

Investigation of Destructive and Healing Effects on the Temperature and Moisture Rise in terms of Dielectric Strength of Transformer Insulation Oil

Nihat Pamuk (Corresponding author)

TEIAS 5. İletim Tesis ve İşletme Grup Mudurluğu, Test Grup Basmühendisliği, Sakarya
E-mail: nihampamuk@gmail.com

Abstract

Transformer insulation oil is a crucial material for power transformer. Dielectric strength is one of the most important parameters of transformer insulation oil. Dielectric strength of insulation oil provides reliable operation of electrical equipment. Dielectric strength of insulation oil is a measure of the oils superior ability to withstand electrical stress without failure. Dielectric strength test involves applying alternative voltage at a controlled rate to two electrodes immersed in the insulation oil. Gap is a specified distance. When the current arcs across gap the voltage value recorded at that instant is the dielectric strength value of insulation oil. Dielectric strength of transformer insulation oil is also known as breakdown voltage of insulation oil. In this study, breakdown voltage of insulation oil was investigated under the influences of temperature and moisture. Breakdown voltage tests were applied in the standards IEC 156/95, ASTM D1816/97 and VDE 0370/Part5/96 test conditions for three different insulation oil types. Experimental results of the dielectric strength of transformer insulation oil were investigated during temperature and moisture non-equilibrium. The obtained results were compared with different temperature and moisture values in actual power transformer. Destructive and healing effects of temperature and moisture parameters were examined.

Key words: Dielectric strength, Insulation oil, Temperature, Moisture, Transformer

Transformatör Yalıtım Yağının Dielektrik Dayanım Açısından Sıcaklık ve Nem Artışındaki Bozucu ve İyileştirici Etkilerinin İncelenmesi

Özet

Transformatör yalıtım yağı güç transformatörü için hayati bir malzemedir. Transformatör yalıtım yağlarının en önemli parametrelerinden biri dielektrik dayanımdır. Yalıtım yağının dielektrik dayanımı elektriksel teçhizatların güvenli olarak çalışmasını sağlar. Yalıtım yağının dielektrik dayanımı arızaya uğramaksızın elektriksel gerilmeye dayanmak için yağların üstün yeteneğinin bir ölçüsüdür. Dielektrik dayanım testi yalıtım yağındaki daldırılmış iki elektrota kontrollü bir oranda alternatif gerilim uygulamasını içerir. Boşluk belirli bir mesafedir. Akımlar boşluğun içinden atladığı zaman, o anda kaydedilen gerilim değeri yalıtım yağının dielektrik dayanım değeridir. Transformatör yalıtım yağının dielektrik dayanımı yalıtım yağının delinme gerilimi olarak da bilinir. Bu çalışmada, yalıtım yağının delinme gerilimi sıcaklık ve nem etkileri altında incelenmiştir. Delinme gerilimi testleri IEC 156/95, ASTM D1816/97 ve VDE 0370/Part5/96 standartlarındaki test koşullarında üç farklı yalıtım yağı için uygulanmıştır. Transformatör yalıtım yağının dielektrik dayanımının deneysel sonuçları sıcaklık ve nem dengesizliği boyunca araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar mevcut güç transformatörlerindeki farklı sıcaklık ve nem değerleri ile karşılaştırılmıştır. Sıcaklık ve nem parametrelerinin bozucu ve iyileştirici etkileri incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Dielektrik dayanım, Yalıtım yağı, Sıcaklık, Nem, Transformatör

1. Giriş

Transformatör ve diğer elektriksel teçhizatlarda yalıtımı, ısı transferini ve bilgi taşımaya sağlamak amacıyla yalıtım sıvısı kullanılmaktadır. Transformatörün içindeki tüm yapı malzemesiyle devamlı temas halinde olan tek madde, yalıtım yağlarıdır. Bu nedenle yalıtım yağının kalitesi, transformatörün işletme ömrünü ve verimini önemli ölçüde etkiler. Özellikle kâğıt yalıtımın erken bozulmasından ve metal kısmın korozyona uğramasından yalıtım yağı büyük oranda sorumludur. Bu nedenle yapı malzemesiyle uyum sağlaması açısından, başlangıçta kaliteli bir yağ seçilmesi gerekmektedir. Transformatörlerde uygun bir yalıtım yağı kullanmak, ileride oluşabilecek birçok olumsuz olayları ve arızaları ortadan kaldıracak önemli bir adımdır. Transformatörlerde kullanılan yalıtım yağı ve kraft kâğıdı mekanik açıdan oldukça zayıf görünmelerine karşın birlikte kullanıldığı durumlarda etkili yalıtım özelliği gösterirler. Kraft kâğıdının ve yalıtım yağının tek başlarına dielektrik dayanımı, sırasıyla 40kV ve 12kV iken, yağ emdirilmiş kraft kâğıdının dielektrik dayanımı 64kV olmaktadır [1]. Transformatörlerde kullanılan yalıtım yağları ve kraft kâğıtlarının hizmet ömürlerinin sınırlı olmasından dolayı ideal koşullarda dahi bozulmaktadırlar. Hizmet ömürlerini sınırlayan etmenler, elektriksel teçhizatın çalışma koşullarına bağlı yaşlanma hızı, sıcaklık ve nemdir. Kraft kâğıdının yaşlanmasında sıcaklık ve nem katalizör olarak çalışmaktadır. Sıcaklık ve nemin yüksek olduğu değerlerde hem kraft kâğıdı hem de yalıtım yağı hızla yaşlanmaktadır. Transformatörlerdeki yalıtım yağının yaşlanmasından sorumlu diğer etmenler, bakır, boya, vernik ve oksijendir [2]. Yağ yaşlanmasının başlıca mekanizması olan oksitlenme, asitlerin ve kutuplu başka bileşiklerin oluşmasıyla sonuçlanır. Oksitlenme sonucunda elde edilen bileşikler, kâğıdın bozulma sürecine zararlı etkide bulunurlar.

Transformatörlerde kraft kâğıdının ısıyla bozulması 60 – 90 °C arasındaki işletme sıcaklıklarında ortaya çıkar [3]. Bu bozulma, yüksek sıcaklıklarda ünitenin aşırı ısınması sonucunda hızlanır. Bunun sonucu olarak, transformatörün faydalı ömrü kısalmır. Hasar görmüş veya bozulmuş kraft kâğıdının elektriksel özellikleri kabul edilebilir olsa bile mekanik özellikleri, artık mekanik titreşimlere dayanamayacak kadar zayıflar. Yalıtım yağının ve kraft kâğıdının durumunu tespit etmek için kullanılacak çeşitli teknikler vardır. Teşhis amaçlı bu testlerin birlikte kullanılması, yalıtımda zamanla olan değişikliklerin izlenip bunların ısı, dielektrik, kimyasal, mekanik etkilerden hangisinden kaynaklanmış olduğunun anlaşılabilmesine olanak sağlar. Yalıtım yağının ne kadar çabuk yaşlandığını bilmenin faydası, yağın mümkün olduğunca uzun süre kullanıldıktan sonra kâğıtta veya transformatörde hasara yol açmadan değiştirilmesine olanak sağlar. Kraft kâğıdının ekonomik olarak değiştirilmesi veya onarılması mümkün olmadığından, transformatörün ömür süresini etkin olarak belirler.

Bu çalışmada, transformatörlerde kullanılan üç farklı mineral yağ numunesi (Shell Diala S3 ZX-I yalıtım yağı, Nynas Nytro Lyra X yalıtım yağı ve Power Oil 1020-60 UX yalıtım yağı) kullanılmıştır. Bu yağlara ait dielektrik dayanım testleri, IEC 156/95, ASTM-D1816/97 ve VDE 0370/96'dan oluşan üç farklı standarda göre gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Ayrıca delinme gerilimleri üzerinde olumsuz etkiye sahip olan nem probleminin araştırılması amacıyla, deney numunesi olarak kullanılan üç farklı yalıtım yağı için sırasıyla 10 ve 20 ppm su ilave edilerek delinme geriliminde meydana gelen değişimler belirlenmiştir. Sıcaklık etkisinin araştırılması amacıyla, 20 ppm su ilave edilmiş yalıtım yağları sırasıyla 40 ve 50°C'ye kadar ısıtılarak sonrasında meydana gelen gerilim değişimleri incelenmiştir.

2. Transformatör Yalıtım Yağının ve Kraft Kâğıdının Özelliklerinin İncelenmesi

Yüksek gerilim tesislerinde yalıtım amaçlı kullanılan mineral yağlar, kimyasal açıdan parafinik, naftanik ve aromatik hidrokarbon moleküllerinin bir karışımıdır [4]. Mineral yağlar, ham petrol rafine edilerek üretilir. Seçilen ham petrol ile rafine etme tekniği, son ürünün özelliklerini de belirler. Parafinli yağların alçak sıcaklıktaki özellikleri zayıf, oksitlenme ürünlerini ve tortuları çözmeye güçleri düşüktür [5]. Bu durum, tortuların sargılar ve kanallardaki bloajlar üzerine çökmesine yol açar. Bu durum tersine, naftenli yalıtım yağı içinde yağ oksitlenme ürünleri rahatlıkla çözünür. Yalıtım yağının hizmet ömrü için en önemli etken olan oksitlenme direnci, oksitlenme önleyicilerin var olmasına bağlı olarak değişir. Bazı yağlar oksitlenme önleyicileri doğal olarak içermektedir. Oksitlenme önleyici maddeler içermeyen yalıtım yağları, rafine etme işlemleri sonucunda oksitlenmeyi azaltıcı katkıları eklenerek oksitlenmeyi önleyebilmektedir.

2.1 Transformatör Yalıtım Yağı Yaşlanma Süresinin İncelenmesi

Yalıtım yağının yaşlandırma etmenlerinin başında gelen oksijen, serbest bir kök madde süreci vasıtasıyla belirli oranda hidrokarbonlarla tepkimeye girerek hidroperoksitleri oluşturur. Kararlı bir yapıya sahip olmayan hidroperoksitler ayrışarak ketonlar ve suyun oluşumunu sağlar. Ketonların oksitlenmesi

sonucunda karboksilik asitler, bölünmesi sonucunda ise aldehitler oluşur [6-7]. Hidroperoksit grupları alkol ve fenolün üretilmesiyle son bulur. Oksitlenme ürünlerinin çoğu, yalıtım yağının elektriksel özellikleri üzerinde olumsuz etki oluşturur. Üretilen karboksilik asitler ise, yağ içinde eriyerek transformatörün üst kısmındaki boşluklara yükselirler. Erimiş asitler kâğıt ve bakır sargılara zarar verirken, uçucu asitler ise ünitenin tepesini aşındırır. Oksitlenmeyi yavaşlatıcı katkıları ise, oksitlenme mekanizmalarını, serbest kök maddeleri ve başlatıcılarını yok ederek veya peroksitlerle tepkimeye girerek karboksilik asitlerin oluşmasını engeller. Serbest kök tepkimeleri, bakır ve alüminyum gibi katalizörlerin olduğu ortamlarda daha hızlı gelişir. Bu katalizörlerin etkisi, metal pasifleştiriciler vasıtasıyla yok edilir [8]. Fenatrolin gibi doğal olarak var olan moleküller ile organik bazlı sülfür bileşikler kök madde gibi hareket ettikleri için, metal katalizörlerin aktifliğini yok ederler. Aromatik bileşiklerin oksitlenmesiyle üretilen fenolların bir kısmı ise, oksitlenmeyi önleyici olarak hareket ederler. Fenollar, bir hidrojen atomunu peroksi köküne vererek bu kökü kararlı bir yapıya dönüştürür ve serbest kök tepkimesini sonlandırır. Oksitlenme önleyici özelliği sayesinde yalıtım yağı içerisinde sentetik katkı maddesi haline dönüşürler.

2.2 Transformatör Kraft Kağıdı Yaşlanma Süresinin İncelenmesi

Elektriksel teçhizatla yalıtım amacı ile kullanılan kraft kâğıdı mat kahverengi renkte olup, kalınlığı 30 ile 120 µm arasında değişmektedir [9]. Kraft kâğıdı 15 tabakaya kadar bakır iletkenine sarılarak, her büküm bir sonrakinden yalıtılır. Alman kimyacı Carl F. Dahl tarafından 1884'te oluşturulan kraft işlemi, kâğıt hamurunun sodyum hidroksit ve sodyum sülfat ile işlemden geçirilerek odun özlerine ayrıştırılmasını içerir [10]. Kâğıt hamuru içerisindeki selüloz maddesinin polimerleşme derecesi (DP), 20000'den fazla iken bu işlem sırasında 1000 ile 1300 arasındaki değere düşer [11]. Kâğıdın doğal nem içeriği yaklaşık %6 olup, transformatörlerde kullanılacak yalıtım kâğıdının kullanılmadan önce kurutulması zorunlu olur [12]. Polimerleşme derecesi, kurutma işlemi sırasında yaklaşık 950 değere kadar düşer. Bu durum 95 - 100°C'deki vakum koşullarında 10 - 16 gün veya 120 - 140°C'deki hafif yağ buharında 2 - 3 gün sürebilir. Kraft kâğıdının son nem içeriği, tipik olarak % 0,1 oranından az olur. Kraft kâğıdı yaklaşık % 90 oranında selüloz maddesinden ve % 6 oranında odun özü maddesinden oluşurken, geri kalan kısım yarı selüloz maddesinden oluşur [9]. Odun özleri birbirine karbon-karbon ve eter bağlarıyla bağlı fenilpropan birimlerinden oluşan polimer yapılardan meydana gelir. Yarı selüloz maddeler ise, suda eriyebilen ve selüloza benzeyen polisakkarit yapılardan oluşur [13]. Kraft kâğıdı delinme gerilimi dayanımını yarı kristal yapıda üretilen selüloz zincirleri arasındaki hidrojen bağından sağlar [11].

2.3 Polimerleşme Derecesi ile Serbest Yağ Asidi Bağıntısının İncelenmesi

Transformatör yalıtım yağları, serbest yağ asidi (FFA) içerikleri açısından IEC 61198'de belirtilen testlere göre analiz edilirler. Yalıtım yağı içerisindeki serbest yağ asidi miktarının ölçülmesi basit olmakla birlikte, sonuçların yorumlanması oldukça karmaşıktır. Kraft kâğıdının polimerleşme derecesi serbest yağ asidi analizine bağlıdır. Serbest yağ asidi değerinin logaritması ile polimerleşme derecesi arasındaki bağıntı eşitlik 1'de verilmiştir [14].

$$DP = 7100 / (8.88 + FFA) \quad (1)$$

Serbest yağ asidi yoğunluğu yalıtım yağının kg ağırlığı başına düşen, mg cinsinden yağ asidi miktarıdır [15]. Bu durumda yalıtım yağının en düşük serbest yağ asidi miktarı 30 ppm olur [13]. Transformatör sargılarındaki kraft kâğıtları maruz kaldıkları kısa devre arızaları nedeniyle hiçbir zaman aynı oranda bozulmazlar. Transformatör yük koşullarına ve sargı kâğıdının % 20'sinin kâğıdın geri kalanından iki kat hızlı bozulduğu varsayımına göre polimerleşme derecesi arasındaki bağıntı eşitlik 2'de verilmiştir [15].

$$DP = 800 / [(0.186 \times FFA) + 1] \quad (2)$$

Kraft kâğıdının polimerleşme derecesi, yalıtım yağındaki serbest yağ asidi miktarının kâğıt tarafından emilip emilmediğinin bilinmesine bağlı olarak değişir.

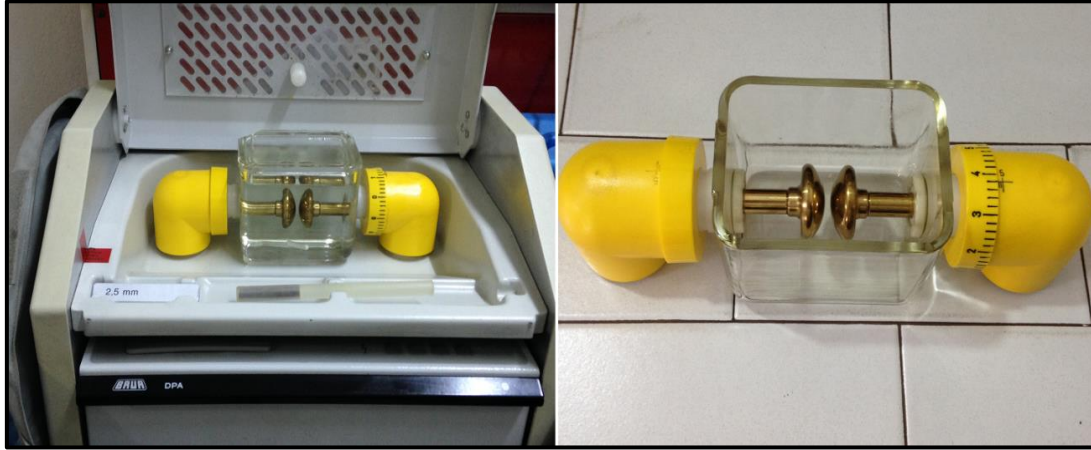
3. Transformatör Yalıtım Yağının Delinme Gerilimi Test Standartları

Transformatörlerde kullanılan yalıtım yağlarının kirlenme ve yaşlanma seviyelerinin belirlenebilmesi için kimyasal, fiziksel ve elektriksel testler uygulanır. Böylelikle transformatör veya diğer elektriksel teçhizatların arıza sonucunda servis harici olması önlenerek, enerjinin sürekliliği ve kalitesi artırılır. Bu amaçla yalıtım yağlarının dielektrik dayanımının belirlenebilmesi için, IEC 156/95, ASTM D1816/97

ve VDE 0370/Part5/96 test standartları kullanılmaktadır [16].

3.1 IEC 156/95 Test Standardı ve Uygulaması

Bu standarda göre delinme gerilimi deneyinde kullanılacak elektrot şekli küresel tipte olup, elektrot açıklığı $2,5 \pm 0,05$ mm olmalıdır. Elektrot boyutları 12,5 ile 13,0 mm arasında olacak olup, laboratuvar ortam sıcaklığı $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ olmalıdır. Test hücresinin hacmi 350 ml - 600 ml arasında olmalıdır [17]. Ölçümlerde kullanılan test hücresinin hacmi 400 ml olarak seçilmiştir. Akım kesme süresi 5ms' den küçük olmalıdır. Trafonun kısa devre akımı 10mA - 25mA arasında olmalıdır [17]. Şekil 1'de dielektrik dayanım testinde kullanılan Baur DPA 75C marka test cihazı ve küresel tipteki elektrotları gösterilmiştir.



Şekil 1. Baur DPA 75C Marka Delinme Gerilimi Test Cihazı ve Küresel Tipteki Elektrotları

İlk delinme gerilimi uygulaması, yağ doldurma işleminden 5 dakika sonra uygulanır. Test hücresinin içerisinde hava baloncuklarının oluşmasını önlemek için bir karıştırıcı düzeneği test süresi boyunca sürekli olarak kullanılır. $2 \pm 0,2\text{kV/sn}$ gerilim artış hızı ile artan, toplam 6 adet delinme gerilimi testi uygulanır. Uygulanan her bir test arasında 2 dakika bekleme süresi vardır. Şekil 2'de yalıtım yağının 40°C ile 50°C sıcaklık seviyelerine kadar ısınmasını sağlamak amacıyla kullanılan FN 500 etüv cihazı gösterilmiştir.



Şekil 2. FN 500 Etüv Cihazı

3.2 ASTM D1816/97 Test Standardı ve Uygulaması

Bu standarda göre elektrot şekli küresel tipte olup, elektrot açıklığı $2,0 \pm \% 20$ mm olmalıdır. Elektrot açıklığına göre delinme geriliminin test sonuçları değişmektedir. Akım kesme süresi 50ms' den küçük olmalıdır. Eğer maksimum akım değeri 0,2A' den büyük ise, akım kesme süresi 83ms' den küçük olmalıdır. Elektrot boyutları arasında $\pm 0,03$ mm tolerans olmalı ve laboratuvar ortam sıcaklığı 20°C ile 30°C arasında olmalıdır. Gerilim artış hızı $0,5\text{kV/s} \pm \% 20$ arasında olmalıdır. Trafonun kısa devre

akımı 1mA - 10mA arasında olmalıdır [18]. En yüksek delinme gerilimi testi ile en düşük delinme gerilimi testi arasındaki fark, delinme gerilimi testleri ortalamasının % 92'sinden küçük olmalıdır [19]. Aksi takdirde delinme gerilimi testleri tekrarlanmalıdır. İlk delinme gerilimi uygulaması, yağ doldurma işleminden 3 ile 5 dakika arasında beklendikten sonra uygulanır. Yüksek alevlenme noktasına sahip numuneler için en az 30 dakika beklenir. Test hücresinin içerisinde hava baloncuklarının oluşmasını önlemek için bir karıştırıcı düzeneği test süresi boyunca sürekli olarak kullanılır. 0,5kV/sn \pm % 20 gerilim artış hızı ile artan, toplam 5 adet delinme gerilimi testi uygulanır. Uygulanan her bir test arasında 3 dakika bekleme süresi vardır.

3.3 VDE 0370/Part5/96 Test Standardı ve Uygulaması

Bu standarda göre delinme gerilimi deneyinde kullanılacak elektrot şekli küresel tipte olup, elektrot açıklığı $2,5 \pm 0,1$ mm olmalıdır. Elektrot boyutları 12,5 mm olup, laboratuvar ortam sıcaklığı $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ olmalıdır. Akım kesme süresi 20ms' den küçük olmalıdır. Trafonun kısa devre akımı 20mA'den büyük olmalıdır. Gerilim değerinin ulaşabileceği en yüksek seviye efektif gerilim değerinin $\pm 5\%$ arasında olmalıdır [19]. Test hücresinin hacmi 300 ml - 500 ml arasında olmalıdır. Ölçümlerde kullanılan test hücresinin hacmi 400 ml olarak seçilmiştir. İlk delinme gerilimi uygulaması, yağ doldurma işlemi sonrası 0 ile 10 dakika arasında uygulanmalıdır. Test hücresinin içerisinde hava baloncuklarının oluşmasını önlemek için bir karıştırıcı düzeneği vardır. Her bir delinme uygulamasından sonra 1 dakika süre ile karıştırıcı düzeneği kullanılır. 2kV/sn gerilim artış hızı ile artan, toplam 6 adet delinme gerilimi testi uygulanır. Uygulanan delinme gerilimi testleri arasında 5 dakikadan az süre ile beklenmelidir.

4. Transformator Yalıtım Yağının Dielektrik Dayanım Testi Uygulaması

Bu çalışmada üç farklı mineral yağ numunesi için üç farklı delinme gerilimi metodu ile dielektrik dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Standartlara ek olarak nem ve sıcaklık faktörlerinin dielektrik dayanım testi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Üç farklı mineral yağ numunesi için pH değeri 7.0 ve iletkenliği $0.055 \mu\text{S}/\text{cm}$ (25°C) olan 10 ve 20 ppm değerinde saf su ilave edilmiş ve yeniden dielektrik dayanım testleri yapılmıştır. 10 ve 20 ppm değerindeki saf su yağ numunelerine mikro şırınga yardımıyla ilave edilmiştir.

Üç farklı mineral yağ numunesi için 10 ppm değerinde saf su ilave edildikten sonra karıştırıcı düzeneği yardımıyla yağ numuneleri karıştırılmış ve suyun homojen olarak dağılabilmesi amacıyla standartlarda belirtilen süre kadar beklenmiştir. Üç farklı delinme gerilimi metoduna göre her bir mineral yağ numunesi için dielektrik dayanım testleri tekrarlanmıştır. Daha sonra üç farklı mineral yağ numunesinin her birine 20 ppm değerinde saf su ilave edilmiş ve karıştırıcı düzeneği yardımıyla yağ numuneleri karıştırılmıştır. Suyun yağ içerisinde homojen olarak karıştığı gözlemlendikten sonra dielektrik dayanım testleri tekrarlanmıştır.

Dielektrik dayanım testi üzerinde sıcaklık etkisinin araştırılabilmesi amacıyla 20 ppm değerinde saf su ilave edilmiş ve karıştırıcı düzeneği yardımıyla karıştırılmış olan yağ numuneleri FN 500 etüv cihazı yardımıyla 40°C ' ye kadar ısıtılmıştır. 40°C ' deki üç farklı mineral yağ numunesi için üç farklı delinme gerilimi metodu ile dielektrik dayanım testleri tekrarlanmıştır.

Daha sonra yeni üç farklı mineral yağ numunesi için 20 ppm değerinde saf su ilave edilmiş ve karıştırıcı düzeneği yardımıyla numuneler karıştırılmıştır. Yağ numuneleri FN 500 etüv cihazı yardımıyla 50°C ' ye kadar ısıtılmıştır. 50°C ' deki üç farklı mineral yağ numunesi için üç farklı delinme gerilimi metodu ile dielektrik dayanım testleri tekrarlanmıştır. 40 ve 50°C ' deki dielektrik dayanım testi sonuçları karşılaştırılarak delinme gerilimi üzerindeki sıcaklık etkisi incelenmiştir. Tablo 1'de üç farklı transformator yalıtım yağı için elde edilen dielektrik dayanım test sonuçları gösterilmiştir.

5. Transformator Yalıtım Yağının Dielektrik Dayanım Analizleri

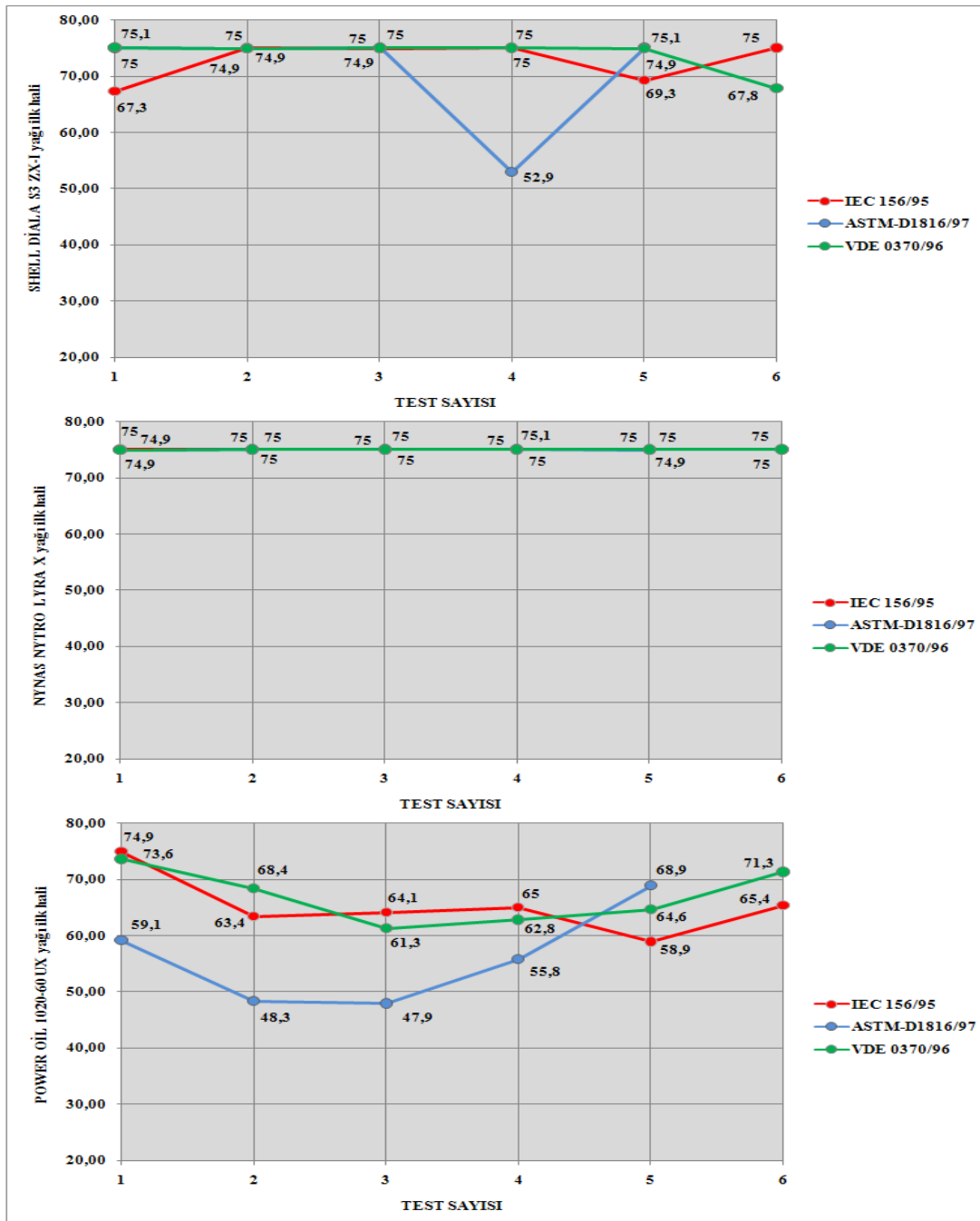
5.1 Transformator Yalıtım Yağlarının İlk Durum Analizi

Shell Diala S3 ZX-I, Nynas Nytro Lyra X ve Power Oil 1020-60 UX marka yalıtım yağları pipet yardımıyla yağ varillerinden alınmış ve 20°C ile 30°C arasındaki laboratuvar sıcaklığında dielektrik dayanım testleri uygulanmıştır. Şekil 3'de üç farklı transformator yalıtım yağı için üç farklı delinme gerilimi metodu ile gerçekleştirilen ilk analiz sonuçları gösterilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde, birbirini takip eden ölçüm sonuçlarının doğrusal olarak değişmediği (Shell Diala S3 ZX-I ve Power Oil 1020-60 UX yalıtım yağları için) görülmektedir. Bunun sebebi, yalıtım yağlarının fiziksel ve kimyasal yapılarının çevresel etmenlere karşı (nem ve toz parçacıkları) oldukça hassas olması ve buna bağlı olarak her bir ölçümde yapısal değişiklik göstermesinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 1. Üç farklı transformatör yalıtım yağı için elde edilen dielektrik dayanım test sonuçları

Yalıtım Yağı Markaları		Shell Diala S3 ZX-I yağı			Nynas Nytro Lyra X yağı			Power Oil 1020-60 UX yağı		
Durum	Metotlar	IEC	ASTM-D	VDE	IEC	ASTM-D	VDE	IEC	ASTM-D	VDE
Numunenin ilk hali	Test 1	67.3 kV	75.0 kV	75.1 kV	75.0 kV	74.9 kV	74.9 kV	74.9 kV	59.1 kV	73.6 kV
	Test 2	75.0 kV	74.9 kV	74.9 kV	75.0 kV	75.0 kV	75.0 kV	63.4 kV	48.3 kV	68.4 kV
	Test 3	74.9 kV	75.0 kV	75.0 kV	75.0 kV	75.0 kV	75.0 kV	64.1 kV	47.9 kV	61.3 kV
	Test 4	75.0 kV	52.9 kV	75.0 kV	75.1 kV	75.0 kV	75.0 kV	65.0 kV	55.8 kV	62.8 kV
	Test 5	69.3 kV	75.1 kV	74.9 kV	75.0 kV	74.9 kV	75.0 kV	58.9 kV	68.9 kV	64.6 kV
	Test 6	75.0 kV	***	67.8 kV	75.0 kV	***	75.0 kV	65.4 kV	***	71.3 kV
	Ortalama		72.8 kV	70.6 kV	73.8 kV	75.0 kV	75.0 kV	75.0 kV	65.3 kV	56.0 kV
10 ppm su ilaveli hali	Test 1	74.2 kV	60.8 kV	75.0 kV	34.6 kV	33.5 kV	44.3 kV	60.1 kV	45.5 kV	55.2 kV
	Test 2	44.3 kV	54.9 kV	55.8 kV	41.3 kV	31.9 kV	45.8 kV	53.5 kV	42.5 kV	38.2 kV
	Test 3	60.0 kV	58.5 kV	75.1 kV	36.9 kV	35.4 kV	47.5 kV	50.8 kV	49.2 kV	58.2 kV
	Test 4	45.3 kV	57.7 kV	44.1 kV	35.4 kV	32.9 kV	35.8 kV	44.2 kV	40.9 kV	60.9 kV
	Test 5	75.0 kV	55.1 kV	75.0 kV	35.8 kV	26.9 kV	39.8 kV	40.7 kV	56.9 kV	51.6 kV
	Test 6	66.3 kV	***	71.0 kV	39.3 kV	***	50.4 kV	61.8 kV	***	58.2 kV
	Ortalama		60.9 kV	57.4 kV	66.0 kV	37.2 kV	32.1 kV	43.9 kV	51.8 kV	47.0 kV
20 ppm su ilaveli hali	Test 1	53.1 kV	52.9 kV	64.1 kV	31.9 kV	32.7 kV	36.8 kV	42.2 kV	24.8 kV	32.9 kV
	Test 2	65.0 kV	59.6 kV	55.5 kV	35.1 kV	35.9 kV	26.8 kV	31.0 kV	27.5 kV	33.4 kV
	Test 3	60.4 kV	36.4 kV	62.3 kV	30.8 kV	34.5 kV	34.9 kV	37.9 kV	32.9 kV	40.3 kV
	Test 4	64.1 kV	38.9 kV	58.8 kV	33.6 kV	34.0 kV	33.8 kV	37.4 kV	26.7 kV	48.1 kV
	Test 5	53.2 kV	65.9 kV	56.7 kV	39.6 kV	32.3 kV	34.5 kV	33.6 kV	34.9 kV	43.3 kV
	Test 6	52.3 kV	***	49.9 kV	32.6 kV	***	38.7 kV	39.4 kV	***	41.7 kV
	Ortalama		58.0 kV	50.7 kV	57.9 kV	33.9 kV	33.9 kV	34.3 kV	36.9 kV	29.4 kV
20 ppm su + 40 °C sıcaklık ilaveli hali	Test 1	75.0 kV	67.7 kV	74.9 kV	46.8 kV	36.3 kV	54.3 kV	74.0 kV	53.6 kV	65.3 kV
	Test 2	75.0 kV	64.7 kV	73.4 kV	55.8 kV	41.6 kV	36.1 kV	66.4 kV	58.2 kV	68.4 kV
	Test 3	74.9 kV	61.6 kV	66.7 kV	51.7 kV	39.2 kV	39.1 kV	74.3 kV	49.4 kV	61.2 kV
	Test 4	75.1 kV	64.1 kV	74.9 kV	50.3 kV	40.9 kV	49.0 kV	74.9 kV	58.7 kV	66.2 kV
	Test 5	66.2 kV	56.1 kV	75.0 kV	56.6 kV	37.5 kV	48.9 kV	71.9 kV	54.3 kV	69.0 kV
	Test 6	74.1 kV	***	75.1 kV	52.3 kV	***	44.9 kV	74.9 kV	***	60.8 kV
	Ortalama		73.4 kV	62.8 kV	73.4 kV	52.3 kV	39.1 kV	45.4 kV	72.7 kV	54.8 kV
20 ppm su + 50 °C sıcaklık ilaveli hali	Test 1	75.0 kV	72.3 kV	75.0 kV	75.0 kV	75.0 kV	75.0 kV	74.9 kV	61.1 kV	74.2 kV
	Test 2	74.4 kV	75.0 kV	74.9 kV	74.9 kV	75.0 kV	75.1 kV	75.0 kV	63.7 kV	74.9 kV
	Test 3	75.0 kV	65.1 kV	75.0 kV	75.0 kV	75.0 kV	74.9 kV	72.8 kV	54.7 kV	75.0 kV
	Test 4	75.0 kV	68.3 kV	74.4 kV	75.0 kV	75.0 kV	75.0 kV	75.0 kV	59.3 kV	74.6 kV
	Test 5	75.0 kV	69.4 kV	75.0 kV	75.1 kV	75.0 kV	75.0 kV	75.0 kV	64.4 kV	73.6 kV
	Test 6	75.0 kV	***	75.0 kV	74.7 kV	***	75.0 kV	74.9 kV	***	75.0 kV
	Ortalama		74.9 kV	70.0 kV	74.9 kV	75.0 kV	75.0 kV	75.0 kV	74.6 kV	60.6 kV

Nynas Nytro Lyra X yalıtım yağının çevresel etmenlerden etkilenmeden düzgün bir şekilde varillere doldurulduğu anlaşılmaktadır. Dielektrik dayanım test metotları incelendiğinde ise, IEC 156/95 ve VDE 0370/96 test metotlarının üç farklı yağ türü içinde birbirine yakın değerler verdiği görülmektedir.

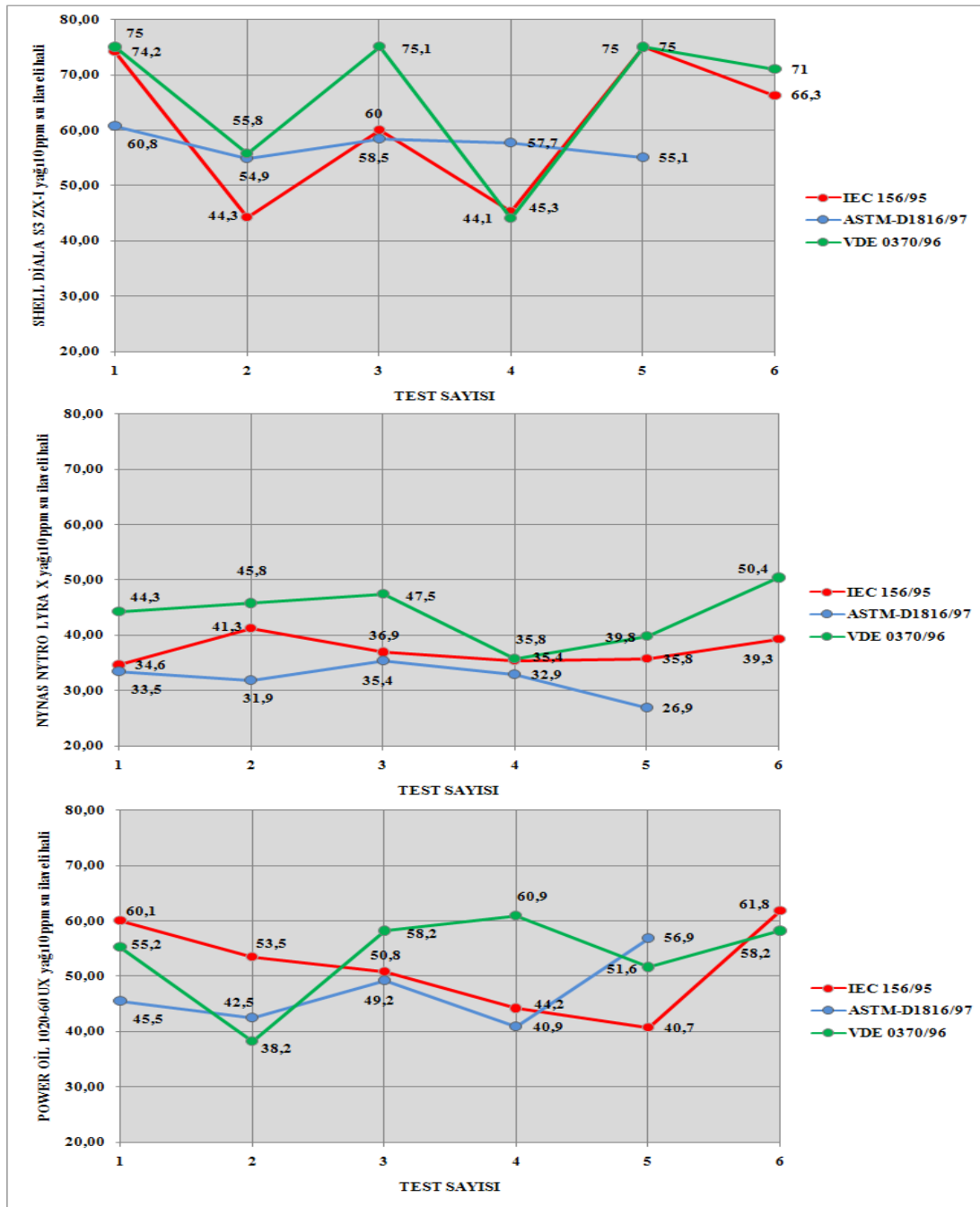


Şekil 3. Transformör Yalıtım Yağlarının İlk Analiz Sonuçları

5.2 Transformör Yalıtım Yağlarının 10 ppm Su İlaveli Analizi

Şekil 4'de üç farklı transformör yalıtım yağı için üç farklı delinme gerilimi metodu ile gerçekleştirilen 10 ppm su ilaveli analiz sonuçları gösterilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde, yağ içerisinde su bulunması yağın dielektrik dayanım test değerlerinin azalmasına ve delinme alan şiddetinin zayıflamasına neden olmaktadır. Delinme gerilimindeki en ciddi zayıflama % 64,14'lük oranla ASTM-D1816/97 test metodu ile delinme gerilimi ölçülen Nynas Nytro Lyra X marka yalıtım yağında görülmüştür. ASTM-D1816/97 test metodunun üç farklı yalıtım yağı içinde değişim sonuçlarının birbirine yakın değerler olarak doğrusal olarak değiştiği görülmüştür. Kullanılan üç farklı yöntem

içinde delinme gerilimi değerlerindeki en az etkilenmenin Shell Diala S3ZX-I marka yalıtım yağında olduğu belirlenmiştir. Üç farklı yalıtım yağı içinde dielektrik dayanım değerlerinin ortalamasının en yüksek bulunduğu test metodu VDE 0370/96 test metodu olarak belirlenmiştir.

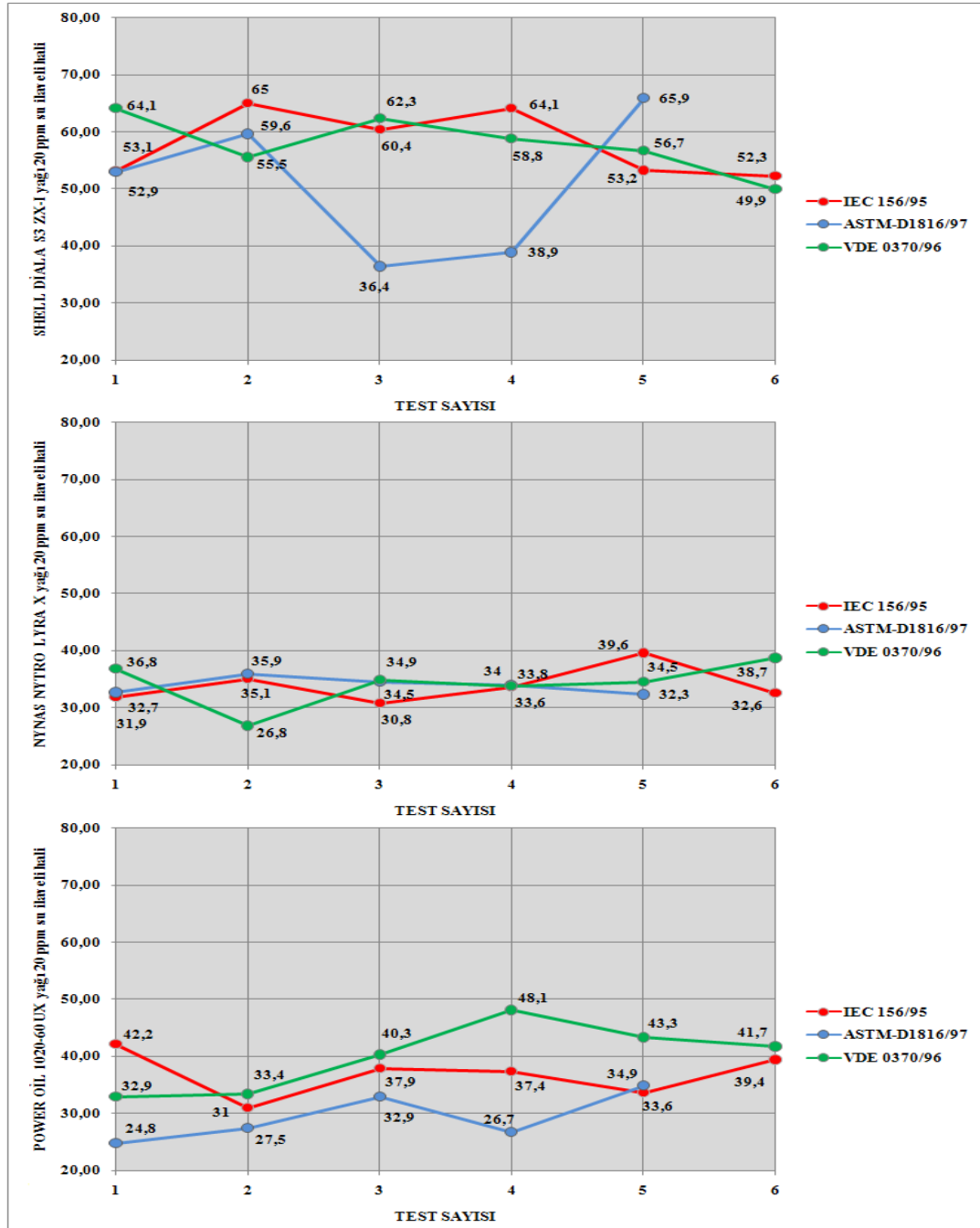


Şekil 4. Transformatör Yalıtım Yağlarının 10 ppm Su İlaveli Analiz Sonuçları

5.3 Transformatör Yalıtım Yağlarının 20 ppm Su İlaveli Analizi

Şekil 5’de üç farklı transformatör yalıtım yağı için üç farklı delinme gerilimi metodu ile gerçekleştirilen 20 ppm su ilaveli analiz sonuçları gösterilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde, yağın dielektrik dayanım test değerlerinde çok ciddi azalmalar olduğu ve delinme alan şiddetinin oldukça zayıfladığı görülmektedir. Delinme gerilimindeki en ciddi zayıflama % 66,93’lük oranla ASTM-D1816/97 test metodu ile delinme gerilimi ölçülen Power Oil 1020-60 UX marka yalıtım yağında görülmüştür. Nynas Nytro Lyra X marka yalıtım yağının analiz sonuçlarının üç farklı test metodu içinde birbirine yakın değerler olarak doğrusal olarak değiştiği görülmüştür. Delinme gerilimi

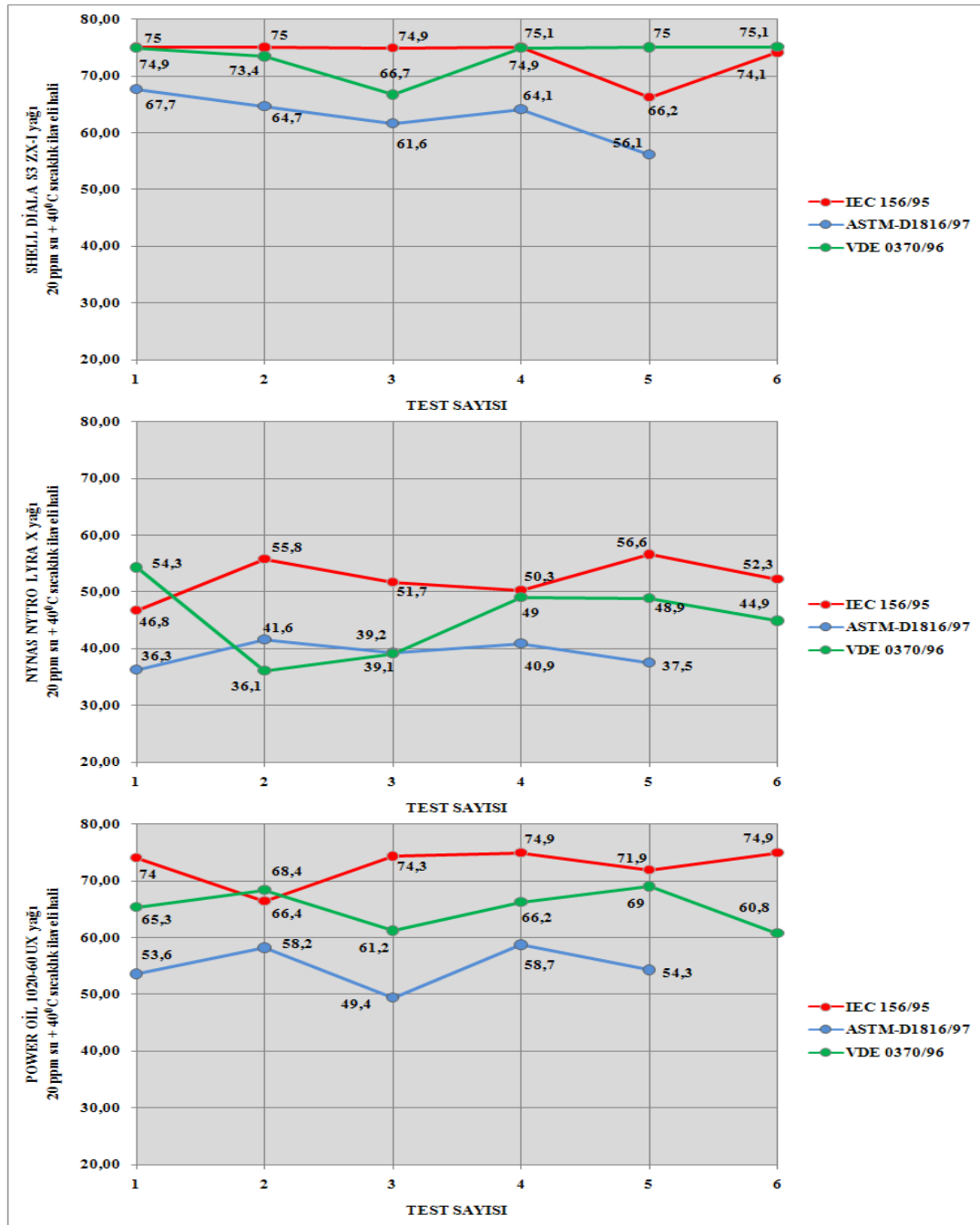
değerlerindeki en az etkilenmenin Shell Diala S3ZX-I marka yalıtım yağında olduğu belirlenmiştir. Üç farklı yalıtım yağı içinde dielektrik dayanım değerlerinin ortalamasının en yüksek bulunduğu test metodu VDE 0370/96 test metodu olarak belirlenmiştir.



Şekil 5. Transformatör Yalıtım Yağlarının 20 ppm Su İlaveli Analiz Sonuçları

5.4 Transformatör Yalıtım Yağlarının 20 ppm Su + 40°C Sıcaklık İlaveli Analizi

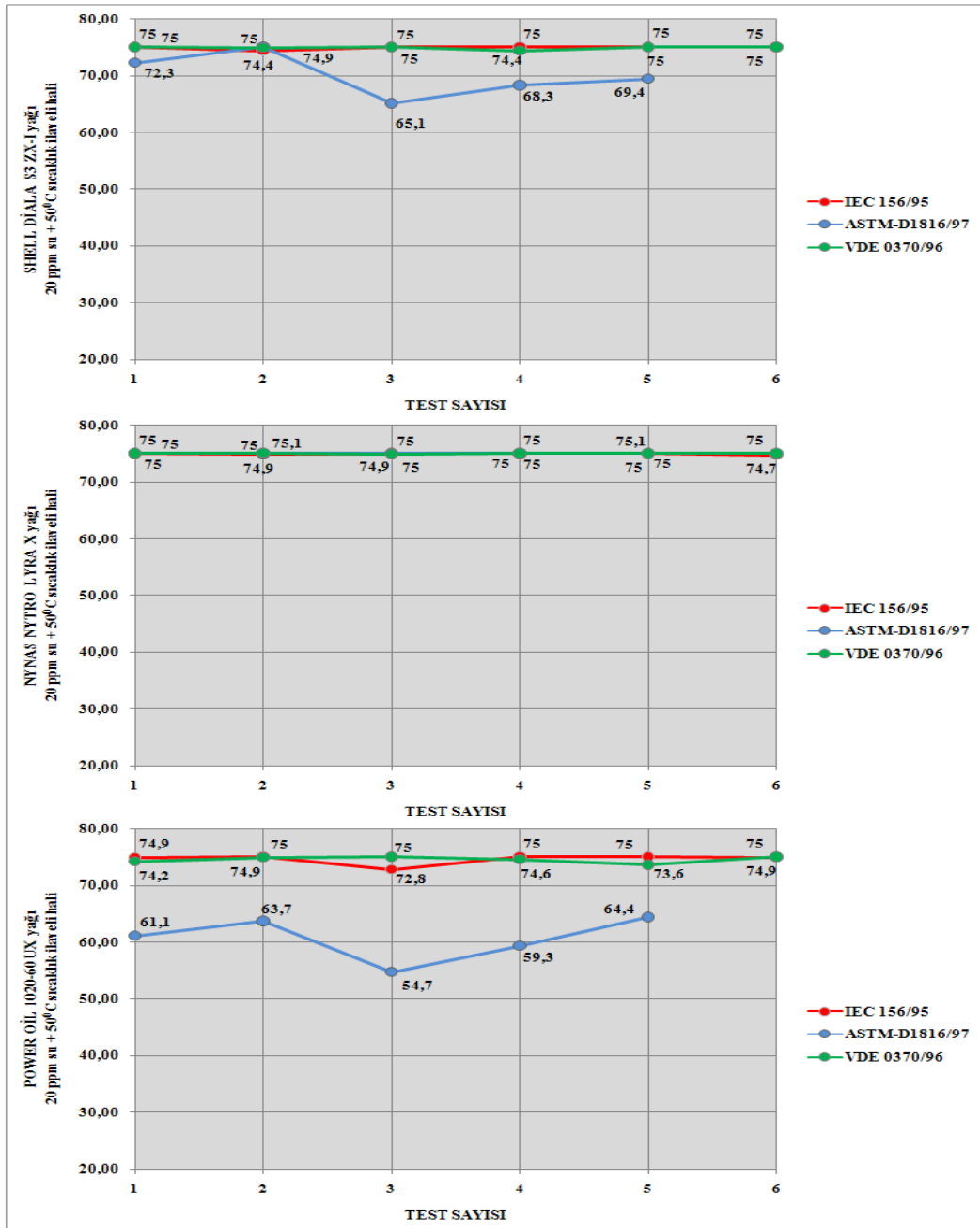
Şekil 6'da üç farklı transformatör yalıtım yağı için üç farklı delinme gerilimi metodu ile gerçekleştirilen 20 ppm su + 40°C sıcaklık ilaveli analiz sonuçları gösterilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde, yağ içerisinde nem halinde bulunan su moleküllerinin bir kısmının 40°C sıcaklık yardımıyla yok edildiği görülmüştür. Bu durum yalıtım yağlarının dielektrik dayanım test değerlerinin artmasına ve delinme alan şiddetinin kuvvetlenmesine neden olmuştur. Delinme gerilimindeki en ciddi yükselme % 97'lik oranla IEC 156/95 test metodu ile delinme gerilimi test edilen Power Oil 1020-60 UX marka yalıtım yağında yaşanmıştır.



Şekil 6. Transformör Yalıtım Yağlarının 20 ppm Su + 40 °C Sıcaklık İleveli Analiz Sonuçları

5.5 Transformör Yalıtım Yağlarının 20 ppm Su + 50 °C Sıcaklık İleveli Analizi

Şekil 7’de üç farklı transformör yalıtım yağı için üç farklı delinme gerilimi metodu ile gerçekleştirilen 20 ppm su + 50°C sıcaklık ilaveli analiz sonuçları gösterilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, Nynas Nytro Lyra X marka yalıtım yağının analiz sonuçlarının üç farklı test metodu içinde birbirine yakın değerler alarak doğrusal olarak değiştiği görülmüştür. Delinme gerilimindeki en ciddi yükselme % 91.82’lik oranla ASTM-D1816/97 test metodu ile delinme gerilimi test edilen Nynas Nytro Lyra X marka yalıtım yağında yaşanmıştır. Delinme gerilimi değerlerindeki en az etkilenmenin % 2.04’lük bir oranla IEC 156/95 test metodu ile delinme gerilimi test edilen Shell Diala S3ZX-I marka yalıtım yağında olduğu belirlenmiştir. Üç farklı yalıtım yağı içinde dielektrik dayanım değerlerinin ortalamasının en yüksek bulunduğu test metotları % 99.78’lik bir oranla IEC 156/95 ve VDE 0370/96 test metotları olarak belirlenmiştir. Dielektrik dayanım değerleri ortalamasının en düşük bulunduğu test metodu ise % 9.44’lük bir oranla ASTM-D1816/97 test metodu olarak belirlenmiştir.



Şekil 7. Transformatör Yalıtım Yağlarının 20 ppm Su + 50⁰C Sıcaklık İlaveli Analiz Sonuçları

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, elektrik güç sistemlerindeki transformatörlerde yalıtım amacıyla kullanılan Shell Diala S3 ZX-I, Nynas Nytro Lyra X ve Power Oil 1020-60 UX marka yalıtım yağı numuneleri için dielektrik dayanım analizleri gerçekleştirilmiştir. Üç farklı markadaki yağ numuneleri için IEC156/95, ASTM-D1816/97 ve VDE 0370/96 test metotları uygulanarak yalıtım değerleri incelenmiştir. Yalıtım yağlarına 10 ve 20 ppm saf su ilave edilmiş ve nemin dielektrik dayanım üzerine etkisi incelenmiştir. 20 ppm su ilave edilmiş yalıtım yağları 40 ve 50°C'ye kadar ısıtılarak, sıcaklığın dielektrik dayanım üzerine etkisi incelenmiştir. Ortalama dielektrik dayanım değerleri, delinme gerilimi hızı yükseldikçe artmaktadır. Yalıtım yağı içerisine su ilave edildikçe, delinme gerilimi olumsuz olarak etkilenmekte ve yağın yalıtım özelliği azalmaktadır. Bu durumun aksine yalıtım yağının sıcaklığı yükseldikçe dielektrik dayanımı artmaktadır. Yalıtım amacı ile kullanılan benzer özellikteki yalıtkan yağların işletme koşullarında davranışlarının farklı olacağı ortaya çıkmıştır. Bu sebeple transformatörlerde yalıtım amacı ile kullanılacak olan yağların test ve analiz sonuçlarına büyük önem verilmelidir. Yalıtım yağı içerisindeki

bozucu etmenlerin (toz veya kâğıt parçacıkları) etkisi farklı olduğundan, transformatör yalıtım yağlarının kullanım yeri ve amacı dikkate alınarak yalıtım yağlarının seçilmesi gerekmektedir.

Kaynaklar

- [1] Pamuk N., “ Investigation of the long term degradation of cellulosic insulating materials in high voltage power transformer” *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, Vol. 16, No. 3-4, 422-428, 2014.
- [2] Krause C., Gasser H. P., Huser J., Sidler A., “ Effects of Moisture in Transformerboard Insulation and the Mechanism of Oil Impregnation of Void” *Transform 98* 20-21 April, Munich, Germany, 1998.
- [3] Thomson C. I., Lowe R. M., Ragauskas A. J., “Imaging cellulose fibre interfaces with fluorescence microscopy and resonance energy transfer” *Carbohydrate Polymers*, Vol. 69, No. 4, 799-804, 2007.
- [4] Sezer M., “Trafo Bakımı ve Yalıtım Yağı” *Çağdaş Basımevi*, 127s, Balıkesir, 2014.
- [5] Kayam Ç., “ Parafinik ve Naftenik Menşeli Ham Petrollerin Rafinasyonları ve Ürünleri, Parafinik ve Naftenik Baz Yağların Özelliklerinin Karşılaştırılması” *II. Uluslararası Madeni Yağlar Sempozyumu ve Sergisi* 14-16 Kasım, Ankara, 2013.
- [6] Tante D. N., Liddawi S. Y., Sskasiko D., “ Properties of Transformer Oil that Affect Efficiency” *Blekinge Tekniska Högskola, Blekinge Institute of Technology, Bachelor of Science in Electrical Engineering Thesis*, 7-9p, Krlskrona, Sweden, 2014.
- [7] Düzgün M., “ Transformatör Yağları, Kullanım Alanları Genel Özellikleri ve PCB’lerin Türkiye’deki Mevcut Durumu” *II. Uluslararası Madeni Yağlar Sempozyumu ve Sergisi* 14-16 Kasım, Ankara, 2013.
- [8] Gallagher T. J., “Simple Dielectric Liquids - Mobility, Conduction and Breakdown” *Clarendon Press, Oxford*, 59-63, 1975.
- [9] Karlsson H., “ Strength Properties of Paper Produced from Softwood Kraft Pulp, Pulp Mixture, Reinforcement and Sheet Stratification” *Karlstad University, Faculty of Technology and Science Chemical Engineering, Master Thesis*, 21-32p, Karlstad, Sweden, 2010.
- [10] Dahl C. F., “ Kraft paper and kraft paper productions” *New Encyclopedia Britannica*, 13, 966, 1994.
- [11] Adejumobi I. A., Oyagbirin S. G., “ Insulation deterioration and its effects on power systems” *Journal Engineering and Applied Sciences*, Vol. 2, No. 5, 870-873, 2007.
- [12] Nynas, “Transformer Oil Handbook” *Nynas Naphthenics AB*, 102p, Stockholm, Sweden, 2002.
- [13] Kazi S. M., Kortschot M. T., “ The fracture behavior of TMP/kraft blends” *Tappi Journal*, Vol. 79, No. 5, 197-202, 1996.
- [14] Gernandt R., Wagberg L., Gardlund L., Dautzenberg H., “Polyelectrolyte complexes for surface modification of wood fibres. I. Preparation and characterization of complexes for dry and wet strength improvement of paper” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 213, No. 1, 15-25, 2003.
- [15] Gardlund L., Wagberg L., Gernandt R., “Polyelectrolyte complexes for surface modification of wood fibres. Part II: influence of complexes on wet and dry strength of paper” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 218, No. 1-3, 137-149, 2003.
- [16] IEC 60296 International Standard, “ Fluids for Electro technical Applications - Unused Mineral Insulating Oils for Transformers and Switchgear, *International Electrotechnical Commission*, 2003.
- [17] IEC 60156, International Standard, “ Insulating Liquids - Determination of the Breakdown Voltage at Power Frequency - Test Method, Second Edition, *International Electrotechnical Commission*, 1995.
- [18] ASTM-D1816/97, “ Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disc Electrodes, 2007.
- [19] Kocatepe C., Arıkan O., Taslak E., Kumru C. F., “ Yüksek Gerilim Tesislerinde Kullanılan Yalıtkan Yağların Delinme Dayanımı Analizi” *5th Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu EVK’2013* 23-24 Mayıs, Kocaeli, 2013.