014.
- [2] T. K. Hua, V. Azarov, ve V. Kutenev, “Modern Invisible Hazard of Urban Air Environment Pollution When Operating Vehicles That Causes Large Economic Damage”, *Authorea Preprints*, c. 5, sayı 2, ss. 76-81, 2022,
- [3] A. Kerem, “Elektrikli Araçlarda Teknolojisinin Gelişimi ve Gelecek Beklentileri”, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 5, sayı 1, ss. 1 – 13, 2014.
- [4] C. C. Chan, “The rise & Fall of electric vehicles in 1828-1930: Lessons learned”, *Proceedings of the IEEE*, c. 101, sayı 1, ss. 206-212, 2013,
- [5] S. Kocabey, “Elektrikli otomobillerin dünü, bugünü ve geleceği”, *Journal of Intelligent Transportation Systems and Applications*, c. 1, sayı 1, ss. 16-23, 2018,
- [6] M. Tören & H. Mollahasanoğlu, “Investigation of Electric motors in electric and hybrid vehicles and estimation of changes in co2 emissions: a sample of Türkiye”, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, c. 9, sy 3, ss. 1082-1097, 2022.
- [7] S. Akkaya & H. Özbay, “Otonom araçların akıllı ulaşım politikaları üzerindeki etkileri”, *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, c. 5, sayı 2, ss. 200-210, 2022,
- [8] I.I. Gündüz, “Technological capabilities analysis within the scope of electrical vehicle and energy storage technologies: the case of Türkiye”, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2024.
- [9] Ş. Ertekin, & M. Dam, “Türkiye’de çevre vergilerinin çevresel etkileri üzerine bir değerlendirme”, *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi*, c. 15, ss. 66-87, 2020.

- [10] A. Ustabaş, “Mikro ve makro etkileri yönünden elektrikli otomobiller (Türkiye ekonomisi örneği)”, *Marmara University Journal of Economic and Administrative Sciences*, c. 36, sayı 1, ss. 269 - 291, 2014.
- [11] K. Reddy, K. Niklas, & J. Sjöberg, “E-Mobility complete vehicles: a layout and modularization approach”. *Department of Industrial and Materials Science Chalmers University Of Technology Gothenburg, İsveç*, 2019.
- [12] T. Zhao, S. Wu, & S. Cui, “Multiphase PMSM with asymmetric windings for more electric aircraft”, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, c. 6, sy 4, ss. 1592-1602, 2020.
- [13] N. Arish, M. J. Kamper, & R. J. Wang, “Advancements in electrical marine propulsion technologies: A comprehensive overview”, *SAIEE Africa Research Journal*, c. 116, sy 1, ss. 14-29, Mar. 2025.
- [14] X. Zhang, C. L. Bowman, T. C. O’Connell, & K. S. Haran, “Large electric machines for aircraft electric propulsion”, *IET Electr Power Appl*, c. 12, sy 6, ss. 767-779, Tem. 2018.
- [15] H. El Hadraoui, M. Zegrari, A. Chebak, O. Laayati, & N. Guennouni, “A Multi-Criteria Analysis and Trends of Electric Motors for Electric Vehicles”, *World Electric Vehicle Journal 2022*, c. 13, sayı 4, ss. 65, 2022.
- [16] C. Zhou, X. Huang, Z. Li, & W. Cao, “Design Consideration of Fractional Slot Concentrated Winding Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for EV and HEV Applications”, *IEEE Access*, c. 9, ss. 64116-64126, 2021.
- [17] T. Orłowska-Kowalska, M. Wolkiewicz, P. Pietrzak, M. Skowron, P. Ewert, G. Tarchala & C. T. Kowalski, “Fault diagnosis and fault-tolerant control of PMSM drives–state of the art and future challenges”, *Ieee Access*, c. 10, ss. 59979-60024, 2022.
- [18] H. Ghanayem, M. Alathamneh, & R. M. Nelms, “Performance of a vector controlled PMSM drive based on proportional–resonance control under single-phase open circuit fault”, *Energy Reports*, c. 9, ss. 755-763, 2023.
- [19] A. Bıçak & A. Gelen, “Sensorless direct torque control based on seven-level torque hysteresis controller for five-phase IPMSM using a sliding-mode observer”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, c. 24, sayı 5, ss. 1134-1143, 2021.

- [20] T. Balachandran, J. Reband, M. Lewis, & K. S. Haran, “Co-design of integrated propeller and inner rotor PMSM for electric aircraft application”, *2021 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2021*, May. 2021, doi: 10.1109/IEMDC47953.2021.9449579.
- [21] H. Gao, Z. Zhang, Y. Liu, W. Huang, & H. Xue, “Development and analysis of dual three-phase pmsm with phase-shifted hybrid winding for aircraft electric propulsion application”, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, doi: 10.1109/TTE.2023.3334026.
- [22] A. Emadi, M. Ehsani, J. M. Miller, “Vehicular Electric Power Systems : Land, Sea, Air, and Space Vehicles”, *Vehicular Electric Power Systems*, 2003, doi: 10.1201/9780203913468.
- [23] L. P. Di Noia, L. Piegari, & R. Rizzo, “Optimization methodology of PMSM cooled by external convection in aircraft propulsion”, *Energies* 2020, 13, sy 15, s. 3975, 2020.
- [24] P. Electronics, D. Eng Bogomolov, & J. A. Paulides Borisavljevic, “Concept study of 20 MW high-speed permanent magnet synchronous motor for marine propulsion”, Yüksek Lisans Tezi, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Netherlands 2013.
- [25] S. Derammelaere, M. Heamers, J.D. Viaene, F. Verbelen & K. Stockman, “A quantitative comparison between BLDC, PMSM, brushed DC and stepping motor technologies”, *2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Chiba, Japan, 2016, ss. 1-5.
- [26] M. S. Rafeeq, W. Midgley, & T. Steffen, “A Review of the State of the Art of Torque Ripple Minimization Techniques for Permanent Magnet Synchronous Motors”, *IEEE Trans Industr Inform*, c. 20, sayı 1, ss. 1019-1031, 2024.
- [27] G. Pellegrino, A. Vagati, P. Guglielmi, & B. Boazzo, “Performance comparison between surface-mounted and interior PM motor drives for electric vehicle application”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 59, sayı 2, ss. 803-811, 2012.
- [28] S. Darius Gnanaraj, E. Gundabattini, & R. Raja Singh, “Materials for lightweight electric motors- A review”, içinde *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/906/1/012020.

- [29] H. Wang & J. Leng, “Summary on development of permanent magnet synchronous motor”, *“Proceedings of the 30th Chinese Control and Decision Conference (2018 CCDC): 09-11 June 2018, Shenyang, China. IEEE Industrial Electronics (IE) Chapter*, 2018.
- [30] X. Li, L. Zhang, H. Ying, S. Huang, & Q. Zhang, “Study of suppression of vibration and noise of PMSM for electric vehicles”, *IET Electr Power Appl*, c. 14, sayı 7, ss. 1274-1282, 2020.
- [31] R. Besselink & I. J. M. Nijmeijer, “Influence of in-wheel motors on the ride comfort of electric vehicles”, In *Proceedings of the 10th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC10)*, 22-26 August 2010, Loughborough, United Kingdom (pp. 835-840).
- [32] H. Salmani, M. Abbasi, T. Fahimi Zand, M. Fard, & R. Nakhaie Jazar, “A new criterion for comfort assessment of in-wheel motor electric vehicles”, *JVC/Journal of Vibration and Control*, c. 28, sayı 3-4, ss. 316-328, 2022.
- [33] M. Liu, F. Gu, & Y. Zhang, “Ride comfort optimization of in-wheel-motor electric vehicles with in-wheel vibration absorbers”, *Energies (Basel)*, c. 10, sayı 10, 2017.
- [34] K. Horváth & A. Zelei, “Simulating Noise, Vibration, and Harshness Advances in Electric Vehicle Powertrains: Strategies and Challenges”, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*, 2024, doi: 10.3390/wevj15080367.
- [35] W. Deng & S. Zuo, “Electromagnetic vibration and noise of the permanent-magnet synchronous motors for electric vehicles: An overview”, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* 2019, doi: 10.1109/TTE.2018.2875481.
- [36] S. Wu, W. Tong, W. Li, S. Yu, & R. Tang, “Electromagnetic Vibration Analysis of High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machines with Amorphous Metal Stator Cores Considering Current Harmonics”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 67, sayı 12, ss. 10156-10167, 2020.
- [37] S. H. Lee, J. P. Hong, S. M. Hwang, W. T. Lee, J. Y. Lee, & Y. K. Kim, “Optimal Design for Noise Reduction in Interior Permanent-Magnet Motor”, *IEEE Trans Ind Appl*, c. 45, sayı 6, ss. 1954-1960, 2009.

- [38] Z. Yang, W. Li, Y. Gou, & T. Cai, “Research on Radial Force of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Maxwell”, *Journal of Electrical Engineering and Technology*, c. 15, sayı 6, ss. 2601-2608, 2020.
- [39] S. H. Lee, J. P. Hong, S. M. Hwang, W. T. Lee, J. Y. Lee, & Y. K. Kim, “Optimal design for noise reduction in interior permanent-magnet motor”, *IEEE Trans Ind Appl*, c. 45, sayı 6, ss. 1954-1960, 2009.
- [40] H. Kutlak, M. Cihan, & A. Özkan, “Polietilen rotıl yatağının çekme kuvveti altında ANSYS ile mukavemet analizi”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 1, sayı 1, ss. 39-46, 2013.
- [41] G. U. Jang, S. Cho, J. Moon, K. Jeon, & C. W. Kim, “Topology optimization to reduce electromagnetic force induced vibration for the specific frequency of pmsm motor using electromagnetic-structural coupled analysis”, *Energies (Basel)*, c. 14, sayı 2, 2021.
- [42] S. Httang, M. Aydin, & T. A. Lipo, “Electromagnetic vibration and noise assessment for surface mounted PM machines”, In *2001 Power Engineering Society Summer Meeting Conference Proceedings (Cat. No. 01CH37262)*, c. 3, ss. 1417-1426.
- [43] S. Wu, S. Zuo, & Y. Zhang, “Optimization for electromagnetic noise reduction in claw pole alternator by rotor claw chamfering”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 65, sayı 12, ss. 9325-9335, 2018.
- [44] W. Deng & S. Zuo, “Electromagnetic vibration and noise of the permanent-magnet synchronous motors for electric vehicles: An overview”, 01 Mart 2019, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.* doi: 10.1109/TTE.2018.2875481.
- [45] X. Li, S. Huang, Q. Zhang, & Y. Dai, “Electromagnetic noise assessment for EV's PM driving machines”, In *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2014, ss. 1552-1555.
- [46] W. Liang, J. Wang, P. C. K. Luk, & W. Fei, “Analytical Study of Stator Tooth Modulation on Electromagnetic Radial Force in Permanent Magnet Synchronous Machines”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 68, sayı 12, ss. 11731-11739, 2021.
- [47] S. O. Kwon, J. J. Lee, T. Sun, & J. P. Hong, “Characteristics and radial magnetic force of interior permanent magnet synchronous motor according

to pole/slot combinations'' *5th International IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference : September 7-11, 2009, Dearborn, Michigan, USA*. IEEE, 2009, ss. 1491-1495.

- [48] T. Sun, J. M. Kim, G. H. Lee, J. P. Hong, & M. R. Choi, "Effect of pole and slot combination on noise and vibration in permanent magnet synchronous motor", *IEEE Trans Magn*, c. 47, sayı 5, ss. 1038-1041, 2011.
- [49] P. Song, W. Li, S. Mukundan, & N. C. Kar, "An Overview of Noise-Vibration-Harshness Analysis for Induction Machines and Permanent Magnet Synchronous Machines", içinde *2020 10th International Electric Drives Production Conference, EDPC 2020 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Ara. 2020. doi: 10.1109/EDPC51184.2020.9388189.
- [50] P. Granjon, "Electromagnetic vibrations estimation of an induction motor by nonlinear optimal filtering", In *2005 5th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, 2005, ss. 1-5.
- [51] L. Tao, "Vibration suppression and control parameter design of a sensorless PMSM rotary compressor drive", *2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '20 ECCE Europe)*, 2020, ss. 1-10.
- [52] M. Yang, C. Wang, D. Xu, W. Zheng, & X. Lang, "Shaft Torque Limiting Control Using Shaft Torque Compensator for Two-Inertia Elastic System With Backlash", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, c. 21, sayı 6, ss. 2902-2911, 2016.
- [53] X. Chen, R. Chen, & T. Deng, "An investigation on lateral and torsional coupled vibrations of high power density PMSM rotor caused by electromagnetic excitation", *Nonlinear Dyn*, c. 99, sayı 3, ss. 1975-1988, 2020.
- [54] X. Chen, S. Han, J. Li, T. Deng, & H. Wei, "Investigation of electromechanical coupling lateral/torsional vibration in a high-speed rotating continuous flexible shaft of PMSM", *Appl Math Model*, c. 77, ss. 506-521, 2020.
- [55] M. I. Tametang, G. D. Meli, Leutcho, & D. Yemele, "Multistability analysis and nonlinear vibration for generator set in series hybrid electric vehicle through electromechanical coupling", *Chaos*, c. 31, sayı 7, 2021.

- [56] S. Ge, S. Hou, & M. Yao, “Electromechanical Coupling Dynamic Characteristics of the Dual-Motor Electric Drive System of Hybrid Electric Vehicles”, *Energies (Basel)*, c. 16, sayı 7, 2023.
- [57] J. Ju, Y. Liu, & C. Zhang, “Stability analysis of electromechanical coupling torsional vibration for wheel-side direct-driven transmission system under transmission clearance and motor excitation”, *World Electric Vehicle Journal*, c. 13, sayı 3, 2022.
- [58] S. Ge, L. Qiu, Z. Zhang, H. Wang, & M. Hu, “Electromechanical coupling dynamic characteristics of electric drive system for electric vehicle”, *Nonlinear Dyn*, c. 112, sayı 8, ss. 6101-6136, 2024.
- [59] B. J. Schwarz & M. H. Richardson, “Experimental modal analysis”, *CSI Reliability week*, c. 35, sayı 1, ss. 1-12, 1999.
- [60] F. Chai, Y. Li, Y. Pei, & Z. Li, “Accurate modelling and modal analysis of stator system in permanent magnet synchronous motor with concentrated winding for vibration prediction”, *IET Electr Power Appl*, c. 12, sayı 8, ss. 1225-1232, 2018.
- [61] Z. El Khawly & D. Schramm, “Analytical modal analysis for the stator system of a permanent magnet synchronous motor for hybrid vehicles and calculation of its natural frequencies”, *Proceedings of ISMA2010 Including USD2010*, 2010, ss. 4535-4548.
- [62] R. M. Pindoriya, R. K. Thakur, B. S. Rajpurohit, & R. Kumar, “Numerical and experimental analysis of torsional vibration and acoustic noise of PMSM coupled with dc generator”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 69, sayı 4, ss. 3345-3356, 2022.
- [63] M. Zhao, X. Wang, L. Liu, X. Tu, & Q. Yang, “Optimization of PMSM for EV based on Vibration and Noise Suppression”, *Appl Comput Electromagn Soc J*, c. 39, sayı 1, ss. 64-80, 2024.
- [64] Z. El Khawly & D. Schramm, “Analytical modal analysis for the stator system of a permanent magnet synchronous motor for hybrid vehicles and calculation of its natural frequencies”, *Proceedings of ISMA2010 Including of ISMA2010 Including USD*, 2010, ss. 4535-4548.
- [65] H. Yin, X. Zhang, F. Ma, C. Gu, H. Gao, & Y. Wang, “New equivalent

model and modal analysis of stator core-winding system of permanent magnet motor with concentrated winding”, *IEEE Access*, c. 8, ss. 78140-78150, 2020.

- [66] S. Das, A. Chowdhury , S. Paul, Z. Wan, R. Islam & Sozer ‘‘Experimental and simulation based study of vibration prediction in fractional slot permanent magnet synchronous machines’’, *2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC) : May 12-15, 2019, Westin San Diego, San Diego, CA*. IEEE, 2019, ss. 1138-1143.
- [67] D. Azevedo, G. Papini, L. Felipe Adão Torre Silva, & P. Iscold, ‘‘Operating deflection shape method applied to low-speed wind tunnel power basement’’, *Proceedings of the XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering ABMEC*, Brasília, DF, Brazil, November 2016, ss. 6-9.
- [68] B. Dynamic, L. Pugliese De Siqueira, & F. Nogueira, ‘‘Application of modal analysis and operating deflection shapes on the study of trucks and buses dynamic behavior’’, *SAE transactions*, 2001, ss. 418-424.
- [69] B. Schwarz & M. H. Richardson, ‘‘Operational deflection shapes detect unbalance in rotating equipment’’, *IMAC-XXVII, the 27th International Modal Analysis Conference*, Orlando, FL, February 2009.
- [70] M. A. Saleem, G. Diwakar, & M. R. S. Satyanarayana, ‘‘Detection of Unbalance in Rotating Machines Using Shaft Deflection Measurement during Its Operation’’, *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, c. 3, sayı 3, ss. 08-20, 2012.
- [71] M. T. Hnin & T. M. Htike, ‘‘Estimation of Rotating Unbalance in Rotor Bearing System using Operating Deflection Shape’’, *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, c. 71, sayı 1, ss. 11-23, Tem. 2020.
- [72] Z Z. F. Fu, & J. He, ‘‘Modal anaysis’’, *Woburn: Elsevier*, c. 1. sayı 1, 2001.
- [73] R. R. , & K. A. J. Craig Jr, *Fundamentals of Structural Dynamics*. NemJersey: John Wiley & Sons, 2006.
- [74] M. , B. M. , & H. Pastor, ‘‘Modal assurance criterion’’, *Procedia Eng*, c. 48, ss. 543-548, 2012.
- [75] R.W Clough,. & J. Penzien, *Dynamics of Structures 2*. Baskı, McGraw-Hill, New York. Ss. 738, 1993.

- [76] M. Escudier & T. Atkins, "A Dictionary of Mechanical Engineering", *A Dictionary of Mechanical Engineering*, 2019, doi: 10.1093/ACREF/9780198832102.001.0001.
- [77] "Modeling damped mass-spring system in matlab simulink® | Request PDF". Erişim: 22 Aralık 2024.
- [78] B. Schwarz & M. Richardson, "Measurements Required for Displaying Operating Deflection Shapes", In *International Modal Analysis Conference XXII January*, c. 26, ss. 29, 2004.
- [79] S. N. Ganeriwala, B. Schwarz, & M. H. Richardson, "Operating deflection shapes detect unbalance in rotating equipment", *Sound and Vibration*, c. 43, sayı 5, ss. 11-13, 2009.
- [80] B. J. Schwarz & M. H. Richardson, "Introduction to operating deflection shapes", *CSI Reliability Week*, c. 10 sayı 538, ss. 121-126, 1999.
- [81] Y. E. Torun, "İçten yanmalı motorlarda yanma gürültüsü", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [82] G. Balıkçı, "AISI 4140 çeliğinin sıcak dövme karakteristiğinin incelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2016.
- [83] M. Kutay, "Rot başının bilgisayar destekli yapısal çözümlemesi", *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 1, sayı1, ss. 45-51, 2014.
- [84] T. Ö. C. Topaloğlu, "Metal kesme teknolojilerinde kesme yüzeylerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2010.
- [85] M. F. Aycan, "Farklı martenzit hacim oranlarında kırılma tokluğu değerlerinin incelenmesi" *Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic* doi: 10.2339/politeknik.520142.
- [86] A. Aslan, "Tornalamada akustik emisyon ve motor akımı optimizasyonu ve analizi", *European Journal of Science and Technology*, c. 25, ss. 50-57, 2021.

- [87] E. Saraç, “Temperleme sıcaklıklarının aısı 4140 ve aısı 4340 çeliklerinin mekanik özellikleri üzerine etkilerinin araştırılması”, Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans tezi, Düzce, Türkiye, 2019.
- [88] H. Kutlak, M. Cihan, & A. Özkan, “Polietilen rotıl yatağının çekme kuvveti altında ansys ile mukavemet analizi”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 1, sayı 1, 39-46, 2013.
- [89] A. Dizdar, “Femur cerrahisinde dinamik kondiler vida (dcs) ve retrograde çivinin mekanik davranışlarının sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2013.
- [90] F. Atik, M. S. Ataç, A. Özkan, Y. Kiliç, & M. Arslan, “Biomechanical analysis of titanium fixation plates and screws in mandibular angle fractures”, *Niger J Clin Pract*, c. 19, sayı 3, ss. 386-390, 2016.
- [91] M. S. Islam, R. Islam, & T. Sebastian, “Noise and vibration characteristics of permanent-magnet synchronous motors using electromagnetic and structural analyses”, *IEEE Trans Ind Appl*, c. 50, sayı 5, ss. 3214-3222, 2014.
- [92] K. Saravanan & A. S. Sekhar, “Crack detection in a rotor by operational deflection shape and kurtosis using laser vibrometer measurements”, *JVC/Journal of Vibration and Control*, c. 19, sayı 8, ss. 1227-1239, 2013.
- [93] C. Zhang, B. Li, Z. Yang, W. Xiao, & Z. He, “Crack location identification of rotating rotor systems using operating deflection shape data”, *Sci China Technol Sci*, c. 56, sayı 7, ss. 1723-1732, 2013.
- [94] R. M. Pindoriya, A. K. Mishra, B. S. Rajpurohit, & R. Kumar, “An experimental investigation of acoustic noise and vibration of PMSM induced by power electronics converters”, *Electric Power Components and Systems*, c. 48, sayı 19-20, ss. 2005-2018, 2021.
- [95] M. Zhu, W. Hu, & N. C. Kar, “Acoustic noise-based uniform permanent-magnet demagnetization detection in SPMSM for high-performance PMSM drive”, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, c. 4, sayı 1, ss. 303-313, 2017.
- [96] M. R. Bache, W. J. Evans, & I. Uygur, “Fatigue life predictions for notch geometries in particle reinforced metal matrix composites”, *Materials science and technology*, c. 14, sayı 9, ss. 1065-1069, 1998.

- [97] M. R. Bache, W. J. Evans, & I. Uygur, ‘‘Fatigue life predictions for notch geometries in particle reinforced metal matrix composites’’, *Materials science and technology*, c. 14, sayı 9-10, ss. 1065-1069, 1998.
- [98] I. Uygur, ‘‘Tensile behavior of powder metallurgy processed (Al-Cu-Mg-Mn) /SiCP composites’’, *Materials Science and Technology*, c. 17, sayı 1, 2004.
- [99] I. Uygur & B Gülenç ‘‘The effect of shielding gas compositions of MIG welding process on mechanical behavior of low carbon steel’’, *Metalurgija*, c. 43, sayı 1, ss. 35-40, 2004.
- [100] I. Uygur, ‘‘Microstructure and wear properties of AISI 1038 H steel weldments’’, *Industrial Lubrication and Tribology*, c. 58, sayı 6, ss. 303-311, 2006.
- [101] I. Uygur, ‘‘Notch behavior and fatigue life predictions of discontinuously reinforced MMCs’’, *Archives of Metallurgy and Materials*, c. 56, sayı 1, ss. 109-115, 2011.
- [102] M. K. Yoon, D. Heider, J. W. Gillespie, C. P. Ratcliffe, & R. M. Crane, ‘‘Local damage detection with the global fitting method using operating deflection shape data’’, *J Nondestr Eval*, c. 29, sayı 1, ss. 25-37, Mar. 2010.
- [103] B. J. Schwarz & M. H. Richardson, ‘‘Introduction to operating deflection shapes’’, *CSI Reliability Week*, c. 10, sayı 538, ss. 121-126, 1999.
- [104] X. Wang, X. Sun, & P. Gao, ‘‘Study on the effects of rotor-step skewing on the vibration and noise of a PMSM for electric vehicles’’, *IET Electr Power Appl*, c. 14, sayı 1, ss. 131-138, 2020.
- [105] S. Wang, J. Hong, Y. Sun, & H. Cao, ‘‘Exciting force and vibration analysis of stator permanent magnet synchronous motors’’, *IEEE Trans Magn*, c. 54, sayı 11, 2018.
- [106] A. Malekipour, A. Corne, L. Garbuio, P. Granjon & L. Gerbaud, ‘‘A closed-loop pmsm sensorless control based on the machine acoustic noise’’, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 70, sayı 10, ss. 9859-9869, 2023.
- [107] S. Zuo, F. Lin, & X. Wu, ‘‘Noise analysis, calculation, and reduction of external rotor permanent-magnet synchronous motor’’, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, c. 62, sayı 10, ss. 6204-6212, 2015.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Serdar ALBAYRAK

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Makine Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2025
Y. Lisans	Makine Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2014
Lisans	Otomotiv Öğretmenliği	Karabük Üniversitesi	2010
Lise	Gemi Makineleri	Hatice Erdem Anadolu Denizcilik Meslek Lisesi	2003

TEZDEN ÇIKAN YAYINLAR

- [1] S. Albayrak & H. Saruhan, ‘Experimental study on the effect of shaft material on noise of permanent magnet synchronous motor’’, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi (Güz)*, 2024, ss. 421-428.
- [2] S. Albayrak & H. Saruhan, ‘‘Rotor mili malzemesinin daimi mıknatıslı senkron motorun gürültüsünün azaltılmasına etkisi üzerine deneysel çalışma’’, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi (Güz)*, 2024, ss. 429-436.

DİĞER YAYINLAR

- [1] Ü. Ağbulut, S. Sarıdemir, & S. Albayrak, ‘‘Experimental Investigation of Combustion, Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine Fuelled with Diesel–Biodiesel–Alcohol Blends’’. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* c. 41, ss. 389, 2019.
- [2] S. Albayrak & A. Ş. Şener, ‘‘Perçin eğitim seti tasarımı, imalatı ve mevcut yöntemle kıyaslanması’’, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi (Güz)*, Kocaeli, Türkiye, 2023, ss. 319-324.

- [3] S. Sarıdemir, & S. Albayrak, ‘‘Kanola yağı metil esterı ve karışımlarının motor performans ve egzoz emisyonlarına olan etkileri’’, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2015, 4(1), 35-46.
- [4] S. Albayrak & M. kam, ‘‘Bell 206 Jet Ranger tip helikopterin kuyruk rotorunda kullanılan yuvarlanmalı yatakların deneysel titreşim analizi’’, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi (Bahar)*, 2019, 1, ss. 444-449.
- [5] S. Albayrak, S. Sarıdemir & Ü. Ağbulut, ‘‘Kanola yağı ve etanolden oluşan dizel yakıt karışımlarının egzoz emisyonlarına olan etkilerinin incelenmesi’’, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi (Bahar)*, 2019, 2, 2082-2088.
- [6] S. Albayrak, S. Sarıdemir & Ü. Ağbulut, ‘‘Kanola yağı biyodizeli-etanol-dizel yakıt karışımının yanma karakteristiğine olan etkisinin incelenmesi’’, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi (Bahar)*, ss. 2077-2081.

