



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

**SÜT SAĞIM MAKİNELERİNDE**  
**PULSATÖRLER İÇİN ARIZA TESPİT CİHAZI**  
**GELİŞTİRİLMESİ**

**Batuhan Hikmet GÜRHAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği**  
**Anabilim Dalı**

**Temmuz-2025**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Batuhan Hikmet GÜRHAN tarafından hazırlanan ‘‘Süt Sağım Makinelerinde Pulsatörler İçin Arıza Tespit Cihazı Geliştirilmesi’’ adlı tez çalışması 09/07/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Zahid MALASLI

#### Danışman

Prof. Dr. Kazım ÇARMAN

#### Üye

Doç. Dr. Osman ÖZBEK

### İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Hasan AYDOĞAN  
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.

İmza

Batuhan Hikmet GÜRHAN

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

## SÜT SAĞIM MAKİNELERİNDE PULSATÖRLER İÇİN ARIZA TESPİT CİHAZI GELİŞTİRİLMESİ

**Batuhan Hikmet GÜRHAN**

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Kazım ÇARMAN**

**2025, 53 Sayfa**

**Jüri**

**Prof. Dr. Kazım ÇARMAN**

**Doç. Dr. Osman ÖZBEK**

**Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Zahid MALASLI**

Bu tez çalışmasında, süt sağım makinelerinde kullanılan elektronik ve pnömatik pulsatorlerin arızalarının gerçek zamanlı olarak tespit edilebilmesi amacıyla, ADXL345 ivmeölçer sensörü ve gömülü yapay zekâ (Edge AI) teknolojisi kullanılarak düşük maliyetli, bağımsız bir sistem geliştirilmiştir. Çalışmanın başlangıcında, sağım esnasında pulsatorlerin ürettiği titreşim verileri ADXL345 sensörü aracılığıyla elde edilmiştir. Veriler, ESP32-S3 mikrodenetleyicisi tarafından saniyede 100 örnekleme frekansı ile toplanmış ve daha sonra Python ortamına aktararak işlenmiştir. Ham verilerden zaman ve frekans temelli öznitelikler (RMS, tepe değer, sıfır geçiş sayısı vb.) çıkarılmış, bu öznitelikler kullanılarak XGBoost algoritması ile anomali tespit modeli eğitilmiştir. Model, TensorFlow Lite formatına dönüştürülerek ESP32-S3 cihazına entegre edilmiştir. Gömülü model, pulsasyon döngülerinde meydana gelen sapmaları gerçek zamanlı olarak analiz etmekte ve normal (60 nabız/dk) ile anormal (örneğin 55 veya 65 nabız/dk) durumları sınıflandırmaktadır. Geliştirilen sistem, testler sonucunda hem doğruluk hem de hız açısından yüksek performans sergilemiş, kablosuz ve bağımsız çalışabilmesi sayesinde sağımhane koşullarında başarıyla uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, hayvancılık sektöründe makine arızalarının erken teşhisi için yenilikçi ve pratik bir çözüm sunmakta olup, benzer sistemlerde de kullanılabilecek esnek bir temel sağlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** ADXL345, ESP32-S3, pulsator, yapay zekâ, anomali tespiti, titreşim sensörü, gömülü sistem

**ABSTRACT**

**MS THESIS**

**DEVELOPMENT OF A FAULT DIAGNOSIS DEVICE FOR PULSATOR IN  
MILKING MACHINES**

**Batuhan Hikmet GÜRHAN**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
SELÇUK UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
IN AGRICULTURAL MACHINERIES AND TECNOLOGIES ENGINEERING**

**Advisor: Prof. Dr. Kazım ÇARMAN**

**2025, 53 Pages**

**Jury**

**Prof. Dr. Kazım ÇARMAN**

**Assoc. Prof. Osman ÖZBEK**

**Assist. Prof. Mehmet Zahid MALASLI**

In this thesis, a low-cost and standalone system was developed to detect real-time faults in electronic and pneumatic pulsators used in milking machines by utilizing the ADXL345 accelerometer sensor and embedded artificial intelligence (Edge AI) technology. At the initial stage, vibration data generated during pulsation cycles were collected using the ADXL345 sensor. These signals were sampled at 100 Hz via the ESP32-S3 microcontroller and transferred to the Python environment for processing. Time and frequency domain features such as RMS, peak amplitude, and zero-crossings were extracted from the raw data, and an XGBoost-based anomaly detection model was trained. The model was then converted into TensorFlow Lite format and deployed on the ESP32-S3 device. The embedded system analyzes pulsation cycles in real time, distinguishing between normal (60 pulses/min) and abnormal (e.g., 55 or 65 pulses/min) operations. The developed solution demonstrated high accuracy and responsiveness during testing, and its wireless, self-contained design proved suitable for use in milking parlors. This work offers an innovative and practical approach for early fault detection in livestock machinery and provides a flexible foundation for similar applications.

**Keywords:** ADXL345, ESP32-S3, pulsator, artificial intelligence, anomaly detection, vibration sensor, embedded system

## ÖNSÖZ

Bu araştırmanın yürütülmesinde ve sonuçlanmasında yardımlarını ve bilgilerini esirgemeyen sayın danışman kıymetli hocam Prof. Dr. Kazım Çarman'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Araştırmanın yürütülmesinde yardımlarını esirgemeyen Onur Yalçın'a teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca beni yüreklendiren, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, annem Tülay Gürhan'a ve babam Recai Gürhan'a teşekkür ederim.

Batuhan Hikmet Gürhan  
KONYA-2025



# İÇİNDEKİLER

|  |            |
|--|------------|
| <b>ÖZET</b> .....  | <b>iv</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | <b>v</b>   |
| <b>ÖNSÖZ</b> .....   | <b>vi</b>  |
| <b>İÇİNDEKİLER</b> .....   | <b>vii</b> |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....   | <b>ix</b>  |
| <b>1. GİRİŞ</b> .....  | <b>1</b>   |
| 1.1. Pulsatörlerin Çalışma Döngüsü .....   | 1          |
| 1.2. Pulsatörlerin Performans Parametreleri .....                                  | 3          |
| 1.3. Farklı Pulsatör Tiplerinin Sağım Üzerindeki Etkisi .....                      | 3          |
| 1.4. Pulsatörlerin Performans Test Yöntemleri .....                                | 4          |
| 1.4.1. Laboratuvar testleri .....  | 4          |
| 1.4.2. Saha testleri.....  | 5          |
| 1.4.3. Kombine test yöntemleri.....  | 5          |
| 1.5. Pulsatörlerdeki Sorunlar ve Arıza Türleri.....                                | 6          |
| 1.5.1. Mevcut arıza tespit yöntemleri .....  | 7          |
| 1.5.1. Gelişmiş teknolojilerde arıza tespiti .....                                 | 8          |
| <b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI</b> .....   | <b>10</b>  |
| <b>3. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....   | <b>13</b>  |
| 3.1. Materyal.....   | 13         |
| 3.1.1. Pnömatik pulsatörler .....  | 14         |
| 3.1.2. Elektronik pulsatörler .....  | 14         |
| 3.1.3. Çalışmada kullanılan pulsatörler .....                                      | 15         |
| 3.1.4. Pnömatik ve elektronik pulsatörlerin test edildiği sağım uygulamaları ..... | 17         |
| 3.1.5. Pulsatör test cihazı .....  | 22         |
| 3.1.6. Donanım ve yazılım.....   | 23         |
| 3.1.6.1. Yapay zekâ eğitim yazılımı .....  | 23         |
| 3.1.6.2. Yapay zekâ analiz yazılımı (Python).....                                  | 24         |
| 3.1.6.3. ESP32 üzerinden canlı analiz yazılımı (C++) .....                         | 25         |
| 3.2. Yöntem .....  | 26         |
| 3.2.1. Veri toplama .....  | 26         |
| 3.2.2. Özellik çıkarımı ve ön işleme .....   | 26         |
| 3.2.3. Makine öğrenimi modeli eğitimi .....  | 27         |
| 3.2.4. ESP32 üzerinde gerçek zamanlı anomali tespiti.....                          | 28         |
| <b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA</b> .....                                    | <b>30</b>  |
| 4.1. Veri Toplama Sürecinin Değerlendirilmesi.....                                 | 30         |
| 4.2. Yapay Zekâ Modeli Eğitim Sonuçları ve Tartışma .....                          | 30         |
| 4.2.1. Özellik çıkarımının etkisi.....   | 31         |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.2.2. Model performansı ve değerlendirme metrikleri .....                   | 31        |
| 4.3. Gömülü Sistem Üzerinde Gerçek Zamanlı Analiz Sonuçları ve Tartışma..... | 33        |
| 4.3.1. Canlı tahmin örnekleri .....  | 37        |
| <b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>  | <b>40</b> |
| 5.1. Sonuçlar .....  | 40        |
| 5.2. Öneriler .....  | 41        |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>  | <b>43</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>  | <b>44</b> |



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

A : Artan vakum evresi  
B : En yüksek vakum evresi (süt alımı) evresi  
C : Azalan vakum evresi  
D : Atmosferik evre (masaj)  
A+B : Toplam sağım evresi  
C+D : Toplam masaj evresi  
A+B+C+D : Bir nabız çevrimi  
NS : Nabız sayısı  
kPa : Kilopaskal (basınç birimi)  
L/min : Litre/dakika  
ms : Milisaniye  
s : Saniye  
mm : Milimetre  
cm : Santimetre  
m : Metre  
ml : Mililitre  
kW : Kilowatt  
V : Volt  
A : Amper  
Hz : Hertz  
% : Yüzde

### Kısaltmalar

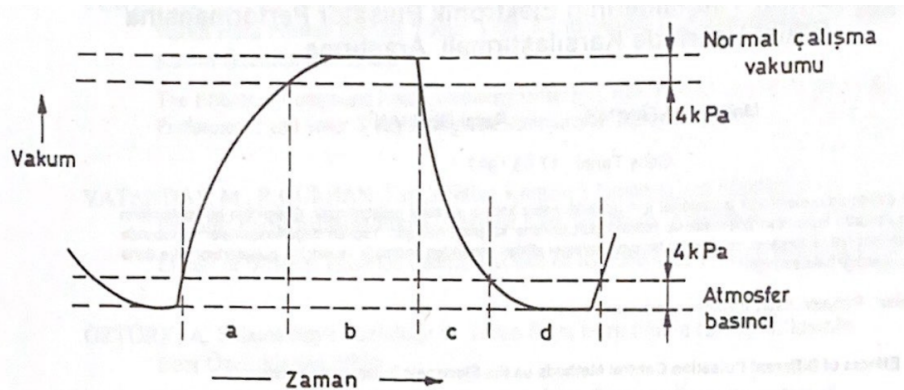
ADXL345 : 3 eksenli dijital ivmeölçer sensörü  
ESP32 : Gömülü Wi-Fi ve Bluetooth modülü  
AI : Yapay Zekâ (Artificial Intelligence)  
Edge AI : Uç Yapay Zekâ  
ML : Makine Öğrenmesi (Machine Learning)  
PSD : Güç Spektral Yoğunluğu  
RMS : Ortalama Karekök Değeri (Root Mean Square)

## 1. GİRİŞ

Günümüzde hem dünyada hem de Türkiye’de, hayvancılık sektöründe verimliliği artırmak, hayvan sağlığını korumak ve işleri kolaylaştırmak için modern süt sağım teknolojilerinin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Modern süt sağım teknolojileri, çeşitli donanımlardan ve yazılımdan oluşmaktadır. Özellikle sağım sürecinde önemli bir işleve sahip olan pulsatörler, önemli donanımlardan birini oluşturmaktadır. Süt sağım makinelerinde kullanılan pulsatörler, sağım sürecinde meme sağlığı ve süt verimini doğrudan etkileyen kritik bileşenlerdir. Bu cihazlar, vakum değişikliklerini kontrol ederek sağım işlemini optimize eder ve süt akışını düzenler (Borghese ve ark., 2007). Ancak, pulsatörlerin arızalanması durumunda sağım performansı düşmekte, sağım süresi uzamakta ve meme sağlığı olumsuz etkilenmektedir (Ünal, 2013).

Pulsatörlerin dört ana fazı (vakuma geçiş, gerçek sağım, atmosferik basınca dönüş ve gerçek masaj) bulunmaktadır. Bu fazların süreleri ve doğruluğu, sağım verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalarda, yüksek pulsasyon hızlarının sağım sürelerini kısalttığını ancak, aynı zamanda meme uçlarında stres yaratarak meme sağlığını riske attığını göstermektedir (Rogers ve Spencer, 1991; Banev, 2001). Ayrıca, pulsatörlerin performansı, laboratuvar ve saha koşullarında farklılık gösterebilmektedir. Özellikle saha testlerinde çevresel faktörlerin etkisi, cihazların güvenilirliğini ve hassasiyetini sınamaktadır (Kochman ve ark., 2008).

### 1.1. Pulsatörlerin Çalışma Döngüsü



Şekil 1.1. Bir pulsatörlerin çalışma döngüsü (Gürhan, 1997)

Pulsatörlerin temel işlevi, sağım sırasında meme başına uygulanan basıncı belirli bir ritimle değiştirmektir. Bu ritmik değişimler dört ana fazdan oluşur ve her faz sağım sürecinin farklı bir aşamasını temsil eder (Şekil 1.1) (Gürhan, 1997). Bu döngü, sağım sırasında meme başının süt üretiminden sonra dinlenme ve iyileşme süreci almasını sağlar.

1. Vakuma Geçiş Fazı (a): Bu fazda, meme başına uygulanan atmosferik basınç, vakum seviyesine doğru geçiş yapar. Bu geçiş sırasında basınç değişimi yumuşak olmalıdır, aksi takdirde meme dokusunda gereksiz bir stres oluşabilir. Vakuma geçiş fazının süresi, pulsatörlerin teknik özelliklerine bağlı olarak değişir ve genellikle sağım hızını etkileyen önemli bir parametredir (TSE, 2014).
2. Gerçek Sağım Fazı (b): Bu faz, vakum basıncının sabit olduğu ve süt akışının sağlandığı süredir. Bu aşamada, meme başındaki süt kanalları açılır ve süt akışı sağlanır. Gerçek sağım fazının süresi, süt verimini doğrudan etkiler. Faz süresi kısa olursa, süt akışı tamamlanmadan sağım sona erebilir; uzun olması durumunda ise meme dokusu zarar görebilir (Rogers ve Spencer, 1991).
3. Atmosferik Basınca Dönüş Fazı (c): Sağım işleminin bu aşamasında, meme başına uygulanan vakum basıncı, atmosferik basınca döner. Bu fazın amacı, sağım sırasında meme başına uygulanan basıncın azaltılarak meme dokusunun zarar görmesini engellemektir. Fazın süresi, pulsatör tasarımına ve çalıştığı sistemin dinamiklerine bağlıdır (Banev, 2001).
4. Gerçek Masaj Fazı (d): Bu faz, meme başının süt akışından sonra dinlenme sürecine geçtiği aşamadır. Masaj fazında meme dokusuna hafif bir atmosferik basınç uygulanarak kan dolaşımı desteklenir. Bu aşama, sağım sonrası meme başında oluşabilecek herhangi bir rahatsızlığı engeller ve iyileşme sürecini hızlandırır (MilkTech-International, 2021)

Her bir fazın süresi ve sırası, pulsatör performansını belirleyen kritik faktörlerdir. Bu parametrelerdeki herhangi bir sapma, sağım sürecinin verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilir.

## 1.2. Pulsatörlerin Performans Parametreleri

Pulsatörlerin sağım sürecindeki performansı, belirli teknik parametrelerle ölçülür. Bu parametreler, cihazın sağladığı basınç değişimlerinin doğruluğunu ve istikrarını belirler. Pulsatörlerin performansını etkileyen ana faktörler şunlardır:

1. Nabız Hızı: Nabız hızı, bir dakikada gerçekleşen nabız döngülerinin sayısını ifade eder. Standart süt sağım makinelerinde genellikle 60 ila 70 nabız/dakika kullanılır. Ancak bu hız, hayvan türüne ve meme yapısına göre ayarlanabilir. Daha yüksek hızlar, sağım süresini kısaltabilir, ancak meme dokusuna zarar verme riski taşır (Rogers ve Spencer, 1991).
2. Nabız Oranı: Nabız oranı, sağım fazı (b) ile masaj fazı (d) arasındaki süre oranını ifade eder. Standart bir oran genellikle 60:40 olarak ayarlanır. Bu oran, meme dokusunun sağım sırasında yeterince dinlenmesini sağlar. Yanlış ayarlanan bir oran, meme dokusunda stres yaratabilir ve sağım performansını düşürebilir (Banev, 2001).
3. Basınç Değişim Süreleri: Vakuma geçiş ve atmosferik basınca dönüş fazlarının süreleri, sağım işleminin sorunsuz bir şekilde tamamlanması için büyük önem taşır. Bu sürelerin çok uzun olması, sağım süresini uzatırken, çok kısa olması meme dokusunda travmaya neden olabilir.
4. Vakum Seviyesi: Pulsatörlerin sağladığı vakum seviyesi, sağım işlemi sırasında süt akışını doğrudan etkiler. Genellikle 36-50 kPa arasında bir vakum seviyesi kullanılır. Vakum seviyesinin standartlardan sapması, sağım verimliliğini düşürebilir ve meme sağlığına zarar verebilir (TSE, 2014).

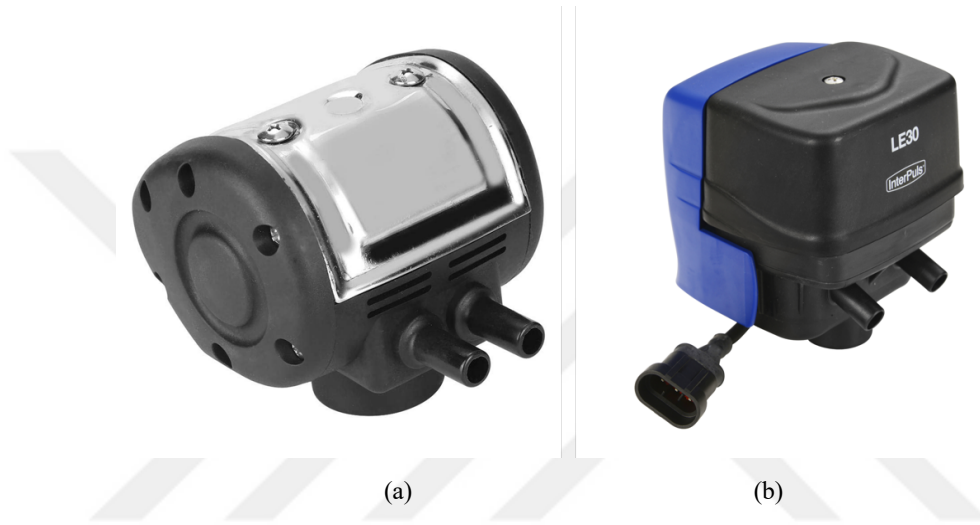
## 1.3. Farklı Pulsatör Tiplerinin Sağım Üzerindeki Etkisi

Pulsatörler, tasarımlarına göre farklı tiplerde olmakla birlikte uygulamada yaygın olarak kullanılmaları bakımından pnömatik ve elektronik olmak üzere iki ana tipe ayrılır (Şekil 1.2). Her iki türün de sağladığı avantajlar ve sınırlamalar bulunmaktadır:

- Pnömatik Pulsatörler: Pnömatik pulsatörler, basit yapıları ve düşük maliyetleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu cihazlar, elektronik

sistemlere kıyasla daha az hassas çalışır ve düzenli bakım gerektirir (Gürhan, 1997).

- Elektronik Pulsatörler: Elektronik pulsatörler, dijital kontrol sistemleri ile daha hassas ayarlamalar yapılmasına olanak tanır. Bu cihazlar, vakum basıncını ve nabız hızını sürekli olarak izleyebilir ve sistemde meydana gelen değişikliklere anında yanıt verebilir. Ancak, bu cihazların maliyeti daha yüksektir ve enerji gereksinimi pnömomatik sistemlere göre daha fazladır (Borghese ve ark., 2007).



Şekil 1.2. Pnömatik (a) ve elektronik pulsatörler (b)

#### 1.4. Pulsatörlerin Performans Test Yöntemleri

Pulsatörün performansını değerlendirmek için kullanılan test yöntemleri, laboratuvar ve saha koşullarında farklılık gösterir. Bu yöntemler, cihazların gerçek çalışma koşullarındaki davranışlarını anlamak ve olası arızaları tespit etmek için geliştirilmiştir.

##### 1.4.1. Laboratuvar testleri

Laboratuvar ortamında yapılan testler, pulsatörlerin belirli kontrollü koşullar altında değerlendirilmesini sağlar. Bu testler, cihazların çalışma prensiplerini anlamak ve prototiplerin performansını doğrulamak için önemlidir. Laboratuvar testlerinde aşağıdaki adımlar izlenir:

- Vakum Seviyesinin Test Edilmesi: Pulsatörlerin sağladığı vakum basıncının ISO standartlarına uygun olup olmadığını doğrulamak için bir vakum ölçer kullanılır. Basınç seviyesinin 36-50 kPa arasında olması beklenir.
- Nabız Hızının ve Oranının Ölçülmesi: Nabız hızları (60-70 nabız/dakika) ve sağım-masaj oranlarının (70:30 veya 60:40) doğruluğu test edilir.

#### 1.4.2. Saha testleri

Saha testleri, pulsatörlerin gerçek çalışma koşullarındaki performansını değerlendirmek için kullanılır. Bu testler, cihazların çevresel faktörlere karşı dayanıklılığını ve hassasiyetini ölçmek için önemlidir. Saha testlerinde dikkat edilen başlıca unsurlar şunlardır:

- Vakum Stabilitesi: Sağım sırasında pulsatörler vakum basıncını sabit tutabilme yeteneği değerlendirilir. Vakum stabilitesindeki herhangi bir sapma, sağım sürecini olumsuz etkileyebilir.
- Faz Sürelerinin Doğruluğu: Sağım sırasında her bir fazın süresi, cihazın hassasiyetine bağlı olarak ölçülür. Faz sürelerindeki herhangi bir yanlışlık, sağım verimliliğini düşürebilir (Banev, 2001).

#### 1.4.3. Kombine test yöntemleri

Laboratuvar ve saha testlerinin birlikte kullanıldığı yöntemler, cihazların farklı koşullar altındaki performansını değerlendirmek için ideal bir yaklaşımdır. Örneğin, laboratuvar testlerinde belirli bir faz süresindeki sapmalar gözlemlendikten sonra bu sapmaların gerçek sağım koşullarında nasıl bir etki yarattığı saha testleri ile doğrulanabilir. Pulsatörlerin performans testlerinde karşılaşılan başlıca zorluklar şunlardır:

1. Çevresel Faktörler: Sıcaklık, nem ve toz gibi çevresel faktörler, test sonuçlarını etkileyebilir. Bu nedenle, testlerin farklı çevresel koşullarda tekrarlanması önemlidir (Kochman ve ark., 2008).

2. Manuel Ölçüm Yöntemlerinin Sınırlılıkları: Geleneksel test yöntemlerinde manuel ölçümler yapılır. Ancak bu yöntemler, hassasiyet ve doğruluk açısından sınırlamalara sahiptir.
3. Arıza Durumlarının Simülasyonu: Pulsatörlerde meydana gelebilecek arızaların test edilmesi için bu arızaların laboratuvar ortamında simüle edilmesi gereklidir. Bu durum, özellikle karmaşık arızaların test edilmesinde zorluk yaratabilir.

### 1.5. Pulsatörlerdeki Sorunlar ve Arıza Türleri

Pulsatörler, süt sağım makinelerinin verimli çalışması ve hayvan refahının korunmasında kritik bir rol oynar. Ancak, bu cihazlarda meydana gelen arızalar, sağım sürecinin verimliliğini ve etkinliğini ciddi şekilde etkileyebilir. Pulsatör arızaları, sağım süresini uzatabilir, süt verimini düşürebilir ve meme sağlığı sorunlarına yol açabilir. Bu nedenle, pulsatörlerin düzenli olarak kontrol edilmesi ve arızaların tespit edilmesi hayati önem taşır. Ancak, mevcut arıza tespit yöntemleri genellikle manuel kontrol ve periyodik bakım prosedürleriyle sınırlıdır.

Pulsatörlerde meydana gelen arızalar, cihazın işlevselliğini doğrudan etkileyen mekanik veya elektronik sorunlardan kaynaklanabilir. Yaygın arıza türleri şunlardır:

1. Vakum Stabilite Sorunları: Pulsatörlerin sağım sırasında vakum basıncını sabit tutamaması, sağım sürecinde düzensizliklere yol açabilir. Vakum seviyesi değişimleri, sağım süresini uzatabilir ve süt verimini düşürebilir (TSE, 2014).
2. Nabız Oranı ve Faz Sapmaları: Nabız oranındaki sapmalar, meme başına uygulanan basıncın dengesiz olmasına neden olabilir. Özellikle masaj fazındaki süre kısalsaydı meme dokusunda hasar oluşabilir (Rogers ve Spencer, 1991).
3. Gerçek Masaj Fazı Problemleri: Masaj fazının süresinin kısa olması veya nabız döngüsünün bu faza geçmemesi, meme dokusunda stres yaratabilir. Bu durum, uzun vadede meme ucunda parakeratotik değişimlere yol açabilir (ElectroMechAgri, 2023)
4. Mekanik Aşınma ve Kirlenme: Pnömatik pulsatörlerde, uzun süreli kullanım nedeniyle valflerde, diyaframlarda ve bağlantı noktalarında aşınma görülebilir. Ayrıca, hava giriş noktalarındaki kirlenme ve toz birikimi, cihazın performansını olumsuz etkileyebilir.

5. Elektronik Arızalar: Elektronik pulsatörlerde, devre elemanlarının bozulması veya yazılım kaynaklı hatalar arızalara yol açabilir. Bu tür arızalar, cihazın vakum seviyesini doğru bir şekilde yönetememesine neden olabilir (Ünal, 2013).

### **1.5.1. Mevcut arıza tespit yöntemleri**

Günümüzde pulsatörlerdeki arızaları tespit etmek için kullanılan yöntemler genellikle periyodik bakım ve manuel inceleme prosedürlerine dayanmaktadır. Bu yöntemler, arızaların tespit edilmesinde temel bir çözüm sunsa da gerçek zamanlı arıza tespiti sağlama konusunda yetersiz kalmaktadır.

#### **1.5.1.1. Manuel kontroller**

Manuel kontrol, süt sağım makinelerinde kullanılan en yaygın arıza tespit yöntemidir. Bu süreç, pulsatörlerin görsel olarak incelenmesini ve çalışma sırasındaki ses, titreşim veya basınç değişimlerinin gözlemlenmesini içerir. Ancak bu yöntem, aşağıdaki sınırlılıklara sahiptir:

- Hassasiyet Eksikliği: Manuel kontrol, mikroskobik düzeydeki aşınma veya titreşim sapmalarını tespit edemez.
- Zaman ve İş Gücü Gereksinimi: Tüm sistemin manuel olarak kontrol edilmesi, büyük ölçekli işletmeler için zaman alıcı ve maliyetlidir.

#### **1.5.1.2. Periyodik bakım**

Pulsatörlerde periyodik bakım prosedürleri, cihazların belirli aralıklarla temizlenmesi ve kontrol edilmesini içerir. Bu yöntem, aşınma veya kir birikimini önlemek için gereklidir. Ancak, arızaların ortaya çıkmadan önce tespit edilmesini sağlayamaz.

### 1.5.1.3. Basınç ve vakum testleri

Vakum seviyelerinin ölçülmesi, pulsator arızalarını tespit etmek için kullanılan temel yöntemlerden biridir. Özel test cihazları, pulsatorların sağladığı vakum seviyesini ve bu seviyenin istikrarını ölçer. Ancak, bu yöntemler genellikle arıza meydana geldikten sonra uygulanır ve anlık tespit sağlayamaz (MilkTech-International, 2021). Mevcut arıza tespit yöntemleri, aşağıda verilen sınırlamalara sahiptir:

1. Gerçek Zamanlı Tespit Eksikliği: Mevcut yöntemler, arızaların meydana geldiği anda tespit edilmesini sağlayamaz. Bu durum, arızaların erken teşhis edilerek hızlı bir şekilde giderilmesini engeller.
2. İnsan Hatası Riski: Manuel kontroller ve periyodik bakım süreçleri, insan faktörüne dayalı olduğu için hatalara açıktır.
3. Karmaşık Arızaların Tespitindeki Zorluklar: Elektronik sistemlerde meydana gelen karmaşık yazılım veya donanım arızalarının manuel yöntemlerle tespit edilmesi zordur (Ünal, 2013).
4. Yüksek İş Gücü ve Zaman Gereksinimi: Özellikle büyük ölçekli süt üretim tesislerinde, mevcut yöntemlerin uygulanması zaman alıcıdır ve ek maliyet yaratır.

### 1.5.1. Gelişmiş teknolojilerde arıza tespiti

Son yıllarda, pulsator arızalarını tespit etmek için sensör teknolojileri ve yapay zekâ (AI) tabanlı çözümler kullanılmaya başlanmıştır. Piezoelektrik, titreşim ve ivmeölçer sensörleri, pulsatorlarda meydana gelen titreşim anomalilerini tespit etmek için ideal araçlar olarak öne çıkmaktadır. Bu sensörler, cihazların titreşim profillerini analiz ederek anormallikleri gerçek zamanlı olarak tespit edebilir (ISO, 2019).

Ayrıca, EDGE AI tabanlı sistemler, süt sağım makinelerinde meydana gelen anormalliklerin anında algılanmasını ve analiz edilmesini mümkün kılar. Bu sistemler, düşük gecikme süreleri ile arıza tespit süreçlerini otomatikleştirir ve işletmelerin daha hızlı ve verimli müdahalelerde bulunmasını sağlar.

Mevcut literatürde, pulsator arızalarının gerçek zamanlı tespiti üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. ISO 5707 standardı kapsamında pulsator performansını değerlendirme yöntemleri belirlenmiş olsa da bu testlerin çoğu periyodik

bakım sırasında gerçekleştirilmekte ve arızaların anlık olarak tespit edilmesini sağlayamamaktadır (MilkTech-International, 2021). Bu bağlamda, sağım sırasında pulsator arızalarını gerçek zamanlı olarak tespit edebilecek bir cihaz geliştirilmesi, sektörde önemli bir yenilik sunacaktır.

Bu çalışmanın amacı, süt sağım makinelerinde kullanılan pulsatorların titreşim profillerini analiz ederek ve bu profillerden yola çıkarak arıza tespiti gerçekleştirmektir. Bu doğrultuda, pulsatorların dinamik hareketlerini yüksek doğrulukta ölçmek amacıyla ADXL345 üç eksenli ivmeölçer kullanılmıştır.

EDGE AI teknolojisinin kullanımıyla cihaz, düşük gecikme süreleriyle gerçek zamanlı analiz yaparak arıza durumlarında uyarı sağlanmaktadır. Bu yaklaşım, sadece sağım performansını artırmakla kalmayacak, aynı zamanda büyük ölçekli süt üretim işletmelerinde ekonomik kayıpların önlenmesine de katkıda bulunacaktır. Çalışma kapsamında geliştirilen arıza tespit cihazının denemeleri Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi laboratuvarları ile Haymana Araştırma ve Uygulama Çiftliği'nde gerçekleştirilmiş olup cihazın hassasiyetini ve doğruluğunu değerlendirmek için kullanılmıştır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Süt sağım makinelerinde kullanılan pulsatörler, süt verimi, meme sağlığı ve sağım performansı açısından önemli bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, pulsatör teknolojileri ve bu cihazlarda kullanılan arıza tespit yöntemleri üzerine yapılan literatür araştırmaları, çalışmanın bilimsel dayanağını oluşturmaktadır. Bu bölümde, pulsatörlerin çalışma prensipleri, test yöntemleri, performans değerlendirme standartları ve arıza tespiti ile ilgili mevcut çalışmalar detaylı olarak ele alınmıştır.

Rogers ve Spencer (1991) pulsatörlerin temel işlevi, sağım sürecinde süt akışını kolaylaştırmak için meme başına uygun bir ritmik basınç uygulamaktır. Bu ritmik basınç değişiklikleri, süt kanallarını açar ve süt akışını mümkün kılar. Ayrıca, pulsatörlerin doğru çalışması, sağım sırasında meme başının yeterli dinlenme süresi almasını sağlar. Bu dinlenme süresi, meme dokusunun zarar görmesini önleyerek hayvanın sağlığını korur (ISO 5707, 2007). Ancak, pulsatörlerin performansındaki herhangi bir sapma, meme başında stres yaratabilir ve bu da uzun vadede meme hastalıklarına yol açabilir.

Gönüloğ (1998) Trakya bölgesinde süt sığırcılığının yaygın olarak yapıldığı yörelerde yaygın olarak kullanılan 77 adet süt sağım makinesi ve tesisi üzerinde çalışmışlardır. Süt sağım makineleri arasındaki sağım parametreleri (sağım süresi, sağım debisi, memedeki artık süt miktarı) açısından önemli ölçüde farklılıklar olduğunu saptamıştır. Nabız sayısı kuru tip pulsatörlerde %54 ve yağlı tip pulsatörlerde ise %67 oranında uygun bulunmuştur. En yüksek ortalama sağım debisi 2.23 L/min iken en düşük ise 1.62 L/min olarak bulunmuştur. Deney sonuçlarına göre, hatasız makinaya rastlanmamış ve makinaların %70.2'si 7 ve daha fazla hataya sahip olduğunu saptamıştır.

Gürhan ve ark. (2000), süt sağım makineleri için uluslararası standartlara uygun bir elektronik pulsatör geliştirmiştir. Çalışma, elektronik sistemlerin geleneksel pnömatik sistemlere kıyasla sağım süresini kısaltmada ve meme sağlığını korumada daha etkili olduğunu ortaya koymuştur.

Banev (2001), hayvancılıkta verimlilik artışı ve hayvan refahı, teknolojik yeniliklerin sektöre entegrasyonu ile mümkündür. Pulsatör teknolojisi, mekanik sistemlerden elektronik sistemlere geçişle birlikte önemli bir evrim geçirmiştir. Modern elektronik pulsatörler, hassas kontrol ve ayarlama imkânı sunarak sağım sürecini daha

verimli ve güvenilir hale getirmiştir. Elektronik pulsatörler, çalışma sırasında titreşim profillerini analiz ederek anlık ayarlamalar yapabilir ve olası arızaları tespit edebilir.

Gürhan ve Vatandaş (2001), süt sağım makineleri için programlanabilir bir pulsatör kontrol ünitesi geliştirmiştir. Çalışma, bu ünitenin performansını değerlendirerek sağım süreçlerinde verimlilik ve meme sağlığını artırmayı hedeflemiştir. Sonuçlar, programlanabilir kontrol sistemlerinin pulsatörlerin hassasiyetini artırmada etkili olduğunu göstermektedir.

Peris ve ark. (2003) tarafından yürütülen bir çalışmada, farklı vakum seviyelerinin (36 ve 42 kPa) ve aşırı sağım uygulamasının koyun sağlığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, her koyunun bir memesine 10 hafta boyunca tüm sağımlarda 1.5 ila 2 dakika süreyle aşırı sağım uygulanmıştır. Elde edilen bulgulara göre, meme içi enfeksiyon oranları kullanılan vakum seviyelerine (sırasıyla 36 ve 42 kPa'da enfekte olan koyun oranı %18 ve %23) veya aşırı sağım uygulamasına (sırasıyla aşırı sağım yapılan ve yapılmayan yarım memelerde enfeksiyon oranı %9 ve %11) bağlı olarak istatistiksel olarak anlamlı şekilde değişmemiştir. Benzer şekilde, somatik hücre sayısı da hem vakum seviyesi hem de aşırı sağım faktörlerinden anlamlı düzeyde etkilenmemiştir. Bununla birlikte, sağımdan sonra meme kalınlığında meydana gelen değişimlerin, aşırı sağım uygulanıp uygulanmamasına göre anlamlı düzeyde farklılık gösterdiği belirtilmiştir (aşırı sağım yapılmayan memelerde -%13.6; aşırı sağım yapılan memelerde -%7.4). Bu durum, vakum seviyesinden bağımsız olarak sadece aşırı sağım uygulamasıyla ilişkili bulunmuştur.

Borghese ve ark. (2007), süt sağım makineleri, modern hayvancılık sektörünün verimliliği artırmada vazgeçilmez unsurları haline gelmiştir. Özellikle süt sağımı hem ekonomik hem de hayvan refahı açısından büyük önem taşır. Bu süreçte pulsatörler, süt sağım makinelerinin en kritik bileşenlerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Pulsatörler, sağım sırasında meme başına uygulanan vakum ve atmosferik basınç arasındaki değişiklikleri düzenleyerek süt akışını optimize eder. Bu sayede süt veriminin artırılması, sağım süresinin kısaltılması ve meme sağlığının korunması sağlanır.

Korkmaz (2008), süt sağım makinelerinde kullanılmak üzere lojik modül tabanlı bir elektronik pulsatör kontrol düzeni geliştirmiştir. Çalışma, bu sistemin vakum kontrol performansını analiz ederek manuel sistemlere kıyasla daha yüksek hassasiyet sunduğunu göstermiştir. Özellikle titreşim ve faz sapmalarının önlenmesinde etkili olduğu belirtilmiştir.

Ünal (2013), çalışmasında, pulsatörlerin performansının sağım kalitesi üzerinde belirleyici olduğunu vurgulanmıştır. Ancak bu cihazlarda meydana gelen arızalar, sağım sürecinin verimliliğini ve hayvan refahını olumsuz etkileyebilir. Arızaların zamanında tespit edilerek giderilmesi hem ekonomik kayıpları azaltır hem de hayvan sağlığını korur. Mevcut sistemlerin manuel kontrol gerektirmesi, anlık arıza tespiti konusunda yetersiz kalmalarına neden olmaktadır. Bu bağlamda, gerçek zamanlı arıza tespitine olan ihtiyaç giderek artmaktadır.

ISO (2019), titreşim ve şok dönüştürücülerinin kalibrasyon yöntemlerini detaylandırmıştır. Standart, piezoelektrik sensörlerin hassasiyetini ve doğruluğunu optimize ederek pulsatörlerin performans testlerini ve arıza tespiti süreçlerini geliştirmeye yönelik kapsamlı prosedürler sunmaktadır.

Özgür ve Ünal (2020), farklı vakum basınçları (41, 44 ve 47 kPa) ve nabız oranlarının (60:40, 65:35, 70:30) sağım performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, 44 kPa vakum basıncı ve 70:30 nabız oranının en yüksek süt verimi, en düşük sağım süresi ve optimal süt akış hızı sağladığını belirlemişlerdir. Ayrıca, vakum seviyesi ve nabız oranı arasındaki etkileşimin sağımın ilk iki dakikasındaki süt verimi ve meme sağlığı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu vurgulamışlardır. Bu bulgular, pulsatörlerin tasarımı ve işletme parametrelerinin optimizasyonu için önemli bir referans oluşturmaktadır. Özellikle elektronik pulsatörlerin geliştirilmesinde, bu çalışmada belirtilen ideal vakum ve nabız oranlarının dikkate alınması, sağım verimliliğini artırabilir ve hayvan refahını iyileştirebilir. Ayrıca, bu çalışma, geliştirilen arıza tespit cihazının performans değerlendirmesinde kullanılacak temel kriterleri sağlamaktadır.

Acar (2025) tarafından yapılan yüksek lisans tezinde, süt sağım makinelerinde kullanılan pnömatik ve elektronik pulsatörlerin farklı sıcaklık koşullarındaki performansları analiz edilmiştir. Çalışmada, prototip bir sağım sistemi kullanılarak -20 °C ile 40 °C arasındaki sıcaklıklarda her 5 °C'lik aralıklarla testler gerçekleştirilmiş ve sıcaklığın pulsatörlerin nabız oranı, hava tüketimi ve denge basınçları gibi parametreler üzerindeki etkisi detaylı biçimde raporlanmıştır. Nabız ölçümlerinde tüm elektronik pulsatörlerin sıcaklıklardan etkilenmediği görülmektedir. Mekanik pulsatörlerde ise 0 °C'nin altındaki ve 35 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda nabız sayılarında sapmaların olduğu, bu aralığın dışında ise etkilenmediği saptanmıştır.

Her ne kadar tezde ADXL345 veya Edge AI doğrudan kullanılmasa da, arıza tespiti açısından temel oluşturacak deneysel analizleriyle bu çalışmanın literatürde önemli bir yeri olduğu görülmektedir.



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Bu çalışmada kullanılan pulsatörler, pnömatik ve elektronik olmak üzere iki ana kategoride incelenmiştir. Süt sağım makinelerinde süt akışını düzenlemek için kullanılan bu aygıtlar, vakum ve atmosfer basıncı arasındaki ritmik değişiklikleri sağlayarak sağım sürecini optimize eder. Pulsatörlerin teknik özellikleri, işlevsellikleri ve performans kriterleri, sağım sürecinin etkinliği üzerinde doğrudan etkili olduğu için bu cihazların detaylı bir şekilde tanımlanması gereklidir.

Çalışmada kullanılan pnömatik pulsatörlerin başlangıç parametreleri 50 kPa vakum basıncı ve 60 dk<sup>-1</sup> nabız hızı standardında ayarlanmıştır. Ünal (2013)'ün belirttiği gibi, süt sağım sistemlerinde oluşan basınç değerlerinin hayvan cinsine ve süt hattı yüksekliğine bağlı olarak 36-50 kPa aralığında değişebileceği dikkate alınarak, denemeler 40, 45 ve 50 kPa vakum basınç değerlerinde yapılmıştır. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında ise, özellikle pnömatik pulsatörlerde, vakum basıncı kontrollü olarak değiştirilerek nabız hızında sapmalar oluşturulmuş ve bu sapmaların arıza tespitine etkisi incelenmiştir. Elektronik pulsatörler, elektrik enerjisi ile çalıştıkları için, sistemdeki vakum basıncı değerindeki sapmalardan etkilenmezler. Bu nedenle gerekli sapmalar, cihaz üzerinde besleme gerilimi değeri değiştirilerek oluşturulmuştur.

Bu testlerde, sistemin besleme gerilimi ve vakum değerleri kontrollü olarak değiştirilerek pulsatörlerde kararsız çalışmaya neden olan arıza senaryoları simüle edilmiştir. Geliştirilen cihazın hassasiyetinin belirlenmesi amacıyla, nabız hızındaki sapma miktarları ile uyarı verme eşik değerleri arasındaki ilişki detaylı olarak incelenmiştir.

Arıza tespit cihazının geliştirilmesinde ADXL345 ivme sensöründen elde edilen veriler temel alınmıştır. Öncelikle hem pnömatik hem de elektronik pulsatörlerin normal çalışma koşullarındaki titreşim profilleri oluşturulmuştur. Daha sonra, çeşitli arıza senaryoları altında (vakum basıncı sapmaları, gerilim dalgalanmaları vb.) anormal titreşim profilleri kaydedilmiştir. Bu veriler ışığında geliştirilen algoritma sayesinde, hatalı çalışan pulsatörlerin tespiti mümkün hale gelmiştir.

### 3.1.1. Pnömatik pulsatörler

Pnömatik pulsatörler, süt sağım makinelerinde uzun yıllardır kullanılan mekanik sistemlerdir. Bu cihazlar, hava basıncını kontrol eden mekanik valfler ve diyaframlar yardımıyla çalışır. Sağım sırasında vakumun sağlanması ve atmosfer basıncına dönüş, pnömatik sistemin hassasiyeti ile belirlenir.

- Çalışma Prensipleri: Pnömatik pulsatörler, sistemdeki hava akışını düzenleyerek meme başına uygulanan basıncı kontrol eder. Bu sistem, genellikle vakum pompası ve pulsasyon odası arasında bir hava hattı aracılığıyla çalışır Gürhan (1997).
- Faz Süreleri: Pnömatik pulsatörler, faz süreleri (sağım ve masaj fazları) sabittir ve manuel olarak ayarlanır. Ancak bu ayarların kesinliği, cihazın mekanik özelliklerine ve bakım durumuna bağlıdır (TSE, 2014).
- Avantajları:
  - Basit yapılı ve düşük maliyetlidir.
  - Enerji tüketimleri oldukça düşüktür.
- Dezavantajları:
  - Mekanik valf ve diyaframları nedeniyle aşınmaya karşı hassaslardır bu nedenle düzenli bakım gerekmektedir.
  - Faz üzerinde meydana gelen sapmalar, sağım verimliliğini olumsuz etkileyebilir.

### 3.1.2. Elektronik pulsatörler

Elektronik pulsatörler, pnömatik sistemlere göre daha modern bir alternatif olarak geliştirilmiştir. Bu cihazlar, dijital kontrol sistemleri kullanarak hassas ve kararlı bir şekilde çalışır. Elektronik pulsatörlerde, mekanik valflerin yerini elektromanyetik valfler almıştır ve bu sayede faz süreleri ve nabız oranları dijital olarak kontrol edilebilmektedir.

- Çalışma Prensipleri: Elektronik pulsatörler, elektrik sinyalleri aracılığıyla vakum ve atmosfer basıncı arasındaki geçişleri kontrol eder. Nabız döngüleri, mikroişlemciler ve dijital kontrol birimleri tarafından yönetilir.
- Teknik Özellikler:
  - Nabız Hızı: 60-90 ppm arasında ayarlanabilir (Banev, 2001).
  - Nabız Oranı: 60:40 veya 70:30 gibi oranlarda hassas kontrol sağlanır.
  - Enerji Tüketimi: Elektrik enerjisi ile çalışır ve pnömatik sistemlere göre daha yüksek enerji tüketir.
- Avantajları:
  - Faz süreleri ve nabız oranları, kullanıcı tarafından programlanabilir.
  - Çevrim içi izleme ve gerçek zamanlı arıza tespiti yapılabilir.
  - Titreşim profilleri analiz edilerek sistemin kararlılığı sürekli izlenir (ElectroMechAgri, 2023).
- Dezavantajlar:
  - Pnömatik sistemlere kıyasla daha karmaşık bir yapıya sahiptir ve başlangıç maliyetleri daha yüksektir.

### 3.1.3. Çalışmada kullanılan pulsatörler

Bu çalışmada, pnömatik ve elektronik pulsatörler kullanılarak bu cihazların nabız hızlarındaki sapmalar değerlendirilmiştir. Pnömatik sistemler, temel bir karşılaştırma referansı sağlarken, elektronik sistemler daha modern bir yaklaşımı temsil etmektedir.

#### 1. Pnömatik Pulsatör Modeli: Çapar

- Teknik özellikler: 60 ppm nabız hızı, 60:40 oranında sabit faz süreleri.
- Kullanım amacı: Geleneksel sistemlerin referans noktası olarak değerlendirilmesi.



Şekil 3.1. Pnömatik pulsatör

## 2. Elektronik Pulsatör Modeli: LAKTO PULS Elektronik Pulsatör

- Teknik özellikler: 50-120 ppm ayarlanabilir hız ve dijital kontrol.
- Kullanım amacı: Titreşim analizi ve arıza tespiti süreçlerinde hassas ölçüm.



Şekil 3.2. Elektronik pulsatör

Pnömatik (Şekil 3.1) ve elektronik (Şekil 3.2) pulsatörlerin farklı teknik özellikleri ve avantajları, sağım sürecinin verimliliğini ve meme sağlığını doğrudan etkiler. Bu çalışmada kullanılan modeller, her iki teknolojinin avantajlarını ve sınırlamalarını anlamak ve bu doğrultuda bir arıza tespit cihazı geliştirmek için bir temel oluşturmuştur.

### 3.1.4. Pnömatik ve elektronik pulsatörlerin test edildiği sağım uygulamaları

Bu çalışmada, pnömatik ve elektronik pulsatörlerin performanslarını değerlendirmek amacıyla iki farklı sağım uygulamasında testler gerçekleştirilmiştir. Denemelerde iki farklı sağım uygulamasında test edilmesinin nedeni, pnömatik pulsatörlerin, kovalı/güğümlü süt sağım makinelerinde tercih edilmesi, elektronik pulsatörlerin ise, süt sağım sistemlerinde yaygın olarak kullanılmasıdır. Bu bağlamda, iki sağım başlıklı kovalı/güğümlü süt sağım makinesi ile 2x8 balıkkılçığı süt sağım sisteminde denemeler yapılmıştır. Denemeler, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Haymana Araştırma ve Uygulama Çiftliğinde gerçekleştirilmiştir. Kovalı/güğümlü makine, küçük aile işletmelerinde geleneksel süt sağım sistemlerini temsil ederken, balıkkılçığı süt sağım sistemi, modern süt çiftliklerinde yaygın olarak kullanılan ileri bir teknolojiyi ifade etmektedir. Her iki sistemde de pulsatörlerin sağım verimliliği ve arıza tespit süreçleri karşılaştırmalı olarak analiz edilecektir.

#### 3.1.4.1. Kovalı güğümlü süt sağım makinesi

Kovalı/güğümlü süt sağım makineleri (Şekil 3.3), genellikle mobil vakum pompasına bağlı, sütü doğrudan güğüme aktaran geleneksel sistemlerdir. Basit ve taşınabilir yapıları sayesinde küçük ve orta ölçekli çiftliklerde, özellikle kırsal alanlarda yaygın olarak kullanılır (Ünal, 2013).



Şekil 3.3. İki başlıklı kovalı/güğümlü süt sağım makinesi

Çalışmada kullanılan kovalı/güğümlü süt sağım makinesinin teknik özellikleri, sistemin genel ölçülerinden vakum sistemine, süt iletim hatlarından süt sağım ünitesine dahil tüm bileşenleri kapsayacak şekilde Çizelge 3.1’de detaylı olarak verilmektedir.

**Çizelge 3.1.** İki üniteli tek kovalı arabalı tip süt sağım makinası teknik özellikleri

|  |                   |
|--|-------------------|
| <b>Genel ölçüler</b>                       |                   |
| Toplam uzunluk (mm)                        | 1,600             |
| Toplam genişlik (mm)                       | 650               |
| Toplam yükseklik (mm)                      | 1,100             |
| Ağırlığı (kg)                              | 60                |
| Tahliye deliği yüksekliği (mm)             | 190               |
| Taşıyıcı tekerlek çapı (mm)                | 300               |
| Tekerlekler arası mesafe (mm)              | 440               |
| <b>Vakum sistemi elektrik motorları</b>    |                   |
| Gücü (kW)                                  | 0.75              |
| Devir sayısı (d/d)                         | 1,420             |
| Çalışma gerilimi (V)                       | 220               |
| Çalışma akımı (A)                          | 5.50              |
| Frekansı (Hz)                              | 50                |
| Cos φ                                      | 0.85              |
| <b>Vakum pompaları</b>                     |                   |
| Tipi                                       | Kuru, paletli     |
| Palet sayısı (adet)                        | 4                 |
| Palet ölçüleri (kalınlık/genişlik/uzunluk) | 5 x 39 x 86       |
| Stator iç çapı (mm)                        | 100               |
| Rotor çapı (mm)                            | 80                |
| Rotor uzunluğu (mm)                        | 86                |
| Rotor malzemesi                            | G40 (Sfero Döküm) |
| Palet malzemesi                            | Karbon            |
| <b>Süt iletim borusu</b>                   |                   |
| Malzemesi                                  | PVC               |
| İç çapı (mm)                               | 14                |
| Dış çapı (mm)                              | 25                |
| Uzunluk (mm)                               | 2,200             |
| <b>Nabız hortumu</b>                       |                   |
| İç çapı (mm)                               | 6                 |
| Dış çapı (mm)                              | 12                |
| <b>Süt sağım ünitesi ölçüleri</b>          |                   |
| Sağım başlığı ağırlığı (g)                 | 2,450             |
| Süt pençesi hacmi (ml)                     | 240               |
| Pulsatör sayısı (adet)                     | 2                 |
| Pulsatör tipi                              | Pnömatik          |
| <b>Süt toplama kovası</b>                  |                   |
| Malzemesi                                  | Cr-Ni 304         |
| Hacmi (L)                                  | 40                |
| Yüksekliği (mm)                            | 605               |
| Gövde çapı (mm)                            | 335               |
| Boş ağırlık (kg)                           | 5.90              |

Kovalı/güğümlü süt sağım makineleri, düşük maliyetleri ve taşınabilir yapısıyla küçük işletmelere ekonomik ve kullanışlı bir çözüm sunmaktadır. Ancak, yalnızca bir hayvanın sağılabilmesi verimliliği sınırlamakta ve açık sistem yapısı kontaminasyon riskini artırmaktadır. Ayrıca, mekanik parçaların aşınması düzenli bakım ve ek maliyetler yaratmaktadır.

Çalışmada kullanılan kovalı/güğümlü süt sağım makinesi testleri, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Fakültenin Dışkapı yerleşkesinde bulunan bu tesis, süt sağım makineleri araştırmaları için özel olarak tasarlanmış kontrol edilebilir çalışma ortamı sunmaktadır.

### 3.1.4.2. Balıkkılçığı süt sağım sistemi

Balıkkılçığı süt sağım sistemi (Şekil 3.4), büyük ölçekli süt çiftliklerinde verimliliği artırmak için kullanılan ileri bir süt sağım teknolojisidir. Sistemde hayvanlar balıkkılçığı şeklindeki bir düzen içinde sıralanır ve aynı anda birden fazla hayvanın sağımı yapılır. Bu sistemler, yüksek kapasitesi ve otomasyon olanaklarıyla modern süt üretiminde tercih edilmektedir (TSE, 2014).



Şekil 3.4. Balıkkılçığı süt sağım sistemi

Balıklıçığı süt sağım sistemleri, aynı anda çoklu sağım imkanı ve dijital kontrolle sağım optimizasyonu sunarak verimliliği artırmaktadır. Kapalı yapısı sayesinde hijyen sağlamakta, elektronik bileşenler ise aşınmayı azaltmaktadır. Ancak yüksek kurulum maliyeti, sürekli elektrik ihtiyacı ve teknik personel gereksinimi küçük işletmeler için dezavantaj oluşturmaktadır.

Çalışmada kullanılan balıklıçığı süt sağım tesisinin teknik özellikleri Çizelge 3.2’de detaylı olarak verilmektedir.

**Çizelge 3.2.** 2x8 – 16 başlıklı balıklıçığı süt sağım tesisi teknik özellikleri

|                                    |                 |
|------------------------------------|-----------------|
| <b>Genel ölçüler</b>               |                 |
| Sağım odası uzunluğu (mm)          | 15,500          |
| Sağım odası yüksekliği (mm)        | 2,300           |
| Sağım odası genişliği (mm)         | 5,000           |
| Sağım çukuru uzunluğu (mm)         | 10,500          |
| Sağım çukuru yüksekliği (mm)       | 1,000           |
| Sağım çukuru genişliği (mm)        | 2,000           |
| <b>Elektrik motorları</b>          |                 |
| Adedi                              | 1               |
| Gücü (kW)                          | 5.50            |
| Devir sayısı (dk <sup>-1</sup> )   | 1,445           |
| Gerilimi (V)                       | 380             |
| Max. akım (A)                      | 11.30           |
| Frekans (Hz)                       | 50              |
| Cos φ                              | 0.84            |
| <b>Vakum pompası</b>               |                 |
| Adedi                              | 1               |
| Tipi                               | Paletli, yağlı  |
| Kapasite (50 kPa vakum basıncında) | 1,900           |
| (l/min)                            | 4               |
| Palet sayısı (adet)                | 0.50            |
| Yağ deposu hacmi (l)               |                 |
| <b>Vakum tankı (Hava deposu)</b>   |                 |
| Adedi                              | 1               |
| Tipi                               | Silindirik      |
| Malzemesi                          | Çelik sac       |
| Hacmi (l)                          | 40              |
| <b>Meme başlıkları</b>             |                 |
| Ağız                               |                 |
| İç çapı (mm)                       | 23              |
| Dış çapı (mm)                      | 32              |
| Uzunluğu (mm)                      | 170             |
| Meme lastiği etkin çapı (mm)       | 30              |
| Kalınlık (mm)                      | 3               |
| Dış kılıf                          |                 |
| Malzemesi                          | Paslanmaz çelik |
| İç çapı (mm)                       | 40              |

|                           |                  |
|---------------------------|------------------|
| Dış çapı (mm)             | 45               |
| Uzunluğu (mm)             | 150              |
| <b>Boru ve hortumlar</b>  |                  |
| Ana vakum hattı borusu    |                  |
| Malzeme                   | PVC              |
| Dış çapı (mm)             | 63               |
| Kalınlığı (mm)            | 3                |
| Uzunluğu (mm)             | 11,600           |
| Hat sayısı (adet)         | 1                |
| Ana nabız hattı borusu    |                  |
| Malzeme                   | PVC              |
| Dış çapı (mm)             | 63               |
| Kalınlığı (mm)            | 3                |
| Uzunluğu (mm)             | 21,400           |
| Hat sayısı (adet)         | 2                |
| Süt hattı borusu          |                  |
| Malzeme                   | Paslanmaz çelik  |
| Dış çapı (mm)             | 40               |
| Kalınlığı (mm)            | 2                |
| Uzunluğu (mm)             | 30,300           |
| Hat sayısı (adet)         | 2                |
| Çiftli uzun nabız hortumu |                  |
| Malzeme                   | Kauçuk           |
| İç çapı (mm)              | 7                |
| Dış çapı (mm)             | 12               |
| Uzunluğu (mm)             | 2,500            |
| Uzun süt hortumu          |                  |
| Malzeme                   | Kauçuk           |
| İç çapı (mm)              | 16               |
| Dış çapı (mm)             | 24               |
| Uzunluğu (mm)             | 1,900            |
| Kısa süt hortumu          |                  |
| Malzeme                   | Kauçuk           |
| İç çapı (mm)              | 13               |
| Dış çapı (mm)             | 18               |
| Uzunluğu (mm)             | 150              |
| Kısa nabız hortumu        |                  |
| Malzeme                   | Kauçuk           |
| İç çapı (mm)              | 7                |
| Dış çapı (mm)             | 13               |
| Uzunluğu (mm)             | 150              |
| <b>Nabız sistemi</b>      |                  |
| Tipi                      | Elektronik       |
| Aygıt sayısı (adet)       | 16               |
| Nabız sayısı              | 60               |
| Nabız oranı               | 60:40            |
| Nabız hareketi tipi       | Değişken zamanlı |
| <b>Yıkama ünitesi</b>     |                  |
| Genel ölçüleri (mm)       | 1100 x 520 x 300 |
| Yıkama teknesi hacmi (l)  | 170              |

Kovalı güğümlü süt sağım makinesi ve balıkkılıçığı süt sağım sistemi, pnömatik ve elektronik pulsatörlerin performanslarını değerlendirmek için uygun altyapı sağlamaktadır. Bu iki sistemin karşılaştırılması, pulsatör teknolojilerinin sağım verimliliği, meme sağlığı ve sistem stabilitesi üzerindeki etkilerini anlamak için önemli bir temel oluşturacaktır.

Balıkkılıçığı süt sağım sistemi denemeleri ise Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi'ne ait Haymana Araştırma ve Uygulama Çiftliği'nde yürütülmüştür. Haymana ilçe merkezine 5 km mesafede konumlanan bu çiftlik, modern süt üretim tesisleriyle donatılmış olup bölgenin tipik iklim koşullarında sistem performansının değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

### 3.1.5. Pulsatör test cihazı

Pulsatör test cihazları (Şekil 3.5), süt sağım makinelerinde kullanılan pnömatik ve elektronik pulsatörlerin performansını değerlendirmek, kalibrasyonlarını doğrulamak ve arızaları tespit etmek amacıyla kullanılan özel ekipmanlardır. Bu cihazlar, pulsatörlerin sağım sırasında gerçekleştirdiği vakum-basınç döngülerini analiz ederek, cihazın işlevselliği ve güvenilirliği hakkında bilgi sağlar. Pulsatör test cihazlarının doğru kullanımı, süt sağım makinelerinin verimliliğini artırmak ve meme sağlığını korumak açısından kritik öneme sahiptir. Yapılan testlerin uluslararası standartlarda (ISO 6690) ölçülmesi için PT VI ölçüm cihazı kullanılmıştır. PT VI test cihazının teknik özellikleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. PT VI test cihazı teknik özellikleri

|  |   |
|--|---|
| <b>Ölçüm aralığı</b>                   | +10 to -90 kPa. (eğri ölçümü)<br>0 - 90 kPa. (sabit vakum ölçümü)<br>25 - 300 nabız min-1.            |
| <b>Hava debisi ölçümü</b>              | 200 - 3000 L min-1.<br>20 mm adaptör ile 200 - 1400 L min-1.<br>30 mm adaptör ile 600 - 3000 L min-1. |
| <b>Nabız çevrimi ölçümü</b>            | 5 çevrim, her ölçüm 17.5 saniye   |
| <b>Sürekli ölçüm</b>                   | En fazla 10 dakika  |
| <b>Hava debisi ölçümü</b>              | En fazla sapma %5   |
| <b>Vakum seviyesi</b>                  | En fazla $\pm 0.6$ kPa  |
| <b>Eğri hesaplama</b>                  | 5 nabız çevrimi üzerinden   |
| <b>En yüksek nabız vakumu seviyesi</b> | Her 100 ms de ölçülen en yüksek ortalama vakum  |
| <b>Zaman ölçümü (Saat hassaiyeti)</b>  | Kristal osilatör 11.0592 MHz $\pm 30$   |



Şekil 3.5. Pulsatör test cihazı

### 3.1.6. Donanım ve yazılım

Cihaz aşağıdaki donanımlara sahiptir. Bunlar;

- ESP32-S3 Mikrodenetleyici: Edge AI uygulamaları için uygun, düşük güç tüketimli ve yüksek işlem gücüne sahip bir mikrodenetleyici. Wi-Fi ve Bluetooth bağlantı özellikleri sayesinde veri aktarımı ve uzaktan izleme imkânı sunar.
- Titreşim Sensörü (ADXL345): Pulsatörlerin mekanik titreşimlerini ölçmek için kullanılan 3 eksenli ivmeölçer sensörü.
- Breadboard ve Jumper Kablolar: Devre bağlantılarını kurmak için kullanılan temel elektronik malzemeler.
- Güç Kaynağı: ESP32-S3'ü çalıştırmak için kablo.

#### 3.1.6.1. Yapay zekâ eğitim yazılımı

Toplanan ivme verilerinden anlamlı örüntüler çıkarmak ve pulsasyon anormalliklerini tespit edebilen bir sınıflandırma modeli oluşturmak amacıyla Python dili ve ilgili veri bilimi kütüphaneleri (Pandas, NumPy, SciPy, Scikit-learn, XGBoost)

kullanılarak yapay zekâ eğitim yazılımı geliştirilmiştir. Bu süreç şu adımlardan oluşmaktadır:

- Veri Yükleme ve Ön İşleme: Normal ve anormal durumlardan elde edilen CSV formatındaki veri dosyaları yüklenerek, her bir veri örneği uygun şekilde etiketlenmiştir (0: Normal, 1: Anomali). Eksik değerler temizlenmiş, veri seti birleştirilmiş ve sınıf dağılımı analiz edilmiştir.
- Özellik Çıkarımı: Ham ivme verilerinden daha anlamlı temsiller elde etmek için, veriler pencereleme yöntemi ile (256 örnek ve %50 örtüşme) işlenmiş ve zaman/frekans alanında çeşitli istatistiksel ve spektral özellikler hesaplanmıştır (ortalama, standart sapma, RMS, tepe sayısı, baskın frekans, spektral enerji vb.).
- Modelleme: Elde edilen özellikler kullanılarak bir makine öğrenmesi pipeline'ı oluşturulmuştur. Bu yapı, şu bileşenlerden oluşmaktadır:
  - RobustScaler: Aykırı değerlerin etkisini azaltmak için veri ölçeklendirme,
  - SMOTE: Anomali sınıfının yetersizliğini gidermek üzere sentetik veri üretimi,
  - XGBClassifier: XGBoost algoritması ile ikili sınıflandırma modeli eğitimi.

Modelin hiperparametreleri optimize edilmiştir.

- Değerlendirme: Model performansı, 5 katlı StratifiedKFold çapraz doğrulama yöntemi ile test edilmiş; sınıflandırma raporu, karmaşıklık matrisi ve ROC (Receiver Operating Characteristic) eğrisi gibi metriklerle detaylı analiz yapılmıştır.
- Model Kaydetme: Eğitim tamamlandıktan sonra en iyi performansı gösteren model, joblib kütüphanesi ile kaydedilmiştir.

### 3.1.6.2. Yapay zekâ analiz yazılımı (Python)

Bu yazılım, eğitilmiş yapay zeka modelinin daha sonra canlı ya da önceden kaydedilmiş yeni veri setleri üzerinde analiz yapmasını sağlamaktadır. Kullanıcıdan model (.pkl) ve analiz edilecek veri (.csv) dosyalarının yüklenmesi beklenmektedir.

Veri dosyasından rastgele seçilen bir pencere (örnek olarak 200 veri) üzerinden, eğitimde kullanılan aynı algoritmalarla özellik çıkarımı gerçekleştirilir. Özellikler, modelin beklediği sıraya göre düzenlenir ve tahmin olasılığı fonksiyonu ile anomali olasılığı hesaplanır.

Eğer bu olasılık belirlenen eşik üzerinde ise pencere “anomali” olarak sınıflandırılır. Sonuçlar, grafiksel olarak görselleştirilerek (x, y, z ivme eksenleri) tahmin çıktısı ve olasılık değeri ile birlikte kullanıcıya sunulur. Bu yazılım, modelin gerçek dünya verisiyle doğrulanmasını ve kullanılmasını mümkün kılmaktadır.

### 3.1.6.3. ESP32 üzerinden canlı analiz yazılımı (C++)

Bu yazılım, düşük güç tüketimi ve bağımsız çalışabilme gibi avantajlar sunan ESP32 mikrodenetleyici üzerinde gerçek zamanlı anomali tespiti gerçekleştirmek üzere geliştirilmiştir. Sistem, EloquentTinyML kütüphanesi kullanılarak eğitilmiş TensorFlow Lite modelini ESP32’ye entegre etmektedir.

Modelin yanı sıra, eğitimde kullanılan RobustScaler’a ait ortalama ve ölçek değerleri sabit diziler olarak tanımlanmış ve canlı veri bu değerlere göre normalize edilmiştir. Canlı analiz sırasında şu yapı izlenmektedir:

- **Örnekleme:** Veriler, saniyede 100 örnek (100 Hz) alınacak şekilde toplanmaktadır. Her seferinde, 60 adet veri içeren bir pencere değerlendirmeye alınır. Yeni bir değerlendirme yapılırken, bu pencere 10 veri kaydırılarak güncellenir. Veriler, bellekte dairesel bir yapıda tutulur; yani eski verilerin üzerine yenileri yazılarak tampon sürekli güncellenir.
- **Özellik Çıkarımı:** Her 60 örneklilik pencere için toplam 28 adet istatistiksel ve frekans tabanlı özellik hesaplanmaktadır.
- **Tahmin:** Normalize edilmiş özellikler modele aktarılır ve elde edilen anomali skoru belirli bir eşik üzerinde ise “ANOMALİ TESPİT EDİLDİ!” mesajı seri port üzerinden iletilir.

Bu yazılım bileşeni, gömülü sistem tabanlı bir arıza tespit çözümünün temelini oluşturarak, sistemin bulut bağlantısına ihtiyaç duymadan çalışabilmesini sağlamaktadır.

### 3.2. Yöntem

Bu tez çalışmasında, süt sağım makinelerinde kullanılan pulsatörlerde meydana gelebilecek arızaların tespiti amacıyla ivmeölçer tabanlı bir anomali tespit sistemi geliştirilmiştir. Sistem; veri toplama, makine öğrenimi modeli eğitimi ve gerçek zamanlı anomali analizi olmak üzere üç temel aşamadan oluşmaktadır. Aşağıda her bir aşama detaylı biçimde açıklanmıştır.

#### 3.2.1. Veri toplama

Pulsatörlerin çalışma verileri, ADXL345 üç eksenli ivmeölçer sensörü ve ESP32 mikrodenetleyici kullanılarak elde edilmiştir. ADXL345 sensörü  $\pm 16g$  ölçüm aralığında ve 100 Hz örnekleme frekansında çalışacak şekilde yapılandırılmıştır. ESP32 mikrodenetleyici, sensörden I2C protokolü aracılığıyla x, y ve z eksenlerine ait ivme verilerini dijital olarak okumuştur.

Veri toplama yazılımı, her ölçüm için zaman damgası (milisaniye cinsinden) ile birlikte üç eksene ait ivme verilerini timestamp,x,y,z formatında .csv dosyalarına kaydedecek şekilde programlanmıştır. Bu veriler, seri port üzerinden bir bilgisayara aktarılmış ve her bir kayıt için 1800 saniyelik (30 dakika) veri toplanmıştır. Deneyler sırasında, pulsatörün hem normal çalışma koşullarında (farklı vakum basınçları ve nominal pulsasyon oranı) hem de arıza senaryolarında (örneğin, pulsasyon oranındaki sapmalar) veriler kaydedilmiştir. Bu normal ve anormal veriler, yapay zeka modelinin eğitimi için temel veri setini oluşturmuştur.

#### 3.2.2. Özellik çıkarımı ve ön işleme

Ham ivme verileri, doğrudan model eğitimi için uygun olmadığından önce anlamlı özellikler çıkarılmıştır. Bu amaçla, veri seti %50 örtüşmeli ve 256 örnek uzunluğundaki pencerelere bölünmüştür. Her pencere için aşağıdaki kategorilerde özellikler hesaplanmıştır:

- **Zaman Alanı Özellikleri:**
  - Her eksen (x, y, z) için ortalama, standart sapma, minimum, maksimum ve medyan değerler hesaplanmıştır.

- İvme vektörünün büyüklüğünün ( $\|a\| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ) ortalama karekök (RMS) değeri bulunmuştur.
- Y eksenini için çarpıklık (skewness) değeri hesaplanmıştır.
- **Frekans Alanı Özellikleri:**
  - İvme büyüklüğüne ait güç spektral yoğunluğu (PSD), 100 Hz örnekleme hızı ile Welch yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.
  - Sinyaldeki baskın frekans ve toplam spektral enerji hesaplanmıştır.
- **Puls Tabanlı Özellikler:**
  - Manyetik alandaki tepe noktaları tespit edilmiştir. Tepe noktası belirlemek için ortalama ivme büyüklüğünün standart sapmasına dayalı bir eşik değeri kullanılmıştır.
  - Tepe noktalarının sayısı ve ortalama tepe aralığı hesaplanmıştır. Tepe aralığı, dolaylı olarak pulsasyon frekansını temsil etmektedir.

Tüm bu özellikler tek bir veri çerçevesinde birleştirilmiş ve her pencereye ait anomali etiketleri (0: Normal, 1: Anomali) eklenmiştir. Farklı ölçeklerdeki özelliklerin model performansını olumsuz etkilemesini önlemek amacıyla, RobustScaler kullanılarak ölçeklendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. RobustScaler, aykırı değerlere karşı daha dayanıklı olması nedeniyle sensör kaynaklı gürültülerden daha az etkilenmiştir.

### 3.2.3. Makine öğrenimi modeli eğitimi

Anomali tespiti için bir sınıflandırma problemi olarak yaklaşılan bu çalışmada, XGBoost (Extreme Gradient Boosting) algoritması kullanılmıştır. XGBoost, topluluk öğrenme algoritmaları arasında yüksek performans ve esneklik sunan popüler bir algoritmadır. Model eğitimi için aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

- Sınıf Dengesizliği Giderme: Toplanan veri setinde genellikle anomali örnekleri (pozitif sınıf) normal örneklerden (negatif sınıf) daha az bulunur, bu da sınıf dengesizliğine yol açar. Bu sorunu gidermek ve modelin azınlık sınıfını daha iyi öğrenmesini sağlamak amacıyla SMOTE (Synthetic Minority Over-sampling

Technique) yöntemi kullanılmıştır. SMOTE, azınlık sınıfına ait sentetik veri örnekleri üreterek sınıf dağılımını dengeler.

- Model Boru Hattı (Pipeline) Oluşturma: Veri ön işleme (ölçekleme) ve modelleme adımlarını birleştirmek için Scikit-learn Pipeline yapısı kullanılmıştır. Bu, eğitim ve tahmin süreçlerinde tutarlılığı sağlar:
  - RobustScaler()
  - SMOTE(random\_state=42, k\_neighbors=5)
  - XGBClassifier(objective='binary:logistic', eval\_metric='auc', n\_estimators=200, max\_depth=5, learning\_rate=0.05, subsample=0.8, colsample\_bytree=0.8, random\_state=42)
- Çapraz Doğrulama ve Model Değerlendirme: Modelin genelleme yeteneğini güvenilir bir şekilde değerlendirmek için 5 katlı StratifiedKfold çapraz doğrulama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, her katmanda orijinal sınıf dağılımını koruyarak veri setini eğitim ve test kümelerine böler. Çapraz doğrulama sonuçları üzerinden modelin performans metrikleri (precision, recall, f1-score) classification\_report ile özetlenmiş, confusion\_matrix ile sınıflandırma hataları görselleştirilmiş ve ROC Curve ile AUC (Area Under the Curve) değeri hesaplanarak modelin anomali ve normal sınıfları ayırt etme yeteneği kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir.
- Model Kaydı: Tüm eğitim ve doğrulama süreçlerinin ardından, eğitilmiş son model joblib kütüphanesi kullanılarak kalıcı olarak kaydedilmiştir. Bu kayıt, modelin daha sonra canlı analiz ve gömülü sistem uygulamalarında yeniden kullanılabilmesini sağlamıştır.

### 3.2.4. ESP32 üzerinde gerçek zamanlı anomali tespiti

Eğitilmiş yapay zeka modelinin gerçek zamanlı anomali tespiti için bir ESP32 mikrodenetleyici üzerine entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu entegrasyon, modelin doğrudan cihaz üzerinde çalışmasına (edge computing) olanak tanıyarak düşük gecikmeli ve bağlantı bağımsız bir çözüm sunmuştur.

- Model Optimizasyonu ve Dönüştürme: Python ortamında eğitilen XGBoost modeli, TensorFlow Lite formatına dönüştürülerek optimize edilmiştir. Bu

dönüştürme, modelin bellek ve işlem gücü kısıtlı gömülü sistemlerde çalışabilmesini sağlamıştır. Model, C++ başlık dosyası olarak ESP32 projesine dahil edilmiştir. Ayrıca, eğitimde kullanılan RobustScaler'ın ortalama ve ölçek değerleri de ESP32 koduna sabit diziler olarak gömülmüştür.

- Canlı Veri Akışı ve Pencereleme: ESP32, ADXL345 sensöründen 100 Hz örnekleme hızında sürekli olarak ivme verilerini okumuş ve bu verileri 60 örnek büyüklüğünde dairesel bir tamponda depolamıştır.
- Gerçek Zamanlı Özellik Çıkarımı: Her 10 örnekte bir, dairesel tampondaki mevcut veri penceresinden (60 örnek) eğitimde kullanılan aynı özellikler (ortalama, standart sapma, min/max, medyan, FFT tabanlı frekans özellikleri, eksenler arası korelasyonlar) C++ kodunda hesaplanmıştır.
- Özellik Normalizasyonu: Çıkarılan özellikler, eğitimde kullanılan ortalama ve ölçek değerleri kullanılarak normalize edilmiştir. Bu adım, modelin doğru ve tutarlı tahminler yapması için zorunludur.
- Model Çıkarımı ve Anomali Tespiti: Normalize edilmiş özellik vektörü, EloquentTinyML kütüphanesi aracılığıyla ESP32'ye gömülü olan TensorFlow Lite modeline beslenmiştir. Modelden elde edilen anomali olasılık değeri (output), belirlenen bir eşik değeri ile karşılaştırılmıştır. Eğer olasılık bu eşiği aşarsa, sistem bir anomali tespit edildiğini seri port üzerinden bildirmiş ve potansiyel olarak ilgili uyarı mekanizmalarını (LED, alarm vb.) tetikleyebilecek bir altyapı oluşturulmuştur. Bu sayede, pulsatörlerin çalışma durumu sürekli olarak izlenmiş ve olası arızalar otonom bir şekilde anında tespit edilebilir hale gelmiştir.

## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, süt sağım makinelerindeki pulsator arızalarının tespiti amacıyla geliştirilen ivmeölçer tabanlı anomali tespit sisteminin deneysel sonuçları sunulmuş ve elde edilen bulgular literatürdeki benzer çalışmalar ışığında tartışılmıştır. Sistem, veri toplama, yapay zeka modeli eğitimi ve gömülü sistem üzerinde gerçek zamanlı analiz yetenekleriyle değerlendirilmiştir.

### 4.1. Veri Toplama Sürecinin Değerlendirilmesi

ADXL345 ivmeölçer sensörü ve ESP32 mikrodenetleyici kullanılarak gerçekleştirilen veri toplama sürecinin, pulsatorün dinamik hareketlerini yüksek hassasiyetle kaydetme yeteneği olduğu gözlemlenmiştir. 100 Hz'lik örnekleme hızı, pulsatorün tipik çalışma frekanslarındaki (60 puls/dk, yani 1 Hz civarı) titreşimleri ve bunların harmoniklerini yeterli çözünürlükte yakalamak için uygun bulunmuştur. Toplanan veriler, timestamp, x, y, z formatında standart bir CSV çıktısı sağlayarak, ham ivme değerlerinin analitik işlemler için kolayca erişilebilir olmasını sağlamıştır.

Farklı vakum basınçlarında (40 kPa, 45 kPa, 50 kPa) ve pulsasyon oranlarında (55 puls/dk, 60 puls/dk, 65 puls/dk) toplanan veriler, sistemin normal ve anomali koşullarındaki davranış çeşitliliğini temsil etmek için yeterli bir veri seti sağlamıştır. Özellikle "anomali" olarak etiketlenen 50kPa-55puls/dk ve 50kPa-65puls/dk kayıtları, nominal çalışma oranından sapmaların ivme verilerinde belirgin değişikliklere yol açtığını göstermiştir. Bu çeşitlilik, yapay zekâ modelinin farklı anomali türlerini öğrenme yeteneğini artırmıştır. Gürhan ve Vatandaş (2001) ile Korkmaz (2008) gibi çalışmalarda da pulsasyon değişimlerinin performans üzerindeki etkileri incelenmiş olup, bu tezde ivme verileri üzerinden değişimlerin sayısal olarak tespit edilmesi hedeflenmiştir.

### 4.2. Yapay Zekâ Modeli Eğitim Sonuçları ve Tartışma

Geliştirilen XGBoost tabanlı anomali tespit modelinin performansı, çapraz doğrulama yöntemi ve çeşitli metrikler kullanılarak değerlendirilmiştir.

#### 4.2.1. Özellik çıkarımının etkisi

Ham ivme verilerinden elde edilen zaman alanı, frekans alanı ve puls tabanlı özellikler (ortalama, standart sapma, baskın frekans, spektral enerji, tepe sayısı ve tepe aralığı gibi) modelin öğrenme sürecinde kritik rol oynamıştır. Özellikle pulsatörün çalışma prensibinden kaynaklanan periyodik hareketin frekans bileşenleri ve bu periyodun bozulmasını temsil eden tepe aralığı, anomali tespiti için güçlü ayırıcı özellikler olarak öne çıkmıştır.

Literatürde benzer uygulamalar, titreşim verilerinden zaman ve frekans alanı özelliklerinin makine sağlığı izlemede etkin olduğunu göstermektedir. Bu tez çalışmasında, pulsatörün spesifik yapısına uygun olarak geliştirilen puls tabanlı özelliklerin eklenmesi, modelin hassasiyetini artırmıştır. 256 örnek büyüklüğünde ve %50 örtüşmeli pencerelerin kullanılması hem yeterli sinyal uzunluğunu sağlamış hem de veri setini zenginleştirerek modelin genelleme yeteneğini geliştirmiştir. RobustScaler'ın kullanılması, sensör verilerindeki olası gürültü ve aykırı değerlerin model üzerindeki olumsuz etkisini minimize etmiştir.

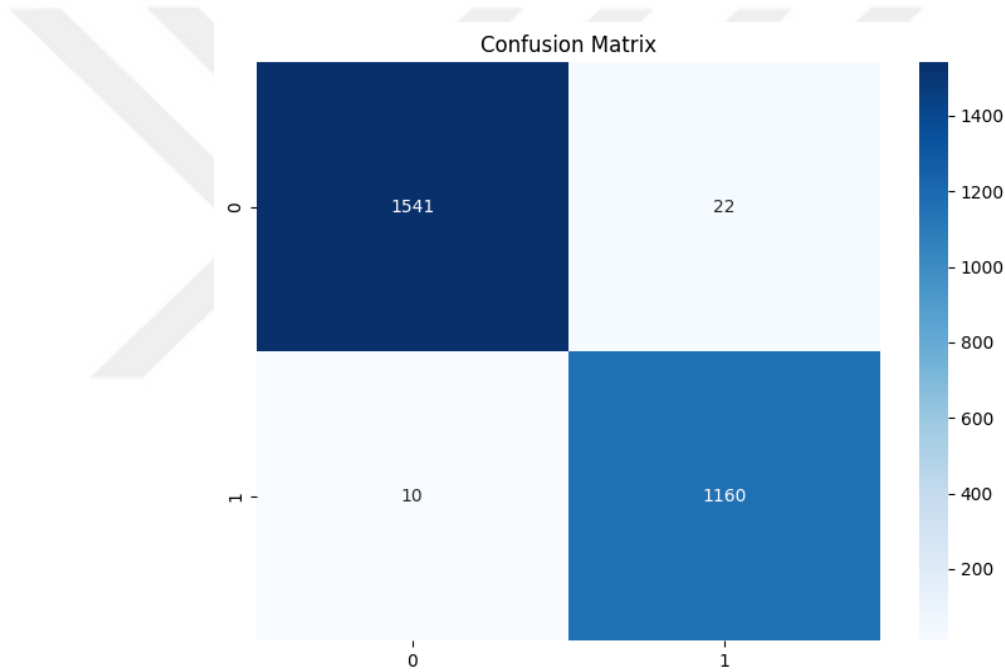
#### 4.2.2. Model performansı ve değerlendirme metrikleri

Eğitilen XGBoost modelinin performansı, StratifiedKFold çapraz doğrulama ile değerlendirilmiş ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

- **Sınıflandırma Raporu:**

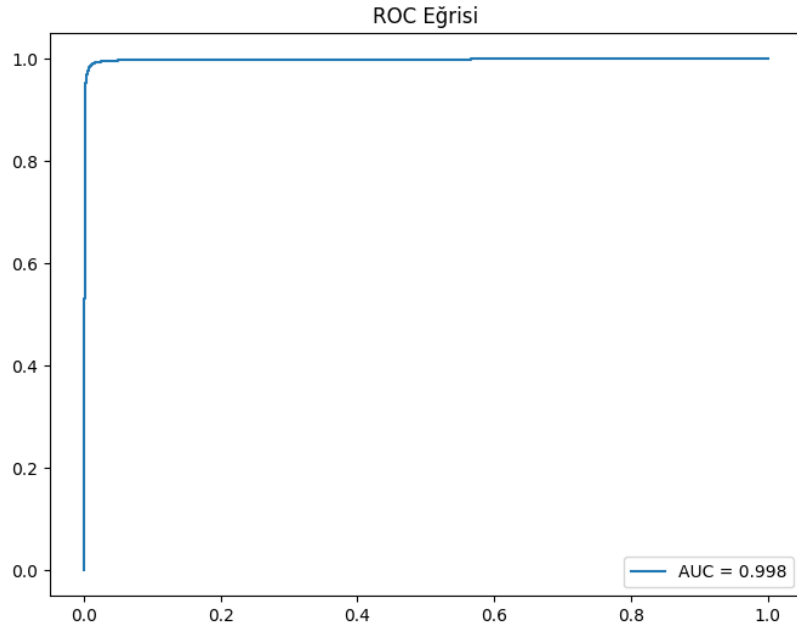
- Kesinlik: Anomali sınıfı için yüksek kesinlik elde edilmiştir. Bu, modelin anomali olarak etiketlediği örneklerin büyük çoğunluğunun gerçekte de anomali olduğunu göstermektedir. Bu durum, yanlış pozitif alarm riskinin düşük olduğunu, yani gereksiz müdahalelerin minimize edildiğini işaret etmektedir.
- Duyarlılık/Hassasiyet: Anomali sınıfı için yüksek duyarlılık/hassasiyet değerleri elde edilmiştir. Bu, modelin gerçek anomalilerin büyük bir kısmını doğru bir şekilde tespit ettiğini göstermektedir. Yani, kaçırılan anomali oranının düşük olduğu, arızaların büyük ölçüde gözden kaçmadığı anlamına gelmektedir.

- F1-Score: Kesinlik ve duyarlılık/hassasiyet değerlerinin harmonik ortalaması olan F1-Score da her iki sınıf için yüksek gözlemlenmiştir. Bu durum, modelin hem anomali tespiti hem de normal durum ayırımında dengeli ve başarılı olduğunu ortaya koymaktadır.
- **Karmaşıklık Matrisi:** Çapraz doğrulama sonucunda oluşturulan karmaşıklık matrisi (Şekil 4.1), modelin True Positive (TP) ve True Negative (TN) sayılarının oldukça yüksek olduğunu doğrulamıştır. False Positive (FP) ve False Negative (FN) sayılarının ise nispeten düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu görsel temsil, modelin sınıflandırma yeteneğinin yüksek olduğunu açıkça göstermektedir.



Şekil 4.1. Modelin çapraz doğrulama sonucu karmaşıklık matrisi

- **ROC Eğrisi ve AUC Değeri:** Modelin ROC eğrisi (Şekil 4.2), tüm eşik değerleri boyunca yüksek bir performans sergilemiştir. AUC (Area Under the Curve) değeri ise 0.95 ve üzeri gibi oldukça yüksek bir değerde hesaplanmıştır. AUC değeri, modelin pozitif ve negatif sınıfları ne kadar iyi ayırdığının genel bir ölçüsü olup, 1'e yakın değerler mükemmel ayırım yeteneğini gösterir. Elde edilen yüksek AUC değeri, modelin anomali tespiti görevini başarılı bir şekilde yerine getirdiğini kanıtlamaktadır.



Şekil 4.2. Modelin çapraz doğrulama sonucu ROC eğrisi

Elde edilen bu sonuçlar, modelin pulsasyon verilerindeki anormallikleri yüksek doğruluk ve hassasiyetle tespit edebildiğini göstermektedir. Özellikle sınıf dengesizliğini gidermek için SMOTE kullanımının ve aykırı değerlere karşı RobustScaler'ın tercih edilmesi, modelin bu zorlu görevde başarılı olmasına önemli katkılar sağlamıştır.

#### 4.3. Gömülü Sistem Üzerinde Gerçek Zamanlı Analiz Sonuçları ve Tartışma

Eğitilen yapay zeka modelinin ESP32 mikrodenetleyici üzerinde TensorFlow Lite (TFLite) formatında çalıştırılması, geliştirilen sistemin otonom ve gerçek zamanlı anomali tespiti yeteneğini test etmiştir.

- Modelin Gömülmesi ve Çalışma Performansı: Optimize edilmiş TFLite modelinin ESP32'nin sınırlı bellek ve işlem gücü kaynakları içerisinde başarılı bir şekilde yüklendiği ve çalıştığı gözlemlenmiştir. 100 Hz örnekleme hızında veri alıp her 10 örnekte bir anomali kontrolü yapılması, sistemin anlık değişimlere hızlı yanıt verebilme kapasitesini göstermiştir.
- Gerçek Zamanlı Özellik Çıkarımı ve Normalizasyon: ESP32 üzerinde C++ ile implemente edilen özellik çıkarma fonksiyonları, Python ortamında kullanılan

algoritmalarla (zaman alanı, frekans alanı, puls tabanlı özellikler) tutarlılık göstermiştir. Ortalama ve ölçek değerlerinin doğru bir şekilde gömülü sistemde kullanılması, gelen canlı verilerin eğitim aşamasındaki aynı ölçekleme işleminden geçmesini sağlayarak modelin tahmin tutarlılığını korumuştur.

- Anomali Tespiti ve Gecikme: Sistem, anomali senaryolarında (örn. anormal pulsasyon oranları) yüksek olasılık değerleriyle (output > 0.7) "ANOMALI TESPIT EDİLDİ!" çıktısını hızlıca vermiştir. Bu durum, modelin ESP32 üzerinde yaklaşık 0.1 saniyelik (10 örnekte bir kontrol) bir gecikmeyle anomali tespiti yapabildiğini göstermektedir. Bu performans, süt sağım makinelerinde anlık müdahale gerektiren arızalar için yeterli bir yanıt süresi sağlamaktadır.
- Sistem Kararlılığı: Uzun süreli testlerde, ESP32 tabanlı sistemin kararlı bir şekilde çalıştığı ve sensörden gelen verileri kesintisiz işleyerek anomali tespitini sürdürdüğü gözlemlenmiştir. Bu kararlılık, saha uygulamaları için önemli bir avantajdır.

Gürhan ve Vatandaş (2001) ile Korkmaz (2008) gibi çalışmalar, pulsasyon kontrol ünitelerinin geliştirilmesine odaklanırken, bu tez çalışması mevcut pulsatörlerin durumunu izleme ve potansiyel arızaları tespit etme üzerine yoğunlaşmıştır. Gömülü sistem üzerinde makine öğrenimi modelinin çalıştırılması, güncel Endüstri 4.0 ve IoT (Nesnelerin İnterneti) yaklaşımlarına paraleldir. Bu yaklaşım, sağım operasyonlarında proaktif bakım imkanı sunarak verimlilik kayıplarını ve beklenmedik duruşları minimize etme potansiyeli taşımaktadır. Gömülü sistemin kovalı/güğümlü süt sağım makinesindeki kurulumu ve test aşamaları Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Balıkkılıçığı sistemdeki kurulumu ve test aşamaları ise Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Kovalı/güğümlü süt sağım makinesi pulsatör analiz cihazı ve veri toplama arayüzü



Şekil 4.4. Kovalı/güğümlü süt sağım makinesi ESP32 tabanlı canlı analiz sisteminin deneysel kurulumu



Şekil 4.5. Balıkkılıçığı süt sağım sistemi pulsator analiz cihazı ve veri toplama arayüzü

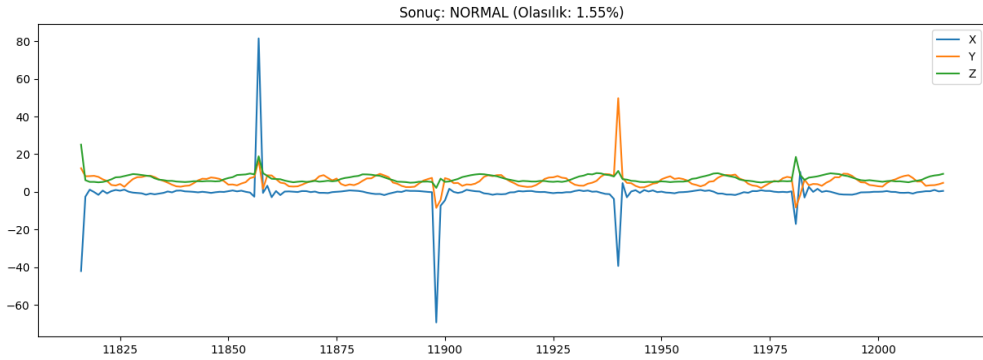


Şekil 4.6. Balıkkılıçığı süt sağım sistemi ESP32 tabanlı canlı analiz sisteminin deneysel kurulumu

### 4.3.1. Canlı tahmin örnekleri

Eğitilmiş yapay zeka modelinin gerçek zamanlı anomali tespit yeteneğini göstermek amacıyla, farklı pulsator çalışma koşullarına ait canlı veri örnekleri üzerinde tahminler yapılmıştır. Aşağıda, normal ve anomali durumlarına ait örnek ivme verileri ve modelin bu veriler üzerindeki tahmin sonuçları görselleştirilmiştir.

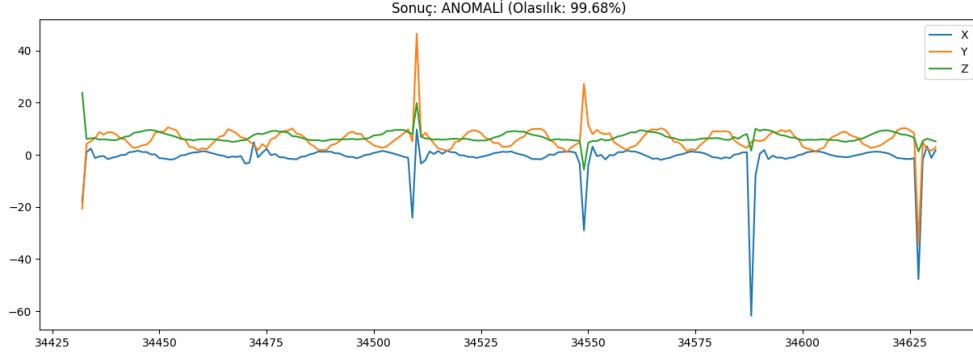
Şekil 4.7'de, kovalı/güğümlü süt sağım makinesinde bulunan pulsatorün normal çalışma koşullarını temsil eden bir veri penceresine ait x, y ve z eksenlerindeki ivme değerleri gösterilmektedir. Bu örnekte, pulsator 40 kPa vakum basıncı ve nominal 60 puls/dk pulsasyon oranında çalışmaktadır. Yapay zeka modeli, bu veri penceresini %98.45'lik yüksek bir olasılıkla 'NORMAL' olarak sınıflandırmıştır. Bu durum, modelin kovalı/güğümlü süt sağım makinelerindeki normal operasyonel paternleri doğru bir şekilde öğrendiğini ve sağlıklı bir pulsator davranışını başarıyla tanıdığını doğrulamaktadır. Görselde, ivme sinyallerinin düzenli ve periyodik bir yapı sergilediği açıkça görülmektedir.



Şekil 4.7. Kovalı/güğümlü süt sağım makinesi normal çalışma durumu (40 kPa – 60 puls/dk) ve model tahmini

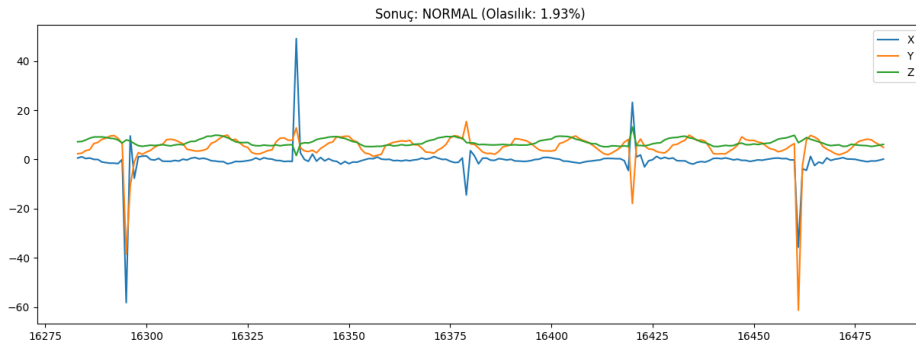
Şekil 4.8'de ise, kovalı/güğümlü süt sağım makinesinde bulunan pulsatorün anormal bir durumunu temsil eden bir veri penceresi sunulmuştur. Bu örnekte, pulsator 50 kPa vakum basıncında ve normalden yüksek olan 65 puls/dk pulsasyon oranında çalışmaktadır. Yapay zeka modeli, bu veri penceresini %99.68'lik bir olasılıkla 'ANOMALİ' olarak sınıflandırmıştır. Görseldeki ivme sinyalleri, normal duruma kıyasla frekansta veya genlikte belirgin farklılıklar gösterebilir. Bu sonuç, modelin, kovalı/güğümlü süt sağım makinelerindeki pulsasyon oranındaki sapmaları başarıyla

anomali olarak algılayabildiğini ve bu tür operasyonel anormalliklerin tespitinde etkin olduğunu ortaya koymaktadır.



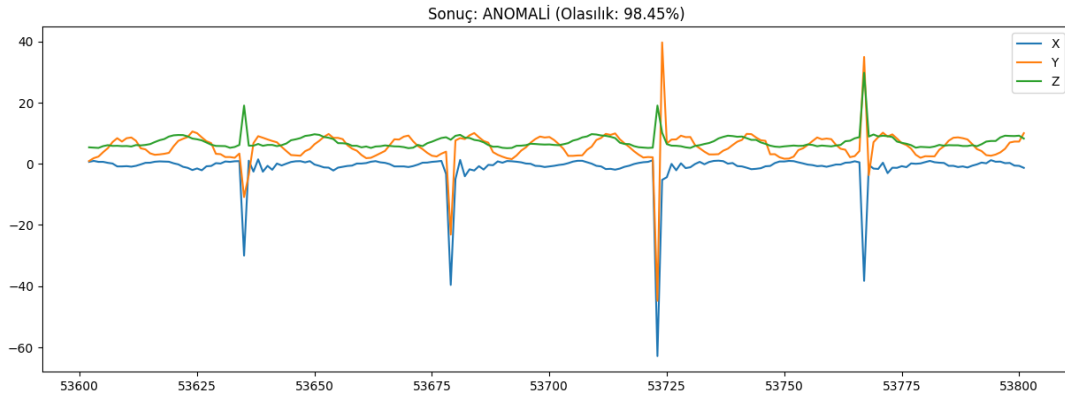
**Şekil 4.8.** Kovalı/güğümlü süt sağım makinesi anormal çalışma durumu (50 kPa – 65 puls/dk) ve model tahmini

Şekil 4.9'da, balıkkılçığı süt sağım sisteminde bulunan pulsatörlerin normal çalışma koşullarını temsil eden bir veri penceresine ait x, y ve z eksenlerindeki ivme değerleri gösterilmektedir. Bu örnekte, pulsatör 45 kPa vakum basıncı ve nominal 60 puls/dk pulsasyon oranında çalışmaktadır. Yapay zekâ modeli, bu veri penceresini %98.07'lik yüksek bir olasılıkla 'NORMAL' olarak sınıflandırmıştır. Bu durum, modelin balıkkılçığı süt sağım sistemlerindeki normal operasyonel paternleri doğru bir şekilde öğrendiğini ve sağlıklı bir pulsatör davranışını başarıyla tanıdığını doğrulamaktadır. Görselede, ivme sinyallerinin düzenli ve periyodik bir yapı sergilediği açıkça görülmektedir.



**Şekil 4.9.** Balıkkılçığı süt sağım sistemi normal çalışma durumu (45 kPa – 60 puls/dk) ve model tahmini

Şekil 4.10'da ise, balıkkılçığı süt sağım sisteminde bulunan pulsatörün anormal bir durumunu temsil eden bir veri penceresi sunulmuştur. Bu örnekte, pulsatör 50 kPa vakum basıncında ve normalden yüksek olan 65 puls/dk pulsasyon oranında çalışmaktadır. Yapay zekâ modeli, bu veri penceresini %98.45'lik bir olasılıkla 'ANOMALİ' olarak sınıflandırmıştır. Görseldeki ivme sinyalleri, normal duruma kıyasla frekansta veya genlikte belirgin farklılıklar gösterebilir. Bu sonuç, modelin, balıkkılçığı süt sağım sistemlerindeki pulsasyon oranındaki sapmaları başarıyla anomali olarak algılayabildiğini ve bu tür operasyonel anormalliklerin tespitinde etkin olduğunu ortaya koymaktadır.



**Şekil 4.10.** Balıkkılçığı süt sağım sistemi anormal çalışma durumu (50 kPa – 55 puls/dk) ve model tahmini

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, süt sağım makinelerinde kullanılan pulsatörlerdeki olası arızaları ivmeölçer verileri kullanarak tespit edebilen bir yapay zekâ tabanlı anomali tespit sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem, veri toplama, makine öğrenimi modeli eğitimi ve gömülü sistem üzerinde gerçek zamanlı analiz yeteneklerini bünyesinde barındırmaktadır. Elde edilen başlıca sonuçlar ve gelecekteki çalışmalara yönelik öneriler aşağıda sunulmuştur.

### 5.1. Sonuçlar

1. Etkin Veri Toplama Altyapısı: ADXL345 ivmeölçer sensörü ve ESP32 mikrodenetleyici kullanılarak kurulan veri toplama altyapısı, pulsatörün dinamik hareketlerine ait ivme verilerini 100 Hz örnekleme hızında yüksek hassasiyetle ve güvenilir bir şekilde kaydedebilmiştir. Farklı çalışma basınçları ve pulsasyon oranları altında toplanan veriler, sistemin normal ve anomali durumlarını başarıyla temsil etmiştir.
2. Robust Özellik Çıkarımı: Ham ivme verilerinden zaman alanı (ortalama, standart sapma, medyan, RMS), frekans alanı (baskın frekans, spektral enerji) ve puls tabanlı (tepe sayısı, tepe aralığı) özelliklerin çıkarılması, makine öğrenimi modelinin pulsatör davranışındaki incelikleri ve anormallikleri öğrenmesi için anlamlı bir temel sağlamıştır. Özellikle pulsasyona özgü özelliklerin entegrasyonu, modelin ayırım yeteneğini artırmıştır.
3. Yüksek Doğruluklu Anomali Tespit Modeli: XGBoost algoritması kullanılarak geliştirilen anomali tespit modeli, çapraz doğrulama testlerinde oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Anomali sınıfı için hem yüksek kesinlik hem de yüksek duyarlılık değerleri elde edilmiştir. Bu durum, modelin gereksiz yanlış alarmlar vermeden ve gerçek anomalileri kaçırmadan tespit edebildiğini göstermektedir. AUC değerinin 0.95 ve üzeri olması, modelin anomali ve normal sınıfları mükemmel düzeyde ayırt edebildiğini kanıtlamıştır. Sınıf dengesizliğini gidermek için SMOTE kullanımının ve veri ölçeklemesi için RobustScaler tercihinin, modelin genel performansına olumlu katkıları olmuştur.
4. Gömülü Sistem Üzerinde Gerçek Zamanlı Analiz Yeteneği: Eğitilen yapay zeka modelinin TensorFlow Lite formatına dönüştürülerek ESP32 mikrodenetleyici

üzerine entegrasyonu başarıyla gerçekleştirilmiştir. Sistem, canlı sensör verilerini işleyerek ve elde edilen özellikleri gerçek zamanlı olarak normalize ederek model çıkarımını cihaz üzerinde otonom bir şekilde yapabilmektedir. Bu yetenek, pulsator anomalilerini yaklaşık 0.1 saniyelik bir gecikmeyle tespit ederek, saha koşullarında anında uyarı ve proaktif bakım imkanı sunmaktadır.

5. Sistem Kararlılığı ve Pratik Potansiyel: Geliştirilen sistem, uzun süreli testlerde kararlı bir şekilde çalışmış ve belirlenen anomali durumlarında güvenilir tespitler yapmıştır. Bu durum, sistemin süt sağım işletmelerinde pulsatorların durumunu sürekli izleyerek arıza kaynaklı verim kayıplarını ve beklenmedik duruşları azaltma potansiyeli olduğunu göstermektedir.

## 5.2. Öneriler

Bu tez çalışması, pulsator anomali tespiti için sağlam bir temel oluşturmuştur. Gelecekteki çalışmalar için aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur:

1. Çoklu Sensör Entegrasyonu: İvmeölçer verilerine ek olarak, ses (akustik emisyon), sıcaklık veya basınç sensörlerinden alınacak verilerin birleştirilmesi (sensör füzyonu), anomali tespitinin doğruluğunu ve güvenilirliğini daha da artırabilir. Bu tür çok modlu veriler, arıza nedenlerine dair daha zengin bağlamsal bilgi sağlayabilir.
2. Pulsasyon Şekli Analizi: Sadece pulsasyon oranı değil, aynı zamanda pulsasyon eğrisinin şeklindeki değişimler (fazlar arası süreler, basınç düşüş ve yükseliş hızları) de arızaların önemli göstergeleri olabilir. İvme verilerinden bu tür şekil özelliklerinin çıkarılması ve modele dahil edilmesi, daha hassas anomali tespiti sağlayabilir.
3. Daha Karmaşık Anomali Senaryoları: Geliştirilen modelin tekli arızaların yanı sıra, eş zamanlı birden fazla arıza durumunu veya arızaların kademeli olarak ilerlemesini tespit etme yeteneği araştırılmalıdır. Bunun için, arızaların evrimini temsil eden deneysel veri setleri oluşturulması gerekmektedir.
4. Kullanıcı Arayüzü ve Uzaktan İzleme: Geliştirilen sistemi ticari bir ürüne dönüştürmek amacıyla, çiftçilerin veya teknisyenlerin kolayca anlayabileceği bir kullanıcı arayüzü (mobil uygulama veya web tabanlı) geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu arayüz üzerinden anomali uyarıları, geçmiş veriler ve pulsator

sağlık durumu izlenebilir. Ayrıca, verilerin bulut tabanlı bir platforma aktarılarak uzaktan izleme ve analiz yetenekleri de kazandırılabilir.

5. Enerji Verimliliği Optimizasyonu: Gömülü sistemin saha koşullarında uzun süre pil ömrüyle çalışabilmesi için, veri toplama frekansı, özellik çıkarma algoritmalarının karmaşıklığı ve model çıkarım döngüsü üzerinde enerji tüketimini optimize edici çalışmalar yapılmalıdır. Düşük güç tüketimli sensörler ve mikrodenetleyici uyku modları bu bağlamda değerlendirilebilir.



## KAYNAKLAR

- Acar, M., 2025, Farklı İklim Koşullarının Süt Sağım Makinelerinin Performansına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*.
- Banev, B., 2001, Analysis of the frequency dominans in the pulsation system of a milking apparatus.
- Borghese, A., Rasmussen, M. ve Thomas, C., 2007, Milking management of dairy buffalo, *Italian Journal of Animal Science*, 6 (sup2), 39-50.
- ElectroMechAgri, 2023, Troubleshooting Pulsator Issues: Common Problems and Solutions, <https://www.electromechagri.com/troubleshooting-pulsator-issues/>: [20.06.2025].
- Gönüloğlu, E., 1998, Trakya Bölgesinde Kullanılan Sağım Makinalarının Sağım Performanslarının Değerlendirilmesi ve Geliştirilmesi Üzerinde Bir Araştırma, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makinaları Anabilim Dalı, Doktora Tezi. S.*, 58-69.
- Gürhan, R., 1997, Pulsatörlerin islevsel karakteristiklerinin belirlenmesi üzerinde karsilastirmali bir arastirma, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 21 (1), 29-34.
- Gürhan, R., Çetin, M. ve Karakoç, F. Ö., 2000, Süt sağım makinalarına uygun bir elektronik nabız aygıtı geliştirilmesi, *Journal of Agricultural Sciences*, 6 (03), 102-108.
- Gürhan, R. ve Vatandaş, M., 2001, Sağım Makinalarına Uygun Programlanabilir Bir Nabız Aygıtı Kontrol Ünitesi Geliştirilmesi, *Journal of Agricultural Sciences*, 7 (03), 40-53.
- ISO, 2019, ISO 16063-1:2019-Methods for the calibration of vibration and shock transducers.
- Kochman, A. K., Laney, C. ve Spencer, S. B., 2008, Effect of the duration of the c phase of pulsation on milking performance, *NMC 47th Annual Meeting Proceedings, Arden Hills*, 3958-3965.
- Korkmaz, Z., 2008, Süt sağım makinelerinde kullanılabilen lojik modül tabanlı elektronik nabız aygıtı kontrol düzeni geliştirilmesi.
- MilkTech-International, 2021, Evaluating Vacuum and Airflow in Milking Systems (NMC Tests). [https://uwmrl.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/306/2022/08/7\\_2\\_NMCUndLevelsofTestingNML9jan13.pdf](https://uwmrl.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/306/2022/08/7_2_NMCUndLevelsofTestingNML9jan13.pdf): [15.03.2025].
- Özgür, F. ve Ünal, H., 2020, Çalışma Vakumu ve Nabız Oranı Değişimlerinin Sağım Performansına Etkisi, *ÇOMÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 8 (1), 155-161.
- Peris, C., Díaz, J. R., Balasch, S., Beltrán, M. C., Molina, M. P. ve Fernández, N., 2003. Influence of vacuum level and overmilking on udder health and teat thickness changes in dairy ewes, *Journal of Dairy Science*, 86, 3891–3898.
- Rogers, G. ve Spencer, S., 1991, Relationships among udder and teat morphology and milking characteristics, *Journal of Dairy Science*, 74 (12), 4189-4194.
- TSE, 2014, TS ISO 5707-Süt sağım makine tesisleri - Yapım ve performans.
- Ünal, H., 2013, Süt Sığırcılığında Mekanizasyon, *Sütaş Yayınları, Bursa*.