



Electric field analysis of different electrode systems used for breakdown tests of insulating liquids with FEM

Eyüp Taslak^{1*}, Özcan Kalenderli²

¹Yildiz Technical University, Department of Electrical Engineering, Istanbul, 34220, Turkey

²Istanbul Technical University, Department of Electrical Engineering, Istanbul, 34469, Turkey

Highlights:

- Effect of voltage rise rate and electrode geometry on the breakdown voltage of mineral oil
- Electric field analysis in VDE and disk electrode systems
- Determination of the critical breakdown area in the presence of foreign particles

Keywords:

- High voltage
- Insulating oil
- Breakdown strength
- Electric field analysis
- Finite element method

Article Info:

Received: 22.12.2016

Accepted: 31.01.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416384

Acknowledgement:

Correspondence:

Author: Eyüp Taslak

e-mail:

eyuptaslak@outlook.com

phone: +90 212 285 6759

Graphical/Tabular Abstract

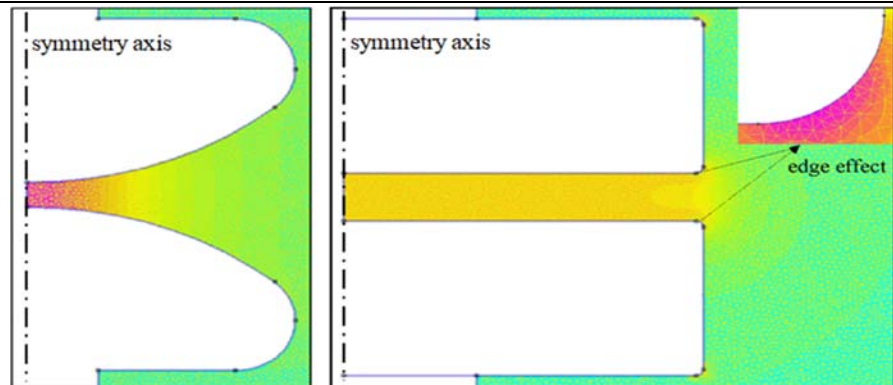


Figure A. The electrical field distributions for VDE electrodes (at left) and for disk electrodes (at right)

Table A. Maximum electric field intensities in mineral oil for different electrode systems (V/m)

Electrode type	Critical electric field line analyzed	Maximum electric field intensity $\times 10^5$ (V/m)		
		Without foreign particles	Air bubble	Water drop
VDE	Axis	155,66	202,59	309,32
	Between opposing edges	21,56	21,56	21,56
	Axis	150,00	204,66	312,56
Disk	Between opposing edges	197,08	197,08	197,08

Purpose: In this study, the effects of VDE and disk electrode systems on the breakdown voltage of mineral oil at different rates of voltage rise are examined theoretically and experimentally.

Theory and Methods:

Using the electrode systems described in the ASTM D1816 and ASTM D877 standards, the breakdown voltages of mineral oil are measured and compared with different voltage rise rates at same electrode gap. In addition, the electrical stresses in the insulating oil with and without air bubble and water drop are investigated by the FEMM package program which performs numerical analysis based on the finite element method (FEM) and critical breakdown area in the insulating oil is determined.

Results:

Analysis results show that the breakdown voltages measured by the VDE electrode system at all voltage rise rates are higher than the disk electrode system. In addition, the highest electric field intensity in the VDE electrode system is on the axis of symmetry while the highest electric field intensity among the disk electrodes occurs on the edges of the electrodes.

Conclusion:

It is founded that VDE electrode system has lower electric field strength in the oil than the disk electrode system, thus it provides a higher breakdown voltage. This can be explained that the VDE electrode system has a more uniform electric field distribution and the electrode edge effect is less than the disk electrode system. It is also determined that the VDE electrode system is more susceptible to air (gas) bubble and water drop than the disk electrode system. Therefore, it is recommended working with the VDE electrode system to better understand the negative effects of the gas bubble and water drop in the oil.



Yalıtkan sıvıların delinme deneylerinde kullanılan farklı elektrot sistemlerinin SEY ile elektrik alan incelemesi

Eyüp Taslak^{1*}, Özcan Kalenderli²

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34220, Türkiye

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 34469, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Gerilim yükselme hızının ve elektrot geometrisinin mineral yağın delinme gerilimine etkisi
- VDE ve disk elektrot sistemlerinde elektrik alan incelemesi
- Yabancı parçacıkların varlığında kritik delinme bölgesinin tespiti

Makale Bilgileri

Geliş: 22.12.2016

Kabul: 31.01.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416384

Anahtar Kelimeler:

Yüksek gerilim,
yalıtkan yağ,
delinme dayanımı,
elektrik alan analizi,
sonlu elemanlar yöntemi

ÖZET

Güç sistemlerinde kullanılan cihazların yalıtımında katı, sıvı, gaz ve karma yalıtkan malzemelerden yararlanılmaktadır. Yüksek gerilim güç transformatörlerinde hem faz-toprak ve fazlar arası elektriksel yalıtımı sağlamak hem de soğutmak amacıyla yalıtkan sıvılar kullanılır. Yalıtkan sıvıda elektriksel zorlanma uygulanan gerilim, elektrot biçimi ve yabancı parçacıkların varlığı gibi birçok etkene bağlıdır. Bu bakımdan, yalıtkan sıvıda farklı elektrotlar arasında gaz kabarcığı ve su damlacığından dolayı meydana gelen elektrik alan değişimlerinin analizi ve yalıtkan sıvıda kritik delinme bölgesinin belirlenmesi yalıtkan sıvının etkin kullanımı bakımından önemlidir. Bu çalışmada, mineral yağın delinme gerilimi üzerine, farklı gerilim yükselme hızlarında VDE ve disk elektrot sistemlerinin etkileri deneysel ve kuramsal olarak incelenmiştir. Ayrıca, yalıtkan yağda hava kabarcığı ve su damlacığı varken ve yokken meydana gelen elektriksel zorlanmalar sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile sayısal çözümlene yapan FEMM programı ile araştırılmıştır. İncelenen elektrot sistemleri, ekselel simetrijlerinden yararlanılarak FEMM programında ekselel kesitleriyle iki boyutlu olarak modellenmiştir. Bu yaklaşımda, modellerin simetri ekseninde 2π radyan döndürülmesiyle üç boyutlu elektrik alan dağılımı elde edileceği göz önüne alınmıştır. Analiz sonuçları, VDE elektrot sisteminin disk elektrot sistemine göre yalıtkan yağda daha düşük elektrik alan şiddetine sahip olduğunu, dolayısıyla daha yüksek delinme gerilimi sağladığını göstermiştir.

Electric field analysis of different electrode systems used for breakdown tests of insulating liquids with FEM

H I G H L I G H T S

- Effect of voltage rise rate and electrode geometry on the breakdown voltage of mineral oil
- Electric field analysis in VDE and disk electrode systems
- Determination of the critical breakdown area in the presence of foreign particles

Article Info

Received: 22.12.2016

Accepted: 31.01.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416384

Keywords:

High voltage,
insulating oil,
breakdown strength,
electric field analysis,
finite element method

ABSTRACT

Solid, liquid, gas and composite insulators are utilized for power system equipment insulation. In HV power transformers, insulating liquids are used to provide both electrical insulation and cooling the transformer. The electrical stress on insulating liquid depends on many factors such as applied voltage, electrode geometry, and foreign particles. In this regard, analysis of electric field changes occurring due to gas bubbles and water droplets between the different electrodes, and determination of the critical breakdown area are important for effective use of insulating liquid. In this study, effects of VDE and disk electrode systems on the breakdown voltage of mineral oil at different rates of voltage rise are examined theoretically and experimentally. In addition, the electrical stresses in the oil with and without air bubbles and water droplets are investigated with FEMM program using finite element method (FEM). The examined electrode systems are modeled as 2D using axial symmetry. In this approach, it is considered that 3D electric field distribution is obtained by rotating 2π radians around the symmetry axis of the models. Analysis results show that the VDE electrode system has lower electric field strength in the oil than the disk electrode system, thus it provides higher breakdown voltage.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: eyuptaslak@outlook.com / Tel: +90 212 285 6759

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek gerilim cihazlarında elektriksel yalıtım konusu, enerji sürekliliği, güvenliği ve ekonomikliği bakımından araştırılması gereken önemli bir konudur. Transformator (dağıtım, güç, akım, gerilim transformatörleri), kondansatör, reaktör, kablo, geçit izolatörü, vb. gibi yüksek gerilim donanımlarında elektriksel yalıtımı ve ısı soğutmayı sağlamak için çeşitli yalıtım sıvıları kullanılır. Genelde yalıtkan yağ türünde olan bu sıvılar, kimyasal açıdan mineral yağlar, yüksek moleküler ağırlıklı hidrokarbonlar, silikonlu yağlar ve bitkisel sıvılar olarak sınıflandırılmaktadır. Mineral yağlar, kimyasal açıdan naftanik, parafinik ve aromatik hidrokarbon moleküllerinden oluşmaktadır. Bu yalıtkan yağlar düşük maliyetli olması, iyi yalıtım performansına ve ısı soğuma yeteneğine sahip olması nedeniyle yaklaşık 100 yıldan beri en çok tercih edilen yalıtım sıvılarıdır.

Yalıtkan sıvıların delinme gerilimleri, ilgili test standartlarında tanımlanan elektrot biçimine, elektrotlar arası açıklığa, gerilim yükselme hızına, ölçüm sayısına, delinmeler arası bekleme süresine bağlı olarak değişir. [1]'deki çalışmada, mineral yağın delinme gerilimi ASTM D1816, ASTM D877 ve IEC 60156 standartlarına göre ölçülmüş ve farklı standartlara göre ölçülen delinme gerilimleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. [2, 3]'deki çalışmalarda IEC 60156 standardına göre yapılan deneylerde standart sapmayı azaltmak ve deneysel ölçmeyi iyileştirmek için önerilerde bulunulmuştur. Literatürde, yalıtkan sıvı içerisinde bulunabilen katı parçacıkların [4, 5], gaz kabarcıklarının [6, 7] ve su damlacıklarının [8, 9] delinme gerilimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yalıtkan sıvı içerisindeki yabancı parçacıkların yağın dielektrik dayanımı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Bu etkide, yalıtkan sıvı içerisindeki katı parçacıkların kutuplanabilir olması ve yalıtkan sıvıdan daha yüksek dielektrik sabitine sahip olması etkilidir. Bu durum, katı parçacıkları maksimum alana doğru yönlendiren ve çeken bir elektriksel kuvvetin sonucudur. Elektrotlar arasındaki yüksek elektrik alanda biriken yabancı parçacıklar, bir köprü oluşturarak elektriksel delinmenin kolaylaşmasına neden olur. Yalıtkan sıvı içerisinde katı parçacıklar yerine, yalıtkan sıvıdan daha düşük delinme dayanımına sahip su damlacıkları, hava kabarcıkları veya gaz habbecikleri de olabilmektedir. Bu durumda, su damlacığı (nem) veya hava (gaz) kabarcıklarının delinmesiyle yalıtkan sıvının tamamen delinmesi tetiklenebilir. Yalıtkan yağların delinme gerilimi deneylerinde elektrotlar arası açıklık ve uygulanan gerilimin yükselme hızı gibi deneysel koşulların aynı olması, farklı tipte elektrot sistemlerinin yağda meydana getirdiği elektriksel zorlanmaları birbirleri ile kıyaslamakta daha güvenilir sonuçlar verecektir. Yalıtkan yağın delinme gerilimi standartlarında tanımlanan elektrot sistemlerinin yağda meydana getirdiği elektriksel zorlanmaların karşılaştırılması ve bu elektrot sistemleri arasında yabancı parçacıklar varken yağdaki kritik delinme bölgesinin tespiti konusunda literatürde az çalışma olduğu görülmüştür. Bu

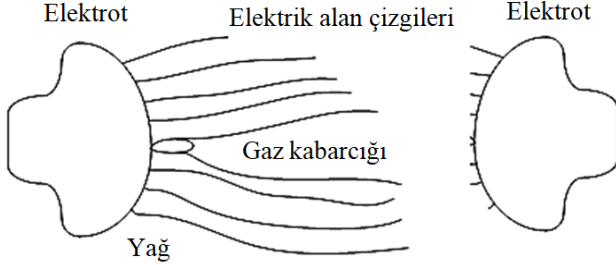
makalede, deneysel ve sayısal benzetim (simülasyon) olmak üzere iki farklı yoldan delinme gerilimi ve elektrik alan dağılımı analizleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, yalıtkan sıvıların delinme gerilimini belirleme deneylerinde göz önüne alınan ASTM D1816 ve ASTM D877 standartlarında tanımlanan elektrot sistemlerini kullanarak aynı elektrot açıklığında farklı gerilim yükselme hızları ile delinme gerilimleri ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır [10, 11]. Böylece, kullanılan elektrot sistemlerinin farklı gerilim yükselme hızlarında delinme gerilimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Daha sonra, yalıtkan sıvı içinde bu elektrotlar arasında yabancı cisim yokken, hava kabarcığı ve su damlacığı varken elektrik alan dağılımları incelenmiş ve bu elektrot sistemleri elektriksel zorlanma bakımından karşılaştırılarak yalıtkan yağda kritik delinme bölgesinin yeri belirlenmiştir. Analizler, sonlu elemanlar yöntemine (SEY) göre çözüm yapan açık kodlu FEMM paket programı ile gerçekleştirilmiştir.

2. YALITKAN SIVILARDA DELİNME (BREAKDOWN IN INSULATING LIQUIDS)

Elektrik tesislerinde kullanılan katı, sıvı ve gaz yalıtkan malzemelerin delinme gerilimi değerleri işletmenin güvenilirliği, sürekliliği ve uzun ömürlü olması açısından önemlidir. Bu yalıtkan maddelerin delinme dayanımlarının belirlenmesi ve delinme ile ilgili teorilerinin geliştirilmesi amacıyla pek çok çalışma yapılmıştır. Gaz ve katı yalıtkan maddeler ile ilgili yapılan çalışmalar yanında sıvı yalıtkanlar için gerçekleştirilen çalışmalar daha azdır. Bunun nedeni ise yağların moleküler yapılarının gaz ve katı maddelere oranla daha karmaşık ve düzensiz olmasıdır. Elektro-optik tekniklerin geliştirilmesi yağlardaki delinme olayının açıklanmasında önemli ilerlemeler sağlamıştır. Aşırı elektriksel zorlanmalara maruz kalan ve ısınan yağlarda, yağın buharlaşması nedeniyle gaz veya hava kabarcıklarının oluştuğu ve kabarcıklar içinde olan elektriksel boşalmaların yağın delinmesini kolaylaştırdığı görülmüştür. Hava kabarcıkları içinde olan yerel boşalmaların genişlemesi ile elektrotlar arasında tam boşalma olayı yani delinme daha kolay gerçekleşmektedir [12].

Yalıtım sıvılarında gaz kabarcıklarının oluşmasının çeşitli nedenleri vardır. Bu nedenlerden bazıları arasında yağın hareketi, çalkalanması, maruz kaldığı ısı ve elektriksel zorlanmaların yüksekliğinden dolayı hidrokarbon gazların açığa çıkması, atmosferden hava emilmesi, ani sıcaklık değişimlerinden dolayı buharlaşan su ve yağ sayılabilir. Yalıtkan yağlarda çözünmüş olarak bulunabilen gazlar doyma seviyesine ulaştığında yalıtkan yağda gaz kabarcıkları oluşur. Gaz kabarcıklarının varlığı yağın delinme gerilimi üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Yalıtkan yağın delinme gerilimi gaz kabarcıklarının hem miktarına ve büyüklüğüne hem de kabarcık içindeki gazın türüne bağlıdır [13]. Şekil 1'den görüldüğü gibi elektrik alana maruz kalan yağ içinde elektrotlar arasında küre şeklinde gaz kabarcıkları meydana gelir. Bu gaz kabarcıklarında, hem daha yüksek elektrik alana maruz kalmaları hem de içindeki gazın

yalıtkan yağa göre daha düşük elektrik dayanımına sahip olmasından dolayı kısmi boşalma olarak adlandırılan elektriksel boşalmalar olur [14]. Gaz kabarcıklarındaki elektriksel boşalmalar, yağ içinde iletken kanallar oluşturarak yağdaki delinmenin daha düşük gerilim seviyelerinde gerçekleşmesine neden olur.



Şekil 1. Yağ içinde elektrik alanında bir gaz kabarcığı
(A gas bubble in the electric field in the oil)

Hava veya gaz kabarcıkları, yalıtkan yağlarda meydana gelen boşalmaların sebeplerinden biridir. Düzgün elektrik alanında, bir yalıtkan yağda küresel bir gaz kabarcığı içindeki elektrik alan şiddeti (E_b), Eş. 1 ile hesaplanabilir [7].

$$E_b = \frac{3 \cdot \epsilon_2}{2 \cdot \epsilon_2 + \epsilon_1} \cdot E_0 \quad (1)$$

Bu denklemde ϵ_1 kabarcık içindeki gazın (veya havanın) dielektrik katsayısı (sabit) ve ϵ_2 ise yalıtkan sıvının (veya yağın) dielektrik katsayısıdır (sabit). E_0 yalıtkan yağda gaz kabarcığı olmadığı durumda, düzgün alandaki elektrik alan şiddetidir. Yalıtkan sıvıdaki bir gaz kabarcığı içindeki elektrik alan şiddeti için yukarıdaki denklemin kabarcık yarıçapını, gerilim düşümünü, yüzey gerilimini göz önüne alarak geliştirilmiş hali Eş. 2 ile ifade edilebilir.

$$E_b = \frac{1}{(\epsilon_2 - \epsilon_1)} \left\{ \frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot (2 \cdot \epsilon_2 + \epsilon_1)}{r} \cdot \left[\frac{\pi}{4} \sqrt{\left(\frac{V_b}{2 \cdot r \cdot E_0} \right)} - 1 \right] \right\}^{1/2} \quad (2)$$

Bu denklemde, σ yalıtkan sıvının yüzey gerilimi, r gaz kabarcığının yarıçapı ve V_b ise gaz kabarcığındaki gerilim düşümdür [15, 16]. E_b elektrik alanı, gaz kabarcığının delinme dayanımına eşit veya büyük olduğunda gaz kabarcığında elektriksel boşalma oluşur ve tüm elektrot sistemi için kısmi boşalma sayılan bu boşalmalar sonunda yalıtkan sıvı delinir.

3. YÖNTEM (METHODOLOGY)

Bu bölümde, deneysel yöntem ve elektrik alan analizleri için faydalanılan sonlu elemanlar yöntemi tanıtılmıştır.

3.1. Deneysel Yöntem (Experimental Method)

Deneysel çalışmada, ASTM D1816 ve ASTM D877 standartlarında tanımlanan elektrot sistemleri ile bir mineral yağın delinme gerilimleri ölçülmüştür. Ölçmeler 115 kV'luk

bir yağ test cihazında VDE (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.) ve disk elektrotlar kullanılarak 2 mm elektrot açıklığında, farklı gerilim yükselme hızlarında yapılmıştır. Şekil 2'de deneylerde kullanılan ve benzetimde de göz önüne alınan elektrotlar gösterilmiştir. Kullanılan elektrot sistemlerine ilişkin boyutlar Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 2. Disk (solda) ve VDE elektrotlar (sağda)
(Disk (on left) and VDE electrodes (on right))

Tablo 1. Kullanılan elektrotların boyutsal özellikleri
(Dimensional characteristics of the electrodes)

Özellik	Elektrot Tipi	
	VDE	Disk
Elektrot çapı (mm)	36	25,4
Elektrot kalınlığı (mm)	13	6,4
Kenar eğrilik yarıçapı (mm)	4	0,25
Elektrot açıklığı (mm)	2	2

Deneysel çalışma, aşağıda belirtilen süreç izlenerek gerçekleştirilmiştir. Mineral yağ, paslanmaz bir çelik kaba konularak bir fırında 18 saat süre ile 90°C sıcaklıkta tutulmuştur. Bu yöntemle mineral yağın içindeki nemden arındırılması amaçlanmıştır. Test hücresi ve ölçüm elektrotları suyla yıkayıp temizlenmiş ve aynı fırında kurutularak nemden arındırılmıştır. Daha sonra, mineral yağ laboratuvar ortamında soğumaya bırakılmış ve yağın sıcaklığı 22°C'ye (oda sıcaklığına) ulaştığında yağ, test hücresine yavaşça ve hava kabarcığı oluşmayacak şekilde doldurulmuş ve gerilim uygulanmasına geçmeden önce 3 dakika beklenmiştir. Tablo 3'te belirtilen gerilim yükselme hızlarında yağda delinme meydana gelene kadar elektrotlar arasına gerilim uygulanmıştır. Ardışık delinmeler arasında 1,5 dakika beklenerek her gerilim yükselme hızında beş ölçme yapılmıştır. Bu beş ölçümün aritmetik ortalama değeri, mineral yağın delinme gerilimi olarak kabul edilmiştir. Bu ölçme yöntemi VDE ve disk elektrot sistemleri için her seferinde ayrı ayrı uygulanmıştır.

3.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method)

Elektrot sistemlerinde elektrik alan dağılımını incelemek için kullanılan yöntemlerden biri sonlu elemanlar yöntemidir. Yöntemde, problemin geometrik yapısına ve simetrisine göre uygun koordinat sisteminde tanımlama ve çözümlene yapılması, çözümlene doğruluğunu ve kolaylığını artırır. Bu çalışmada incelenen elektrot sistemleri aksel simetrisinden dolayı silindriyel koordinatlarda incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile silindriyel koordinatlarda elektrik alanı incelemek için,

eksenel simetriden dolayı iki boyutlu bölgede, $V = V(r, z)$ elektriksel potansiyel çözümünü bulmak gerekir. Potansiyel çözümü Eş. 3'deki Laplace denklemi çözülerek bulunur.

$$\Delta V = \frac{\partial^2 V(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 V(r, z)}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

Burada r radyal (çapsal) koordinat bileşeni, z de eksenel koordinat bileşenidir. İki boyutlu böyle bir elektrostatik alan probleminde çözüm bölgesi içindeki toplam elektrik enerjisi;

$$W = \varepsilon \pi \iint \left[\left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] r dr dz \quad (4)$$

olarak yazılır. Burada, V elektriksel potansiyel, ε da incelenen bölgedeki dielektriğin (örneğin yağın) dielektrik katsayısıdır. Sonlu elemanlar yönteminin ilkesi, problem için Laplace denkleminin çözümünden bulunan potansiyel ile problemin tanımlandığı bölgedeki enerjiyi en küçük değere indiren çözümden bulunan potansiyelin aynı olmasına dayanır. Bu nedenle sonlu elemanlar yönteminde Laplace denklemini (bir diferansiyel denklemi) çözmek yerine Eş. 4'deki enerji denklemini en küçük (minimum) yapan bir potansiyel çözümünü bulmak yoluna gidilir [17]. İncelenen bölge için, problemin şekli, sınır koşulları, yalıtkan sıvıya uygulanan gerilim değeri ve malzeme özellikleri belirlenerek problemin tanımı yapılır. Alanı incelenen bölge sonlu elemanlara bölünür. Daha sonra enerji denklemi çözülür. Bu çalışmada bu çözümleme için sonlu elemanlar yöntemine göre çözümleme yapan FEMM paket programı kullanılmış ve programda çözümleme silindrisel koordinatlarda yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında göz önüne alınan analiz verileri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Paket program analiz verileri
(Analysis data of package program)

Özellik	Değer
Uygulanan gerilim (50 Hz AC)	30 kV
Yağın bağlı dielektrik katsayısı	2,3
Hava kabarcığının çapı	0,5 mm
Su damlacığının çapı	0,5 mm
Havanın bağlı dielektrik katsayısı	1
Suyun bağlı dielektrik katsayısı	81
Deney kabının bağlı dielektrik katsayısı	5

Analizlerde yalıtkan yağdaki hava kabarcığının ve su damlacığının küre şeklinde oldukları ve elektrotlar arası aralığın tam ortasında buldukları kabul edilmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu bölümde, VDE ve disk elektrotlar ile mineral yağda yürütülen deneysel ve elektrik alan analizlerinin sonuçları ve yorumları sunulmuştur.

4.1. Deneysel Analizler (Experimental Analyses)

VDE ve disk elektrot sistemlerinde 2 mm elektrot aralığı için 0,5, 2 ve 3 kV/s gerilim yükselme hızlarında mineral yağın ölçülen delinme gerilimleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. İki farklı elektrot türü için farklı gerilim yükselme hızlarında mineral yağın ölçülen delinme gerilimleri
(Breakdown voltages of mineral oil at different voltage rise rates for two different electrodes)

Gerilim yükselme hızı (kV/s)	Delinme gerilimi (kV)	
	VDE elektrot sistemi	Disk elektrot sistemi
0,5	28,90 kV	27,04 kV
2	36,44 kV	33,44 kV
3	42,46 kV	39,82 kV

Deneylerde VDE elektrot sistemi ile ölçülen delinme gerilimleri tüm gerilim artış hızlarında disk tipi elektrotlarla ölçülenlere göre daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni, disk elektrotun daha yüksek elektrik alana sebebiyet veren eğrilik yarıçapı küçük kenarlara sahip olmasıdır. Elektrotların keskin kenarlarında elektrik alan şiddeti daha yüksek olduğu için delinme öncelikle bu kenarlardan başlar [9, 18]. Yalıtkan yağda delinme yağ içindeki yabancı parçacıklara ve serbest yüklerle de bağlıdır. Düzgün elektrik alanda yalıtkan yağ (ε_{r1}) içinde bulunan yabancı parçacıklar (ε_{r2}), $\varepsilon_{r2} > \varepsilon_{r1}$ olması durumunda elektrik alan yönünde hareket ederler. Bu hareket yağ delinmesine neden olan kısmi boşalmalara neden olur. Ayrıca, yağ içindeki yüksek potansiyeldeki elektrot pozitif kutuplu iken etrafında pozitif serbest yükler, tersine, negatif kutuplu iken etrafında negatif serbest yükler meydana gelir. Yüksek potansiyeldeki elektrotun kutbu, alternatif gerilim değişiminden dolayı pozitif kutuptan negatif kutba döndüğünde elektrot, çevresine negatif yükler yaymaya başlar. Bu durumda, bu elektrotun çevresi bir önceki yarım periyottan kalan pozitif serbest yükler tarafından doldurulur. Bu zıt yükler elektrot etrafındaki yerel elektrik alanı büyütür ve kısmi boşalma başlama geriliminin düşmesine neden olur [13]. Deneysel çalışmada, yalıtkan yağa uygulanan gerilim yükselme hızı arttıkça yağın delinme geriliminin de arttığı belirlenmiştir. Bu durum, gerilim yükselme hızı arttıkça yağın daha kısa süre gerilime dolayısıyla daha az süre elektriksel zorlanmaya maruz kalmasıyla açıklanabilir. Örneğin, 3 kV/s gerilim yükselme hızında yağ içinde mikro düzeydeki yabancı parçacıkları hareket ettirmek için maruz kalınan gerilimin süresi 2 kV/s ve 0,5 kV/s gerilim yükselme hızlarına göre daha kısadır. Deneysel sonuçlar elektrot geometrisinin ve gerilimin yükselme hızının yağın delinme gerilimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

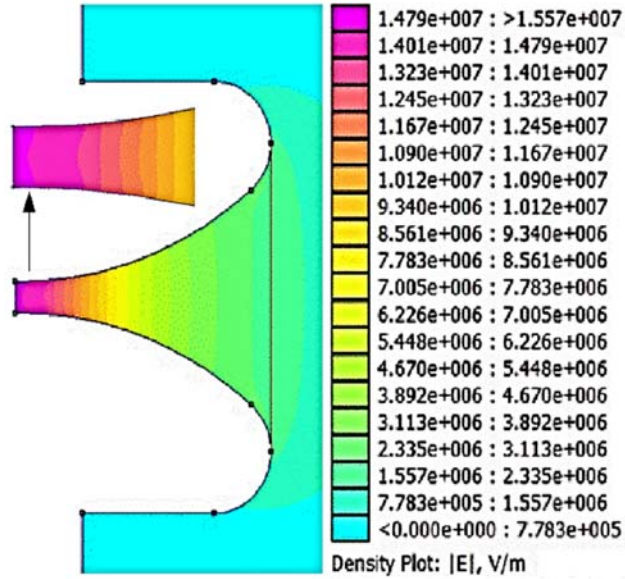
4.2. Elektrik Alan Analizleri (Electric Field Analyses)

Bu kısımda, deneysel çalışmada kullanılan elektrotlar arasında yağ içinde bir küresel hava kabarcığının ve bir küresel su damlacığının bulunması durumunda meydana gelen elektriksel zorlanma, sonlu elemanlar yöntemine göre çözümleme yapan FEMM programı ile incelenmiştir.

4.2.1. VDE elektrot sisteminin analizi (Analysis of VDE electrode system)

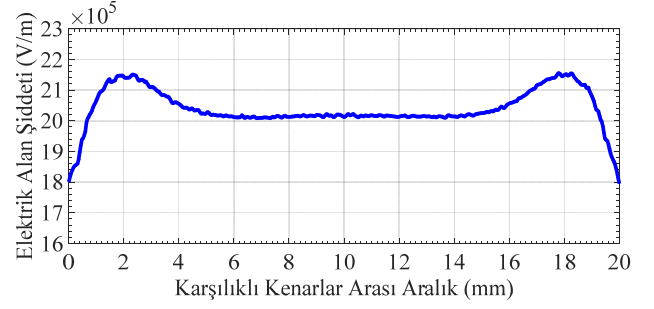
ASTM D1816 standardında tanımlanan yarı mantar şeklindeki elektrotlardan oluşan VDE elektrot sisteminde yağ içinde meydana gelen elektrik alan dağılımı incelenmiştir. VDE elektrotları kenar etkisinin en az olacağı şekilde Rogowski profiline göre biçimlendirilmiş elektrotlardır. Bir elektrot sisteminin elektrotları sonsuz geniş olmadıkları için sonlu genişlikli elektrotların kenarlarında, kenar eğrilik yarıçapının küçüklüğünden dolayı elektrotlar arasındaki alandan daha yüksek elektrik alan şiddeti meydana gelir. Buna elektrot kenar etkisi adı verilir. VDE elektrotların kenar eğrilik yarıçapının büyük olması, elektrotların kenar etkisini olumlu olarak azaltmaktadır.

Şekil 3'te VDE elektrot sisteminin simetrisinden faydalanarak sadece bir yarısı için yapılan benzetim ve elektrot sisteminin kritik delinme bölgesi gösterilmiştir. Şeklin sol kenarı simetri eksenini olup bu eksen çevresinde şeklin 2π radyan döndürülmesiyle elektrot sisteminin üç boyutlu elektrik alan dağılımı elde edilir.

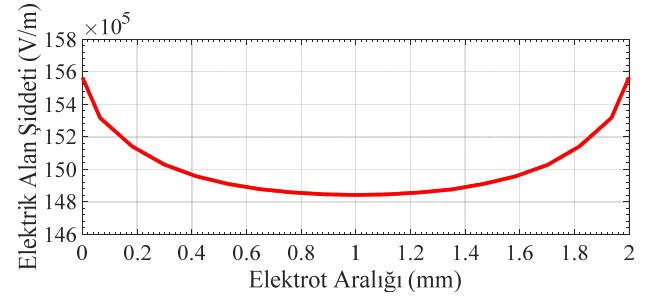


Şekil 3. VDE elektrot sisteminin benzetimi ve kritik delinme bölgesi
(Simulation of VDE electrode system and critical breakdown area)

Şekil 4 ve Şekil 5'de sırasıyla, VDE elektrotların karşılıklı kenarları arasında çizilen doğru boyunca ve elektrotlar arasında eksen boyunca elde edilen elektrik alan dağılımları verilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5'den görüleceği üzere VDE elektrot sisteminde eksen boyunca maksimum elektrik alan şiddeti ($155,66 \times 10^5$ V/m), karşılıklı elektrotların kenarları arasındaki maksimum elektrik alan şiddetine ($21,56 \times 10^5$ V/m) göre yaklaşık olarak 7,22 kat daha yüksektir. Bu nedenle, yalıtkan yağda delinmenin elektrotlar arasında eksen boyunca gerçekleşmesi beklenir.

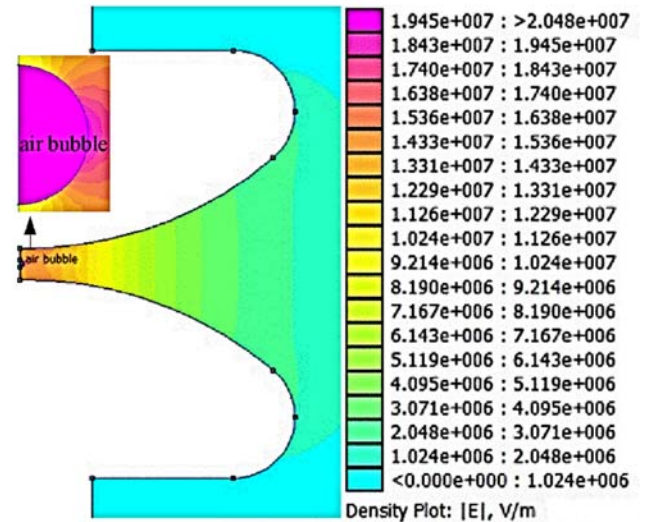


Şekil 4. VDE elektrotların karşılıklı kenarları arasındaki elektrik alan dağılımı
(Electric field distribution between opposing edges of VDE electrodes)



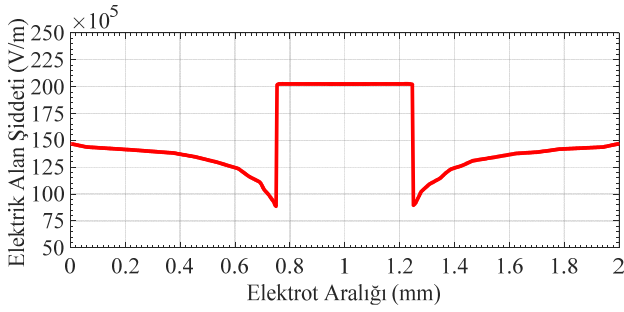
Şekil 5. VDE elektrot sisteminde elektrotlar arasında eksen boyunca elektrik alan dağılımı
(Electric field distribution along the axis between the electrodes in VDE electrode system)

Şekil 6'da bir örnek olarak elektrotlar arasında hava kabarcığı varken elde edilen benzetim ve kritik delinme bölgesi gösterilmiştir. Bu benzetim sonucunda hava kabarcığı ve etrafında elektrot sisteminin diğer kısımlarındaki göre daha yüksek elektriksel zorlanma meydana geldiği görülmüştür.



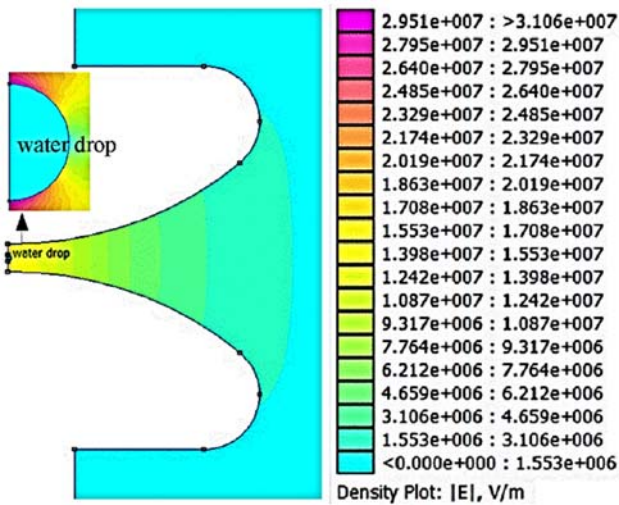
Şekil 6. VDE elektrotlar arasında hava kabarcığı benzetimi ve kritik delinme bölgesi
(Simulation of an air bubble between VDE electrodes and critical breakdown area)

Şekil 7’de elektrotlar arasında eksen üzerinde bir hava kabarcığı varken elde edilen elektrik alan dağılımı verilmiştir. Şekil 7’den görüleceği gibi hava kabarcıklı durumda elektrik alan şiddeti hava kabarcığının içinde artmaktadır. Hava kabarcığının içinde yabancı cisimsiz duruma göre yaklaşık olarak %30,15 daha fazla elektriksel zorlanma meydana gelmektedir. Ayrıca, hava kabarcıklı durumda VDE elektrotların eksenleri boyunca maksimum elektrik alan şiddeti, elektrotların kenarları arasında çizilen doğru üzerindeki maksimum elektrik alan şiddetine göre yaklaşık olarak 9,39 kat daha yüksektir. Elektrik alanına maruz kalan bir gaz kabarcığı uygulanan alan yönü boyunca eliptik bir şekle dönüşür. Elektrik alanın kritik seviyeye yükseldiği bu deforme olmuş kabarcığın uçlarında kısmi boşalmalar görülebilir [13]. Kısmi boşalmalar hava kabarcığında başlar ve elektroda doğru ilerleyerek delinme meydana gelir.

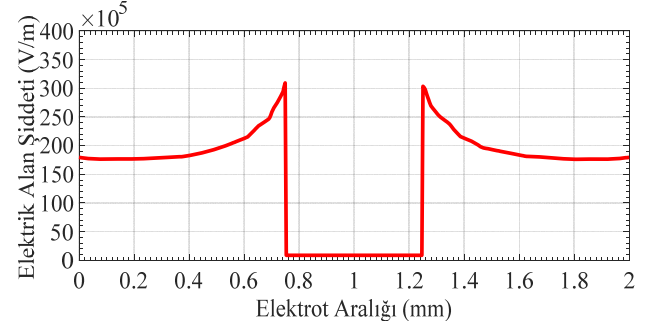


Şekil 7. VDE elektrotlar arasında hava kabarcığı varken elektrik alan dağılımı
(Electric field distribution in the presence of an air bubble between VDE electrodes)

Şekil 8’de elektrotlar arasında eksen üzerinde bir su damlacığı olması durumu için gerçekleştirilen benzetim ve elektrot sisteminin kritik delinme bölgesi gösterilmiştir. Bu benzetimden elde edilen elektrik alan dağılımı Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 8. VDE elektrotları arasında su damlacığı benzetimi ve kritik delinme bölgesi
(Simulation of a water drop between VDE electrodes and critical breakdown area)



Şekil 9. VDE elektrotları arasında su damlacığı varken elektrik alan dağılımı
(Electric field distribution in the presence of a water drop between VDE electrodes)

Su damlacığının içinde elektrik alan şiddeti yaklaşık olarak $8,65 \times 10^5$ V/m’dir. VDE elektrotları arasında su damlacığı olması durumunda yalıtkan yağ, yabancı cisimsiz duruma göre yaklaşık olarak 1,987 kat daha fazla elektriksel zorlanmaya maruz kalmaktadır. Ayrıca, elektrotlar arasında su damlacığı olması durumunda eksen boyunca meydana gelen maksimum elektrik alan şiddeti, elektrotların karşılıklı kenarları arasındaki maksimum elektrik alan şiddetine göre yaklaşık olarak 14,35 kat daha yüksektir. Genellikle, elektrik alan altında su damlacığı sıkışır ve alan yönünde boyu uzar [8]. Uzatılmış su damlacıkları tam bir su kanalı veya kısmi bir su kanalı meydana getirebilir. Su damlacığı iletken bir kanal gibi hareket eder ve kendisine seri yalıtkan yağ bölümlerinde elektrik alanı büyütür [13]. Su damlacığından dolayı yalıtkan yağ içinde yerel delinme meydana gelir ve bu durum yalıtkan yağın tamamen delinmesini kolaylaştırır.

4.2.2. Disk elektrot sisteminin analizi (Analysis of disk electrode system)

Disk elektrotlar, sınırlı boyutlu düzlem elektrotlardır. Sınırlı boyutları nedeniyle kenar etkisine sahiptirler. Bir düzlemsel elektrot sisteminde elektrotlar arasında elektrik alan dağılımının düzgün olabilmesi için elektrotlarda kenar etkisinin olmaması gerekir. Disk elektrotlarda kenar etkisini değerlendirebilmek için kenar etkisi olmayan durumdaki elektrik alan değeri bilinmelidir. Kenar etkisi olmayan düzlemsel bir elektrot sisteminde, elektrotlar arasında V potansiyelinin, r eksenini doğrultusunda sabit kalıp, yalnızca z eksenini yönünde değiştiğini düşünürsek, kartezyen koordinat sisteminde bir boyutlu Laplace denklemi Eş. 5 ile ve elektrik alan ifadesi Eş. 6 ile gösterilir.

$$\frac{d^2V}{dz^2} = 0 \quad (5)$$

$$E = -\frac{dV}{dz} \quad (6)$$

Eş. 5’deki bir boyutlu Laplace denkleminin genel çözümü Eş. 7 ile ifade edilir.

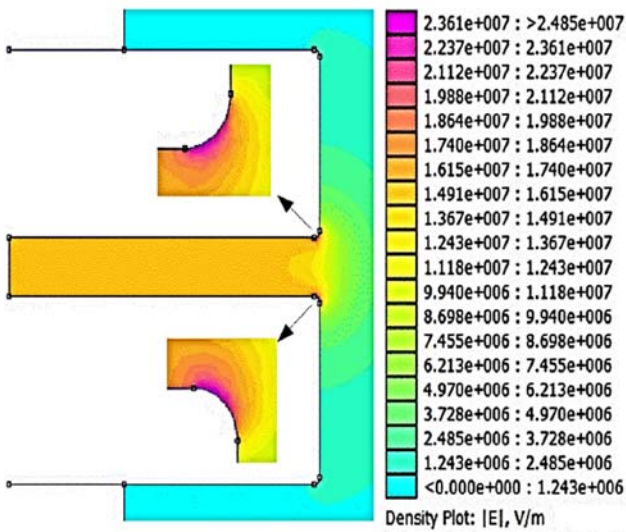
$$V = V(z) = A + B \cdot z \quad (7)$$

İlgili problemde sınır koşulları, $z = 0$ için $V = 0$ ve $z = a$ elektrot açıklığı için $V = U$ uygulanan gerilim olarak alınır. Eş. 7'deki A ve B sabitleri bulunur. Bu şekilde elde edilen potansiyel bağıntısının z 'ye göre türevi elektrik alan bağıntısını verecektir. Buna göre kenar etkisi olmayan düzlemsel elektrot sistemlerinde elektrik alan bağıntısı için Eş. 8 elde edilir.

$$E = -\frac{U}{a} \quad (8)$$

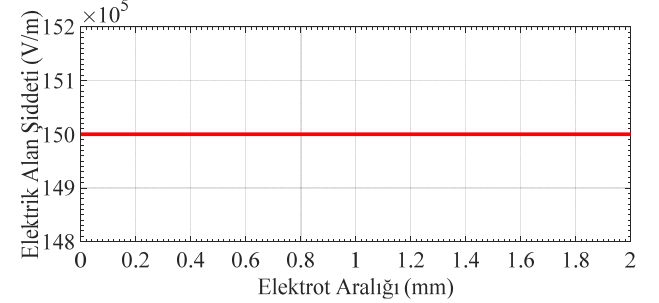
Denklemdaki eksi işareti, elektrik alan vektörünün yüksek potansiyelden alçak potansiyele doğru olduğunu belirtmektedir. Bu denklemden kenar etkisi olmayan düzlem elektrot sisteminin elektrik alan şiddeti hesaplanır. Örneğin elektrotlara uygulanan gerilim $U = 30$ kV, elektrotlar arası açıklık $a = 2$ mm alınır $E = 15$ kV/mm = 150 kV/cm olacaktır. Disk elektrotlar arasındaki yalıtkan yağın maruz kaldığı elektriksel zorlanma (E), yalıtkan yağın delinme dayanımına (E_d) eşit veya büyük olduğunda yalıtkan yağ delinir. Kenar etkisi olmayan elektrotta, boşalma başlangıç gerilimi (U_0) ile tam delinme gerilimi (U_d) birbirine eşittir ve delinme elektrotun her yerinde aynı anda gerçekleşir [19]. Ancak, disk elektrotların kenarlarında, kenar eğrilik yarıçapının küçüklüğünden dolayı elektrotlar arasındaki alandan daha yüksek elektrik alan şiddeti meydana gelir [18]. Disk elektrotların kenar eğrilik yarıçapının küçük olması, elektrotların kenar etkisini arttırmaktadır. Burada disk elektrotun kenar etkisini ve bu durumdaki elektrik alan dağılımını bulmak için sonlu elemanlar yönteminden yararlanılmıştır. Burada, ASTM D877 standardında tanımlanan disk elektrotla yalıtkan yağda meydana gelen elektrik alan dağılımı incelenmiştir.

Şekil 10'da disk elektrot sisteminin benzetimi ve elektrotların kenar etkisinden kaynaklanan kritik delinme bölgesi gösterilmiştir.

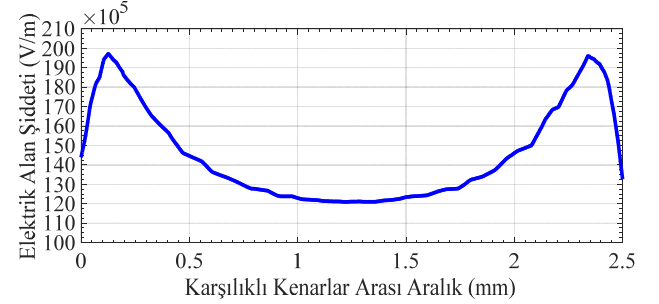


Şekil 10. Disk elektrot sisteminin benzetimi ve kritik delinme bölgesi
(Simulation of disk electrode system and critical breakdown area)

Şekil 11 ve Şekil 12'de sırasıyla, disk elektrot sistemi eksen boyunca meydana gelen elektrik alan şiddeti ve disk elektrotların karşılıklı kenarları arasında çizilen doğru boyunca elde edilen elektrik alan dağılımı verilmiştir.



Şekil 11. Disk elektrotlarda eksen boyunca elektrik alan dağılımı
(Electric field distribution along the axis of disk electrodes)

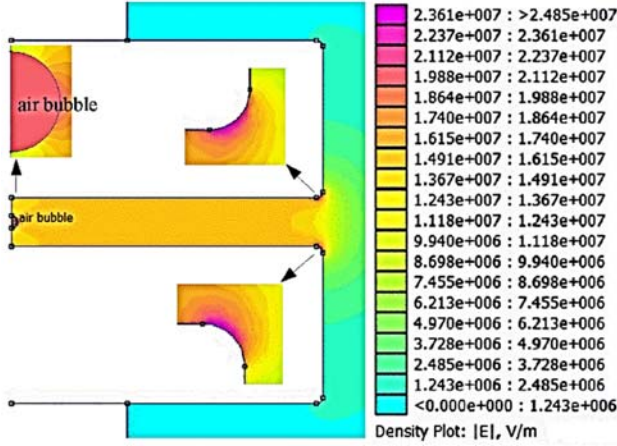


Şekil 12. Disk elektrotların karşılıklı kenarları arasındaki elektrik alan dağılımı
(Electric field distribution between opposing edges of disk electrodes)

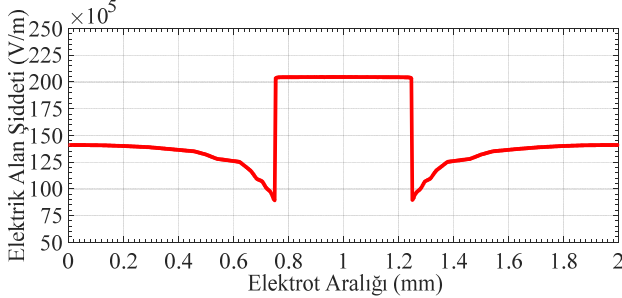
Şekil 11 ve Şekil 12'den görüleceği üzere, disk elektrotların kenarları arasındaki elektrik alan şiddeti elektrotların eksenleri üzerindeki elektrik alan şiddetine göre yaklaşık olarak %31,38 daha yüksektir. Bu nedenle, yalıtkan yağda delinme artan gerilimle disk elektrotların kenarlarından gerçekleşmesi beklenmektedir. Disk elektrot sisteminde, elektrotlar arasında elektrik alan dağılımının tam düzgün olabilmesi yani kenar etkisinin olmaması için elektrotlar sonsuz genişlikte olmalıdır. Ancak uygulamada böyle bir durum mümkün olmadığı için mümkün en yüksek kenar etkileri yuvarlatılarak (eğrilik yarıçapı artırılarak) önlenmiş elektrotlar ile çalışılması önerilir.

Şekil 13'de elektrotlar arasında hava kabarcığı olması durumu için yapılan benzetim ve elektrot sisteminin kritik elektriksel boşalma bölgesi gösterilmiştir. Şekil 13'den görüleceği üzere, disk elektrot sisteminin kenar eğrilik yarıçapı üzerindeki maksimum elektriksel zorlanma hem hava kabarcığına göre hem de elektrot sisteminin diğer kısımlarına göre daha yüksektir. Şekil 14'de, disk elektrotlar arasında eksen üzerinde bir hava kabarcığı varken elde edilen elektrik alan dağılımı verilmiştir. Elektrotların kenar eğrilik yarıçapı üzerindeki maksimum elektrik alan şiddeti ($248,5 \times 10^5$ V/m), hava kabarcığının içindeki maksimum elektrik alan şiddetine ($204,66 \times 10^5$ V/m) göre

yaklaşık olarak %21,42 daha yüksektir. Bu nedenle, yalıtkan yağda elektriksel boşalmaların ilk önce elektrot sisteminin kenarlarından başlaması beklenmektedir. Aynı zamanda, elektrotlar arasında elektrik alan kritik seviyeye yükseldiğinde ($E_{maxhava} > E_{dhava}$) hava kabarcığının uçlarında da kısmi boşalmalar görülebilir. Yağın o andaki moleküler yapısına bağlı olarak elektrotun kenarlarından veya hava kabarcığından delinme gerçekleşir.



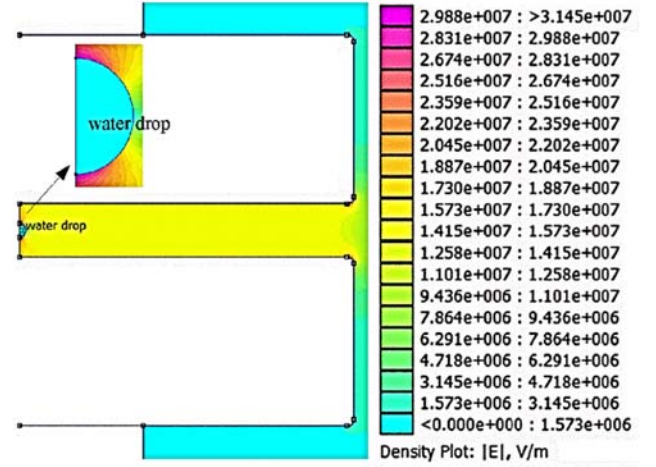
Şekil 13. Disk elektrotlar arasında hava kabarcığı benzetimi ve kritik elektriksel boşalma bölgesi
(Simulation of an air bubble between disk electrodes and critical electrical discharge area)



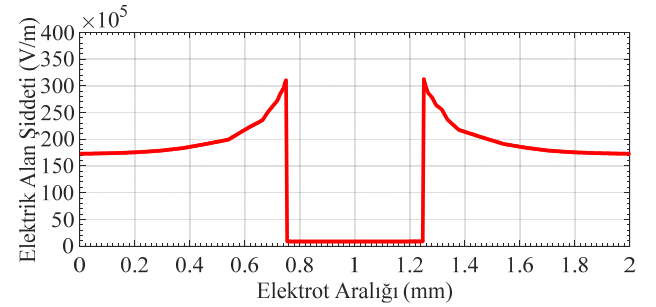
Şekil 14. Disk elektrotlar arasında hava kabarcığı varken elektrik alan dağılımı
(Electric field distribution in the presence of an air bubble between disk electrodes)

Şekil 15’de yalıtkan yağdaki disk elektrotlar arasında eksen üzerinde bir su damlacığı varken gerçekleştirilen benzetim ve kritik delinme bölgesi gösterilmiştir. Bu benzetimden elde edilen elektrik alan dağılımı Şekil 16’da verilmiştir. Şekil 16’dan görüldüğü gibi su damlacığının içinde elektrik alan şiddeti yaklaşık olarak $8,73 \times 10^5$ V/m’dir. Disk elektrotlar arasında su damlacığı varken eksenler boyunca meydana gelen elektrik alan şiddeti, elektrotların karşılıklı kenarları arasında çizilen doğru üzerindeki maksimum elektrik alan şiddetine göre yaklaşık olarak %58,59 daha yüksektir. Düzgün elektrik alanda yalıtkan yağ ($\epsilon_{ryağ} = 2,3$) içindeki bir su damlacığı ($\epsilon_{rsu} = 81$) maksimum alana doğru (elektroda doğru) çekilir. Su damlacığı, yalıtkan yağ içinde elektrik alana maruz kaldığında iletken bir köprü gibi davranır ve kendine seri yağ bölümlerinde elektrik alanı büyütür. Su

damlacığının olduğu bölgede yerel delinme meydana gelir ve böylelikle yağda tam delinme daha düşük gerilim seviyelerinde gerçekleşir.



Şekil 15. Disk elektrotlar arasında su damlacığı benzetimi ve kritik delinme bölgesi
(Simulation of a water drop between disk electrodes and critical breakdown area)



Şekil 16. Disk elektrotlar arasında su damlacığı varken elektrik alan dağılımı
(Electric field distribution in the presence of a water drop between disk electrodes)

5. ELEKTROT SİSTEMLERİNİN ELEKTRİK ALAN BAKIMINDAN KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF ELECTRODE SYSTEMS IN TERMS OF ELECTRIC FIELD)

Bu makalede, yalıtkan yağların delinme geriliminin ölçülmesinde kullanılan VDE ve disk elektrot sistemlerinin meydana getirdiği elektriksel zorlanmalar incelenmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde küresel hava kabarcığı ve su damlacığının, elektrotlar arası aralığın tam ortasında olduğu öngörülmüştür. İncelenen iki farklı elektrot sistemi için FEMM paket programı ile yapılan benzetimlerden elde edilen maksimum elektrik alan şiddetleri Tablo 4’de verilmiştir. *VDE elektrot sistemi için elektriksel zorlanmanın değerlendirilmesi:* VDE elektrot sisteminde en yüksek elektrik alan şiddeti elektrotların birbirine bakan en yakın noktalarında yani simetri eksenini üzerinde, en az ise elektrotların kenarlarında meydana gelmiştir. Bu nedenle, yalıtkan yağda delinme elektrotların orta noktaları arasında gerçekleşir. VDE elektrotları arasında su damlacığı varken

Tablo 4. Farklı elektrot sistemleri için mineral yağdaki maksimum elektrik alan şiddetleri (V/m)
(Maximum electric field intensities in mineral oil for different electrode systems (V/m))

Elektrot tipi	Hesabın yapıldığı kritik elektrik alan çizgisi	Maksimum elektrik alan şiddeti $\times 10^5$ (V/m)		
		Yabancı cisimsiz	Hava kabarcıklı	Su damlacıklı
VDE	Eksen	155,66	202,59	309,32
	Karşılıklı kenarlar arası	21,56	21,56	21,56
Disk	Eksen	150,00	204,66	312,56
	Karşılıklı kenarlar arası	197,08	197,08	197,08

eksenler boyunca meydana gelen elektrik alan şiddeti; hava kabarcıklı durumuna göre yaklaşık olarak %52,68, yabancı cisim olmadığı durumuna göre ise yaklaşık olarak %98,71 daha yüksektir. Bundan dolayı, yalıtkan yağda delinme bakımından en riskli durumlar sırasıyla içinde su kabarcığı, hava kabarcığı bulunduğu ve yabancı cisim olmadığı durumlardır.

Disk elektrot sistemi için elektriksel zorlanmanın değerlendirilmesi: Disk elektrotlar arasında yabancı cisim yokken en yüksek elektrik alan şiddeti elektrotların kenarlarında, en az ise elektrotların orta bölgesinde meydana gelmiştir. Daha yüksek elektriksel zorlanmadan dolayı yağda delinme elektrotların kenarları arasında gerçekleşir. Disk elektrotlar arasında 0,5 mm çapında bir hava kabarcığı varken, yalıtkan yağda ilk elektriksel boşalmaların elektrotların kenar eğrilik yarıçapları üzerinde ($248,5 \times 10^5$ V/m) başlaması beklenir. Daha sonra yağın moleküler yapısına bağlı olarak elektrot kenarlarından veya hava kabarcığından delinme gerçekleşir. Yalıtkan yağda elektrotlar arasında bir su damlacığı varken en yüksek elektrik alan şiddeti eksen boyunca su damlacığına seri yalıtkan yağ bölümlerinde meydana gelmiştir.

VDE elektrot sistemi ile Disk elektrot sisteminin elektrik zorlanmalarının karşılaştırılması: Tablo 4'deki yabancı cisimsiz durum için VDE ve disk elektrot sistemlerinin meydana gelen elektrik alan şiddetleri karşılaştırıldığında, disk elektrot sisteminin kenar etkisinden dolayı yalıtkan yağda yaklaşık olarak %26,61 daha fazla elektriksel zorlanmaya neden olduğu görülmektedir. Bu nedenle disk elektrot sistemiyle denenen yalıtkan yağın delinme gerilimi, VDE elektrot sistemiyle denenenen daha düşük olur. Elektrotlar arasında 2 mm açıklık bulunan yalıtkan yağ içindeki bir VDE elektrot sisteminde, elektrotlar arasında 0,5 mm çapında bir hava kabarcığı bulunması durumunda elektriksel boşalma, önce elektrotlar arasındaki hava kabarcığında başlar ve ardından elektrotlar arasında gerçekleşir. Bunun nedeni, havanın dielektrik sabitinin yalıtkan yağın dielektrik sabitinden küçük olması sebebiyle hava kabarcığı içinde yağdakine göre daha yüksek elektrik alan şiddeti meydana gelmesi ve havanın delinme dayanımının yalıtkan yağın delinme dayanımından küçük olmasıdır. Buna karşılık yalıtkan yağ içindeki disk elektrot sisteminde elektriksel boşalmalar elektrot kenarlarında başlar. Bunun da nedeni, disk elektrot kenar eğrilik yarıçapları üzerinde ($248,5 \times 10^5$ V/m) elektrot sisteminin diğer bölgelerine göre daha yüksek elektrik alan

oluşması yani disk elektrotların kenar etkisine sahip olmasıdır. Yalıtkan yağ içindeki VDE ve disk elektrot sistemlerinin arasında su damlacığı varken, disk elektrot sisteminde yalıtkan yağ, su damlacığına göre elektriksel olarak daha fazla zorlanmaktadır. Bunun nedeni, yağın dielektrik sabitinin suyun dielektrik sabitinden küçük olması ve yağda daha yüksek elektrik alanın meydana gelmesidir. Disk elektrot sisteminde delinme, VDE elektrot sistemindekine göre biraz daha düşük gerilimlerde meydana gelir.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma ile yalıtkan yağların delinme gerilimi deneylerinde kullanılan VDE ve disk elektrot sistemlerinin delinme gerilimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. İlk olarak, 2 mm elektrot aralığı için 0,5 kV/s, 2 kV/s ve 3 kV/s gerilim yükselme hızlarında bir mineral yağın delinme gerilimleri ölçülmüştür. Daha sonra, yağın içinde gazın varlığı bir hava kabarcığıyla ve yağ içindeki nemin varlığı bir su damlacığıyla temsil edilerek delinme gerilimi üzerindeki etkileri sonlu elemanlar yöntemi ile çözümleme yapan FEMM programı ile incelenmiştir.

Çalışılan tüm gerilim artış hızlarında VDE elektrot sistemi ile ölçülen delinme gerilimlerinin, disk elektrot sistemi ile ölçülen delinme gerilimlerinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, FEMM programı ile gerçekleştirilen analizlerle VDE ve disk elektrotların yalıtkan yağda meydana getirdiği elektrik alan dağılımları belirlenmiştir. VDE elektrot sisteminin disk elektrot sistemine göre yalıtkan yağda daha düşük elektrik alan şiddetine dolayısıyla daha yüksek delinme gerilimine neden olduğu saptanmıştır. Bu durum, VDE elektrot sisteminin disk elektrot sistemine göre daha düzgün elektrik alan dağılımına sahip olması ve elektrot kenar etkisinin daha az olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca, VDE elektrot sisteminin disk elektrot sistemine göre hava (gaz) kabarcığı ve su damlacığına karşı daha duyarlı olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, yağ içindeki gaz ve su damlacıklarının delinme gerilimi üzerindeki olumsuz etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için VDE elektrot sistemi ile çalışılması tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kocatepe C., Arıkan O., Taslak E., ve Kumru C.F., Yüksek Gerilim Tesislerinde Kullanılan Yalıtkan Yağların Delinme Dayanımı analizi, 5. Enerji

- Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu (EVK), Kocaeli, 156-160, 2013.
2. Baur M., Pompili M., Bartnikas R.A., Comment on the Test Methods for the Breakdown Voltage of Dielectric Liquids, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 19 (5), 1482-1484, 2012.
 3. Baur M., Calcara L., Pompili M., Scatter Reduction of the 50-60 Hz Breakdown Voltage Test for Insulating Liquids, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 22 (5), 2401-2407, 2015.
 4. Lu W., Liu Q., Effect of Cellulose Particles on Streamer Initiation and Propagation in Dielectric Liquids, *IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, Sydney, Australia, 939-942, 19-22 July, 2015.
 5. Zhang J., Li J., Huang D., Zhang X., Liang S., Li X., Influence of Nonmetallic Particles on the Breakdown Strength of Vegetable Insulating Oil, *IEEE Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Michigan, 609-612, 18-21 Oct., 2015.
 6. Tao Z., Yunpeng L., Fangcheng L., Ruihong D., Study on Dynamics of the Bubble in Transformer Oil under Non-Uniform Electric Field, *IET Sci. Meas. Technol.*, 10 (5), 498-504, 2016.
 7. Góngora-Nieto M.M., Pedrow P.D., Swanson, B.G., Barbosa-Cánovas G.V., Impact of Air Bubbles in a Dielectric Liquid When Subjected to High Field Strengths, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 4 (1), 57-67, 2003.
 8. Berg G., Lundgaard L.E., Becidan M., Sigmund R.S., Instability of Electrically Stressed Water Droplets in Oil, *IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids*, Graz, Austria, 220-224, 7-12 July, 2002.
 9. Yılmaz H., Guler S., The Effect of Electrode Shape, Gap and Moisture on Dielectric Breakdown of Transformer Oil, *12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids*, Roma, Italy, 354-357, 15-19 July, 1996.
 10. ASTM D1816-12., Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using VDE Electrodes, ASTM International, West Conshohocken-PA, 2012.
 11. ASTM D877-02., Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes, ASTM International, West Conshohocken-PA, 2007.
 12. Al-Arainy A.A., Qureshi M.I., Malik N.H., *Fundamentals of High Voltage Engineering*, Academic Publishing and Press, Riyadh, 2005.
 13. Wang X., *Partial Discharge Behaviours and Breakdown Mechanisms of Ester Transformer Liquids Under ac Stress*, Ph.D. Dissertation, the University of Manchester, Faculty of Engineering and Physical Sciences, Manchester, 2011.
 14. Yulastuti E., *Analysis of Dielectric Properties Comparison Between Mineral Oil and Synthetic Ester Oil*, Master Dissertation, the Delft University of Technology, in *Electrical Engineering*, Delft, 2010.
 15. Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J., *High Voltage Engineering Fundamentals*, Newnes, New York, 2000.
 16. Wadhwa C.L., *High Voltage Engineering*. New Age International, New Delhi, 3rd Ed. 2010.
 17. Sadiku M.N.O., A Simple Introduction to Finite Element Analysis of Electromagnetic Problems, *IEEE Trans. Educ.*, 32 (2), 85-93, 1989.
 18. Taslak E., Arıkan O., Kumru C.F., Kalenderli Ö., Analyses of the insulating characteristics of mineral oil at operating conditions, *Springer Electrical Eng.*, 100 (1), 321-331, 2018.
 19. Kalenderli Ö., Kocatepe C., Arıkan O., *Çözümlü Problemlerle Yüksek Gerilim Tekniği*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 3. Baskı, 2015.

