T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

YÜKSEK GERİLİM DAĞITIM KABLOLARINDAKİ SU AĞACI OLAYININ GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİYLE İNCELENMESİ

Mustafa KARHAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Mukden UĞUR

Ekim, 2017

İSTANBUL

Bu çalışma, 9.10.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. Mukden UĞUR(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ
İstanbul Teknik Üniversitesi
Elektrik - Elektronik Fakültesi

Prof. Dr. Aydın AKAN
İzmir Katip Çelebi Üniversitesi
Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi

Prof. Dr. Fırat KAÇAR
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Emel ÖNAL
İstanbul Teknik Üniversitesi
Elektrik - Elektronik Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, TÜBİTAK 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurtiçi Doktora Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Kabloların yalıtımında meydana gelen, yerel ve kalıcı bir bozulma olan su ağacı olayı orta ve yüksek gerilim kablolarının servis ömründe aktif ve önemli bir rol oynamaktadır. Bu tez çalışmasında, su ağacı olayı görüntü işleme teknikleri yardımıyla analiz edilerek polimerik yalıtkanların incelenmesine yeni bir bakış açısı getirilmiştir.

Tez konumun belirlenmesinde ve yürütülmesinde yapıcı ve yönlendirici fikirleri ile bana daima yol gösteren, tez çalışmamın her aşamasında yardımlarını ve manevi desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mukden UĞUR'a sonsuz teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışmam boyunca bilimsel desteklerini esirgemeyen ve tezde izlenecek adımlar hususunda yol gösteren hocalarım Sayın Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ ve Sayın Prof. Dr. Aydın AKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Numunelerin kesilmesinde ve boyanmasında bana laboratuvar imkânı sağlayan ve tezin bu aşamasında bana yol gösteren Sayın Prof. Dr. Mehmet ÇAKIR'a ve Doç. Dr. Volkan EYÜPOĞLU'na, tez çalışmam boyunca yardımlarından ve istişarelerinden dolayı kadim dostum Sayın Eczacı Hamza BALCI'ya ve mesai arkadaşlarım Sayın Öğr. Gör. Fatih ISSI 'ya ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Musa Faruk ÇAKIR'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu doktora tez çalışmasına "TÜBİTAK 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurtiçi Doktora Burs Programı" kapsamında desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca her konuda yardımlarını esirgemeyen canım eşim Öznur KARHAN'A, varlığıyla bana huzur ve mutluluk veren aslan oğlum Hamza Kaan KARHAN'a, benden uzakta olan her daim ilgilerini ve sevgilerini çok yakınımda hissettiğim ve benden maddi ve manevi hiçbir desteğini esirgemeyen canım annem Saime KARHAN'a ve kardeşlerim Abdulsamet ve Zehra KARHAN'a çok teşekkür ederim. En zor zamanlarımda yanımda olan maddi ve manevi desteğini esirgemeyen teyzem Av. Zeynep KISTIRAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak hep yanımda olmuş, eğitim hayatım boyunca da maddi ve manevi desteğini hiç esirgememiş yakın zamanda vefat eden babam Mehmet KARHAN'a şükranlarımı sunuyor ve hayırla yâd ediyorum. Bu tezi rahmetli babam Mehmet KARHAN'ın aziz hatırasına ithaf ediyorum.

Ekim 2017 Mustafa KARHAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **xv**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xvi**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xx**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **3**
2.1. POLİMERİK YALITKANLAR 3
2.2. ORTA VE YÜKSEK GERİLİMDE XLPE YALITKANLI KABLOLAR 7
2.3. SU AĞACI OLAYI 11
2.3.1. Morfoloji 13
2.3.1.1. Papyon sulu ağaçlanma 15
2.3.1.2. Yelpaze sulu ağaçlanma 16
2.3.2. Karakteristik Özellikleri 18
2.3.3. Sulu Ağaçlanmanın Büyüme Sürecini ve Oluşumunu Etkileyen Faktörler 18
2.3.3.1. Polimer Morfolojisi 18
2.3.3.2. Elektrik Alan 19
2.3.3.3. Frekans 22
2.3.3.4. Sıcaklık 23
2.3.3.5. Nem 24
2.3.3.6. Mekanik Gerilme 25
2.3.3.7. İyonik İçerik 26
2.3.3.8. Katkı Maddeleri, Kirletici Maddeler ve Ağaçlanma Geciktiriciler 29
2.3.4. Sulu Ağaçlanmanın Büyüme Sürecindeki Olası Olaylar 31
2.4. YELPAZE SULU AĞAÇLANMA İÇİN SAYISAL GÖRÜNTÜ İŞLEME 34
2.4.1. Matematiksel Morfoloji ve Morfolojik Görüntü İşleme 34
2.4.1.1. Genleşme (*Dilation*) *İşlemi* 35
2.4.1.2. Aşınma (*Erosion*) *İşlemi* 36

2.4.1.3. Açma (*Opening*) *İşlemi* 36
2.4.1.4. Kapama (*Closing*) *İşlemi* 37
2.4.1.5. Yapısal Eleman 38
2.4.2. Gradyan Yönelim Tabanlı Öznitelik Tanımlayıcılar 38
2.4.2.1. Yönlü Gradyanların Histogramları (*HOG - Histograms of Oriented Gradients*) 38
2.4.2.2. Eş Oluşum Yönlü Gradyanların Histogramları – (*CoHOG - Co-occurrence Histograms of Oriented Gradients*) 45
2.4.3. Mel Frekans Kepstral Katsayıları (MFCC) 47
3. MALZEME VE YÖNTEM 51
3.1. DONANIM KISMI 53
3.1.1. Yüksek Gerilim Üreteci Bölümü 53
3.1.2. Veri Toplama Bölümü 55
3.1.3. Deney Ortamı Bölümü 61
3.1.3.1. NaCl Çözelti Hazırlanışı 61
3.1.3.2. Numune Hazırlanışı 63
3.1.3.3. Sulu Ağaçlanmanın Görüntülenmesi 67
3.2. YAZILIM KISMI 71
3.2.1. Deneysel Sistem İçin Geliştirme Kartı Üzerinde Yazılım 71
3.2.2. Deney Sistemi İçin Geliştirme Kartı Dışında Yazılım 72
3.2.2.1. Görüntü İşleme 72
4. BULGULAR 74
4.1. DENEYSEL SONUÇLAR 74
4.1.1. Farklı Yaşlandırma Süreleri İçin Sulu Ağaçlanma 74
4.1.2. Farklı Elektrik Alanı Şiddetlerinde Sulu Ağaçlanma 83
4.1.3. Farklı Deney Parametrelerinde Başlayıp Büyüyen Yelpaze Sulu Ağaçlanma 87
4.2. YELPAZE SULU AĞAÇLANMANIN GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ İLE İNCELENMESİ 92
4.2.1. Farklı Yaşlandırma Sürelerinde Sulu Ağaçlanma Analizi 92
4.2.1.1. Mel Frekans Kepstral Katsayıları (*MFCC*) 93
4.2.1.2. Eş Oluşum Yönlü Gradyanların Histogramları (*CoHOG*) 93
4.2.1.3. Yönlü Gradyanların Histogramları (*HOG*) 99
4.2.2. Elektrik Alanının Sulu Ağaçlanmaya Etkisinin Analizi 101
4.2.2.1. Mel Frekans Kepstral Katsayıları (*MFCC*) 102
4.2.2.2. Eş Oluşum Yönlü Gradyanların Histogramları (*CoHOG*) 102

4.2.2.3. Yönlü Gradyanların Histogramları (*HOG*).....110
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 115
KAYNAKLAR.....118
ÖZGEÇMİŞ 125

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Orta gerilim kablosundan alınan XLPE yalıtkan (yarı iletkenden temizlenmiş). 5

Şekil 2.2: XLPE yalıtkanlı tek damarlı yüksek gerilim kablosunun temel bileşenleri. 8

Şekil 2.3: Dış kılıftan ayrılmış bakır ve alüminyum iletkenli XLPE yalıtkanlı tek damarlı orta gerilim kabloları. 9

Şekil 2.4: XLPE yalıtkanlı tek damarlı kablodan yaşlandırmak için alınan numune örnekleri (yarı iletken kısımdan ayrılmamış). 9

Şekil 2.5: XLPE yalıtkanlı tek damarlı kablodan yaşlandırmak için alınan numune örnekleri (yarı iletken kısımdan ayrılmamış). 10

Şekil 2.6: Sulu ağaçlanmanın mikroskop görüntüsü. 12

Şekil 2.7: Yelpaze su ağacının SEM görüntüsü. 14

Şekil 2.8: Papyon su ağacı mikroskop görüntüleri (Hellesø ve diğ., 2012). 16

Şekil 2.9: Papyon sulu ağaçlanma örnekleri (Qureshi ve diğ., 2008; Al-Arainy ve diğ., 2004). 16

Şekil 2.10: Yelpaze su ağacının metilen mavisi ile boyandıktan sonra optik mikroskop görüntüsü. 17

Şekil 2.11: Farklı iğne uç eğrilik yarıçapı değerleri için su ağacı uzunluğunu başlangıçtaki büyüme kinetikleri (gerilim = 10 kVp, frekans = 0.5 kHz) (Filippini ve Meyer, 1988). 20

Şekil 2.12: Farklı gerilim değerleri için su ağaçlarının başlangıçtaki büyüme kinetikleri (iğne ucunun eğrilik yarıçapı = 10μm, frekans = 10kHz) (Filippini ve Meyer, 1988). 21

Şekil 2.13: Yelpaze sulu ağaçlanma ile frekans arasındaki ilişki (Steennis ve Kreuger, 1990). 23

Şekil 2.14: Deiyonize suda çözünmüş NaCl konsantrasyonunun su ağacı uzunluğuna etkisi (Konsantrasyonlar mole/L olarak verilmiştir) (U = 20 kVpp, f = 2 kHz, r = 5 μm) (Koo ve Filippini, 1983). 28

Şekil 2.15: Tuzların su ağacı uzunluğuna etkisi (U = 20 kVpp, f = 2 kHz, r = 10 μm, C = 0.5 mole/L) (Koo ve Filippini, 1983). 28

Şekil 2.16: Elektrot malzemesinin su ağacı uzunluğuna etkisi (U = 20 kVpp, f = 2 kHz, r = 10 μm, C = 0.5 mole/L) (Koo ve Filippini, 1983). 29

Şekil 2.17: XLPE ve TR-XLPE malzemeler için su ağacı büyüme örüntüleri (Caronia ve diğ., 2006). 30

Şekil 2.18: Yaşlanma koşulları, süreçler & etkiler ve su ağacı özellikleri (Ross, 1998). 32

Şekil 2.19: Su ağacı oluşumu ve büyümesinin elektrofiziksel yapısı (Patsch ve Jung, 1999). 33

Şekil 2.20: Matematiksel morfolojinin gelişimi, uygulamalar, teori & yöntemler ve algoritmalar arasındaki karşılıklı etkileşimleri (Soille, 2004). 35

Şekil 2.21: 5×5 yapısal eleman ile aşınma ve genleşme işlemi uygulanmış görüntü örnekleri. 37

Şekil 2.22: 5×5 yapısal eleman ile açma ve kapama işlemi uygulanmış görüntü örnekleri. 38

Şekil 2.23: RGB görüntünün G bandının yatay gradyanı Gx. 40

Şekil 2.24: RGB görüntünün G bandının dikey gradyanı Gy. 40

Şekil 2.25: RGB görüntü (1146×1436). 41

Şekil 2.26: RGB görüntü G bandı (256×256). 42

Şekil 2.27: R bandı gradyan yönelimleri (hücre boyutu 16×16). 42

Şekil 2.28: G bandı gradyan yönelimleri (hücre boyutu 16×16). 43

Şekil 2.29: B bandı gradyan yönelimleri (hücre boyutu 16×16). 43

Şekil 2.30: CoHOG öznitelik çıkarma basamakları. 46

Şekil 2.31: Ses işaretinin kepstral katsayıları, zaman, frekans izgesinde gösterimi ve spektrogramı. 47

Şekil 2.32: Mikroskop görüntüsünden MFCC'nin çıkarılmasının blok diyagramı. 48

Şekil 2.33: MFCC öznitelik çıkarma yönteminin uygulandığı gri seviyeli mikroskop çıktı görüntüsü. 49

Şekil 2.34: Görüntü işaretinin kepstral katsayıları. 49

Şekil 3.1: Deney sisteminin genel olarak görüntüsü (Versiyon 1). 51

Şekil 3.2: Deney sisteminin yandan görünümü (Versiyon 1). 52

Şekil 3.3: Deney sisteminin üstten görünümü (Versiyon 1). 52

Şekil 3.4: Deney sisteminin genel olarak görüntüsü (Versiyon 2).....53

Şekil 3.5: Yüksek gerilim üretecinin blok diyagramı. 54

Şekil 3.6: Deney sisteminin veri toplama bölümündeki donanımlar (Versiyon 1).....55

Şekil 3.7: Deney sisteminin veri toplama bölümündeki donanımlar (Versiyon 1).....56

Şekil 3.8: Deney sisteminin veri toplama bölümündeki donanımlar (Versiyon 2).....56

Şekil 3.9: Raspberry Pi 3 Model B ve Raspberry Pi 1 Model B geliştirme kartları. 57

Şekil 3.10: Deney ortamından alınan sensör verilerinin seri monitörde görünümü. 58

Şekil 3.11: SSH protokolü yardımıyla sensörlerden alınan değerlerin akıllı telefondaki ekran görüntüsü. 59

Şekil 3.12: RTSP protokolü yardımıyla Picamera modülü ile alınan görüntü.....59

Şekil 3.13: LXTerminalde kodun ekran çıktısı. 60

Şekil 3.14: SG78 – SevenGo Duo pro pH/iyon/iletkenlik ölçüm cihazı.....62

Şekil 3.15: XLPE yalıtkanlı kablolardan alınan ince kesitli numuneler. 63

Şekil 3.16: XLPE yalıtkanlı kablolardan alınan 800 µm - 950 µm kalınlıklarındaki ince kesitli numunelerin dijital mikroskop görüntüsü.....64

Şekil 3.17: Silindirik kaplar ve altlarına yapıştırılmış yaşlandırılacak XLPE numuneler.....64

Şekil 3.18: Silindirik kaplar ve altlarına yapıştırılmış yaşlandırılacak XLPE numuneler.....65

Şekil 3.19: Polyamid rezervuar altına yapıştırılmış yaşlandırılacak XLPE numuneler.....65

Şekil 3.20: Sulu ağaçlanmanın başlatıldığı ve büyütüldüğü deney düzeneği. 66

Şekil 3.21: Alüminyum düzlem elektrotlar. 67

Şekil 3.22: Alüminyum çubuk elektrot, polyamid rezervuar, iletken jel ve alüminyum düzlem elektrot. 67

Şekil 3.23: Metilen mavisi boya çözeltisinin hazırlanma safhalarından görüntüler. 68

Şekil 3.24: Metilen mavisi çözeltisinin içerisine atılan numunelerin fırına konulmasından görüntüler. 69

Şekil 3.25: Metilen mavisi ile boyanmış 100 µm lik yaşlandırılmış XLPE numuneleri. 70

Şekil 3.26: Olympus CX41 ışık mikroskobu. 70

Şekil 3.27: Olympus CX41 mikroskobu ve Olympus SC-100 dijital kamerası ile görüntü alınması.....71

Şekil 3.28: Python programlama dilinde yazılan kod, LXTerminalde kodun ekran çıktısına ve Arduino IDE üzerinde sadeleştirilmiş C++ kod görüntüleri. 72

Şekil 3.29: MFCC tekniği kullanarak öznitelik çıkarımı ve istatiksel değerlerin elde edilmesi.....73

Şekil 3.30: HOG ve CoHOG tekniklerini kullanarak öznitelik çıkarma ve istatiksel değerlerin elde edilmesi.....73

Şekil 4.1: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü üzerinde ağaç uzunluk, genişlik ve iğne – elektrot arası mesafe ölçümleri (2 saat yaşlandırma süresi sonunda). 75

Şekil 4.2: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü (2 saat yaşlandırma süresi sonunda). 76

Şekil 4.3: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü (2 saat yaşlandırma süresi sonunda). 76

Şekil 4.4: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü (2 saat yaşlandırma süresi sonunda). 77

Şekil 4.5: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü (2 saat yaşlandırma süresi sonunda). 77

Şekil 4.6: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü üzerinde ağaç uzunluk, genişlik ve iğne – elektrot arası mesafe ölçümleri (10 saat yaşlandırma süresi sonunda). 78

Şekil 4.7: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü (10 saat yaşlandırma süresi sonunda). 79

Şekil 4.8: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü (10 saat yaşlandırma süresi sonunda). 79

Şekil 4.9: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü (10 saat yaşlandırma süresi sonunda). 80

Şekil 4.10: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü (10 saat yaşlandırma süresi sonunda). 80

Şekil 4.11: Su ağacı referans ölçüm şekli. 81

Şekil 4.12: Su ağacı uzunluğu (µm) - su ağacı genişliği (µm).....82

Şekil 4.13: Su iğnesi ile alüminyum elektrot uzaklığı (µm) - su ağacı uzunluğu (µm).....82

Şekil 4.14: Su iğnesi ile alüminyum elektrot uzaklığı (µm) - su ağacı genişliği (µm).....83

Şekil 4.15: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü. 84

Şekil 4.16: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü. 84

Şekil 4.17: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü. 85

Şekil 4.18: Su ağacı uzunluğu (µm) - su ağacı genişliği (µm).....85

Şekil 4.19: Su iğnesi ile alüminyum elektrot uzaklığı (µm) - su ağacı uzunluğu (µm).....86

Şekil 4.20: Su iğnesi ile alüminyum elektrot uzaklığı (µm) - su ağacı genişliği (µm).....86

Şekil 4.21: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (24 kV_{pp}, 3 kHz, 24 saat, 1 M, 84.2 mS/cm).....87

Şekil 4.22: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (24 kV_{pp}, 3 kHz, 24 saat, 1.4 M, 109.9 mS/cm).....88

Şekil 4.23: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (24 kV_{pp}, 3 kHz, 6 saat, 1 M, 84.2 mS/cm).....89

Şekil 4.24: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (24 kV_{pp}, 5 kHz, 24 saat, 0.85 M). 89

Şekil 4.25: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (24 kV_{pp}, 3 kHz, 12 saat, 0.4 M, 37.5 mS/cm).....90

Şekil 4.26: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (24 kV_{pp}, 3 kHz, 12 saat, 0.6 M, 53 mS/cm).....91

Şekil 4.27: Yelpaze sulu ağaçlanma SEM görüntüsü (5000X).....91

Şekil 4.28: Yelpaze sulu ağaçlanma SEM görüntüsü (10000X).....92

Şekil 4.29:Görüntü verilerinin, MFCC tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (kepstral katsayıların standart sapması – kepstral katsayıların ortalaması). 93

Şekil 4.30: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG maksimumu – CoHOG minimumu).....94

Şekil 4.31: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG ortalama – CoHOG maksimumu). 94

Şekil 4.32: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG ortalama – CoHOG minimum). 95

Şekil 4.33: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG ortalama – CoHOG medyan). 95

Şekil 4.34: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG medyan– CoHOG maksimum). 96

Şekil 4.35: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG medyan– CoHOG minimum).....96

Şekil 4.36: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG standart sapması – CoHOG maksimum).....97

Şekil 4.37: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG standart sapması – CoHOG ortalama). 97

Şekil 4.38: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG standart sapması – CoHOG medyan).....98

Şekil 4.39: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG standart sapması – CoHOG minimum).....98

Şekil 4.40: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG standart sapma – HOG ortalama). 99

Şekil 4.41: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG standart sapma – HOG maksimum).....100

Şekil 4.42: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG medyan– HOG maksimum).....100

Şekil 4.43: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG maksimum – HOG entropi). 101

Şekil 4.44: Görüntü verilerinin, MFCC tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (kepstral katsayıların standart sapması-kepstral katsayıların ortalaması). 102

Şekil 4.45: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG standart sapma – CoHOG medyan). 103

Şekil 4.46: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG standart sapma– CoHOG ortalama). 103

Şekil 4.47: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG standart sapma – CoHOG maksimum). 104

Şekil 4.48: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG standart sapması – CoHOG entropi).....104

Şekil 4.49: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG minimum – CoHOG entropi).....105

Şekil 4.50: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG medyan – CoHOG minimum).....105

Şekil 4.51: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG medyan – CoHOG maksimum). 106

Şekil 4.52: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG medyan – CoHOG entropi).....106

Şekil 4.53: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG ortalama – CoHOG minimum). 107

Şekil 4.54: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG ortalama – CoHOG medyan). 107

Şekil 4.55: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG ortalama – CoHOG maksimum). 108

Şekil 4.56: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG maksimum– CoHOG minimum).....108

Şekil 4.57: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG maksimum – CoHOG entropi).....109

Şekil 4.58: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG standart sapma– CoHOG minimum). 109

Şekil 4.59: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG standart sapma– HOG medyan).....110

Şekil 4.60: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG standart sapma– HOG maksimum).....111

Şekil 4.61: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG standart sapma– HOG entropi). 111

Şekil 4.62: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG medyan– HOG maksimum).....112

Şekil 4.63: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG medyan– HOG entropi). 112

Şekil 4.64: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG ortalama– HOG maksimum). 113

Şekil 4.65: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG maksimum– HOG minimum).....113

Şekil 4.66: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG maksimum– HOG entropi). 114

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Katı yalıtkan malzemeler ve kullanım alanları (Tanaka, 2002). 4

Tablo 2.2: LDPE, MDPE, HDPE ve XLPE malzemelerin özellikleri (Steennis, 1989; Steennis and Kreuger, 1990; Lanca, 2002). 6

Tablo 2.3: Yalıtkan malzemelerin elektriksel özelliklerinin karşılaştırılması (Orton, 2013).....11

Tablo 3.1: Raspberry Pi 1 Model B ve Raspberry Pi 3 Model B'nin teknik özellikleri.....57

Tablo 3.2: NaCl çözeltilerin pH değerleri. 61

Tablo 3.3: Farklı molaritelerdeki tuzlu su çözeltilerinin iletkenlikleri.....62

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

$AgNO_3$: Gümüş nitrat
Al : Alüminyum
Al_2O_3 : Alüminyum oksit
atm : Atmosfer
C : Çözelti konsantrasyonu
$CaCl_2$: Kalsiyum klorür
CH_2 : Metilen
cm^3 : Santimetre küp
Cu : Bakır
$CuCl_2$: Bakır (II) klorür
$CuSO_4$: Bakır (II) sülfat
$Cu(NO_3)_2$: Bakır (II) nitrat
d : Su iğnesinin ucu ile karşı düzlem elektrot arasındaki uzaklık
e : Düzeltme sabiti
E : Elektrik alan
f : Frekans
f : Normalize edilmiş vektör
Fe : Demir
$FeSO_4$: Demir (II) sülfat
f_{mel} : Mel frekansı
g : Gram
G_X : Yatay gradyan
G_Y : Dikey gradyan
H_{xy} : Eş oluşum matrisi
hPa : Hectopascal
Hz : Hertz
K : Kelvin
KBr : Potasyum bromür
kHz : Kilohertz
kV : Kilovolt

kV_p : Kilovolt tepe

kV_{pp} : Kilovolt tepeden tepeye

K_2SO_4 : Potasyum sülfat

l : Ağaç uzunluğu

m : Metre

MHz : Megahertz

mm : Milimetre

Mpa : Megapascal

mS : Milisiemens

NaCl : Sodyum klorür

Na_2SO_4 : Sodyum sülfat

Pb : Kurşun

Pt : Platin

r : Uç eğrilik yarıçapı

Si : Silika

tan δ : Güç kayıp faktörü

U : Gerilim

v : Normalize edilmemiş vektör

v : Büyüme hızı

W : Watt

µm : Mikrometre

ºC : Derece celsius

Ω : Ohm

% : Yüzde

$\oplus$: Genleşme işlemi

$\ominus$: Aşınma işlemi

$\emptyset$: Boş küme

$\circ$: Açma işlemi

$\bullet$: Kapama işlemi

$*$: Konvolüsyon

θ : Gradyan yönelimi

Kısaltmalar **Açıklama**

AC : Alternating current – Alternatif akım

CoHOG : Co-occurrence histograms of oriented gradients - Eş oluşum yönlü gradyanları histogramları

CPU : Central processing unit - Merkezi işlem birimi

DC : Direct current – Doğru akım

DCT : Discrete cosine transform – Ayrık kosinüs dönüşümü

DFT : Discrete fourier transform– Ayrık fourier dönüşümü

EPDM : Ethylene propylene diene monomer - Etilen propilen dien monomer

EPR : Ethylene propylene rubber - Etilen propilen kauçuk

FRP : Fiberglass-reinforced plastic - Fiberglas takviyeli plastik

GIS : Gas insulated substation - Gaz yalıtımlı istasyon

GPIO : General purpose input output - Genel amaçlı giriş çıkış

GPR : Ground penetrating radar – Yerden etkili radar

HDPE : High density polyethylene - Yüksek yoğunluklu polietilen

HOG : Histograms of oriented gradients - Yönlü gradyanların histogramları

IP : Image processing – Görüntü işleme

LDPE : Low density polyethylene - Düşük yoğunluklu polietilen

MDPE : Medium density polyethylene - Orta yoğunluklu polietilen

MFCC : Mel frequency cepstral coefficients - Mel frekans kepstral katsayıları

OCR : Optical character recognition - Optik karakter tanıma

PE : Polyethylene – Polietilen

PET : Polyethylene terephthalate - Polietilen tereftalat

PPLP : Polypropylene-laminated paper - Polipropilen tabakalı (lamine) kağıt

PPS : Polyphenylene sulfide - Polifenilen sülfür

RAM : Random access memory - Rastgele erişimli bellek

RGB : Red Green Blue – Kırmızı Yeşil Mavi

RTSP : Real time streaming protocol – Gerçek zamanlı yayın akışı protokolü

SEM : Scanning electron microscope – Taramalı elektron mikroskobu

SoC : System on chip – Çip üstünde sistem

SSH : Secure shell – Güvenli kabuk

USB : Universal serial bus – Evrensel seri veriyolu

VWT : Vented water tree - Yelpaze su ağacı

WTR-XLPE : Water-tree retardant cross-linked polyethylene - Su ağacı geciktirici çapraz bağlı polietilen

XLPE : Cross-linked polyethylene - Çapraz bağlı polietilen

ÖZET

DOKTORA TEZİ

YÜKSEK GERİLİM DAĞITIM KABLOLARINDAKİ SU AĞACI OLAYININ GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİYLE İNCELENMESİ

Mustafa KARHAN

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Mukden UĞUR

Bu tez çalışmasında, polimerik yalıtkanları temsilen orta ve yüksek gerilim uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılan XLPE tipi yalıtkan malzeme incelenmiştir. XLPE yalıtkanlı kablolardan alınan numunelerde su iğneleri oluşturularak yelpaze tipi sulu ağaçlanma laboratuvar ortamında başlatılmış ve büyütülmüştür. Sulu ağaçlanmaların molarite, iletkenlik, elektrik alan, frekans ve uygulama (yaşlandırma) süresine bağlı analizleri yapılmıştır. Görüntü işleme bölümünde, yaşlandırma süresi ve elektrik alanın değişken, diğer parametrelerin ise sabit tutulmasıyla elde edilen ağaçlanmaların mikroskop altında çekilen görüntüleri kullanılmıştır. Öncelikle bu görüntüler morfolojik filtre yardımıyla anlamsız bölgelerden temizlenmiş ve daha sonra HOG, CoHOG ve MFCC algoritmalarının kullanımıyla öznitelikler çıkartılmıştır ve son aşamada bu verilerin istatiksel değerlerine bakılmıştır. Su ağacı olayının görüntü işleme teknikleri ile detaylı olarak incelenmesi, XLPE tipi polimerik yalıtkanların çevresel etkenler karşısında elektriksel ve mekanik özelliklerindeki zamana bağlı değişimin belirlenmesine yeni bir bakış açısı getirmekte ve ömür tespitinde daha doğru öngörüde bulunulmasına yardımcı olmaktadır.

Ekim 2017, 146 sayfa.

Anahtar kelimeler: Yüksek gerilim, görüntü işleme, polimerik yalıtkan, XLPE, yelpaze sulu ağaçlanma

SUMMARY

Ph.D. THESIS

INVESTIGATION THE WATER TREEING PHENOMENON IN HIGH VOLTAGE DISTRIBUTION CABLES BY USING IMAGE PROCESSING TECHNIQUES

Mustafa KARHAN

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Electrical and Electronic Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Mukden UĞUR

In this study, XLPE, which is widely used in medium and high voltage applications as a polymeric insulating material, has been investigated. With the presence of water needles, which were formed in samples taken from the XLPE insulated cables, vented type water trees (VWT) were initiated and have grown in laboratory conditions. To investigate the water treeing phenomenon, several type of analysis, such as molarity, conductivity, electric field, frequency and aging were performed. In the image processing (IP) part, microscopic VWT images, which were obtained under stable external conditions except for varying electrical field strength and aging time, were analysed. Initially, the obtained VWT images were cleaned from the irrelevant spots and regions using morphological filters and then the features were extracted using HOG, CoHOG and MFCC algorithms. Finally the statistical values of these features were calculated. The investigation of VWT by using IP techniques enables to observe the change in electrical and mechanical properties of XLPE type insulators according to aging time. The results also indicate, that by using these IP techniques, it might be possible to make an estimate about the remaining life of a XPLE type insulator.

October 2017, 146 pages.

Keywords: High voltage, image processing, polymeric insulator, XLPE, vented water treeing

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi iletim ve dağıtımında kullanılan orta ve yüksek gerilim kablolarının hizmet süresinin uzun, bakımının kolay, kayıp ve kaçağın ise minimum düzeyde olması, yaşlanma olaylarından minimal seviyede etkilenmesi ve güvenli olması gibi özellikler istenmektedir. Kabloların yalıtkan malzemesi ile alakalı olan bu özellikler, bozulma bölgelerinin tanımlanması, teşhisi ve muayenesi gibi ifadeleri ön plana çıkarmaktadır. Kabloların enerji nakil anlamında ilk kullanımından günümüze kadar farklı iletken ve polimerik yalıtkanlar kullanılmıştır (Ersoy, 2003; Uğur ve diğ., 2002; Karhan ve Uğur, 2016). EPR (Ethylene Propylene Rubber - Etilen Propilen Kauçuk) ve XLPE (Cross-linked Polyethylene - Çapraz Bağlı Polietilen) yaygın olarak kullanılan polimerik kablo yalıtkanlarıdır. (Werelius, 2001). PE (Polyethylene - Polietilen) malzeme, kablolarda 1942 yılında kullanılmaya başlanırken, 1968'de XLPE kabloların ilk olarak orta gerilimde kullanıldığı görülmektedir. (Orton, 2013).

Çapraz bağlı polietilen (XLPE), elektriksel, fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı orta ve yüksek gerilim kablolarında yoğun bir şekilde kullanılan bir elektriksel yalıtım malzemesidir. XLPE yalıtkanlı kablolar, bu üstün özelliklerinden dolayı dünya çapında ilgili kuruluşlar tarafından tercih edilmektedir (Al-Arainy ve diğ., 2007; Malik ve diğ., 2012). XLPE malzeme her ne kadar bu derece elektriksel yalıtım anlamında mükemmel özelliklere sahip olsa da servis süresi boyunca servis verdiği ortam itibariyle bazı yaşlanma olayları kaçınılmazdır. XLPE malzemenin yaşlanmasında birçok faktör etkili olabilmektedir. İlk olarak Miyashita (1969), tarafından tespit edilen su ağacı olayı (water treeing phenomena) bunların başında gelmektedir. Sulu ağaçlanma, XLPE kabloların servis ömründe ve kablo yalıtımının bozulmasında aktif bir rol üstlenmektedir.

Sulu ağaçlanma, dielektrik kablo arızalarıyla ilişkili bir ön kırılma (prebreakdown) olayıdır (Nunes ve Shaw, 1980). Sulu ağaçlanma, yüksek bir elektrik alan ve su mevcudiyetinde meydana gelebilen hidrofilik yaygın dallanmış ağaç benzeri bir yapıya sahip kalıcı bozulmalardır. Su ağaçları, kanallar ile bağlı veya bağlı olmayan su dolu mikro boşluklardan oluşur (Hellesø ve diğ., 2012; Stancu ve diğ., 2009). Sulu ağaçlanma genel olarak papyon sulu ağaçlanma ve yelpaze sulu ağaçlanma olmak üzere iki tipe sınıflandırılmaktadır.

Sulu ağaçlanmayı etkileyen faktörlerle ve sulu ağaçlanmaya başlatan ve büyüten olası olaylarla ilgili olarak literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bunlara ilişkin olarak yapılan çalışmalar genel kısımlar bölümünde verilmiştir.

Kablo yalıtımının bozulmasının en baskın etkenlerinden biri olan su ağacı olayını açıklamaya çalışan birçok teori 1970'lerin başından beri yayınlanmıştır fakat hepsinin eksiklikleri bulunmaktadır ve hiçbiri çok sayıdaki deneysel verileri ve çeşitli laboratuvarlar tarafından bildirilen yorumların farklılık ve çeşitliliğini tam olarak açıklayamamıştır (Bulinski ve diğ., 1994).

Bu çalışma kapsamında, polimerik yalıtkanları temsilen orta ve yüksek gerilim uygulamalarında yoğun olarak yer bulan XLPE malzeme kullanılmıştır. Kullanılan XLPE malzemeler kullanılmaya hazır XLPE yalıtkanlı kablolardan alınmıştır. Kullanılmaya hazır durumda olan XLPE yalıtkanlı kablolardan alınan numunelerde su iğneleri oluşturularak yelpaze sulu ağaçlanma laboratuvar ortamında başlatılmış ve büyütülmüştür.

Çalışma kapsamında, orta ve yüksek gerilim kablolarının servis ömründe önemli bir yer tutan yerel ve kalıcı bir bozulma olan sulu ağaçlanmanın molarite, iletkenlik, elektrik alan, frekans ve uygulama (yaşlandırma) süresi tabanlı analiz edilmiştir. Görüntü işleme bölümünde, yaşlandırma süresi ve elektrik alan faktörlerinin etkin kılındığı ağaçlanma mikroskop görüntüleri kullanılmıştır. Sulu ağaçlanma deneyleri, tasarlanıp uygulanan akıllı bir deneysel sistem yardımıyla kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Farklı parametreler için elde edilen görüntüler, görüntü işleme teknikleri ile incelenmiştir.

Görüntü işleme bölümünde, elde edilen yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri morfolojik filtre yardımıyla anlamsız bölgelerden temizlenmiştir. Filtrelenen görüntülerden HOG, CoHOG ve MFCC algoritmalarını kullanarak öznitelikler çıkartılmıştır. Çıkartılan özniteliklerin istatiksel değerlerine bakılmıştır.

Polimerik yalıtkanların yaşlandırılması işlemi, açık kaynak yazılım ve geliştirme kartı tabanlı akıllı bir deneysel sistem ile gerçekleştirilmesi açısından yüksek gerilim ve açık kaynak platformun (yazılım ve donanım anlamında) kesiştiği bir yaklaşım sunmaktadır. Su ağacı olayının görüntü işleme teknikleri ile incelenmesi polimerik yalıtkanların incelenmesine yeni bir bakış açısı getirmektedir.

2. GENEL KISIMLAR

Bu bölümde, polimerik yalıtkanlara değinilip orta ve yüksek gerilim kablolarında kullanılan çapraz bağlı polietilen (XLPE) yalıtkan malzemesi tanıtılmıştır. Su ağacı olayının başlama ve büyüme sürecine etki eden faktörler açıklanarak bu faktörlerle ilgili literatürde yapılan çalışmalara değinilmiştir. Sulu ağaçlanmanın başlamasında ve yayılmasındaki olası olaylar verilmiştir. Tezde, deney sonrası yelpaze sulu ağaçlanmanın yazılımsal analizinde kullanılan işaret işleme teknikleri açıklanarak verilmiştir.

2.1. POLİMERİK YALITKANLAR

Yalıtkan malzemeler, basit polimerlere ve kompozitlere ayrılmıştır. Güç kabloları, transformatörler, yalıtkanlar ve dönen makineler için bazı katkı maddeli basit polimerler kullanılmaktadır. Bunlar termoplastikler, elastomerler ve termosetlerden oluşmaktadır. Termoplastiklere polietilen (PE), polietilen tereftalat (PET) ve polifenilen sülfür (PPS) dahildir (Tanaka, 2002).

Örneğin, termosetleri epoksi ile temsil ederken, elastomerler silikon, etilen propilen kauçuk (EPR) ve etilen propilen dien monomer (EPDM) 'dir. İnorganik maddeler içeren kompozit malzemeler, gaz yalıtımlı istasyonlar (GIS), dönen makineler ve izolatörler için uygulanır. Bunları epoksi/cam, epoksi/silika ve/veya alümina ve epoksi/mika sistemleri oluştururlar (Tanaka, 2002). Tablo 2.1’de elektroteknoloji için katı yalıtım malzemeleri ve bunların kullanım alanları verilmiştir.

Tablo 2.1: Katı yalıtkan malzemeler ve kullanım alanları (Tanaka, 2002).

Tür	Malzeme	Güç Uygulamaları
Polimerler		
Termoplastikler	PE PET PPS	Kablolar Transformatörler
Elastomerler	Silikon EPR EPDM	Polimer yalıtkanlar
Termosetler	Epoksi emdirilmiş (emprenye edilmiş)	Dönen makineler
Kompozitler		
Kompozit	Epoksi/cam FRP Epoksi/Si, Al_2O_3 Epoksi/Mika	Gaz yalıtımlı istasyonlar (GIS), Polimer yalıtkanlar, Çekirdek malzemeler, Dönen makineler

Düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) malzeme çoğunlukla çekilmiş (ekstrüze) kablolar için yalıtım malzemesi olarak kullanılmıştır. Günümüzde, polietilen çekilmiş kabloların çoğu XLPE yalıtkan malzemesini içermektedir. Modern kablo teknolojisinde kılıf üretimi için kullanılan diğer çeşit polietilenler, orta yoğunluklu polietilen (MDPE) ve yüksek yoğunluklu polietilendir (HDPE) (Steennis ve Kreuger, 1990).

Polietilenler $(CH_2\text{-}CH_2)_n$ çok uzun makromoleküllerdir. PE bir termoplastiktir; üst çalışma sıcaklığı $\approx$ 70°C ile sınırlıdır. Makromoleküllerin çapraz bağlanmasıyla çalışma sıcaklığı $\approx$ 90°C 'ye yükseltilir. Yaygın bir kullanıma sahip olan PE; ucuz olması, iyi dielektrik özelliğe sahip olması, kimyasal etkiye ve neme direnç sağlaması, esnek olması, kullanımının kolay

olması ve kolay işlenebilir olması gibi avantajlara sahiptir (Steennis ve Kreuger, 1990; Tanırcan, 2006).

XLPE bir termosettir. Polietilenin çekilmesi (ekstrüzyonu) sırasında bir katalizör eklenerek XLPE elde edilir, daha sık olarak dikumil peroksit (dicumyl peroxide) ve silan kullanılır. Çapraz bağlama genellikle dikumil peroksit gibi bir katalizör kullanılarak elde edilir. Kablo üretiminde çapraz bağlama maddesi polimer bileşiğine eklenir ve çekilme işleminden sonra yüksek sıcaklık ve basınç uygulanması reaksiyonu başlatır (Lanca, 2002; Steennis ve Kreuger, 1990; Doedens, 2012). Şekil 2.1' de XLPE yalıtkanlı tek damarlı orta gerilim kablosundan alınan XLPE yalıtkanı gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Orta gerilim kablosundan alınan XLPE yalıtkan (yarı iletkenden temizlenmiş).

XLPE, mükemmel seviyedeki fiziksel, kimyasal ve elektriksel özelliklerinden dolayı orta ve yüksek gerilim uygulamalarındaki dağıtım kablolarında yalıtım malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Li ve diğ., 2011). Bu çalışmada popüler bir yalıtım malzemesi olan XLPE, polimerik yalıtkanları temsilen kullanılmıştır. Tablo 2.2'de LDPE, MDPE, HDPE ve XLPE malzemelerin özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.2: LDPE, MDPE, HDPE ve XLPE malzemelerin özellikleri (Steennis, 1989; Steennis and Kreuger, 1990; Lanca, 2002).

PE	**LDPE**	**MDPE**	**HDPE**	**XLPE**
Yoğunluk (g/cm^3)	0.91-0.94	0.926-0.94	0.95-0.97	0.92
Ortalama moleküler uzunluğu	1500-1530		7000-14000	
Yan zincirlerin sayısı (1000 zincir atomu başına)	20-40	5-15	1-5	
Yan zincirlerin uzunluğu (atomların sayısı)	2-5		<4	
Kristallik (%)	42-55	54-63	64-90	
Kristal erime noktası (ºC)	110-120	120-130	135	120
Cam Geçişi	0			-35
Mekanik Özellikler				
Sertlik-Rockwell (D shore)	41-46	50-60	60-70	
Young modülü (MPa)	200-400	170-380	600-1500	100
Verim kuvveti (MPa)	10-20	10-25	25-50	20
Son mukavemet (MPa)	15-25		25-55	
Kırılma uzaması (%)	400-700		100-600	
Eğilme modülü (MPa)	34-410	410-800	700-1800	
Termal Özellikler				
Isıl iletkenlik (W/K-m)	0.33	0.4	0.45-0.52	0.3

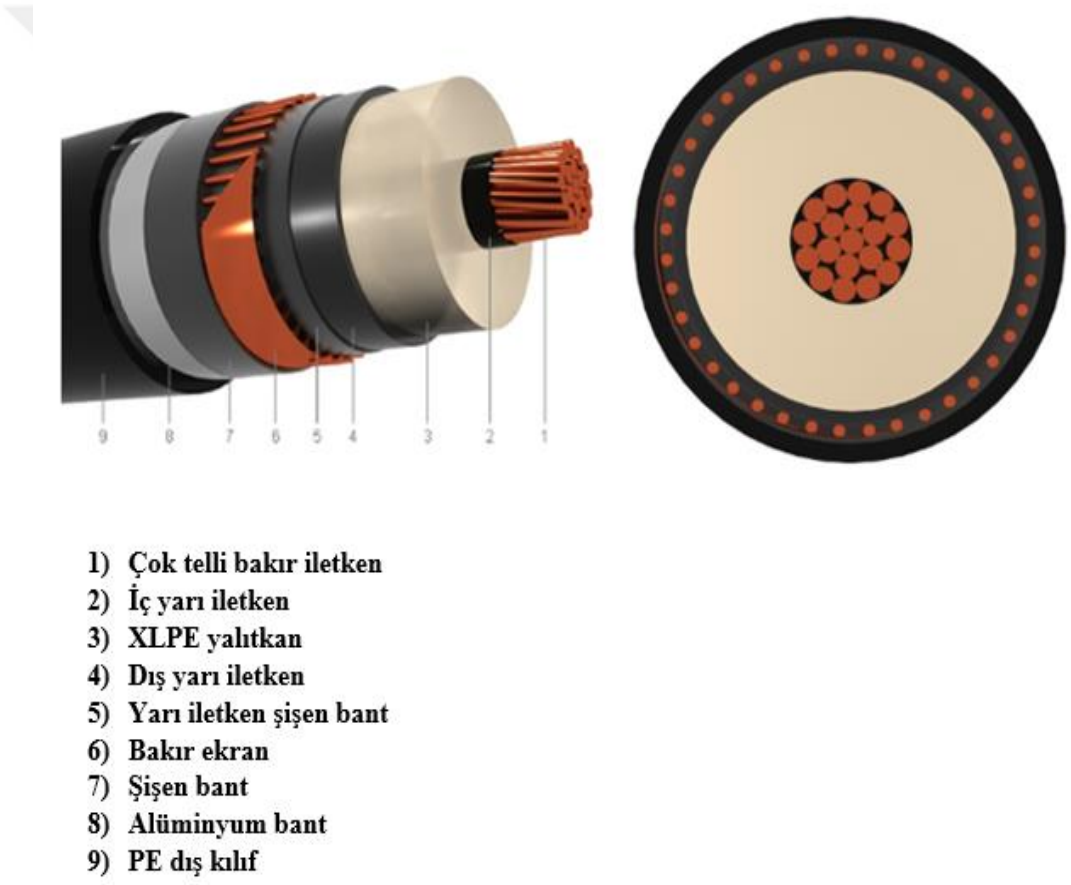
Tablo 2.2 (devam): LDPE, MDPE, HDPE ve XLPE malzemelerin özellikleri (Steennis, 1989; Steennis and Kreuger, 1990; Lanca, 2002).

Doğrusal termal genleşme katsayısı (10^{-6}K)	320		100-200	320
Elektrik ve Dielektrik Özellikler				
Bağıl dielektrik sabiti (1 MHz)	2.2-2.35	2.2-2.35 (1 kHz'de)	2.3-2.4	2.4
1 MHz'de tan δ (10^{-4})	2	2 (1 kHz'de)	10	10
Delinme dayanımı (kV/mm)	75		100	50
Hacimsel özdirenç (Ωcm)	10^{15}-10^{18}	10^{15}-10^{18}	10^{15}-10^{18}	10^{16}
Yüzeysel özdirenç (Ωcm^{-1})	10^{13}		10^{13}	
Optik Özellikler				
Kırılma indisi	1.51	1.52	1.54	
Geçirgenlik (%)	4-50	4-50	10-50	

2.2. ORTA VE YÜKSEK GERİLİMDE XLPE YALITKANLI KABLOLAR

Güç kabloları eş eksenli (co-axial) bir yapıya sahiptir. Şekil 2.2'de 40/69 kV XLPE yalıtkanlı yüksek gerilim enerji kablosunun temel bileşenleri gösterilmiştir. Hat veya faz geriliminde çalışan, genellikle bakır veya alüminyum malzemeden yapılmış akım taşıyan iletken bulunmaktadır. Bunun etrafında süper temiz çapraz bağlı polietilen gibi çekilmiş (ekstrüze edilmiş) bir plastik olan yalıtım malzemesi bulunmaktadır. Şekil 2.3'te alüminyum ve bakır

iletkenli XLPE yalıtkanlı tek damarlı orta gerilim kablolarına yer verilmiştir. Merkezi iletkenden oluşturulan kıymık benzeri çıkıntıları önlemek ve polimerik yalıtkana yapışmak için, iletken malzeme (bakır, alüminyum) iletken plastik ile çevrelenmiştir. Sözde "yarı iletken" ve yalıtkan arasındaki arayüz, olabildiğince düzgün olacak şekilde tasarlanmıştır. Metalik çıkıntıları önlemenin yanı sıra, yarı iletken polimer yalıtkan ile benzer termal özelliklere sahiptir. İletken ısınıp soğuduğunda yalıtkan ve iletken parçalar arasında meydana gelebilecek önemli farklı kasılmaları önler. Benzer şekilde, yalıtkanın dış tarafında, topraklanmış veya dönüş iletkene bağlı olan başka bir yarı iletken vardır. Suyun girmesini önlemek için, dış yarı iletkeni çevreleyen metalik bir koruma olabilir (Fothergill, 2014).



Şekil 2.2: XLPE yalıtkanlı tek damarlı yüksek gerilim kablosunun temel bileşenleri.

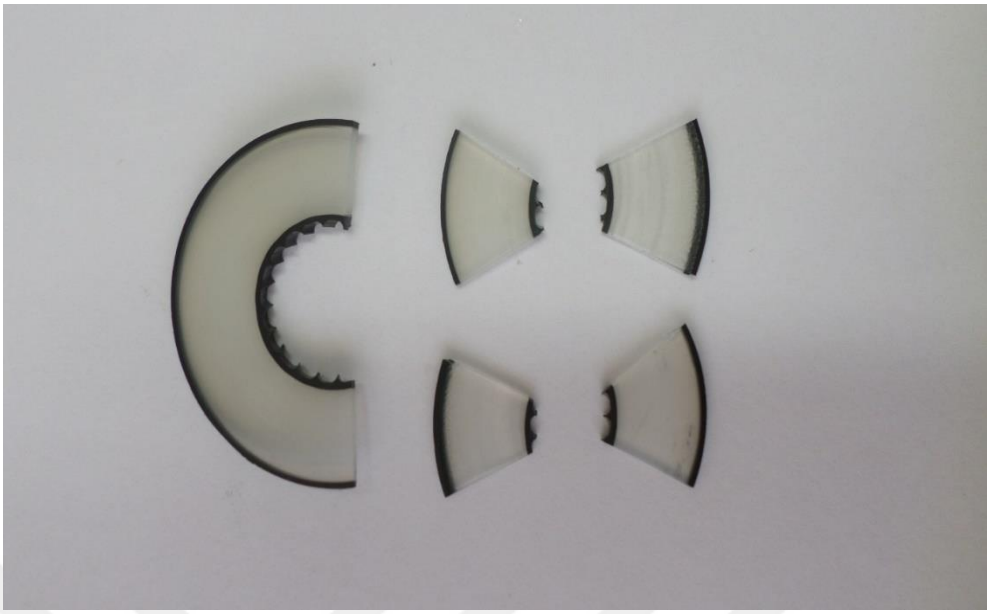


Şekil 2.3: Dış kılıftan ayrılmış bakır ve alüminyum iletkenli XLPE yalıtkanlı tek damarlı orta gerilim kabloları.

Şekil 2.4 ve 2.5'te XLPE yalıtkanlı tek damarlı kablodan yaşlandırmak için alınan numuneler (yarı iletken kısımdan ayrılmamış) gösterilmiştir.



Şekil 2.4: XLPE yalıtkanlı tek damarlı kablodan yaşlandırmak için alınan numune örnekleri (yarı iletken kısımdan ayrılmamış).



Şekil 2.5: XLPE yalıtkanlı tek damarlı kablodan yaşlandırmak için alınan numune örnekleri (yarı iletken kısımdan ayrılmamış).

Orton (2013) "Yeraltı Güç Kablolarının Tarihi" adlı makalesinde güç kablolarının gelişimini kronolojik olarak vermektedir. Polietilenin (PE) ilk defa kablolarda 1942 yılında kullanıldığı görülürken, orta gerilimde çapraz bağlı polietilenin (XLPE) ilk kullanımı 1968 yılında görülmüştür. XLPE kabloların geliştirilmesindeki bazı önemli tarihler aşağıdaki şekilde sıralanmıştır;

- 1968 XLPE kabloların ilk olarak orta gerilimde kullanılması (çoğunlukla kılıfsız bant korumalar)
- 1972 Çekilmiş yarı iletken ekranların tanıtılması
- 1973 Süper temiz malzemelerin kullanımı (İsveç)
- 1978 Kuzey Amerika'da polimerik kılıfların yaygın kullanımı
- 1982 Amerika Birleşik Devletleri ve Almanya'da orta gerilim için su ağacı geciktirici yalıtkan malzemelerin tanıtılması
- 1989 Kuzey Amerika'da orta gerilim kabloları için süper pürüzsüz iletken korumaların tanıtılması
- 1990 Su ağacı geciktirici yalıtkan malzemelerin yaygın kullanımı (Orton, 2013; Fothergill, 2014).

Tablo 2.3'de yalıtkan malzemelerin tan δ ve dielektrik sabitleri verilmiştir.

Tablo 2.3: Yalıtkan malzemelerin elektriksel özelliklerinin karşılaştırılması (Orton, 2013).

Yalıtkan Malzemelerin Elektriksel Özelliklerinin Karşılaştırılması[1]		
Yalıtkan Malzeme[2]	**Dielektrik Sabiti**	**tan δ**
Trafo kağıdı (Kraft Paper)	3.6	0.0030
XLPE	2.3	0.0001
WTR-XLPE	2.4	0.0004
EPR	3.2	0.0080
PPLP (90ºC'de)	2.7	0.0008

[1]Anma geriliminde ve oda sıcaklığında alınan ölçümler

[2]XLPE: çapraz bağlı polietilen (cross-linked polyethylene)

WTR-XLPE: su ağacı geciktirici çapraz bağlı polietilen (water-tree retardant cross-linked polyethylene)

EPR: etilen propilen kauçuk (ethylene propylene rubber)

PPLP: polipropilen tabakalı (lamine) kağıt (polypropylene-laminated paper)

2.3. SU AĞACI OLAYI

Herhangi bir malzemenin fiziksel ve/veya kimyasal olarak yaşlanması kaçınılmazdır. Bir yalıtkan malzeme içinde elektrik alan varlığı ile başlayıp büyüyebilen elektriksel yaşlanma olayları meydana gelebilmektedir. Buradaki temel amaç elektriksel yaşlanmayı anlamak, yaşlanmayı azaltmak, yaşlanmanın etkisini en aza indirgemek, ömür tayini yapabilmek ve malzeme ömrünü uzatabilmektir. Polietilen gibi bir polimerik yalıtkan malzemede üç temel yaşlanma süreci gözlemlenebilir. Bunlar sulu ağaçlanma, elektrik ağaçlanma ve dielektrik

kırılma olaylarıdır. Bu olaylardan herhangi biri ortaya çıkmadan önce bile polimerin elektriksel yaşlanmaya maruz kaldığı görülebilmektedir (Lanca, 2002).

Sulu ağaçlanma, kablo yalıtkanı arızaları başlığı altında incelenecek bir öncül bozulma olayıdır. Su ağaçları, hidrofilik ve yaygın dallanmış yapıdaki kalıcı lokalize olmuş hasarlar ve bozulmalardır. Dallanmış yapıdaki bu ağaçların boyutları birkaç mikrondan 1 mm'ye kadar değişebilmektedir (Nunes ve Shaw, 1980; Steennis and Kreuger, 1990; Lanca, 2002). Sulu ağaçlanma, AC gerilim ve nemli koşullar altında polimerik yalıtkanlar için esaslı bir bozulma olayı gibi görünmektedir (Fothergill ve diğ., 1993). Şekil 2.6'da laboratuvar ortamında oluşturulan bir su ağacı görüntüsüne yer verilmiştir.



Şekil 2.6: Sulu ağaçlanmanın mikroskop görüntüsü.

Su ve elektriksel gerilimin varlığında meydana gelen polietilenin (PE) bozunumunun keşfi 1969 yılında Miyashita tarafından yayınlandı ve Boston'da Elektriksel Yalıtım Konferansı'nda sunuldu (Miyashita, 1969). Daha sonra da bu tür ağaçlanmalar "Sulu Ağaçlanma" olarak anıldı. Miyashita (1969), sulu ağaçlanmayı dalgıç motorların stator sargılarındaki polietilen ile kaplanmış tellerinde gözlemledi (Steennis ve Kreuger, 1990).

Sulu ağaçlanmalar zamanla elektrik ağaçlanmalarına ve yalıtkan bozulmalarına dönüşebilmektedir. Sulu ağaçlanmanın yalıtımı zayıflatabileceği ve özellikle de büyük boyutlardaki su ağaçlarının tehlike oluşturabileceği bilinmektedir (Steennis ve Kreuger, 1990).

Literatürde sulu ağaçlanmanın başlaması ve büyümesini birçok faktörün etkilediğini gösteren birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda sulu ağaçlanma başlaması ve büyümesini etkileyen faktörler, sulu ağaçlanmanın başlaması ve büyümesindeki olası olaylar, deneysel çalışmalarda izlenecek adımlar, sulu ağaçlanma morfolojisi, sulu ağaçlanmanın karakteristik özellikleri gibi birçok başlığa değinilmiştir (Nunes ve Shaw, 1980; Shaw ve Shaw, 1984; Steennis, 1989; Steennis ve Kreuger, 1990; Ross, 1998; Lanca, 2002; Sanniyati ve diğ., 2016).

2.3.1. Morfoloji

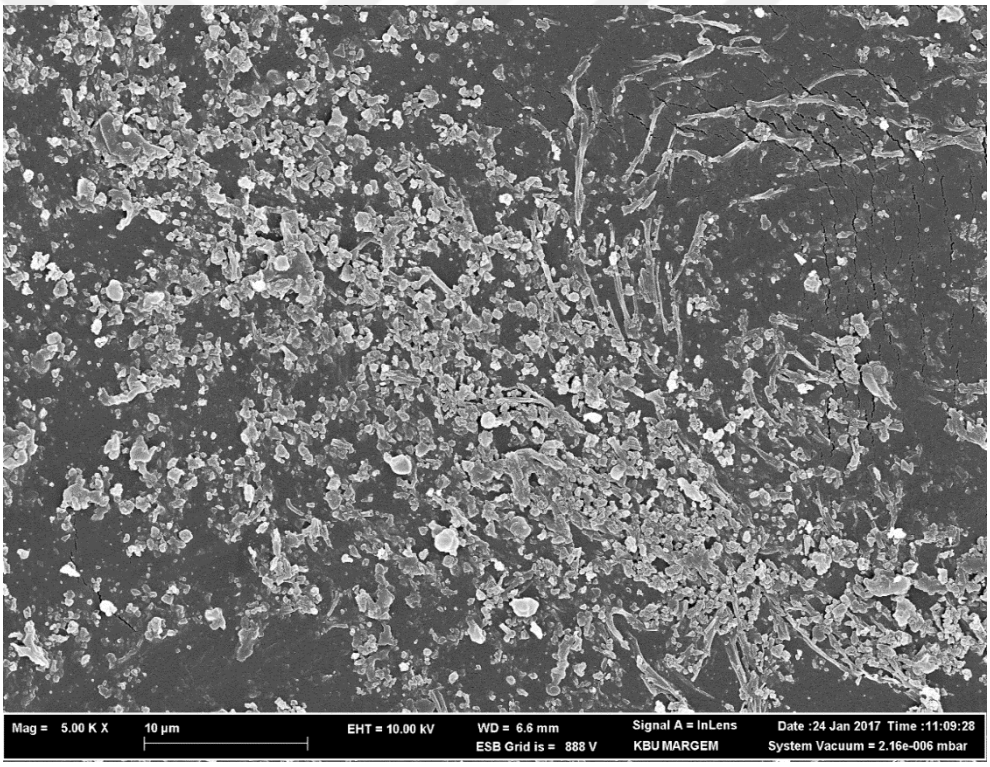
Su ağaçları genel olarak su ve elektrik alanının etkisi altında farklı türlerdeki polimerlerde başlayabilen ve büyüyebilen yalıtkan malzemedeki çalı ve yelpaze benzeri dağınık yaygın yapılardır. Su ağaçları su ve nem içerir. Su ağaçlarındaki su yoğunluğu, etkilenmemiş çevreleyen yalıtkandaki suyun yoğunluğundan daha yüksektir. Ağaçlardaki su buharlaştırılırsa, yalıtkan su veya su buharına maruz kaldığında ağacın suyunu tekrar emeceği bilinmektedir. Su ağaçları yalıtkanı zayıflatır ve özellikle büyük su ağaçları tehlikeli kabul edilebilir. Büyük su ağaçları, yalıtkan bozulmalarını başlatabilmektedir (Steennis ve Kreuger, 1990).

PE'de hâlihazırda var olan boşlukların yanı sıra, ekstra boşluk oluşumu zaman zaman su ağacında da meydana gelebilmektedir. Bu boşlukların yığınları, bazen yelpaze ağaçların gövdesinde bulunabilir (Steennis ve Kreuger, 1990).

Kurumuş su ağaçları çevresindeki PE'den ayırt edilemez hale geldiğinden, meydana gelen sulu ağaçlanmayı gözlemleyebilmek için su ağaçları farklı boyalarla kalıcı olarak görünür hale getirilebilir. Genellikle metilen mavisi kullanılarak boyama işlemi gerçekleştirilmektedir. Metilen mavisi, boyama için oksitlenmiş halde uygulanan bir redoks göstergesidir. Çözelti, renk değişikliğini önlemek için bir karbonat çözeltisi ile tamponlanır. Boyamadan sonra, metilen mavisi hala oksitlenmiş haldedir. Dolayısıyla boyama, kimyasal nitelik taşımamaktadır. Su ağacındaki bir difüzyon ve boya kümelenmesi olarak düşünülebilir (Ross, 1998). Boyama işlemi, farklı boyalarla yapıldığı gibi aynı boya ile farklı yöntemlerle de yapıldığı da gözlemlenmiştir. Genellikle metilen mavisi yapılan bu işlemi Stancu ve diğ. (2009), Ciuprina ve diğ. (2010) rhodamine çözeltisi ile su ağaçlarını boyayarak görünür hale getirmişlerdir. Bu

çalışmada metilen mavisi ile boyamak için Shaw ve Shaw (1984) tarafından verilen ve genel kabul görmüş olan Siemens yöntemi kullanılmıştır.

Çoğu yayınlanmış araştırmadan sonra dahi su ağacı morfolojisi hala tartışma konusudur. Mikrometre ölçeğinde belirli konularda fikir birliğine varılmasına rağmen, nanometre ölçeğinde belirsizlikler devam etmektedir. Sulu ağaçlanma meydana gelmiş polimerlerdeki su ağaçlarını gözlemlemek için polimerler bazı işlemlerden geçmelidir. Ağaçlanmayı gözlemleyebilmek için gerçekleştirilen bu işlemler ağacın esas şeklini değiştirebileceği ve insan eliyle yapay bir doku oluşturulabileceğinden en küçük ölçeği belirlemede sorun teşkil edecektir (Lanca, 2002). Şekil 2.7'de laboratuvar ortamında oluşturulmuş bir yelpaze su ağacının SEM görüntüsüne yer verilmiştir. Görüntüde boya kalıntıları da görünmektedir.



Şekil 2.7: Yelpaze su ağacının SEM görüntüsü.

Kablo yalıtkanı içinde oluşan ağaçlanma papyon sulu ağaçlanma ve kablonun iç ve/veya dış iletken ekranlarında ortaya çıkan ve iletkene doğru yayılan dağınık yapıdaki yelpaze sulu ağaçlanma olmak üzere iki çeşit su ağaçlanması mevcuttur. Papyon sulu ağaçlanma ve yelpaze

sulu ağaçlanma aynı parametreden farklı şekilde etkilenebilir. Bu çalışmada, laboratuvar ortamında yelpaze su ağacı oluşturulup büyütülmüştür.

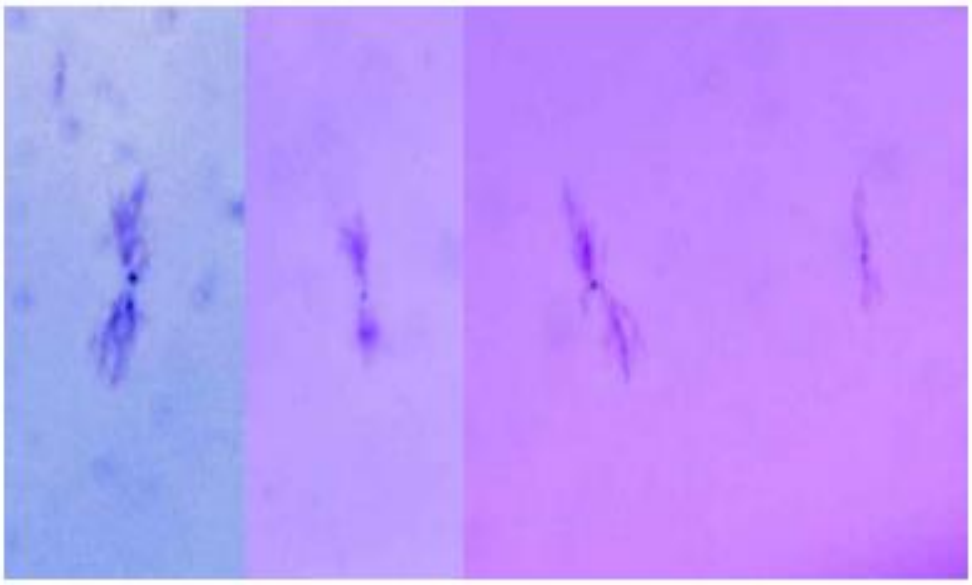
2.3.1.1. Papyon sulu ağaçlanma

Papyon sulu ağaçlanma, yalıtkan malzeme hacmi içerisinde meydana gelen bir sulu ağaçlanma türüdür. Papyon sulu ağaçlanma, yalıtkan malzeme içindeki elektrottan (noktadan) simetrik olarak dışarı doğru büyüyebilmektedir. Bu ağaçlanmalar istisnai durumları olmakla beraber elektrik alan çizgileri tersi yönünde büyümektedir (Steennis, 1989; Steennis ve Kreuger, 1990).

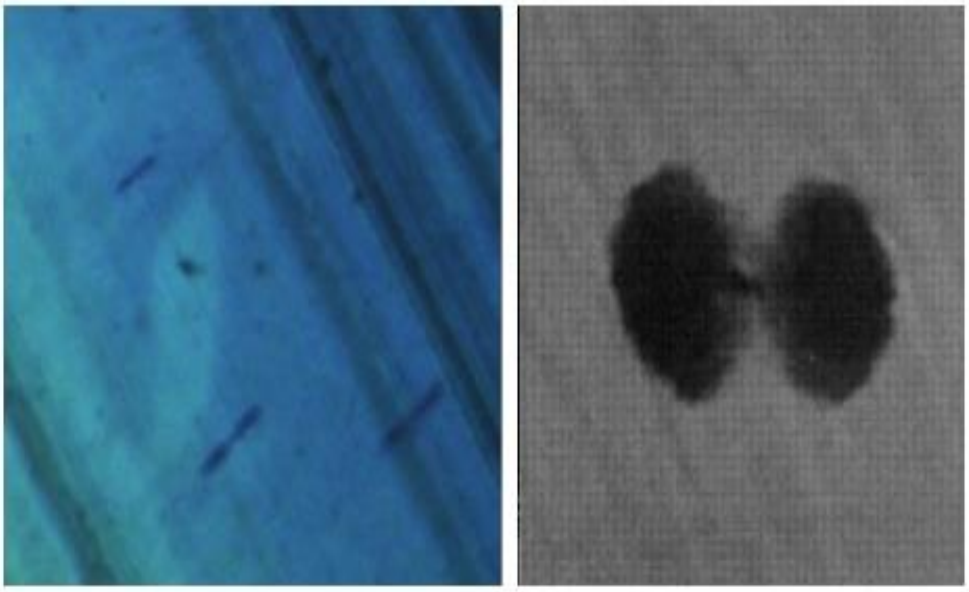
Başlama noktaları optik mikroskop yardımıyla açıkça görülebilmektedir. Sletbak ve Botne (1977) yaptıkları deneysel çalışmada, boyalı ağaçları ve ağaçlanmanın başlangıç noktalarını, yabancı madde içeriği açısından analiz etmişler ve boyalı ağaçların, kükürt ve bazı metal içeren yabancı maddelerden kaynaklandığı bulmuşlardır. Ağaç dallarında ayrıca kükürt ve bazı durumlarda metal içerdiğini tespit etmişlerdir.

Normalde papyon su ağacının büyümesi belirli bir süre sonra şiddetle azalmaktadır. Toplam uzunluk sınırlıdır ve bu nedenle bu tür su ağaçları nadiren de olsa kablo arızalarına sebep teşkil etmektedir. Papyon su ağaçlarının uzunluğunun, yabancı maddeler içeren yerin büyüklüğüyle ilişkili olduğuna dair işaretler bulunmaktadır (Steennis, 1989; Steennis ve Kreuger, 1990).

Phillips ve Karakelle'nin (1989) papyon sulu ağaçlanmanın büyümesinde kristalizasyon ve tavlamanın etkileri üzerine çalışmaları bulunmaktadır. Karakelle ve Phillips'in (1989) kirletici maddelerin papyon sulu ağaçlanmaya etkisi ve ağaçlanma morfolojisi ile ilgili olarak çalışmaları bulunmaktadır. Qureshi ve diğ. (2008), 4 farklı Arap Körfezi menşeili XLPE kablo üreticisinin numunelerini kullanarak 800 saat yaşlandırma sonundaki papyon su ağacı yoğunluklarını analiz ederek kabloların papyon sulu ağaçlanma eğilimlerini elde etmişlerdir. (Qureshi et al. 2008). Hellesø ve diğ. (2012), 2 ve 3 aylık süreler için mekanik gerilme altında oluşan papyon su ağacı sayılarını ve uzunluklarını ölçmüşlerdir. Bu çalışma sonucunda oluşan papyon su ağacı görüntüleri Şekil 2.8'de papyon sulu ağaçlanmaya örnek görüntüler olarak verilmiştir. Şekil 2.9'da Qureshi ve diğ. (2008) ve Al-Arainy ve diğ. (2004) papyon sulu ağaçlanmayla ilgili yaptıkları çalışmalardan alınan papyon su ağacı mikroskop görüntüleri verilmiştir.



Şekil 2.8: Papyon su ağacı mikroskop görüntüleri (Hellesø ve diğ., 2012).



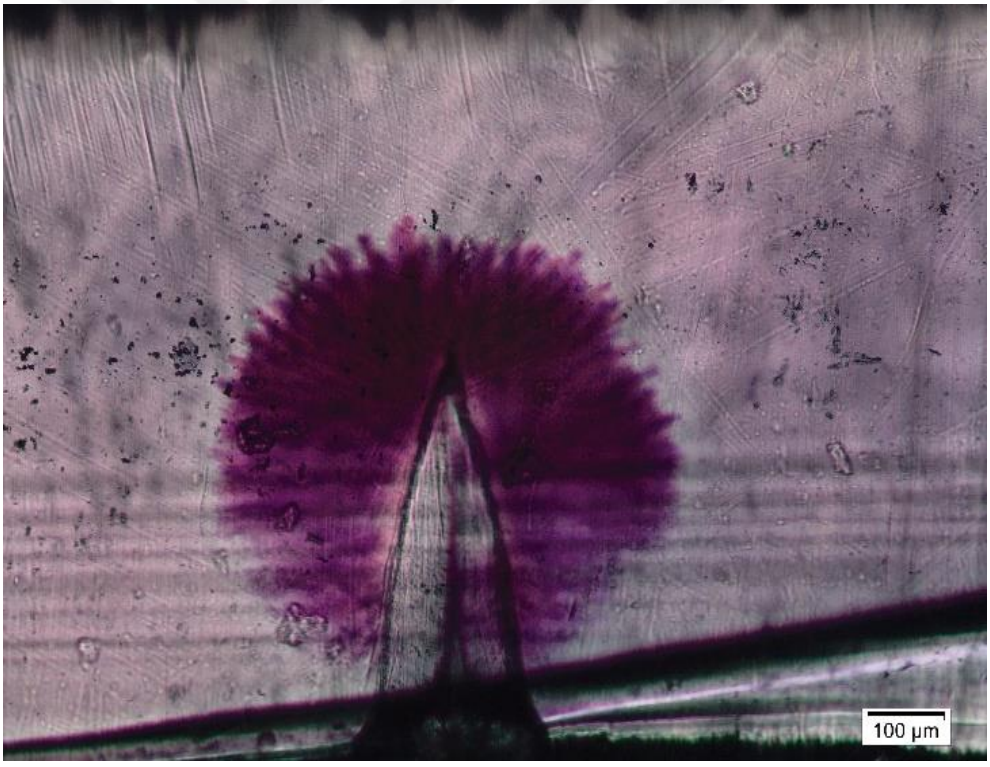
Şekil 2.9: Papyon sulu ağaçlanma örnekleri (Qureshi ve diğ., 2008; Al-Arainy ve diğ., 2004).

2.3.1.2. Yelpaze sulu ağaçlanma

Yelpaze sulu ağaçlanma, yalıtım malzemesi sınırlarından yalıtkanın diğer tarafına, ağırlıklı olarak elektrik alanı yönünde büyüyen ağaçlanma olarak tanımlanabilir. Çoğu durumda yelpaze su ağacının başlangıcının menşeini bulmak zordur. Bununla birlikte bazen kablo yalıtkanında mekanik hasarlar oluşabilmektedir, örneğin yalıtkanın çizilmesi ağaçlanmayı

başlatabilmektedir. Yelpaze sulu ağaçlanmanın oluşmasının ve başlamasının diğer bir nedeni de yarıiletken ekranın yalıtkan ile temas ettiği yerdeki düzensizlik olabilmektedir (Steennis ve Kreuger, 1990). Yelpaze sulu ağaçlanma servis yaşlanma koşulları altında papyon sulu ağaçlanmaya kıyasla daha tehlikelidir. Şekil 2.10'da laboratuvar ortamında büyütülmüş yelpaze su ağacının metilen mavisi ile boyandıktan sonra optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.

Yelpaze sulu ağaçlanma ile ilgili literatürdeki çalışmaları laboratuvar ortamında hızlandırılmış deneyler ve işletmedeki kablolardan alınan numunelerden olmak üzere ikiye ayırabilir. Papyon sulu ağaçlanmaya kıyasla yelpaze sulu ağaçlanma başlığı altında ağaçlanmayı etkileyen faktörlerle ilgili olarak çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar ile ilgili bilgiler sulu ağaçlanmanın büyüme sürecini ve oluşumunu etkileyen faktörler bölümünde detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 2.10: Yelpaze su ağacının metilen mavisi ile boyandıktan sonra optik mikroskop görüntüsü.

2.3.2. Karakteristik Özellikleri

Yelpaze sulu ağaçlanmanın karakteristik özellikleri başlığı altında dielektrik özelliklerini verirken "yelpaze ağaç" ve "yelpaze ağaç yolu" bilinmesi gereken tanımlardır. Yelpaze ağaç, boyama işleminden sonra ağacın gözlemlenebileceği toplam bölgeyi (µm-mm ölçeği) temsil etmektedir. Yelpaze ağaç yolu yalnızca aşınmış-bozulmaya uğramış PE (nm ölçeği) ile ilgilidir. Yelpaze ağacı ve yelpaze ağaç yolları yalıtkan malzeme olarak dikkate alınabilir. Yelpaze su ağacının ayrı yollarının dielektrik özellikleri için doğru değer verilemez. Bununla birlikte, yaklaşık 10'dan küçük bir bağıl dielektrik sabiti ve yaklaşık 1.3×10^{-8} $(\Omega m)^{-1}$'den daha düşük bir iletkenlik için bir yolun ucunda makul gerilim artışı beklenebilir. Dielektrik özelliklerin bu şekilde olması, bu bölgelerdeki suyun moleküler olarak dağılmış olduğu varsayımıyla uyumludur (Steennis, 1989; Steennis ve Kreuger, 1990).

Ross ve diğ. (1989), normal yaşlanma koşulları altında tam ölçekli bir XLPE yalıtımlı kabloda büyütülmüş bir yelpaze su ağacının dielektrik özelliklerini ölçmüştür. Ölçümler yapılmadan önce ağaçlar suyla doyurulmuştur. Yelpaze ağacın, bağıl dielektrik sabiti 2.26 ve 50 Hz'de kayıp faktörünün $\approx20\times10^{-4}$ değerlerinde olduğu bulunmuştur. Yelpaze su ağacının yalıtım malzemesi olduğunu gösteren başka gözlemler de bulunmaktadır (Steennis ve Kreuger, 1990).

Yelpaze ağaç yolu iletken olsaydı, yalıtkanın diğer tarafına doğru büyüyen böyle bir yol, termal arızaya neden olabilecek veya bir elektrik ağacı başlatabilecek ve ardından delinmeye sebebiyet verebilecekti. Bununla birlikte, çoğu durumda bu tür uzun yelpaze su ağaçlarının 2 kV/mm seviyesindeki elektrik alan değerlerinde delinmeye neden olmadığı bulunmuştur (Steennis ve Kreuger, 1990).

2.3.3. Sulu Ağaçlanmanın Büyüme Sürecini ve Oluşumunu Etkileyen Faktörler

2.3.3.1. Polimer Morfolojisi

İşleme ve üretim, polimeri kimyasal ve fiziksel olarak değiştirebilmektedir. Örneğin, kirletici maddelerin eklenmesi, kusurların oluşması ve ayrıca ısıl işlem gibi süreçler kristallik, küreleşme boyutu ve sayısı gibi özelliklerde farklılıklara neden olabilmektedir. Yaşlanma geometrisinin etkisi, laboratuvar ortamında yaşlanan su ağaçlarının analizi açısından önemlidir. Benzer koşullar altında yaşlandırılan farklı kabloların karşılaştırılması bile, farklı sonuçlar doğurabilir (Lanca, 2002).

Li ve diğ. (2011), polimer morfolojisinin XLPE kablosunun sulu ağaçlanma davranışı üzerinde büyük etkisi olduğunu göstermişlerdir. Crine (1998), polimer morfolojisi, sulu ağaçlanmayı mekanik özelliklerinin modifikasyonlarıyla büyük ölçüde etkilediğine değinmiştir.

Raharimalala ve diğ. (1994), polimer morfolojisinin sulu ağaçlanmaya etkisini üzerinde su iğnesi bulunan laboratuvar numuneleri kullanarak incelemişlerdir. Altı farklı termoplastik malzeme için su ağaçlarının büyüme kinetikleri ölçülmüş, her bir su ağacının su içeriği su ağacının opaklığından değerlendirilmiş ve su ağacının morfolojisi optik mikroskop ile incelenmiştir. Su ağacının kendi morfolojisinin, polimerin morfolojisinden kuvvetle etkilendiğini belirtmişlerdir. Filippini (1990), su ağaçlarının büyümesinin, mekanik özelliklerden ve malzemelerin morfolojisinden kuvvetle etkilendiğini belirtmiştir.

Steenis ve Kreuger (1990), erime indeksi, kristallik ve yoğunluk gibi morfolojik parametreler muhtemelen yelpaze su ağaçlarının büyümesini etkilemeyeceği kanaatine varmışlardır. Bellet ve diğ. (1987), polimerlerin mikro yapısının ve morfolojisinin sulu ağaçlanma arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Su ağaçlarının büyümesinin çeşitli olaylarla değiştirilebileceğine ve polimer morfolojisinin su ağaçlarının yayılmasında önemli etkisinin olduğuna dikkat çekmişlerdir.

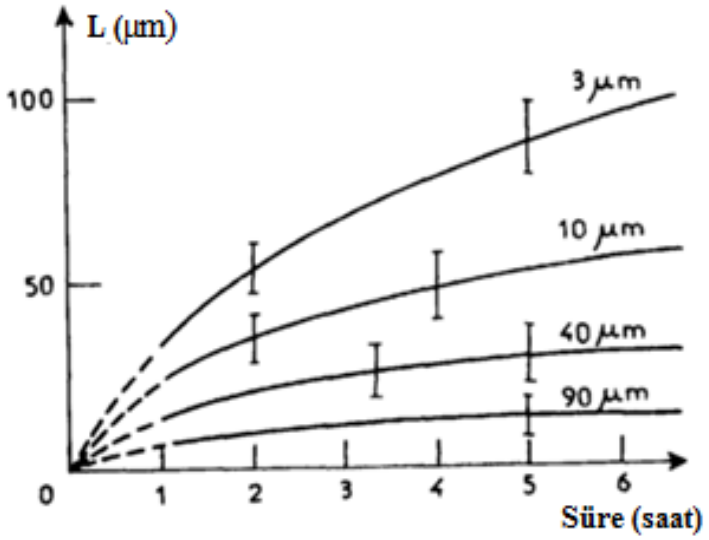
2.3.3.2. Elektrik Alan

Elektrik alan şiddeti, sulu ağaçlanmanın başlamasını ve büyümesini kuvvetle etkileyen faktörlerden biridir. Elektrik alan şiddetinin ağaçların sayısı ve uzunluğunu arttırdığı kesin olarak bilinmektedir (Steennis, 1989; Steennis ve Kreuger, 1990). Elektrik alanı, frekansa bağlı olarak, maksimuma erişene kadar ağaçlanma büyüme oranının artmasına neden olacaktır. Çok yüksek frekans değerleri için ise ağaçlanmanın büyümesinde azalmalar meydana gelebilecektir (Lanca, 2002). Gerilim değerinin büyümesi yelpaze su ağacı uzunluğunun artmasına neden olacaktır. Sulu ağaçlanmayı keşfeden Miyashita (1971) gerilim dalga şeklinin, ağaçlanmanın büyümesine etkisini incelemiştir. Sinüs ve kare dalgalar (1.5 kVp, 5 kHz) uygulamıştır. Uygulanan gerilim seviyesi, elektrotlar arası mesafe, gerilim dalga şekli, iğne eğrilik yarıçapı elektrik alanı değerini etkileyen faktörler olduğu için bu başlık altında ele alınmıştır.

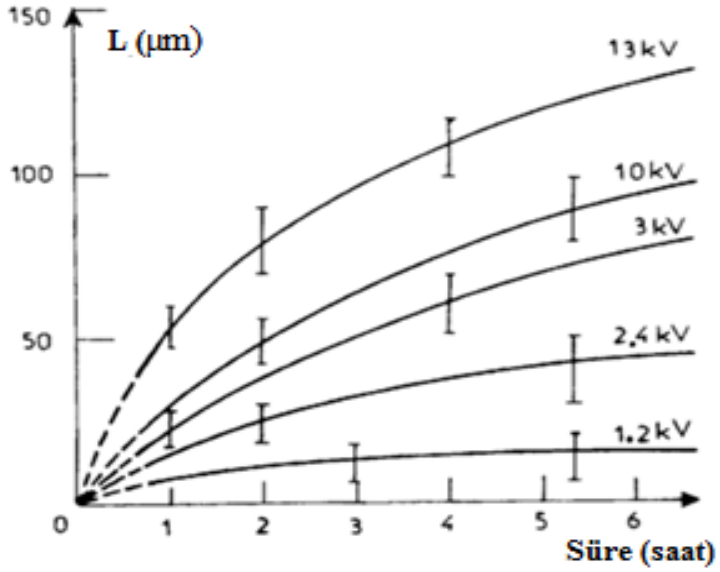
Sulu ağaçlanma ile yapılan çalışmalarda sulu ağaçlanmanın AC bir gerilim altında oluştuğunu altı çizilirken, Steennis (1989), çok yüksek DC gerilim altında oluşturup büyütülen ağaçların AC gerilim altında oluşturulan su ağaçlarından şekil olarak farklı olduklarını belirtmiştir.

Yüksek DC gerilim altında elde edilen ağaçlanma ile AC gerilim uygulanarak elde edilen ağaçlanma için belki de farklı başlama ve büyüme olaylarının olabileceğini belirtmiştir.

Filippini ve Meyer (1988), su iğnesi yöntemi ile sulu ağaçlanma deneyleri geçekleştirerek iğne ucunda oluşan elektrik alan şiddetinin etkisini incelemişlerdir. Su ağacı büyümesini sabit gerilim altında farklı uç eğrilik yarıçapları için ve sabit uç eğrilik yarıçapında farklı gerilimler için incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda uç eğrilik yarıçapının azalmasıyla su ağaçlanmasının yayılmasının arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 2.11'de gerilim ve frekans değerleri sabit tutulup farklı uç eğrilik yarıçaplarında oluşan su ağacı uzunluk grafiği verilmiştir. Şekil 2.12'de uç eğrilik yarıçapı ve frekans değerleri sabit tutulup farklı gerilimlerde oluşan su ağacı uzunluk grafiği verilmiştir.



Şekil 2.11: Farklı iğne uç eğrilik yarıçapı değerleri için su ağacı uzunluğunu başlangıçtaki büyüme kinetikleri (gerilim = 10 kVp, frekans = 0.5 kHz) (Filippini ve Meyer, 1988).



Şekil 2.12: Farklı gerilim değerleri için su ağaçlarının başlangıçtaki büyüme kinetikleri (iğne ucunun eğrilik yarıçapı = 10µm, frekans = 10kHz) (Filippini ve Meyer, 1988).

Su iğnesinin ucu ile karşı düzlem elektrot arasındaki uzaklık (d), uç eğrilik yarıçapı (r) ve uygulanan gerilim (U) elektrik alanın değerini değiştirecek parametrelerdir. Elektrik alan değeri de su ağaçlanmasının oluşmasında, büyümesinde ve yayılma hızında aktif bir rol oynamaktadır. Su iğnesinin ucu ile karşı düzlem elektrot arasındaki eksende elektrik alan Denklem (2.1)'de verilmiştir (Filippini ve Meyer, 1988).

$$E = \frac{2U}{rln(1 + \frac{4d}{r})} \tag{2.1}$$

Lokal bir olay olan su ağacı olayının oluşabilmesi ve büyümesi için elektrik alan olması gereklidir. Yerel alan $f[E(l,t)]$ Denklem (2.2) ve (2.3)'teki eşitliklerle ifade edilebilir (Dissado ve diğ., 1988).

$$\frac{dl}{dt} = f[E(l,t)] \tag{2.2}$$

Burada l ağaç uzunluğunu, $f[E(l,t)]$ yerel alan olan $E(l,t)$ 'nin fonksiyonunu ifade etmektedir.

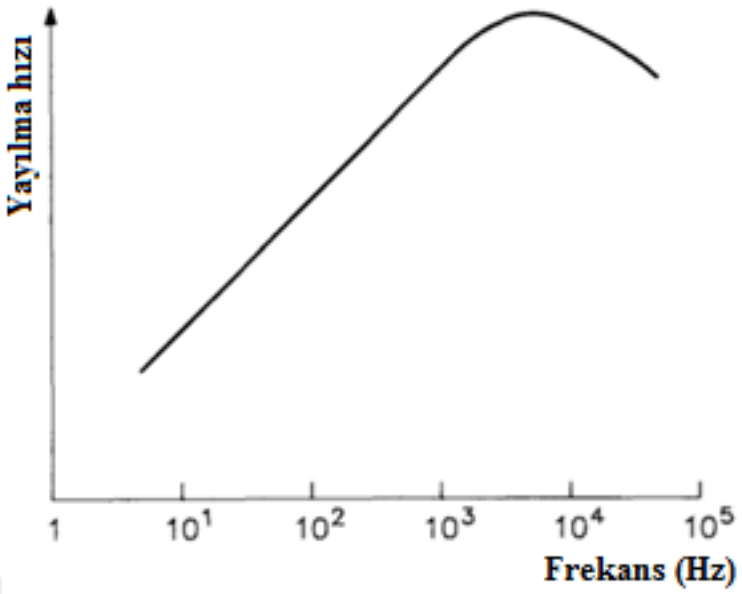
$$f[E(l,t)] = vE^2(l,t) \tag{2.3}$$

Denklem (2.3)'te verilen 'v' Ashcraft tarafından büyüme hızı olarak adlandırılan alan bağımsız bir faktördür. v sıcaklık, frekans, elektrolit konsantrasyonu ve diğer sulu ağaçlanmayı etkileyebilecek değişkenlere bağlı bir sabittir (Dissado ve diğ. 1988, Ashcraft 1977).

Karhan ve Uğur (2016), yaptıkları deneysel çalışmada, farklı elektrik alan şiddetlerinde sulu ağaçlanmadaki değişimi incelemişlerdir. Farklı değerlerdeki elektrik alanlarını, su iğnesi ile düzlem elektrot arası mesafeyi değiştirerek elde etmişlerdir. Deneylerde sulu ağaçlanmayı etkileyebilecek diğer parametreleri sabit tutmuşlardır.

2.3.3.3. Frekans

Uygulanan gerilimin frekansı, yelpaze sulu ağaçlanmanın büyüme hızı arasında bir bağlantı bulunmaktadır. Frekansın sulu ağaçlanmaya etkisini araştırmak üzere yapılan çalışmalar genellikle laboratuvar ortamında su iğnesi kullanılarak yapılan çalışmalardır. Yoshimura ve diğ. (1977), 5 saatlik kısa bir deney süresi için 200 Hz – 3 kHz skalasında frekans ile sulu ağaçlanma büyümesi arasında lineer bir bağıntı bulmuşlardır. Favrie ve diğ. (1980) ve Filippini ve diğ. (1982) daha uzun deneyler geçekleştirmiş ve en optimum yelpaze sulu ağaçlanma büyümesinin frekans aralığını 4 ve 8 kHz aralığında olduğunu göstermişlerdir. Şekil 2.13'te yelpaze sulu ağaçların yayılma hızı ile frekans arasındaki ilişkiyi veren grafik verilmiştir. Belli bir frekans seviyesinde sulu ağaçlanma yayılım oranının doğru bir şekilde tahmin edilmesi pek mümkün değildir (Steennis ve Kreuger, 1990).



Şekil 2.13: Yelpaze sulu ağaçlanma ile frekans arasındaki ilişki (Steennis ve Kreuger, 1990).

Crine ve Jow (2001), polietilende (PE) sulu ağaçlanmanın frekansa duyarlı olduğunun bilindiği ancak bu ampirik gözlemi açıklayan güvenilir bir analitik modelin henüz olmadığını belirtmişlerdir. Sulu ağaçlanma için daha yüksek frekans sınırını kesin olarak tanımlayabilmek için daha fazla çalışma olması gerektiğini belirtmişlerdir. Zhang ve diğ. (2016), gerilim frekansının sulu ağaçlanmayı başlatmaya olan etkisini incelemişlerdir. Sulu ağaçlanmayı başlatmasını ve yayılımını daha etkili bir şekilde kolaylaştırabildiğini gözlemlemişlerdir.

2.3.3.4. Sıcaklık

Sıcaklığın su ağacının büyümesine etkisi oldukça karmaşık olarak düşünülebilir. Sıcaklık seviyesine, sıcaklık eğilimine, sıcaklık yük modeline, su difüzyon katsayısına, yalıtkanın nem absorpsiyonuna ve diğer kablo bileşenlerine bağlı olduğu düşünülmektedir (Steennis ve Kreuger, 1990).

Yelpaze sulu ağaçlanma için sıcaklık faktörü ele alındığında çalışmalar, sabit sıcaklık ve döngüsel sıcaklık altında yapılan çalışmalar olmak üzere iki başlık altında toplanabilir. Bazı çalışmalarda, yelpaze su ağacının büyümesini, yalıtkan üzerinde bir sıcaklık eğilimi olmaksızın, sabit sıcaklık seviyelerinde tartışmaktadır. Deneylerin çoğu LDPE veya XLPE yalıtkanları üzerinde su banyolarında gerçekleştirilmiştir. Gerek sabit sıcaklık gerek döngüsel sıcaklık altında birçok çalışma bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda yalıtkanın sıcaklığının $\geq$50ºC

olduğu durumlarda yelpaze su ağaçlarının yoğunluğunun arttığı uzunluklarının ise azaldığı gözlemlenmiştir. 20ºC ile 50ºC arasındaki sıcaklıklarda çelişkili görüşler bulunmaktadır. İğnelerle gerçekleştirilen deneyler haricinde su ağaçlarının büyümesi için en uygun sıcaklık aralığı 30ºC ile 50ºC'dir (Steennis ve Kreuger, 1990).

Wang ve diğ. (2013), yaptıkları çalışmada LDPE ve XLPE malzemelerdeki sulu ağaçlanmaya sıcaklığın etkisini incelemişlerdir. İki numune üzerinde gerçekleştirdikleri deneylerde, sulu ağaçlanma başlatma hızlarının ilk önce azaldığını ve daha sonra sıcaklık arttıkça arttığını, sulu ağaçlanma başlatma hızlarının, 80°C'de maksimum noktaya ulaştığını belirtmişlerdir. Su ağacı uzunluğu ve genişliğindeki değişimler 60°C'nin altındaki bir sıcaklıkta önemsiz olduğunu bununla birlikte, su ağacı uzunluğu ve genişliği, sıcaklık 60°C'nin üstüne çıktığında aniden yükseldiğini gözlemlemişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda sulu ağaçlanmasının hızlanmasının başlıca nedenleri, mekanik özelliklerin düşmesi, nemin buharlaşması, mikrogözeneklerin genişlemesi ve kılcal genleşmenin yol açtığı bitişik mikrogözenek bağlantılar olduğunu belirtmişlerdir.

Al-Arainy ve diğ. (2004), farklı sıcaklık değerleri altında XLPE kablolardaki su ağaçlarını istatiksel olarak incelemişlerdir. Bulinski ve diğ. (1986), oda sıcaklığında ve döngüsel sıcaklık altında (20ºC'den 70ºC'ye) papyon ve yelpaze sulu ağaçlanmayı incelemişlerdir.

2.3.3.5. Nem

Diğer önemli bir faktör de nemdir. Farklı nem koşullarında hem yelpaze hem de papyon sulu ağaçlanma için deneysel çalışmalar bulunmaktadır. Sletbak ve Botne (1977) ve Yoshimitsu ve diğ. (1983) numuneyi çevreleyen hava neminin, sulu ağaçlanmayı etkilediğini göstermişlerdir. Sletbak ve Botne (1977), PE ve XLPE' de içerisinde nemin de olduğu sulu ağaçlanmaya etki eden birçok farklı faktörü deneysel olarak incelemişlerdir. 10 ila 15 kV/mm elektrik alanında ve 75°C'de, çoğu papyon su ağacının, bağıl nem oranının yaklaşık %70'i aştığı bölgelerde büyümekte olduğunu gözlemlemişlerdir.

Yoshimitsu ve diğ. (1983), nemli havada sulu ağaçlanmayla ilgili olarak verdiği temel sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

1) Su ağaçları nemli havada oluşur ve büyür.

2) 50 ºC ve %65'lik bağıl neme sahip hava su ağacı büyümesini koruyabilir.

3) Su varlığındaki sulu ağaçlanmaya benzer bir şekilde sulu ağaçlanma birkaç kV/mm'lik düşük elektrik alan değeriyle başlayabilir.

4) Su varlığındaki sulu ağaçlanmanın aksine sıcaklık arttıkça nemli havada su ağaçlarının sayısı azalır.

5) Elektriksel gerilime bağlı kılcal yoğunlaşma, nemli havadaki su ağaçlarının oluşma olayı ile bağlantılı olarak önerilir.

Her ikisi de %65-70 veya daha düşük bir nem oranında sulu ağaçlanmanın nadir olduğunu gözlemlemişlerdir. Sletbak ve Botne (1977), bağıl nem ile papyon su ağaçlarının; Yoshimitsu ve diğ. (1983), bağıl nem ile yelpaze su ağaçlarının arasındaki ilişkiyi deneysel olarak incelemişlerdir.

2.3.3.6. Mekanik Gerilme

Bir yalıtkana mekanik bir gerilim uygulanabilir. Çekilen (ekstrüze edilen) eriyikten soğutulduktan sonra yalıtkanda da mekanik bir gerilme bulunabilir (Steennis ve Kreuger, 1990). Tanaka ve Fukuda (1974), LDPE malzeme için dahili mekanik gerilmeler ile sulu ağaçlanma arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Papyon su ağaçları ile yelpaze su ağaçlarının yüksek mekanik gerilmeler altında yoğunlaştığını tespit etmişlerdir. Yalıtkanda 1 ila 8 MPa arasında mekanik gerilmeler gözlemlemişlerdir. Bu değerler, üretim sürecinden veya kablo tesisatından kaynaklı yıkıcı olmayan değerlerdir (Steennis ve Kreuger, 1990).

Tu ve Kao (1983), su iğnesi olan bir PE numunesini basınçlı bir atmosfere maruz bıraktılar. Numunenin her tarafındaki basınç, 0.1 - 3 MPa aralığında değiştirildi. 15 saatlik kısa bir deney süresi sonunda sulu ağaçlanmanın başlamasının hızlı olduğunu fakat basınç arttıkça yelpaze su ağaçlarının büyümesinin yavaşladığını gözlemlemişlerdir.

Hellesø ve diğ. (2002), XLPE kablolarda statik ve dinamik mekanik gerilmeler altında su ağacı başlamasını ve büyümesini incelemişlerdir. Dinamik ve mekanik yükün sulu ağaçlanmaya etkisini araştırmışlardır. Elektriksel ve dinamik mekanik yaşlanmaya yönelik yeni bir deney cihazı tasarlamış ve yapmışlardır. Sulu ağaçlanma, statik mekanik yüke tabi tutulan bir referansla karşılaştırılmışlardır. Önemli ölçüde yüksek ağaç yoğunlukları, statik referans

kablosuna kıyasla en yüksek dinamik mekanik zorlanmanın olduğu bölgelerde olduğunu belirtmişlerdir.

2.3.3.7. İyonik İçerik

Su mükemmel bir şekilde deiyonize edilmişse deney numunelerinde sulu ağaçlanma gözlemlenmez. Bu sebeple su ağacı oluşturabilmek için çözeltide iyon mevcudiyeti gerekli bir durumdur. Farklı çözeltilerde, farklı sonuçlar ve değerler gözlemlenecektir. Bu başlık altında, çözelti içerisindeki tuzların çeşidi, tuzların konsantrasyonu, asidite (pH), çözünürlük, elektrot malzeme cinsi gibi faktörlerin üzerinde durulmalıdır (Steennis, 1989; Steennis ve Kreuger, 1990). İyonik konsantrasyonun artışı, ağaçlanmada daha yüksek bir büyüme hızına yol açmaktadır.

Çoğu araştırmacı, suda çözünmüş bazı tuz iyonlarının konsantrasyonu ile bağlantılı olarak yelpaze su ağaçların büyümesi üzerinde çalışmışlardır. Çözelti molarite ve iletkenliklerine bağlı olarak yapılan çalışmalarda genel olarak NaCl ve $CuSO_4$ çözeltileri kullanılmıştır. Yüksek tuz konsantrasyonlarının yelpaze su ağacı yayılım hızını arttırdığı gözlemlenmiştir (Steennis ve Kreuger, 1990).

Bamji ve diğ. (1984), su iğnelerinin oluşturulduğu XLPE numunelerinde suda çözünmüş çeşitli tuzların yelpaze su ağacı uzunluğuna etkisini incelemişlerdir. En büyük ağaç büyümesi $CuSO_4$, daha sonra NaCl ve son olarak $CaCl_2$ çözeltilerinde olduğu verilmiştir. Deney süresi 90 saat ve frekans 1 kHz belirlenmiştir. Damıtık suda ağaçlanma gözlememişlerdir.

Ross ve diğ. (1990), $CuSO_4$, NaCl, $CuCl_2$ ve Na_2SO_4 çözeltileriyle yelpaze su ağacı büyütmüşlerdir. En uzun sulu ağaçlanmayı $CuSO_4$ için elde ederken NaCl için 10 kat daha küçük ağaçlar elde etmişlerdir. Deneylerde elektrot malzemesi olarak paslanmaz çelik kullanmışlardır.

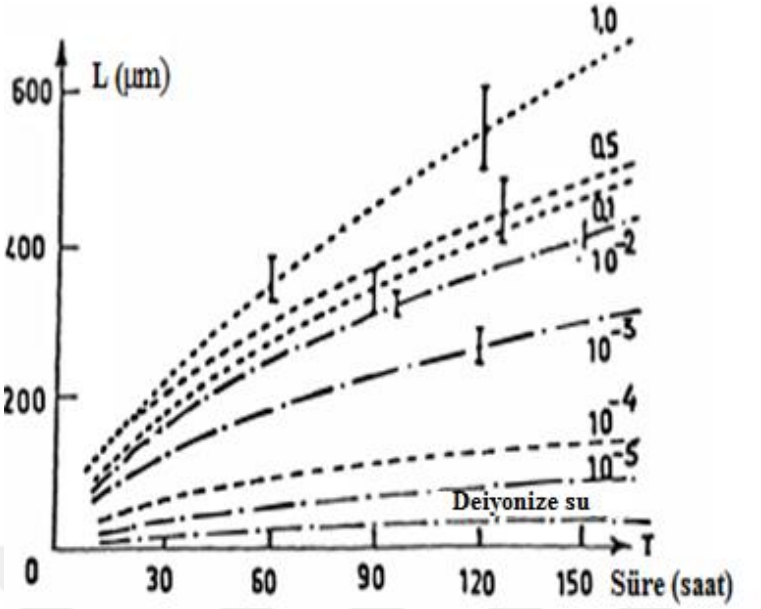
Al-Arainy ve diğ. (2004), deiyonize su ve NaCl, $AgNO_3$ çözeltilerinde farklı numunelerle farklı sıcaklık değerleri altında oluşan su ağacı uzunluk değerlerine yer vermişlerdir. Malik ve diğ. (2006), yaptıkları çalışmada NaCl, $CuSO_4$ ve $Cu(NO_3)_2$ sulu iyonik çözeltilerinde farklı sıcaklık değerleri altında XLPE yalıtkanlı kablolarda oluşan sulu ağaçlanmanın uzunluk değerlerine yer vermişlerdir.

Boonraksa and Marungsri (2014), yaptıkları çalışmada sulu ağaçlanmanın büyümesinde iyonik çözeltilerin rolünü incelemişlerdir. Bu çalışmalarında, Na_2SO_4 ve $CuSO_4$ çözeltilerinin sulu ağaçlanmanın büyümesine yönelik daha güçlü eğilim sergilediklerini göstermişlerdir.

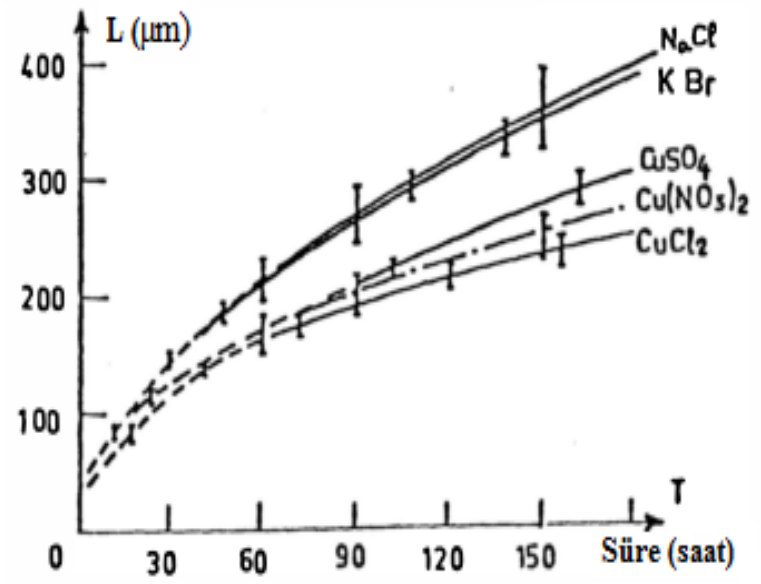
Karhan ve diğ. (2017), farklı molarite ve iletkenlikteki NaCl çözeltilerinde oluşan yelpaze su ağacı uzunluk, genişlik ve geometrilerini incelemişlerdir. İyonik çözelti aynı olsa dahi molaritenin artmasının sulu ağaçlanmanın büyümesinde etkin bir rol oynadığını gözlemlemişlerdir.

Elektrot malzeme türü de bu başlık altında değerlendirilebilir. Elektrot malzemesi ilgili yapılan çalışmalarda, Pt ve Cu elektrotların Al, Fe ve Pb elektrotlara nispeten çözelti içerisinde daha düşük oksidasyona maruz kalmaları sebebiyle büyük olasılıkla daha fazla ağaçlanma meydana gelecektir. pH değeri arttığında yelpaze sulu ağaçlanmanın büyüme hızı da artar (Lanca, 2002). Bu çalışmada, elektrot malzemesi Al seçilmiştir.

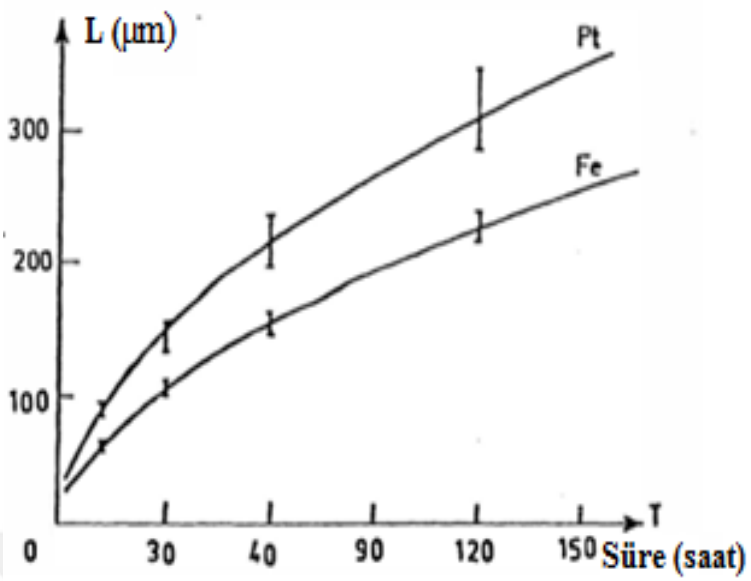
Koo ve Filippini (1983), yaptıkları çalışmada, farklı konsantrasyondaki tuzlu su çözeltilerinde, farklı iyonik çözeltilerde (NaCl, KBr, $CuSO_4$, $Cu(NO_3)_2$, $CuCl_2$) ve farklı elektrot malzemelerinde (Pt, Fe) zamanın bir fonksiyonu olarak su ağacı yayılımını incelemişlerdir. Şekil 2.14'te farklı sodyum klorür konsantrasyonları için ağaç uzunlukları zamana bağlı olarak gösterilmiştir. Şekil 2.15'te farklı tuzlar için ağaç uzunlukları zamana bağlı olarak gösterilmiştir. Şekil 2.16'da Pt ve Fe elektrot malzemeleri için ağaç uzunlukları zamana bağlı olarak değişimleri verilmiştir.



Şekil 2.14: Deiyonize suda çözünmüş NaCl konsantrasyonunun su ağacı uzunluğuna etkisi (Konsantrasyonlar mole/L olarak verilmiştir) (U = 20 kVpp, f = 2 kHz, r = 5 µm) (Koo ve Filippini, 1983).



Şekil 2.15: Tuzların su ağacı uzunluğuna etkisi (U = 20 kVpp, f = 2 kHz, r = 10 µm, C = 0.5 mole/L) (Koo ve Filippini, 1983).



Şekil 2.16: Elektrot malzemesinin su ağacı uzunluğuna etkisi (U = 20 kVpp, f = 2 kHz, r = 10 µm, C = 0.5 mole/L) (Koo ve Filippini, 1983).

2.3.3.8. Katkı Maddeleri, Kirletici Maddeler ve Ağaçlanma Geciktiriciler

XLPE malzemede, LDPE'ye kıyasla daha az sulu ağaçlanma görülmektedir. Bu nedenle kablo yalıtkanında XLPE, LDPE'nin yerini almıştır. Bu daha az sulu ağaçlanmanın görülmesinin nedeni morfolojiyle ilişkili olmasının aksine, bir çapraz bağlama yan ürününün (asetofenon) varlığı ile ilgilidir. Bu anlamda katkı maddeleri, kirletici maddeler ve ağaçlanma geciktiriciler sulu ağaçlanmayı etkilemektedir. Bir başka örnek ise mekanik mukavemeti ve esnekliği azaltan, ancak bazen su ağaçlarını büyütebilen oksidasyonu önlemek için üretim sırasında eklenen oksitlenmeyi giderici maddelerdir (antioksidanlar) (Lanca, 2002).

Sulu ağaçlanmayı geciktirmek için polimer değiştirilebilir veya kimyasal katkı maddeleri eklenebilir veya her iki durum da olabilir (Steennis ve Kreuger, 1990). Polimer modifikasyonu, elektromekanik teori ile açıklanırken kimyasal katkı madde ekleme ise elektrokimyasal model ile açıklanabilmektedir. Her iki yaklaşımda bazı başarılar elde edilmiş olup, sulu ağaçlanmanın doğasının karmaşık yapısını doğrulamaktadır (Lanca, 2002).

Kabloların üretim safhasında, ağaçlanma geciktirici katkı maddeleri yalıtkana eklenir. Kullanılan katkı maddeleri asetofenon ve antioksidanlardır (Lanca 2002). Shaw ve Shaw (1984), katkı maddelerinin kimyasal tepkime, kanal tıkanıklığı, boşlukların doldurulması ve

boşluk birleştirme ile müdahale gibi birçok rolü olduğuna değinmişlerdir. Şekil 2.17'de Caronia ve diğ. (2006) yaptıkları çalışmadan alınan XLPE ve TR-XLPE malzemeler için su ağacı büyüme örüntülerine yer verilmiştir.



Şekil 2.17: XLPE ve TR-XLPE malzemeler için su ağacı büyüme örüntüleri (Caronia ve diğ., 2006).

Ciuprina ve diğ. (2010), üç farklı LDPE malzemeyle yaptıkları çalışmada ilk numunede hiçbir katkı maddesi bulunmamakta, diğer iki numunede ise farklı su ağacı geciktirici katkı maddeleri bulunmaktadır. Bu çalışma sonucunda polietilene eklenen farklı katkıların, katkı maddesinin doğasına göre sulu ağaçlanmayı başlatmayı farklı şekillerde etkilediğini varsaydıklarını belirtmişlerdir.

Hui ve diğ. (2013), XLPE/silika nanokompozitlerin nemli ortamlarda dielektrik performansları incelemişlerdir. XLPE/silika nanokompozitlerinde su ağacının büyümesinin büyük ölçüde azaldığını gözlemlemişlerdir. Nemli ortamlarda XLPE/silika nanokompozitlerin dielektrik performansının iki temel özelliğini açıklamışlardır. Birincisi, işlevsizleştirilmiş veya kısmen işlevselleştirilmiş silika parçacıklarının eklenmesi emilen nem miktarını artırabildiğini; ikincisi, XLPE/silika nanokompozitlerinde sulu ağaçlanma, XLPE ile karşılaştırıldığında sınırlandırıldığını belirtmişlerdir.

2.3.4. Sulu Ağaçlanmanın Büyüme Sürecindeki Olası Olaylar

Sulu ağaçlanmanın varlığından haberdar olunduktan sonra birçok hipotez ortaya atılmıştır. Günümüzde dahi sulu ağaçlanmadaki olası olaylar ilgili olarak tartışmalar devam etmektedir. Bazıları farklı yaşlanma koşulları kaynaklı olabildiği gibi bazıları da farklı görüş veya deneysel yaklaşımlardan kaynaklanabilmektedir (Ross, 1998).

Nunes ve Shaw (1980), Dissado ve diğ. (1983), Shaw ve Shaw (1984), Steennis (1989), Steennis ve Kreuger (1990), Patsch (1992), Crine (1998), Patsch ve Jung (1999) ve Lanca (2002) yaptıkları çalışmalarda bu olası olayları ele almışlardır.

Steennis ve Kreuger (1990), yaptıkları derleme makalede sulu ağaçlanmanın büyümesindeki olası olayları aşağıda belirtilen yedi başlık altında ele almıştır.

1. Osmoz
2. Kapiler hareket
3. Coulomb kuvvetleri
4. Dielektroforez
5. Termal bozulma
6. Kısmi boşalmalar
7. Elektrokimyasal bozulma

Osmoz ve kapiler hareket, elektriksel gerilim ile ilgili olmadığından su ağacının büyümesine neden olamayacakları düşünülmektedir. Bununla birlikte, her iki süreç, sulu ağaçlanmanın başlatılması sırasında veya bir polarize kanala suyun itilmesinde ikincil bir rol oynayabileceği düşünülmektedir (Steennis, 1989; Steennis ve Kreuger, 1990).

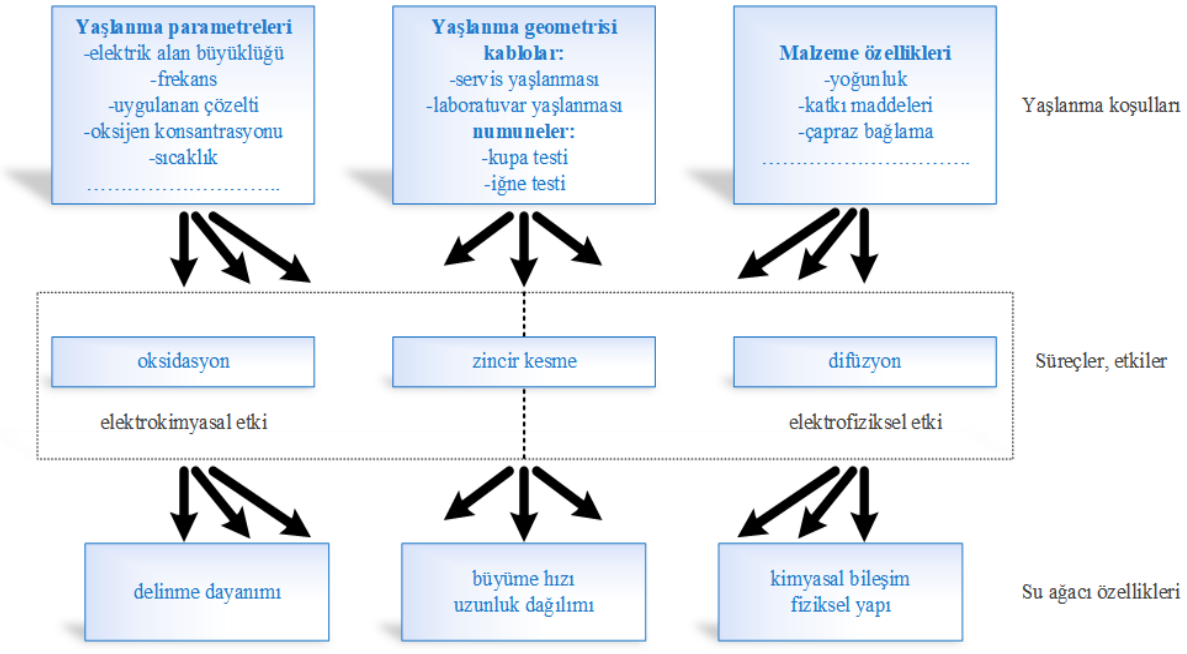
Kısmi boşalmalar, makul yaşlanma koşulları altında yelpaze su ağacının büyümesi sırasında asla gözlemlenememiş ve bu nedenle su ağacının büyümesinin kaynağı olarak ilk sırada kabul edilmemiştir. Bununla birlikte, bu tür boşalmalar söz konusu ise, seviye tespit edilebilirlik seviyesinin altındadır (Steennis, 1989; Steennis ve Kreuger, 1990).

Bir su ağacının iletken bir malzemeyi temsil ettiği varsayıldığında, Coulomb kuvvetleriyle bozulma ve termal bozulma gibi bozulmanın çeşitli temel mekanizmaları makul olduğu düşünülmektedir. Dielektroforezin sulu ağaçlanmadaki rolü hakkında farklı görüşler

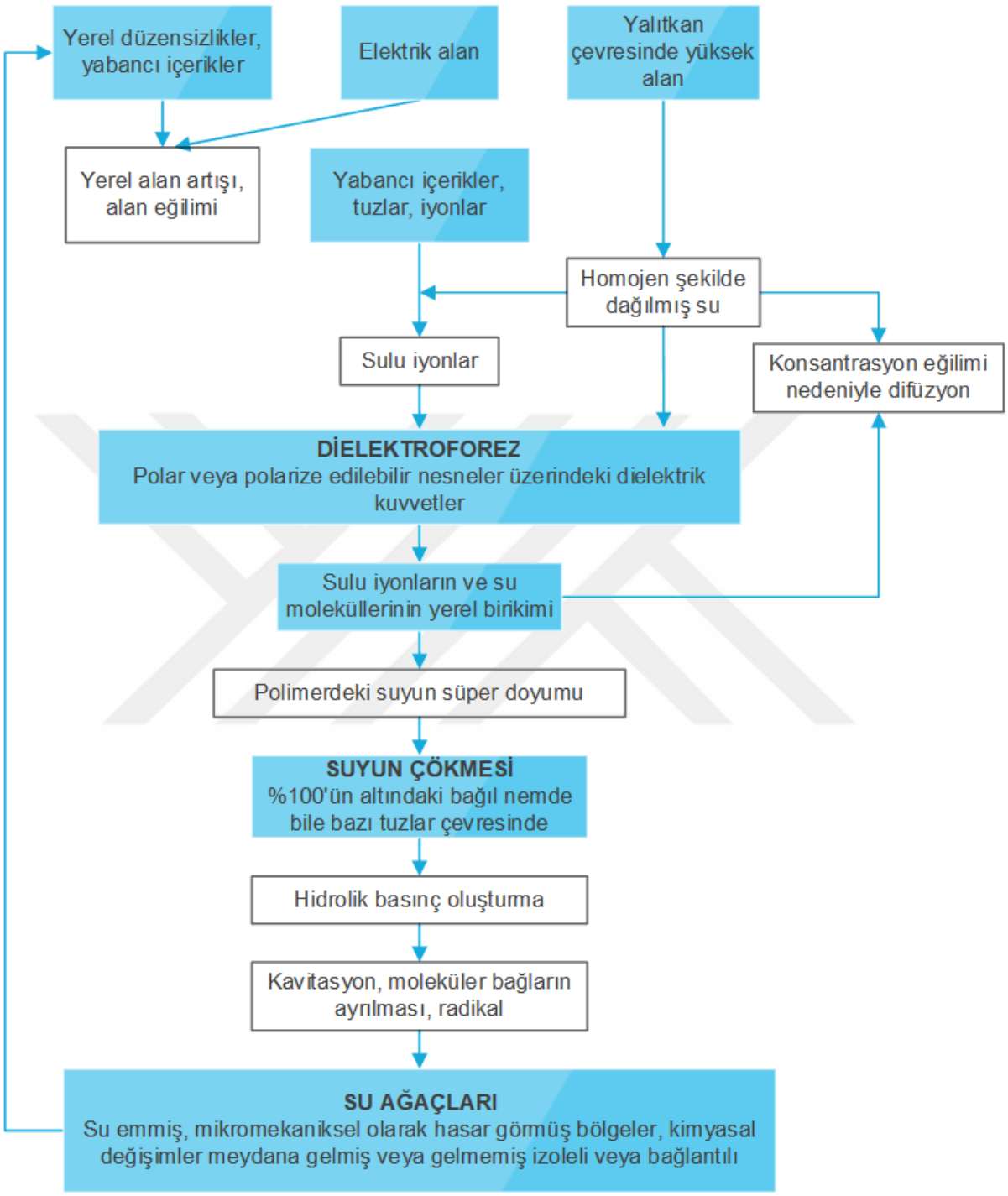
bulunmaktadır. Her durumda, dielektroforez, su buharının bir yelpaze ağacın ucuna taşınmasında yardımcı olabileceği düşünülmektedir (Steennis, 1989; Steennis ve Kreuger, 1990).

Öte yandan, bir yelpaze su ağacının iletken bir malzeme değil de yalıtkan malzeme olduğu varsayıldığında ve kablolarının gerçek kullanımına uygun yaşlandırma parametreleri seçildiğinde, bahsi geçen olayların çoğunun olmasının ihtimal dahilinde olmadığına değinilmiştir. Bununla birlikte, yazarlar bu varsayımlar altında, elektrokimyasal bozulmanın önemli bir olay olduğunu belirtmişlerdir (Steennis, 1989; Steennis ve Kreuger, 1990).

Ross (1998), sulu ağaçlanmanın başlama ve yayılma olayları adlı çalışmasında su ağacı tanımına, başlangıç ve yayılım olaylarına ilişkin özellikleri ele almıştır. Ele alınan yayılım olaylarını, elektromekanik kuvvetler, hidrofilik türlerin difüzyonu ve iki tip oksidasyon mekanizmasını içerdiğine değinmiştir. Süreçler ve yaşlanma koşulları arasındaki korelasyonlara da dikkat çekmektedir (Ross 1998). Şekil 2.18'de yaşlanma koşulları, süreçler & etkiler ve su ağacı özellikleri arasındaki ilişki şematize edilerek gösterilmiştir. Şekil 2.19'da sulu ağaçlanmanın elektrofiziksel yapısının akış şeması verilmiştir.



Şekil 2.18: Yaşlanma koşulları, süreçler & etkiler ve su ağacı özellikleri (Ross, 1998).



Şekil 2.19: Su ağacı oluşumu ve büyümesinin elektrofiziksel yapısı (Patsch ve Jung, 1999).

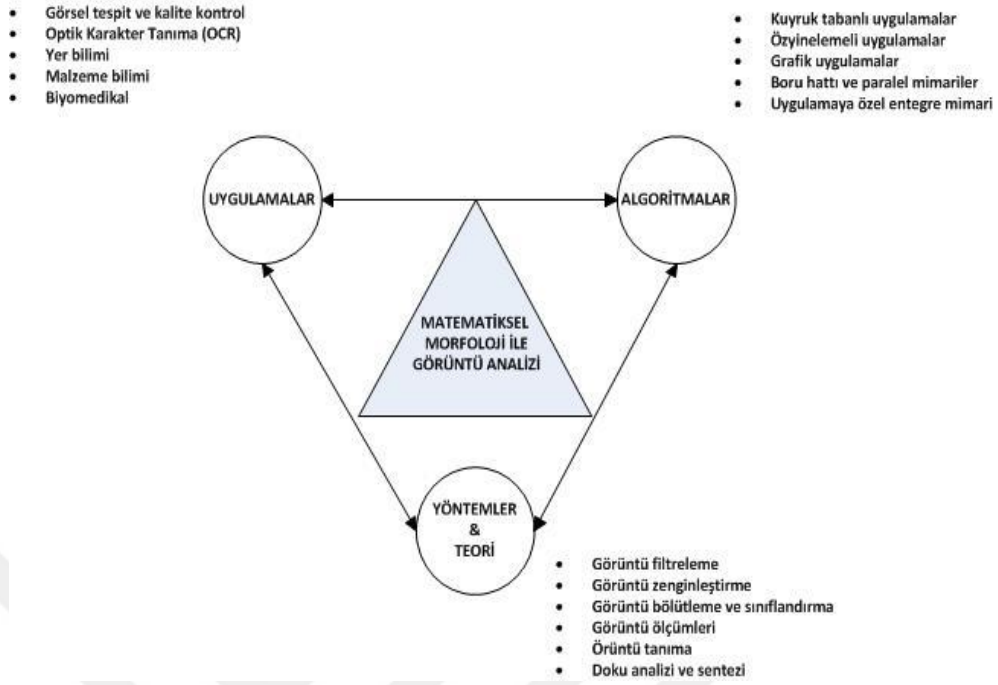
2.4. YELPAZE SULU AĞAÇLANMA İÇİN SAYISAL GÖRÜNTÜ İŞLEME

2.4.1. Matematiksel Morfoloji ve Morfolojik Görüntü İşleme

Morfoloji (biçim bilimi), en genel tanımıyla biyolojide canlıların şekillerini ve yapılarını inceleyen bir daldır. Temel küme işlemlerine dayanan matematiksel morfoloji görüntü içerisindeki sınır, iskelet ve dışbükey zarf gibi bölgesel yapıların tanımlanmasında ve temsil edilmesinde görüntü bileşenlerini çıkarmak için kullanılabilecek teknikleri nitelemektedir. Görüntü işlemede genellikle, morfolojik filtreleme, inceltme (thinning), budama (pruning) gibi ön veya son işlem olarak da sıkça kullanılırlar (Gonzales ve diğ., 2004).

Matematiksel morfoloji kümeler teorisine dayanan bir yaklaşımdır. Görüntünün şekilsel yapısı ile ilgilenmektedir. Bu yaklaşımın temeli ilk olarak Georges Matheron ve Jean Serra tarafından atılmıştır. Morfolojik görüntü işlemede, aşınma (erosion) ve genleşme (dilation) işlemleri olmak üzere iki temel morfolojik işlem bulunmaktadır. Morfolojik algoritmaların çoğu, bu temel iki morfolojik işleme ve/veya bunların kombinasyonlarından oluşan diğer morfolojik işlemlere dayanmaktadır (Gonzales ve diğ., 2004; Karhan ve diğ., 2011; Karhan, 2012; Özşen, 2002).

Sayısal işaretler için aşınma ve genleşme işlemi, sırasıyla Minkowski küme çıkarma işlemi (kümeler cebirinde kesişim işlemi) ve Minkowski küme toplama işlemi (kümeler cebirinde birleşim işlemi) olarak tanımlanır. Bu kümeler teorisine dayalı temel morfolojik işlemler Serra tarafından ikili olmayan işaretlere de uygulanmıştır (Serra, 1982). İlk başta ikili görüntüler için kullanılan morfolojik işlemler gri seviyeli görüntüler içinde kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 2.20'de matematiksel morfolojinin gelişimi, uygulamalar, teori & yöntemler ve algoritmalar arasındaki karşılıklı etkileşimleri ile gösterilmiştir.



Şekil 2.20: Matematiksel morfolojinin gelişimi, uygulamalar, teori & yöntemler ve algoritmalar arasındaki karşılıklı etkileşimleri (Soille, 2004).

2.4.1.1. Genleşme (*Dilation*) *İşlemi*

İkili görüntü içerisinde bulunan nesneleri büyütmeyi veya kalınlaştırmayı sağlayan temel bir morfolojik işlemdir. Genleşme işlemindeki kalınlaşmanın boyutu ve şekli yapısal eleman tarafından kontrol edilir. Genleşme işlemi sonrası görüntüde köşe noktalarının yumuşaması, görüntü içerisindeki delikli ve boş bölgelerin doldurulması gibi durumlar gözlemlenebilir (Gonzales ve diğ., 2004; Özşen, 2002; Karhan ve diğ., 2011).

Z^2 içindeki A ve B kümeleri için A'nın B ile genleşmesi $A \oplus B$ ile gösterilmiş Denklem (2.4) ve (2.5) ile ifade edilmiştir.

$$A \oplus B = \left\{ z \middle| \left(\hat{B}\right)_z \cap A \neq \emptyset \right\} \tag{2.4}$$

$$A \oplus B = \left\{ z \middle| \left[\left(\hat{B}\right)_z \cap A \right] \subseteq A \right\} \tag{2.5}$$

2.4.1.2. Aşınma (*Erosion*) *İşlemi*

Aşınma işlemi ikili görüntü içerisindeki nesneleri küçülten ya da incelten temel morfolojik işlemdir. Aşınma işlemindeki incelmenin boyutu ve şekli yapısal eleman tarafından kontrol edilir. Aşınma, görüntüdeki yapısal elemandan daha küçük bölgeleri elemine etmesinden dolayı morfolojik bir süzgeç olarak da düşünülebilir. Aşınma işlemi tam anlamıyla da olmasa bir anlamda genleşmenin tersi gibi düşünülebilir. Görüntü içerisindeki nesneler ufalır, delikli bölgeler varsa genişler, birbirlerine bağlı nesneler ayrılma eğilimi gösterebilir (Gonzales ve diğ., 2004; Özşen, 2002; Karhan ve diğ., 2011).

Z^2 içindeki A ve B kümeleri için A'nın B ile aşındırılması $A \ominus B$ile gösterilmiş Denklem (2.6) ve (2.7) ile ifade edilmiştir.

$$A \ominus B = \{z|(B)_z \subseteq A\} \tag{2.6}$$

$$A \ominus B = \{z|(B)_z \cap A^c = \emptyset\} \tag{2.7}$$

Burada A^c, *A'*nın tümleyenini ve $\emptyset$ *ise* boş kümeyi göstermektedir (Gonzales ve diğ., 2004).

2.4.1.3. Açma (*Opening*) *İşlemi*

Açma ve kapama işlemleri temel morfolojik işlemler olan aşınma ve genleşme işlemlerinin kombinasyonu olan işlemlerdir. Aşınma işleminin hemen ardından genleşme işlemi uygulanması sonucu açma işlemi elde edilir. Amaca yönelik olarak görüntü içerisindeki nesneler ve nesneler arasındaki boşluklar yapısal elemanın büyüklüğüne ve geometrisine göre temizlenir. Görüntü üzerinde kalan nesneler orijinal görüntüdeki şekillerinden biraz daha küçük hale gelir. Açma işlemi ile birbirine yakın iki nesne görüntüde fazla değişime sebebiyet vermeden ayrılmış olurlar (Özşen, 2002; Topaloğlu ve Gangal., 2006; Karhan ve diğ., 2011; Karhan, 2012).

A'nın B ile açılması işlemi $A \circ B$ ile gösterilmiş ve Denklem (2.8) ile ifade edilmiştir.

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \tag{2.8}$$

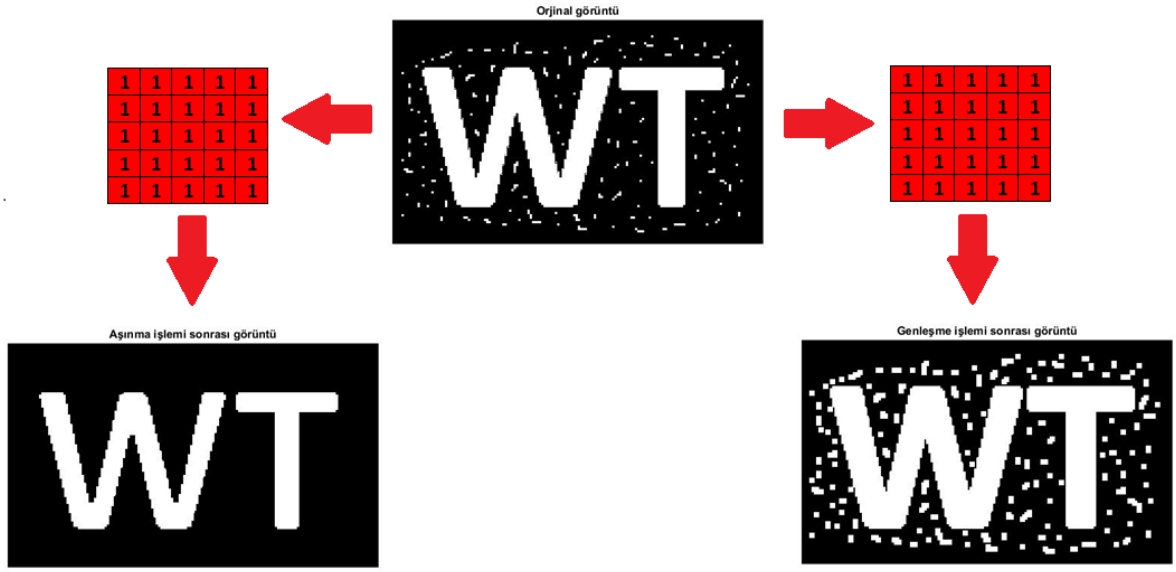
2.4.1.4. Kapama (Closing) İşlemi

Görüntü üzerinde genleşme işleminin hemen ardından aşınma işleminin uygulanması sonucu kapama işlemi elde edilir. Dolayısıyla görüntü içerisinde birbirine yakın konumda bulunan iki nesne görüntüde fazla değişiklik yapılmadan birbirine bağlanmış olur veya birbirine bağlanma eğilimine girer. Kapama işlemi uygulanmış görüntü içerisindeki noktalar birbirlerini kapatırlar, görüntüdeki ana hatlar daha da dolgun görüntü sergilerler. Kapama işleminde de birbirine yakın olan noktalar arasındaki boşluklar dolar ve noktalar birleşir. Görüntü üzerinde kalan nesneler, orijinal görüntüdeki şekillerine benzer bir hale dönüşürler (Özşen 2002; Topaloğlu ve Gangal, 2006; Karhan ve diğ., 2011; Karhan, 2012).

A'nın B ile kapanması işlemi $A \bullet B$ ile gösterilmiş ve Denklem (2.9) ile ifade edilmiştir.

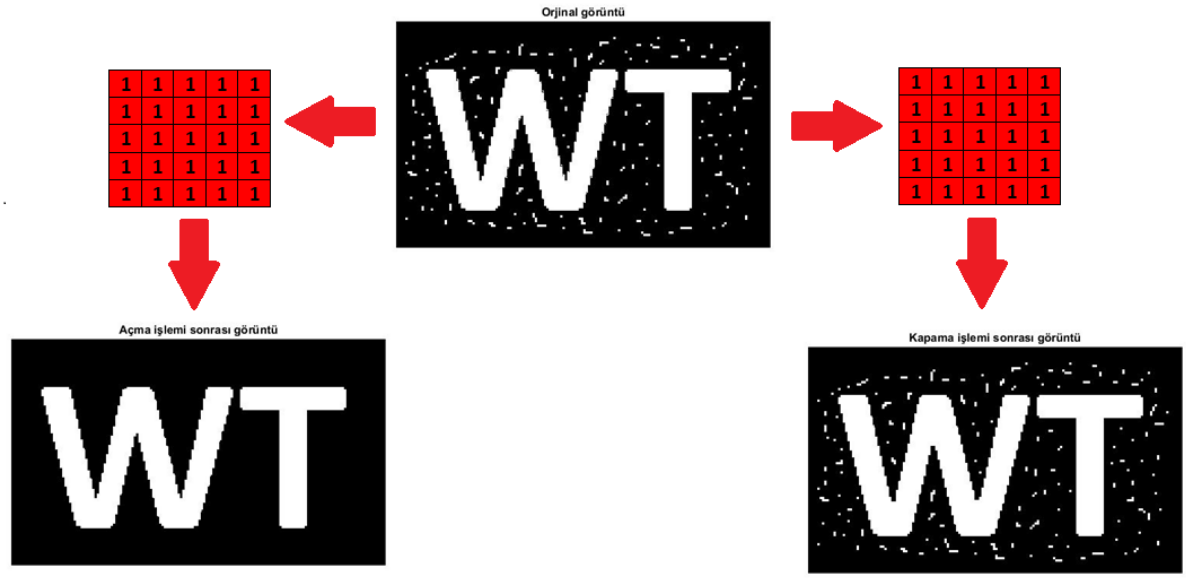
$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \tag{2.9}$$

Şekil 2.21'de 5×5 yapısal eleman ile aşınma ve genleşme işlemi uygulanmış görüntü örnekleri verilmiştir.



Şekil 2.21: 5×5 yapısal eleman ile aşınma ve genleşme işlemi uygulanmış görüntü örnekleri.

Şekil 2.22'de 5×5 yapısal eleman ile açma ve kapama işlemi uygulanmış görüntü örnekleri verilmiştir.



Şekil 2.22: 5×5 yapısal eleman ile açma ve kapama işlemi uygulanmış görüntü örnekleri.

2.4.1.5. Yapısal Eleman

Yapısal eleman, görüntü üzerinde yapacağımız işlemin ve yapmak istediğimiz uygulamanın amacına yönelik olarak istenilen boyutlarda ve istenilen geometride hazırlanmış küçük ikili bir görüntüdür. Yapısal eleman farklı geometrik şekillerde olabilmektedir. Morfolojik işlemlerde en çok kullanılan geometrik şekiller kare, dikdörtgen ve dairedir (Boztoprak ve diğ., 2007; Karhan ve diğ., 2011; Karhan, 2012).

2.4.2. Gradyan Yönelim Tabanlı Öznitelik Tanımlayıcılar

2.4.2.1. Yönlü Gradyanların Histogramları (*HOG - Histograms of Oriented Gradients*)

İlk olarak Dalal ve Triggs (2005) tarafından önerilen HOG tanımlayıcıları, bilgisayar görüsünde birçok farklı problemin çözümünde ve çeşitli çalışma alanlarında kullanılmaktadır. HOG tanımlayıcıları yaya tespiti (Toya ve diğ., 2008; Zhao ve diğ.,2015; Lee ve diğ., 2013), insan tespiti (Dalal ve Triggs, 2005; Pang ve diğ., 2011), yüz tanıma (Déniz ve diğ., 2011; Li ve Huo

2016; Shu ve diğ., 2011), tümör tespiti (Abbasi ve Tajeripour, 2016) ve metin tanıma (Tian ve diğ., 2013) gibi çalışma alanlarında öznitelik oluşturma anlamında kullanılmaktadır.

HOG, bir hedef şekli temsil etme noktasında yerel bölgelerdeki hedef kenarların dağılımıyla ilgili bilgileri çıkarır. HOG, gradyan yönelimleri ile ilgili olarak iyi tasarlanmış histogramların ve gradyan bilgilerinin gruplandırmasını sağlar (Lee ve diğ., 2015).

HOG öznitelikleri hesaplanırken ilk adım gradyan değerlerinin hesaplanmasıdır. Görüntüdeki her piksel için gradyan değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır. İki yön boyunca her noktanın görüntü gradyan değerlerini hesaplamak için basit ve temel bir gradyan operatörü [-1,0,1] kullanılır. *I* görüntüsü için bir (*x*,*y*) noktasındaki gradyanlar, gradyan operatörü ile görüntünün konvolüsyonu ile bulunabilir. Görüntü gradyan değerlerini hesaplamada Denklem (2.10), (2.11), (2.12) ve (2.13) kullanılmaktadır.

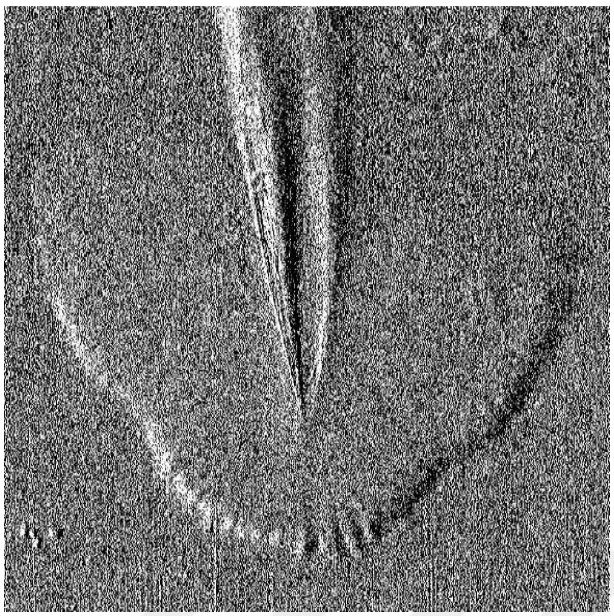
$$G_X = [-1, 0, 1] * I(x, y) \tag{2.10}$$

$$G_Y = [-1, 0, 1]^T * I(x, y) \tag{2.11}$$

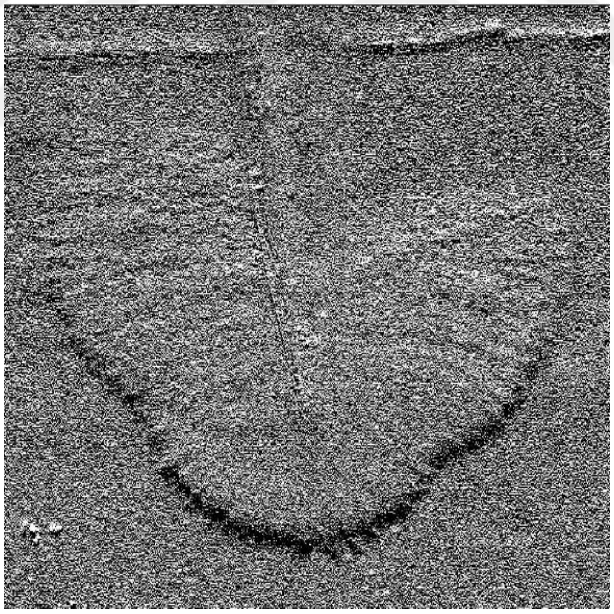
$$G_X(x, y) = I(x + 1, y) - I(x - 1, y) \tag{2.12}$$

$$G_Y(x, y) = I(x, y + 1) - I(x, y - 1) \tag{2.13}$$

Şekil 2.23 ve 2.24'te yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop RGB görüntüsünün G (Green-Yeşil) bandının sırasıyla yatay gradyanı G_X ve dikey gradyanı G_Y gösterilmiştir.



Şekil 2.23: RGB görüntünün G bandının yatay gradyanı Gx.



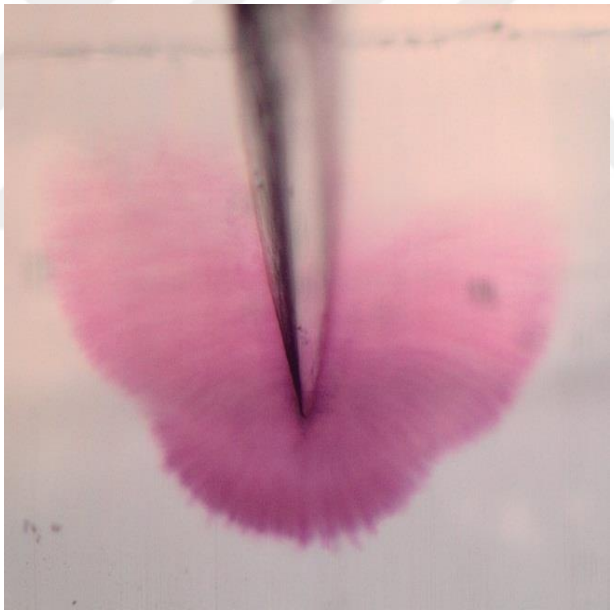
Şekil 2.24: RGB görüntünün G bandının dikey gradyanı Gy.

Burada G_X ve G_Y görüntü gradyanının sırasıyla x ve y bileşenlerini belirtmektedir. $I(x, y)$, (x,y) noktasındaki piksel değerini vermektedir. Gradyan büyüklüğü ve gradyan yönelimleri sırasıyla Denklem (2.14) ve (2.15)'te gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

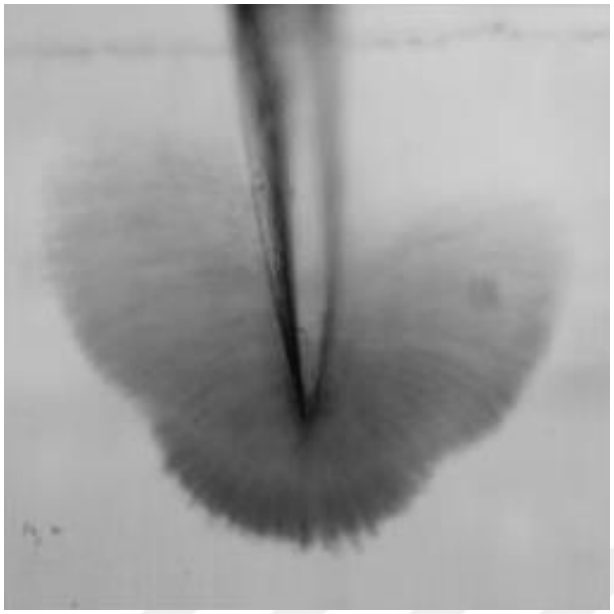
$$G(x,y) = \sqrt{G_X(x,y)^2 + G_Y(x,y)^2} \tag{2.14}$$

$$\theta(x,y) = \tan^{-1}\left(\frac{G_Y(x,y)}{G_X(x,y)}\right) \tag{2.15}$$

Şekil 2.25'te yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü RGB formatında (1146×1136) verilmiştir. Şekil 2.26'da RGB görüntünün G bandı tekrar boyutlandırılarak 256×256 boyutunda verilmiştir.

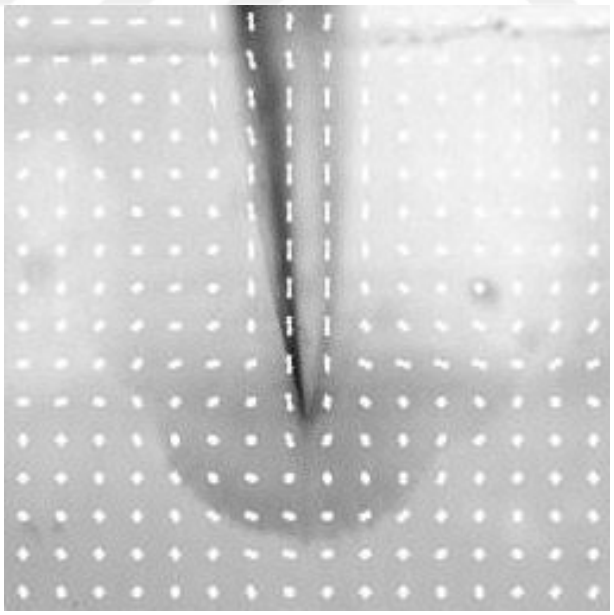


Şekil 2.25: RGB görüntü (1146×1436).

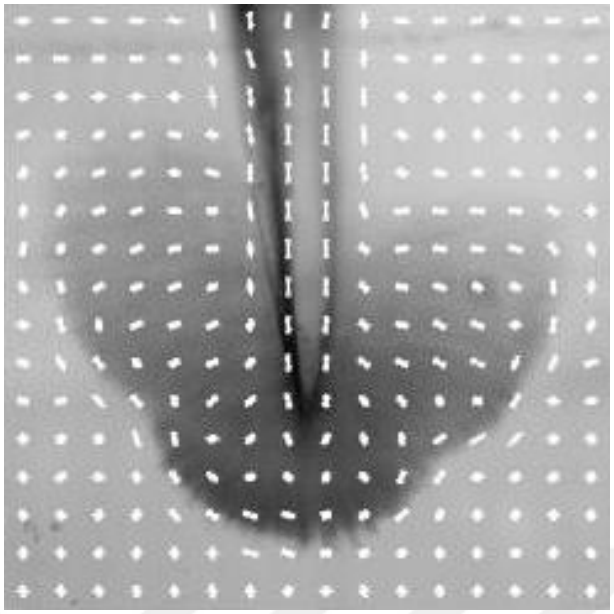


Şekil 2.26: RGB görüntü G bandı (256×256).

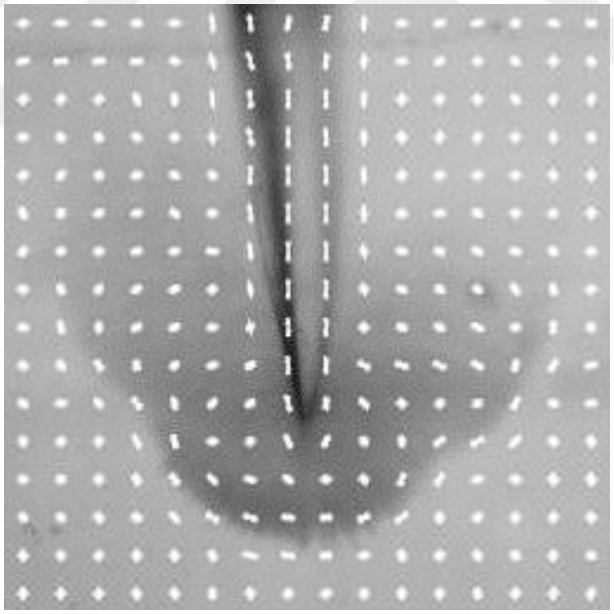
Şekil 2.27, 2.28 ve 2.29'da sırasıyla R (Red-Kırmızı), G (Green-Yeşil), ve B (Blue-Mavi) bantlarının gradyan yönelimleri 16×16 hücre boyutunda gösterilmiştir.



Şekil 2.27: R bandı gradyan yönelimleri (hücre boyutu 16×16).



Şekil 2.28: G bandı gradyan yönelimleri (hücre boyutu 16×16).



Şekil 2.29: B bandı gradyan yönelimleri (hücre boyutu 16×16).

HOG öznitelik çıkarmada ikinci basamak yönelim kutulama (orientation binning) işlemidir. Görüntü algılama penceresi "hücre" olarak adlandırılan küçük uzamsal bölgelere ayrılmıştır. Birçok hücre "blok" olarak adlandırılan bir grup oluşturur. Bu basamak hücre histogramlarının oluşturulmasını içerir. Hücre içindeki her piksel gradyan hesaplamasında bulunan değerlere

dayalı olarak yönelim tabanlı bir histogram kanalı için ağırlıklı bir oy kullanır. Hücredeki piksellerin gradyan büyüklükleri, oy ağırlığına etki etmektedir (Lee ve diğ., 2015; Arróspide ve diğ., 2013). Kısaca, gradyanların yönelimleri histogram kutularına nicemlenir ve her kutunun yönelim aralığı vardır (Hans ve diğ., 2015). Histogram kanalları, gradyanın "işaretli" veya "işaretsiz" olup olmadığına bağlı olarak 0˚ ila 180˚ veya 0˚ ila 360˚ arasında eşit olarak yayılır. Dalal ve Triggs (2005), 9 histogram kanalıyla birlikte kullanılan işaretsiz gradyanların deneylerinde en iyi sonuç verdiğini bulmuşlardır. 0'dan küçük olan gradyan yönelimleri için, gradyan yönelimleri 180 ile toplanarak hesaplanır (Alparslan, 2013).

Aydınlatma ve kontrastta meydana gelen değişiklikleri hesaplamak adına, gradyan büyüklükleri lokal olarak normalleştirilmelidir; bu da hücrelerin daha geniş, uzamsal olarak bağlı bloklara gruplanmasını gerektirir. HOG tanımlayıcı, daha sonra tüm blok bölgelerinden normalleştirilmiş hücre histogramlarının bileşenlerinin vektörüdür. Bu bloklar tipik olarak çakışmaktadır, yani her hücre, son tanımlayıcıya birden fazla katkıda bulunur. Dikdörtgen R-HOG blokları ve dairesel C-HOG blokları olmak üzere iki temel blok geometrisi mevcuttur. R-HOG blokları genellikle üç parametreyle temsil edilen kare ızgaralardır. Bu parametreler blok başına hücre sayısı, hücre başına piksel sayısı ve hücre histogramı için kanal sayısıdır.

Blok normalizasyon işlemi gerçekleştirmek için farklı yöntemler (L1-Norm, L2-Norm, L1-Sqrt, L2-Hys) mevcuttur (Dalal ve Triggs, 2005). L1-Norm, L2-Norm ve L1-Karekök sırasıyla Denklem (2.16), (2.17) ve (2.18)'de belirtilmiştir. Blok normalizasyon işleminde, bu çalışmada L1-Norm uygulanmıştır. Belirli bir bloğun tüm histogramlarını içeren normalize edilmemiş vektörü *v,* normalize edilmişi *f* belirtmektedir. *e* paydanın sıfır olmasından kaçınmak için kullanılan ve sonucu etkileyemeyecek kadar küçük bir düzeltme sabitidir (Zhao ve diğ., 2015; Hanbay ve diğ., 2015). Bu çalışmada *e*, 1 olarak ayarlanmıştır.

$$f = \frac{v}{\|v\|_1 + e} \tag{2.16}$$

$$f = \frac{v}{\sqrt{\|v\|_2^2 + e^2}} \tag{2.17}$$

$$f = \sqrt{\frac{v}{\|v\|_1 + e}} \tag{2.18}$$

2.4.2.2. Eş Oluşum Yönlü Gradyanların Histogramları – (*CoHOG - Co-occurrence Histograms of Oriented Gradients*)

HOG, görüntü bloğundaki görüntü piksellerinin yönlü gradyanlarının istatistikleri yardımıyla bir görüntü bloğunun temel özelliklerini tanımlar. Öte yandan, HOG izole piksellerin yalnızca yönlerini yakalar ve komşu piksellere göre uzamsal bilgileri göz ardı eder. CoHOG tanımlayıcısı bunun yerine, piksel çiftleri arasında yönlü gradyanların eş oluşumlarının sıklığına bağlı olarak daha zengin uzamsal bilgiler vermektedir (Tian ve diğ., 2016). CoHOG öznitelik tanımlayıcısı, HOG yönteminin bir uzantısıdır (Hans ve diğ., 2015; Tian, 2016). Gradyan yönelim çiftlerinin 2 boyutlu histogramından elde edilen eş oluşum matrisi tabanlı bir yöntemdir. Eş oluşum matrisi görüntü üzerinde verilen offset değerlerinde gradyan yönelimlerini açıklar (Hanbay ve diğ., 2015).

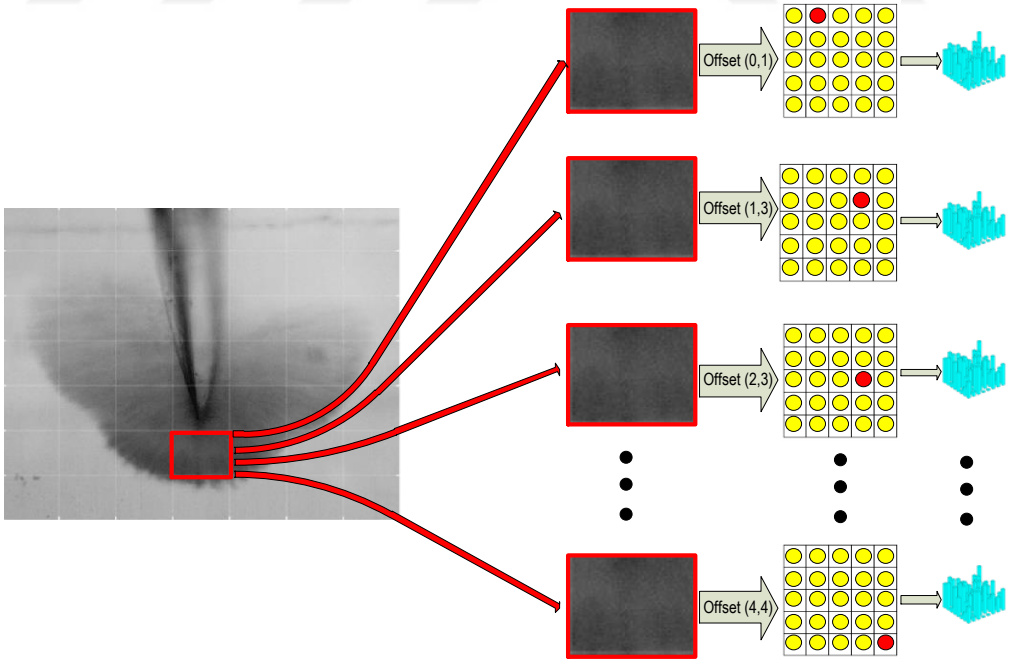
Belirli bir ofsetteki (*x,y*) eş oluşum matrisi Denklem (2.19)'da verilmiştir. H_{xy} kare matris ve boyutu yönelim kutuları tarafından kararlaştırılan bir eş oluşum matrisidir. *O, kbin* yönelim kutularına nicemlenmiş olan *I* giriş görüntüsünün gradyan yönelimidir. *i,j* gradyan yönelimlerini göstermektedir. *x, y* dikey ve yatay offsetleri belirtmektedir. *B,* görüntüdeki bir bloğu temsil etmektedir. Dolayısıyla denklem her bir blok için eş oluşum matrisini hesaplamaktadır. Bir görüntünün öznitelik tanımlayıcısı, 0-2π aralığında 8 kutuya nicemlenmiştir.

$$H_{x,y}(i,j) = \sum_{(p,q)\in B} \begin{cases} 1, & O(p,q) = i \; ve \; O(p+x,q+y) = j \\ 0, & aksi \; takdirde \end{cases} \tag{2.19}$$

Gradyan yönelimleri Denklem (2.20)'ye göre göre hesaplanmaktadır. *v* ve *h* uygun filtrelerle hesaplanan gradyan dikey ve yatay bileşenlerini göstermektedir.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v}{h}\right) \tag{2.20}$$

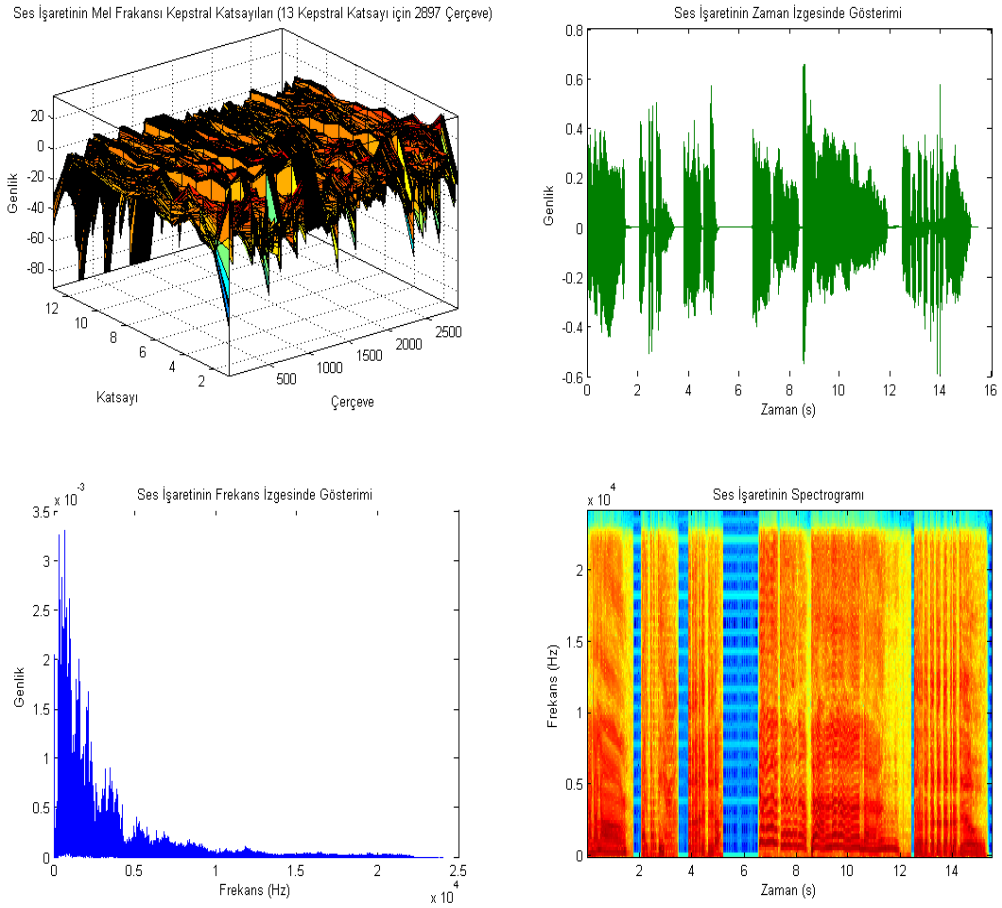
kbin gradyan yönelim kutularını, *m* eş oluşum matris sayısını (offset sayısına göre değişiklik gösterecektir), *Bw* blok genişliğini *ve Bh* blok uzunluğunu temsil etmektedir. Sonuç olarak bir görüntünün CoHOG öznitelik tanımlayıcısı, görüntünün *Bw*Bu* kadar bloğa bölünürek ve görüntü içerisindeki tüm blokların eş oluşum matrislerinin birleştirilip vektörize edilmesiyle oluşturulabilir. CoHOG öznitelik tanımlayıcısının boyutu *Bw*Bu*kbin*kbin*m* kadardır (Hanbay ve diğ., 2015; Tian ve diğ., 2016; Hans ve diğ., 2015). CoHOG öznitelik çıkarmada gradyan büyüklüğü ve yönelimi hesaplama, ağırlıklı oylama ve öznitelik vektörü oluşturma olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır (Tian ve diğ, 2016). Şekil 2.30'da CoHOG öznitelik çıkarma basamakları gösterilmiştir.



Şekil 2.30: CoHOG öznitelik çıkarma basamakları.

2.4.3. Mel Frekans Kepstral Katsayıları (MFCC)

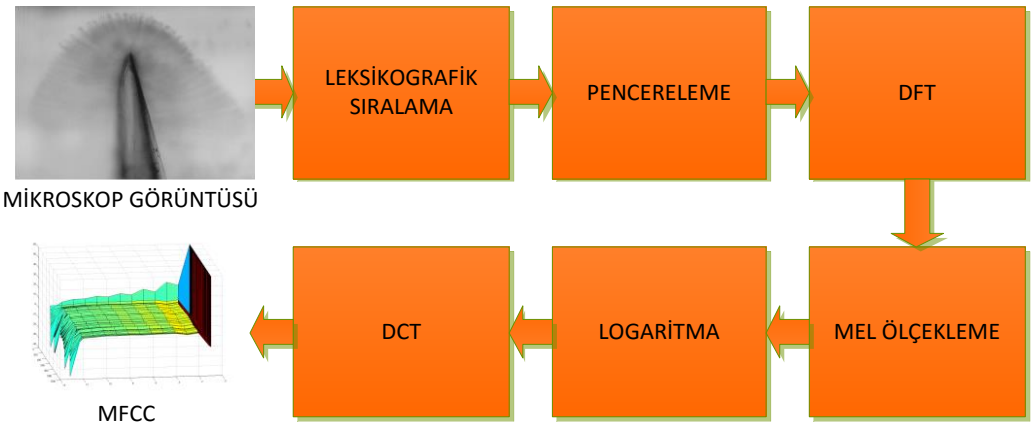
Mel birimi insanoğlunun işitme sisteminden ilham alınarak geliştirilen lineer olmayan bir frekans ölçüm birimidir. Mel ölçeği, Hz cinsinden gerçek frekans ekseni ve Mel cinsinden algılanan frekans ekseni arasındaki bir eşlemedir (Kasban ve diğ., 2011). Mel frekans kepstral katsayıları (MFCC), çoğunlukla konuşma ve konuşmacı tanımada kullanılan özniteliklerden biri olmakla beraber ses işlemede farklı çalışma alanlarında da kullanılmıştır. Şekil 2.31'de bir ses işaretinin kepstral katsayıları, zaman, frekans izgesinde gösterimi ve spektrogramı gösterilmiştir.



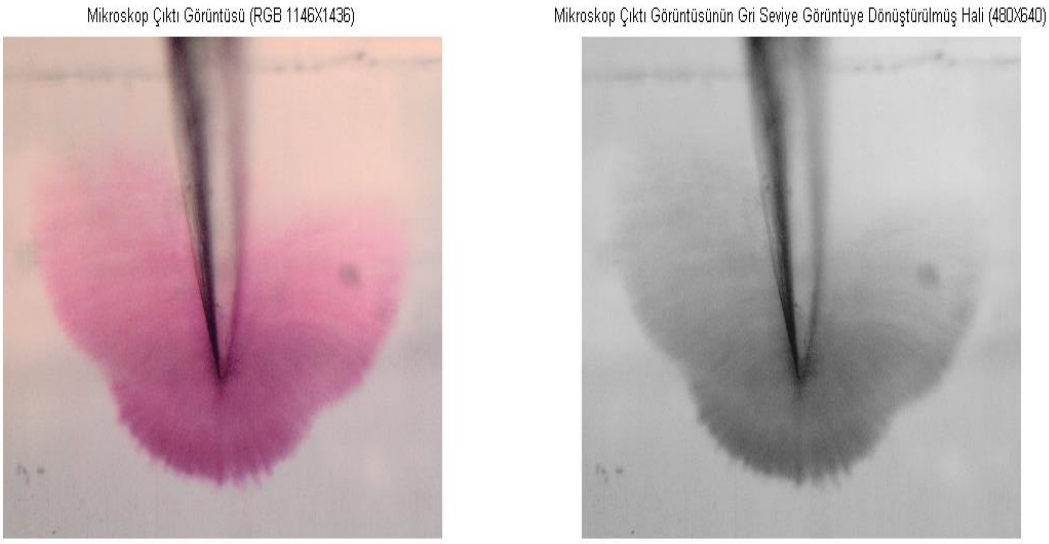
Şekil 2.31: Ses işaretinin kepstral katsayıları, zaman, frekans izgesinde gösterimi ve spektrogramı.

MFCC her ne kadar ses işlemede kullanılan bir öznitelik çıkarma yöntemi dahi olsa son yıllarda yapılan görüntü işleme çalışmalarında kullanılmıştır. Kasban ve diğ. (2011), yaptıkları çalışmada radyografi görüntülerinden kaynak hata tespiti yaparken MFCC kullanmışlardır. Talal ve El-Sayed (2009), MFCC tabanlı uydu görüntüleri için gürbüz bir tanıma yöntemi sunmuşlardır. Khan ve diğ. (2010), akustik ve GPR görüntülerinden kara mayınlarının ve yer altı araçlarının tespitini gerçekleştirirken MFCC algoritmasını kullanmışlardır. Zahran ve diğ. (2013) radyografik görüntülerden otomatik kaynak hata tanıma yaparken öznitelik çıkarma işleminde MFCC'den yararlanmışlardır.

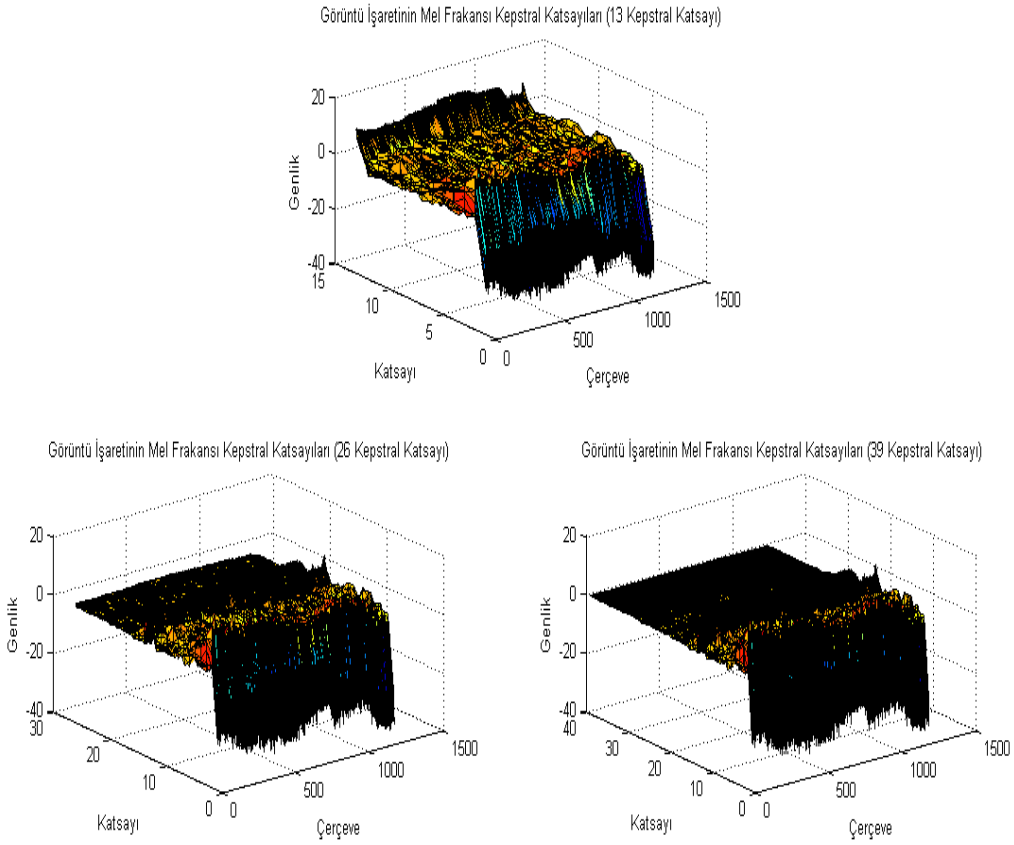
Görüntülerin öznitelikleri çıkarılmadan önce 2 boyuttan tek boyuta indirgenmelidir. Bunun için 2 boyutlu işaret leksikografik sıralanarak tek boyutlu işarete dönüştürülür ve daha sonra kepstral katsayılar çıkartılır. Şekil 2.32'de görüntü işaretinden kepstral katsayıların çıkarılma basamakları verilmiştir. 13 kepstral katsayı için çıkartılan çerçeve sayısı 1200'dür. Şekil 2.33'te MFCC öznitelik çıkarma yönteminin uygulandığı gri seviyeli mikroskop çıktı görüntüsü verilmiştir. Şekil 2.34'te bu görüntü işaretinin kepstral katsayıları 3 eksen (katsayı, çerçeve ve değer) için çizdirilmiş ve gösterilmiştir.



Şekil 2.32: Mikroskop görüntüsünden MFCC'nin çıkarılmasının blok diyagramı.



Şekil 2.33: MFCC öznitelik çıkarma yönteminin uygulandığı gri seviyeli mikroskop çıktı görüntüsü.



Şekil 2.34: Görüntü işaretinin kepstral katsayıları.

Lineer frekans ile mel frekans ölçeği arasındaki ilişki aşağıdaki Denklem (2.21) ve (2.22)'de verilmektedir.

$$f_{mel} = 2595 \log_{10}\left(1 + \frac{f_{lineer}}{700}\right) \tag{2.21}$$

$$c_m(k) = \sum_{j=1}^{N} f_j \cos\left(\frac{\pi k}{N}(j - 0.5)\right) \tag{2.22}$$

($k = 0,\ldots, V-1$) *ve* MFCC'nin gerekli sayısı ($V \leq N$) olmak üzere *k*, kepstral katsayı indeksini; f_j, logaritmik süzgeç bankası çıkışındaki işaretleri temsil etmektedir. İlk kepstral katsayı $c_m(0)$, genellikle giriş sinyalinin ortalama değerini temsil ettiği için dikkate alınmaz (Bahoura ve Ezzaidi, 2013; Bolat, 2013; Karhan ve diğ., 2016).

3. MALZEME VE YÖNTEM

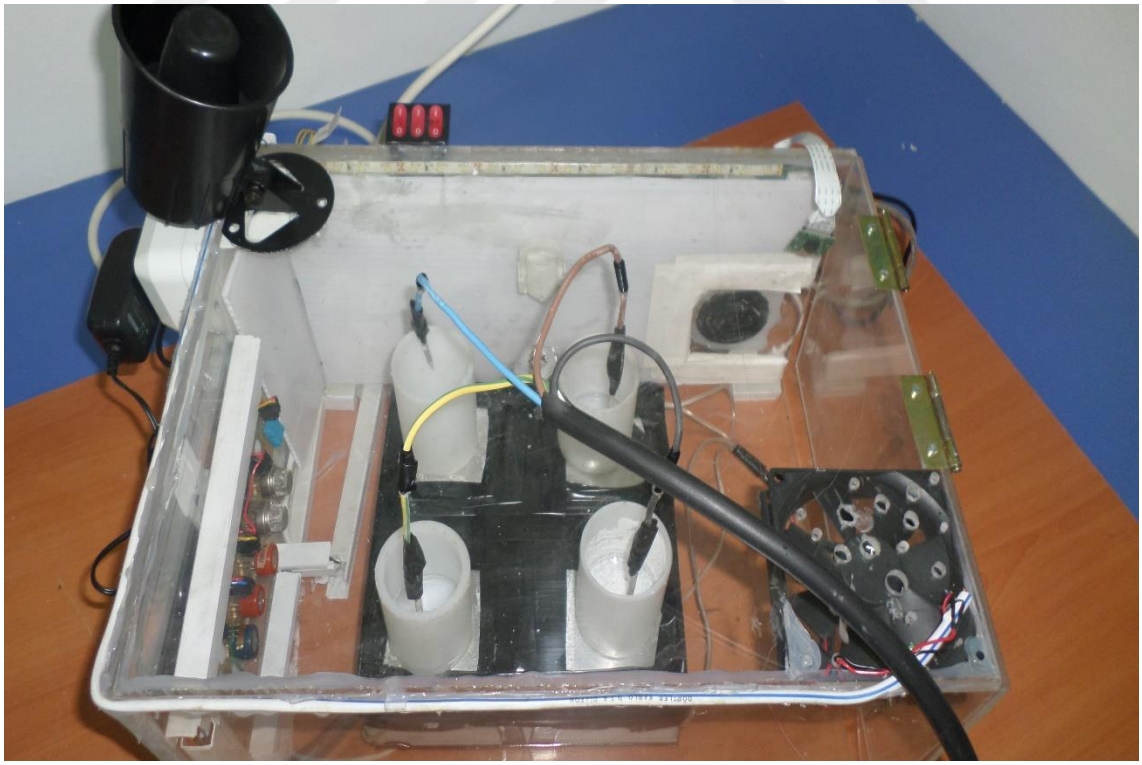
Tasarlanıp ve gerçeklenen bu deney sistemi, yüksek gerilim altında yaşlandırma deneylerini kontrollü ve güvenli bir şekilde gerçekleştirmeye imkân vermektedir. Deney sistemi sulu ağaçlanmayı etkileyebilecek birçok faktör için kontrol olanağı sağlamaktadır. Deney sistemi, uzaktan erişilebilen ve iş güvenliği açısından da büyük olanaklar sunan düşük maliyetli bir sistemdir. Deney sistemini, donanım ve yazılım olmak üzere iki başlık altında ifade edebiliriz. Donanım bölümünde; tek kartlı mini bir bilgisayar olan Raspberry Pi geliştirme platformu, mikrodenetleyici olan Arduino, Raspberry Pi kamera modülü, mikrofon, gaz sensörleri, sıcaklık ve nem sensörlerinin yer aldığı veri toplama bölümü, yüksek gerilimin üretildiği yüksek gerilim üreteç bölümü ve son olarak sulu ağaçlanmanın oluşturulduğu deney ortamı bölümü mevcuttur. Bu deney sistemi hem tasarım anlamında hem de donanım anlamında geliştirilerek Versiyon 2 üretilmiştir. Versiyon 1'de Raspberry Pi 1 Model B, Versiyon 2'de Raspberry Pi 3 Model B kullanılmıştır. Deney sisteminin (Versiyon 1) genel olarak görüntüsü Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Şekil 3.2 ve 3.3'de sırasıyla deneysel sistemin yandan ve üstten görünümü (Versiyon 1) gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Deney sisteminin genel olarak görüntüsü (Versiyon 1).



Şekil 3.2: Deney sisteminin yandan görünümü (Versiyon 1).



Şekil 3.3: Deney sisteminin üstten görünümü (Versiyon 1).

Şekil 3.4'de tasarım ve donanım anlamında geliştirilen deney sisteminin genel olarak görünümü (Versiyon 2) gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Deney sisteminin genel olarak görüntüsü (Versiyon 2).

3.1. DONANIM KISMI

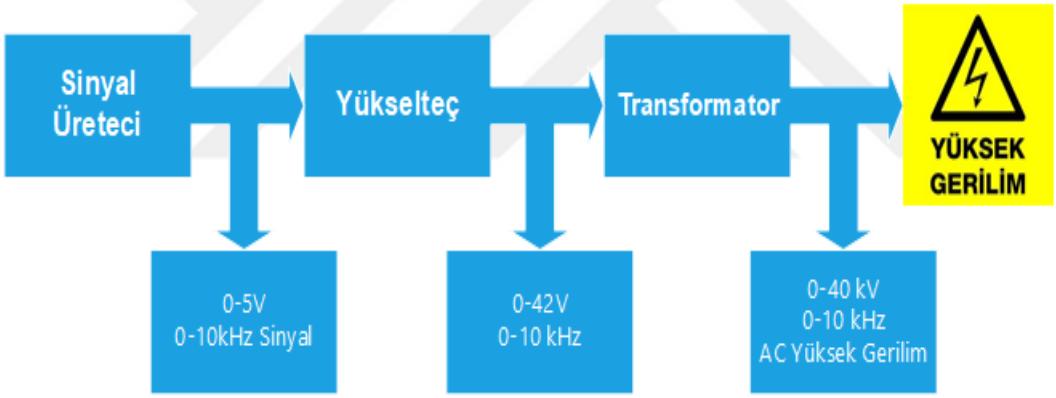
Deney sisteminin donanım kısmı, frekansı ve genliği ayarlanabilir yüksek gerilim üreteç bölümü, deney ortam parametrelerinin kontrollü alınmasına olanak sağlayan veri toplama bölümü ve içerisinde sulu ağaçlanmanın oluşturulduğu deney ortamı bölümünden oluşmaktadır.

3.1.1. Yüksek Gerilim Üreteci Bölümü

Sulu ağaçlanmayı laboratuvar ortamında hızlı bir şekilde oluşturabilmek için en önemli adımlardan biri de yüksek frekansta yüksek bir gerilim oluşturmaktır. Çünkü büyük bir elektrik alanı için ya gerilimin arttırılması ya da karşı elektrota uzaklığın minimize edilmesi şarttır. Sulu ağaçlanmanın oluşumu ve büyümesinde elektrik alan şiddeti en önemli faktörlerden biridir.

Elektrik alan şiddetinin artması su ağaçlarının sayısı, uzunluğu ve genişliğinin de artmasına neden olacaktır.

Deneylerin gerçekleştirilmesi için istenilen frekansta ve genlikte gerilimler üretilebilmektedir. AC işaretler kare ve sinüsoidal olarak üretilebilmektedir. Yüksek gerilimin üretilebilmesi için bu deney sisteminin bu bölümünde, sinyal üreteci, yükseltici ve transformatör kullanılmıştır. Sinyal üreteci yardımıyla istenilen frekansta düşük genlikte sinyaller üretilmektedir. Bu sinyallerin genlik değerleri, yükseltici yardımıyla belli bir seviyeye kadar yükseltilebilmektedir. Yükseltici çıkışında gerilim değeri belli seviyeye kadar yükseltilen sinyal transformatör yardımıyla yüksek gerilim seviyelerine kadar yükseltilebilmektedir. Şekil 3.5'te yüksek gerilim üretecinin blok diyagramı gösterilmiş ve bu blok diyagramda her bir bloğun sonucunda sinyalin alabileceği genlik ve frekans değerlerine yer verilmiştir.

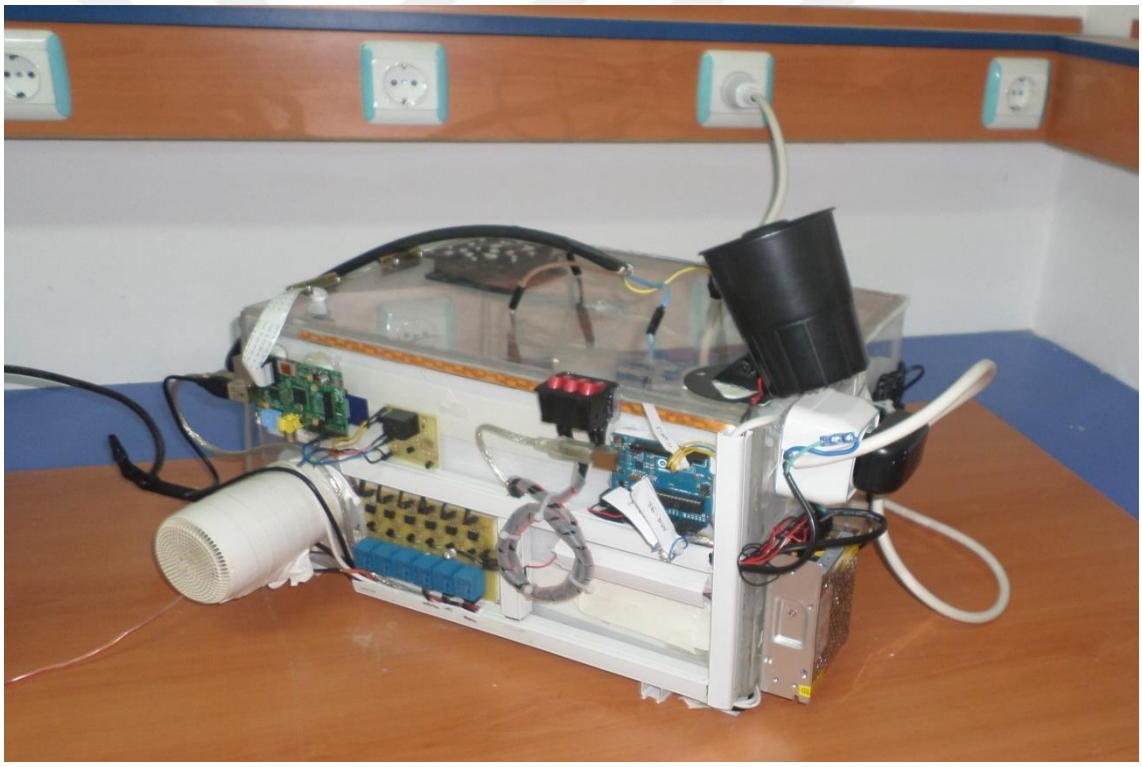


Şekil 3.5: Yüksek gerilim üretecinin blok diyagramı.

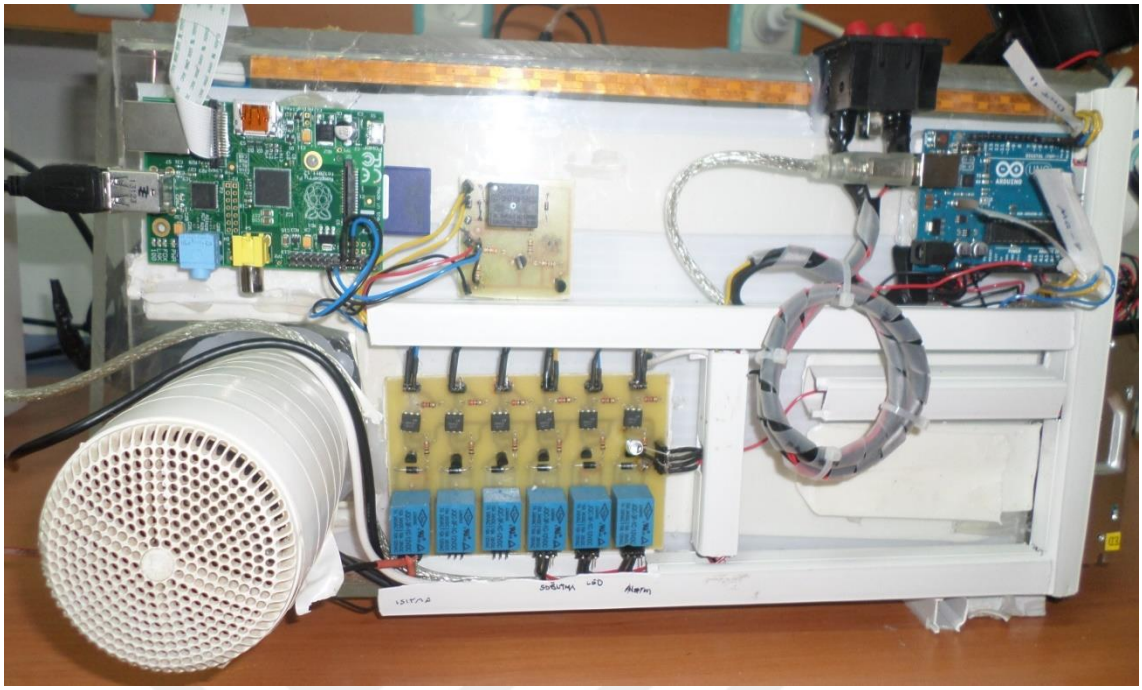
Çıkış gerilimi ve frekansı oldukça yüksek olduğundan veri toplama bölümünde bulunan cihazlara ve sensörlere elektrik alanın etkisini ve oluşabilecek enterferansı minimize etmek adına transformatör kalınlığı 1 cm olan ve akrilik malzemeden yapılmış kutu içerisinde tutulmaktadır. Alüminyum elektrot ile transformatör arasındaki kablolar yalıtkanları kalın kablolardan seçilmiştir.

3.1.2. Veri Toplama Bölümü

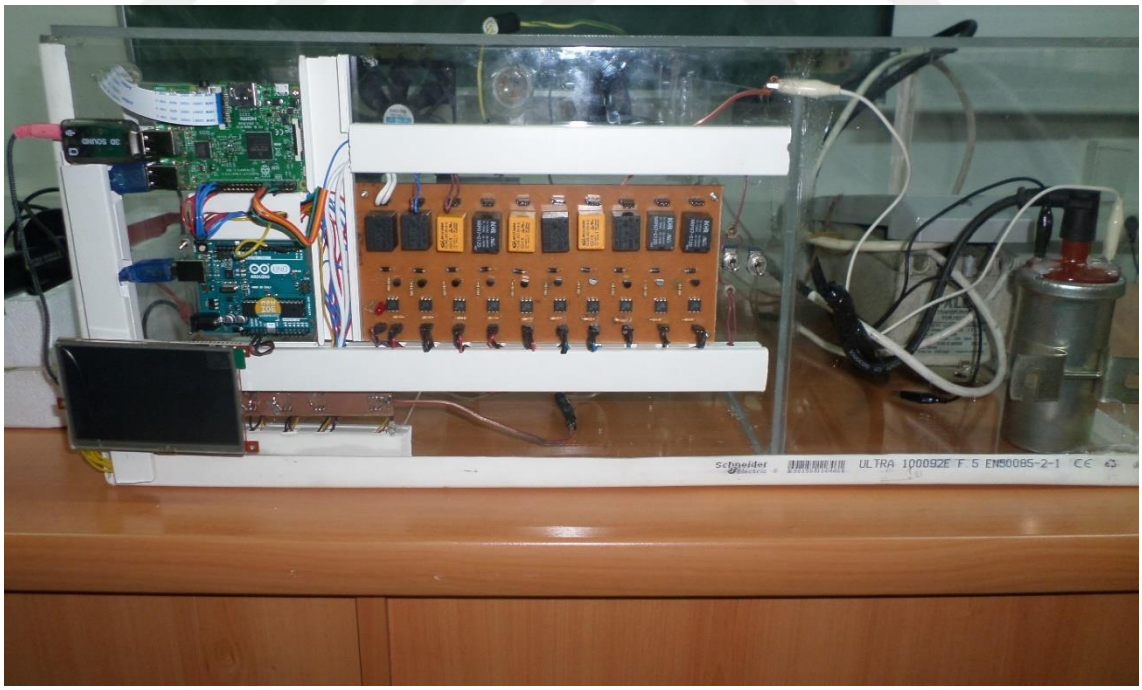
Veriler genel olarak tek kartlı mini bir bilgisayar olan Raspberry Pi platformu ve bir mikrodenetleyici olan Arduino Uno R3 yardımıyla alınmıştır. Bir kredi kartı boyutunda olan Raspberry Pi platformu, tek kartlı mini bir bilgisayardır. Raspberry Pi platformu açık kaynak yazılım tabanlı projelerde önemli fırsatlar sunmaktadır. Bundan dolayı tüm dünyada popüler olan Raspberry Pi açık kaynak elektronikte tercih edilmektedir. Bu popüler geliştirme kartı son yıllarda eğitim amaçlı, ticari ve akademik olarak kullanılmaktadır. Deney sisteminin veri toplama bölümünde bulunan geliştirme kartı, mikrodenetleyici, röle kartı ve bağlantılar Şekil 3.6, 3.7 ve 3.8'de gösterilmiştir. Raspberry Pi 3 Model B ve Raspberry Pi 1 Model B geliştirme kartları Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.6: Deney sisteminin veri toplama bölümündeki donanımlar (Versiyon 1).



Şekil 3.7: Deney sisteminin veri toplama bölümündeki donanımlar (Versiyon 1).



Şekil 3.8: Deney sisteminin veri toplama bölümündeki donanımlar (Versiyon 2).



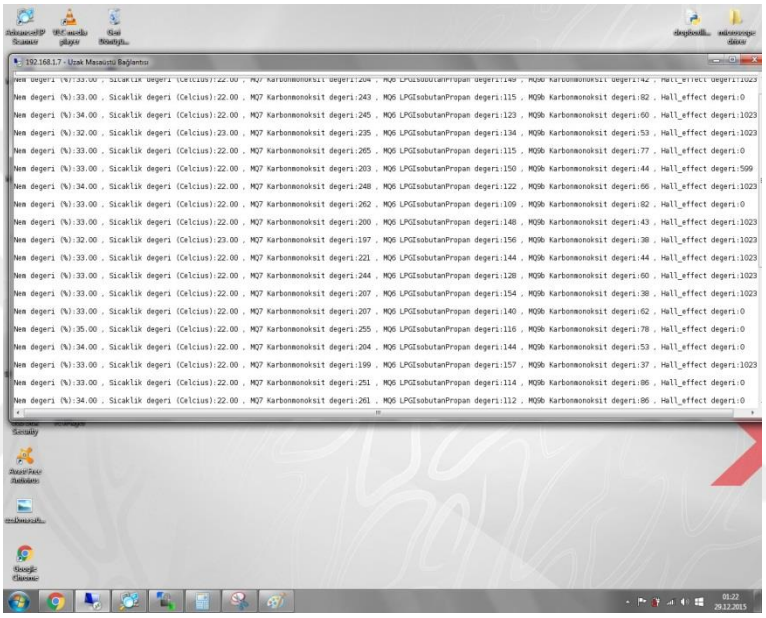
Şekil 3.9: Raspberry Pi 3 Model B ve Raspberry Pi 1 Model B geliştirme kartları.

Raspberry Pi 1 Model B ve Raspberry Pi 3 Model B'nin teknik özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Raspberry Pi 1 Model B ve Raspberry Pi 3 Model B'nin teknik özellikleri.

	Raspberry Pi 1 Model B	**Raspberry Pi 3 Model B**
Mimari	ARMv6Z (32-bit)	ARMv8-A (64-bit)
SoC	Broadcom BCM2835	Broadcom BCM2837
CPU	700 MHz tek çekirdek ARM1176JZF-S	1.2 GHz 64-bit 4 çekirdek ARM Cortex-A53
RAM	512 MB	1 GB
USB 2.0 port sayısı	2	4
Kart üzerinde Ağ	10/100 Mbit/s Ethernet	10/100 Mbit/s Ethernet, 802.11n Wifi, Bluetooth 4.1
Güç değerlendirmesi	700 mA (3.5 W)	300 mA (1.5 W) ortalama 1.34 A (6.7 W) maksimum
Güç kaynağı	5 V (MikroUSB veya GPIO)	5 V (MikroUSB veya GPIO)
Boyut	85.60 mm × 56.5 mm	85.60 mm × 56.5 mm
Ağırlık	45 g	45 g

Deney sisteminin bu kısmında, Arduino'ya bağlı sensörler yardımıyla deney ortamından sıcaklık, nem, karbonmonoksit, karbondioksit değerleri alınıp seri haberleşme yardımıyla Raspberry Pi platformuna iletilmektedir. Deney ortamından alınan sensör değerlerinin 5 saniye aralıklarla seri monitörde görünümü Şekil 3.10'da verilmiştir. Bu değerler, Raspberry Pi platformunda .txt uzantılı olarak kaydedilip saklanmakta aynı zamanda kullanıcıya SSH protokolü yardımıyla gerçek zamanlı olarak erişim imkânı vermektedir.

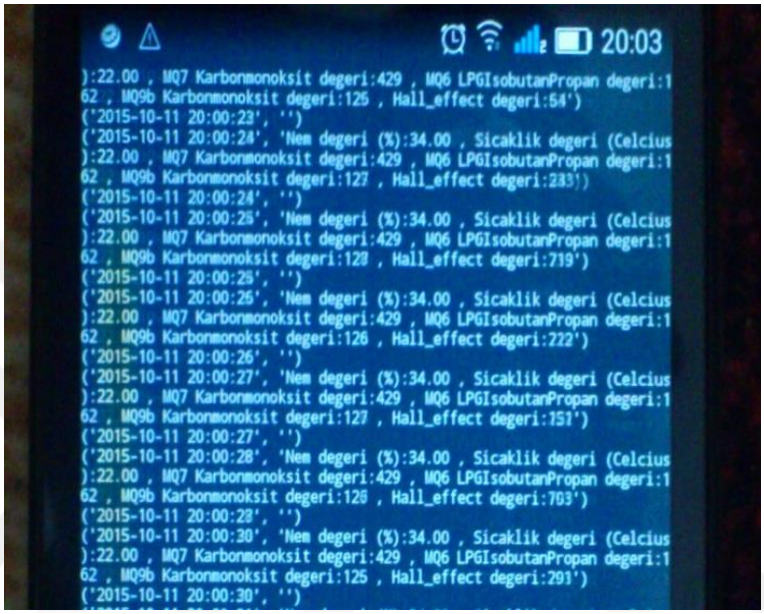


Şekil 3.10: Deney ortamından alınan sensör verilerinin seri monitörde görünümü.

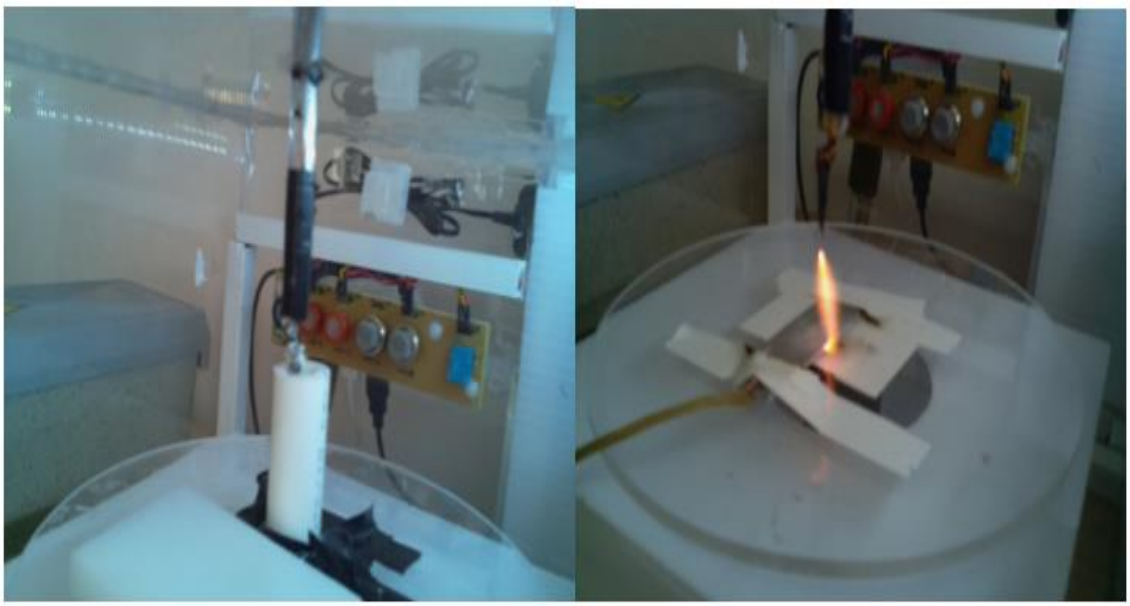
Sensörlerden gelen verilerin alımında ise Arduino'dan faydalanılmıştır. Raspberry Pi'de analog girişler olmadığından tüm sensörler Arduino'ya bağlanmış ve sensörlerden okunan veriler seri haberleşme yardımıyla Raspberry Pi'ye gerçek zamanlı olarak aktarılmıştır. Dolayısıyla Arduino, Raspberry Pi altında ve kontrolünde çalışan bir mikrodenetleyici konumundadır. Yaşlandırma testleri gerçekleştirilirken istenilen sıcaklığın ve nemin ayarlanmasında, röle kontrol devresine üzerinden mikrodenetleyiciye bağlı 220 V – 50 Hz'lik sıcak fan (Versiyon 2'de akkor telli lamba) ve 12 V soğuk fanlar bulunmaktadır.

Deneysel sistemin en önemli avantajlarından biri de uzaktan erişime imkân vermesidir. Secure Shell (SSH) Protocol bağlantı sayesinde hem PC üzerinden hem de akıllı telefon üzerinden bağlantı yapılabilmektedir. SSH bağlantı yapıldıktan sonra LXTerminal görüntüsü Şekil

3.11‘de verilmiştir. Böylelikle deney sonuçlarının takibi, koda müdahale gibi işlemler kolaylıkla gerçekleştirilebilecektir. RTSP Real Time Streaming Protocol yardımıyla video yayını yapılıp iş güvenliği açısından deney ortamının takibi yapılabilmektedir. Şekil 3.12‘de deney ortamının RTSP protokolü yardımıyla Picamera modülü ile alınan görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.11: SSH protokolü yardımıyla sensörlerden alınan değerlerin akıllı telefondaki ekran görüntüsü.



Şekil 3.12: RTSP protokolü yardımıyla Picamera modülü ile alınan görüntü.

Veri toplama bölümünde, deney sürecinde ortamdan ses verilerini almaya imkân tanıyan mikrofon ve deneysel ortamdan görüntü alabilen bir kamera mevcuttur. Mikrofon ve kamera Raspberry Pi platformuna bağlıdır. Mikrofon bir ses kartı yardımıyla Raspberry Pi'ye doğrudan bağlanmıştır. Ses verileri, istenilen uzunlukta ve istenilen aralıklarda alınıp kullanıcıya işlenecek formatta hazırlanmaktadır. Deneysel ortamdan görüntü verileri Raspberry Pi'nin kamera modülü olan Picamera modülüyle alınmaktadır. RTSP protokolü yardımıyla ortamdan gerçek zamanlı olarak video yayını alınabilmektedir. Görüntüler kullanıcıya istenilen formatta hazırlanmaktadır.

Ses ve görüntü verilerini elde ederken direkt olarak Raspberry Pi kullanılmıştır. İstenilen zaman dilimi aralıklarında ses, görüntü ve sensör verileri SD karta kaydediliyor, buluta dosya depolanıyor aynı zamanda kullanıcının mail adresine gönderiliyor. Şekil 3.13'te LXTerminalde kodun ekran çıktısı verilmiştir.



Şekil 3.13: LXTerminalde kodun ekran çıktısı.

3.1.3. Deney Ortamı Bölümü

3.1.3.1. NaCl Çözelti Hazırlanışı

Sulu ağaçlanma deneyi gerçekleştirilirken deney ortamında iyonik çözeltinin konulduğu polyamid kaplar, trafonun yüksek gerilim çıkış uçlarına bağlı alüminyum elektrotlar ve XLPE yalıtkanlı tek damarlı kablodan alınan yalıtkan numuneleri bulunmaktadır. Genel olarak su ağacı oluşturmak için hazırlanan deney düzenekleri benzerlik göstermektedirler. Sulu ağaçlanma ile ilgili çalışmalarda (su ağacı oluşturmak için hazırlanan deney düzeneklerinde); su iğnesi uzunlukları, su iğnesi sayıları, elektrot malzeme türleri (Al, Pt, Cu, Fe ve Pb) ve iyonik çözelti türleri (Na_2SO_4, $CuSO_4$, $FeSO_4$, K_2SO_4, KBr, $CuSO_4$, $Cu(NO_3)_2$, $CuCl_2$, $AgNO_3$) farklılık gösterebilmektedir. Bu farklılıklarla beraber su ağacının uzunluk, genişlik ve sayıları da değişebilmektedir.

Molarite ve iletkenliğinsulu ağaçlanmanın büyüklüğüne ve geometrisine etkisini analiz edebilmek için öncelikle farklı molaritelerde NaCl çözeltisi hazırlanmıştır. Çözeltilerin hazırlanmasında kontrollü bir deney yapabilmek adına çeşme suyu yerine saf su kullanılmıştır. Hazırlanan çözeltilerin iletkenlik ve pH değerleri SG78 – SevenGo Duo pro pH/iyon/iletkenlik ölçüm cihazı yardımıyla alınmıştır. 0.8 M, 1 M, 1.4 M'lık tuzlu su çözeltilerinin pH değerleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Farklı molaritelerdeki tuzlu su çözeltilerinin iletkenlikleri Tablo 3.3'te verilmiştir. Şekil 3.14'te iletkenlik ve pH değerlerinin ölçümlerinde kullanılan SG78 – SevenGo Duo pro pH/iyon/iletkenlik ölçüm cihazı verilmiştir.

Tablo 3.2: NaCl çözeltilerin pH değerleri.

Molarity	**pH**
0.8 M	6.14
1 M	6.21
1.4 M	6.54

Tablo 3.3: Farklı molaritelerdeki tuzlu su çözeltilerinin iletkenlikleri.

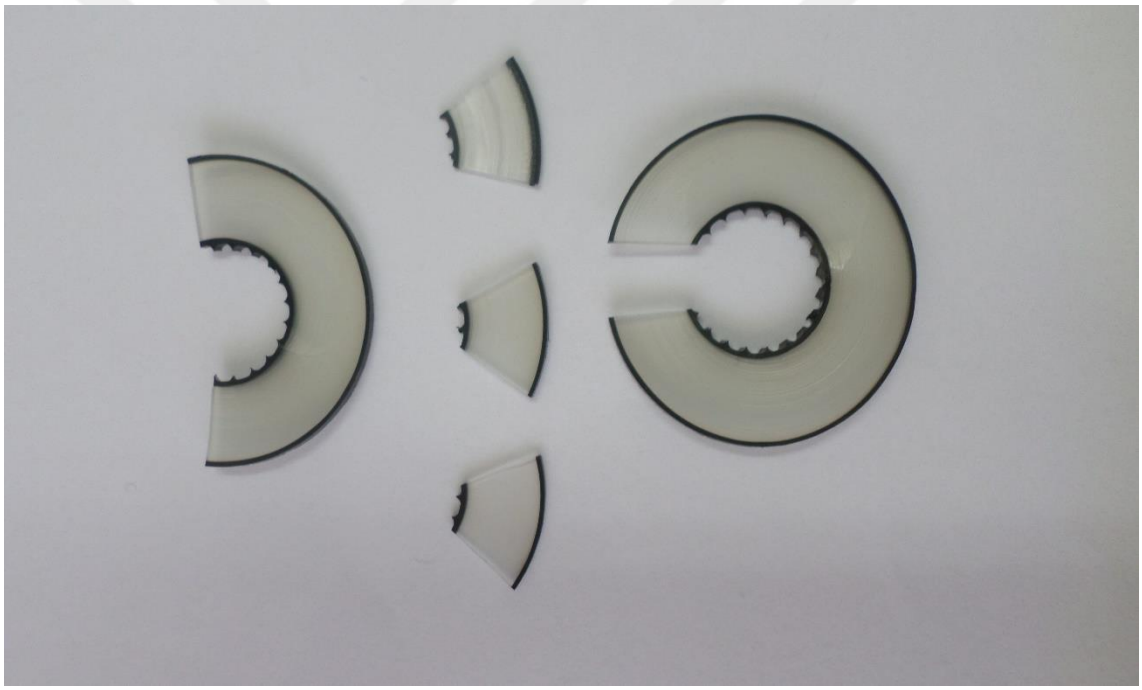
Molarite (M)	NaCl (g)	İletkenlik (mS/cm)
0.2	5.85	20.2
0.4	11.70	37.5
0.6	17.55	53
0.8	23.4	69.2
1	29.25	84.2
1.2	35.1	97.7
1.4	40.949	109.9
1.6	46.8	123.9
1.8	52.65	135.9
2	58.5	147.1
2.2	64.35	157.9
2.4	70.2	167.9
2.5	73.125	173.4



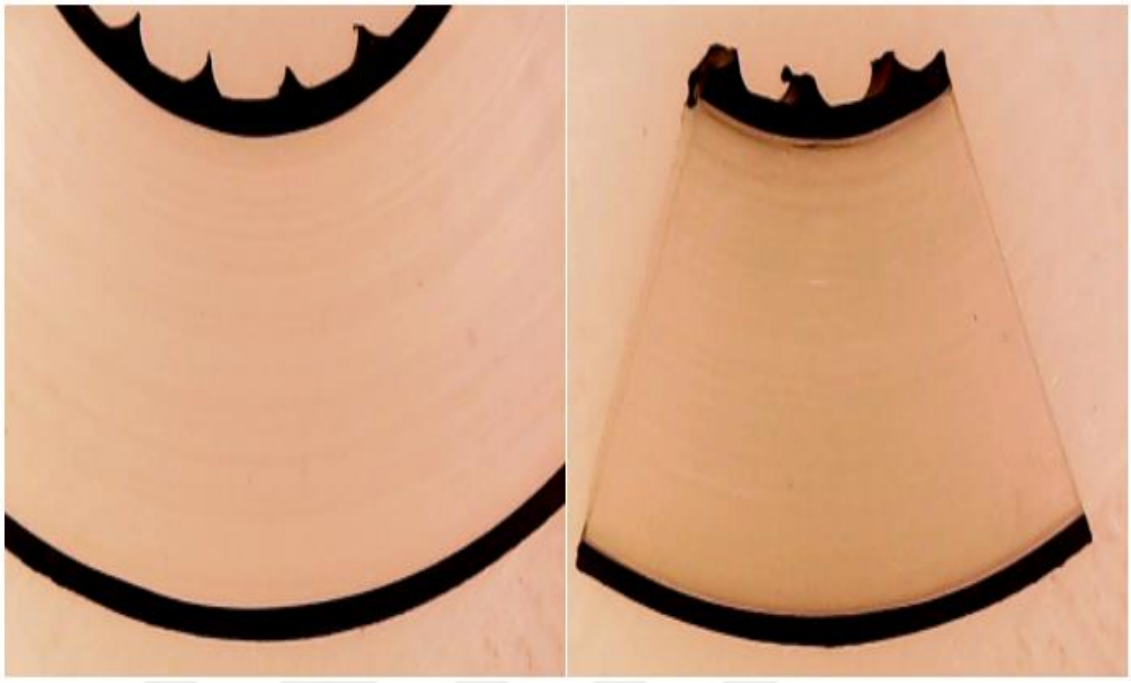
Şekil 3.14: SG78 – SevenGo Duo pro pH/iyon/iletkenlik ölçüm cihazı.

3.1.3.2. Numune Hazırlanışı

Sulu ağaçlanmanın oluşturulduğu ve büyütüldüğü numuneler, hizmet vermeye hazır XLPE yalıtkanlı kablolardan 800 µm - 950 µm kalınlıklarında ince kesitler alınarak hazırlanmıştır. Numunelerde su iğneleri oluşturabilmek için farklı uzunlukta delikler açılmıştır. Alınan bu numuneler, NaCl çözeltinin içerisine konulduğu polyamid malzemeden yapılmış bir silindirik kabın altına yapıştırılmıştır. Şekil 3.15'te XLPE yalıtkanlı kablolardan alınan ince kesitli numuneler gösterilmiştir. Şekil 3.16'da XLPE yalıtkanlı kablolardan alınan 800 µm - 950 µm kalınlıklarındaki numunelerin dijital mikroskop görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.17, 3.18 ve 3.19'da polyamid malzemeden yapılmış silindirik kaplar ve altlarına yapıştırılmış yaşlandırılacak XLPE numunelere yer verilmiştir.



Şekil 3.15: XLPE yalıtkanlı kablolardan alınan ince kesitli numuneler.



Şekil 3.16: XLPE yalıtkanlı kablolardan alınan 800 µm - 950 µm kalınlıklarındaki ince kesitli numunelerin dijital mikroskop görüntüsü.



Şekil 3.17: Silindirik kaplar ve altlarına yapıştırılmış yaşlandırılacak XLPE numuneler.



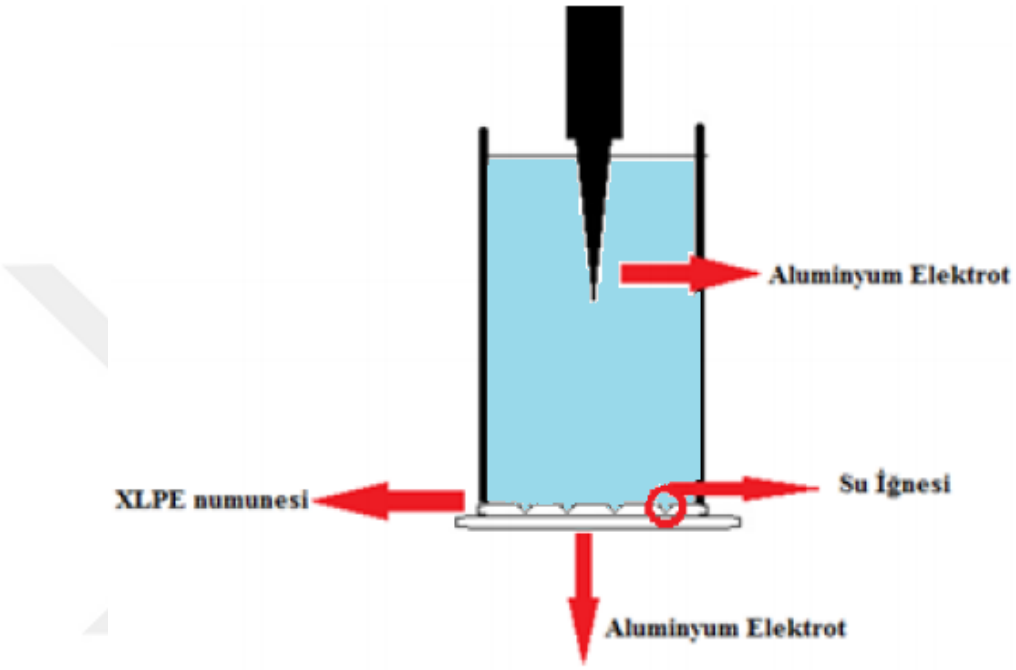
Şekil 3.18: Silindirik kaplar ve altlarına yapıştırılmış yaşlandırılacak XLPE numuneler.



Şekil 3.19: Polyamid rezervuar altına yapıştırılmış yaşlandırılacak XLPE numuneler.

XLPE numunelerin yapıştırıldığı polyamid kabın altına alüminyum tabaka yerleştirilmiştir. Numunenin tüm yüzeyi ile alüminyum tabaka arasında boşluk olmaması için alüminyum

elektrot ile numune arasına iletken jel sürülmüştür. Bu jelin iletkenliği 1169 µS/cm olarak ölçülmüştür. Şekil 3.20'de sulu ağaçlanmayı başlatıp ve büyütmek için hazırlanmış deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 3.20: Sulu ağaçlanmanın başlatıldığı ve büyütüldüğü deney düzeneği.

Su ağacı oluşturmak için hazırlanan düzenek içerisinde elektrotların malzeme cinsi önem taşımaktadır. Elektrotların malzeme cinsi sulu ağaçlanmayı etkileyecek faktörler arasındadır. Literatürde elektrotların malzeme türüne göre sulu ağaçlanmanın nasıl etkilendiğine dair bir çok çalışma mevcuttur. Elektrot malzemesi ilgili yapılan çalışmalarda, Pt ve Cu elektrotların Al, Fe ve Pb elektrotlara nispeten çözelti içerisinde daha düşük oksidasyona maruz kalmaları sebebiyle büyük olasılıkla daha fazla ağaçlanma oluşacağına değinilmiştir. Bu çalışmada, elektrot malzemesi Al seçilmiştir. Şekil 3.21'de alüminyum düzlem elektrotlar gösterilmiştir. Şekil 3.22'de alüminyum çubuk elektrot, polyamid rezervuar, iletken jel, alüminyum düzlem elektrot ve polyamid rezervuarın deney sistemi içerindeki görünümüne yer verilmiştir.



Şekil 3.21: Alüminyum düzlem elektrotlar.



Şekil 3.22: Alüminyum çubuk elektrot, polyamid rezervuar, iletken jel ve alüminyum düzlem elektrot.

3.1.3.3. Sulu Ağaçlanmanın Görüntülenmesi

Laboratuvar ortamında yaşlandırılan XLPE numuneler içerisinde oluşan su ağaçlanmasının gözlemlenebilmesi için numunelerden microtome bıçağı yardımı ile 100 µm'lik kesitler

alınmıştır. Kesitleri alırken su iğnelerinin oluşturulduğu yerden dik bir şekilde alınmasına özen gösterilmiştir. Alınan bu kesitler metilen mavisi (methylen blue) çözeltisi içerisinde 70˚C'de 4 saat bekletilmiştir. Metilen mavisi içerisinde bekletilen numuneler başka bir kap içerisindeki ılık su ile durulanmıştır. Daha sonra üzerindeki artık boya kalıntılarından kurtulmak için etanol ile hafifçe silinmiştir. Bu çalışmada, metilen mavisi ile boyamak için Shaw ve Shaw (1984) tarafından verilen ve genel kabul görmüş olan Siemens yöntemi kullanılmıştır. Şekil 3.23'te metilen mavisi boya çözeltisinin hazırlanma safhaları gösterilmiştir. Şekil 3.24'te metilen mavisi boya çözeltisinin içerisine atılan numunelerin fırına konulmasından görüntülere yer verilmiştir.

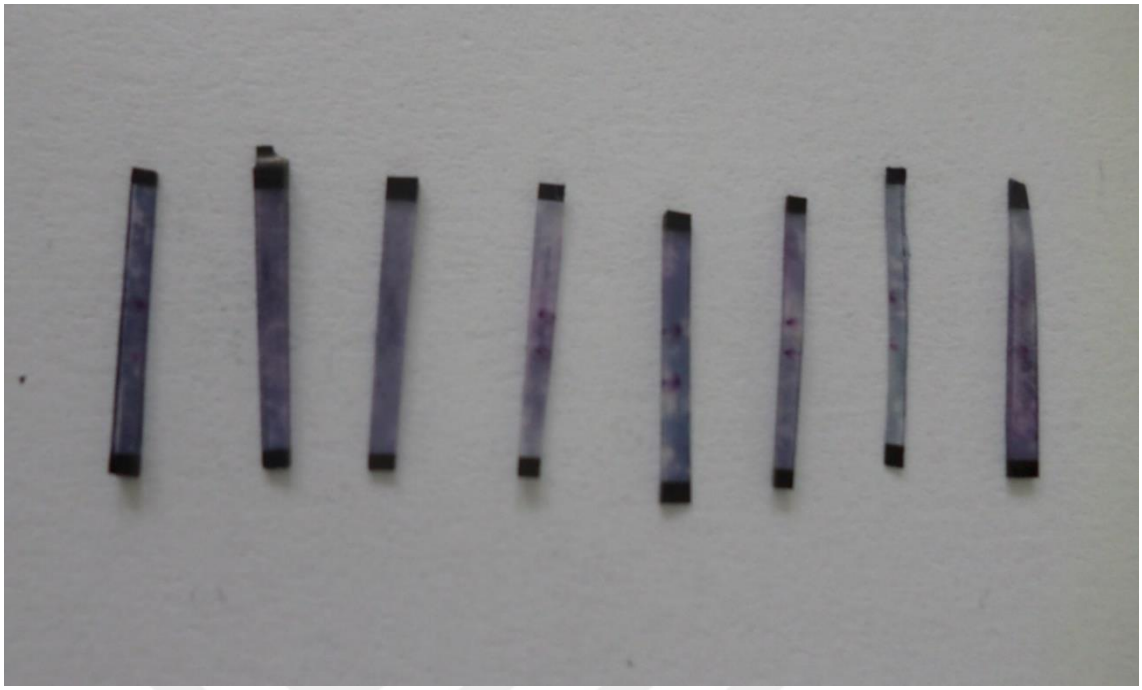


Şekil 3.23: Metilen mavisi boya çözeltisinin hazırlanma safhalarından görüntüler.



Şekil 3.24: Metilen mavisi çözeltisinin içerisine atılan numunelerin fırına konulmasından görüntüler.

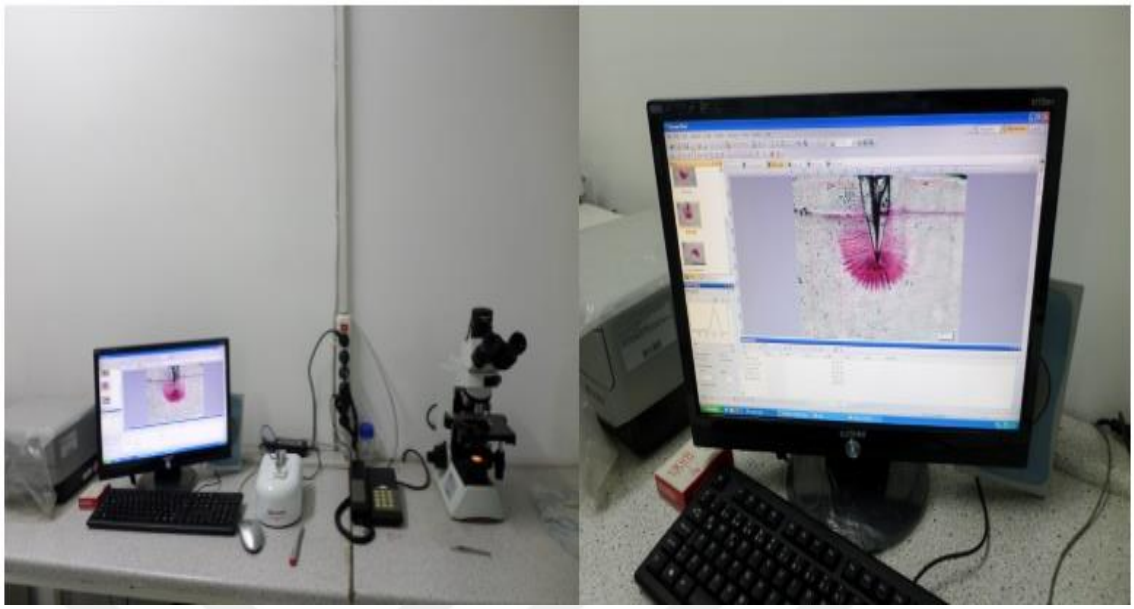
Metilen mavisi ile boyanan numunelerden görüntüler Olympus CX41 ışık mikroskobu ve Olympus SC-100 CMOS dijital kamerası yardımı ile alınmıştır. Şekil 3.25'te mikroskop altında sulu ağaçlanma görüntülerinin alınacağı metilen mavisi ile boyanmış XLPE numuneleri gösterilmiştir. Şekil 3.26'da Olympus CX41 ışık mikroskobu gösterilmiştir. Şekil 3.27'de Olympus CX41 mikroskobu ve Olympus SC-100 dijital kamerası ile görüntü alınması gösterilmiştir.



Şekil 3.25: Metilen mavisi ile boyanmış 100 µm lik yaşlandırılmış XLPE numuneleri.



Şekil 3.26: Olympus CX41 ışık mikroskobu.

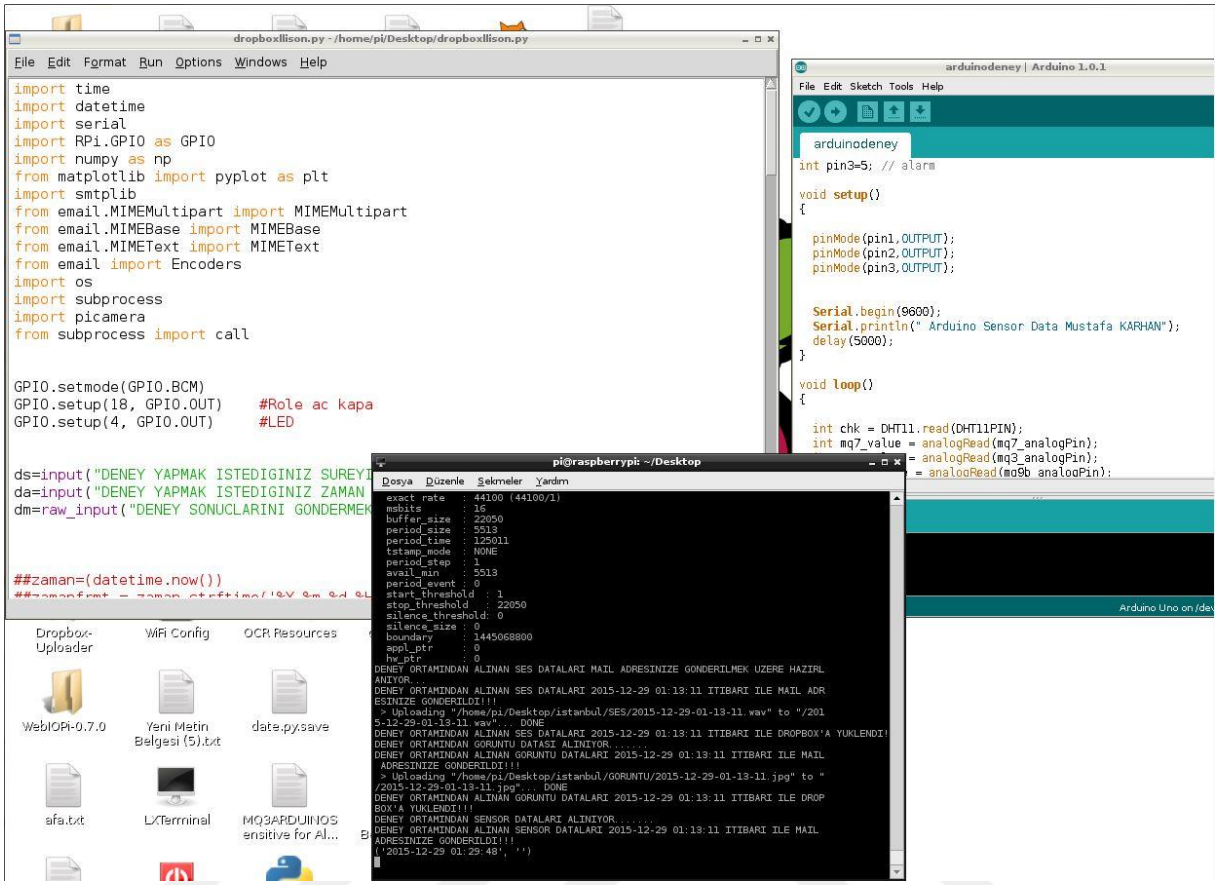


Şekil 3.27: Olympus CX41 mikroskobu ve Olympus SC-100 dijital kamerası ile görüntü alınması.

3.2. YAZILIM KISMI

3.2.1. Deneysel Sistem İçin Geliştirme Kartı Üzerinde Yazılım

Raspberry Pi üzerinden tüm donanımların kontrolünde, mikrodenetleyici üzerinden sensörlerden gelen verilerin okunmasında, ses ve görüntü verilerinin elde edilmesinde ve e-posta ile ilgiliye gönderilmesinde Python programlama dili kullanılmıştır. Mikrodenetleyici olan Arduino'da ise sensör verilerinin alımı ve sensör veri değerlerine göre sıcak ve soğuk fan kontrolünde ise sadeleştirilmiş C++ programlama dili kullanılmıştır. Şekil 3.28'de Geliştirme kiti üzerinden Python programlama dilinde yazılan kod, LXTerminalde kodun ekran çıktısına ve Arduino IDE üzerinde sadeleştirilmiş C++ kod görüntülerine yer verilmiştir.



Şekil 3.28: Python programlama dilinde yazılan kod, LXTerminalde kodun ekran çıktısına ve Arduino IDE üzerinde sadeleştirilmiş C++ kod görüntüleri.

3.2.2. Deney Sistemi İçin Geliştirme Kartı Dışında Yazılım

Bu bölümde deney sisteminden toplanan veriler, MATLAB yardımıyla işlenmiştir. Görüntü işleme bölümünde ise deneyle yaşlandırılmış XLPE numunelerden ince kesitler alınıp metilen mavisi ile boyandıktan sonra ışık mikroskobundan alınan görüntüler işlenmiştir.

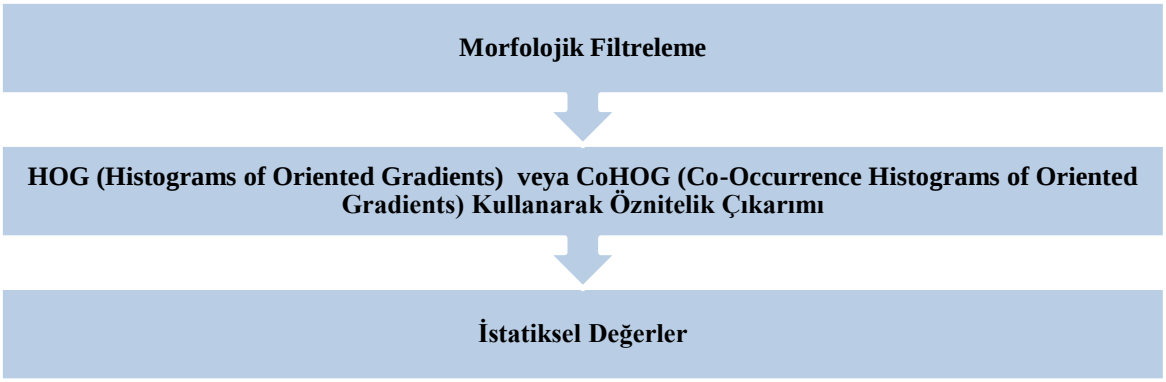
3.2.2.1. Görüntü İşleme

Görüntü işleme bölümünde öznitelik çıkarma aşamasında üç algoritma kullanılmıştır. Bunlar MFCC, HOG ve CoHOG algoritmalardır. MFCC, HOG ve CoHOG algoritmaları hakkında detaylı bilgi genel kısımlar bölümünde verilmiştir. Öznitelik çıkarma işlemi yapılmadan önce metilen mavisi kaynaklı oluşan yanılsama görüntüleri ve anlamsız bölgeleri elemine etmek için morfolojik görüntü işleme teknikleri kullanılmış ve görüntü iyileştirilmiştir. MFCC tekniği ile öznitelik çıkarma işlemi ses işlemede yaygın olarak kullanılan bir tekniktir fakat son yıllarda bazı çalışmalarda görüntü işleme tabanlı çalışmalarda da öznitelik çıkarmak için kullanıldığı

görülmüştür. Şekil 3.29'da MFCC tekniği kullanarak öznitelik çıkarımı ve istatiksel değerlerin elde edilmesi için yapılacak işlemler verilmiştir. Şekil 3.30'da HOG ve CoHOG tekniklerini kullanarak öznitelik çıkarma ve istatiksel değerlerin elde edilmesi için yapılacak işlemler verilmiştir.



Şekil 3.29: MFCC tekniği kullanarak öznitelik çıkarımı ve istatiksel değerlerin elde edilmesi.



Şekil 3.30: HOG ve CoHOG tekniklerini kullanarak öznitelik çıkarma ve istatiksel değerlerin elde edilmesi.

4. BULGULAR

4.1. DENEYSEL SONUÇLAR

Yelpaze sulu ağaçlanma deneyleri gerçekleştirilirken çözelti molaritesi, çözelti iletkenliği, elektrik alan, frekans ve yaşlandırma süresi faktörleri ele alınmıştır. Bu ağaçlanmaya etki edebilecek faktörleri göz önünde bulundurarak deneyler gerçekleştirilmiştir fakat sadece farklı yaşlandırma süreleri ve farklı elektrik alan şiddetleri için sulu ağaçlanma, görüntü işleme teknikleri ile incelenmiştir. Görüntü işlemeye esas olan yelpaze sulu ağaçlanma deneylerinde öncelikle ağaçlanmaya doğrudan etki edebilecek tüm parametreler sabit tutulmuş sadece deney (yaşlandırma) süreleri ve elektrik alan şiddetleri farklı kılınmıştır. Farklı yaşlandırma süreleri ve elektrik alan şiddetleri için laboratuvar ortamında numuneler yaşlandırılmıştır. Yaşlandırılan numunelerden alınan ince kesitler metilen mavisi ile boyanmıştır. Boyanan numunelerden sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri elde edilmiş ve bu görüntüler daha sonra görüntü işleme teknikleriyle analiz edilmiştir.

4.1.1. Farklı Yaşlandırma Süreleri İçin Sulu Ağaçlanma

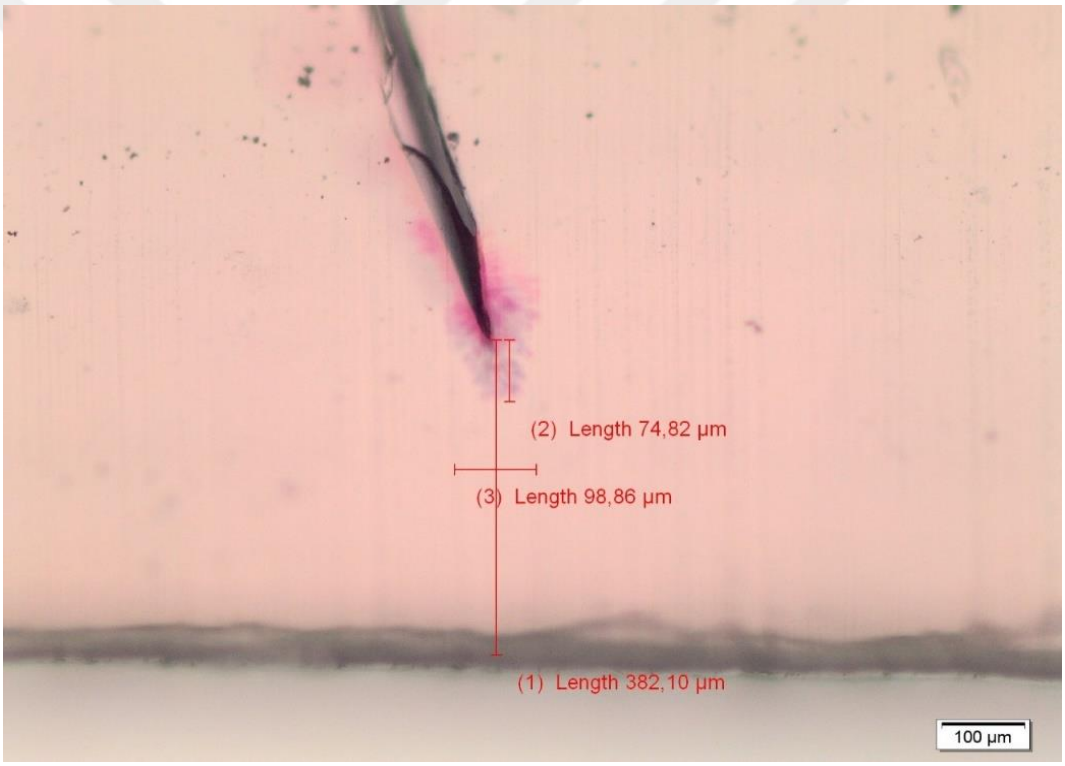
Yaşlandırma süresinin yelpaze sulu ağaçlanmaya etkisini analiz edebilmek için aynı XLPE kablolardan numuneler alınmıştır. Alınan numunelerde su iğneleri oluşturulmuştur. Elektrik alanının etkisini sabit tutmak adına su iğnesi ile alüminyum elektrot arası mesafe 350 µm ±100 µm olan numuneler seçilmiştir. Eğrilik yarıçapının da elektrik alanını değiştiren bir parametre olmasından ötürü su iğnesi oluşturulurken dikkat edilmiştir.

Yaşlandırma süreleri 2 saat ve 10 saat seçilmiş, bunun haricinde sulu ağaçlanmaya etki edebilecek tüm faktörler (elektrik alan, frekans, bağıl nem, ortam basıncı, çözeltinin cinsi, çözeltinin molaritesi, çözeltinin iletkenliği ve çözeltinin pH değeri) sabit tutulmuştur. Deney ortam parametreleri aşağıda belirtilmiştir.

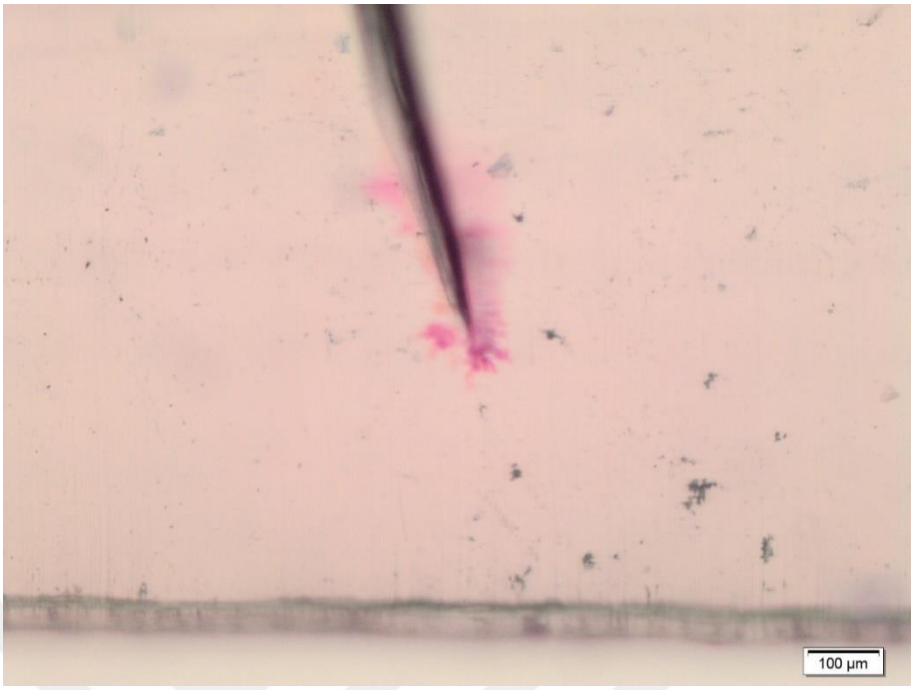
- Uygulama süresi: 2 saat ve 10 saat
- Uygulanan gerilim ve frekans: 6 kV - 4 kHz
- Deney ortam sıcaklığı: 21 ºC ∓ 1.5 ºC
- Bağıl nem: %47.7 RH ∓ 2 RH
- Ortam basıncı: 930 hPa

- Çözelti cinsi, molaritesi ve iletkenliği: NaCl, 2 M, 147.1 mS/cm

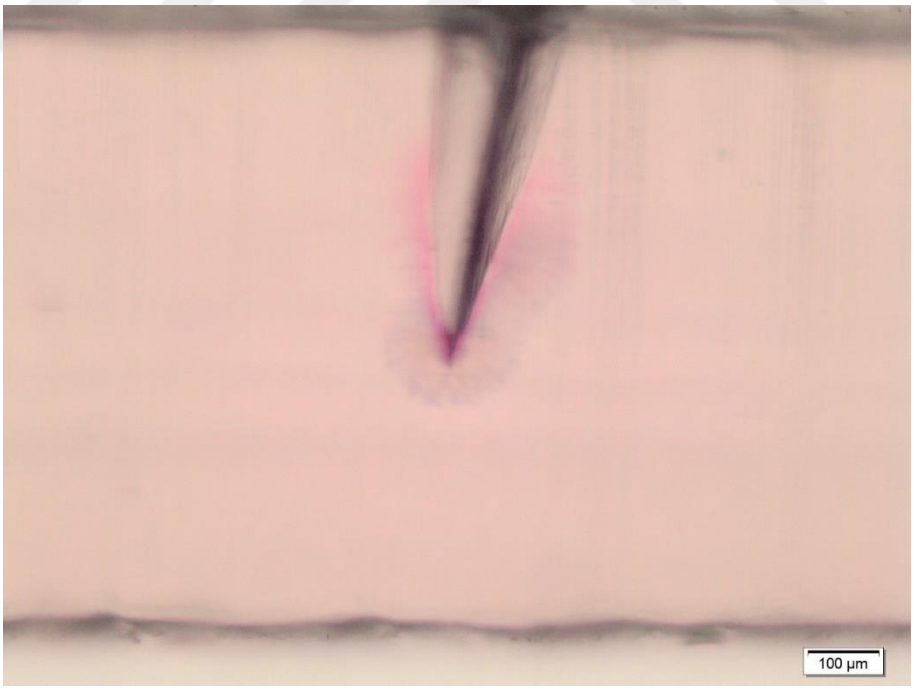
Şekil 4.1'de 2 saat yaşlandırma süresi sonunda Olympus CX41 ışık mikroskobu ile alınan yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü üzerinde ağacın uzunluğu, ağacın genişliği ve su iğnesi ile elektrot arası mesafe ölçümleri verilmiştir. Şekil 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5'te 2 saat yaşlandırma süresi sonunda Olympus CX41 ışık mikroskobu ile alınan farklı ölçeklerdeki yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (147.1 mS/cm & 2 M & 2 Saat & 4 kHz & 6 kV) verilmiştir.



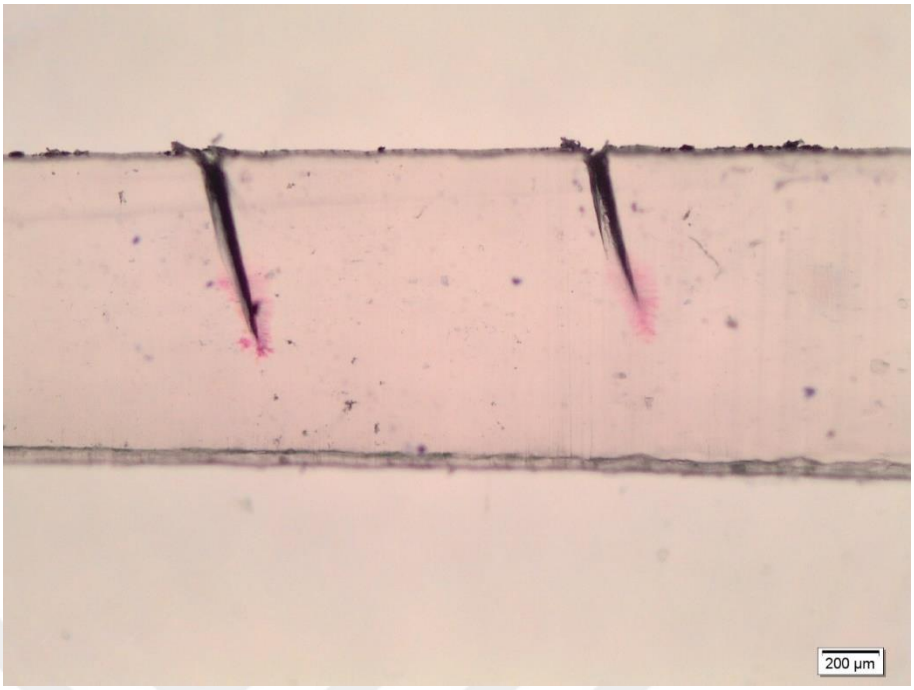
Şekil 4.1: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü üzerinde ağaç uzunluk, genişlik ve iğne – elektrot arası mesafe ölçümleri (2 saat yaşlandırma süresi sonunda).



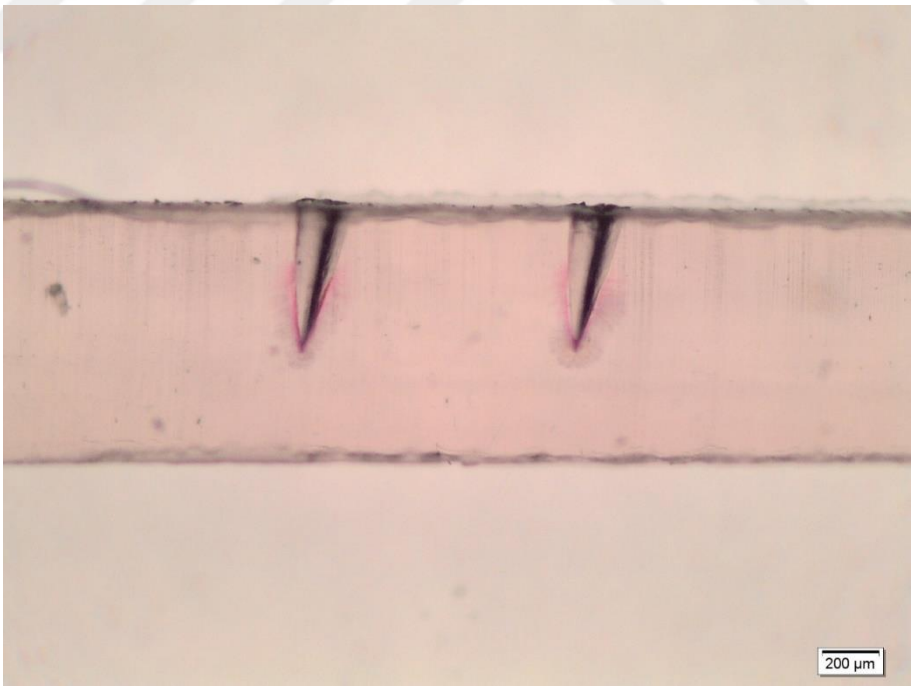
Şekil 4.2: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü (2 saat yaşlandırma süresi sonunda).



Şekil 4.3: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü (2 saat yaşlandırma süresi sonunda).

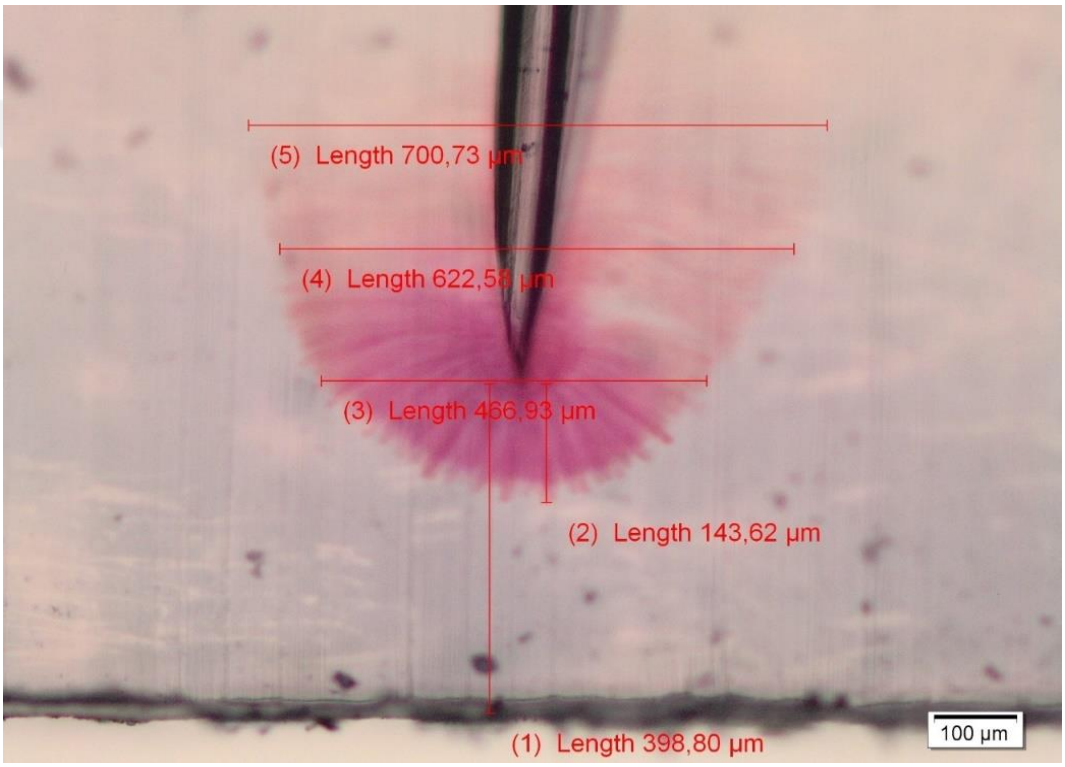


Şekil 4.4: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü (2 saat yaşlandırma süresi sonunda).



Şekil 4.5: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü (2 saat yaşlandırma süresi sonunda).

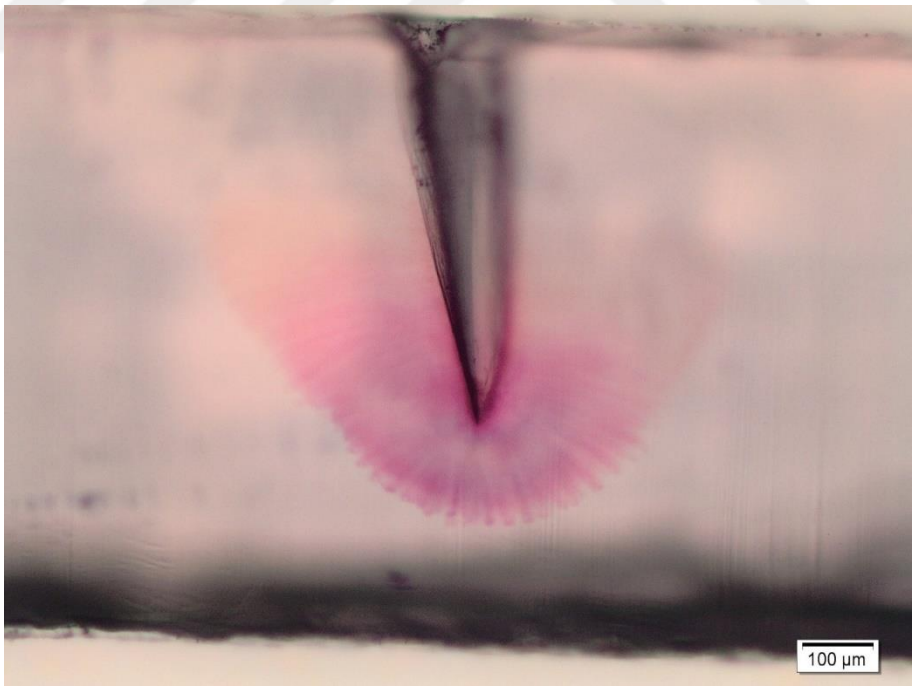
Şekil 4.6’da 10 saat yaşlandırma süresi sonunda Olympus CX41 ışık mikroskobu ile alınan yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü üzerinde ağacın uzunluğu, ağacın genişliği ve su iğnesi ile elektrot arası mesafe ölçümleri verilmiştir. Şekil 4.7, 4.8, 4.9 ve 4.10’da 10 saat yaşlandırma süresi sonunda Olympus CX41 ışık mikroskobu ile alınan farklı ölçeklerdeki yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (147.1 mS/cm & 2 M & 10 Saat & 4 kHz & 6 kV) verilmiştir.



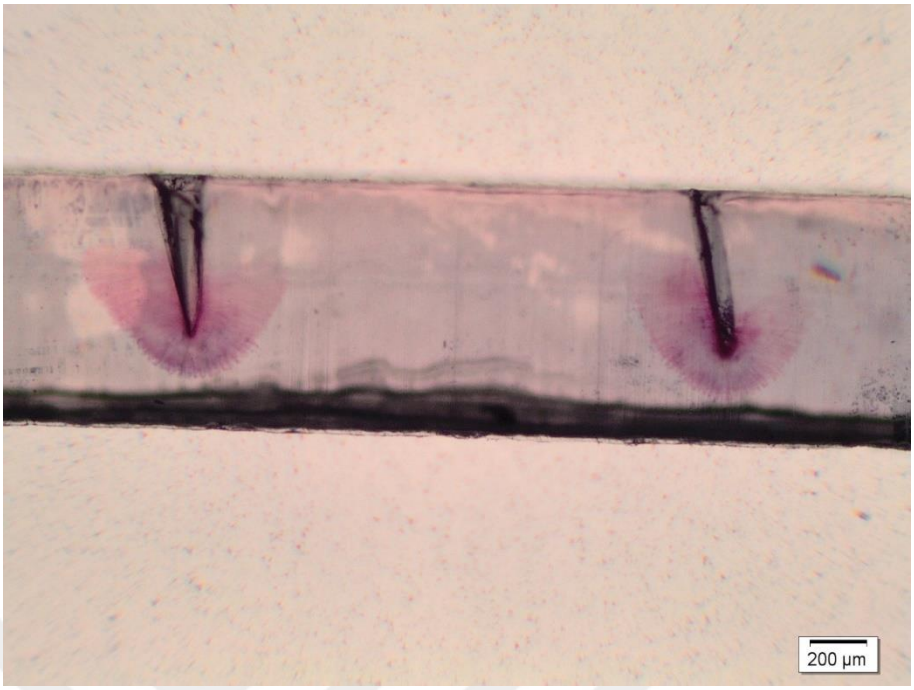
Şekil 4.6: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü üzerinde ağaç uzunluk, genişlik ve iğne – elektrot arası mesafe ölçümleri (10 saat yaşlandırma süresi sonunda).



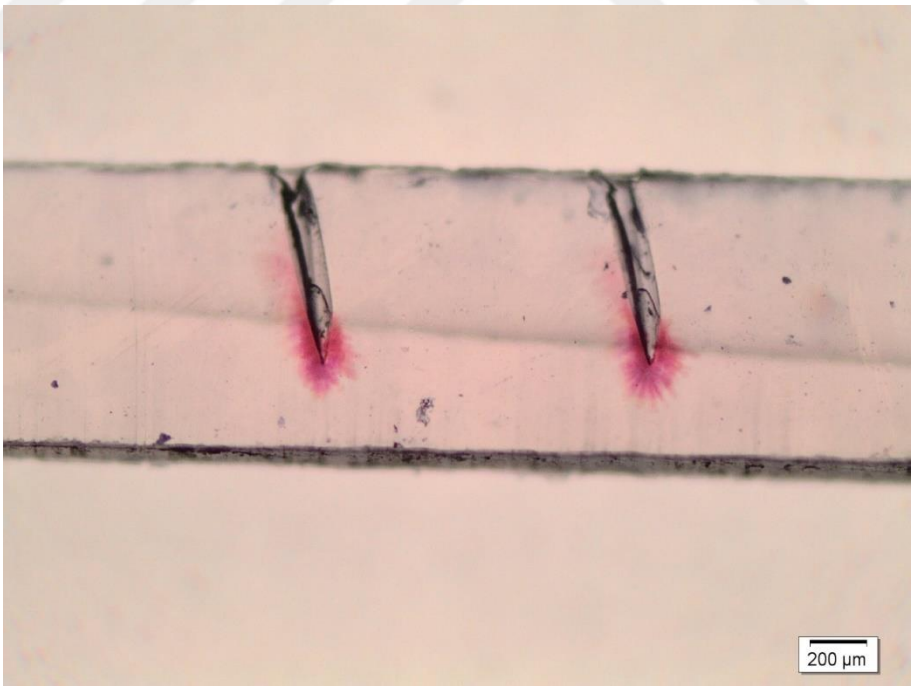
Şekil 4.7: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü (10 saat yaşlandırma süresi sonunda).



Şekil 4.8: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü (10 saat yaşlandırma süresi sonunda).

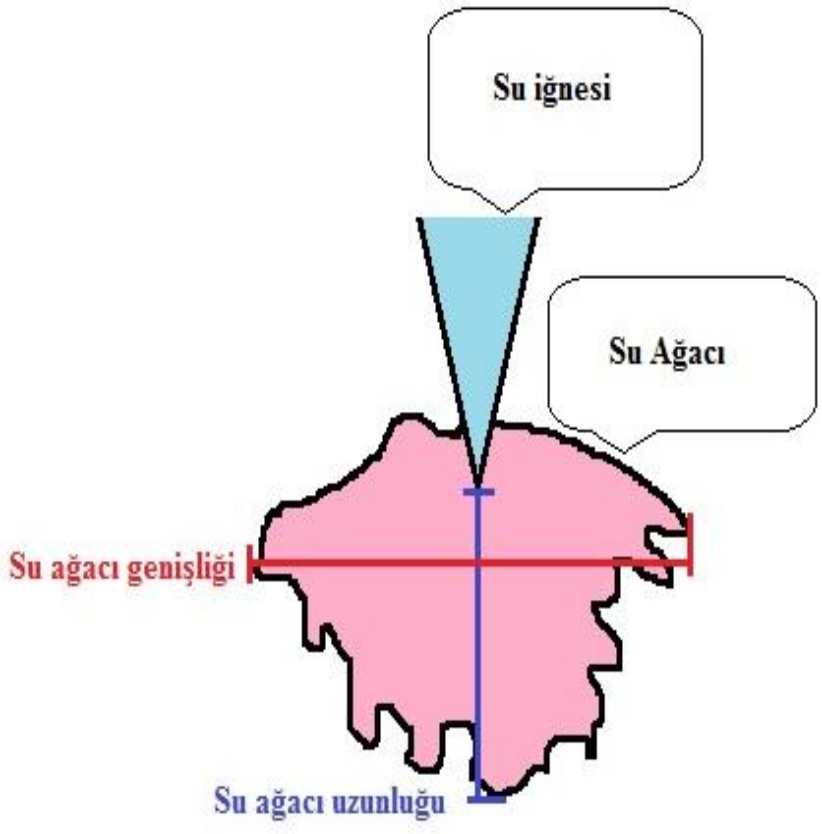


Şekil 4.9: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü (10 saat yaşlandırma süresi sonunda).

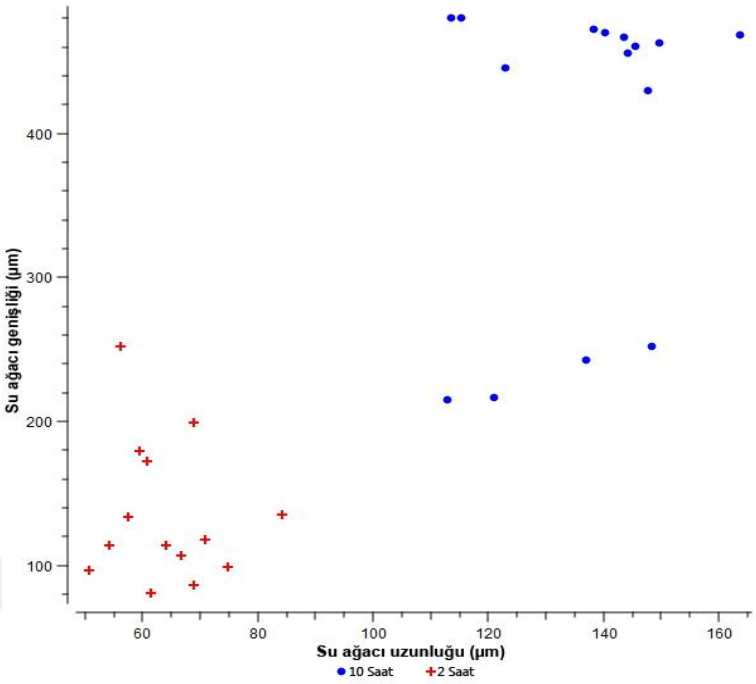


Şekil 4.10: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü (10 saat yaşlandırma süresi sonunda).

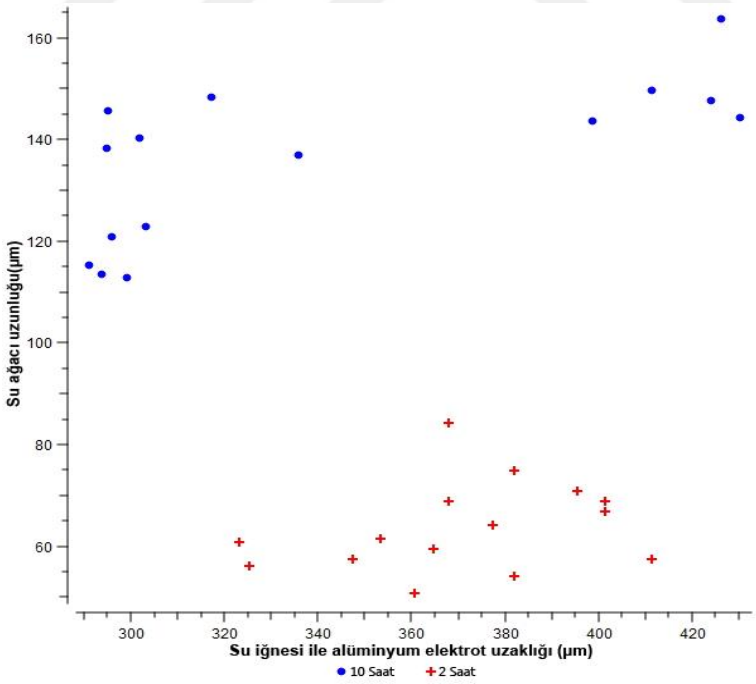
Su ağacının uzunluk ve genişlik değerleri ölçümü alınırken Şekil 4.11'deki ölçüm şekli referans alınmıştır. Yukarıda verilen deney parametreleri dahilinde başlayıp büyüyen yelpaze su ağaçlarının sırasıyla su ağacı uzunluğu - su ağacı genişliği, su iğnesi ile alüminyum elektrot uzaklığı - su ağacı uzunluğu ve su iğnesi ile alüminyum elektrot uzaklığı - su ağacı genişliği μm cinsinden saçılım grafikleri Şekil 4.12, 4.13 ve 4.14'te verilmiştir.



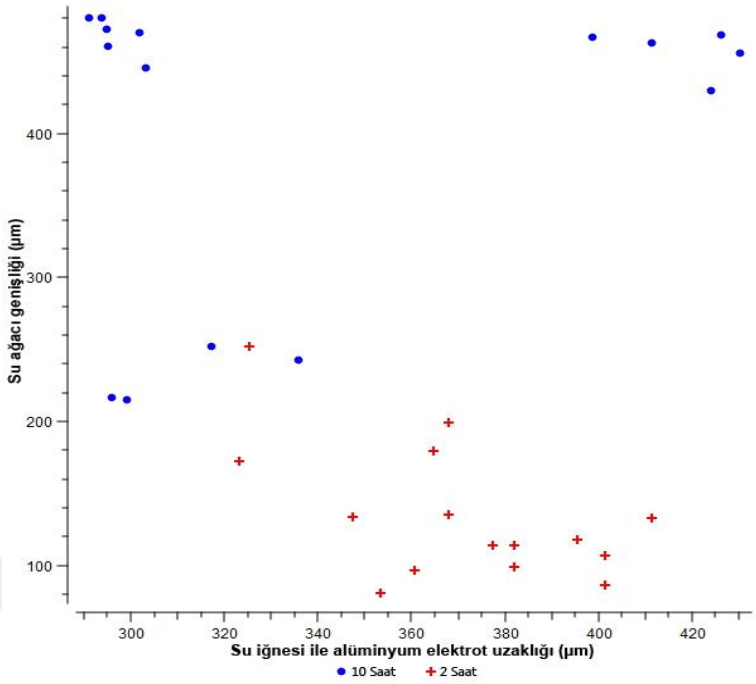
Şekil 4.11: Su ağacı referans ölçüm şekli.



Şekil 4.12: Su ağacı uzunluğu (µm) - su ağacı genişliği (µm).



Şekil 4.13: Su iğnesi ile alüminyum elektrot uzaklığı (µm) - su ağacı uzunluğu (µm).



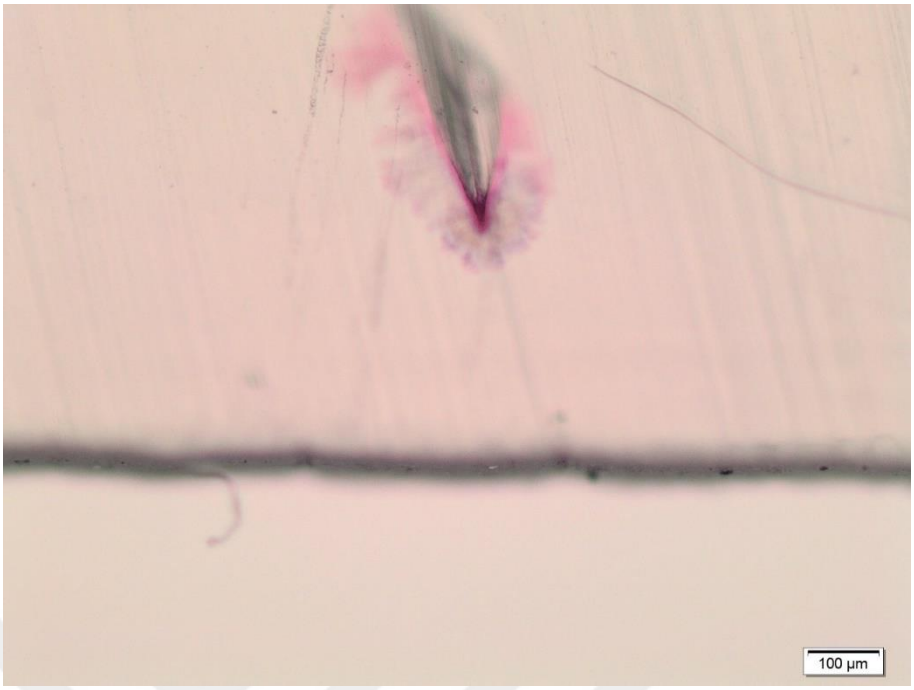
Şekil 4.14: Su iğnesi ile alüminyum elektrot uzaklığı (µm) - su ağacı genişliği (µm).

4.1.2. Farklı Elektrik Alanı Şiddetlerinde Sulu Ağaçlanma

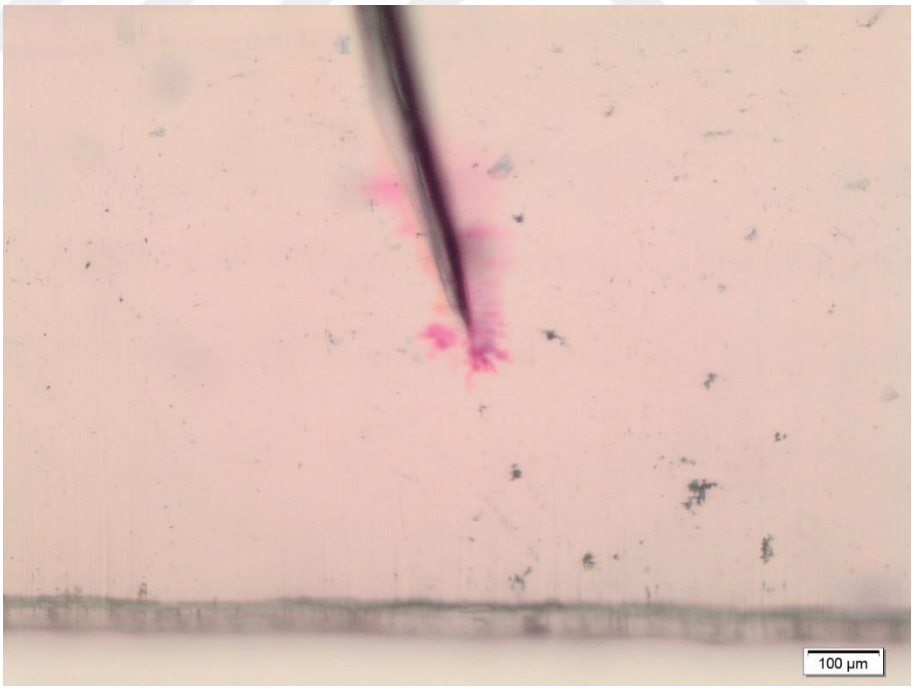
Elektrik alanının yelpaze sulu ağaçlanmaya etkisini gözlemleyebilmek için aynı gerilimde ve aynı frekansta farklı su iğnesi ile alüminyum elektrot arası mesafelerde oluşan yelpaze su ağaçlarının mikroskop görüntüleri alınmıştır. XLPE kablodan alınan numunelerde su iğneleri oluşturulmuştur. Elektrik alanının sulu ağaçlanmaya etkisini inceleyebilmek için su iğnesi ile alüminyum elektrot mesafesi dışında sulu ağaçlanmayı etkileyecek diğer tüm parametreler sabit tutulmuştur. Deney ortam parametreleri aşağıda belirtilmiştir.

- Uygulama süresi: 2 saat
- Uygulanan gerilim ve frekans: 6 kV - 4 kHz
- Deney ortam sıcaklığı: 21 ºC ∓ 1 ºC
- Bağıl nem: %47.7 RH ∓ 2 RH
- Ortam basıncı: 930 hPa
- Çözelti cinsi, molaritesi ve iletkenliği: NaCl, 2 M, 147.1 mS/cm

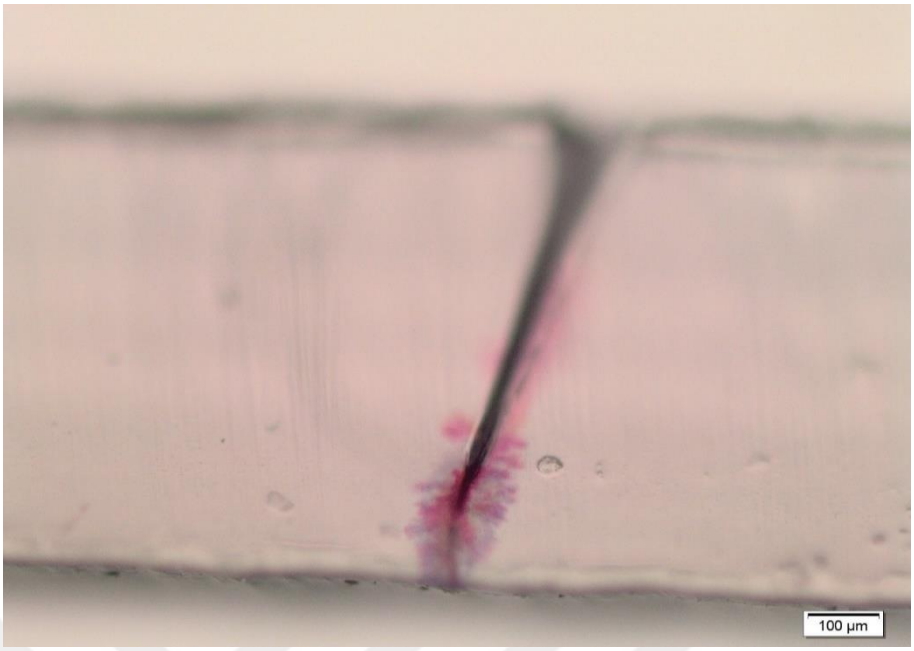
Şekil 4.15, 4.16 ve Şekil 4.17'de 2 saat yaşlandırma süresi sonunda farklı elektrik alanı değerleri için Olympus CX41 ışık mikroskobu ile alınan yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (147.1 mS/cm & 2 M & 2 Saat & 4 kHz & 6 kV) verilmiştir.



Şekil 4.15: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü.

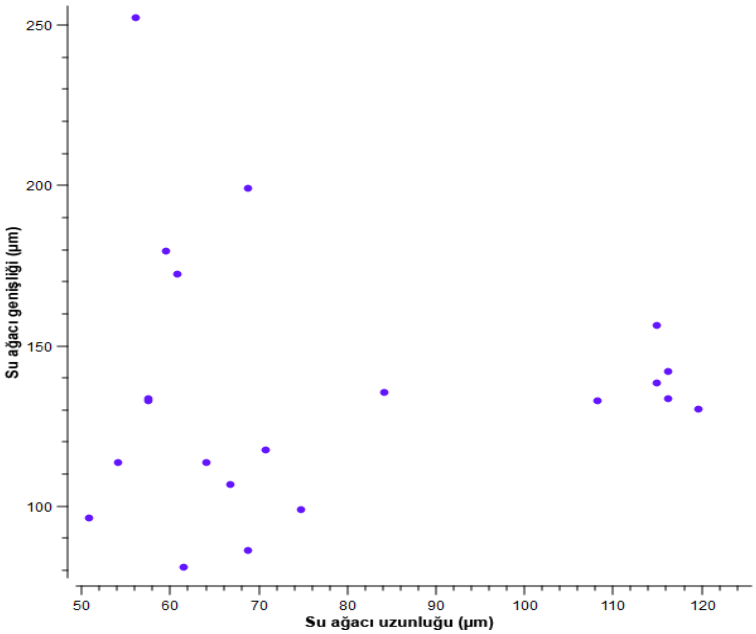


Şekil 4.16: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü.

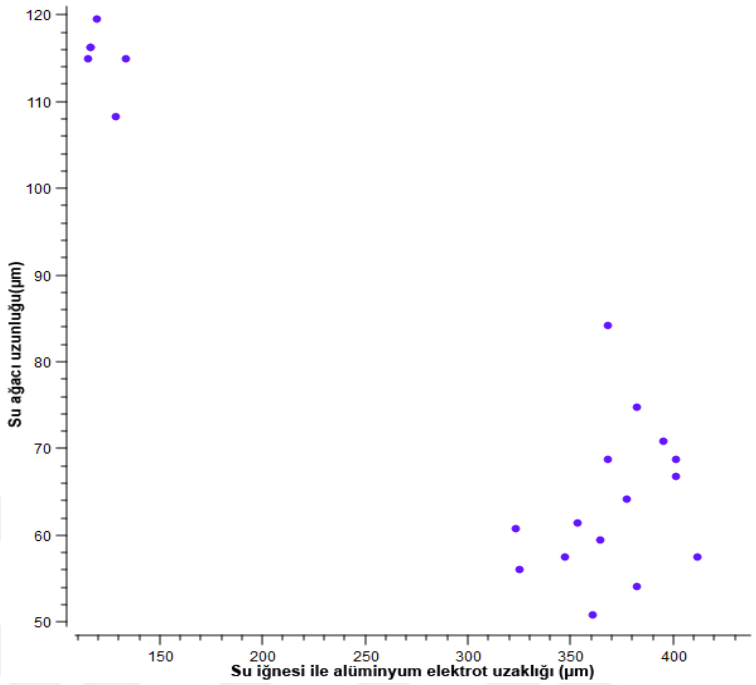


Şekil 4.17: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüsü.

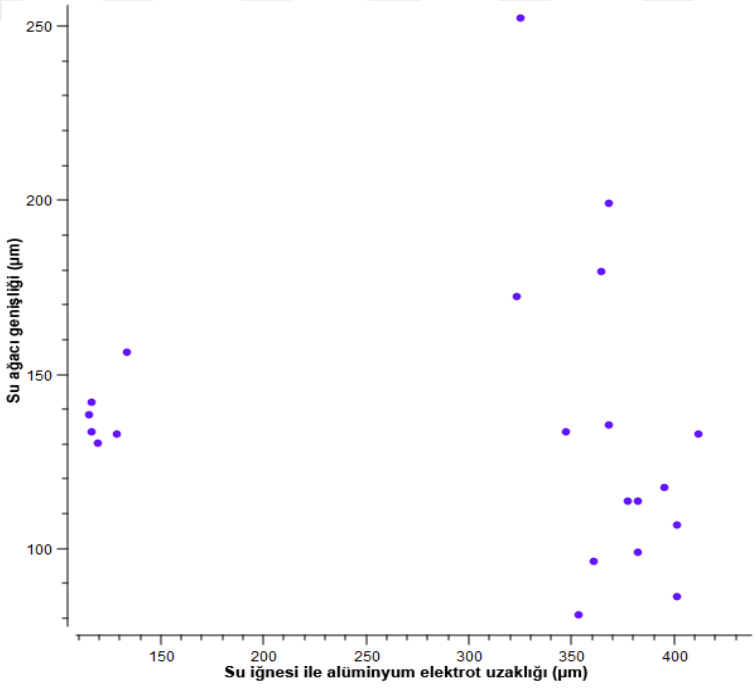
Yukarıda verilen deney parametreleri dahilinde oluşan yelpaze su ağaçlarının sırasıyla su ağacı uzunluğu - su ağacı genişliği, su iğnesi ile alüminyum elektrot uzaklığı - su ağacı uzunluğu ve su iğnesi ile alüminyum elektrot uzaklığı - su ağacı genişliği µm cinsinden saçılım grafikleri Şekil 4.18, 4.19 ve 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.18: Su ağacı uzunluğu (µm) - su ağacı genişliği (µm).



Şekil 4.19: Su iğnesi ile alüminyum elektrot uzaklığı (µm) - su ağacı uzunluğu (µm).



Şekil 4.20: Su iğnesi ile alüminyum elektrot uzaklığı (µm) - su ağacı genişliği (µm).

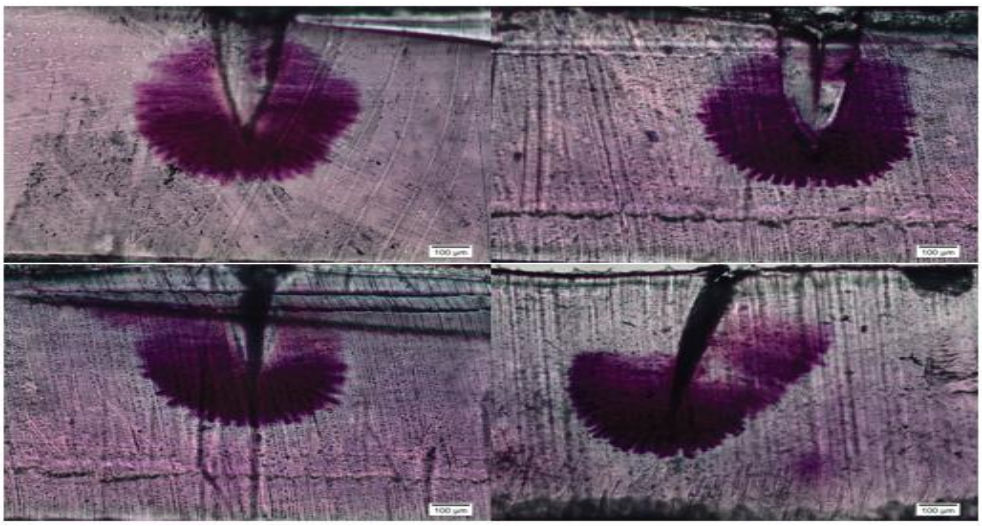
4.1.3. Farklı Deney Parametrelerinde Başlayıp Büyüyen Yelpaze Sulu Ağaçlanma

Yelpaze sulu ağaçlanmaya çözelti molaritesi, çözelti iletkenliği, frekans, elektrik alan ve yaşlandırma süresi gibi faktörlerin etkilerini gözlemleyebilmek için bu faktörlerin değerleri değiştirilerek laboratuvar ortamında sulu ağaçlanmalar üretilmiştir.

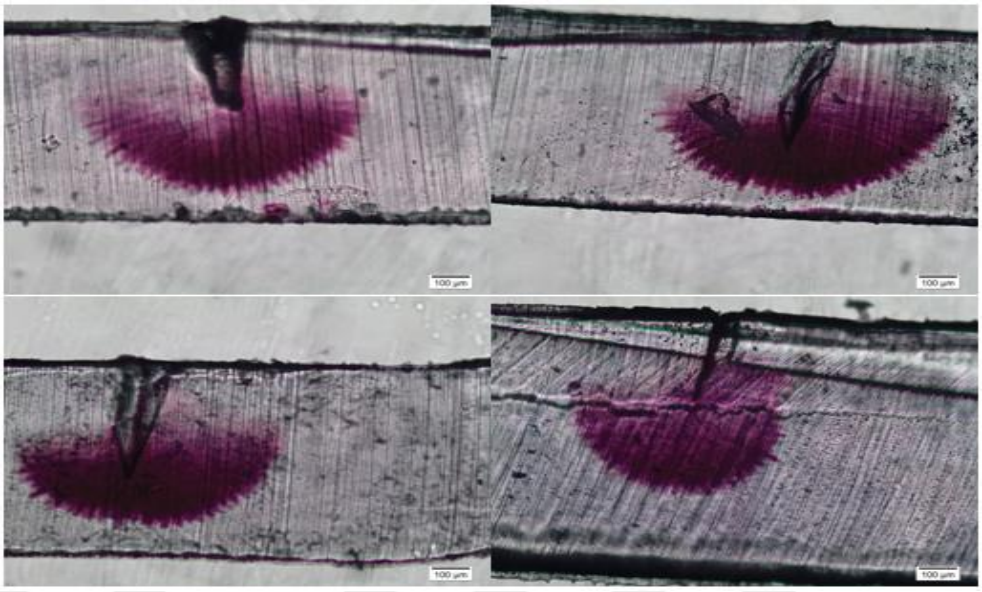
84.2 mS/cm ve 109.9 mS/cm iletkenliklere sahip NaCl çözeltilerinde aşağıda verilen deney parametreleri dahilinde yelpaze sulu ağaçlanma üretilmiştir.

- Uygulama süresi: 24 saat
- Uygulanan gerilim ve frekans: 24 kV_{pp} – 3 kHz
- Bağıl nem: % 43 RH ∓ 4 RH
- Ortam sıcaklığı: 22.5 ˚C ∓ 2.5 ºC
- Ortam basıncı: 929.93 hPa (0.917769 atm)
- Çözelti cinsi, molaritesi ve iletkenliği: NaCl, 1 M-1.4 M, 84.2 mS/cm ve 109.9 mS/cm

Laboratuvar ortamında yaşlandıran numunelerden alınan kesitler metilen mavisi ile boyandıktan sonra oluşan su ağacı mikroskop görüntüleri elde edilmiştir. Şekil 4.21'de 1 M NaCl çözelti için yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (24 kV_{pp}, 3 kHz, 24 saat, 1 M, 84.2 mS/cm) verilmiştir. Şekil 4.22'de 1.4 M NaCl çözelti için yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (24 kV_{pp}, 3 kHz, 24 saat, 1.4 M, 109.9 mS/cm) verilmiştir.



Şekil 4.21: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (24 kV_{pp}, 3 kHz, 24 saat, 1 M, 84.2 mS/cm).

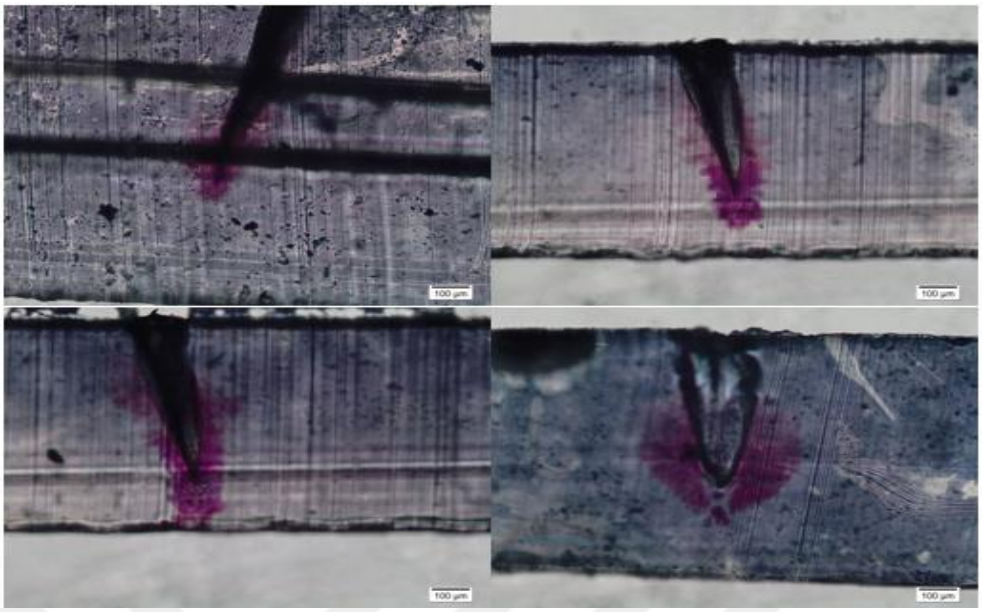


Şekil 4.22: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (24 kV_{pp}, 3 kHz, 24 saat, 1.4 M, 109.9 mS/cm).

84,2 mS/cm iletkenliğe sahip NaCl çözeltisinde aşağıda verilen deney parametreleri dahilinde yelpaze sulu ağaçlanma üretilmiştir.

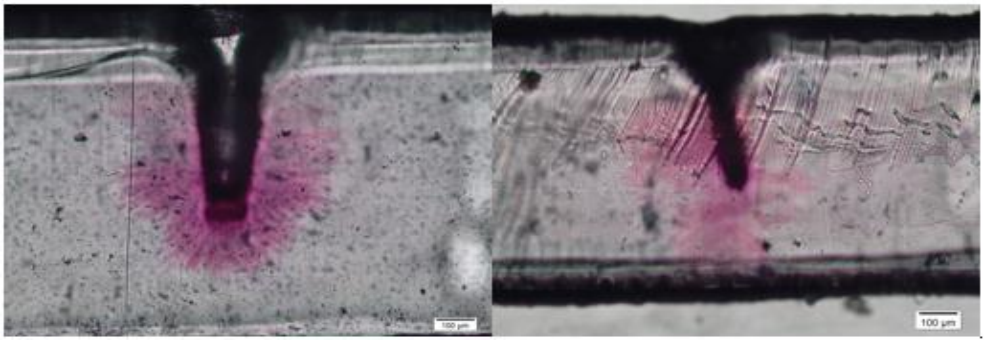
- Uygulama süresi: 6 saat
- Uygulanan gerilim ve frekans: 24 kV_{pp} – 3 kHz
- Bağıl nem: % 50.3 RH ∓ 2 RH
- Ortam sıcaklığı: 22.5 ˚C ∓ 1.5 ˚C
- Çözelti cinsi, molaritesi ve iletkenliği: NaCl, 1 M, 84.2 mS/cm

Şekil 4.23'te 1 M NaCl çözelti ve 6 saat yaşlandırma süresi için yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (24 kV_{pp}, 3 kHz, 6 saat, 1 M, 84.2 mS/cm) verilmiştir.



Şekil 4.23: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (24 kV_{pp}, 3 kHz, 6 saat, 1 M, 84.2 mS/cm).

Şekil 4.24'te yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (0.85 M, 24 kV_{pp}, 5 kHz, 24 Saat) verilmiştir. Gerçekleştirilen bu deneyde su iğnesi diğer deneylerdeki su iğnelerinden farklı bir uç açısına ve geometriye sahip olarak seçilmiştir.



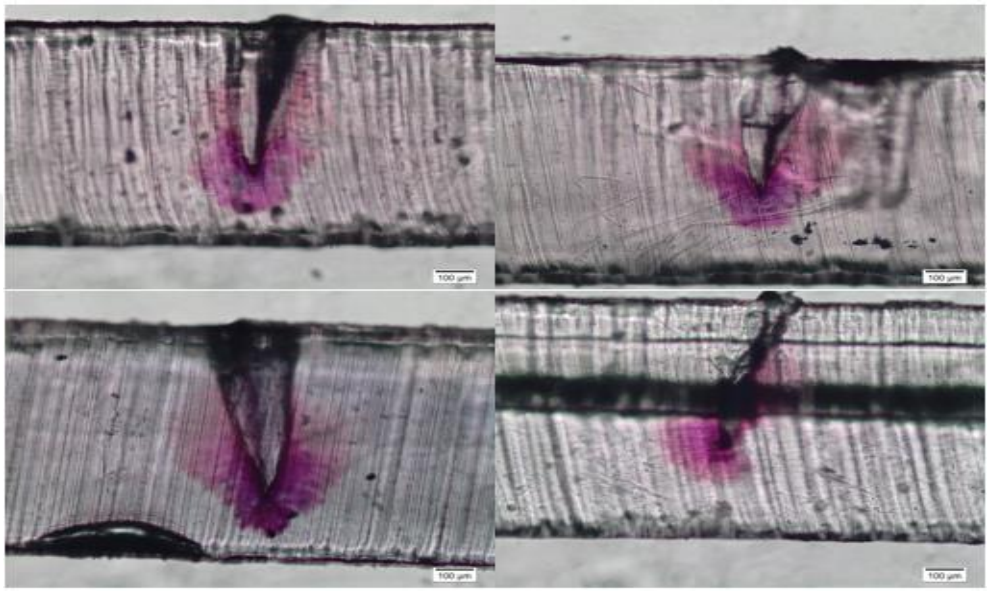
Şekil 4.24: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (24 kV_{pp}, 5 kHz, 24 saat, 0.85 M).

37.5 mS/cm ve 53 mS/cm iletkenliklere sahip NaCl çözeltilerinde aşağıda verilen deney parametreleri dahilinde yelpaze sulu ağaçlanma üretilmiştir.

- Uygulama süresi: 12 saat
- Uygulanan gerilim ve frekans: 24 kV_{pp} – 3 kHz

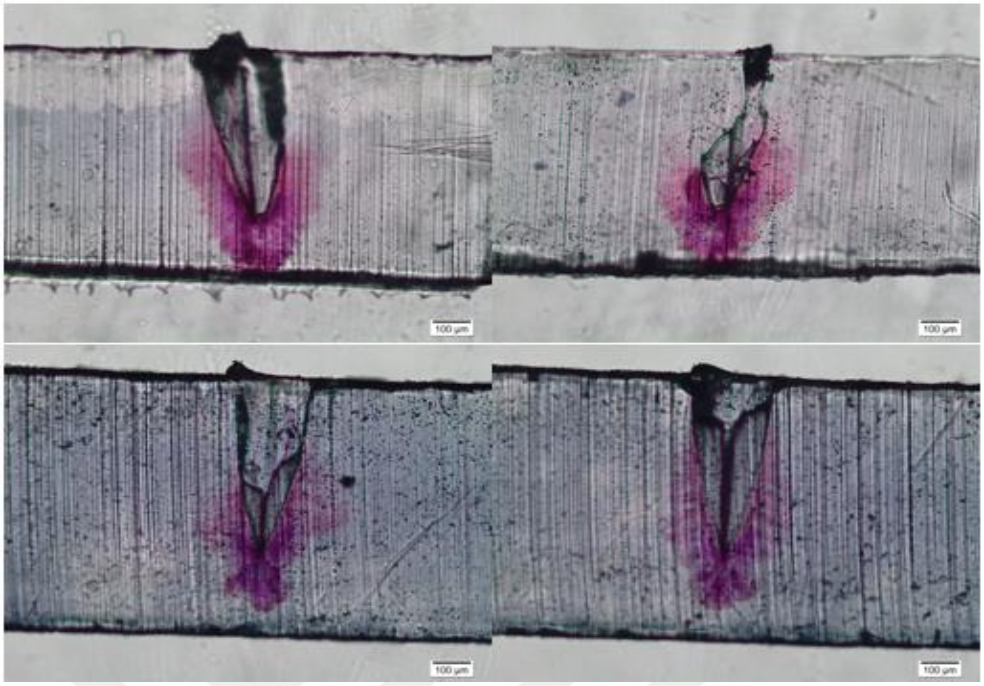
- Bağıl nem: % 50 RH ∓ 3 RH
- Ortam sıcaklığı: 21.5˚C ∓ 1.5 ˚C
- Çözelti cinsi, molaritesi ve iletkenliği: NaCl, 0.4 M – 0.6 M, 37.5 mS/cm ve 53 mS/cm

Şekil 4.25'te 0.4 M NaCl çözelti ve 12 saat yaşlandırma süresi için yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (24 kV_{pp}, 3 kHz, 12 saat, 0.4 M, 37.5 mS/cm) verilmiştir.



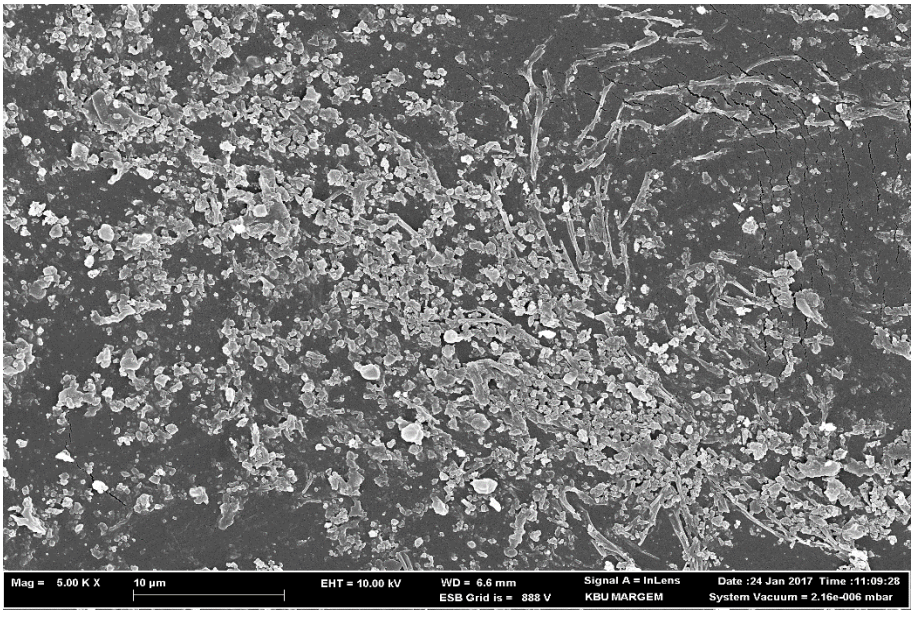
Şekil 4.25: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (24 kV_{pp}, 3 kHz, 12 saat, 0.4 M, 37.5 mS/cm).

Şekil 4.26'da 0.6 M NaCl çözelti ve 12 saat yaşlandırma süresi için yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (24 kV_{pp}, 3 kHz, 12 saat, 0.6 M, 53 mS/cm) verilmiştir.

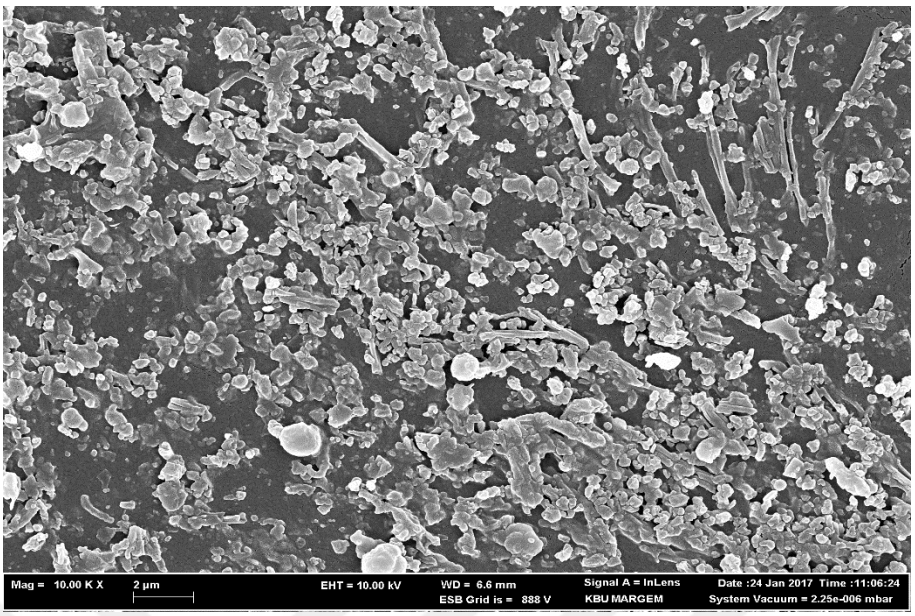


Şekil 4.26: Yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri (24 kV_{pp}, 3 kHz, 12 saat, 0.6 M, 53 mS/cm).

Şekil 4.27 ve 4.28'de yelpaze sulu ağaçlanmanın farklı ölçeklerde SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.27: Yelpaze sulu ağaçlanma SEM görüntüsü (5000X).



Şekil 4.28: Yelpaze sulu ağaçlanma SEM görüntüsü (10000X).

4.2. YELPAZE SULU AĞAÇLANMANIN GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ İLE İNCELENMESİ

Değişik parametreler altında başlatılıp büyütülen yelpaze su ağacı mikroskop görüntülerinin MFCC, HOG ve CoHOG algoritmaları yardımıyla öznitelikleri çıkartılmadan önce morfolojik filtreleme yardımıyla anlamsız bölgelerden temizlenmiştir. Bu ön işlem sonrası görüntünün kepstral katsayıları, yönlü gradyanların histogramları ve eş oluşum yönlü gradyanların histogramları çıkartılmıştır. Son olarak bu özniteliklerin istatiksel değerleri analiz edilmiştir.

4.2.1. Farklı Yaşlandırma Sürelerinde Sulu Ağaçlanma Analizi

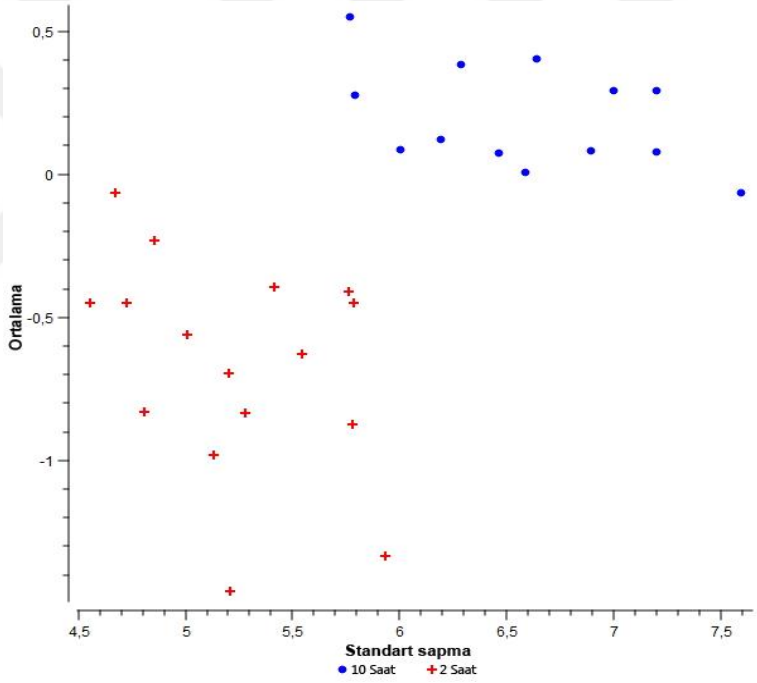
Sulu ağaçlanmayı doğrudan etkileyebilecek tüm faktörler sabit ve aynı değerlerde tutulmuştur. Bu parametrenin etkisini incelemede en büyük sorunu teşkil edebilecek elektrik alan şiddetinin etkisini bütün numunelerde aynı tutmak adına XLPE kablolardan alınan numunelerde su iğnesi ile alüminyum elektrot arası mesafe 350 µm ±100 µm olan numuneler seçilmiştir. Deney ortam parametreleri aşağıda belirtilmiştir.

- Uygulama süresi: 2 saat - 10 saat
- Uygulanan gerilim ve frekans: 6 kV- 4 kHz
- Deney ortam sıcaklığı: 21 ºC ∓ 1.5 ºC

- Bağıl nem: %47.7 RH ∓ 2 RH
- Ortam basıncı: 930 hPa
- Çözelti cinsi, molaritesi ve iletkenliği: NaCl, 2 M, 147.1 mS/cm

4.2.1.1. Mel Frekans Kepstral Katsayıları (*MFCC*)

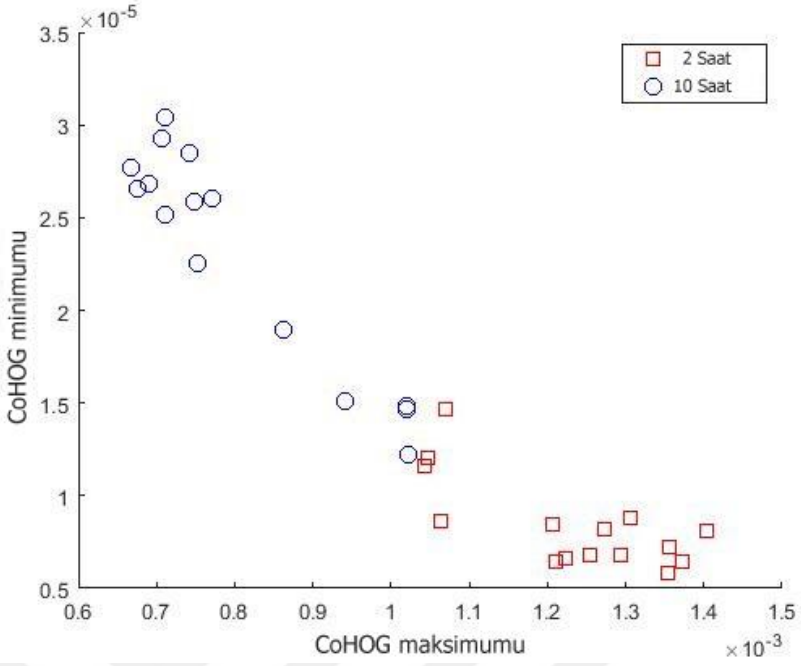
2 saat ve 10 saat yaşlandırma süresi sonunda elde edilen yelpaze sulu ağaçlanma görüntülerinin kepstral katsayıları çıkartılmıştır. Çıkartılan kepstral katsayıların standart sapmaları ve ortalama değerlerine ilişkin saçılım grafikleri Şekil 4.29'da verilmiştir



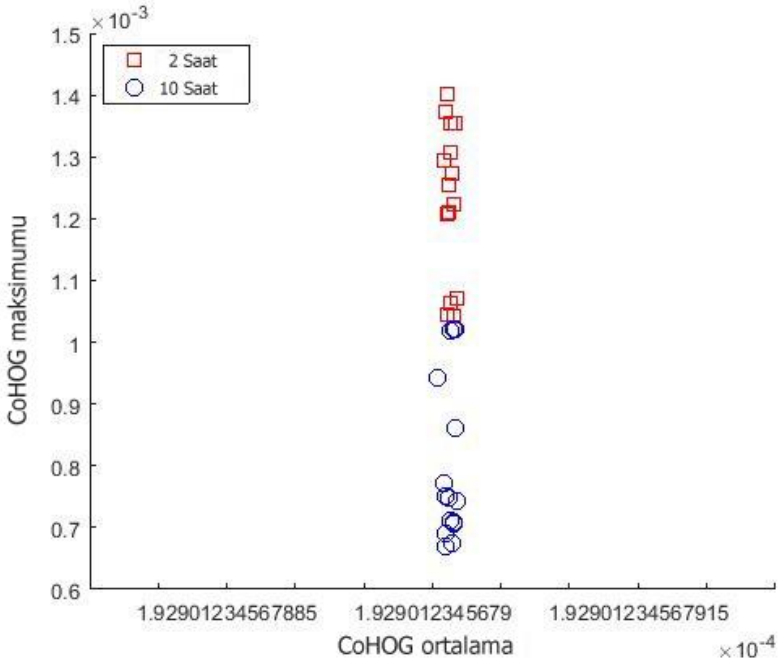
Şekil 4.29:Görüntü verilerinin, MFCC tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (kepstral katsayıların standart sapması – kepstral katsayıların ortalaması).

4.2.1.2. Eş Oluşum Yönlü Gradyanların Histogramları (*CoHOG*)

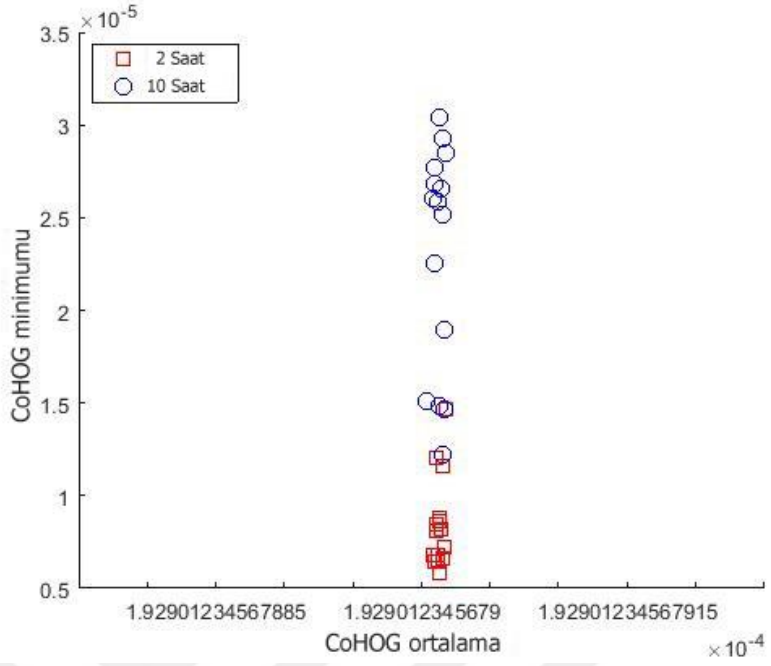
2 saat ve 10 saat yaşlandırma süresi sonunda elde edilen yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntülerinden CoHOG algoritması yardımıyla öznitelik çıkartılmıştır ve daha sonra bu özniteliklerin istatiksel değerlerine ilişkin grafikler Şekil 4.30, 4.31, 4.32, 4.33, 4.34, 4.35, 4.36, 4.37, 4.38, 4.39'da verilmiştir.



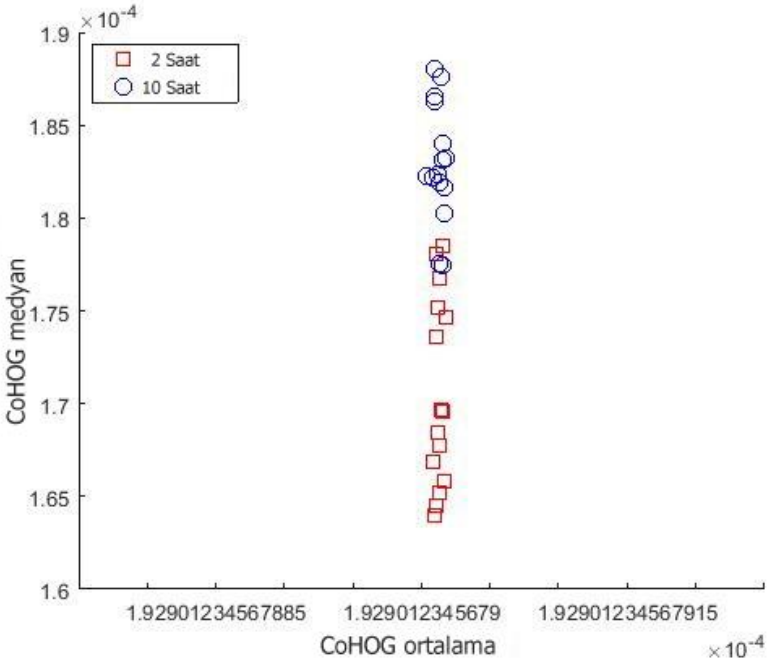
Şekil 4.30: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG maksimumu – CoHOG minimumu).



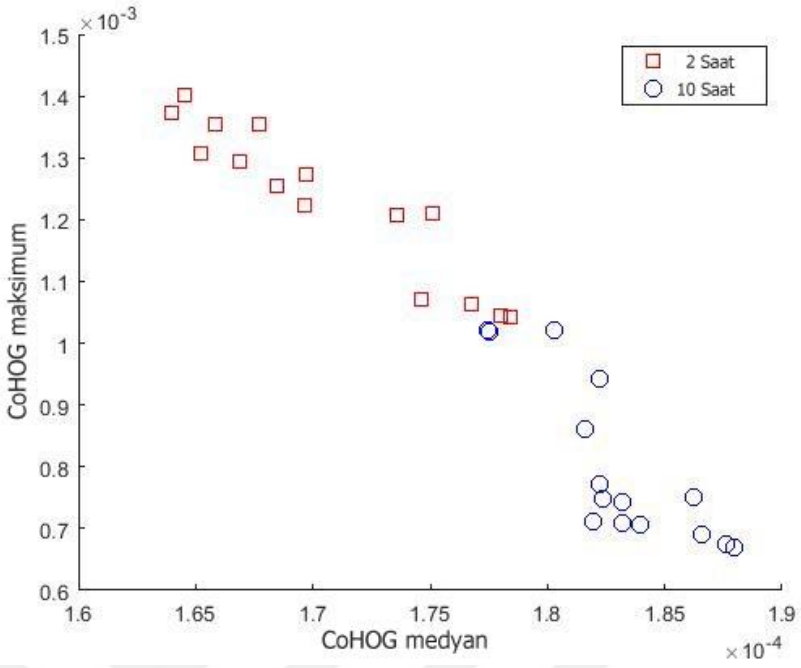
Şekil 4.31: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG ortalama – CoHOG maksimumu).



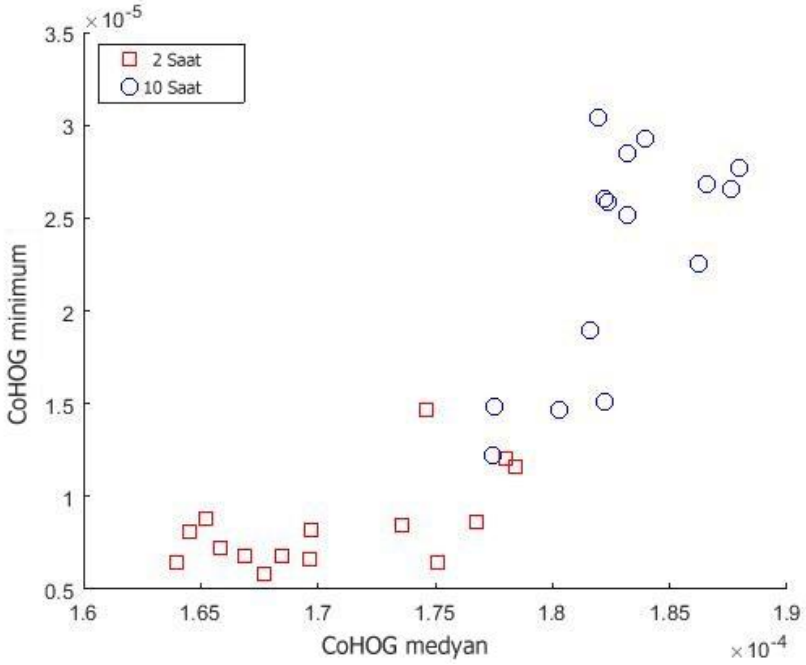
Şekil 4.32: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG ortalama – CoHOG minimum).



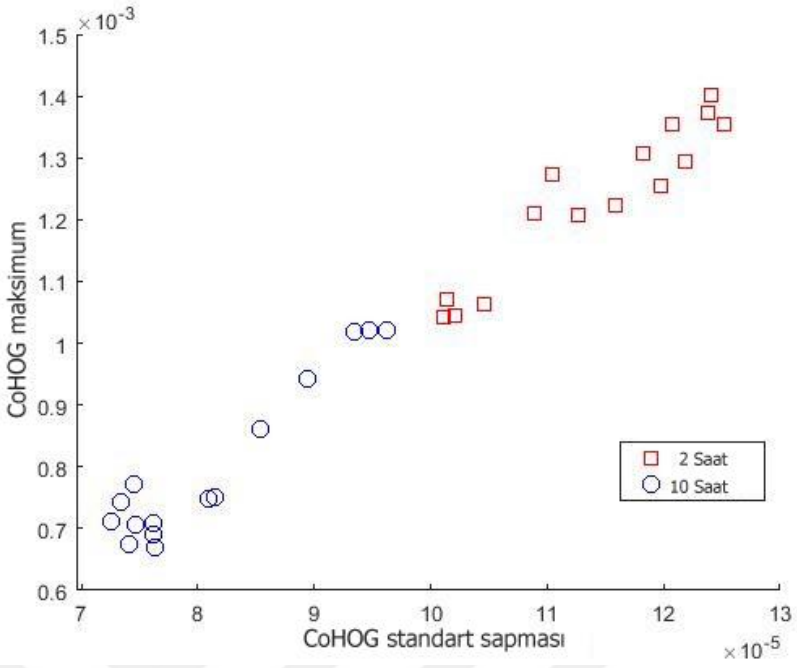
Şekil 4.33: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG ortalama – CoHOG medyan).



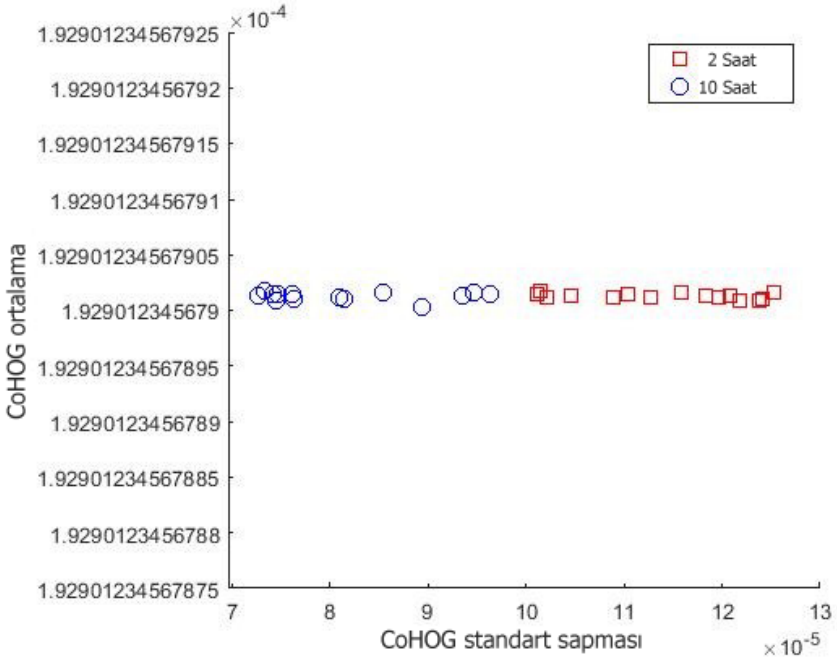
Şekil 4.34: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG medyan– CoHOG maksimum).



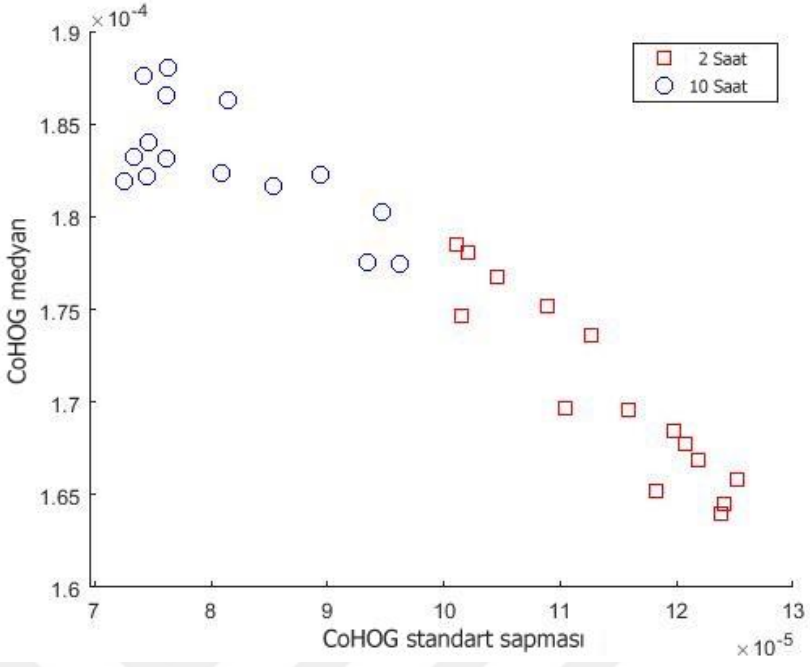
Şekil 4.35: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG medyan– CoHOG minimum).



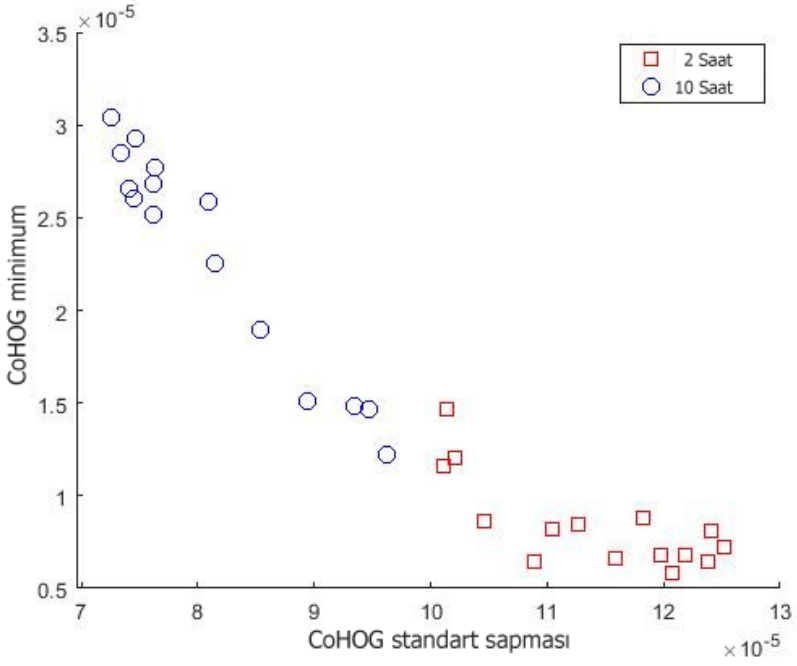
Şekil 4.36: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG standart sapması – CoHOG maksimum).



Şekil 4.37: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG standart sapması – CoHOG ortalama).



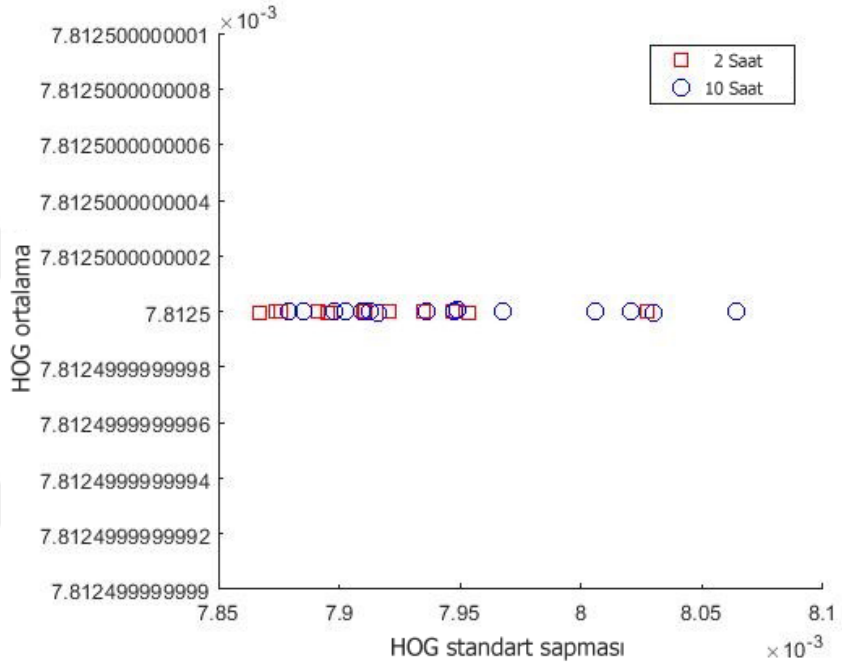
Şekil 4.38: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG standart sapması – CoHOG medyan).



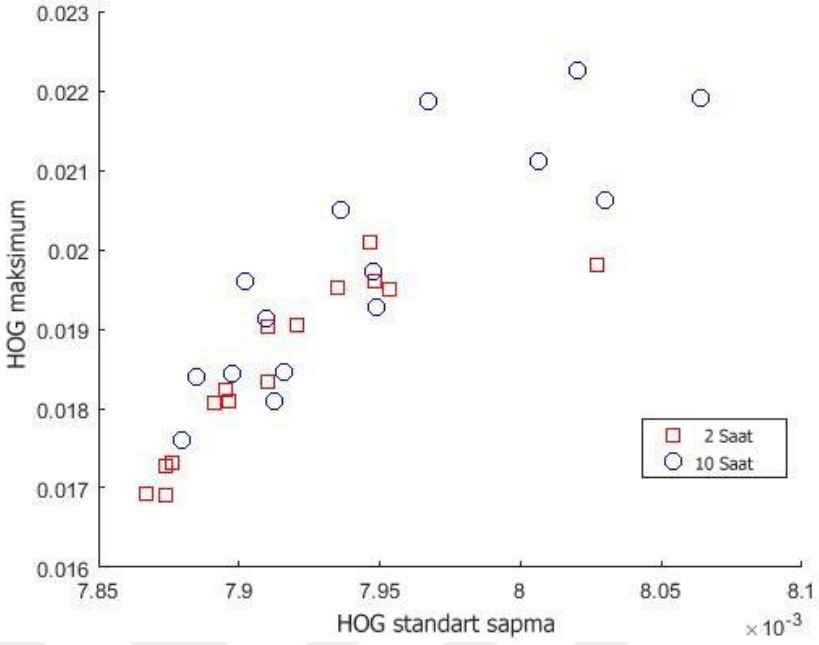
Şekil 4.39: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG standart sapması – CoHOG minimum).

4.2.1.3. Yönlü Gradyanların Histogramları (*HOG*)

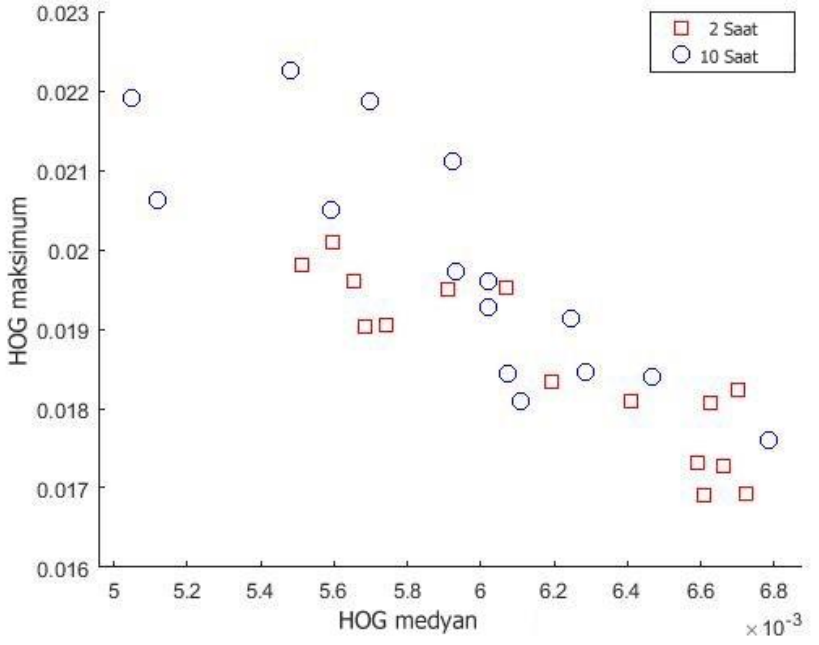
2 saat ve 10 saat yaşlandırma süresi sonunda elde edilen yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntülerinden HOG algoritması yardımıyla öznitelik çıkartılmıştır ve daha sonra bu özniteliklerin istatiksel değerlerine ilişkin grafikler Şekil 4.40, 4.41, 4.42 ve 4.43'te verilmiştir.



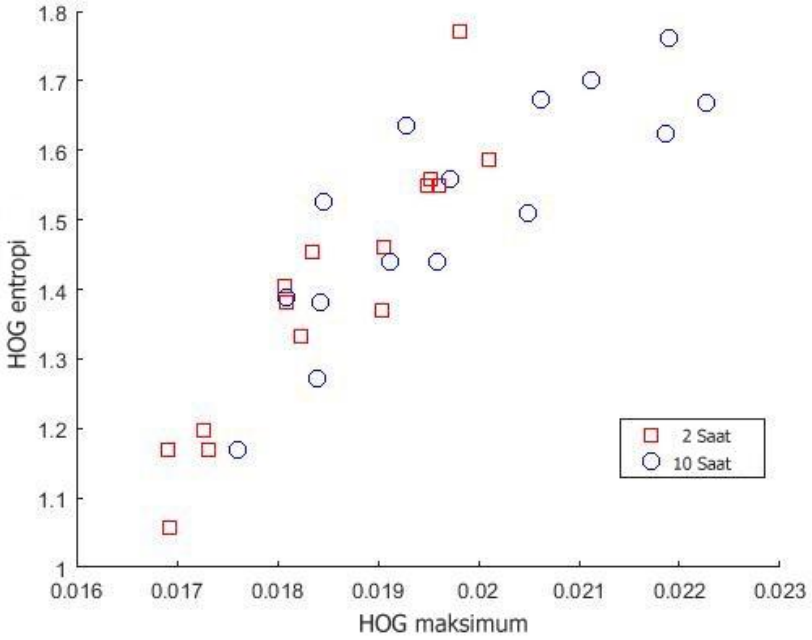
Şekil 4.40: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG standart sapma – HOG ortalama).



Şekil 4.41: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG standart sapma – HOG maksimum).



Şekil 4.42: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG medyan– HOG maksimum).



Şekil 4.43: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG maksimum – HOG entropi).

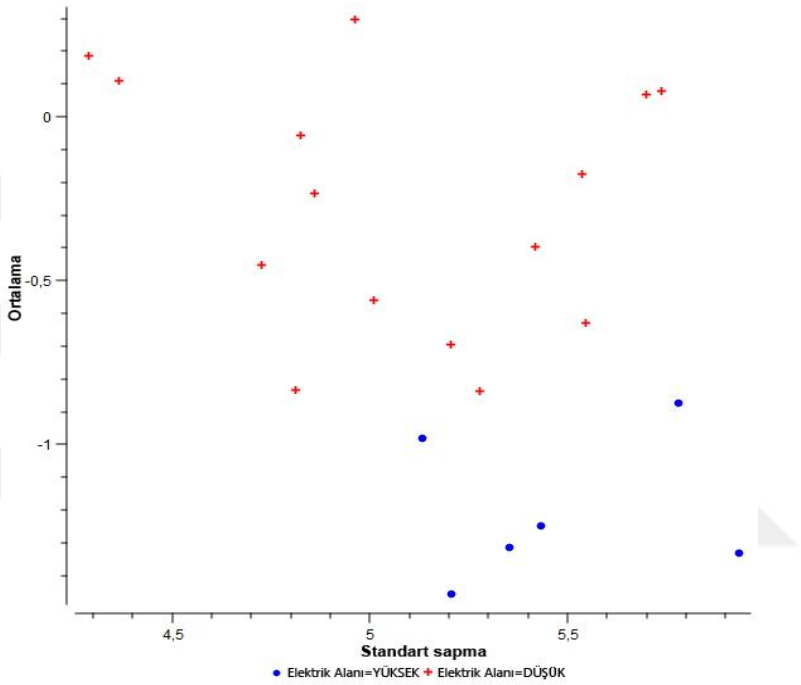
4.2.2. Elektrik Alanının Sulu Ağaçlanmaya Etkisinin Analizi

Elektrik alanının sulu ağaçlanmaya etkisini inceleyebilmek için su iğnesi ile alüminyum elektrot arası mesafe dışında sulu ağaçlanmayı etkileyecek diğer tüm parametreler sabit ve aynı değerlerde tutulmuştur. 2 saat sonunda elde edilen ağaçlanma görüntülerinde iğne ve elektrot arası mesafeye bakılarak elektrik alan şiddetinin düşük ve yüksek elektrik alan olmak üzere ampirik olarak iki sınıfa ayrılmıştır. Deney ortam parametreleri aşağıda belirtilmiştir.

- Uygulama süresi: 2 saat
- Uygulanan gerilim ve frekans: 6 kV - 4 kHz
- Deney ortam sıcaklığı: 21 ºC ∓ 1 ºC
- Bağıl nem: %47.7 RH ∓ 2 RH
- Ortam basıncı: 930 hPa
- Çözelti cinsi, molaritesi ve iletkenliği: NaCl, 2 M, 147.1 mS/cm

4.2.2.1. Mel Frekans Kepstral Katsayıları (*MFCC*)

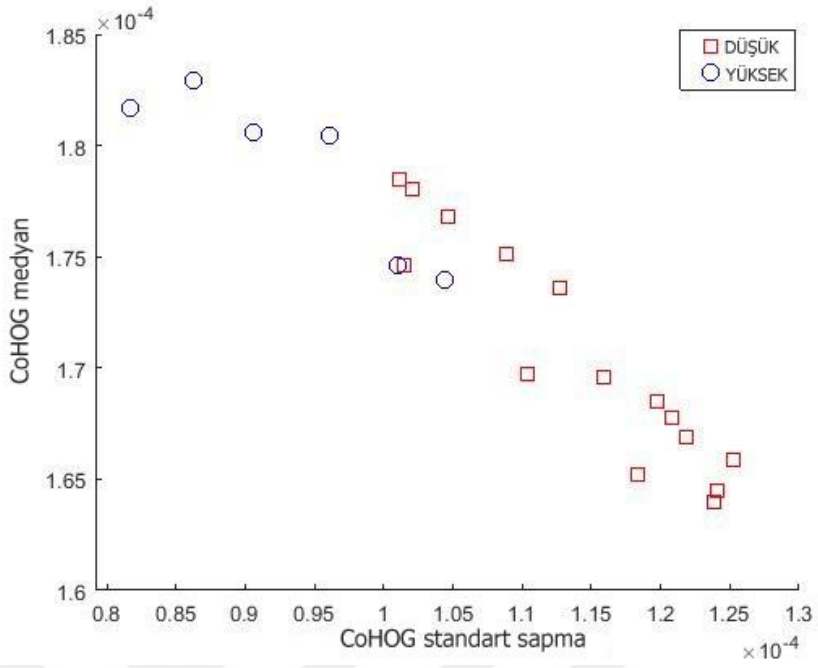
2 saat yaşlandırma süresi sonunda ve farklı elektrik alan şiddetleri altında elde edilen yelpaze sulu ağaçlanma görüntülerinin kepstral katsayıları çıkartılmıştır. Çıkartılan kepstral katsayıların standart sapmaları ve ortalama değerlerine ilişkin saçılım grafikleri Şekil 4.44'te verilmiştir.



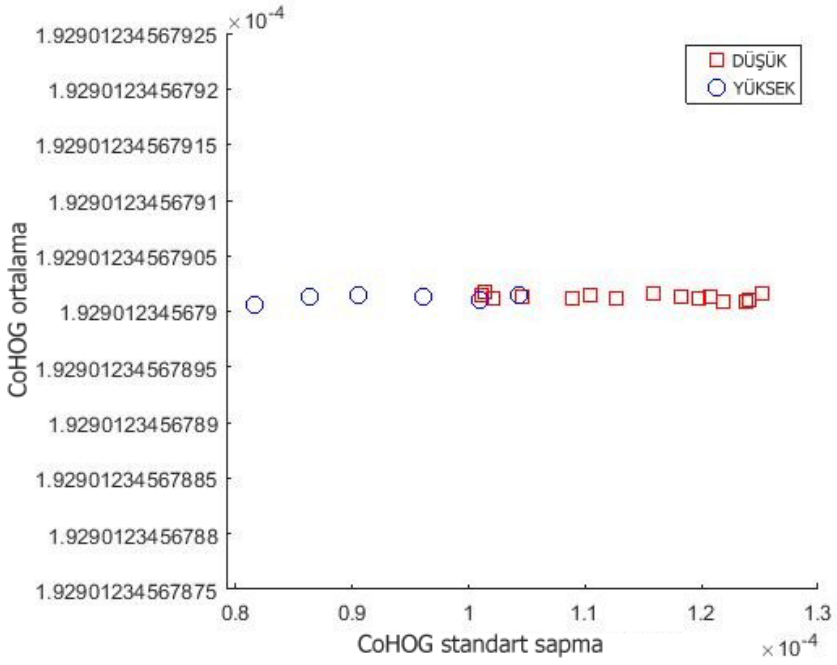
Şekil 4.44: Görüntü verilerinin, MFCC tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (kepstral katsayıların standart sapması-kepstral katsayıların ortalaması).

4.2.2.2. Eş Oluşum Yönlü Gradyanların Histogramları (*CoHOG*)

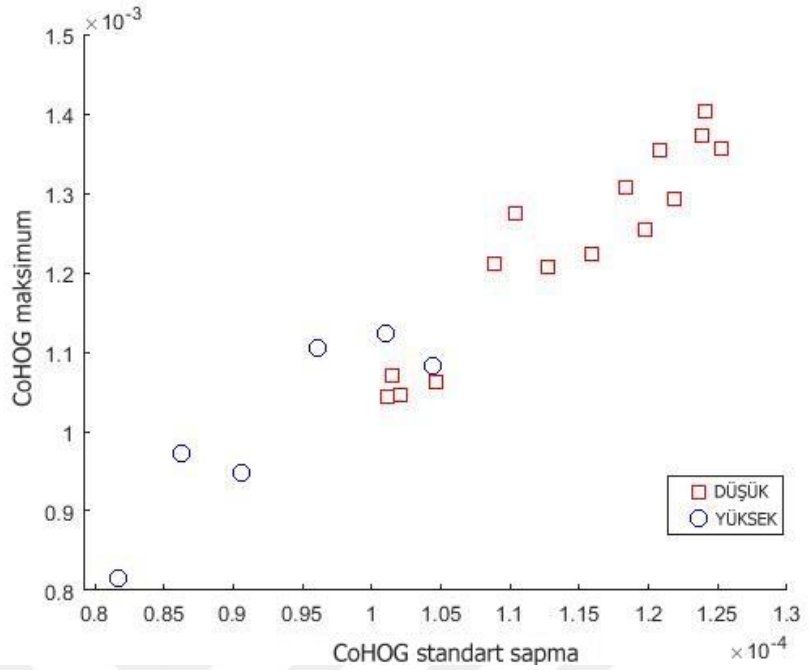
2 saat yaşlandırma süresi sonunda ve farklı elektrik alan şiddetleri altında elde edilen yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntülerinden CoHOG algoritması yardımıyla öznitelik çıkartılmıştır ve daha sonra bu özniteliklerin istatiksel değerlerine ilişkin grafikler Şekil 4.45, 4.46, 4.47, 4.48, 4.49, 4.50, 4.51, 4.52, 4.53, 4.54, 4.55, 4.56, 4.57 ve 4.58'de verilmiştir.



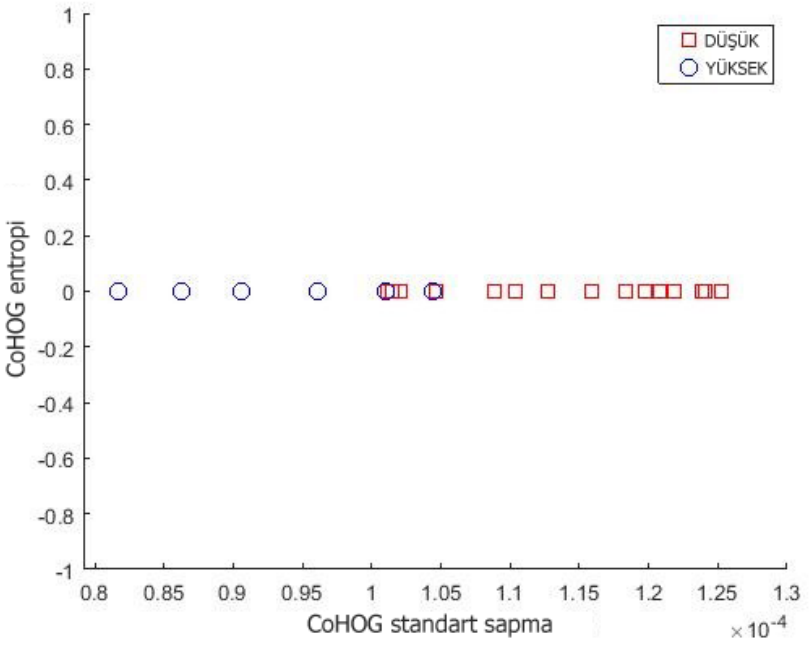
Şekil 4.45: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG standart sapma – CoHOG medyan).



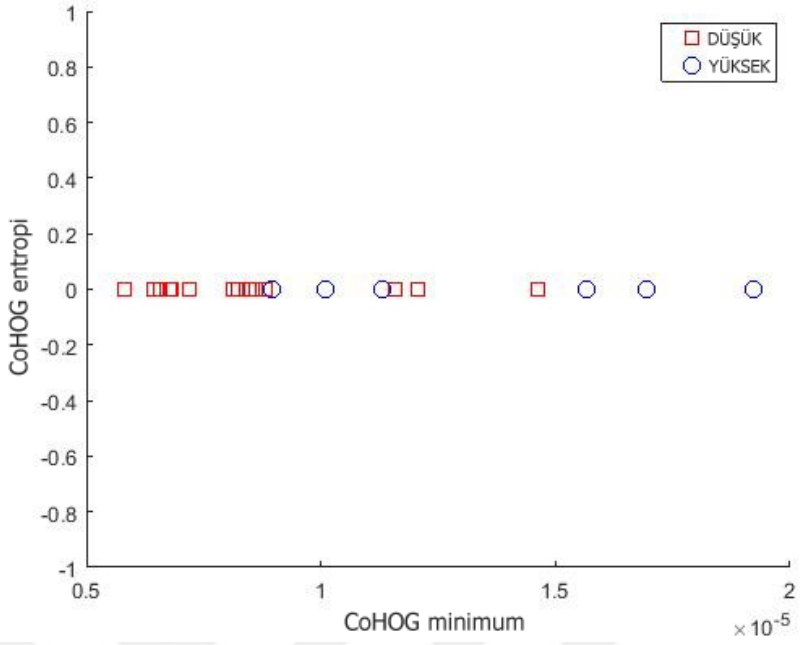
Şekil 4.46: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG standart sapma– CoHOG ortalama).



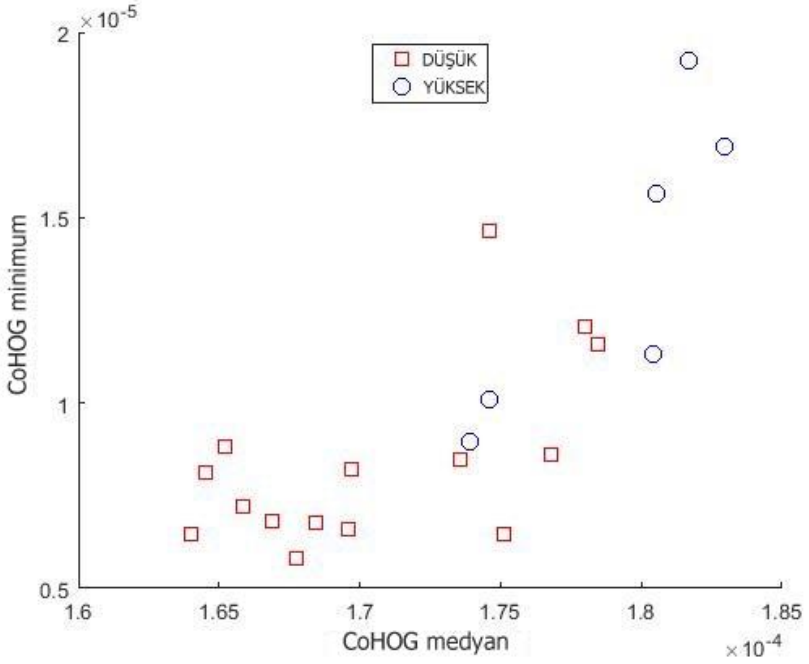
Şekil 4.47: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG standart sapma – CoHOG maksimum).



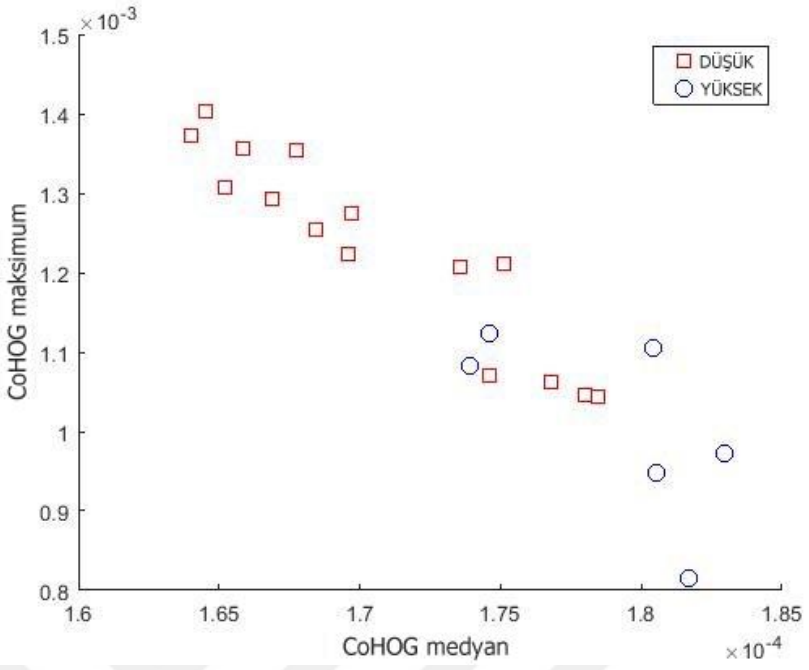
Şekil 4.48: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG standart sapması – CoHOG entropi).



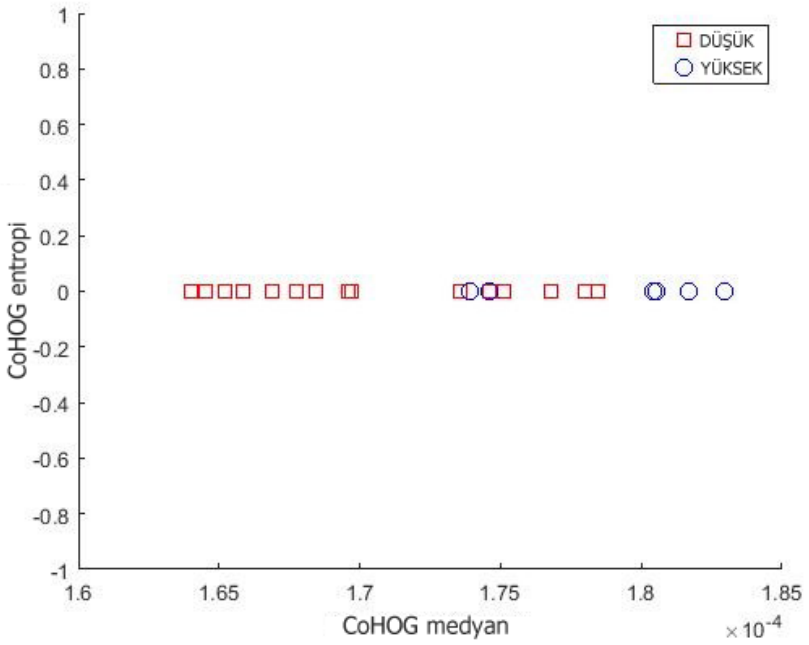
Şekil 4.49: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG minimum – CoHOG entropi).



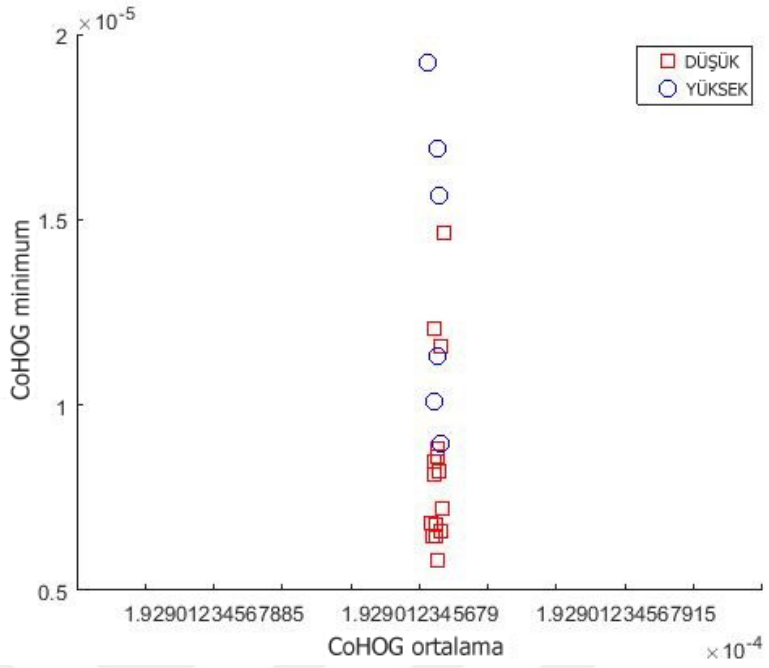
Şekil 4.50: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG medyan – CoHOG minimum).



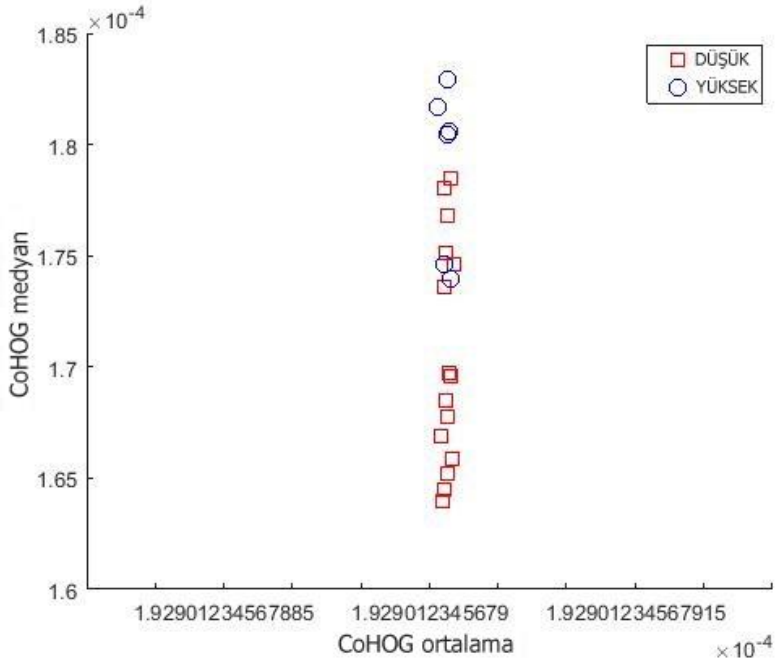
Şekil 4.51: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG medyan – CoHOG maksimum).



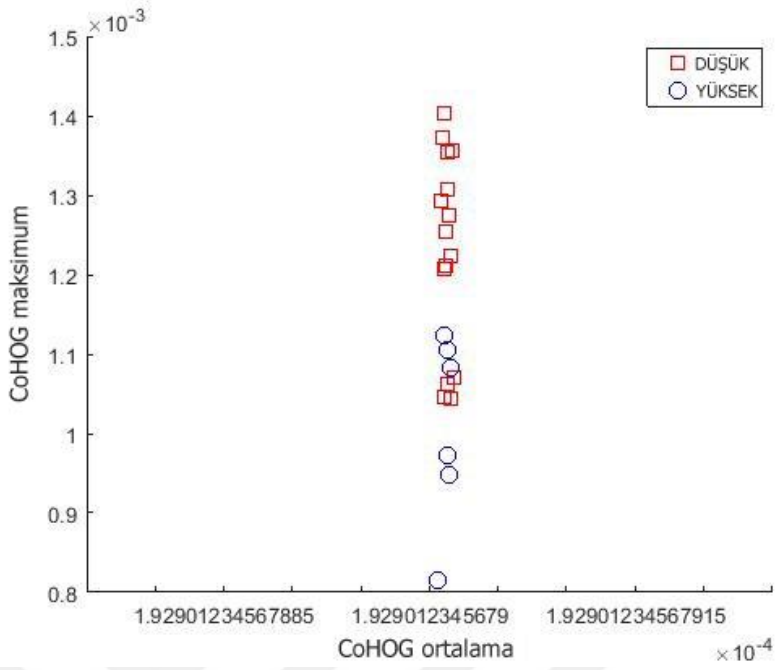
Şekil 4.52: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG medyan – CoHOG entropi).



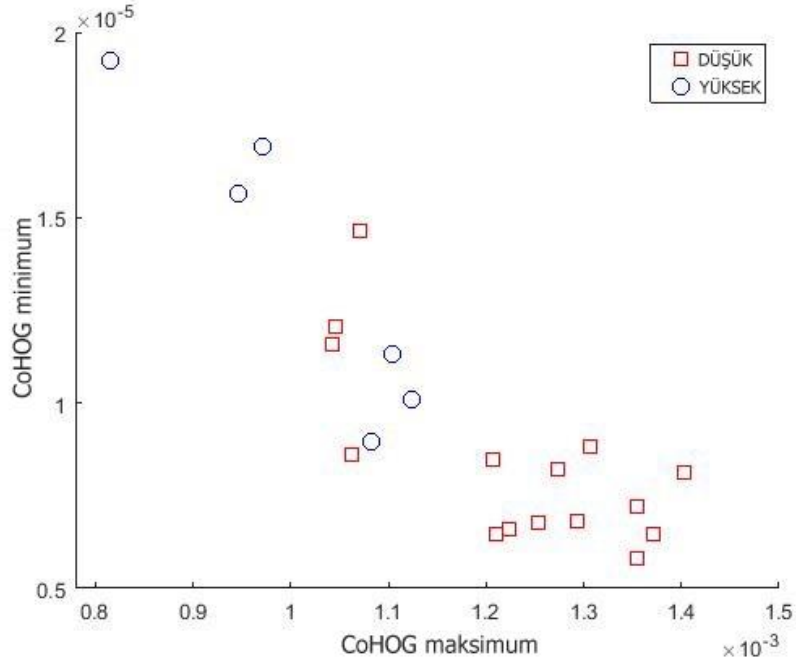
Şekil 4.53: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG ortalama – CoHOG minimum).



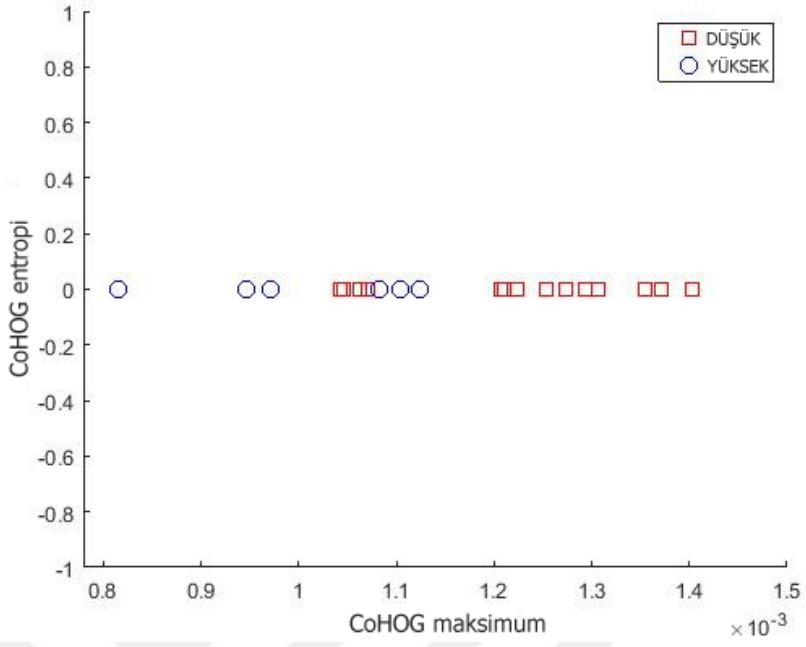
Şekil 4.54: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG ortalama – CoHOG medyan).



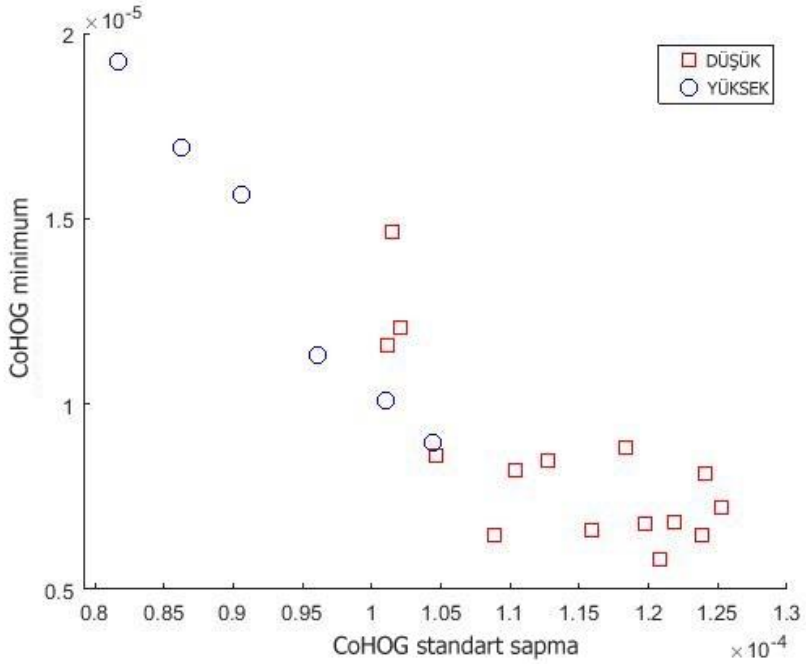
Şekil 4.55: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG ortalama – CoHOG maksimum).



Şekil 4.56: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG maksimum– CoHOG minimum).



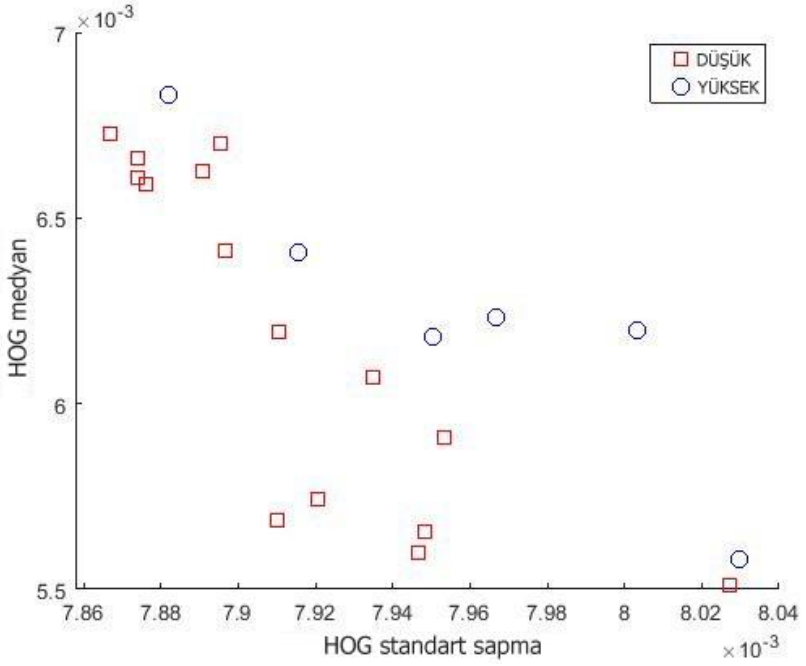
Şekil 4.57: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG maksimum – CoHOG entropi).



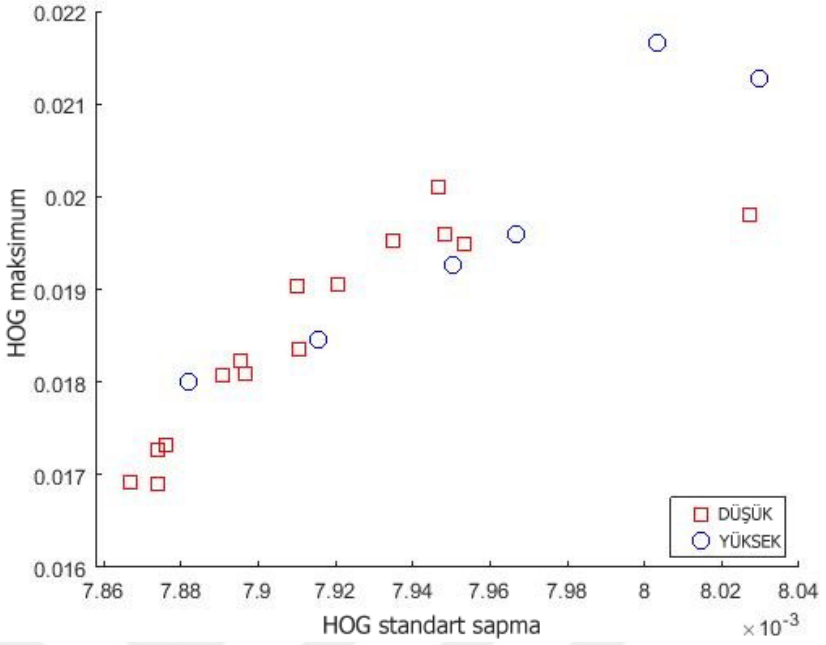
Şekil 4.58: Görüntü verilerinin, CoHOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (CoHOG standart sapma– CoHOG minimum).

4.2.2.3. Yönlü Gradyanların Histogramları (*HOG*)

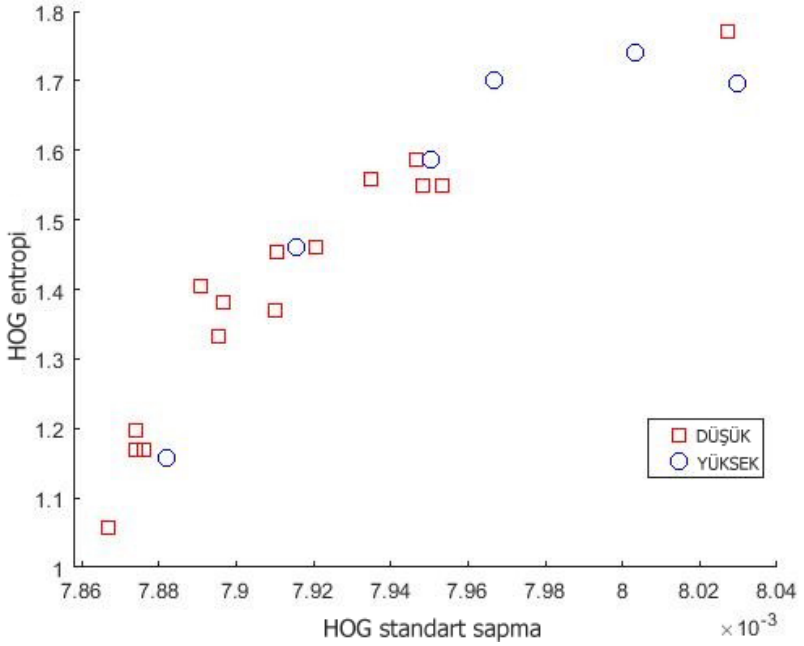
2 saat yaşlandırma süresi sonunda ve farklı elektrik alan şiddetlerinde elde edilen yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntülerinden HOG algoritması yardımıyla öznitelik çıkartılmıştır ve daha sonra bu özniteliklerin istatiksel değerlerine ilişkin grafikler Şekil 4.59, 4.60, 4.61, 4.62, 4.63, 4.64, 4.65 ve 4.66'da verilmiştir.



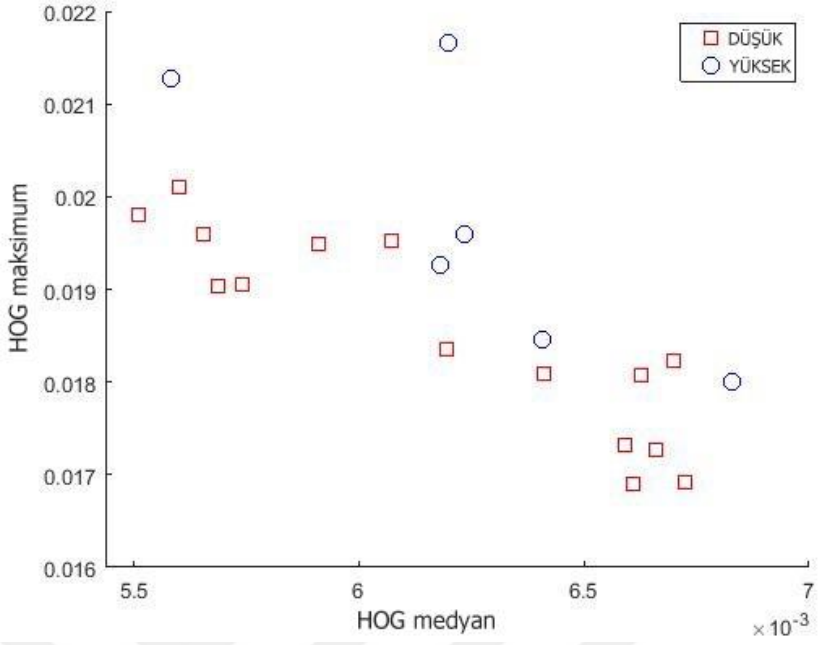
Şekil 4.59: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG standart sapma– HOG medyan).



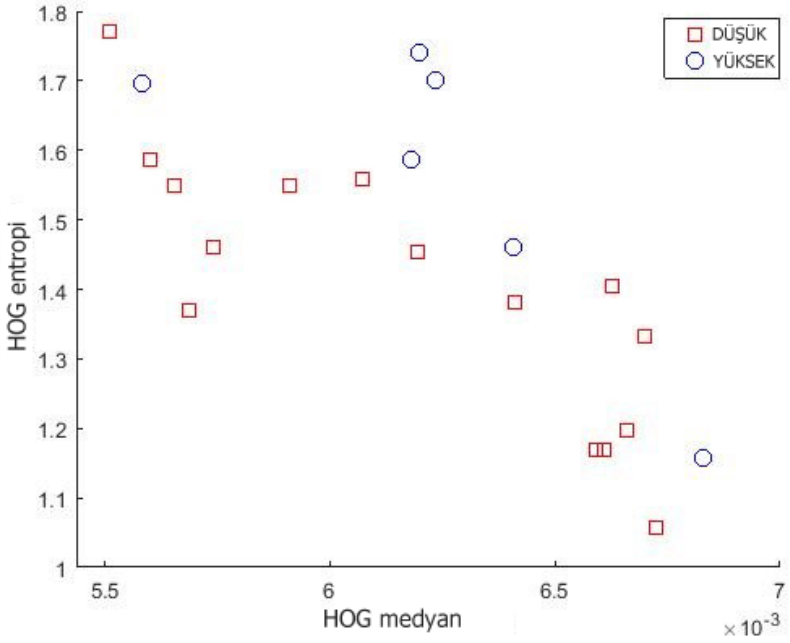
Şekil 4.60: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG standart sapma– HOG maksimum).



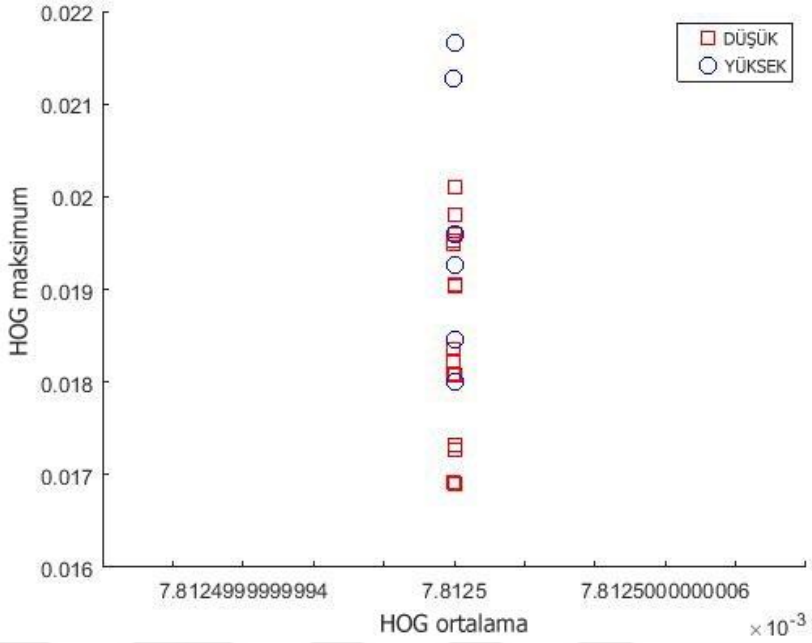
Şekil 4.61: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG standart sapma– HOG entropi).



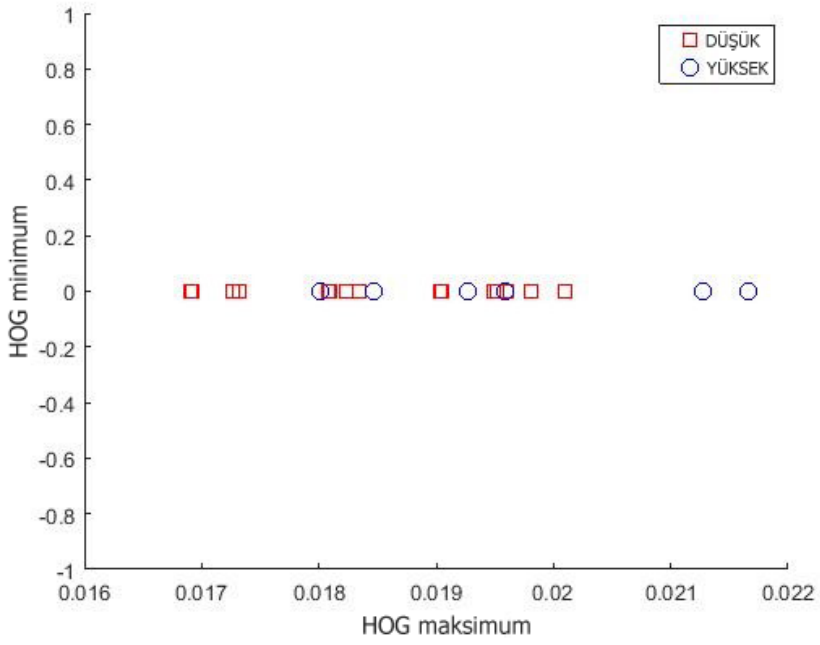
Şekil 4.62: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG medyan– HOG maksimum).



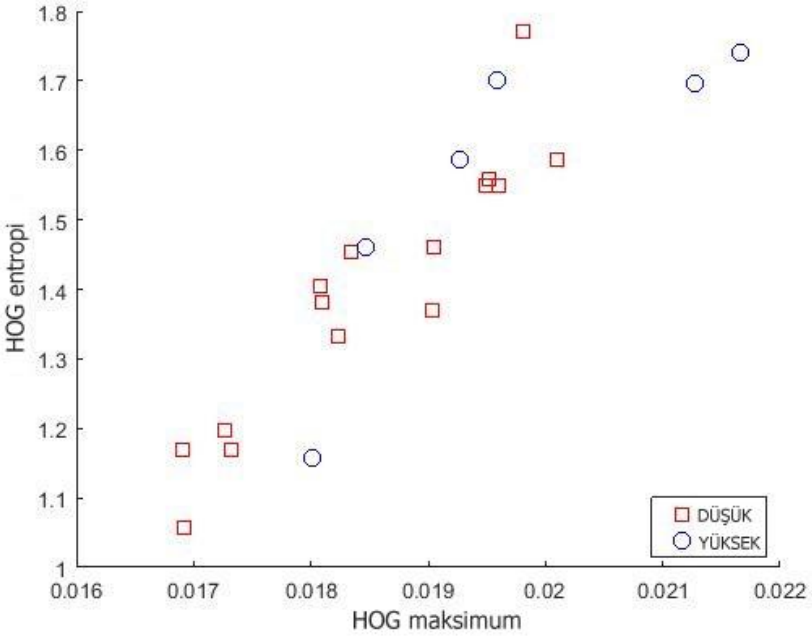
Şekil 4.63: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG medyan– HOG entropi).



Şekil 4.64: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG ortalama– HOG maksimum).



Şekil 4.65: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG maksimum– HOG minimum).



Şekil 4.66: Görüntü verilerinin, HOG tekniği kullanılarak öznitelikleri çıkarıldıktan sonra saçılım grafiği (HOG maksimum– HOG entropi).

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, orta ve yüksek gerilim kablolarının işletme ömründe önemli bir yer tutan yerel ve kalıcı bir bozulma olan sulu ağaçlanmanın molarite, iletkenlik, elektrik alan, frekans ve uygulama (yaşlandırma süresi) süresi parametreleri tabanlı analizi gerçekleştirilmiştir. Görüntü işleme bölümünde, yaşlandırma süresi ve elektrik alan faktörlerinin etkin kılındığı ağaçlanma mikroskop görüntüleri kullanılmıştır. Sulu ağaçlanma deneyleri, tasarlanıp uygulanan akıllı bir deney sistemi yardımıyla kontrollü bir şekilde yapılmıştır. Farklı parametreler için elde edilen görüntüler, görüntü işleme teknikleri ile incelenmiştir.

Uygulama (yaşlandırma) süresinin sulu ağaçlanmaya etkisini gözlemleyebilmek için 2 saat ve 10 saat olmak üzere iki farklı uygulama süresi seçilmiştir. Uygulama süresinin yelpaze sulu ağaçlanmaya etkisini incelerken elektrik alan şiddetlerini aynı değerlerde tutmak için elde edilen mikroskop görüntülerinden su iğnesi ile alüminyum elektrot arası mesafeler ölçülmüştür. 350 μm ±100 μm'lik su iğnesi ile alüminyum elektrot arası mesafelere sahip numune görüntüleri seçilmiştir. Böylelikle elektrik alan şiddetleri tolereli bir şekilde birbirlerine denk hale getirilmiştir.

Elektrik alanının sulu ağaçlanmaya etkisini gözlemleyebilmek için 2 saatlik yaşlandırma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler gerçekleştirilirken diğer tüm parametreler sabit ve aynı değerlerde tutulmuştur. Elektrik alanı şiddetinin farklı değerler alması su iğnesi ile alüminyum elektrot arası mesafelerin değiştirilmesi ile sağlanmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda, çok yüksek elektrik alanına maruz kalsa dahi düzlem elektrot ile su iğnesi arasında yeterince mesafe yok ise su ağacı genişliği fazla büyümemektedir. Aksine su ağacı uzunluğu maksimum değeri alıp yani düzlem elektrot ile su iğnesi arasındaki mesafeye eşit olmakta ve sulu ağaçlanma elektrik ağaçlanmasına dönüşme veya yalıtımın bozulması eğilimine girmektedir. Bu eğilime girdiği boyamadan sonraki renksel yoğunluk ile yorumlanabilir.

Su iğnesi ile düzlem elektrot arasındaki mesafe çok yakın ise yaygın bir yapı yerine bozulma eğilimine girip düzlem elektrota doğru bir yol izlemektedir. Dolayısıyla deneyler gerçekleştirilirken elde edilen görüntülerde su iğnesi ile elektrot arası mesafe yelpaze sulu ağaçlanmanın oluşumu ve gelişimini anlamamıza olanak sağlayacak şekilde seçilmiştir.

2M ve 147.1 mS/cm NaCl çözelti ile yapılan deney sonuçları bize literatürde yapılan çalışmalara kıyasla 2 saat gibi çok kısa bir sürede yelpaze sulu ağaçlanma oluşturulabileceğini göstermektedir. Bu deneyde uygulama süresi düşük tutulup molarite ve uygulanan frekans arttırılmıştır ve sonuçta beklenildiği gibi uzunluk ve genişlikleri daha az olan yelpaze su ağaçları oluşturulmuştur.

Metilen mavisi ile boyama işlemleri sonucunda elde edilen görüntülerin anlamlı olabilmesi adına metilen mavisi çözeltisinin birörnek ve aynı konsantrasyon değerlerine sahip olması gereklidir. Işık mikroskobu altında alınan görüntülerde mikroskobun ışık parlaklığı aynı olmalıdır. Aksi takdirde görüntü işleme kısmında hatalı sonuçlara neden olabilmektedir. Boyama işleminden sonra yanılsama bölgeler oluşabileceği için numuneler su ve ethanol ile yeterince temizlenmelidir.

Görüntü işleme bölümünde, elde edilen yelpaze sulu ağaçlanma mikroskop görüntüleri morfolojik filtre yardımıyla anlamsız bölgelerden temizlenmiş ve daha sonra HOG, CoHOG ve MFCC algoritmalarını kullanarak öznitelikler çıkartılmıştır. Çıkartılan özniteliklerin istatiksel değerlerine bakılmıştır. Bu istatiksel parametrelerin saçılım grafikleri incelendiğinde farklı yaşlandırma süreleri ve farklı elektrik alan şiddetleri için yelpaze su ağacı uzunlukları ve genişliklerinin bir kümelenme oluşturdukları gözlemlenebilir. Bu anlamda sınıflandırma algoritmalarıyla başarılı bir şekilde sınıflandırma gerçekleştirileceği görülmektedir.

Sulu ağaçlanma ile ilgili olarak yapılan çalışmalar genel olarak ağaçlanmayı etkileyen faktörlerin karşısında oluşan su ağacı görüntülerini elde edip su ağacı uzunluk ve genişlik ölçüm değerlerini vermektedir. Yapılan bu çalışma ise oluşan su ağaçlarının uzunluk ve genişlik ölçüm değerlerinin yanı sıra elde edilen sulu ağaçlanma mikroskop görüntülerinden görüntü iyileştirme ve morfolojik filtreleme sonrası görüntü işleme teknikleri ile çıkartılan özniteliklerinin istatiksel değerlerine bakarak ağaçlanmanın aşaması ve ağaçlanmayı etkileyen faktörler hakkında yorum yapabilmemize olanak vermektedir.

Farklı molaritelerde, farklı iletkenliklerde, farklı deney ortam sıcaklıklarında, farklı deney ortam basınçlarında, farklı çözeltilerde, farklı elektrotlarda, farklı uygulanan gerilimlerde ve frekanslarda ve farklı uygulama sürelerinde elde edilebilecek bir veri kümesi dahilinde başarım oranı yüksek olacak bir yüksek gerilim kablo yalıtkanı sulu ağaçlanma deney cihazı (kalite ve ömür anlamında) ürün haline dönüştürülebilir.

Yapılan bu çalışma, ileride yapılacak yüksek gerilim altındaki akıllı deney sistemlerine temel olabilecek çokdisiplinli bir çalışmadır. Tasarlanan ve gerçekleştirilen bu deney sistemi, yüksek gerilim altında yapılacak yaşlandırma deneylerine kolaylık, güvenlilik, uzaktan erişilebilirlik gibi imkânlar vermiştir. Polimerik yalıtkanlarda yaşlandırma işlemi genellikle manuel olarak gerçekleştirilmektedir. Manuel olarak gerçekleştirilmesinden çok yazılım ve donanım tabanlı otomatik bir akıllı bir deney sistemine dikkat çekilmektedir. Bu çalışma ile Raspberry Pi gibi geliştirme kartları ve açık kaynak yazılımlar yardımıyla yüksek gerilim altındaki yaşlandırma işlemlerinin hem akademik hem de ticari uygulamaların düşük maliyetlerle gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir.

Deney sisteminin gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılabilmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Aynı zamanda küçük değişikliklerle yardımıyla da farklı endüstriyel sistemlere entegre edilebilme esnekliğini de göstermektedir. Gerçeklenen bu sistem, görüntü işleme ve ses işleme tabanlı endüstriyel uygulamalarda kullanılabilecek düşük maliyetli, operatör müdahalesini ve enerji sarfiyatını minimize edebilecek bir sistem özelliğine de sahiptir. Donanım kısmı uzaktan erişime de imkân tanıdığı için ileride gerçekleştirilebilecek uygulamalarda bu özellikte kullanılabilecektir. Açık kaynak platform ve yüksek gerilim altında yapılabilecek uygulamalara örnek olabilecek çalışma niteliğinde olduğundan, endüstriyel çalışmalarda ve uygulamalarda, zengin ve doğruluk oranı yüksek uygulamalara imkân tanıyabilecektir.

Polimerik yalıtkanların yaşlandırılması işlemi açık kaynak yazılım ve geliştirme kartı tabanlı akıllı bir deney sistemi yardımıyla gerçekleştirilmesi nedeniyle de yüksek gerilim ve açık kaynak platformun kesiştiği bir yaklaşım sunmaktadır. Su ağacı olayının görüntü işleme teknikleri incelenmesi polimerik yalıtkanların incelenmesine yeni bir bakış açısı getirmektedir.

KAYNAKLAR

Abbasi, S., and Tajeripour, F., 2017, Detection of brain tumor in 3D MRI images using local binary patterns and histogram orientation gradient, *Neurocomputing*, 219, 526-535.

Al-Arainy, A. A., Ahaideb, A. A., Qureshi, M. I., & Malik, N. H., 2004, Statistical evaluation of water tree lengths in XLPE cables at different temperatures, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 11(6), 995-1006.

Al-Arainy, A., Malik, N. H., Qureshi, M. I., & Al-Saati, M. N., 2007, The performance of strippable and bonded screened medium-voltage XLPE-insulated cables under long-term accelerated aging, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(2), 744-751.

Alparslan, N., 2013, *Gradyan tabanlı heterojen öznitelik çıkarma yöntemlerine yeni yaklaşımlar*, Tez (Yüksek Lisans), İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Arróspide, J., Salgado, L., & Camplani, M., 2013, Image-based on-road vehicle detection using cost-effective histograms of oriented gradients, *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 24(7), 1182-1190.

Ashcraft, A.C., 1977, Treeing Update Part III: Water trees.‘ Kabelitems 152, Union Carbide Corporation. Based on ’Water treeing in polymer dielectrics", *World Electrotechnical Congress in Moscow*.

Bahoura, M., & Ezzaidi, H., 2013, Hardware implementation of MFCC feature extraction for respiratory sounds analysis, *Systems, Signal Processing and their Applications (WoSSPA)*, 12-15 May 2013, Algiers, Algeria, Electronic ISBN: 978-1-4673-5540-7, 226-229.

Bamji, S., Bulinski, A., Densley, J., Garton, A. and Shimizu, N., 1984, Water Treeing in Polymeric Insulation, *Conference Internationale des Grandes Reseaux Electriques Haute Tension (CIGRE)*, 15-07.

Bolat, B., 2006, *Enstrüman seslerinin tanınması ve sınıflandırılması*, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Boonraksa, T., & Marungsri, B., 2014, Role of ionic solutions affect water treeing propagation in XLPE insulation for high voltage cable, *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 8(5), 788-791.

Boztoprak, H., Çağlar, M. F., & Merdan, M., 2007, Alternatif morfolojik bir yöntemle plaka yerini saptama. *XII. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi*. Kasım, Eskişehir.

Bulinski, A. T., Bamji, S. S., & Densley, R. J., 1986, The effects of frequency and temperature on water tree degradation of miniature XLPE cables, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, (4), 645-650.

Bulinski, A., Bamji, S., Densley, J., Gustafsson, A., & Gedde, U. W., 1994, Water treeing in binary linear polyethylene blends: the mechanical aspect, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1(6), 949-962.

Ciuprina, F., Teissèdre, G., Filippini, J. C., Smedberg, A., Campus, A., & Hampton, N., 2010, Chemical crosslinking of polyethylene and its effect on water tree initiation and propagation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24 June 2010, 17(3), 709–715.

Crine, J. P., 1998, Electrical, chemical and mechanical processes in water treeing, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 5(5), 681-694.

Crine, J. P. and Jow, J., 2001, Influence of frequency on water tree growth in various test cells, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 8(6), 1082-1087.

Dalal, N., & Triggs, B., 2005, Histograms of oriented gradients for human detection, *Computer Vision and Pattern Recognition* 20-25 June 2005, San Diego, CA, USA, ISBN: 0-7695-2372-2 , 886-893.

De Bellet, J. J., Matey, G., Rose, L., Rose, V., Filippini, J. C., Poggi, Y., & Raharimalala, V., 1987, Some aspects of the relationship between water treeing, morphology, and microstructure of polymers, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, (2), 211-217.

Déniz, O., Bueno, G., Salido, J., & De la Torre, F., 2011, Face recognition using histograms of oriented gradients, *Pattern Recognition Letters*, 32(12), 1598-1603.

Dissado, L. A., Wolfe, S. V., & Fothergill, J. C. , 1983, A study of the factors influencing water tree growth, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, (6), 565-585.

Dissado, L. A., Wolfe, S. V., Filippini, J. C., Meyer, C. T., & Fothergill, J. C., 1988, An analysis of field-dependent water tree growth models, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 23(3), 345-356.

Doedens, E., 2012, *Organic contaminants in crosslinked polyethylene for demanding high voltage applications*, Master programme of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology.

Ersoy, A., 2003, *Kablo polimerlerinde ağaç oluşumu ve modellenmesi,* Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi.

Favrie, E., & Auclair, H., 1980, Effect of water of electrical properties of extruded synthetical insulations application on cables, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (3), 1225-1234.

Filippini, J. C. , 1990, Mechanical aspects of water treeing in polymers, *Electrical Insulation, Conference Record of the 1990 IEEE International Symposium*, 3-6 June 1990, Toronto, Ontario, Canada, 183-186.

Filippini, J. C., & Meyer, C. T., 1982, Effect of frequency on the growth of water trees in polyethylene, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Dec. 1982, (6), 554-559.

Filippini, J. C., & Meyer, C. T., 1988, Water treeing using the water needle method: the influence of the magnitude of the electric field at the needle tip, *IEEE transactions on electrical insulation*, Apr 1988, *23*(2), 275-278.

Fothergill, J. C., 2014, The coming of age of HVDC extruded power cables, *Electrical Insulation Conference (EIC)*, 8-11 June 2014, Philadelphia, PA, USA, ISBN: 978-1-4799-2787-6,124-137.

Fothergill, J. C., Eccles, A., Houlgreave, J. A., & Dissado, L. A., 1993, Water tree inception and its dependence upon electric field, voltage and frequency, *IEE Proceedings A (Science, Measurement and Technology)*, Sept. 1993, 140(5), 397-403.

Gonzalez, R. C., Woods R. E., Eddins S. L., 2004, *Digital image processing using MATLAB*, Person Prentice Hall, Lexington, ISBN 978-0-9820854-0-0.

Hanbay, K., Alpaslan, N., Talu, M. F., Hanbay, D., Karci, A., & Kocamaz, A. F., 2015, Continuous rotation invariant features for gradient-based texture classification, *Computer Vision and Image Understanding*, 132, 87-101.

Hans, C., McCollum, C., Bondesson, M., Shah, S., & Merchant, F., 2015, Gradient weighted CO-HOG for analysis of caudal vein structural changes in toxin exposed zebrafish embryo, *Biomedical Imaging (ISBI)*, 16-19 April 2015, New York, NY, USA , Electronic ISBN: 978-1-4799-2374-, 524-527.

Hellesø, S., Benjaminsen, J. T., Selsjord, M., & Hvidsten, S., 2012, Water tree initiation and growth in XLPE cables under static and dynamic mechanical stress, *Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2012 IEEE International Symposium*, 10-13 June 2012, San Juan, PR, USA , ISBN: 978-1-4673-0488-7, 623-627.

Hui, L., Schadler, L. S., & Nelson, J. K., 2013, The influence of moisture on the electrical properties of crosslinked polyethylene/silica nanocomposites, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, *20*(2), 641-653.

Karakelle, M. & Phillips, P. J., 1989, The influence of structure on water treeing in crosslinked polyethylene: Tree morphology and the influence of organic contaminants, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, *24*(6), 1101-1108.

Karhan, M., Oktay, M. O., Karhan, Z., Demir, H., 2011, Morfolojik görüntü işleme yöntemleri ile kayısılarda yaprakdelen (Çil) hastalığı sonucu oluşan lekelerin tespiti, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11),* 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey, 172-176.

Karhan M., 2012, *İmge işleme yöntemleri ile kayısılarda yaprakdelen hastalığı sonucu oluşan lekelerin tespiti,* Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi.

Karhan, M., Çakir, M. F., Uğur, M., 2016, Mel-frekansı kepstral katsayılarını (MFCC) kullanılarak elektriksel boşalma seslerinin analizi, *Güç Sistemleri Konferansı (GSK2016),* İstanbul, Türkiye.

Karhan, M., Uğur, M., 2016, XLPE izoleli tek damarlı orta gerilim kablolarında elektrik alanının sulu ağaçlanmaya etkisinin incelenmesi, *Güç Sistemleri Konferansı (GSK2016), İ*stanbul, Türkiye.

Karhan, M., Uğur, M., 2016, Analysis of effect of electric field on water treeing in polymeric insulators, *UNITECH 2016,* (1), 143-146, Gabrovo, Bulgaria.

Karhan, M., Ersoy, A., Uğur, M., 2017, Investigation the effect of solution conductivity on the growth rate and shape of water trees observed in distribution cables, *Istanbul University - Journal of Electrical & Electronics Engineering,* 17(2), 3445–3451.

Kasban, H., Zahran, O., Arafa, H., El-Kordy, M., Elaraby, S. M., & El-Samie, F. A., 2011, Welding defect detection from radiography images with a cepstral approach, *NDT & E International*, 44(2), 226-231.

Khan, U. S., Al-Nuaimy, W., & El-Samie, F. E. A., 2010, Detection of landmines and underground utilities from acoustic and GPR images with a cepstral approach, *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 21(7), 731-740.

Koo, J. Y., & Filippini, J. C., 1983, Effect of physico-chemical factors on the propagation of water trees in polyethylene, *Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, Proceedings of First International Conference*, pp. 255-260.

Lanca, M. C., 2002, *Electrical ageing studies of polymeric insulation for power cables*, Thesis (PhD), Universidade Nova De Lisboa.

Lee, J. C., Chang, C. P., & Chen, W. K., 2015, Detection of copy–move image forgery using histogram of orientated gradients, *Information Sciences*, 321, 250-262.

Lee, S. E., Min, K., & Suh, T., 2013, Accelerating histograms of oriented gradients descriptor extraction for pedestrian recognition. *Computers & Electrical Engineering*, 39(4), 1043-1048.

Li, B., & Huo, G., 2016, Face recognition using locality sensitive histograms of oriented gradients. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 127(6), 3489-3494.

Li, J., Zhao, X., Yin, G., Li, S., Zhao, J., & Ouyang, B., 2011, The effect of accelerated water tree ageing on the properties of XLPE cable insulation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 10 October 2011, 18(5).

Malik, N. H., Qureshi, M. I., Al-Arainy, A. A., Saati, M. N., Al-Natheer, O. A., & Anam, S., 2012, Performance of water tight cables produced in Saudi Arabia under accelerated aging, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19(2), 490-497.

Malik, N. H., Qureshi, M. I., & Al-Arainy, A., 2006, The role of cations in water tree growth in technical grade XLPE insulated cables, *Properties and applications of Dielectric Materials*, 26-30 June 2006, Bali, Indonesia, ISBN: 1-4244-0189-5, 127-130.

Miyashita, T., 1969, Deterioration of water-immersed polyethylene coated wire by treeing *Proceedings 1969 IEEE-NEMA Electrical Insulation Conference*, Boston, September, pp. 131-135.

Miyashita, T., 1971, Deterioration of water-immersed polyethylene-coated wire by treeing. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, (3), 129-135.

Nunes, S. L., & Shaw, M. T., 1980, Water treeing in polyethylene-a review of mechanisms, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, (6), 437-450.

Orton, H., 2013, History of underground power cables, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, *29*(4), 52-57.

Özşen, Ö., 2002, *Matematiksel morfoloji kullanılarak göğüs kanserinin erken teşhisi,* Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Pang, Y., Yuan, Y., Li, X., & Pan, J., 2011, Efficient HOG human detection. *Signal Processing*, 91(4), 773-781.

Patsch, R., 1992, Electrical and water treeing: a chairman's view, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 27(3), 532-542.

Patsch, R., & Jung, J., 1999, Water trees in cables: generation and detection, *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, 146(5), 253-259.

Phillips, P. J., & Karakelle, M., 1989, The influence of structure on water treeing in crosslinked polyethylene: crystallization and annealing effects in bow-tie tree growth, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 24(6), 1093-1100.

Qureshi, M. I., Malik, N. H., Al-Arainy, A. A., Saati, M. N., Al-Nather, O. A., & Anam, S., 2008, Investigation of resistance toward water tree growth in XLPE insulated MV cables produced in the Arabian Gulf region, *Condition Monitoring and Diagnosis*, 21-24 April 2008, Beijing, China, ISBN: 978-1-4244-1621-9,1195-1198.

Raharimalala, V., Poggi, Y., & Filippini, J. C., 1994, Influence of polymer morphology on water treeing, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1(6), 1094-1103.

Ross, R., Geurts, W. S. M. and Smit, J. J., van der Maas J. H. and Lutz, E. T. G. , 1989, Vented water trees - oxidation and hydrophilic behavior, Kema Scientific Technical Reports, 7 (6), 357- 364.

Ross, R., Geurts, W. S. M., Smit, J. J., van der Maas, J. H. and Lutz, E. T. G., 1990, The hydrophilic nature of water trees, *Conference record of the 1990 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 3-6 June 1990, Toronto, Canada.

Ross, R., 1998, Inception and propagation mechanisms of water treeing, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 5(5), 660-680.

Sanniyati, C. N., Arief, Y. Z., Adzis, Z., Muhamad, N. A., Ahmad, M. H., Sidik, M. A. B., & Lau, K. Y., 2016, Water tree in polymeric cables: a review, *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 12(1).

Serra, J., 1982, *Image analysis and mathematical morphology*, Vol 1. London: Academic press.

Shaw, M. T., & Shaw, S. H., 1984, Water treeing in solid dielectrics, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, (5), 419-452.

Shu, C., Ding, X., & Fang, C., 2011, Histogram of the oriented gradient for face recognition, *Tsinghua Science & Technology*, 16(2), 216-224.

Sletbak, J., & Botne, A., 1977, A study of inception and growth of water trees and electrochemical trees in polyethylene and cross linked polyethylene insulations, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, (6), 383-389.

Stancu, C., Notingher, P. V, Ciuprina, F., Notingher, P., Castellon, J., Agnel, S., & Toureille, A., 2009, Computation of the electric field in cable insulation in the presence of water trees and space charge, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45(1), 30–43.

Steennis, E. F., 1989, *Water treeing: the behaviour of water trees in extruded cable insulation*, Thesis (PhD), Delft University of Technology.

Steennis, E. F. and Kreuger, F. H., 1990, Water treeing in polyethylene cables, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 25(5), 989-1028.

Talal, T. M., & El-Sayed, A., 2009, Identification of satellite images based on mel frequency cepstral coefficients, *Computer Engineering & Systems (ICCES)*, 14-16 Dec. 2009, Cairo, Egypt, ISBN: 978-1-4244-5842-4, 274-279.

Tanaka, T., 2002, Aging of polymeric and composite insulating materials. Aspects of interfacial performance in aging, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical insulation*, *9*(5), 704-716.

Tanaka, T., & Fukuda, T., 1974, Residual strain and water trees in XLPE and PE cables, *Electrical Insulation & Dielectric Phenomena-Annual Report 1974*, Conference, 239-249.

Tanırcan, L., 2006, *Denizaltı güç kabloları ve uygulamaları*, Tez (Yüksek Lisans), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Tian, S., Bhattacharya, U., Lu, S., Su, B., Wang, Q., Wei, X., Lu, Y., & Tan, C. L., 2016, Multilingual scene character recognition with co-occurrence of histogram of oriented gradients, *Pattern Recognition*, *51*, 125-134.

Tian, S., Lu, S., Su, B., & Tan, C. L., 2013, Scene text recognition using co-occurrence of histogram of oriented gradients, *Document Analysis and Recognition (ICDAR)*, 25-28 Aug. 2013, Washington, DC, USA, Electronic ISBN: 978-0-7695-4999-6, 912-916.

Toya, A., Hu, Z., Yoshida, T., Uchimura, K., Kubota, H., & Ono, M., 2008, Pedestrian recognition using stereo vision and histogram of oriented gradients, *Vehicular Electronics and Safety*, 22-24 Sept. 2008, Columbus, OH, USA, ISBN: 978-1-4244-2359-0, 57-62.

Topaloğlu, M., & Gangal, A., 2006, Watershed Dönüşümü Kullanılarak Corpus Callosumun Bölütlenmesi. *Uluslararası Radyo Bilimleri Birliği 3. Bilimsel Kongresi*.

Tu, D. M., & Kao, K. C., 1983, Effects of hydrostatic pressure on water treeing properties of polyethylene, *Electrical Insulation & Dielectric Phenomena-Annual Report 1983, Conference*, 307-311.

Uğur, M., Kuntman, A. & Ersoy, A., 2002, Geliştirilmiş Weibull istatistiği ile polimerik yalıtkanların yaşlanma sürecinin incelenmesi, *Elektrik–Elektronik–Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu,* Bursa, Türkiye, pp. 125–129.

Wang, J., Zheng, X., Li, Y., & Wu, J., 2013, The influence of temperature on water treeing in polyethylene, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20(2), 544-551.

Werelius, P., 2001, *Development and application of high voltage dielectric spectroscopy for diagnosis of medium voltage XLPE cables*, Thesis (PhD), Elektrotekniska system Stockholm.

Yoshimitsu, T., Mitsui, H., Hishida, K., & Yoshida, H., 1983, Water treeing phenomena in humid air, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, (4), 396-401.

Yoshimitsu, T., Mitsui, H., Kenjo, S., & Nakakita, T., 1983, Some considerations on AC water trees in crosslinked polyethylene, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, (1), 23-27.

Yoshimura, N., Noto, F., & Kikuchi, K., 1977, Growth of water trees in polyethylene and silicone rubber by water electrodes, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, (6), 411-416.

Zahran, O., Kasban, H., El-Kordy, M., Abd El-Samie, F.E., 2013, Automatic weld defect identification from radiographic images, *NDT & E International*, Volume 57, 26-35.

Zhang, C., Li, C., Nie, L., Jing, Z., & Han, B., 2016, Research on the water blade electrode method for assessing water tree resistance of cross-linked polyethylene, *Polymer Testing*, *50*, 235-240.

Zhao, Y., Zhang, Y., Cheng, R., Wei, D., & Li, G., 2015, An enhanced histogram of oriented gradients for pedestrian detection, *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, *7*(3), 29-38.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Mustafa KARHAN
Doğum Yeri	Malatya
Doğum Tarihi	01.11.1985
Uyruğu	☑ T.C. ❒ Diğer:
Telefon	0 (544) 426 23 44
E-Posta Adresi	mustafakarhan@gmail.com
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Süleyman Demirel Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik – Mimarlık Fakültesi
Bölümü	Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	02.07.2008

Yüksek Lisans	
Üniversite	Namık Kemal Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
Programı	Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
Mezuniyet Tarihi	27.01.2012

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı
Mezuniyet Tarihi	13.10.2017

Makale ve Bildiriler

Karhan, M., Oktay, M. O., Karhan, Z., Demir, H., 2011, Detecting spots on apricots due to coryneum beijerinckii disease with morphological image processing methods. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11),* Elazığ, Turkey.

Karhan, M., Karhan, Z., Arslan, Ö., 2011, RGB ve HSV renk uzaylarının renk değerlerini kullanarak morfolojik görüntü işleme yardımıyla yüz tespiti, *4th Engineering and Technology Symposium, 4. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu,* Ankara, Turkey.

Arslan, Ö., Belen, M. A., Karhan, M., 2011, 2.4 GHz ISM bandı uygulamaları için çift katlı A sınıfı güç kuvvetlendiricisi tasarımı, *4th Engineering and Technology, 4. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu,* Ankara, Turkey.

Karhan, M., 2014, Monitoring of plant growth based on image processing techniques using Raspberry Pi, *22nd Summer School on Image Processing (SSIP 2014),* Zagreb, Crotia.

Karhan, M. & Uğur M., 2015, Analysis of effect of air cavities and humidity on electric field and potential disribution in XLPE insulated single-core medium voltage cables using finite element method, *UNITECH 2015,* (1), 182-187, Gabrovo, Bulgaria.

Karhan, M., Çakır, M. F., Güllü, H. C., Özen, F., Özdemirci, E., Karayel, M., 2015, Design and implementation of a low cost reconnaissance robot using open source platforms, *UNITECH 2015,* (1), 271-275, Gabrovo, Bulgaria.

Karhan, M. & Şahinoğlu, A, 2015, Kumlama işleminde paslanmış bölgelerin k- means yöntemini kullanarak renk tabanlı bölütlenmesi, *MTS8 – Engineering and Technology Symposium Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu*, Ankara, Turkey.

Şahinoğlu, A., Gürbüz, R., Güllü, A., Karhan, M., 2015, Intelligent production machine, *ICMMM 2015:17th International Conference on Machining and Machinability of Materials,* 2(8). Venice, Italy.

Karhan, M., Çakir M. F., Uğur M., 2016, Mel-frekansı kepstral katsayılarını (MFCC) kullanılarak elektriksel boşalma seslerinin analizi, *Güç Sistemleri Konferansı (GSK2016),* İstanbul, Türkiye.

Karhan, M. & Uğur M., 2016, XLPE izoleli tek damarlı orta gerilim kablolarında elektrik alanının sulu ağaçlanmaya etkisinin incelenmesi, *Güç Sistemleri Konferansı (GSK2016),* İstanbul, Türkiye.

Özdemirci, E. & Karhan, M., 2016, Realization of modular controller application set, *MESTEK 2016 3. Ulusal Meslek Yüksekokulları Sosyal ve Teknik Bilimler Kongresi*, Aydın, Turkey.

Karhan, Z. & Karhan, M., 2016, Performance evaluation of machine learning algorithms in the opinion mining, *Turkish Journal of Nature and Science - Türk Doğa ve Fen Dergisi,* 5(2), 51-54.

Karhan, M. & Uğur M., 2016, Analysis of effect of electric field on water treeing in polymeric insulators, *UNITECH 2016,* (1), 143-146, Gabrovo, Bulgaria.

Karhan, M. & Uğur M., 2016, Analysis of sound signals taken from transformer during the aging test of XLPE cable insulation using mel frequency cepstral coefficients MFCC, *UNITECH 2016,* (1), 169-172, Gabrovo, Bulgaria.

Karhan, M., Ersoy, A., Uğur, M., 2017, Investigation the effect of solution conductivity on the growth rate and shape of water trees observed in distribution cables, *Istanbul University - Journal of Electrical & Electronics Engineering*, 17(2), 3445–3451.