

YÜKSEK GERİLİM TESİSLERİNDE KULLANILAN YALITKAN YAĞLARIN DELİNME DAYANIMI ANALİZİ

Celal KOCATEPE, Oktay ARIKAN, Eyüp TASLAK, C. Fadıl KUMRU

Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü

kocatepe@yildiz.edu.tr, oarikan@yildiz.edu.tr, eyuptaslak@gmail.com, cfkumru@yildiz.edu.tr

Özet

Yüksek gerilim tesislerinin sürekliliğinde yalıtım seviyesi, güvenlik ve ekonomiklik büyük öneme sahiptir. Bu sebeple yüksek gerilim tesislerinin işletiminde yalıtım kalitesi, üzerinde durulması gereken en önemli parametrelerdendir. Bilindiği üzere, yüksek gerilimlere karşı yalıtımın sağlanması için katı, sıvı ve gaz yalıtım malzemeleri kullanılır. Bu çalışmada, yüksek gerilim tesislerinde kullanılan yalıtkan yağların delinme dayanımları incelenmiştir. Deneysel olarak gerçekleştirilen analizlerle uygulamada kullanılan iki farklı mineral yağ ele alınmıştır. Analizler üç farklı standart test metoduna göre gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: yalıtkan yağlar, delinme gerilimi, mineral yağlar, yüksek gerilim

1. Giriş

Yüksek gerilim tesislerinde yalıtım amaçlı kullanılan mineral yağlar, kimyasal açıdan naftanik, parafinik ve aromatik hidrokarbon moleküllerinin bir karışımıdır [1]. Mineral yağlar, elektrik donanımlarında maliyet ve verimlilik bakımından uygun sonuç verdiği için uzun süreli kullanılmaktadır. Günümüzde çeşitli marka ve kalitede çok sayıda mineral yağ kullanılmaktadır. Kullanılacak yalıtım yağının kalitesi dolaylı olarak enerji kalitesini de etkilemekte elektrik donanımının verimini, ömrünü ve güvenilirliğini ortaya koymaktadır. Örneğin, transformatörlerde oluşan arızaların önemli bir bölümünün transformatörde kullanılan yağın düşük kaliteli olmasından kaynaklandığı görülmüştür. Yalıtım yağının seçiminde, yalıtkanlık, ısı soğutma, dayanıklılık, fiyat ve çevreye zararsız olma gibi özellikler dikkate alınmaktadır [2].

Bir yağın kalitesini ve özelliklerini araştırmak için yalıtım yağları üzerinde delinme gerilimi, kayıp faktörü ($\tan \delta$), parlama noktası, nem gibi kalite parametrelerinin bilinmesi gereklidir. Suwarno ve

arkadaşları silikon, doğal ester ve mineral yağları 120 °C ve 150 °C'de ısı yaşlandırmaya maruz bırakarak ısının yalıtım yağı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda doğal esterlin delinme geriliminin daha yüksek olduğu görülmüştür [3]. S. Abdi ve arkadaşları BORA22 tipi transformatör mineral yağına ısı yaşlandırma testi uygulayarak iki farklı sıcaklıkta yağın delinme gerilimi, $\tan \delta$, asitlik derecesi gibi özelliklerini incelemiş ve delinme geriliminin sıcaklık artışıyla azaldığını gözlemlemişlerdir [4]. Düzgün alanlı ve düzgün olmayan alanlı elektrot sistemlerinin de delinme gerilimi üzerinde etkileri bilinmektedir. Wilson ve arkadaşlarınca yapılan analizlerle bunların etkileri de ortaya konulmuştur [5].

Bu çalışmada, transformatörlerde kullanılan iki farklı mineral numunesi kullanılmıştır. Bu yağlara ait delinme gerilimi testleri, ASTM D1816, ASTM D877 ve IEC 156'dan oluşan üç farklı standarda göre gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar sunulmuştur [6,7,8]. Ayrıca, yalıtım yağlarının delinme gerilimleri üzerinde olumsuz etkileyen nem probleminin araştırılması amacıyla, deney numunesi olarak kullanılan yağlara belirli oranda su eklenerek meydana gelen değişim belirlenmiştir.

2. Yalıtım Yağlarının Özellikleri

Transformatör, kesici, kondansatör, güç kablosu vb. yüksek gerilim ekipmanlarında, elektriksel yalıtım ve ısı soğumayı sağlamak için iki çeşit yalıtım sıvısı kullanılır. Bunlar ham petrolün işlenmesiyle üretilen doğal madeni yağlar ve kimyasal yollarla üretilen sentetik sıvılardır. Sentetik sıvı olarak silikonlu, esterli veya hidrokarbonlu yapıda olan yağların parlama noktaları 300°C'den yüksektir. Bu nedenle işletmede yangınlara karşı daha güvenle kullanılabilir. Doğal madeni yağlar ise cihazların yapımında kullanılan malzemeler ile iyi uyumu ve ucuzluğu nedeniyle uzun zamandan beri tercih edilen bir yalıtım malzemesidir [2]. Aşağıdaki

tabloda bazı yalıtkan yağların dielektrik özellikleri verilmektedir.

Tablo-1 IEC Standardına göre bazı yalıtım sıvılarında sınır değerler [2]

Özellikler	Birim	Madeni Yalıtım Yağı	Esterler Ve Silikonlar
Delinme Gerilimi	kV (2,5mm)	≥ 30	≥ 45
Dielektrik Kayıp Faktörü(90°C)	-	≤ 0,005	≤ 0,03
Yoğunluk	gr/cm ³	≤ 0,895	≤ 1
Akma Noktası	°C	≤ -40	≤ -45

Tablo 1'den de görüldüğü üzere, yalıtımda kullanılan yağlar farklı elektriksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Bu nedenle seçilecek yağ, kullanılacağı donanım ve kullanım amacına göre karar verilmesi gereklidir.

2.1. Mineral Yağlar (Madeni Yağlar)

Uzun zamandan beri transformatörlerde yalıtım sıvısı olarak mineral yağlar kullanılmaktadır. Fiyat bakımından ekonomik olmaları ve yüksek ısı soğutma kapasitesine sahip olmaları sebebiyle diğer yağlara göre daha çok tercih edilmektedirler. Ancak, geri dönüşüm işlemlerinin zor olması, düşük alevlenme noktasına sahip olmaları, mineral yağların olumsuz özellikleridir [9]. Maliyet ve güvenlik sebebiyle, elektriksel donanımların uzun süre kullanılabilmesi için kaliteli bir yağın seçimi önemlidir. Bu çalışmada kullanılan mineral yağlara ait genel özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo-2 Analizi yapılan mineral yağlara ait genel özellikler

Özellikler	Numune-1	Numune-2
Delinme Gerilimi (kV)	>30	>30
Parlama Noktası (°C)	>135	140
Dielektrik kayıp faktörü (tanδ) (90°C)	< 0,005	0,002

Tablo 2'den görüleceği üzere, mineral yağlar sınıfında bulunan her iki numunenin de katalog değerleri yaklaşık aynıdır.

3. Yalıtkan Yağlara Uygulanan Delinme Gerilimi Test Standartları

Günümüzde, yağlara fiziksel, kimyasal ve elektriksel testler uygulanarak kirlenme ve yaşlanma seviyeleri ölçülebilmektedir [2]. Böylelikle, transformatör ve diğer elektrik donanımlarda bir arıza meydana gelmeden önce gerekli önlemler alınabilir. Bu amaçla yalıtım yağlarında, delinme gerilimi gerilimlerinin belirlenmesi için ASTM D1816, ASTM D877 ile IEC156 standart test metotları kullanılmaktadır [10,11].

3.1. ASTM D1816 Standart Test Metodu

Bu standarda göre gerilim artış hızı 500 V/s ve kullanılacak elektrot tipi ise VDE küresel elektrot olmalıdır. Müsaade edilen elektrot açıklığı 1mm veya 2 mm olup kullanılan elektrot açıklığı ölçüsüne göre delinme gerilimi test sonuçlarının doğruluk kriterleri vardır. Testler, 20°C ile 30°C arasında oda sıcaklığında gerçekleştirilir. Test hücresi standartta belirtilen şekilde doldurulduktan sonra, ilk delinme geriliminin uygulanması için 3-5 dakika arası (yüksek alevlenme noktasına sahip numuneler için en az 30 dk.) beklenir. Delinme meydana gelene kadar 0,5kV/s artış hızıyla gerilim uygulanır. Takip eden her delinme arasında 1 dk. ile 1,5 dk. arası beklenir.

En yüksek delinme gerilimi ile en düşük delinme gerilimi arasındaki fark, 2 mm elektrot açıklığına göre test edilen beş delinme geriliminin ortalamasının %92'sinden daha küçük olmalıdır. Aksi takdirde analizler tekrarlanır.

3.2. ASTM D877 Standart Test Metodu

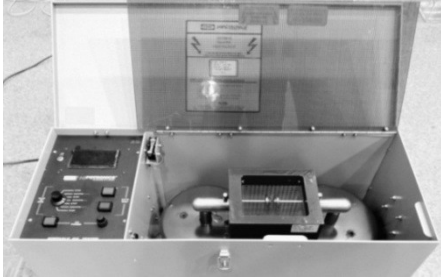
Test gerilimi 45 ile 65 Hz arasında bir frekansa ayarlanabilir. Gerilim artış hızı 3 kV/s olarak ayarlanmalıdır. Kullanılacak elektrot disk tipi olup elektrot açıklığı 2.54 mm'dir. Test süresi boyunca, laboratuvar ortam sıcaklığı 20°C ile 30°C arasında olmalıdır. Test hücresi standartta belirtilen şekilde doldurulur. Test hücresinden havayı arındırmak için gerilim uygulanmadan önce 2-3 dk. arası beklenir. Doldurulmuş bir test hücresinde, her delinme arasında minimum 1dk. beklenerek beş delinme gerçekleştirilir. En yüksek delinme gerilimi ile en düşük delinme gerilimi arasındaki fark, beş delinme geriliminin ortalamasının %92'den büyük olmamalıdır.

3.3. IEC 156 Standart Test Metodu

Test hücresinin hacmi 350 ml ve 600 ml arasında seçilebilir. Kullanılacak elektrot küresel olup elektrot açıklığı $2,5 \pm 0,05$ mm'dir. Deneyin yapılacağı laboratuvarın ortam sıcaklığı $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ olmalıdır. Test hücresi standartta belirtilen şekilde doldurulduktan sonra, ilk gerilim, yağ doldurma işleminden yaklaşık beş dakika sonra uygulanır. Standartta belirtilen ölçülerde bir karıştırıcı düzeneği kullanılabilir. Gerilim artış hızı 2 kV/s olup her delinme arasında en az 2 dakika bekleme süresiyle toplam 6 delinme gerçekleştirilir.

4. Deneysel Çalışma

Gerçekleştirilen çalışmada iki farklı mineral yağın delinme gerilimi analizleri yapılmıştır. Analizler için Şekil 1'de gösterilen HIPOTRONICS OC90D yağ test cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, ASTM D1816, ASTM D877 ve IEC 156 standartlarına göre üç farklı gerilim artış oranı ve iki farklı elektrot geometrisiyle analiz yapma imkânı sunmaktadır. Testlerde kullanılan elektrotlar Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Yağ test cihazı (Hipotronics OC90D)



Şekil 2. Disk (solda) ve küresel (sağda) elektrot

4.1. ASTM D1816 Standardına Göre Elde Edilen Sonuçlar

Standartlara uygun şekilde hazırlanan deney düzeneği ile ölçümler yapılmıştır. İlk delinme gerilimi uygulanmadan önce 4 dk. ve her delinme arası 1,15 dk. beklenmiştir. Gerilim artış hızı $0,5\text{kV/s}$ 'dir. Tüm testler, 24°C ortam sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Standart testlere ek olarak, nem faktörünün delinme gerilimi üzerindeki etkisini araştırmak için mineral yağ içerisine pH değeri 7,1 ve iletkenliği $55,1 \mu\text{S/cm}$ olan 5 ml su eklenerek

yeni delinme gerilimleri belirlenmiştir. Su, yağ numunesine şırınga yardımıyla eklenmiştir. Daha sonra bir karıştırıcı yardımıyla yağ numunesi karıştırılarak standartta belirtilen süre kadar beklenmiştir. Su, iki farklı mineral yağ numunesine aynı şekilde uygulanıp üç farklı standartta belirtilen şekilde analizler gerçekleştirilmiştir. Eklenen suyun yağ numunesinin hacmine oranı $\% 0,5$ 'dir.

Deney numunesine ait delinme gerilimi ile delinme dayanımı değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Deney numunelerinin delinme dayanımı değerleri Denklem 1'de verilen β katsayısı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_d = \frac{\alpha}{a \cdot 10^{-1}} \cdot U_d = \beta \cdot U_d \quad [1]$$

Bu eşitlikte a elektrot sisteminin düzgünlük faktörü olup β katsayısının birimi $1/\text{cm}$ 'dir. Elektrot açıklığına bağlı olarak değişen β değeri, literatürde verilen grafikten yaklaşık 5,7 olarak belirlenmiştir[12].

Tablo-3 Analizi yapılan mineral yağlara ait delinme gerilimleri ve delinme dayanımları (ASTM D1816)

Mineral Yağ Numunesi	Ortalama Delinme Gerilimi (kV)	Delinme Alan Şiddeti (kV/mm)
Numune-1	36,50	20,81
Numune-1 (5ml su ile)	16,98	9,62
Numune-2	23,22	13,24
Numune-2 (5 ml su ile)	18,32	10,44

4.2. ASTM D877 Standardına Göre Elde Edilen Sonuçlar

Standartta istenen şartlar sağlanarak gerilimi uygulanmadan önce 2,5 dk. ve her delinme arasında 1 dk. beklenerek 5 delinme gerçekleştirilmiştir. Bu standarttaki disk tipi elektrotlar düzlemsel elektrot geometrisine sahip olduğu için delinme alan şiddeti değerleri,

$$E_d = \frac{U_d}{a} \quad [2]$$

denkleminde göre hesaplanmıştır. Burada U_d kV cinsinden delinme gerilimini, a ise mm cinsinden elektrot açıklığını ifade etmektedir. Gerçekleştirilen deney sonuçlarına ait delinme gerilim ve hesaplanan delinme dayanımı değerleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo-4 Analizi yapılan mineral yağlara ait delinme gerilimleri ve delinme dayanımları (ASTM D877)

Mineral Yağ Numunesi	Ortalama Delinme Gerilimi (kV)	Delinme Alan Şiddeti (kV/mm)
Numune-1	52,52	20,67
Numune-1 (5 ml su ile)	34,62	13,63
Numune-2	44,76	17,62
Numune-2 (5 ml su ile)	34,84	13,72

4.3.IEC 156 Standardına Göre Elde Edilen Sonuçlar

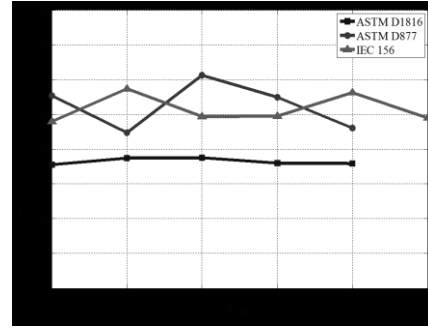
Bu standarda küresel elektrot kullanılarak elektrot açıklığı 2,5 mm olarak ayarlanmıştır ($\beta \cong 4,45$). İlk delinme gerilimi uygulanmadan önce 5dk. ve her delinme arasında 2,5 dk. beklenmiştir.. Gerilim artış hızı 2kV/s'dir. Test hücresi içindeki numune deney süresi boyunca bir karıştırıcı düzeneği ile hava baloncukların oluşmasını önlemek için karıştırılmıştır. Deney boyunca, laboratuvar ortam sıcaklığı 24°C olarak ölçülmüştür. Deney sonucunda elde edilen veriler, Tablo 5'de belirtilmiştir.

Tablo-5 Analizi yapılan mineral yağlara ait delinme gerilimleri ve delinme dayanımları (IEC 156)

Mineral Yağ Numunesi	Ortalama Delinme Gerilimi (kV)	Delinme Alan Şiddeti (kV/mm)
Numune-1	51,60	22,96
Numune-1 (5 ml su ile)	29,77	13,25
Numune-2	32,63	14,52
Numune-2 (5 ml su ile)	27,38	9,96

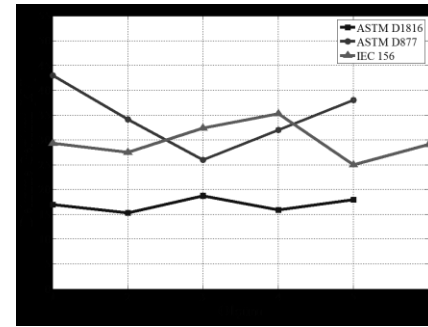
5. Analiz

Üç farklı standart test metoduna göre gerçekleştirilen analizler sonucunda, iki farklı deney numunesine ait delinme gerilimi ve delinme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Numune-1 için gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilen her bir ölçüme ait delinme gerilimi değerleri Şekil 3'de verilmiştir.



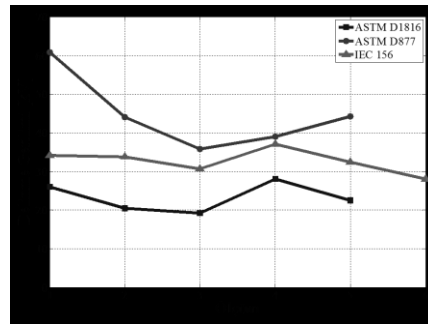
Şekil 3. Numune-1'e ait delinme gerilimleri

Şekil 3'de görüldüğü üzere, birbirini takip eden ölçüm sonuçları doğrusal olarak değişmemektedir. Bunun sebebi, yağların fiziksel ve kimyasal yapılarının çevresel etmenlere karşı hassas olması ve buna bağlı olarak her bir ölçümde yapısal değişiklik göstermesinden kaynaklanmaktadır.



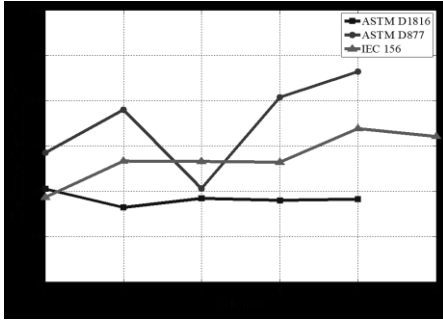
Şekil 4. Numune-1'e ait delinme gerilimleri (5 ml su eklenmiş durum)

Şekil 4'de, yağ içerisinde su olması durumundaki delinme gerilim ölçümleri verilmiştir. Yağ içerisinde su bulunması, yağın delinme gerilimini ve delinme alan şiddetini zayıflatmıştır. Delinme gerilimindeki en ciddi zayıflama %53,47'lik oranla ASTM D1816 standardında yapılan ölçüme görülmüştür.



Şekil 5. Numune-2'e ait delinme gerilimleri

Şekil 5'de, Numune-2 için gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilen delinme gerilimi değerleri verilmiştir. Numune-2'e ait delinme gerilimi değerleri, Numune-1'e göre daha düşük değerdedir.



Şekil 6. Numune-2'e ait delinme gerilimleri (5 ml su eklenmiş durum)

Şekil 6'da yağ içerisine su eklendiği durumda yağın delinme gerilim ölçümleri verilmiştir. Su etkisi, Numune 2'nin de delinme gerilimi ve delinme alan şiddetini olumsuz etkilemiştir. Ancak, Numune 2'deki delinme gerilimindeki azalma oranı Numune 1'e göre daha az olduğu gözlemlenmiştir.

6.Sonuç

Gerçekleştirilen çalışmada, elektrik tesislerinde kullanılan donanımda yalıtım amacıyla kullanılan iki farklı yağ numunesi için delinme gerilimi analizleri yapılmıştır. Deneysel çalışmada her iki numuneye de üç farklı standarda göre (ASTM D1816, ASTM D877, IEC 156) gerilim uygulayarak davranışları tespit edilmiştir. Ayrıca, izolasyon yağlarında delinme dayanımını olumsuz etkileyen nem durumu, yağ içerisine bir miktar su eklenerek simule edilmiştir. Deneyler sonucunda, gerilim yükselme hızı arttıkça olumlu bir davranış olarak ortalama delinme gerilimi değerinin büyüdüğü tespit edilmiştir. Yalıtkan malzeme içerisine su eklendiğinde ise beklenildiği üzere delinme geriliminin her iki numune için de olumsuz etkilenerek düştüğü ve yalıtım özelliğinin zayıfladığı görülmüştür.

Deneysel çalışmada, temiz yağ kullanıldığında üç test metodu içinde Numune 1'in delinme gerilimi değerinin daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. Yalıtım yağlarının içerisindeki yabancı madde olarak 5ml su eklendiğinde, ASTM D1816 ve ASTM D877 test metotları için Numune 2'nin değeri, IEC 156'ya göre ise Numune 1'in delinme gerilimi değeri daha yüksek çıkmıştır. Suyun, izolasyon yağının delinme gerilimini azaltma oranı bakımından yapılan analiz sonucunda, Numune 2'nin delinme gerilimindeki azalmanın daha az olduğu belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen çalışma sonucu, kullanım amaçları aynı olan benzer özellikteki yalıtkan yağların,

işletme koşullarında davranışlarının farklı olacağı görülmüştür. Bu nedenle, kullanılacak yağların test ve analizlerine büyük önem verilmelidir. Ayrıca, yağ içerisindeki istenmeyen maddelerin etkisi farklı olduğundan, kullanım amacı ve yeri dikkate alınarak yağ seçimi yapılmasının gerekliliği ortaya çıkmıştır.

7.Kaynaklar

- [1] Ciuriuc, A., Vihacencu, M.S., Dumitran, L.M., Notinger, P.V., "Comparative Study on Power Transformers Vegetable and Mineral Oil" International Conference on Applied and Theoretical Electricity(ICATE), pp 1-6, 2012.
- [2] Sezer, M., Yalıtım Yağı ve Trafo Bakımı, 1.Basım, Çağdaş Basımevi, 2008.
- [3] Suwarno., Widyanugraha, T., Didit, P.C.H.S., Suharto., "Dielectric Properties of Silicone Oil, Natural Ester, and Mineral Oil under Accelerated Thermal Aging", International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), pp 1139-1142, 2012.
- [4] Abdi, S., Boubakeur, A., Haddad, A., "Influence of Thermal Ageing on Transformer Oil Properties" IEEE International Conference on Dielectric Liquids(ICDL), pp 1-4, 2008.
- [5] Wilson, M.P., Timoshkin, I.V., Given, M.J., MacGregor, S.J., Wang, T., "Breakdown of Mineral Oil: Effect of Electrode Geometry and Rate of Voltage Rise", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol 19, No 5, pp 1657-1664, 2012.
- [6] ASTM D1816-12, Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using VDE Electrodes, 2012.
- [7] ASTM D877-02, Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes, 2007.
- [8] IEC 156, Insulating liquids-Determination of the breakdown voltage-at power frequency-Test Method, 1995-07.
- [9] Li, X., Li, J., Sun, C., "Properties of Transgenic Rapeseed Oil based Dielectric Liquid", Southeast Con, 2006.
- [10] IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment, IEEE Std C57.106-2006.
- [11] IEC 60296 International Standard, Fluids for electrotechnical applications-Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear, 2003.
- [12] Kalenderli, Özcan., Özdemir, Aydoğan., Yüksek Gerilim Laboratuvarı Deneyleri, Ofset Baskı Atölyesi, 1990.