



**ORTA GERİLİM KABLOLARINDA MEYDANA GELEN KISMİ  
BOŞALMALARIN İLERİ SİNYAL İŞLEME TEKNİKLERİYLE  
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Fatih SERTTAŞ

Danışman

Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2020

Bu tez çalışması 18.FEN.BİL.63 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi BAPK Birimi tarafından desteklenmiştir.

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ**

**ORTA GERİLİM KABLOLARINDA MEYDANA GELEN KISMİ  
BOŞALMALARIN İLERİ SİNYAL İŞLEME TEKNİKLERİYLE  
İNCELENMESİ**

**Fatih SERTTAŞ**

**Danışman**

**Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU**

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Haziran 2020**

**BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI**  
**Afyon Kocatepe Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**15 / 06 / 2020**

**Fatih SERTTAŞ**

## ÖZET

Doktora Tezi

### ORTA GERİLİM KABLOLARINDA MEYDANA GELEN KISMI BOŞALMALARIN İLERİ SİNYAL İŞLEME TEKNİKLERİYLE İNCELENMESİ

Fatih SERTTAŞ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU

Orta gerilim ve yüksek gerilimde kullanılan katı ve sıvı yalıtkanlarda, kısmi boşalmalara (deşarjlara) bağlı olarak uzun bir süreç içerisinde oluşan ve yıkıcı düzeylere ulaşan fiziksel hasarlar meydana gelmektedir. Yüksek ve orta gerilimlerdeki tüm arızaların %80 oranında kısmi boşalmalara bağlı yalıtım sorunlarından kaynaklandığı standartlarda belirtilmiştir. Meydana gelen bu hasarlar, yüksek gerilim sisteminin zarar görerek çalışamaz hale gelmesine sebep olabildiği gibi ölümle sonuçlanabilen kazalara da yol açabilmektedir. Dolayısıyla, bu boşalma olaylarının sınıflandırılması, olası arıza türünün ve yerinin önceden tespit edilmesi ve buna göre gerekli önlemlerin alınması, hem sistemin kesintisiz çalışması, hem de olası istenmeyen iş kazalarının önüne geçilmesi açısından büyük önem arz etmektedir.

Doktora tez çalışması kapsamında orta gerilim dağıtım şebekesinin en önemli bileşenlerinden olan ve sistem için maliyet açısından büyük önem arz eden orta gerilim kablolarında meydana gelen KB'lerin türlerinin ve konumlarının belirlenmesi uygulamaları yenilikçi yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ilk adım olarak farklı boşalma olayının gözlemlenebilmesi amacıyla, çapraz bağlı polietilen yalıtımlı (cross linked polyethylene-XLPE) kablolar üzerinde yapay hasarlar oluşturulmuştur. Bu hasarlar kablonun dielektrik kısmında meydana getirilmiştir. Kablo imalatı veya montajı sırasında oluşabilecek kusurların benzetimi yapılmıştır. İkinci aşamada ise, ilk aşamada

Üretilen, yalıtımlarında belirli noktalarda hasarlanmış kablo numunelerine, çeşitli genliklerde yüksek gerilimler uygulanarak çok sayıda farklı deney yapılmıştır. Çeşitli verilerin toplanması sağlanmıştır. Deneyler esnasında kısmi boşalma verileri kablolar üzerinden ölçülüp kaydedilmiştir. Deneyler, Afyon Kocatepe Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bünyesinde bulunan yüksek gerilim laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler üzerine, öznitelik çıkarma amaçlı istatistiksel hesaplamalar, Fourier dönüşümleri ve bu dönüşümlerin istatistiksel öznitelikleri, faz çözünümlü kısmi boşalma (phase resolved partial discharge-PRPD) analizleri uygulanmıştır. Destek vektör makineleri, yapay sinir ağları, k en yakın komşuluklar, dalgacık dönüşümleri gibi güncel ve alanda kabul görmüş yöntemler kısmi boşalma verilerine arıza türü ve konumu sınıflandırmak için uygulanmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır. Çalışmanın son adımında, ilk kez bu tez çalışması kapsamında Mycielski-Markov hibrit yaklaşımının farklı kusurlara sahip XLPE kablolarının sınıflandırılmasında ve XLPE kablolarında meydana gelen boşalma olayının modellenmesindeki performansı denenmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

**2020, xii + 84 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Yüksek gerilim, Kısmi boşalma, Sinyal işleme, Destek vektör makineleri, Yapay sinir ağları, Mycielski

## **ABSTRACT**

Ph.D. Thesis

### **INVESTIGATION OF PARTIAL DISCHARGES IN MEDIUM VOLTAGE CABLES WITH ADVANCED SIGNAL PROCESSING METHODS**

Fatih SERTTAŞ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Engineering

**Supervisor:** Prof. Fatih Onur HOCAOĞLU

In the solid and liquid insulators used in medium voltage and high voltage, physical damages occur in a long process due to partial discharges and reach destructive levels. It is stated in the standards that all faults at high and medium voltages are caused by insulation problems due to partial discharges of 80%. These damages can cause the high voltage system to become damaged and fail to work, as well as lead to fatal accidents. Therefore, the classification of these ejaculation events, determining the possible malfunction type and location in advance and taking the necessary precautions accordingly are of great importance in terms of both uninterrupted operation of the system and preventing possible unwanted work accidents.

Within the scope of the doctoral thesis study, the practices of determining the types and locations of partial discharges in the medium voltage cables, which are among the most important components of the medium voltage distribution network and which are of great importance in terms of cost for the system, have been carried out with innovative methods. In this context, as a first step, artificial damages have been created on cross-linked polyethylene insulated (XLPE) cables in order to observe different discharge events. In the second stage, many different experiments were carried out by applying high voltages in various amplitudes to the cable samples produced in the first stage and damaged at certain points in their insulation. During the experiments, partial discharge

data were measured and recorded on cables. Experiments were carried out in the high voltage laboratory of Afyon Kocatepe University Electrical Engineering. Statistical calculations, Fourier transforms and statistical features of these transformations, phase resolution partial discharge (PRPD) analyzes were applied on the obtained data. Current and accepted methods in the field such as support vector machines, neural networks, nearest neighborhoods, wavelet transforms have been applied to partial discharge data to classify the type and location of the fault and successful results have been obtained. In the last step of the study, for the first time, within the scope of this thesis, the performance of Mycielski-Markov hybrid approach in the classification of XLPE cables with different defects and modeling of the discharge occurrence in XLPE cables has been tried and successful results have been obtained.

**2020, xii + 84 pages**

**Keywords:** High voltage, Partial Discharge, Signal processing, Support Vector Machines, Artificial Neural Networks, Mycielski.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Afyon Kocatepe Üniversitesi BAPK Birimi tarafından 18.FEN.BİL.63 numaralı proje desteği ile gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım, saygıdeğer hocam Prof. Dr. Fatih Onur HOCAOĞLU'na, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen kıymetli hayat arkadaşım Dr. Tuba Nur SERTTAŞ'a teşekkür ederim.

Bu araştırma ve tüm hayatım boyunca maddi, manevi desteklerinden dolayı kıymetli aileme ve de mutluluk kaynağım olan biricik kızım Miray'a teşekkür ederim.

Fatih SERTTAŞ  
Afyonkarahisar 2020

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

|                                                                      | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                           | i     |
| ABSTRACT .....                                                       | iii   |
| TEŞEKKÜR .....                                                       | v     |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....                                              | vi    |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....                                 | viii  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                 | ix    |
| RESİMLER DİZİNİ .....                                                | xii   |
| 1. GİRİŞ.....                                                        | 1     |
| 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ .....                                         | 3     |
| 2.1 Kısmi Boşalma Kaynakları.....                                    | 3     |
| 2.2 Orta Gerilim Kablolarında Kısmi Boşalmalar .....                 | 6     |
| 3. MATERYAL ve METOT .....                                           | 9     |
| 3.1 Kısmi Boşalma Ölçümü ve Veri Kaydı Teknikleri .....              | 9     |
| 3.1.1 Kuplaj Kondansatörlü Kısmi Boşalma Ölçüm Sistemi.....          | 10    |
| 3.1.2 HFCT, TEV ve AA Sensörlü Portatif Ölçüm Cihazı.....            | 11    |
| 3.1.3 Kısmi Boşalma Veri Kaydı .....                                 | 16    |
| 3.2 Orta Gerilim XLPE Kablolarıyla Kısmi Boşalma Deneyleri .....     | 18    |
| 3.2.1 Farklı Kusur Türleri ile Kısmi Boşalma Oluşturma.....          | 20    |
| 3.2.2 Farklı Konumlardaki Kusurlar ile Kısmi Boşalma Oluşturma ..... | 22    |
| 3.2.3 Öznitelik Çıkarımı.....                                        | 25    |
| 3.2.3.1 İstatistiksel Öznitelik Çıkarımı.....                        | 26    |
| 3.2.3.1 Fourier Dönüşümü.....                                        | 29    |
| 3.2.3.2 Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) .....                           | 30    |
| 3.2.3.1 Faz Çözünümlü Kısmi Boşalma (PRPD) Analizi .....             | 33    |
| 3.3 Destek Vektör Makineleri.....                                    | 37    |
| 3.3.1 Çok Sınıflı Destek Vektör Makineleri .....                     | 38    |
| 3.4 Yapay Sinir Ağları (YSA) Yöntemi .....                           | 39    |
| 3.4.1 SOM Haritaları.....                                            | 40    |
| 3.4.2 SOM Haritalarıyla KB Sınıflandırma .....                       | 42    |
| 3.5 K En Yakın Komşuluklar Yöntemi .....                             | 42    |
| 3.6 Mycielski Yöntemi .....                                          | 43    |
| 3.6.1 Veri Düzenleme .....                                           | 46    |

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| 3.6.2 Mycielski Yönteminin KB İşaretlerine Uygulanması.....         | 47 |
| 3.7 Dalgacık Dönüşümleri Yöntemi ile Gürültü Süzme.....             | 50 |
| 3.8 Markov Yöntemi.....                                             | 52 |
| 3.8.1 Mycielski - Markov Yöntemi.....                               | 55 |
| 3.8.1.1 Mycielski - Markov Yöntemiyle KB İşaretlerinin Tahmini..... | 55 |
| 4. BULGULAR .....                                                   | 57 |
| 4.1 DVM ile KB Sınıflandırma Sonuçları .....                        | 57 |
| 4.1.1 Kusur Türü Sınıflandırma Sonuçları.....                       | 58 |
| 4.1.2 Arıza Konumlandırma Sonuçları .....                           | 60 |
| 4.2 YSA Sonuçları .....                                             | 61 |
| 4.3 KNN Sonuçları .....                                             | 62 |
| 4.4 Mycielski Yöntemine Ait Sonuçlar .....                          | 63 |
| 4.4.1 Mycielski ile Sınıflandırma Sonuçları .....                   | 63 |
| 4.4.1.1 Mycielski ile Kusur Türü Sınıflandırma Sonuçları .....      | 63 |
| 4.4.1.2 Mycielski ile Kusur Konumu Sınıflandırma Sonuçları.....     | 64 |
| 4.4.2 Kısmi Boşalma Veri Tahmini Sonuçları.....                     | 65 |
| 5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....                                          | 71 |
| 6. KAYNAKLAR.....                                                   | 74 |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                       | 80 |

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

|           |                          |
|-----------|--------------------------|
| Hz        | Hertz                    |
| $\Omega$  | Ohm                      |
| kV        | Kilo Volt                |
| mA        | Mili Amper               |
| pC        | Piko Kulon               |
| $\varphi$ | Elektriksel Gerilim Fazı |

### Kisaltmalar

|      |                                                                                    |
|------|------------------------------------------------------------------------------------|
| AA   | Akustik Kısmi Boşalma Sensör                                                       |
| DFT  | Ayrık Zamanlı Fourier Dönüşümü (Discrete-Time Fourier Transform)                   |
| DGOM | Durum Geçiş Olasılıkları Matrisi                                                   |
| DVM  | Destek Vektör Makineleri                                                           |
| DSO  | Dijital Kayıt Yapabilen Osiloskop (Digital Storage Oscilloscope)                   |
| FFT  | Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)                                    |
| HFCT | Yüksek Frekanslı Akım Trafosu - Rogowski Bobini (High Frequency Current Transform) |
| IDFT | Tersine Ayrık Zaman Fourier Dönüşümü (Inverse Discrete-Time Fourier Transform)     |
| KB   | Kısmi Boşalma                                                                      |
| KNN  | K En Yakın Komşuluk                                                                |
| OG   | Orta Gerilim                                                                       |
| PRPD | Faz Çözünümlü Kısmi Boşalma (Phase Resolved Partial Discharge)                     |
| RMSE | Ortalama Karekök Hatası (Root Mean Square Error)                                   |
| SOM  | Kendini Organize Eden Haritalar (Self-Organizing Map)                              |
| TEV  | Geçici Toprak Gerilimi (Transient Earth Voltage)                                   |
| USB  | Evrensel Seri Yol (Universal Serial Bus)                                           |
| XLPE | Çapraz Bağlı Polietilen (Cross-Linked Polyethylene)                                |
| YG   | Yüksek Gerilim                                                                     |
| YSA  | Yapay Sinir Ağları                                                                 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 3.1 Kuplaj kondansatörlü ölçüm sistemi devre şeması. ....                                                                                | 10    |
| Şekil 3.2 Hat başı deneyi için HFCT ölçümü.....                                                                                                | 14    |
| Şekil 3.3 Hat ortası deneyleri için yapılan HFCT ölçümü. ....                                                                                  | 15    |
| Şekil 3.4 Hat sonu HFCT ölçümleri. ....                                                                                                        | 16    |
| Şekil 3.5 USB veri kaydedici ile ölçülen alternatif gerilim ve KB gerilimi. ....                                                               | 17    |
| Şekil 3.6 KB darbesinin yakından görünümü. ....                                                                                                | 18    |
| Şekil 3.7 Kullanılan XLPE kablunun iç yapısına ait grafik çizim. ....                                                                          | 19    |
| Şekil 3.8 Kullanılan XLPE kablodaki kusurların görünümü (A: kusursuz durum, B: iğne ucu kusuru, C: kılcal çizik, D: kalın çizik).....          | 20    |
| Şekil 3.9 Kusurlara ait detaylı ölçüler. ....                                                                                                  | 20    |
| Şekil 3.10 5 kV gerilim altında kusurlu kablolardaki KB sinyalleri. ....                                                                       | 21    |
| Şekil 3.11 12 kV gerilim altında kusurlu kablolardaki KB sinyalleri. ....                                                                      | 22    |
| Şekil 3.12 Konumlandırma deneylerine ait grafiksel gösterim. ....                                                                              | 23    |
| Şekil 3.13 7 kV gerilim altında çok noktadan arıza ölçümlerinden 3 test sonucu KB sinyali. ....                                                | 24    |
| Şekil 3.14 12 kV gerilim altında çok noktadan arıza ölçümlerinden 3 test sonucu KB sinyali. ....                                               | 25    |
| Şekil 3.15 İğne ucu kusurlu kablodan 5kV’da ölçülen sinyalin Fourier dönüşüm mutlak değeri. ....                                               | 32    |
| Şekil 3.16 Fourier dönüşümlerini karşılaştırmak amacıyla ağ çizimi. ....                                                                       | 32    |
| Şekil 3.17 Deney 1’ e ait 3 boyutlu (a) ve 2 boyutlu (b) PRPD grafiği. ....                                                                    | 34    |
| Şekil 3.18 a) 3 boyutlu b) 2 boyutlu hat ortası (Deney 2) ve c) 3 boyutlu b) 2 boyutlu hat sonu (Deney 3) deneyleri için PRPD grafikleri. .... | 35    |
| Şekil 3.19 Yapay sinir ağı temel yapısı.....                                                                                                   | 40    |
| Şekil 3.20 SOM Mimarisi .....                                                                                                                  | 41    |
| Şekil 3.21 Mycielski algoritmasının önermesi. ....                                                                                             | 44    |
| Şekil 3.22 (a) Ham KB verisi, (b) Filtrelenmiş KB Verisi.....                                                                                  | 46    |
| Şekil 3.23 Mycielski algoritmasının sınıflandırma aşamasında çalışması. ....                                                                   | 48    |
| Şekil 3.24 Sınıflandırılacak olan bir çevrimlik KB ve senkron AC sinyali. ....                                                                 | 49    |
| Şekil 3.25 Mycielski için veri düzenleme sonrası giriş sinyali. ....                                                                           | 49    |

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.26</b> Dalgacık dönüşümü öncesi (a) ve sonrası KB sinyalleri (b).....                                     | 51 |
| <b>Şekil 3.27</b> Durum geçiş olasılıkları (A ve B durum uzayları).....                                              | 53 |
| <b>Şekil 3.28</b> Myicelski Markov algoritmasına ait akış diyagramı.....                                             | 56 |
| <b>Şekil 4.1</b> KB sinyallerinin sınıflandırma sonuçlarına uygulanan k-katlı çapraz<br>doğrulama.....               | 58 |
| <b>Şekil 4.2</b> Standart sapma değerlerinin karşılaştırması (5 kV ve 20 kV Gerilim Altında).<br>.....               | 59 |
| <b>Şekil 4.3</b> Ortalama değerlerin karşılaştırması (5 kV ve 20 kV altında). ....                                   | 60 |
| <b>Şekil 4.4</b> Kılcal Çizik kusurlu kablo için eğitilmiş SOM Haritası. ....                                        | 61 |
| <b>Şekil 4.5</b> a) Kılcal Çizik, b) İğne Ucu, c) Kalın Çizik kusuru ve d) kusursuz kablo için<br>SOM çizimleri..... | 62 |
| <b>Şekil 4.6</b> XLPE kablo üzerinde oluşturulan kusur türleri. ....                                                 | 64 |
| <b>Şekil 4.7</b> Deney 1'e ait tahmin ve ölçülen KB sinyal karşılaştırması. ....                                     | 66 |
| <b>Şekil 4.8</b> Deney 2'ye ait karşılaştırma grafiği. ....                                                          | 67 |
| <b>Şekil 4.9</b> Deney 2'ye ait karşılaştırma grafiğinin yakın versiyonu. ....                                       | 68 |
| <b>Şekil 4.10</b> Deney 3'e ait karşılaştırma grafiği. ....                                                          | 68 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                          | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 3.1 Cihazla yapılan ölçümlerin sonuçları. ....                                                   | 13    |
| Çizelge 3.2 İstatistiksel öznitelik tablosu. ....                                                        | 27    |
| Çizelge 3.3 Arıza konumlandırma çalışması için istatistiksel değerler tablosu. ....                      | 29    |
| Çizelge 3.4 12 kV gerilimde, kablo üzerinde çok noktadan ölçülen verilerin istatistiksel değerleri. .... | 29    |
| Çizelge 3.5 Durum geçiş olasılıkları matrisinin bir bölümü. ....                                         | 54    |
| Çizelge 4.1 Veri gruplarının sınıflandırma başarısına etkileri. ....                                     | 57    |
| Çizelge 4.2 Kısmi boşalma sinyalleri için kaynak sınıflandırma sonuçları. ....                           | 58    |
| Çizelge 4.3 Arıza konumlandırma çalışması sınıflandırma sonuçları. ....                                  | 60    |
| Çizelge 4.4 13 noktadan ölçümlerin farklı şekillerde sınıflandırma sonuçları. ....                       | 61    |
| Çizelge 4.5 KNN ile sınıflandırma sonucu. ....                                                           | 63    |
| Çizelge 4.6 Mycielski ile kusur türü sınıflandırma sonucu. ....                                          | 64    |
| Çizelge 4.7 Mycielski ile arıza konumu sınıflandırma sonucu. ....                                        | 65    |
| Çizelge 4.8 Mycielski ile KB sinyali tahmin sonucu. ....                                                 | 65    |
| Çizelge 4.9 Karşılaştırmalı sınıflandırma sonuçları. ....                                                | 69    |
| Çizelge 4.10 Sınıflandırma yüzdelерinin literatürdeki çalışmalarla karşılaştırması. ....                 | 69    |

## RESİMLER DİZİNİ

|                                                                                | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Resim 3.1</b> Kuplaj kondansatörlü ölçüm sistemi görüntüsü.....             | 11    |
| <b>Resim 3.2</b> HVPD PDS Insight markalı portatif KB ölçüm cihazı .....       | 12    |
| <b>Resim 3.3</b> HFCT ile kablodaki KB sinyallerini ölçme işlemi .....         | 13    |
| <b>Resim 3.4</b> Picoscope 5204 USB Osiloskop ve TA041 Diferansiyel Probu..... | 17    |
| <b>Resim 3.5</b> Kablo konumlandırma deney düzeneğinin görünümü .....          | 23    |



## 1. GİRİŞ

Elektrik ekipmanlarının yalıtım sistemlerini oluşturan malzemelerin hem kimyasal hem de fiziksel olarak bozulmasına yol açabilecek kısmi boşalma (KB), tıkanmış gaz halindeki boşluklarda veya yüksek gerilimlere maruz kalan yalıtkan içindeki ara yüzlerdeki boşluklarda meydana gelebilir. Bu tür boşalmaların (deşarjların) dış yüzeyde gerçekleşmesi olayı korona olarak adlandırılır. Boşalmalar tespit edildiğinde ve büyüklükleri ölçüldüğünde, boşalmanın kaynağını, geometrik konfigürasyonunu, boyutunu ve yerini tanımlayabilmenin yanı sıra darbe örüntüsünü herhangi bir yabancı parazitten ayırt edebilmek de oldukça büyük öneme sahiptir (Sahoo vd. 2005).

Temelde, fiziksel olarak kısmi boşalma, küçük bir boşluk içerisinde oluşan Townsend boşalmasıdır. Bu küçük boşlukta, az sayıda serbest elektronun güçlü bir elektrik alan ile hızlandırıldığı ve sonucunda elektriksel iletkenliğin olduğu bir gaz iyonlaşma süreci gerçekleşir. Kondansatöre benzer bir fiziksel özellik göstermektedir. Modellemelerde kapasite eşdeğerleriyle ifade edilmektedir. Boşalma örüntüsünü içeren boşalma darbelerinin daha önemli özelliklerinden bazıları genlikleri, yükselme süresi, tekrarlama oranı, uygulanan alternatif gerilime (boşalma dönemleri) göre oluşumun faz ilişkisi ve önceki ile ardışık darbelere olan zaman aralığıdır.

Elektriksel ve termal açıdan oldukça dayanıklı teknik özellikleri ile çapraz bağlı polietilen (XLPE) yeraltı kabloları, tüm alternatif akım (AC) gerilim seviyeleri için yeni kurulan sistemlerdeki kablo sınıfına giderek daha fazla hâkim olmaktadır. Öte yandan, uzun süre kullanımda olduğunda, kablo sistemlerinde daha yüksek arıza olasılığı ortaya çıkmaktadır. Yeraltı kablolarında meydana gelen birçok arıza üçüncü taraf hasarlarından kaynaklanmaktadır. Arızaların önemli bir kısmı da kablo yalıtım sistemindeki, özellikle kablo aksesuarlarındaki dâhili kusurlardan kaynaklanmaktadır. Bu, kurulum sırasında ortaya çıkan yalıtım ara yüzey kusurlarından kaynaklanmaktadır (Wu vd. 2019).

XLPE kablolarda yalıtım hataları, özellikle eklerde ve sonlandırmalarda, çoğunlukla da yerel kusurlara bağlı olarak yetersiz imalat veya kötü montaj işçiliğinden kaynaklanmaktadır (Zheng vd. 2011). KB kaynağıyla (arıza veya bozulma) bir ilişki olduğunun iyi bilinmesi nedeniyle, KB bulma ve örüntü tanıma, kusurların tipi veya

şiddeti veya potansiyeli hakkında bilgi vermek için bir araç olarak yaygın şekilde kabul edilmiştir. Bu da kablo aksesuarlarının onarımı veya değiştirilmesi konusunda tavsiyeler vermelidir. Bu nedenle bugüne kadarki araştırmaların çoğu bu konuyu ele almaktadır.

Tez çalışmasında, piyasada yaygın olarak kullanılan orta gerilim (OG) XLPE kablolarına yapay kusurlar oluşturulmuş ve laboratuvar ortamında yüksek gerilimler altında kısmi boşalma sinyalleri ölçülerek kaydedilmiştir. Kısmi boşalmalar için farklı kusur türleri ve bir kusurun farklı konumları kullanılmış, 900'e yakın deney gerçekleştirilmiş, böylece kaynak tipi ve konumu tespit edilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sinyaller, istatistiksel öznitelik çıkarımlarının yanında Fourier dönüşümü tabanlı yenilikçi öznitelikleri kullanılarak; destek vektör makineleri, yapay sinir ağları, k en yakın komşuluklar yöntemi gibi geleneksel yöntemlerle sınıflandırılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Doktora tez çalışmasında, yüksek gerilim alanında daha önce hiç uygulanmamış yeni bir yöntem kısmi boşalma sinyallerine uyarlanarak literatüre kazandırılmıştır. Mycielski - Markov yöntemi olarak adlandırılan, örüntü tarama ve olasılıksal modelleme tabanlı bu hibrit yöntem, arıza sınıflandırma ve kısmi boşalma sinyallerinin tahmin edilmesinde kullanılmış ve başarılı sonuçlara ulaşılmıştır.

## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

### 2.1 Kısmi Boşalma Kaynakları

Kısmi boşalmalar yüksek gerilim elektrik sistemlerinin olduğu her yerde boy gösterebilmektedir. Trafolar (Yuan vd. 2008, Wang vd. 2017, Dukanac 2018), yüksek gerilim kabloları(Sahoo vd. 2005), anahtarlama elemanları (Liu vd. 2012), izolatörler yaygın olarak üzerinde kısmi boşalma deneyleri yapılan elektriksels elemanlardır.

Kısmi boşalmalar incelenirken doğru ölçümler ve bu ölçümlerden elde edilen veriler çok önemlidir. Kısmi boşalma verileri farklı şekillerde ele alınmaktadır. Literatürde çeşitli çalışmalarda kullanılan KB verileri genel itibariyle üçe ayrılmaktadır. Bunlar faza bağlı veriler, zamana bağlı veriler ve faz-zaman bilgisi olmayan verilerdir (Madonia vd. 2017). Faza bağlı veriler, alternatif akım test geriliminin dalga şekliyle ilintili olarak elde edilir. Test gerilimi sabit tutulur ve gerilimin fazı küçük aralıklarda uygun sayıya bölünür. Kısmi boşalma darbelerinin gerçek şekillerine ilişkin bilgi içermez. Farklı faz değerleri için darbe sayısı, ortalama yük, yük tepe değerleri elde edilir. Zamana bağlı verilerde ise KB verisinin gerçek şekli elde edilir. Kusurun, fiziksel özellikler ve KB şekli hakkında doğrudan ilişki içermesi ve daha düşük maliyetli cihazlarla ölçümlerin yapılabilmesinden dolayı sık tercih edilmektedir. Faz-zaman bilgisinin mevcut olmadığı kısmi boşalma darbe verilerinin tipik bir örneği, bir test çevriminde KB histerezis etkisini göstermek için test geriliminin değişken genliklerinde boşalma büyüklüğünün ölçülmesiyle elde edilen  $q$ - $V$ 'dir. Boşalmadaki gerilim ( $V_{KB}$ ), denklem (2.1)' de verilen Paschen kanunuyla açıklanabilir.

$$V_{KB} = \frac{\beta \cdot p \cdot d}{X + \ln(p \cdot d)} \quad (2.1)$$

Burada kritik parametreler boşluğu boyutunu ifade eden ve yarıçap olan  $[d]$ , iç basınç  $[p]$ ' dir.  $\beta$  ve  $X$  boşluktaki gazla ilgili sabitleri ifade etmektedir.

Faz çözümlenmiş verilerde boşalma darbelerinin gerçek şekilleri hakkında bilgi yoktur (Sahoo vd. 2005). Tersine, zaman tabanlı veri modeli, yani  $q(t)$  verileri, tekil KB

darbelerinin gerçek şekillerini gösterir (Arora vd. 2017, Lalitha ve Satish 2000, Salama ve Bartnikas 2002). Yine, test gerilimi sabit olarak kabul edilir. Bu veri örüntüsünün önemli avantajları vardır, çünkü arızanın fiziği ile KB sinyalinin şekli arasında doğrudan bir ilişki vardır. Ayrıca, ölçüm prosedürü, faz çözümlemeli ölçümler için gerekli olandan daha düşük maliyetli ekipman kullanımını içerir. Dahası, yalıtım malzemelerinin kullanılması, bu veri modellerinden daha kolay bir şekilde gözlemlenebilir, çünkü bu, kısmi boşalma (KB) darbesinin şeklini belirgin bir şekilde değiştirir. İlke olarak, her KB kaynağı tipi, eşsiz bir KB parmak izi verir. Araştırmacılar, tipik kablo aksesuar kusurlarını, ilgili KB imzalarıyla ilişkilendirmektedir (Raymond vd. 2017).

KB darbelerinin enerjisi, KB faaliyetlerinin özelliklerini incelemek için faydalıdır. Chen vd. (2017) beyaz gürültü ve dar bant gürültüsü varlığında KB darbelerinin enerjisini tahmin etmek için bir yöntem önermektedir (Rizzi vd. 2009). Önerdikleri yöntemde ilk olarak, enerji spektrumu katsayılarının olasılık dağılımından darbe enerjisinin maksimum benzerlik tahmincisi türetilmektedir. Maksimum benzerlik yöntemini uygulamak için örneklenen veriler, sinyal ve gürültü katmanlarına bölünür. Daha sonra gürültü katmanları, 3F-C yöntemini kullanarak gürültü parametrelerini ayıklamaktadır. Sonunda, bu gürültü parametreleri, darbe enerjisinin maksimum benzerlik tahminini bulmak için sinyal katmanlarına uygulanmaktadır. Kısmi boşalma darbelerinin analizinde, özdeğer analizi, Marchenko - Pastur (M-P) kanunu, halka kanunu gibi yöntemlerin yanında Rassal Matris Teorisi (Random Matrix Theory) yöntemi de kullanılmaktadır (Xu vd. 2016). Gürültülü kısmi boşalma sinyallerinin modellenmesinde modern istatistiksel matematik aracı olan rassal matris teorisi ile örüntü tanıma tabanlı bir yöntem geliştirilmiş ve laboratuvar ortamında üretilen farklı kısmi boşalma sinyallerinde uygulanmıştır. Görüldüğü üzere kısmi boşalma sinyallerinde gürültüleri süzme işlemleri başlı başına birer süreçtir (Hucker ve Krantz 1995).

Destek vektör makineleri kısmi boşalma işaretlerinin farklı özellikleriyle sınıflandırılmasına son yıllarda yaygın olarak rastlanmaktadır (Arora vd. 2000, McDonnell ve Bentley 1999). Sarathi vd. (2013) kısmi boşalma işaretlerini destek vektör makinelerini kullanarak; korona boşalması, yüzey boşalması, dâhili boşalma, akışkan parçacık boşalması, trafo yağı boşalması ve parçacık hareketi boşalması olarak

sınıflandırmışlar ve bu sınıflandırmalarda sırasıyla %100, %98.98, %99.62, %99.98, %100 ve %100 başarı oranı elde etmişlerdir. Sonuçlar DVM'in özellikle korona boşalmalarını sınıflandırmada büyük başarıya sahip olduğunu göstermektedir. Chan vd. (2013) kesikli dalgacık dönüşümü ve empirik mod ayrıştırma yöntemlerini kısmi boşalma işaretlerini ayrıştırmak ve destek vektör makinelerini de bu işaretleri sınıflandırmak için kullanmışlardır. Bulgular, ayrıştırılmış işaretlerden çıkarılan özelliklerin, orijinal KB işaretlerinden özümsemiği geleneksel yöntemle karşılaştırıldığında daha yüksek sınıflandırma doğruluğu sağladığını göstermektedir. Ambikairajah vd. (2013), kısmi boşalma işaretlerinin spektral özniteliklerini çıkarmışlar ve buna bağlı olarak sınıflandırma gerçekleştirmişlerdir.

Kısmi boşalma sinyallerinin işlenmesinde Fourier (Nimsanong vd. 2016), Dalgacık dönüşümleri (Chen vd. 2016, Eigner ve Rethmeier 2016), Haar ve Walsh (Luo vd. 2017) dönüşümleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Faza bağlı üç boyutlu (faz-darbe sayısı-yük değeri) örüntülerden oluşturulan resimlerle görüntü işleme teknikleri kullanılarak da öznitelik çıkarımı yapılmaktadır (Sahoo vd. 2005).

Mas'ud vd. (2016), istatistiksel parmak izlerinin KB  $\phi$ -q-n (faz-yük-adet) modellerinin farklı faz çözünürlüğü (phase resolution-PR) ve genlik boyutlarına (GB) duyarlılığını araştırmışlardır. Çalışmalarında, u-q-n boşalma düzeninin farklı çözünürlük boyutlarını tanıma ve ayırmada, topluluk sinir ağı (ensemble neural network-ENN) ve tek sinir ağı (single neural network-SNN) yeteneğini karşılaştırmışlardır. Hem SNN hem de ENN için eğitim parmak izleri, farklı  $\phi$ -q-n ölçümlerinden istatistiksel parmak izleri içerir. Sonuç, istatistiksel parmak izlerinin bazılarında farklı PR ve GB boyutları için istatistiksel ayırım bulunduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, ENN ve SNN çıktıları, farklı PR ve GB boyutlarıyla eğitim ve teste bağlı olarak değişir. Dahası, ENN, çözünürlük değişikliklerini SNN'ye kıyasla tanıma ve ayırt etmede daha duyarlı görünmektedir. Son olarak, sonuçlar enerji endüstrisinde pratik uygulama açısından değerlendirilir ve uygulayıcılara sağlanan faydalar vurgulanır. Bu çalışmaya benzer olarak, güncel bir çalışmada ise derin sinir ağları yöntemi (derin öğrenme) kısmi boşalma sinyallerini anlamlandırmada kullanılmıştır (Catterson vd. 2015). Bu çalışmada mineral yağ üzerinde farklı tiplerde KB'ye yol açacak kusurlar üretilmiş ve ölçülen sinyaller üzerinden kusurlar yapay sinir

ağları ve derin sinir ağları yöntemiyle sınıflandırılmıştır. Derin sinir ağlarıyla sınıflandırmada başarı oranı %72' den %86' lara çıkmıştır.

Yalıtım durumunu verimli bir şekilde değerlendirmek için hava yalıtımlı trafo merkezlerinde KB konumlandırması kullanılabilir (Chan vd. 2015). Li vd. (2017) çalışmalarında, konumlandırma sonucunun doğruluğunu iyileştirmek ve muhtemel hata dağılımını bildirmek için yönlendirme antenine ve çoklu nokta ölçümüne dayanan yeni bir konumlandırma yöntemi önermişlerdir. Testlerini 220 kV'da gerçekleştirmişler ve sonuçları mevcut bir yöntemle karşılaştırmışlar, önerdikleri yöntemin daha başarılı bir yöntem olduğunu kanıtlamışlardır.

## **2.2 Orta Gerilim Kablolarında Kısmi Boşalmalar**

1960'lardan 1980'lere kadar, hem yüksek gerilimde hem de ekstra yüksek gerilim (YG) sistemlerinin yalıtımlarında sıvı dolu sistemler üstünlük sağlamaktaydı (Gregory 2000). Bu performans 1980'lerde ve 1990'larda çok yüksek gerilimdeki uygulamalar için düşük kayıplı polipropilen kağıt laminat (polypropylene paper laminate-PPL) kablo sisteminin evrimine yol açmıştır. 1970'ler ve 1980'lerde, OG ve YG'de XLPE kabloların gelişimi görülmüştür. 1990'larda, 275 kV ve üzerindeki ilk gerçek XLPE iletim sistemlerinin tanıtımı yapılmıştır.

Üretici firmalar tarafından yüksek gerilim iletim kabloları ile ilgili olarak cevaplanması istenilen soru, hangi KB yönteminin hangi uzunluktaki kabloların kullanımına olanak sağladığıdır (Van Brunt vd. 1993). KB' nin algılanabileceği azami kablo uzunluğu ile ilgili soru çeşitli faktörlere bağlı olarak farklı cevaplara sahip olabilmektedir. Van Brunt vd. çalışması, bir kablo üzerinde gezinirken KB darbe zayıflamasını araştırmak için simülasyon araçlarını kullanarak ve hem YG hem de AG polimerik kabloları düşünülerek, cevapların türetilebileceği bir çerçeve sunmaktadır. Gürültünün ve bir KB aracının gürültüyü reddetme veya gürültü seviyesinin altında bile KB darbelerini ölçme kabiliyeti tarafından üstlenilen önemli rol vurgulanmaktadır.

Zheng vd. (2011), yüksek gerilimlerde kullanılan XLPE kablolarında yalıtımın kısmi olarak bozulmasına bağlı meydana gelen kısmi boşalmalarda konum tespiti amacıyla

çeşitli sensörleri (yüksek frekanslı akım trafosu, ultra yüksek frekans ve akustik sensörler) kullanarak veri kaydetmişlerdir (Li vd. 2012). Çalışmalarında varış zamanı analiziyle kablo üzerindeki KB konumunu araştırmışlardır. Yayılma hızına göre ölçtükleri sinyallerin konumlarını teorik olarak hesaplatmış ve çeşitli sensörlerle uygulamalı olarak deneyip karşılaştırmışlardır. Büyük ölçüde doğrulukla konumlandırma işlemini gerçekleştirmişlerdir.

Raymond vd. (2017) XLPE kabloların en zayıf yerleri olan bağlantı noktalarında meydana gelebilen KB'ler üzerine yaptıkları çalışmada, yüksek gürültü toleranslı bir temel bileşenler analizi (Principal Component Analysis) tabanlı öznitelik çıkarma modeli önermişlerdir (Evagorou vd. 2010). 11 kV gerilim altında 3 metre uzunluğundaki XLPE kablolar ile yaptıkları deneylerde sınıflandırmak üzere, 5 çeşit kusur oluşturmuşlardır. Çıkardıkları özniteliklerden yapay sinir ağları ve destek vektör makineleri için girişleri oluşturmuşlar, sınıflandırma yapmışlar ve diğer modeller ile karşılaştırmışlardır. İstatistiksel öznitelikler ile destek vektör makinelerinin birlikte kullanımından en yüksek sınıflandırma doğruluğu oranını elde etmişlerdir.

Rizzi vd. (2007) katı dielektrik preslenmiş güç dağıtım kablolarının sonlandırmalarında ve eklemlerinde kısmi boşalma (PD) darbe modellerinin tanımlanması için bir teşhis sistemini optimize edebilen bir genetik algoritmaya dayanan otomatik bir prosedür geliştirmişlerdir. Geliştirilen prosedür, kablolarda ve diğer elektrikli cihazlarda kısmi boşalma kaynak tanımlamasına uygulanacak kadar genel bir prosedürdür.

Kısmi boşalma özniteliği çıkarma, XLPE kablo kusur modelleri sınıflandırmasında önemli bir işleme prosedürüdür. Dalgacık alanındaki öznitelik çıkarımı için, genellikle alt bantların enerjileri çıkarılır. Bununla birlikte, bir alt bandın enerjisi sadece belirli bir özelliktir. Xu vd. (2016) tarafından XLPE kablo kusur modelleri sınıflandırması için verimli bir öznitelik çıkarma yöntemi önerilmektedir. Bulanık c-ortalamlar kullanılarak öznitelik çıkarımı yapılmıştır. Önerilen yöntemin, mevcut 4 farklı KB sınıflandırma yönteminden daha iyi olduğu kanıtlanmıştır.

Madonia vd. (2017), XLPE yalıtımlı bir OG kablosunun 500 m' lik bir teslimat uzunluğunun KB testi sırasında ortaya çıkan bazı kritik sorunları anlatmaktadır. İlk önce, geleneksel kısmi boşalma ölçümleri standart bir kazanım sistemi kullanılarak tüm uzunlukta gerçekleştirilmiş; KB aktivitesi tespit edilmiş, ancak sistem operatörünün KB' leri yalnızca 70 m uzunluğunda konumlandırmasına izin verilmiştir. Bu bölümün görsel olarak incelenmesi, dış tabakada bir eksorasyon (derinin yüzülmesi) varlığını vurgulamıştır. Kusurun daha doğru bir iğne işaretlemesini hedefleyen taşınabilir bir KB algılama sistemi kullanılarak dış kusurun yakınında daha fazla ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu, KB algılama taşınabilir araçlarının, böyle durumlarda KB kaynağının bulunması ve doğru sınıflandırılması için göstergeler sağlayabildiğini ispatlamaktadır.

Orta gerilim güç kabloları, elektrik güç dağıtımının önemli bir unsurudur. XLPE yalıtımı ve kablo aksesuarlarında meydana gelen kablo arızalarının çoğu yalıtım hatasından kaynaklanmaktadır. Bu araştırma çalışması (Li vd. 2017), polarizasyon ve depolarizasyon akımı ölçümü, IEC 60270'e göre klasik kısmi boşalma ölçümü ve yüksek frekansla ölçülen yüksek frekanslı akım ölçümünü kullanarak kablo bağlantılarını içeren 12/20 (24) kV XLPE güç kablolarının dielektrik incelemesini temsil etmektedir. Bu araştırmada yapılan altı vaka çalışmasında; vaka 1: koruyucu kılıf hasarı, vaka 2: yarı iletken tabaka hasarı, vaka 3: haddelenmiş kabloda boşluk kusuru, vaka 4: kablo eklemesindeki haddelenmiş kabloda boşluk kusuru, vaka 5: yarı iletken kablo mafsalında kirletici madde ve vaka 6: kablo mafsalında iletken kirletici olarak incelenmiştir. Test sonuçları, kablo yalıtımının polarizasyon ve kutuplaşma akımının iki temel özelliğinin eklem sorunları olan kabloların sınıflandırılması için kullanılabileceğini göstermiştir.

### 3. MATERYAL ve METOT

Doktora tez çalışmasının deneysel bölümü çalışmaları için, Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan yüksek gerilim laboratuvarı altyapısı kullanılmıştır. Tez çalışması kapsamında laboratuvar altyapısına ilave olarak KB test düzeneği kurulumu gerçekleştirilmiştir. Laboratuvarda mevcut bulunan 50 kV yüksek gerilim trafosuna, kuplaj kapasitörü, gerilim bölücü, osiloskop ve veri kaydedici bağlantısı yapılabilen test düzeneği bağlantısı yapılmıştır. Ayrıca, yine tez çalışmasına paralel olarak hazırlanan bir proje ile laboratuvara, Rogowski bobinli (yüksek frekanslı akım trafosu-high frequency current transform-HFCT), akustik sensörlü (airborne acoustic-AA) ve geçici toprak gerilimi (transient earth voltage-TEV) sensörlü portatif KB ölçüm cihazı alımı yapılmış ve bu cihazla da testler gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında kullanılan cihazların ve deneylerde kaydedilen verilerin detaylı anlatımı Bölüm 3.1’ de verilmiştir. Ardından 50 mm<sup>2</sup>, 36 kV OG XLPE kablo kullanılarak numuneler hazırlanmış ve çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin kapsamlı anlatımı Bölüm 3.2’ de sunulmuştur. Kısmi boşalma verilerinin elde edilmesini takiben literatürde mevcut bulunan, doğrulukları kabul görmüş yöntemlerle KB verilerinin analizi yapılmıştır. Destek vektör makineleri (Bölüm 3.3), yapay sinir ağları (Bölüm 3.4) ve k en yakın komşuluk yöntemi (Bölüm 3.5) bu yöntemleri oluşturmaktadır. Geleneksel yöntemlerin kullanımında, tez çalışmasına özgü yenilikçi KB öznelilikleriyle doğru sonuçlar üretilmiştir. Tez çalışmasının özgün yöntemi olan ve yüksek gerilim çalışmalarında daha önce uygulanmamış olan Mycielski yöntemi Bölüm 3.6’ da sunulmuştur. Kısmi boşalma sinyallerinde gürültü süzme işlemi için tercih edilen dalgacık dönüşümleri yöntemi ve Mycielski yöntemi için tamamlayıcı nitelikte kullanılan Markov yöntemi ise Bölüm 3.7 ve 3.8’ de verilmiştir.

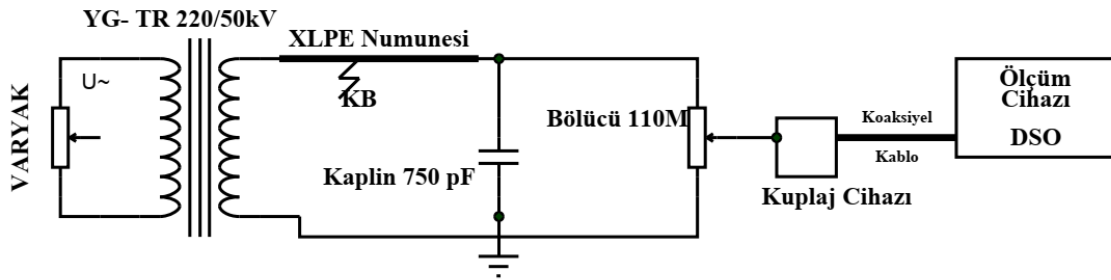
#### 3.1 Kısmi Boşalma Ölçümü ve Veri Kaydı Teknikleri

Tez çalışması kapsamında veri olarak; zaman serisi formunda KB sinyalleri ve KB’lerin kapasite değerleri (pC), KB’lerin belirli bir periyot için oluşma sıklıkları ve tepe değerleri kullanılmıştır. Zaman serisi formunda KB sinyallerinin elde edilmesi kaplin (kuplaj) kapasitörlü deney düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. Bu deney düzeneği Bölüm 3.1.1’ de

detaylı anlatılmıştır. Yüksek frekanslı akım trafosu olan Rogowski bobinli (HFCT), TEV ve AA sensörlü portatif cihaz ve yapılan ölçümlere ait detaylar Bölüm 3.1.2’ de verilmiştir. Yüksek frekans ve bant genişliğinde, aktif ölçüm kaydı yapabilme kapasitesine sahip USB osiloskop ile elde edilen zaman serisi formunda KB verilerinin kaydı ise Bölüm 3.1.3’ de sunulmuştur.

### 3.1.1 Kuplaj Kondansatörlü Kısmi Boşalma Ölçüm Sistemi

Tez projesi kapsamında Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan yüksek gerilim laboratuvarına kurulumu gerçekleştirilen kuplaj kondansatörlü geleneksel KB ölçüm düzeneği devre şeması Şekil 3.1’ de, görüntüsü ise Resim 3.1’ de sunulmuştur.



Şekil 3.1 Kuplaj kondansatörlü ölçüm sistemi devre şeması.

Düzenek üzerine bir adet 0,22/50 kV yüksek gerilim transformatörü, 750 pF kaplin (kuplaj) kapasitörü, 110 MΩ rezistif gerilim bölücü, kuplaj cihazı koaksiyel kablo ve dijital osiloskop bulunmaktadır. Tüm elektriksel ekipmanlar Faraday kafesi içerisinde bulunmaktadır. Varyak ile giriş gerilimi kontrol edilmektedir. Laboratuvar binasının çevresi de faraday kafesi içerisinde, sıvaların altında metalik sac bulunmaktadır. Laboratuvarında bulunan spektrum analizörü, KB gerilimlerinin frekans spektrumunun incelenmesinde kullanılmaktadır.



**Resim 3.1** Kuplaj kondansatörlü ölçüm sistemi görüntüsü.

Varyak kontrollü transformatör, 0,22/50 kV dönüştürme oranına sahip bir yüksek gerilim trafosudur. Yüksek gerilim testlerinde kullanım amaçlı üretildiği için akım değeri 50 mA seviyelerindedir.

### **3.1.2 HFCT, TEV ve AA Sensörlü Portatif Ölçüm Cihazı**

Yüksek gerilim ölçümlerinin sistem aktif çalışırken yapılabilmesi, sistemlerin devamlılığı ve ekonomiklik açısından büyük öneme sahiptir. Bu nedenle elektrik piyasasında KB ölçümlerini gerçekleştirebilmek maksadıyla, özellikle durum izleme yapabilmek için portatif KB ölçüm cihazları yaygın olarak kullanılmaktadır. Laboratuvarında bulunan HVPD marka, güncel olarak kalibrasyonu yapılmış PDS Insight modeli cihaz, HFCT, AA ve TEV sensörlerine sahiptir. Cihaz ve çevre birimleri Resim 3.2’ de görülmektedir. Her bir test için, beş saniye süre boyunca KB ölçümü yaparak pikokulon (pC) cinsinden KB değerlerini ölçmektedir. Bu süre sonunda oluşan KB sayısını, maksimum değerini ve etkinliği ölçebilen cihazın Bölüm 3.2.2’ de belirtilen konum değerlerinden elde edilmiş verileri Çizelge 3.1’ de sunulmuştur. Bu değerler orta gerilim XLPE kablusunun toprak bağlantısı üzerine Rogowski bobinin (HFCT) bağlanmasıyla elde edilmiştir. Resim 3.3’ te HFCT ve kablounun bağlantı resmi görülmektedir.



**Resim 3.2** HVPD PDS Insight markalı portatif KB ölçüm cihazı.

HVPD PDS Insight portatif, çevrimiçi (aktif) KB ölçüm cihazının çevre birimleri; HFCT sensörü, akustik ölçüm mikrofonu, parabolik antenli akustik alıcı, durum izleme olanağı sağlayan yazılımı içeren bluetooth bağlantılı tablet bilgisayardır. Cihazın üzerinde TEV sensörü ve barkod okuyucu mevcuttur. Cihazın yanında gelen çok sayıdaki barkod ile çeşitli elektriksel ekipmanların durumlarının KB'ler bakımından zaman içerisinde izlenmesine olanak sağlanmaktadır. Kayıtları bluetooth bağlantılı tablet bilgisayarda tutulmaktadır. Deneyden önce barkod okuyucu ile barkodlar cihaza tanıtılmakta, ardından ölçümler gerçekleştirilmektedir. Böylece verilerin saklanması daha sağlıklı ve kolay bir hale gelmektedir.



**Resim 3.3** HFCT ile kablodaki KB sinyallerini ölçme işlemi.

Parabolik anten, yüksek gerilim hatlarının altından korona boşalmalarını ölçmeye olanak sağlamaktadır. Antenin lazerli işaretçisi bulunmaktadır. Lazer ışığını gündüz daha net görebilmek amacıyla bir de özel filtreli gözlüğü mevcuttur. Akustik anten de benzer şekilde sesle ancak yakın mesafeden ölçüm yapmaktadır. Özellikle panolardaki sesli KB'ler için ölçüm yapmaya olanak sağlar. HFCT sensörü, tez çalışmasında da faydalandığı şekilde kablolardan ölçüm yapmaya olanak sağlamaktadır. Bobin kelepçesi (klamp) içerisinde toprak bağlantısı yönünü gösteren ok mevcuttur.

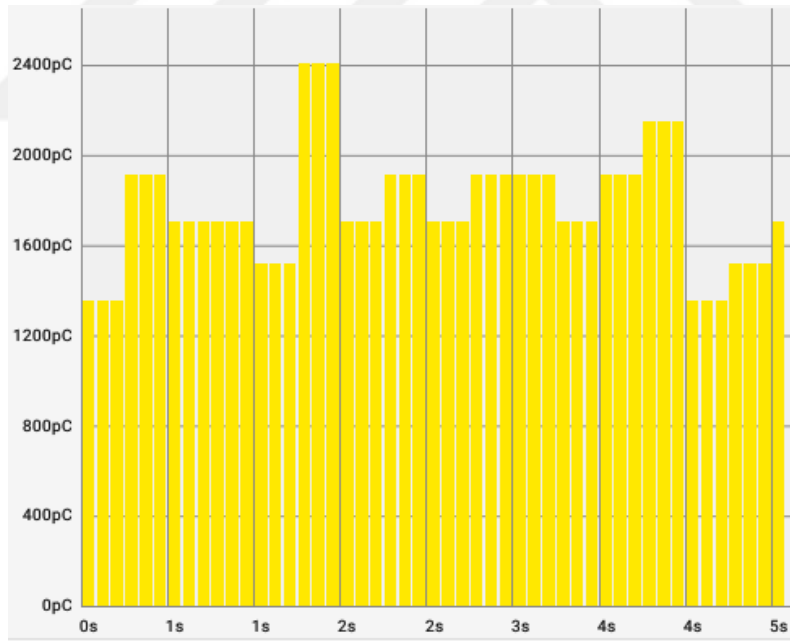
Cihazın ölçüm yapıp yapmadığını test edebilmek amacıyla, şarj etmek için üzerinde durduğu dock station (evrensel bağlantı noktası çoğaltıcısı ve durma standı) içerisinde referans KB sinyali mevcuttur. Bu sayede cihaz test edilebilmektedir.

**Çizelge 3.1** Cihazla yapılan ölçümlerin sonuçları.

|                   |          |                 |
|-------------------|----------|-----------------|
| <b>Hat Başı</b>   | Tepe     | 1706,8 pc       |
|                   | Sayım    | 24/çevrim       |
|                   | Etkinlik | 15556 pc/çevrim |
| <b>Hat Ortası</b> | Tepe     | 1521,2 pC       |
|                   | Sayım    | 27/çevrim       |
|                   | Etkinlik | 18475 pc/çevrim |
| <b>Hat Sonu</b>   | Tepe     | 1706,8 pc       |
|                   | Sayım    | 19 /çevrim      |
|                   | Etkinlik | 11549 pC/çevrim |

Çizelge 3.1’de görüldüğü şekilde değerler birbirine yakın seyretmektedir. Bu nedenle yalnızca bu cihazla yapılan ölçümlerin de sinyalleri ayırt etmede yeterli olmayacağı anlaşılmıştır. Ancak ölçümlerin kapasite değerlerini göstermek amacıyla tez çalışmasına eklenmiştir. Ayrıca literatürde çoğu testte, kusurlar dielektrik malzemesi üzerine doğrudan yapılmamaktadır. Bu çalışmada, yapay kusurların dielektrik malzeme üzerinde oluşturulmasının kapasite değerlerinin farklılığına sebep oluşturabileceği düşünülmektedir.

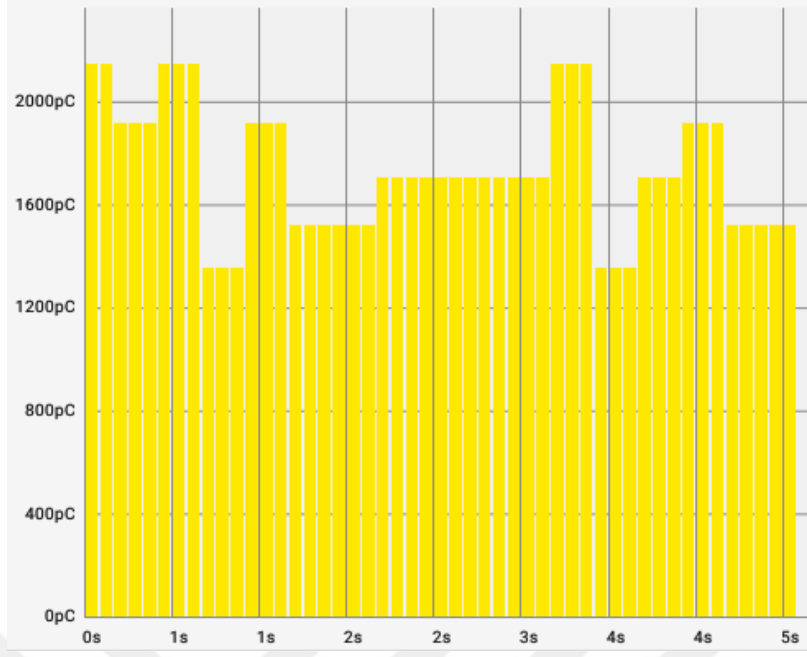
Portatif KB ölçüm cihazıyla yapılan arıza konumlandırma deneylerinden hat başı deneyi için ölçüm grafiği Şekil 3.2’ de sunulmuştur. Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te “x” eksen zaman, y eksen ise kapasite değerine karşılık gelmektedir. Birinci saniyenin sonlarında yüksek kapasitif değerler gözlenmiştir. Grafiğin sarı renkte görülüyor olması KB’nin az riskli olduğunu göstermektedir. Genellikle KB’lerin değerlerinin 1600 pC ile 2000 pC arasında değiştiği gözlenirken, 2400 pC ve 1350 pC değerlerine ulaştığı da görülmektedir.



**Şekil 3.2** Hat başı deneyi için HFCT ölçümü.

Şekil 3.3’ te hat ortası deneyleri için HFCT ölçümü sunulmaktadır. Bu deney için de 2’nci saniyenin başlarında tepe noktalarda KB’ler gözlenmiştir. Benzer şekilde grafik yine sarı renktedir. Cihazın özelliği olarak, KB değerleri kritik seviyelerde bulunuyorsa ve boşalma yakınsa kırmızı renkte görülmekte, az riskli ise sarı renkli ve risksiz durumdaysa





Şekil 3.4 Hat sonu HFCT ölçümleri.

### 3.1.3 Kısmi Boşalma Veri Kaydı

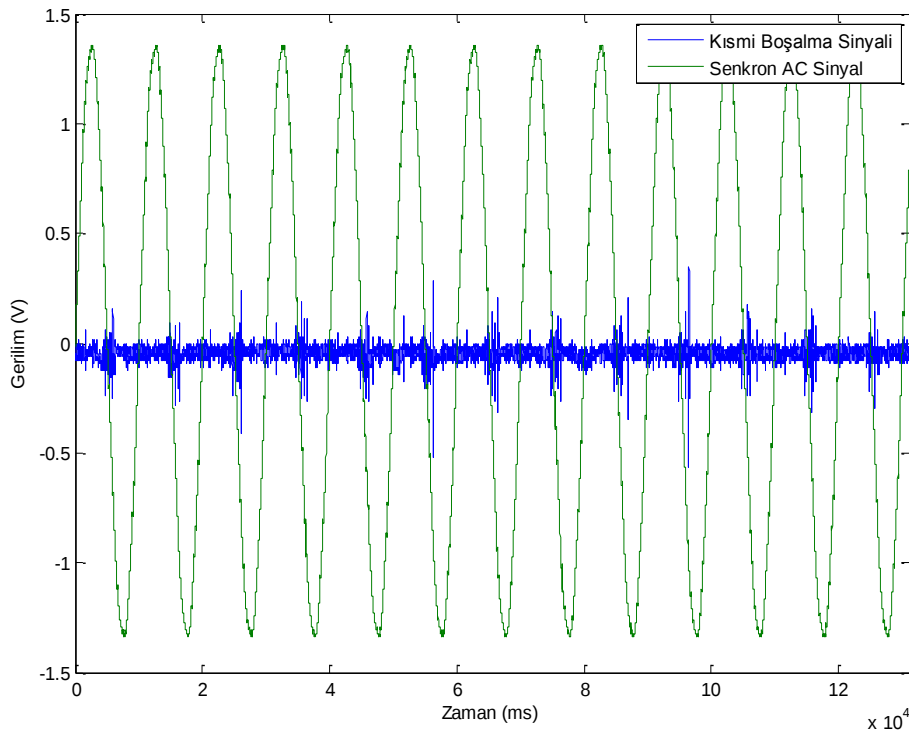
Kısmi boşalma verilerinin kaydı için yüksek frekans ve bant genişliğinde bir aktif veri kaydediciye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle tez projesi kapsamında, Resim 3.4’de görülen Picoscope 5204 modeli temin edilmiş ve veri kaydında kullanılmıştır. Programlanabilir USB osiloskop olarak kullanılan cihaz aynı zamanda aktif olarak doğrudan bilgisayar belleğine veri kaydedebilme özelliğine sahiptir. Saniyede bir gigasample veri kaydedebilme kapasitesi ve 250 Mhz band genişliği mevcuttur. Bu sayede KB darbeleri yüksek çözünürlüklü olarak kaydedilebilmekte, 2 kanal ve diferansiyel probu sayesinde senkron olarak uygulanan AC sinyalin de ölçülmesine olanak sağlamakta PRPD ölçümüne olanak sağlamaktadır.



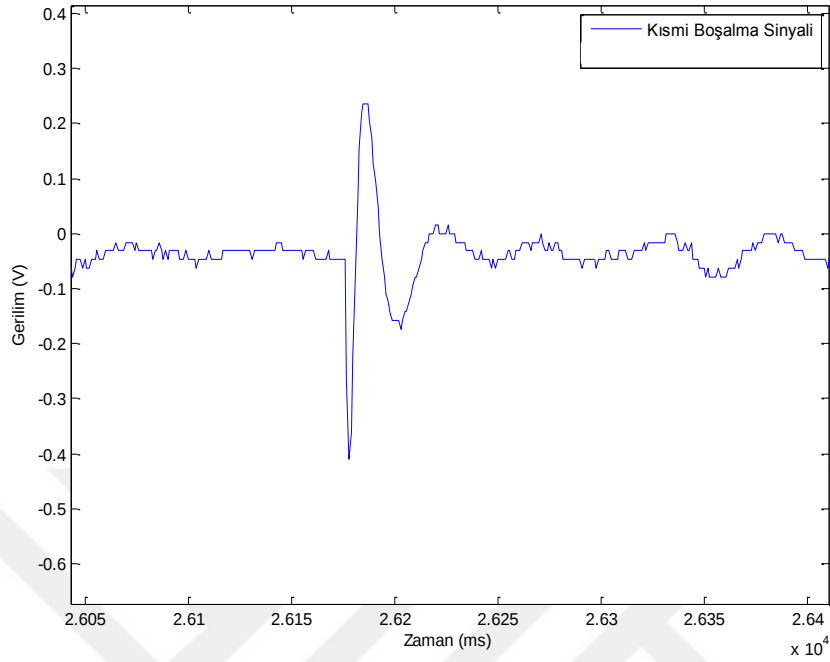
**Resim 3.4** Picoscope 5204 USB Osiloskop ve TA041 Diferansiyel Probu.

Piyasada mevcut PRPD analizi yapabilen cihazlar oldukça yüksek maliyetli cihazlardır. Ancak tez çalışması kapsamında USB osiloskop ve hazırlanan yazılımla PRPD ölçümü düşük maliyetle mümkün olabilmektedir.

Ölçüm sistemi ve USB osiloskop kullanılarak kaydedilen bir KB verisi Şekil 3.5’ te sunulmuştur. Aynı zamanda Şekil 3.6’ da, 3.5’ te görülen KB verisinin yalnızca küçük bir bölümüne yakınlaştırılmış hali bulunmaktadır. Bu sayede KB darbesi gözlemlenebilmektedir.



**Şekil 3.5** USB veri kaydedici ile ölçülen alternatif gerilim ve KB gerilimi.



**Şekil 3.6** KB darbesinin yakından görünümü.

Yüksek örnekleme aralığına sahip olan veri kaydedici ile bir deneye ait KB örüntüsünde, 1 milyon veri bulunması nedeniyle veri işleme hızı oldukça düşmektedir. Yüksek merkezi işlem birimi (CPU) hızına sahip bilgisayarlar ile verilerin işlenmesi tavsiye edilmektedir.

### **3.2 Orta Gerilim XLPE Kablolarıyla Kısmi Boşalma Deneyleri**

Orta gerilim XLPE kablolar, yüksek elektriksel ve termal dayanıma sahip olduğu için elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinde çok yaygın kullanılmaktadır. Tez çalışması kapsamında, bu nedenlerden dolayı ve elektrik piyasasından rahatlıkla temin edilebilmesinden XLPE kablo tercih edilmiştir. Öncelikle piyasadan, 36 kV' a kadar orta gerilimlerde kullanılan, 50 mm<sup>2</sup> kesitinde XLPE kablolar temin edilmiştir. Bu kablolardan 7 metre uzunluğunda numuneler oluşturulmuş ve kusur türü sınıflandırma ve kablo üzerinde kusur konumu belirleme deneyleri için hazırlanmıştır.



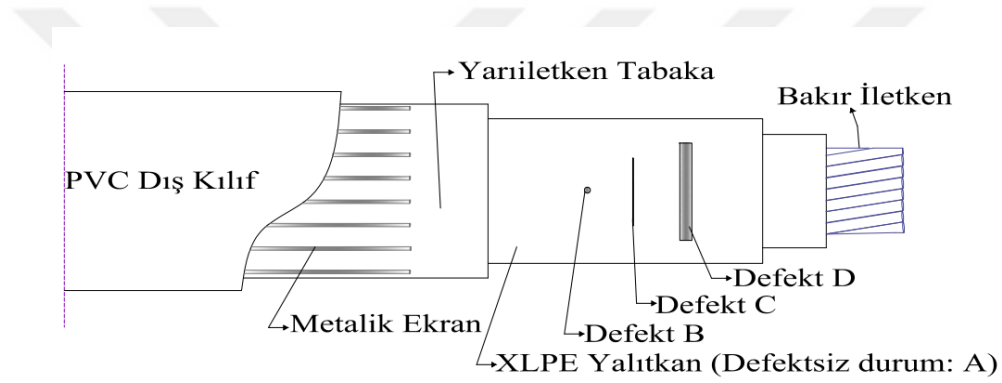
**Şekil 3.7** Kullanılan XLPE kablunun iç yapısına ait grafik çizim.

Şekil 3.7’ te tez çalışmasında kullanılan XLPE kabloya ait CAD ortamında hazırlanmış yapısal çizim görünmektedir. En iç kısımda bakır iletken mevcuttur. Aynı zamanda piyasadan alüminyum iletken içeren XLPE kablolar da temin edilmiştir ancak sayılarının ve metrajlarının yetersizliği nedeniyle yalnızca bakır iletkenler ile deneyler yapılmıştır. Kusurlar XLPE yalıtkan üzerinde oluşturulmuştur. Bu nedenle kusur oluşturulacak olan bağlantı noktasına yakın yerlerde yarıiletken tabaka soyulmuştur. XLPE kabloların teste hazır numuneler haline getirilmesi oldukça zahmetli bir süreçtir. Kablo soyma, başlık yapma gibi işlemler ustalık gerektiren işler olduğu için düzgün yapılmadığında özellikle kusur oluşturulmasa dahi KB’ler gözlemlenmektedir. Tez çalışmasında bu nedenle KB kusurları, el işçiliği sonrası meydana gelebilecek arızalara yakın şekilde hazırlanmaya çalışılmıştır. Orta ve yüksek gerilim işçiliklerinde en yüksek maliyetleri kablolar oluşturmakta, en büyük problemler de kabloların izolasyon arızalarıyla oluşmaktadır.

Elektrik sektöründe boy gösteren yerel firmalarla görüşüldüğünde, kablo ek ve başlık işlerinin ardından sisteme enerji verildiğini ve bir patlama beklendiğini, herhangi bir patlama gerçekleşmezse sorun olmadığı ve sistemin çalışacağı kanaatine varıldığı belirtilmiştir. Patlama olursa yeniden kablo bağlantıları yapılmaktadır. Bu durumun vahameti göz önüne alındığında, kablolardaki KB’lerin çokça ele alınması gerekliliği açıkça görülmektedir.

### 3.2.1 Farklı Kusur Türleri ile Kısmi Boşalma Oluşturma

Tez çalışmasında kullanılan 50 mm<sup>2</sup> kesitinde XLPE kablunun yalıtkan tabakasında üç çeşit kusur oluşturulmuş ve bunlara ek olarak kabloda kusur yokken aynı şekilde ölçümler yapılmıştır. 0,4 kV' dan (0 kV gibi kabul edilmiştir), 20-25 kV gerilime kadar çok çeşitli orta gerilim seviyelerinde KB ölçümleri yapılmıştır. Kusursuz durum A durumu olarak belirlenirken, iğne ucu kusuru B, kılcal çizik kusuru C ve daha kalın olan kusur ise D olarak belirlenmiştir. Kusurlar Şekil 3.8'de kablo üzerindeki formlarıyla gösterilmiştir. Şekil 3.9'da yapay olarak oluşturulan kusurlara ait detaylı ölçüler sunulmuştur.

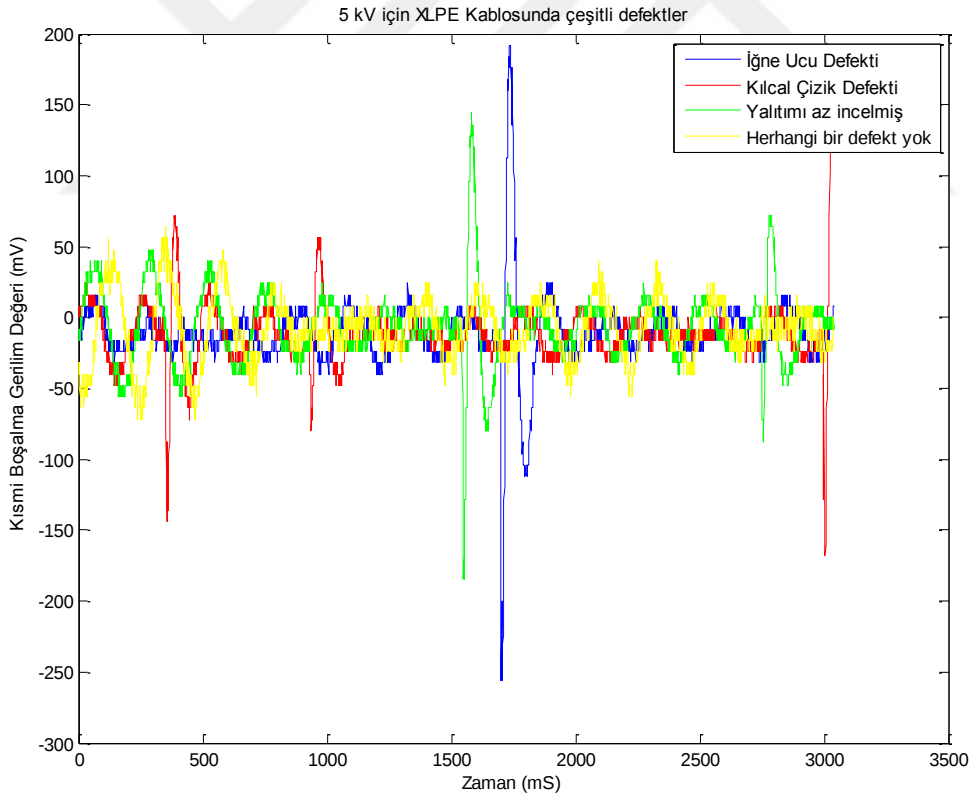


**Şekil 3.8** Kullanılan XLPE kablodaki kusurların görünümü (A: kusursuz durum, B: iğne ucu kusuru, C: kılcal çizik, D: kalın çizik).

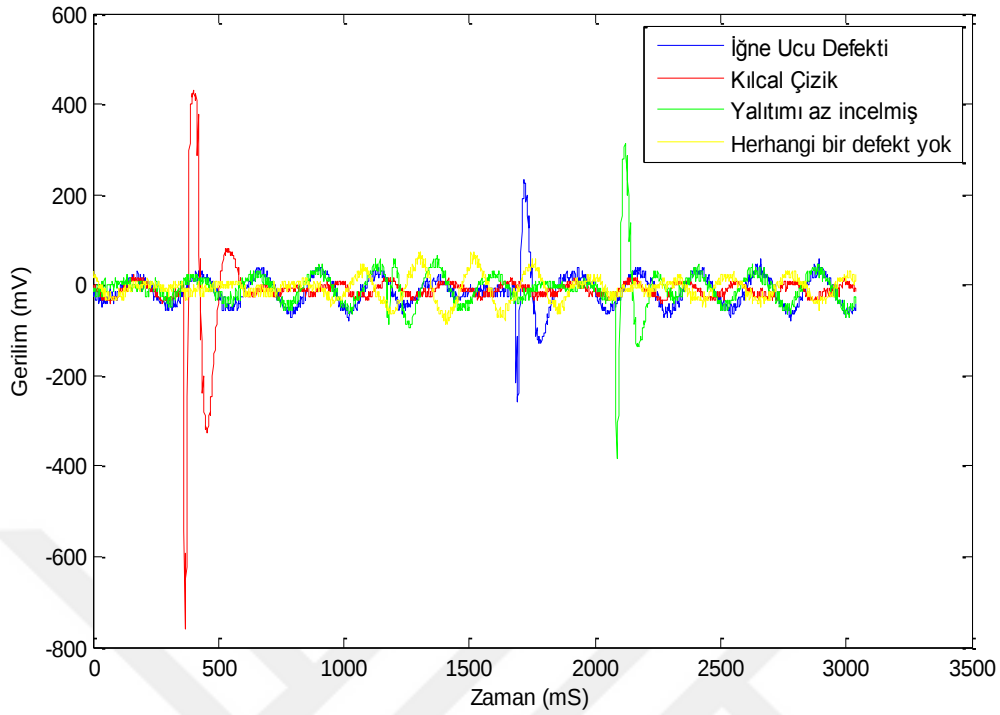


**Şekil 3.9** Kusurlara ait detaylı ölçüler.

Uygulanan yüksek gerilim seviyesi değiştirilirken, KB'lerin 5 kV ve üzerindeki gerilimlerde oluşmaya başladığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle sınıflandırma işlemlerinin çoğunda bu gerilimler tercih edilmiştir. Normal şartlarda çalışma koşulları göz önüne alındığı için, genellikle 15-16 kV gerilim tercih edilmiştir. 20 kV ve üzeri gerilimler, KB'ler kritik seviyelere doğru yükseldiği için ve uzun süreli deney kayıtları yapıldığı için, herhangi bir patlamaya ve iş güvenliği problemine neden olmamak maksadıyla tercih edilmemiştir. Normal şartlar altında 36 kV OG kablonun KB deneylerinin 20 ve üzerinde yapmak daha uygundur. Ancak KB dalga şekillerinin elde edildiği ve belirtildiği üzere iş kazasına mahal verilmemesi planlandığı için daha düşük gerilimlerde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar imkanlarının kısıtlı olması da gerilimlerin düşük olması için bir neden oluşturmaktadır. Deneyler sonucunda kaydedilen KB sinyallerinden bazıları karşılaştırmalı olarak 5 kV gerilim için Şekil 3.10'da, 12 kV gerilim için Şekil 3.11'de sunulmuştur.



**Şekil 3.10** 5 kV gerilim altında kusurlu kablolardaki KB sinyalleri.

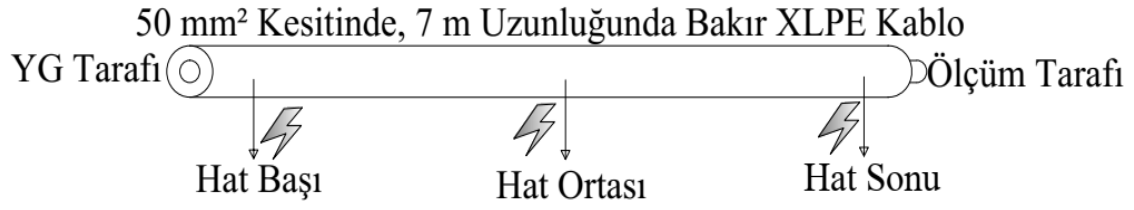


**Şekil 3.11** 12 kV gerilim altında kusurlu kablolardaki KB sinyalleri.

Beklendiği üzere 12 kV gerilimde KB darbelerinin genlikleri daha büyük değerlere doğru artış göstermiştir. Gerilim değeri daha da artırıldığında, ölçülen çevrimdeki darbe sayısı (darbe sıklığı) da artış göstermiş, genlikler oldukça büyük değerlere doğru yükselmiştir.

### 3.2.2 Farklı Konumlardaki Kusurlar ile Kısmi Boşalma Oluşturma

Akaike bilgi kriterlerine göre KB darbesinin 300 metre uzunluğundaki XLPE kablosunda yayılma hızı yaklaşık  $167,8 \times 10^6$  m/s' dir (Zheng vd. 2011), bu da ışık hızının ( $3 \times 10^8$ ) yaklaşık olarak yarısına karşılık gelmektedir. Tez çalışması kapsamında 7 metrelik numuneler oluşturulmuştur. Oluşturulan numune kabloya ait şematik çizim Şekil 3.12'de sunulmuştur. Kablo üzerindeki konumlar, deney sonuçlarında ayırt edebilmek amacıyla hat başı, hat ortası ve hat sonu olarak isimlendirilmiştir. Aynı zamanda deney düzeneğine ait fotoğraf ise Resim 3.5'de görülmektedir.



**Şekil 3.12** Konumlandırma deneylerine ait grafiksel gösterim.

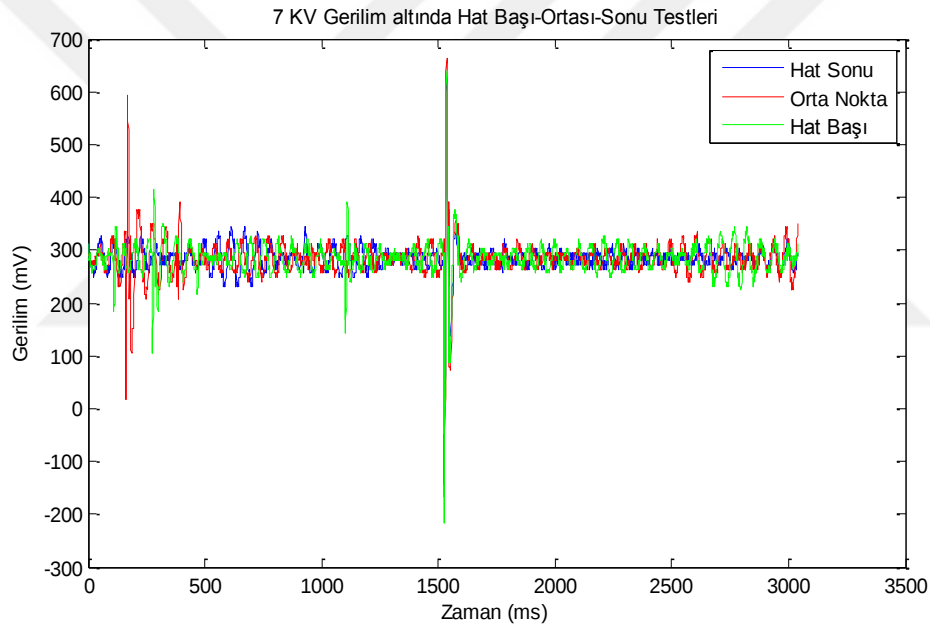
Oluşturulan kusurlar benzer özellikte ve kablonun dielektrik (yalıtkan) kısmı üzerinde meydana getirilmiştir.



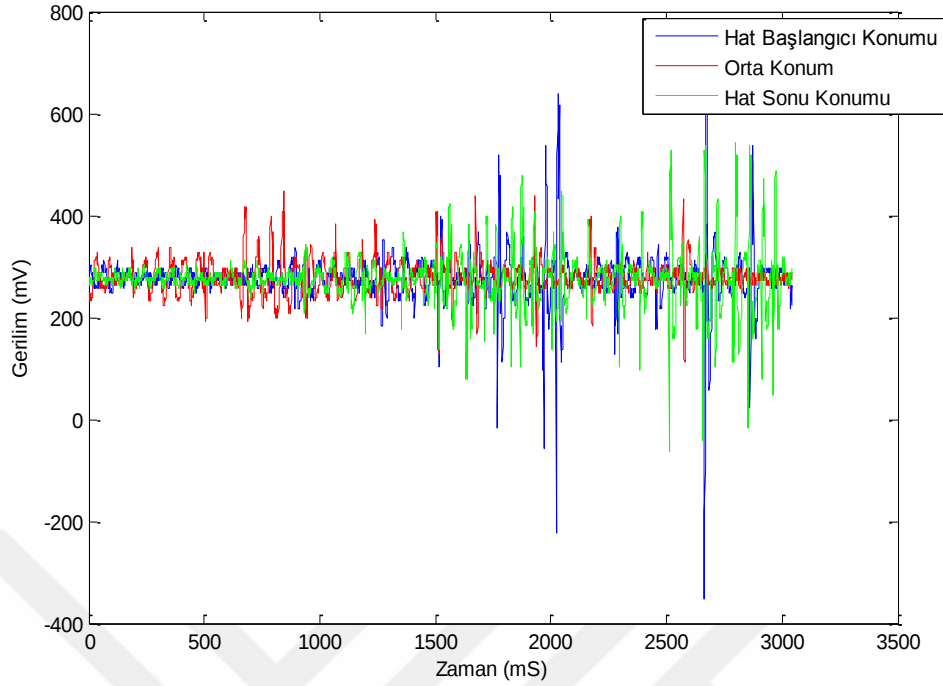
**Resim 3.5** Kablo konumlandırma deney düzeneğinin görünümü.

Kısa kablolarla konumlandırma işleminin daha zorlu bir süreç olduğu öngörülmektedir. Kablonun boyunun uzaması KB darbeleri arasındaki (giden ve yansıyan dalga) mesafeyi de etkileyecektir. KB sinyallerinin daha belirgin farklılıklara sahip olacağı düşünülmektedir. Fiziksel koşulların çok daha uzun metrajlı kabloların testine imkan vermediği için kablo boyutları sınırlı kalmıştır ancak literatürde pek çok çalışmada 3 m (Jineeth vd. 2018), 5 m (Hui vd. 2016) 7 m (Mashikian ve Szarkowski 2006) ve 10 m'lik (Gouda vd. 2018) XLPE kablolar ile laboratuvarında KB testleri gerçekleştirilmiştir.

Kablolar üzerindeki KB'ye sebep olan kusurların, arızaların konumlarının belirlenmesi oldukça önemli bir konudur. Kısmi boşalmayı tespit etmenin ardından yerinin de belirlenmesi ekonomiklik ve çözüm getirebilmek adına yapılması gereken başlıca uygulamalardan birisidir. Tez çalışması kapsamında, çeşitli yöntemler ile kullanmak üzere XLPE kablo üzerindeki farklı konumlarda kusurlar oluşturulmuş ve bu kusurlara bağlı olarak elde edilen KB sinyallerinin sınıflandırılmasıyla arızaların konumunun belirlenmesi hedeflenmiştir. Şekil 3.13'te 7 kV gerilim altında, kablo üzerinde 3 ayrı noktadan yapılan deneylere ait birer KB sinyalinin bulunduğu karşılaştırma grafiği görülmektedir. Aynı şekilde Şekil 3.14'te de 12 kV gerilim altında 3 ayrı konumda oluşturulan kusur ile ölçülen KB sinyalleri mevcuttur.



**Şekil 3.13** 7 kV gerilim altında çok noktadan arıza ölçümlerinden 3 test sonucu KB sinyali.



**Şekil 3.14** 12 kV gerilim altında çok noktadan arıza ölçümlerinden 3 test sonucu KB sinyali.

Kusurlar 7 metrelik kablo üzerinde, kablonun trafo bağlantısının olduğu yere yakın tarafta oluşturulduğunda hat başı, kablonun orta noktasında oluşturulduğunda hat ortası ve gerilim bölücü tarafına doğru yapıldığında ise hat sonu isimlerini almıştır. Yöntemlerde konumla ilgili arızalar bu isimlerle belirtilmiştir. Mycielski yönteminde tahmin aşamasında bu deneyler; Deney 1 - 2 ve 3 olarak isimlendirilmiştir.

### 3.2.3 Öznitelik Çıkarımı

Sınıflandırma problemlerinde çoğu yöntem için genellikle ham verilerin doğrudan sınıflandırma algoritmalarıyla birlikte kullanımları mümkün değildir. Bu nedenle verilerin küçültülmesi, anlam taşımayan fakat örüntü üzerinde yer işgal eden verilerin uzaklaştırılması, daha çok anlam taşıyan, verinin özü olarak nitelendirilebilecek verilerin çıkarılması bu hususta büyük önem taşımaktadır. Bu öz veriyi çıkarma işlemi öznitelik çıkarımı olarak adlandırılmaktadır. Zaman serileri olarak kaydedilen KB ham verilerini de doğrudan sınıflandırma işlemine almak zorlu bir süreçtir. Bu nedenle destek vektör makineleri gibi yöntemlere uyum sağlaması ve doğruluğu artırması açısından istatistiksel öznitelik çıkarımı ve Fourier dönüşümlerinden öznitelik çıkarımı yapılmıştır. Tez

çalışması kapsamında KB sinyallerinin Fourier dönüşümlerinin bir kısmına ait verinin istatistiksel öznitelikleriyle sınıflandırma yapılmış ve sınıflandırma başarı oranı yükseltilmiştir. Tez çalışmasının özgün olarak nitelendirilebilecek yönlerinden birisi de bu durumudur.

### 3.2.3.1 İstatistiksel Öznitelik Çıkarımı

Kısmi boşalma literatüründe birçok çalışmada çeşitli istatistiksel parametreler öznitelik olarak kullanılmıştır (Md Thayoob, Ghani ve Ghosh 2003, Raymond, Illias ve Bakar 2017). Tez çalışması kapsamında, 50 mm<sup>2</sup> lik, 36kV orta gerilim için üretilmiş XLPE kablo üzerindeki tüm KB ölçüm deneylerinden elde edilen veriler, dijital USB osiloskoptan aktarılan “text” dosyasından düzenlenerek MATLAB ortamına aktarılmıştır. Kaydedilen tüm verilerin, sınıflandırmada kullanmak amacıyla istatistiksel değerleri alınmıştır. Bu değerler sırasıyla ortalama değer (denklem (3.1)), minimum değer, maksimum değer, medyan, standart sapma (denlem (3.2)), varyans (denklem (3.3)), kurtosis (basıklık) (denklem (3.4)) ve skewness (çarpıklık) (denklem (3.5)) olarak belirlenmiş ve matris oluşturulmuştur. İstatistiksel hesaplamalara ait formüller denklem (3.1-3.5)’ da sırasıyla verilmiştir. Bu denklemlerde  $n$  eleman sayısını ifade ederken,  $X_i$  i’nci eleman sayısına tekabül etmektedir. Diğer değişkenlerin ifadeleri yanlarında verilmiştir.

$$\text{Ortalama Değer } \mu = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (3.1)$$

$$\text{Standart Sapma } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{n}} \quad (3.2)$$

$$\text{Varyans } \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{n} \quad (3.3)$$

$$\text{Kurtosis} = \frac{1}{\sigma^4} \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^4}{n} \quad (3.4)$$

$$\text{Skewness} = \frac{1}{\sigma^3} \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^3}{n} \quad (3.5)$$

Bölüm 3.2.1’ de verilen farklı kusur türleriyle KB ölçüm deneylerinin ardından, elde edilen veriler üzerinde istatistiksel hesaplamalar yapılarak Çizelge 3.2’ de verilen istatistiksel öznitelik matrisi elde edilmiştir.

**Çizelge 3.2** İstatistiksel öznitelik tablosu.

| Gerilim Seviyesi (kV)     | İğne Ucu Kusuru |                     |              |               |               |
|---------------------------|-----------------|---------------------|--------------|---------------|---------------|
|                           | Ortalama (mV)   | Standart Sapma (mV) | Varyans (mV) | Kurtosis (mV) | Skewness (mV) |
| 0,4                       | 3,48            | 12,01               | 144,34       | -0,40         | -0,09         |
| 3                         | 4,18            | 20,41               | 416,70       | -0,31         | -0,45         |
| 5                         | -1,43           | 29,91               | 894,67       | 4,30          | 0,44          |
| 8                         | 4,13            | 64,41               | 4148,98      | 48,68         | -2,04         |
| 12                        | -11,05          | 156,02              | 24342,05     | 70,86         | -5,37         |
| 15                        | -10,97          | 226,14              | 51140,89     | 52,66         | -5,71         |
| Kılcal Çizik Kusuru       |                 |                     |              |               |               |
| 0,4                       | 4,84            | 18,39               | 338,33       | 0,22          | -0,50         |
| 3                         | 3,93            | 20,93               | 438,21       | -0,54         | -0,06         |
| 5                         | 3,49            | 30,07               | 904,24       | 0,01          | -0,15         |
| 8                         | 5,18            | 54,36               | 2955,43      | 9,00          | -0,34         |
| 12                        | 6,96            | 150,57              | 22670,50     | 122,91        | -7,99         |
| 15                        | -10,33          | 227,21              | 51625,68     | 52,60         | -5,39         |
| Yalnızca toprak yakınlığı |                 |                     |              |               |               |
| 0,4                       | 7,05            | 10,67               | 113,91       | -0,89         | 0,05          |
| 3                         | 5,31            | 19,66               | 386,42       | -0,72         | -0,04         |
| 5                         | 0,13            | 31,90               | 1017,75      | 2,86          | 0,37          |
| 8                         | 3,68            | 55,43               | 3071,95      | 18,97         | -1,40         |
| 12                        | 5,55            | 114,92              | 13206,54     | 11,22         | -0,82         |
| 15                        | -11,72          | 189,59              | 35945,98     | 14,57         | -1,94         |
| Kusursuz Hal              |                 |                     |              |               |               |
| 0,4                       | 6,21            | 11,11               | 123,53       | -0,63         | -0,04         |
| 3                         | 3,93            | 19,88               | 395,31       | -0,50         | -0,28         |
| 5                         | 8,41            | 28,10               | 789,85       | -0,14         | -0,52         |
| 8                         | 8,49            | 36,82               | 1355,62      | -0,42         | 0,13          |
| 12                        | 6,08            | 43,41               | 1884,63      | -0,59         | 0,04          |
| 15                        | -0,28           | 45,74               | 2092,29      | -0,75         | 0,16          |

Çizelge 3.2’ de açık olarak görüldüğü üzere minimum, maksimum değer ve medyan deneyleri KB sinyallerini ayırt etmekte kullanışlı görülmemektedir. Kurtosis (basıklık), sinyal içerisindeki tepe noktalarının yani KB darbelerinin basıklık-sivrilik durumunu belirtmektedir. Pozitif kurtosis değeri, tepenin daha yüksek eğilimli, daha dik olduğunu

göstermektedir. Negatif kurtosis değeri hiçbir kusur bulunmayan kabloda gözlenmiştir. Bu da bir anlamda KB darbelerinin oluşmadığının ispatıdır.

Ortalama değerlerin sıfıra yakın, düşük değerlerde gözlenmesinin sebebi KB sinyallerinde pozitif ve negatif darbelerin bulunması ve genliklerinin birbirine yakın olmasıdır. Bu nedenle standart sapmalar gerilim artışına bağlı olarak, darbe genliklerinin büyümesiyle artış gösterirken ortalama değerlerde önemli bir değişiklik görülmemektedir.

Çarpıklık olarak ifade edilen skewness değeri ise tepelerin yükselme ve alçalma zamanlarıyla ilintilidir. Pozitif skewness olan sinyallerde tepe noktalarının yükselme zamanları kısa, alçalma-kuyruk zamanları uzundur. Negatifte ise durum tam tersidir. Kılcal çizik ve iğne ucu kusurunda genellikle negatif skewness görülmüştür.

Bölüm 3.2.2’ de bahsedilen farklı konumlarda aynı kusur ile oluşturulan KB sinyallerinin sınıflandırılması koşuluyla arıza sınıflandırma deneylerine ait istatistiksel öznitelik çıkarım sonuçları Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4’te sunulmuştur. Çizelge 3.3, 3 farklı konumda KB deneylerinin gerçekleştiğindeki duruma ait sonuçlar iken, Çizelge 3.4’teki sonuçlar 13 farklı konumdan deneylerin yapılmasına dayalı olarak elde edilmektedir. Konum sayısı artılınca doğruluk düşüşü gözlenmektedir. Bunun nedeninin, kusurların birbirine oldukça yakın konumda olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kablonun farklı konumunda oluşturulan her bir kusur için hesaplanan istatistiksel değerler, 12 kV gerilim için yapılan ölçümlerdir. Önceki deneylerle benzerlik göstermesi açısından her bir noktadan 6 adet KB sinyali ölçümü gerçekleştirilmiştir. Çok kez ölçüm yapmanın nedeni, daha önce de belirtildiği üzere, doğruluğu test etmek amacını taşımaktadır. Değerlerin arasında doğrusal bir ilişki gözlemlenememiştir. Bu nedenle herhangi bir model oluşturmada sadece öznitelikler üzerinden arıza konumlarını sınıflandırabilmek mümkün olmamaktadır. Ortalama değerlerin benzer şekilde kalmasının nedeni sinyalde pozitif ve negatif KB darbelerinin bulunmasından kaynaklanmaktadır.

**Çizelge 3.3** Arıza konumlandırma çalışması için istatistiksel değerler tablosu.

|            | Ortalama | Standart S. | Varyans | Kurtosis | Skewness |
|------------|----------|-------------|---------|----------|----------|
| Hat Başı   | 283,0    | 113,5       | 12889,4 | 14,8     | -1,1     |
|            | 283,8    | 107,7       | 11591,8 | 15,6     | -0,9     |
|            | 282,9    | 110,2       | 12139,5 | 24,1     | -2,0     |
|            | 283,9    | 88,4        | 7814,4  | 20,4     | -1,0     |
|            | 283,7    | 95,1        | 9047,4  | 35,1     | -2,2     |
|            | 282,2    | 116,9       | 13660,7 | 24,9     | -2,0     |
| Orta Nokta | 284,7    | 75,7        | 5736,7  | 36,5     | -2,1     |
|            | 286,9    | 55,4        | 3068,1  | 32,1     | -1,5     |
|            | 284,5    | 83,3        | 6940,8  | 80,2     | -4,7     |
|            | 285,3    | 68,0        | 4629,3  | 28,7     | -1,1     |
|            | 284,4    | 77,0        | 5924,7  | 33,6     | -1,5     |
|            | 284,2    | 87,1        | 7592,6  | 77,8     | -4,7     |
| Hat Sonu   | 286,5    | 37,9        | 1437,0  | 53,3     | -0,8     |
|            | 285,9    | 45,9        | 2104,1  | 63,4     | -2,3     |
|            | 286,1    | 35,0        | 1221,8  | 64,6     | -1,2     |
|            | 286,2    | 46,4        | 2154,6  | 35,9     | 0,2      |
|            | 285,3    | 44,5        | 1981,1  | 47,2     | 0,1      |
|            | 286,0    | 42,3        | 1793,5  | 37,7     | 0,5      |

**Çizelge 3.4** 12 kV gerilimde, kablo üzerinde çok noktadan ölçülen verilerin istatistiksel değerleri.

| (mV) /cm | Ortalama | Standart Sapma | Varyans | Kurtosis | Skewness |
|----------|----------|----------------|---------|----------|----------|
| 50       | 278,4    | 54,7           | 3427,4  | 24,6     | -0,7     |
| 100      | 279,1    | 39,8           | 1608,4  | 33,4     | -0,4     |
| 150      | 278,8    | 38,6           | 1514,1  | 17,6     | -0,4     |
| 200      | 278,7    | 35,6           | 1312,7  | 16,1     | -0,1     |
| 250      | 278,5    | 33,7           | 1142,1  | 6,5      | 0,1      |
| 300      | 278,1    | 33,4           | 1133,4  | 15,1     | -0,2     |
| 350      | 277,8    | 37,1           | 1406,6  | 7,8      | 0,1      |
| 400      | 278,3    | 30             | 918,9   | 15,8     | -0,3     |
| 450      | 277,9    | 34,6           | 1261    | 29       | -0,8     |
| 500      | 277,4    | 28,6           | 873,7   | 21,5     | 0        |
| 550      | 277,5    | 34,1           | 1189,2  | 12,7     | 0,1      |
| 600      | 277,1    | 32,3           | 1060,2  | 19,4     | -0,1     |
| 650      | 277,4    | 46,6           | 2315,2  | 12,5     | 0        |

### 3.2.3.1 Fourier Dönüşümü

Fourier serisi analizi ve fourier dönüşümü, zaman serilerinin spektral olarak incelenmesinde yaygın kullanılan yöntemlerdendir. Tez çalışması kapsamında, çeşitli

laboratuvar deneyleri ile oluşturulması planlanan KB veri tabanındaki zaman serisi şeklindeki KB sinyallerinin fourier dönüşümlerinin alınarak frekans spektrumları incelenmiştir. Fourier serisi denklem (3.6)' da ve Fourier dönüşümü formülü denklem (3.7)' de verilmiştir.

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (3.6)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(s) \exp(-ist) ds \quad (3.7)$$

$$F(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \exp(ist) dt$$

### 3.2.3.2 Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT)

Hızlı Fourier dönüşümü (FFT), bir veri dizisinin ayrık Fourier dönüşümünü (DFT) veya tersini (IDFT) hesaplayan bir algoritmadır. Fourier analizi, bir sinyali orijinal alanından (genellikle zaman veya boşluk) frekans alanında bir temsile dönüştürür veya bunun tersi de geçerlidir. DFT, bir değer dizisinin farklı frekanslardaki bileşenlere ayrıştırılmasıyla elde edilir (Heideman vd. 1984). DFT işlemi birçok alanda kullanışlıdır, ancak doğrudan tanımdan hesaplamak genellikle çok yavaş, uzun zaman alan bir süreçtir. Bir FFT, DFT matrisini seyrek (çoğunlukla sıfır) bir ürüne çarpanlarına ayırarak bu tür dönüşümleri hızla hesaplar. Sonuç olarak, DFT'yi hesaplamanın karmaşıklığını azaltmayı başarır. DFT tanımını basitçe  $O(N^2)$ 'den,  $O(N \log N)$  'ye dönüştürür. Burada  $N$  veri boyutudur. Hız farkı, özellikle  $N$  nin binlerce veya milyonlarca olduğu uzun veri setleri için çok büyük olabilir. Yuvarlama hatasının varlığında, birçok FFT algoritması DFT tanımını doğrudan veya dolaylı olarak değerlendirmekten çok daha doğrudur. Basit karmaşık sayı aritmetiğinden grup teorisi ve sayı teorisine kadar çok çeşitli yayınlanmış teorilere dayanan birçok farklı FFT algoritması vardır.

Hızlı Fourier dönüşümleri mühendislik, müzik, bilim ve matematik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Temel fikirler 1965'te popülerleştirilmiş, ancak bazı algoritmalar 1805 yılı kadar erken bir tarihte türetilmiştir. 1994 yılında Gilbert Strang, FFT'yi "yaşamımızın en önemli sayısal algoritması" olarak tanımlamıştır (Strang 1994) ve IEEE Bilim ve Mühendislik Dergisi Bilgisayar Bilimi dergisi tarafından 20. Yüzyılın

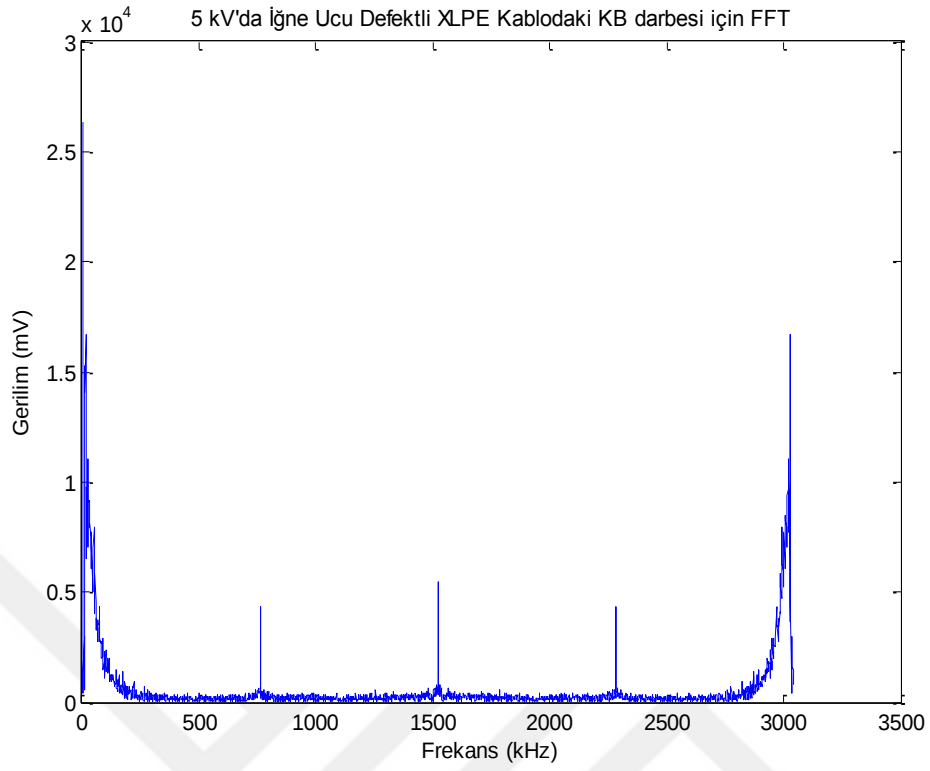
İlk 10 Algoritmasına dahil edildi (Dongarra ve Sullivan 2000).

En iyi bilinen FFT algoritmaları N'nin çarpanlarına ayrılmasına bağlıdır, ancak birinci N için bile tüm N için  $O(N \log N)$  karmaşıklığına sahip FFT'ler vardır. Çoğu FFT algoritması yalnızca  $e^{-2\pi i/N}$ , N' inci bir ilkel birlik köküdür ve bu nedenle sayı gibi herhangi bir sonlu alan üzerindeki benzer dönüşümlere uygulanabilir. Ters DFT, DFT ile aynı olduğundan, ancak üssünde zıt işaret ve 1 / N faktörü olduğu için, herhangi bir FFT algoritması bunun için kolayca uyarlanabilir. Hızlı Fourier dönüşümüne ait formül, denklem (3.8)'de sunulmuştur.

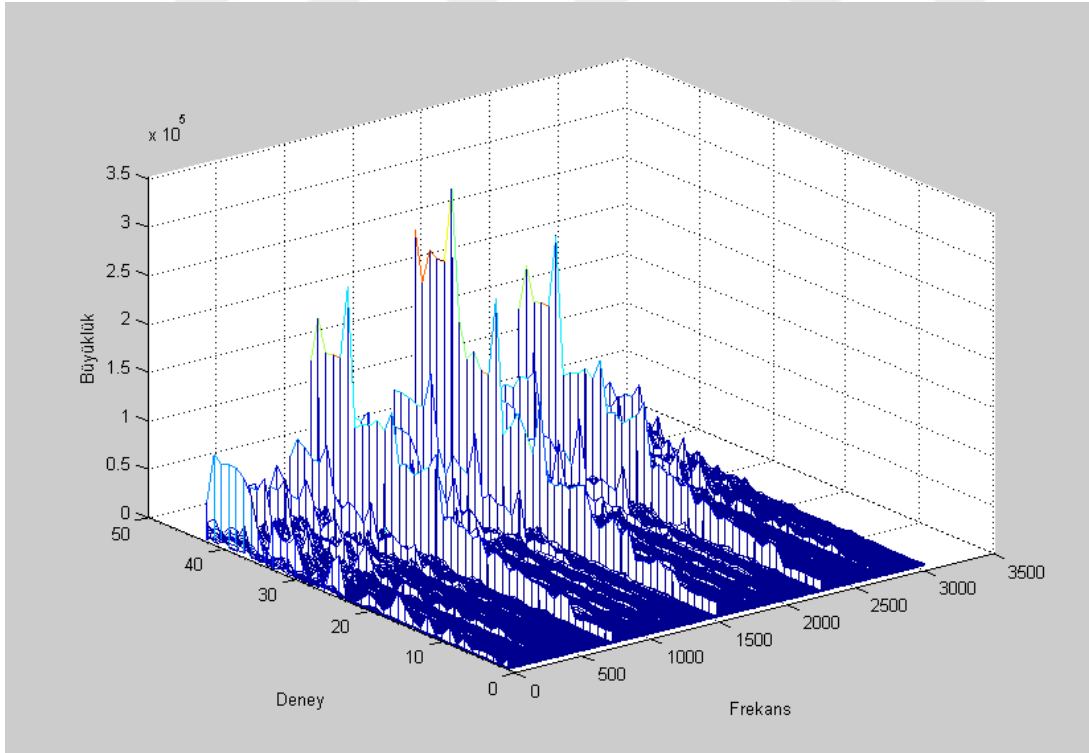
$$\begin{aligned} X(k) &= \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \\ x(j) &= \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{k=1}^N X(k) \omega_N^{-(j-1)(k-1)} \\ \omega_N &= e^{(-2\pi i)/N} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Öznitelik çıkarma işleminde KB verilerine FFT işlemi uygulanmıştır. Kısmi boşalma veri seti uzunluğu denklemdeki N'e tekabül etmektedir. X(k) Fourier ile frekans ortamına dönüşmüş sinyali, x(j) ise ters Fourier dönüşümü ile zamana dönüştürme işlemini ifade etmektedir. Şekil 3.15'te iğne ucu kusurlu kablo için 5 kV' da yapılan KB verisinin Fourier dönüşümüne ait grafik verilmiştir. Şekil 3.16 ise, bir çeşit kusur için yapılan tüm deneylere ait fourier dönüşümlerini ağ yapısı olarak göstermektedir.

Şekil 3.15 ve Şekil 3.16'dan görüleceği üzere frekanslardaki tepe değerleri aynı frekans noktalarında oluşmaktadır. Frekans spektrumunda özellikle ilk 400 verinin kusur türlerine göre değişimler gösterdiği gözlemlenmiş ve daha çok anlam içeren veriler olarak belirlenmiştir. Bu 400 veri içerisinde de hangi parçaların sınıflandırmaya daha yüksek etkisi olduğu test edilmiş ve sonuçları Bulgular bölümünde sunulmuştur.



Şekil 3.15 İğne ucu kusurlu kablodan 5kV’da ölçülen sinyalin Fourier dönüşüm mutlak değeri.



Şekil 3.16 Fourier dönüşümlerini karşılaştırmak amacıyla ağ çizimi.

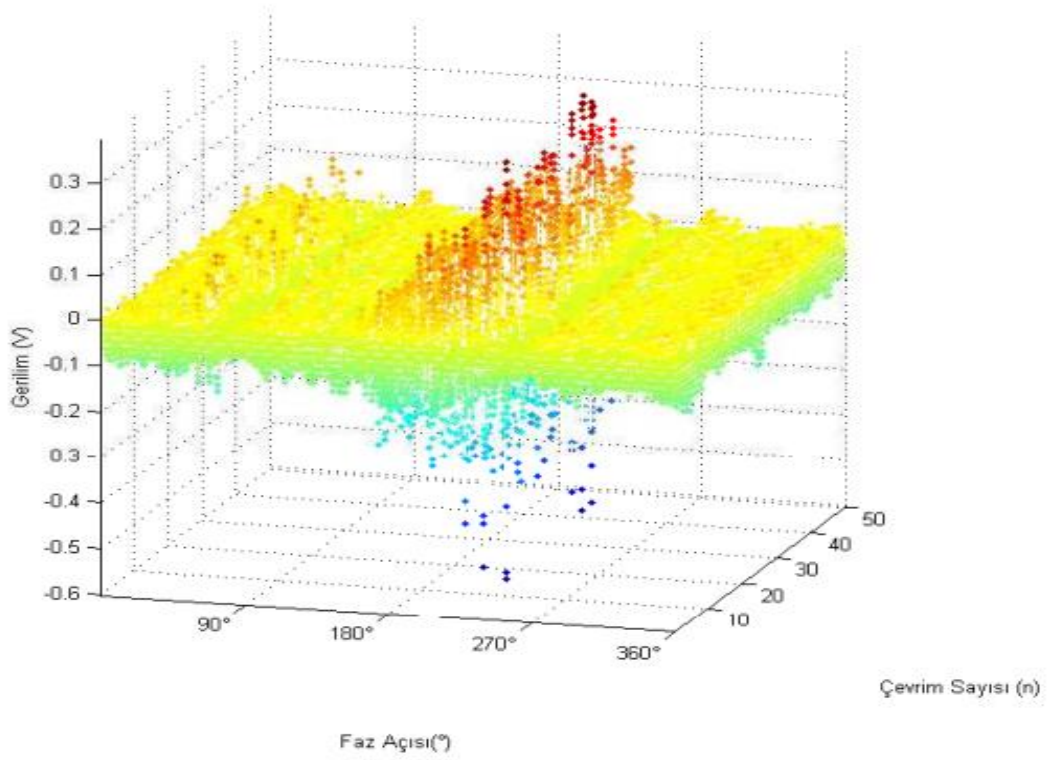
### 3.2.3.1 Faz Çözünümlü Kısmi Boşalma (PRPD) Analizi

Tez çalışması kapsamında, düşük maliyetli bir PRPD analizi gerçekleştirilmiştir. PRPD ölçümü yapabilen cihazlar, yüksek maliyet gerektiren ekipmanlardır. Üniversite laboratuvarında böyle bir cihaz bulunmamasından dolayı, yazılımla bu analiz yapılabilir hale gelmiştir. Yüksek hızlı ve aktif kayıt yapabilen Picoscope 5204 USB osiloskop ile aynı anda iki kanaldan besleme gerilimi ve KB sinyali kaydedilebilmektedir. Bu iki sinyal, sayısal verilere dönüştürüldükten sonra MATLAB ortamına aktarılmakta ve programlanan yazılım sayesinde verileri 3 boyutlu PRPD grafiklerine dönüştürmektedir.

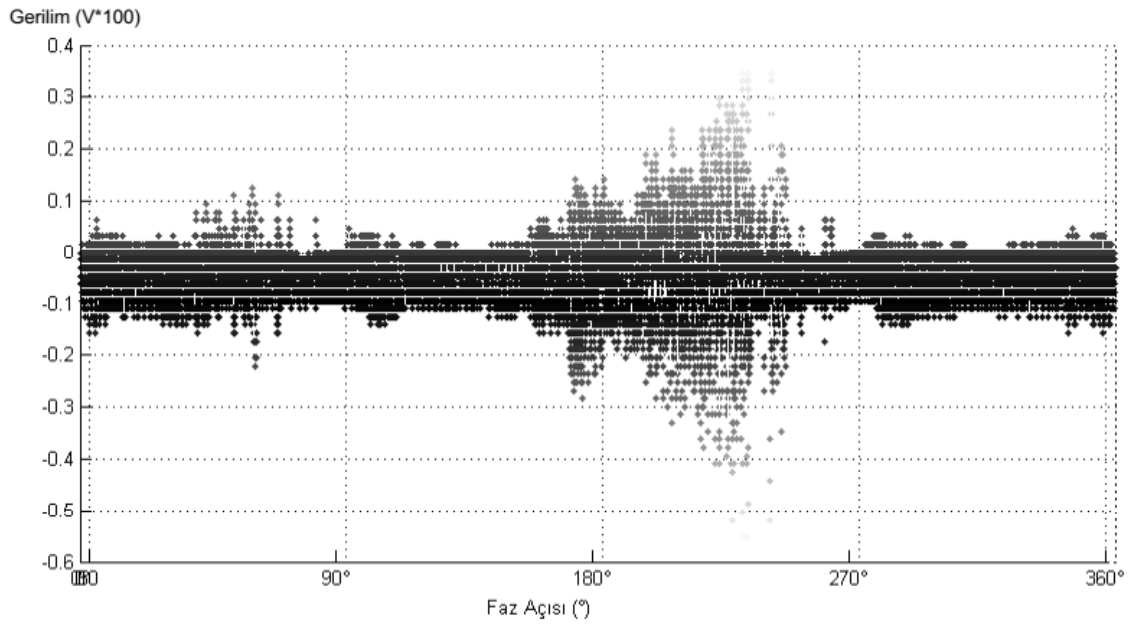
PRPD grafiklerine göre, KB'lerin çoğu üç deneyde de  $180^\circ$  -  $270^\circ$  faz açıları arasında meydana gelmiştir. Ancak aralarında farklılıklar da vardır. İlk deneyin  $230^\circ$  faz açısında, en yüksek genlikli KB darbeleri gözlenmiş nadiren de  $50^\circ$  faz açısında gözlenir.

İkinci deney için KB'ler çoğunlukla  $240^\circ$  de, daha az ölçüde  $60^\circ$  de görülür. Son olarak, üçüncü deney için  $225^\circ$  faz açısı kritiktir. Şekil 3.15'de Deney 1'e ait PRPD grafiği açık olarak görülmesi amacıyla verilmiştir. Şekil 3.16'de diğer deneylere ait 2 boyutlu (2B) ve 3 boyutlu (3B) PRPD grafikleri mevcuttur.

Grafiksel görünümlü PRPD analizlerine literatürde sıkça rastlanmaktadır. KB sinyallerinin farklı çalışmalarda elde edilen KB sinyalleriyle karşılaştırılabilir olması adına bu analiz gerçekleştirilmiş, analiz, aynı zamanda KB darbelerinin yoğun olarak bulunduğu noktaların faz dağılımlarını inceleme imkânı sağlamıştır.



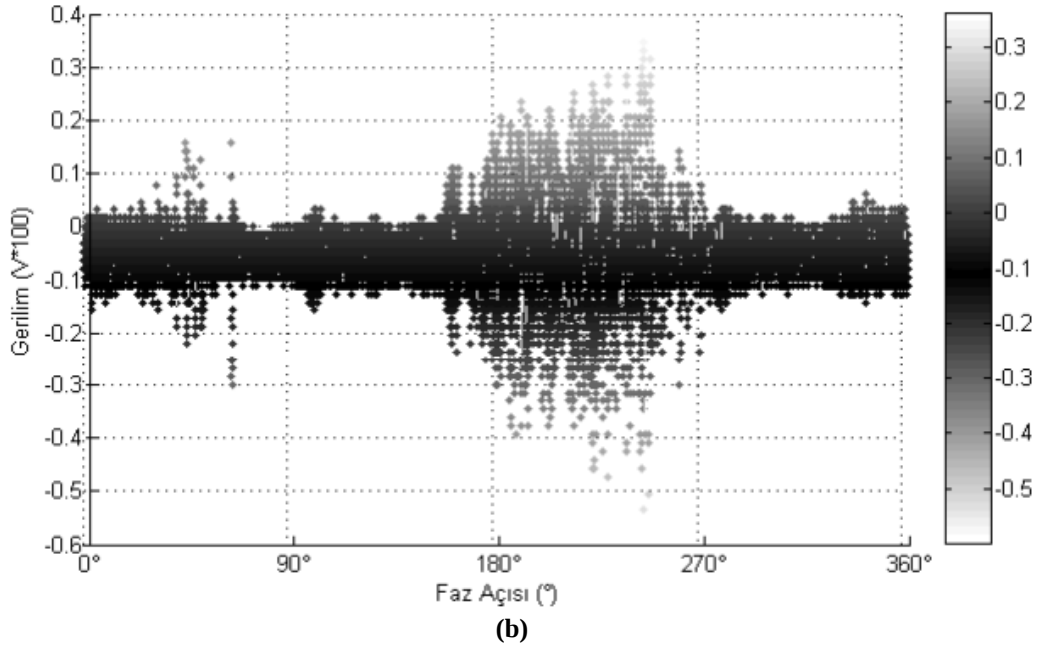
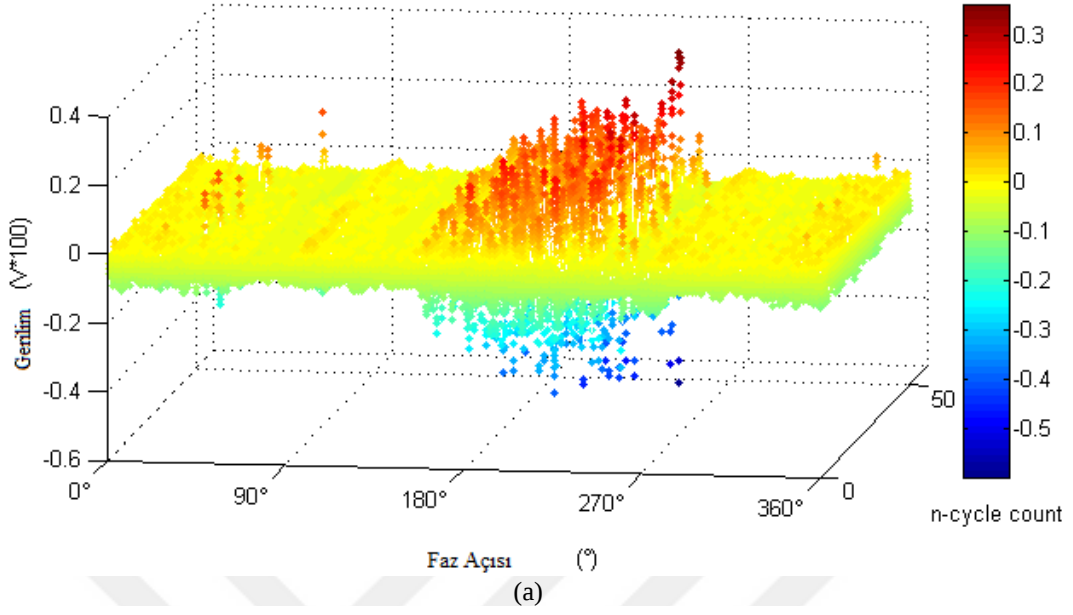
(a)



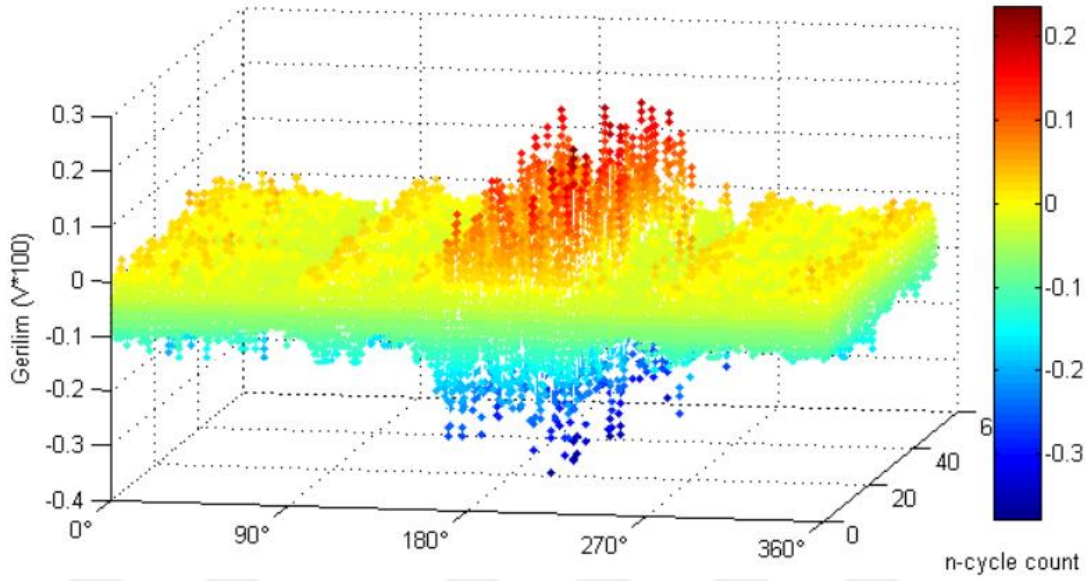
(b)

Şekil 3.17 Deney 1' e ait 3 boyutlu (a) ve 2 boyutlu (b) PRPD grafiği.

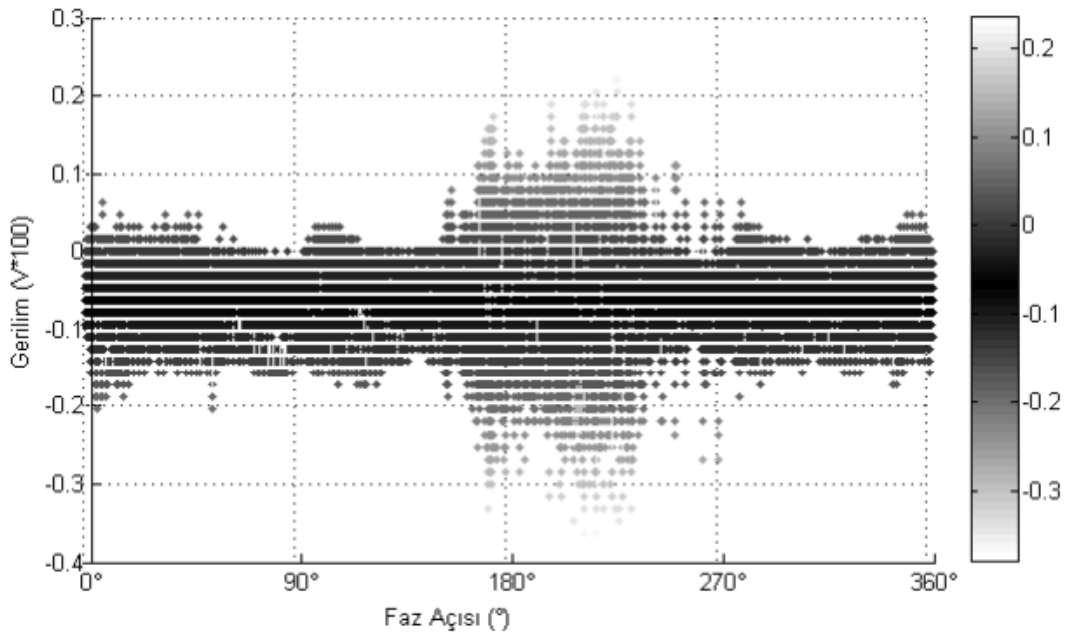
Şekil 3.17'de Deney 2'ye ait 3B ve 2B grafikler üst tarafta gelmekte, sonda bulunanlar ise Deney 3'e ait 2B ve 3B PRPD grafiklerini oluşturmaktadır.



**Şekil 3.18** a) 3 boyutlu b) 2 boyutlu hat ortası (Deney 2) ve c) 3 boyutlu b) 2 boyutlu hat sonu (Deney 3) deneyleri için PRPD grafikleri.



(c)



(d)

**Şekil 3.18** (Devam) a) 3 boyutlu b) 2 boyutlu hat ortası (Deney 2) ve c) 3 boyutlu b) 2 boyutlu hat sonu (Deney 3) deneyleri için PRPD grafikleri.

Tez kapsamında elde edilen PRPD grafiklerinde gerilim - çevrim sayısı ve faz açısı görülmektedir. Bu grafikler farklı algortima yazılımlarıyla faz açısı-yük sayısı ve çevrim sayısına dönüştürülebilir. Tez çalışmasındakinin benzeri şekilde gerilim haliyle de yayınlanmış güncel makale çalışmaları bulunmaktadır (Xia vd. 2019).

### 3.3 Destek Vektör Makineleri

Destek vektör makineleri (DVM), istatistiksel öğrenme teorisi olarak geliştirilmiştir. Altmışlı yılların başında Vladimir Vapnik ve Alexey Chervonenkis tarafından temelleri atılan yöntem, istatistiksel öğrenmeye dayalı bir gözetimli öğrenme algoritmasıdır. Temelleri 60' lı yıllara uzansada, 1995 yılında Vladimir Vapnik, Bernhard Boser ve Isabelle Guyon tarafından geliştirilmiştir (Akpınar 2017). Bir dizi etiketli eğitim verisi içinde en geniş marjı olan optimal bir kanonik ayırma hiperdüzlemi oluşturulması, DVM' nin temelini oluşturan nihai öğrenme hedefidir. Destek Vektör Makineleri, temel olarak iki sınıfa ait verileri birbirinden en uygun şekilde ayırmak için kullanılır. Bunun için karar sınırları ya da diğer bir ifadeyle hiper düzlemler belirlenir. Yüksek boyutlu uzayda etkili bir yöntemdir. Boyut sayısının örneklem sayısından fazla olduğu durumlarda etkilidir. Belleği verimli kullanır ve kernel fonksiyonları kullanmasından dolayı çok yönlüdür.

Eğitim verisinden elde edilen denklem (3.9)' deki hiper düzlemin maksimal bir  $M$  kenara sahip olması gerekmektedir. Yeni veriyi daha iyi sınıflandırabilmesi için gereklidir.

$$w^T x + b = 0 \quad (3.9)$$

Formüldeki  $b$  sapma (hiperdüzlemin orjinine olan uzaklık),  $w$  ağırlık,  $x$  test noktası ve  $T$  ise transpoz anlamlarına gelmektedir. Denklemde hiper-düzlemin kanonik biçimi de hesaplamaları basitleştirecektir. Eğitilme sırasında, kanonik hiper-düzlemin ağırlık normu  $|w|$ 'nin minimize edilmesiyle, denklem (3.10) ve denklem (3.11)'de verilen marjin maksimize edilir ve Vapnik-Chervonenkis (VC) boyutları da minimize edilmektedir. İki doğrusal olarak ayrılabilir sınıfın durumunu göz önünde bulundurursak, denklem (3.9) durumunu sağlayan kanonik bir hiperdüzlemdir.

$$M = \frac{2}{|w|} \quad (3.10)$$

$$\min |w^T x + b| = 1 \quad x_i \in X \quad (3.11)$$

Doğrusal olmayan şekilde ayrılabilen veri setleri için yukarıdaki şekilde optimal sınıflandırma yeteneği kısıtlıdır. Kernels' in kullanımı, giriş vektörlerini daha yüksek

boyutta uzaya haritalamaktadır. Ayırıcı hiper yüzeyin hesaplanması, yüksek boyutlu uzayda tam olarak yapılabilmektedir.

### 3.3.1 Çok Sınıflı Destek Vektör Makineleri

Çok aşamalı destek vektör makineleri problemlerini çözmek için gerekli olan formüllerdeki değişkenler, sınıfların sayısı ile orantılı olarak artar. İki sınıflı problemlerde öğrenme vektörü  $x_i \in R^d$ ,  $i = 1, \dots, l$ , ve etiket vektörü  $y \in \{1, -1\}$  l, destek vektör makineleri denklem (3.12) verilen optimizasyon probleminin çözümünü gerektirmektedir.

$$\begin{aligned} \min_{w \in H, b \in R, \xi_i \in R} \quad & \frac{1}{2} w^T w + C \sum_{i=1}^l \xi_i \\ \text{subject to} \quad & y_i(w^T \phi(x_i) + b) \geq 1 - \xi_i, \\ & \xi_i \geq 0, i = 1, \dots, l. \end{aligned} \quad (3.12)$$

$w \in R^d$  ağırlık vektörü,  $C \in R^+$  düzenleme sabiti,  $\xi$  pozitif köle (gevşek-slack) değişken ve haritalama fonksiyonu  $\phi$ , doğrusal olmayan karar yüzeylerine izin verecek şekilde eğitim verilerini uygun bir özellik alanı  $H$  ye yansıtır. Çözülmesi gereken ortak bir yöntem denklem (3.13) ikilisidir:

$$\begin{aligned} \min_{b \in R^l} \quad & \frac{1}{2} a^T (K \odot (y y^T)) a - e^T a \\ \text{subject to} \quad & 0 \leq a \leq C e, y^T a = 0 \end{aligned} \quad (3.13)$$

$e \in R^l$  bütün 1' lerin vektörünü tanımlar,  $K \in R^{l \times l}$  kernel matrisi, ve  $\odot$  Hadamard–Schur (elementwise) ürününü tanımlar. Bu nedenle, çok sınıflı destek vektör makinaları yöntemi, çeşitli ikili sınıflayıcılardan gelmelidir veya en iyileştirme sorunu genişletilmelidir. Bu nedenle, birden fazla problemin çözümü, aynı sayıda veriye sahip bir ikiliden daha karmaşıktır. Çok sınıflı DVM (ÇDVM) yöntemi için denklem (3.13), denklem (3.14)' e dönüşür.

$$\begin{aligned} \min_{w_k, b_k, \xi_i^k} \quad & \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \|w_k\|^2 + C \sum_{i=1}^n \sum_{k=1, k \neq y_i}^K \xi_i^k \\ \text{s. t.} \quad & (w_{y_i}^T \cdot x_i + b_{y_i}) - (w_k^T \cdot x_i + b_k) \geq 2 - \xi_i^k, \xi_i^k \geq 0, \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$i = 1, \dots, m, k \in \{1, \dots, K\} \setminus y_i$$

Sınıfa ait yeni bir örnek  $x$ ;  $k^* \text{ if } k^* = \operatorname{argmax}_{k=1, \dots, K} \{\mathbf{w}_k^T \cdot \mathbf{x} + b_k\}$ .

Çok sınıflı DVM, doğrudan ve dolaylı ÇDVM yöntemleri (Bire Çok Yaklaşımı ve Bire-Bir Yaklaşımı) için önerilen iki yaklaşım vardır. Dolaylı yöntemler ikili yaklaşıma dayalı yaklaşımlar olsa da, doğrudan yaklaşımlar sorunu doğrudan çözmekte ve daha karmaşıktır. Literatürde, araştırmacılar tarafından sunulan çeşitli doğrudan yaklaşımlar vardır.

Yöntemde kullanılan KB verileri, eğitim ve test verisi olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Bir KB kusuruyla ölçülen 6 ayrı sinyalin 5 tanesi eğitim, 1 tanesi de test edilmek üzere %83 eğitim, %17 test amaçlı kullanılmıştır. Bu veriler, detayları ileriki bölümlerde açıklanan k çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak, sırayla değiştirilerek yöntemin sınıflandırma doğruluğu test edilmiştir.

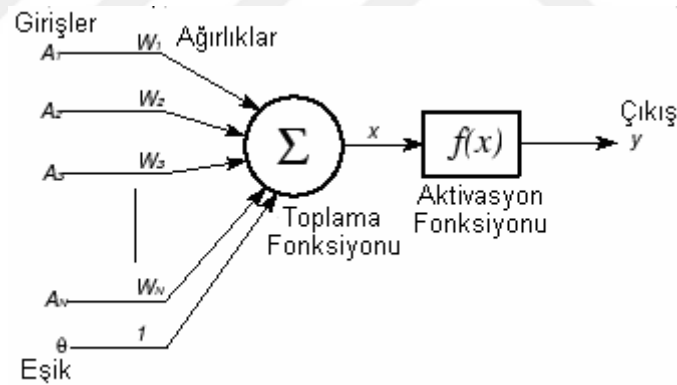
### 3.4 Yapay Sinir Ağları (YSA) Yöntemi

YSA iyi bir genelleme kabiliyetine sahip olduğu için KB sınıflandırması için uygundur. YSA, eğitim kısmında kullanılan girdiye kıyasla girdinin biraz değiştirilmesine rağmen doğru kararı verebilir. Bu durum, KB modellerinin aynı hata kaynağı için bile her zaman bir miktar değişime sahip olduğu KB sınıflandırması için çok önemlidir (Al-Geelani, M. Piah ve Bashir 2015). İleri beslemeli, geri yayımlı sinir ağı YSA' da en sık kullanılan öğrenme standardıdır. İleri-geri bir süreçte eğitilmiş denetimli bir öğrenme ağıdır.

YSA, temel konsepti biyolojik sinir ağlarının benzetmesinden alınan bilgi işlem sistemlerini ifade eder. Zeka veya örüntü tanıma içeren günlük işlerin otomatikleştirilmesi son derece zordur, ancak hayvanlar tarafından çok kolay bir şekilde yerine getirildiği görülmektedir. Bir hayvanın sinir ağı, nöron adı verilen özel bir hücre ağını içeren sinir sisteminin bir parçasıdır. Nöronlar, bir nöronun aksonu ile başka bir nöronun dendriti arasında bir ara bağlantının olduğu, kitlesel olarak birbirine bağlı

yapılardır. Bu bağlantı sinapsis olarak adlandırılır. Sinyaller dendritlerden hücre gövdesi yoluyla sinyallerin bağlı tüm dendritlere yayıldığı yerden aksona yayılır. Bir sinyal bir nöronun aksonuna sadece hücre “ateşlendiğinde” iletilir. Bir nöron ihtiyaca göre bir sinyali engelleyebilir veya uyarabilir.

Canlılardakine benzer şekilde, her yapay nöron, ortamdaki diğer yapay nöronlardan sinyaller alır, bu sinyalleri toplar ve ateşlendiğinde tüm bağlı yapay nöronlara bir sinyal iletir. Giriş sinyalleri, yapay nörona her bir bağlantı ile ilişkili negatif ve pozitif sayısal ağırlıklarla engellenir veya uyarılır. Yapay nöronun toplama fonksiyonu gelen tüm sinyalleri toplar ve net ağırlık sinyalini ilgili ağırlıkların ve sapmaların fonksiyonu olarak hesaplar. Net giriş sinyali, yapay nöronun çıkış sinyalini hesaplayan transfer fonksiyonuna giriş görevi görür. YSA’ların hücre seviyelerinde gerçekçi beyin modelleri olarak hizmet etmek için çok basit olmasına rağmen, bunlar organizmanın gerçekleştirdiği temel bilgi işleme görevleri için çok iyi modeller olabilmektedir. Yapay sinir ağlarının temel yapısı Şekil 3.19’da gösterilmiştir.



Şekil 3.19 Yapay sinir ağı temel yapısı.

### 3.4.1 SOM Haritaları

Kohonen tarafından geliştirilen Kendiliğinden Düzenlenen Harita (self-organized map-SOM), en popüler sinir ağı modellerinden birisi olma özelliği taşımaktadır. SOM algoritması, kazanan hepsini alır (winner-take-all) denilen denetimsiz rekabetçi öğrenmeye dayanmaktadır, bu da tamamen veri odaklı eğitimin ve haritanın nöronlarının birbirleriyle rekabet ettiği anlamına gelmektedir.

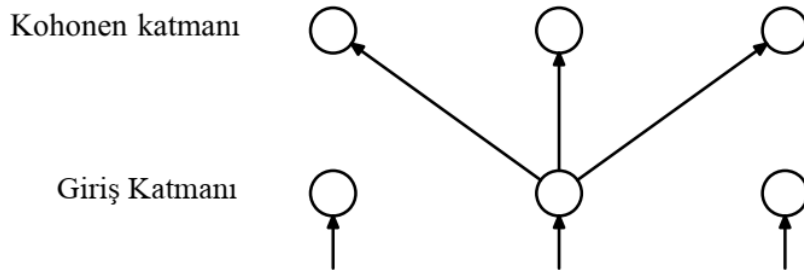
Çok katmanlı algılayıcı gibi denetimli algoritmalar, her veri vektörü için hedef değerlerin bilinmesini gerektirmektedir, ancak SOM bu sınırlamaya sahip değildir. SOM, giriş sinyalinin yüksek boyutlu uzayından tipik olarak 2 boyutlu nöron ızgarasına doğrusal olmayan bir eşleme özellikleri uygulayan bir sinir ağı modelidir.

SOM mimarisi tamamen bağlı iki katmandan oluşmaktadır: bir giriş katmanı ve bir Kohonen katmanı. Kohonen katmanındaki nöronlar bir veya iki boyutlu örgü halinde düzenlenmiştir. Şekil 3.20, çıkış nöronlarının tek boyutlu bir örgü içinde düzenlendiği tek boyutlu bir haritanın düzenini gösterir.

Giriş katmanındaki nöronların sayısı, nesnelerin niteliklerinin sayısı ile eşleşir. Giriş katmanındaki her nöronun, Kohonen katmanındaki her nörona, bir ileri besleme bağlantısı vardır. Girişlerin normalleştirildiği varsayılır, yani  $x = 1$  kabul edilmektedir. Kohonen katmanına girişler denklem (3.15) hesaplanabilir;

$$y_j = \sum_{i=1}^d w_{ji} x_i \quad (3.15)$$

burada  $w_{ji}$ ;  $i$  giriş nöronundan  $j$  çıkış nöronuna olan ağırlıktır. Kazananların hepsi bir paradigma altında, en büyük  $y_j$  ye sahip Kohonen katmanındaki nöron kazanan nöron veya kazananların hepsini alan nöron olacaktır.



Şekil 3.20 SOM Mimarisi.

SOM'un oluşumundan sorumlu algoritma önce ağıdaki ağırlıkları küçük rastgele değerler atayarak başlatmaktadır.

### 3.4.2 SOM Haritalarıyla KB Sınıflandırma

Bir n-boyutlu ağırlık vektörü  $w$  olan nöron  $i$ 'nin komşuluk ilişkisi ilişkilidir;  $n$ , giriş vektörünün boyutudur. Her eğitim adımında, bir giriş vektörü  $x$  rastgele seçilir ve  $x$  ile  $w$  arasındaki Öklid mesafeleri hesaplanır. Giriş vektörünün ve SOM ızgarasının görüntüsü, ağırlık vektörü  $x$ ' e en yakın olan en yakın birim  $w_{ik}$  ve en iyi eşleşen birim (EEB) olarak denklem (3.16)' teki haliyle tanımlanır:

$$D(x, w_i) = \sqrt{\sum_k (w_{ik} - x_k)^2} \quad (3.16)$$

SOM içindeki panel sayısı  $A \times B$  nöronlarına göre, U-matrisi, temsili bir  $U ((2A-1) \times (2B-1))$  boyutludur. Mesafe kriterinin seçimi uygulamaya bağlıdır. Tez çalışması kapsamında, Öklid mesafesi SOM ile yaygın olarak kullanıldığı için tercih edilmiştir. Bir SOM' un kalitesini ölçmek karmaşıktır. Çözünürlük ve topolojinin korunması genellikle SOM kalitesini ölçmek için kullanılır. Ölçmenin birçok yolu mevcuttur. Niceleme hatası haritanın kalitesini ölçmek için hesaplanır. Niceleme hatası, harita çözünürlüğünü ölçen her veri vektörü ve EEB' si arasındaki ortalama mesafedir. Topolojik hata, birinci ve ikinci EEB' lerin bitişik birimler olduğu tüm veri vektörlerinin oranıdır, aksi halde bu, topolojinin ihlali olarak kabul edilir ve bu nedenle hata değeri artırılarak cezalandırılır. Kısmi deşarj örüntülerinin tanınması ve sınıflandırılması için, hataların ve işlem süresinin en aza indirilmesi önemlidir, ancak tanıda başarılı olacak parametre, kod çizelgesini değerlendirdiği için niceleme hatasıdır.

### 3.5 K En Yakın Komşuluklar Yöntemi

K-en yakın komşuluk (KNN) sınıflandırması, mevcut tüm vakaların depolanacağı ve yeni bir vaka, mesafe ölçümü gibi benzerlik kriterlerine göre sınıflandırılacağı, alternatif bir parametrik olmayan yöntemdir (Pattanadech and Nimsanong, 2015). Hedef ve en yakın komşular arasındaki mesafeyi değerlendirmek için, bir araştırmacının hesaplama için

mesafe işlevini seçmesi gerekir. KNN sınıflandırması için Öklid mesafesi, Manhattan mesafesi, Minkowski mesafesi veya Hamming mesafesi uygulanabilir. Bu tez çalışması kapsamında Öklid mesafesi tercih edilmiştir. Öklid mesafesi denklem (3.17)'de verilmiştir.

$$\text{Öklid} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3.17)$$

Denklemden,  $x$  girdi vektörü,  $y$  eğitim vektörü ve  $n$  sınıflandırmada kullanılan en yakın komşuların sayısıdır. Optimal  $k$  değeri ilk olarak verilerden gözlemlenebilir veya öneri olarak 3 ile 10 arasında bir değer belirlenebilir.

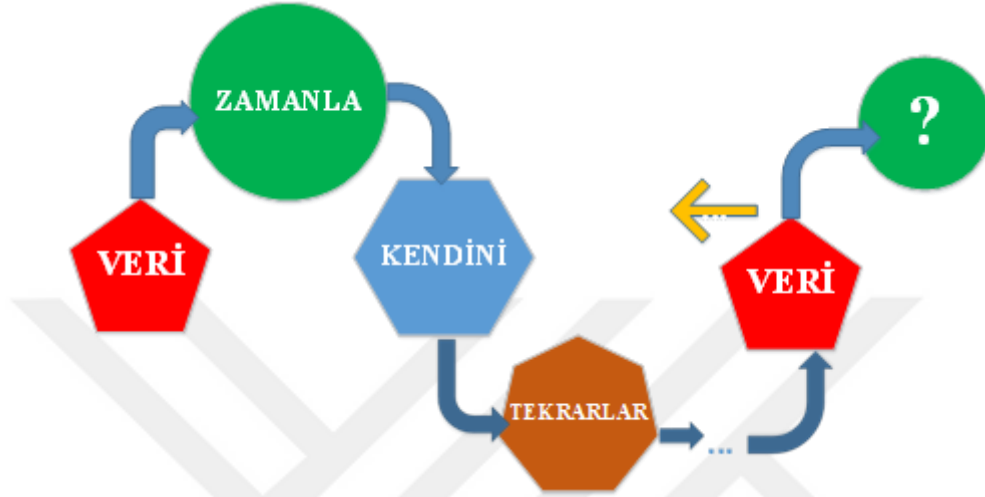
KNN sınıflandırma modeli MATLAB biyoinformatik araç kutusu (toolbox) kullanılarak test edilmiştir. Sınıf = knnclassify (Örnek, Eğitim, Grup,  $k$ , mesafe); Sınıf, KNN tarafından sınıflandırılan sınıf üyeliği, Örnek test seti matrisidir. Her matris satırının değeri grubun karşılık gelen girişi olan gruba ait olduğu eğitim matrisidir. Grup ayrı değerlerdir.

Eğitim matrisindeki her bir satır için grupları belirleyen  $k$ , sınıflandırmada kullanılan en yakın komşu sayısıdır, mesafe-mesafe fonksiyonudur. Bu çalışmada  $k = 3$  ve öklid uzaklık fonksiyonu kullanılmıştır. KNN modelinde 18 orijinal giriş değişkeni kullanılmıştır.

### 3.6 Mycielski Yöntemi

Mycielski kesikli zaman serisi verilerinde öngörü yapan deterministik bir algoritmadır (Fidan 2006). Algoritmanın temelinde, tahmin edilecek andan hemen önce tekrar etmiş verileri, geçmişteki en uzun alt dizi olarak bulmak yatmaktadır. Verinin zaman içerisinde kendini tekrarladığı varsayımına sahiptir. Bu varsayım, Mycielski yönteminin önermesine uygun olarak Şekil 3.21'de grafik haline getirilmiştir. Aranan alt dizi (vektör, örüntü) bulunduğunda, bu alt diziden sonra gelen eleman, öngörü değerini oluşturacaktır. Mycielski yöntemi önceleri sinyal işleme tekniklerinde öngörücü sıkıştırma yöntemi

olarak da kullanılmıştır (Gerek ve Fidan 2006). Mycielski yöntemi, kodlama işlemi sırasında tarama için dinamik olarak yapılandırılmış kodlama veri tabanı ile birleştirilerek ve üzerine zaman geliştirmesi uygulanarak Mycielski-78 adıyla yeni bir yöntem geliştirilmiştir.



Şekil 3.21 Mycielski algoritmasının önermesi.

Ayrıca Mycielski yöntemi bu uygulama alanı ile sınırlı kalmamış yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisinin en önemli sorunlarından olan rüzgar hızının stokastik yapısına bir çözüm olarak uygulanmış ve sonucunda yüksek doğrulukla rüzgar hız verilerinin tahmini elde edilmiştir (Lee 2012, Fidan 2009). Mycielski yönteminin başarılı bir rüzgar hızı tahmincisi ve genellikle iyi sonuçlar verdiği sonucuna varmışlardır.

Güncel çalışmalarda ise Mycielski yöntemi, güneş ışıınım tahmini probleminde de kullanılmıştır (Hocaoglu and Serttas 2017). Türkiye’ de seçilen bazı iller için güneş ışıınımı tahmini yapılan Mycielski modeli, aynı zamanda Markov yöntemiyle geliştirilerek başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Tahmin işlemi herhangi bir andaki veri için, o andan önceki tüm geçmiş veriler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Tahmin işleminin fonksiyonel ifadesi denklem (3.18) ile verilebilir.

$$\hat{x}[n + 1] = f_{n+1}(x[1], L, x[n]) \quad (3.18)$$

Formüldeki  $\hat{x}[n + 1]$  en olası tahmin anlamını ifade etmektedir.  $n$  dizideki eleman sayısıdır. Eşitlikteki  $L$  sembolü geçmişteki en uzun dizinin yerini temsil etmektedir.

Algoritma şu andaki diziyle eşleşecek geçmiş veriler içerisindeki en uzun tek bir diziyi bulmayı amaçlamaktadır. Bu yöntemi uygulayarak sinyal içindeki aynı alt yapıları bulup, bu yapılardan sonraki davranışın da aynı olacağını varsayar. Bu varsayıma bağlı olarak bu alt diziyi kendinden önceki geçmiş içinde bulduğunda, bulunduğu yerdeki alt diziden sonra gelen elemanı fonksiyonun görüntü değeri olarak belirler. Bu değer analitik karşılığı denklem (3.19)'da verilmiştir (Hocaoğlu 2009). Denklem (3.20)'de tahmin değerinin atanması görülmektedir.

$$m = \underset{k}{\operatorname{argmax}} \begin{cases} x[k] = x[n], x[k - 1] = x[n - 1] \\ \dots \dots x[k - L + 1] = x[n - L + 1] \end{cases} \quad (3.19)$$

$$f_{n+1} = \hat{x}[n + 1] = x[m] \quad (3.20)$$

şeklinde ifade edilir.

Dizi arayışına KB verilerinin geçmiş verisinin sonundan başlanır. Öngörü değerinin olduğu birkaç eleman söz konusu olduğunda veri dizisi arttırılarak işleme devam edilir. Algoritma geçmiş veriler içerisinde bulunmayan bir veri dizisi ile karşılaşınca ya da sinyalden daha uzun bir dizi elde edilinceye kadar devam eder. Bu şekilde elde edilen son dizinin öncesindeki sinyal elemanı,  $\hat{x}[n + 1]$  için en "olası" öngörüdür.

Araştırma işleminin veri uzunluğu genişletilerek yapılması öngörü değerinde iyileştirme sağlar. Daha doğru bir sonuç elde etmek için her arama sonucunda geçmişten öngörü olarak belirlenen veri ve üzerinde arama yapılan veri dizisi sinyalden çıkarılarak arama aralığı daraltılır. Bu işlem tüm tarama süreci sonuna kadar devam eder.

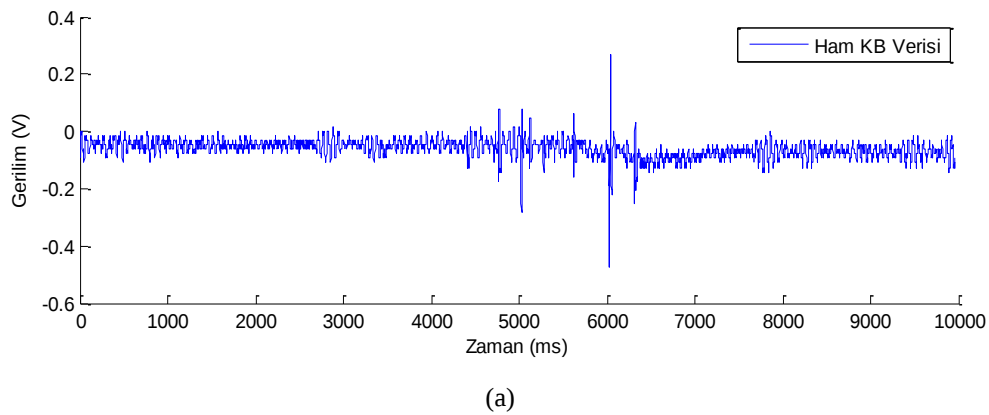
Taranan en kısa alt dizi bile geçmişte bulunamadığı durumlarda, öngörü değeri sıfır kabul edilmiştir. Karşılaştırma geçmiş verilerle yapıldığından  $x[2]$  ve  $x[1]$  için herhangi bir arama işlemi yapılamaz. Bu elemanlar için öngörü değeri 0 olarak kabul edilir ve ilk öngörü  $x[3]$  elemanı için yapılır.

### 3.6.1 Veri Düzenleme

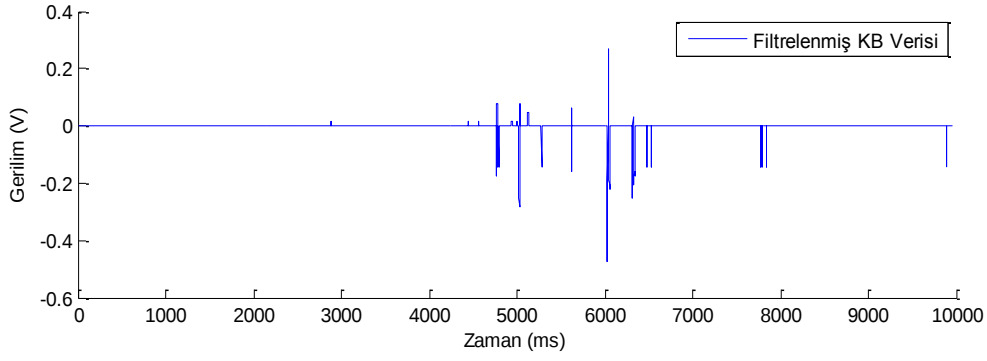
Mycielski yönteminin başarılı bir biçimde çalışabilmesi için, geçmiş veri seti örüntüsünü oluşturma amacıyla, ölçülen tüm kusur türü sinyalleri ve konum sinyalleri birleştirilerek tek bir veri seti haline getirilmiştir. Bu şekilde her bir kusur türü için kaydedilen verilerin %83'ü veri seti içerisinde kalırken, %17'si taranacak ve eşleştirilecek test verisi olarak kullanılır. Mycielski yönteminde tarama örüntüsündeki elemanların geçmişte bir konumdaki elemanlarla birebir örtüşmesi gerekmektedir. Bu nedenle yüksek çözünürlükle ve yüksek örnekleme hızında kaydedilen KB sinyali verilerinin, çözünürlüğü çok fazla düşürmeden ve sinyalin dalga şeklini bozmadan, verilerin tam sayı olacak biçimde yuvarlanması veri sayısının azaltılması gerekmektedir.

Verilere normalizasyon benzeri yapılan bir işlem olarak, öncelikle kaydedilen ham KB verileri ölçeklendirilmiştir. Ölçeklendirme işlemi için öncelikle verilerin histogramına bakılmış ve aralık değerleri belirlenmiştir. Ardından gürültü olduğu açıkça belli olan rassal değişen küçük genlikli, yüksek frekanslarda seyreden veriler, filtrelenerek sıfıra eşitlenmiştir.

KB sinyallerine uygulanan filtreleme işlemi öncesi ve sonrası sinyalin durumu Şekil 3.22'de görülmektedir. Bu filtreleme sayesinde KB darbeleri net olarak ortaya çıkmış, veride eşleşmeleri güçleştirecek gürültüler süzölmüştür.



Şekil 3.22 (a) Ham KB verisi, (b) Filtrelenmiş KB Verisi.



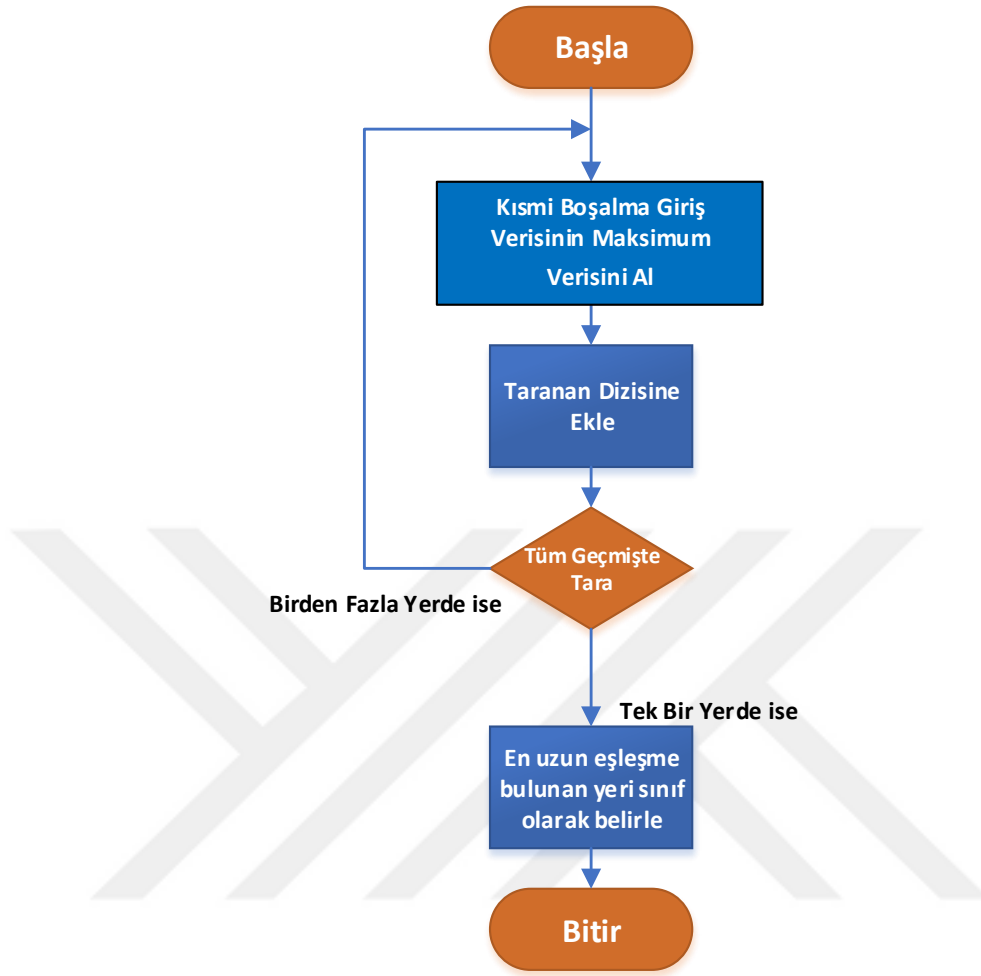
(b)

Şekil 3.22 (Devam) (a) Ham KB verisi (b) Filtrelenmiş KB verisi.

### 3.6.2 Mycielski Yönteminin KB İşaretlerine Uygulanması

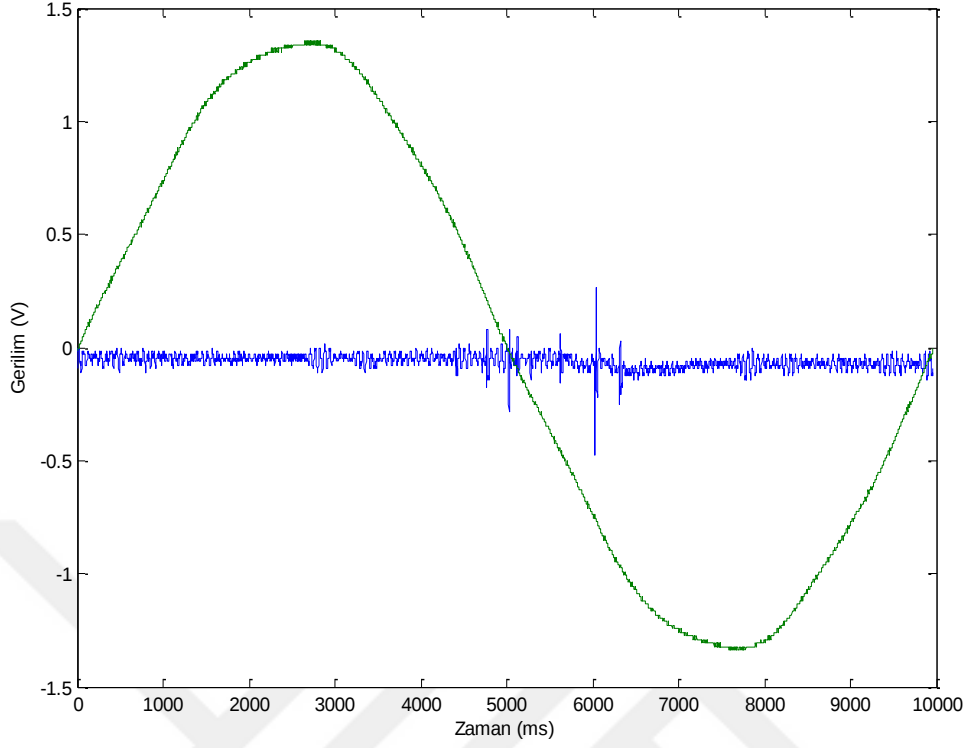
Mycielski yöntemi, KB verilerinin analiz edilmesinde ilk kez bu tez çalışması kapsamında kullanılmıştır. Algoritma, KB sinyalleriyle yapılacak olan uygulamalara göre, 2 farklı şekilde iyileştirilmiştir. Sınıflandırma çalışmalarında, öncelikle tüm kaydedilen KB'ler uzun bir veri seti olacak şekilde birleştirilmiştir. Ardından, uzun veri seti, Mycielski yönteminde bahsedilen “geçmiş” veri seti olarak kullanılmış ve sınıflandırılacak olan KB giriş sinyali, geçmiş veri setinde taranmıştır. Eşleşen en uzun örüntünün bulunduğu indisler, hangi kusura veya uygulamaya göre hangi konuma ait ise algoritma sınıflandırma sonucunda o sınıfı üretmektedir.

Şekil 3.23'te algoritmanın KB verilerini tahmin etme süreci akış diyagramı şeklinde gösterilmiştir.

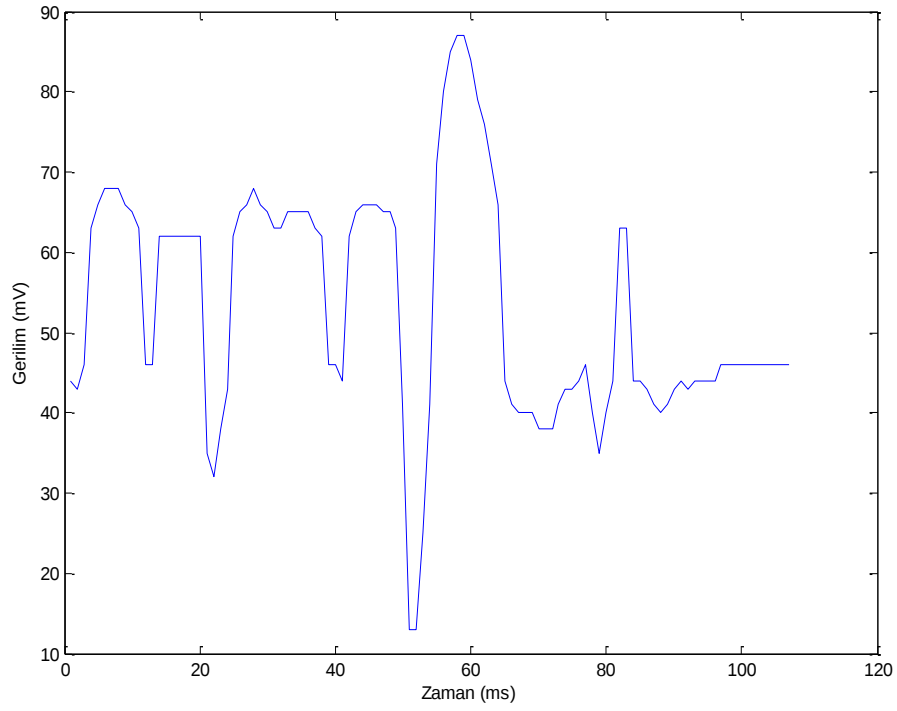


**Şekil 3.23** Mycielski algoritmasının sınıflandırma aşamasında çalışması.

Şekil 3.24'te veri seti içerisinde taranacak olan bir giriş sinyali görülmektedir. Taranacak olan giriş sinyali, bir AC gerilim çevrimi (periyodu) boyunca ölçülen KB sinyalıdır. Mycielski yöntemine uyarlayabilmek için, KB sinyalı, veri düzenleme aşaması sonrasında Şekil 3.25'deki hali almaktadır. Sıra sıra KB darbelerini yan yana bulunduran, darbenin olmadığı yerlerin süzüldüğü bir sinyal haline gelmiştir. Sınıflandırmada, üretilecek bir dalga şekli olmadığından dalga şeklinin bozulması değil, doğru sınıfla eşleşmesi önemlidir. Ancak diğer uygulama olan tahminde ise dalga şeklinin bozulmadan kalması büyük öneme sahiptir.



Şekil 3.24 Sınıflandırılacak olan bir çevrimlik KB ve senkron AC sinyali.



Şekil 3.25 Mycielski için veri düzenleme sonrası giriş sinyali.

### 3.7 Dalgacık Dönüşümleri Yöntemi ile Gürültü Süzme

Kısmi boşalmaların Mycielski - Markov yöntemiyle tahmin edilmesinin öncesinde Dalgacık - Haar dönüşümü yöntemi kullanılmıştır. Sınıflandırma uygulamalarında ise eşik değerleri belirlenmiş ve altında kalan veriler sıfırlanmak suretiyle süzölmüştür.

Haar dalgacık, en basit dalgacık türüdür. Ayırık biçimde, Haar dalgacıkları Haar dönüşümü adı verilen matematiksel bir işlemle ilişkilidir. Haar dönüşümü diğer tüm dalgacık dönüşümleri için bir prototip görevi görür.

Şu anda "dalgacık" dediğimiz kavramın ilk kaydedilen sözü 1909' da Haar tarafından yapılan bir tezde görünmektedir (Zhang 2007). Dalgacık kavramı bugünkü teorik biçiminde ilk olarak Morlet tarafından önerilmiştir. Dalgacık analizi yöntemleri esas olarak Meyer tarafından geliştirilmiştir. Ana algoritma 1988' de Mallat' ın çalışmalarına dayanmaktadır. O zamandan beri, sinyal sentezi ve analizi, gürültü giderme ve sıkıştırma, örüntü tanıma ve sinyal / görüntü işleme gibi çeşitli geçici analiz uygulamaları için birçok alanda yaygın olarak kullanılmıştır.

İlk olarak, Haar dönüşümü ile analiz edeceğimiz sinyallerin türünü tanımlamamız gerekmektedir. Ayırık sinyal, ayırık örneklerde meydana gelen değerlerle zamanın bir fonksiyonudur. Genel olarak,  $f = (f_1, f_2, \dots, f_N)$  biçiminde ayrı bir sinyal ifade edeceğiz, burada  $N$ ,  $f$ 'nin uzunluğu olarak ifade edeceğimiz pozitif bir çift tam sayıdır.  $F$  değerleri,  $N$  gerçekte sayı  $f_1, f_2, \dots, f_N$ 'dir. Bu değerler tipik olarak sinyalinin  $t = t_1, t_2, \dots, t_N$  anında ölçülen ölçülen değerleridir. Yani,  $f$  değerleri denklem (3.21)'deki şekliyle;

$$f_1 = g(t_1), f_2 = g(t_2), \dots, f_N = g(t_N) \quad (3.21)$$

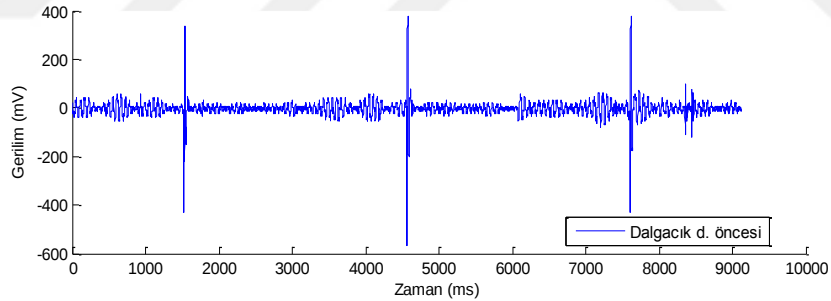
olarak ifade edilecektir.

Basitlik açısından, birbirini izleyen her zaman değerini, birbirinden ayıran zaman artışının, her zaman aynı olduğu varsayılacaktır. Bu durum, KB sinyallerinin belli bir örnekleme aralığında yapılan kaydına benzetilebilir. Ayırık sinyal bu şekilde tanımlanmış değerlere sahip olduğunda, eşit aralıklı örnek değerleri veya yalnızca örnek değerler

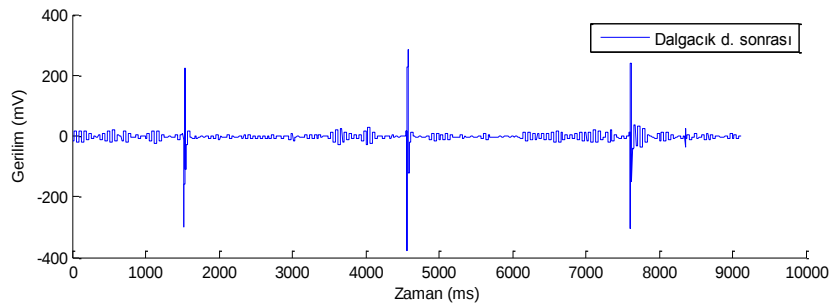
ifadesi kullanılmaktadır. Örnek değerlerin önemli bir örneği, .wav duzantılı bir ses dosyasında depolanan veri değerleri kümesidir. Diğer bir örnek, bir CD'ye kaydedilen ses yoğunluğu değerleridir. Ses sinyali olmayan bir analog sinyal örneği sayısallaştırılmış bir elektrokardiyogramdır.

Tüm dalgacık dönüşümleri gibi, Haar dönüşümü de ayrık bir sinyali ortasından bölerek iki alt işarete ayırıştırır. Bir alt işaret, çalışan bir ortalama veya eğilimdir; diğer alt işaret ise çalışan bir fark ya da dalgalanmadır.

Dalgacık dönüşümü daha önce gürültülü zeminlerde KB tespiti için, KB' leri elektriksel gürültüden ayırmak için, KB bantlarını dar bant girişiminden çıkarmak için kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında ise Mycielski yöntemi ile sinyal tahmini yapmadan önce sinyali gürültülerinden arındırmak için tercih edilmiştir. Tek boyutlu Haar Dalgacık dönüşümü ile sinyal süzölmüş ve gürültüler yok edilmiştir. Bunun için 5 seviyeli katsayılar seçilmiştir. Şekil 3.26'da Haar Dalgacık dönüşümü uygulanmadan önce ve filtreleme sonrası KB sinyaline ait çizim görölmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.26 Dalgacık dönüşümü öncesi (a) ve sonrası KB sinyalleri (b).

Dalgacık dönüşümü MATLAB'ın halihazırda var olan “Wavelet Toolbox” araç kutusu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eşik değerleri sinyal üzerinden el ile, gürültüleri süzecek şekilde belirlenmiştir.

### 3.8 Markov Yöntemi

Markov tekniği, Andrey Markov tarafından üretilen, bir durum uzayından diğer bir durum uzayına geçme durumunu matematiksel olarak modelleyen sistemdir. Markov, hafızasız olarak tanımlanabilen olasılıksal bir süreçtir. Gelecek durum yalnızca şu anki duruma bağlıdır, geçmişteki olaylar dizisiyle bağlantısı yoktur. Bu hafızasızlık, yani geçmiş kaydetmeme durumuna Markov özelliği denilir. Tez çalışmasında, bu özelliğin tersine hareket eden Mycielski yöntemiyle, Markov yöntemi beraber kullanılarak pek çok ayrı durum değerlendirilmiştir.

Birinci dereceden Markov zinciri ise Markov özelliğine sahip stokastik bir süreçtir. Yani gelecek durumlar geçmişten bağımsız olarak o andaki durum kullanılarak tahmin edilmektedir. Başka bir deyişle tahmin yapılan andaki durum gelecek durumla ilgili tüm bilgileri kapsamaktadır. Markov zincirinin diğer stokastik modellerden daha güvenilir olduğunun kanıtlanmasıyla bu modele olan ilgi artmış ve yapılan enerji uygulamaları çeşitlilik kazanmıştır (Mustacchi, Cena ve Rocchi 1979).

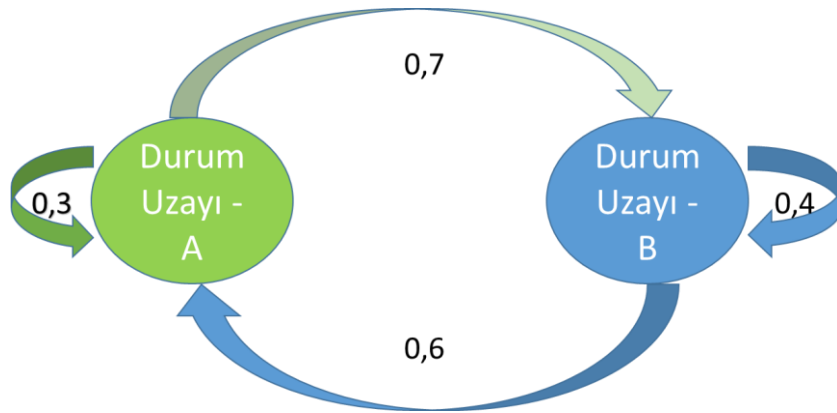
Markov yöntemi literatürde, KB süreçlerini incelemeye bazı çalışmalarda tercih edilmiştir. Ancak genellikle Saklı Markov modellerin kullanımına rastlanılmıştır. Boşluk boyutlarının maksimum yük transfer özelliklerine göre sınıflandırılmasına yönelik Saklı Markov modeli uygulanmış, besleme gerilimi örüntülerinden bir yaklaşım tanımlanmıştır (Abdel-Galil vd. 2004). Bu modellerde, farklı boşluk boyutları için KB örüntüleri, gerçek eğrilerden ziyade bir dizi olayla temsil edilmektedir. Eğitim aşamasında, her boşluk boyutu kendi öz dizisini yayan benzersiz bir sınıfı temsil eder. Bu özel olaylar dizisi için etiketler atamak üzere vektör nicemleme uygulanır. Vektör nicemleme tarafından üretilen etiketlerden oluşan bir dizi eğitim deseni kullanılarak her sınıf için bir Saklı Markov Modeli eğitilir. Testler sırasında, tanınacak olayların sırası ölçülür ve sonra geliştirilen tüm modellerle eşleştirilir. En iyi eşleşen model boşluk boyutu sınıfını belirler. Deney

sonuçları, önerilen algoritmanın dikkate değer kabiliyetini göstermektedir.

KB sinyalleri ve konuşma arasında yakın bir benzerlik vardır (Satish and Gururaj, 1993). Her ikisi de zaman değişimli ve davranış bakımından benzerdir. Saklı Markov modelleri (SMM) konuşmayı modelleme ve tanımda çok başarılı olmuştur. Bu nedenle, KB modellerini sınıflandırmak için kullanılmıştır. SMM kullanılarak KB örüntülerinin başarılı bir şekilde tanınmasının mümkün olduğu gösterilmiştir.

Markov yöntemi, sadece bitişik devirler arasında seri bağımlılık göstermesi nedeniyle rassal değişkenler dizisinde zincir adıyla anılır. Zincir adı, “Bir sonraki adımda ne olacağı şu anki adıma bağlıdır.” sistemlerinde gerçekleşen birbiriyle bağlanmış olayları tanımlarken kullanılır. Birinci dereceden Markov, yalnızca gelecek durumun tek bir şu anki duruma bağlı olması durumudur, ikinci ve daha yüksek dereceden Markov süreçlerinde ise bir önceki ve daha önceki durumlar da hesaba katılır.

Süreçteki durum uzaylarının değişimine geçiş adı verilmektedir. Olasılıklar, geçiş olasılıkları olarak nitelendirilen, durum değişimleriyle ilişkilendirilir. Şekil 3.27’de durum geçişleri görselleştirilmiştir. Geleneksel olarak, sürece tüm olası durumlar ve geçişler dâhil edilir, bu yüzden her zaman gelecek bir durum vardır ve süreç hiç bitmez. Mycielski yöntemindeki en uzun bir eşleşmeye rastlanmama durumunda sistemin kararsızlığını tamamlayacak olan da hiç bitmeyen Markov sürecidir.



Şekil 3.27 Durum geçiş olasılıkları (A ve B durum uzayları).

$X(t_n)$  stokastik süreç, kesikli durumlar uzayı  $S=\{1,2,...,K\}$  kabul edersek, genel olarak  $t_1 < t_2 < ... < t_{n-1} < t_n$  şeklinde zaman noktaları verilen bir dizi için durumsal olasılıklar denklem (3.22)'de sunulduğu şekilde olmalıdır.

$$\Pr\{X(t_n) = i_n | X(t_1) = i_1, \dots, X(t_{n-1}) = i_{n-1}\} = \Pr\{X(t_n) = i_n | X(t_{n-1}) = i_{n-1}\} \quad (3.22)$$

$\Pr\{X(t) = j | X(s) = i\} = P_{ij}(s, t)$  olasılıkları,  $i$  durumundan  $j$  durumuna geçiş olasılığı olarak adlandırılır. Durum geçiş olasılıkları matrisi (DGOM) denklem (3.23)'te formülü gösterildiği şekilde, dizideki her bir değer için hesaplanır (Shamshad vd. 2005, Hocaoglu ve Serttas 2017).

$$\begin{bmatrix} p_{1,1} & \cdots & p_{1,k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{k,1} & \cdots & p_{k,k} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

DGOM, tahminde taramanın yapılacağı geçmiş dizisindeki KB durumlarının birbirleriyle olan geçiş olasılıkları ilişkilerini vermektedir. Kısmi boşalma verisinin ölçeklendirilmiş halinden üretilen 60x60'lık DGOM'un bir parçasının görünümü Çizelge 3.5' te verilmiştir.

**Çizelge 3.5** Durum geçiş olasılıkları matrisinin bir bölümü.

| Durumlar  | 52.<br>durum | 53.<br>durum | 54.<br>durum | 55.<br>durum | 56.<br>durum | 57.<br>durum | 58.<br>durum | 59.<br>durum | 60.<br>durum |
|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 52. durum | 0,750        | 0,000        | 0,000        | 0,250        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        |
| 53. durum | 0,000        | 0,667        | 0,000        | 0,000        | 0,083        | 0,000        | 0,167        | 0,000        | 0,000        |
| 54. durum | 0,000        | 1,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        |
| 55. durum | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,600        | 0,000        | 0,000        | 0,400        | 0,000        | 0,000        |
| 56. durum | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,688        | 0,063        | 0,063        | 0,000        | 0,000        |
| 57. durum | 0,000        | 0,032        | 0,000        | 0,032        | 0,000        | 0,645        | 0,129        | 0,097        | 0,000        |
| 58. durum | 0,000        | 0,002        | 0,002        | 0,000        | 0,000        | 0,009        | 0,938        | 0,011        | 0,022        |
| 59. durum | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,001        | 0,001        | 0,976        | 0,019        |
| 60. durum | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,000        | 0,003        | 0,031        | 0,962        |

Durum geçiş olasılıkları matrisinde verilerin yoğunlukla diyagonal (köşegen) üzerinde bulunması beklenir. Çizelge 3.5' de bu duruma güzel bir örnek teşkil etmektedir. Kendi değerinin karşılığında uzaklaştıkça olasılığın azalması beklenmektedir.

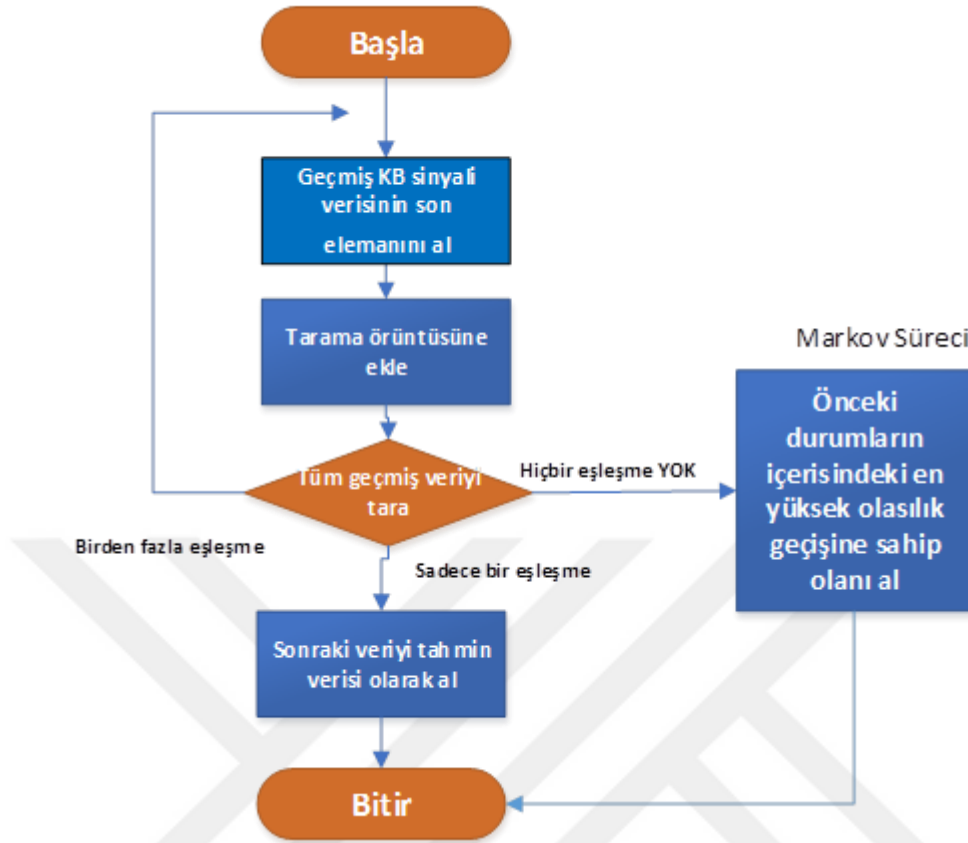
### 3.8.1 Mycielski - Markov Yöntemi

Mycielski öngörücüsü, aranan veriyle geçmişte birebir eşleşen en uzun veriyi bulmaktadır. Bunu yaparken öncelikle bir elemanı tüm geçmişte taratmakta, ardından çok muhtemel çok yerde bulmasından dolayı yanındaki elemanı da arama dizisine ekleyip geçmişten yeniden taramakta ve bu şekilde yalnızca bir tane en uzun eleman kalana kadar aramalara devam etmektedir. Ancak pratik uygulamalarda, aradığı örüntüden geçmişte birkaç yerde bulmasının ardından, arama örüntüsünü artırınca hiçbir yerde eşleşmeme durumlarıyla karşılaşabilmektedir. Bu durumda tahmin edilecek veri konusunda kararsızlık oluşmaktadır. Markov yöntemi burada devreye girmekte ve geçmiş verisinden oluşturulan durum geçiş olasılıkları matrisine göre, eşleşen veri dizilerinden sonra gelen, en yüksek geçiş olasılığına sahip olanı tahmin verisi olarak atar.

Mycielski - Markov yöntemi, ilk kez tez çalışmasının yazarı ve danışmanı tarafından, güneş ışınlam şiddetinin tahmini için 2017 yılında bir makalede yayınlanmıştır (Hocaoglu and Serttas, 2017b). Doktora tez çalışmasıyla birlikte, KB sinyallerine uyarlanmış ve başarılı tahminler gerçekleştirilmiştir.

#### 3.8.1.1 Mycielski - Markov Yöntemiyle KB İşaretlerinin Tahmini

Kısmi boşalma işaretleri tahminden önce tahmine hazır bir veri haline getirilmeye çalışılmıştır. Öncelikle gürültülü KB sinyallerinin dalgacık Haar dönüşümleriyle gürültüden süzme işlemi gerçekleştirilmiştir. Gürültüden süzülen KB verisinin dörtte üçü geçmiş verisi olarak kullanılmış, dörtte biri ise tahmin edilecek olan gelecek verisi olarak ayrılmıştır. Mycielski - Markov yönteminin çalışma mantığı ve akış diyagramını gösteren şema Şekil 3.28’de gösterilmiştir.



Şekil 3.28 Mycielski Markov algoritmasına ait akış diyagramı.

Şekil 3.28’de belirtildiği üzere, KB geçmiş verisinin en son elemanı aranan veri örüntüsüne eklenir ve tüm geçmiş taranır. Eşleşmeler olması durumunda verinin bir önceki elemanı da taranan örüntüye eklenir ve böylece en uzun eşleşen veri aranır. En uzun bir tane bulamaması durumunda, algoritma Markov yöntemiyle KB verisinin durum geçiş olasılıkları matrisine bakar. Durum geçiş olasılıkları matrisine göre örüntüdeki verilerden hangisine geçiş olasılığı en yüksek ise algoritma tahmin edilecek veriyi o veri olarak seçer.

## 4. BULGULAR

Tez çalışmasında kullanılan yöntemlere ait sonuçlar bu bölümde sunulmuştur. Tez kapsamında birden çok yöntem kullanıldığı için her bir yönteme ait sonuçlar ayrı alt bölümlerde verilmektedir.

### 4.1 DVM ile KB Sınıflandırma Sonuçları

Farklı çeşitlerdeki KB verilerinin sınıflandırılmalarındaki başarıyı artırmak için kullanılan Fourier dönüşümü veri setlerinde ayarlamalar yapılmıştır. Destek vektör makineleriyle sınıflandırmada herhangi bir deneyin Fourier dönüşümüne ait veri setinin tamamını kullanmak yerine, sınıflandırmada en yüksek anlamı taşıyan elemanların bulunması amaçlanmıştır. Bu nedenle bir ölçüm deneyi için 3040 eleman içeren her bir Fourier dönüşümü verisi, 20 elemanlık alt verilere (veri grupları) bölünmüştür. Her bir 20 elemanlık küçük veri setleri sınıflandırmalarda kullanılmış ve başarı oranına etkisi incelenmiştir. Başarıya etkisinin yüzdeleri Çizelge 4.1’ de sunulmuştur. Bazı veri parçalarının sınıflandırmaya çok düşük etkisi olduğu, bazılarının ise yüksek anlamlar içerdiği gözlenmiştir.

**Çizelge 4.1** Veri gruplarının sınıflandırma başarısına etkileri.

| Veri Grup No | Veri Gruplarının Sınıflandırmadaki Yüzdelik Etkisi (%) |             |             |             |      |
|--------------|--------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|------|
| 1-5          | 50,0                                                   | <b>62,5</b> | 58,3        | 58,3        | 58,3 |
| 6-10         | 58,3                                                   | 54,2        | 50,0        | <b>66,7</b> | 50,0 |
| 11-15        | 41,7                                                   | 45,8        | <b>62,5</b> | 54,2        | 50,0 |
| 16-20        | 33,3                                                   | 37,5        | 41,7        | 50,0        | 45,8 |

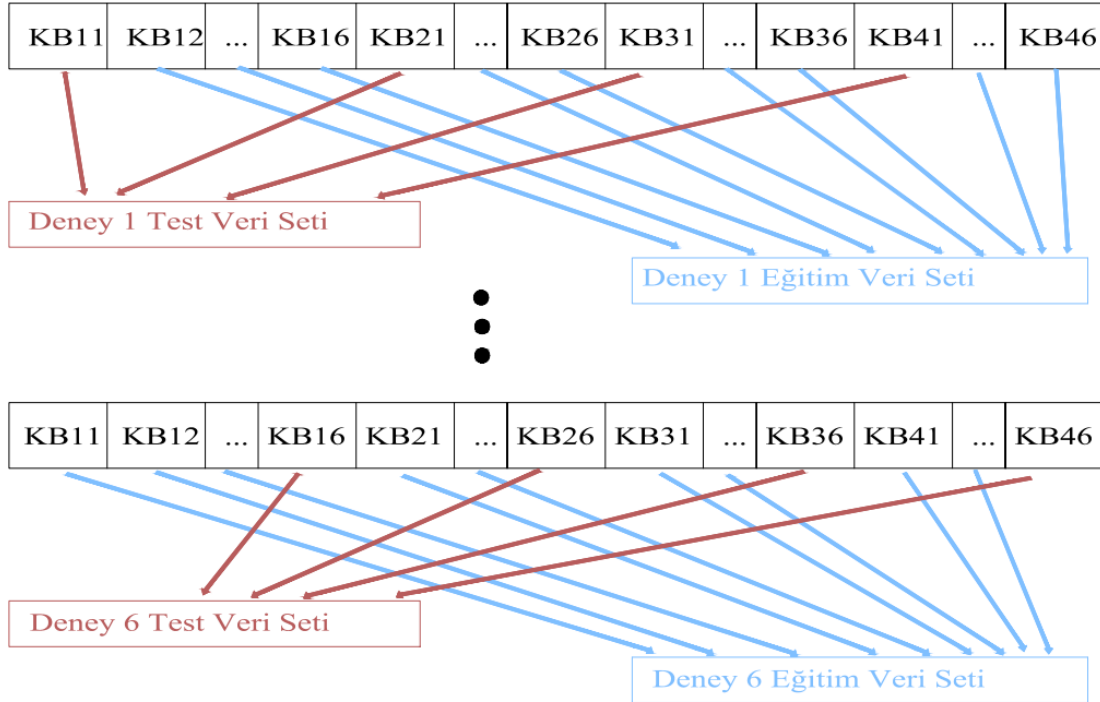
Fourier dönüşümlerindeki ayarlamaların ardından KB verileri, kusur türü sınıflandırma ve arıza konum belirleme amaçlı çok sınıflı destek vektör makineleriyle sınıflandırılmıştır. Destek vektör makineleriyle yalnızca iki sınıf durumunda sınıflandırma yapılmasına olanak sağlarken tez çalışmasında yer alan kusur türü belirleme probleminde 4 sınıf ve konum belirlemede 3 sınıf olduğu için çok sınıflı DVM kullanılmıştır. Bölüm 4.1.1’ de kusur türü sınıflandırma sonuçları verilirken, Bölüm 4.1.2’ de arıza konumlandırma sonuçları sunulmuştur.

#### 4.1.1 Kusur Türü Sınıflandırma Sonuçları

Kısmi boşalma türlerinin sınıflandırılma sonuçları Çizelge 4.2’ de sunulmuştur. Deneyler yapıldıktan sonra DVM ile sınıflandırma sonrası, yöntemin başarısını değerlendirebilmek amacıyla k-katlı çapraz doğrulama işlemi yapılmıştır. Çapraz doğrulama sistemini şematik olarak gösteren çizim Şekil 4.1’de sunulmuştur.

**Çizelge 4.2** Kısmi boşalma sinyalleri için kaynak sınıflandırma sonuçları.

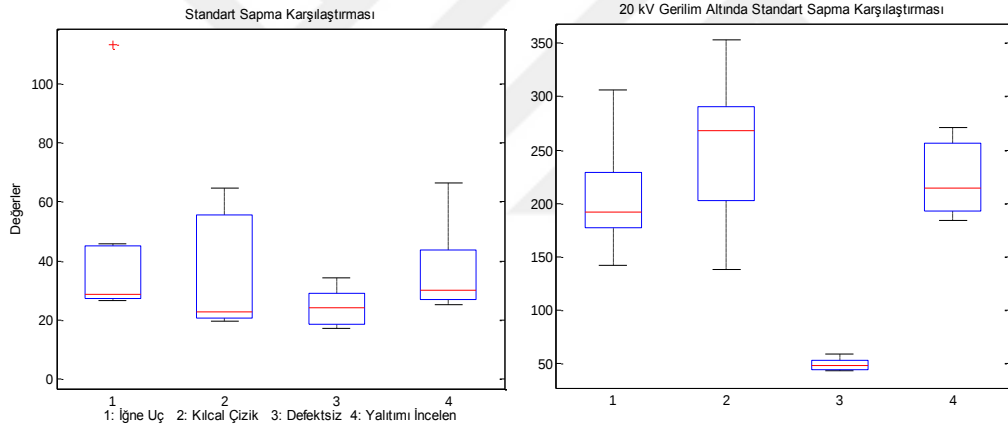
| Testte Kullanılan Deney | Beklenen   |   |   |   |          | Gözlenen   |   |          | Doğruluk   |
|-------------------------|------------|---|---|---|----------|------------|---|----------|------------|
|                         | Kusur Türü |   |   |   |          | Kusur Türü |   |          |            |
| Deney 1                 | A          | B | C | D | <b>D</b> | B          | C | <b>B</b> | 50%        |
| Deney 2                 | A          | B | C | D | A        | B          | C | <b>A</b> | 75%        |
| Deney 3                 | A          | B | C | D | A        | B          | C | <b>A</b> | 75%        |
| Deney 4                 | A          | B | C | D | A        | B          | C | D        | 100%       |
| Deney 5                 | A          | B | C | D | A        | B          | C | <b>A</b> | 75%        |
| Deney 6                 | A          | B | C | D | A        | B          | C | D        | 100%       |
| <b>Ortalama</b>         |            |   |   |   |          |            |   |          | <b>79%</b> |



**Şekil 4.1** KB sinyallerinin sınıflandırma sonuçlarına uygulanan k-katlı çapraz doğrulama.

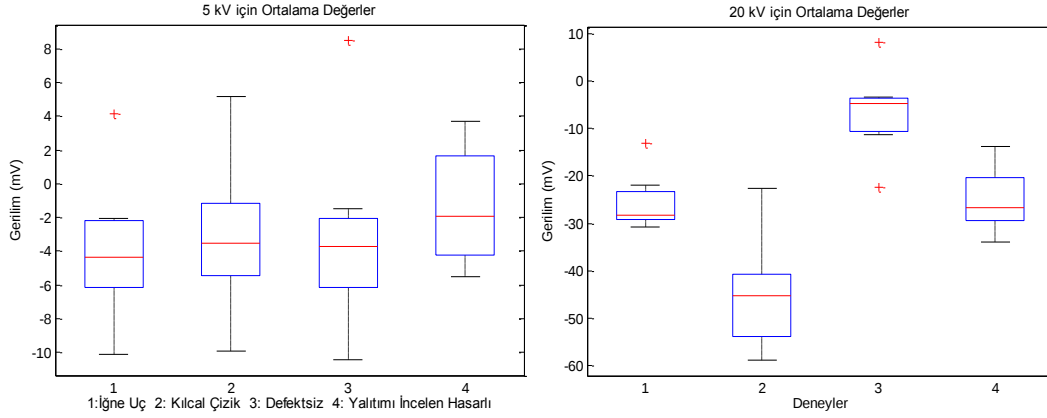
Çizelge 4.2’ de görüleceği üzere tez çalışmasında üretilen KB verileri ve önerilen özniteliklerle bazı deneylerde %100 doğrulukla sınıflandırma yapmak mümkün olmuştur. Ancak bazı deneylerde kusurların sınıflandırılmasında hatalar bulunduğu için başarı yüzdesi düşmüştür.

Destek vektör makinelerinde kullanılan istatistiksel öznitelikler için kutu-çizim grafikleri Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’ de sunulmuştur. Şekil 4.2’ de deneylere ait standart sapma değerleri görülmektedir. Buradaki amaçlardan birisi de gerilim değişimine bağlı olarak kusur türüne göre istatistiksel özniteliklerin değişimlerini gözlemlemektir. Gerilimin artışına bağlı olarak kusursuz kablodaki standart sapmada değişim görülmemesi normal bir durumdur. Kusursuz kabloda yalnızca sinyalin gürültüsü mevcuttur. Diğer kusurlar için de farklar giderek açılmıştır.



**Şekil 4.2** Standart sapma değerlerinin karşılaştırması (5 kV ve 20 kV Gerilim Altında).

Şekil 4.3’ de KB sinyallerinin ortalama değerlerinin karşılaştırması sunulmuştur. Gerilim artışına bağlı olarak yine değişimler gözlenmiştir. Negatif KB darbelerinin bulunması dolayısıyla kusurlu kablolarda genlikler negatif yönde büyümüştür. Grafiklerdeki kırmızı noktalar nadir bulunan değerleri göstermekte, mavi kutular genel dağılımı göstermekte, siyah çizgiler az sayıda olan değerlerin dağılımını göstermektedir. Kırmızı çizgi ise en yoğun değerlerin görüldüğü yere tekabül etmektedir. Grafikler üzerinden de belli ayrımlar yapmak mümkün olabilmektedir.



**Şekil 4.3** Ortalama değerlerin karşılaştırması (5 kV ve 20 kV altında).

Kutu grafiksel çizimleri güncel çalışmalarda sıklıkla başvurulanan bir gösterim haline gelmiştir. Verilerin dağılımlarını kolayca karşılaştırabilmek adına uygun bir çizim şeklidir. Kısmi boşalmaların istatistiksel özniteliklerini de açık bir şekilde göstermektedir.

#### 4.1.2 Arıza Konumlandırma Sonuçları

Verilerin istatistiksel özellikleri çok sınıflı destek vektör makineleri yöntemiyle sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma sonucunda az sayıda ölçümler ile 3 noktadan arıza konumu belirlemede Çizelge 4.3’ de görülen %94, çok sayıda veri ile arıza konumu belirlemede ise Çizelge 4.4’ de görülen, %77 doğruluk elde edilmiştir. Bu deney kapsamında, çok sayıda noktada kusur oluşturmak suretiyle KB verileri kaydedilmiş, yine 3 ayrı konumdan en yakınına olan mesafeye göre konum sınıfı oluşturulmuştur. Kusurların yerleri birbirlerine çok yakın olduğu için yöntem bazı sinyalleri karıştırmış ve doğruluk yüzdesi düşüş göstermiştir. Deneyler 12 kV gerilim altında gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 4.3** Arıza konumlandırma çalışması sınıflandırma sonuçları.

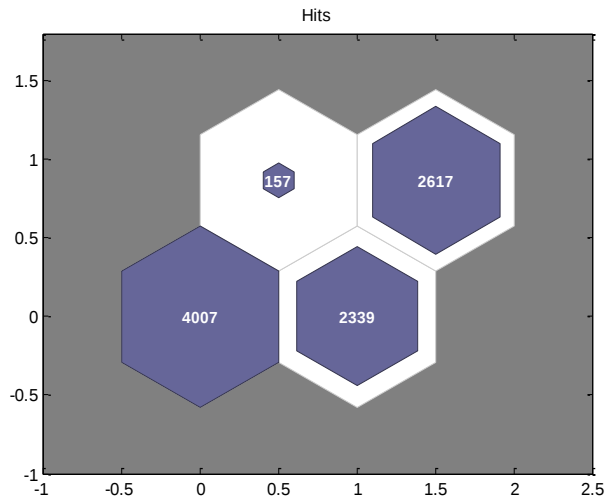
| Testte<br>Kullanılan<br>Deney | Beklenen |   |   | Gözlenen |   |   | Doğruluk |
|-------------------------------|----------|---|---|----------|---|---|----------|
| Deney 1                       | 1        | 2 | 3 | 1        | 2 | 3 | 100%     |
| Deney 2                       | 1        | 2 | 3 | 1        | 2 | 3 | 100%     |
| Deney 3                       | 1        | 2 | 3 | 1        | 2 | 3 | 100%     |
| Deney 4                       | 1        | 2 | 3 | 1        | 2 | 3 | 100%     |
| Deney 5                       | 1        | 2 | 3 | 2        | 2 | 3 | 66,6%    |
| Deney 6                       | 1        | 2 | 3 | 1        | 2 | 3 | 100%     |
| Ortalama                      |          |   |   |          |   |   | 94,43%   |

**Çizelge 4.4** 13 noktadan ölçümlerin farklı şekillerde sınıflandırma sonuçları.

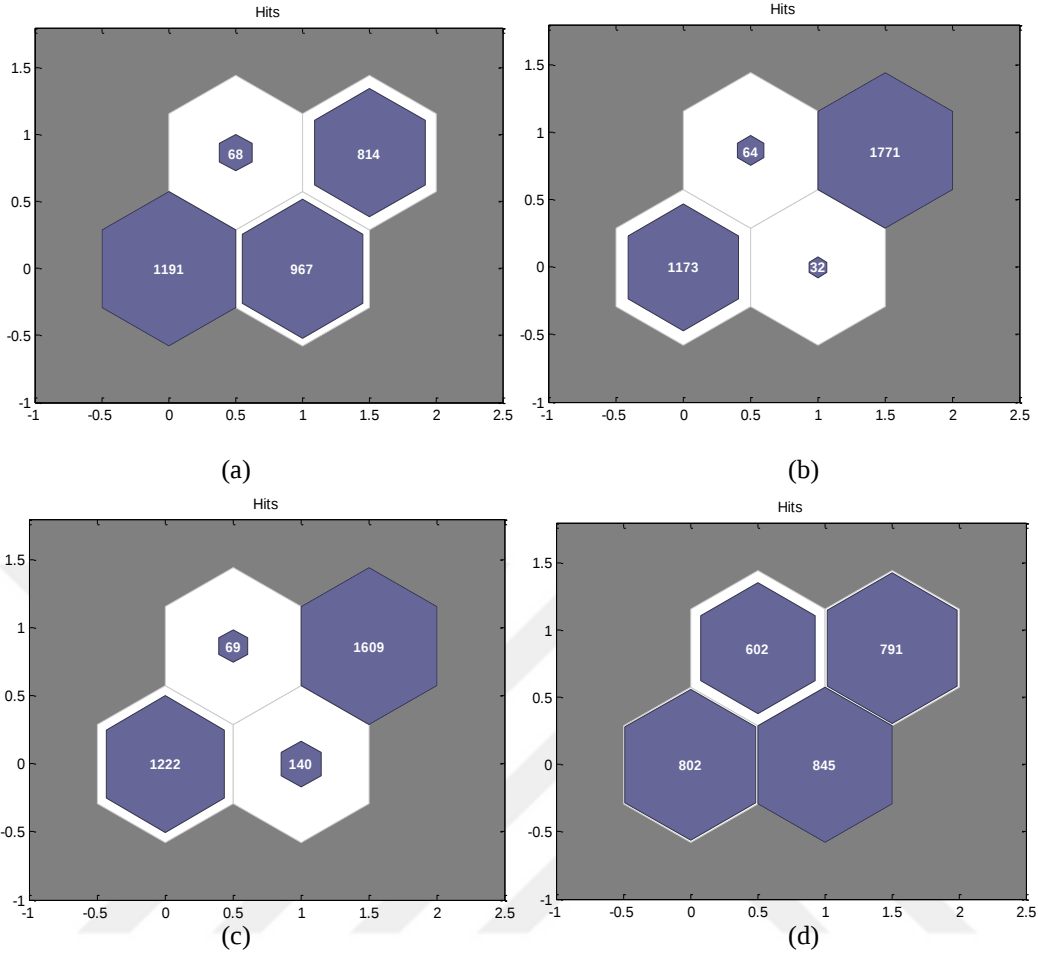
| Hedef                 | 3 Ayrı Sınıf |   |   |   |     |   |
|-----------------------|--------------|---|---|---|-----|---|
| 1                     | 3            | 3 | 1 | 1 | 3   | 1 |
| 1                     | 1            | 1 | 1 | 1 | 1   | 1 |
| 1                     | 1            | 1 | 1 | 2 | 1   | 1 |
| 1                     | 1            | 1 | 1 | 1 | 1   | 1 |
| 2                     | 2            | 1 | 1 | 2 | 1   | 2 |
| 2                     | 2            | 2 | 1 | 2 | 2   | 2 |
| 2                     | 2            | 2 | 2 | 2 | 2   | 2 |
| 2                     | 1            | 3 | 2 | 2 | 2   | 2 |
| 2                     | 2            | 2 | 3 | 2 | 2   | 2 |
| 3                     | 3            | 2 | 3 | 3 | 3   | 3 |
| 3                     | 2            | 2 | 2 | 3 | 3   | 3 |
| 3                     | 3            | 3 | 3 | 3 | 3   | 3 |
| 3                     | 1            | 2 | 2 | 3 | 3   | 3 |
| Toplam Başarı Yüzdesi |              |   |   |   | 77% |   |

## 4.2 YSA Sonuçları

Ham KB verileri Yapay Sinir Ağı kümeleme yönteminde, Kendiliğinden Düzenlenen Haritalar'da (SOM) kullanılmıştır. Eşleme, her deneyin 1x3040 eleman verilerine uygulanmış ve verileri 2x2 eşlenmiş matrise dönüştürmüştür. Şekil 4.4' te eğitim sonucu bir kılcal çizik kusuru görülmektedir. Bu eğitimin ardından yapılan testler sonucu sınıflandırma sonuç grafikleri Şekil 4.5' te verilmektedir.



**Şekil 4.4** Kılcal Çizik kusurlu kablo için eğitilmiş SOM Haritası.



**Şekil 4.5** a) Kılcal Çizik, b) İğne Ucu, c) Kalın Çizik kusuru ve d) kusursuz kablo için SOM çizimleri.

Şekil 4.5’ te, beklendiği üzere kusursuz kabloda açık bir fark görülürken, iğne ucu ve kalın çizik kusurlarının sonuçlarında benzerlikler gözlenmiştir. Ancak kılcal çizik kusuru diğerlerinden tamamen farklıdır. Bu kümeleme tekniği ayrıştırma için kullanmanın yanı sıra, bir öznitelik çıkarma yöntemi olarak da kullanılabilir. Gelecekteki çalışmalar için, bu 2x2 eşleştirilmiş matris bir KB ölçüm deneyini temsil edecektir.

### 4.3 KNN Sonuçları

K en yakın komşuluk yöntemiyle yapılan sınıflandırma sonucu Çizelge 4.5’ te sunulmuştur. Çizelgeden görüleceği üzere toplam başarı %88,89 olarak belirlenmiştir. Sınıflandırma sonucunu test etmek amacıyla “k katlama çapraz doğrulaması” yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle göre, eğitim amacıyla tüm KB verileri birleştirilerek tek bir veri haline getirilmiş ve test edilecek veri sırasıyla tüm veriden çıkarılıp test edilmek

suretiyle tüm veriler için algoritma tekrarlanmıştır. Bu tür çapraz doğrulamalara, yöntemin başarısını test etmek amacıyla, test edilecek veri sayısı kısıtlı ise başvurulması gerekmektedir. Aynı yöntem destek vektör makineleri yönteminde de kullanılmıştır.

**Çizelge 4.5** KNN ile sınıflandırma sonucu.

|                   | Sınıflandırma Sonucu |   |   |   |   |   | Başarı<br>Yüzdesi |
|-------------------|----------------------|---|---|---|---|---|-------------------|
| <b>Hat Başı</b>   | 1                    | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | %83,33            |
| <b>Hat Ortası</b> | 2                    | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | %100              |
| <b>Hat Sonu</b>   | 3                    | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | %83,33            |
| <b>Toplam</b>     |                      |   |   |   |   |   | <b>%88,89</b>     |

#### 4.4 Mycielski Yöntemine Ait Sonuçlar

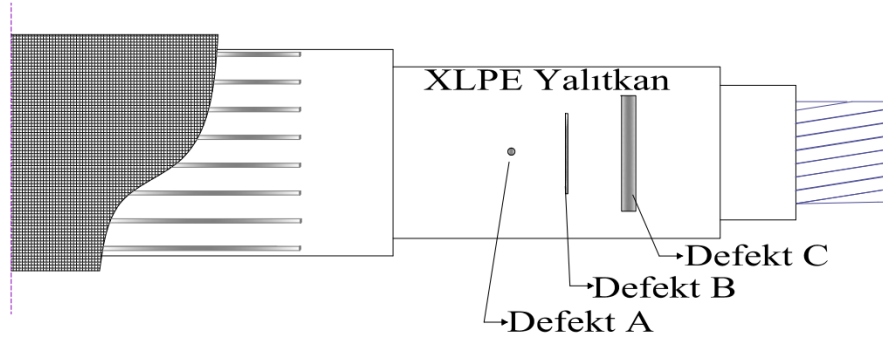
Örüntü tarama tabanlı Mycielski yöntemiyle yapılan KB sinyallerinin sınıflandırma ve tahmin sonuçları Bölüm 4.4.1 ve Bölüm 4.4.2’de sunulmuştur.

##### 4.4.1 Mycielski ile Sınıflandırma Sonuçları

Örüntü tarama tabanlı Mycielski yöntemi ile sınıflandırma uygulamasında 2 farklı çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, önceki yöntemlerle de gerçekleştirildiği üzere KB’ye sebep olan kusurun türünün sınıflandırılması ve kusurun kablo üzerindeki konumunun belirlenmesi çalışmasıdır.

##### 4.4.1.1 Mycielski ile Kusur Türü Sınıflandırma Sonuçları

Tez çalışması kapsamında, laboratuvarında XLPE kablo numunelerinde kusurlar oluşturmak suretiyle elde edilen KB verileri, Mycielski yöntemiyle sınıflandırma işlemine tabii tutulmadan önce üç kusur türüne ait tüm veriler geçmiş veri seti olarak birleştirilmiştir. Diğer yöntemlerden farklı olarak Mycielski yönteminde kusursuz kablo kullanılmamıştır. Çünkü veri düzenleme aşamasında gürültü olarak sayılan veriler sıfırlanmış ve sıfır olan veriler de veriden atılmıştır. Sınıflandırmada yalnızca KB darbeleri kullanılmıştır. Şekil 4.6’ da A, B ve C olarak adlandırılan 3 kusur türü gösterilmiştir.



**Şekil 4.6** XLPE kablo üzerinde oluşturulan kusur türleri.

Şekil 4.6’ da önceki bölümlerden farklı olarak kusursuz durum bulunmadığı için A, B ve C kusurları değişmiştir. Bu nedenle yeniden şekil sunulmuştur. Çizelge 4.6’ da ise KB’ ye neden olan kablo kusuru türü sınıflandırma sonuçları tablo olarak sunulmuştur. Tüm veriler doğru sınıflandırılırken, yalnızca A kusuruna ait bir deney sonucu yanlış sınıflandırılmıştır.

**Çizelge 4.6** Mycielski ile kusur türü sınıflandırma sonucu.

|                | Eşleşme Doğruluğu KB Örnek 1 | Eşleşme Doğruluğu KB Örnek 2 | Eşleşme Doğruluğu KB Örnek 3 | Toplam Doğruluk (%) |
|----------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|
| <b>Kusur A</b> | ✓                            | ✓                            | BAŞARISIZ (%50)              | 66,67               |
| <b>Kusur B</b> | ✓                            | ✓                            | ✓                            | 100                 |
| <b>Kusur C</b> | ✓                            | ✓                            | ✓                            | 100                 |

Çizelge 4.6’ da görüldüğü üzere toplam başarı oranı %88,89 olarak belirlenmiştir. Eşleşme sonucu %50 olarak görünen deney sonucu, geçmişteki tarama sonucunda 2 konumda en uzun eşleşmenin bulunduğunu ancak taranan veri sayısı artırılınca eşleşmenin olmadığını göstermektedir.

#### 4.4.1.2 Mycielski ile Kusur Konumu Sınıflandırma Sonuçları

Mycielski yöntemiyle 3 farklı konumda oluşturulan aynı kusurla üretilen KB sinyallerinin sınıflandırılmasına ait sonuçlar Çizelge 4.7’de sunulmuştur. Tüm deneyler için ortalama başarı %77,78 olarak belirlenmiştir. Mycielski yönteminin bu şekilde uygulanmasıyla,

arıza türü sınıflandırmada daha başarılı olduğu, hatta geleneksel olarak kullanılan destek vektör makinelerinden daha başarılı olduğu görülmektedir. Arıza konumlandırma başarı sonucu da algoritma geliştirilerek iyileştirilebilir. Benzer şekilde eşleşme sonucu %50 olarak görünen deney sonucu, yalnız bir yerde en uzun eşleşmeye düşülemediğini göstermektedir. Bu tür durumlar için tercih mekanizması oluşturularak sınıflandırma doğruluğu artırılabilir. Çünkü eşleşmelerden birisinin konumu doğru sınıfta bulunmaktadır. İki veya daha fazla konumda en uzun eşleşmeleri sağlayıp bunların çoğunluğunun bir sınıfa ait olduğu durumlarda algoritma o sınıfı sonuç olarak üretmektedir.

**Çizelge 4.7** Mycielski ile arıza konumu sınıflandırma sonucu.

|                   | Eşleşme Doğruluğu KB Örnek 1 | Eşleşme Doğruluğu KB Örnek 2 | Eşleşme Doğruluğu KB Örnek 3 | Toplam Doğruluk (%) |
|-------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|
| <b>Hat Başı</b>   | ✓                            | ✓                            | BAŞARISIZ (%40)              | 66,67               |
| <b>Hat Ortası</b> | ✓                            | ✓                            | ✓                            | 100                 |
| <b>Hat Sonu</b>   | ✓                            | ✓                            | BAŞARISIZ (%50)              | 66,67               |

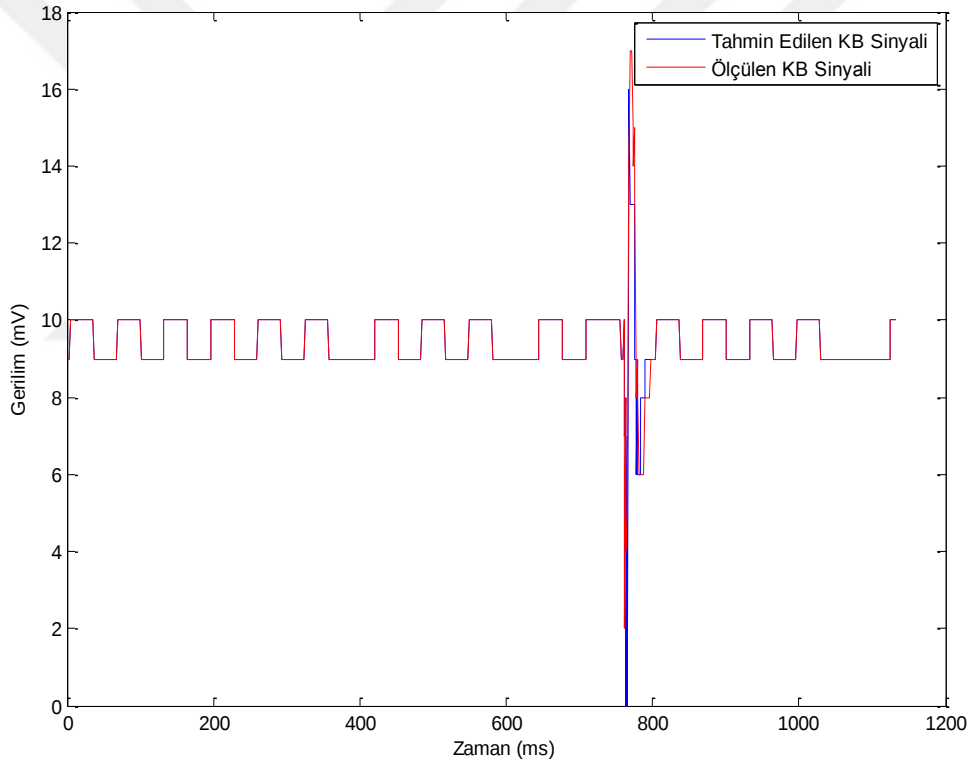
#### 4.4.2 Kısmi Boşalma Veri Tahmini Sonuçları

Mycielski - Markov yöntemiyle KB verilerinin tahmini çalışmaları kapsamında 3 deney seçilmiştir. Buradaki amaç gelecek verileri doğru tahmin edebilmek, özellikle de KB darbelerinin yerini ve dalga şeklini doğru tahminleyebilmektir. Çizelge 4.8’ de 3 farklı deney için tahmin edilmiş KB sinyallerinin, ölçülen KB sinyalleriyle olan ilişkilerinin sonuçları sunulmuştur.

**Çizelge 4.8** Mycielski ile KB sinyali tahmin sonucu.

| KB Sinyali     | Veri Tipi | Kurtosis (Basıklık) | Skewness (Çarpıklık) | RMSE   | Korelasyon Faktörü (R) |
|----------------|-----------|---------------------|----------------------|--------|------------------------|
| <b>Deney 1</b> | Ölçülen   | 32,515              | 1,6712               | 0,4191 | 0,8799                 |
|                | Tahmin    | 48,214              | -2,374               |        |                        |
| <b>Deney 2</b> | Ölçülen   | 19,801              | 2,2861               | 0,825  | 0,9125                 |
|                | Tahmin    | 25,686              | 1,452                |        |                        |
| <b>Deney 3</b> | Ölçülen   | 9,828               | 0,0303               | 0,185  | 0,9795                 |
|                | Tahmin    | 10,051              | -0,1077              |        |                        |

Kısmi boşalma sinyalleri, KB darbeleri içerdiği için, sinyallerin basıklık ve çarpıklık değerleri önemli bir bilgi taşımaktadır. Bu nedenle sınıflandırma işlemlerinde de parmak izi özneliği olarak genellikle tercih edilen istatistiksel parametrelerdir. Sinyallerin karşılaştırılmasında, Çizelge 4.9’ da, bu nedenle özellikle kurtosis ve skewness değerleri tercih edilmiş ve birbirlerine yakın oldukları gözlenmiştir. Tez kapsamında KB’ler için uyarlanan Mycielski - Markov yöntemiyle yapılan, 1’inci deney tahmin sonuçlarına ait sinyal dalga şekli grafiksel olarak Şekil 4.6’ da gösterilmiştir. Grafikte bulunan sinyaller incelendiğinde KB darbesinin yeri büyük bir doğrulukla tespit edilmiştir. Dalga şekli ve genliği de büyük benzerlikler göstermektedir.

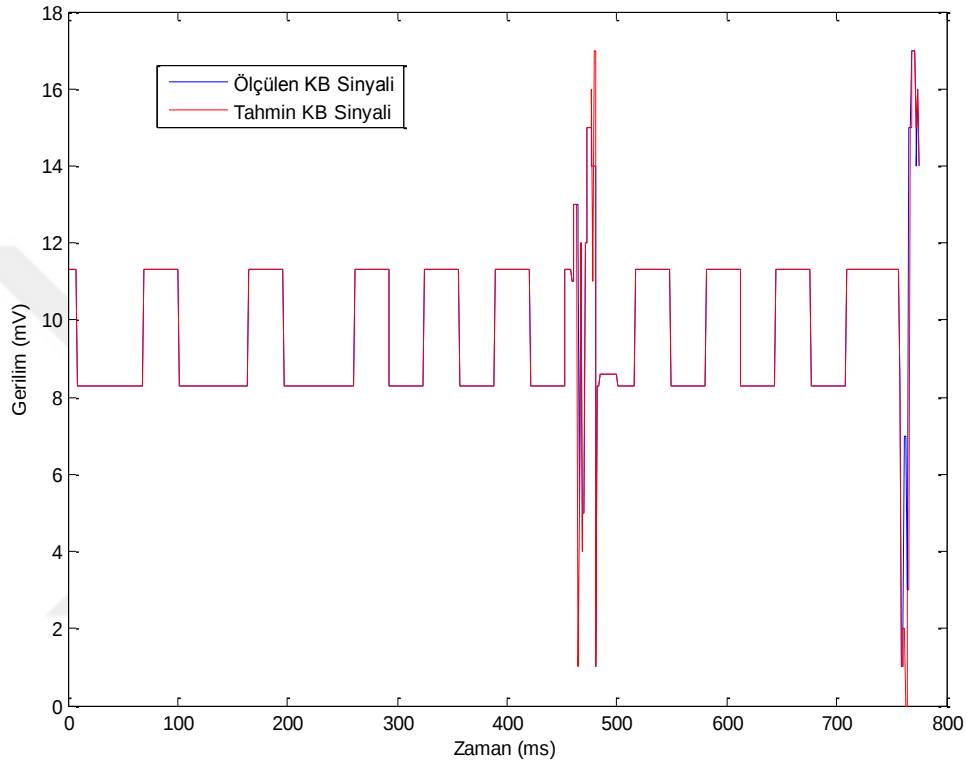


**Şekil 4.7** Deney 1’e ait tahmin ve ölçülen KB sinyal karşılaştırması.

Şekil 4.7’ deki sinyalde görülen kare dalgalar, dalgacık dönüşümü sonrası oluşmuştur. Bu kare dalgalar arzu edilirse algoritmaya eklenecek bir yazılım ile silinebilir. Ancak netice itibarıyla doğru tahmin gerçekleştiği ve KB darbelerinin bozulmadığı için kare dalgalarla ilgili herhangi bir işlem yapılmamış ve deney sonuçları kare dalgalar mevcut haldeyken hesaplanmıştır. Aynı zamanda tahminin doğruluğu görsel olarak da görmede

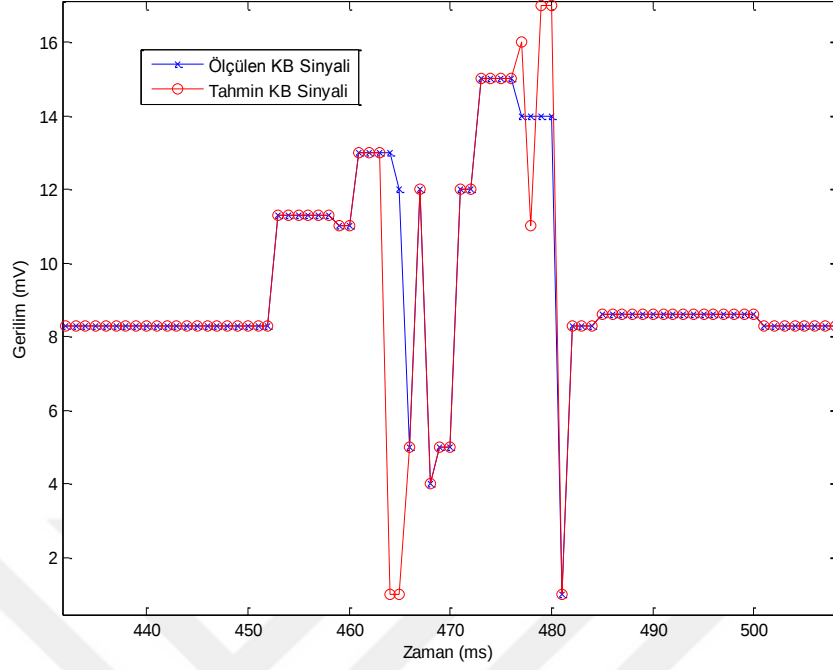
foyda sağlamaktadır.

Şekil 4.8’ de 2’nci deneye ait tahmin sonucu karşılaştırma çizimi görölmektedir. Kare dalgalarda tam eşleşme sağlanmış, yani KB darbelerinin konumları tam olarak tahmin edilmiş, genlikleri de oldukça büyük yakınlık göstermektedir.



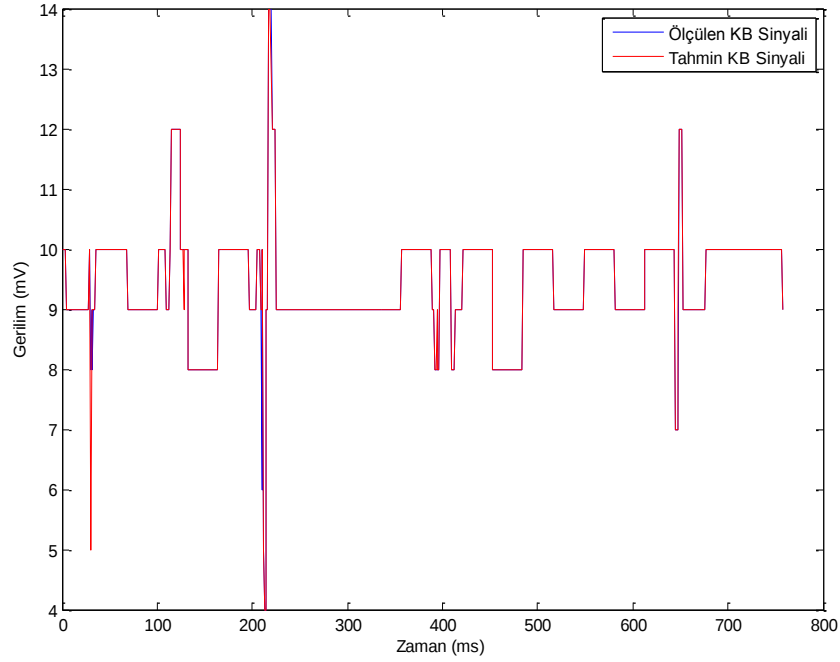
Şekil 4.8 Deney 2’ye ait karşılaştırma grafiği.

Şekil 4.9’ da ise 3’ncü deneye ait tahmin sonucu karşılaştırma çizimi görölmektedir. En iyi sonuç bu deney için elde edilmiştir. Kare dalgalarda yine tam eşleşme sağlanmış, yani KB darbelerinin konumları tam olarak tahmin edilmiş, genliklerinde de başarılı bir tahmin gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 4.9** Deney 2'ye ait karşılaştırma grafiğinin yakın versiyonu.

Sinyallerin aralarındaki küçük farklılıkların görülmesi amacıyla Şekil 4.10' da KB darbesinin yakınlaştırılmış hali görülmektedir.



**Şekil 4.10** Deney 3'e ait karşılaştırma grafiği.

Tez kapsamında kullanılan ve yüzdelik olarak doğruluğu ölçülen yöntemlere ait sınıflandırma doğruluklarının karşılaştırıldığı tablo, Çizelge 4.9’da sunulmuştur.

**Çizelge 4.9** Karşılaştırmalı sınıflandırma sonuçları.

|                  | <b>Kusur Türü Sınıflandırma</b> | <b>Konumlandırma</b> |
|------------------|---------------------------------|----------------------|
| <b>DVM</b>       | %79,2                           | <b>%94,4</b>         |
| <b>KNN</b>       | %72,2                           | %88,9                |
| <b>Mycielski</b> | <b>%88,9</b>                    | %77,8                |

Mycielski yöntemi kablo üzerinde oluşturulan kusurların sınıflandırılmasında %88,9 başarı ile en yüksek doğrulukla sınıflandırmayı gerçekleştirirken, konumlandırma çalışmalarında ise DVM yöntemi %94,4 ile en yüksek orana sahiptir. KNN yöntemi kusur türü sınıflandırmada oldukça düşük yüzdeye sahipken, konumlandırmada ise Mycielski yönteminden başarılı durumdadır.

Tez çalışmasında üretilen özneteliklerle kullanılan yöntemlerin literatürde mevcut olan çalışmalarla sınıflandırma sonuçlarının karşılaştırıldığı tablo, Çizelge 4.10’da verilmiştir.

**Çizelge 4.10** Sınıflandırma yüzdelerinin literatürdeki çalışmalarla karşılaştırması.

| <b>Yöntemler</b>                                             | <b>Ma vd. 2013</b>      | <b>Barrios vd. 2019</b> | <b>Basharan vd. 2018</b> | <b>Tez Çalışması</b> |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|
| KNN                                                          | 85,8 - 98,1             | -                       | 60 - 86,6                | 72,2 - 88,9          |
| 2 Katmanlı Ağ<br>Olasılıksal<br>(Bayesian)<br>Sınıflandırıcı | 6,9 - 94,2<br>80 - 95,3 | -<br>-                  | -<br>-                   | -<br>-               |
| DVM                                                          | 91,3 - 99,7             | 74,2 - 91,5             | -                        | 79,2 - 94,4          |
| YSA                                                          | -                       | 70,2 - 90,6             | 60 - 73,3                | -                    |
| Evrişimsel Sinir<br>Ağı                                      | -                       | 86,7 - 95,6             | -                        | -                    |
| Mycielski*                                                   | -                       | -                       | -                        | 77,8 - 88,9          |

\*Bu yöntem, literatüre tez kapsamında kazandırılmıştır.

Çizelge 4.10 incelendiğinde, tez kapsamında kullanılan yöntemlerle elde edilen sınıflandırma başarımlarının benzer çalışmalarla yakın aralıklar gösterdiği ve tezin önermesi olan Mycielski yönteminin daha önce bu alanda kullanılmadığı açıkça görülmektedir. Bu çalışmaların çoğunluğunda, bu tez çalışmasındakine benzer şekilde, yapay kusurların oluşturulduğu ve KB sinyallerinin buradan elde edildiği gözlenmiştir.

Gerçekte oluşacak kusurlarda, KB'lerin kapasitif değerlerinin (pC) farklı olacağı, ancak literatürdeki çalışmalar da göz önüne alındığında, KB sinyal şekillerinin, eğilimlerinin benzer yapıda olacağı öngörülmektedir. Bu nedenle tez çalışması kapsamında ölçülen KB sinyalleri ve bu sinyallere uygulanan yöntemlerin, gerçek KB sinyallerinde de başarılı olacağı düşünülmektedir. Gelecek çalışmalarda, kullanımda bulunmuş ve boşalma gerçekleşmeden sistemden ayrılmış bir kablo üzerinde testlerin yapılarak yöntemlerin uygulanması planlanmaktadır. Aynı zamanda yapay kusurların da sayısının artırılması mümkündür.

SOM haritalarıyla grafiksel olarak sınıflandırma gerçekleştirildiği için başarı yüzdesi çizelgeye eklenememiştir. Mycielski - Markov algoritmasının KB sinyallerine uygulanması, yeni bir yöntemin literatüre kazandırılmasının yanında, KB sinyal tahmini olarak yeni bir uygulama tekniğinin kazandırılması anlamına da gelmektedir. Enerji çalışmalarında rüzgâr hızı ve güneş ışıınımı tahminleri uzun yıllardır pek çok yöntemle yapılmaktadır. Ancak aynı durum KB sinyalleri için geçerli değildir. Kısmi boşalma sinyallerinin kısa dönemli tahminiyle, gelecek KB darbelerinin konumları, boyutları tahmin edilmektedir. Bu işlem mümkün olduğunca uzatılarak kısıtlı veri ile KB sinyal analizlerinde fayda sağlayabilir durumdadır. Ayrıca gelecekte bu tahminlerin geliştirilmesiyle ile elektriksel malzemenin ömür kestirim çalışmalarının başarısı artırılabilir.

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Tez çalışması kapsamında, orta gerilim elektrik dağıtım hatlarında yaygın olarak kullanılan XLPE kabloları oluşabilecek KB türleri ve kablo üzerindeki arıza konumlarının belirlenmesi çalışmaları yenilikçi özniteliklerle geleneksel yöntemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda bu alan için ilk olan Mycielski - Markov yöntemi, KB verilerine uygulanmış, başarılı sınıflandırma ve tahmin sonuçları elde edilmiştir. Orta gerilim XLPE kabloların yaygın kullanımı ve KB'lerin kablo yalıtımında kritik öneme sahip olması nedeniyle bu problem, doktora çalışması kapsamında ele alınmıştır.

Tezin KB çalışmaları üzerine diğer bir uygulaması olan arıza konumlandırma çalışmalarında ise ham verilerin istatistikleri öznitelik olarak kullanılmıştır. Kablonun XLPE izolasyonu üzerine oluşturulan kusurlar XLPE yalıtımlı OG kablusunun çeşitli yerlerinde el ile, montaj sırasında oluşabilecek veya özellikle imalat sırasında dielektrik üzerinde meydana gelebilecek kusurlara benzer şekilde oluşturulmuştur. Laboratuvar ortamında çeşitli yüksek gerilimler altında deneyler gerçekleştirilmiş ve deneyler sırasında her bir kablodan KB sinyalleri ölçülmüştür. Ölçülen KB verilerinin istatistiksel parametreleri çok sınıflı destek vektör makinelerinde işlenmiştir. Destek vektör makineleriyle arıza konumu belirlemede %94'ün üzerinde sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir. Bu doğruluk değerleri k-katlı doğrulama yöntemi ile elde edilmiştir. Önerilen yöntemin avantajları aşağıdaki açıklamalarda listelenmiştir.

Destek vektör makinelerine ek olarak, literatürde yaygın kullanılan K en yakın komşuluk (KNN) yöntemi de benzer şekilde istatistiksel öznitelikler kullanılarak sınıflandırma için tercih edilmiştir. İstatistiksel öznitelikler ile arıza konumlandırmada KNN yönteminin başarısı %88,89 olarak belirlenmiştir. Bu yöntemlere ek olarak, yapay sinir ağlarının kendini düzenleyebilen haritalar (SOM) yöntemi, kusur türleri için kümeleme yapmak suretiyle sınıflandırma amaçlı kullanılmıştır. SOM haritalarıyla her bir kusur türü için farklı bir grafiksel görünüm elde edilmiş, benzer türde kusur sınıflarında benzer grafikler elde edilmiştir.

KB verilerinin Fourier dönüşümünün istatistiksel özellikleri, çok sınıflı destek vektör makineleri ile kablo üzerindeki kusur türünü ve arızanın kablodaki konumunu belirlemek üzere sınıflandırılmıştır. Elektrik güç sistemlerinde yaygın kullanımı nedeniyle XLPE yalıtımlı güç kablosu, dielektrik kısım üzerinde kılcal çizik, iğne ucu boşluğu ve kalın çizik şeklinde ifade edilen yapay kusurlar oluşturmak üzere tercih edilmiştir. Sınıflandırma sonucunda ilk önce sadece Fourier dönüşümüne ait istatistiklerle %75 doğruluk elde edilmiştir. Kısmi boşalmaların FFT' sinin ilk kısmının (KB spektrumunun düşük frekansları) kullanılması durumunda, sınıflandırma doğruluğu yaklaşık %80' e ulaşmıştır.

Tez çalışmasında elde etmesi zor ve karmaşık olmayan, temel öznitelikler çıkarılmıştır. Ancak bu özniteliklere yeni bakış açıları getirilmiştir. Fourier dönüşümü ile oluşturulan veri kümesinin, sınıflandırmaya olumlu etki yapan belirli kısımları tercih edilmiştir (bu kısımlar test edilerek belirlenmiştir). Genel istatistiksel yöntemler farklı bakış açılarıyla birleştirilerek başarılı sınıflandırma sonuçları elde edilmiştir. Bu şekilde arıza tespiti ve konumlandırma literatürüne katkı yapılmıştır.

Yüksek gerilim ve kısmi boşalma literatüründe hâlihazırda bulunmayan, alanda ilk olma özelliği taşıyan ve tezin en önemli özgün yönünü oluşturan Mycielski ve Mycielski - Markov hibrit yöntemleri, tez kapsamında deneysel olarak üretilen KB sinyallerine uygulanmış, sınıflandırma ve tahmin çalışmalarında başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Deterministik bir yöntem olan Mycielski yöntemi, sinyal işlemede kodlama işlemlerinde ve yakın zamanda da enerji çalışmalarında tahminleme yapmak amaçlı kullanılmakta olan bir yöntemdir. Verilerin geçmişteki dizilimlerinin gelecekte de benzer şekilde oluşacağı varsayımıyla hareket eden Mycielski yöntemiyle, KB kusurlarının sınıflandırılması, KB'nin kablo üzerinde konumlandırılması ve KB darbelerinin gelecekte oluşacak halinin (zaman ve büyüklük olarak) tahminlenmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir.

DVM, KNN ve Mycielski yöntemlerinde sınıflandırma, literatürde yaygın olarak kullanılan dalgacık dönüşümleri gibi gürültü filtrelemesi yöntemleri uygulanmadan, ölçülen sinyallerden alınan ham veriler üzerinden yapılmıştır. Bu durum sinyal işleme tekniklerinde önem verilen bir konudur. Ancak Mycielski-Markov hibrit yöntemiyle

gelecek sinyal tahmini yapılırken dalgacık dönüşümleriyle gürültü süzme işlemi gerçekleştirilmiştir. Gürültüler bu yöntemin doğru tahminleme yapmasını güçleştirmektedir.

Özgün Mycielski - Markov hibrit yöntemiyle KB sinyallerinde görülen KB darbelerinin başlangıç ve bitiş zamanları, pozitif ve negatif alternansda oluşan genlikleri, korelasyon yöntemleriyle test edilmiş yüksek doğruluklarla, tahmin edilmiştir. Literatürde KB sinyallerinin tahminlemesi uygulamalarına rastlanmamaktadır. Tez çalışmasının bir sonucu olarak, KB sinyallerine yeni bir bakış açısı kazandırılmıştır. Bu yöntemin gelecekte uzun dönemli veri tahminine dönüştürülerek elektriksel teçhizatın yalıtkanının ömür kestiriminde kullanılabileceği, boşalma gibi kritik arızalarının zamanının doğru olarak öngörülebileceği düşünülmektedir.

Deneyler ekonomik ölçülerde ve fiziksel koşulların el verdiği imkanlarla tamamlanmıştır. Gerçek bir soruna çözüm olması planlandığından, elektrik piyasasında yaygın olarak kullanılan orta gerilimli bir XLPE kablo üzerinde, kablo imalatında veya elektrik işçilerinin yapabilmesi muhtemel arızalar dielektrik kısımda oluşabilecek kusurlara benzer kusurlar tercih edilmiştir.

Tez kapsamında KB sinyallerinin analizinin gerçekleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan faz çözünümlü KB (phase resolved partial discharge - PRPD) çalışması da gerçekleştirilmiştir. Düşük maliyetli, yazılım çalışmasıyla geliştirilmiş bir PRPD ölçüm sistemi tasarlanmıştır. Picoscope 5204 marka programlanabilir USB osiloskop ve diferansiyel probu sayesinde aktif ve uzun süreli KB sinyali kaydı, uygulanan alternatif akım gerilimiyle birlikte doğrudan bilgisayarın belleğine kaydedilmiş ve yazılımla bu veriler üzerinden 3 boyutlu ve 2 boyutlu PRPD grafikleri elde edilmiştir. Temin edilmesi yüksek maliyetleri bulan PRPD ölçümü yapabilen cihazların yerine kullanılabilecek sistem ekonomik ve kolay erişilebilir olma özelliği taşımaktadır.

## 6. KAYNAKLAR

- Abdel-Galil T K, Hegazy Y G, Salama M M A, Bartnikas R, 2004, Partial discharge pulse pattern recognition using hidden Markov models, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 11, 715–723.
- Akpınar H, 2014, DATA -Veri Madenciliği Veri Analizi, Papatya Bilim Yayıncılık, 440s, İstanbul.
- Al-Geelani N A, Piah M A, Bashir N, 2015, A review on hybrid wavelet regrouping particle swarm optimization neural networks for characterization of partial discharge acoustic signals, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Pergamon, 20–35.
- Ambikairajah R, Phung B T, Blackburn T, Ravishankar J, 2013, Spectral features for the classification of partial discharge signals from selected insulation defect models, *IET Science Measurement Technology*, 7, 104–111.
- Arora R, Abdul Rahman M K, Srivastava S C, 2000, Partial discharge classification using principal component transformation, *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, 147, 7–13.
- Catterson V M, Sheng B, 2015, Deep Neural Networks for Understanding and Diagnosing Partial Discharge Data, 2015 Electrical Insulation Conference, 218–221.
- Chan J C, Ma H, Saha T K, 2013, Partial discharge pattern recognition using multiscale feature extraction and support vector machine, 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 1–5.
- Chen, X, Qian Y, Xu Y, Sheng G, Jiang X, 2016, Energy Estimation of Partial Discharge Pulse Signals Based on Noise Parameters, *IEEE Access*, 4, 10270–10279.
- Dongarra J, Sullivan F, 2000, Guest Editors Introduction to the top 10 algorithms, *Computing in Science & Engineering*, 2, 22–23.

- Dukanac D, 2018, Application of UHF method for partial discharge source location in power transformers, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 25, 2266–2278.
- Eigner A, Rethmeier K, 2016, An overview on the current status of partial discharge measurements on AC high voltage cable accessories, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 32, 48–55.
- Evagorou D, Kyprianou A, Georghiou G E, Hunter J A, Hao L, Lewin P L vd., 2010, Performance of the Support Vector Machine Partial Discharge classification method to noise contamination using phase synchronous measurements, *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 1–4.
- Gerek O N, Fidan M, 2006, The Mycielski78 Compression Algorithm, *IEEE 14th Signal Processing and Communications Applications*, 1–4.
- Gouda O E, ElFarskoury A A, Elsinnary A R, Farag A A, 2018, Investigating the effect of cavity size within medium-voltage power cable on partial discharge behaviour, *IET Generation Transmission & Distribution*, Mart 2018, 1190–1197.
- Gregory B, 2000, Cable technology and applications in the 21st century, *IEEE Power Engineering Review*, 20, 6–7.
- Heideman M T, Johnson D H, Burrus C S, 1984, Gauss and the history of the fast Fourier transform (PDF), *IEEE ASSP Magazine*, 1, 14–21.
- Hocaoglu F O, Serttas F, 2017, A novel hybrid (Mycielski-Markov) model for hourly solar radiation forecasting, *Renewable Energy*, 108, 635–643.
- Hucker T, Krantz H G, 1995, Requirements of automated PD diagnosis systems for fault identification in noisy conditions, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2, 544–556.
- Hui B, Liu C, Tian Y, Fu M, Xu Y, Zhang Y, 2016, The relationship between partial discharge behavior and the degradation of 10 kV XLPE cable joints, *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, 843–846.

- Hunter J A, Hao L, Lewin P L, Evagorou D, Kyprianou A, Georghiou G E, 2010, Comparison of two partial discharge classification methods, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1–5.
- Jineeth J, Malleshally R, Sindhu T K, 2018, Classification of Partial Discharge Sources in XLPE Cables by Artificial Neural Networks and Support Vector Machine, IEEE Electrical Insulation Conference, 407–411.
- Lalitha E M, Satish L, 2000, Wavelet analysis for classification of multi-source PD patterns, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 7, 40–47.
- Li J, Jiang T, Harrison R, Grzybowski S, 2012, Recognition of ultra high frequency partial discharge signals using multi-scale features, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 19, 1412–1420.
- Li P, Zhou W, Yang S, Liu Y, Tian Y, Wang Y, 2017, Method for partial discharge localisation in air-insulated substations, IET Science and Measurement Technology, 11, 331–338.
- Liu H, Zhan H, Li C, Wang J, 2012, Simulation of partial discharge pulse propagation in 110kV XLPE cable, IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. IEEE, 663–666.
- Luo L, Han B, Chen J, Sheng G, Jiang X, 2017, Partial Discharge Detection and Recognition in Random Matrix Theory Paradigm, IEEE Access, 5, 8205–8213.
- Ma H, Chan J, Saha T, Seo J, Ekanayake C, 2015, Advanced signal processing techniques for transformer condition assessment, IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), 96–99.
- Madonia A, Troia I, Giannini S, 2017, Critical issues in the PD testing methodology for XLPE-insulated MV cables: An experimental case, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP), 311–314.
- Mashikian M S, Szarkowski A, 2006, Medium voltage cable defects revealed by off-line partial discharge testing at power frequency, IEEE Electrical Insulation Magazine, 22, 24–32.

- Mas'ud A A, Stewart B G, McMeekin S G, 2016, An investigative study into the sensitivity of different partial discharge  $\phi$ -q-n pattern resolution sizes on statistical neural network pattern classification, *Measurement*, 92, 497–507.
- McDonnell J T E, Bentley P M, 1994, Wavelet transforms: an introduction, *Electronics & Communication Engineering Journal*, 6, 175–186.
- Md Thayoob Y H, Ghani A B A, Ghosh P S, 2003, Partial discharge pattern classification using frequency-domain statistical descriptors, in *Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference (Cat. No.03CH37480) IEEE*, 171–175.
- Montanari G C, 2016, Partial discharge detection in medium voltage and high voltage cables: maximum distance for detection, length of cable, and some answers, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 32, 41–46.
- Mustacchi C, Cena V, Rocchi M, 1979, Stochastic simulation of hourly global radiation sequences, *Solar Energy*, 23, 47–51.
- Nimsanong P, Pattanadech N, Yutthagowith P, 2016, Dielectric diagnosis of 24KV XLPE cable using polarization and depolarization current, conventional partial discharge measurements and high frequency current measurement, 12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2016), 127.
- Pattanadech N, Nimsanong P, 2015, Effect of noise signals on partial discharge classification models, *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON*.
- Perkel J, Hernandez-Mejia J C, 2016, Medium Voltage Cable System Partial Discharge, Georgia Tech NEETRAC, Cable Diagnostic Focused Initiative (CDFI), 7.
- Raymond W J K, Illias H A, Bakar A H A, 2017, High noise tolerance feature extraction for partial discharge classification in XLPE cable joints, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24, 66–74.
- Rizzi A, Mascioli F M F, Baldini F, Mazzetti C, Bartnikas R, 2009, Genetic Optimization of a PD Diagnostic System for Cable Accessories, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24, 1728–1738.

- Roder P, 1997, Standard: IEEE 493-1997 - IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems (Gold Book).
- Sahoo N C, Salama M M A, Bartnikas R, 2005, Trends in partial discharge pattern classification: a survey, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 12, 248–264.
- Salama M M A, Bartnikas R, 2002, Determination of neural-network topology for partial discharge pulse pattern recognition, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 13, 446–456.
- Satish L, Gururaj B I, 1993, Use of Hidden Markov Models for Partial Discharge Pattern Classification, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 28, 172–182.
- Shamshad A, Bawadi M, Wanhussin W, Majid T, Sanusi S, 2005, First and second order Markov chain models for synthetic generation of wind speed time series, *Energy*, 30, 693–708.
- Strang, Gilbert, 1994, Wavelets, *American Scientist*, 82 (3): 250–255, JSTOR 29775194.
- Van Brunt R J, Cernyar E W, Von Glahn P, 1993, Importance of unraveling memory propagation effects in interpreting data on partial discharge statistics, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 28, 905–916.
- Wang Y B, Chang D G, Fan Y H, Zhang G J, Zhan J Y, Shao X J vd., 2017, Acoustic localization of partial discharge sources in power transformers using a particle-swarm-optimization-route-searching algorithm, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24, 3647–3656.
- Wu J, Rodrigo Mor A, Smit J J, 2019, The effects of superimposed impulse transients on partial discharge in XLPE cable joint, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Elsevier, 110, 497–509.
- Xu Y, Qian Y, Chen X, Xue A, Sheng G, Jiang X, 2016, Partial discharge feature extraction through contourlet transform for XLPE cable defect models classification, 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 912–915.

- Xia Y, Song X, He J, Jia Z, Wang X, 2019, Simulation and partial discharge detection for typical defects of 10 kV cable the joint, in *The Journal of Engineering*, 16, 2856-2859.
- Yuan P, Zhao X H, Yang J G, Li J H, Si W R, Li Y M, 2008, Study of anti-interference technology for UHF PD-detection in power transformers, 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, IEEE, 1097–1099.
- Zhang H, Blackburn T R, Phung B T, Sen D, 2007, A novel wavelet transform technique for on-line partial discharge measurements. 1. WT de-noising algorithm', *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 14(1), 3–14.
- Zheng W, Qian Y, Yang N, Huang C J X, 2011, Research on Partial Discharge Localization in XLPE Cable Accessories Using Multi-Sensor Joint Detection Technology, *Przegląd Elektrotechniczny*, 11, 281–284.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fatih SERTTAŞ  
Doğum Yeri ve Tarihi : Afyonkarahisar 1989  
Yabancı Dili : İngilizce  
İletişim (Telefon / e-posta) : 0 272 218 24 05 / fserttas@aku.edu.tr

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Afyon Kocatepe Anadolu Lisesi (2003 – 2007)  
Lisans : Pamukkale Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği  
Böl., (2007– 2011)  
Lisans : Anadolu Üniversitesi, İşletme Fakültesi, İşletme (2009-  
2015)  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens., Elektrik  
Mühendisliği ABD, Yenilenebilir Enerji Sistemleri (2013  
– 2015)  
Doktora : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens., Elektrik  
Mühendisliği ABD, (2015 – 2020)

### Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

: Afyon Kocatepe Üniversitesi (2012 – Devam Ediyor)

Yayınları (SCI ve diğer) : Aşağıda gruplar halinde listelenmiştir.

### SCI Makaleler:

Serttaş F, Hocaoglu F O, 2020, Partial discharge detection and localization on the medium voltage XLPE Cables with multi-class support vector machines, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, In Press (DOI: 10.3906/elk-2003-16).

Hocaoglu F O, Serttas F, 2017, A novel hybrid (Mycielski-Markov) model for hourly solar radiation forecasting, Renewable Energy, 108, 635–643.

### **Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler:**

Üstündağ E, Hocaoglu F O, Akarslan E, Serttaş F, 2018, Short Term Wind Speed Forecasting Using Linear Prediction Filters, International Journal of Advanced Computational Engineering and Networking, 6, 15–18.

Akarslan E, Çınar S M, Hocaoglu FO, Serttaş F, 2014, An Experimental Setup Design to Evaluate Power Generation Performances of TECs under Different Temperatures, Applied Mechanics and Materials, 492, 473-477.

### **Ulusal / Uluslararası Kitap Bölümü**

Bilimsel Araştırmalarda Yeni Yaklaşımlar - 1, Bölüm adı: Bozucu Çevrenin Yüksek Gerilim Ölçümlerine Etkisi, 2018, Hocaoglu F O, Serttaş F, Berikan Yayınevi

### **Ulusal Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler:**

Serttaş F, Hocaoglu F O, 2018, Orta Gerilim Kablolarında Kısmi Boşalma Analizi Üzerine Deneysel Bir Yaklaşım, Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 18, 904–912.

### **Uluslararası Bilimsel Konferanslarda Tam Metin Yayınlanan Bildiriler:**

Serttaş T N, Serttaş F, 2019, Rüzgâr Gücü Tahminine Yapay Sinir Ağları Yöntemi İle Bir Yaklaşım. UBAK 2019

Serttaş F, Hocaoglu F O, 2019, Yüksek Gerilim Kablolarındaki Kısmi Boşalmaların Deneysel Olarak Tespiti. UBAK 2019

Serttaş F, Hocaoglu F O, 2019, Rüzgâr Potansiyeli Analizi Üzerine Bir Çalışma. UBCAK 2019

Serttaş F, Hocaoglu F O, 2019, Classification of Corona Discharge Signals Using Support Vector Machines. UBCAK 2019, 223-230.

Serttaş F, Hocaoglu F O, 2019, A Statistical Approach for the Location of the Failure in a Medium Voltage XLPE Cable Using Partial Discharge Analysis. 4th

- International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2019), 1091-1094.
- Serttaş F, Hocaoglu F O, 2018, High Voltage Cable Defect Clustering Using Artificial Neural Networks. INGLOBE, 435
- Serttaş F, Hocaoglu F O, Serttaş T N, Akarslan E, 2018, An Experimental Study On The Performance of Manufactured Solar Powered Unmanned Aerial Vehicle (UAV). ICRIET
- Serttaş F, Hocaoglu F O, Akarslan E, 2018, Short Term Solar Power Generation Forecasting: A Novel Approach. PVCON
- Hocaoglu F O, Kürekçi M, Akarslan E, Serttaş F, 2018, An Experimental Study On The Modeling Of The PV Output. PVCON
- Hocaoglu F O, Serttaş F, Kürekçi M, Akarslan E, Çınar S M, Doğan R, Yönetken A, 2018, Comparison Of Experimentally Obtained I-V Curves Of Different Pv Modules. 2018 9th International Renewable Energy Congress (Irec)
- Serttaş T N, Serttaş F, 2017, Determination of Driver Behavior from Real-Time Driving Data. Uluslararası Bolvadin Sempozyumu, 79
- Serttaş F, Serttaş T N, Hocaoglu F O, 2017, An Evaluation Of The Generation Performance of An Exemplary Rooftop Photovoltaic System for The Bolvadin District. Uluslararası Bolvadin Sempozyumu, 146
- Serttaş F, Hocaoglu F O, 2017, The Performance Of Markovian Approach On Solar Radiation Data Generation. Multidisciplinary Academic Conference Academic Conference On Engineering, IT and Artificial Intelligence
- Akarslan E, Doğan R, Hocaoglu F O, Çınar S M, Yönetken A, Serttaş F, Arseven B, 2017, An Experimental Setup Design For Power Electronics experiments. Academic Conference On Engineering, It And Artificial Intelligence, Czech Republic, Prague (Ac-Eitai 2017), 119-127.
- Akarslan E, Çınar S M, Hocaoglu F O, Serttaş F, 2017, A Simple Battery Management System Design For An Electrical Vehicle. 3th International Conference On Engineering And Natural Sciences (Icens 2017), 450-454.

- Hocaoğlu F O, Serttaş F, 2017, Probabilistic Approach To Solar Radiation Modelling. 3rd International Conference on Engineering And Natural Sciences, 734-739.
- Akarslan E, Serttaş F, Hocaoğlu F O, 2016, Short Term Solar Radiation Modeling. 8th IEEESE
- Serttaş F, Akarslan E, Hocaoğlu F O, 2016, An Investigation on Electromagnetic Analysis of a Brushless DC Hub Motor Using in Electric Vehicles. 8th IEEESE, 785-790.
- Serttaş F, Akarslan E, 2016, Battery Type Selection for An Electric Vehicle. 8th IEEESE, 167-167.
- Arseven B, Akarslan E, Serttaş F, 2016, Developments on Wind Energy Technology from the Past to the Present. 8th IEEESE, 169
- Akarslan E, Serttaş F, Hocaoğlu F O, 2016, Feasibility Analysis of a Rooftop PV System: A Case Study. 8th IEEESE, 612-616.
- Serttaş F, Akarslan E, Hocaoğlu F O, 2016, An Experimental Setup To Form High Voltage Impulse Wave Shape Characterization Front And Tail Resistor Effects. 8th IEEESE, 798-804.
- Gül T N, Serttaş F, 2015, Developing Energy Management Technology Of Smart Home A Review. ICNES 2015
- Serttaş F, Hocaoğlu F O, 2015, A New Technique For Short Term Solar Radiation Prediction. ICRES 2015, 256-261.
- Çinar S M, Serttaş F, Akarslan E, 2014, A New Solar Rechargeable Electronic Noticeboard Design. Solar Tr, 631-635.
- Sutkoviç F, Serttaş F, Hocaoğlu F O, Akarslan E, 2014, Feasibility Analysis of A 1mw Pv Array For Afyonkarahisar Region. Solar Tr, 199-203.
- Serttaş F, Hocaoğlu F O, 2014, A Historical Based Solar Radiation Forecasting Method. Solar Tr, 214-219.
- Akarslan E, Hocaoğlu F O, Çinar SM, Serttaş F, 2014, A Review of Electronic Design of Electrical Cars and a Case Study. Solar Tr, 220-225.

Serttaş F, Hoccoğlu F O, Ucuñ İsmail, 2014, An Investigation on Energy Consumption Differences Between Damaged and Stable Cutting Disks in a Marble Cutting Machine. 7th IEEESE

Serttaş F, Hoccoğlu F O, 2013, A New NN Based Procedure for Hourly Solar Radiation Forecasting. The Second International Conference on Water Energy and the Environment

**Ulusal Bilimsel Konferanslarda Tam Metin Yayınlanan Bildiriler:**

Serttaş F, Hoccoğlu F O, 2020, Yüksek Gerilimlerde Kısmi Boşalma Sinyallerinin Tahminine Yönelik Özgün Bir Uygulama, 28. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, Gaziantep, Türkiye

Serttaş F, Hoccoğlu F O, 2016, DC Gerilim Yükseltici Devrelerin Karşılaştırmalı Analizi. Güç Sistemleri Konferansı, İstanbul, Türkiye

Akarşlan E, Çınar S M, Hoccoğlu F O, Serttaş Fatih, 2015, Elektrikli Araç Çalışmalarının İncelenmesi ve Örnek Bir Elektrikli Araç Tasarımı, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı, 354-358, Denizli, Türkiye

Diğer konular: 1989 yılı Afyonkarahisar doğumludur. Evli ve 1 kız çocuk babasıdır.