



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ASENKRON MOTOR ROTOR ARIZASI TESPİT CİHAZININ DÜŞÜK MALİYETLİ EL CİHAZI OLARAK GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Mustafa PARLA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalını

OCAK-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mustafa PARLA tarafından hazırlanan “Asenkron Motor Rotor Arızası Tespit Cihazının Düşük Maliyetli El Cihazı Olarak Gerçekleştirilmesi” adlı tez çalışması 21/01/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Başkan Dr. Öğr. Üyesi Mümtaz MUTLUER	……..
Danışman Prof. Dr. Hayri ARABACI	……..
Üye Dr. Öğr. Üyesi MURAT KÖKLÜ	……..

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Sait GEZGİN
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mustafa PARLA

Tarih: 22 / 01 / 2021

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ASENKRON MOTOR ROTOR ARIZASI TESPİT CİHAZININ DÜŞÜK MALİYETLİ EL CİHAZI OLARAK GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Mustafa PARLA

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hayri ARABACI

2020, 64 Sayfa

Jüri
Danışman Prof. Dr. Hayri ARABACI
Dr. Öğr. Üyesi Murat KÖKLÜ
Dr. Öğr. Üyesi Mümtaz MUTLUER

Asenkron motorların arızaları ile ilgili son 20 yıldır çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Çalışmalarda genellikle veri alma kartları ve yüksek kapasiteli işlemcilere sahip bilgisayarlar kullanılmıştır. Bu durumda teşhis sistemlerinin bir fabrika ortamında pratik olarak uygulanabilmesi çok maliyetli olmaktadır. Ayrıca fabrika ortamında bulunan her bir motor için teşhis sisteminin oluşturulduğu düşünülürse maliyet artmakta ve uygulanabilirlik zorlaşmaktadır. Taşınabilir el cihazı şeklinde tasarlanan bir arıza teşhis sistemi hem maliyet hem de uygulama kolaylığı getirecektir. Ancak el cihazında kullanılabilecek düşük kapasiteli işlemci, teşhis algoritmalarında kullanılan işlem yükü yüksek işlemleri gerçekleştirmek için özel çözümler gerektirmektedir. Dolayısıyla teşhis için bir el cihazı gerçekleştirmek zorlaşmaktadır. Bu çalışmada, rotor arızası teşhisi için düşük kapasiteli işlemci kullanarak taşınabilir bir el cihazı uygulaması gerçekleştirilmiştir. Sağlam ve arızalı durum tespiti için bir asenkron motor kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneyler için kullanılan asenkron motorda laboratuvar ortamında farklı seviyelerde arızalar oluşturulmuştur. Sağlam durum ve oluşturulan arızalı durumlar için motorun stator akımı hall sensörü kullanılarak sisteme aktarılmış ve kaydedilmiştir. Akım verilerinden özellik çıkarımı için motorun hat akımının frekans spektrumundan faydalanılmıştır. Frekans spektrumu elde edilmesi için Hızlı Fourier Dönüşümü kullanılmıştır. Elde edilen akım spektrumları kullanılarak rotor arızalarının stator akımına etkileri incelenmiştir. Sistemde 16 bitlik mikrodenetleyici ile işlemler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar cihaz ekranında yazdırılmış ve grafiksel gösterim için bilgisayara aktarılmıştır. Gerçekleştirilen sistem hem fabrikaların düşük maliyetli olarak arıza teşhisini mümkün kılmış hem de farklı konumlardaki motorlara uygulamayı da kolaylaştırmıştır. Deneysel sonuçlar önerilen yöntemin ve gerçekleştirilen sistemin arıza teşhisini gerçekleştirebildiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Arıza Teşhisi, Asenkron Motor, Hızlı Fourier Dönüşümü, Mikrodenetleyici, Motor Akım Sinyal Analizi, Rotor Arızaları

ABSTRACT

MS THESIS

LOW COST IMPLEMENTATION OF INDUCTION MOTOR ROTOR FAILURE DETECTION DEVICE

Mustafa PARLA

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN COMPUTER ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Hayri ARABACI

2020, 64 Pages

Jury
Advisor Prof. Dr. Hayri ARABACI
Asst. Prof. Dr. Murat KÖKLÜ
Asst. Prof. Dr. Mümtaz MUTLUER

Many studies have been made on the faults of asynchronous motors for the last 20 years, and continue. High-speed data acquisition cards and computers with powerful processors are generally used in these studies. In this situation, the practical implementation of the diagnosis systems in factories is very costly. Also, the cost of the system increases and the applicability becomes more difficult when we consider that a diagnosis system is created for each motor separately in the factory. The diagnostic system as a handheld device is going to provide low cost and ease of use of the application. However, the low-capacity processor that can be used in the handheld device requires special solutions to perform the operations that need more calculations in diagnostic algorithms. Therefore, the implementation of a handheld device for diagnosis becomes difficult. In this study, a portable handheld device application has been implemented by a low capacity processor for rotor failure diagnosis. Experimental studies have been carried out using an asynchronous motor to detect health and fault conditions. In the asynchronous motor used for the experiments, different levels of faults were created in the laboratory environment. For the health state and the faults created, the stator current of the motor has been transferred to the system using the hall sensor and saved. The frequency spectrum of the line current of the motor was used for feature extraction from the current data. Fast Fourier Transform was used to obtain the frequency spectrum. The effects of rotor faults on stator current have been investigated by using the obtained current spectrums. Operations were carried out by a 16-bit microcontroller in the system. Results were shown on the device screen and transferred to the computer for graphical display. The realized system did not only make it possible to diagnose the motor failures for the factories at low cost but also made it possible to easily apply it to motors in different locations. It has been shown with experimental results that the proposed method and the system performed can detect fault diagnosis.

Keywords: Asynchronous Motors, Fast Fourier Transform, Fault Detection, Microcontroller, Motor Current Signals Analysis, Rotor Faults

ÖNSÖZ

Engin bilgi ve tecrübeleri ile tez çalışmamın her aşamasını yönlendiren, her türlü desteğini benden esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Hayri ARABACI‘ ya, değerli katkıları ve desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Mehmet ÇUNKAŞ' a, deney çalışmalarım esnasında maddi manevi desteklerinden dolayı değerli arkadaşım Mehmet Ali ACAR' a teşekkürlerimi sunarım.

Tüm çalışmam boyunca gösterdiği sabır ve desteği için eşime, manevi desteklerini gördüğüm aileme ve arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Mustafa PARLA
KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Tezin Amacı ve Önemi 1
1.1.1. Tezin organizasyonu 3

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **4**

3. ASENKRON MOTORLAR **8**

3.1. Asenkron Motorların Yapısı 8
3.1.1. Stator 9
3.1.2. Rotor 9
3.1.2.1. Sargılı rotor 10
3.1.2.2. Sincap kafesli rotor 10
3.2. Asenkron Motorun Çalışması 11

4. ASENKRON MOTOR ARIZALARI **12**

4.1. Stator Arızaları 12
4.2. Rulman Arızaları 12
4.3. Eksen Kayıklığı Arızaları 13
4.4. Rotor Arızaları 13
4.4.1. Rotor arızalarının etkileri 14

5. MOTOR AKIMI ANALİZ YÖNTEMLERİ **16**

5.1. Frekans Domeninde Analiz Yöntemleri 16
5.1.1. Hızlı Fourier dönüşümü (HFD) 16
5.1.2. Zoom hızlı Fourier dönüşümü 17
5.1.3. Çoklu sinyal sınıflandırması (ÇSS) 17
5.2. Zaman-Frekans Domeninde Analiz Yöntemleri 18
5.2.1. Kısa süreli Fourier dönüşümü 18
5.2.2. Ayrık dalgacık dönüşümü 18

6. DENEYSEL ÇALIŞMA ve SONUÇLARI **20**

6.1. Arıza Teşhis Cihazı 20
6.2. Deney Düzeneğinin Kurulumu 21
6.3. Akım Verilerinin Okunması 24

6.4. Akım İşaretlerinin Spektral Analizi 26
6.5. Arızaların Teşhisi 26

7. DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ 29

7.1. Akım Güç Devir Ölçüm Analizleri 29
7.2. Spektral Analizler 29

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 60

8.1 Sonuçlar 60
8.2 Öneriler 60

KAYNAKLAR 62

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

dB	:Desibel
Hz	:Hertz
Kb	:Kilo byte
kS	:Örnekleme oranı
kW	:Kilowatt
n_r	:Rotor hızı (d/d)
n_s	:Senkron hız(d/d)
rpm	:Dakikadaki devir
s	:Senkron hız ile rotor hızı arasındaki fark

Kısaltmalar

ADC	:Analog sayısal çevirici
ADD	:Ayrık dalgacık dönüşümü
AFD	:Ayrık Fourier dönüşümü
ATC	:Arıza teşhis cihazı
ÇSS	:Çoklu sinyal sınıflandırma
HFD	:Hızlı Fourier dönüşümü
IOT	:Nesnelerin interneti
KSFD	:Kısa süreli Fourier dönüşümü
RMS	:Etkin değer
Z-HFD	:Yaklaştırılmış hızlı Fourier dönüşüm yöntemi

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı ve Önemi

Endüstrinin gelişmesi ile birlikte üretim tesislerinde kullanılan makine sayısı her geçen gün artmaktadır. Dolayısıyla makinelerde kullanılan ve makinelere hareket kabiliyeti sağlayan elektrik motorlarının kullanımı da artmaktadır. Ülkemizde toplam elektrik sarfiyatının yaklaşık %35 ve sanayide toplam elektrik sarfiyatının ise yaklaşık %70'ini asenkron motorlarda harcanması kullanım yaygınlığının önemini vurgulamaktadır (Soy, 2016). Asenkron motorlar sağlam olması, çeşitli güçlerde üretilebilmesi, hız kontrolünün kolay olması, maliyetinin düşük olması nedeniyle endüstride en yaygın kullanılan motorlardır. Kullanım ortamı ve şartlarına bağlı olarak nadiren de olsa arıza yapabilirler. Arızalar elektriksel ya da mekanik problemlerden meydana gelmektedir. Olası bir arıza durumunda kendileri ile birlikte kullanıldıkları sistemde ciddi hasarlara sebep olabilmekte ve sistemi kesintiye uğratarak yüksek maddi zararlara yol açabilmektedir. Bu nedenle, motorların arızalarının teşhisi ve durumlarının gözlenmesi konusu önem arz etmektedir. Endüstri alanları için asenkron motorların durumlarının izlenmesi ihtiyaç haline gelmektedir. Son yıllarda bu konu üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Asenkron motorlarda en sık karşılaşılabilecek arızalar şu şekildedir;

- Stator arızaları,
- Rotor arızaları,
- Rulman arızaları,
- Eksen kayıklığı arızaları.

Stator arızalarını teşhis etmek için basit ölçüm cihazları ve teknikler yeterlidir. Rotor arızaları, rotor çubuklarında oluşan çatlama, kırılma ve yüksek rezistanslı birleştirilmiş sonlandırma halkaları şeklinde olmaktadır. Rotor çubuklarında oluşan bu arızalar genellikle küçük bir arıza başlangıcı olarak ortaya çıkar, zamanla arıza seviyesi artar ve motoru çalışmaz hale getirebilir. Rotor arızalarının basit tekniklerle tespit edilmesi zordur (Arabacı, 2011). Zaman içerisinde gelişen bu tür arızayı erken teşhis etmek motoru ve sistemi ciddi sıkıntılara uğramaktan kurtarabilir. Literatürde asenkron motorlarda rotor arızasını erken tespit etme üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, motorun durumunun elektriksel olarak izlenmesine yönelik çalışmalar üzerine

yoğunlaşıldığı görülmektedir (Benbouzid, 2000; Arabacı, 2005; Kumar ve ark., 2009; Aydin ve ark., 2011; Mariun ve ark., 2011; Saidi ve ark., 2011; Ishkova ve Vítek, 2015; Owatchaiphong, 2018).

Motor akımından arıza belirtisi işaretleri elde etmek için birçok yöntem bulunmaktadır (Benbouzid, 2000; Bellini ve ark., 2008; Aydin ve ark., 2011; Riera-Guasp ve ark., 2012; Eren ve Devaney, 2013). Bunlar; hızlı Fourier dönüşümü (HFD) ve türleri, dalgacık dönüşümü (DD), Hilbert dönüşümü (HD), Gabor dönüşümü (GD) ve istatistiksel analiz yöntemleri şeklindedir. Bu teknikler, motor akımından alınmış çok sayıda örnek verisi üzerinde karmaşık ve işlem hacmi yüksek hesaplamalar içermektedir. Örnek verilerinin saklanması ve işlemlerin gerçekleşmesi esnasında saklanması gereken ara değerler için yüksek kapasiteli bellek ve çıkarılan özellikleri sınıflandırma için kullanılan yöntemler karmaşık olduğu için yüksek kapasiteli işlemciler gerekmektedir. Bu nedenle literatürde incelenen çalışmaların çoğu yüksek hızlı veri aktarma kartları, bilgisayar ve MATLAB, SIMULINK benzeri üçüncü parti yazılımlar ile gerçekleştirilmiştir. Bu durumda arıza teşhis üzerine yapılan çalışmalarda kullanılan sistemlerin, bir endüstri alanında her bir motor için uygulanması çok maliyetli olacağından ve fiziki olarak uygulanması zor olduğundan pratikte uygulanması mümkün olmamaktadır.

Bu tez çalışmasında asenkron motorlarda rotor arızası teşhisi için taşınabilir bir el cihazı uygulaması gerçekleştirmek amaçlanmıştır. Taşınabilir arıza teşhis sistemi hem maliyet hem de uygulama kolaylığı sağlayacaktır. Literatürdeki çalışmaların çoğu taşınması mümkün olmayan ve yüksek kapasiteye sahip donanım ve işlemciler ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada farklı olarak düşük kapasiteli işlemci ve donanımlar kullanılarak arıza teşhisi sistemi geliştirilmiştir. Teşhis algoritmalarının yürütülmesi için gerekli yüksek işlem yüküne sahip işlemleri el cihazında kullanılabilecek düşük kapasiteli işlemci ile gerçekleştirebilmek için özel çözümler gerekmektedir. Dolayısıyla sınırlı donanım ile sistemi gerçekleştirmek zorlaşmaktadır. Motor akımından arıza belirtisi sinyal bileşenlerini incelemek içi Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) kullanılmıştır. Arıza belirtisini sınıflandırmak için eşik yöntemi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik Makineleri Laboratuvarında bulunan deney seti ile yapılmıştır. Test sonuçlarının grafiksel gösterimi için C# dili ile bir görsel ara yüz tasarlanmış ve kullanılmıştır.

Deneylerde 1.1kW'lık asenkron motor kullanılmış ve sağlam, bir çubuğu kırık rotor, iki çubuğu kırık rotor, üç çubuğu kırık rotor olmak üzere dört faklı durum incelenmiştir. Sağlam durum ve arızalandırılmış her bir durum için farklı örnekleme

oranlarında örnekler alarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Oluşturulan arıza durumları için önerilen yöntem ve geliştirilen sistemin arıza teşhisini gerçekleştirdiği gösterilmiştir.

1.1.1. Tezin organizasyonu

Tezin birinci bölümünde; tezin amacını ve önemini anlatıldığı giriş bölümü bulunmaktadır.

İkinci bölümde bu konuda yapılmış benzer çalışmaların anlatıldığı kaynak araştırması bölümü bulunmaktadır.

Üçüncü bölümünde, sincap kafesli asenkron motorun yapısı, parçaları ve çalışma sistemi anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, genel asenkron motor arızalarına değinilmiş ve çalışmaya konu olan rotor arızaları ve etkileri anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, arıza tespiti için kullanılan frekans ve zaman-frekans boyutunda analiz yöntemlerinin prensiplerinden bahsedilmiş, avantajlı olduğu alanlar vurgulanmıştır.

Altıncı bölümde, arıza teşhis cihazının yapısı, deneysel çalışmanın detayları, deney düzeneği, arızaların oluşturulması ve kullanılan yöntem ve teknikler konuları bulunmaktadır.

Yedinci bölümde, deneysel çalışma sonuçları; motorun yüksüz, yarım yükte ve tam yükte ölçümlerinin değerlendirilmiş sonuç spektrumları ayrı ayrı ve grafiksel olarak verilmiştir. Ayrıca sonuçların analizleri ve sonuçlara dair tartışma bulunmaktadır.

Sekizinci bölümde, çalışmanın genel olarak ulaştığı sonuçlar ve gelecek çalışmalar için öneriler yer almaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Asenkron motorlarda rotor arıza teşhisi çalışmalarında ilk olarak termal ve titreşim izleme yöntemleri kullanılmıştır. Son yıllarda yapılan çalışmalar motorun elektriksel olarak izlenmesine yönelik yöntemlerin kullanımı üzerine yoğunlaşılmıştır (Benbouzid, 2000). Özellik çıkarımı için yapılan zaman ve frekans analiz yöntemleri, sınıflandırma algoritmaları yüksek işlem yükü gerektirmektedir. Arıza teşhisi ve motorların durumlarının incelenmesi üzerine yapılan çalışmaların çoğu bilgisayar ortamında modelleme yaparak ya da veri alma kartları ile bilgisayara veriler aktarılarak çeşitli analiz ve sınıflandırma yöntemleri ile MATLAB, LABVIEW benzeri yazılımlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Arabacı ve Bilgin (2006) yaptıkları deneysel çalışmada 6 adet 1.5kW sincap kafesli asenkron motor kullanarak her bir motora farklı seviyelerde arızalar oluşturup rotor arızası teşhisi için önerilen yöntemin doğruluğunu test etmişlerdir. Veri aktarma düzeneği ile bilgisayara her bir motor için ayrı ayrı örnekler alınarak kaydedilmiştir. Akım spektrumu elde etmek için HFD kullanmışlardır. Her bir arıza durumu için elde ettikleri spektrum verilerini yapay sinir ağlarını eğitmek için kullanmış ve sonuç olarak önerilen yöntemin rotor arızasını kesin olarak tespit ettiğini bildirmişlerdir. Spektrum hassasiyetini artırmak için örnekleme süresinin artırılarak daha uzun bir veri örneği kullanılmasını önermişlerdir.

Touhami ve Fadel (2007) klasik spektral analiz yöntemlerinden olan Fourier dönüşümü ve dalgacık dönüşümü yöntemlerinin başarımını kıyaslayan bir çalışma yapmışlardır. Deneyde; sağlam, bir çubuğu kırık rotor, iki çubuğu kırık rotor ve üç çubuğu kırık rotora sahip 4kW'lık motorlardan alınan örnekler bilgisayara aktarılmış, tüm veriler için hem Fourier hem de dalgacık dönüşümleri yapılmıştır. Dalgacık dönüşümünde Morlet dalgacık fonksiyonu, gösterim için spektogram grafiği kullanılmış ve zaman-frekans dönüşümlerinde pencere boyutunun önemli olduğu vurgulanmıştır. Fourier dönüşümünün daha net olarak arıza seviyesini gösterdiğini bildirmişlerdir.

Janeiro ve ark. (2008) yaptıkları deneysel çalışmada rotor arızalarını etkin değer (RMS) ve HFD yöntemini kullanarak teşhis etmişlerdir. Motordan alınan akım işaretlerine etkin değer hesaplayıp daha sonra HFD yaparak motorun yük durumunda arıza belirtisi olan yan bant bileşenlerini incelemişlerdir. Akım pensleri, veri aktarma kartı ve bilgisayar ile oluşturulan deney düzeneği kullanılmıştır. Örnekleme oranı olarak

10 kS/s ile 20000 örnek alarak işlemler gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemin arıza seviyesini de gösterdiğini bildirmişlerdir.

Kumar ve ark. (2009) 2.2 kW, 400V, 50 Hz üç fazlı asenkron motorda rotor arızası teşhis etmek için yüksüz ve değişik yük seviyelerinde alınan motor akım sinyalinde HFD dönüşümü yaparak sonuçları sunmuşlardır. Sensör olarak Fluke akım sensörü, sinyal işleme için ise Tektronics TDS 2014 Power Analyzer cihazını kullanmışlardır. Sonuçların gösteriminde desibel (dB) grafiği kullanımının, spektrumda geniş dinamik aralıkları gösterebildiği vurgulanmıştır.

Aydin ve ark. (2011) çalışmalarında arıza teşhisini yeni bir yöntem ile gerçekleştirmişlerdir. Sağlam ve arızalı motorlarda, yüksüz ve denge durumunda bir faz akımından alınan veriye Hilbert Dönüşümü (HD) işlemi uygulayıp, çıkan değerlere entropi hesabı yapmışlardır. Entropi hesabı eşik değerinden yüksek çıkarsa çıkarılan Hilbert dönüşümü dizileri kopyası alınarak spektrum analizi yapılmıştır. Spektrumdan da arıza belirtisi yan bant bileşenleri incelenmiştir. Bu yöntemle 0.37 kW‘ lık asenkron motorlarda 3 saniye boyunca 3000 Hz örnekleme hızında alınan 16384 örnek ile çalışılmış, veriler yüksek hızlı veri aktarma kartı ile bilgisayara aktarılmıştır. MATLAB ile sinyal işleme, MATLAB-SIMULINK ile de benzetim işlemleri gerçekleştirilmiş sağlam ve arızalı motora ait sonuçlar grafikler halinde sunularak önerilen yöntemin başarısı gösterilmiştir.

Mariun ve ark. (2011) biri sağlam biri rotor arızası olan iki adet üç fazlı asenkron motorda arıza teşhisi için Pencereli Fourier Dönüşümü ve Dalgacık Dönüşümü (DD) metotlarını kullanarak sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Pencere metodunun Fourier dönüşümünün sonucunu iyileştirdiğini bildirmektedirler. Materyal olarak bilgisayara akım, gerilim ve hız verilerini iletmek için SCXI 1125&1140 isimli yüksek hızlı veri aktarma kartı kullanmışlardır. 20000 Hz örnekleme frekansında, 32768 örnek HFD için, 2048 örnek ise DD için alınmış ve sinyal işleme için MATLAB yazılımı kullanılmıştır. Arıza başlangıç seviyesinde iken ve zayıf motor yükü ile yapılan testlerde DD’nün HFD’e göre daha başarılı olduğunu göstermişlerdir.

Pineda-Sanchez ve ark. (2013) çalışmalarında rotor arızası tespiti yeni bir yöntemle spektral analizi işlemlerinin başarısını artırmayı hedeflemişlerdir. Deneyde kullanılan üç fazlı asenkron motorun stator akımından alınan örnekleri spektral analiz işlemine girmeden önce Teager-Kaiser Energy Operator (TKEO) isimli filtreden geçirmişlerdir. Spektral analiz işlemlerinin başarısını artırmak için önerilen metot ile akım sinyalindeki temel frekans bileşeni ve harmonikleri ayrıştırılmıştır. Örnekleme 10

saniye boyunca, 10000 Hz örnekleme hızında yapılmıştır. Sinyal işleme işlemcisi olarak TMS320F28335 'i kullanmış ve testlerini 10 – 50 Hz kaynak frekansı ve değişik yük şartlarında test etmiş, başarılı sonuçlar elde etmişlerdir.

Sapena-Bano ve ark. (2014) BECKHOFF CX5020 isimli Programlanabilen Lojik Kontrolör (PLK) ile rotor arızası tespit çalışması yapmışlardır. Motor hızı, kaynak gerilimi frekansı ve stator akımı sinyal verilerini kullanmışlardır. Motor hızını bir enkoder vasıtası ile elde etmiş ve 1000 Hz örnekleme hızında alınan 8192 HFD noktası ile PLK üzerinde sinyal işleme yaparak işlem sonucu verilerini ağ üzerinden sunucu bilgisayara göndermiş ve sonucu grafiksel olarak sunmuşlardır. Ayrıca test edilen yan bant frekans bileşeni için belirlenen bir eşik değeri üzerine çıkıldığında PLK, Uzaktan Kontrol ve Gözleme Sistemi' ne alarm vermektedir.

Naha ve ark. (2016) asenkron motorların denge durumunda düşük yükte çalışırken Genişletilmiş Kalman Filtresi (GKF) ile motor akım sinyalinden temel frekans bileşenini çıkararak temel frekans bileşenine çok yakın ve düşük genlikteki yan bant frekans bileşenlerini bulmaya çalışmışlardır. Temel frekans bileşeni çıkarılmış akım sinyaline çoklu sinyal sınıflandırması (ÇSS) uygulanarak yan bant bileşeni incelenmiştir. Stator akımını aktarmak için Fluke i1000s isimli pens ampermetre, verileri kaydetmek için ise Yokogawa DL-850v veri kaydedici cihazı kullanılmış ve veriler bilgisayara aktarılarak işlemler gerçekleştirilmiştir. ÇSS'nin çok düşük yüklerde arızayı teşhis ettiği gösterilmiştir.

de Jesus Romero-Troncoso (2016) çalışmasında HFD tabanlı analiz yöntemlerinde başarıyı artırmak için çok oranlı yeniden örnekleme metodunu önermiştir. Motordan alınan örnekler seyreltilerek yeniden örnekler oluşturulmuştur. Böylece spektral sızıntının ayrıştırıldığı ve başarının arttığını göstermişlerdir.

Guven ve Atis (2018) çalışmalarında Cortex-M3 çekirdekli ARM mikrodenetleyicisi ile kırık rotor çubuğu arızası teşhisi için gerçekleme yapmışlardır. Motor akımını sisteme aktarmak için hall etki algılayıcısı, kayma önleyici filtreleme için ise darbe genişlik modülasyonu (DGM) ile durdurma frekansı ayarlanabilen alçak geçiren filtre kullanmışlardır. HFD ve Gri İlişki Analizi (GİA) algoritmasını kullanarak, 500 Hz örnekleme frekansı ile gerçeklemelerini yapmışlardır. Sistem üç farklı rotor arızası olan motorla test edilmiş ve rotor arızaları seviyeleri tespit edilmiştir.

Ayon-Sicaeros ve ark. (2019) kalkınma akımını kullanarak rotor arızası teşhisi için yaptıkları çalışmada kısa süreli Fourier dönüşümü (KSFD) yöntemini kullanmışlardır.

Sağlam ve çeşitli seviyelerde arızalandırılmış motorlardan alınan akım verileri çeşitli pencere fonksiyonları ile KSFD yapılarak sonuçlar spektogram grafiği ile verilmiştir.

HFD ile akım spektrumunda genlik farklarını belirginleştirmek için pencereleme kullanılması gereklidir. Ayrıca örnek alma süresinin artırılması spektrumun hassasiyetini artırmaktadır (Arabacı ve Bilgin, 2006). Bu tez çalışmasında literatürden faklı olarak düşük kapasiteli işlemci ile HFD kullanarak akım spektrumu elde edilmiştir. Spektrumdan düşük genlikteki işaretleri belirginleştirmek için güç spektrum yoğunluğu elde edilmiştir. Çeşitli pencereleme fonksiyonları kullanılarak ve farklı uzunluklarda örnekler alınarak arıza belirtisi işaretler elde edilmiştir. Sonuç olarak düşük maliyetli taşınabilir bir arıza teşhis cihazı geliştirilmesi gerçekleştirilmiştir.

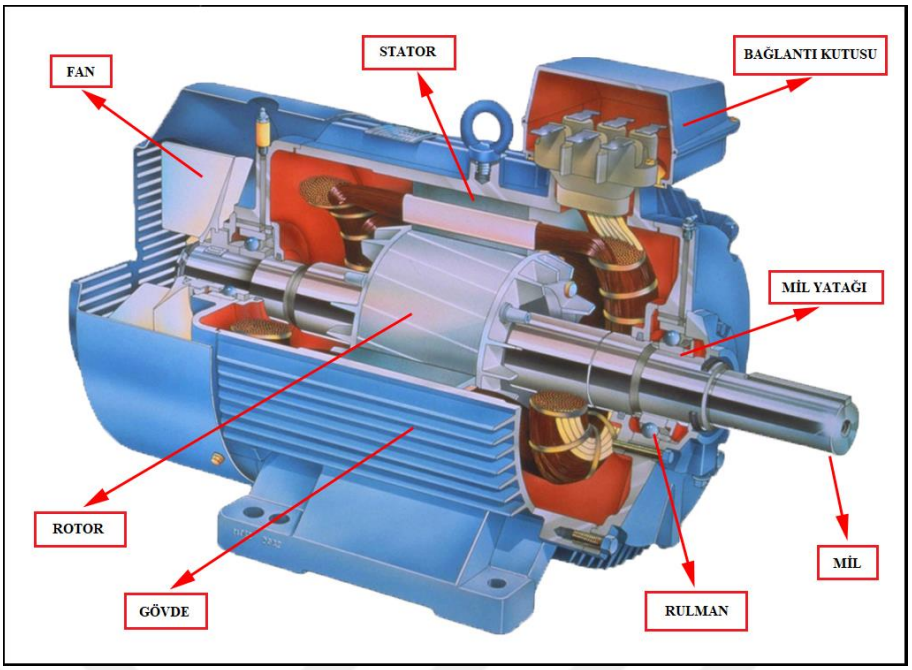
3. ASENKRON MOTORLAR

Birçok alanda kullanılan ve endüstrinin vazgeçilmezi olan asenkron motorlar insanoğluna yıllardır hizmet etmektedir. Ev aletlerinden her türlü taşıta, sanayinin tüm kollarında makinelere hareket kabiliyeti sağlamaktadır. Sanayileşmiş bir ülkenin elektrik sarfiyatının neredeyse yarısını tüketebildikleri için bu yoğun kullanımından dolayı endüstrinin koşan atları tabiri kullanılmaktadır (Thomson ve Fenger, 2001; Ayhan ve ark., 2008). Asenkron motorlar elektromanyetik indüksiyon prensibi ile çalıştığı için indüksiyon motorları olarak da bilinir. İnsanoğluna evvelden beri ihtiyaç olan hareket ihtiyacını karşılayan mekanizmalar için ısı enerjisi kullanılırken elektrik enerjisinin ve elektrik motorlarının keşfi ile enerji olarak elektrik enerjisi kullanılmıştır. Günümüzde, elektrik enerjisinin temiz enerji olması ve diğer kaynakların dünyada azalması nedenleri ile kişisel otomobillerden, büyük taşıtlara ve trenlere kadar elektrik motorları kullanan ve elektrik enerjisi ile çalışan araçlara hızla dönülmektedir. Yapılarının sağlam olması, maliyetinin düşük olması, çeşitli güçlerde bulunabilmesi, fazla bakım gerektirmemesi gibi birçok neden ile asenkron motorlar en yaygın kullanılan elektrik motorları olmuştur.

3.1. Asenkron Motorların Yapısı

Galileo Ferrari (1885) ve Nikola Tesla (1887) tarafından iki ayrı tasarım ile icat edilmiştir. Temel çalışma prensiplerini günümüze kadar korumuştur. Elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirerek milden yüke aktarırlar. Manyetik alan içerisinde bulunan ve içinden akım geçen iletkende meydana gelen kuvvet prensibiyle çalışırlar. Bu prensibe indüksiyon adı verilir.

Asenkron motorlar genellikle sabit duran kısmı stator ve stator içinde dönen kısmı rotor olmak üzere iki ana kısımdan oluşur. Diğer kısımlar ise; rotorun dönmesini sağlayan yataklar, tüm parçaların sabitlendiği gövde, stator içinde rotorun merkezlenmesi için kapaklar ve motorun soğutulması için kullanılan fandan oluşmaktadır. Asenkron motorun yapısı Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Asenkron motorun yapısı

3.1.1. Stator

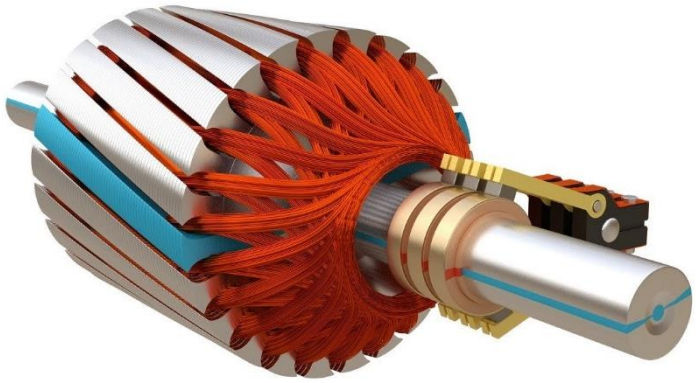
Stator asenkron motorun sabit duran, döner manyetik alanın oluşturulduğu parçasıdır. Asenkron motorlar, rotor çubuklarına gerilim indüklenmesi, indüklenen gerilim kısa devre edilmiş rotor çubukları içerisinden elektrik akımı akması ve bu sayede rotorun dönmesi prensibiyle çalışır. Rotor iletkenlerinde gerilim indüklenmesi için gereken döner manyetik alan statorda bulunan sargılar ile oluşturulmaktadır. Statorun saç gövdesi, iç yüzeylerinde sargıların sarılması için oluklar açılmış, belirli kalınlıklarda üretilen manyetik saçların bir yüzleri yalıtılarak sıkı bir şekilde yapıştırılmasıyla elde edilir. Bu yapıya nüve adı verilir. Nüve içerisindeki oyuk kanallara her bir faz için 120 derece faz farkı olacak şekilde stator sargıları sarılır. Her bir faza ait sargı uçları motor gövdesi üzerindeki bağlantı kutusuna bağlanır.

3.1.2. Rotor

Rotor asenkron motorun dönen parçasıdır. Statorda olduğu gibi oluklu manyetik saç paketin mil üzerine preslenmesiyle oluşturulur. Sincap kafesli rotor (kısa devreli rotor) ve sargılı rotor (bilezikli rotor) olmak üzere iki çeşittir.

3.1.2.1. Sargılı rotor

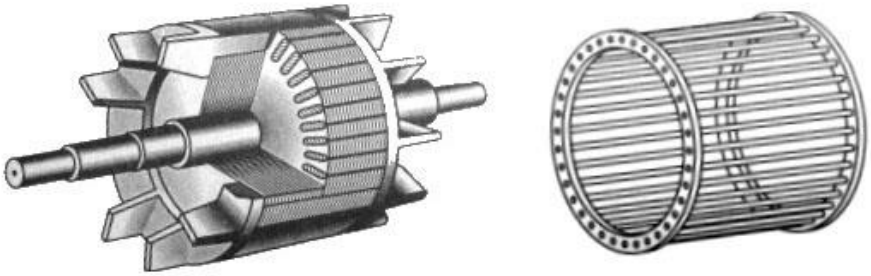
Sargılı rotorda rotor çubukları yerine sargılar mevcuttur. Aralarında 120 derece faz farkı olacak şekilde rotor gövdesine sarılan bu sargıların birer uçları yıldız bağlantı şeklinde birbirine bağlanır. Diğer uçları ise bilezik adı verilen milden yalıtılmış yapıyla motorun bağlantı kutusuna bağlanır. Şekil 3.2'de sargılı rotor görülmektedir.



Şekil 3.2. Sargılı rotor

3.1.2.2. Sincap kafesli rotor

Stator sargılarının oluşturduğu manyetik alan sayesinde rotor çubukları üzerinde gerilim indüklenir. Rotor çubuklarından akım akması için çubukların her iki tarafta kısa devre halkası adı verilen halkalar ile kısa devre edilir. Bu sayede rotor döner. Kısa devre halkasının arasında kalan alan manyetik saçlar ile kaplanır. Rotorun iki tarafında rotor çubuklarını kısa devre eden halkalarda alüminyum döküm yapılırken küçük kanatçıklar meydana getirilir. Bu kanatçıklar pervane gibi motorun soğumasını sağlar. Şekil 3.3. 'de rotorun kesiti (solda) ve saçları çıkartılmış çizimi (sağda) görülmektedir.



Şekil 3.3. Sincap kafesli rotorun yapısı

3.2. Asenkron Motorun Çalışması

Asenkron motorlarda üç fazlı alternatif akım uygulanarak stator sargıları üzerinde 120 derece faz farkı olan döner manyetik alan oluşturulur. Alternatif akımın bir çevrimlik değişimi stator sargılarında bir devirlik döner manyetik alan oluşturur. 50 Hz frekansında bir alternatif akım için dakikada 3000 devir döner alan oluşur. Stator sargılarında oluşan bu döner manyetik alanın dönme hızına senkron hız denir. Rotor senkron hıza ulaştığında döner alan rotor çubukları ile aynı doğrultuda olacağından, rotor çubukları manyetik alan tarafından kesilmeyecektir. Bu nedenle rotorun dönme hızı senkron hızdan geri kalacaktır. Döner alan devir sayısı ile rotor devir sayısı arasındaki farka kayma adı verilir. Kayma s harfi ile gösterilir ve bağıntısı Denklem 3.1'de verilmiştir (Ayhan ve ark., 2008).

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \tag{3.1}$$

4. ASENKRON MOTOR ARIZALARI

Asenkron motorlar sağlam, güvenilir olmalarına rağmen çevresel, termal, mekanik etkiler ve yanlış çalışma gibi öngörülemeyen nedenlerden dolayı arızalanabilir (Sharma ve ark., 2017). Sıklıkla görülen arıza dört grupta incelenebilir (Thomson ve Fenger, 2001; Nandi ve ark., 2005):

- Stator arızaları,
- Rulman arızaları,
- Eksen kayıklığı arızaları,
- Rotor arızaları.

4.1. Stator Arızaları

Stator sargı arızaları, alçak ve orta gerilim asenkron motorlarda önemli bir sorundur. Asenkron motor arızalarının yaklaşık %30-%40'ı stator arızaları olarak görülür (Haji ve Toliyat, 2001; Thomson ve Fenger, 2001). Stator arızaları genellikle stator sargılarındaki yalıtım problemlerinden kaynaklanır. Nem, aşırı ısınma, sistemin ani yüklenmesi gibi etkenler yalıtım problemine sebep olur. Yalıtımın ömrünü uzatmak için sıkışma, aşırı yüklenme ve dengesiz çalışma gibi ısınmaya sebep olan durumlara karşı motorun korunması gerekir (Uçar, 2008). Yalıtım zayıflığı neticesinde sargıların kısa devre olması voltaj dengesizliğine neden olur.

4.2. Rulman Arızaları

Rulman arızaları sıklıkla görülen arızaların yaklaşık %40-%50'sini oluşturur. Mile yapılan uzun süreli baskılar rulman arızasına sebep olur. Bu baskı yuvarlanma yollarında aşırı sürtünmeye ve buna bağlı olarak kazımaya neden olur. Yatağın yanlış hizalanması da doğal olarak rulman arızasına yol açar. Rulmanlar rotoru desteklediği için yatak arızası oluştuğunda statorla rotor arasında radyal bir harekete sebep olur (Benbouzid, 2000; Benbouzid ve Kliman, 2003). Bu tip arıza ilerledikçe yüksek ses ve titreşim belirtileri gösterir.

4.3. Eksen Kayıklığı Arızaları

Eksen kayıklığı arızası rotor ile stator arasındaki boşluğun eşit olmaması durumudur. Minimum radyal hava aralığı konumu boşlukta sabit ise buna statik dış eksantriklik denir. Bunun sebebi stator çekirdeğinin ovalliği ya da stator ile rotorun yanlış merkezlenmesi olabilir. Rotor milinin dönme merkezinde olmaması durumuna dinamik dış eksantriklik denir. Minimum hava boşluğunun konumu rotorla birlikte döner. Bükülmüş rotor mili, yatak aşınması ya da yanlış hizalama dinamik dış eksantrikliğe neden olabilir (Arabacı, 2011). Pratikte %10'a kadar hava boşluğu eksantrikliğine izin verilebilir (Haji ve Toliyat, 2001). Motor arızalarının yaklaşık %10'u eksen kayıklığı arızası olarak gerçekleşmektedir.

4.4. Rotor Arızaları

Asenkron motor arızalarının yaklaşık %10'u rotor arızası olarak görülmektedir (Haji ve Toliyat, 2001; Thomson ve Fenger, 2001; Bellini ve ark., 2008; Vico ve ark., 2010). Sincap kafesli rotoru oluşturan rotor çubukları ile kısa devre halkaları üretimde motorun gücüne göre vidalanarak, kaynakla ya da döküm şeklinde birleştirir (Arabacı, 2011). 3000kW gücüne kadar olan motorlarda döküm kafesli rotorlar kullanılır. Döküm rotorlar sağlam olmalarına rağmen çubuk ya da halkada meydana gelen çatlak ve kırıklar tamir edilmesi zordur (Bellini ve ark., 2008). Stator arızası oluştuktan sonra motorun çalışmaya devam etmesi uzun sürmez fakat rotor arızası genellikle motoru hemen kullanılmaz hale getirmez. Bu nedenle rotor arızasının erken teşhisi önemlidir. Rotor arızaları dört farklı şekilde oluşmaktadır (Arabacı, 2005):

- Tamamen kopmuş (kırık) rotor çubukları ya da kısa devre halkaları
- Yarı kırık (çatlak) rotor çubukları (yüksek dirençli) ya da kısa devre halkaları
- Rotor çubukları ile kısa devre halkası arası kötü bağlantı
- Kısa devre olmuş rotor saçları

Rotor arızalarının oluşum sebebi üretim esnasında yapılan hatalar ya da kullanım esnasında karşılaşılan olumsuz durumlardır. Üretim esnasında dökümle yapılan rotorlarda, döküm işlemini gerçekleştirme esnasında rotor çubuğu içerisinde, kısa devre halkasında ya da birleşim noktalarında kalan hava kabarcığı yabancı madde tam temas ettirmemeye neden olur. Bunun sonucu olarak rotor çubuğu için yüksek direnç oluşur.

Kullanımda ise rotor çubuğu ya da kısa devre halkasının kırılması termal, manyetik, dinamik, çevresel ve mekanik gerilmeler kaynaklanmaktadır. Arıza başlangıcı özellikle büyük motorlarda kalkınma esnasındaki gerilmelerden ve sıcak noktalardan kaynaklanır. Kırık rotor çubuğu arızası, torku önemli ölçüde değiştirir ve motorun güvenli, kararlı çalışması için tehlike arz eder (Sharma ve ark., 2017).

4.4.1. Rotor arızalarının etkileri

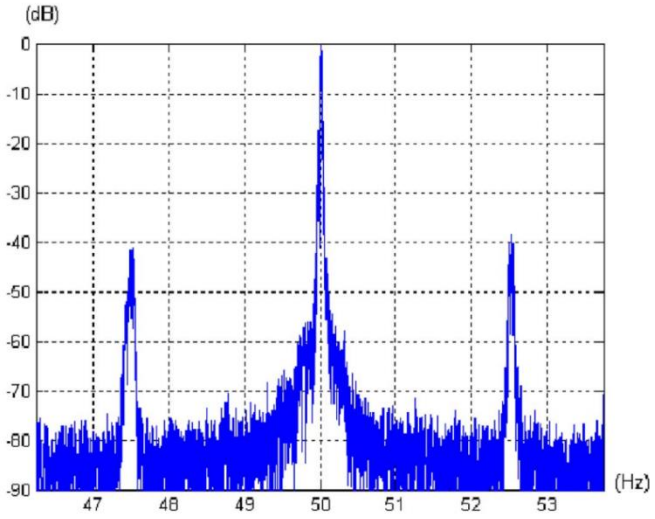
Rotor çubuklarında ya da kısa devre halkasında meydana gelen bir kırık ya da yüksek direnç arızası diğer çubuklardaki akım dağılımını değiştirir. Neticede bu akım değişimi bir hız salınımına sebep olur. Sağ yan-bant bileşeni bu hız salınımına bağlı olarak stator sargısında indüklenir (Thomson ve Fenger, 2001). Rotor arızası sonucu oluşan anormal manyetik alandan kaynaklanan spektral bileşenler incelenerek tespit edilebilir. Bu spektral bileşenler yan-bant bileşenleri olarak adlandırılır. Denklem 4.1'de verilen yan-bant frekans bileşeni temel frekansa yakın bir frekans olarak spektrumda görülür (Benbouzid, 2000; Miletic ve Cettolo, 2003; Sharma ve ark., 2017).

$$f_{brb} = f.(1 \pm 2.k.s) \tag{4.1}$$

f_{brb} yan-bant frekansı, f temel frekans, s kayma, k tamsayıdır.

Rotor arızasının sebep olduğu salınımlar moment ve hız değişimi getirdiği için temel frekansa simetrik yan-bant bileşenleri sol ve sağ olmak üzere iki tanedir (Miletic ve Cettolo, 2003). Şekil 4.1.'de rotor arızasının stator akımı üzerinde yaptığı etki gösterilmiştir. Motor yükü değiştikçe yan-bant bileşenleri yer değiştirmekte, yük arttıkça temel frekanstan uzaklaşmaktadır (Aydin ve ark., 2011).

Arızalı rotor durumu, temel ve sol yan-bant bileşeni arasındaki genlik farkından değerlendirilebilir. Temel bant ve sol yan-bant arasındaki genlik farkı 50 dB'den düşük olması rotor arızası olduğunu göstermektedir (Benbouzid, 2000; Kumar ve ark., 2009; Vico ve ark., 2010; Sharma ve ark., 2017).



Şekil 4.1. Yan-bant frekans bileşenleri gösterimi

5. MOTOR AKIMI ANALİZ YÖNTEMLERİ

Asenkron motorlarda arıza teşhisi için motor akımının spektral analizi kullanılarak yapılan teşhis yöntemlerine motor akım işaret analizi (MAİA) adı verilmektedir (Benbouzid, 2000). Analiz yöntemleri; frekans domeni analiz yöntemleri ve zaman-frekans domeni analiz yöntemleri olarak incelenebilir.

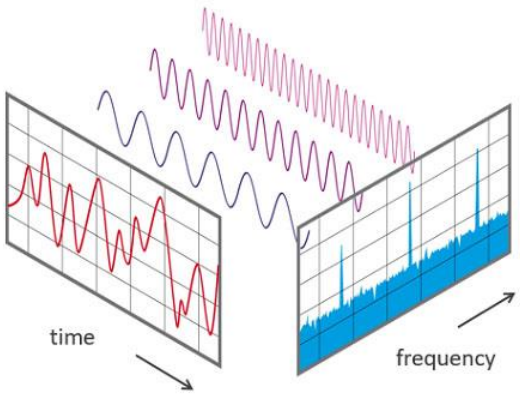
5.1. Frekans Domeninde Analiz Yöntemleri

5.1.1. Hızlı Fourier dönüşümü (HFD)

Ayrık zamanlı Fourier dönüşümü (AFD) zaman domenindeki işaretlerin frekans alanında gösterimini sağlamaktadır. Hızlı Fourier dönüşümü ise AFD' nün işlem sayısının azaltılmış türevi olan, 1965 yılında Cooley ve Tukey' in geliştirdiği bir metottur. AFD dönüşüm fonksiyonu Denklem 5.1'de görülmektedir.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]\, e^{-jk\frac{2\pi}{N}n} \qquad \begin{matrix} x[n]: & n = 0,1,\ldots,N\text{-}1 \\ X[k]: & k = 0,1,\ldots,N\text{-}1 \end{matrix} \tag{5.1}$$

AFD metodu N örnek sayısı için N^2 adet işlemden oluşan iş yüküne sahipken, HFD metodu $N.\log_2(N)$ adet işlem iş yüküne sahiptir (Owatchaiphong, 2018). İş yükünün az olması nedeniyle HFD günümüzde sinyal işleme üzerine birçok uygulama alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 5.1'de HFD' nün zaman-frekans domeni dönüşümü grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.1. HFD zaman-frekans domeni dönüşümünün grafiksel gösterimi

5.1.2. Zoom hızlı Fourier dönüşümü

Zoom-hızlı Fourier dönüşümü (Z-HFD), spektral analiz amacıyla dar bir frekans bandında yakınlaştırma için kullanışlı bit yöntemdir. Yöntem, Fourier dönüşümünde kullanılan nokta çözünürlüğünü detaylı incelenmek istenen frekans bandı aralığına yoğunlaştırmaktadır. Frekans çözünürlüğü yalnızca örnekleme oranından bağımsız olarak örneklerin kapsadığı toplam süre ile ilgilidir. Z-HFD zamanla değişen işaretleri analiz etmede, istenilen bant genişliğinde anlık bir frekansın izlenmesini sağladığı için daha etkindir. Z-HFD sayesinde elde edilen hesaplama maliyetindeki kazanç, örnek seyreltme faktörü (C) ile ilgilidir. Z-HFD yönteminin hesaplama maliyetine ait bağıntı Denklem 5.2' de verilmiştir(Bellini ve ark., 2008).

$$Hesap\ Maliyeti = C\frac{\log_2 N}{\log_2 N - \log_2 C} \tag{5.2}$$

5.1.3. Çoklu sinyal sınıflandırması (ÇSS)

Çoklu sinyal sınıflandırma (ÇSS) yöntemi, düşük sinyal-gürültü oranına sahip frekansları tespit edebilen yüksek çözünürlüklü bir metottur ve haberleşme, radar, sonar gibi birçok uygulama alanına sahiptir. Düşük SNR sinyallerde HFD ve Z-HFD yöntemlerinin frekans çözünürlük sınırlamasını aşan ÇSS motor arıza teşhis yöntemi olarak uygulanmaktadır. Bu yöntemin bir zayıflığı da gürültülerin genliği hakkında kesin bir bilgi verememesidir (Moussa ve ark., 2016).

ÇSS metodu sinyali, ilinti matrisine ait vektörleri sinyal alt uzayı ve gürültü alt uzayı olarak ayıran öz vektör prensibine dayanır (Kutay ve Afacan, 2014). ÇSS yöntemi, ilinti matrisinin boyutunu artırarak birçok frekansı bulmak mümkündür, fakat uzun bir hesaplama süresi alır (Kia ve ark., 2007). Alınan örnek sayısı N iken, M=3/4N şeklinde M ilinti matrisi büyüklüğü, M^3 ise ÇSS metodunun hesaplama maliyetidir (King, 2011).

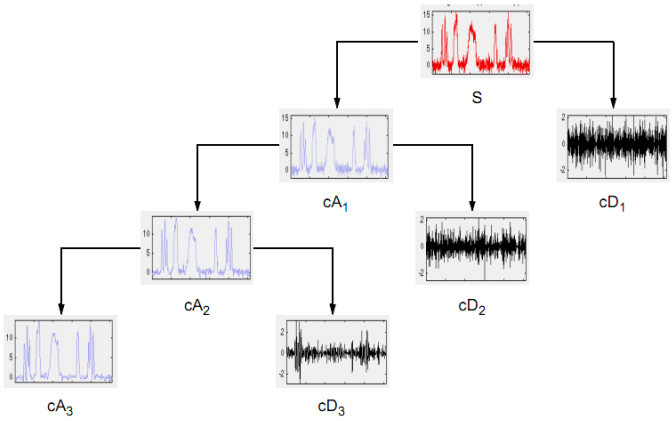
5.2. Zaman-Frekans Domeninde Analiz Yöntemleri

5.2.1. Kısa süreli Fourier dönüşümü

Kısa süreli Fourier dönüşümü (KSFD) diğer adıyla pencereli Fourier dönüşümü basit bir spektrum analizi metodudur. Tüm sinyalin dönüşümünü yapmak yerine, kayan zaman penceresi ile sinyalin parça parça Fourier dönüşümünü yapar. KSFD frekans değişiminin yavaş gerçekleştiği durumda uygulanabilir (King, 2011). KSFD uygulamasında, zaman ve frekans çözünürlüğü arasında uygun seçim yapılmalıdır. Kısa süreli pencere, düşük frekans çözünürlüğü pahasına iyi bir zaman çözünürlüğü sağlarken uzun süreli, düşük zaman çözünürlüğü pahasına iyi bir frekans çözünürlüğü sağlar (Bellini ve ark., 2008). Her bir pencere için yapılan Fourier dönüşümleri kullanılarak elde edilen zaman-frekans değişimini gösteren grafiğe spektogram adı verilir. Spektogram incelenerek zaman eksenindeki frekans değişimi hakkında bilgi edinilebilir. Pencereler iç içe geçecek şekilde konumlandırmak spektogram çözünürlüğünü artırır (Arabaci ve Bilgin, 2007).

5.2.2. Ayrık dalgacık dönüşümü

Ayrık dalgacık dönüşümü (ADD) ayrık sinyal işaretlerinde zaman-frekans analizi için kullanılan bir dönüşüm metodudur. Sürekli ve süreksiz işaretlerde bileşenleri tanımlama ve gürültü temizlemede yaygın olarak kullanılmaktadır. ADD, Fourier dönüşümündeki gibi farklı frekanslardaki sinüs dalgalarını kullanmak yerine, sinyali bir ana dalgacık dizisinin ölçeklenmiş ve ötelenmiş nüshalarına ayırır. Şekil 4.4’ de görüldüğü gibi sinyal, hem yüksek frekansları analiz etmek üzere bir dizi yüksek geçişli filtre hem de düşük frekansları analiz etmek için bir dizi düşük geçişli filtre içinden geçirilir (Ameid ve ark., 2018).



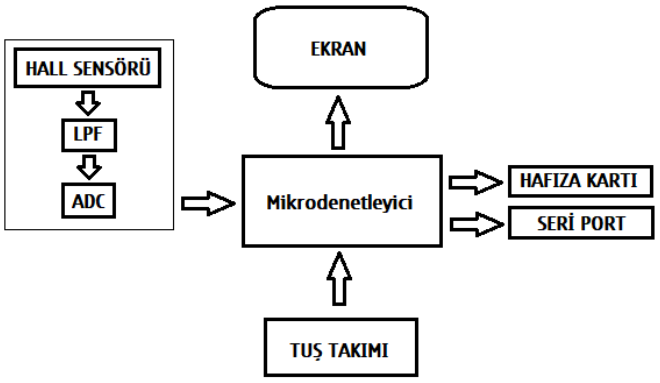
Şekil 4.4. Ayrık dalgacık dönüşümü fonksiyonel gösterimi

Örneklenen sinyale ADD dönüşüm işlemi süresinde bir ana dalgacık hem ölçeklenir hem de ötelenir. Ana dalgacığın ölçeklenmesi dalganın genişletilip daraltılması, ötelenmesi ise dalganın zaman ekseninde kaydırılması ile yapılır (Öner ve ark., 2017). Zaman serilerinin sayısı arttığında sonuç hassasiyeti ve hesaplama zamanı artar. Hesaplama sınırı, serinin zaman aralığına ve ölçek-kaydırma değer aralığına bağlıdır.

6. DENEYSEL ÇALIŞMA ve SONUÇLARI

6.1. Arıza Teşhis Cihazı

Arıza teşhisi için el cihazı şeklinde bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Sistemin bilgisayardan bağımsız arıza teşhisi yapması, taşınabilir ve düşük maliyetli olması bu çalışmanın temel amacıdır. Arıza teşhis cihazı (ATC) donanım olarak üç ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar; hall sensörü, pasif alçak geçiren filtre ve ADC'den oluşan veri toplama birimi, işlem birimi ve ekran, tuş takımı, hafıza kartı ve seri porttan oluşan kullanıcı ara yüzü birimleridir. ATC'nın blok diyagramı Şekil 6.1'de verilmiştir.

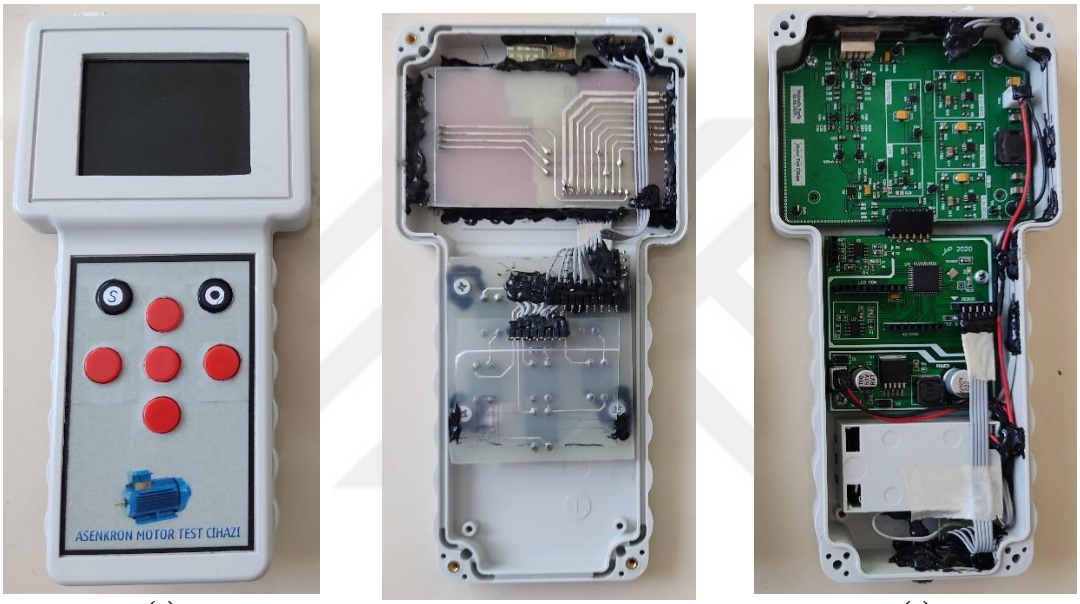


Şekil 6.1. Arıza teşhis cihazının blok diyagramı

ATC ile motor akımını okumak için yüksek hassasiyetli ve elektriksel olarak yalıtılmış hall etkisi prensibi ile çalışan sensör kullanılmıştır. Sensör, besleme geriliminin yarısı olan 2.5v üzerinde merkezlenmiş analog sinyal şeklinde çıkış vermektedir. ADC ile sayısal çevrime girmeden önce 50 Hz alçak geçiren filtre ile sinyal filtrelenmiştir. Akım sinyalini sayısal çevrim için 16 bit çözünürlükte 1 Msps örnekleme oranına kadar destekleyen SAR tipi ADC kullanılmıştır.

Cihaz parametrelerini ayarlamak, test işlemini başlatmak için tuş takımı, test parametrelerini ve teşhis sonuçlarını görmek için ekran ile kullanıcı ara yüzü oluşturulmuştur. ATC motor akımından elde edilen verileri seçenekli olarak SD/MMC tipi hafıza kartına kaydedebilmektedir. Aynı zamanda akım verilerini bilgisayarda depolamak ya da sonuç spektrumunu bilgisayar ekranına çizdirmek için gerekli verilerin gönderimi düşünülerek seri port eklenmiştir. Seri port iletişimini ADC çevirimine harmonik katmaması için izolasyon entegresi ile cihazdan yalıtılmıştır.

Yukarıda belirtilen işlemleri ve arıza teşhisi için gerekli algoritmaları yürütme görevi mikrodenetleyici aittir. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak düşük kapasiteli belleğe ve 16 bit çekirdekli işlemciye sahip bir mikrodenetleyici kullanılmıştır. Cihazda kullanılan DSPIC33EP512GP504 isimli mikrodenetleyici, okunan motor akımı verilerini, algoritma ve yazılımı yürütmek için gerekli olan değişkenleri saklamak için kullanılan ram hafızası olarak sadece 48 Kb'lık hafızaya sahiptir. Şekil 6.2' de ATC'nın (a) ön konsolu , (b) ön konsolun iç bölgesini ve (c) elektronik devre kartını gösteren fotoğrafları verilmiştir.



(a) (b) (c)

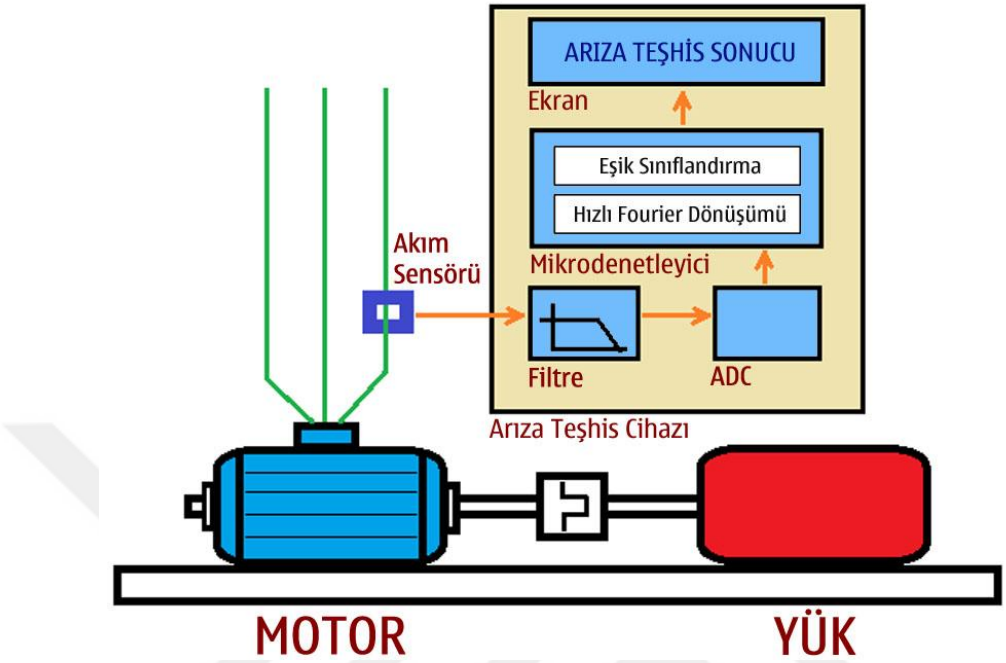
Şekil 6.2. Arıza teşhis cihazının fotoğrafı

Analog sayısal çevrim elemanları ile yüksek gürültü üreten mikrodenetleyicili devre elektriksel gürültüyü en aza indirmek için birbirinden yalıtılmak amacıyla iki ayrı kart olarak tasarlanmıştır. Sistem hem pil ile hem güç kaynağı ile beslenebilmektedir. Sistemin taşınabilir, her türlü fabrika ortamında fiziki koşulda çalışabilmesi için tasarımı uygun hale getirilmiştir.

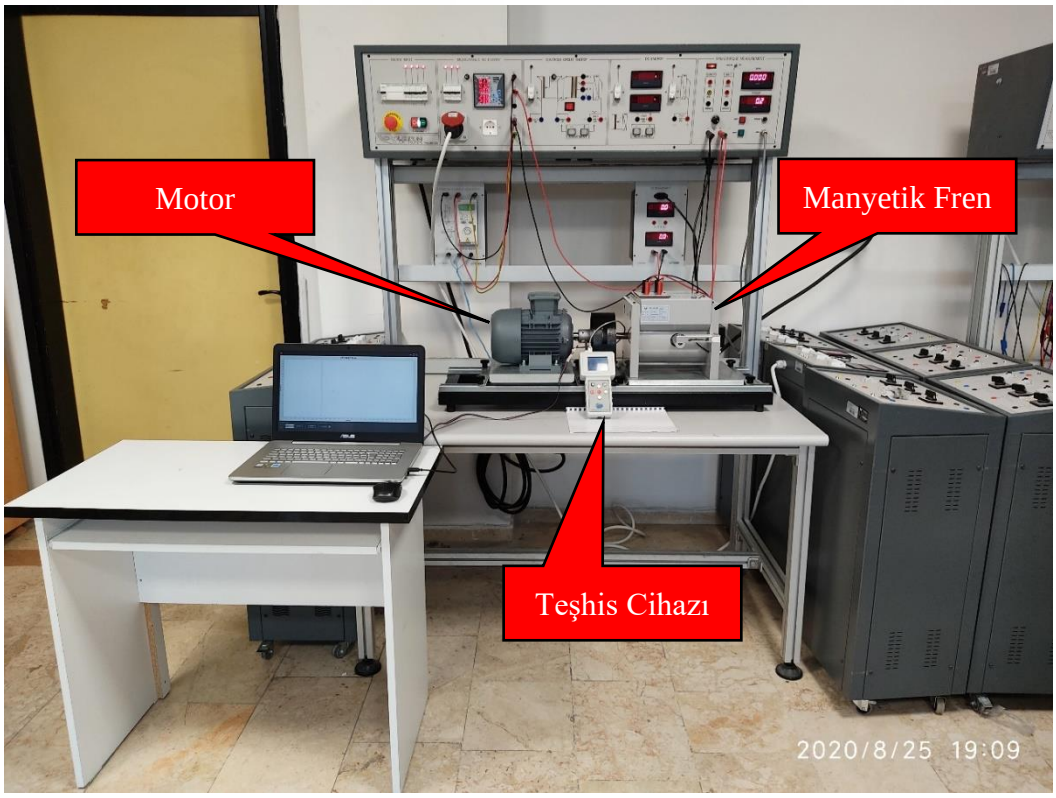
6.2. Deney Düzeneğinin Kurulumu

Deneyler Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi elektrik makineleri laboratuvarında yapılmıştır. Laboratuvarda bulunan, motorları beslemek için AC, DC güç kaynağı, hız kontrolü için inverter sürücü, rpm hız sayacı, 0-24v kontrollü manyetik fren sistemi ve ölçüm cihazları barındıran bir deney seti deney için kullanılmıştır. Asenkron

motorun sağlam ve arızalı durumlarını incelemek içi uygun olan deney düzeneğine ait blok diyagramı Şekil 6.3'de deney düzeneğinin fotoğrafı Şekil 6.4'de verilmiştir.



Şekil 6.3. Deney düzeneğine ait blok diyagramı



Şekil 6.4. Deney düzeneğinin fotoğrafı

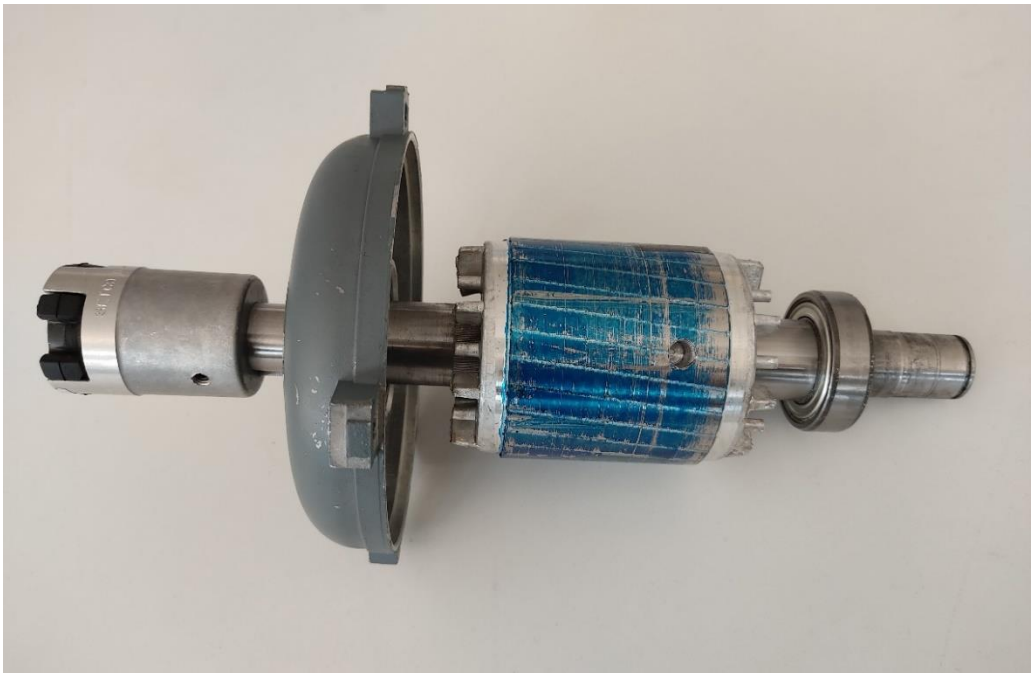
Deneyde kullanılan üç fazlı sincap kafesli asenkron motorun beslemesi deney düzeneğinde bulunan inverter ile 50Hz frekansına ayarlanarak sağlanmıştır. Deneyde kullanılan asenkron motorun teknik özellikleri Çizelge 6.1.'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Deneyde kullanılan asenkron motorun özellikleri

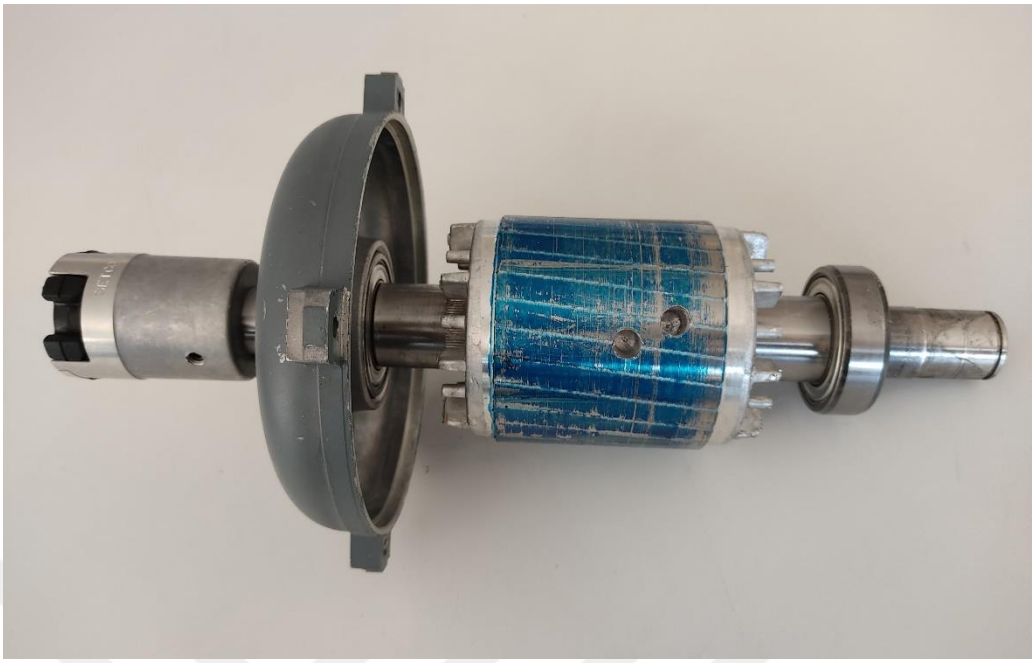
Özellik	Değer
Besleme frekansı	50 Hz
Gücü	1,1 kW
Devir	1380 d/dk

Deneyde motoru yüklemek için 20 Nm moment ve 0-24v ayarlı manyetik fren sistemi kullanılmıştır. Deney düzeneğinde bulunan ayarlanabilir DC güç kaynağı ile manyetik fren sistemi yarım yük ve tam yük için kumanda edilmiştir. Motor devri motora bağlı enkoder vasıtasıyla elde edilmiştir.

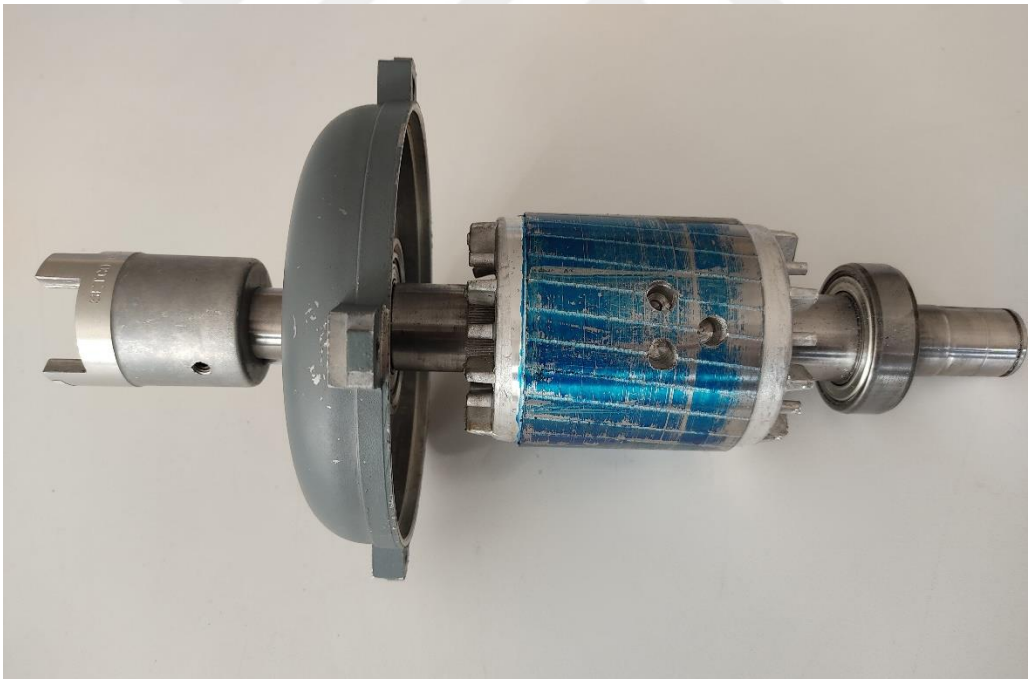
Motorun sağlam durum ve arızalı durumları için laboratuvar ortamında arızalandırma yapılmıştır. Arıza durumu olarak rotor çubukları delik açılarak kırık hale getirilip iletkenliği tamamen kaybettirilmek suretiyle yapılmıştır. Arızalandırılmış rotorlara ait Şekil 6.5'de bir çubuğu kırık rotor, Şekil 6.6'de iki çubuğu kırık rotor, Şekil 6.7'de üç çubuğu kırık rotor olarak verilmiştir.



Şekil 6.5. Bir rotor çubuğu kırık arızalandırılmış rotor fotoğrafı



Şekil 6.6. İki rotor çubuğu kırık arızalandırılmış rotor fotoğrafı



Şekil 6.7. Üç rotor çubuğu kırık arızalandırılmış rotor fotoğrafı

6.3. Akım Verilerinin Okunması

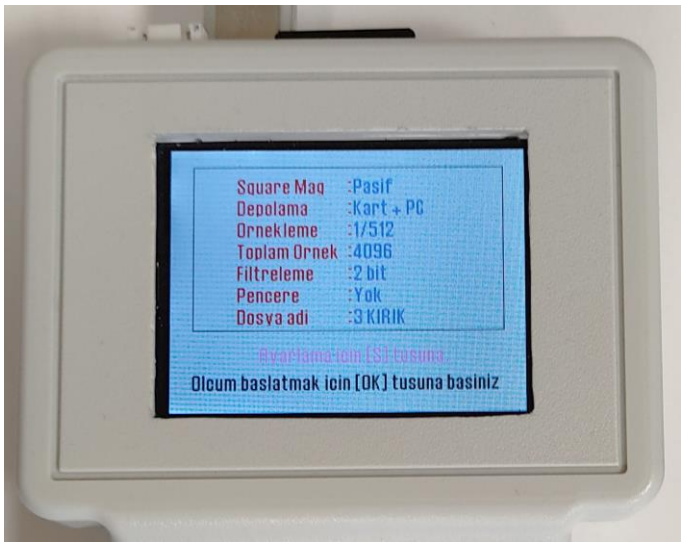
Motor akım verilerinin elde edilmesi için akım sinyali, motorun bir faz akımından hall sensörü ile sisteme aktarılmıştır. Yüksek frekanslı gürültü sinyallerinin geçişini

engellemek için 50 Hz alçak geçiren filtre ile filtreleme yaptıktan sonra analog sayısal dönüştürücü ile motor akımında sayısal veriler elde edilmiştir. Motordan sağlam durum ve her bir arıza durumu için çeşitli oranlarda ve uzunlukta örnekler alınmıştır. Deneyde yapılan ölçümlere ait örnekleme oranı (örnek/saniye), toplam örnek alma uzunluğu, toplam örnek alma süresi ve frekans çözünürlüğü Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Ölçümlere ait örnekleme oranları, süreleri ve frekans çözünürlükleri

Örnekleme Oranı (Örnek/Saniye)	Toplam Örnek Adedi	Toplam Örnekleme Süresi (sn)	Frekans Çözünürlüğü (Hz)
256	1024	4	0,25
256	2048	8	0,125
256	4096	16	0,0625
512	2048	4	0,25
512	4096	8	0,125

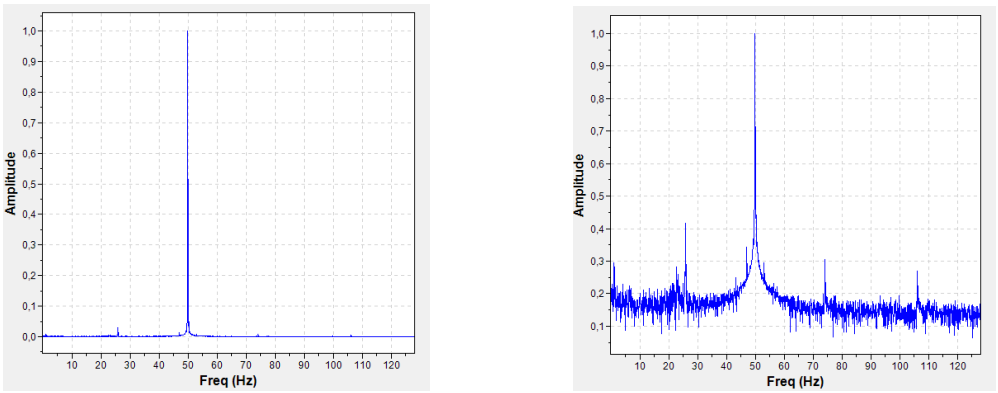
Mikrodenetleyicinin ram hafızası ve maksimum adresleme kapasitesine göre örneklemeler yapılmış, okunan akım verileri deney esnasında ATC'a takılı olan hafıza kartına hem de seri port üzerinden bilgisayara gönderilerek ayrı ayrı dosyalara kaydettirilmiştir. Test işlemini başlatmadan önce depolama yeri, örnekleme oranı toplam örnek sayısı gibi parametreler ayarlamak suretiyle örnekleme yapılabilmektedir. Şekil 6.8'de cihazın ayarlar menüsünün ekran görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.8. ATC'nın ayarlar menüsü ekran görüntüsü

6.4. Akım İşaretlerinin Spektral Analizi

Sağlam ve 3 farklı seviyede arızalandırılmış rotorlar için motorların akım sinyalleri ölçülmüştür. Her bir motor için motorun boşta, yüksüz çalışmada, yarım yükte ve tam yükte Çizelge 6.2'de verilen örnekleme oranlarında örnekler alınarak kaydedilmiştir. Akım spektrumunun hassasiyetinin artırılması için örnek sayısı çoğaltılmasıyla mümkün olmamaktadır. Hassasiyeti artırmak için örnekleme süresinin mümkün olduğunca uzun tutulması gerekir (Arabacı ve Bilgin, 2006). Mikrodenetleyicinin hafızasının alabileceği üst sınıra kadar çeşitli çözünürlük ve uzunlukta örnekler alınmıştır. HFD pencere kullanılması spektrumda genlik farkını belirginleştirir(Arabacı ve Bilgin, 2006). Bu nedenle ATC'nın ayarlar menüsüne Rectengular, Hamming, Hanning, Triangle, Flat Top filtreleme seçenekleri eklenmiştir. HFD ile elde edilen spektruma düşük seviyeli frekansları belirginleştirmek için güç spektrum yoğunluğu uygulanmıştır (Cusido ve ark., 2006). Son olarak spektrum normalize edilmiştir. Şekil 6.9'de (a) güç spektrum yoğunluğu uygulanmamış spektrum, (b) uygulanmış spektrum gösterimleri verilmiştir.



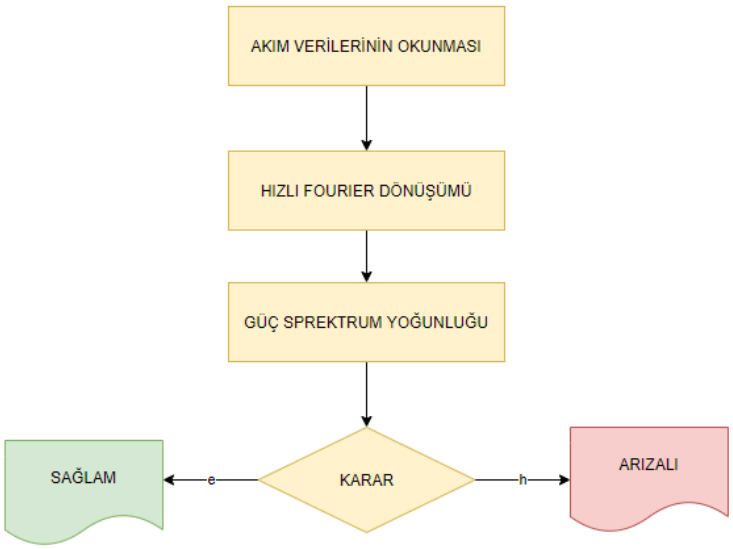
(a) (b)

Şekil 6.9. Güç spektrum yoğunluğu uygulanmamış ve uygulanmış spektrum gösterimi

6.5. Arızaların Teşhisi

Literatürde birçok karmaşık ve yüksek hesap maliyetli sınıflama yöntemleri kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında arıza teşhisi ve sınıflandırma için basit bir yöntem olan eşik yöntemi kullanılmıştır. Güç spektrum yoğunluğu elde edilmiş ve normalize edilmiş spektrumdan rotor arızasını teşhis için eşik yöntemi kullanılmaktadır (Benbouzid,

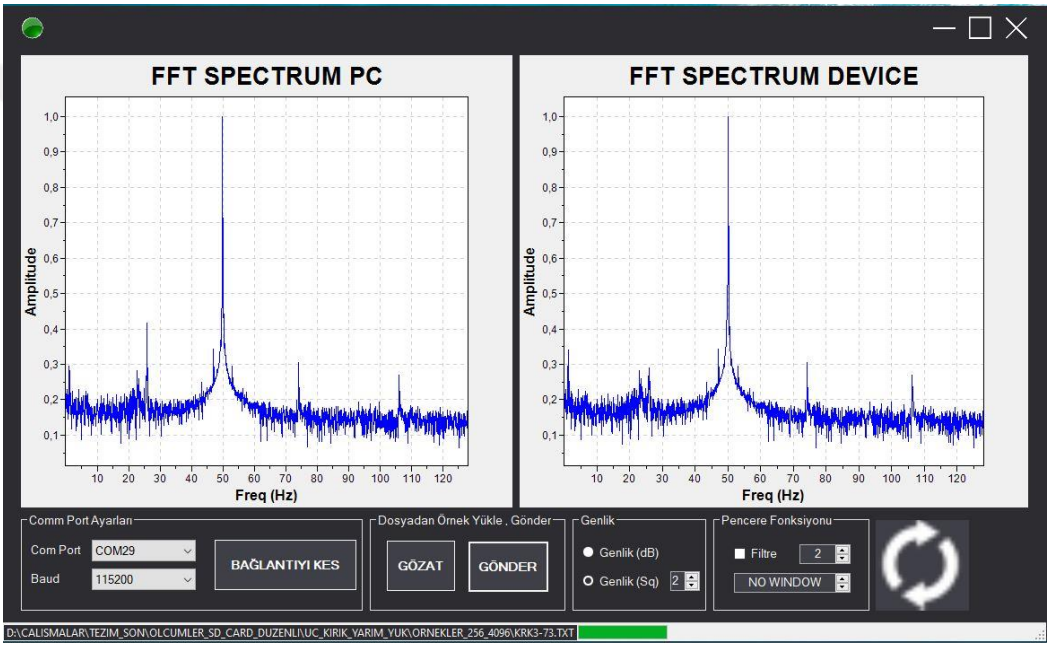
2000; Bellini ve ark., 2008; Kumar ve ark., 2009; Vico ve ark., 2010; Antonino-Daviu ve ark., 2016; Sharma ve ark., 2017). Algoritma spektrumda 40 Hz ile 60 Hz arasındaki frekans bandında genlikleri tarayarak yan-bant bileşenlerini varlığını test etmektedir. Şekil 6.10'da arıza teşhis yazılımın akış diyagramı verilmiştir. Sırası ile akım verilerinin okunması, HFD, güç spektrum yoğunluğu hesaplanması ve eşik sınıflama ile arıza teşhisi sonuçlandırılması işlem basamakları yer almaktadır. Şekil 6.11'de ise karar algoritması sonucu arızalı ve sağlam sonuçlarına ait ekran görüntüleri verilmiştir. Arızalı ya da sağlam sonucu ile arıza mevcut ise sol yan-bant bileşenin frekansı gösterilmiştir. Teşhis yazılımı yürütüldükten sonra sonuç spektrumu da grafiksel gösterim için seri port üzerinden bilgisayar yazılımına gönderilmektedir. ATC'nın ekran çözünürlüğü ayrıntılı olarak spektrum gösterimine elverişli olmadığı için test sonuçlarının grafiksel gösterimi bilgisayar yazılımında yapılmıştır. Yazılımda HFD'nün bilgisayarda gerçekleştirimi ve cihazda gerçekleştirimine ait grafikler ayrı ayrı çizdirilmiştir. Ayrıca bilgisayara kaydedilmiş motor akımı örnekleri test için cihaza seri port üzerinden gönderilebilmektedir. Şekil 6.12'de bilgisayar programında sonuç spektrumunun grafiksel gösterimi, Şekil 6.13'de yan-bant bileşeni belirgin gösterimi verilmiştir.



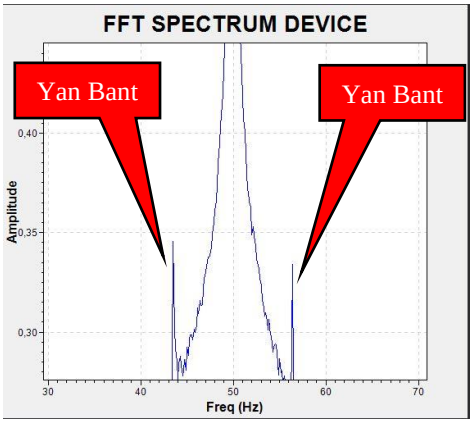
Şekil 6.10. Arıza teşhis yazılımının akış diyagramı



Şekil 6.11. ATC sonuç ekranı fotoğrafı



Şekil 6.12. ATC sonuç spektrumu grafiksel gösterim için bilgisayar yazılımı



Şekil 6.13. Yan-bant bileşeninin spektrumda yakınlaştırılmış gösterimi

7. DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ

Deneylerden elde edilen verilere, grafiklere ve test cihazının sonuçlarına göre sistemin değerlendirmesinde (bkz. Bölüm 7.1, 7.2) şu sonuçlar ortaya çıkmıştır:

En zayıf arıza belirtisi olan ve arıza başlangıcı sayılabilecek olan arıza bir kırık rotor çubuğu arızasıdır. Bir kırık, iki kırık ve üç kırık rotor çubuğu arızası durumları için yapılan testlerde motorun boşta (sadece yüke bağlı), yarım yükte ve tam yükte çalışması durumlarında örnekleme süresi en uzun olan ölçümler başarılı olmuştur.

7.1. Akım Güç Devir Ölçüm Analizleri

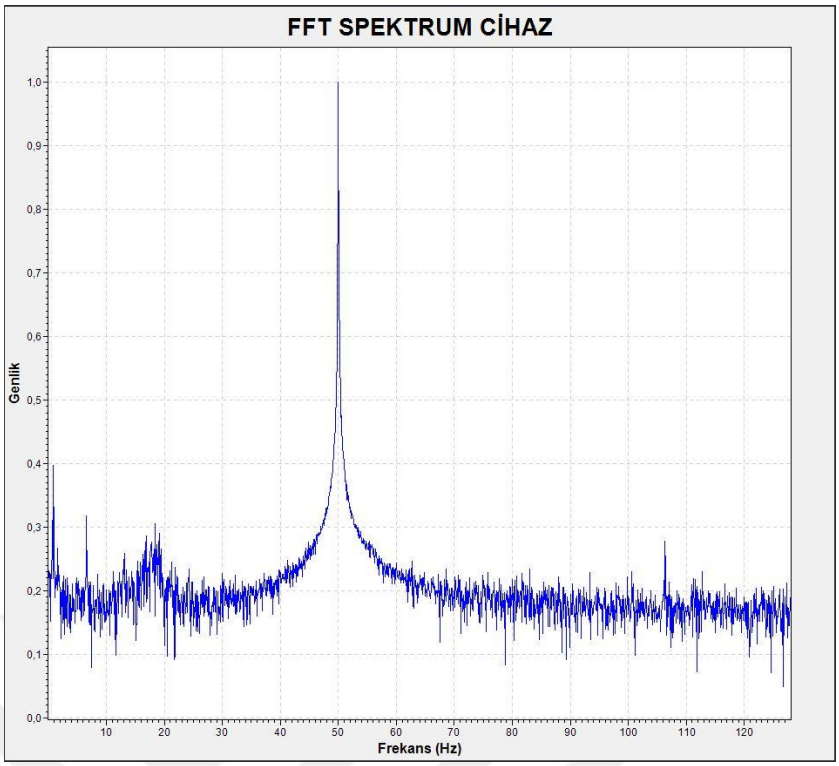
Her bir motor için yapılan yüksüz, yarım yükte ve tam yükte deneyleri için alınan beş farklı örnekleme oranı ile yapılmış ölçümlere ait motorun çektiği akım, harcadığı güç ve devir sayıları Çizelge 7.1'de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Akım, güç ve devir ölçüm sonuçlarını gösterir çizelge

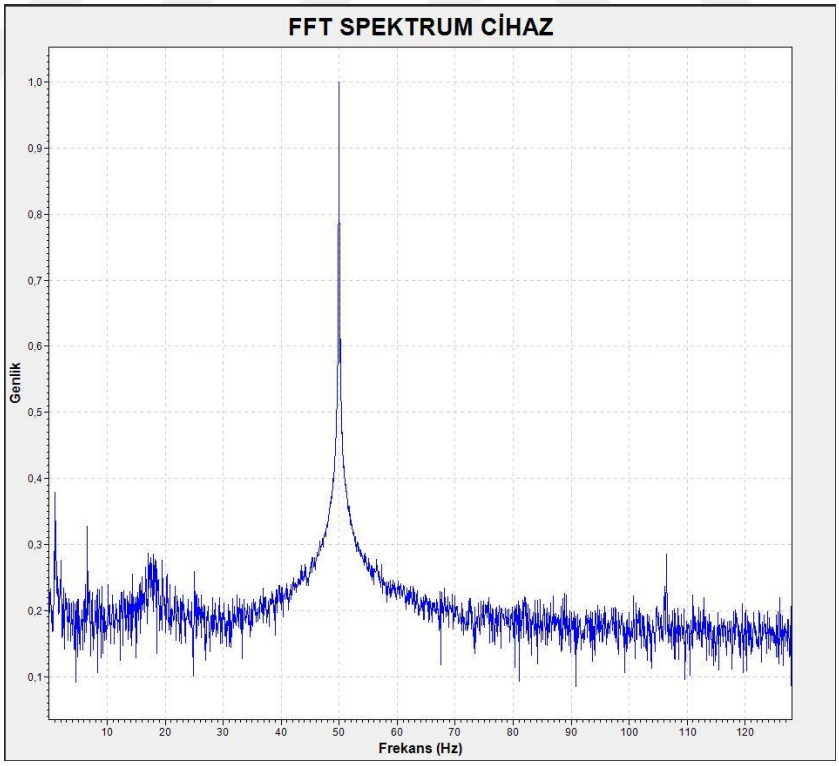
	YÜKSÜZ			YARIM YÜK			TAM YÜK		
	Devir d/d	**Akım A**	**Güç W**	**Devir d/d**	**Akım A**	**Güç W**	**Devir d/d**	**Akım A**	**Güç W**
SAĞLAM	1492	1,8	260	1456	5,48	800	1424	7,67	1200
1 KIRIK	1492	2,05	265	1454	5,49	800	1414	7,83	1200
2 KIRIK	1492	2,06	280	1453	5,54	805	1409	7,9	1202
3 KIRIK	1491	2,15	280	1452	5,6	807	1403	7,94	1208

7.2. Spektral Analizler

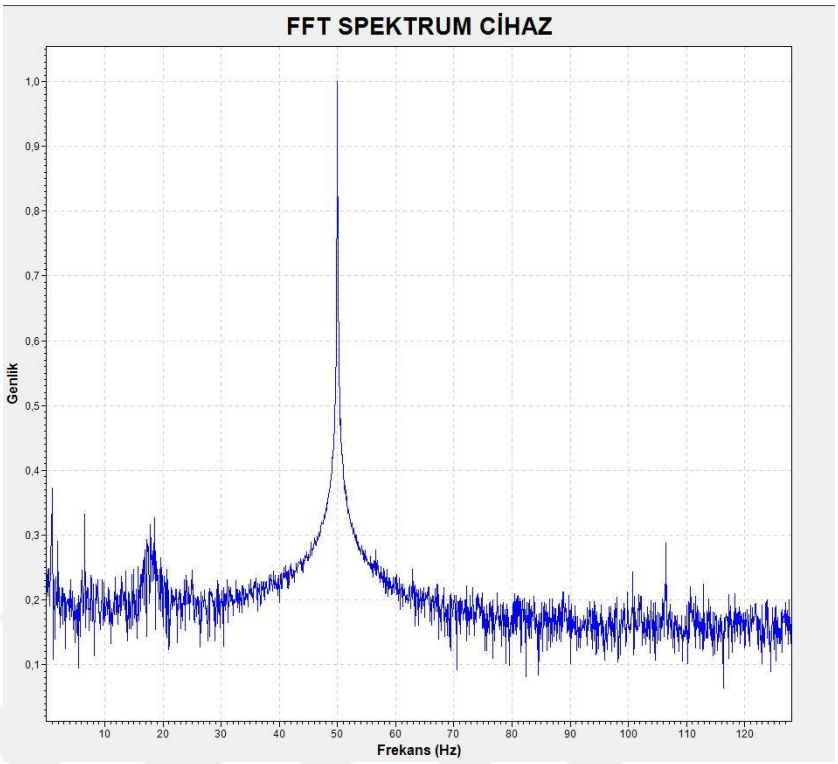
Rotor arızaları için yapılan ölçümlere ait ATC tarafından hesaplanmış, normalize edilmiş güç spektrum yoğunluklarına ait grafikler sırasıyla Şekil 7.1 – Şekil 7.60'a kadar verilmiştir. Çizelgelerde, örnekleme oranları ve süreleri farklı ölçüm sonuçlarına ait grafikler; HFD' nün yüksek örnekleme ve oranı kısa süreli yapılan ölçümlerden ziyade örnekleme süresinin uzun olduğu ölçümlerin daha net sonuçlar verdiğini göstermiştir.



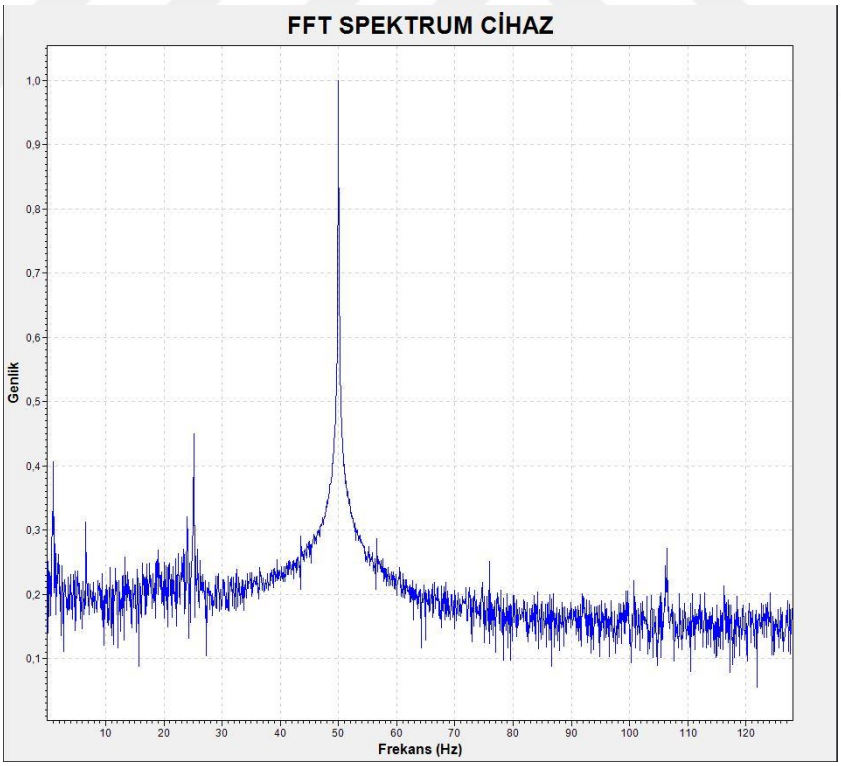
Şekil 7.1. Motor sağlam ve yüksüz durumu için 256 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



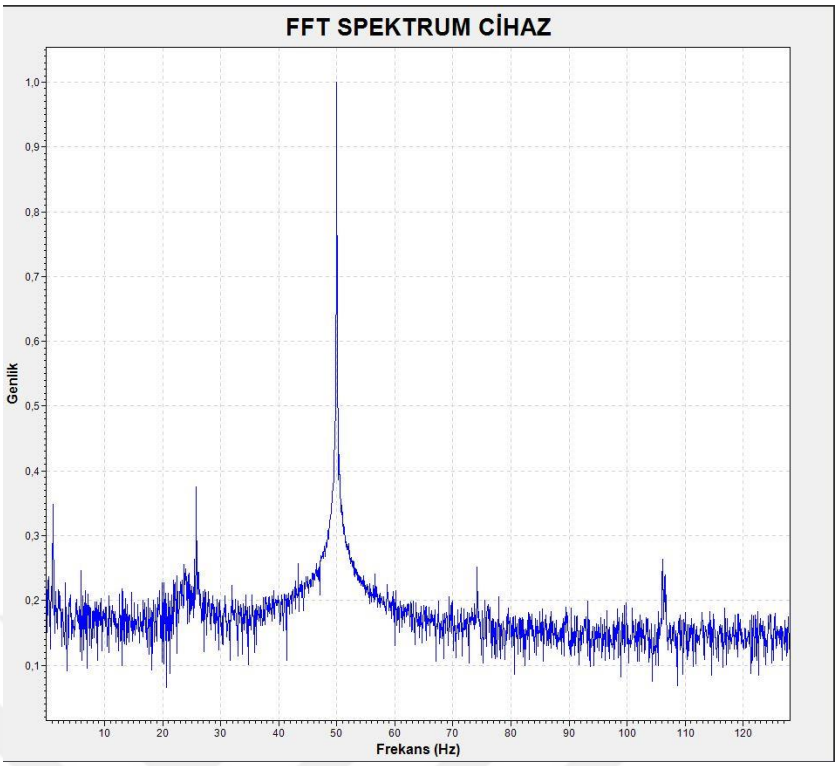
Şekil 7.2. Motor sağlam ve yarım yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



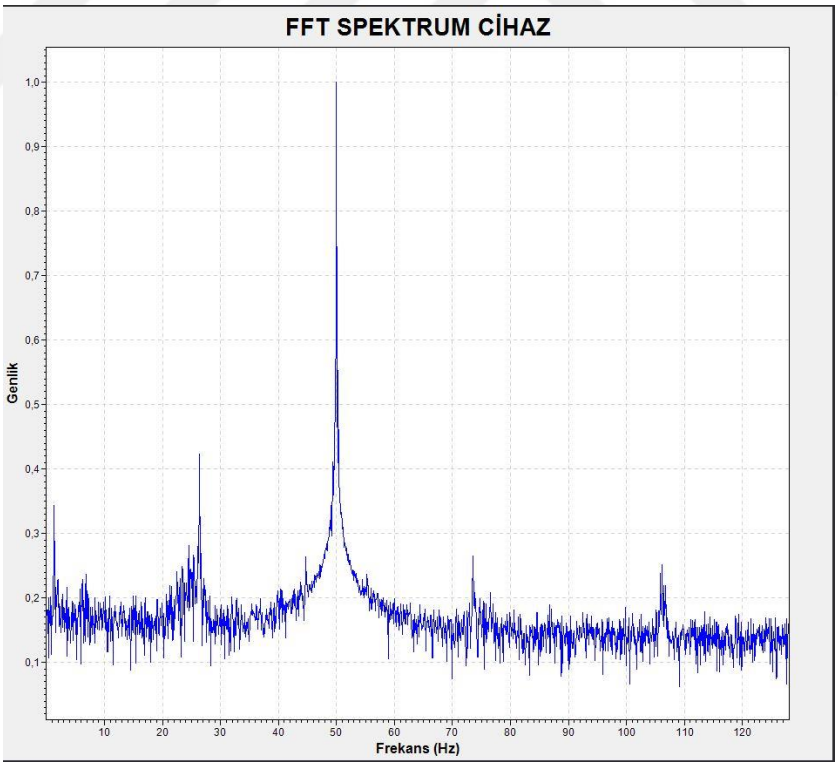
Şekil 7.3. Motor sağlam ve tam yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



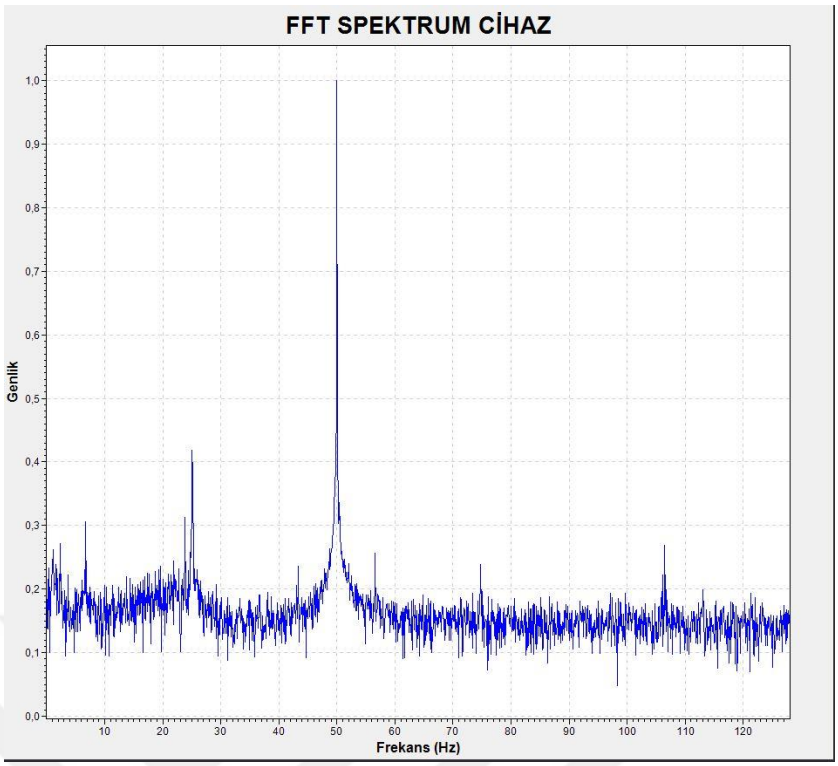
Şekil 7.4. Motor 1 kırık ve yüksüz durumu için 256 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



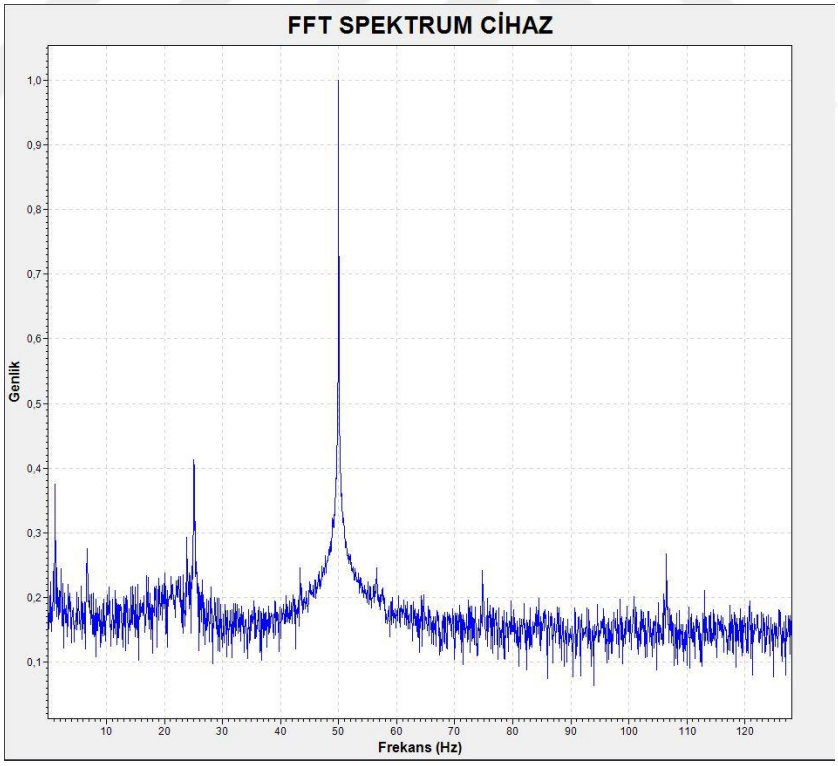
Şekil 7.5. Motor 1 kırık ve yarım yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



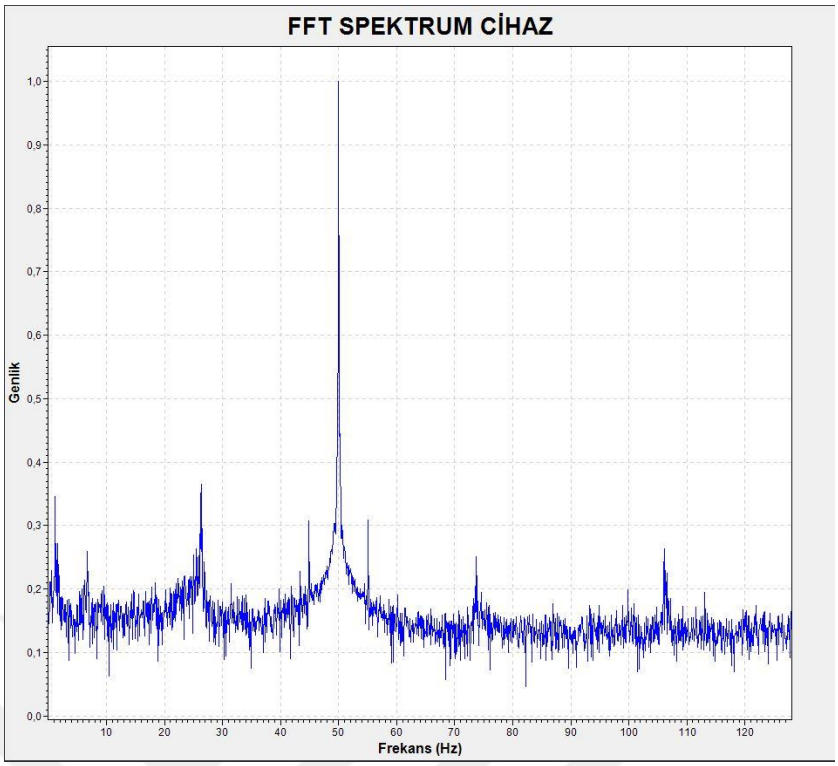
Şekil 7.6. Motor 1 kırık ve tam yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



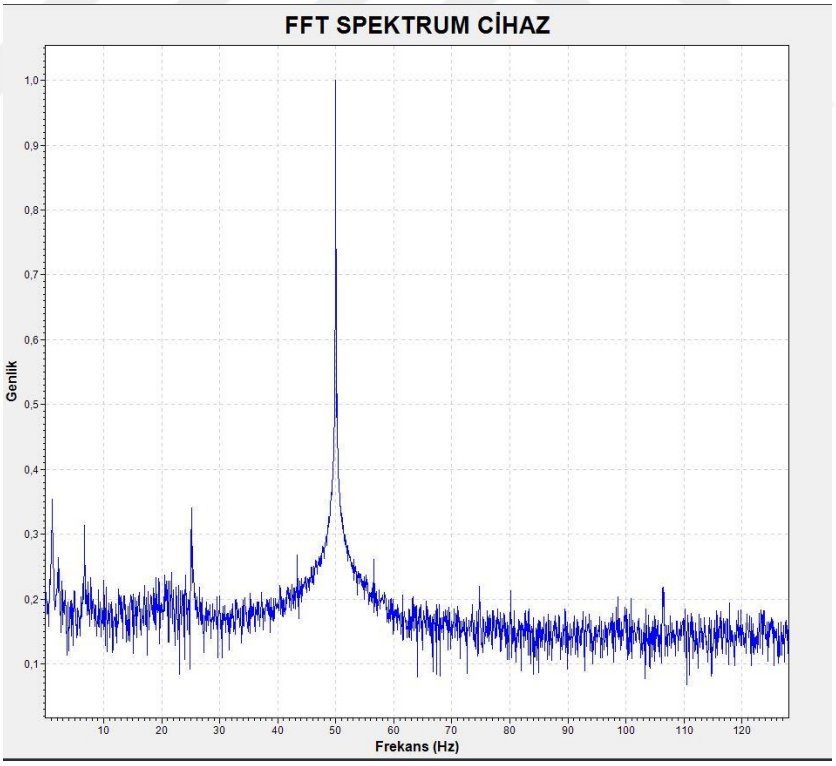
Şekil 7.7. Motor 2 kırık ve yüksüz durumu için 256 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



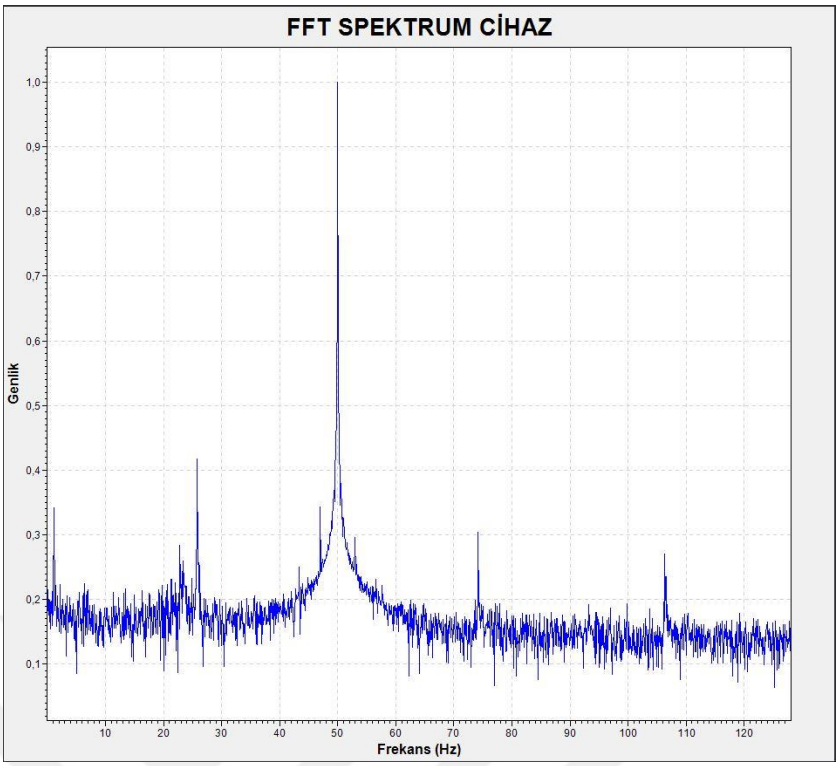
Şekil 7.8. Motor 2 kırık ve yarım yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



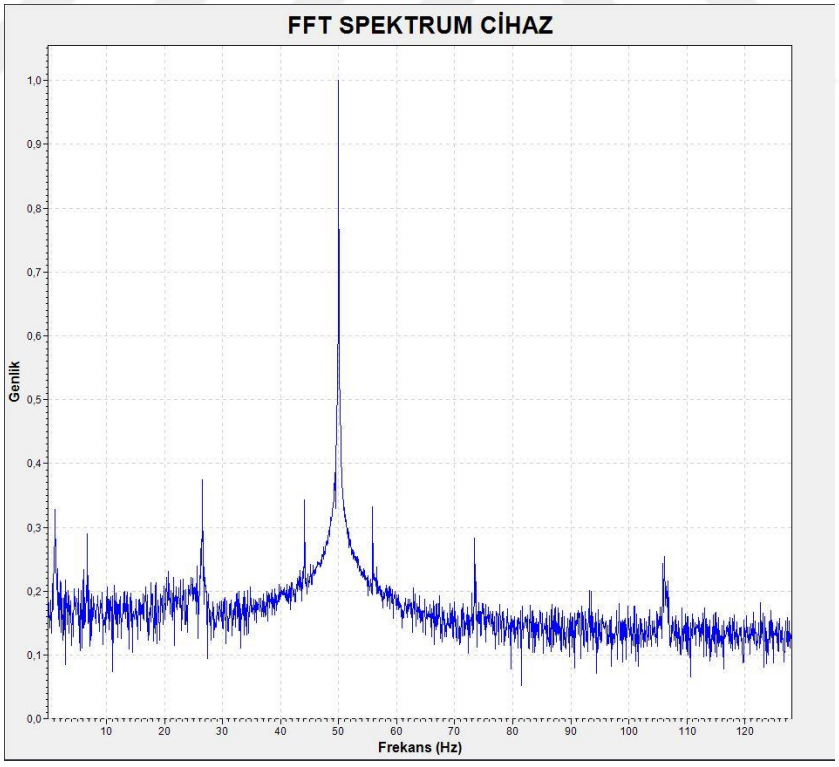
Şekil 7.9. Motor 2 kırık ve tam yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



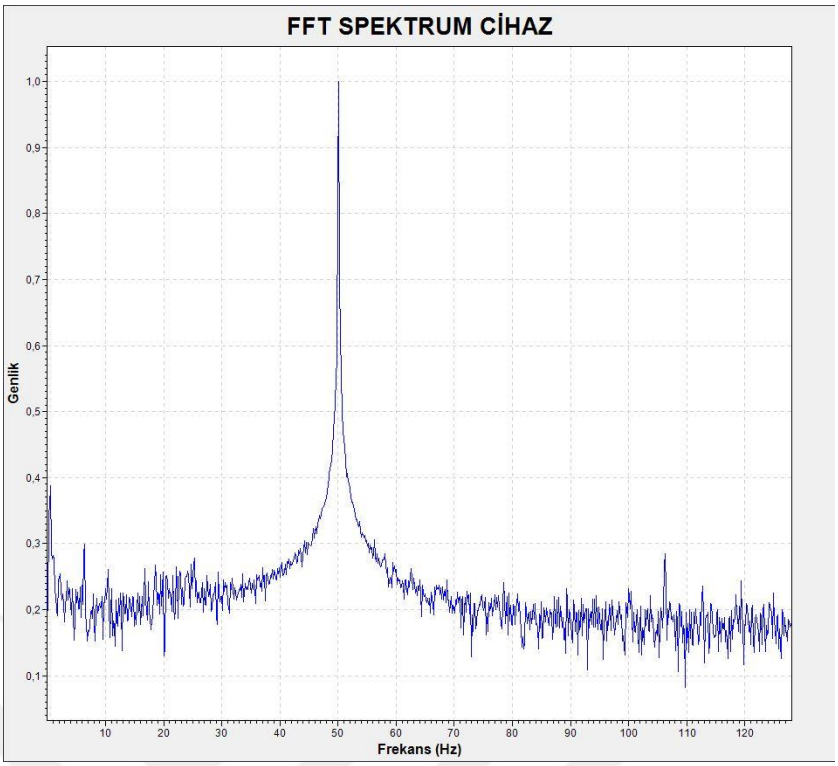
Şekil 7.10. Motor 3 kırık ve yüksüz durumu için 256 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



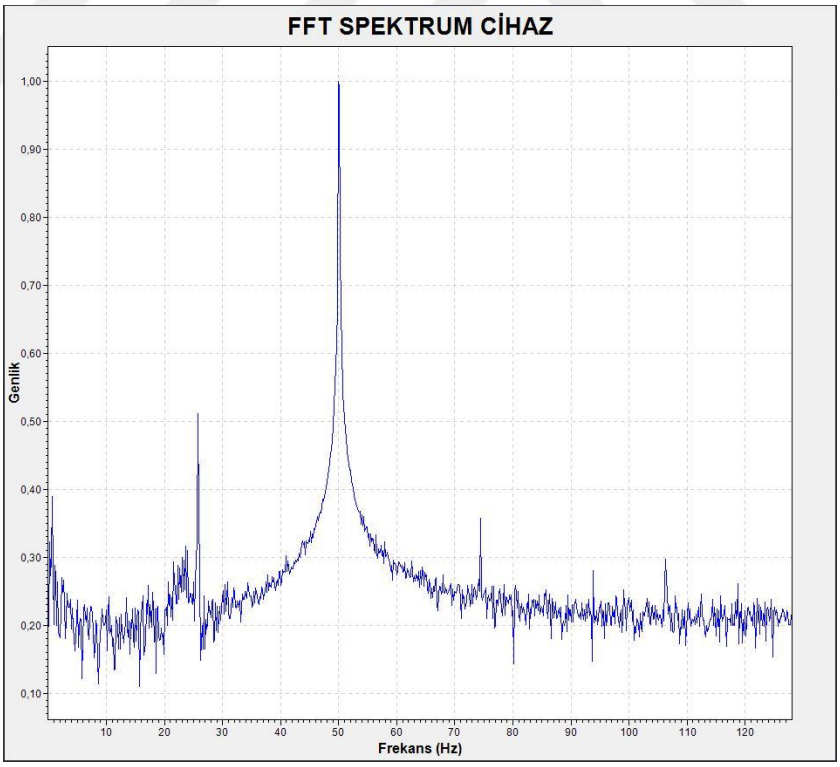
Şekil 7.11. Motor 3 kırık ve yarım yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



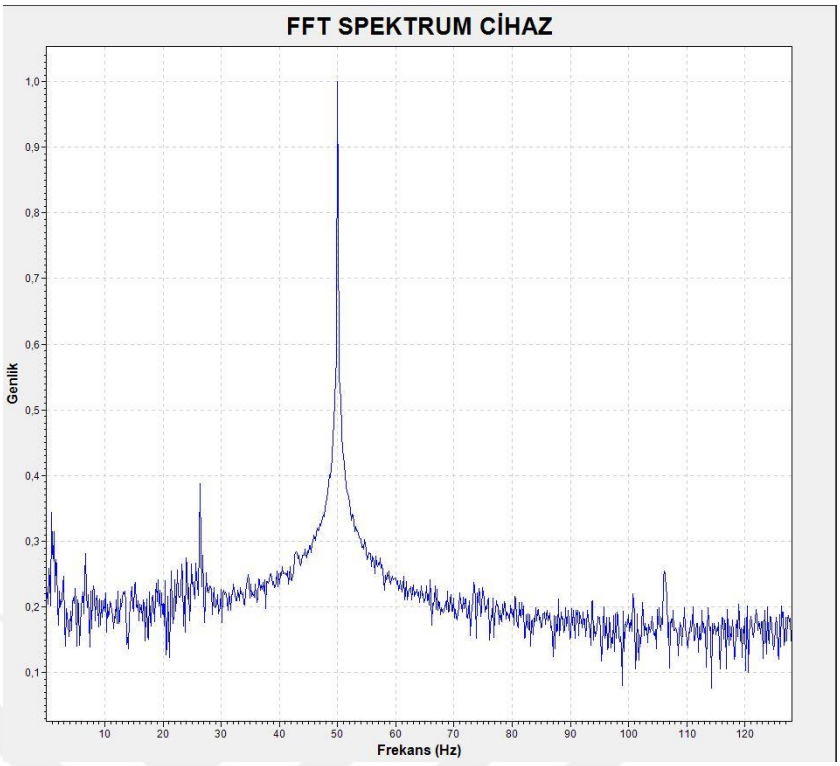
Şekil 7.12. Motor 3 kırık ve tam yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



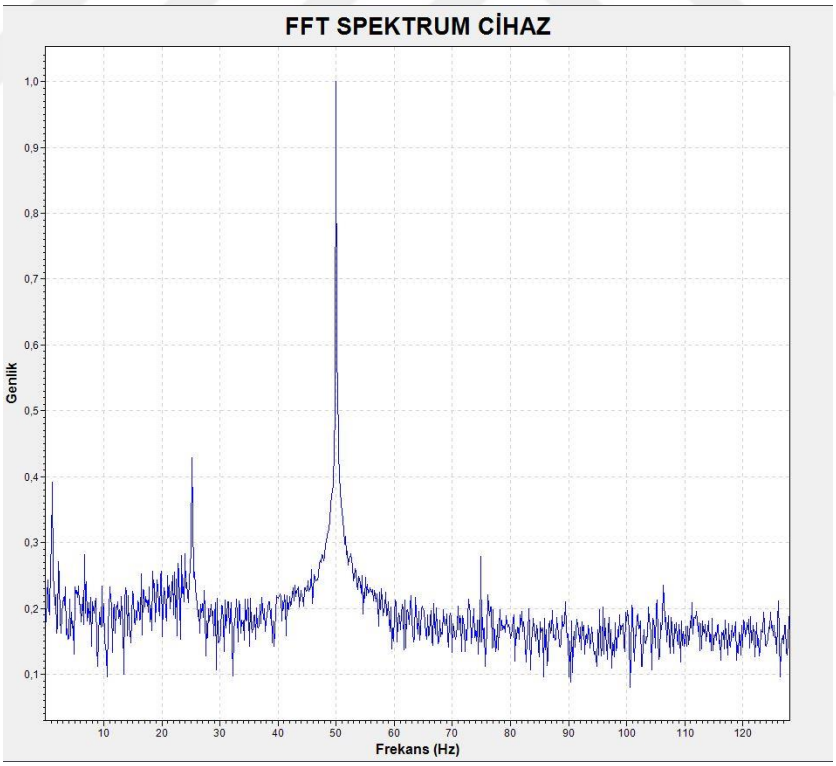
Şekil 7.13. Motor sağlam ve yüksüz durumu için 256 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



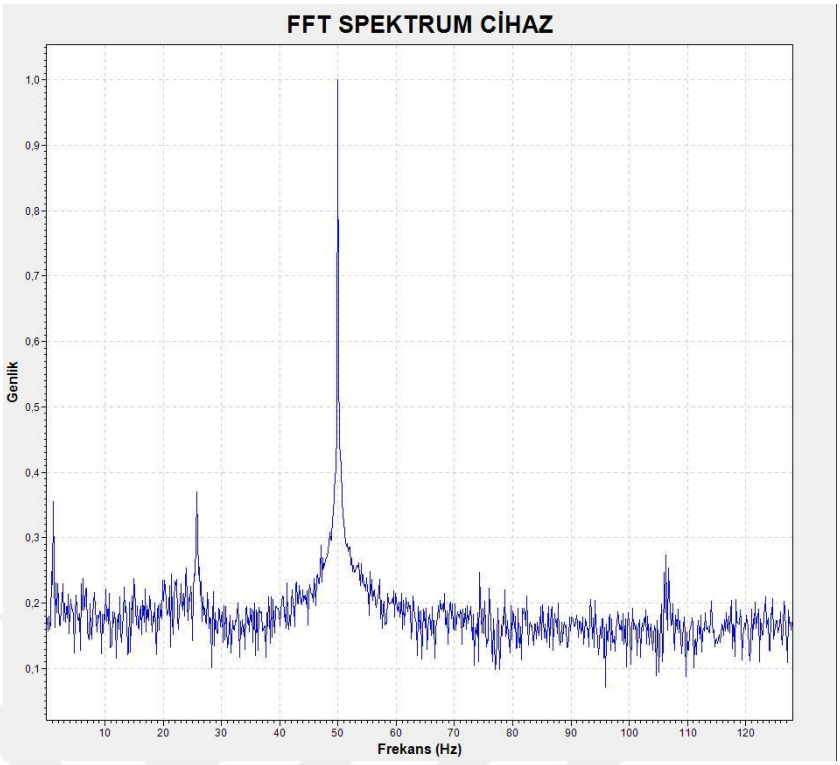
Şekil 7.14. Motor sağlam ve yarım yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



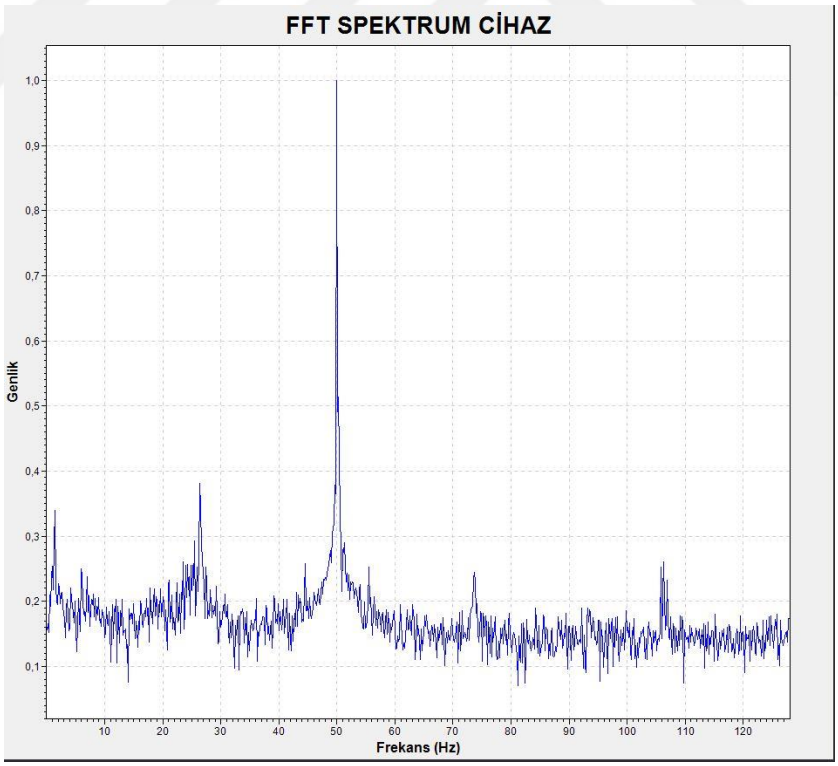
Şekil 7.15. Motor sağlam ve tam yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



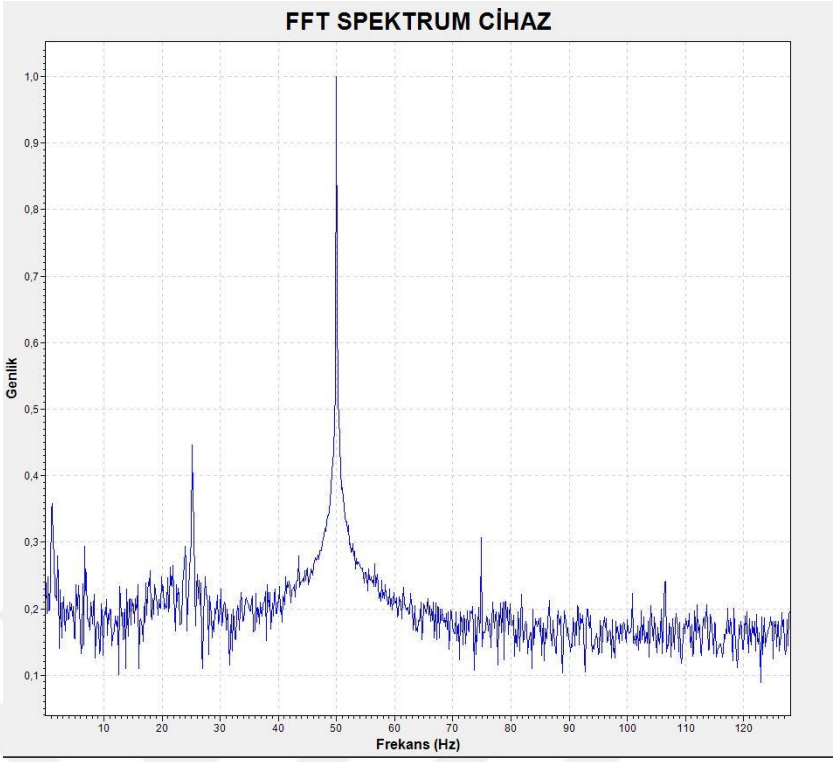
Şekil 7.16. Motor 1 kırık ve yüksüz durumu için 256 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



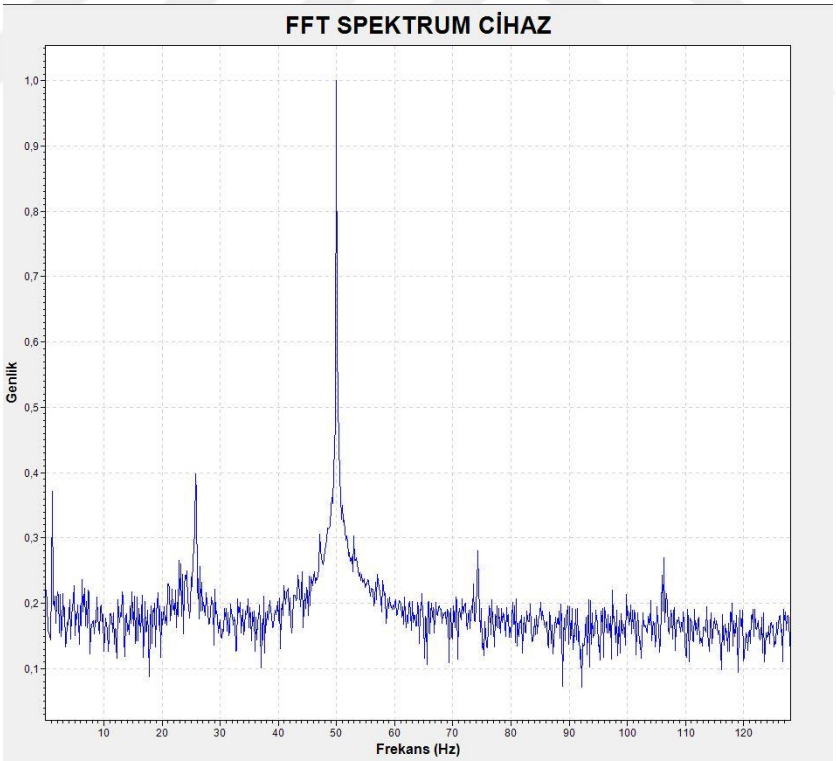
Şekil 7.17. Motor 1 kırık ve yarım yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



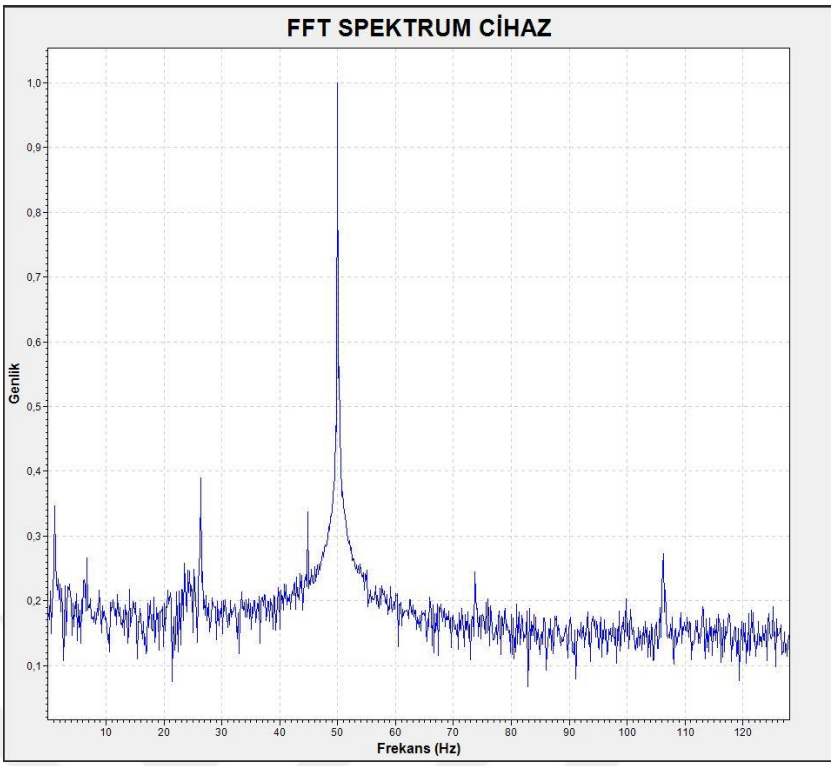
Şekil 7.18. Motor 1 kırık ve tam yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



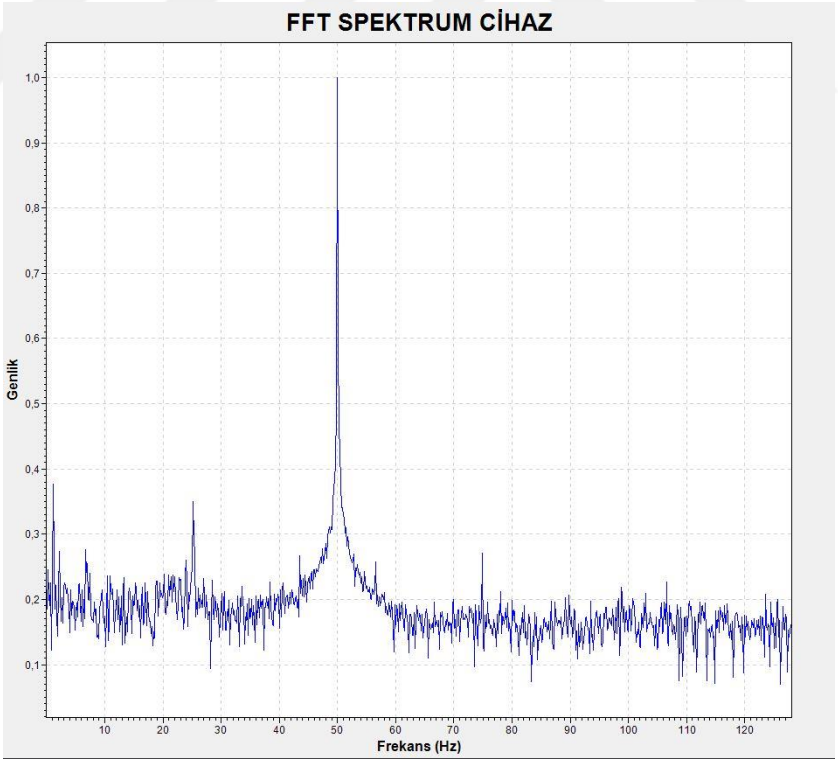
Şekil 7.19. Motor 2 kırık ve yüksüz durumu için 256 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



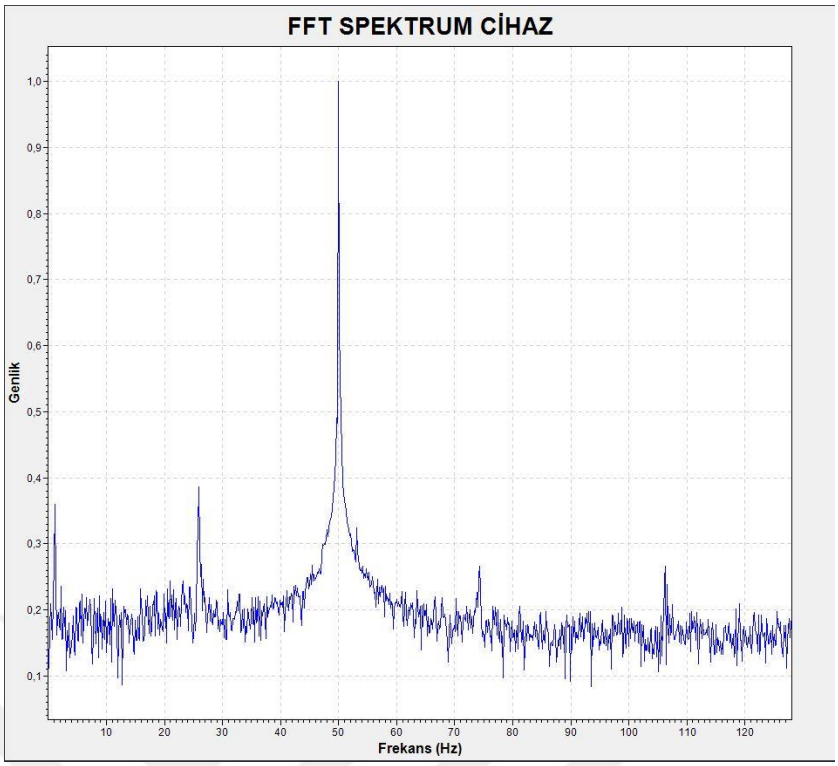
Şekil 7.20. Motor 2 kırık ve yarım yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



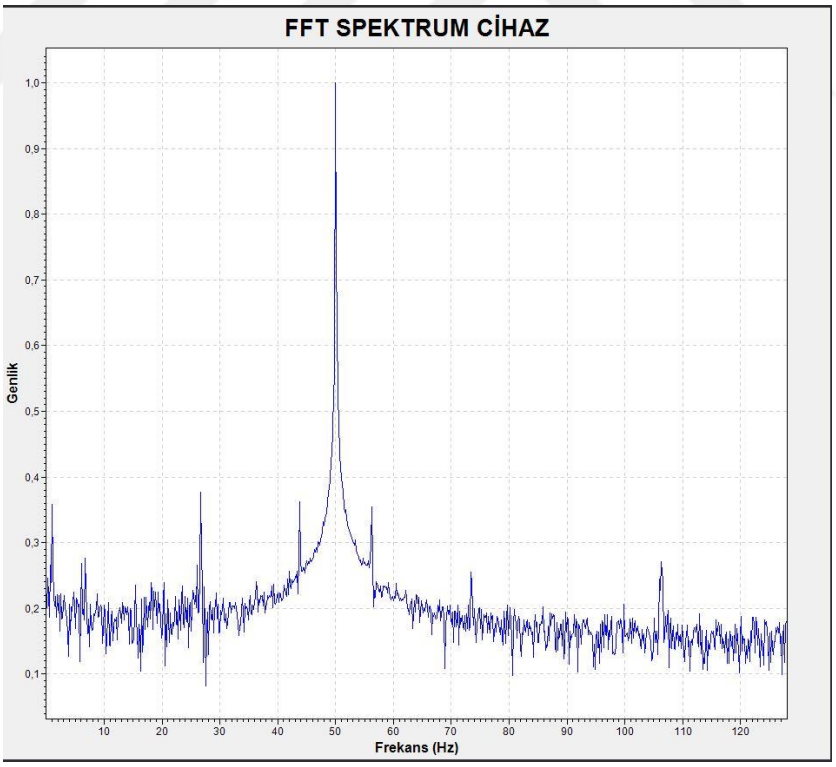
Şekil 7.21. Motor 2 kırık ve tam yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



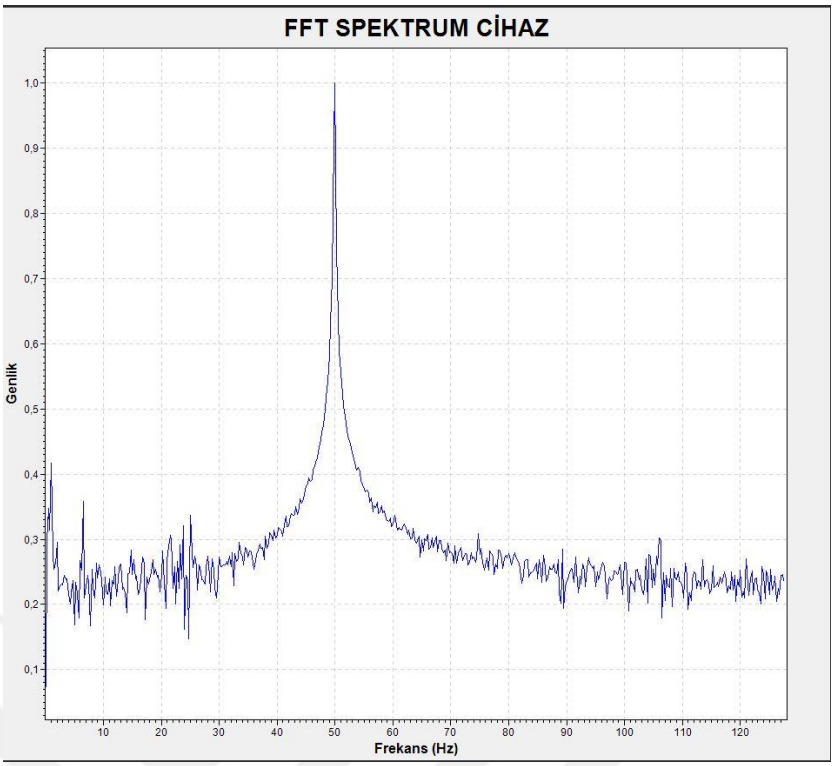
Şekil 7.22. Motor 3 kırık ve yüksüz durumu için 256 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



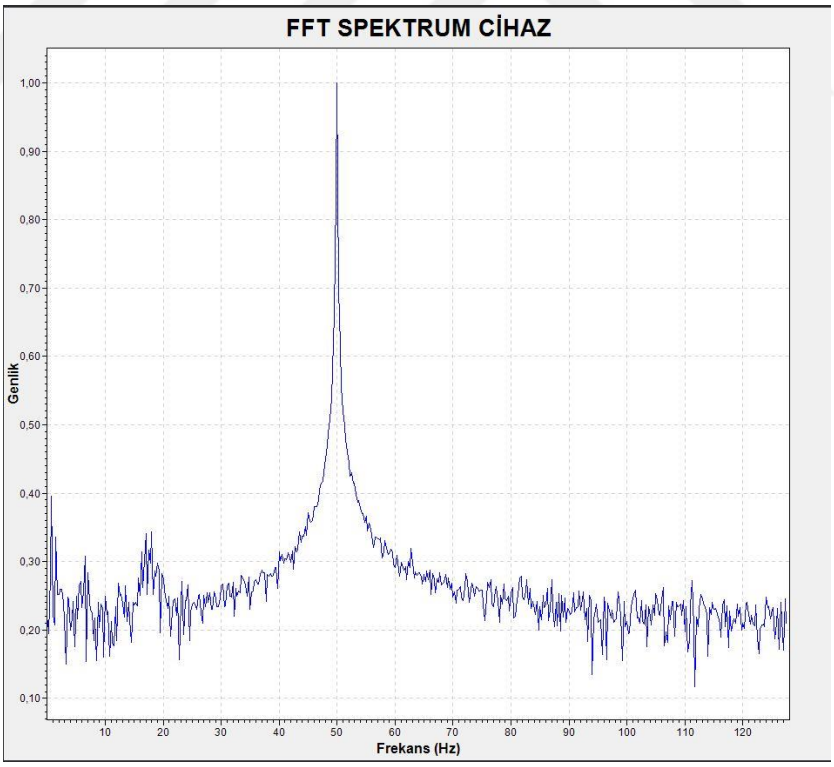
Şekil 7.23. Motor 3 kırık ve yarım yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



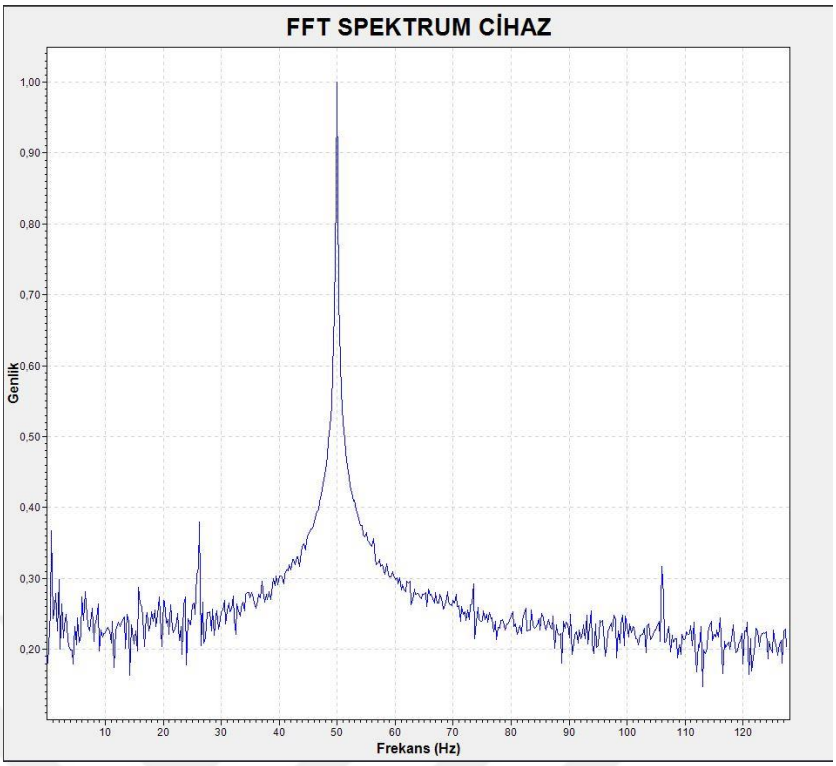
Şekil 7.24. Motor 3 kırık ve tam yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



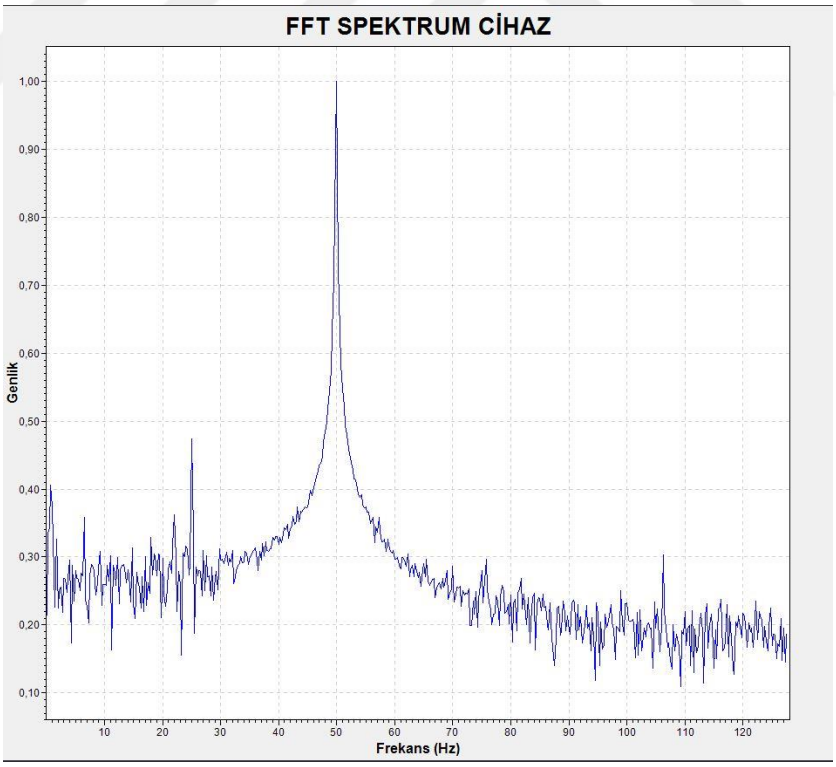
Şekil 7.25. Motor sağlam ve yüksüz durumu için 256 S/s örnekleme oranı 1024 örnek ile elde edilen spektrum



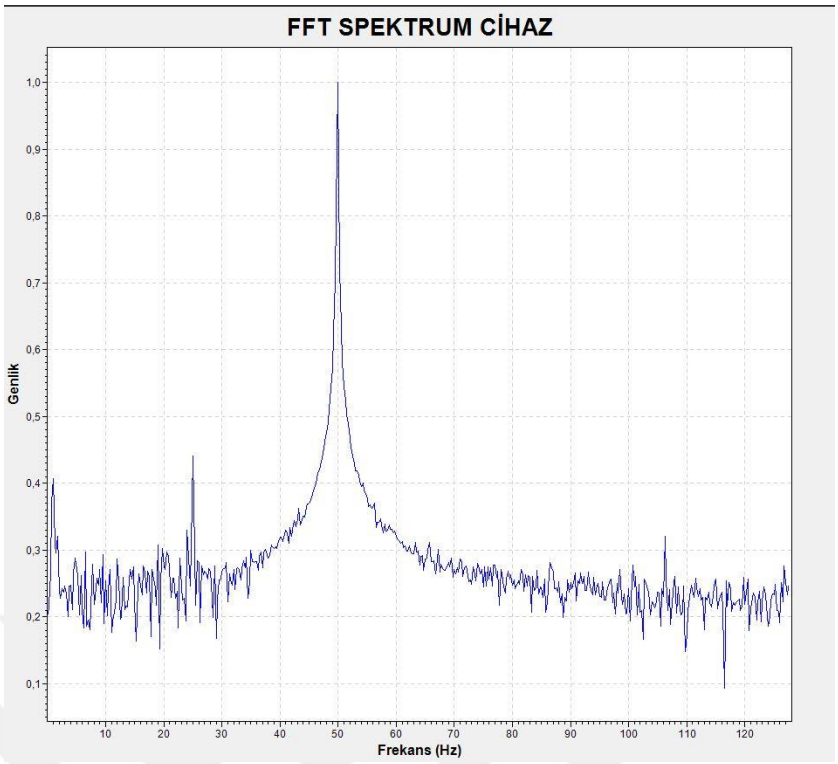
Şekil 7.26. Motor sağlam ve yarım yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 1024 örnek ile elde edilen spektrum



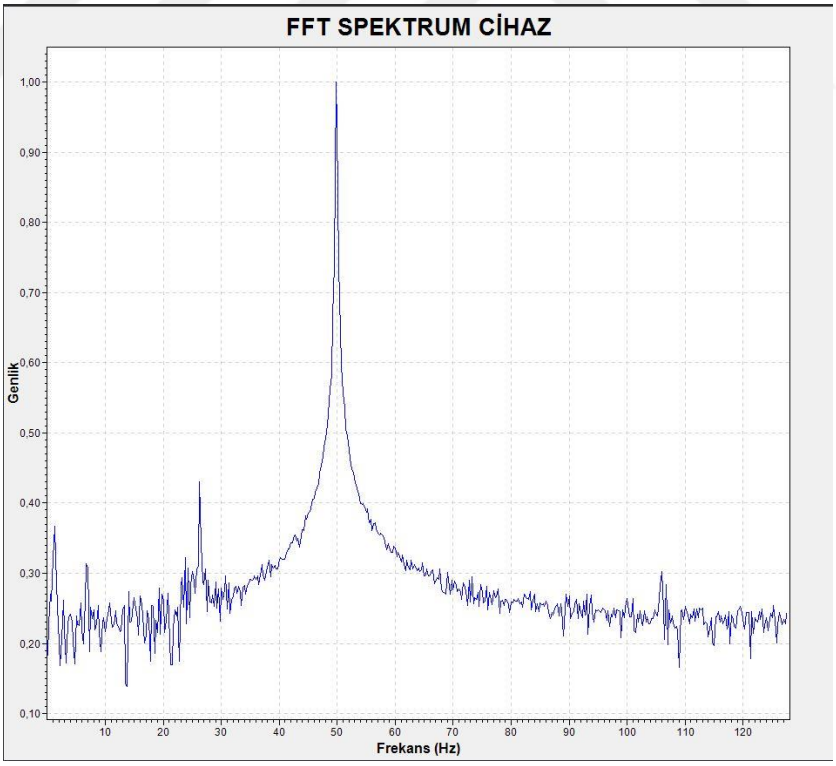
Şekil 7.27. Motor sağlam ve tam yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 1024 örnek ile elde edilen spektrum



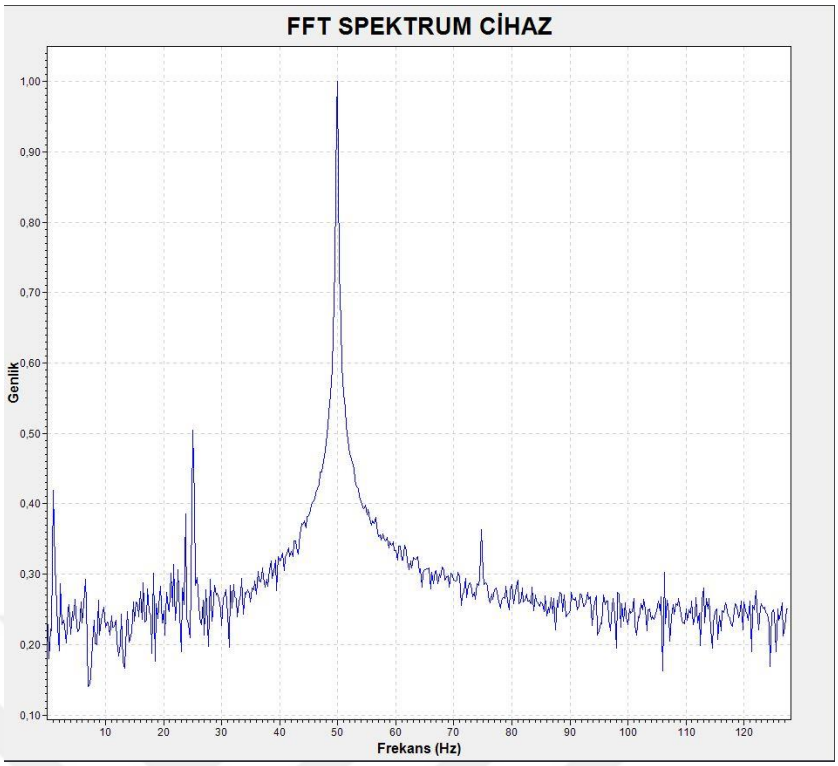
Şekil 7.28. Motor 1 kırık ve yüksüz durumu için 256 S/s örnekleme oranı 1024 örnek ile elde edilen spektrum



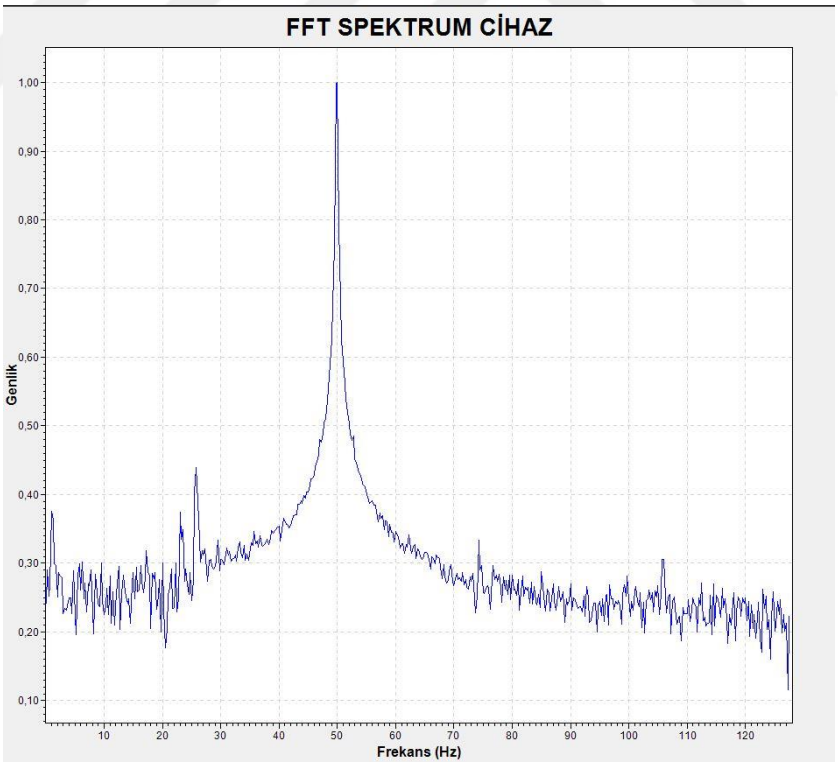
Şekil 7.29. Motor 1 kırık ve yarım yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 1024 örnek ile elde edilen spektrum



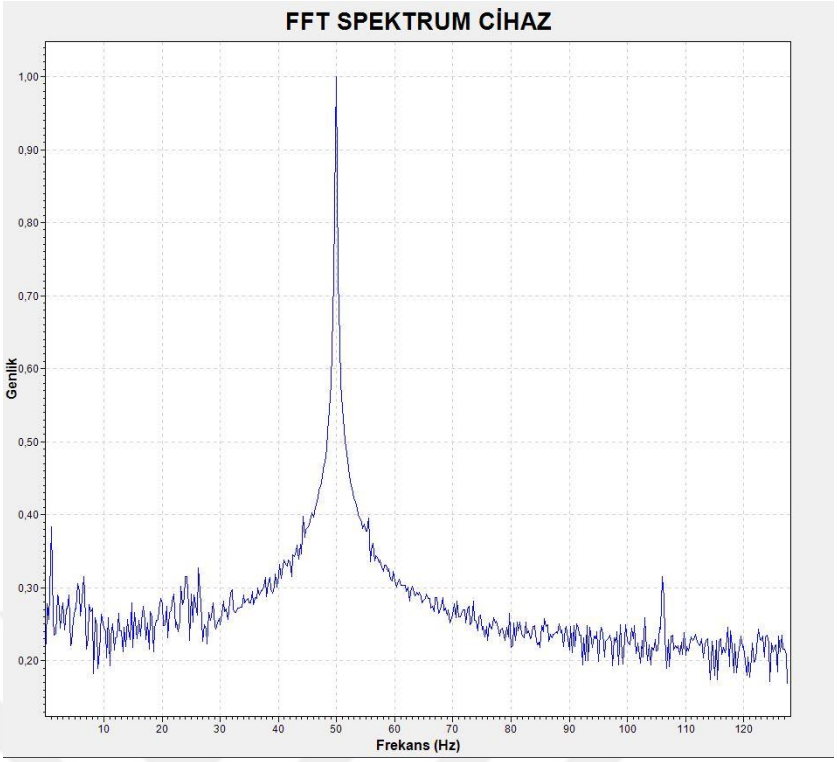
Şekil 7.30. Motor 1 kırık ve tam yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 1024 örnek ile elde edilen spektrum



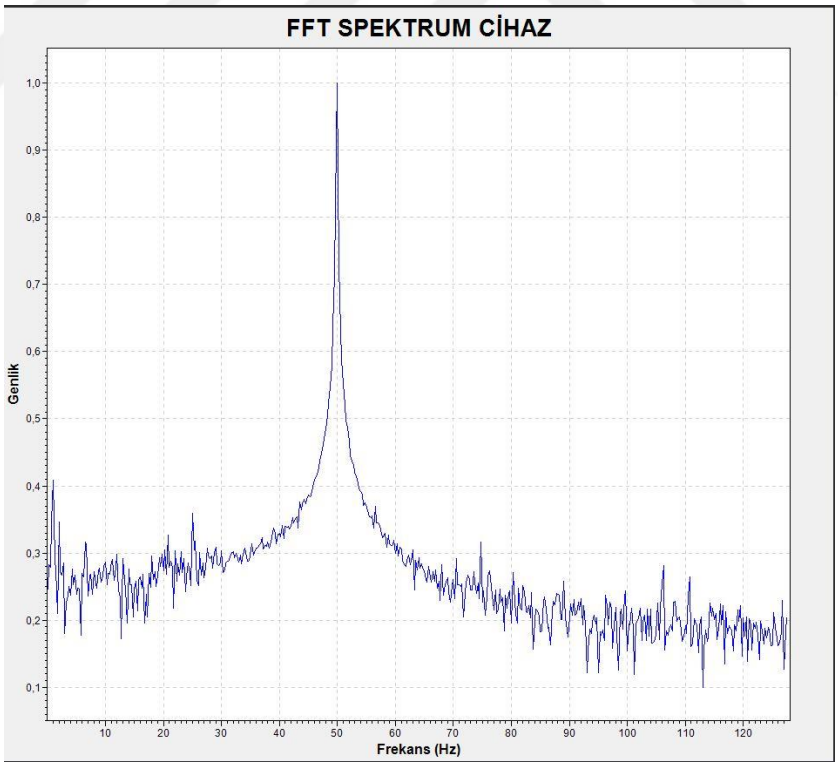
Şekil 7.31. Motor 2 kırık ve yüksüz durumu için 256 S/s örnekleme oranı 1024 örnek ile elde edilen spektrum



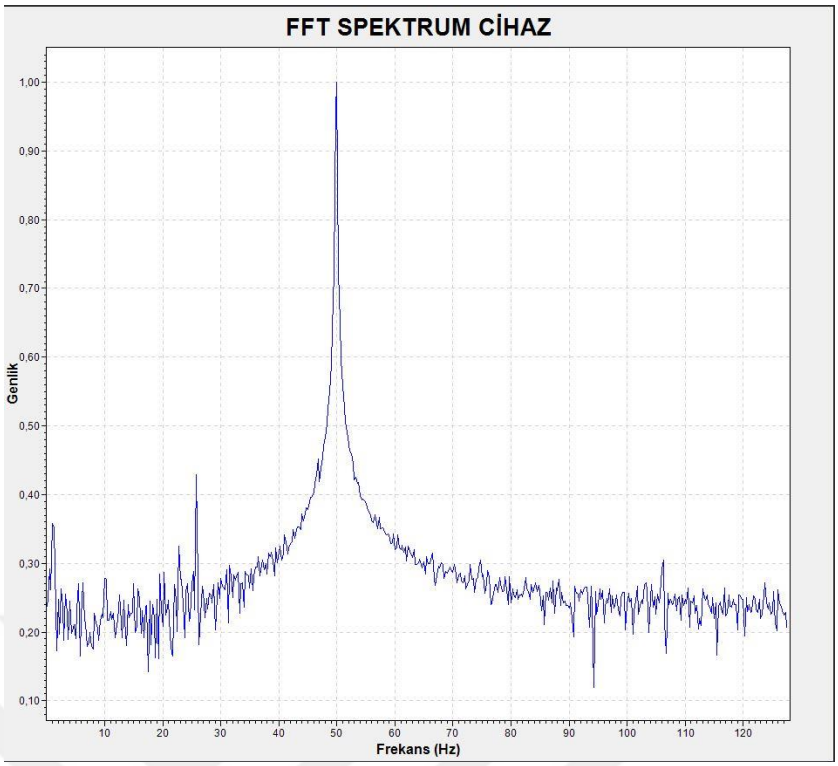
Şekil 7.32. Motor 2 kırık ve yarım yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 1024 örnek ile elde edilen spektrum



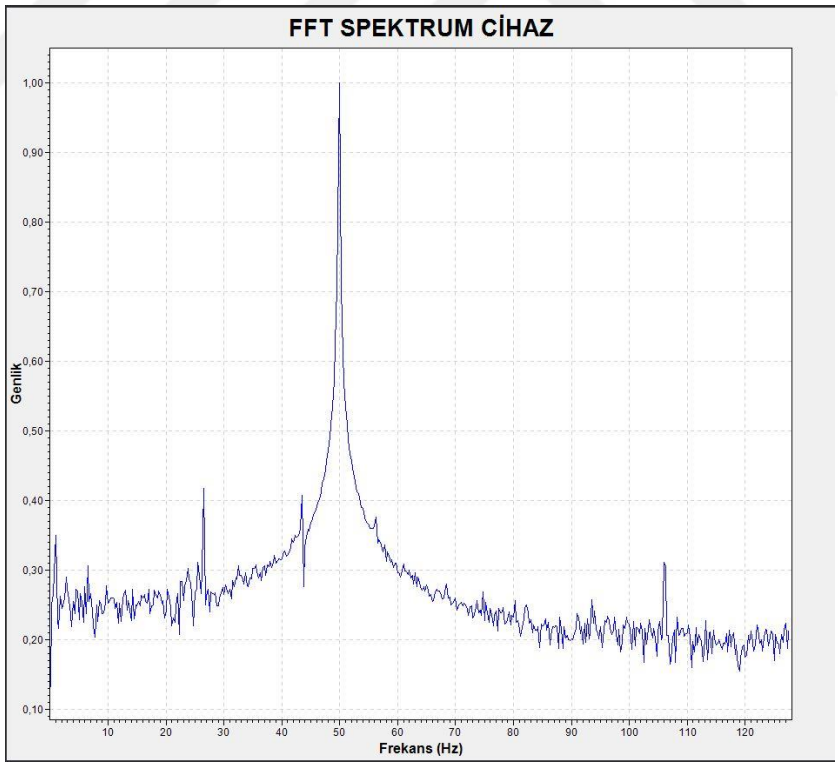
Şekil 7.33. Motor 2 kırık ve tam yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 1024 örnek ile elde edilen spektrum



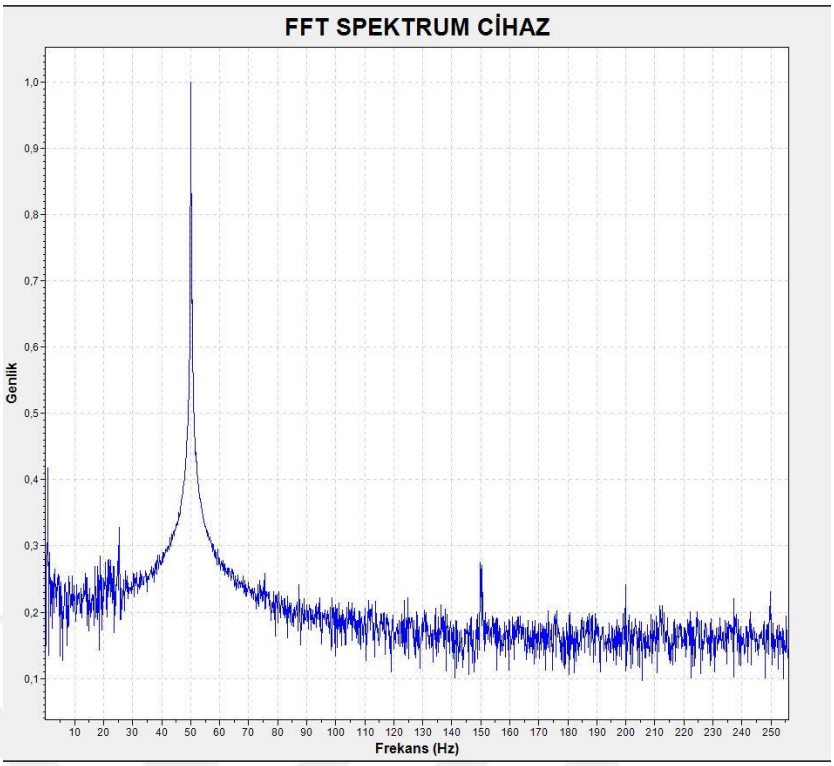
Şekil 7.34. Motor 3 kırık ve yüksüz durumu için 256 S/s örnekleme oranı 1024 örnek ile elde edilen spektrum



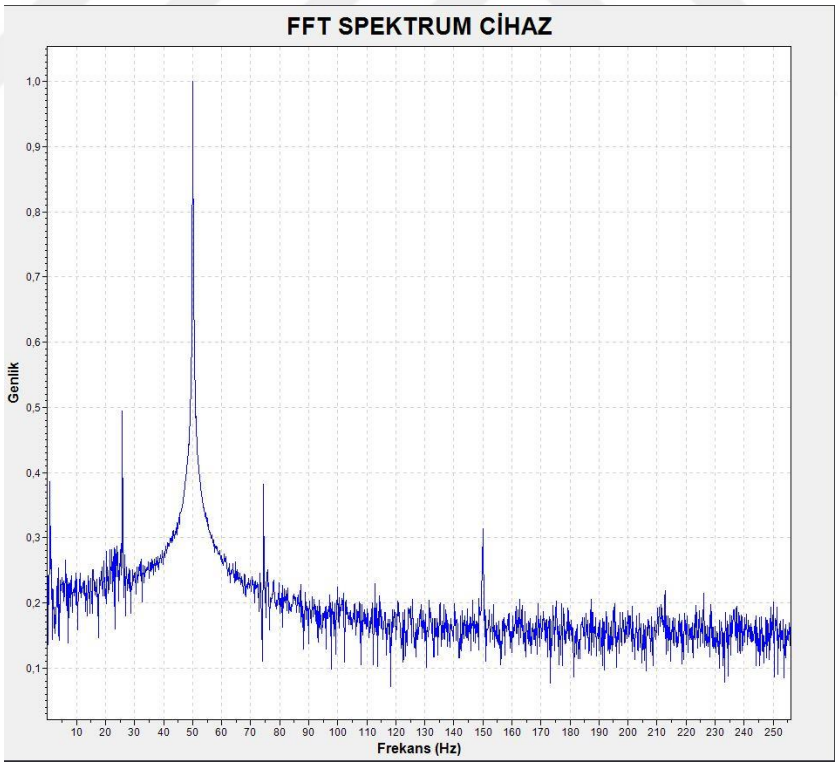
Şekil 7.35. Motor 3 kırık ve yarım yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 1024 örnek ile elde edilen spektrum



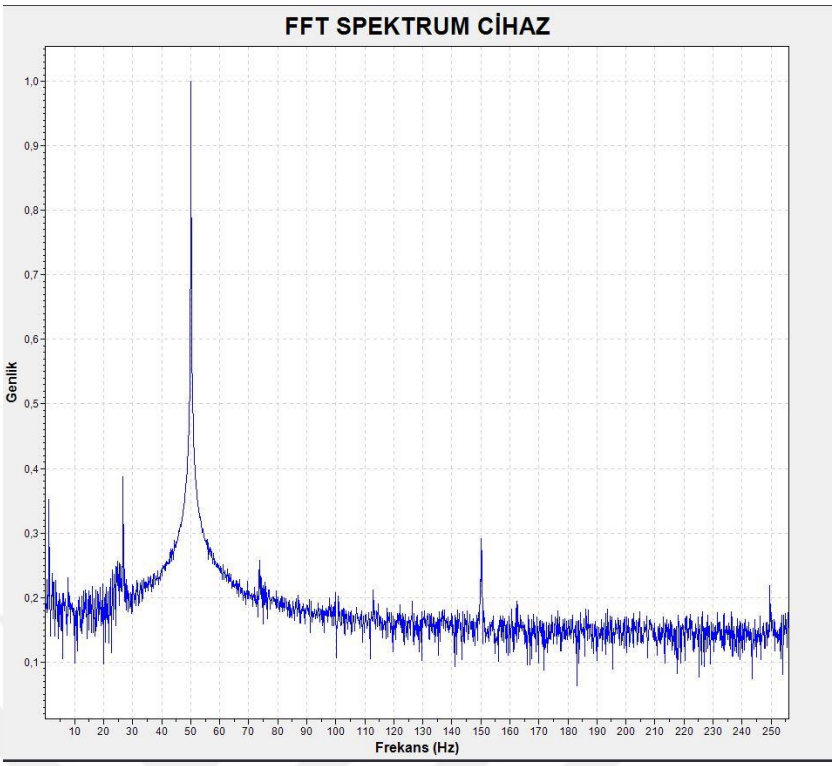
Şekil 7.36. Motor 3 kırık ve tam yük durumu için 256 S/s örnekleme oranı 1024 örnek ile elde edilen spektrum



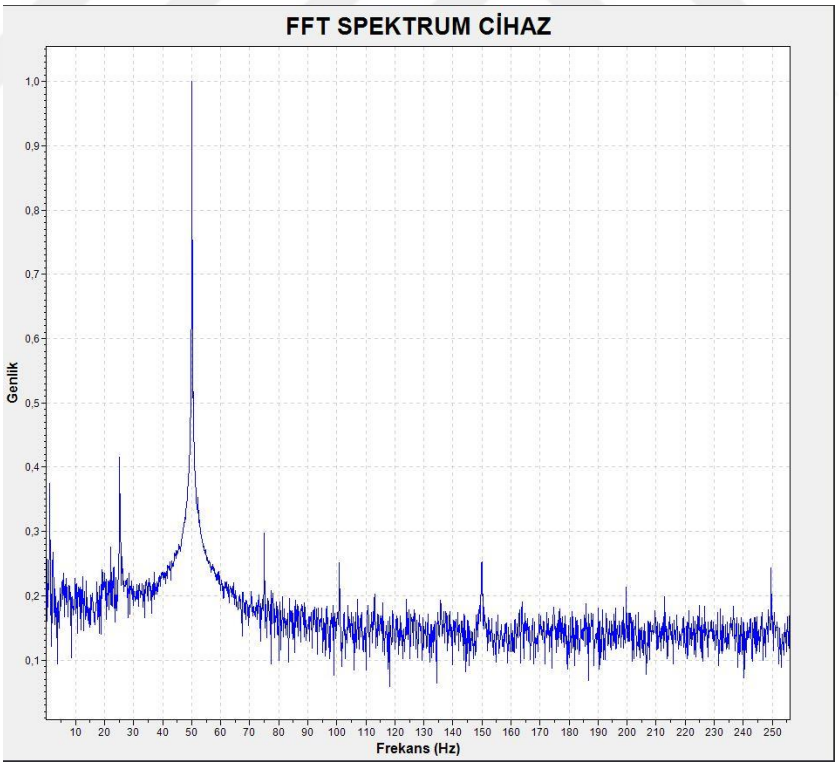
Şekil 7.37. Motor sağlam ve yüksüz durumu için 512 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



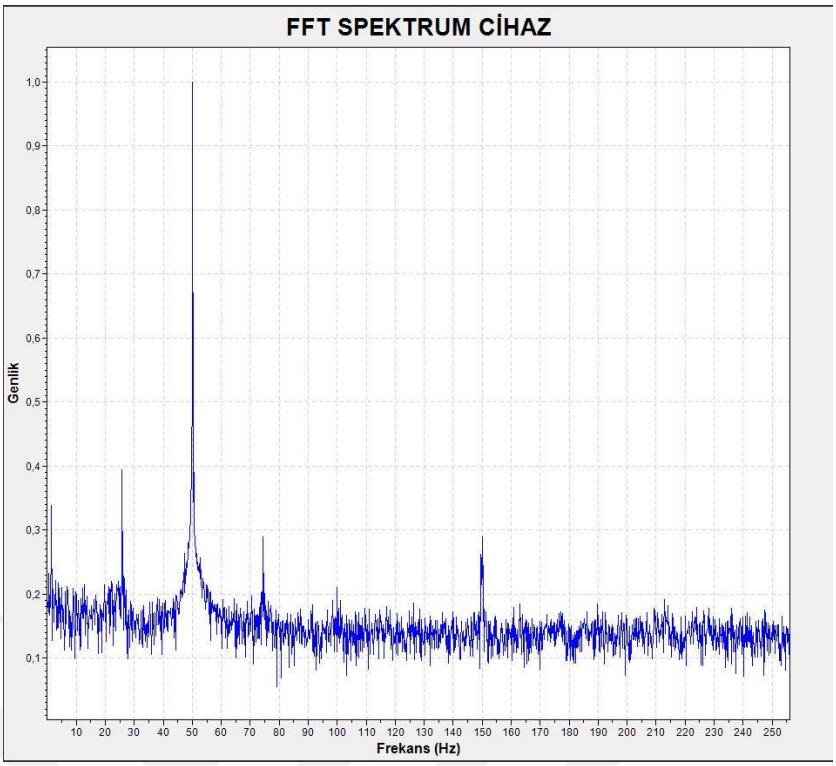
Şekil 7.38. Motor sağlam ve yarım yük durumu için 512 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



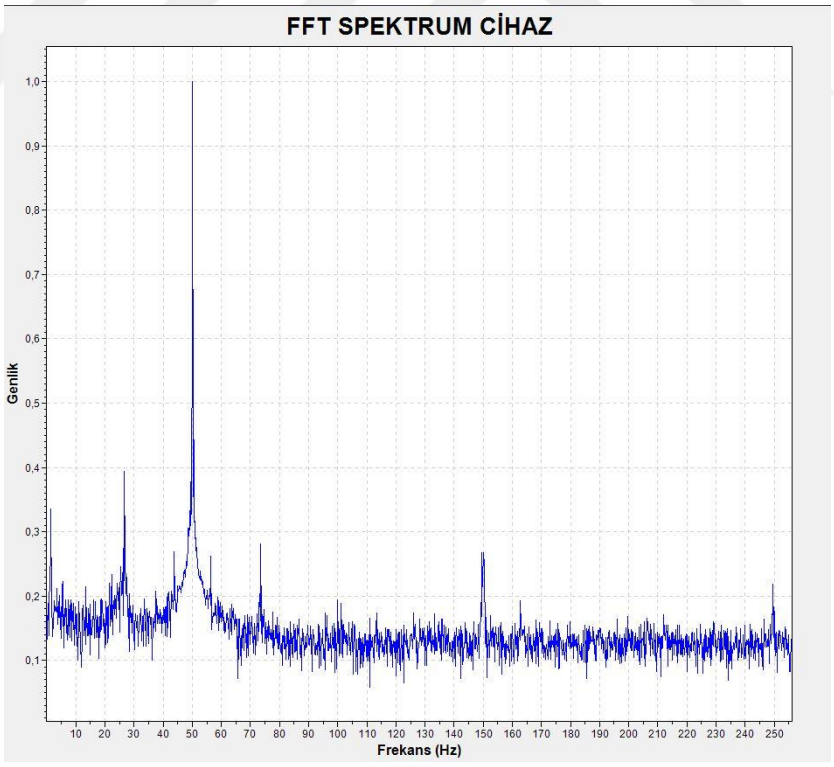
Şekil 7.39. Motor sağlam ve tam yük durumu için 512 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



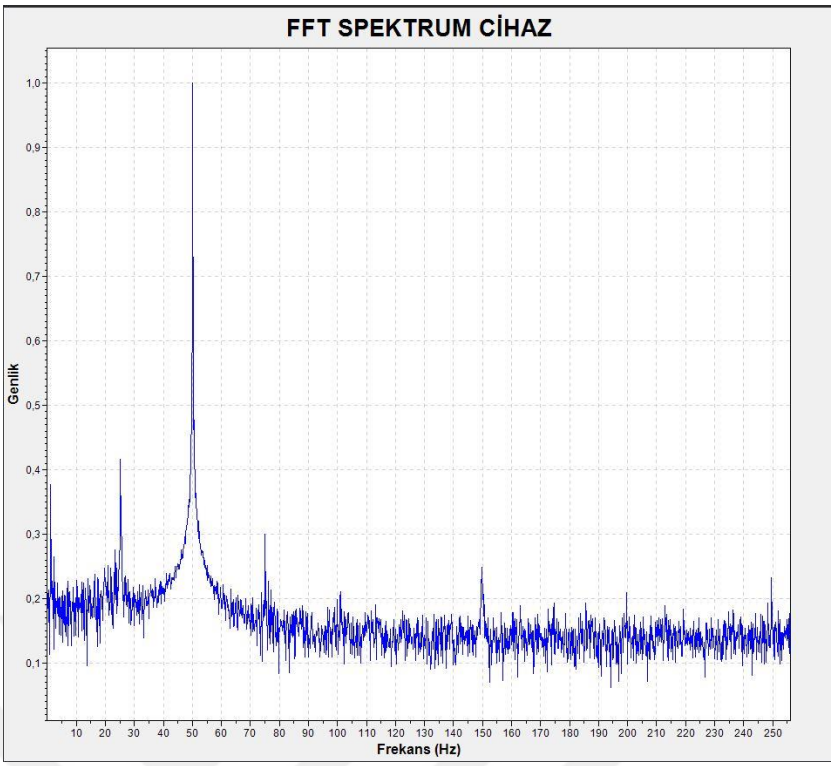
Şekil 7.40. Motor 1 kırık ve yüksüz durumu için 512 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



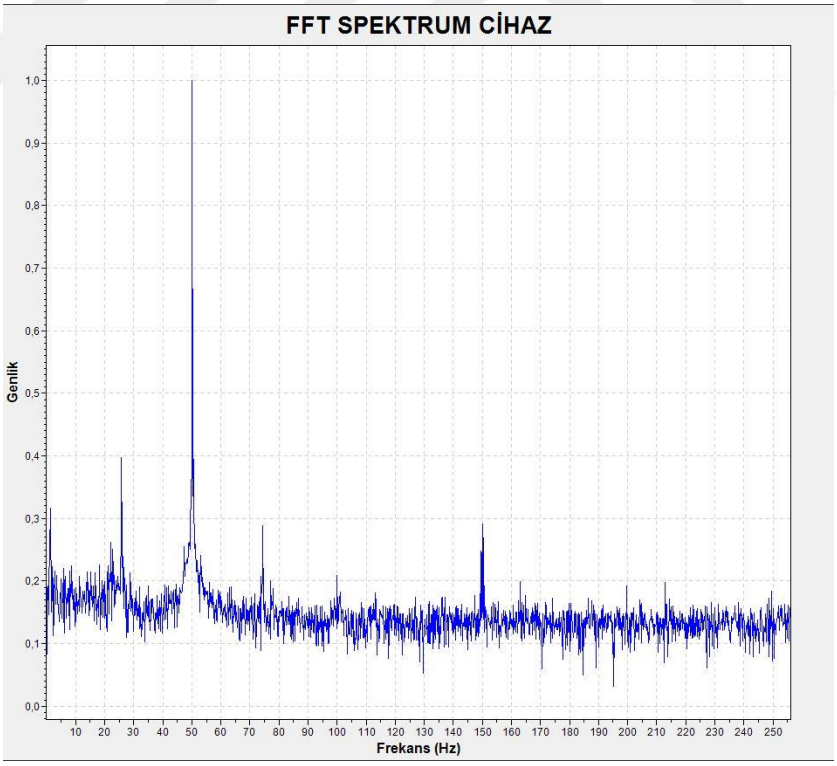
Şekil 7.41. Motor 1 kırık ve yarım yük durumu için 512 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



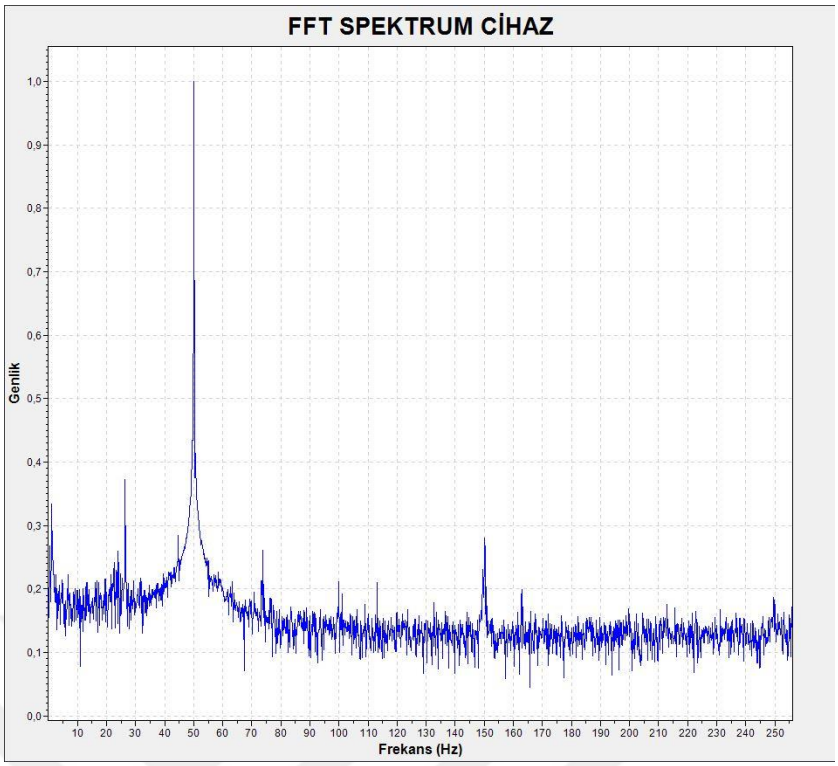
Şekil 7.42. Motor 1 kırık ve tam yük durumu için 512 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



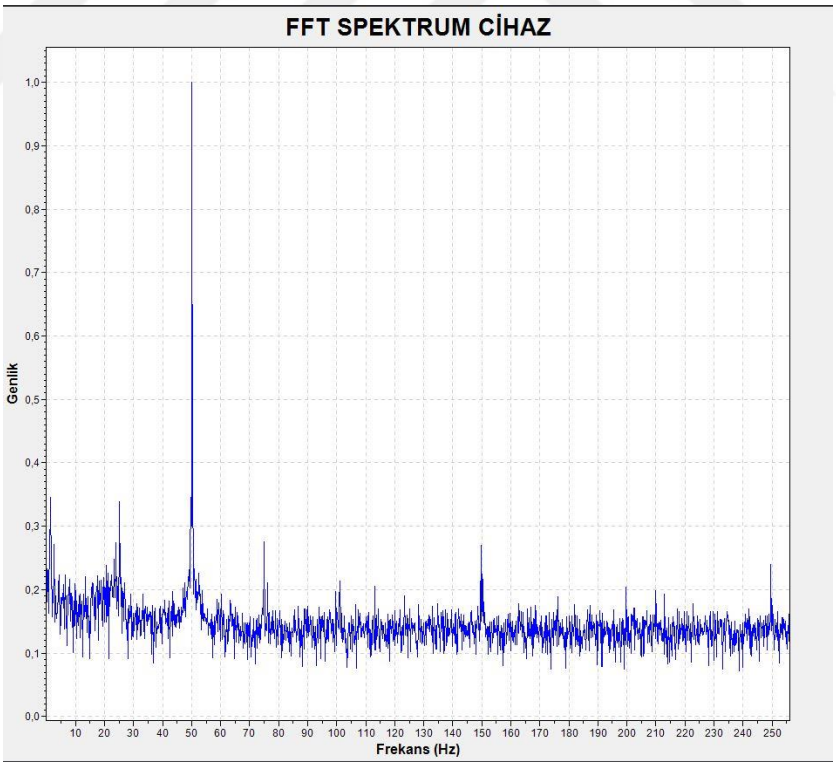
Şekil 7.43. Motor 2 kırık ve yüksüz durumu için 512 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



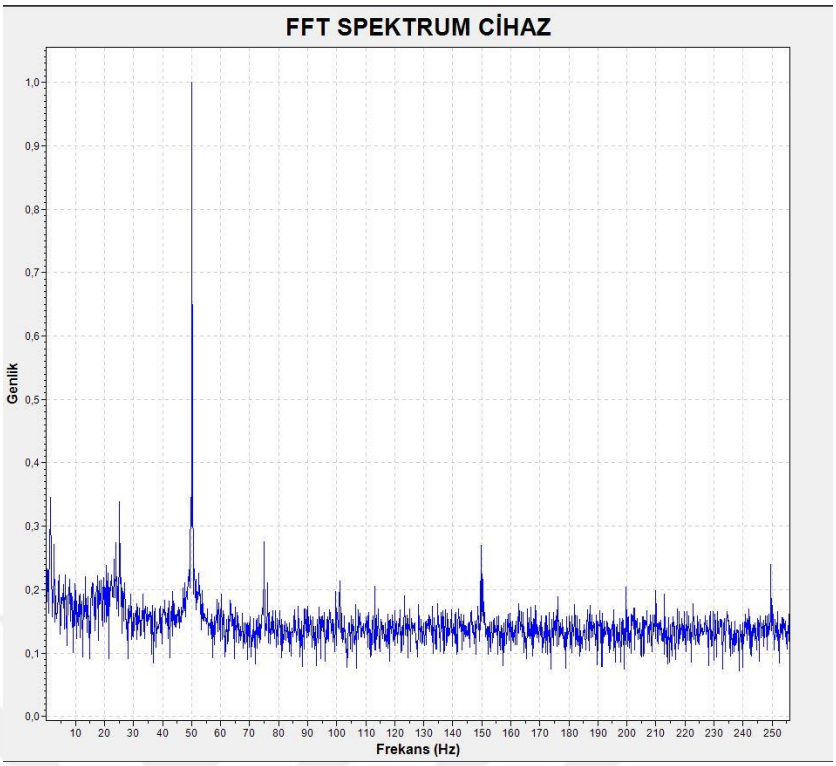
Şekil 7.44. Motor 2 kırık ve yarım yük durumu için 512 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



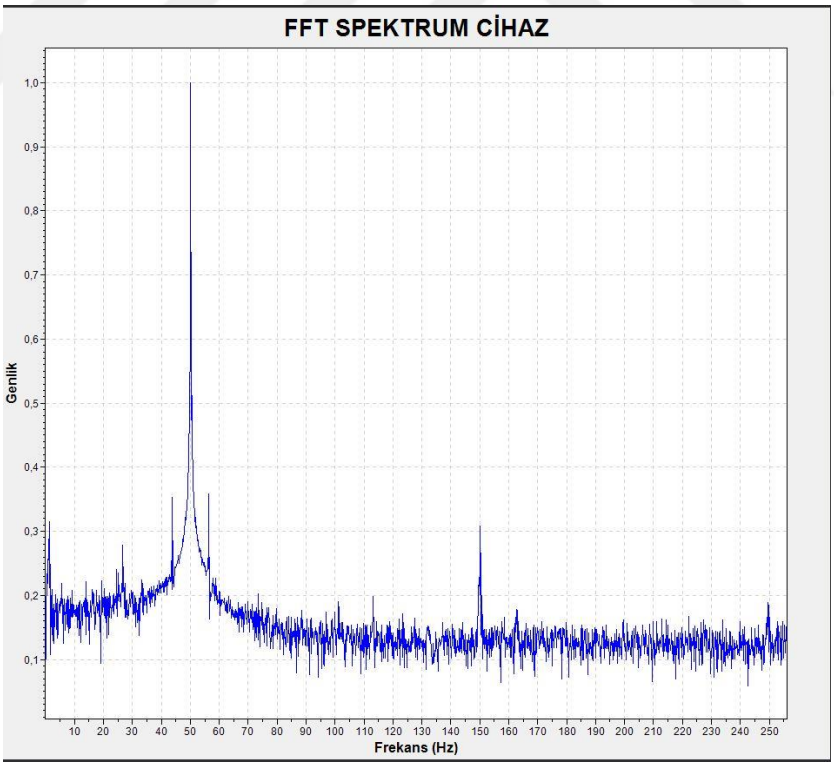
Şekil 7.45. Motor 2 kırık ve tam yük durumu için 512 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



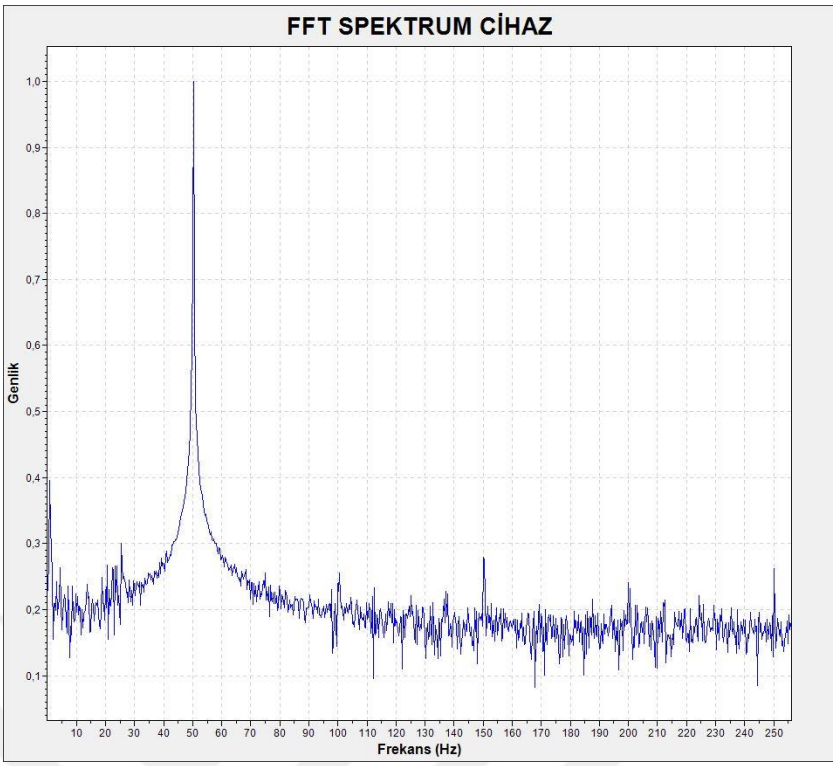
Şekil 7.46. Motor 3 kırık ve yüksüz durumu için 512 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



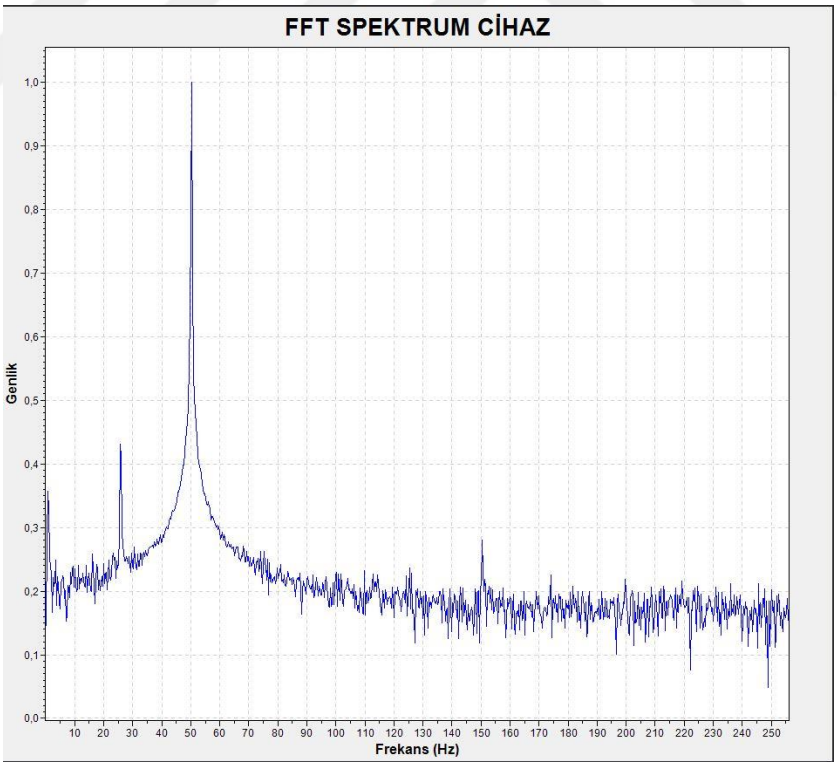
Şekil 7.47. Motor 3 kırık ve yarım yük durumu için 512 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



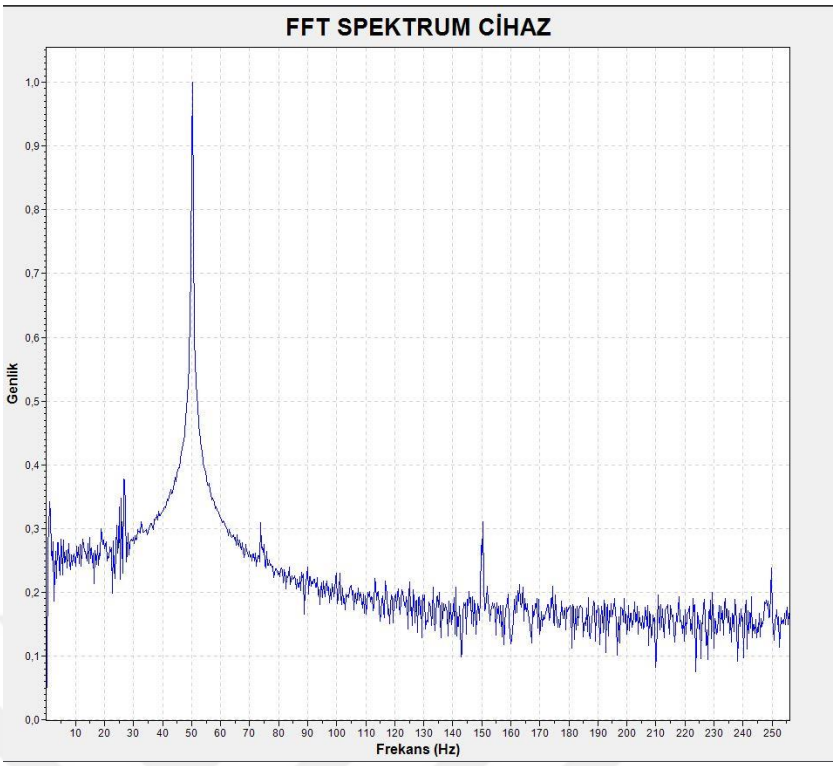
Şekil 7.48. Motor 3 kırık ve yarım yük durumu için 512 S/s örnekleme oranı 4096 örnek ile elde edilen spektrum



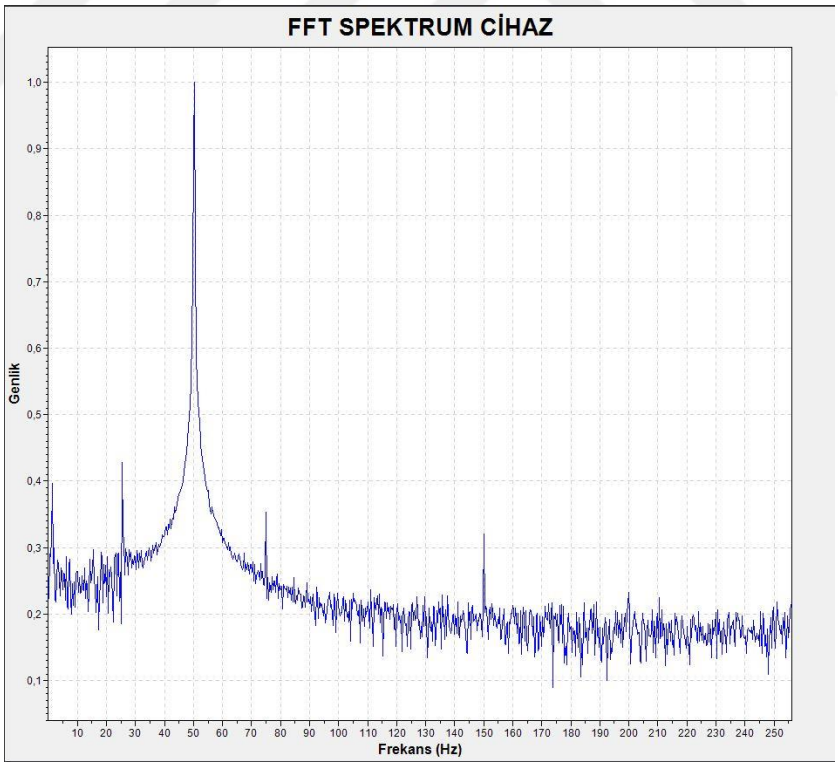
Şekil 7.49. Motor sağlam ve yüksüz durumu için 512 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



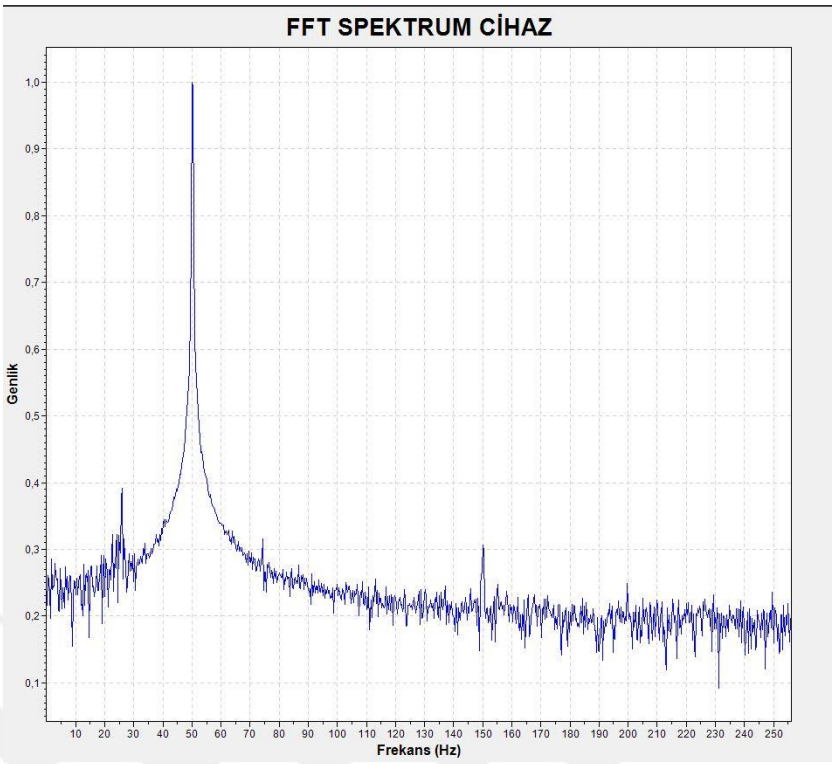
Şekil 7.50. Motor sağlam ve yarım yük durumu için 512 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



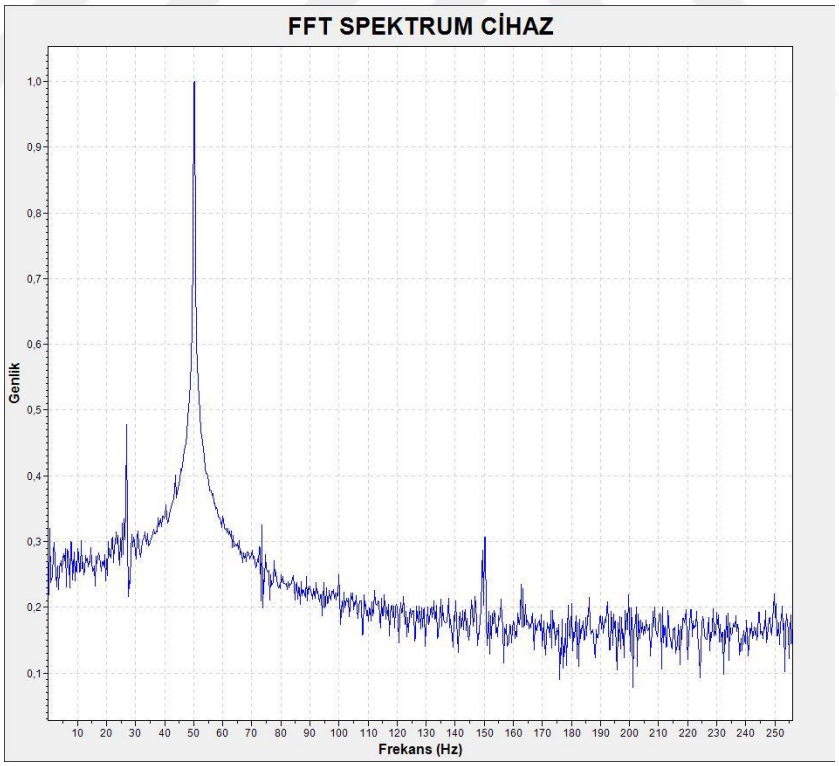
Şekil 7.51. Motor sağlam ve tam yük durumu için 512 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



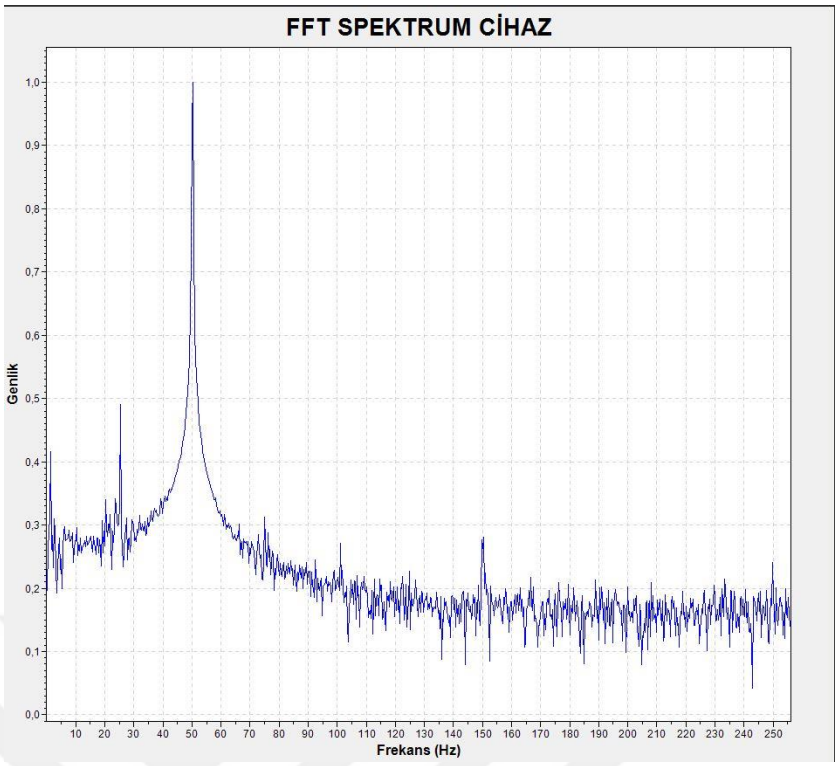
Şekil 7.52. Motor 1 kırık ve yüksüz durumu için 512 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



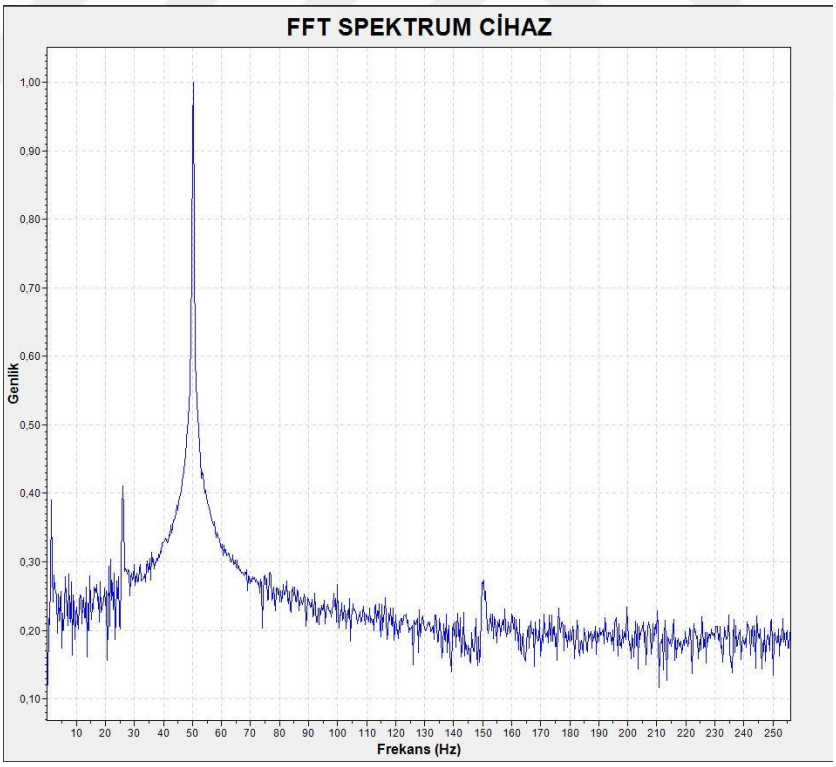
Şekil 7.53. Motor 1 kırık ve yarım yük durumu için 512 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



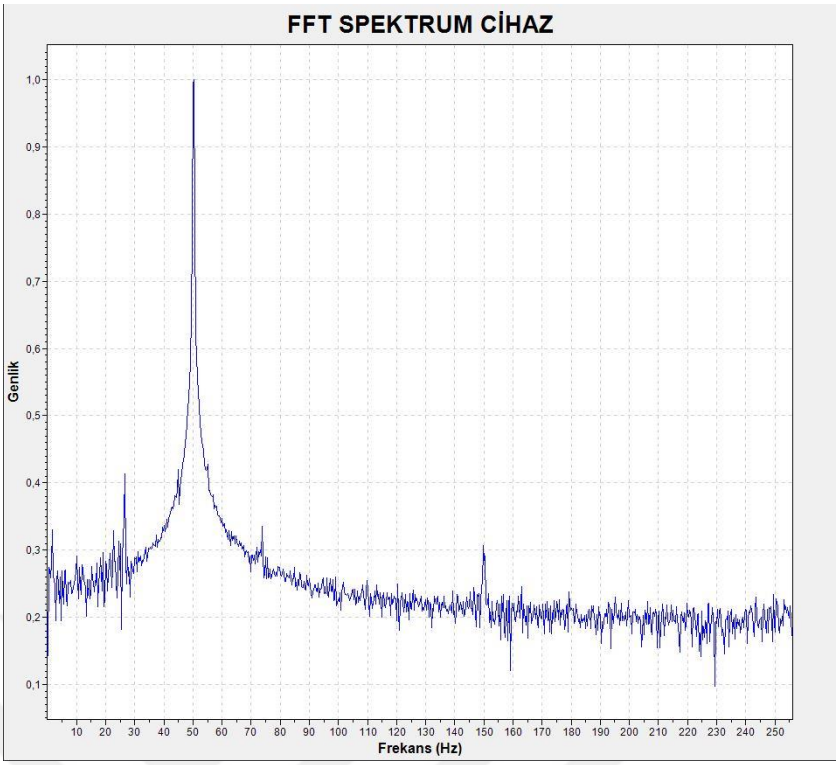
Şekil 7.54. Motor 1 kırık ve tam yük durumu için 512 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



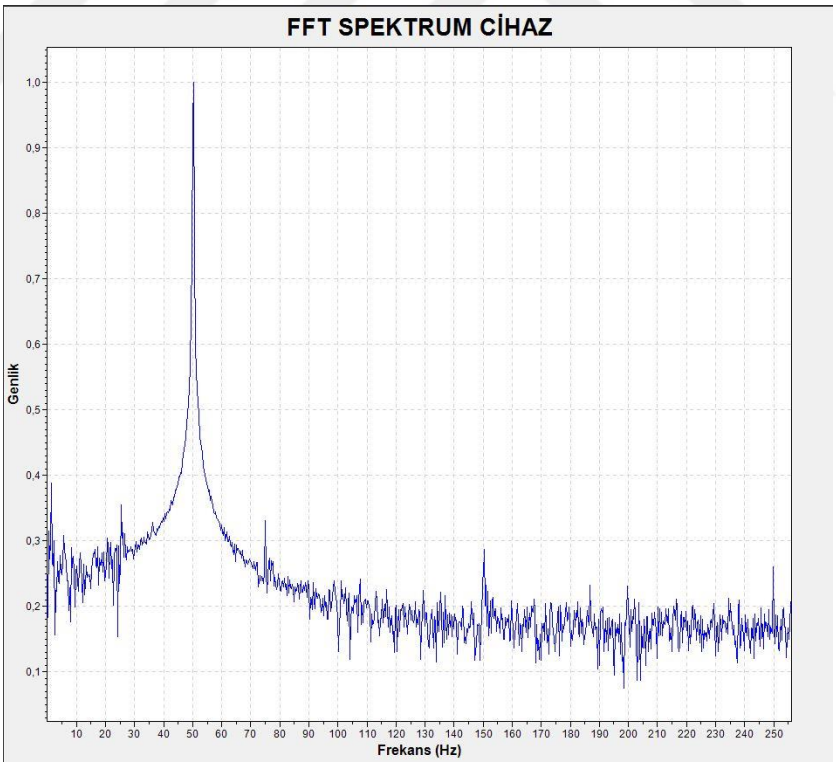
Şekil 7.55. Motor 2 kırık ve yüksüz durumu için 512 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



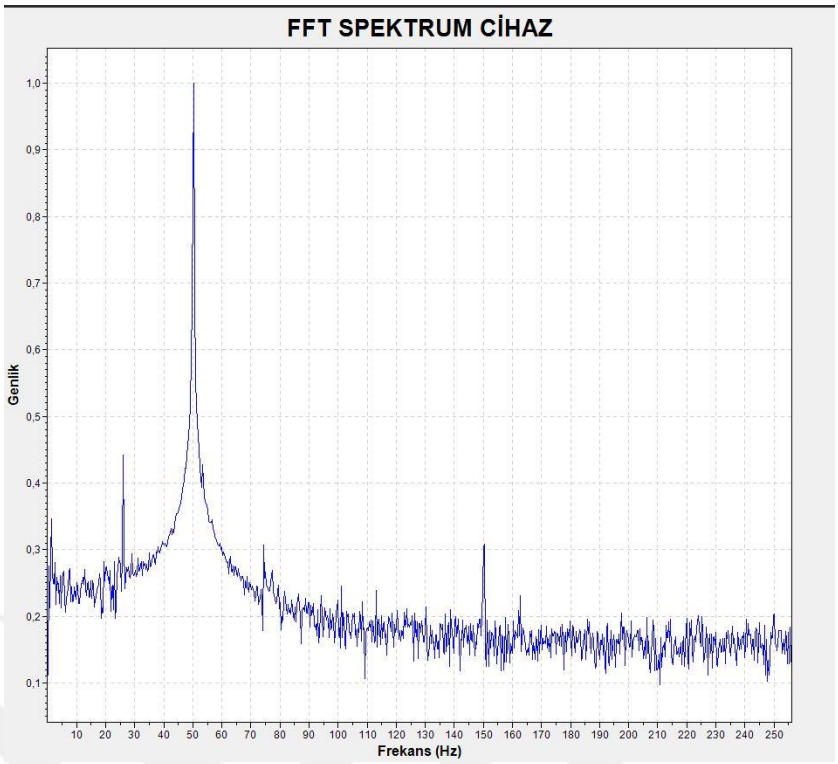
Şekil 7.56. Motor 2 kırık ve yarım yük durumu için 512 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



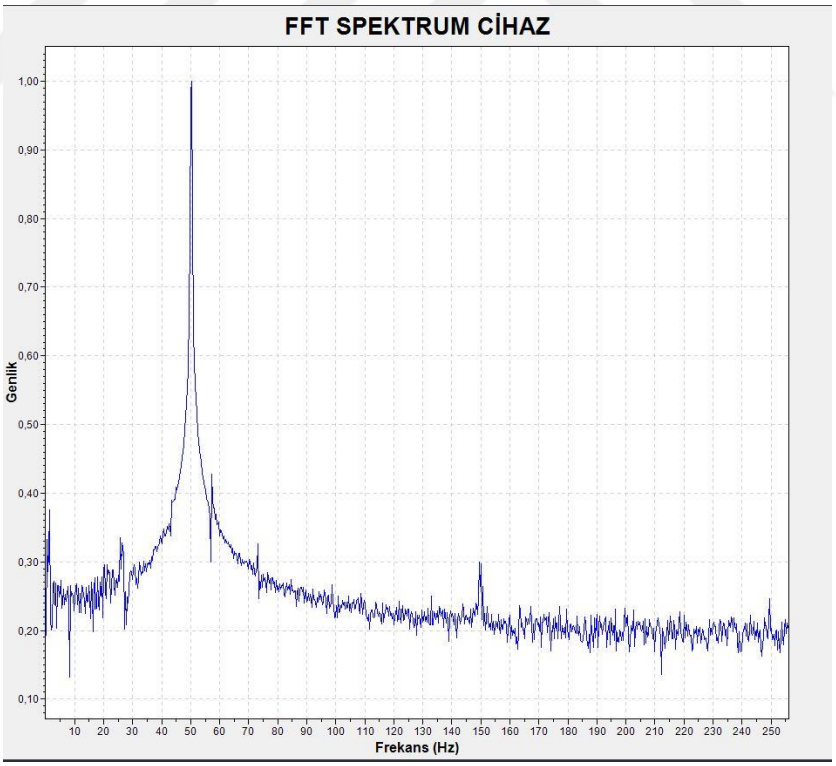
Şekil 7.57. Motor 2 kırık ve tam yük durumu için 512 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



Şekil 7.58. Motor 3 kırık ve yüksüz durumu için 512 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



Şekil 7.59. Motor 3 kırık ve yarım yük durumu için 512 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum



Şekil 7.60. Motor 3 kırık ve tam yük durumu için 512 S/s örnekleme oranı 2048 örnek ile elde edilen spektrum

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1 Sonuçlar

Önerilen yöntem ve gerçekleştirilen sistem, deneyde kullanılan 1,1 kW gücünde asenkron motorda oluşturulan rotor arızalarını teşhis edebilmiştir. Arıza başlangıcı sayılabilecek bir çubuğu kırık rotorda yapılan, örnekleme süresi kısa olan testlerde zayıf sonuçlarla karşılaşılmıştır. Örnekleme süresinin kısa olması sistemin başarısını düşürmektedir. Sebebi frekans çözünürlüğünün düşük olması ve arıza belirtisi sinyallerin temel frekansa yakın ve çok düşük genlikte olmasıdır. Motor yükte çalışırken yan-bant bileşenlerinin genliği daha belirgin ve temel frekanstan uzaklaştığı için başarılı bir şekilde arızayı teşhis edebilmektedir.

Deneyde kullanılan sınırlı donanım ile elde edilen ölçümler, motorun denge durumunda ve yükte çalışırken arıza belirtilerini rahatlıkla elde edilebildiğini göstermiştir. HFD'nün durağan sinyallerde frekans bileşenleri ve genlikleri hakkında doğru bilgiler sunduğunu ispatlanmıştır.

8.2 Öneriler

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen sistemin göstermiş olduğu eksiklik ve zayıflıklar giderilerek sistemin başarısının artırılabileceği düşünülmektedir. Önerilen yöntemin başarısını artırmak ve eksiklerini gidermek için:

Sistemde kullanılan alçak geçiren pasif filtre yerine kesme frekansı ayarlanabilen bir filtre tasarımına gidilmesi farklı frekanslarda çalışan sistemlere uyumluluğu sağlayacaktır. ATC cihazının çeşitli güçlerdeki ve besleme frekanslarında çalışan motorlar için genel olarak başarımını yükselteceği düşünülmektedir.

Sistemin donanım olarak kaydedebileceği örnek kapasitesinin yükseltilmesi HFD pozitif etki ettiği görülmüştür. Bunun yanında diğer motor akım analizi yöntemlerinin gerçekleştirimi ya da benzer algoritmalara olanak sağlaması açısından gerekli görülmüştür. Kapasitenin maliyetleri çok yükselmeyecek seviyede artırılması aynı zamanda arıza teşhisi algoritmasında ve gelişmiş sınıflama yöntemlerini test etmek için önerilmektedir.

Mevcut arıza karar algoritması literatürde geçen çalışmalarda bilgisayarlarda yürütüldüğü için daha fazla örnekleme oranı ve yüksek HFD çözünürlüğü ile

çalışıldığından başarımı daha yüksektir. Mevcut sistem henüz tam başarımla arıza seviyesi tespit edememektedir. Bu konuda iyileştirme için sonraki çalışmalarda başarımı yüksek ve gömülü sistemlerin kapasitesine uygun yöntemler ile devam ettirilmesi düşünülmektedir.

HFD yönteminde kararlı bir yapı oluşturabilmek için, motorun denge durumunda çalıştığı zaman aralığını ve akımdan yük durumunu takip ederek HFD zayıf yönü olan değişken yük koşullarında test yapma durumunu denge konumuna adapte edilebileceği düşünülmektedir. Bunları yaparken ATC'nın her türlü fiziki koşula uyumlu olması, test için fazladan montaj işlemi vs gerektirmeyen ve yöntemin başarımını yükseltecek ek verilere ait sıcaklık, titreşim, hız gibi basit sensörlerin geliştirilmesi düşünülebilir.

Mevcut sistem sahada bir operatör aracılığı ile kullanılacağından periyodik kontrol amaçlı yük ve denge koşulları altında kullanılabilir. İleriki çalışmalarda operatörsüz tek başına motor durumu ile ilgili koşulları algılayabilen düşük maliyetli Lora, Zigbee gibi kablosuz ya da kablolu bağlantı ile IOT yönüne evrilmesi de planlanmaktadır. Bu sayede yaklaşan bakım ihtiyaçlarını algılayıp kendisi bakım çağıran akıllı sistemlere geçiş mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

Ameid, T., Menacer, A., Talhaoui, H. ve Azzoug, Y., 2018, Discrete wavelet transform and energy eigen value for rotor bars fault detection in variable speed field-oriented control of induction motor drive, *ISA transactions*, 79, 217-231.

Antonino-Daviu, J. A., Quijano-Lopez, A., Fuster-Roig, V. ve Nevot, C., 2016, Case stories of induction motors fault diagnosis based on current analysis, *2016 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe (PCIC Europe)*, 1-9.

Arabaci, H. ve Bilgin, O., 2007, The detection of rotor faults by using short time fourier transform, *2007 IEEE 15th Signal Processing and Communications Applications*, 1-4.

Arabacı, H., 2005, Asenkron motorlarda kırık rotor çubuğu arızalarının yapay sinir ağları ile teşhisi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Arabacı, H. ve Bilgin, O., 2006, Yapay Sinir Ağları Kullanarak Rotor Arızalarının Teşhisi, *IEEE 14. Sinyal işleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı*.

Arabacı, H., 2011, Sincap kafesli asenkron motorlarda kafes arızalarının motor performansına etkileri, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Aydin, I., Karakose, M. ve Akin, E., 2011, A new method for early fault detection and diagnosis of broken rotor bars, *Energy Conversion and Management*, 52 (4), 1790-1799.

Ayhan, B., Trussell, H. J., Chow, M.-Y. ve Song, M.-H., 2008, On the use of a lower sampling rate for broken rotor bar detection with DTFT and AR-based spectrum methods, *IEEE transactions on industrial electronics*, 55 (3), 1421-1434.

Ayon-Sicaeros, R. A., Cabal-Yepez, E., Ledesma-Carrillo, L. M. ve Hernandez-Gomez, G., 2019, Broken-rotor-bar detection through STFT and windowing functions, *2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 1-5.

Bellini, A., Yazidi, A., Filippetti, F., Rossi, C. ve Capolino, G.-A., 2008, High frequency resolution techniques for rotor fault detection of induction machines, *IEEE transactions on industrial electronics*, 55 (12), 4200-4209.

Benbouzid, M. E. H., 2000, A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection, *IEEE transactions on industrial electronics*, 47 (5), 984-993.

Benbouzid, M. E. H. ve Kliman, G. B., 2003, What stator current processing-based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis?, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 18 (2), 238-244.

Cusido, J., Jornet, A., Romeral, L., Ortega, J. ve Garcia, A., 2006, Wavelet and PSD as a fault detection techniques, *2006 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, 1397-1400.

de Jesus Romero-Troncoso, R., 2016, Multirate signal processing to improve FFT-based analysis for detecting faults in induction motors, *IEEE Transactions on industrial informatics*, 13 (3), 1291-1300.

Eren, L. ve Devaney, M. J., 2013, Effect of current resampling in motor current signature analysis, *2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 345-348.

Guven, Y. ve Atis, S., 2018, Implementation of an embedded system for real-time detection of rotor bar failures in induction motors, *ISA transactions*, 81, 210-221.

Haji, M. ve Toliyat, H. A., 2001, Pattern recognition-a technique for induction machines rotor broken bar detection, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 16 (4), 312-317.

Ishkova, I. ve Vítek, O., 2015, Diagnosis of eccentricity and broken rotor bar related faults of induction motor by means of motor current signature analysis, *2015 16th*

International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), 682-686.

Janeiro, F. M., Martins, J. F., Pires, V. F., Ramos, P. M. ve Pires, A. J., 2008, Induction motor broken bars online detection, *2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2137-2140.

Kia, S. H., Henao, H. ve Capolino, G.-A., 2007, A high-resolution frequency estimation method for three-phase induction machine fault detection, *IEEE transactions on industrial electronics*, 54 (4), 2305-2314.

King, G. J., 2011, Induction motor fault detection using the fast orthogonal search algorithm, Library and Archives Canada= Bibliothèque et Archives Canada, p.

Kumar, R. S., Ray, K. ve Kumar, K. V., 2009, Fault diagnosis of industrial drives using MCSA techniques, *2009 International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation*, 1-7.

Kutay, F. ve Afacan, E., 2014, Evaluation of MUSIC algorithm with regard to signal estimation for short wave links, *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 313-316.

Mariun, N., Mehrjou, M. R., Marhaban, M. H. ve Misron, N., 2011, An experimental study of induction motor current signature analysis techniques for incipient broken rotor bar detection, *2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 1-5.

Miletic, A. ve Cettolo, M., 2003, Frequency converter influence on induction motor rotor faults detection using motor current signature analysis-experimental research, *4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2003. SDEMPED 2003.*, 124-128.

Moussa, M. A., Boucherma, M. ve Khezzar, A., 2016, A detection method for induction motor bar fault using sidelobes leakage phenomenon of the sliding discrete Fourier transform, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32 (7), 5560-5572.

Naha, A., Samanta, A. K., Routray, A. ve Deb, A. K., 2016, A method for detecting half-broken rotor bar in lightly loaded induction motors using current, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65 (7), 1614-1625.

Nandi, S., Toliyat, H. A. ve Li, X., 2005, Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—A review, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20 (4), 719-729.

Owatchaiphong, S., 2018, Design Concept of Low Cost Measurement for Motor Current Signature Analysis, *2018 Third International Conference on Engineering Science and Innovative Technology (ESIT)*, 1-5.

Öner, İ. V., Yeşilyurt, M. K. ve YILMAZ, E. Ç., 2017, WAVELET ANALİZ TEKNİĞİ VE UYGULAMA ALANLARI, *Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7 (1), 42-56.

Pineda-Sanchez, M., Perez-Cruz, J., Roger-Folch, J., Riera-Guasp, M., Sapena-Baño, A. ve Puche-Panadero, R., 2013, Diagnosis of induction motor faults using a DSP and advanced demodulation techniques, *2013 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 69-76.

Riera-Guasp, M., Pineda-Sanchez, M., Pérez-Cruz, J., Puche-Panadero, R., Roger-Folch, J. ve Antonino-Daviu, J. A., 2012, Diagnosis of induction motor faults via Gabor analysis of the current in transient regime, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61 (6), 1583-1596.

Saidi, L., Henao, H., Fnaiech, F., Capolino, G.-A. ve Cirrincione, G., 2011, Application of higher order spectral analysis for rotor broken bar detection in induction

machines, *8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives*, 31-38.

Sapena-Bano, A., Perez-Cruz, J., Puche-Panadero, R., Martinez-Roman, J., Burriel-Valencia, J. ve Lazaro-Garcia, J., 2014, Motor current signal analysis on programmable logic controller, *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 1648-1653.

Sharma, A., Mathew, L. ve Chatterji, S., 2017, Analysis of Broken Rotor bar Fault Diagnosis for Induction Motor, *2017 International Conference on Innovations in Control, Communication and Information Systems (ICICCI)*, 1-5.

Soy, O., 2016, Sanayide Kullanılan 7, 5 kW ve üzeri AC Motorlara İlişkin Envanter Çalışması, *TC Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Verimlilik Genel Müdürlüğü, Anahtar Dergisi*, 3, 237.

Thomson, W. T. ve Fenger, M., 2001, Current signature analysis to detect induction motor faults, *IEEE Industry Applications Magazine*, 7 (4), 26-34.

Touhami, O. ve Fadel, M., 2007, Detection of Broken Rotor Bars and Stator Faults in Squirrel-Cage Induction Machine by Spectral Analysis, *2007 Thirty-Ninth Southeastern Symposium on System Theory*, 274-278.

Uçar, H. M., 2008, Asenkron Motorlarda İşaret Tabanlı Stator Yalıtım Arıza Tanısı, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Vico, J., Stankovic, D., Voloh, I., Zhang, Z. ve Swigost, D., 2010, Enhanced algorithm for motor rotor broken bar detection.