



Effect of electric field on contact angle and droplet shape in XLPE dielectric materials

Mustafa Karhan^{1*}, Musa Faruk Çakır¹, Özkan Arslan², Fatih Issi¹, Volkan Eyüpoğlu³

¹Electronics and Automation Department, Cankiri Karatekin University, Cankiri, 18200, Turkey

²Electronics and Communication Engineering Department, Namik Kemal University, Tekirdag, 59860, Turkey

³Chemistry Department, Cankiri Karatekin University, Cankiri, 18100, Turkey

Highlights:

- Evaluation of the wettability behavior of XLPE dielectric materials
- Performing of the contact angle measurements under the electric field using image processing techniques
- Observation of the correlation between the electric field, wettability and contact angle

Keywords:

- XLPE dielectric materials
- wettability
- electric field
- contact angle
- image processing

Article Info:

Research Article
Received: 07.03.2020
Accepted: 27.01.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.700362

Acknowledgement:

This work was supported by Cankiri Karatekin University Scientific Research Projects Coordination Unit. Project Number: MY0150219B04

Correspondence:

Author: Mustafa Karhan
e-mail: mustafakarhan@gmail.com
phone: +90 376 213 4201 / 6168

Graphical/Tabular Abstract

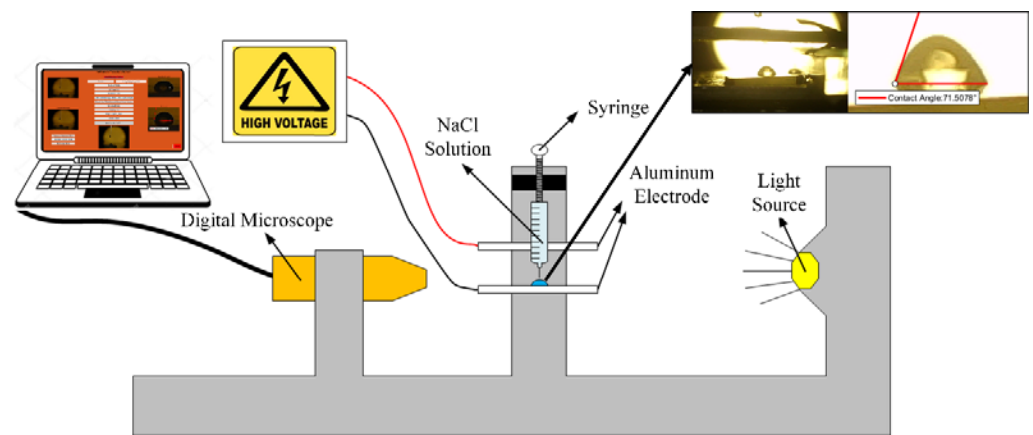


Figure A. Contact angle measurement platform, droplet image in the absence and presence of electric field

Purpose: This study aims to carry out contact angle measurements under the electric field to evaluation and determination on the wettability behavior (hydrophobicity and hydrophilicity) of the XLPE dielectric material, which plays an important role in electrical insulation, which is widely used in electrical energy transmission and distribution.

Theory and Methods:

In the contact angle measurement platform manufactured using the 3D printer, the XLPE dielectric material was placed between the aluminum plane electrodes and exposed to an electric field. A high voltage source of 0-10kV, previously designed and made, was used as a high voltage generator during the experiments. Snapshots of the 1.8M saltwater droplet dropped on the XLPE dielectric material surface under the electric field were taken. In the image processing part of the study, images taken with a digital microscope were processed using the image processing techniques with the help of a graphical user interface (GUI) prepared on the MATLAB platform. Contact angle values were obtained as output.

Results:

Contact angle values were measured as $\theta_{XLPE} = 77,5^{\circ} \pm 2^{\circ}$ for a droplet of 1.8 M salt water on the surface of the XLPE ($R_a = 0,327\mu m$) sample in the absence of an electric field. The contact angle value for the 1.8 M brine droplet was measured as $\theta_{XLPE} = 66,80^{\circ} \pm 5^{\circ}$ when the distance between the electrodes was 7mm and the sample thickness was 1mm under 10kV voltage on the surface of the XLPE ($R_a = 0,327\mu m$) sample.

Conclusion:

An approach based on the contact angle for evaluation and determination of the wettability of XLPE dielectric materials is presented. As a result, the correlation between the electric field, surface roughness, hydrophobicity/hydrophilicity and contact angle was observed.



XLPE dielektrik malzemelerde elektrik alanının temas açısına ve damlacık şekline etkisi

Mustafa Karhan^{1*}, Musa Faruk Çakır¹, Özkan Arslan², Fatih Issı¹, Volkan Eyüpoğlu³

¹Çankırı Karatekin Üniversitesi, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 18200, Çankırı, Türkiye

²Namık Kemal Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, 59860, Tekirdağ, Türkiye

³Çankırı Karatekin Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, 18100, Çankırı, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- XLPE dielektrik malzemelerin ıslanabilirlik davranışının değerlendirilmesi
- Görüntü işleme teknikleri kullanılarak elektrik alanı altında temas açısı ölçümlerinin gerçekleştirilmesi
- Elektrik alanı, ıslanabilirlik ve temas açısı arasındaki korelasyonun gözlemlenmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 07.03.2020

Kabul: 27.01.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.700362

Anahtar Kelimeler:

XLPE dielektrik malzeme,
ıslanabilirlik,
elektrik alan,
temas açısı,
görüntü işleme

ÖZ

XLPE dielektrik malzemeler, elektrik iletim ve dağıtımında önemli bir yer tutmaktadır. Servis süresi boyunca XLPE dielektrik malzemelerin yaşlanması kaçınılmaz bir durumdur. XLPE dielektrik malzemelerin yüzey özellikleri, servis ömürlerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi sürecinde aktif rol oynamaktadır. Hidrofobisite ve hidrofilisite gibi özellikler malzemelerin yüzey özelliklerinin analizinde kullanılan yöntemlerden biridir. Bu çalışma kapsamında, elektrik enerjisi iletim ve dağıtımında yaygın bir şekilde kullanılan elektriksel yalıtımda önemli bir yer tutan XLPE malzemenin ıslanabilirlik davranışları hakkında yorum yapmaya yönelik olarak elektrik alanı altında temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 3D yazıcıyla üretilen temas açısı ölçüm platformunda XLPE dielektrik malzeme, alüminyum düzlem elektrotlar arasına yerleştirilip elektrik alanına maruz bırakılmıştır. Deneysel yapılarırken yüksek gerilim üretici olarak 0-10kV'luk bir yüksek gerilim kaynağı kullanılmıştır. Elektrik alanı altındaki XLPE yalıtkan üzerine bırakılan 1,8M tuzlu su damlacığının anlık görüntüleri alınmıştır. Çalışmanın görüntü işleme kısmında ölçüm ortamından dijital mikroskop ile alınan görüntüler, MATLAB platformunda hazırlanan bir arayüz yardımıyla görüntü işleme teknikleri kullanılarak işlenmiştir. Çıktı olarak temas açıları elde edilmiştir. Elektrik alanı altında XLPE yüzeylerinden elde edilen temas açıları XLPE dielektrik malzemelerin servis ömrü hakkında yorum yapabilmeye imkân sunacaktır. XLPE dielektrik malzemelerin ıslanabilirlikleri hakkında yorum yapılarırken temas açısı temelli bir yaklaşım sunulmuştur. Sonuç olarak elektrik alanı, ıslanabilirlik ve temas açısı arasındaki korelasyon gözlemlenmiştir.

Effect of electric field on contact angle and droplet shape in XLPE dielectric materials

H I G H L I G H T S

- Evaluation of the wettability behavior of XLPE dielectric materials
- Performing of the contact angle measurements under the electric field using image processing techniques
- Observation of the correlation between the electric field, wettability and contact angle

Article Info

Research Article

Received: 07.03.2020

Accepted: 27.01.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.700362

Keywords:

XLPE dielectric materials,
wettability,
electric field,
contact angle,
image processing

ABSTRACT

XLPE dielectric materials have an important place in electricity transmission and distribution. The aging of XLPE dielectric materials during the service period is inevitable. The surface properties of XLPE dielectric materials play an active role in the determination and evaluation of their service life. Properties such as hydrophobicity and hydrophilicity are the methods used in the analysis of the surface properties of materials. Within the scope of this project, contact angle measurements were carried out under the electric field for evaluation and determination on the wettability behavior of the XLPE material, which plays an important role in electrical insulation, which is widely used in electrical energy transmission and distribution. In the contact angle measurement platform manufactured using the 3D printer, XLPE insulator was placed between the aluminum plane electrodes and exposed to an electric field. A high voltage source of 0-10kV was used as a high voltage generator during the experiments. Snapshots of the 1.8M saltwater droplet dropped on the XLPE insulator surface under the electric field were taken. In the image processing part of the study, images taken with a digital microscope were processed using the image processing techniques with the help of a graphical user interface (GUI) prepared on the MATLAB platform. Contact angle values were obtained as output. Contact angles obtained from XLPE surfaces under the electric field will allow an evaluation of the service life of XLPE dielectric materials. An approach based on the contact angle for evaluation and determination of the wettability of XLPE dielectric materials is presented. As a result, the correlation between the electric field, wettability, and contact angle was observed.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde, yalıtkan malzeme olarak polimerik malzemelerin kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Polimerik yalıtkanlar alçak ve orta gerilim uygulamalarında ve transformatörlerde yalıtım amaçlı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1]. Polimerik yalıtkanların yüzey özellikleri, servis ömürlerinin belirlenmesinde ve tahmini sürecinde önemli bir rol üstlenmektedir [2, 3]. Hidrofobisite ve hidrofilisite gibi özellikler malzemelerin yüzey özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerden biridir [4, 5]. Polimerik yalıtkanların ıslanabilirlik karakteristikleri (hidrofobisite ve hidrofilisite) hakkındaki yorumlar ve değerlendirmeler temas açısı ölçümleri gerçekleştirilerek yapılmaktadır [4, 5].

Bu çalışma kapsamında polimerik yalıtkanları temsilen elektriksel, fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı orta ve yüksek gerilim kablolarında yoğun bir şekilde kullanılan bir elektriksel yalıtım malzemesi olan XLPE (çapraz bağlı polietilen) dielektrik malzeme kullanılmıştır [6-8]. Şekil 1’de XLPE izoleli orta gerilim kablolarından alınmış XLPE yalıtkanı gösterilmiştir. Şekil 2’ de temas açısı ölçümleri gerçekleştirilecek farklı pürüzlülük değerlerine sahip XLPE dielektrik malzeme numuneleri gösterilmiştir. Bu malzemelerin genel anlamıyla çevre koşullarına ve neme karşı iyi direnç, esneklik, zayıf mekaniksel kuvvet ve kimyasal direnç anlamında üstünlük gibi özellikleri mevcuttur. Çok yaygın bir kullanım alanına sahip olmakla beraber düşük maliyetlidir.

XLPE dielektrik malzemelerin hidrofilik ve/veya hidrofobik karakterleri malzemenin ömrünü ve servis süresini tayin edebilmektedir. Yüzey üzerindeki mikrokanal oluşumları polimer içerisinde suyun infüze olmasını ve dolayısıyla elektriksel yaşlanma olaylarının başlamasına ve

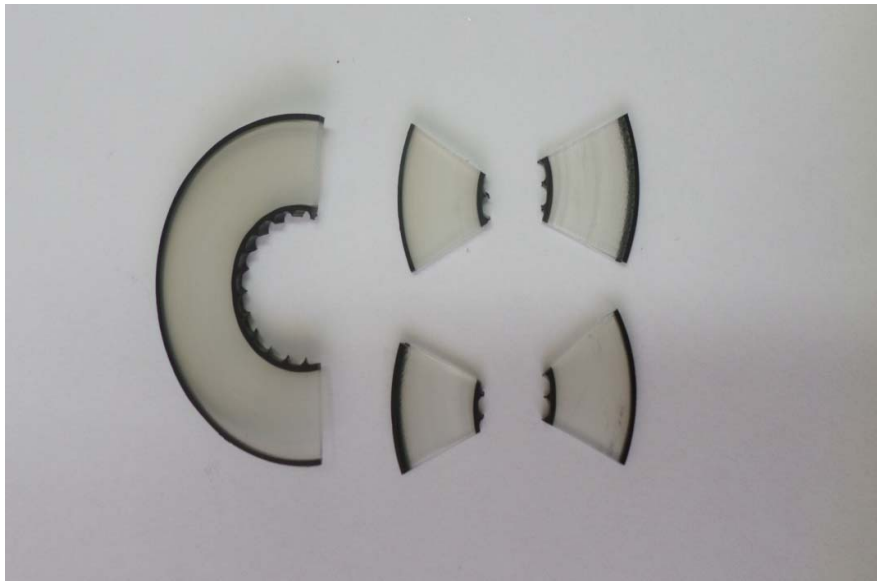
hızlanmasına neden olacaktır. Bu sebeple XLPE dielektrik malzemelerin yüzey karakteristikleri ve ıslanabilirlik davranışları arasındaki korelasyonun tespiti önem taşımaktadır.



Şekil 1. XLPE yalıtkanlı orta gerilim kablodan alınan numune görüntüsü

(Image of the sample taken from XLPE insulated medium voltage cable)

Hidrofobisite, hidrofilisite, temas açısı ve ıslanabilirlik kavramları elektrik ve elektronik mühendisliği [9-11], tekstil mühendisliği [12], inşaat mühendisliği [13], gıda mühendisliği [14], maden mühendisliği [15], malzeme mühendisliği [16] ve kimya mühendisliği [17] gibi birçok farklı mühendislik alanı içerisinde karşımıza çıkan ve kendine önemli bir yer bulan kavramlardır.



Şekil 2. Farklı pürüzlülük değerlerine sahip XLPE numuneleri (XLPE samples with different roughness values)

Elektrik alanının temas açısı üzerine etkilerini inceleyen çalışmalar çok sayıda olmamakla beraber literatürde bulunmaktadır. Genel olarak yapılan çalışmalar harici bir elektrik alan altında farklı sıvılar için farklı yüzeylerde ve farklı elektrik alan şiddeti altındaki temas açısı değer ve damlacık şekil değişimlerini incelemiştirler [18]. Vancauwenberghe vd. özetledikleri deneysel çalışmalarda elektrik alanının büyüklüğündeki bir artışla, yüzey ve sıvının türüne bağlı olarak temas açısının artabileceğini veya azalabileceğini öneren çalışmalar bulunmaktadır [18].

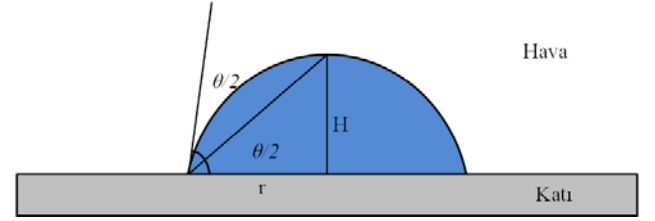
Almohammadi ve Amirfazli, 4 farklı yüzey (alüminyum, PEMA, PS ve teflon) için elektrik alan altında yaptıkları deneylerde temas açısının azaldığını gözlemlemiştirler. Sıvı olarak 20µl destile su kullanmışlardır. Alüminyum ve PEMA yüzeyler için E=11.1 kV/cm, PS yüzey için 10.3 kV/cm ve teflon yüzey için 7.5kV/cm elektrik alan şiddeti uygulanmıştır [19]. Di Marco vd., PTFE malzeme için etanolün temas açısı değerinin elektrik alan şiddetinin artmasıyla beraber arttığını gözlemlemiştir [20]. Bateni vd., paslanmaz çelik yüzey için destile su temas açısı değerinin elektrik alan şiddetinin artmasıyla beraber arttığını gözlemlemiştir [21]. Bateni ve ark. (2004), bir elektrik alanında iletken damlaların hem şekil hem de yüzey geriliminin incelenmesi için simetrik eksenli damla şekil analizi-elektrik alanları (Axisymmetric Drop Shape Analysis - Electric Fields) (ADSA-EF) olarak adlandırılan yeni bir metodoloji sunulmuştur. ADSA-EF kullanılarak yaptıkları ön ölçümler sonucunda, 10⁶ V/m büyüklüğünde bir elektrik alanı uygulandığında suyun yüzey geriliminin yaklaşık %2 arttığını gözlemlemiştirler [22].

Bateni vd., elektrik alanının temas açısı ve damlaların yüzey gerilimine etkisi üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada durağan damlaların temas açıları elektrik alanında deneysel olarak incelenmiştir. Elektrik alanında alkol gibi polar sıvıların temas açılarının arttığı gözlemlemiştirler [23].

2. TEMAS AÇISI VE ELEKTRİK ALAN (CONTACT ANGLE AND ELECTRIC FIELD)

XLPE yalıtkan malzemelerin ıslanabilirlik davranışlarının (hidrofobisite ve hidrofilisite) belirlenebilmesi için temas açısı ölçümlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Teğetsel yöntem, θ/2 yöntemi ve daire yöntemi [24-26], elips yöntemi [27, 28], Young-Laplace yöntemi [29, 30], polinomsal yöntem [31] ve B-spline snakes yöntemi [32] dahil olmak üzere üç fazlı temas hattındaki temas açılarını hesaplamak için çeşitli matematiksel yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmadaki temas açısı ölçümleri alınırken yarım açı θ/2 metodu, ImageJ çağrılıp koşturularak da LB-ADSA (Low-Bond Axisymmetric Drop Shape Analysis)[30] ve DropSnake [32] eklentileri kullanılmıştır. Yarım açı metodu, durağan damlayı (sessile drop) ideal bir kürenin parçası ve damlanın yan görünümünü ise bir çember varsayar (Şekil 3). Sonuç olarak bu metod yardımıyla temas açısı, damlanın yüksekliği (H) ve taban yarıçapına (r) bağlı olarak hesaplanır (Eş. 1) [24, 33].

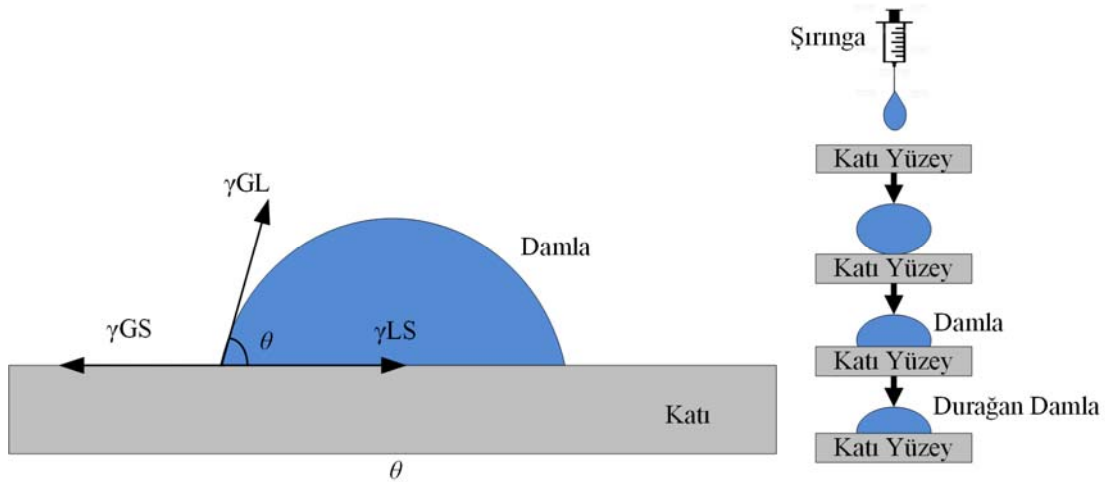
$$\theta = 2 \tan^{-1} \left(\frac{H}{r} \right) \quad (1)$$



Şekil 3. Bir durağan damlanın (sessile dropun) θ/2 yöntemi ile şematik gösterimi
(Schematic representation of a sessile drop with the θ/2 method)

2.1. Islanabilirlik ve Temas Açısı (Wettability and Contact Angle)

Islanabilirlik (hidrofobisite ve hidrofilisite), yaklaşık iki yüzyıl önce ilk kez Young tarafından tanımlanmış bir



Şekil 4. Yüzey gerilimleri ve statik temas açısı ölçümü sırasında durağan damlanın oluşumu
(Surface tensions. Formation of the sessile drop during static contact angle measurement)

kavramdır [34]. Bir yüzeyin ıslanabilirliği temas açısı (contact angle) olarak adlandırılan yüzey ile su damlası arasındaki açıyla açıklanabilecek bir karakteristiktir. Temas açısı, sıvı yüzey gerilimi (γ_{GL}), katı yüzey gerilimi (γ_{GS}) ve sıvı-katı arayüzey gerilimi (γ_{LS}) olmak üzere üç yüzey gerilimin arasındaki mekanik dengenin bir sonucudur ve Young denklemi ile ifade edilmektedir. İfade edilen bu eşitlik Eş. 2'de verilmiştir. Bu temas açısı aynı zamanda Young açısı veya statik temas açısı olarak tanımlanır [33]. Şekil 4'te temas açısı için yüzey gerilimleri ve statik temas açısı ölçümü sırasında durağan damlanın oluşumu gösterilmiştir.

$$\gamma_{GS} = \gamma_{GL} \cdot \cos\theta + \gamma_{LS} \quad (2)$$

Katı bir yüzeyin hidrofobikliği veya hidrofilikliği gerek pratik uygulamalarda gerekse AR-GE çalışmalarında önemli bir yere sahiptir. Ölçümler sonucunda elde edilen temas açısı değeri 90° 'den düşük ise yüzey hidrofilik, 90° 'den büyük ise hidrofobik, 150° ile 180° arasında ise süperhidrofobik özellik gösterir. Katı yüzeyin ıslanabilirliği yüzeyin kimyasal özelliklerine ve mikro yapısına bağlı bir özelliktir. Temas açısı; yüzey gerilimi, pürüzlülük, buharlaşma, malzeme cinsi, yüzey temizliği, ortam parametreleri, damlatılan sıvının cinsi, molaritesi, hacmi gibi birçok faktöre bağlıdır [33]. Şekil 5'te bir su damlasının katı yüzeyle yaptığı farklı temas açıları gösterilmiştir.

2.2. Elektrik Alanının Damlacık Şekline ve Temas Açısına Etkisi (Effect of Electric Field on Droplet Shape and Contact Angle)

Temel olarak, bir elektrik alanının altındaki bir damlacığın denge şekli, yüzey gerilimi ve dış kuvvetler (yerçekimi ve elektrik alanı) dengelenerek oluşturulur [21, 22]. Artırılmış Young-Laplace denklemi, yüzey gerilimi elektrik alanı ve yerçekimi arasındaki mekanik dengeyi tanımlar. Bu denge Eş. 3'te ifade edilmiştir [35, 36].

$$\gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \Delta P_0 + (\Delta\rho)gz + \Delta P_e \quad (3)$$

γ yüzey gerilimi, R_1 ve R_2 eğriliğin ana yarıçapları, ΔP_0 damla arayüzü boyunca basınç farkı, $\Delta\rho$ arayüz boyunca

yoğunluk farkı, g yerçekimi ivmesi, z referanstan dikey uzaklık, ΔP_e ara yüz boyunca Maxwell gerilme tensörünün normal bileşenindeki farka karşılık gelen elektrik basıncını göstermektedir [19, 22, 36].

Damlacık iletken bir sıvı olduğunda, damlacık içinde elektrik alanı yoktur. Bu durumda, Eş. 3 Eş. 4'deki gibi basitleştirilebilir ve yazılabilir:

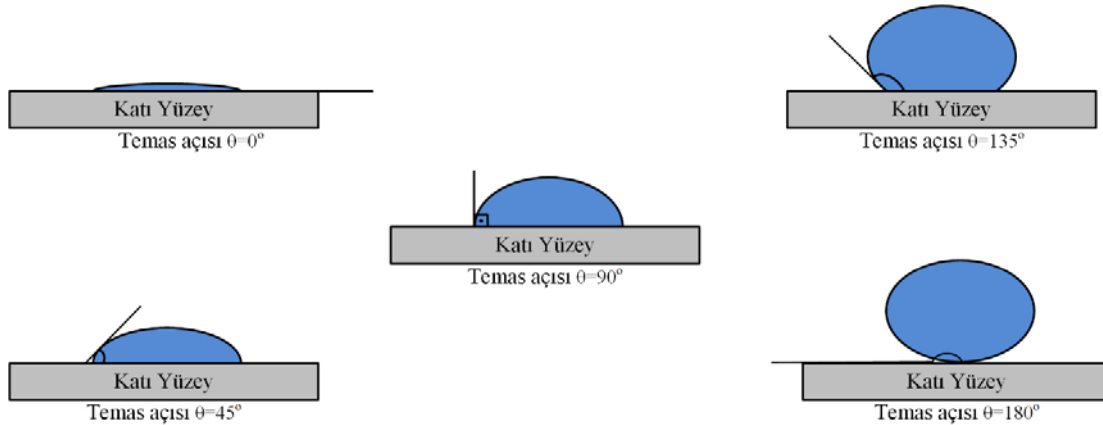
$$\gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \Delta P_0 + (\Delta\rho)gz + \frac{1}{2} \varepsilon^{(h)} E_n^{(h)2} \quad (4)$$

E_n , damlacık yüzeyindeki elektrik alanının normal bileşeni, ε sıvının geçirgenliği ve üst simge h , çevreleyen havayı temsil etmektedir [19, 22, 36].

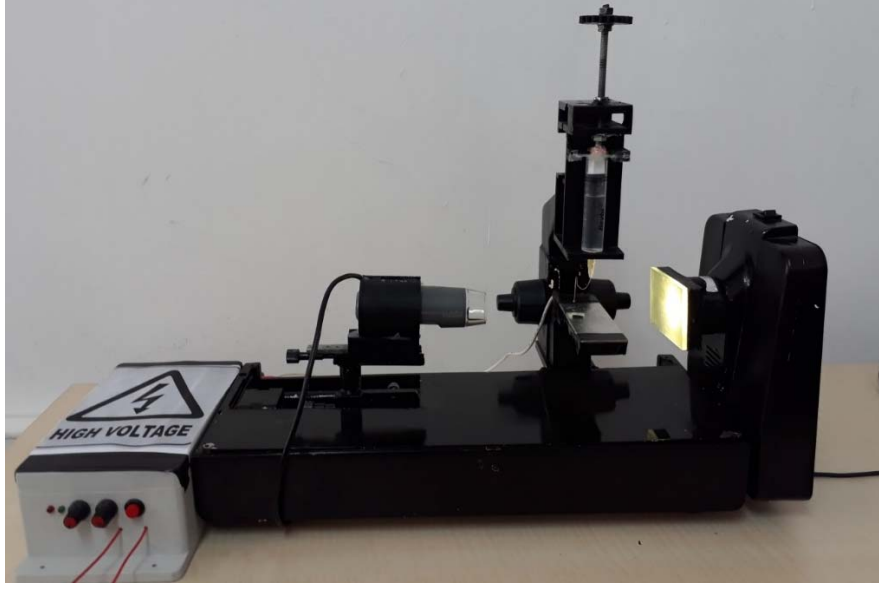
3. XLPE DİELEKTRİK MALZEMELER İÇİN ELEKTRİK ALAN ALTINDA TEMAS AÇISI ÖLÇÜM PLATFORMU

(CONTACT ANGLE MEASUREMENT PLATFORM UNDER THE ELECTRIC FIELD FOR XLPE DIELECTRIC MATERIALS)

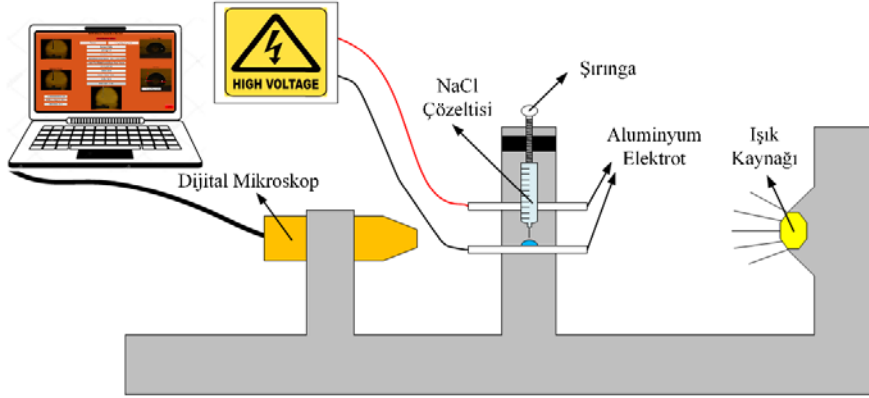
Temas açısı ölçümlerinin yapıldığı platform, ölçümlerin yüksek gerilim altında kontrollü ve güvenli bir şekilde yapmaya olanak sağlamaktadır. Tasarlanıp uygulanan bu platform yazılım ve donanım olmak üzere 2 bölüme ayrılmıştır. Donanım bölümü, istenilen elektrik alanını oluşturmak üzere yüksek gerilimin üretildiği yüksek gerilim kaynağı, düzlem alüminyum elektrotlar, NaCl çözelti, aynı hacimlere sahip tuzlu su damlacığının bırakıldığı şırınga, damlacık görüntülerinin alındığı dijital mikroskop, temas açısı ölçümlerinin doğru hesaplanabilmesine yönelik olarak ayarlanabilir ışık kaynağı ve XLPE numunelerden oluşmaktadır. Yazılım bölümünde ise dijital mikroskop yardımıyla alınan görüntülerin temel görüntü işleme teknikleriyle işlendiği, temas açısı değerlerinin hesaplandığı ve raporlandığı MATLAB platformunda hazırlanmış grafiksel kullanıcı arayüzü (GUI) mevcuttur. Elektrik alanı altında temas açısı ölçümlerinin gerçekleştirildiği platform Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 7'de temas açısı ölçüm platformunun şematik gösterimi verilmiştir. Elektrik alanının damlacık şekli ve temas açısına etkisini incelemek üzere 1,8 M NaCl çözeltiler hazırlanmıştır. NaCl çözeltiler



Şekil 5. Bir su damlasının katı yüzeyle yaptığı farklı temas açıları (Different contact angles of a water drop for solid surface)



Şekil 6. Elektrik alanı altında temas açısı ölçümlerin gerçekleştirildiği platform
(The platform where contact angle measurements are carried out under the electric field)



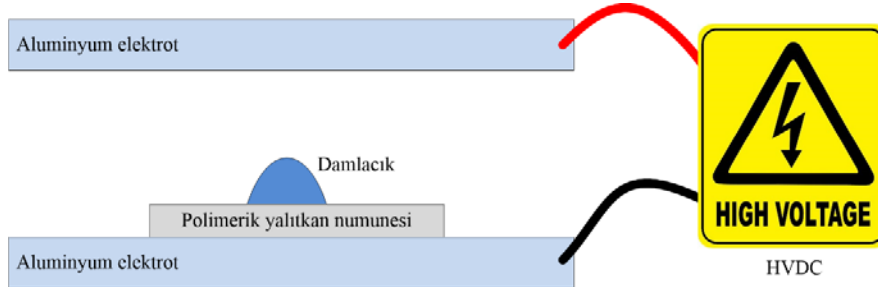
Şekil 7. Temas açısı ölçüm platformunun şematik gösterimi (Schematic representation of the contact angle measurement platform)

kontrollü bir şekilde temas açısı ölçümü yapmak için musluk suyu yerine ultra saf su (milli Q) ile hazırlanmıştır. Uygulamalarda yeraltı kablolarında kullanımları göz önünde bulundurularak deneylerde saf su kullanmak yerine tuzlu su kullanılmıştır. Damla için hazırlanan çözeltilerin iletkenlik değerleri, SG78 - (SevenGo Duo pro pH / İyon / İletkenlik Ölçer, Mettler Toledo) yardımıyla ölçülmüştür. Bu çalışma kapsamında damlacık sıvısı olarak 1,8 M molarite ve 135,9 mS/cm iletkenliğe sahip NaCl çözelti kullanılmıştır.

Literatürde uygulanan elektrik alan şiddetleri ve gerçekleştirilen deneyler baz alınarak deneysel çalışmalarda uygulanan gerilim değeri ve elektrotlar arası mesafe belirlenmiştir [19, 36]. Böylelikle numunelerin delinmesinden ve elektrotlar arası elektriksel boşalmadan kaçınılmıştır. Numune üzerine bırakılan damlacığın elektrik alan altındaki temas açısını incelemeye yönelik olarak 0-10 kV gerilim üretebilen bir kaynak kullanılmıştır. Bu kaynak gerek kullanıcı arayüzündeki kontrol panelinden gerek manuel olarak ayarlanabilmektedir. XLPE numuneler,

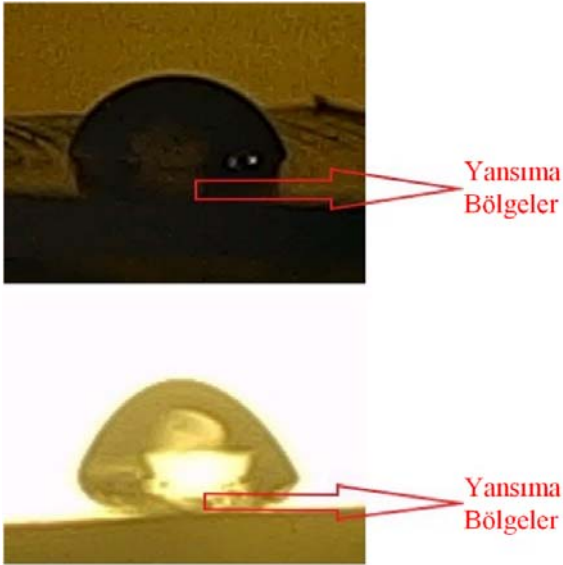
alüminyum düzlem elektrotlar üzerine yerleştirilmiştir. Alüminyum elektrot ile numune arasında boşluk kalmaması için iletken jel sürülmüştür. Düzlem elektrotlar yüksek gerilim üreticisine (0-10 kV) bağlanmıştır. Elektrik alanının damlacık şekline ve temas açısı değerine etkisine net bir şekilde gözlemleyebilmek adına çalışmalarda genellikle 10 kV mertebesinde çalışılmıştır. Şekil 8'de alüminyum elektrotlar arasındaki XLPE numune üzerine bırakılan damlacığın şematik gösterimi verilmiştir.

Temas açısı değerleri alınmadan önce numunenin yüzeyinin birörnek olmasına ve temiz olmasına dikkat edilmiştir. Her ölçüm öncesi XLPE numuneler alkol ile temizlenip saf su ile durulandıktan sonra kurutulmuştur. Temas açısı ölçümü yapılacak XLPE numuneleri için yüzey pürüzlülük değeri ortalama olarak $R_a=0,327\mu\text{m}$ ölçülmüştür. Ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (R_a) Mitutoyo SJ-410 marka/model profilometre kullanılarak elde edilmiştir. Temas açısı ölçümleri yapılırken damlacık görüntülerinin alınmasında Celestron 44308 marka/model dijital mikroskop



Şekil 8. Alüminyum elektrotlar arasındaki XLPE numune üzerine bırakılan damlacık (Droplet on the XLPE sample between aluminum electrodes)

kullanılmıştır. Görüntü işleme kısmında deney ortamından dijital mikroskop ile alınan görüntüler, MATLAB platformunda damlanın bölütlenmesine, damla yansıma bölgelerinin elimine edilmesine ve damlanın uç noktalarının bulunmasına yönelik görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Şekil 9'da elektrik alan uygulanmamış damlacık (üstte) ve elektrik alan uygulanmış damlacık (altta) görüntülerindeki yansıma bölgeler gösterilmiştir. Temas açısı ölçümü yapılırken durağan damla (sessile drop) yöntemi kullanılmıştır. Temas açısı hesaplanırken damlacık görüntülerinden anlamsız bölgeler elimine edilmiştir. Damlacığın taban çizgisi, sağ, sol ve tepe uç noktaları görüntü işleme teknikleri kullanılarak bulunup temas açısı, yarım açı (half angle - $\theta/2$) metoduyla hesaplanmıştır. Yarım açı metodu, durağan damlayı ideal bir kürenin parçası ve damlanın yan görünümünü ise bir çember varsayar. Sonuç olarak bu metod yardımıyla temas açısı, damlanın yüksekliği ve taban yarıçapına bağlı olarak hesaplanır.



Şekil 9. Damlacık görüntülerindeki yansıma bölgeler (Reflection regions in droplet images)

Bununla birlikte literatürde kabul görmüş ve ıslanabilirlik davranışları ile ilgili çalışmalarda temas açısı ölçümünde yaygın bir şekilde kullanılan ücretsiz bir yazılım olan ImageJ, kullanıcı arayüzüne eklenen buton yardımıyla

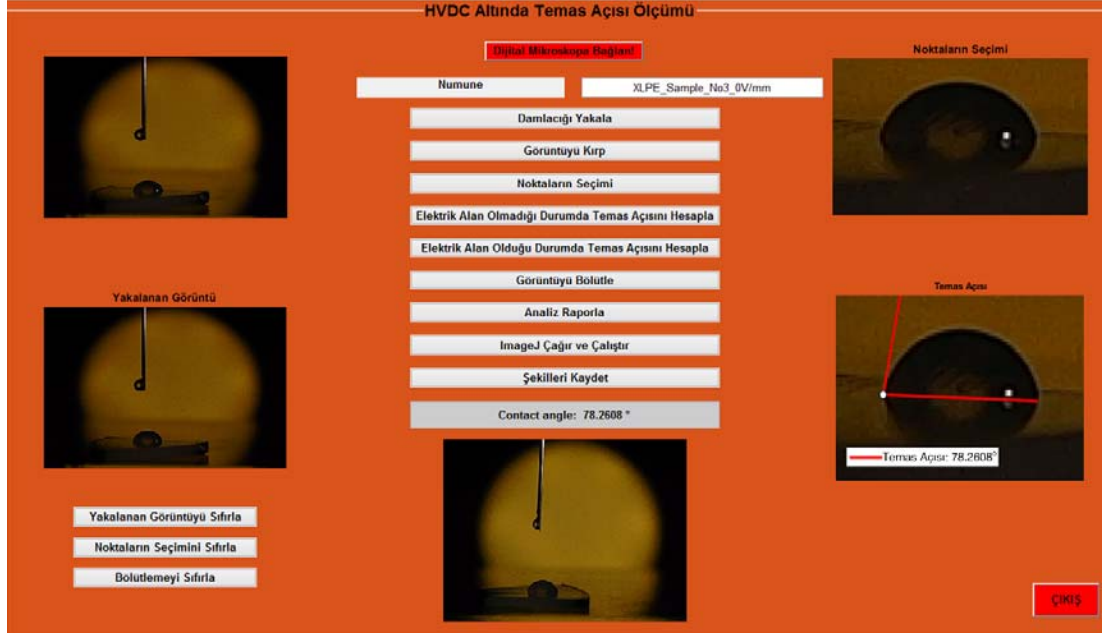
çalıştırılabilmektedir. LB-ADSA (Low-Bond Axisymmetric Drop Shape Analysis) [30] ve DropSnake [32] eklentileri kullanılarak ölçümler yapılabilmektedir. İstenildiği takdirde temas açısı ölçümleri bu platform üzerinden de yapılabilmekte ve karşılaştırmaya olanak sunulmaktadır.

Numune ismi ve belirleyici veriler girildikten sonra elektrik alan altındaki numunelerden damlacık görüntüleri alınıp temas açısı değerleri hesaplanıp kaydedilmektedir. Minimum 20 farklı numune yüzeyi için temas değerleri hesaplatılıp sütun ve saçılım grafikleri çizdirilmektedir.

Hazırlanan arayüz yardımıyla yüzey üzerine bırakılan damladan istenilen zaman aralıklarında görüntü alınabilmektedir. Alınan bu görüntülerin temel görüntü işleme teknikleri kullanılarak analizi yapılabilmektedir. Şekil 10'da temas açısı hesaplanabilmesine yönelik MATLAB platformunda hazırlanan kullanıcı arayüzü gösterilmiştir.

4. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Numune, temas açısı ölçümü yapılacak platforma düzgün bir şekilde yerleştirilmiştir. Temas açısı ölçümü yapılırken "Sessile Drop" yöntemi kullanılmıştır. $Ra=0,327\mu\text{m}$ yüzey pürüzlülüğü değerine sahip XLPE numuneleri üzerine $20\mu\text{L}$ hacime sahip $1,8\text{M}$ tuzlu su damlacığı şırınga ile bırakılmıştır. Tablo 1'de $Ra=0,327\mu\text{m}$ pürüzlülük değerlerine sahip XLPE numuneleri için elektrik alan altında ve elektrik alan olmadığı durumlarda temas açısı ölçüm sonuçları verilmiştir. Şekil 11 ve Şekil 12'de elektrik alan şiddeti 0 V/mm iken XLPE ($Ra=0,327\mu\text{m}$) numunesi yüzeyinde $1,8\text{ M}$ tuzlu su damlacığı için sırasıyla damlacık şekli ve hesaplanan temas açısı değeri verilmiştir. Şekil 13'te elektrik alan şiddeti 0 V/mm iken XLPE numuneleri için temas açısı değerlerinin sütun grafiği verilmiştir. Şekil 14'te elektrik alan altında XLPE ($Ra=0,327\mu\text{m}$) numunesi için damlacık şekli verilmiştir. Şekil 15'te XLPE numunesi ($Ra=0,327\mu\text{m}$) yüzeyinde 10kV gerilim altında elektrotlar arası mesafe 7mm ve numune kalınlığı 1mm iken $1,8\text{ M}$ tuzlu su damlacığı için hesaplanan temas açısı değeri verilmiştir. Şekil 16 ve Şekil 17'de XLPE ($Ra=0,327\mu\text{m}$) numuneleri yüzeyinde 10kV gerilim altında elektrotlar arası mesafe 7mm ve numune kalınlığı 1mm iken $1,8\text{ M}$ tuzlu su damlacığı için hesaplanan temas açısı değerlerinin sırasıyla sütun ve saçılım grafiği verilmiştir.



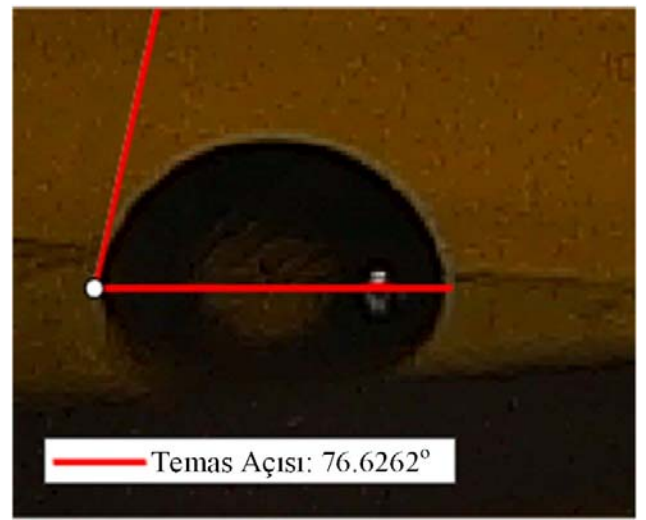
Şekil 10. Temas açısı hesaplanabilmesine yönelik kullanıcı arayüzü (The graphical user interface for calculating contact angle)

Tablo 1. XLPE numunesi için temas açısı ölçüm sonuçları (Contact angle measurement results for XLPE sample)

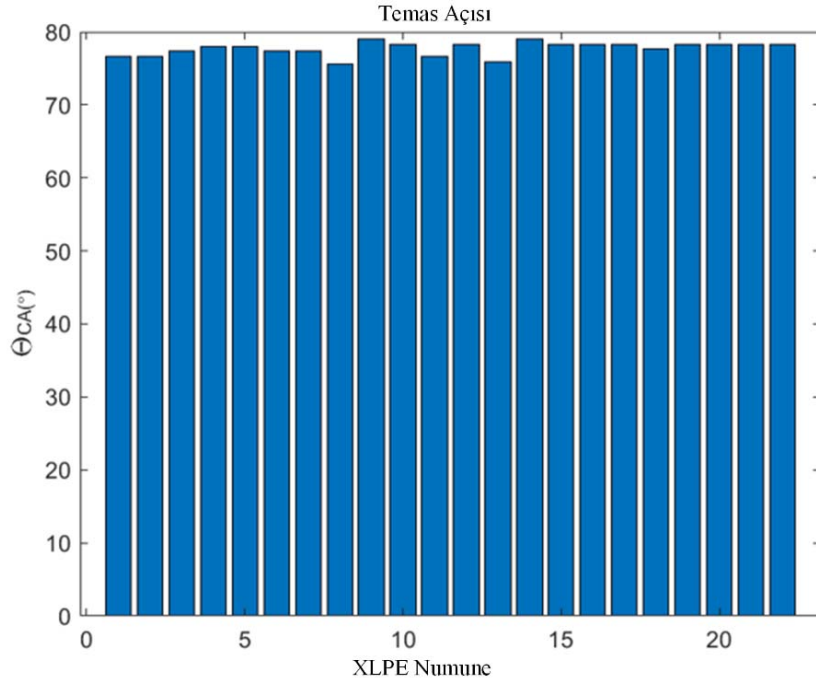
Temas Açısı Ölçüm Sonuçları (XLPE)		
	Uygulanan gerilim: 0 V	Uygulanan gerilim: 10 kV
Temas açısı (θ)	$77,5^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$66,80^{\circ} \pm 5^{\circ}$
Ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a)	$0,327 \mu\text{m}$	$0,327 \mu\text{m}$
Numune kalınlığı	1 mm	1 mm
Elektrotlar arası mesafe	-	7 mm
Damlacık çözeltisi	Tuzlu su	Tuzlu su
Çözelti iletkenliği	135,9 mS/cm	135,9 mS/cm
Çözelti molaritesi	1,8 M	1,8 M
Damlacık hacmi	20 μl	20 μl



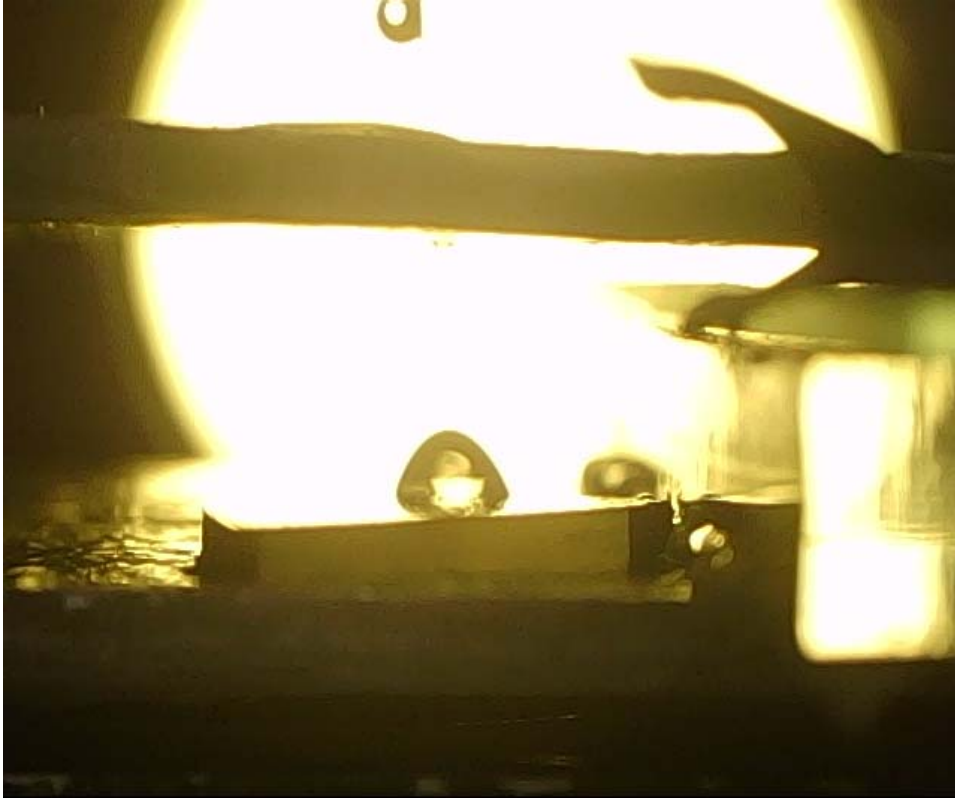
Şekil 11. XLPE numunesi için elektrik alan olmadığı durumda damlacık şekli (Droplet shape in the absence of electric field for XLPE sample)



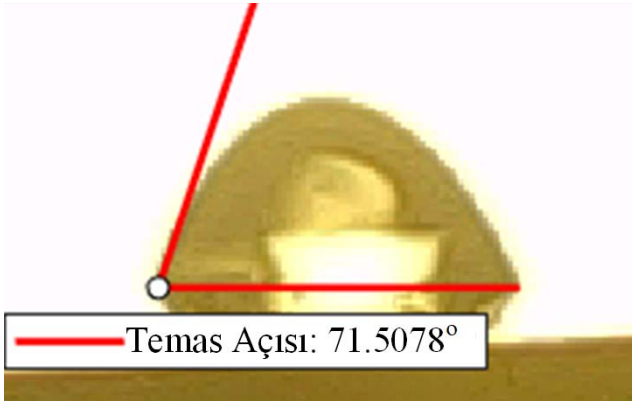
Şekil 12. XLPE numunesi için elektrik alan şiddeti 0 V/mm iken temas açısı (Contact angle when the electric field strength is 0 V/mm for XLPE sample)



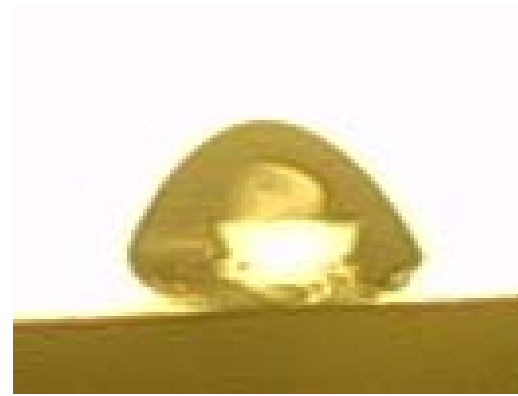
Şekil 13. XLPE numuneleri için elektrik alan şiddeti 0 V/mm iken temas açısı değerlerinin sütun grafiği
(Bar graph of contact angle values when the electric field strength is 0 V/mm for XLPE samples)



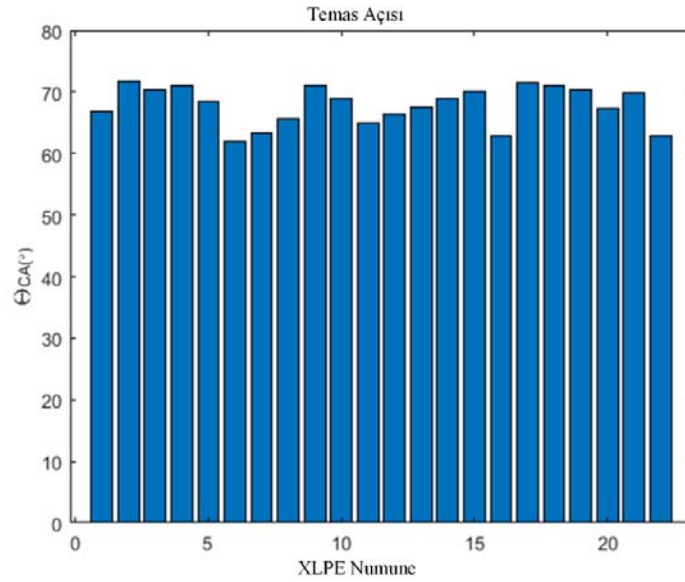
Şekil 14. XLPE numunesi için elektrik alan altında damlacık şekli (Droplet shape under the electric field for XLPE sample)



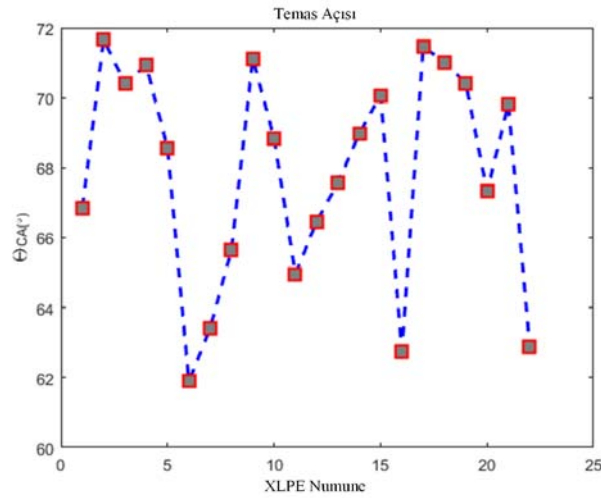
Şekil 15. XLPE numunesi için elektrik alan altında temas açısı (Contact angle under the electric field for XLPE sample)



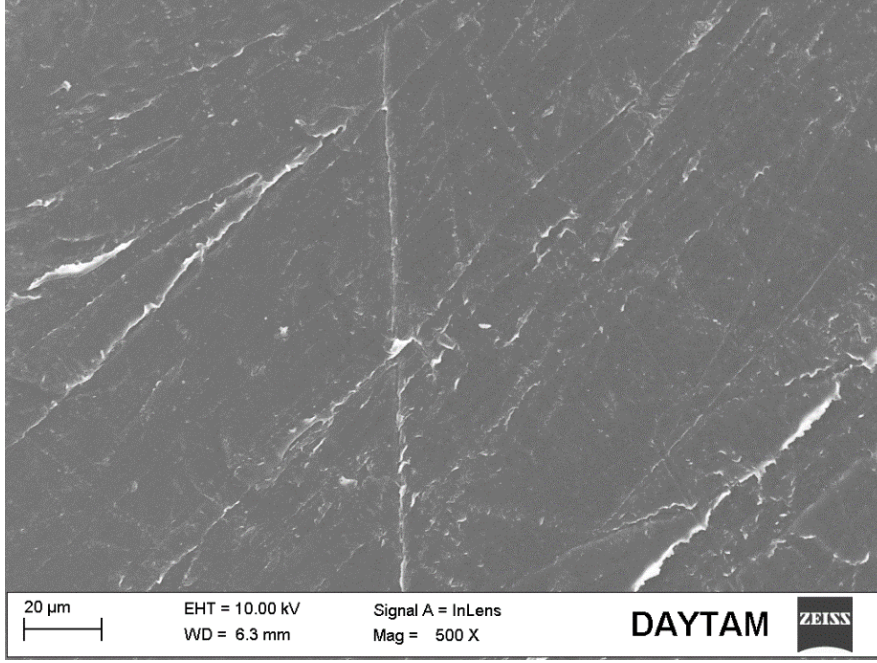
Şekil 18. XLPE numunesi için elektrik alan altında damlacık şekli (Droplet shape under the electric field for XLPE sample)



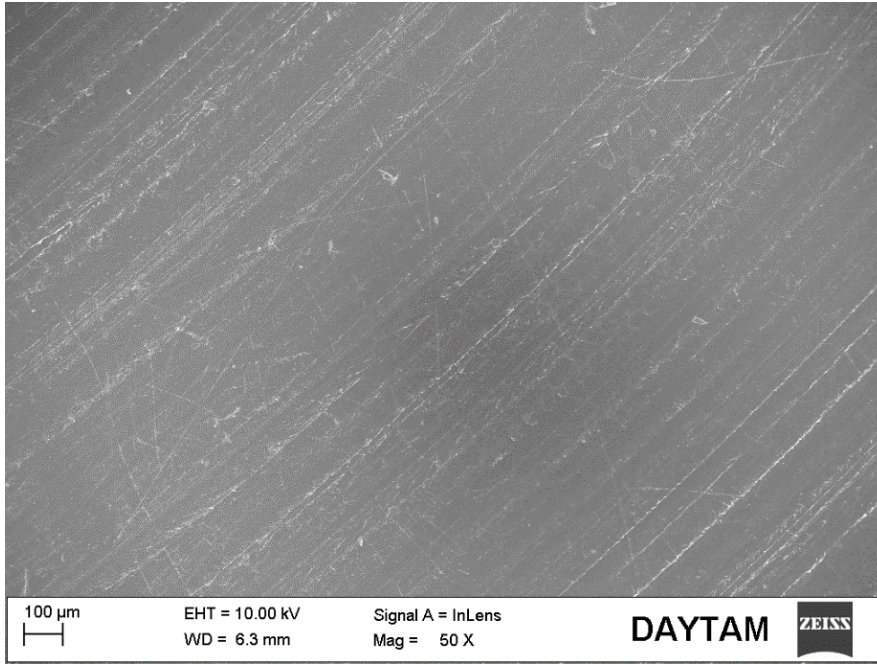
Şekil 16. XLPE numuneleri için elektrik alan altında temas açısı değerlerinin sütun grafiği (Bar graph of contact angle values under the electric field for XLPE samples)



Şekil 17. XLPE numuneleri için elektrik alan altında temas açısı değerlerinin saçılım grafiği (Scatter plot of contact angle values under the electric field for XLPE samples)



Şekil 19. XLPE numunenin SEM görüntüsü (SEM image of XLPE sample)



Şekil 20. XLPE numunenin SEM görüntüsü (SEM image of XLPE sample)

Şekil 11’de görüldüğü gibi elektrik alanının olmadığı durumda damlacık şekli yuvarlak bir şekil almışken, Şekil 18’de görüldüğü üzere elektrik alanı altındaki damlacıkta dikleşme eğilimi görülmektedir. XLPE dielektrik malzemenin yüzey karakterizasyonu amaçlı eklenen SEM görüntüleri malzeme yüzeyinde var olan pürüzlülük ve mikrokanal yapılarının varlığı noktasında bilgiler sunmaktadır. Temas ölçümleri gerçekleştirilen bazı XLPE numunelerinin farklı ölçeklerdeki SEM görüntüleri Şekil 19 ve Şekil 20’de verilmiştir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

XLPE dielektrik malzemelerin yüzey özellikleri, servis ömürlerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi sürecinde aktif rol oynamaktadır. Hidrofobisite ve hidrofilisite gibi özellikler malzemelerin yüzey özelliklerinin analizinde kullanılan yöntemlerden biridir. Islanabilirlik birçok endüstriyel alanda üretim aşamasında önemli bir rol üstlenmektedir. Elektrik alan altında malzemenin ıslanabilirliğinin arttığı ve hidrofilik bir yapıya eğilim

gösterdiği gözlemlenmiştir ve dolayısıyla hidrofilik karakterdeki elektriksel yaşlanma olaylarının başlamasına ve hızlanmasına neden olacaktır. Bu bağlamda XLPE dielektrik malzemelerin yüzey karakteristikleri ve ıslanabilirlik davranışları arasındaki korelasyonun tespiti önem taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında, elektrik enerjisi iletim ve dağıtımında yaygın bir şekilde kullanılan elektriksel yalıtımında önemli bir yer tutan XLPE dielektrik malzemenin ıslanabilirlik özellikleri hakkında yorum yapmaya yönelik olarak temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Temas açısı ölçümleri görüntü işleme algoritması yardımıyla MATLAB platformunda hazırlanan bir arayüz ile gerçekleştirilmiştir. XLPE yüzeylerinden elde edilen temas açıları polimerik yalıtkanların servis ömrü hakkında yorum yapabilmeye imkân sunacaktır.

Temas açısı değerleri, elektrik alanın olmadığı durumda XLPE ($R_a=0,327\mu\text{m}$) numunesi yüzeyinde 1,8 M tuzlu su damlacığı için $\theta_{XLPE}=77,5^\circ\pm 2^\circ$ olarak ölçülmüştür. XLPE ($R_a=0,327\mu\text{m}$) numunesi yüzeyinde 10kV gerilim altında elektrotlar arası mesafe 7mm ve numune kalınlığı 1mm iken 1,8 M tuzlu su damlacığı için hesaplanan temas açısı değeri $\theta_{XLPE}^*=66,80^\circ\pm 5^\circ$ olarak ölçülmüştür. Aynı gerilim altında elde edilen temas açılarındaki küçük farklılıklar yüzey pürüzlülüğü, yüzey temizliği, tuzlu su damlacığının XLPE numuneye temas anından sonra geçen süre, ortam parametreleri gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Elektrik alanının damlacık şekli ve temas açısına etki ettiği net bir şekilde görülmektedir. Elektrik alanı uygulanmadığında damlacık şeklinin daha yuvarlak bir şekil aldığı gözlemlenirken elektrik alanı altında damlacık şeklinin dikleştiği, konik bir şekil eğilimine girdiği ve temas açısında bir azalma gözlemlenmiştir.

Yüksek gerilim altında deney yapma tehlikesi ve damlacık görüntülerinin alınıp temas açısı hesaplanmasının zorluğu göz önünde bulundurulduğunda geliştirilen bu platform, malzemelerin elektrik alanındaki ıslanabilirlik davranışları hakkında değerlendirme yapılabilmesinde önemli kolaylıklar sağlayacaktır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı polimerik yalıtkanların, farklı elektrik alan şiddeti ve farklı damlacık sıvıları için temas açıları ölçülüp karşılaştırılması planlanmaktadır. Geliştirilen platform elektrik ve elektronik mühendisliği başta olmak üzere tekstil mühendisliği, inşaat mühendisliği, gıda mühendisliği, maden mühendisliği, metalurji ve malzeme mühendisliği ve kimya mühendisliği gibi birçok mühendislik disiplinine katkı sunacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Çankırı Karatekin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) tarafından MY0150219B04 numaralı proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ersoy A., Kuntman A., Polimerik yalıtkanlarda yüzey özelliklerinin temas açısı ile incelenmesi, Elektrik-

Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO2008), 107-111, 2008.

2. Ahmadi-Joneidi I., Shayegani-Akmal A.A., Mohseni H., Lifetime prediction of 20 kV field-aged silicone rubber insulators via condition assessment, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 24 (6), 3612-3621, 2017.
3. Ali M., Hackam R., Effects of saline water and temperature on surface properties of HTV silicone rubber, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 15 (5), 1368-1378, 2008.
4. Yan Z., Liang X., Shen H., Liu Y., Preparation and basic properties of superhydrophobic silicone rubber with micro-nano hierarchical structures formed by picosecond laser-ablated template, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 24 (3), 1743-1750, 2017.
5. Gubanski S. M., Vlastos A. E., Wettability of naturally aged silicon and EPDM composite insulators, IEEE Transactions on Power Delivery, 5 (3), 1527-1535, 1990.
6. Sekii Y., Charge generation and electrical degradation of cross-linked polyethylene, IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 14 (1), 4-15, 2019.
7. Al-Arainy A., Malik N. H., Qureshi M. I., Al-Saati M. N., 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, 2007.
8. Malik N. H., Qureshi M. I., Al-Arainy A. A., Saati M. N., Al-Natheer O. A., Anam S., Performance of water tight cables produced in Saudi Arabia under accelerated aging, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 19 (2), 490-497, 2012.
9. Kwon J. H., Bae J. H., Lee H., Park J., Dimethyl ketone treatment of cross-linked poly (4-vinylphenol) insulators for pentacene thin-film transistors, Journal of the Korean Physical Society, 74 (3), 280-285, 2019.
10. Gao Y., Liang X., Bao W., Li S., Wu C., Liu Y., Cai Y., Effects of liquids immersion and drying on the surface properties of HTV silicone rubber: Part I-contact angle and surface chemical properties, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 24 (6), 3594-3602, 2017.
11. Xu Z., An inclined plane based dynamic contact angle algorithm and its validity in application of hydrophobicity measurement for insulating materials, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 20 (5), 1832-1835, 2013.
12. Han S. W., Park E. J., Jeong M. G., Kim I. H., Seo H. O., Kim J. H., Kim Y. D., Fabrication of recyclable superhydrophobic cotton fabrics, Applied Surface Science, 400, 405-412, 2017
13. He L., Ma Y., Liu Q., Mu, Y., Surface modification of crumb rubber and its influence on the mechanical properties of rubber-cement concrete, Construction and Building Materials, 120, 403-407, 2016.
14. Aydar A. Y., Rodriguez-Martinez V., Farkas B. E., Determination and modeling of contact angle of Canola

- oil and olive oil on a PTFE surface at elevated temperatures using air or steam as surrounding media, *LWT-Food Science and Technology*, 65, 304-310, 2016.
15. Kowalczyk P. B., Akkaya C., Ergun M., Janicki M., Sahbaz O., Drzymala J., Water contact angle on corresponding surfaces of freshly fractured fluorite, calcite and mica, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 53, 2017
 16. Evcin A., Ersoy B., Uygunoğlu T., Güneş İ., The effect of different mineral additives on non-wettability and surface energy of epoxy floor coating, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (2), 599-610, 2018.
 17. Chen S. Y., Kaufman Y., Schrader A. M., Seo D., Lee D. W., Page S. H., Israelachvili J. N., Contact angle and adhesion dynamics and hysteresis on molecularly smooth chemically homogeneous surfaces. *Langmuir*, 33 (38), 10041-10050, 2017.
 18. Vancauwenbergh V., Di Marco P., Brutin D., Wetting and evaporation of a sessile drop under an external electrical field: A review, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 432, 50-56, 2013.
 19. Almohammadi H., Amirfazli, A., Sessile drop evaporation under an electric field, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 555, 580-585, 2018.
 20. Di Marco P., Pedretti F., Saccone G., Effect of an external electric field on the shape of a dielectric sessile drop, 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, Lisbon, Portugal, 2013.
 21. Bateni A., Amirfazli A., Neumann A. W., Effects of an electric field on the surface tension of conducting drops, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 289 (1-3), 25-38, 2006.
 22. Bateni A., Susnar S. S., Amirfazli A., Neumann A. W., Development of a new methodology to study drop shape and surface tension in electric fields. *Langmuir*, 20 (18), 7589-7597, 2004.
 23. Bateni A., Laughton S., Tavana H., Susnar S. S., Amirfazli A., Neumann A. W., Effect of electric fields on contact angle and surface tension of drops, *Journal of colloid and interface science*, 283 (1), 215-222, 2005.
 24. Gu H., Wang C., Gong S., Mei Y., Li H., Ma W., Investigation on contact angle measurement methods and wettability transition of porous surfaces, *Surface and Coatings Technology*, 292, 72-77, 2016.
 25. Neumann A. W., Good R. J., Techniques of measuring contact angles, In *Surface and colloid science*, Springer, 31-91 Boston, MA, 1979.
 26. Williams D. L., Kuhn A. T., Amann M. A., Hausinger M. B., Konarik M. M., Nesselrode E. I., Computerised measurement of contact angles, *Galvanotechnik*, 101 (11), 2502, 2010.
 27. Skłodowska A., Woźniak M., Matlakowska R., The method of contact angle measurements and estimation of work of adhesion in bioleaching of metals, *Biological procedures online*, 1 (3), 114-121, 1999.
 28. Lubarda V. A., Talke K. A., Analysis of the equilibrium droplet shape based on an ellipsoidal droplet model, *Langmuir*, 27 (17), 10705-10713, 2011.
 29. Kalantarian A., David R., Neumann A. W., Methodology for high accuracy contact angle measurement. *Langmuir*, 25 (24), 14146-14154, 2009.
 30. Stalder A. F., Melchior T., Müller M., Sage D., Blu T., Unser M., Low-bond axisymmetric drop shape analysis for surface tension and contact angle measurements of sessile drops, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 364 (1-3), 72-81, 2010.
 31. Bateni A., Susnar S. S., Amirfazli A., Neumann A. W., A high-accuracy polynomial fitting approach to determine contact angles, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 219 (1-3), 215-231, 2003.
 32. Stalder A. F., Kulik G., Sage D., Barbieri L., Hoffmann P., A snake-based approach to accurate determination of both contact points and contact angles, *Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects*, 286 (1-3), 92-103, 2006.
 33. Law K. Y., Zhao H., *Surface wetting: characterization, contact angle, and Fundamentals*, Switzerland: Springer, 2016.
 34. Young T., III. An essay on the cohesion of fluids, *Philosophical transactions of the royal society of London*, 95, 65-87, 1805.
 35. Adamiak K., Interaction of two dielectric or conducting droplets aligned in the uniform electric field, *Journal of Electrostatics*, 51, 578-584, 2001.
 36. Bateni A., Ababneh A., Elliott J. A. W., Neumann A. W., Amirfazli A., Effect of gravity and electric field on shape and surface tension of drops, *Advances in Space Research*, 36 (1), 64-69, 2005.

