

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ASENKRON MOTOR RULMAN ARIZASININ TİTREŞİM İŞARETLERİ
ÜZERİNDEN ENTROPİ TABANLI ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

Duhan SÖNMEZ

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

NİSAN 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ASENKRON MOTOR RULMAN ARIZASININ TİTREŞİM İŞARETLERİ
ÜZERİNDEN ENTROPİ TABANLI ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

**Duhan SÖNMEZ
(504002153)**

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN
Eş Danışman: Prof. Dr. Serhat ŞEKER**

NİSAN 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504002153 numaralı Doktora Öğrencisi **Duhan SÖNMEZ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ASENKRON MOTOR RULMAN ARIZASININ TİTREŞİM İŞARETLERİ ÜZERİNDEN ENTROPİ TABANLI ANALİZİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Prof. Dr. Serhat ŞEKER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hakan TEMELTAŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Emine AYAZ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Tahir Çetin AKINCI
Kırklareli Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Ali Fuat ERGENÇ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **08 Şubat 2013**
Savunma Tarihi : **16 Nisan 2013**

Eşime ve kızıma,

ÖNSÖZ

Öncelikle akademik yaşamımın en önemli kilometre taşlarından birini oluşturan doktora tez çalışmamın başlangıcında, bu alanda çalışmam için beni teşvik eden; önder kişiliği, olayları çok yönlü değerlendirme beceri ve bilgeliği, akademik çalışmalarının yanısıra endüstriyel uygulamalarda ortaya koyduğu başarıları ile her zaman örnek almaktan onur duyacağım, 2007 yılında aramızdan ayrılan çok değerli hocam Prof.Dr. Tamer KUTMAN'ı saygı ve şükranla anıyorum.

Tez çalışmamın tekrar yön bulması ve ilerlemesi için yön göstericiliğini ve desteklerini esirgemeyen çok değerli hocam Prof.Dr. Metin Gökaşan'a; çalışmamın ilerlemesi ve tamamlanması aşamalarında her türlü bilgi ve desteği sağlayan, yakın ilgi ve özverili yardımlarını son ana kadar esirgemeyen çok değerli hocam Prof.Dr. Serhat Şeker'e; tez izleme jürisinde bulunarak çalışmamın yönlendirilmesinde değerli katkılarını sağlayan Prof.Dr. Hakan Temeltaş, Prof.Dr. Müjde Güzelkaya ve Doç.Dr. Emine Ayaz'a; çalışmamın başından beri beni destekleyen, çalışanı olduğum Control Techniques firmasına ve çalışmamın ilk dönemlerinde firmanın İngiltre-Galler'deki araştırma-geliştirme bölümünde araştırma yapma fırsatı tanıyan başta Prof.Dr. Bill Drury olmak üzere Dr. Mike Cade ve Dr. Collin Hargis'e; firmanın Türkiye merkezinde bulunan çalışma arkadaşlarım Elektrik Müh. M.Akif Sarııbrahim, Elektrik Y.Müh. Erkan Şele ve yöneticim Tamer Küçüktülü'ye; çalışmamın her döneminde manevi desteği ile yanımda olan başta eşim Begüm Sönmez ve babam Atilla Sönmez olmak üzere tüm aileme; yakın arkadaşlarımla Elektrik Müh. Önder Ağca ve Makine Müh. Murat Dalgın'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Nisan 2013

Duhan SÖNMEZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
SEMBOL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxi
1. GİRİŞ	1
2. ASENKRON MOTORLARDA RULMAN ARIZALARI VE KULLANILAN DURUM İZLEME YÖNTEMLERİ	9
2.1 Asenkron Motorlarda Rulman Yapısı ve Karşılaşılan Arızalar	9
2.1.1 Rulman arıza kaynakları	10
2.1.2 Rulman hareketi ve karakteristik frekanslar	11
2.2 Rulman Arızalarında Kullanılan İşaret Tabanlı Durum İzleme Yöntemleri ...	14
2.2.1 Titreşim işareti ile rulman arıza durumu izlenmesi.....	14
2.2.2 Akım işareti ile rulman arıza durumu izlenmesi	14
3. UYGULANAN MATEMATİKSEL YÖNTEMLER.....	17
3.1 Spektral Analiz ve Güç Spektrum Yoğunluğu.....	17
3.2 İstatistiksel Analiz ve Parametre Hesabı	18
3.2.1 Ortalama değer	18
3.2.2 Sapma, standart sapma ve etkin (RMS) değer	18
3.2.3 Çarpıklık (skewness) ve basıklık (kurtosis).....	19
3.3 Entropi Tanımı ve Shannon Entropisi Hesabı.....	20
3.3.1 Shannon entropi tanımı.....	21
3.3.2 Stokastik sistemlerde yaşlanma süreci ve entropi yaklaşımı	23
3.3.3 Yaşlanma sürecinin modellenmesi ve güvenilirlik Fonksiyonu	25
4. ASENKRON MOTORDA RULMAN ARIZASI YAŞLANDIRMA DENEY DÜZENİĞİ VE VERİ TOPLAMA SİSTEMİ	27
4.1 Yaşlandırma Deney Düzenliğinin Yapılandırması.....	27
4.2 Yaşlandırma Süreci ve Performans Deneyleri	29
4.3 Rulman Arızasına İlişkin Analiz Edilecek Titreşim Bilgisinin Belirlenmesi...32	
5. RULMAN ARIZASINA İLİŞKİN TİTREŞİM İŞARETLERİNİN ZAMAN VE FREKANS TANIM BÖLGESİNDEKİ ANALİZİ.....	33
5.1 Ham Titreşim İşaretlerinin İncelenmesi	33
5.1.1 Zaman tanım bölgesinde inceleme	33
5.1.2 Frekans tanım bölgesinde spektral inceleme	38
5.2 Filtrelenmiş Titreşim İşaretlerinin İncelenmesi	44
5.2.1 Zaman tanım bölgesinde inceleme	44
5.2.2 Frekans tanım bölgesinde spektral inceleme	48

6. RULMAN ARIZASINA İLİŞKİN TİTREŞİM İŞARETLERİNİN İSTATİSTİKSEL ANALİZİ.....	55
6.1 Ham Titreşim İşaretlerinin İstatistiksel İncelemesi	55
6.2 Filtrelenmiş Titreşim İşaretlerinin İstatistiksel İncelemesi	59
7. FİLTRELENMİŞ TİTREŞİM İŞARETLERİ ÜZERİNDEN ENTROPİ HESABI	65
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	75
KAYNAKLAR.....	81
EKLER	87
ÖZGEÇMİŞ.....	93

KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım
EDM	: Elektrik Boşalması Oyulması
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
DFT	: Ayrık Fourier Dönüşümü (Discrete Fourier Transform)
GSY	: Güç Spektrum Yoğunluğu
HP	: Beygir Gücü (Horse Power)
Hz	: Hertz
MCSA	: Motor Akım İz Analizi (Motor Current Signature Analysis)
RMS	: Etkin Değer (Root Mean Square)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 6.1 : Filtre öncesi titreşim işaretlerine ait istatistik parametreler	56
Çizelge 6.2 : Filtrelenmiş titreşim işaretlerine ait istatistik parametreler	60
Çizelge 7.1 : Yaşlandırma çevrimlerine ait olasılık ve Entropi değerleri	67
Çizelge A.1: Deney motoru plaka bilgileri	89
Çizelge A.2: Yüksek bant genişlikli ivmeölçerlerin teknik özellikleri	90
Çizelge A.3: Deney düzeneği fırınına ait teknik özellikler	91

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Tek sıra bilyalı rulman içyapısı	9
Şekil 3.1 : İki elemanlı olasılık durumunda Entropi grafiği	23
Şekil 3.2 : Doğrusal yapılanmış bir sistemde yaşlanma süreci	25
Şekil 4.1 : Motor performans test düzeneği ve veri toplama-analiz sistemi	28
Şekil 4.2 : Rulman akımı ile yaşlandırma işlemi için kullanılan düzenek	29
Şekil 4.3 : Motor üzerinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşimi	31
Şekil 4.4 : Motor mil tarafı-saat 2:00 konumlu ivme ölçerin %100 yük koşulunda aktardığı titreşim işaretinin etkin değer eğrisi	32
Şekil 5.1 : Filtre öncesi titreşim genlikleri. (a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim (e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim	34
Şekil 5.2 : Filtre öncesi titreşim işareti GSY. (a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim (e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h). 7.çevrim	38
Şekil 5.3 : GSY'lerinin karşılaştırılması (filtre öncesi)	43
Şekil 5.4 : GSY'lerinin logaritmik ölçekte karşılaştırılması (filtre öncesi)	43
Şekil 5.5 : Filtre sonrası titreşim genlikleri. (a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim (e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim	44
Şekil 5.6 : Filtre sonrası titreşim işareti GSY. (a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim (e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h)	49
Şekil 5.7 : GSY'lerinin karşılaştırılması (filtre sonrası)	53
Şekil 5.8 : GSY'lerinin logaritmik ölçekte karşılaştırılması (filtre sonrası)	54
Şekil 6.1 : Sağlam durum ve yaşlandırma çevrimlerine ait standart sapma değişimi	57
Şekil 6.2 : Sağlam durum ve yaşlandırma çevrimlerine ait basıklık derecesi değişimi	57
Şekil 6.3 : Yaşlandırma sürecindeki filtre öncesi titreşim işareti veri dağılımları (a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim (e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim	58
Şekil 6.4 : Yaşlandırma sürecindeki titreşim işaretlerine ait veri dağılımlarının karşılaştırması	59
Şekil 6.5 : Filtrelenmiş titreşim işaretlerine ait standart sapma değişimi	61
Şekil 6.6 : Filtrelenmiş titreşim işaretlerine ait basıklık derecesi değişimi	61
Şekil 6.7 : Yaşlandırma sürecindeki filtrelenmiş titreşim işaretleri veri dağılımları (a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim (e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim	62
Şekil 6.8 : Yaşlandırma sürecindeki filtrelenmiş titreşim işaretlerine ait veri dağılımlarının karşılaştırması	63
Şekil 7.1 : Yaşlandırma sürecindeki sağlam olma olasılığı eğilimi	68
Şekil 7.2 : Yaşlandırma sürecindeki arızalı olma olasılığı eğilimi	69
Şekil 7.3 : Sağlam olma olasılığına bağlı Entropi eğilimi	70
Şekil 7.4 : Arızalı olma olasılığına bağlı Entropi eğilimi	70
Şekil 7.5 : Yaşlandırma sürecindeki arızalı olma olasılığı ve entropi eğilimi	71
Şekil 7.6 : Arızalı olma durumu için Entropi geçiş oranları	72

Şekil 7.7 : Arızalı olma durumuna ait Entropi değişimi ve eğim değerleri.....	73
Şekil A.1 : Yüksek bant genişlikli ivmeölçerin yapısı.....	91

SEMBOL LİSTESİ

f_r	: Rotor dönme frekansı
f_{TK}	: Temel kafes frekansı
f_{DB}	: Dış bilezik bilya geçiş frekansı
f_{IB}	: İç bilezik bilya geçiş frekansı
f_b	: Bilya dönme frekansı
N_b	: Bilya sayısı
D_b	: Bilya çapı
D_k	: Kafes sayısı
β	: Bilya temas açısı
f_{ra}	: Rulman arızasının motor akımında yarattığı frekans bileşeni
Δf	: Frekans çözünürlüğü
Δt	: Örnekleme zamanı
f_s	: Şebeke besleme frekansı
f_t	: Karakteristik titreşim frekansı
μ	: Ortalama değer
σ	: Standart sapma
s	: Çarpıklık
k	: Basıklık
p_i	: Sağlam olma olasılığı
q_i	: Arızalı olma olasılığı
H	: Entropi değeri
ΔH	: Entropi geçiş oranı

ASENKRON MOTOR RULMAN ARIZASININ TİTREŞİM İŞARETLERİ ÜZERİNDEN ENTROPİ TABANLI ANALİZİ

ÖZET

Günümüz endüstriyel tesislerinde en sık kullanılan elektrik motorlarının başında asenkron motorlar gelmektedir. Gelişen üretim teknolojileri, bu motorlarda yüksek verimlilik, uygulama kolaylığı, dayanıklılık ve düşük maliyet faktörlerini ön plana çıkarmaktadır. Öte yandan ağır işletme koşullarının bu motorlar üzerinde yarattığı bozucu etkiler, beklenmedik anlarda arızaların oluşmasına ve plansız duruşlar nedeniyle ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu bakımdan endüstrinin en önemli yapı taşlarından biri olan elektrik motorlarında gelişen arıza durumlarının, kalıcı arızaya dönüşmeden önce belirlenmesi; yaşanacak kayıpların önlenmesi veya azaltılması bakımından oldukça önem verilen bir araştırma konusudur.

Bu tez çalışmasında, asenkron motorlarda karşılaşılan arızalar arasında en büyük paya sahip olan rulman arızasının, işaret tabanlı analiz yöntemlerinin kullanımı ile incelenmesi ve arıza gelişiminin takip edilerek arızanın önceden belirlenmesi amaçlanmıştır. Uygulanan işaret tabanlı analiz yöntemleri ile; laboratuvar ortamında yaşlandırılan motor rulmanının yarattığı motor titreşim işaretleri incelenmiştir.

Buna göre çalışmada kullanılan titreşim verisi, *The University of Tennessee-Knoxville* (UTK) / Amerika Birleşik Devletleri, *Maintenance and Reliability Centre*'da kurulmuş olan deney düzeneğinden alınmıştır. Bu düzenekte asenkron motorlar için hızlandırılmış yapay bir yaşlandırma süreci bulunmaktadır. Yedi aşamada tamamlanan bu sürecin her çevriminde motorlara; elektriksel, ısı ve kimyasal bozucu etkiler uygulanmakta ve sonrasında motor performans düzeneği kullanılarak motorlardan elektriksel, mekanik ve ısı ölçümleri alınmakta ve bu şekilde bir veri kümesi oluşturulmaktadır.

Buna göre bu tez çalışmasında sadece motor titreşim işaretleri üzerinden inceleme yapılmıştır. Toplam altı adet ivmeölçer kaydının bulunduğu veri kümesinden, etkin değerleri dikkate alınarak yapılan seçimde sadece bir ivmeölçerin (motor mil tarafı, saat 2 konumu) ilettiği titreşim işaretleri ile analizler yürütülmüştür.

Titreşim işaretlerinin analiz edilmesi için öncelikle zaman ve frekans tanım bölgelerinde genlik değişimleri incelenmiştir. Buna göre ivmeölçerden alınan titreşim işaretlerinin her yaşlandırma çevriminden sonraki grafik incelemesinde, hem zaman hem de frekans tanım bölgelerinde bozulmaya bağlı olarak işaret genliğinde artma olduğu gözlenmiştir. Ayrıca güç spektrum yoğunluk (GSY) ları ile yapılan spektral inceleme; özellikle yüksek frekans bölgesinde genlik artışı tespit edildiğinden, yüksek frekans bandına daha çok yoğunlaşabilmek için yüksek geçiren bir bant filtre uygulanmıştır. Yüksek geçiren bant filtre ile koşullandırılan titreşim işaretleri tekrar zaman ve frekans tanım bölgelerinde incelenmiş ve öncekine benzer genlik artışları tespit edilmiştir.

Sonraki aşamada titreşim işaretleri istatistiksel olarak incelenmiş ve her yaşlandırma çevriminde elde edilen titreşim veri kümesinde veri dağılımına ait istatistik parametreleri hesaplanmıştır. Bunlar; *ortalama değer*, *standart sapma*, *çarpıklık* ve *basıklık*'tır. Her çevrime ait istatistik parametreleri karşılaştırıldığı zaman bunlar arasında en büyük değişimi standart sapma değeri kaydetmiştir. Ayrıca filtre uygulamadan önceki, *sağlam* durum ile *arızalı* (son yaşlandırma adımı) duruma ait standart sapma değerlerinin arasındaki oranın, filtrelenmiş işaret ile belirgin bir değerde arttığı gözlenmiştir. Buna göre de, uygulanan filtrenin yapılan analizi kolaylaştırdığı değerlendirilmiştir.

İstatistiksel bakımdan baskın parametre olarak belirlenen *standart sapma* değeri, aynı zamanda arıza teşhis işlemlerine uyarlanan Entropi tanımında karşılaşılan olasılık değerinin hesaplanması için de kullanılmıştır. *Shannon Entropi* olarak da bilinen bu kavram, rastlantısal bir olaydaki belirsizlik seviyesinin hesaplanması için kullanılmaktadır. Böylece yaşlandırma sürecinde her çevrim için yapılan Entropi hesabı ile rulman arızasının gelişimi, hesaplanan belirsizlik seviyesine bağlı olarak belirlenmeye çalışılmıştır.

Sonuç olarak yaşlandırma sürecindeki bir motorun rulmanındaki bozulmanın derecesi, mevcut motor titreşim işaretlerine üç aşamada işaret analiz yöntemlerinin uygulanması ile incelenmiş ve bu şekilde rulman arızasının gelişimi takip edilmiştir.

ENTROPY BASED VIBRATION SIGNALS ANALYSIS FOR INDUCTION MOTOR BEARING FAULTS

SUMMARY

The common usage of induction motors in recent decades increased evidently in all types of industries. Developing production technologies maintain the induction motors to be more reliable and efficient, easy to apply with low costs when compared with the other types. On the other hand, the harsh environmental conditions create negative defects on the motors which cause them malfunction in an unexpected time and this will also stop the ongoing process in the system which will lead to high economical losses. Therefore fault diagnosis became a very important subject to determine any faults before it reaches to a catastrophic system failure for the industry.

According to the studies on this subject, it is seen that the most significant motor faults are because of the mechanical effects and especially bearing fault takes an important part; as more than 40% of all induction motor faults. And there are different techniques for motor fault diagnosis developed in recent decades, which are mainly based on three groups as; “Signal-based”, “Model-based” and “Data-based” condition monitoring and fault diagnosis techniques. Signal based fault signature analysis is one of the most preferred techniques for condition monitoring and diagnosis and also to investigate the incipient fault signature of the motor. There are different types of signals that can be measured and analysed. Mainly these are electrical measurements (current, power, flux), mechanical measurements (vibration, noise), temperature measurement, chemical measurements (gas analysis) and partial discharge detection.

Bearing faults generally causes static and dynamic eccentricities on the rolling elements which come out with many negative effects on the performance of the motor. Primarily, mechanical vibration on the system occurs due to bearing faults. Therefore, in this thesis, it is concentrated on vibration signal analysis for an induction motor. A proper accelerated aging process is being applied to the motor at seven sequential steps, to bring out the bearing fault and its effects at the end of this period. Measured actual motor vibration signals will be investigated for each aging cycle by spectrum analysis and statistical parameters which will be helpful to diagnose the status of the motor bearing and follow up the aging process in terms of bearing degradation trend.

The measurement data is collected from an experimental setup which is built by “*The University of Tennessee-Knoxville (UTK) / USA, Maintenance and Reliability Centre*”. This experimental setup was designed to simulate the aging process for a 5HP AC motor, which is under electrical and mechanical stresses, also thermal and corrosive effects are added to this artificial aging process. This experimental setup is designed regarding IEEE Standard Test Procedure for AC Electrical Machinery and Standard for Systems of Insulation Materials.

Electrical and thermal aging processes are applied sequentially to the test motor as an aging cycle and this cycle is repeated seven times totally. Each aging cycle started with Electrical Discharge Machining (EDM) process in order to simulate electrical discharge current from motor shaft to the bearing. At each EDM aging cycle the motor was run for 30 minutes with no load condition and during the period, an externally supplied shaft current (27Amperes at 30Volts AC) is applied to the motor shaft. After each EDM aging cycle, a thermal aging process was carried out, which was applied to accelerate the aging process. Basically in a thermal aging process, the motor is being heated up in a laboratory oven that gives a constant temperature of 140°C, and after the heating process, it is immersed in the water. The cycle is repeated again after waiting in water to expose the corrosion effect on the motor components.

Each aging period was followed by a performance test process on an experimental setup. Eventually eight set of measurements are achieved as one healthy (initial) and seven aged cases. There are two accelerometers in this setup for independent vibration measurements and the locations of the two accelerometers which are located at the process end of motor, on clock position by 2 and 10 respectively. After getting the vibration signal from accelerometers, signal conditioners with an anti-aliasing filter are used before data process in a host PC. The anti-aliasing filter has been set to 4kHz cut-off frequency. In this study S2 vibration data is being used.

According to the vibration signal analysis, two types of data analysis methods have been applied. The first inspection due to each aging cycle's data has been in time domain and it's been observed that the vibration signal magnitude increases during the degradation period in the aging process. This increase gives an idea about degradation of bearing but it does not give some characteristic details about aging process and the bearing fault. Therefore when the vibration signal has been examined by spectral analysis, Power Spectral Density (PSD) plots indicate that there have been additional frequency components after 1.5kHz which points out a bearing fault trend during the aging process. It's also possible to realize the deviation on vibration signal data, by looking at PSD plot in logarithmic scale. It is significantly seen on the plot that the subjected deviation arises after frequency level of 1500Hz.

Because of the additional frequency components in the range of 1500Hz to 4000Hz on the spectrum, it has been decided to investigate only this frequency range, just to ignore the low frequency components effect during the spectrum analysis. Therefore a Butterworth type of high-pass filter has been applied to the signal, which is set to 1.5kHz cut-off frequency. It's been indicated that the high frequency components above 1500Hz are being increased due to the degradation of bearing by each aging cycle. Also when the PSD plots are compared in logarithmic scale, the increase at the magnitude of high frequency signal components after each aging cycle, clearly points out the degradation of bearing.

The second method which will be used for vibration analysis will be Statistical analysis. The statistical parameters are mean value (μ), standard deviation (σ), skewness (α) and kurtosis (β). They have been calculated for each aging cycle to analyze the vibration signal data. For the healthy case of motor, the vibration signal data draws a standard normal (Gaussian) distribution in terms of probability distribution. During the aging process, standard deviation value increases significantly which is also an indicator of deviation from standard normal distribution. At the final stage of aging process (Cycle #7), standard deviation value

becomes 20 times bigger than the initial case (healthy motor). The other statistical parameters do not differ as much as standard deviation. The probability density function shows the differentiation on these parameters by each aging cycle.

Finally, Shannon Entropy definition will be used to understand and explain the degree of degradation by calculating the amount of transferred data from initial case (healthy motor) to the last aging cycle (bearing fault) through the aging process. Generally entropy value is defined as a measure of uncertainty. On the other hand; statistical evaluation shows that standard deviation is the most significant parameter that has changed during the aging process. Therefore regarding to the entropy definition, standard deviation can be the parameter which determines the probability value of each cycle at the aging process.

In this manner, the remarkable point is that the greater aging cycle, the greater probability of being faulty, the lower entropy value. It means that during the aging process the probability of being faulty increases and the uncertainty at being faulty state decreases which depends on the Shannon Entropy definition. Besides this, if the entropy variation between each aging cycle has been evaluated then it is possible to realize the amount of entropy which is transferred between aging cycles which can be called as *entropy transfer rate*. From the point of being faulty prospect, the entropy transfer rate has the maximum value at the first aging cycle which points out the maximum uncertainty about this state. After every aging cycle process, the calculated transfer rates between cycles decreases as like as entropy value.

In this study, all the figures regarding entropy approach are stating out a degradation trend for the motor bearing during the aging process, which is also supported by spectral and statistical analysis figures. Therefore it is possible to follow the degradation level of the bearing by evaluating these methods together.

1. GİRİŞ

Günümüz endüstriyel işletmelerinde yoğunlukla kullanılan elektrik motorları, bu alanlarda çalışan yapı taşlarının başında gelmektedir. Gelişen motor teknolojisi ile sağlanan yüksek verimlilik, uygulama kolaylığı, dayanıklılık, güvenilirlik ve düşük maliyet faktörleri son on yıllar içerisinde elektrik motorlarının kullanım alanlarının da artmasına neden olmuştur. Özellikle asenkron motorlar basit yapıları, düşük seviyede bakım ihtiyacı ve nispeten yüksek verimli olmaları bakımından; yaygın olarak tercih edilen motorların başında gelir.

Dünya üzerindeki sermayenin küreselleşmesi ve bu ölçekte artan rekabet koşulları, her türlü endüstriyel tesiste üretim faaliyetlerinin yüksek verimlilik ile gerçekleştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu anlamda dikkat edilecek noktalardan biri de, üretim süreçlerinde arıza kaynaklı duruşların en düşük seviye olmasını sağlamaktır.

Üretim yapan sistemlerde kullanılan elektrik motorları dikkat edilmesi gereken önemli arıza kaynaklarından biridir. Özellikle ağır endüstriyel işletme koşulları ile tasarım, boyutlandırma ve uygulama hataları birleştiği zaman; motorlarda erken yaşlanma ve çalışma ömrünün kısalmasına bağlı kalıcı arızalar ortaya çıkar.

Zamanı önceden kestirilemeyen motor arızalarının neden olduğu sistem duruşları, her türlü işletme için maliyeti yüksek kayıplar anlamına gelir ve büyük bir rahatsızlıkla karşılaşılır. Bu bakımdan, oluşabilecek arızaların henüz kalıcı seviyeye ulaşmadan, başlangıç seviyesinde tespit edilebilmesi, işletmelerde oldukça önem verilen bir konudur. Erken arıza teşhisi ile beklenmeyen ani duruşlar azaltılabilecek, olası sistem kazaları önlenilebilecek, üretimde sürekliliği sağlamak amacıyla gerekli olan öngörülü bakım planları yapılabilecek ve sistem verimliliği bu bakımdan üst seviyede tutulabilecektir.

Asenkron motorlarında çevrimiçi durum izleme, erken arıza teşhisi ve saptanması konuları son yirmi yıl içerisinde araştırmacıların önem verdiği başlıklar arasında yer almıştır. Literatürde bu konuda 1999 yılına kadar yapılan 300'ü aşkın çalışmanın,

kaynak teşkil edebilecek ölçekte bir listesi Benbouzid tarafından hazırlanmıştır [1]. Bu tarihten günümüze kadar uzanan süreçte ise çalışmalar artarak devam etmiştir [2]. Tüm bu çalışmalar çerçevesinde asenkron motorlarda meydana gelen arıza türleri ve bu arızaların erken teşhisinde ortaya konulan yöntemler, birçok araştırma yayını ile literatürde yer almıştır [3-9].

Asenkron motorlarda karşılaşılan arıza türleri elektriksel ve mekanik kaynaklı olmak üzere iki ana grupta toplanmaktadır. Her iki grubun altında ise aşağıdaki belirtilen arıza türleri yer alır.

- Elektriksel arızalar
 - Stator arızaları
 - i.* Sargı arızaları (kısa devre ve açık devre)
 - ii.* Harici arızalar (motor sürücüleri kaynaklı arızalar)
 - Rotor arızaları
 - i.* Rotor çubuk arızası
 - ii.* Kısa devre halka arızaları
- Mekanik arızalar
 - Rulman arızaları
 - Eksen kaymasına bağlı arızalar
 - i.* Statik hava aralığı dengesizliği
 - ii.* Dinamik dengesizlik

Yukarıda bildirilen dört temel arıza türü içinden en sık karşılaşılan arızalar %40-50 oranında en yüksek paya sahip olan rulman arızalarıdır. Bundan sonra, sırasıyla %35 oranı ile stator arızaları ve %10 oranı ile rotor arızaları gelir. Geriye kalan bölümde ise eksenel bağlantı hatalarının sebep olduğu diğer mekanik arızalar gelmektedir [2, 3]. Daha çok petrokimya endüstrisinde yapılan araştırmalarda, 100kW ila 1MW güç aralığındaki motorlar için yukarıda bildirilen arıza dağılım oranları ile ilgili bilgi verilmektedir [10- 12]. Bununla birlikte son yıllarda yapılan başka araştırmalar, gelişen üretim teknolojileri ile üretilen motorlarda sargı ve rotor arızalarında önceki yıllara göre azalma olduğunu, buna yanında rulman arızalarının ise çok daha fazla ön plana çıktığını göstermektedir [13].

Asenkron motor arızalarının erken teşhisi ve belirlenmesine yönelik yapılan araştırmalar ve bu amaçla geliştirilen yöntemler ise aşağıda sıralanan üç grupta toplanmaktadır [3,4].

- Model tabanlı yöntemler
- Bilgi tabanlı yöntemler
- İşaret tabanlı yöntemler

Her üç yöntemde de motor üzerinden ölçülen büyükler işaret işleme teknikleri yardımıyla incelenerek, kullanılan yöntem içerisinde değerlendirilir.

Model tabanlı yöntemler, asenkron motorun matematiksel modeline dayanır ve kurulan model yardımıyla kestirilen motor parametreleri karakteristik arızanın belirlenmesinde kullanılır [14, 15]. Bu durumda gerçek motordan ölçülen işaretler ile matematiksel modelden elde edilen çıkışlar karşılaştırılarak elde edilen fark işareti arıza teşhisi amacıyla değerlendirilir. Asenkron motorun matematiksel modeli yüksek dereceden doğrusal olmayan bir diferansiyel eşitlik ile tanımlanabildiğinden, bu modele bağlı karmaşık matematiksel işlemleri gerçekleştirmek kolay olmamaktadır ve uygulamada bu matematiksel işlemler yüksek kapasiteli mikroişlemci donanımları gerektirmektedir.

Bilgi tabanlı yöntemlerde, model tabanlı yöntemlerin aksine motora ilişkin karmaşık bir matematiksel model kurgusu ve işlem gereksinimi bulunmamaktadır. Bu yöntemler, motordan örneklenerek alınan işaretlerin işlenmesi sonrasında, bilgi kümelerinin oluşturulmasına dayanmaktadır. Sonrasında yapay zeka tabanlı akıllı yöntemler ile geliştirilen karar mekanizmaları arıza durumlarının teşhisinde kullanılmaktadır [16-19]. Literatürde en çok karşılaşılan yöntemler bulanık mantık (*fuzzy logic*) [20, 21], yapay sinir ağları (YSA) [22-23], genetik algoritmalar ve bu yöntemlerin ortak kullanıldığı çalışmalar olarak karşımıza çıkmaktadır [24-27].

İşaret tabanlı arıza teşhis yöntemleri ise model tabanlı yöntemlere göre pratikte uygulanması daha kolay ve bu anlamda daha çok tercih edilen yöntemlerdendir. Çoğunlukla etkin motor üzerinden ölçülen büyüklükler ile işaret analiz yöntemleri kullanılarak motor durumundaki değişimler takip edilir. Literatürde sıklıkla karşılaşılan işaret analiz yöntemlerinin başında, motor akımı ve titreşim işaretlerinin frekans tanım bölgesindeki spektral analizi gelmektedir [28-33]. İşaret, frekans tanım bölgesinde incelenerek, temel bileşen haricindeki bileşenlerin arıza durumları ile

bağlantısı analiz edilir, buna bağlı olarak arıza durumu teşhis edilmeye çalışılır. Elektriksel (akım, gerilim,...vb) ve mekanik (titreşim ve gürültü) işaret ölçümlerinin yanı sıra; sıcaklık, gürültü ve kimyasal ölçümlere dayalı işaretlerin analiz edildiği yöntemlerin uygulandığı literatürde görülmektedir [34-39].

Birçok elektrik motorunda olduğu gibi asenkron motorlarda da dönen kısım olarak bilinen rotor, iki uçta bulunan rulmanlar üzerinde gövdeye sabitlenir. Dönme hareketinin merkezinde bulunan bu elemanlar çalışma ömrü boyunca birçok mekanik ve elektriksel bozucu etkiye maruz kalır. Uygun doğrultuda yapılmayan yük bağlantısı, aşırı titreşimli yükler, çalışma ortamındaki bozucu dış etkiler (aşırı sıcaklık, toz, korozyon...vb.), yetersiz bakım koşulları (eksik yağlama) ve yarı iletkenli motor sürücülerinin neden olduğu rulman hata akımları, karşılaşılan başlıca arıza kaynaklarıdır [4]. Belirtilen sebepler ile gelişen rulman arızaları dönen rotorda statik ve dinamik eksen kaçıklıklarına sebep olur. Bu olumsuzluklar ilk zamanlarda motorda düşük seviyeli mekanik titreşimler yaratırken; çalışma süresi boyunca rulman bozukluğunun ilerlemesi ile motorda ölçülebilen titreşim seviyesi artmaya devam eder ve sonunda kalıcı rulman arızasına dönüşerek motorun dönme hareketinin durmasına sebep olur [6, 32].

Rulman arızalarının izlenmesinde ve arızasının teşhisinde literatürde yer alan yöntemler çoğunlukla daha önce konu edilen işaret tabanlı tekniklere dayanmaktadır [33]. Bunlar arasında en çok karşılaşılan iki yöntem, stator akımı ve motor titreşim işaretinin işlenmesi ve analizi olmuştur. Akım işareti analiz yönteminin tercih edilmesinin en önemli sebebi uygulamada özel ve maliyeti yüksek bir algılayıcı gerektirmemesidir. Zira akım işaretinin ölçümü çoğunlukla motor kontrol merkezinde mevcut olan akım algılayıcıları üzerinden yapılmaktadır. Literatürde rulman arızası teşhisi için akım izleme ve analizinin kullanıldığı birçok çalışma kaydolmuştur [34-36].

Akım işaret analizinin yanı sıra motordan ölçülen mekanik titreşim işaretlerinin analizi ise, rulman arızasının teşhisinde sıklıkla kullanılan ve literatürde oldukça yoğun yer alan bir yöntemdir [37]. Temel olarak motor gövdesinden algılanan titreşim işareti zaman tanım bölgesi ve frekans tanım bölgesinde incelenir. Dönen bir motorun titreşim bilgisi ayrık zamanda dönme hızına bağlı temel bir frekans değeri verirken; rulman arızalarından kaynaklanan titreşim işaretleri aynı işaret üzerinde farklı frekans değerlerinde bileşenler oluşturur. Dolayısıyla motordan alınan titreşim

ölçüm bilgisi, tüm bu frekans bileşenlerini içeren karmaşık bir dalga şeklindedir. Genellikle bu ölçüm işareti Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) gibi bir dönüşüm işlemi ile frekans tanım bölgesine aktararak frekans bileşenlerine ayrıştırılmak suretiyle analiz edilir. Bu yöntem ile rulmandaki yapısal bozukluğun gelişimi takip edilir, aynı zamanda kalıcı rulman arızasının önceden teşhisine yönelik kestirimde bulunulur [42, 43]. Rulman arızasının teşhisinde kullanılan *akım* ve *titreşim* işaretlerinin analiz yöntemleri literatürde [39] ve [40] yayınlarında karşılaştırılmaktadır. Bunun yanında işaret tabanlı arıza analizinde, ilgilenilen frekans bileşenlerinin ayrıntılı incelemesi için Dalgacık dönüşümü (*Wavelet transform*) tekniği kullanılır [46-50].

Bu tez çalışmasında asenkron motorlarda meydana gelen rulman arızalarının karakteristik özellikleri, motordan alınan titreşim işaretlerinin zaman ve frekans tanım bölgelerinde grafiksel ve istatistiksel olarak incelenmesi ile analiz edilmiştir. Bu doğrultuda kullanılan titreşim işareti veri kümesi; *The University of Tennessee, Knoxville* (UTK) tarafından; asenkron motor yaşlandırma sürecinin incelenmesi amacıyla kurulan deney düzeneğinden alınan ölçümlerden oluşmaktadır [51, 52].

Aynı deney düzeneği kullanılarak, UTK ve *İstanbul Teknik Üniversitesi* (İTÜ) tarafından ortak yürütülen önceki çalışmalarda farklı tip asenkron motor arızaları yine işaret tabanlı yöntemler kullanılarak incelenmiştir [53, 54].

Burada kullanılan 5HP gücünde, 4 kutuplu asenkron motorlar yedi aşamalı yapay bir yaşlandırma sürecinden geçirilerek, laboratuvar ortamında arıza durumu ortaya çıkarılmıştır. Sağlıklı durum ve yedi aşamalı yaşlandırma sürecinin her bir çevriminde ölçülen titreşim işaretleri, spektral ve istatistiksel olarak incelenmiş ve rulman bozukluğunun, sağlıklı durumdan arıza durumuna ulaşmaya kadar her bir çevrimle oluşan bozulma aşamaları incelenmiştir.

Bu çalışmada uygulanan spektral analiz ve istatistik inceleme yöntemlerinin literatürdeki uygulamalardan [56-59] en belirgin farkı, titreşim işaretinin; rulman arızasının ayrıştırılabildiği karakteristik frekans değeri dikkate alınarak uygulanan bir yüksek geçiren bant filtre ile düzenlenmiş olmasıdır. Bu haliyle yapılan analiz çalışmalarında, motor rulman bozulmasındaki gelişiminin takip edilebilmesi ve arıza durumunun önceden kestirilebilmesi bakımından daha belirgin sonuçlar elde edilmiştir.

Ayrıca bu çalışmada, Shannon Entropi tanımından [58, 59, 63] yararlanarak; motor yaşlanma sürecindeki her bir yaşlandırma çevrimine ait sağlam ve arızalı olma durumlarının belirsizlikleri hesaplanmış ve ilerleyen yaşlandırma sürecinde iki durum arasında geçiş yapan Entropi değerleri belirlenerek rulman arızasının gelişimi incelenmiştir. Bu analiz sırasında kullanılan titreşim veri kümesi, yüksek geçiren filtre ile uyumlaştırılmış olduğundan, arıza bileşenleri bakımından daha yoğun bir kümedir. Her bir çevrime ait titreşim işaretlerinin entropi değişimleri, bu işaretlerin olasılık dağılımına bağlı olarak incelendiği zaman; bozulmanın kalıcı arızaya dönüştüğü adımlar ayırt edilebilmiştir.

Bu ayrıntılar eşliğinde, tez çalışmasının içeriği aşağıdaki gibi düzenlenmiştir:

Giriş bölümünde, endüstriyel uygulamalarda yoğun kullanım alanları bulunan asenkron motorların arıza türleri irdelenmiş ve literatürde karşılaşılan arıza tanı yöntemleri özetlenmiştir. Bunun yanında çalışma kapsamında incelenen arıza türü, uygulanan arıza teşhis ve izleme yöntemleri ve bu çalışmada getirilen yöntem farklılıkları aktarılmıştır.

İkinci bölümde, tezin çalışma kapsamını oluşturan asenkron motor rulman arızaları incelenmiş, rulman arıza türleri sınıflandırılarak, bu arızalar için geliştirilen arıza teşhis yöntemleri aktarılmıştır.

Üçüncü bölümde tez çalışmasında kullanılan matematiksel yöntemler tanıtılmıştır. Bu anlamda spektral analiz ve istatistiksel analizde kullanılan matematiksel bağıntılar özetlenmiştir. Aynı zamanda tezde kullanılan yöntemler bakımından önemli bir yer tutan Entropi yaklaşımı daha ayrıntılı olarak tanıtılmıştır.

Dördüncü bölümde, rulman arızasının yapay bir yaşlandırma sürecinde ortaya çıkarabilmek üzere kurulmuş olan deney düzeneği ve yaşlandırma sürecinin evreleri tanıtılmıştır.

Beşinci bölümde, deney düzeneğinden elde edilen titreşim işaretleri için zaman ve frekans tanım bölgesindeki spektral (genlik ve frekans) analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında ham titreşim işaretine yüksek geçiren bir filtre uygulanmış ve sonrasında tekrar spektral analiz ile incelenmiştir.

Altıncı bölümde, her iki titreşim veri kümesi (ham veri ve filtrelenmiş veri) istatistiksel olarak incelenmiş, bu amaçla belirlenen istatistik parametreleri hesaplanmış ve karakteristik arızayı vurgulayan baskın parametre tespit edilmiştir.

Yedinci bölümde, bir önceki bölümde elde edilen istatistiksel inceleme sonuçları, Entropi tanımı ile tekrar ele alınarak incelenmiş ve neticesinde asenkron motor rulman bozulmasının yapay yaşlandırma sürecindeki gelişimi kestirilmeye çalışılmıştır.

“Sonuçlar ve Öneriler” bölümünde ise yapay bir yaşlandırma sürecinde ortaya çıkarılan rulman arızası için uygulanan yöntemler ve elde edilen sayısal sonuçlar ile arıza teşhisine yönelik ortaya koyulan yaklaşımlar aktarılmıştır. Ayrıca bu tezin benzer çalışmalara göre farklılıkları ve sonraki araştırmalar ile ilgili öneriler sunulmuştur.

2. ASENKRON MOTORLARDA RULMAN ARIZALARI VE KULLANILAN DURUM İZLEME YÖNTEMLERİ

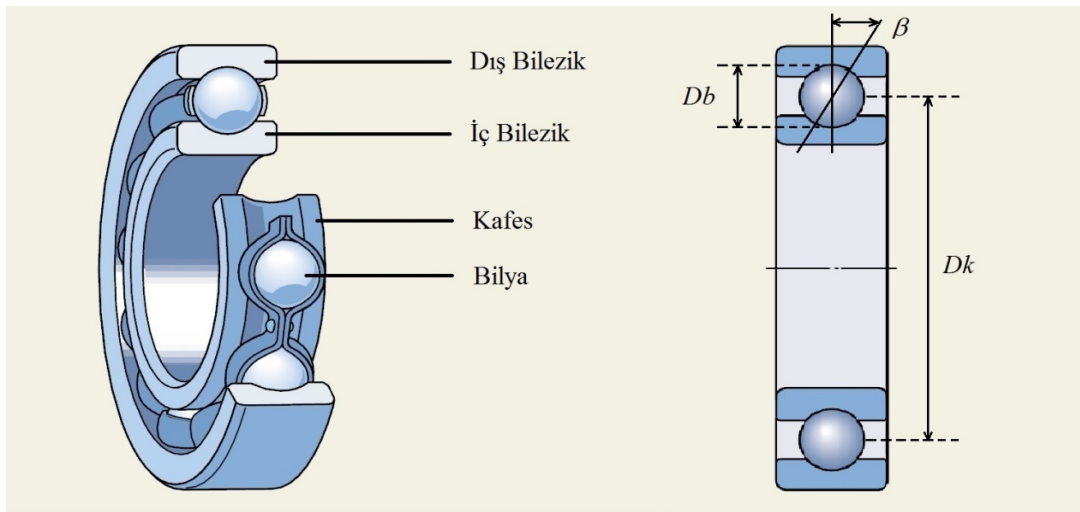
Genel olarak asenkron motor arızaları elektriksel ve mekanik arızalar olmak üzere iki ana grupta toplanmaktadır. Bunlar arasından mekanik kaynaklı rulman arızaları ise, tüm arızaların %40 ila 50 i oranında büyük bir kısmını oluşturur [2,3]

Bu bölümde asenkron motorlarda kullanılan rulmanların yapısal özellikleri, karşılaşılan arızaların nedenleri ve arıza durumlarının izlenmesi ve tespitinde kullanılan yöntemler açıklanmıştır.

2.1 Asenkron Motorlarda Rulman Yapısı ve Karşılaşılan Arızalar

Her tür dönen elektrik makinesinde, milin dönme hareketinin sağlanması amacıyla gövde ile dönen eksen mili arasında konumlandırılan mekanik eleman rulman olarak adlandırılır. İçyapısında küresel veya silindirik formlu dönen elemanlar bulunduran rulman modelleri arasında elektrik motorlarında en çok tercih edilen modeli tek sıra bilyalı rulman'dır [69, 70].

Şekil 2.1'de gösterildiği üzere tek sıra bilyalı rulman dört temel elemandan meydana gelir. Bunlar dış bilezik, iç bilezik, taşıyıcı kafes ve bilyalardır [69].



Şekil 2.1 : Tek sıra bilyalı rulmanın içyapısı.

İç ve dış bilezikler arasında bulunan bilyalar, taşıyıcı kafes sayesinde sabit bir aralıkta düzenli olarak yapı içinde yer alırlar. Bu sayede iç bilezik ve dış bilezik arasında dönme hareketi sağlanabilir.

İç bilezik elektrik motorunun milini kavrarken, dış bilezik ise motor gövdesine yataklanmıştır. Buna göre elektrik motorunun rotoru, stator içerisinde her iki uçta kullanılan rulmanlar ile açısal dönme hareketini sağlar.

2.1.1 Rulman arıza kaynakları

Elektrik motorunun dönme hareketine yardımcı olan bu mekanik elemanlar, çalışma ömrü süresince birçok iç ve dış bozucu etkiye maruz kalır ve neticesinde kalıcı arızalar ortaya çıkar. Rulman arızalarının başlıca kaynakları aşağıda verilmektedir [14, 71].

- Mekanik hasar: Uygunsuz mekanik bağlantı (gevşek ve yanlış doğrultulu mil bağlantısı) ve dengesiz motor yükleri aşırı titreşimlere ve sonucunda rulman içyapısında bozulmalara neden olur. Çoğunlukla rulman içindeki elemanların yüzeyinde başlayan yorulmalar başlangıçta küçük boyutlu malzeme kopmaları ve neticesinde ebatlı yüzeysel girinti ve çıkıntılara dönüşür. Zaman içinde kopan malzemelerin yarattığı olumsuz etki bozulma sürecini hızlandırır.
- Genel yıpranma: Uzun süreli malzeme kullanımı, uygun çalışma koşulları sağlansa dahi, malzemede genel yıpranmaya ve neticesinde bozulmalara neden olur. Mekanik bozucularda olduğu gibi rulman içindeki elemanlarda yıpranma küçük girinti ve çatlaklar şeklinde ortaya çıkar.
- Çatlak hasarı: Rulman elemanlarında karşılaşılan çatlak hasarı çoğunlukla aşırı yük koşulu veya dengesiz salınım yapan yük koşullarında ortaya çıkar. Bunun yanında üretin kaynaklı malzeme çatlakları da bu süreci etkiler.
- Paslanma: Yüksek nemli çalışma ortamlarında kullanılan rulmanları eleman yüzeyinde paslanma meydana gelir. Özellikle rulman yağı içinde emilen su ve nem bu süreci başlatır. Paslanmaya bağlı olarak ortaya çıkan pas tozu, rulman içi eleman yüzeyinde girinti ve çıkıntı haline dönüşen bozulmalara, ilerleyen aşamalarda ise çatlaklara neden olur.

- Yetersiz yağlama: Yetersiz yağlama koşulları veya verimsiz bir yağlama sistemi genel olarak yağlama sorunlarına neden olur. Normal koşullarda rulman içinde dönen elemanlar yani bilyalar ile iç ve dış bilezik yüzeyleri arasında doğrudan teması engelleyecek bir yağ tabakası bulunur. Bu sayede eleman yüzeylerinin hızlı aşınması engellenir. Yetersiz yağlama durumunda ise metal yüzeylerin birbirlerine doğrudan teması ile sürtünme artacak ve aşırı yıpranma ve sonrasında malzeme bozulması ortaya çıkacaktır.
- Elektrik Boşalma akımı etkisi: Uygun topraklama bağlantısı bulunmayan motorlarda karşılaşılan, rulman hata akımı elektriksel kaynaklı bir bozucudur. Genel olarak motor gövdesinden (stator) toprağa doğru, rulmanlar üzerinden akan bir hata akımı ile ortaya çıkar. Gelişen bu arızaya neden olan etkenler çoğunlukla; stator sargılarının simetrik olmaması, zaman içinde motorda gelişen kalıcı mıknatıslık etkisi, gövdede elektrostatik yük birikimi, dışarıdan motor miline gerilim uygulanması veya yarı iletkenli çeviricilerin (PWM kullanılan eviriciler) yüksek anahtarlama frekansına bağlı olarak üretilen ortak uç gerilimleridir. Bu anlamda rulman elemanları; bilyalar ve bilezikler, üzerinden elektrik boşalması (ark) yolu ile akım akacaktır. Düzensiz geçen bu akımlar elemanların metal yüzeyinde yıpranma ve aşınmalara neden olacak ve sonuç olarak malzeme kopmaları ile yüzey bozulmasının derecesi artacaktır [14, 56].

2.1.2 Rulman hareketi ve karakteristik frekanslar

Rulman dinamiğini oluşturan beş temel hareket bulunmaktadır ve her bir hareket sisteme farklı bir frekansı cevabı ile yansıtır. Bu beş frekans, Şekil 3.1’de gösterilen rulman içyapısı dikkate alındığında; motor mili (rotor) dönme frekansı (f_r), temel kafes frekansı (f_{TK}), dış bilezik bilya geçiş frekansı (f_{DB}), iç bilezik bilya geçiş frekansı (f_{IB}) ve bilya dönme frekansı (f_b) olarak aşağıdaki gibi tanımlanır [3, 14, 18, 38].

Bu frekanslar motorun içinde bulunduğu sisteme yansıyan titreşim frekanslarının temel kaynağıdır. Bu frekansları tanımlayan bağıntılarda; N_b bilya sayısı, D_b bilya çapı, D_k kafes çapı, β bilya temas açısı olarak kullanılmıştır.

- Motor mili (rotor) dönme frekansı (f_r): Bir elektrik motorunda, motor mili rotora bağlı olarak rulmanlar yardımıyla stator (gövde) içerisinde açısal dönme hareketi gerçekleştirir. Motor sistemindeki en temel titreşim frekansı motor dönme frekansına aittir. Herhangi bir arızanın bulunmadığı sürekli hal durumunda rulman dış bileziği motor gövdesine sabitlenmiş durağan bir konumdadır ve bu durumda dış bilezik dönme frekansı (f_o) sıfıra eşittir. Ayrıca rulman iç bileziği motor miline (rotor) bağlı olduğundan sürekli halde iç bilezik dönme frekansı (f_i) ise motor mili rotor dönme frekansına (f_r) eşittir.
- Temel kafes frekansı (f_{TK}): Bu frekans rulman içindeki kafes yapının dönme frekansdır ve aşağıdaki bağıntı ile tanımlanır.

$$f_{TKF} = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b \cos \beta}{D_k} \right) \quad (2.1)$$

- Dış bilezik bilya geçiş frekansı (f_{DB}): Bu frekans değeri bilyanın dış bilezik içindeki bir noktadan geçiş frekansını belirlemektedir. Genel olarak, temel kafes frekansının sürekli haldeki dış bilezik dönme frekansına farkı ile bilya sayısının çarpımına eşittir.

$$f_{DB} = N_b (f_{TKF} - f_o) \quad (2.2)$$

$$f_{DB} = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b \cos \beta}{D_k} \right) \quad (2.3)$$

- İç bilezik bilya geçiş frekansı (f_{IB}): Bu frekans değeri bilyanın iç bilezik içindeki bir noktadan geçiş frekansını belirlemektedir. Genel olarak, temel kafes frekansının sürekli haldeki iç bilezik dönme frekansına farkı ile bilya sayısının çarpımına eşittir.

$$f_{IB} = N_b (f_{TKF} - f_i) \quad (2.4)$$

$$f_{IB} = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 + \frac{D_b \cos \beta}{D_k} \right) \quad (2.5)$$

- Bilya dönme frekansı (f_b): Bu frekans değeri bilyanın rulman içinde dönerken, kendi eksenini etrafında gerçekleştirdiği dönme frekansını belirler.

$$f_b = \frac{D_k}{2D_b} f_r \left(1 - \frac{D_b^2 \cos^2 \beta}{D_k^2} \right) \quad (2.6)$$

Rulman içindeki elemanlarda bir bozulma olması durumunda, dönen elemanların bu noktadan geçişi sırasında o bozulmaya ait bir titreşim frekansı ortaya çıkacaktır. Örneğin dış bilezikte oluşan tahribata bağlı bir çukur noktasından, dönen bilyalar her geçtiğinde sisteme f_{DB} frekanslı bir titreşim darbesi yansıtır. Bu noktadaki çukurun boyutu arttıkça yaratmış olduğu harmonik frekansın baskınlığı da artacaktır. Buna göre her elemanda oluşan hatanın ortaya koyduğu titreşim frekansları yukarıdaki bağıntılar ile hesaplanabilir. Sistemin temel frekansına eklenecek olan bu bozucu etki frekansları, frekans tanım bölgesinde analiz edilerek ayrıştırılabilir.

Ayrıca rulman iç hatalarına dış kaynaklı bozucuların eklenmesi de pratikte karşılaşılan karmaşık bir durumdur. Zira motorun yük bağlantısı üzerinden motor rulmanına, mevcut frekanslarda bozucuların eklenmesi mümkündür. En çok karşılaşılan yük kaynaklı bozucu etkiler şunlardır [40]:

- Gevşek motor bağlantısı: En basit karakteristikli bozucu etki olan gevşek motor bağlantısı, rotor dönme frekansı (f_r) ve temel kafes frekansı (f_{TK}) ve katlarında sistem titreşim frekansına etkide bulunur.
- Paralel hizalama hatası: Motor mili ile yük milinin aynı eksende hizalanmadan bağlanması durumudur. Bu çalışma koşulunda oluşan titreşim frekansı, rotor dönme frekansının (f_r) iki katı büyüklüğünde radyal bir bileşen ile sisteme etkide bulunur.
- Açısal hizalama hatası: Motor mili ile yük mili eksenlerinin belli bir açıyla bağlandığı durumdur. Bu çalışma koşulunda oluşan titreşim frekansı, rotor dönme frekansında (f_r) eksenel bir bileşen ile sisteme etkide bulunur.
- Dengesiz yük bağlantısı: Motor miline bağlı yükün ağırlık merkezinin dönme ekseninde olmadığı dengesizlik (unbalance) durumudur. Oluşan titreşim frekansı, rotor dönme frekansında (f_r) radyal bir bileşen ile sisteme etkide bulunur.

Bunun yanında yapılan çalışmalarda [32] gösterilmiştir ki, yukarıda bağıntıları verilen frekans tanımları ancak her bir hatanın tek başına gerçekleşmesi durumunda faydalı olmaktadır. Özellikle uzun süre çalışan bir sistemde gerçekleşen malzeme yorulmasına bağlı genel bozulmalar tek başına bir hatayı işaret etmek yerine birden fazla bozulmanın aynı ayna etkidiği bir karmaşık durumu ortaya koymaktadır. Böylesi bir durumda yukarıdaki bağıntıların hatanın ayırt edilmesi amacıyla kullanımının etkili olamadığı gibi, bu anlamda hatanın arızaya dönüşmeden önce kestiriminin zor olduğu görülmektedir.

2.2 Rulman Arızalarında Kullanılan İşaret Tabanlı Durum İzleme Yöntemleri

Rulman arızalarında kullanılan durum izleme yöntemleri literatürde incelendiğinde, en çok karşılaşılan iki yöntem motor akımı ve motor titreşimi izleme yöntemleridir. Ancak bunların dışında uygulanan farklı yöntemler olarak; sıcaklık izleme, kimyasal izleme, akustik yayılım izleme, ses basıncı izleme ve lazer izleme bulunmaktadır [33, 71].

2.2.1 Titreşim işareti ile rulman arıza durumu izlenmesi

Rulman arıza durumu motor titreşim işareti ile kolaylıkla izlenebilmektedir. Bunun nedeni rulmanda gelişen herhangi bir bozulma durumunun motor titreşim işaretine ek frekans bileşenleri ile yansıyor olmasıdır [38, 40]. Bu konuya ilişkin ayrıntılar Bölüm 3.1.2’de verilmiştir.

Motor titreşim işareti gövde üzerinde uygun biçimde konumlandırılan ivmeölçer veya titreşim hız algılayıcıları ile ölçülebilmektedir. Bu yöntem güvenilirliği ve kolay işlenebilirliği bakımından uzun yıllardır araştırmacıların tercihi olmuştur. Ancak kullanılan titreşim algılayıcılarının yüksek maliyetli olması ve bu algılayıcıların ölçüm yapılacak her motora özel bir işlem ile yerleştirilme zorunluluğu yöntemin zayıf olduğu noktalardır [42].

En sık kullanılan iki yöntem aşağıda açıklanmıştır.

2.2.2 Akım işareti ile rulman arıza durumu izlenmesi

Rulman arızası ile motorda gelişen titreşim frekansları, rotorun motor hava aralığında düzensiz ya da eksenel olarak dengesiz dönmesine neden olur. Motor hava aralığında

oluşan her türlü aksel kaçıklık hava aralığı akı yoğunluğunu olumsuz etkileyecek, bunun sonucu olarak motorun şebekeden çektiği akımın içeriğinde bu titreşimleri yansıtan harmonik bileşenler bulunacaktır [27, 29].

Buna göre rulman arızasının motor akımında yarattığı frekans bileşenleri (f_{ra}), temel frekans olan şebeke frekansının her iki yanında bulunabilen yan bant (side-band) frekanslarıdır.

$$f_{ra} = |f_s \pm m \cdot f_t| \quad (2.7)$$

Yukarıdaki ifadesi ile ilgili yan bant frekansları hesaplanır. Burada $m=1,2,3,\dots, f_s$ şebeke besleme frekansı, f_t ise karakteristik titreşim frekansıdır [34].

Bu yöntemin tercih edilmesinin en önemli nedeni uygulama kolaylığıdır, zira herhangi bir ek donanım veya özel bir algılayıcı ihtiyacı olmadan, mevcut motor kontrol düzeneği üzerinden alınabilen motor akım bilgisi ile uygulanabilmektedir. Bunun yanında yöntemin uygulanmasındaki en önemli sorun; rulman arızası durumunda motor akımına yansıyan harmonik bileşenlerin, temel bileşene göre daha küçük genlikte olması ve algılanmasının zor olmasıdır. Bu bileşenlerin algılanabilmesi ancak belirgin olan karakteristik frekanslara bakılması ile sağlanabilir.

3. UYGULANAN MATEMATİKSEL YÖNTEMLER

Bu tez çalışmasında asenkron motor rulman arızasını tespit edebilmek üzere motora ilişkin titreşim işaretleri üç tür analiz yöntemi kullanılarak incelenmiş, bu amaçla ilgili yöntemler işaret üzerine sıralı olarak uygulanmıştır. Öncelikle asenkron motorda rulman arızasının yapay bir yaşlandırma süreci ile geliştirildiği deney düzeneğinden alınan titreşim işaretleri, zaman ve frekans tanım bölgelerinde analiz edilmiştir. Özellikle bu amaçla frekans tanım bölgesinde uygulanan spektrum analizi, güç spektrum yoğunluğu (GSY) fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra aynı işaretler istatistik parametreleri hesaplanarak istatistiksel olarak incelenmiştir. Son olarak istatistiksel analiz sonucunda; en büyük değişime uğrayan baskın parametre belirlenerek, Shannon Entropi yaklaşımı bir inceleme ortaya koyulmuştur.

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan analiz yöntemlerine ilişkin matematiksel tanımlar verilecektir.

3.1 Spektral Analiz ve Güç Spektrum Yoğunluğu

Rastlantısal bir analog işaretin spektral özelliklerinin belirlenebilmesi için en çok tercih edilen yöntem, bu işaretin Ayırık Fourier Dönüşümü (DFT) kullanılarak frekans tanım bölgesine dönüşümünün sağlanmasıdır. Bu şekilde işaretin tüm frekans bileşenlerine ulaşılır ve güç spektrum yoğunluğu (GSY) grafiği ile bileşenler incelenmesidir.

Zaman tanım bölgesinde bir $x(t)$ rastlantı işaretinin; N adet örnek alınarak, frekans çözünürlüğü Δf , örnekleme zamanı Δt ve $m=0,1,...,N-1$ olmak üzere, $m\Delta f$ frekansındaki dönüşümü

$$X(m\Delta f) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta t) \cdot \exp[-j2\pi km / N] \quad (3.1)$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanır [55-57]. Bununla birlikte $x(t)$ işaretinin $f=m\Delta f$ frekansındaki öz spektral güç yoğunluğu ise;

$$S_{xx}(f) = \frac{1}{N} |X(m\Delta f)|^2 \quad (3.2)$$

bağıntısı ile ifade edilir [55-57].

3.2 İstatistiksel Analiz ve Parametre Hesabı

Bir rastlantı (stokastik) işareti, algılandığı sisteme ait durum bilgileri içerdiğinden; bu işaretin istatistiksel parametreler ile incelenmesi ait olduğu sistemin durumu hakkında temel bilgileri verecektir.

Sistemden alınan işarete ait veri kümesinin $\{x_i\}$ olduğu ve n adet örnekten oluştuğu kabul edilirse; en çok incelenen istatistiksel parametrelerin başında ortalama değer (μ), standart sapma (σ), çarpıklık (s ; skewness) ve basıklık (k ; kurtosis) gelmektedir [57, 58].

3.2.1 Ortalama değer

Veri kümesine bağlı olarak veri dağılım eğrisinin konumunu belirlemek amacıyla öncelikli yapılan hesaplamadır. Buna göre ölçülen işaret genliklerinin aritmetik ortalaması yöntemi ile aşağıdaki tanım ile hesaplanır [58].

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.3)$$

3.2.2 Sapma, standart sapma ve etkin (RMS) değer

İlgili veri kümesinin değişkenliğini belirlemek üzere iki ölçü söz konusudur. Bunlar, veri dağılımında değerlerin merkeze olan yakınlığını ve kuyruk kısmının dağılım şeklini belirler.

Tek değişkenli veri dağılımının değişkenliğini belirlemek için kullanılan başlıca dağılım ölçüleri “sapma” (*variance*) ve “standart sapma” (*Standard deviation*)’ dir.

Histogram bu iki ölçütün beraberce değerlendirilebildiği etkin bir grafik analiz yöntemidir.

Buna göre “*sapma*”, ortalama değere olan uzaklığın karesinin aritmetik ortalaması olarak tanımlanır ve σ^2 ile gösterilir. Bunun yanında “*standart sapma*” ise sapma değerinin karakökü olarak ifade edilir ve σ ile gösterilir.

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \quad (3.4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (3.5)$$

Sapma (σ^2) ve standart sapma (σ) değerleri yukarıdaki bağıntılar ile hesaplanır ve her iki değer de veri dağılım eğrisinin merkez ve kenarlarındaki değişim değerini göstermek için kullanılır [58].

Ortalama değerin sıfır olması durumunda ($\mu=0$); standart sapma etkin değer (RMS – Root Mean Square) adını alır ve

$$RMS(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^2} \quad (3.5)$$

bağıntısı ile hesaplanır. RMS değeri de sıfır ortalamadan sapmanın bir ölçüsü olarak tanımlanabilir.

3.2.3 Çarpıklık (skewness) ve basıklık (kurtosis)

Bir veri dağılım eğrisinin normal dağılım eğrisinden (Gauss formundan) farklılaşma ölçüsünü belirleyen parametreler “çarpıklık” ve “basıklık” olarak ifade edilir.

Çarpıklık (s) veri dağılım eğrisindeki simetri kaybının ölçüsüdür. Bir veri kümesinin simetrik olması veri dağılımının merkez noktasına göre sağ ve sol kısmının benzer olması anlamına gelir. Buna göre çarpıklık,

$$s = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^3 \right]}{\sigma^3} \quad (3.6)$$

bağıntısı ile hesaplanır [57,58].

Basıklık (k) ise veri dağılım eğrisinin normal dağılım eğrisine göre daha dik yada daha basık olma durumunun ölçüsüdür ve

$$k = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^4 \right]}{\sigma^4} \quad (3.7)$$

bağıntısı ile hesaplanır [57,58].

Buna göre ilgili veri dağılım eğrisinin normal dağılım eğrisine eşit (Gauss formunda) olması durumunda yukarıda incelenen istatistiksel parametreler; ortalama değer ($\mu=0$), standart sapma ($\sigma=1$), çarpıklık ($s=0$) ve basıklık ($k=3$) değerlerini alacaktır.

Dolayısıyla bu parametreler bir rastlantı işaretinin istatistiksel davranışındaki değişimleri algılamak üzere kullanılabilir. Bu incelemeyi gerçekleştirirken kullanılacak Histogram çizimi tüm parametreleri beraber takip edebilmek bakımından etkili bir grafik analiz yöntemi olacaktır.

3.3 Entropi Tanımı ve Shannon Entropisi Hesabı

Entropi kelimesi ilk olarak 1865 yılında Alman bilim adamı Rudolf Clausius tarafından, Yunanca kökenli “en” ve “tropos” kelimelerinin birleştirilmesi ile türetilmiştir. Özellikle “enerji” kelimesi ile benzerliği nedeniyle, her türlü enerjinin sonunda işlevsel olmayacak bir forma dönüşeceği fikrini anlatmak üzere kullanıldı [64]. Aslında bu fikir, 1824 yılında Fransız bilim adamı Nicolas Leonard Sadi Carnot tarafından ortaya koyulan ve Termodinamiğin ikinci yasası olarak bilinen matematiksel ifadenin tanımından esinlenerek türetilmiştir.

Sonradan birçok bilim adamı tarafından benimsenen entropi kavramı, özellikle mekanik sistemlerde olasılık tabanlı bir istatistik yaklaşımı sunmak amacıyla 1877 yılında Avustralyalı bilim adamı Ludwig Boltzmann tarafından kullanılmıştır. 20. yüzyılın başlarında yaygınlaşan entropi kavramı, 1948 yılında Amerikalı bilim adamı

Claude Shannon tarafından, “olasılık ve bilgi kuramı” içerisinde kullanılan bir buluş olarak ortaya atıldı [62].

Entropi kavramı genel olarak bir sistemdeki düzensizlik, karmaşıklık veya belirsizliğin ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Bu bağlamda bir sistemdeki entropi artışı o sistemdeki düzensizlik, karmaşıklık veya belirsizliğin derecesinin arttığı anlamına gelir [58, 66].

3.3.1 Shannon entropi tanımı

Shannon tarafından, veri iletişimi ve bilgi kuramında kullanılmak üzere geliştirilen istatistik tabanlı entropi tanımı; rastgele bir işaretin olasılık dağılımına bağlı düzensizlik derecesini veya kaybolan bilgi değerini belirleyen matematiksel ifadeyi ortaya koymaktadır.

Buna göre bir haberleşme sisteminde iletişim sürecinin sonunda elde edilecek veri miktarı, bu süreçte ortaya çıkan bozucu etkinlikteki olayların varlığına bağlıdır. Eğer A kümesi n adet olayı kapsar ve olayların gerçekleşme olasılıkları bir p vektörü ile olarak ifade edilirse, burada $p = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ olasılık vektörü n adet pozitif sayıdan oluşur ve bu olasılıkların toplamı bire (1) eşittir.

Shannon (1948) tarafından ortaya koyulan tanıma göre, bozucu etkilerin gerçekleşme olasılıkları azaldıkça, süreç sonunda elde edilecek veri miktarı daha fazla olacaktır. Bu durumda ölçülen h veri miktarı, p olasılık değerine bağlı azalan bir fonksiyondur. Bu ilişki logaritmik bir ifade ile tanımlanmaktadır.

$$h(p_i) = \log_2(1/p_i) \quad (3.8)$$

Yukarıdaki bağıntıya göre $i=1,2,\dots,n$ ise; p_i değeri 0 ila 1 aralığında değişir, buna göre $h(p_i)$ ise sonsuz ila sıfır arasında değer alır. Burada h veri miktarının birimi, ikilik tabanda logaritmik bir ifade ile kullanıldığından, “bit” ile ifade edilir.

Dolayısıyla bu süreçte n adet, h veri miktarı dikkate alınarak; ortaya çıkabilecek olayların olasılık dağılımına bağlı olan H veri kapsamı, diğer bir ifadeyle “entropi” aşağıdaki şekilde hesaplanacaktır [62, 64, 66].

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i) \quad (3.9)$$

Yukarıdaki ifadeye göre entropi değeri sıfırdan küçük olamaz, ancak en düşük entropi değeri herhangi bir olayın olasılık değerinin bir olması durumunda, sıfır olacaktır [58, 62].

$$H_{\min} = 1 \cdot \log_2[1/1] = 0 \quad (3.10)$$

Ayrıca tüm olayların olasılık değerlerinin eşit olması durumunda ($p_i = 1/n$), entropi değeri, aşağıda verildiği gibi, en büyük değerini alacaktır.

$$H_{\max} = -\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \log_2(n) = n \frac{1}{n} \log_2(n) = \log_2(n) \quad (3.11)$$

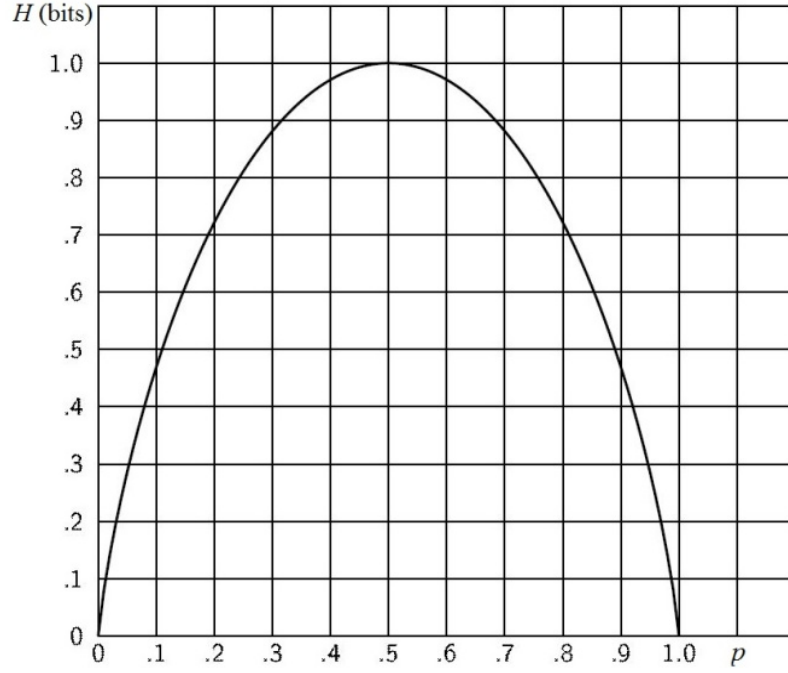
Bu durumda entropi H , olay sayısı n 'e bağlı düzenli artan bir fonksiyon olacaktır.

Entropi; iki elemanlı ($p_1 = p$ ve $p_2 = q$) bir olasılık kümesinin bulunduğu durumda ise $q = 1 - p$ olacağından, entropi değeri [58, 64],

$$H = -(p \log_2(p) + q \log_2(q)) \quad (3.12a)$$

$$H(p) = -p \log_2(p) - (1 - p) \log_2(q) \quad (3.13b)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Bu durumun grafik olarak gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir [62].



Şekil 3.1 : İki elemanlı olasılık durumunda Entropi grafiği.

Şekil 3.1’de gösterildiği üzere; iki elemanın bulunduğu bir durum kümesinde, olayların gerçekleşme olasılığının birbirine eşit ($p=q=0,5$) olması durumunda entropi değeri en büyük değerine ulaşacaktır.

3.3.2 Stokastik sistemlerde yaşlanma süreci ve entropi yaklaşımı

Her sistem çalışma ömrü boyunca çok çeşitli iç ve dış bozucu etkilere maruz kalır. Bu bozucuların etki boyutu küçük dahi olsa süreç içerisinde yarattığı tahribatlar birikerek sistemin yaşlanmasına ve en sonunda sistemde kalıcı bir arızaya ya da sistemin devre dışı kalmasına neden olur. Birçok araştırmacı yaşlanma sürecini, sistemin karakteristik özelliklerindeki bozulmalar ve buna bağlı çalışma başarımındaki azalma miktarı olarak değerlendirmektedir.

İstatistiksel anlamda yaşlanma süreci, sistemin zamana bağlı olarak hayatta kalma olasılığı ile ölçülmekte olup, zamanla azalan bir fonksiyona sahip olduğu öngörülmektedir. Bir güvenilirlik fonksiyonu ile tanımlanabilen bu süreçte stokastik entropi yaklaşımı kullanılabilir [67, 68].

Buna göre, S Stokastik sistemindeki entropi değeri, $H(A_i)$ ile ifade edilir ve A_i durumunun p_i olasılık değerine bağlı fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$H(A_i) = H[A(p_i)] = H(p_i) = \log_e(p_i) \quad (3.14)$$

Yukarıdaki tanımda $i=1, 2, \dots, n$ olarak verilmektedir.

Bu tanım, Shannon entropi tanımı ile bir miktar farklılık göstermekte olup, A_i durumunun *geri çevrilebilir* veya *geri çevrilemez* olduğunu belirler. Dolayısıyla $H(A_i)$ entropi değerinin küçük olması, A_i durumunun *geri çevrilebilir* olduğunu gösterir. Buna karşın sistem, A_i durumundan uzaklaştırılamıyor ise, A_i durumu *geri çevrilemez* olarak tanımlanır ve stokastik entropi değeri $H(A_i)$ bu durumda büyüktür.

S stokastik sisteminin iki duruma sahip olduğu varsayıldığında, sistem durumları A_s *sağlam* ve A_a *arızalı* olma durumları olarak kabul edilebilir. Dolayısıyla iki duruma ait olasılık değerleri; sağlam olma olasılığı p_s ve arızalı olma olasılığı p_a arasındaki ilişki,

$$p = p_s + p_a = 1 \quad (3.15)$$

$$p_s = 1 - p_a \quad (3.16)$$

ile tanımlanabilir. Her iki duruma ait Entropi değerleri ise, olasılık değerlerine bağlı olarak karşılıklı değişim sergiler. Sağlam olma durumuna ait entropi değeri H_s zaman içinde azaldıkça, arızalı olma durumuna ait entropi değeri H_a artma yönünde değişim gösterecektir [68].

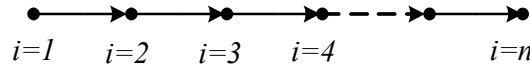
$$\lim_{p_s \rightarrow 1} H(p_s) = 0 \quad (3.17)$$

$$\lim_{p_s \rightarrow 0} H(p_s) = -\infty \quad (3.18)$$

Çalışma ömrü boyunca yaşlanan sistemlerde; sağlam olma olasılığı p_s azalacağından, (3.13) tanımına bağlı olarak entropi değeri de H_s azalacak ve sistemin *sağlam* olma durumundan geri çevrilebilmesi artacaktır. Buna karşın arızalı olma olasılığı p_a ise yaşlanma süresince artacağı için entropi değeri H_a artacak ve *arızalı* olma durumundan geri çevrilebilmesi mümkün olmayacaktır. Her iki duruma ait karşılıklı entropi ilişkisi (3.16) ve (3.17) limit fonksiyonları ile açıklanabilmektedir.

3.3.3 Yaşlanma sürecinin modellenmesi ve güvenilirlik Fonksiyonu

Stokastik sistemlerde yaşlanma sürecinin birbirini takip eden çevrimlerden oluştuğu varsayılır ise, doğrusal ve ardışıl gerçekleşen bu çevrimler; yaşlanma sürecini üstel bir formda hızlandıracak ve sistemi arızaya götürecektir. Bu modele ait gösterim Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 : Doğrusal yapılanmış bir sistemde yaşlanma süreci.

Yaşlanma sürecindeki her bir ardışıl yaşlanma çevrimine ait düğüm noktası, o çevrime ait olasılık değerini belirler. Her bir çevrim sonunda azalan olasılık değeri p_i fiziksel sistemin yaşlandığını ifade eder. Bununla birlikte (3.13) bağıntısında verildiği üzere; olasılık değerindeki değişim, $H(A_i)$ entropi değerindeki değişimi de belirleyecektir.

Yaşlanma süreci boyunca artan arıza olasılığını değerlendirmek üzere, ardışıl yaşlanma çevrimleri arasındaki Entropi farkı aşağıdaki ifade ile hesaplanabilir.

$$\Delta H_i = H_i - H_{i-1} \quad (3.19)$$

Burada i ($i=1,2,...,n$), Şekil 3.2’de gösterilen ardışıl yaşlanma çevrimlerine ait düğüm numarasıdır. Yaşlanma çevrimleri arasında iletilen entropi miktarını veren bu ifade "Entropi değişim farkı" olarak ifade edilebilir.

Bunun yanında sistemdeki yaşlanma eğilimi; entropi değişim farkının, olasılık değişim farkına oranı ile tanımlanır.

$$\frac{\Delta H_i}{\Delta p_i} = \frac{(H_i - H_{i-1})}{(p_i - p_{i-1})} \cong \tan \alpha_i \quad (3.20)$$

Stokastik entropi tanımında belirtildiği üzere, yaşlanma sürecindeki olasılık değişim değeri zamanla orantılıdır ve buna bağlı olarak (3.19) tanımı ile ortaya çıkan sistem durumu zamanla azalan eğilimlidir. Bu bakımdan entropi değişimi aşağıdaki biçimde de ifade edilebilir.

$$\Delta H_i = -\lambda_i \cdot t \quad (3.21)$$

Burada λ_i her bir yaşlanma çevrimine ait zaman sabitidir ve sıfırdan büyüktür.

Buna göre stokastik bir sistemin yaşlanma sürecine ait güvenilirlik fonksiyonu, (3.13) ve (3.20) eşitlikleri dikkate alınarak, olasılık değerinin zamana bağlı üstel bir ifadesi olan aşağıdaki,

$$p_i(t) = k \cdot e^{(-\lambda_i \cdot t)} \quad (3.22)$$

bağıntısı ile tanımlanır [56, 68]. Burada $k > 0$ olacaktır. Bu bağıntıya göre sistemde yaşanan doğrusal nitelikli bir yaşlanma süreci, sistem güvenilirliğinin üstel karakteristikli ve zamanla azalan bir değişim içinde olmasına neden olacaktır.

4. ASENKRON MOTORDA RULMAN ARIZASI YAŞLANDIRMA DENEY DÜZENEGİ VE VERİ TOPLAMA SİSTEMİ

Bu bölümde asenkron motorlarda gelişen rulman arızalarının özelliklerini belirleyebilmek üzere kurulmuş deney düzeneği tanıtılacak ve yapay yaşlandırma sürecinde uygulanan yaşlandırma çevrimlerine ait işlemler açıklanacaktır.

Bu deney düzeneği *The University of Tennessee-Knoxville* (UTK) / Amerika Birleşik Devletleri, *Maintenance and Reliability Center*'da kurulmuş ve asenkron motor arıza özelliklerinin belirlenmesi üzerine *İstanbul Teknik Üniversitesi* (İTÜ) ile ortak çalışmalar yürütülmüş ve birçok yayın çıkarılmıştır [45, 48, 54, 55].

Deney düzeneğinin amacı, asenkron motorun endüstriyel ortamda maruz kaldığı elektriksel, mekanik ve ısı zorlanma koşullarını deney ortamına taşıyarak, asenkron motorun yaşlanma sürecini ve bozulmaları inceleyebilmektir.

Bu amaçla deney düzeneğindeki asenkron motora yedi aşamalı, tekrarlanan deney çevrimleri uygulanmıştır. Her deney çevriminden sonra ise motor performansını ölçmek ve gelişen bozulma seviyesi incelemek üzere performans testleri yürütülmüştür [51, 52].

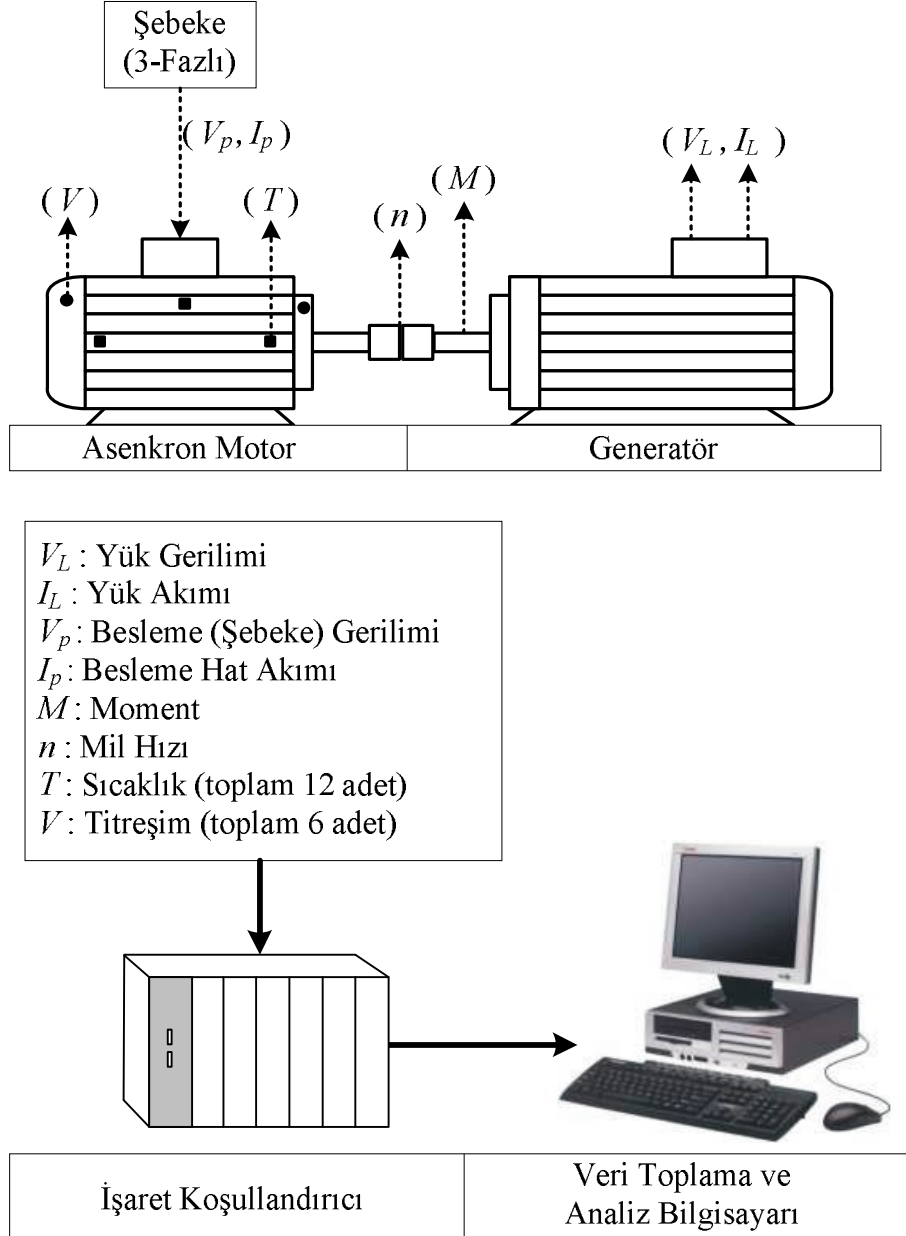
Deney düzeneği hazırlanırken “*IEEE Standard Test Procedure for Evaluation of Systems of Insulation Materials for Random-wound AC Electrical Machinery*” ve “*Standard for Systems of Insulating Materials*” yönergeleri dikkate alınmıştır [51].

Bu tez çalışmasında özellikle elektrik boşalma akımlarının neden olduğu; Elektrik Boşalması Oyluması (EDM-Electrical Discharge Machining) olarak bilinen rulman arızasının gelişimi incelenmiş; bu bakımından ilgili deney düzeneğinden elde edilen titreşim işaretleri kullanılmıştır.

4.1 Yaşlandırma Deney Düzeneğinin Yapılandırması

Deney düzeneğinde 5HP gücünde, 4 kutuplu, *Emerson Electric Company* üretimi bir asenkron motor kullanılmıştır. Yürütülen deneyler üç adet eşlenik motor için tekrarlanmıştır [51,52]. Motorlar üçgen bağlı olup plaka bilgileri Ek A'da verilmiştir.

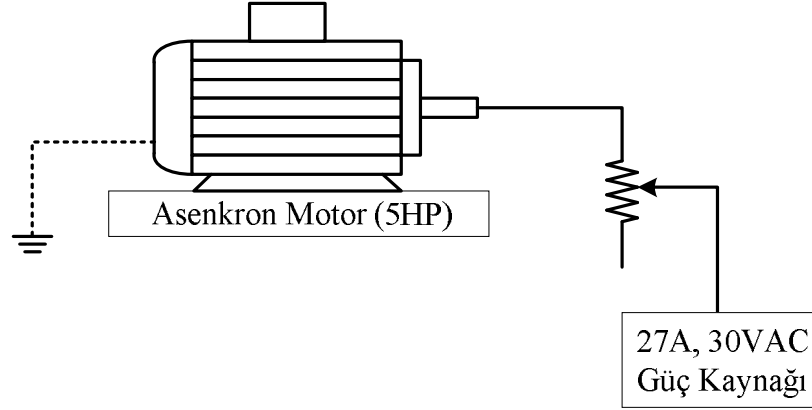
Uygulanan her bir yaşlandırma çevriminden sonra motor performansını test etmek üzere bir elektriksel yük düzeneği kullanılmıştır. Burada 3kW, 1800 devir/dak.'lık bir generatör (dinamometre), motor bağlantısı için uygun bir bağlantı (kaplin) elemanı; bunun yanında elektriksel, mekanik ve ısıl ölçümler için gerekli algılayıcılar bulunmaktadır. Deney düzeneğinin şeması Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Motor performans test düzeneği ve veri toplama-analiz sistemi.

Bu düzende farklı yük koşullarında motor performans testleri yapılarak; motora ilişkin besleme akımları ve gerilimleri, yük akımı ve gerilimi, motor yük moment, motor mil hızı ve birden fazla farklı noktadan alınan sıcaklık ve titreşim ölçümleri veri toplama ve analiz sistemine aktarılmıştır.

Ayrıca deney düzeneğinin kapsamında; elektrik boşalma akımlarının neden olduğu rulman arızasının incelenebilmesi için, benzer akımların geçebilmesini sağlayan ayrı bir düzenek kurulmuştur. Şekil 4.2’de gösterilen bu yapıda; 30VAC, 27A kapasiteli bir kaynaktan motor miline 30 dakika boyunca, yüksüz koşulda gerilim uygulanmaktadır [51, 52]. Bu işlem her yaşlandırma çevriminde tekrarlanmıştır.



Şekil 4.2 : Rulman akımı ile yaşlandırma işlemi için kullanılan düzenek.

Yapay kaynak ile oluşturulan elektrik boşalma akımları, rulmandan toprağa geçerken rulman içi eleman yüzeylerinde (bilya, iç ve dış bilezikler) kıvılcım ve atlamalara bağlı bozulmalara neden olmaktadır. Buna bağlı olarak bozulan yüzeylerde ortaya çıkan oyuklar (çukur) ise motorun hareketi ile yüksek seviyeli titreşimler ve gürültü meydana getirmektedir.

4.2 Yaşlandırma Süreci ve Performans Deneyleri

Asenkron motorlarda elektrik boşalma akımına bağlı rulman yaşlandırma süreci; yapay elektrik boşalma akımı uygulamasının ardı sıra ısı ve kimyasal yaşlandırma çevrimlerinden oluşmaktadır.

Isıl yaşlandırma sürecinde motor 140°C’lik sabit sıcaklıkta bir fırında belirlenen bir süre ile ısıtılır. Kurulan fırın düzeneği laboratuvar ortamına uygun olarak tesis edilmiştir. Buna göre fırın içi sıcaklık değişiminin sabit kalması amacıyla sıcaklık kontrolü ve temiz hava giriş-çıkış kontrolü tesis edilmiştir. Bu düzeneğe ilişkin temel özellikler Ek A’da verilmiştir.

Buna göre uygulanan bir yaşlandırma çevriminin adımları aşağıdaki gibidir:

1. Adım: 5HP gücündeki asenkron motor, elektrik boşalma akımının uygulandığı düzeneğe (Şekil 4.2) 30 dakika süre ile çalıştırılır.
2. Adım: Motor 140°C’de ısıtılmış fırına yerleştirilir.
3. Adım: Motor bu sıcaklıkta 72 saat boyunca ısıtılır ve sonrasında fırından çıkarılarak 6 saat’lik bir soğuma sürecine bırakılır.
4. Adım: Soğuyan motor 15 dakika boyunca tüm gövdesi suyun içinde kalacak şekilde batırılır ve sonrasında hızlıca 72 saat’lik bir ısınma süreci için tekrar fırına yerleştirilir. Bu işlemin amacı motor parçalarında paslanmaya neden olmaktır.
5. Adım: 72 saat sonra fırından çıkarılan motor tekrar 6 saat’lik soğuma sürecine bırakılır.
6. Adım: Motor yük performans düzeneğinde test edilir.

Motor performans testleri sırasında motor anma yükünün %0’dan %115’ine kadar olan yük kademelerinde (%0, %0.1, %25, %50, %75, %100, %115) aşağıdaki ölçümler alınmıştır.

- Motor sıcaklığı (12 ayrı noktadan alınan ölçümler)
- Motor 3 faz gerilimleri
- Motor 3 faz akımları
- Generatör yük akımı
- Generatör yük gerilimi
- Motor mil hızı
- Motor yük momenti
- Motor titreşimleri (6 ayrı noktaya yerleştirilen ivmeölçer ölçümleri)

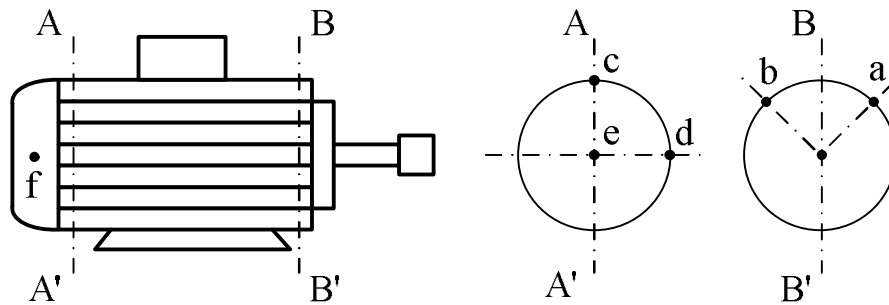
Bu veriler algılayıcılardan toplanarak, *National Instruments* (NI) marka bir işaret koşullandırıcı arabiriminde filtreleme ve kuvvetlendirme işlemleri uygulandıktan sonra analiz edilmek üzere analiz bilgisayarına aktarılır.

Bu tez çalışmasının konusu kapsamında uygulanan analiz yöntemleri gereği; sadece titreşim ölçüm işaretleri kullanılmış olup, diğer mekanik ve elektriksel ölçüm değerleri dikkate alınmamıştır.

Kullanılan titreşim işaretleri, motor üzerinde 6 farklı noktada bulunan yüksek bant genişlikli ivmeölçerler yardımıyla ölçülmektedir. Bu algılayıcıların motor üzerindeki konumları aşağıda verilmiş ve Şekil 4.3’de gösterilmiştir.

- Motor mil tarafı, saat 2:00 konumu (a)
- Motor mil tarafı, saat 10:00 konumu (b)
- Motor fan tarafı, dikey (c)
- Motor fan tarafı, yatay (d)
- Motor fan tarafı, eksenel (e)
- Motor gövdesi (f)

Deney düzeneğinde kullanılan ivmeölçerlerin teknik özellikleri Ek A’da verilmiştir.



Şekil 4.3 : Motor üzerinde kullanılan ivmeölçerlerin yerleşimi.

Her bir yaşlandırma süreci sonrasında motor performans düzeneğinde farklı yük koşullarında çalıştırılan motorlardan alınan veriler 12kHz örnekleme frekansı ile 10s süresince toplanmıştır.

Kullanılan *National Instruments* marka işaret koşullandırma arabiriminde SCXI-1141 modeli 8 kanallı eliptik alçak geçiren bir filtre modülü bulunmaktadır. Ana görevi ivmeölçerden alınan ölçümleri 4kHz kesim frekansı ile filtrelemek ve ayarlanabilir bir kazanç değeri ile kuvvetlendirmektir. Bu filtre ile aynı zamanda sayısallaştırılan işaretteki örtüşme (aliasing) etkisi giderilmektedir.

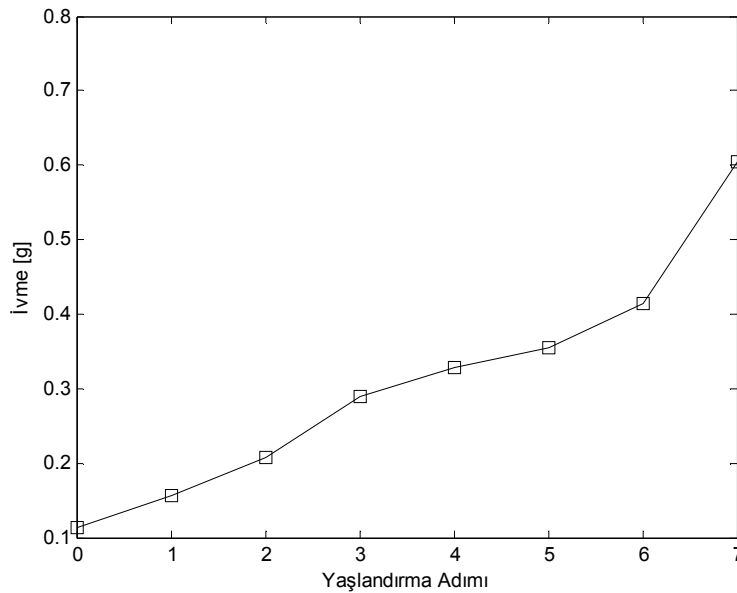
4.3 Rulman Arızasına İlişkin Analiz Edilecek Titreşim Bilgisinin Belirlenmesi

Motor yaşlandırma deneyleri sırasında üç adet 5HP gücünde 4 kutuplu asenkron motor kullanılmıştır. Her bir motor için toplam yaşlandırma süreci, yukarıda adımları açıklanan yaşlandırma çevriminin 7 defa ardışıl uygulanmasından oluşmaktadır.

Tüm motorlar için yaşlandırma sürecinin tamamlanması sonrasında #11, #12 ve #13 numaraları ile kodlanan motorlarda kalıcı rulman arızasının olduğu gözlenmiştir. Bu durum yüksek titreşim seviyesi ve rotor sıkışması ile kendini göstermiştir [52].

Her bir motorun her bir yaşlandırma çevrimi sonrasında, motor anma yükünün %0'dan %115'ine kadar olan yük kademelerinde performans ölçümlerinin alınması ile bu koşullara ait titreşim işaretleri de kaydedilmiştir.

Daha önce yapılan çalışmalarda da [51, 52], ölçüm değerleri alınan her bir titreşim işaretinin farklı yük koşullarındaki etkin değerleri (RMS) hesaplanmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda RMS değerlerinin grafik analizi göstermiştir ki; #11 no'lu motorun her bir yaşlandırma çevrimi sonrası %100 yük koşulunda, “motor mil tarafı saat 2:00 konumlu (a)” (Şekil 4.3'te verilen) ivmeölçerinden algılanan titreşim işaretinin RMS değeri düzenli artan bir eğilimdedir. Bu eğri Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : Motor mil tarafı-saat 2:00 konumlu ivme ölçerin %100 yük koşulunda aktardığı titreşim işaretinin etkin değer eğrisi.

Bu nedenle; bu tez çalışmasında, #11 no'lu motordaki, motor mil tarafı saat 2:00 konumlu ivmeölçerden, %100 yük koşulunda alınan titreşim işaretleri incelenecektir.

5. RULMAN ARIZASINA İLİŞKİN TİTREŞİM İŞARETLERİNİN ZAMAN VE FREKANS TANIM BÖLGESİNDEKİ ANALİZİ

Çalışmanın bu bölümünde, asenkron motor elektrik boşalması tipindeki rulman akımlarının neden olduğu yapısal bozulmanın gelişimi, yaşlandırma deneylerinden elde edilen titreşim ölçüm işaretlerinin zaman ve frekans tanım bölgelerinde işaret tabanlı analizi ile incelenmiştir.

Bu amaçla bir önceki bölümde uygunluğu tespit edilen, #11 no'lu motorun %100 yük koşulunda, motor mil tarafı saat 2:00 konumlu ivmeölçerden alınan titreşim ölçüm işaretleri kullanılmıştır.

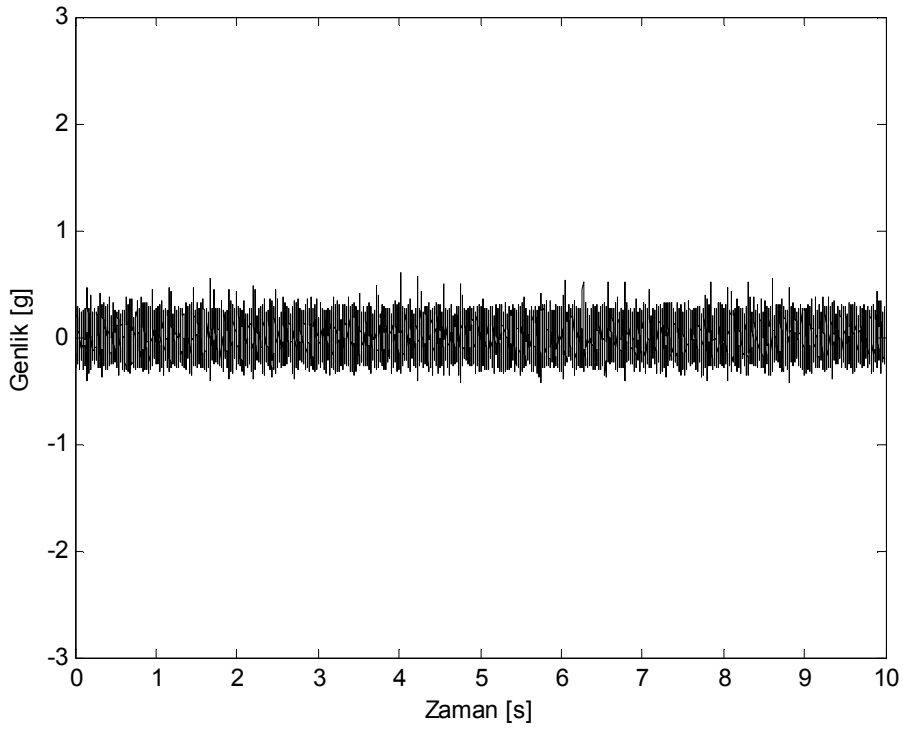
Bu incelemeler kapsamında öncelikle her yaşlandırma çevrimine ait titreşim işaretleri, herhangi bir sayısal filtre ile koşullandırılmadan zaman ve frekans tanım bölgelerinde analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında, rulmandaki bozulma etkisinin yüksek frekans bölgesinde (1500Hz ve üzeri) daha baskın olduğu sonucuna varılarak, bu frekans bölgesinde ikinci aşamada yeni bir inceleme için ham titreşim işareti yüksek geçiren bir filtre ile koşullandırılmıştır.

5.1 Ham Titreşim İşaretlerinin İncelenmesi

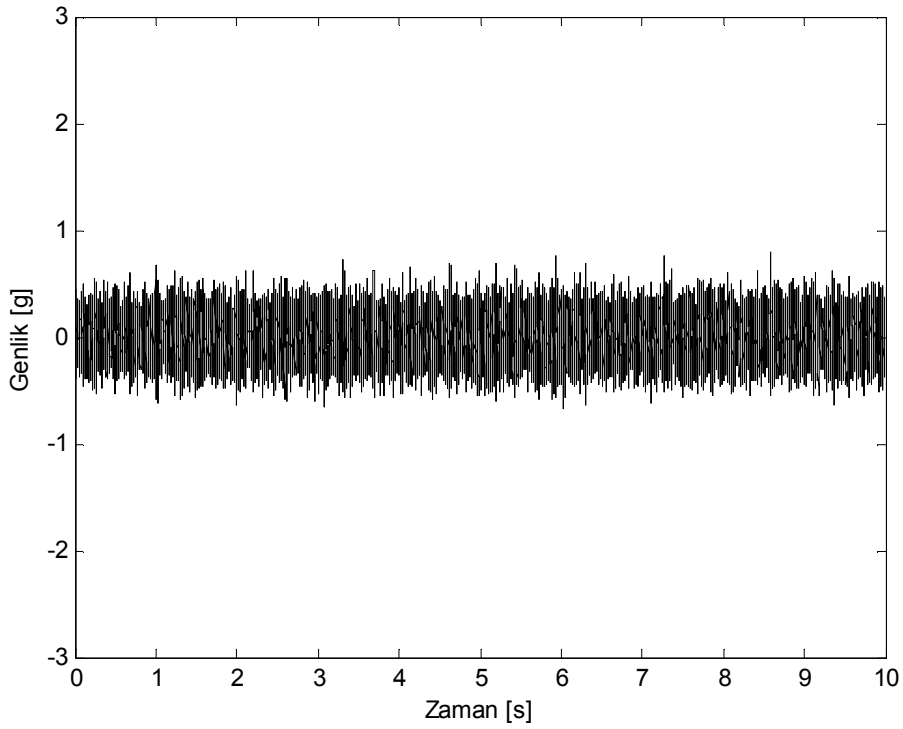
5.1.1 Zaman tanım bölgesinde inceleme

Kaydedilen ham titreşim işaretleri; sağlam durum ve her bir yaşlandırma çevrimine ait olmak üzere, zaman tanım bölgesinde incelendiğinde sağlam durumdan son yaşlandırma çevrimine kadar her aşamada titreşim işaretinin genliğinde artış olduğu görülmektedir.

Sağlam durum ve her bir yaşlandırma çevrimine ait titreşim genlik eğrileri Şekil 5.1'de sırasıyla gösterilmiştir.



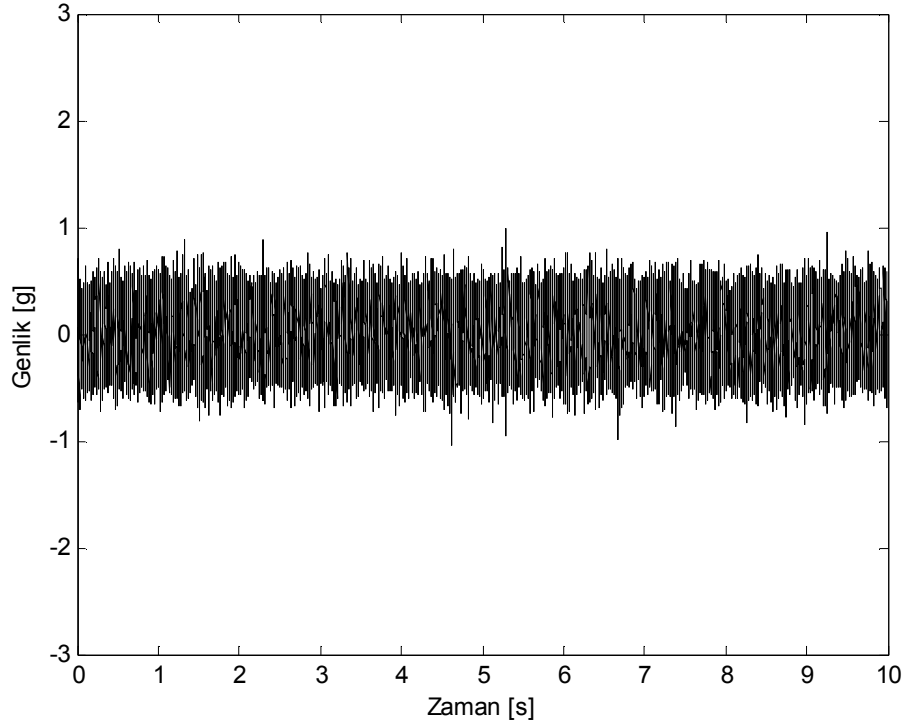
(a) Filtre öncesi, sağlam durum titreşim genliği.



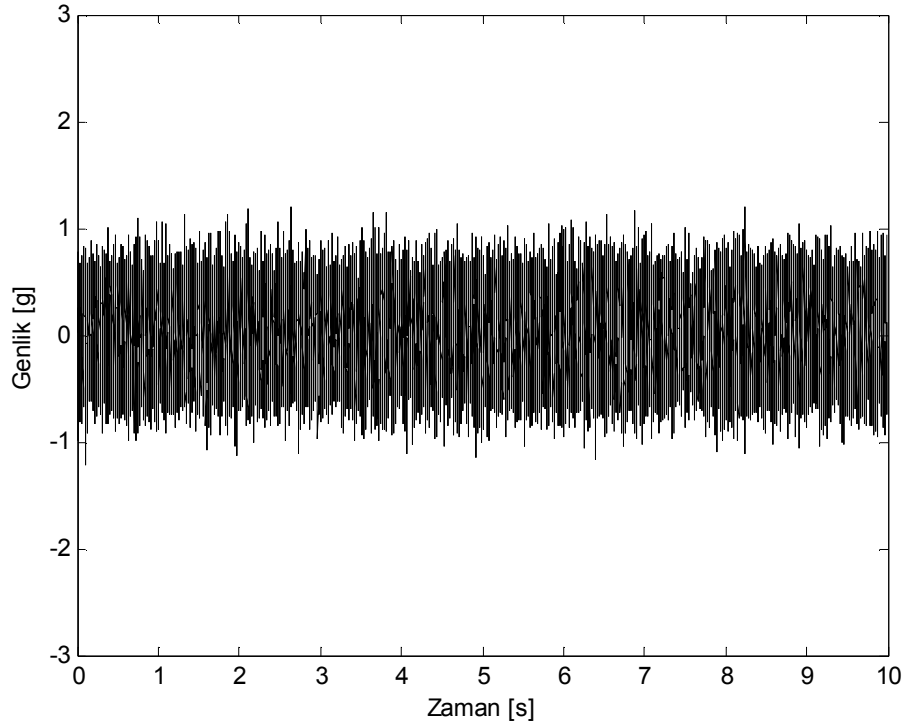
(b) Filtre öncesi, yaşlandırma 1. çevrimi titreşim genliği.

Şekil 5.1 : Filtre öncesi titreşim genlikleri.

(a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim



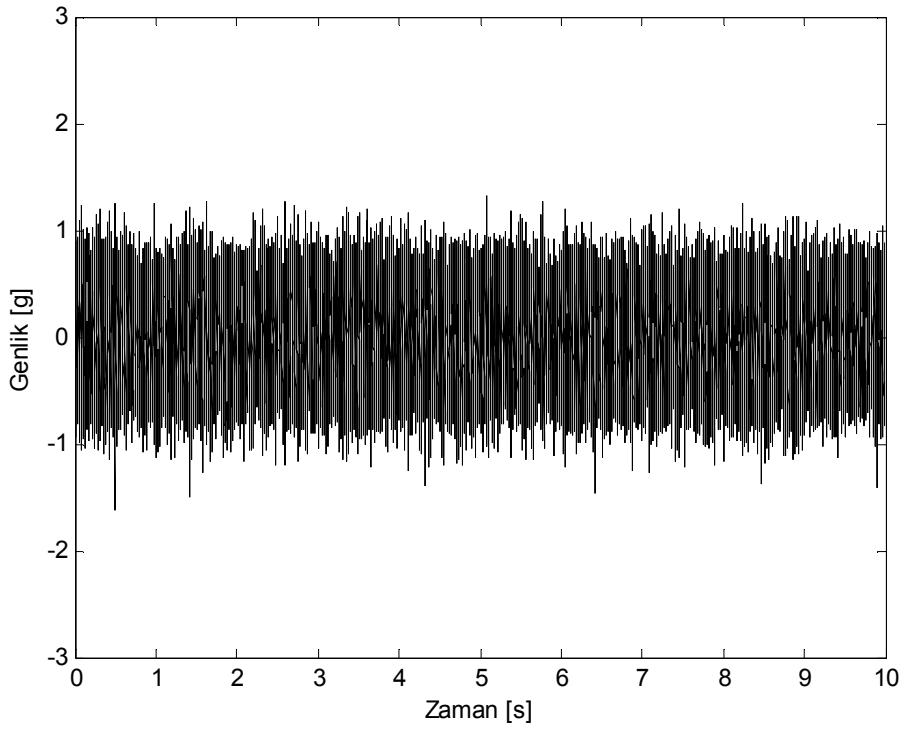
(c) Filtre öncesi, yaşlandırma 2. çevrimi titreşim genliği.



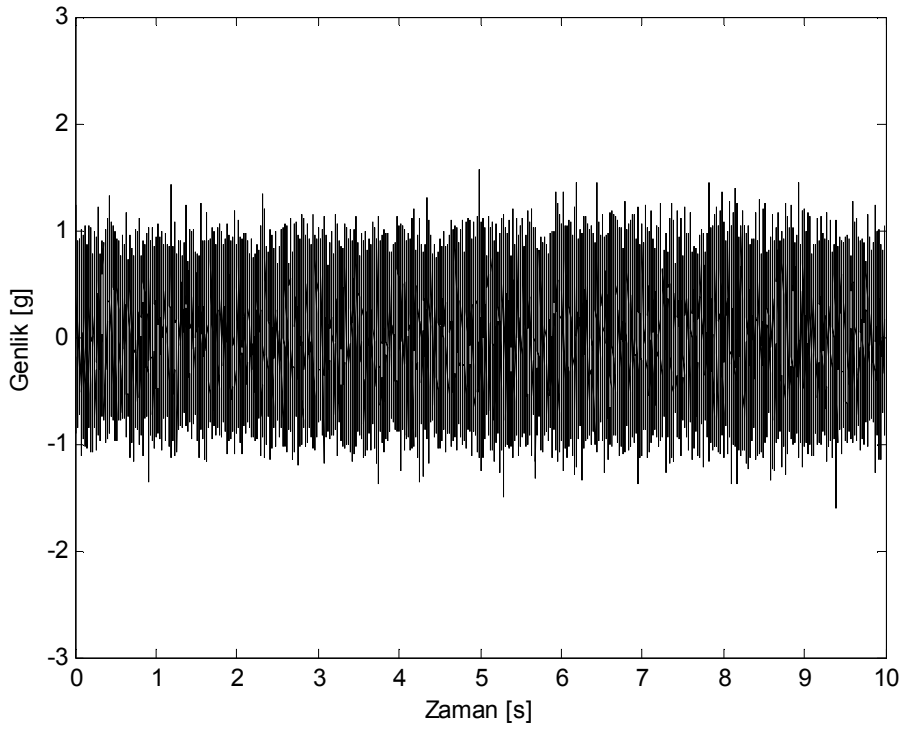
(d) Filtre öncesi, yaşlandırma 3. çevrimi titreşim genliği.

Şekil 5.1 (devam): Filtre öncesi titreşim genlikleri.

- (a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim



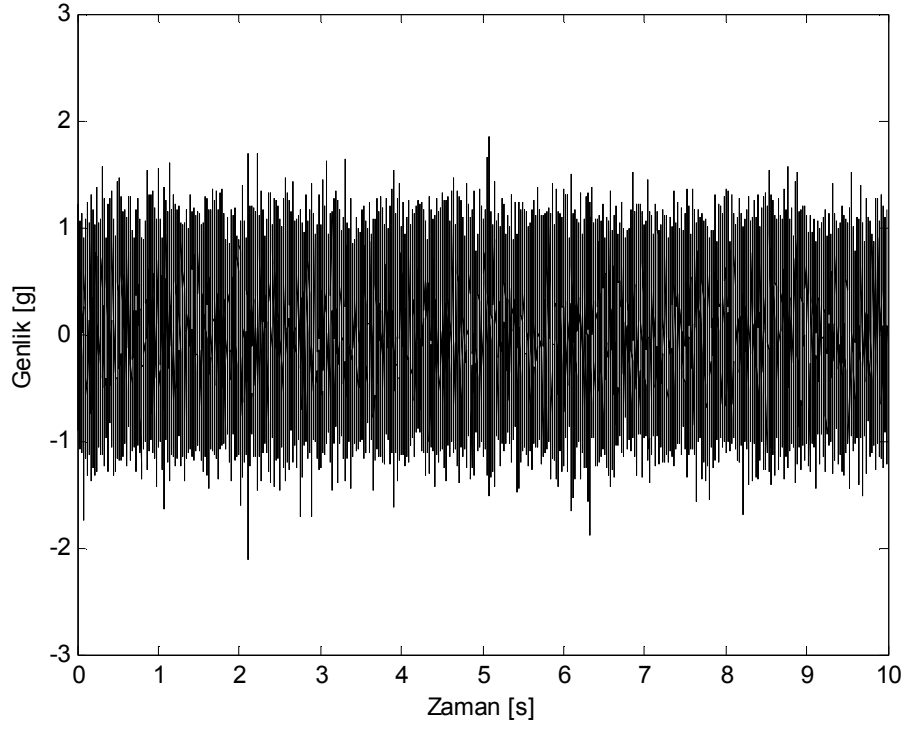
(e) Filtre öncesi, yaşlandırma 4. çevrimi titreşim genliği.



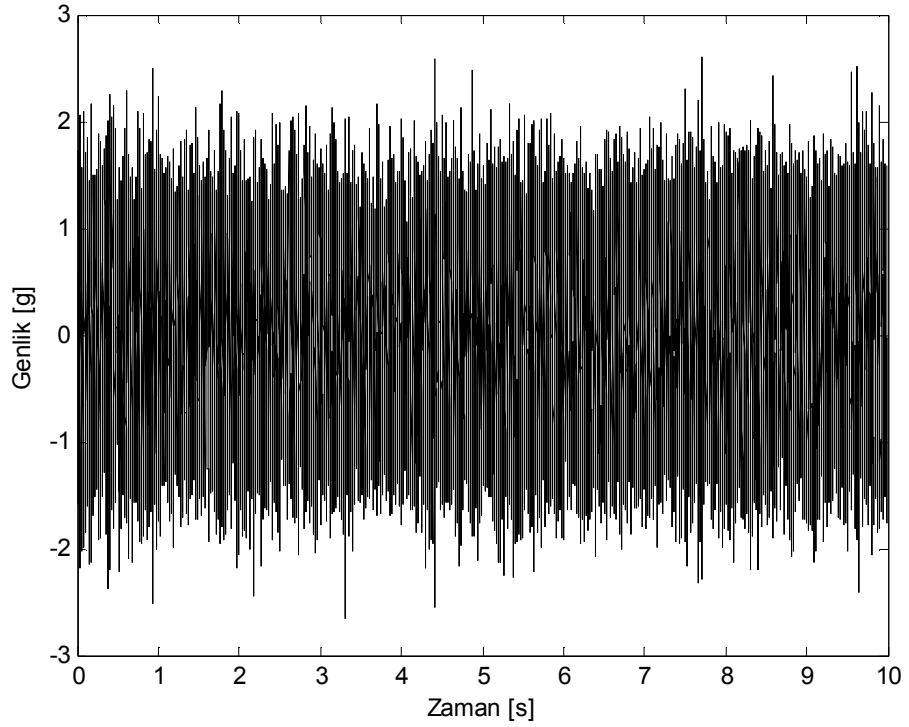
(f) Filtre öncesi, yaşlandırma 5. çevrimi titreşim genliği.

Şekil 5.1 (devam): Filtre öncesi titreşim genlikleri.

- (a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim



(g) Filtre öncesi, yaşlandırma 6. çevrimi titreşim genliği.



(h) Filtre öncesi, yaşlandırma 7. çevrimi titreşim genliği.

Şekil 5.1 (devam): Filtre öncesi titreşim genlikleri.

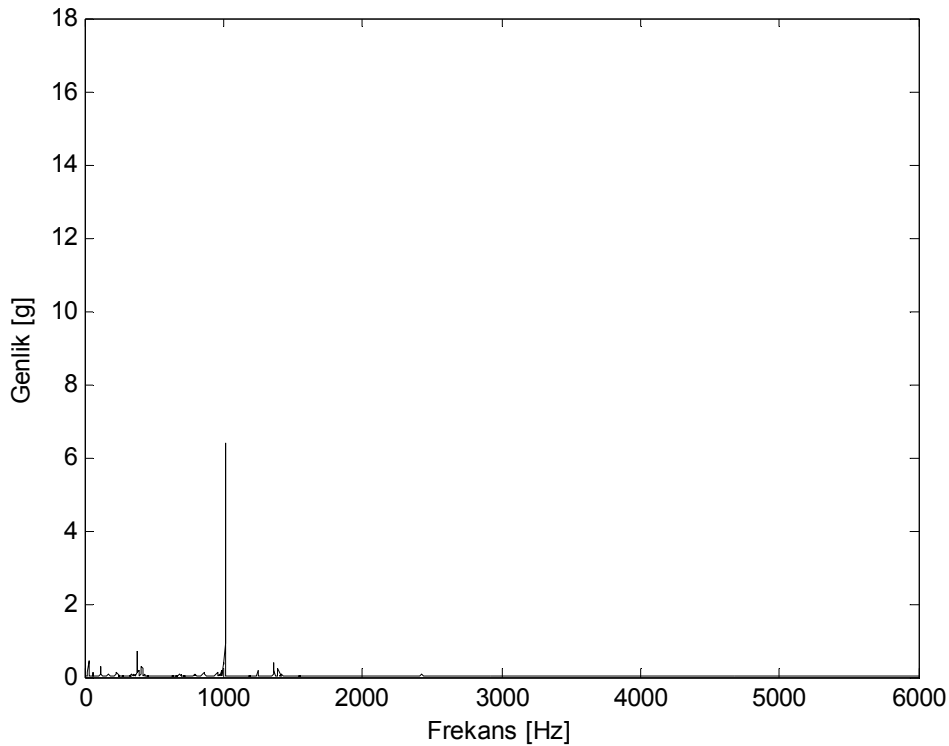
- (a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim

5.1.2 Frekans tanım bölgesinde spektral inceleme

Yaşlanma sürecinin ilerlemesi ile titreşim işaretinin genliğinde ortaya çıkan artış, rulmandaki bozulma miktarının arttığını bildirmekle birlikte, bozulmanın özelliklerini tanımlayabilmek için yeterli bilgi sunmamaktadır. Bu amaçla işaretin frekans tanım bölgesindeki spektral analizi yapılarak frekans bileşenleri incelenmiştir.

Sürekli işaretin frekans tanım bölgesine dönüşümü sırasında, 12kHz örnekleme frekansında 10s süresince alınan titreşim işaretine, örtüşmesiz *Hanning* pencere fonksiyonu kullanılarak 120000 örnek ile 4096 noktalı *Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT)* işlemi uygulanmıştır.

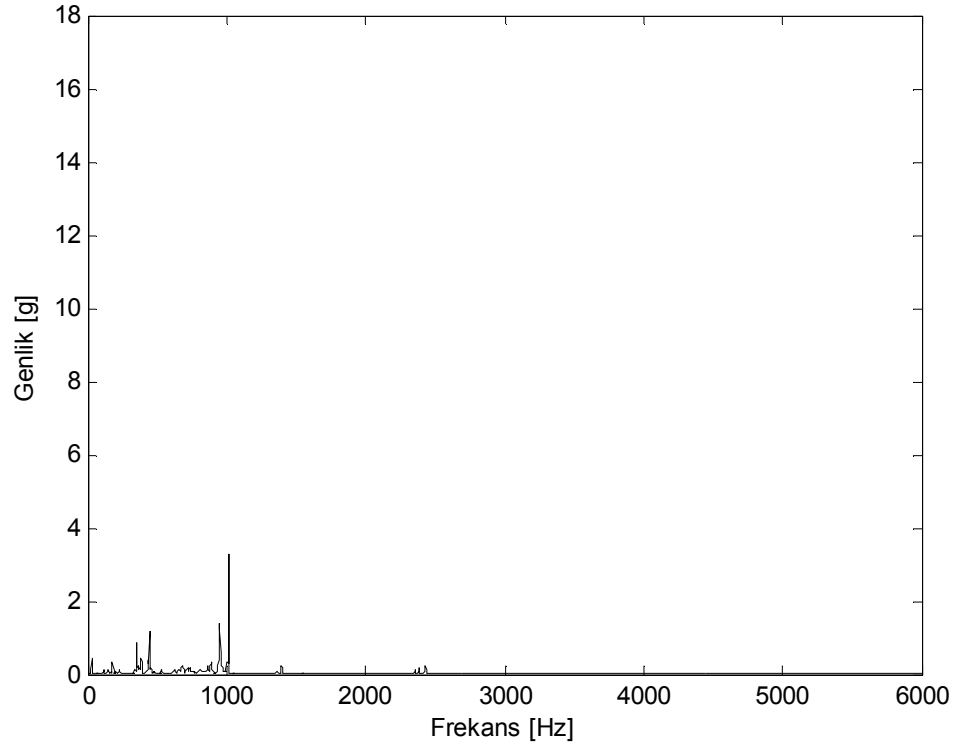
Her bir yaşlandırma çevrimi için hesaplanan Güç Spektrum Yoğunluğu (GSY) fonksiyonları Şekil 5.2'deki grafik çizimler ile gösterilmiştir. Güç Spektrum Yoğunluk fonksiyonu Bölüm 3'de verilen (3.1) bağıntısı ile tanımlanır.



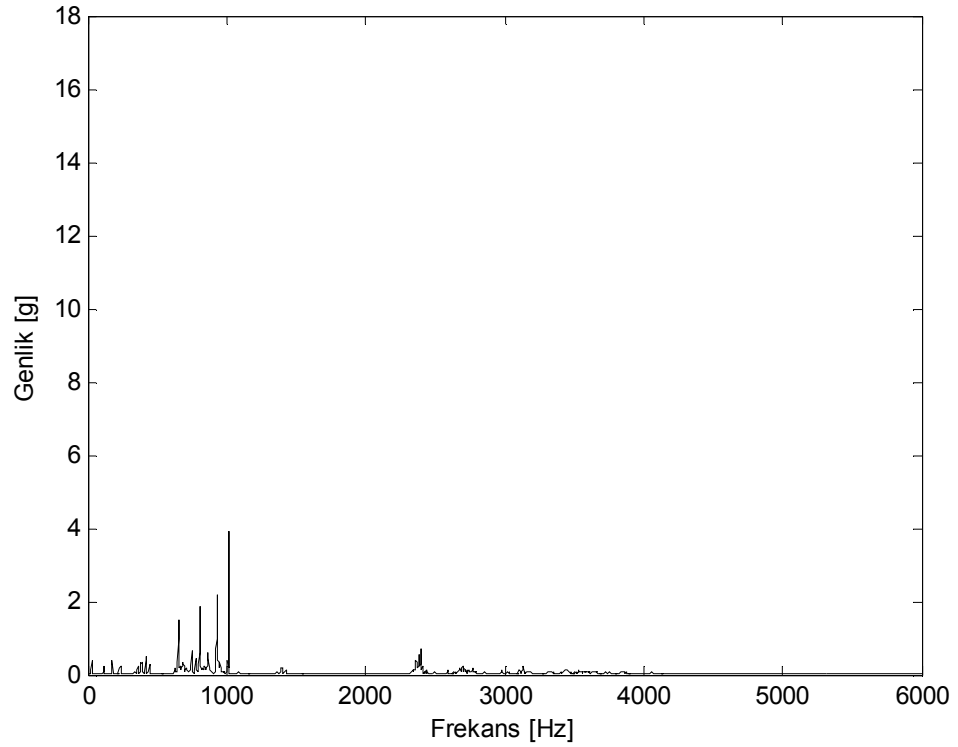
(a) Filtre öncesi, sağlam durum titreşim işareti GSY.

Şekil 5.2: Filtre öncesi titreşim işareti GSY.

- (a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim



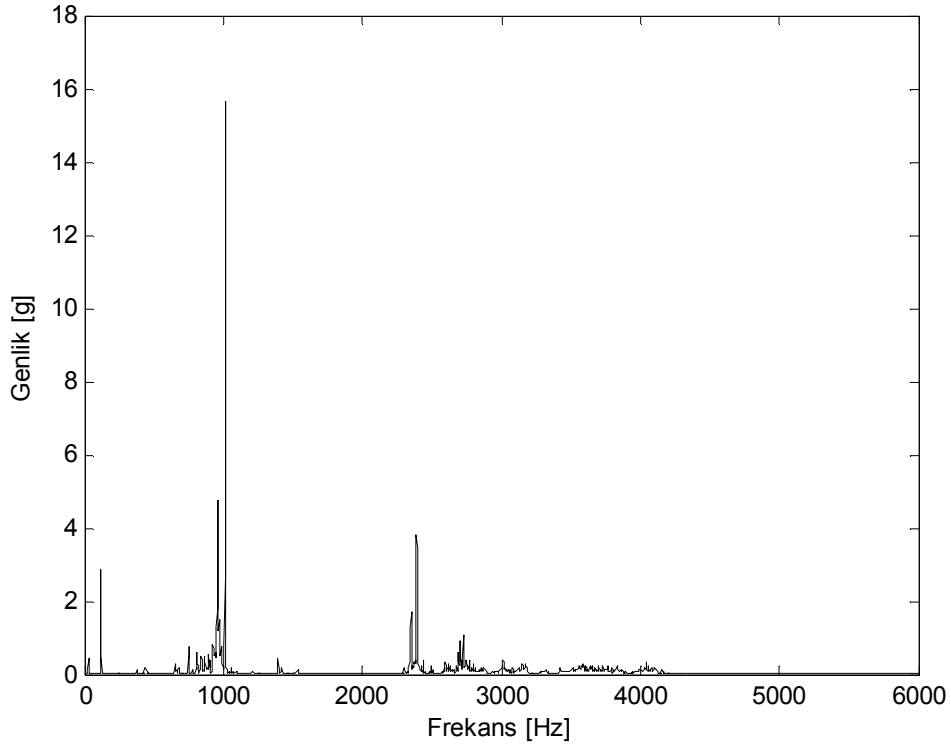
(b) Filtre öncesi, yaşlandırma 1. çevrimi titreşim işareti GSY.



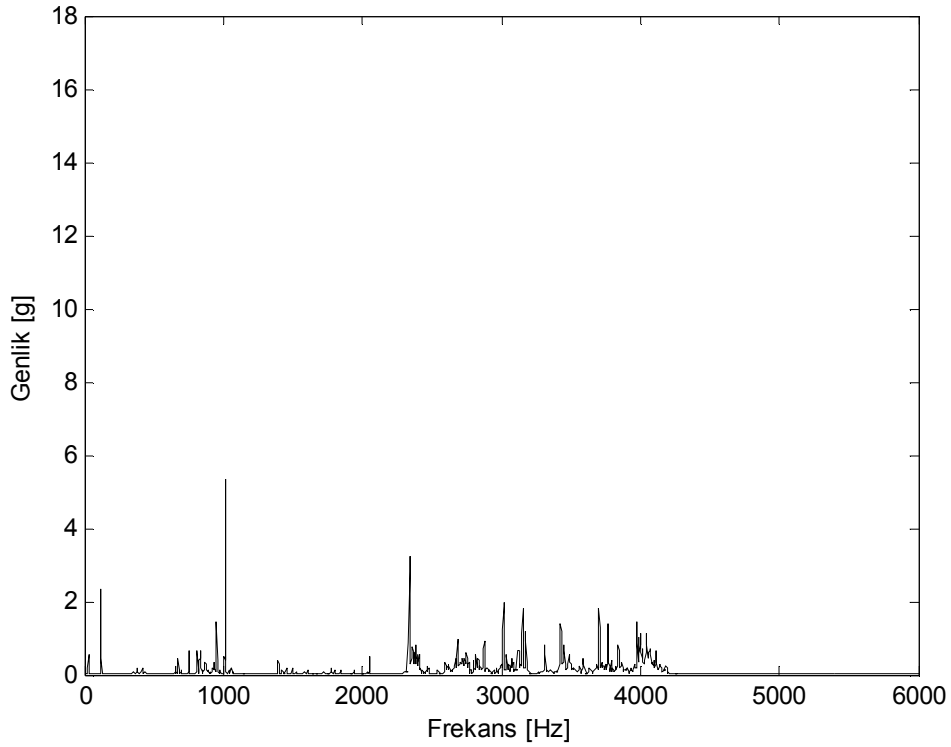
(c) Filtre öncesi, yaşlandırma 2. çevrimi titreşim işareti GSY.

Şekil 5.2 (devam): Filtre öncesi titreşim işareti GSY.

(a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim



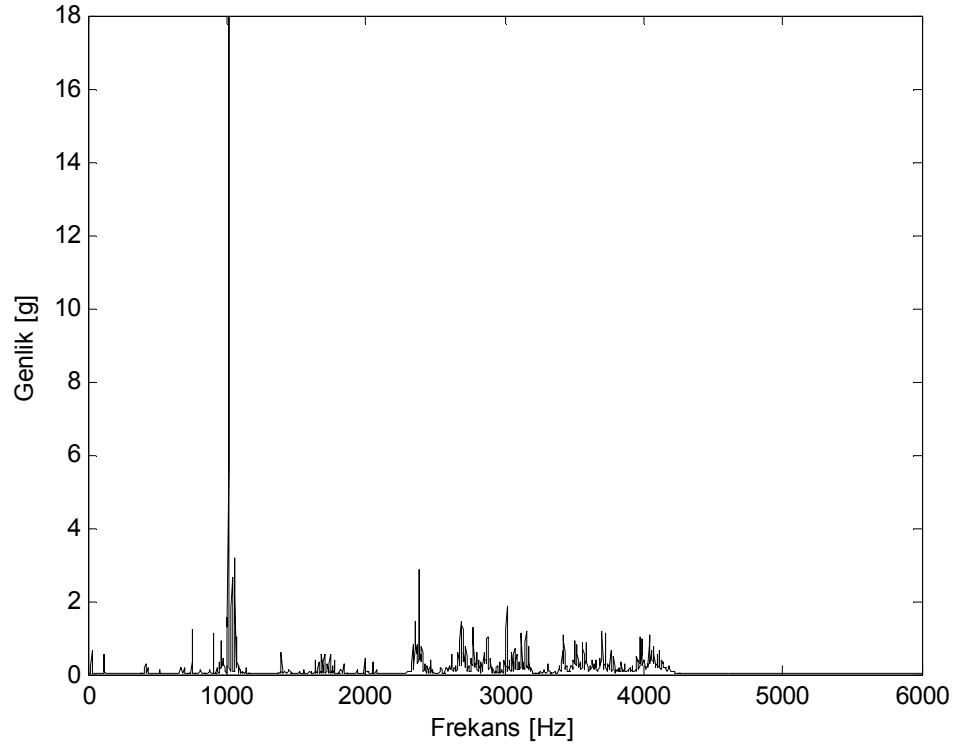
(d) Filtre öncesi, yaşlandırma 3. çevrimi titreşim işareti GSY.



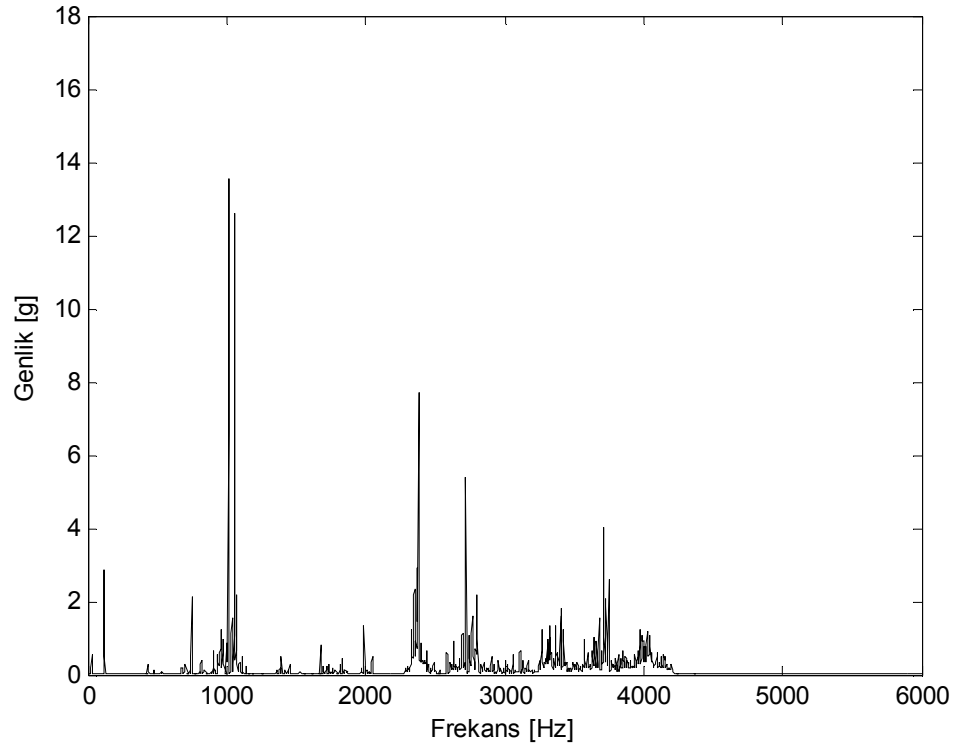
(e) Filtre öncesi, yaşlandırma 4. çevrimi titreşim işareti GSY.

Şekil 5.2 (devam): Filtre öncesi titreşim işareti GSY.

- (a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim



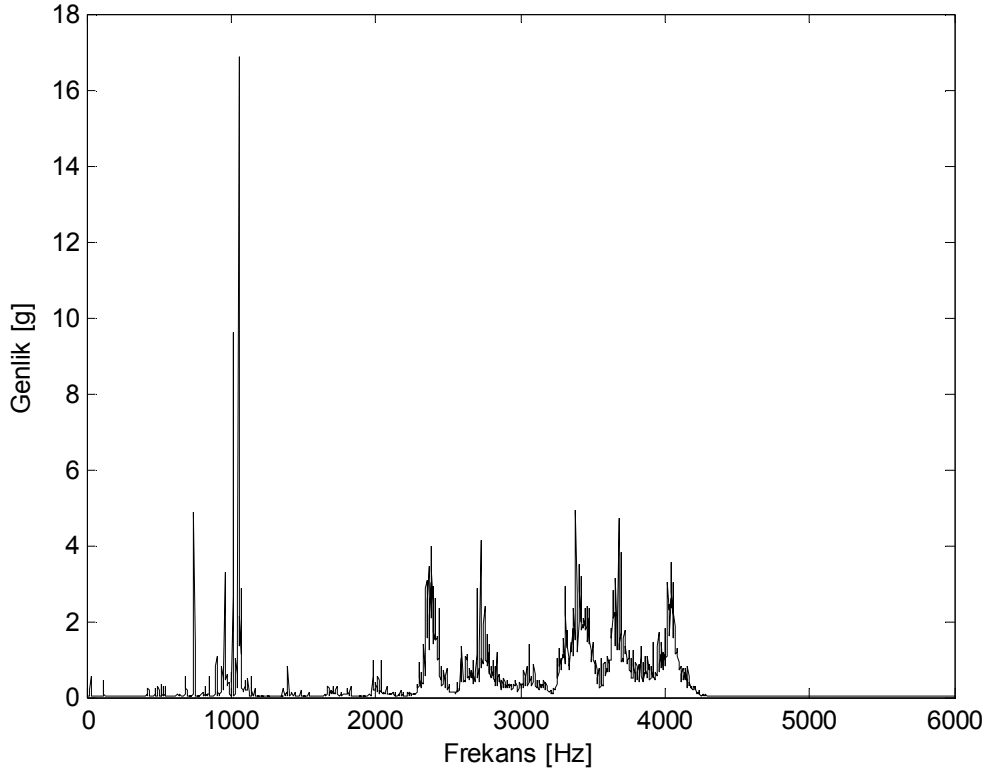
(f) Filtre öncesi, yaşlandırma 5. çevrimi titreşim işareti GSY.



(g) Filtre öncesi, yaşlandırma 6. çevrimi titreşim işareti GSY.

Şekil 5.2 (devam): Filtre öncesi titreşim işareti GSY.

(a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim



(h) Filtre öncesi, yaşlandırma 7. çevrimi titreşim işareti GSY.

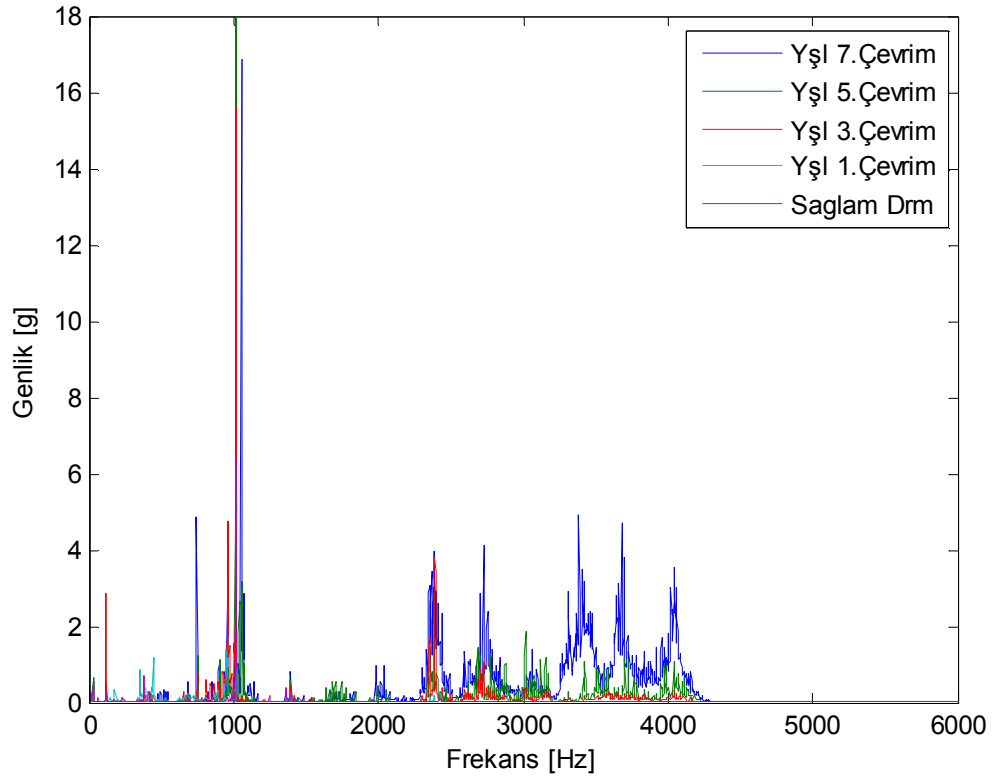
Şekil 5.2 (devam): Filtre öncesi titreşim işareti GSY.

- (a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim

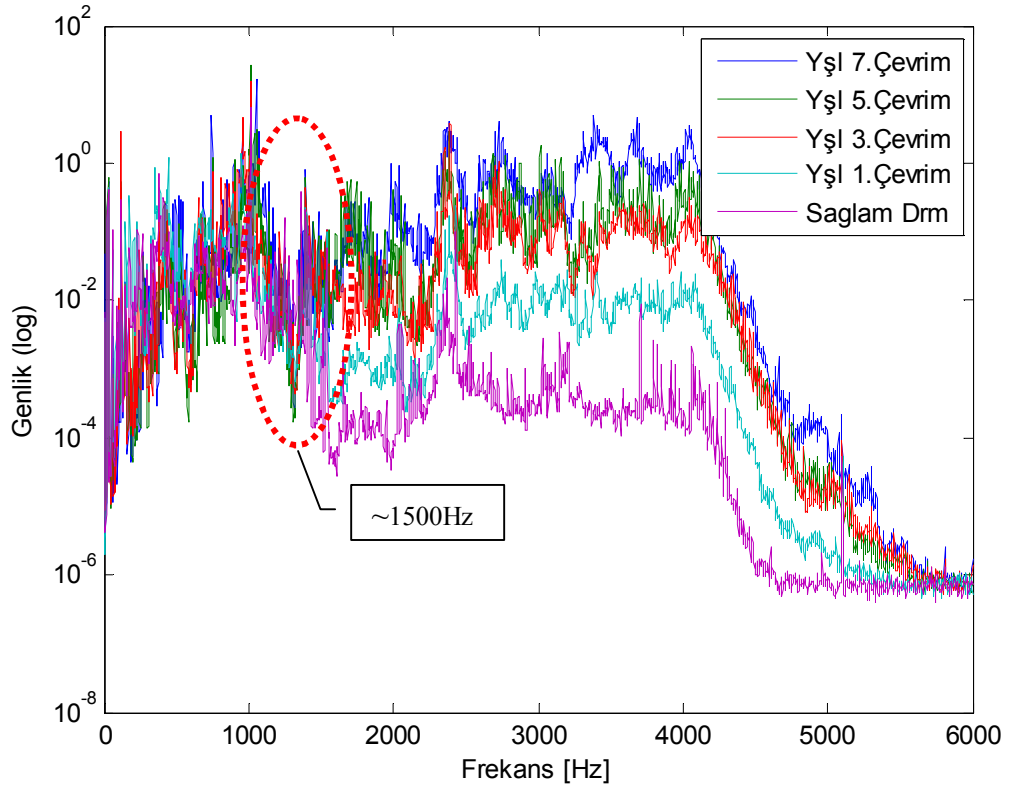
Sağlam durum ve her bir yaşlandırma çevriminin GSY'ları karşılaştırıldığı zaman 1000Hz'in üzerindeki yüksek frekans bölgesinde artan bileşenlerin bulunduğu gözlenmektedir. Şekil 5.3'de bu değişim görülmektedir.

Aynı işaretlerin logaritmik ölçekte GSY'ları karşılaştırıldığı zaman; sağlam durumdan son yaşlandırma çevrimine ilerledikçe, her çevrimdeki titreşim işaretinin logaritmik ölçekteki genliğinin, özellikle 1500Hz'in üzerindeki frekans bölgesinde artış gösterdiği ve son yaşlandırma çevrimine ulaşılnca en üst seviyeye çıktığı görülmektedir. Şekil 5.4'de, 1500Hz ile 4000Hz frekans bölgesindeki genlik artışını görmek mümkündür. Bu anlamda burada 1500Hz'den sonra spektral değişimler birbirlerinden ayrılmaktadır.

Bunun yanında titreşim işaretinin 4000Hz'in üzerinde sönümlenmesinin nedeni, kullanılan işaret koşullandırma arabiriminde (*National Instruments*) 4kHz kesim frekanslı bir örtüşüm önleyici (anti-aliasing) alçak geçiren filtre bulunmasıdır.



Şekil 5.3 : GSY'lerinin karşılaştırılması (filtre öncesi).



Şekil 5.4 : GSY'lerinin logaritmik ölçekte karşılaştırılması (filtre öncesi).

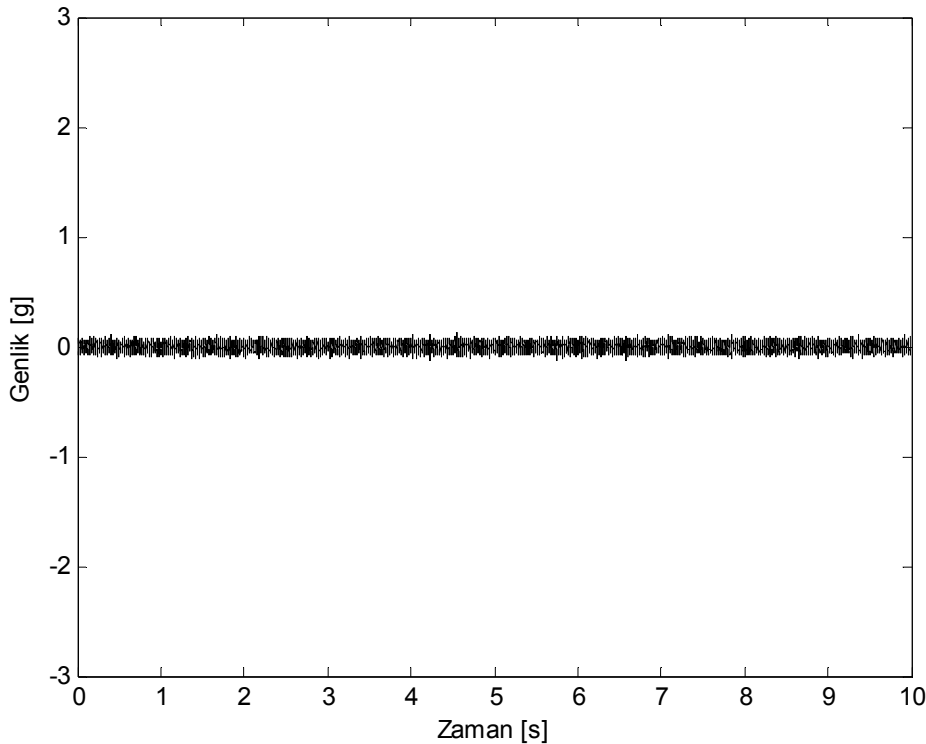
5.2 Filtrelenmiş Titreşim İşaretlerinin İncelenmesi

Bir önceki bölümde titreşim işaretinin spektrumu incelendiği zaman, işarettaki genlik artışının özellikle 1500Hz ile 4000Hz arasındaki frekans bölgesinde daha baskın olduğu gözlemlendiğinden; bu bölgedeki işaret değişimine odaklanmak ve düşük frekanslı bileşenlerin etkisini devre dışı bırakmak için ham titreşim işareti bir yüksek geçiren filtre ile koşullandırılmıştır.

Butterworth tipi kullanılan sayısal filtrenin kesim frekansı 1500Hz ve 5. dereceden bir filtre olarak ayarlanmıştır.

5.2.1 Zaman tanım bölgesinde inceleme

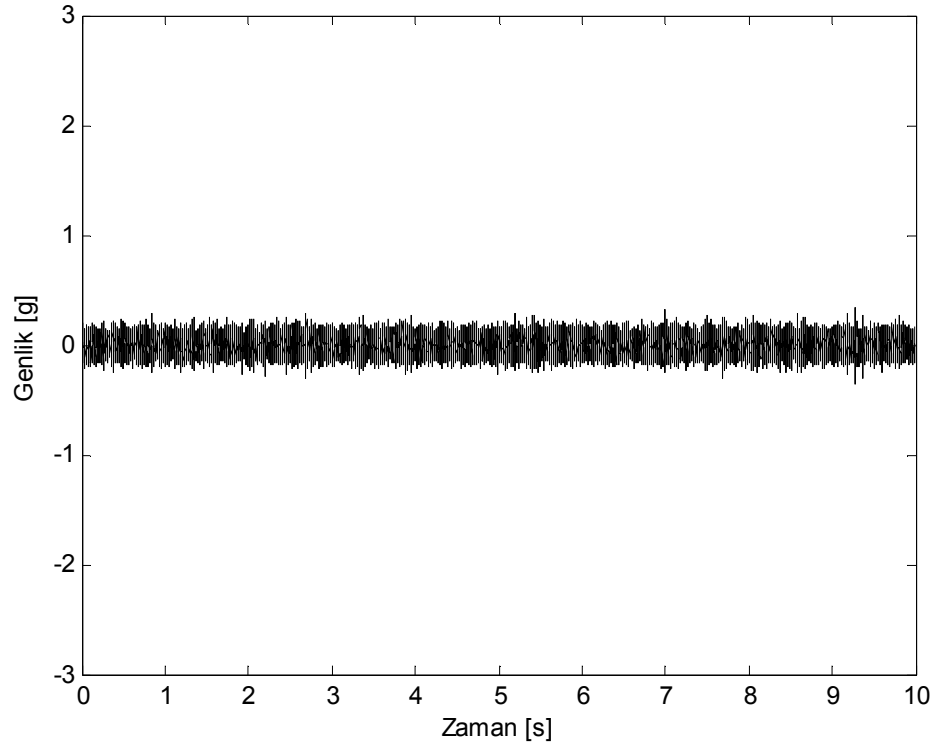
Filtrelenmiş titreşim işaretlerinin zaman tanım bölgesindeki genlik çizimleri Şekil 5.5’de verilmiştir. Yapılan incelemede sağlam durum ve yaşlandırma çevrimleri için zaman tanım bölgesindeki filtrelenmiş genlik değerlerinin, 1500Hz’den küçük frekans bileşenlerinin etkisi devre dışı bırakıldığından, azaldığı gözlenmektedir.



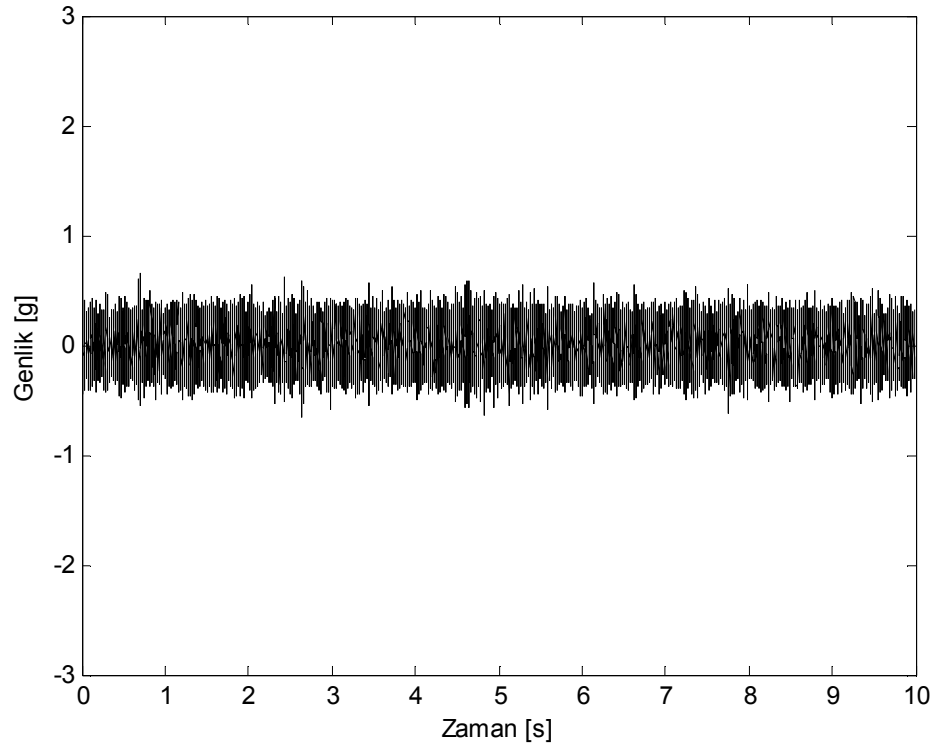
a) Filtre sonrası, sağlam durum titreşim genliği

Şekil 5.5: Filtre sonrası titreşim genlikleri.

(a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim



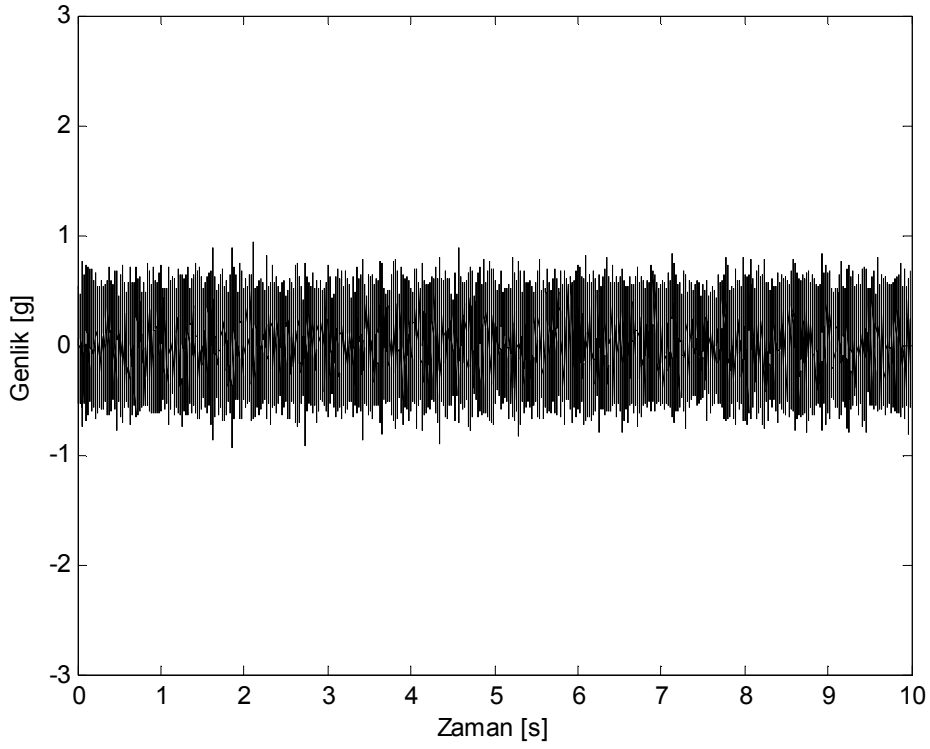
b) Filtre öncesi, yaşlandırma 1. çevrimi titreşim genliği



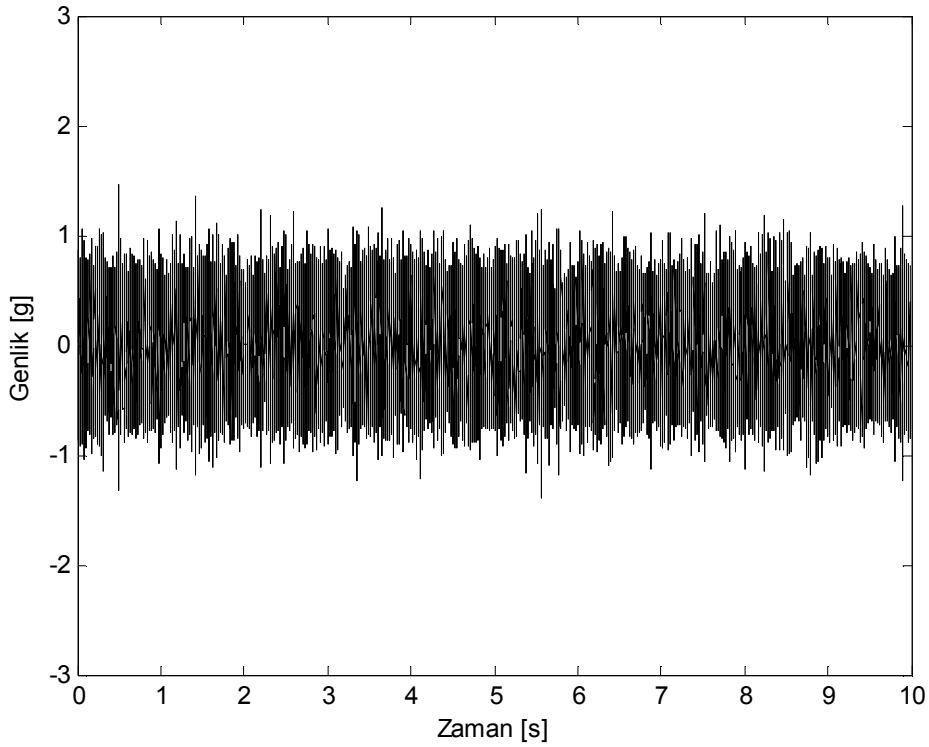
c) Filtre sonrası, yaşlandırma 2. çevrimi titreşim genliği

Şekil 5.5 (devam): Filtre sonrası titreşim genlikleri.

(a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim



d) Filtre sonrası, yaşlandırma 3. çevrimi titreşim genliği

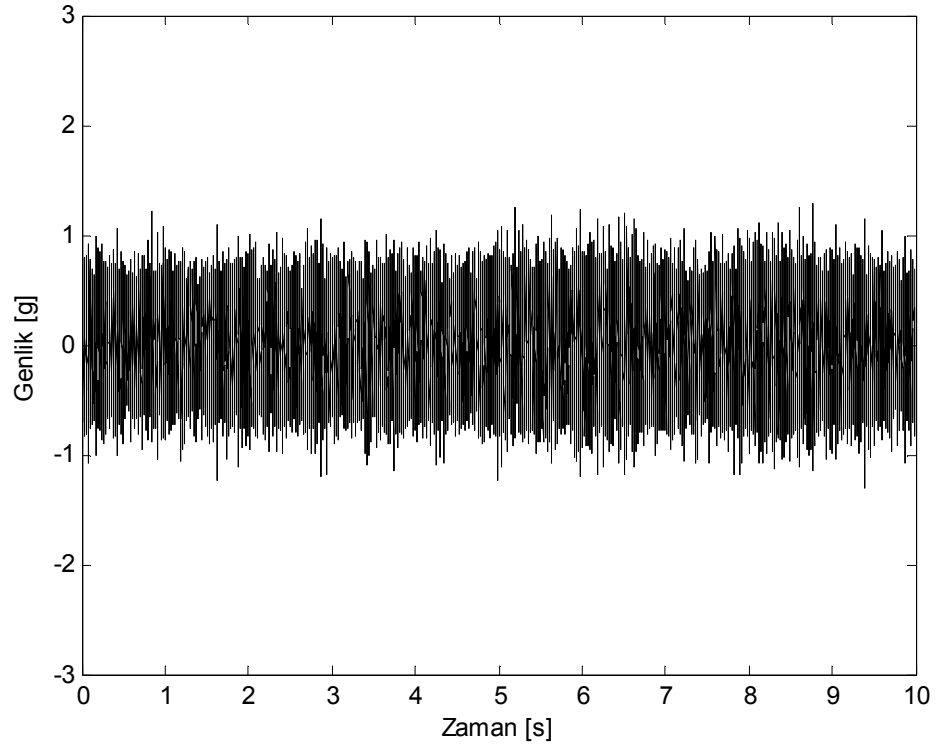


Filtre sonrası, yaşlandırma 4. çevrimi titreşim genliği)

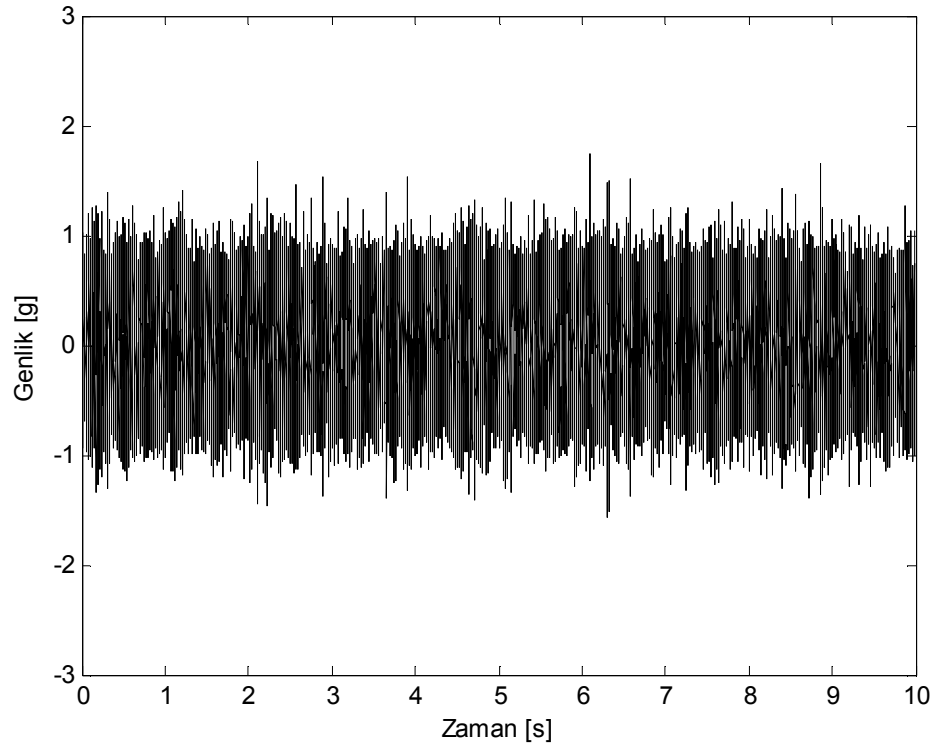
e

Şekil 5.5 (devam): Filtre sonrası titreşim genlikleri.

- (a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim



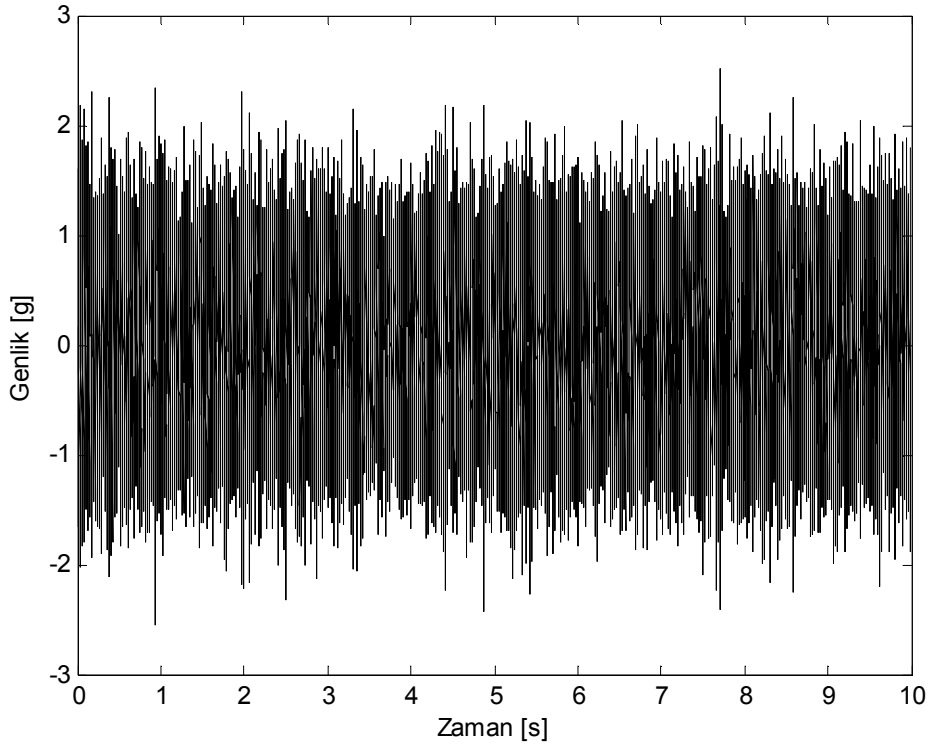
f) Filtre sonrası, yaşlandırma 5. çevrimi titreşim genliği



g) Filtre sonrası, yaşlandırma 6. çevrimi titreşim genliği

Şekil 5.5 (devam): Filtre sonrası titreşim genlikleri.

(a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim



h) Filtre sonrası, yaşlandırma 7. çevrimi titreşim genliği

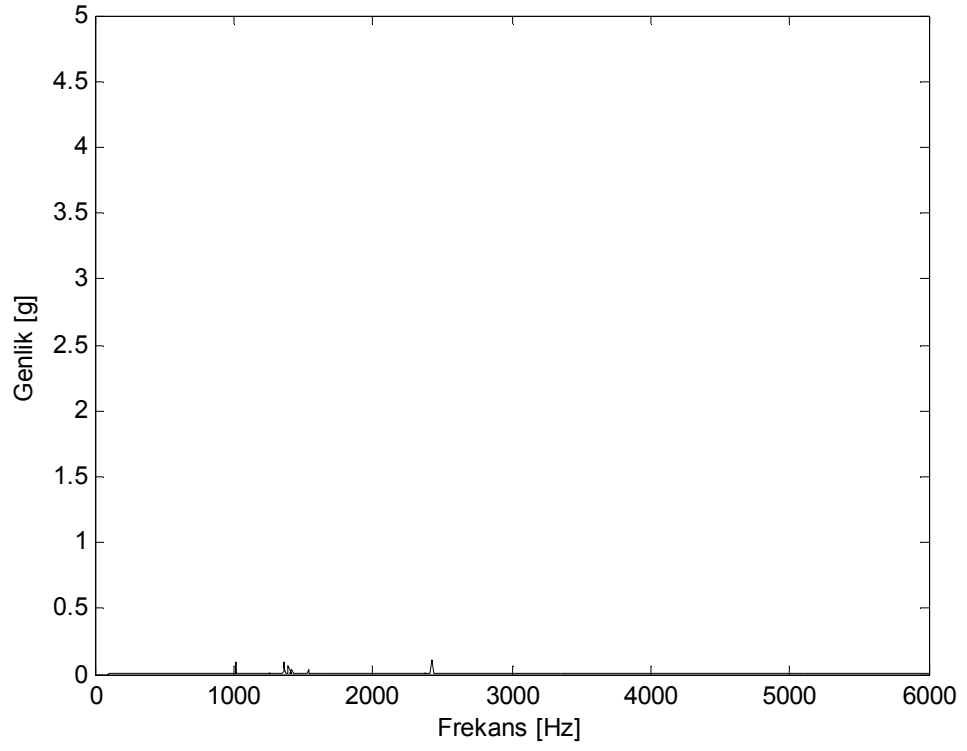
Şekil 5.5 (devam): Filtre sonrası titreşim genlikleri.

(a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim

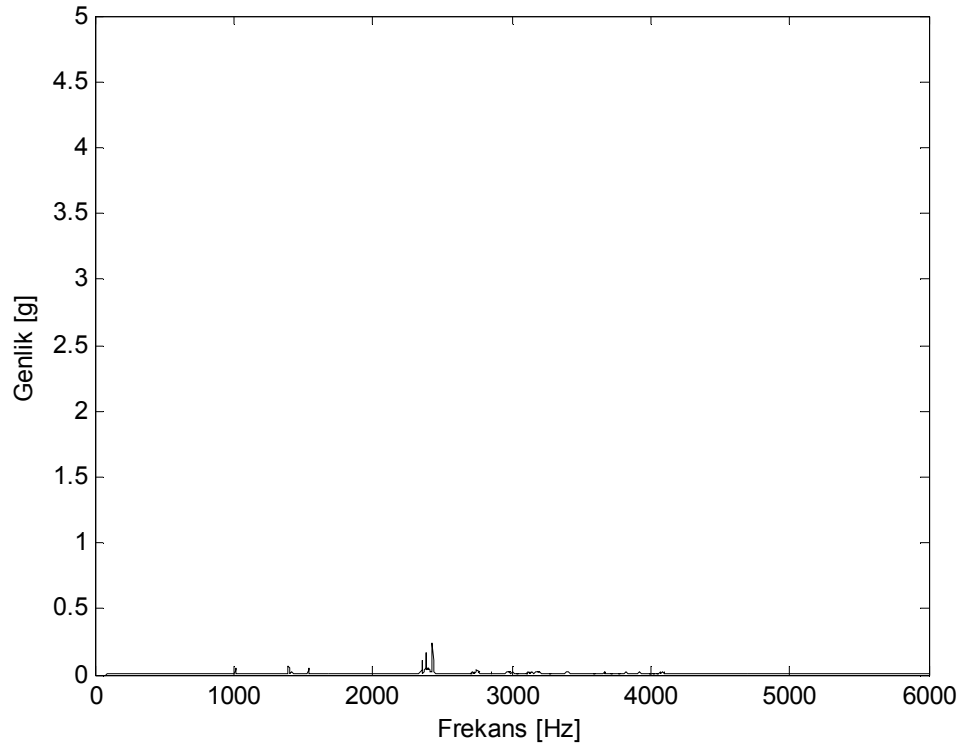
5.2.2 Frekans tanım bölgesinde spektral inceleme

Filtrelenmiş titreşim işaretlerinin GSY ile spektral incelemesi Şekil 5.6'da verilmiştir. Uygulanan filtre gereği 1500Hz'in altındaki frekans bileşenleri bulunmamakta ve rulman arızasının yapısal özelliklerini barındıran frekans bileşenleri daha baskın ortaya çıkmaktadır.

Ayrıca Şekil 5.7'de gösterilen garfiklerde, sağlam durumdan son yaşlandırma çevrimine ilerledikçe GSY'larındaki genlik artışı gözlenmektedir.



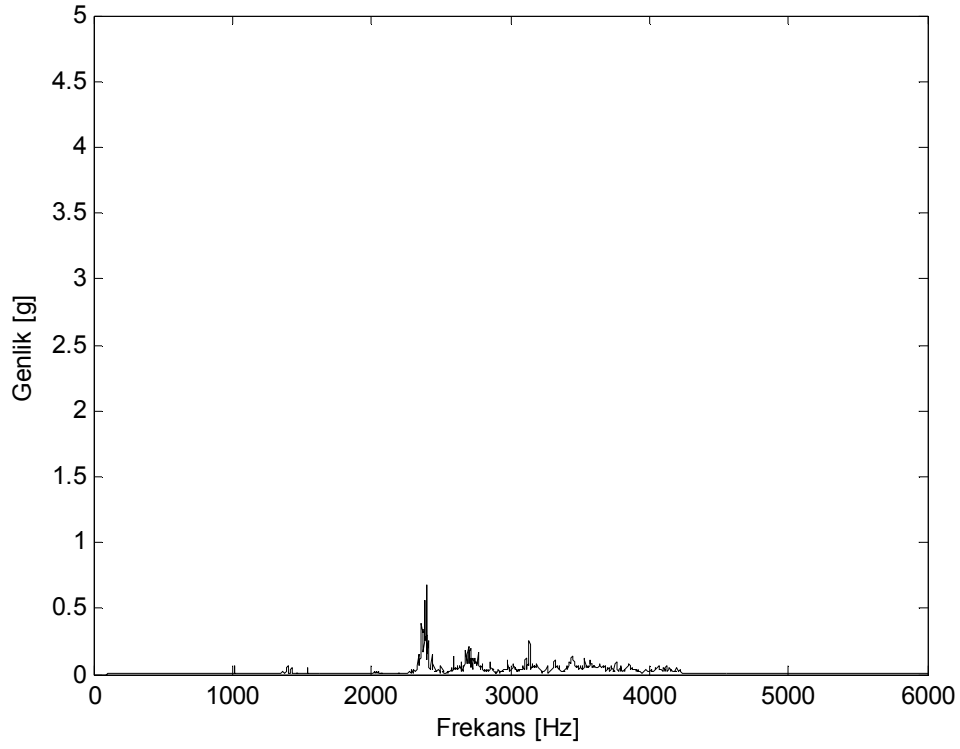
a) Filtre sonrası, sağlam durum titreşim işareti GSY.



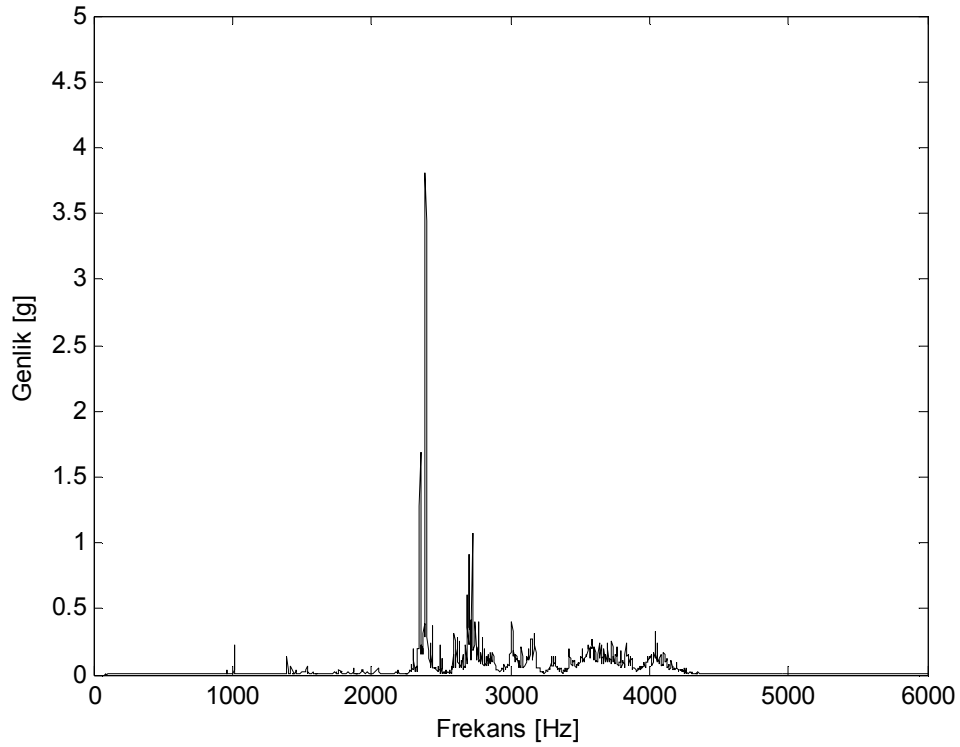
b) Filtre sonrası, yaşlandırma 1. çevrimi titreşim işareti GSY.

Şekil 5.6 : Filtre sonrası titreşim işareti GSY.

(a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim



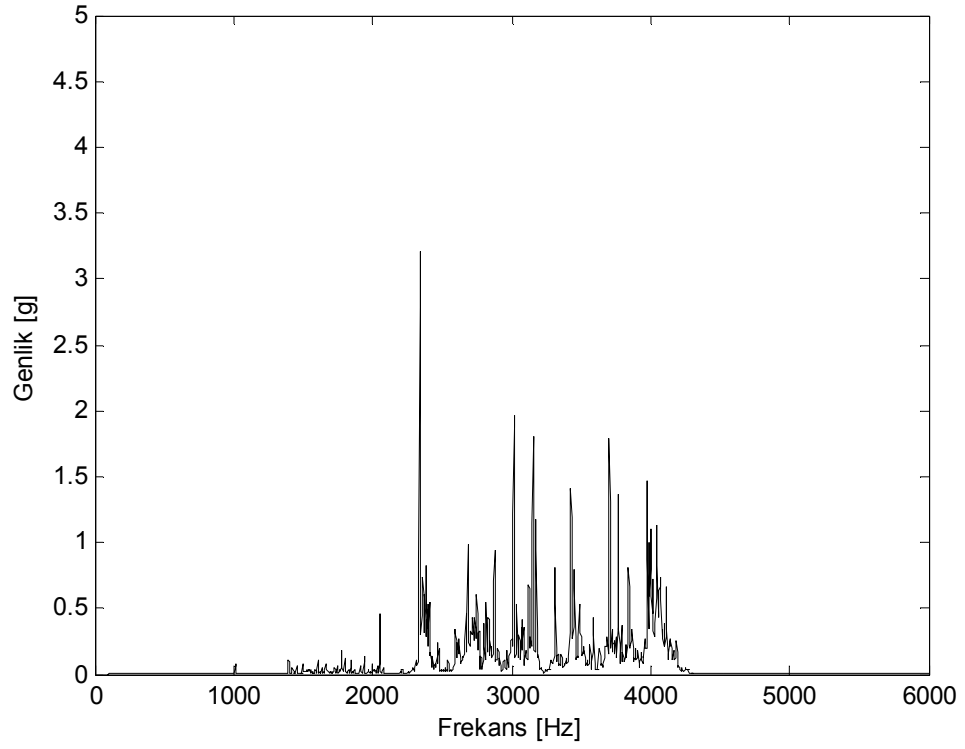
c) Filtre sonrası, yaşlandırma 2. çevrimi titreşim işareti GSY.



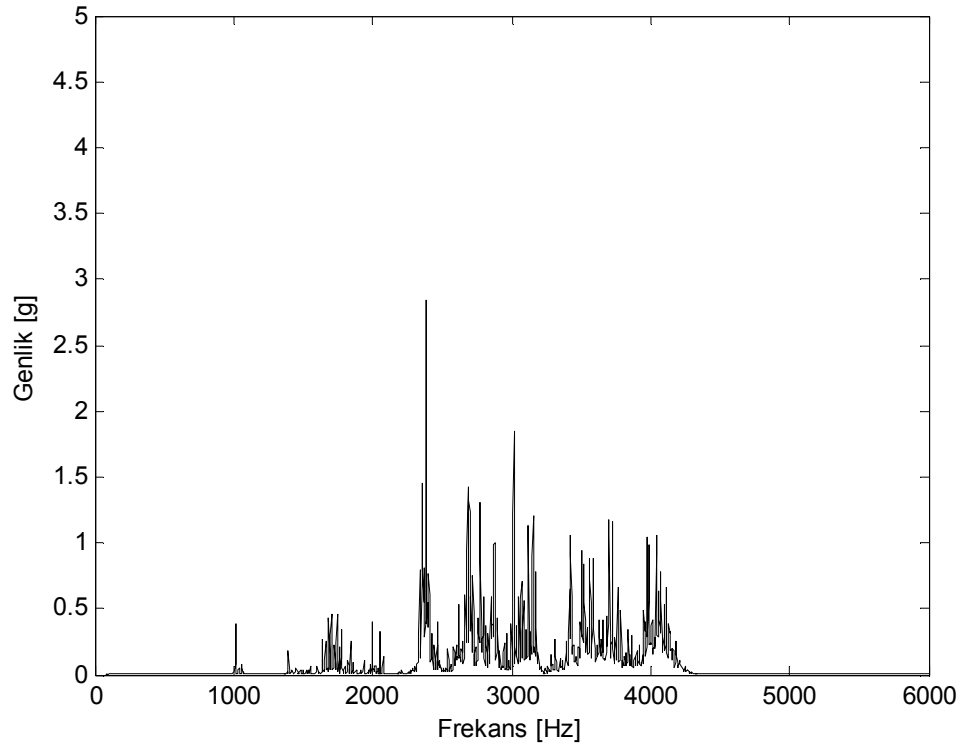
d) Filtre sonrası, yaşlandırma 3. çevrimi titreşim işareti GSY.

Şekil 5.6 (devam): Filtre sonrası titreşim işareti GSY.

- (a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim



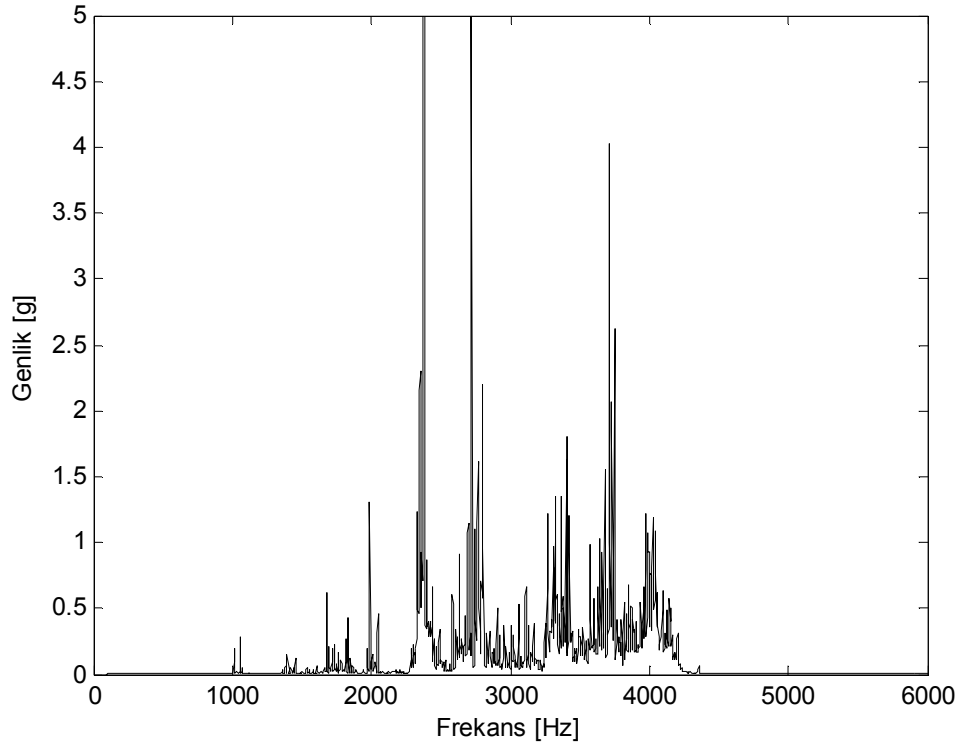
e) Filtre sonrası, yaşlandırma 4. çevrimi titreşim işareti GSY.



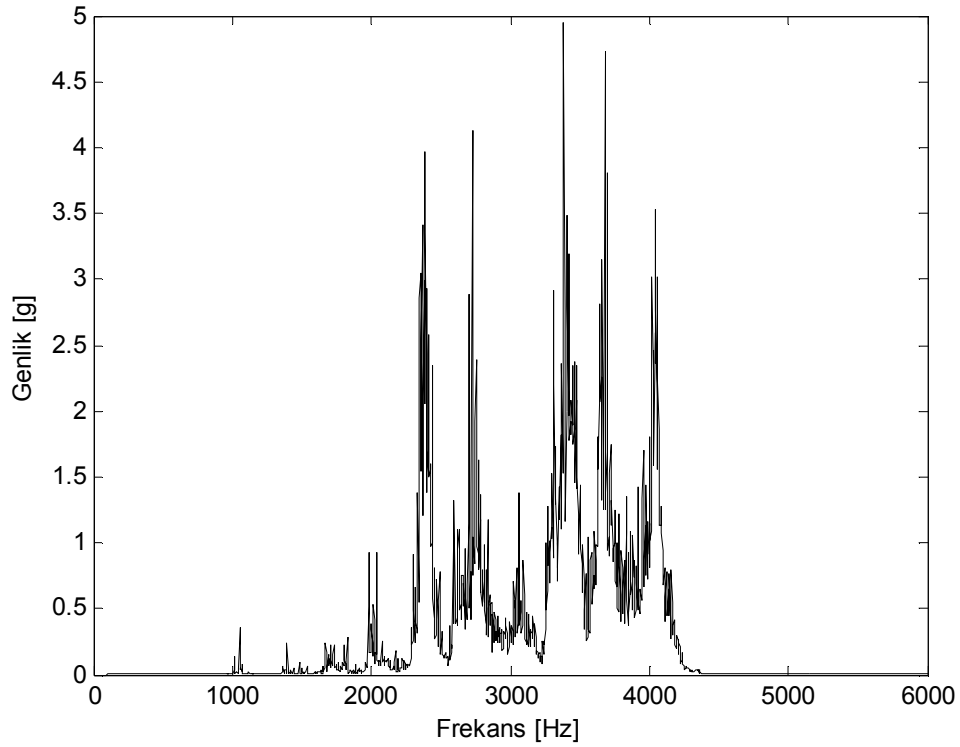
f) Filtre sonrası, yaşlandırma 5. çevrimi titreşim işareti GSY.

Şekil 5.6 (devam): Filtre sonrası titreşim işareti GSY.

- (a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim



g) Filtre sonrası, yaşlandırma 6. çevrimi titreşim işareti GSY.

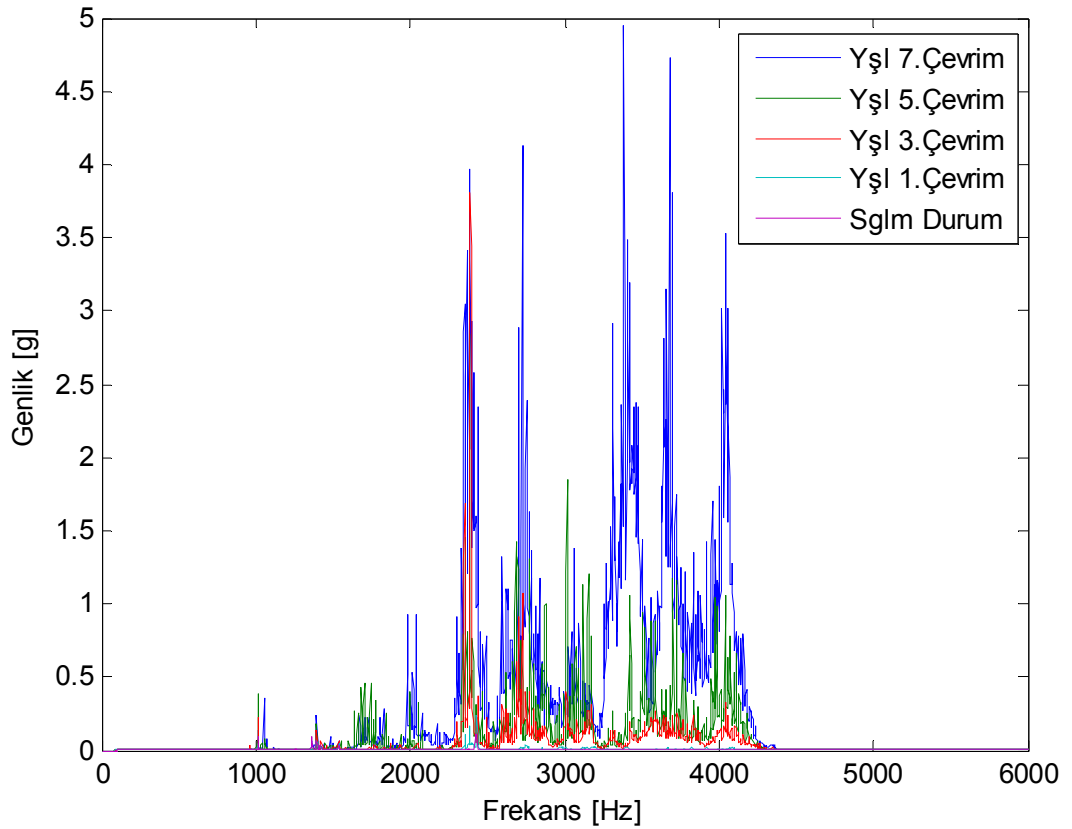


h) Filtre sonrası, yaşlandırma 7. çevrimi titreşim işareti GSY.

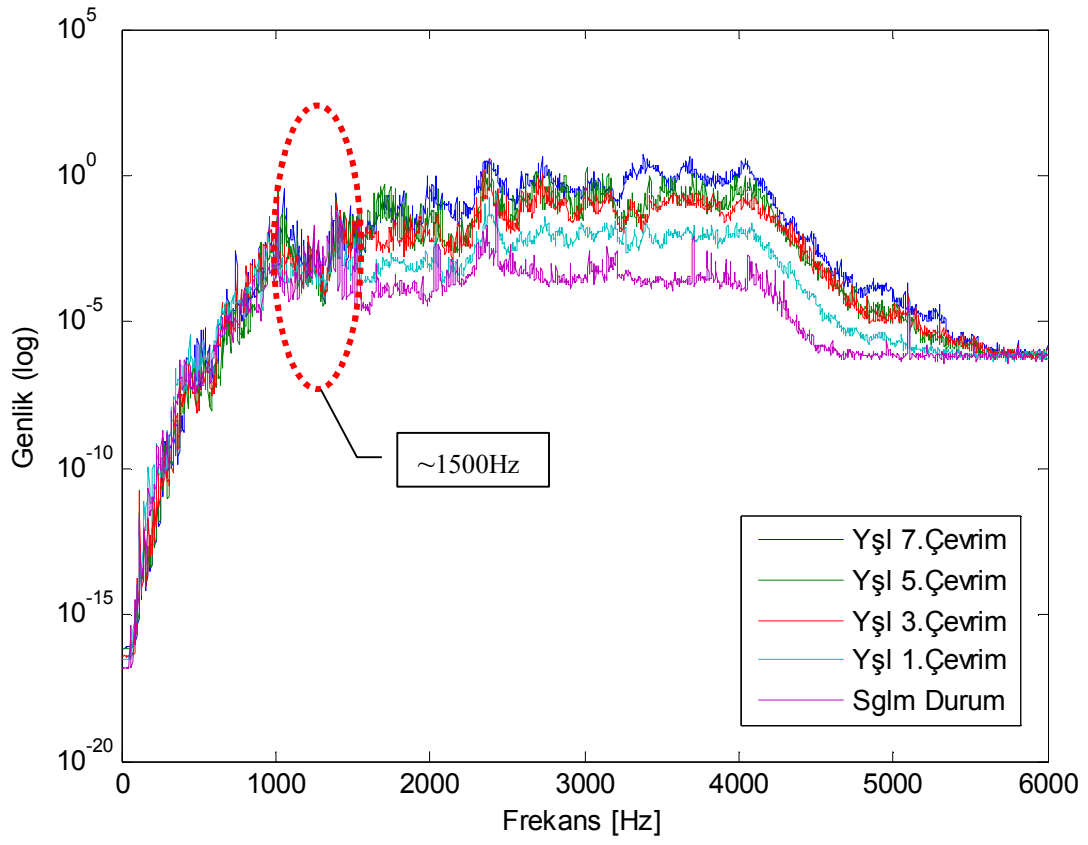
Şekil 5.6 (devam): Filtre sonrası titreşim işareti GSY.

- (a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim

Bunun yanında; sağlam duruma ait filtre öncesi ve filtrelenmiş titreşim işaretinin GSY'ları karşılaştırıldığı zaman; (Şekil 5.2.(a) ile Şekil 5.6.(a)'nin karşılaştırılması) sağlam durumda görülen 1000Hz'lik frekans bileşeninin fiziksel yorumu yapılamamakla birlikte, filtreleme sonrasında bu bileşenin çok düşük bir seviyeye ulaştığı görülmektedir. Ancak sonraki aşamalarda yaşlanma sürecinin ilerlemesi ile bu bileşenin arttığı gözlenmiştir. Bu nedenle titreşim işaretlerinin filtreleme sonrasındaki spektral değişiminin, imalattan gelen düşük seviyeli hatalara ait bileşenler nedeniyle gerçekleştiği varsayılır ise; bu durum 1500-4000Hz frekans bandında var olan imalat hatalarının da nasıl geliştiğinin bir göstergesi olacaktır.



Şekil 5.7 : GSY'larının karşılaştırılması (filtre sonrası).



Şekil 5.8 : GSY'larının logaritmik ölçekte karşılaştırılması (filtre sonrası).

6. RULMAN ARIZASINA İLİŞKİN TİTREŞİM İŞARETLERİNİN İSTATİSTİKSEL ANALİZİ

Çalışmanın bu bölümünde, asenkron motorlarda rulman akımlarının neden olduğu yapısal bozulmanın gelişimi, ölçülen titreşim işaretlerinin istatistiksel olarak analizi ile incelenmiştir.

Bu amaçla sağlam durum ve yedi adet yaşlandırma çevrimine ait rastlantısal (stokastik) yapıdaki titreşim işaretlerinin, Bölüm 3’de matematiksel ifadeleri verilen istatistiksel parametreleri hesaplanmıştır. Bu parametreler; ortalama değer (μ), standart sapma (σ), çarpıklık (s ; skewness) ve basıklık (k ; kurtosis) olarak belirlenmiştir.

Spektral analiz sırasında kullanılan Butterworth tipi yüksek geçiren filtre ile işaret koşullandırma uygulaması istatistiksel inceleme sırasında da kullanılacaktır. Dolayısıyla öncelikle ham durumdaki, filtre edilmemiş işarete ait istatistiksel parametreler hesaplanırken, sonrasında filtre edilmiş işaretlerin istatistiksel parametre incelemesi yapılmıştır.

Son olarak her iki durumun karşılaştırması ve parametre incelemesine dayanan durum bilgi çıkarımı yapılmıştır.

6.1 Ham Titreşim İşaretlerinin İstatistiksel İncelemesi

Sağlam durum ve yaşlandırma çevrimleri için ham titreşim işaretlerinin istatistiksel analizi hesaplanan istatistik parametrelerin incelenmesi ile sağlanmıştır. Hesaplanan parametre değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 : Filtre öncesi titreşim işaretlerine ait istatistik parametreler.

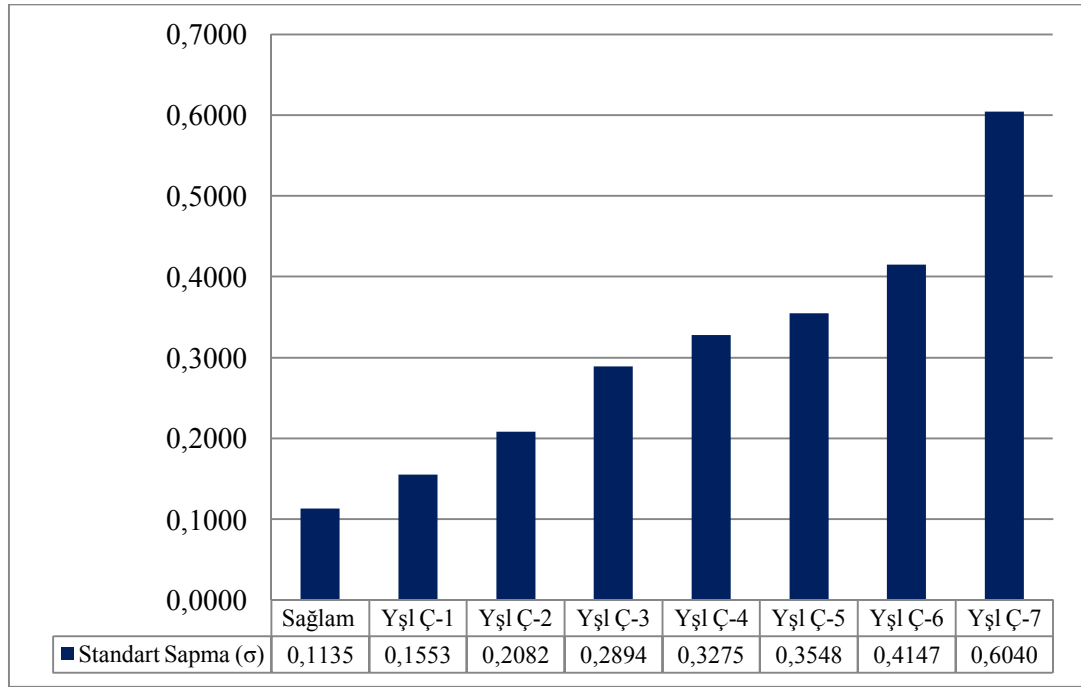
Yaşlandırma Çevrimleri	Ortalama Değer (μ)	Standart Sapma (σ)	Çarpıklık (s)	Basıklık (k)
Sağlam Durum	0,0016	0,1135	0,0591	2,9266
1. Çevrim	0,0014	0,1553	-0,0107	3,2875
2. Çevrim	0,0012	0,2082	0,0178	3,0367
3. Çevrim	0,0013	0,2894	0,0162	2,9985
4. Çevrim	0,0009	0,3275	-0,0031	3,0409
5. Çevrim	0,0010	0,3548	-0,0019	2,9832
6. Çevrim	0,0005	0,4147	-0,0103	2,9871
7. Çevrim	0,0030	0,6040	-0,0060	3,0093

Yukarıdaki çizelgede hesaplanan değerler incelendiğinde dört büyüklük arasından en büyük değişimin standart sapma (σ) değerinde olduğu gözlenmektedir. Buna göre sağlam durum ile rulman arızasının en büyük değere ulaştığı son yaşlandırma çevrimine ait standart sapma değerleri arasında 5 katın üzerinde bir değişim ortaya çıkmaktadır. Şekil 6.1’de bu değişim gösterilmiştir.

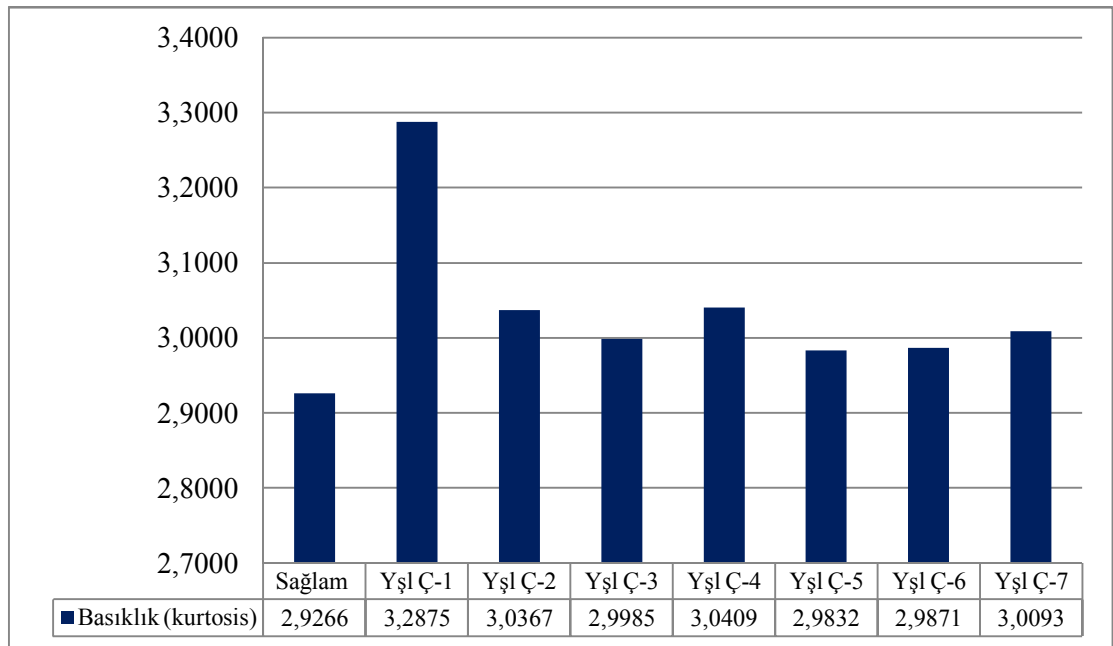
Buna karşın diğer parametrelerdeki değişim standart sapma değerindeki kadar büyük değildir. Ortalama değer sıfıra çok yakın, çarpıklık ve basıklık parametrelerinin değerleri ise normal dağılım eğrisine (Gauss formu) yakın değerlerdedir. Şekil 6.2’de basıklık derecesindeki değişim gösterilmiştir.

Gauss formundaki bir standart normal dağılım eğrisinde; ortalama değer sıfır ($\mu=0$), standart sapma bir ($\sigma=1$), çarpıklık sıfır ($s=0$) ve basıklık üç ($k=3$) değerlerini alır.

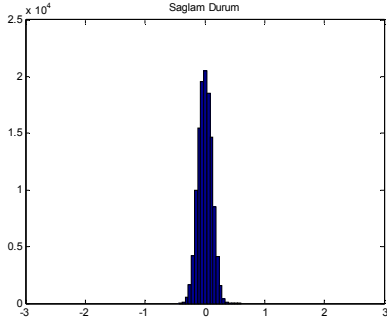
Yapılan deneylerde yaşlandırma çevrimleri sonrasında oluşan bozulma durumunun gelişimini incelemek üzere; sağlam durum ve her bir yaşlandırma çevrimine ait titreşim işaretlerinin veri dağılımı Şekil 6.3’de verilen histogram eğrileri ile gösterilmektedir. Bu eğriler takip edildiğinde yaşlandırma sürecindeki rulman arızası ile ilgili bilgi edinmek mümkün olabilmektedir. Bu amaçla her aşamadaki titreşim işaretlerinin veri dağılımlarının karşılaştırması Şekil 6.4’de yapılmıştır. Buna göre yaşlandırma sürecinde oluşan bozulma durumu; Gauss formundaki eğrilerin genişliğinin artması ile takip edilebilmektedir. Bu değişim standart sapmanın artması ile de açıklanabilir.



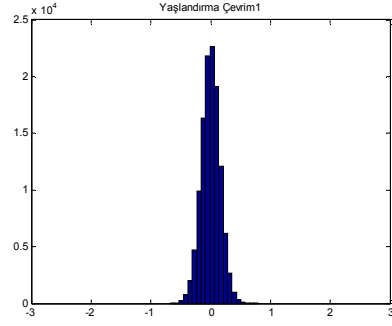
Şekil 6.1 : Sağlam durum ve yaşlandırma çevrimlerine ait standart sapma değışimi.



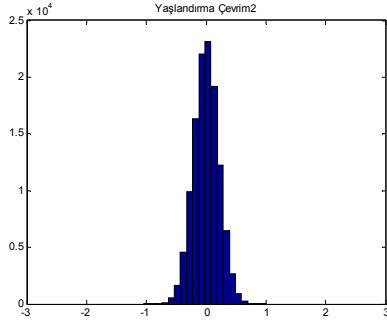
Şekil 6.2 : Sağlam durum ve yaşlandırma çevrimlerine ait basıklık derecesi değışimi.



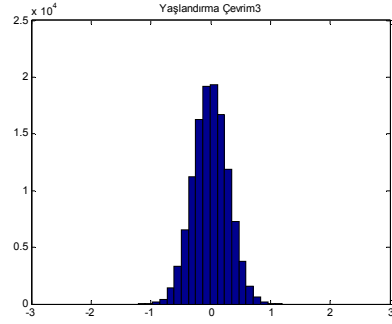
(a)



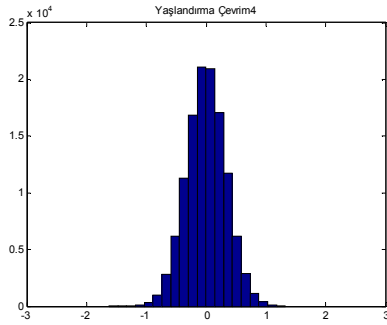
(b)



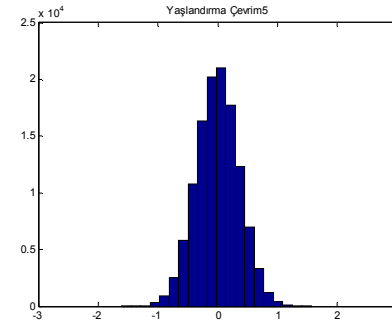
(c)



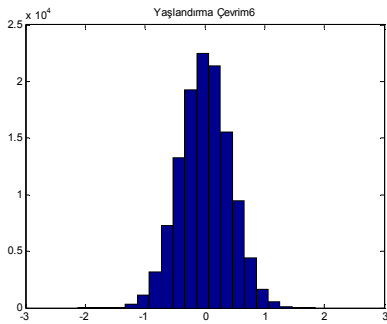
(d)



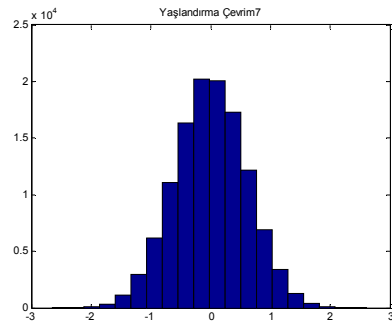
(e)



(f)



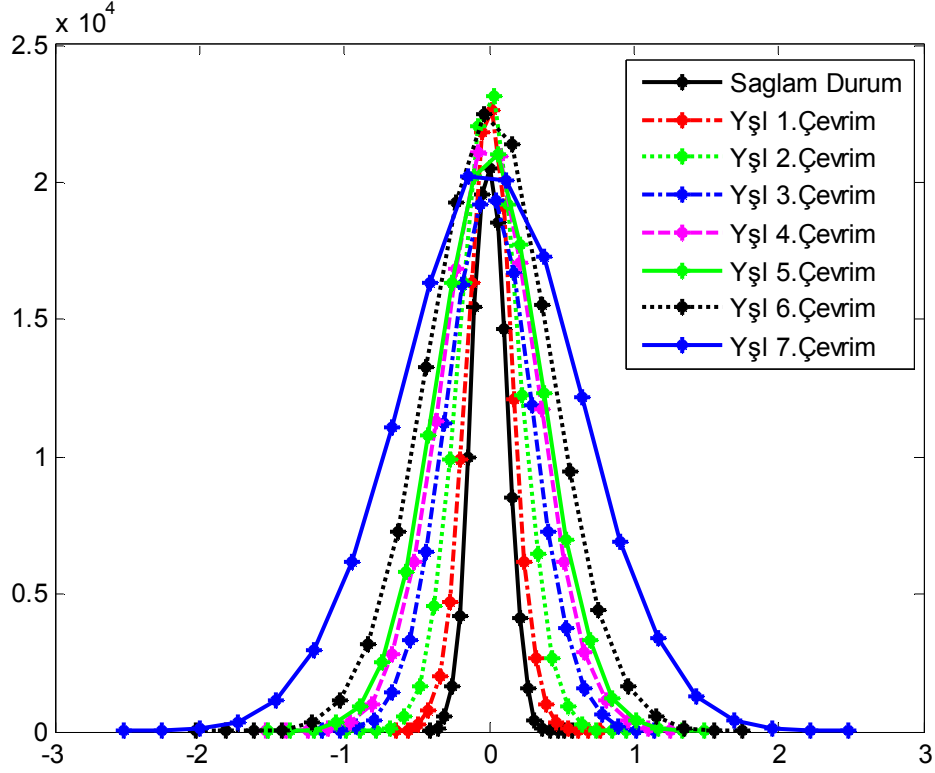
(g)



(h)

Şekil 6.3: Yaşlandırma sürecindeki filtre öncesi titreşim işareti veri dağılımları.

(a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim



Şekil 6.4 : Yaşlandırma sürecindeki titreşim işaretlerine ait veri dağılımlarının karşılaştırması.

6.2 Filtrelenmiş Titreşim İşaretlerinin İstatistiksel İncelemesi

Tüm aşamalara ait titreşim işaretlerinin spektral analizi sırasında dikkat edildiği üzere; rulman bozulmasına ilişkin karakteristik frekans bileşenleri yüksek frekans bölgesinde bulunmaktadır. Bu nedenle spektral analizde uygulandığı gibi; yüksek geçiren bir filtre ile koşullandırılmış titreşim işaretleri analiz açısından daha yoğun bir veri kümesi içerecektir. Bu bakımdan titreşim işaretleri daha önce kullanılan *Butterworth* tipi yüksek geçiren bir sayısal filtre ile koşullandırılmıştır. Kesim frekansı 1500Hz olarak ayarlanan bu filtre yardımıyla, 1500Hz ila 4000Hz frekans bandında istatistiksel parametrelerin incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

Buna göre filtrelenmiş titreşim işaretlerinin hesaplanan istatistiksel parametre değerleri Çizelge 6.2’de verilmektedir.

Çizelge 6.2 : Filtrelenmiş titreşim işaretlerine ait istatistik parametreler.

Yaşlandırma Çevrim No	Ortalama Değer (μ)	Standart Sapma (σ)	Çarpıklık (s)	Basıklık (k)
Sağlam Durum	-2,6835e-07	0,0267	-0,0818	3,2874
1. Çevrim	-9,8336e-07	0,0642	1,5347e-05	3,2741
2. Çevrim	3,6536e-07	0,1355	-3,8493e-04	3,1475
3. Çevrim	-8,7408e-07	0,2127	0,0017	3,0662
4. Çevrim	3,6966e-07	0,2980	-3,4633e-04	3,0398
5. Çevrim	-5,4027e-07	0,2953	-8,3513e-04	3,0303
6. Çevrim	-3,5600e-06	0,3576	-0,0016	3,0207
7. Çevrim	4,9558e-06	0,5578	-9,3291e-04	3,0366

Yukarıdaki çizelgede hesaplanan değerler dikkate alındığı zaman, ham titreşim işaretlerinde olduğu gibi, filtrelenmiş işaretler için de; yaşlandırma süresince istatistiksel parametrelerde en büyük değişimin “*standart sapma*” değerinde olduğu gözlenmiştir. Bu parametredeki değişim oranı; sağlam durum değeri ile son yaşlandırma çevriminin değeri karşılaştırıldığı zaman, değişim oranının 20 katın üzerinde olduğu saptanmıştır. Şekil 6.5’te bu değişim eğrisi verilmiştir. İşaretin filtrelenmemiş durumunda bu değişim oranının yaklaşık 5 kat olduğu bilinmektedir. Buna göre filtreleme işlemi yardımıyla, istatistiksel inceleme yapılacak veri kümesinin; rulman arızasının gelişimini daha rahat takip edebilmek bakımından yoğunlaştırıldığı değerlendirilmiştir.

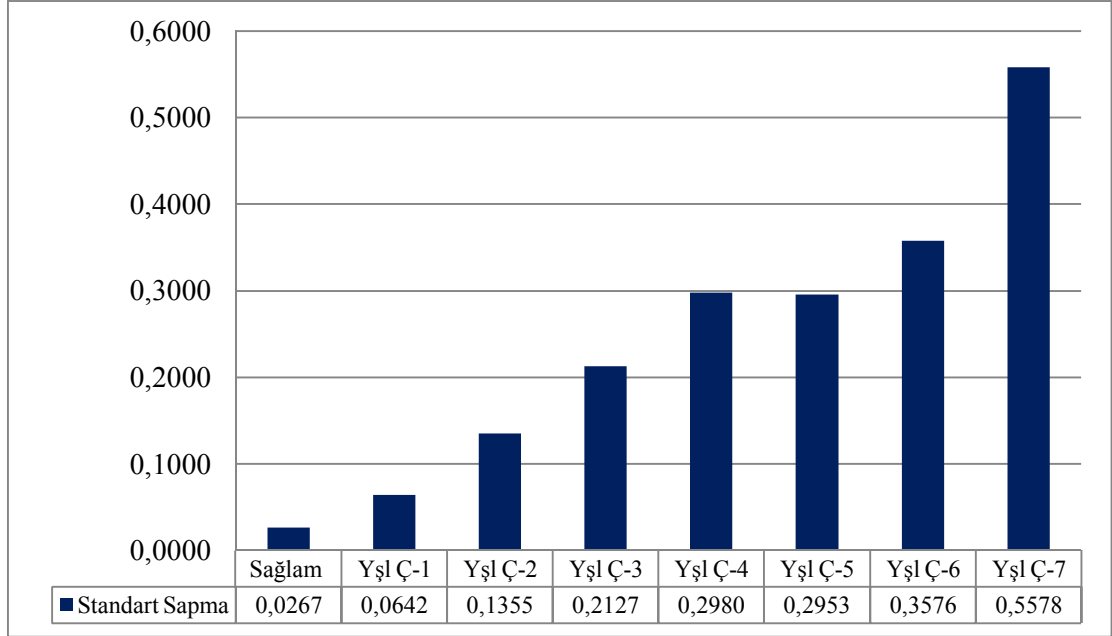
Bunun yanında Şekil 6.5’te gösterilen, standart sapmadaki değişim eğrisi incelendiği zaman; 3.yaşlandırma çevriminden sonra standart sapma değeri, sağlam durumdaki değerinin 10 katını aştığı ve bu büyük değişimin kalıcı arıza durumunu işaret ettiği değerlendirilmektedir.

Diğer istatistiksel parametrelerin değişimi incelendiği zaman; ortalama değer (μ) ve çarpıklık (s) sıfıra oldukça yakın olduğu, basıklık değerinin (k) ise başlangıç durumunda Gauss normundan uzak olmakla birlikte, 3. yaşlandırma çevrimi ve sonrasında Gauss normuna yaklaştığı gözlenmiştir. Basıklık derecesinin değişimi Şekil 6.6’da gösterilmektedir.

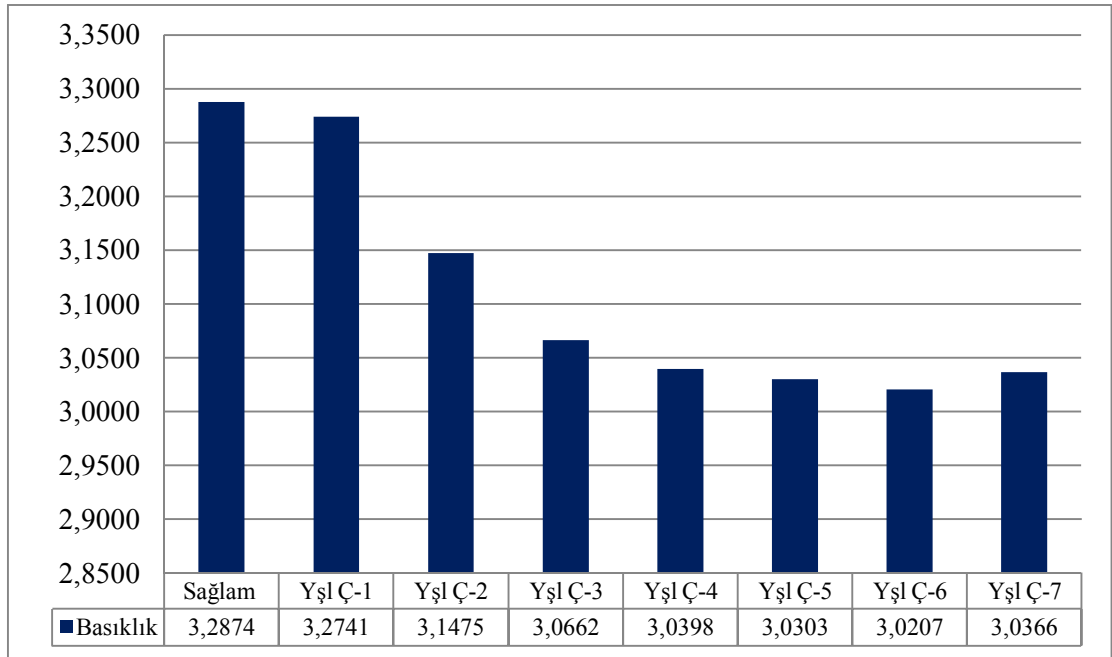
Ayrıca Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de filtrelenmiş titreşim işaretlerinin veri dağılım eğrileri sırasıyla her bir yaşlandırma çevrimi için ayrı ayrı ve karşılaştırmalı olarak

gösterilmektedir. Her iki grup eğride de ortak gözlenebilen özellik, filtre edilen titreşim işaretleri başlangıç çevriminde yani sağlam durumda Gauss formundan uzaktır, ancak 3. yaşlandırma çevrimi ile Gauss formuna geri dönmüş ve basıklık derecesi 3 seviyelerine geri gelmiştir.

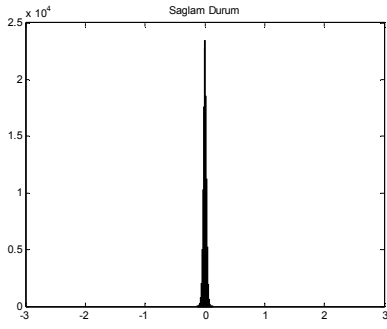
Normalde sağlam duruma ait veri kümesinin Gauss formunda bir dağılım sergilemesi ve bozulma sürecinde bu formdan uzaklaşması beklenen bir sonuçtur.



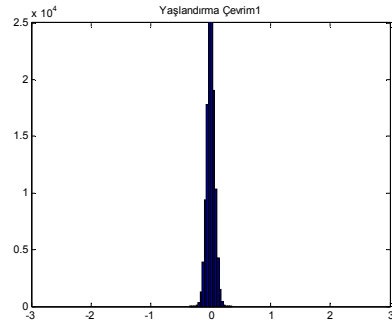
Şekil 6.5 : Filtrelenmiş titreşim işaretlerine ait standart sapma değişimi.



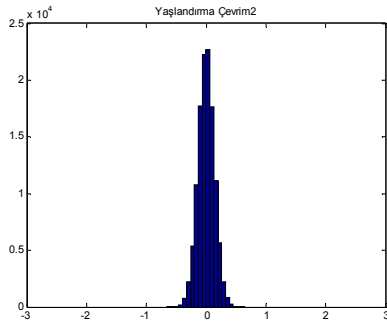
Şekil 6.6 : Filtrelenmiş titreşim işaretlerine ait basıklık derecesi değişimi.



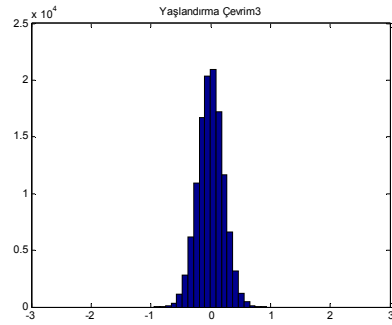
(a)



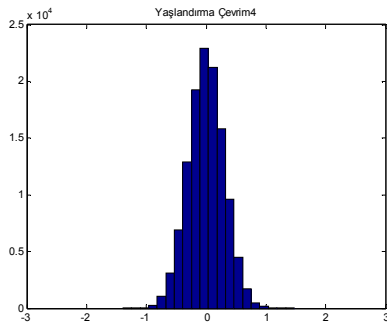
(b)



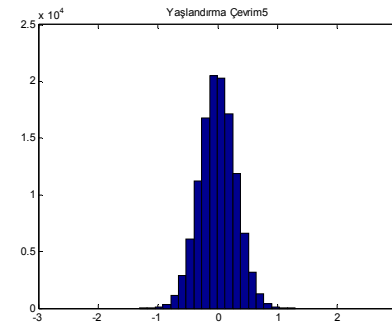
(c)



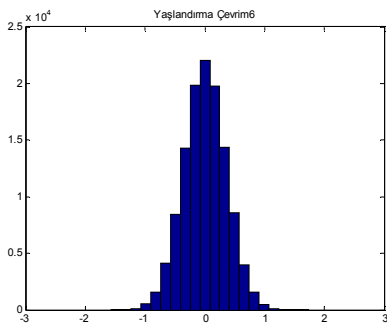
(d)



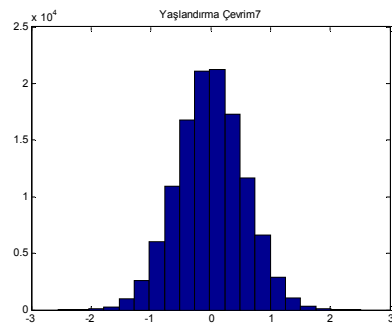
(e)



(f)

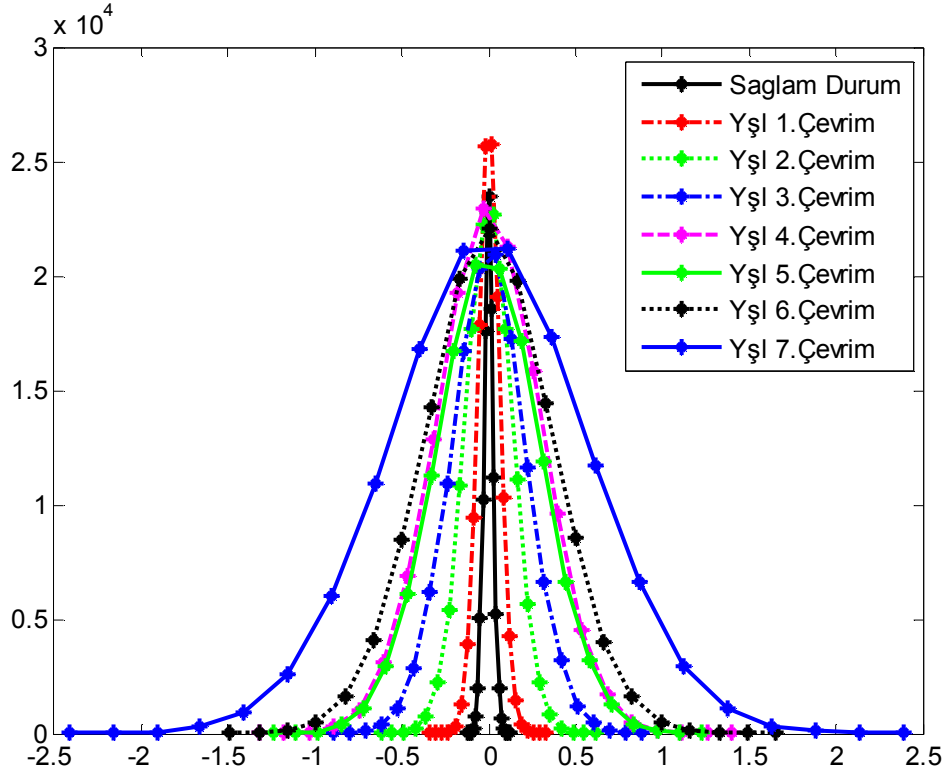


(g)



(h)

Şekil 6.7 : Yaşlandırma sürecindeki filtrelenmiş titreşim işaretleri veri dağılımları.
(a) sağlam (b) 1.çevrim (c) 2.çevrim (d) 3.çevrim
(e) 4.çevrim (f) 5.çevrim (g) 6.çevrim (h) 7.çevrim



Şekil 6.8 : Yaşlandırma sürecindeki filtrelenmiş titreşim işaretlerine ait veri dağılımlarının karşılaştırması.

7. FİLTRELENMİŞ TİTREŞİM İŞARETLERİ ÜZERİNDEN ENTROPİ HESABI

Çalışmanın bu bölümünde, daha önce spektral ve istatistiksel analizi yapılmış olan titreşim işaretlerinin; hesaplanan istatistik parametrelerine uyarlanan Entropi kavramı ile incelenmesi sunulmuştur.

Shannon tarafından 1948 yılında veri analizinde kullanılmak üzere geliştirilen Entropi kavramı; rastgele bir değişkenin (işaretin) belirsizlik veya düzensizlik derecesinin ölçümü olarak tanımlanmıştır [62].

Bir önceki bölümde filtrelenmiş titreşim işaretlerinin istatistiksel incelemesinde, en büyük değişimi gösteren parametrenin standart sapma (σ) olduğu tespit edilmiştir. Zira uygulanan yüksek geçiren filtre ile özellikle arıza gelişimine ait bileşenlerin bulunduğu frekans bölgesine (1500Hz-4000Hz) yoğunlaşmıştır.

Matematiksel tanımı 3. bölümde (3.9) bağıntısında verilen Entropi (H) hesabı, yaşlandırma sürecinde; sağlam durumdan son yaşlandırma çevrimine kadar, gelişen rulman arızasının derecesini olasılık değerlerine bağlı olarak belirlemektedir.

Entropi hesabında kullanılmak üzere; her yaşlandırma çevrimindeki rulman arızasına ilişkin olasılık değerinin tanımı; “Seker ve Ayaz” tarafından ilk kez ortaya atılmış [56] ve her çevrimdeki olasılık değeri aşağıdaki tanımlama ile elde edilmiştir.

Buna göre; Gauss formunda özellikler sergileyen bir sıralı yaşlandırma sisteminde, en büyük değişim oranı standart sapma parametresinde gerçekleşiyor ise; her yaşlandırma çevrimindeki standart sapma değeri ile ilk durum (sağlam) standart sapma değeri kolayca karşılaştırılabilir. Bu iki değeri arasındaki oran; o yaşlandırma çevriminin eskime (yaşlanma) veya bozulma derecesini belirler ve aşağıdaki bağıntı ile tanımlanır [56].

$$p \equiv \frac{\sigma_{ilk}}{\sigma_{son}} \quad (7.1)$$

Buna göre her bir yaşlandırma çevrimi için bu tanımın genelleştirilmesi ve ilk duruma (sağlam) ait standart sapma değerinin σ_0 ile gösterilmesi durumunda, i . çevrime ait olasılık değeri;

$$p_i \equiv \frac{\sigma_0}{\sigma_i} \quad (7.2)$$

bağıntısı ile hesaplanır ve her bir yaşlandırma çevriminin *sağlam* olma olasılığı (p_i) ile ifade edilir. Burada $i=0,1,\dots,7$ yaşlandırma çevrim numaralarını verir.

Buna karşın *arızalı* olma olasılığı (q_i) ise (3.15) bağıntısı ile ilişkili olarak,

$$q_i = 1 - p_i + \varepsilon \quad (7.3)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada ε çok küçük bir sabit değer olarak alınmıştır ($\varepsilon=0.0001$).

Buna göre; daha önce Çizelge 6.2’de verilen, her bir yaşlandırma çevrimi için hesaplanmış standart sapma değerleri dikkate alındığında, birinci yaşlandırma çevrimi için *sağlam* olma ve *arızalı* olma olasılıkları aşağıdaki gibi hesaplanır.

Başlangıç durumu olan sağlam motor durumu için; sağlam olma olasılığı bir ($p_0=1$), buna karşın arızalı olma olasılığı sıfır ($q_0=0$) olacaktır. Ayrıca birinci yaşlandırma çevrimine ait *sağlam* olma olasılık hesaplanacak olursa,

$$p_1 = \frac{\sigma_0}{\sigma_1} = \frac{0,0267}{0,0642} = 0,4155$$

değeri bulunur, bunun yanında aynı adıma ait *arızalı* olma olasılığı

$$q_1 = 1 - p_1 + \varepsilon = 1 - 0,4155 + 0,0001 = 0,5846$$

olarak hesaplanır.

Bu noktada her bir yaşlandırma çevrimine ait transfer edilen entropi miktarı Shannon Entropi tanımındaki (3.9) bağıntısı ile hesaplanır. Örneğin birinci yaşlandırma çevrimine geçerken iletilen, *sağlam* olma olasılığına bağlı entropi değeri (H_{p1}), başlangıç çevrimi olan sağlam motor durumunun *sağlam* olma olasılığı ($p_0=1$) bir ve entropi değeri ($H_{p1}=0$) sıfır olduğundan;

$$H_{p1} = -p_1 \log_2(p_1) = 0,5265$$

eşitliği ile hesaplanır, bunun yanında aynı çevrimin *arızalı* olma olasılığına bağlı entropi değeri (H_{q1}) ise

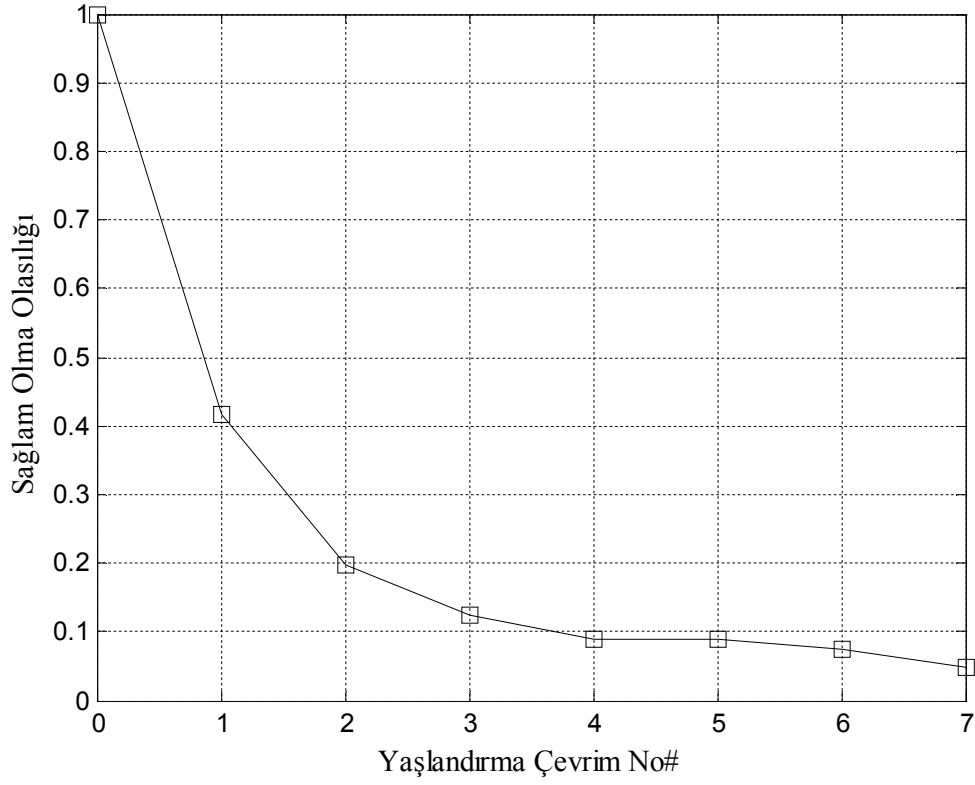
$$H_{q1} = -q_1 \log_2(q_1) = 0,4527$$

olarak elde edilir. Her bir yaşlandırma çevriminde transfer edilen *sağlam* ve *arızalı* olma olasılığına bağlı entropi değerleri hesaplanarak Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1 : Yaşlandırma çevrimlerine ait olasılık ve Entropi değerleri.

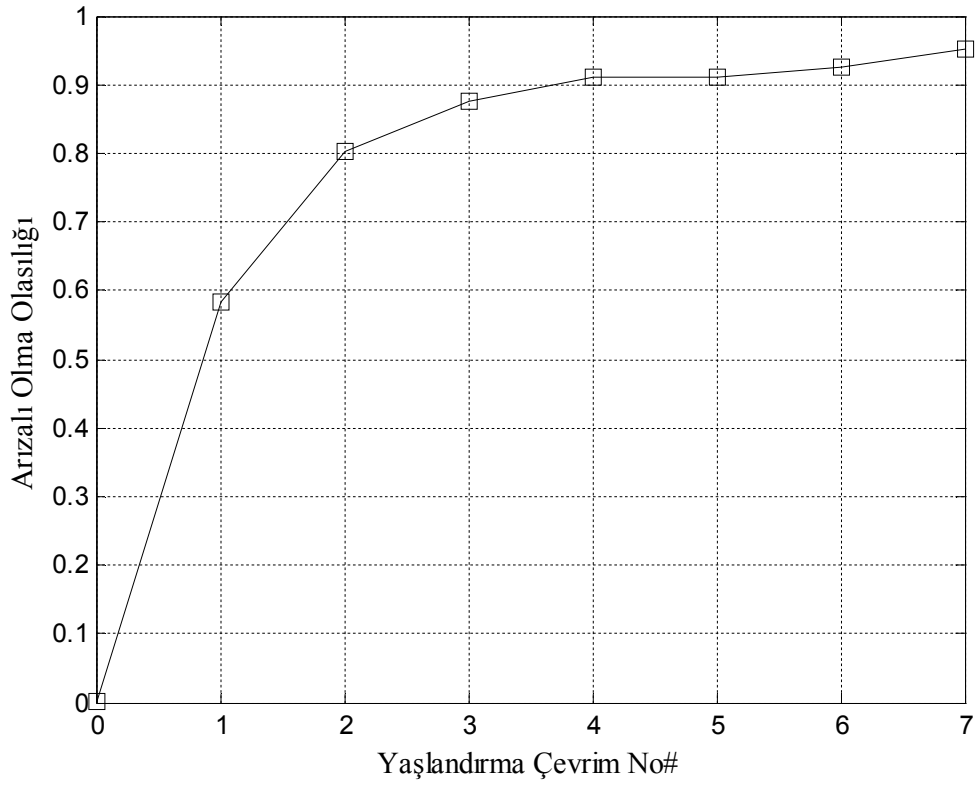
Yaşlandırma Çevrim No	p_n	q_n	H_{pn}	H_{qn}
Sağlam Durum	1	0	0	0,0013
1. Çevrim	0,4155	0,5846	0,5265	0,4527
2. Çevrim	0,1968	0,8033	0,4616	0,2539
3. Çevrim	0,1253	0,8748	0,3755	0,1689
4. Çevrim	0,0895	0,9106	0,3116	0,1230
5. Çevrim	0,0903	0,9098	0,3133	0,1241
6. Çevrim	0,0746	0,9255	0,2793	0,1033
7. Çevrim	0,0478	0,9523	0,2097	0,0672

Bu hesaplar doğrultusunda rulman arızası yaşlandırma sürecindeki *sağlam* ve *arızalı* olma olasılıklarının eğilimleri sırasıyla Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de gösterilmiştir.



Şekil 7.1 : Yaşlandırma sürecindeki sağlam olma olasılığı eğilimi.

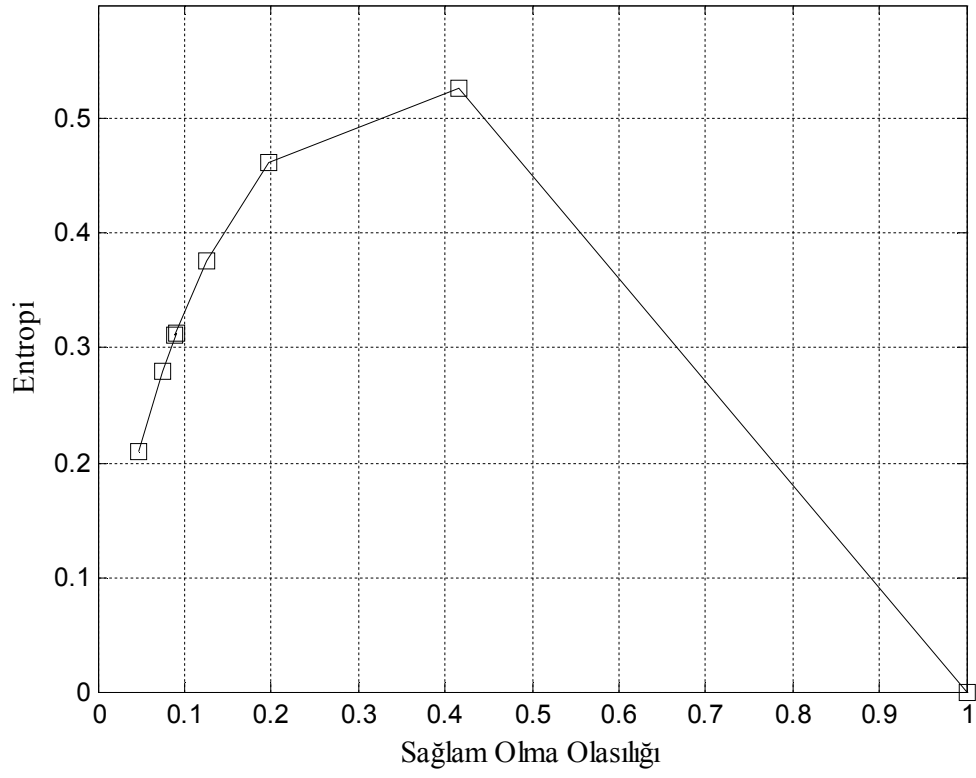
Buna göre yukarıdaki grafikte yaşlandırma çevrimleri ilerledikçe, ölçülen titreşim işaretlerine dayanarak hesaplanan *sağlam* olma olasılığı azalmaktadır. Özellikle 3. yaşlandırma çevrimi ve sonrasında grafikte görülen eğimin azalması, yani değişim miktarının belirli bir aralığa yakınsaması rulmandaki bozulmanın kalıcı bir arıza seviyesine ulaştığı bilgisini içermektedir. Bu değerlendirme Şekil 7.2’de verilen *arızalı* olma olasılığı eğrisine bakılarak da yapılabilmektedir. Zira *arızalı* olma olasılığı değeri 3. yaşlandırma çevrimi ve sonrasında %90 seviyesinin üzerindedir.



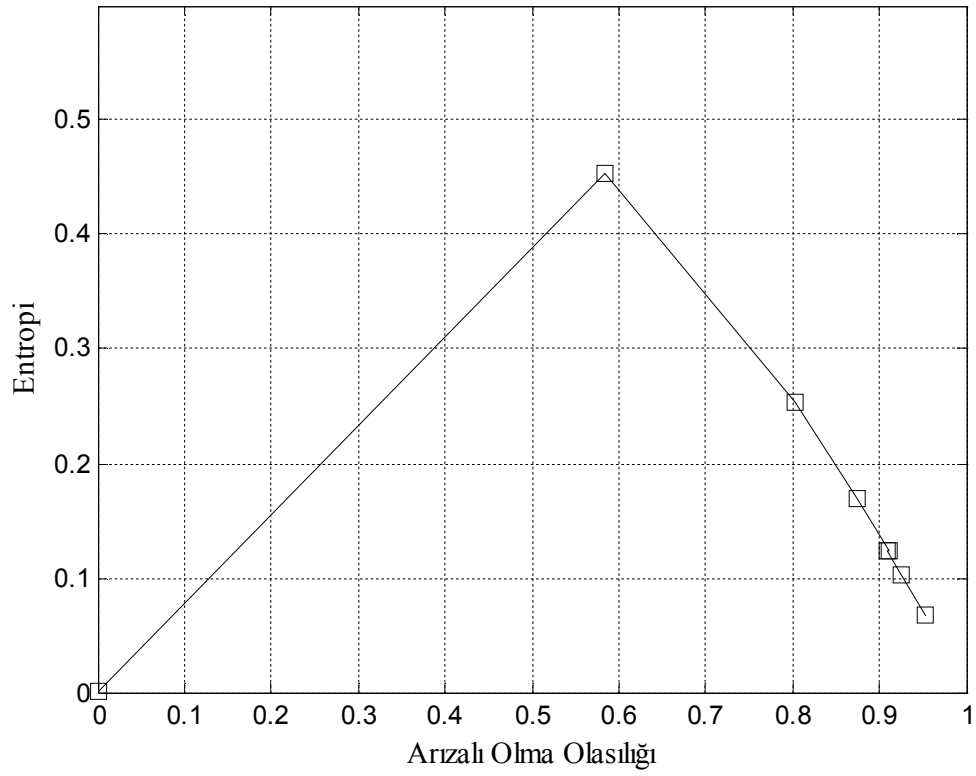
Şekil 7.2 : Yaşlandırma sürecindeki arızalı olma olasılığı eğilimi.

Yaşlandırma sürecinin her çevrimi için hesaplanan Entropi değerlerinin çizdiği grafikler; *sağlam* ve *arızalı* olma durumları bakımından sırasıyla Şekil 7.3 ve Şekil 7.4’de gösterilmiştir. Ayrıca yaşlandırma çevrim numaralarına göre gösterilen arızalı olma olasılığı ve entropi eğrisi Şekil 7.5’de verilmiştir.

Entropi değeri, *sağlam* olma durumu ile *arızalı* olma durumu arasında her durumun belirsizliğini bildiren bir ölçüttür. Bu anlamda birbirinin tümleyeni olan bu durumların olasılık değerleri birbirlerine eşit veya yakın olmaları durumunda Entropi değeri en yüksek (maksimum) değerini alacaktır. Şekil 7.4’de Maksimum Entropi (belirsizlik) değeri, *arızalı* olma olasılığının 0.5841 (%58) olduğu 1. yaşlandırma çevriminde gözlenmektedir. Bu noktada entropi değeri 0,4527 bit olarak hesaplanmaktadır.

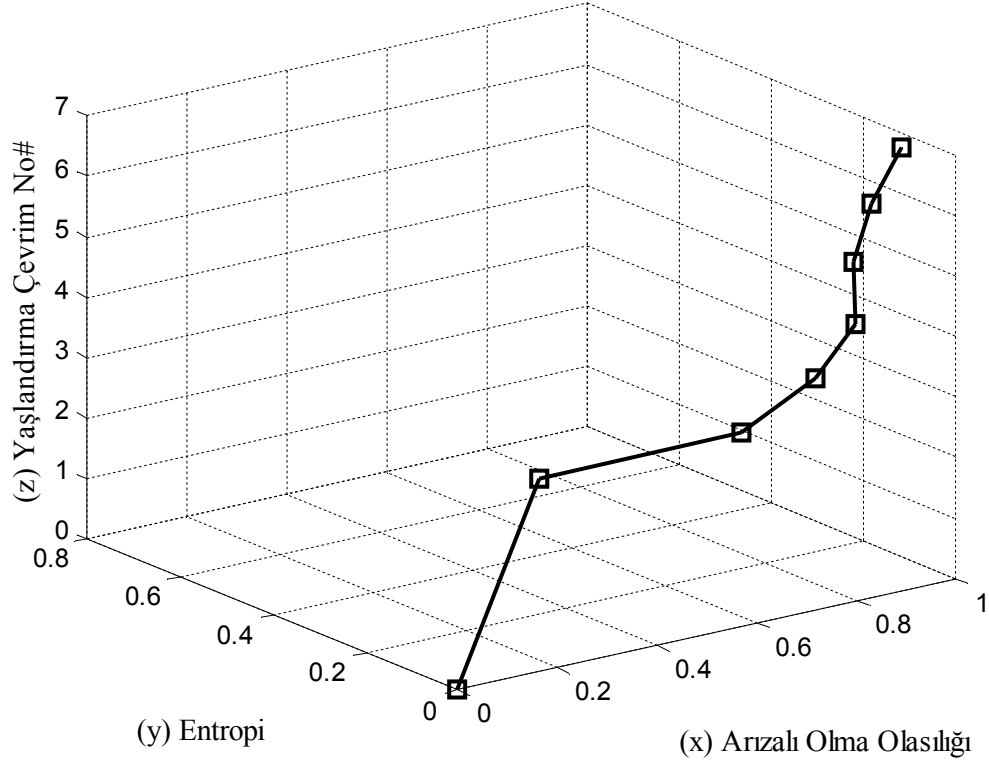


Şekil 7.3 : Sağlam olma olasılığına bağlı Entropi eğilimi.



Şekil 7.4 : Arızalı olma olasılığına bağlı Entropi eğilimi.

Sonraki yaşlandırma adımlarında arızalı olma olasılığı artarken bu durumlardaki entropi değerleri, yani arızalı olma olasılığının belirsizliği hızla azalmaktadır. Buna göre 3. yaşlandırma çevrimi ve sonrasında entropi değeri 0.15bit değerinin altında, entropi geçiş oranı ise Şekil 7.6'da gösterildiği üzere 0.05bit değerinin altında kalmıştır. Bu bakımdan 3. yaşlandırma çevrimi sonrasında rulman bozulmasının arıza düzeyinde belirginleştiği gözlenmiştir.



Şekil 7.5 : Yaşlandırma sürecindeki arızalı olma olasılığı ve entropi eğilimi.

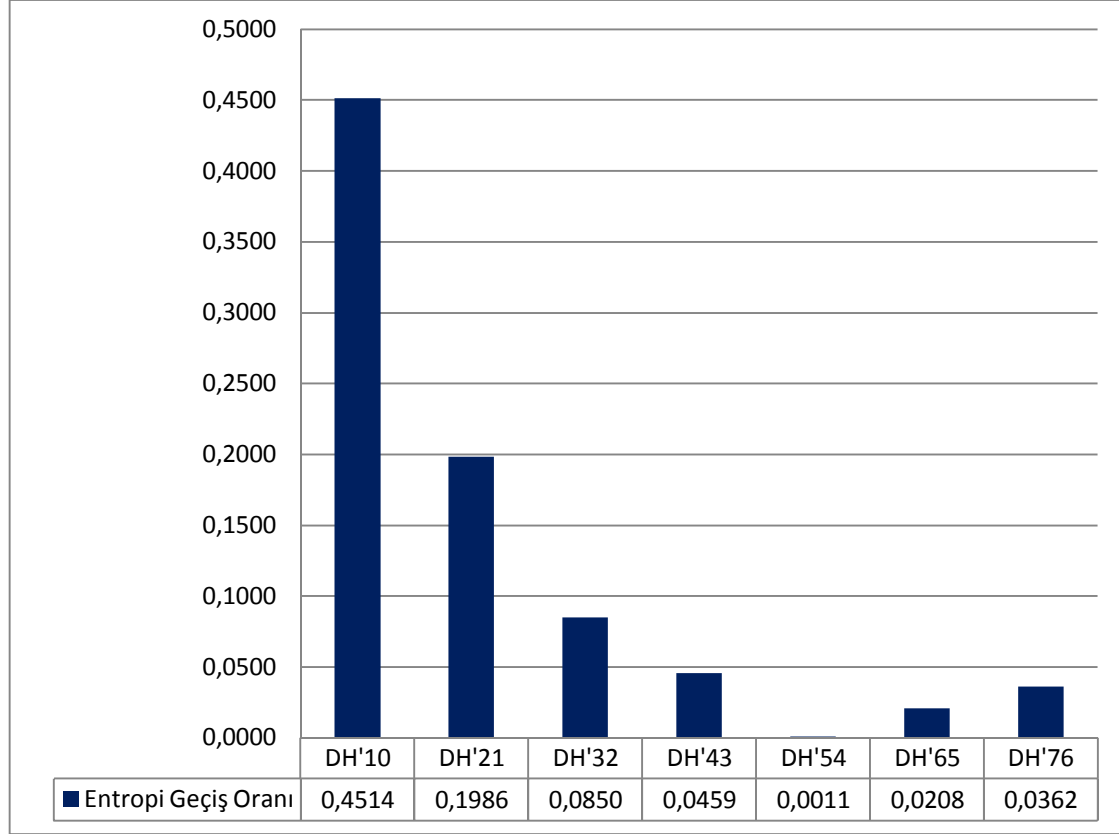
Ayrıca yaşlandırma süreçleri arasında transfer olan Entropi miktarı, her iki çevrimde hesaplanan Entropi değerlerinin farkına bağlıdır. 3. Bölümde (3.19) bağıntısı ile hesaplanan yaşlandırma çevrimleri arasındaki mutlak entropi farkı $\Delta H_{(i, i-1)}$ Entropi Geçiş Oranı olarak tanımlanmış ve hesaplanan değerler ile elde edilen değişim grafiği Şekil 7.6'da gösterilmiştir.

Örnek olarak; başlangıç durumundan 1. yaşlandırma çevrimine geçerken iletilen entropi geçiş oranı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$\Delta H_{q(1,0)} = |H_{q1} - H_{q0}| = |0,4527 - 0,0013| = 0,4514$$

Buna göre yaşlandırma çevrimleri ilerledikçe düşen entropi değerinin yanında entropi geçiş oranı da azalmaktadır. Arızalı olma olasılığı dikkate alındığı zaman bu durum aşağıdaki limit fonksiyonu ile tanımlanabilir.

$$\lim_{q \rightarrow 1} \Delta H(q) = 0 \quad (7.4)$$

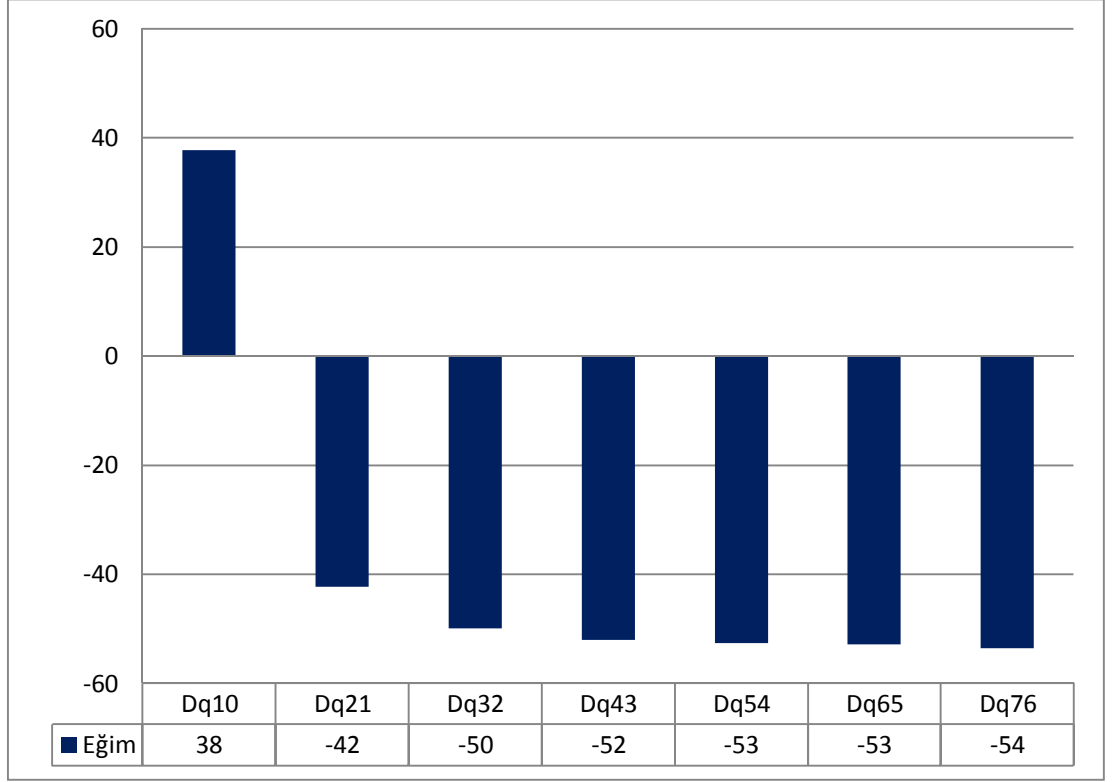


Şekil 7.6 : Arızalı olma durumu için Entropi geçiş oranları.

Arızalı olma durumu bakımından yaşlandırma çevrimlerine ait entropi değerleri grafiksel olarak Şekil 7.4’de gösterilmiştir. Burada gösterilen entropi değişiminin geometrik olarak incelenebilmesi için; değişim eğrisi üzerindeki noktaların teğet eğimleri aşağıdaki tanım ile hesaplanacaktır.

$$\tan \alpha = \frac{\Delta H}{\Delta q} = \frac{H_i - H_{i-1}}{q_i - q_{i-1}} \quad (7.5)$$

Buna göre her bir yaşlandırma çevrimindeki Entropi geçiş oranının olasılık değerine bağlı eğimi derece cinsinden hesaplanarak Şekil 7.7’de verilmiştir.



Şekil 7.7 : Arızalı olma durumuna ait Entropi değişimi ve eğim değerleri.

Buna göre Şekil 7.7’de gösterildiği üzere, elde edilen Entropi değişim grafiğinin her yaşlandırma çevriminde ortaya koyduğu eğim değerleri, 3. yaşlandırma çevrimi ve sonrasında sabit bir eksi eğime ulaşmaktadır. Dolayısıyla Entropi değeri bu çevrimden sonra sabit eğimle azalacağı görülmektedir.

Bu bölümde yapılan incelemeler sonucunda; yaşlandırma sürecinin başından itibaren her iki rulman durumu; *sağlam* ve *arızalı* olma durumları, için hesaplanan Entropi değerinin yüksek bir seviyeden başlayıp sıfıra doğru azaldığı görülmektedir. Shannon Entropi tanımı gereği; Entropi değerindeki azalma eğilimi, sağlıklı olma durumundaki belirsizliğin de azaldığını gösterir. Buna göre 3. yaşlandırma çevrimi sonrasında arızalı olma olasılığının %90 seviyesini aşması ve bu aşamadaki Entropi değerine bağlı belirsizliğin oldukça düşük bir seviyeye ulaşması; rulmandaki bozulmanın kalıcı *arıza* seviyesine ulaştığı sonucunu ortaya koymaktadır.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, endüstride sıklıkla kullanılan asenkron motorlarda ortaya çıkan rulman arızasının, işaret tabanlı analiz yöntemleri ile gelişimini takip edebilmek ve kalıcı arıza durumu oluşumundan önce durum tespitinde bulunmak hedeflenmiştir. Karşılaşılan asenkron motor arızaları arasında rulman arızasının en büyük orana sahip olması, çalışmada bu konuya yoğunlaşılması bakımından önemli bir etken olmuştur.

Asenkron motor rulman arızasının teşhisi ve arıza durum izleme yöntemleri dikkate alındığında, motordan ölçülebilen birçok büyüklüğün işaret tabanlı yöntemler ile analiz edildiği literatürde görülmektedir [3-6]. Bu işaretler arasında akım, titreşim ve sıcaklık en çok tercih edilen büyüklükler olmuştur.

Bu tez çalışmasında ise rulman arızasının yapısal özelliği dikkate alınarak, mevcut ölçüm sisteminden yapay yaşlandırma sürecinde toplanmış olan titreşim işaretleri analiz edilmiş; yapılan analiz sonuçları üzerinden rulman arızasının gelişimi incelenmiş ve bozulma seviyesi ile ilgili kestirimde bulunulmuştur.

Bölüm 4’de ayrıntıları verilen; *The University of Tennessee-Knoxville (UTK) / Amerika Birleşik Devletleri, Maintenance and Reliability Center*’da kurulmuş ve asenkron motor arıza özelliklerinin belirlenmesi üzerine *İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ)* ile ortak çalışmalar yürütülmüş ve bu konuda birçok yayın çıkarılmıştır [45, 48, 54, 55]. Çalışmada kullanılan titreşim verisi bu deney düzeneği üzerinden toplanmıştır. Özellikle elektrik boşalma akımlarının rulman üzerinde yarattığı bozulma etkisinin incelendiği deney düzeneğinde asenkron motora yedi aşamalı tekrarlanan yaşlandırma çevrimleri uygulanmış ve ilgili titreşim işaretleri her yaşlandırma çevrimi sonrasında yürütülen performans testleri sırasında ölçülmüştür. Buna göre sekiz farklı durumu içeren titreşim bilgi kümesi; başlangıç durumu (*sağlam motor*) ve yedi adet yaşlandırma çevrimini kapsamaktadır.

Yapılan çalışmada her bir çevrimdeki titreşim işareti veri kümesi, temel olarak iki farklı aşamada analiz edilmiştir. Başlangıçta zaman ve frekans tanım bölgelerinde incelenen titreşim işaretleri, sonraki aşamada istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

İstatistik analizde elde edilen sonuçlar ışığında, gelişen rulman arızasının derecesini belirleyebilmek amacıyla *Shannon Entropi* tanımından yararlanılmıştır.

Buna göre öncelikle her bir çevrimdeki titreşim işareti zaman tanım bölgesinde incelenmiş ve sağlam durumdan son yaşlandırma çevrimine doğru ilerleyen süreçte titreşim işaretlerinin genliğinde artış olduğu gözlenmiştir. Zaman tanım bölgesinde fark edilebilen bu gelişme, titreşim işaretlerinin yapısal özellikleri hakkında ayrıntılı bilgi vermediğinden aynı işaretlerin frekans tanım bölgesinde spektrum incelemesi yapılmıştır. Her bir yaşlandırma çevrime ait olan titreşim işaretlerinin spektrum analizi, ilerleyen yaşlandırma sürecinde yüksek frekanslarda artan bileşenler ile varlığını göstermektedir.

Mevcut deney düzeneğinden algılanan titreşim işaretleri bir veri toplama sistemine aktarılmış ve burada bir işaret koşullandırma arabiriminden geçirilmiştir. Analog işaretin sayısallaştırılması sırasında örtüşme etkisini gidermek için bir alçak geçiren bant filtre (*anti-aliasing*) kullanılmış ve kesim frekansı 4kHz olarak ayarlanmıştır.

Veri toplama sisteminde kullanılan alçak geçiren bant filtre sayesinde titreşim işaretlerinin frekans spektrumları 0-4000 Hz frekans bandındaki bileşenleri göstermektedir. Spektral analiz amacıyla ilgili yaşlandırma çevrimlerinin Güç Spektrum Yoğunluk (GSY) grafikleri incelendiği ve logaritmik ölçekte karşılaştırıldığı zaman, özellikle 1500Hz ve üzerindeki frekans bölgesinde genlik artışı gözlenmiştir.

Yürütülen yaşlandırma çevrimlerinin rulman yapısında bozulmalara neden olduğu bilinmektedir. Bu nedenle spektral incelemede 1500Hz'in üzerindeki frekans bandının rulman bozulmasını tanımlayan bileşenler bakımından daha yoğun olduğu değerlendirilmiş ve bu nedenle çalışmaları 1500Hz-4000Hz frekans bölgesinde yoğunlaştırabilmek için bir yüksek geçiren bant filtre kullanılmıştır. Butterwoth tipi yüksek geçiren filtre; 1500Hz kesim frekansı ve 5. dereceden bir filtre olarak yapılandırılmıştır.

Her yaşlandırma çevriminden alınan titreşim işaretleri filtrelendikten sonra tekrar zaman ve frekans tanım bölgelerinde incelenmiş ve rulman bozulmasını işaret eden yüksek frekans bileşenlerinin çok daha belirginleştiği gözlenmiştir.

Sonraki aşamada yaşlandırma sürecinde elde edilen titreşim işaretleri istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Bunun için filtre uygulanmayan ham veri kümesi ve

filtrelenmiş veri kümesi ayrı ayrı kullanılarak her bir yaşlandırma çevrimi için dört temel istatistiksel parametre; *ortalama değer*, *standart sapma*, *çarpıklık* ve *basıklık*, hesaplanmıştır. Hesaplanan ayrıntılı incelemesinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Her bir yaşlandırma adımı için hesaplanan parametreleri karşılaştırıldığı zaman en büyük değişimin *standart sapma* parametresinde olduğu gözlenmiştir.
- Yaşlandırma sürecinde son durum ile ilk durum arasında standart sapma değerinin değişimi; filtre uygulanmamış ham veri için 5 kat büyük iken, filtrelenmiş veri için 20 kat daha büyüktür. Bu çıkartıma göre; filtrelenmiş işaretin taşıdığı bozulma bilgisi bakımından daha yoğun olduğu ve bu veri kümesi ile yapılacak incelemelerin daha etkin olacağı değerlendirilmiştir.
- Diğer istatistik parametrelerinden; *ortalama değer* ve *çarpıklık*; filtre ile işaretin koşullandırılması öncesi ve sonrasında dikkate değer bir değişim göstermemiş ve sıfır değerine çok yakın bulunmuştur.
- *Basıklık* parametresi ise; filtrelenmemiş ham veriye göre hesaplandığında genel olarak tüm çevrimler için 3 değerine yakındır, bu anlamda filtre uygulanmamış titreşim verisi Gauss formulu bir dağılım sergilemektedir. Bununla birlikte filtre edilen işarete göre hesaplandığı zaman; ilk iki yaşlandırma çevrimine kadar 3'den uzak, 3. yaşlandırma çevriminden sonra ise tekrar basıklık değeri 3'e yakın bir değer almaktadır. Dolayısıyla 3. çevrimden sonra titreşim verisi Gauss formulu bir dağılım sergilemektedir. 3. çevrimde ortaya çıkan bu değişimin bozulmanın derecesinin belirginleşmesi bakımından önemli olduğu değerlendirilmiştir.

Bir sonraki aşamada; istatistiksel analiz ile elde edilen sonuçlar Shannon Entropi tanımı ile birlikte kullanılmış ve buna göre motorun/rulmanın *sağlam* ve *arızalı* olma olasılıkları kestirilmeye çalışılmıştır. Dolayısıyla *sağlam* ve *arızalı* olma olasılıkları, istatistiksel incelemede en büyük değişimin gözlemlendiği *standart sapma* parametresine bağlı olarak hesaplanmıştır.

Her bir yaşlandırma çevriminde hesaplanan *olasılık değerleri*, başlangıç durumuna göre standart sapma değerinin değişim oranına eşittir. Buna göre her iki durum; sağlam ve arızalı olma, dikkate alınarak her bir yaşlandırma çevrimi için olasılık ve

Entropi hesapları gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemede aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Her bir yaşlandırma çevriminde *standart sapma* değerine bağlı olarak hesaplanan *olasılık* değeri; *sağlam* olma durumu için azalan, *arızalı* olma durumu için artan bir grafik çizmektedir (bkz Şekil 7.1 ve Şekil 7.2). Buna göre yaşlandırma çevrimleri ilerledikçe rulmanın sağlıklı olma olasılığı azalmaktadır.
- *Sağlam* olma olasılığı 3. yaşlandırma çevrimi sonrasında %10 seviyesinin altına inmiştir. Bu seviye erken arıza uyarı sistemi için bir alarm seviyesi olarak tespit edilebilir. Bunu yanında son çevrimde bu seviye %5 olup, kalıcı arızayı işaret etmektedir.
- Entropi tanımı gereği hesaplanan Entropi değerleri her bir yaşlandırma çevriminin sağlıklı veya arızalı olma olasılığındaki belirsizliği bildirmektedir. Yapılan hesaplamalarda 1. yaşlandırma çevrimi her iki durum (*sağlam* ve *arızalı* olma) için de en yüksek Entropi değerinin bulunduğu aşamadır, buna göre durum belirsizliğinin en yüksek olduğu çevrimdir.
- Yaşlandırma sürecinde Entropi değerinin düştüğü, bu anlamda durum belirsizliklerinin azaldığı gözlenmiştir. 3. yaşlandırma çevriminde arızalı olma olasılığına bağlı Entropi değeri 0.15 bit seviyesinin altına inerek büyük bir değişim göstermiştir. Bu anlamda daha önceki değerlendirme sonuçları ile benzerlik göstermek olup, rulman bozulmasının kalıcı arızaya dönüşmeden önce belirginleştiği bir aşama olarak değerlendirilmiştir.
- İki ardışıl yaşlandırma çevrimi arasındaki Entropi farkı; bir çevrimden diğerine transfer edilen Entropi miktarı olarak tanımlanmış ve bu değere Entropi geçiş oranı ismi verilmiştir. Yapılan hesaplamalarda Entropi geçiş oranının yaşlandırma sürecinde azalarak devam ettiği gözlenmiştir. Özellikle 3. çevrimden 4. çevrime geçerken bu değer 0.05bit seviyesinin altına inmiş ve süreç sonuna kadar bu seviyenin altında kalmıştır.
- Entropi değişim oranı geometrik olarak incelenmiş ve olasılık farkına bağlı eğiminin 3. çevrimden sonra sabit açılı azalan bir eğilim çizdiği gözlenmiştir.

Yukarıda verilen analiz sonuçları doğrultusunda, yapay yaşlandırma düzeneğinde gelişen rulman bozulmasının; 3. yaşlandırma çevriminden sonra belirgin bir seviyeye ulaştığını, bu aşamadan sonra kalıcı arızaya gidileceğini kestirmek mümkündür.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında, asenkron motor rulman bozulmasının gelişimini takip etmek ve arıza tespitinde bulunmak amacıyla spektral analiz ve istatistik tabanlı veri analizi ile Shannon Entropi tanımı birlikte kullanılmıştır. Bu çalışmayı benzer çalışmalardan farklı kılan özelliklerin başında, spektral analiz ve istatistiksel analiz gibi çok yaygın kullanılan iki işaret tabanlı yöntemin Shannon Entropi tanımı ile birlikte yorumlanıyor olmasıdır. Ayrıca bu çalışmada yüksek frekans bileşenlerini analiz açısından belirginleştirmek için yüksek geçiren bir filtre ile titreşim işaretinin uyumlaştırılması sağlanmıştır.

Bundan sonra yapılabilecek çalışmalar değerlendirildiği zaman, stokastik sistemler için kurgulanan Stokastik Entropi kavramı benzer bir uygulama ile uyarlanabilir. Bunun yanında mevcut sistemin, çevrimiçi arıza izleme modeli üzerinde çalışılabilir. Tüm bu çalışmalar ile asenkron motor kullanılan endüstriyel işletmelerde kestirimci bakıma yardımcı olacak bir model kurulması söz konusu olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Benbouzid, M.E.H.** (1999). Bibliography on Induction Motors Faults Detection and Diagnosis. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 4, 1065-1074.
- [2] **Tavner, P.J.** (2008). Review of condition monitoring of rotating electrical machines. *The Institution of Engineering and Technology Electric Power Applications*, Vol. 2, No. 4, pp. 215-247.
- [3] **Bellini, A., Filippetti, F., Tassoni, C.; Capolino, G.A.** (2008). Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 12, 4109-4126.
- [4] **Nandi, S.; Toliyat, H.A.; Li, X.** (2005). Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines - A Review. *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 20, No. 4, 719-729.
- [5] **Zhongming, Y.E.; Bin, W.U.** (2000). A Review On Induction Motor Online Fault Diagnosis. *The Third International Power Electronics And Motion Control Conference, IPEMC 2000*, Vol.3, 1353 – 1358.
- [6] **Bonnett, A.H., Soukup, G.C.** (1992). Cause and Analysis of Stator and Rotor Failures in Three-phase Squirrel-cage Induction Motors. *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 28, No. 4, 921-937.
- [7] **Basak, D., Tiwari, A., Das, S.P.** (2006). Fault diagnosis and condition monitoring of electrical machines - A Review. *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 3061-3066, 15-17 Dec.
- [8] **Filippetti, F., Franceschini, G., Tassoni, C., Vas, P.** (2000). Recent Developments Of Induction Motor Drives Fault Diagnosis Using AI Techniques. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 5, 994-1004
- [9] **Raison, B., Rostaing, G.** (2002). Investigations of algorithms for bearing fault detection in induction drives. *28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society IECON*, Vol.2, 1696-1701, 5-8 Nov.
- [10] **Thorsen, O.V., Dalva, M.** (1995). A Survey of Faults on IMotors in OffshoreOil Industry, Petrochemical Ind, Gas Terminals, and Oil Refineries. *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 31, No. 5, 1186-1196.
- [11] **Trigeassou, J.C.** (2011). *Electrical Machines Diagnosis*. London, UK: ISTE Ltd and John Wiley & Sons Inc.
- [12] **Motor Reliability Working Group** (1985). Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations Part I. *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 21, Iss. 4, 853-864.
- [13] **Bonnett, A.H.; Yung, C.** (2008). Increased Efficiency Versus Increased Reliability. *IEEE Industry Applications Magazine*, Jan-Feb, 29-36.

- [14] **Vas, P.** (1993). *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*. University of Aberdeen, UK: Oxford Science Publications.
- [15] **Harihara, P.P., Kyusung, K., Parlos, A.G.** (2003). Signal-based versus model-based fault diagnosis - a trade-off in complexity and performance. *4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2003*, 277-282.
- [16] **Chow, M. Y.** (1997). *Methodologies of Using Neural Network and Fuzzy Logic Technologies for Motor Incipient Fault Detection*. North Carolina State Univ.: Dep. of Electrical and Computer Engineering.
- [17] **Vas, P.** (1999). *Artificial-Intelligence-Based Electrical Machines and Drives*. University of Aberdeen, UK: Oxford Science Publications.
- [18] **Li, B., Goddu, G., Chow, M.Y.** (1998). Detection of common motor bearing faults using frequency-domain vibration signals and a neural network based approach. *IEEE Proceedings of the American Control Conference*, 21-26 June, vol.4, pages: 2032-2036.
- [19] **Filippetti, F., Franceschini, G., Tassoni, C., Vas, P.** (1998). AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect. *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 34, Iss. 1, 98-108.
- [20] **Altug, S., Chow, M.Y., Trussell, H.J.** (1999). Fuzzy inference systems implemented on neural architectures for motor fault detection and diagnosis. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 46, No. 6, 1069-1079.
- [21] **Satish, B., Sarma, N.D:R.** (2005). A fuzzy BP approach for diagnosis and prognosis of bearing faults in induction motors. *IEEE Conference Publications Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 3, page(s): 2291 - 2294.
- [22] **Li, B., Chow, M.-Y., Tipsuwan, Y., Hung, J.C.** (2000). Neural-network-based motor rolling bearing fault diagnosis. *IEEE International Conference on Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 47, Iss. 3, 1060-1069.
- [23] **Seker, S., Kayran, A.H.** (2009). Neural network application for fault detection in electric motors. *IEEE Conference Publications, Power Engineering Conference*, pg. 1-4.
- [24] **Yilmaz, M.S., Ayaz, E.** (2009). Adaptive neuro-fuzzy inference system for bearing fault detection in induction motors using temperature, current, vibration data. *IEEE Conference Publications, EUROCON 2009*, , pg. 1140-1145.
- [25] **Ayaz, E., Ucar, M., Seker, S.** (2009). Neuro-detector Based on Coherence Analysis for Stator Insulation in Electric Motors. *Electric Power Components And Systems*, V.37, Iss.5, pp.533-546, Article Number. PII 910542026 DOI: 10.1080/15325000802599387.

- [26] **Karatoprak, E., Senguler, T., Seker, S.** (2008). Using Probabilistic Neural Networks with Wavelet Transform and Principal Components Analysis for Motor Fault Detection. *IEEE 16th Signal Processing and Communications Applications Conference*, Aydin, Turkey, pages: 356-359.
- [27] **Seker, S., Onal, E., Kaynas, T.** (2011). A Neuro-Detector Based on the Cybernetic Concepts For Fault Detection In Electric Motors. *Journal Of Vibroengineering*, Vol.13, No.4, 629-637.
- [28] **Tallam, R.M., Sang, B.L., Stone, G.C., Kliman, G.B., Jiyoony Y., Habetler, T.G., Harley, R.G.** (2007). A Survey of Methods for Detection of Stator-Related Faults in Induction Machines. *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 43, Iss. 4, 920-933.
- [29] **Benbouzid, M.E.H., Vieira, M., Theys, C.** (1999). Induction motors' faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques. *IEEE Transactions On Power Electronics*, Vol. 14, Iss. 1, 14-22.
- [30] **Tandon, N., Choudhury, A.** (1999). A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology International*, Vol. 32, Iss. 8, 469-480.
- [31] **Benbouzid, M.H.** (2000). A Review Of Induction Motors Signature Analysis As A Medium For Faults Detection. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 5, 984-993.
- [32] **Stack, J.R., Habetler, T.G., Harley, R.G.** (2004). Fault classification and fault signature production for rolling element bearings in electric machines. *IEEE Transactions On Industrial Applications*, Vol. 40, No. 3, 735-739.
- [33] **Wei, Z., Habetler, T.G., Harley, R.G.** (2007). Bearing Condition Monitoring Methods for Electric Machines A General Review. *SDEMPED 2007. IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, pg.3-6.
- [34] **Schoen, R.R.; Habetler, T.G.; Kamran, F.; Bartheld, R.G.** (1995). Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring. *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 31, No. 6, 1274-1279.
- [35] **Thomson, W.T., Fenger, M.** (2001). Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults. *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 7, Iss. 4, 26-34.
- [36] **Obaid, R.R., Habetler, T.G., Stack, J.R.** (2003). Stator current analysis for bearing damage detection in induction motors. *SDEMPED 2003. 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, 182-187.
- [37] **McInerny, S.A.; Dai, Y.** (2003). Basic vibration signal processing for bearing fault detection. *IEEE Transactions On Education*, Vol. 46, Iss. 2, 149-156.
- [38] **Devaney, M., Eren, L.** (2004). Detecting Motor Bearing Faults. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, Vol. 7, Iss. 4, pg.30-50.

- [39] **Immovilli, F.; Bellini, A.; Rubini, R.; Tassoni, C.** (2010). Diagnosis of Bearing Faults in Induction Machines by Vibration or Current Signals - A Critical Comparison. *IEEE Transactions On Industrial Applications*, Vol. 46, Iss. 4, 1350-1359.
- [40] **Trajin, B., Regnier, J., Faucher, J.** (2010). Comparison between vibration and stator current analysis for the detection of bearing faults in asynchronous drives. *IET Electrical Power Applications*, Vol. 4, Iss. 2, p.90-100.
- [41] **Tandon, N., Yadava, G.S., Ramakrishna, K.M.** (2007) A comparison of some condition monitoring techniques for the detection of defect in induction motor ball bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, Iss. 1, p.244-256.
- [42] **Bate, G.H.** *Vibration Diagnostics for Industrial Electric Motor Drives, Application Notes*. Naerum, Denmark: Brüel & Kjaer, DK-2850.
- [43] **Shreve, D.H.** (1995). *Signal Processing For Effective Vibration Analysis*. Columbus, Ohio: IRD Mechanalysis Inc.
- [44] **Betta, G., Liguori, C., Paolillo, A., Pietrosanto, A.** (2002). A DSP-Based FFT-Analyzer for the Fault Diagnosis of Rotating Machine Based on Vibration Analysis. *IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement*, Vol.51, Iss.6, 1316-1322.
- [45] **Seker, S., Ayaz, E., Upadhyaya, B. R., Erbay, A.** (2000). Analysis of Stator Current and Vibration Signals for Detecting Bearing Damage in Electric Motors. *MARCON 2000*, Knoxville, Tennessee, USA, May 2000.
- [46] **Teotrakool, K., Devaney, M.J., Eren, L.** (2009). Adjustable-Speed Drive Bearing-Fault Detection Via Wavelet Packet Decomposition. *IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement*, Vol.58, Iss.8, 2747-2754.
- [47] **Seker, S.** (2000). Bearing Damage Detection Using Wavelet Analysis of Vibration Signals in Electric Motors. *2nd International Seminar on Vibrations and Acoustic Noise of Electric Machinery*, Lodz, Poland.
- [48] **Seker, S., Upadhyaya, B.R. ve Erbay, A.S., McClanahan, J.P. ve da Silva, A.A.** (1998). Rotating Machinery Monitoring and Degradation Trending Using Wavelet Transforms. *MARCON 98 Maintenance and Reliability Conference Proceedings*, vol.1, pp. 23.01-23.11, 12-14 May, Knoxville, USA.
- [49] **Seker, S; Ayaz, E.** (2003). Feature Extraction Related to Bearing Damage in Electric Motors by Wavelet Analysis. *Journal Of The Franklin Institute-Engineering And Applied Mathematics*, 340 (2): 125-134, March.
- [50] **Seker, S., Gullulu, S., Ayaz, E.** (2008). Transfer Function Approach Based Upon Wavelet Transform for Bearing Damage Detection in Electric Motors. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp.155-158, Cambridge, England.

- [51] Erbay, A.S. (1999). *Multi-Sensor Fusion for Induction Motor Aging Analysis and Fault Diagnosis, PhD Thesis*. Knoxville, USA: The University of Tennessee.
- [52] Ayaz, E., (2002). *Elektrik Motorlarında Dalgacık Analizi Yaklaşımı ile Rulman Arıza Tanısı ve Yapay Zeka tabanlı bir Durum İzleme Sistemi, Doktora Tezi*. Istanbul: Istanbul Teknik Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [53] Seker S., Ayaz E. (2002). A Study on Condition Monitoring for Induction Motors Under the Accelerated Aging Processes. *IEEE Power Engineering Review*, V.22, N.7, pp.35-37, July.
- [54] Upadhyaya, B. R., Erbay, A.S., McClanahan, J.P. , Seker, S., Divljakovic, V. (1998). Accelerated Aging Studies of Induction Motors. *MARCON' 98, Maintenance and Reliability Conference*, V.1, pp. 33.01-33.14, Knoxville, Tennessee, USA, May 12-14.
- [55] Ayaz, E., Ucar, M., Seker, S., Upadhyaya, B. R. (2008). Signal Based Fault Detection for Stator Insulation in Electric Motors. *43rd International-Universities-Power-Engineering Conference*, pp.1296-1299, Padova, Italy.
- [56] Seker, S; Ayaz, E. (2003). A reliability model for induction motor ball bearing degradation. *Electric Power Components And Systems*, 31 (7): 639-652, July.
- [57] Karatoprak, E., Senguler, T., Ayaz, E., Caglar, R., Seker, S. (2007). Spectral and statistical based modeling for bearing damage in induction motors. *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, pp.66-71, Cracow, Poland.
- [58] Seker, S., Onal, E. (2007). Entropy Transferred by Aging Process in Electrical Motors. *International Review of Electrical Engineering*, Vol.5 n.4, pg.1550-1554
- [59] Senguler, T., Karatoprak, E., Ayaz, E., Güllülü, S., Seker, S. (2007). Entropy approach using PCA for sequential accelerated aging processes in electrical motors. *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, SDEMPED 2007, pp.501-505.
- [60] Ayaz, E., Ozturk, A., Seker, S. (2009). Fault detection based on continuous wavelet transform and sensor fusion in electric motors. *COMPEL-The International Journal For Computation And Mathematics In Electrical And Electronic Engineering*, V.28, Iss.2, pp.454-470.
- [61] Senguler, T., Karatoprak, E., Seker, S. (2010). A New MLP Approach for the Detection of the Incipient Bearing Damage. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, V.10, Iss.3, pp.34-39.
- [62] Shannon, C.E. (1948). A Mathematical Theory of Information. *The Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656,
- [63] Lesne, A. (2011). Shannon entropy - A rigorous mathematical notion at the crossroads between probability, information theory, dynamical systems and statistical physics. *Laboratoire de Physique Theorique de la Matiere Condensee*, Universite Pierre et Marie Curie-Paris, France

- [64] **Downarowicz, T.** (2011). *Entropy in Dynamical Systems*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, ISBN:978-0-521-88885-1
- [65] **Hershey, H.** (2009). *Entropy Theory of Aging Systems*. University of Cincinnati, USA: Imperial College Press, ISBN13 978-1-84816-292-1
- [66] **Grandy, W.T.** (2008). *Entropy and the Time Evolution of Macroscopic systems*. Oxford, UK: Oxford Science Publications, ISBN 978-0-19-954617-6
- [67] **Rocci, P.** (2006). *Calculations of System Aging through the Stochastic Entropy*. www.mdpi.org/journal/entropy, Vol.8, 134-142
- [68] **Rocci, P.** (2007). Aging and Mortality of Systems Using the Stochastic Entropy. *IBM*.
- [69] **SKF General Catalogue.** (2003) *Catalogue 5000E*.
- [70] **Harris, T.A.** (2007). *Rolling Bearing Analysis - Essential concepts of bearing technology*. USA: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [71] **Bonnett, A.** (1992). Cause And Analysis Of Bearing Failures In Electrical Motors. *Industry Applications Society 39th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*, Sept. 1992, 87-95.
- [72] **Brandt, A.** (2011). *Noise and Vibration Analysis - Signal Analysis and Experimental Procedures*. UK: John Wiley & Sons Ltd.
- [73] **Sonmez, D., Seker, S., Gokasan, M.** (2012). An Entropy Based Fault Detection Approach for Motor Vibration Signals under Accelerated Aging Process. *Journal of Vibroengineering*, September 2012, Volume 14, Issue 3.
- [74] **Cowan, G.** (1998). *Statistical Data Analysis*, New York: Oxford University Press.
- [75] **Taylor, J.K.** (1990). *Statistical Techniques for Data Analysis*. Lewis Publishers, Inc.
- [76] **Romberg, T.M., Black, J.L., Ledwidge, T.J.** (1996). *Signal Processing for Industrial Diagnostics*. John Wiley & Sons Ltd.
- [77] **Patton, R., Frank, P., Clark, R.** (1989). *Fault Diagnosis in Dynamic Systems, Theory and Applications*. Printice Hall Int. Series in Systems and Control Eng.
- [78] **Khwaja, H., Gupta, S.P., Kumar, V.** (2010). A Statistical Approach for Fault Diagnosis in Electrical Machines. *IET Journal of Research*, Vol.56, Iss.3, pg.146-155.
- [79] **Heng, R.B.W., Nor, M.J.M.** (1998). Statistical Analysis of Sound and Vibration Signals for Monitoring Rolling Element Bearing Condition. *Applied Acoustics*, Vol.53, Iss.1-3, pg.211-226.

EKLER

EK A: YAPAY YAŞLANDIRMA DENEYLERİNDE KULLANILAN DENEY DÜZENEĞİ DONANIMININ TEKNİK ÖZELLİKLERİ

EK A. YAPAY YAŞLANDIRMA DENEYLERİNDE KULLANILAN DENEY DÜZENEĞİ DONANIMININ TEKNİK ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde yapay yaşlandırma deneylerinde kullanılan deney düzeneği donanımının teknik özellikleri verilmiştir. Erbay [51] ve Ayaz [52]'ın yaptıkları çalışmalarda aynı deney düzeneği kullanılmış ve donanıma ilişkin özellikler bu çalışmalarda kapsamlı olarak vermiştir. Bu bölümde ise sadece rulman bozulması ve ilgili titreşim işaretlerinin algılanmasına yönelik kullanılan donanıma ait özellikler aktarılmıştır.

A.1 Deney Düzeneği Motorlarının Plaka Bilgileri

Deney düzeneğinde kullanılan motorlara ilişkin plaka bilgileri Çizelge A.1'de verilmiştir.

Çizelge A.1 : Deney motoru plaka bilgileri.

Motor Tipi	Yüksek Verimli Motor
	US Electrical Motors
Yapımcı	Division of Emerson Elec. Co.
	St. Louis, MO
Model No	7965B
HP	5
Motor hızı (dev/dak)	1750
Faz	3
Gövde Numarası	184T
Gövde Tipi	TCE
Gerilim (V)	230/460
Akım (A)	13.0/6.5
Servis Faktörü	1.15
Frekans (Hz)	60
NEMA Tasarım	B
Yalıtım Sınıfı	F
Kapatma	TE
Maks. Ortam Sıcaklığı	40°C
LR KVA Kodu	J
Çalışma oranı	Sürekli
Güç Faktörü	82.5
Verim	90.2
Maks KVAr	1.4
Fan tarafı rulman tipi	6206-2Z-J/C3
Yük tarafı rulman tipi	6205-2Z-J/C3
ID kodu	Z08Z177R190F

A.2 Deney Düzeneginde Kullanılan Dinanometre'ye Ait Teknik Bilgiler

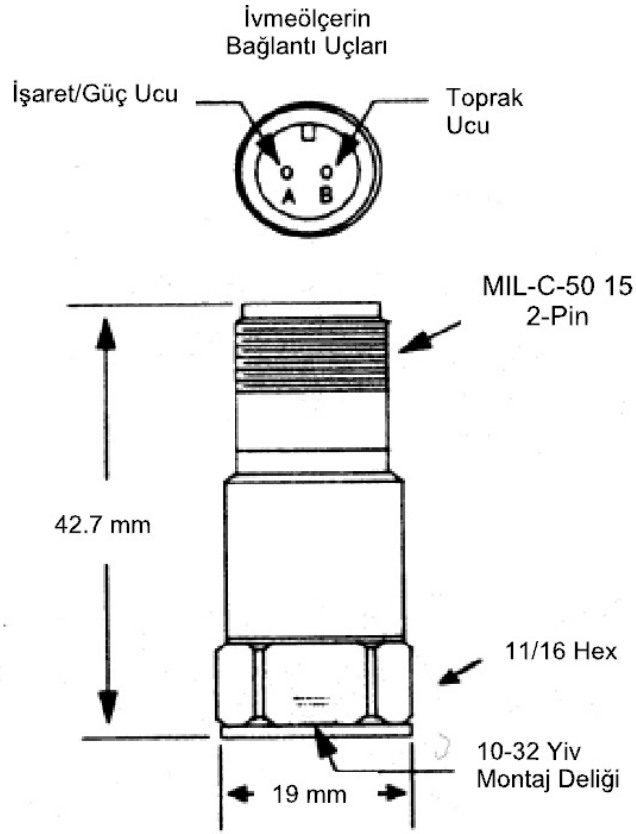
Deney motorlarının performans testlerinde 3kW, 1800 dev/dak. (LSC 132 MC7) tipinde bir generatör (dinamometre) kullanılmış, motorlar ayarlanabilir üniversal bir kavrama yardımı ile generatöre bağlanmıştır. Kullanılan generatörün uyarma devresi 0-2A ve 0-200VDC ile beslenmiş ve yükleme amacıyla 21.63 Ohm değerinde açık tip bir direnç uygulanmıştır.

A.3 Yüksek bant genişlikli ivmeölçerlerin teknik özellikleri

Yaşlandırma çevrimleri sonrasında yürütülen motor performans deneylerinde rulman arızasına ilişkin titreşim işaretleri yüksek bant genişlikli ivmeölçerler üzerinden algılanmıştır. Toplam 6 adet kullanılan bu ivmeölçerlere ilişkin teknik özellikler Çizelge A.2'de verilmiş olup, yapısal özellikleri Şekil A.1'de gösterilmiştir.

Çizelge A.2 : Yüksek bant genişlikli ivmeölçerlerin teknik özellikleri.

Algılayıcı Tipi	Yüksek Frekanslı End. İvmeölçer
Yapımcı	Industrial Monitoring Ins. 3425 Walden Av. Depew, New York
Model #	323B01
Duyarlık	100mV/g $\pm$ %5
Ölçme Aralığı	$\pm$ 50 g
Çözünürlük	0.0002 g
Frekans Aralığı	144 - 480000 cpm $\pm$ %5 102 - 600000 cpm $\pm$ %10 48 - 9000000 cpm $\pm$ 3dB
Bastırılan Rezonan Frekansı	40 kHz
Genlik Doğrusallığı	$\pm$ %1
Enine Duyarlılığı	$\leq$ %5
Şok Limiti	5000 g pk
Sıcaklık aralığı	-54 ... 121°C
Çıkışın $\pm$ %1'ne Yerleşme zamanı	5 saniye
Boşalma Zaman sabiti	$\geq$ 0.2 saniye
Spektral Gürültü	4.0 μ g/ $\sqrt$ Hz (10Hz) 1.2 μ g/ $\sqrt$ Hz (100Hz) 0.4 μ g/ $\sqrt$ Hz (1kHz)
Kasa Yalıtım Koruması	RFI/ESD
Yayılan Elektriksel Gürültü	200 μ g (1-10 kHz)
Algılayıcı Eleman Malzemesi	Seramik
Güç Kaynağı	Model 482A05 I.C.P Güç kaynağı



Şekil A.1 : Yüksek bant genişlikli ivmeölçerin yapısı.

A.4 Isıl Yaşlandırma İşlemi Donanımı

Isıl yaşlandırma sürecinde kullanılan deney fırınına ilişkin teknik özellikler Çizelge A.3’de verilmiştir.

Çizelge A.3 : Deney düzeneği fırınına ait teknik özellikler.

Yapımcı	The Greeve Co., 500Hart Road. Round Lake Illinois, 60073-9989
Model #	LW-201C
İç Boyutları	45.7cm Genişlik, 30.5cm Derinlik, 40.6cm Yüksekli
Kapladığı Hacim	0,0566337 m3
Dış Boyutları	50.8cm Genişlik, 35.5cm Derinlik, 63.5cm Yükseklik
Maksimum Sıcaklık	200°C
Raf Sayısı	2
Yalıtım	2.54
Güç (W)	1600
Yaklaşık Taşıma Ağırlığı	30kg

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Duhan Sönmez

Doğum Yeri ve Tarihi: Ankara, 09 Mayıs 1975

Adres: Zuhurat Baba Mah., Sağlık Sok., Beyazlar Ap., 5-A Blok, D:9, 34147, Bakırköy

E-Posta: duhan.sonmez@emerson.com
duhan.sonmez@gmail.com

Lisans: İstanbul Teknik Üniv, Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans: İstanbul Teknik Üniv, Elektrik Mühendisliği Bölümü

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

- Emerson - Control Techniques, Proje mühendisi (1999-2005),
- Emerson - Control Techniques, Proje yöneticisi (2006-2008),
- Emerson - Control Techniques, Satış müdürü (2008-...)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- **Sonmez D.**, Seker S., Gokasan M. (2012). An Entropy Based Fault Detection Approach for Motor Vibration Signals under Accelerated Aging Process. *Journal of Vibroengineering*, September 2012, Volume 14, Issue 3.

