T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BUZDOLABI KOMPRESÖRLERİNDE TİTREŞİM ÖLÇÜMÜ İLE HATA TESPİTİ YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Ali Aykan SOLMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Alperen ACAR

Şubat, 2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BUZDOLABI KOMPRESÖRLERİNDE TİTREŞİM ÖLÇÜMÜ İLE HATA TESPİTİ YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Ali Aykan SOLMAZ tarafından hazırlanan tez çalışması 24.02.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Isı-Proses Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Alperen ACAR
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Alperen ACAR

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Cihan DEMİR

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Demet BALKAN

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Alperen ACAR sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Buzdolabı Kompresörlerinde Titreşim Ölçümü ile Hata Tespiti Yöntemlerinin Geliştirilmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ali Aykan SOLMAZ

İmza

Sevgili Aileme

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın ortaya çıkması için bana desteğini esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Alperen ACAR'a ve her zaman yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ali Aykan SOLMAZ

İÇİNDEKİLER

KISALTMA LİSTESİ vi
ŞEKİL LİSTESİ vii
TABLO LİSTESİ viii
ÖZET ix
ABSTRACT x
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti ... 1
1.2 Tezin Amacı ... 2
1.3 Hipotez ... 2
2 GENEL BİLGİLER 3
2.1 Buzdolabı Çalışma Prensibi ... 3
2.2 Buzdolabı Parçaları ... 4
2.3 Kompresör ve Parçaları ... 5
2.4 Kompresör Çalışma Parametreleri ... 8
2.5 Asenkron Motorlar ... 9
3 MATERYAL VE METOT 12
3.1 Titreşim Ölçümü ... 12
3.2 Titreşim Ölçümlerinin Analiz Edilmesi ... 14
3.3 İstatistiksel Analizler ... 16
4 HATA TİPLERİ TANIMLARI VE TİTREŞİM ÖLÇÜMÜ İLE TESPİTLERİ 17
4.1 Sesli Çalışma ... 17
4.2 Silindir Hacmi İçine Gaz Gelmemesi ve ya Emme Valfinde Kaçak Olması ... 21
4.3 Kompresör Çıkış Hattı Tıkanıklıkları ... 24
4.4 Yatakların Yetersiz Yağlanması ... 26
4.5 Çalışmayan Kompresör ... 27
5 SONUÇ 29
KAYNAKÇA 30
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 33

KISALTMA LİSTESİ

BLDC	Fırçasız doğru akım elektrik motoru
COP	Verimlilik katsayısı
R-sq	Belirleme katsayısı
Rpm	Devir

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Şematik soğutma çevrimi 3
Şekil 2.2 Kompresör patlatılmış görsel 6
Şekil 2.3 Kompresör gövdesi....6
Şekil 2.4 Krank 7
Şekil 2.5 Biyel 7
Şekil 2.6 Piston 8
Şekil 2.7 Tek fazlı asenkron motor eşdeğer devresi 10
Şekil 2.8 Kondansatör yol vermeli ve daimi kondansatörlü asenkron motorların eşdeğer devreleri 10
Şekil 2.9 Gölge kutuplu asenkron motor eşdeğer devresi 11
Şekil 3.1 Titreşim ölçüm parametreleri 12
Şekil 3.2 Buzdolabı kompresör montaj bölgesi ve titreşim ölçüm sensörü....13
Şekil 3.3 Titreşim ölçümü analiz programı 14
Şekil 3.4 Titreşim ölçüm spektrum....15
Şekil 4.1 Titreşim verileri ve ses seviyesi tek değişken analizi....17
Şekil 4.2 Ses ve titreşim ölçümleri regresyon özet rapor 20
Şekil 4.3 Ölçülen ve tahmin edilen ses seviyeleri grafiği....21
Şekil 4.4 Asenkron motor tork, akım ve rpm grafiği....22
Şekil 4.5 Emme hatalı ve hatasız kompresör titreşim ölçümü 22
Şekil 4.6 Hatasız kompresör titreşim spektrumu....23
Şekil 4.7 Emme hatalı kompresör titreşim spektrumu 23
Şekil 4.8 Çıkış hattı tıkalı ve hatasız kompresör titreşim ölçümü....25
Şekil 4.9 Çıkış hattı tıkalı kompresör titreşim spektrumu....25
Şekil 4.10 Hatasız kompresör titreşim spektrumu....25
Şekil 4.11 Krank yağ kanalı tıkalı ve hatasız kompresör titreşim spektrumu 26
Şekil 4.12 Yetersiz yağlama problemli fan motoru titreşim spektrumu....27
Şekil 4.13 Çalışmayan kompresör titreşim ölçümü....28

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Buzdolabı bileşenleri 4
Tablo 3.1 Buzdolabı kompresör montaj bölgesi bileşenleri.....13
Tablo 3.2 Titreşim ölçüm spektrumu 1 bileşenler 15
Tablo 4.1 Titreşim ve ses ölçümleri.....17

ÖZET

Buzdolabı Kompresörlerinde Titreşim Ölçümü ile Hata Tespiti Yöntemlerinin Geliştirilmesi

Ali Aykan SOLMAZ

Konstrüksiyon Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Alperen ACAR

Bu çalışmada buzdolaplarında kullanılan asenkron elektrik motorlu hermetik kompresörlerin ivmeölçer ile alınan titreşim verilerinin frekans (Hızlı Fourier Dönüşümü Kullanılarak) tabanlı analizleriyle çeşitli hata tiplerinin tespitinin gerçekleştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Bu doğrultuda hatalı ve hatasız kompresörlerin mekanik titreşim karakteristikleri incelenmiş ve hata tiplerinin mekanik titreşim ile arasındaki korelasyonu yapılan testler ile tespit edilmiştir. Bu kapsamda sesli çalışma, silindir hacmi içine gaz gelmeme, valf kaçakları, soğutma sistemi tıkanıklıkları, yetersiz yağlama ve dengesiz çalışma gibi hataların uzun süren ve her hata tipini tespit etmek için farklı ekipmanlar kullanılan testler yerine 20 saniye kadar süren tek bir test ile tespit edilebilirliği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Buzdolabı, Kompresör, Titreşim, Hata Analizi

ABSTRACT

IMPROVING FAULT DETECTION METHODS WITH VIBRATION MEASUREMENT IN REFRIGERATOR COMPRESSORS

Ali Aykan SOLMAZ

Construction Department

Master of Science Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Alperen ACAR

In this study, it has been studied to determine the various error types with frequency (Using Fast Fourier Transform) based analysis of vibration data taken with accelerometers of hermetic compressors with asynchronous electric motors which used in refrigerators. In this direction, the mechanical vibration characteristics of faulty and faultless compressors were examined and the correlation between fault types and mechanical vibration was determined by tests. In this context, it has been shown faults such as noisy operation, gas not coming into the cylinder volume, valve leaks, cooling system blockages, insufficient lubrication and unbalanced operation can be detected with a single test lasting up to 20 seconds instead of tests that take a long time and have to use different equipment to detect all kinds of faults.

Keywords: Refrigerator, Compressor, Vibration, Fault Analysis

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Makinelerin titreşimi frekans tabanlı incelediğinde makinelerin tasarımları, çalışma koşulları ve parçaların durumları hakkında bir çok bilgi verme potansiyeline sahiptir. Bu kapsamda titreşim ölçümü üzerine makineler hataya geçmeden erkenden tespit etmek için ve üretilen ürünlerin hatasız olduğundan emin olmak için bir çok çalışma yapılmıştır ve yapılmaktadır. Ürünler özelinde kapalı sistem olarak çalışan ürünler için bu çalışmalar daha da önem kazanmaktadır, bu tezin konusunu da oluşturan kompresörler de açılamayan, açıldığında kullanılamaz hale gelen kapalı bir sistemdir.

M. Tsypkin aktif olarak çalışan birden çok elektrik motoru üzerinden 10 yıla kadar süren sürelerde titreşim ölçümü almış ve bir çok oluşmuş ve oluşabilecek hatanın tespitini yapmıştır. (Tsypkin, Induction Motor Condition Monitoring: Vibration Analysis Technique - a Practical Implementation, 2011) Bu çalışmanın dışında Tsypkin'in makinelerin titreşim ölçümleriyle hata tespitleri ve çalışma ömürleri içindeki davranışları üzerine çalışmaları bulunmaktadır. Rahman ve arkadaşları sağlam ve 3 farklı hata tipindeki kompresörlerden titreşim ölçümleri alarak, hatalı kompresörleri hatasız olanlardan ayrıştırabilmiştir. (Rahman, Azam, & Saha, 2010)

Tsypkin başka bir çalışmasında indüksiyon motorlarında titreşim ölçümü ile elektromanyetik anomalilerin tespitini göstermiştir. (Tsypkin, Induction Motor Condition Monitoring: Vibration Analysis Technique – Diagnosis of Electromagnetic Anomalies, 2017) Hwang ve arkadaşları da kompresörlerde elektromanyetik kuvvetin ses üzerindeki etkilerini göstermiştir. (Hwang, Lee, Kim, Jung, & Hong, 2006) Liao ve arkadaşları da elektrik motorlarında elektromanyetik titreşim karakteristikleri üzerine çalışmıştır. (Liao, Jiang, & Zhang, 2019)

Kompresörlerin çeşitli hatalardan dolayı silindir hacmi içine gelen gaz miktarı değişebilmektedir. Srdjan ve arkadaşları farklı yükler altında bir elektrik motorunun titreşim verilerini incelemiş ve yük arttıkça titreşim seviyesinin de arttığını göstermişlerdir. (Srdjan, Cincar, & Novakovic, 2018) Fang ve arkadaşları da yüksüz ve

yük altındaki motorların titreşim karakteristikleri üzerine çalışmışlardır. (Fang, Guo, Xu, D., & Qu, 2019)

M. Ahmed, çalışmalarında kompresörlerde zaman tabanlı titreşim ölçüm sonuçlarının istatistiksel analizleriyle giriş ve çıkış valflerindeki kaçakların tespiti üzerine çalışmıştır. (Ahmed, Baqqar, Gu, & D., 2012) Khvostov ve Ryazhskih kompresör valflerindeki problemlerin titreşim karakteristikleri üzerine çalışmışlardır. (Khvostov & Ryazhskih, 2017)

Buzdolabında kullanılan kompresörler için günümüzde en çok şikayet oluşturan konulardan biri de sesli çalışma durumudur. Müşteri beklentilerinin gün geçtikçe artması ve yeni yapılan evlerin daha küçük olması gibi durumlar bu konu üzerinde şikayetlerin gün geçtikçe daha da artmasına sebep olmaktadır. Ses seviye tespiti için yalıtkan ses odalarında ve uzun süren testlerle yapılabilmektedir. Ses seviyesine alternatif olarak çok daha kısa süren titreşim ölçümü ile cihazların ses seviyesini tespit etmeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır. (Park, Kim, & Kim, 2014) Pindoriya ve arkadaşları da BLDC motorlarda titreşim ve gürültü arasındaki korelasyon üzerine çalışmıştır. (Pindoriya, Mishra, Rajpurohit, & Kumar, 2018)

1.2 Tezin Amacı

Makinelerin titreşim ölçümü ile makinelerin çalışmasına etkisi olan bir çok farklı hata tipinin tespit edilebildiği bir çok çalışma ile kanıtlanmıştır. Bu tezin amacı asenkron indüksiyon motorlu kompresörler özelinde titreşim ölçümü ile kompresör ömrüne ve kullanıcı şikayetlerine sebep olabilecek hataların tespit yöntemlerinin geliştirilmesidir.

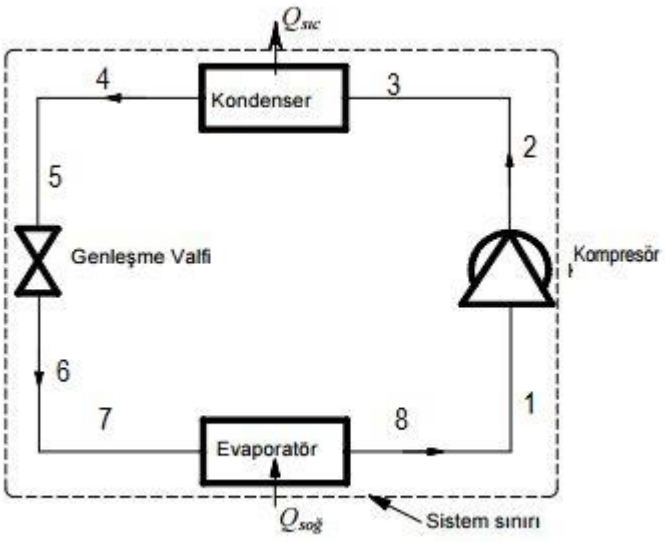
1.3 Hipotez

Kompresörde ve soğutma çevriminde olan hatalar kompresörün çalışma devrini, yükünü ve kompresör içindeki hareket eden parçaların çalışmalarını etkilemekte ve değiştirmektedir. Kompresörde bu değişikliklerin olması aynı zamanda kompresörün titreşim karakteristiğini de etkilemektedir. Bu sebeple kompresörden alınan titreşim ölçümüyle bu değişikliklere sebep olacak hata tipleri tespit edilebilmelidir.

2
GENEL BİLGİLER

2.1 Buzdolabı Çalışma Prensibi

Günümüzde soğutucular için kullanılan en yaygın sistem buhar sıkıştırmalı soğutma çevrimidir. Bu çevrim kompresör, kondenser, genleşme valfi ve ya aynı işlevi gören bir kılcal boru ve evaporatörün bakır ve çelik borularla birbirine bağlanmasıyla oluşur. (ASHRAE, 2016)



Şekil 2.1 Şematik soğutma çevrimi

Şematik soğutma çevriminde $Q_{soğ}$ soğutucu akışkanın ortamdan ısı aldığını, $Q_{sıc}$ ortama ısı verdiğini temsil etmektedir.

Bu çevrimde düşük basınç, düşük sıcaklık ve gaz fazında kompresöre gelen soğutucu akışkan kompresör silindir hacminde sıkıştırılarak yüksek basınç ve yüksek sıcaklıkta kondensere geçer. Kondensörde yüksek basınç ve yüksek sıcaklıkta gaz fazında olan akışkan sıcaklık farkından dolayı dış ortama ısı verir ve sıvı faza dönüşür ve kılcal boruya geçer. Kılcal boruda daralmanın etkisiyle soğutucu akışkanın basıncı ve sıcaklığı düşer ve evaporatöre geçer. Evaporatörde sıvı haldeki soğutucu akışkan ortamdan ısı alarak gaz fazına döner ve buradan tekrar kompresör tarafından emilir. (Tezcan, 2018)

2.2 Buzdolabı Parçaları

Bu bölümde buzdolabında kullanılan parçalar ile ilgili tanımlamalar yapılmıştır. Tablo 2.1'de parçalar ile ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir. (Tezcan, 2018)

Tablo 2.1 Buzdolabı parçaları (Tezcan, 2018)

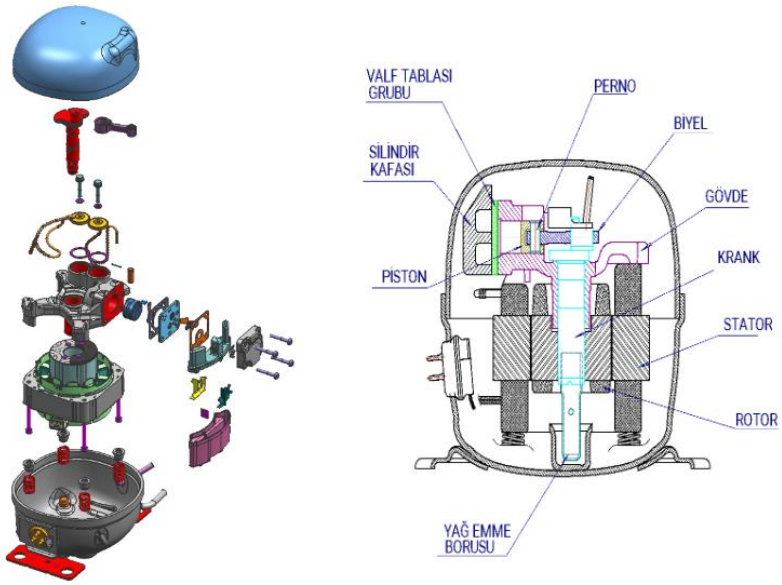
Parça	İşlev	Görsel
Kompresör	Soğutma sisteminde, kompresör evaporatörden gelen ısı almış soğutucu akışkanı sıkıştırarak yüksek basınçta kondensere gönderir böylece dış ortama ısı vermesine olanak sağlar ve akışkanın soğutma sisteminde dolaşma işini yapar.	
Kondenser	Kompresörde sıkıştırılan soğutucu gaz kondenserde yüksek basınç ve kızgın buhar halindedir. Kondenser bu koşuldaki soğutucu akışkanın buzdolabı içinden alınan ısıyı dış ortama aktarması için kullanılır.	

Tablo 2.2 Buzdolabı parçaları(devamı) (Tezcan, 2018)

Kurutucu	Su buharı ve soğutucu gaz dışındaki farklı bileşenleri filtreleyen elemandır.	
Kılcal Boru	Buzdolaplarında genleşme valfi yerine kullanılır. Kondenser ile evaporatör arasında yer alır ve kondenserden evaporatöre geçen soğutucu akışkanın basıncını düşürmek amacıyla kullanılır.	
Evaporatör	Soğutucu akışkanın sıvı fazdan gaz fazına dönüştüğü kısımdır, bu esnada asıl görevi olan buzdolabı içirişinden ısı çekme işlemini yapar.	
Bağlantı Boruları	Sırasıyla, Kompresör-Kondenser-Kılcal boru-evaporatör-kompresör bağlantılarını yapmak için kullanılır.	

2.3 Kompresör ve Parçaları

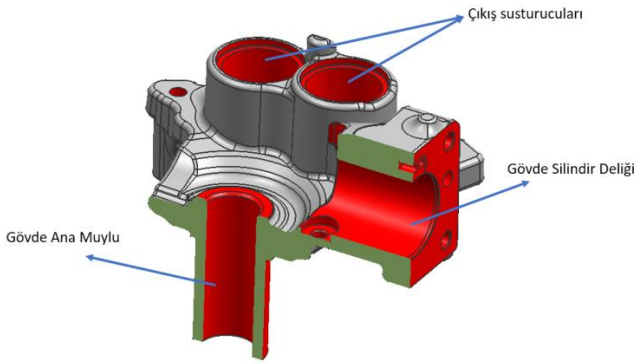
Kompresörler tahrik amacıyla kullanılan elektrik motoru ile oluşan dönme hareketini krank-biyel mekanizması yardımıyla doğrusal harekete çevirerek pistonun silindir içinde git gel yapmasıyla sıkıştırma işlemi yapan makinelerdir. Günümüzde yaygın olarak asenkron motorlu ve invertör sürücülü olmak üzere 2 tip kompresör kullanılmaktadır. Bu çalışmada asenkron motorlu kompresörler üzerine çalışılmıştır. (Arçelik, 2022)



Şekil 2.2 Kompresör patlatılmış görsel

2.3.1 Gövde

Kompresör gövdesi üzerinde susturucu yuvaları, silindir deliği, ana muylu deliği ve irtibat deliklerini toplayan ve pik dökümden yapılmış bir parçadır. Piston ve Krank yataklamalarını sağlar.



Şekil 2.3 Kompresör gövdesi

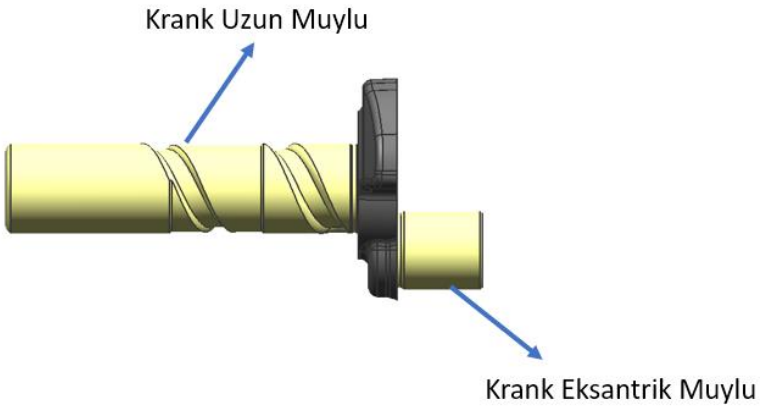
Gövde Ana Muylu: Krank yataklamasının yapıldığı bölge

Gövde Silindir Deliği: Pistonun çalıştığı ve sıkıştırma işlemini bölge

Çıkış Susturucusu: Sıkıştırılan gazın çıkış valfinden çıktıktan sonra geçtiği bölge

2.3.2 Krank

Rotor ve biyel arasındaki hareket iletimini sağlayan parçadır.



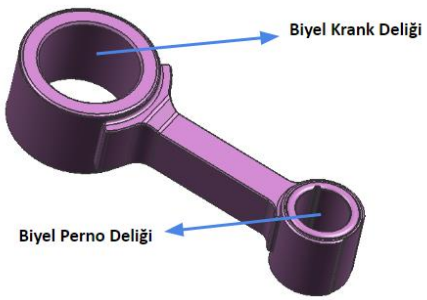
Şekil 2.4 Krank

Krank Uzun Muylu: Rotor-Krank bağlantısı yapılan bölge

Krank Eksantrik Muylu: Krank-Biyel bağlantısı yapılan bölge

2.3.3 Biyel

Krank ile piston arasındaki hareket iletimini sağlayan parçadır.



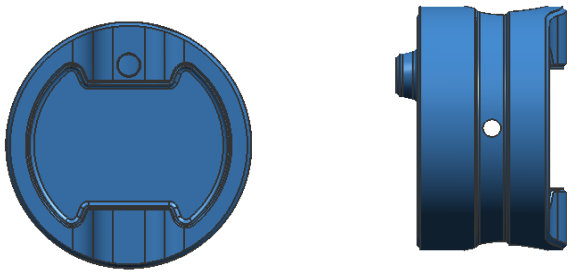
Şekil 2.5 Biyel

Biyel Krank Deliği: Krank eksantrik muylu ile bağlantı yapılan bölge

Biyel Perno Deliği: Perno yardımıyla piston kilitlemesi yapılan bölge

2.3.4 Piston

Piston perno yardımıyla biyele kilitlenir. Gövde silindir deliğinde çalışarak akışkan sıkıştırma işini yapar.



Şekil 2.6 Piston

2.3.5 Stator

Yalıtkan bir malzeme ile kaplı bakır ve alüminyum tellerin sarılması ile oluşturulur. Sargılara alternatif akım uygulandığında dönen bir manyetik alan oluşturur ve üzerinde şoklanmış mıknatıslar bulunan rotorun dönme hareketi yapmasını sağlar. (Bekiroğlu, et al., 2006)

2.3.6 Rotor

Çelik sacların üst üste eklenmesi ile üretilir. Statorun oluşturduğu manyetik alana ilave olarak ikinci manyetik alan yaratmak için üzerine açılan boşluklara sargılar eklenir. İkinci manyetik alanın oluşması ile dönme hareketini yapar. (Bekiroğlu, et al., 2006)

2.4 Kompresör Çalışma Parametreleri

Kompresör için en önemli çalışma parametresi, kompresörün verimidir (C.O.P). Kompresör verimi kompresör kapasitesinin kompresörün tükettiği güce oranıdır.

$$COP = Kapasite\left(\frac{kcal}{h}\right) x1{,}163\ /Güç\ (W) \tag{2.1}$$

2.5 Asenkron Motorlar

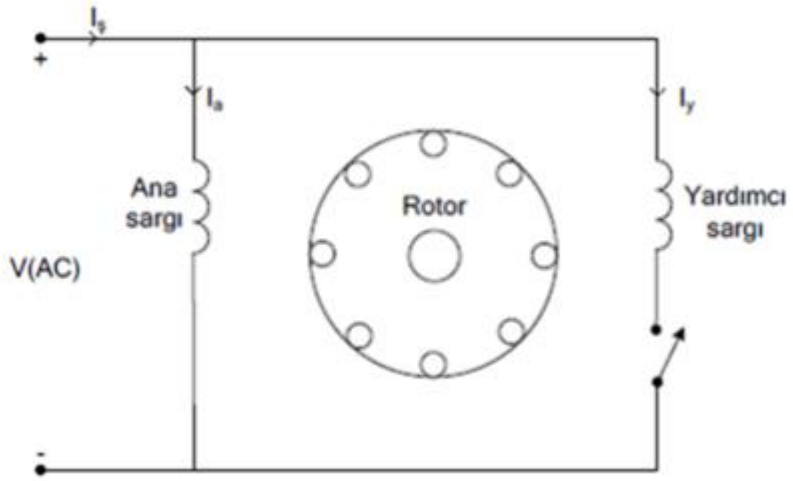
Asenkron motorlar, statora verilen elektrik akımını mekanik enerjiye dönüştüren elektrik motorlarıdır. Çalışma esnasında elektrik arkı oluşmaz ve yük altında devir sayıları az değişir. Bu nedenle, bakım yapılmadan çok uzun sürelerde çalışabilir. Bu motorlar diğer elektrik motorlarına göre daha ucuzdur ve endüstriyel kullanımlarda daha çok tercih edilir. Tek fazlı ve üç fazlı modeller yaygın olarak kullanılmaktadır. (Otunç, 2015)

Asenkron motorlar, stator sargısına uygulanan alternatif akım aracılığıyla manyetik bir alan oluşturur. Üç fazlı asenkron motorlar, birbirlerinden 120 derecelik faz farkı olan üç farklı manyetik alan yaratır. Rotorun senkron hızda dönmesi, stator alanının rotor iletkenlerini kesmemesini ve rotorda alternatif akım oluşmamasını sağlar. Bu nedenle, rotor devir sayısı senkron devir sayısının altında olmalıdır. Rotor dönme hızıyla statorun oluşturduğu manyetik alanın dönme hızı arasındaki bu hız farkı, "kayma" olarak adlandırılır. (Bekiroğlu, et al., 2006) (Otunç, 2015)

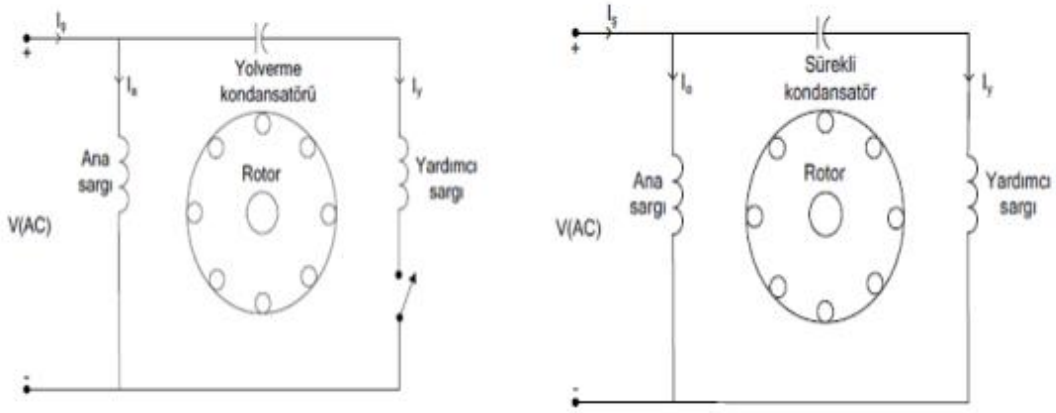
Bu tez çalışmasında ise çalışmalar tek fazlı asenkron motorlu kompresörler üzerinde yapılmıştır.

2.5.1 Tek Fazlı Asenkron Motorlar

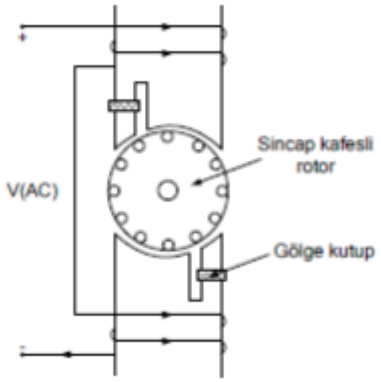
Tek fazlı asenkron motorların yaygın olarak kullanılan dört farklı çeşidi vardır. Bunlar; kondensatör yol vermeli, daimi kondensatörlü, gölge kutuplu ve son olarak buzdolabı kompresörlerinde kullanılan yardımcı sargılı modellerdir. Yardımcı sargılı modelde kalkış için yardımcı sargı başlangıçta devreye girer ve motor kalkışı yaptıktan sonra devreden çıkar. (Özçıra, Bekiroğlu, & Ayçiçek, 2007) (Otunç, 2015)



Şekil 2.7 Tek fazlı asenkron motor eşdeğer devresi (Özçıra, Bekiroğlu, & Ayçiçek, 2007)



Şekil 2.8 Kondansatör yol vermeli ve daimi kondansatörlü asenkron motorların eşdeğer devreleri (Özçıra, Bekiroğlu, & Ayçiçek, 2007)



Şekil 2.9 Gölge kutuplu asenkron motor eşdeğer devresi (Özçıra, Bekiroğlu, & Ayçiçek, 2007)

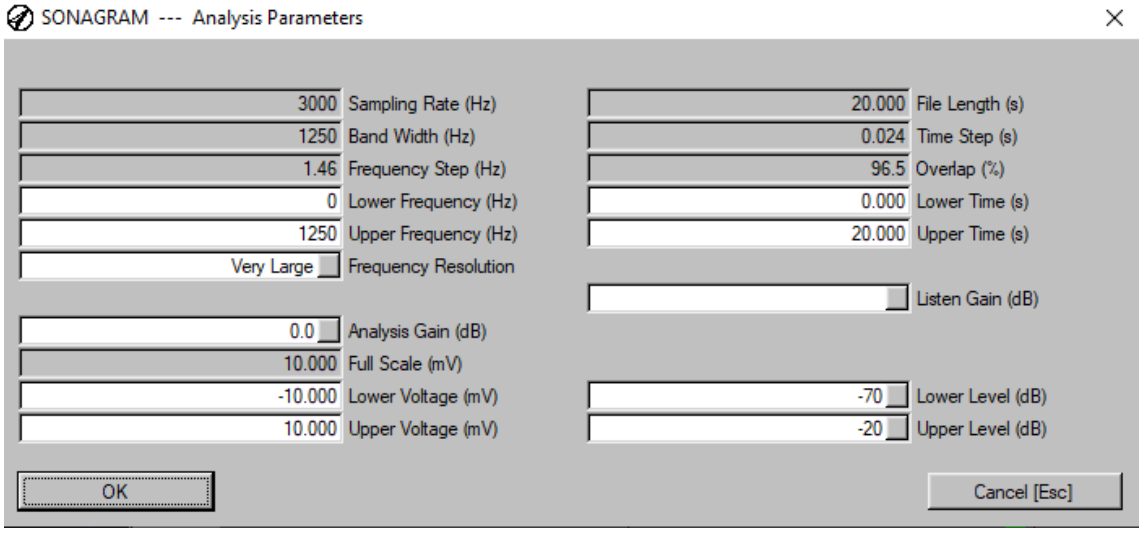
3
MATERYAL VE METOT

3.1 Titreşim Ölçümü

3.1.1 Ölçüm Ekipmanı

Bu çalışma için yapılan titreşim ölçümleri , ölçüm frekans işleme aralığı 10 Hz ile 40 KHz aralığında olan bir sinyal işleyici ve ölçme frekans aralığı 0.2 Hz ile 12.8 KHz arasında olan "1.0 mV/ms^{-2}" hassasiyetinde piezoelektrik ivme ölçer sensör ile yapılmıştır.

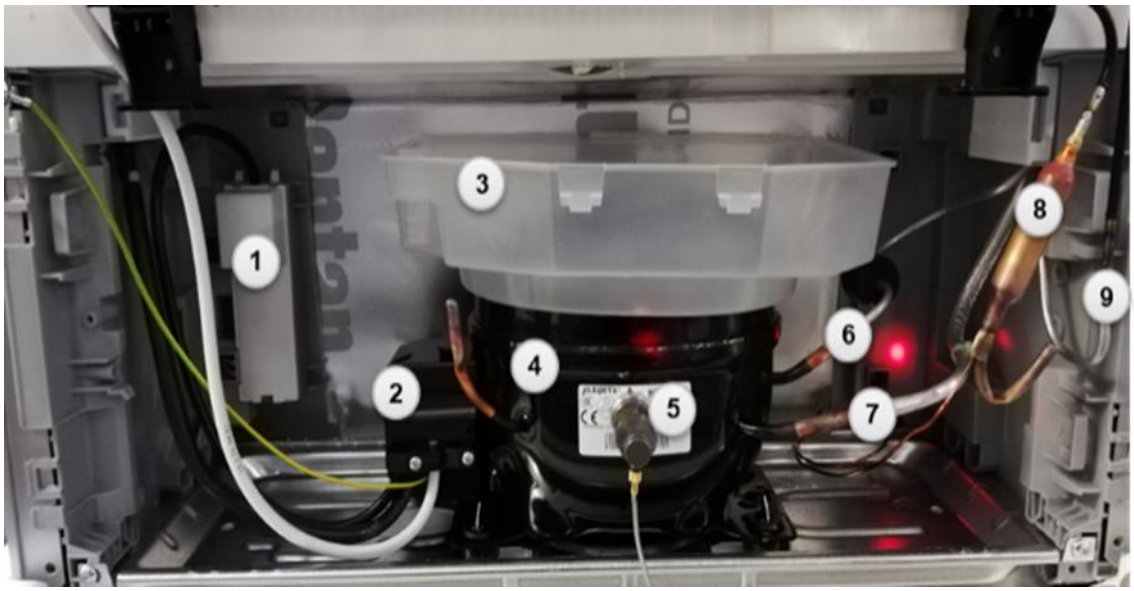
Titreşim ölçümlerinde ve ilerleyen bölümde bahsedilecek analizlerinde sonogram yazılımı kullanılmıştır. Ölçüm ve analiz parametreleri aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Titreşim ölçüm parametreleri

3.1.2 Ölçüm Yöntemi

Titreşim ölçümleri buzdolabına montajı yapılmış kompresör denge basıncı durumunda kalkış yaptıktan 2dk sonra Şekil 3.1'de gösterildiği gibi kompresör üzerine ivme ölçer yerleştirilerek 10 saniye süren ölçümlerle alınmıştır. İvme ölçeri kompresör muhafazası üzerinde sabit olarak tutmak ve kompresörün oluşturduğu manyetik alanın etkilerini görmek için ivme ölçerin uç kısmında ek olarak mıknatıs kullanılmıştır.



Şekil 3.2 Buzdolabı kompresör montaj bölgesi ve titreşim ölçüm sensörü

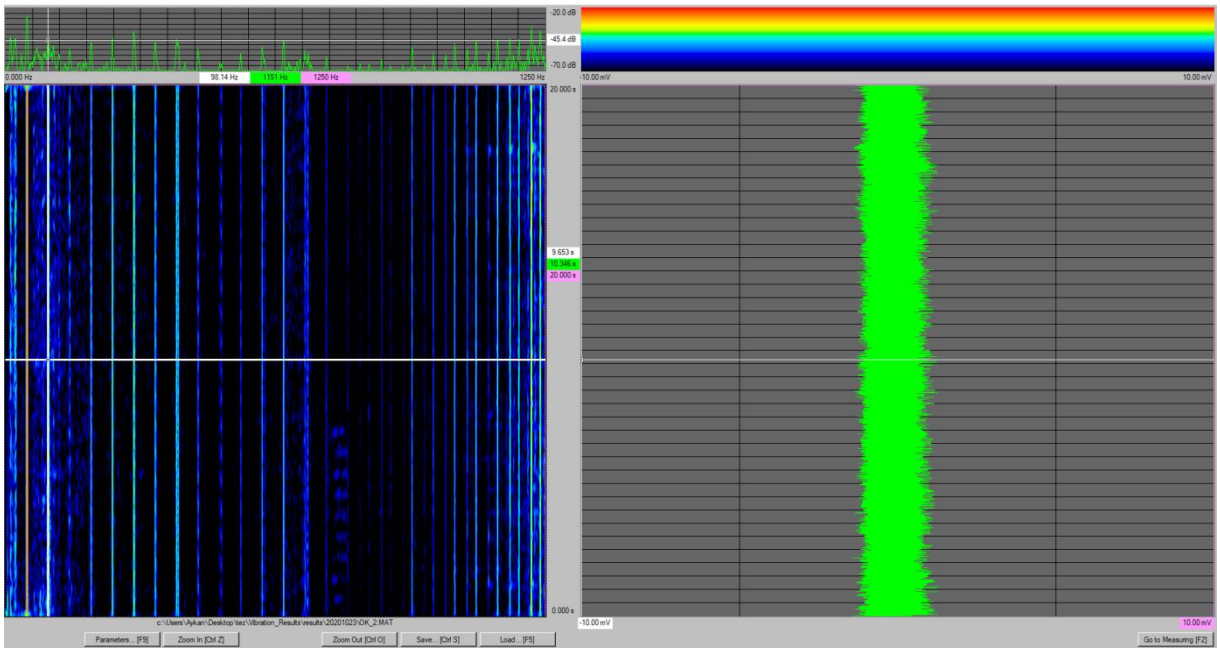
Tablo 3.1 Buzdolabı kompresör montaj bölgesi bileşenleri ve titreşim ölçüm sensörü

No	**Bileşen**
1	Kalkış Kapasitörü
2	Termik Röle
3	Buharlaştırma Kabı
4	Kompresör
5	İvme Ölçer Sensör
6	Yüksek Basınç Bağlantısı
7	Alçak Basınç Bağlantısı
8	Kurutucu
9	Çevre Boru-Kondanser Bağlantısı

3.2 Titreşim Ölçümlerinin Analiz Edilmesi

Ölçümlerin analizi için Şekil 3.2'de analiz ekranı gösterilen yazılım kullanılmıştır. Bu yazılım titreşim ölçümlerini hızlı fourier dönüşümü yardımıyla zaman tabanlı analiz etmenin yanında frekans tabanlı olarak analiz etme olanağı sunmaktadır.

Spektrum ekranında; aşağıdan yukarıya zaman ekseni, soldan sağa frekans ekseni, renklendirme ile büyüklük ekseni gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Titreşim ölçümü analiz programı

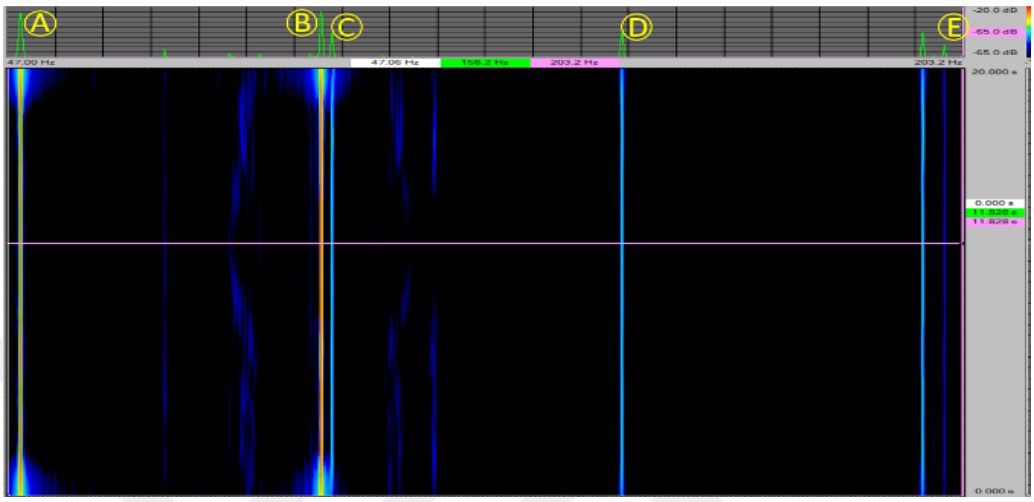
Yazılımda frekans bantlarındaki ivmenin karekök ortalama değerleri logaritmik olarak 0 dB ile -70 dB aralığına sıkıştırılmış olarak gösterilmektedir. Veri alınan en düşük nokta olan "$a_0 = 0.002235\ m/s^2 = -70\ dB$" referans noktası olarak seçilerek diğer ivme büyüklükleri m/s^2 cinsinden denklem 3.1 ile bulunabilir.

Titreşim verileri frekans bazlı lineer olarak incelendiğinde en büyük değer ile en küçük değer arasındaki fark çok fazla olduğu için logaritmik olarak gösterilmektedir. Aşağıdaki denklemde dönüşümün nasıl yapıldığı gösterilmektedir.

$$a = a_0 \times 10^{(dB \div 20)+3.5} \tag{3.1}$$

Yazılımda ayrıca toplam titreşim seviyesi de mV cinsinden gösterilmektedir. Titreşim büyüklüğü $\mathrm{m/s^2}$ olarak bulunmak istenirse aşağıdaki denklem ile bulunabilir. Burada C ivme ölçere göre değişen bir katsayıdır.

$$\frac{\frac{V_1 + V_2}{2 * C}}{\sqrt{2}} = a \tag{3.2}$$



Şekil 3.4 Titreşim ölçüm spektrumu 1

Harmoniler ilk çalışma frekansında ve ilk çalışma frekansının tam katlarında oluşmaktadır. Saniyede 50 tur dönen bir parçanın çalışma frekansı 50 Hz'dir ve ilk titreşim harmoniği 50 Hz'de ikinci titreşim harmoniği 100 Hz'de oluşmaktadır.

Tablo 3.2 Titreşim ölçüm spektrumu 1 bileşenler

No	Bileşen
A	1. Titreşim Harmoniği
B	2. Titreşim Harmoniği
C	1. Manyetik Alan Harmoniği
D	3. Titreşim Harmoniği
E	2. Manyetik Alan Harmoniği

Titreşim ölçümleri frekans bazlı analiz edilebildiği için ayrıcı bu ölçüm ile kompresörün çalışma devri de denklem 3.3 ile bulunabilir.

$$Devir = 1.Harmonik\ Frekansı\ (Hz)\ x\ 60 \tag{3.3}$$

Ölçümlerin mıknatıs yardımı ile alınması ayrıca manyetik alanın ivme ölçere olan etkisini de ölçmemize olanak sunmaktadır. Şekil 3.3 ve Tablo 3.2'de manyetik alan harmonileri tasvir edilmiştir.

Kompresörde rotorun dönmesi için oluşan manyetik alan da hareketli olduğu için harmoni yaratmaktadır. Tek fazlı ve tek kutup çiftli asenkron motorlar için bu besleme şebekesinin frekansına eşittir. Fakat mıknatıs üzerinden bu etkiyi aldığımız için tek turda mıknatıs hem S kutbu hem N kutbu tarafından etkilendiği için ilk harmonik besleme elektrik frekansının 2 katı olan 100 Hz'de oluşmaktadır.

3.3 İstatistiksel Analizler

Çalışmadaki istatistiksel analizler Minitab yazılımı yardımıyla yapılmıştır. Yazılımda temel istatiksel analizler, regresyon analizi, süreç kabiliyeti analizleri deney tasarımları gibi bir çok araç mevcuttur.

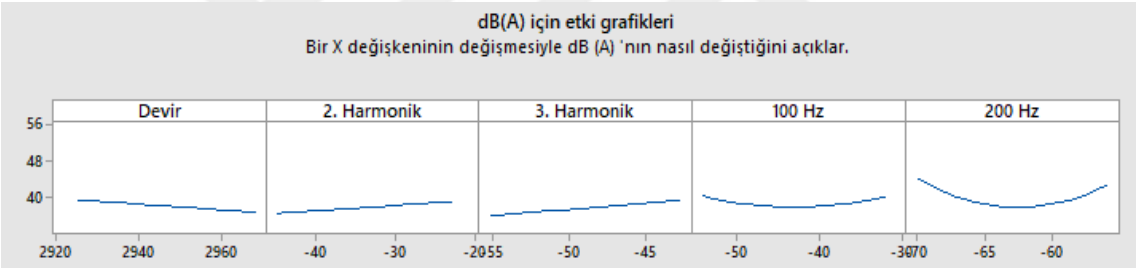
Bu çalışmada girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkileri analiz etmek için regresyon aracı kullanılmıştır.

4
HATA TİPLERİ TANIMLARI VE TİTREŞİM ÖLÇÜMÜ İLE TESPİTLERİ

4.1 Sesli Çalışma

Kompresörlerin sesli çalışma durumunu tespit etmek için kompresör çalışma devri, titreşim harmonileri ve kompresörün çalışması sırasında oluşan manyetik alanın ivme ölçer üzerindeki mıknatısa olan etkisi analiz edilerek bu 3 girdinin olduğu ve çıktısının ses seviyesi olduğu tahmin edici bir model için çalışılmıştır. (Park, Kim, & Kim, 2014)

Bu girdilerin ses seviyesi ile arasındaki korelasyon incelenmiş ve Şekil 4.1'deki sonuçlar ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.1 Titreşim verileri ve ses seviyesi tek değişken analizi

Sesli çalışma ile titreşim ölçümü arasındaki korelasyonu analiz etmek için 40 adet kompresörün buzdolabı üzerinde titreşim ölçümü alınarak daha sonra yalıtımlı odada ses ölçümü alınmıştır. Titreşim ve ses ölçümleri tablo 4.1'de gösterilmektedir.

Tablo 3.2 Titreşim ve ses ölçümleri

No	Devir	2.Harmonik (dB)	3.Harmonik (dB)	100Hz (dB)	200Hz (dB)	Ses Seviyesi dB(A)
1	2950	-45	-50.7	-32	-61	36.3

Tablo 3.2 Titreşim ve ses ölçümleri(devamı)

2	2957	-36	-48	-40.5	-64	36.5
3	2960	-33	-45.3	-32	-67	36.6
4	2950	-35	-48.4	-45	-58.5	36.6
5	2951	-34	-49.3	-42.5	-63	36.7
6	2950	-30.5	-53.8	-42	-59	36.9
7	2950	-29	-46.5	-38.5	-61.5	37.2
8	2966	-39	-51.2	-44	-65	37.3
9	2955	-33.5	-50.5	-45	-62	37.4
10	2953	-37	-48.4	-44	-58	37.4
11	2950	-32.5	-47	-41.5	-63	37.4
12	2957	-31.5	-44.8	-42	-62	37.6
13	2947	-31	-46.5	-43	-62	37.6
14	2956	-36	-55.2	-47	-63	37.7
15	2950	-33	-51.6	-41	-59	37.8
16	2950	-32	-44.8	-39	-61	38
17	2957	-39.5	-53	-34.3	-57.5	38.1
18	2963	-36.5	-44.8	-45	-69	38.2

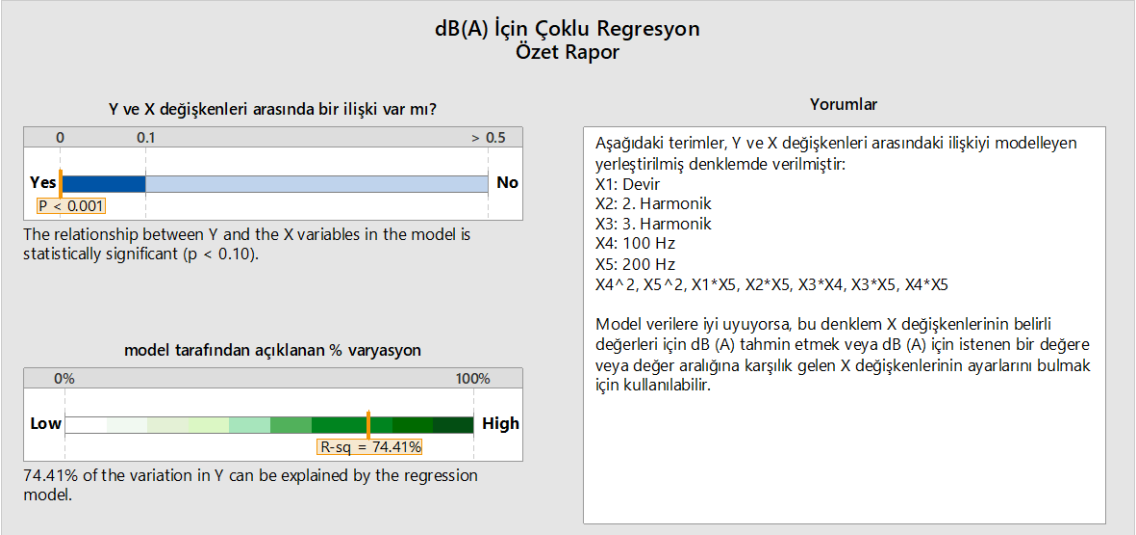
Tablo 3.2 Titreşim ve ses ölçümleri(devamı)

19	2963	-35	-47.4	-48.5	-67	38.2
20	2955	-35.5	-43.7	-46	-65	38.3
21	2942	-28.5	-45.1	-49	-59.5	38.4
22	2940	-31.5	-50.2	-40	-62	38.7
23	2953	-27	-54	-37	-70	38.8
24	2946	-32	-46.7	-40	-60	38.9
25	2957	-31.5	-47.2	-41	-62	39.3
26	2946	-32	-46.7	-44	-65	39.3
27	2958	-39	-48	-43	-58.5	39.5
28	2930	-25	-46	-38	-60	39.6
29	2968	-32	-47.4	-54	-65	39.8
30	2935	-45	-46.5	-35.5	-62	39.9
31	2925	-32	-45.8	-48	-60	39.9
32	2930	-30	-49.1	-42.5	-56	39.9
33	2947	-28	-46.2	-38	-61	41.1
34	2955	-26	-54	-47	-56	42
35	2943	-28.5	-47.2	-39.5	-57	42.7

Tablo 3.2 Titreşim ve ses ölçümleri(devamı)

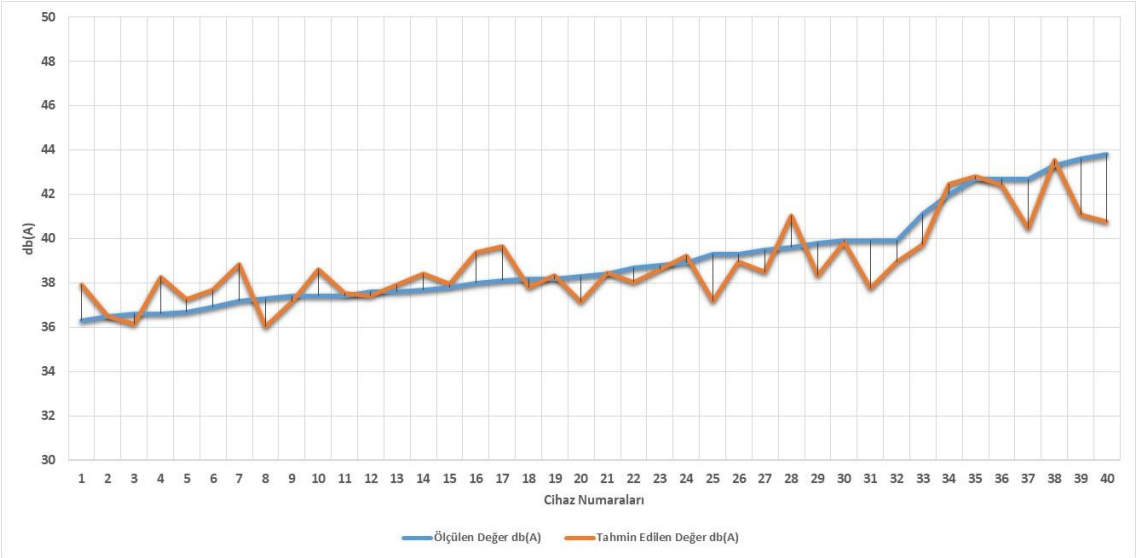
36	2925	-23	-42.7	-39.5	-59	42.7
37	2940	-27	-44.6	-39	-67	42.7
38	2946	-38.5	-44.4	-32	-60	43.3
39	2948	-27	-49.1	-37	-59	43.6
40	2952	-30	-44.4	-39	-60	43.8

Ses ve titreşim ölçümlerinden elde edilen veriler arasındaki korelasyonu bulmak için minitab programı üzerinden regresyon çalışması yapılmıştır. Özet rapor şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2 Ses ve titreşim ölçümleri regresyon özet rapor

Özet raporda da görüldüğü gibi girdiler ile çıktılar arasındaki korelasyonu tanımlayan p değeri 0,001'den küçük çıkarak, girdiler ile çıktılar arasında çok büyük oranda bir bağıntı olduğunu ortaya koymuştur. Ses seviyesi tahmin etmek için kullanılacak modelin R-sq değeri %74,41 olarak çıkmıştır, bu da modelin büyük oranda isteklerimizi karşıladığı anlamına gelmektedir.



Şekil 4.3 Ölçülen ve tahmin edilen ses seviyeleri grafiği

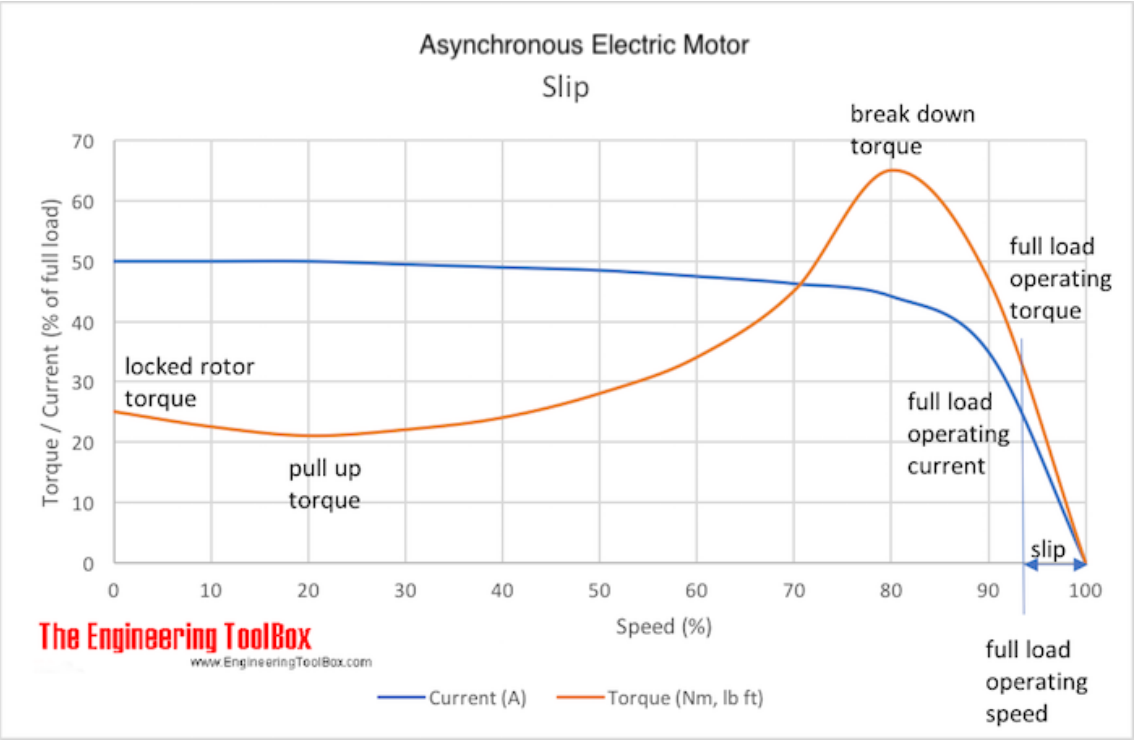
Bu verilere dayanarak 20 saniyelik titreşim ölçümü ile ses seviyesi tahmin etmenin yalıtkan ses odalarında yapılan ve birkaç saat süren ses ölçümlerine alternatif olarak çok daha hızlı bir yöntem olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

4.2 Silindir Hacmi İçine Gaz Gelmemesi ve ya Emme Valfinde Kaçak Olması

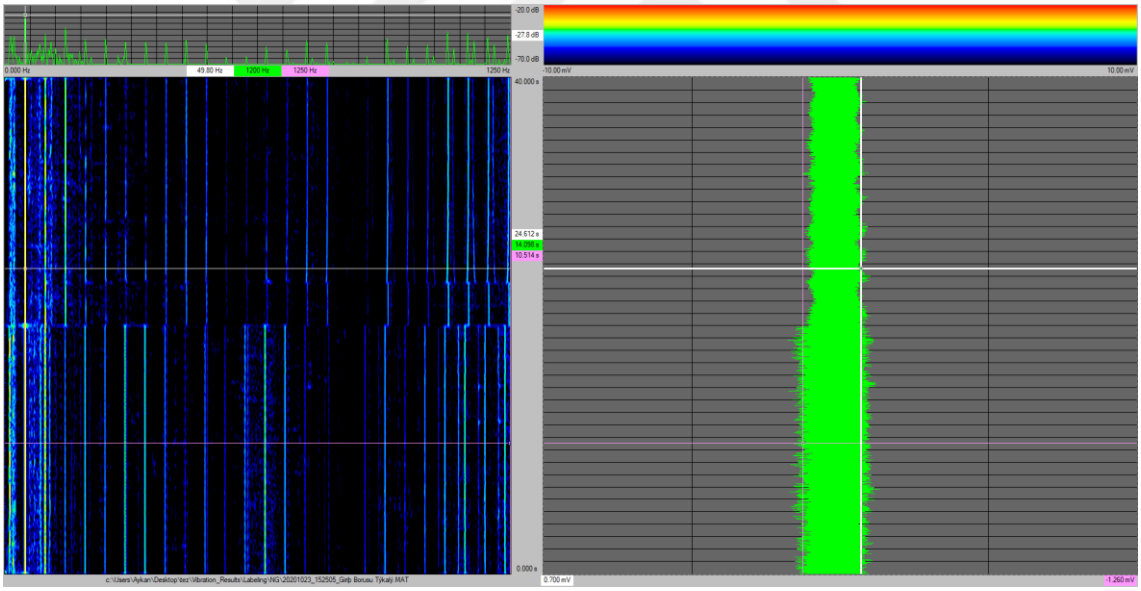
Silindir içine gaz gelmemesi durumunda ve emme kaçaklarında kompresör yükü azalacağı için Şekil 4.3' teki devir-tork eğrisine göre kompresör devri artmalıdır.

Kompresör yükünün az olması durumunda, kompresör daha az zorlanacağı için aynı zamanda toplam titreşimin düşmesi beklenir. (Srdjan, Cincar, & Novakovic, 2018)

Kompresörün silindir hacminin içine gaz alma amacıyla kullanılan valfin emme işlemi bittikten sonra kompresör basma evresine geçtiğinde tam kapanması ve sıkıştırılan gazın bir miktarının emme tarafından geri kaçmasına emme kaçağı denir.



Şekil 4.4 Asenkron motor tork, akım ve rpm grafiği (Engineering Toolbox, 2004)



Şekil 4.5 Emme hatalı ve hatasız kompresör titreşim ölçümü

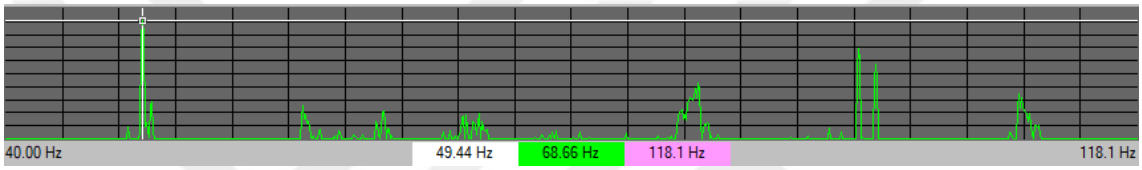
Yukarıda bahsedilen konular için kompresör giriş borusu tıkalı bir numune ile hatasız birer numunenin titreşim ölçüm sonuçları alınmıştır. Şekil 4.4' te üst üste eklenmiş biçimde titreşim ölçümü sonuçlarının spektrumları gösterilmektedir.

Kompresör giriş borusu, sistemden kompresöre gaz dönüşünü sağlayan bağlantıdır. Giriş borusu tıkalı olduğu durumda kompresör içindeki gaz sisteme basıldıktan sonra

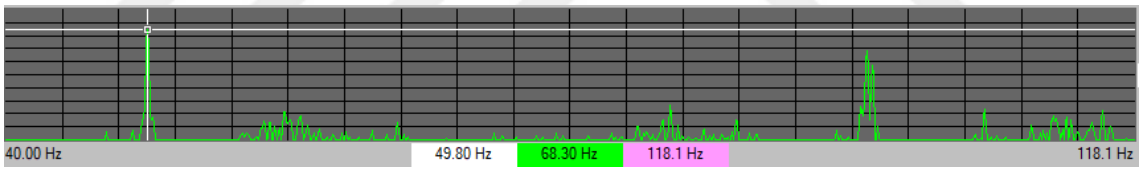
sistemden tekrar kompresöre gaz dönmeyeceği için bir süre sonra kompresör gaz basmadan çalışmaya devam edecektir.

Ölçüm sonuç spektrumunda da görüldüğü gibi, silindir hacmi içine gaz gelmeyen kompresörün toplam titreşim seviyesi daha düşük, devri daha yüksek çıkmıştır.

Spektrumda gaz gelmeyen kompresörün titreşim harmonilerinin hatasız olan kompresöre göre daha yüksek frekansta olduğu gözükmektedir. Bu da kompresörün çalışma frekansının ve dolayısıyla devrinin daha yüksek olduğunu gösterir. Ayrıca hatalı ve hatasız kompresörlerin çalışma frekansları 2 boyutlu spektrum üzerinde aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Hatasız kompresör titreşim spektrumu



Şekil 4.7 Emme hatalı kompresör titreşim spektrumu

Spektrumlarda yer alan kompresörlerin çalışma frekansları ile denklem 3.3 kullanılarak kompresör devirleri aşağıda bulunmuştur. Hatalı olan kompresörün devrinin (denklem 4.2), devir-tork grafiğine uyumlu olarak daha yüksek çıktığı görülmüştür.

$$49{,}44 \text{ x } 60 = 2966{,}4 \text{ rpm} \tag{4.1}$$

$$49{,}8\ x\ 60 = 2988\ rpm \tag{4.2}$$

Titreşim ölçümü ve ölçümün frekans bazlı incelenmesiyle silindir hacmi içine gaz gelmeyen ve emme kaçağı olan kompresörlerin tespit edilebileceği yukarıda bahsedilen bilgiler ile gösterilmiştir.

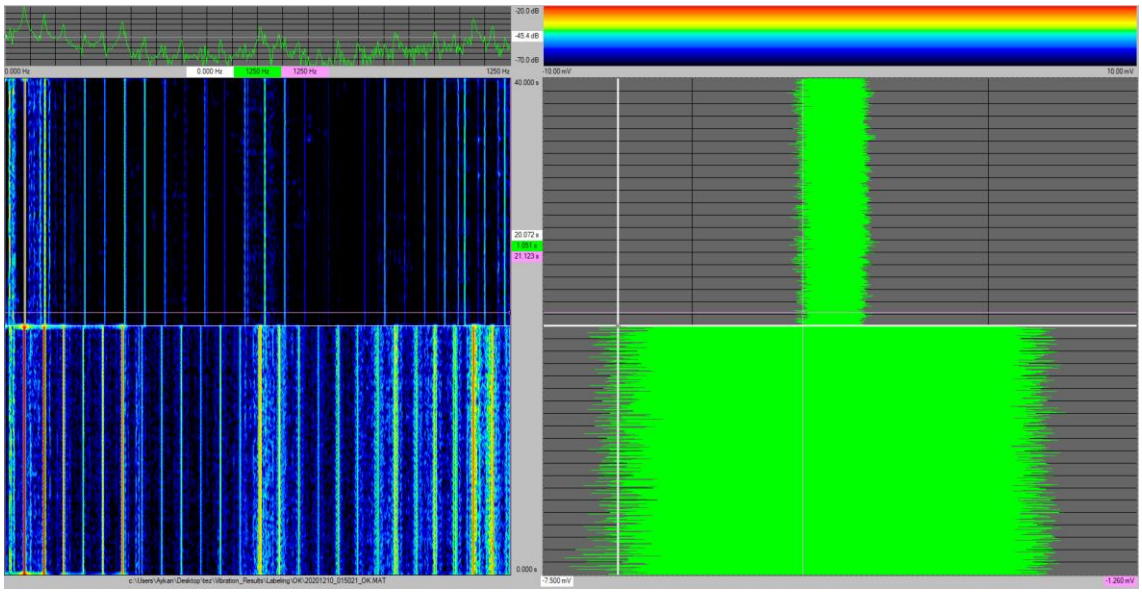
Giriş borusunun tıkanık olması durumunun dışında kompresör silindir hacmi içine gaz gelmeme durumunu oluşturabilecek başka hatalar da vardır. Bunlar; emme valfinin açılmaması, giriş susturucusunda tıkanıklık ve kompresör çıkış borusu dışında soğutma çevrimi bağlantılarının herhangi birinde olan tıkanıklıklar.

Kompresör çıkış borusunda tıkanıklık olması durumunda da basılan gaz tekrar kompresöre geri gelmez. Fakat kompresör çıkış borusunda bir tıkanıklık olması durumunda basılan gaz çok dar bir hacimde kaldığı için çıkış basıncı çok fazla artmaktadır ve bu durum kompresörün yukarıda bahsedilen durumdan daha farklı davranmasına sebep olmaktadır. Bu hata tipinde kompresörün davranışı bir sonraki bölümde anlatılacaktır.

4.3 Kompresör Çıkış Hattı Tıkanıklıkları

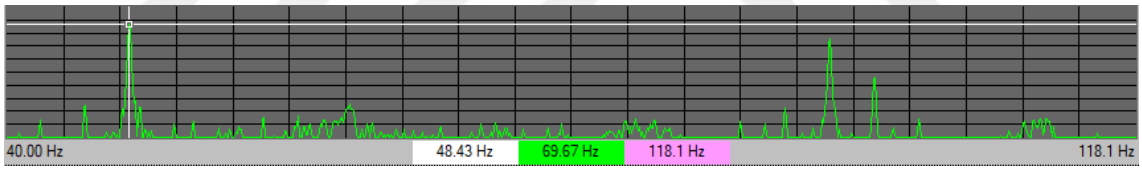
Soğutma çevriminde çıkış hattına yakın bölgelerdeki tıkanıklıklarda sıkıştırılan soğutucu akışkanın küçük bir hacim içinde kalmasından dolayı çıkış hattı basıncı yükselmektedir.

Yükselen çıkış basıncından dolayı kompresör yükü arttığı için asenkron motorların devir-tork eğrisine göre kompresör devrinin düşmesi beklenmektedir. Ayrıca yükün artması, kompresörün çalışmasını zorlaştıran bir durum olduğu için titreşim seviyesinin de yükselmesi beklenmektedir.

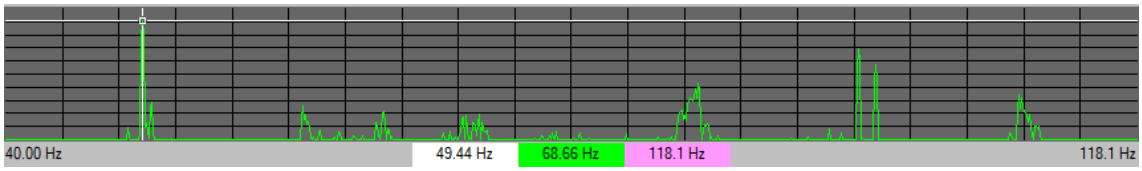


Şekil 4.8 Çıkış hattı tıkalı ve hatasız kompresör titreşim ölçümü

Şekil 4.8'de kondenser giriş borusu tıkalı bir kompresör ile normal bir kompresörün titreşim ölçüm spektrumları gösterilmektedir. Spektrumda görüldüğü gibi kondenser giriş borusu tıkalı olan kompresörün titreşim seviyesi normal kompresöre göre 6 kat kadar daha yüksek çıkmaktadır.



Şekil 4.9 Çıkış hattı tıkalı kompresör titreşim spektrumu



Şekil 4.10 Hatasız kompresör titreşim spektrumu

$$48{,}43\ x\ 60 = 2905{,}4\ rpm \tag{4.3}$$

$$49{,}44\ x\ 60 = 2966{,}4\ rpm \tag{4.4}$$

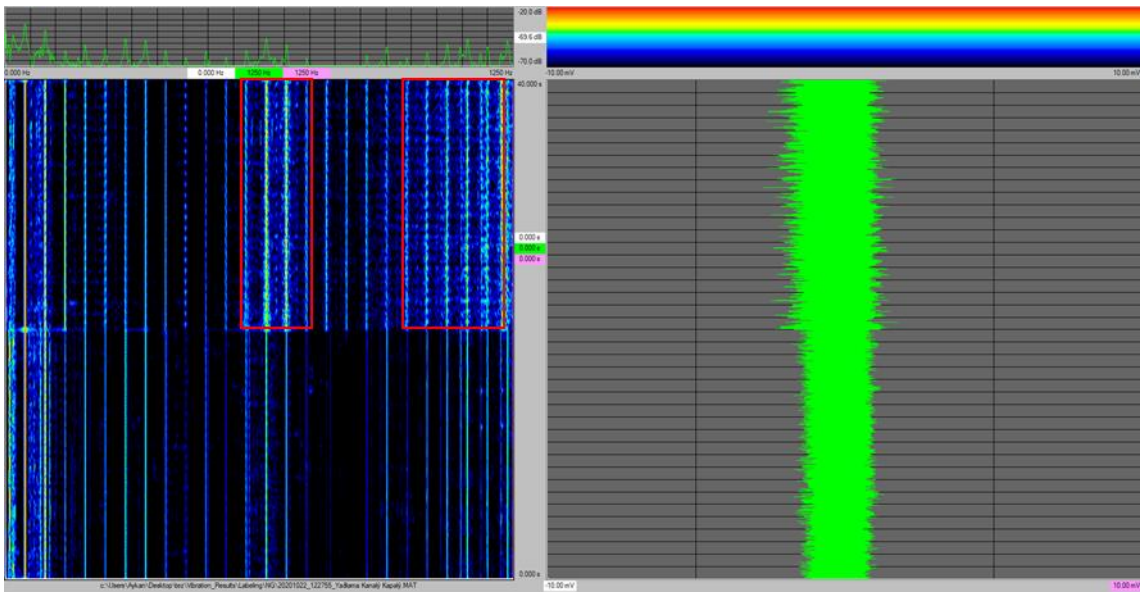
Titreşim spektrumları incelendiğinde çıkış hattı tıkanıklıklarının titreşim ölçümü ile tespit edilebilirliği yukarıda gösterilmiştir.

Çıkış hattı tıkanıklığı kompresör içinde çıkış susturucusu ve titreşim borusu bağlantılarında oluşabilir. Soğutma çevriminde ise kompresör çıkışı ile kondenser bağlantısında, ayrıca çevrimde kullanılıyor ise buharlaştırma kabı ısıtıcısı ve çevre ısıtıcı bağlantılarında olabilir.

4.4 Yatakların Yetersiz Yağlanması

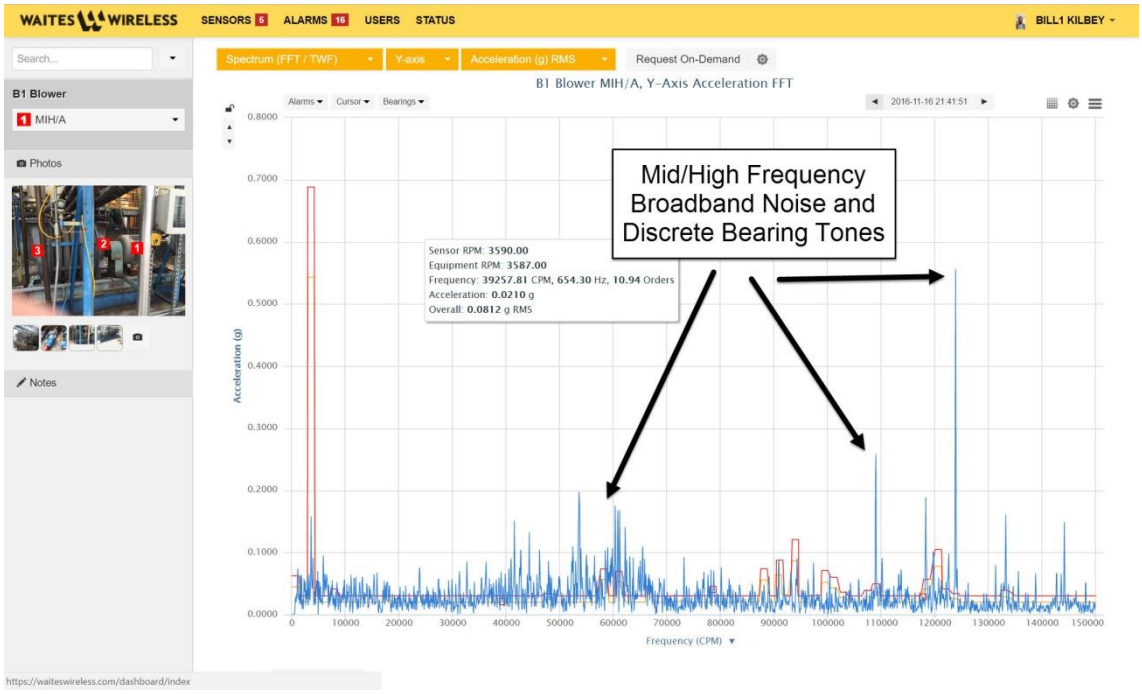
Yatakların yetersiz yağlanması, çalışan iki yüzey arasında yağ filminin oluşmamasına ve yüzeyler arasındaki sürtünmenin artmasına sebep olacaktır. Bu durumun oluştuğu bir kompresörün kısa süre içinde yatak bölgelerinde aşınma oluşur. Aşınma ciddi boyutlara ulaştığında bu yüzeyler birbirini kitler ve kompresör çalışamaz duruma gelir.

Krank yağlama kanallarından biri tıkalı olan bir buzdolabı üzerinde kompresörün ilk çalışmasından 2dk sonra titreşim ölçümü alınmış ve buzdolabı daha sonra çalışır halde bırakılmıştır. Kompresörün 1200 dakika sonra kitlenerek çalışmayı durdurduğu görülmüştür.



Şekil 4.11 Krank yağ kanalı tıkalı ve hatasız kompresör titreşim spektrumu

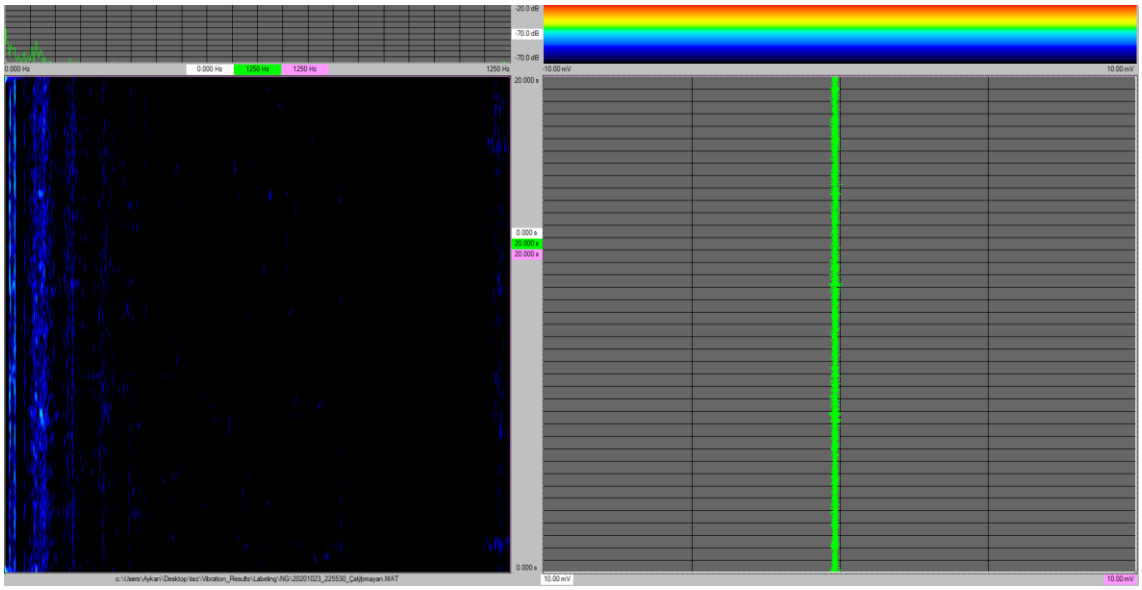
Yukarıda krank yağ kanallarından biri tıkalı ve normal bir kompresörün titreşim ölçüm spektrumu gösterilmiştir. Spektrumda görüldüğü gibi genel titreşim seviyesinde artış, kırmızı bölgelerle işaretlenen orta ve yüksek frekans bölgelerinde artış ve gürültü görülmektedir. Benzer durumu Bill Kilbey bir fan motoru üzerinde yaptığı çalışmada da tespit etmiştir. (Kilbey, 2016)



Şekil 4.12 Yetersiz yağlama problemli fan Motoru titreşim spektrumu (Kilbey, 2016)

4.5 Çalışmayan Kompresör

Çalışmayan bir kompresör beklenileceği üzere bir titreşim oluşturmayacaktır. Bu hata tipinin de yakalanabildiğini göstermek için bir adet çalışmayan kompresör üzerine ivme ölçer yerleştirilerek 20 sn ölçüm alınmıştır. Aşağıdaki spektrumda görüldüğü üzere sadece düşük seviyelerde ortam titreşimleri gözükmektedir.



Şekil 4.13 Çalışmayan kompresör titreşim ölçümü

5
SONUÇ

Titreşim ölçümü ile soğutma sistemlerinde kullanılan kompresörlerdeki çeşitli hataların tespit edilebilirliğini görmek için hatalı ve hatasız sistemlerle deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda titreşim ölçümü ile çeşitli hata tiplerinin tespit edilebilirliği gösterilmiştir. Bu hata tipleri ayrı ayrı farklı test sistemleriyle de tespit edilebilmektedir fakat titreşim ölçümüyle, bu hataların tek bir test sistemiyle ve bazı testlere göre çok daha kısa sürelerde tespit edilebileceği görülmektedir.

Çalışmada deneysel çalışmalar 5 farklı hata tipi üzerinde yapılmıştır. Bu hata tipleri dışında kompresör çalışmasını etkileyecek bir çok farklı hata tipi de teorik olarak tespit edilebilir.

Kompresör ile ilgili hata tiplerinin dışında, soğutma sistemindeki ve kompresörün güç çektiği sistemlerdeki olumsuzluklar da kompresör çalışmasını etkilediği için bu sistemlerdeki hataların da tespiti titreşim ölçümü ile mümkündür.

KAYNAKÇA

Ahmed, M., Baqqar, M., Gu, F., & D., B. A. (2012). Fault Detection and Diagnosis using Principal Component Analysis of Vibration Data from a Reciprocating Compressor. *UKACC International Conference on Control.* Cardiff.

Arçelik. (2022). Kompresör İşletmesi Kalite Eğitimi. *Arçelik İç Eğitimler*. Eskişehir.

ASHRAE. (2016). *ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment.*

Bekiroğlu, N., Şenol, İ., Aybar, O., Zorlu, S., Aydeniz, M., İ., Ö., . . . S., Ö. (2006). *Elektrik Makineleri Deneyleri.* İstanbul: Birsen Yayınevi.

Dragomir-daescu, D., Al-khalidy, A. A., Osama, M., & Kliman, G. (2003). DAMAGE DETECTION IN REFRIGERATOR COMPRESSORS USING VIBRATION AND CURRENT SIGNATURES . *Symposium on Diagnostics for Electric Machines.* Atlanta: IEEE.

Engineering Toolbox. (2004). *Electrical Induction Motors - Torque vs. Speed.* Engineering Toolbox: https://www.engineeringtoolbox.com/electrical-motors-torques-d_651.html adresinden alınmıştır

Fang, H., Guo, J., Xu, Y., D., L., & Qu, R. (2019). Experimental Study of Magnetostriction on Motor Vibration Considering Mechanical Characteristics. *22nd International Conference on Electrical Machines and Systems.* IEEE.

Hwang, S., Lee, H., Kim, T., Jung, Y., & Hong, J. (2006). The Influence of Electromagnetic Force Upon the Noise of an IPM Motor Used in a Compressor. *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 42, NO. 10*.

Khvostov, A., & Ryazhskih, A. (2017). Vibrodiagnostics of Compressor Valves via Empirical Mode Decomposition Method. *2nd International Ural Conference on Measurements.* Chelyabinsk: IEEE.

Kilbey, B. (2016). *Lack of Lubrication Leads to Sudden Bearing Failure in Blower Motor.* Linkedin: https://www.linkedin.com/pulse/lack-lubrication-leads-sudden-bearing-failure-blower-motor-kilbey adresinden alınmıştır

Liao, C., Jiang, W., & Zhang, Z. (2019). Analysis of Electromagnetic Vibration Characteristics of An Interior Permanent Magnet Synchronous Motor. *22nd International Conference on Electrical Machines and Systems.* IEEE.

Otunç, H. (2015). Hermetik Kompresörlerde Kullanılan Elektrik Motorların Kompresör İçi Isı Geçişi Açısından Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.

Özçıra, S., Bekiroğlu, N., & Ayçiçek, E. (2007). Bir Fazlı Asenkron Motorların Karakteristiklerinin İncelenmesi, Karşılaştırılması ve Uygun Yol Verme Mekanizmasının Seçimi. *12. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi ve Fuarı.*

Park, S., Kim, S., & Kim, S. (2014). A Numerical Prediction Model for Vibration and Noise of Axial Flux Motors. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 61, NO. 10*.

Pindoriya, P., Mishra, A., Rajpurohit, B., & Kumar, R. (2018). An Analysis of Vibration and Acoustic Noise of BLDC Motor Drive. Himachal Pradesh: IEEE.

Rahman, M., Azam, T., & Saha, S. K. (2010). Motor Fault Detection Using Vibration Patterns. *6th International Conference on Electrical and Computer Engineering.* Dhaka: IEEE.

Srdjan, J., Cincar, N., & Novakovic, B. (2018). The analysis of vibration measurement and current. *17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA.* East Sarajevo.

Tezcan, A. (2018). ANKASTRE BUZDOLAPLARINDA KULLANILAN ÇİFT ÇEVRİMLİ. Edirne: Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Tsypkin, M. (2010). Induction Motor Condition Monitoring: Slip Frequency and Pole Pass Frequency - a Clarification of Definitions. *National Technical Training Symposium and Annual Meeting.* Oak Brook Illinois.

Tsypkin, M. (2011). Induction Motor Condition Monitoring: Vibration Analysis Technique - a Practical Implementation. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference.* Philadelphia.

Tsypkin, M. (2013). Induction Motor Condition Monitoring: Vibration Analysis Technique - a Twice Line Frequency Component as a Diagnostic Tool. *International Electric Machines and Drives Conference*. Chicago: IEEE.

Tsypkin, M. (2017). Induction Motor Condition Monitoring: Vibration Analysis Technique – Diagnosis of Electromagnetic Anomalies. Philadelphia: IEEE.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Solmaz, A. A., & Acar, A. (2022). Buzdolaplarında Kullanılan Sabit Hızlı Kompresörlerde Gürültülü Çalışma Durumun Alternatif Yöntemler ile Tespiti. *4. Uluslararası Mühendislik Bilimleri ve Multidisipliner Yaklaşımlar Kongresi.* İstanbul.