

KURU TİP TRAFOLARIN ORTALAMA VE EN YÜKSEK SARGI SICAKLIK ARTIŞLARININ İNCELENMESİ

Cenk GEZEGİN¹ Hasan DİRİK² Engin Ufuk ERGÜL³ Muammer ÖZDEMİR⁴

¹ Amasya Üniv., Teknik Bilimler M.Y.O., Elektrik ve Enerji Böl., 05186, Amasya, TÜRKİYE

² Sinop Üniv., Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 57000, Sinop, TÜRKİYE

³ Amasya Üniv., Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Müh. Böl.,05100, Amasya, TÜRKİYE

⁴ OMU, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Müh. Böl.,55270, Samsun, TÜRKİYE

cenkgezegin@gmail.com, hasan_dirik@hotmail.com, euergul@gmail.com,

ozdemirm@omu.edu.tr

Özet- Trafolar elektrik enerjisinin iletim ve dağıtımında kullanılan en önemli donanımlardan birisidir. Trafo kayıplarının oluşturduğu ısı, trafonun iç yapısının farklı bölgelerinde farklı sıcaklık artışlarına neden olur. Bir trafonun ömrünü belirleyen en önemli değişken sargı yalıtım malzemesinin yaşlanmasına neden olan yüksek sıcaklıklardır. Bu çalışmada, öncelikle, IEEE C57.134-2013 ve IEC60076-11-2004 standartlarına göre kuru tip güç trafolarının en sıcak nokta (hottest-spot) sıcaklığını belirlemede kullanılan kavramlar ve ölçme yöntemleri açıklanmıştır. Sonrasında, söz konusu yöntemlerden olan kısa devre ve doğrudan yükleme yöntemleri ile doğal soğutmalı 5kVA, 380/220V değerlerindeki tek fazlı bir kuru tip trafo üzerinde yapılan deneysel çalışmalar verilmiştir. Deneysel çalışmalar ile en sıcak bölge değeri ile ortalama sargı sıcaklığı arasındaki ilişki incelenmiş ve sonuçlar irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler- Kuru Tip Trafolar, En Sıcak Nokta Sıcaklığı, Ortalama Sargı Sıcaklığı.

INVESTIGATION OF AVERAGE AND HOT-SPOT WINDING TEMPERATURE RISES IN DRY TYPE TRANSFORMERS

Abstract- Transformers are one of the most important equipment in the transmission and distribution of electrical energy. The heat that is originated from transformer losses cause different temperature rises in different sections of their internal structure. The most important parameter that affects service life of a transformer is the temperature of hot-spot that causes aging of the winding insulation material. In this study, firstly, concepts and measurement methods that are used for the determination of hottest-spot temperature of dry-type power transformers according to IEEE C57.134-2013 and IEC60076-11-2004 standards are explained. Then, experimental studies performed by short-circuit and direct-loading methods on a self-cooled dry type single phase transformer with rated 5 kVA and 380V/220V is given. In these experimental studies, relation between average and hot-spot winding temperature rises of transformers is investigated and evaluated.

Key Words- Dry-Type Transformer, Hot-Spot Temperature, Average Winding Temperature.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Trafolar elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtımında çeşitli boyutlarda kullanılmakta olup enerji sistemlerinin en önemli ve en maliyetli donanımlarından birisidir. Trafoların verimlerinin çok yüksek olmasına rağmen çekirdek ve sargılarda oluşan kayıplar nedeniyle üzerlerinde önemli bir ısı artışı meydana gelir. Isınma, trafolarda yalıtım için kullanılan malzemenin ömrünü belirlemektedir [1]. Bu ömür, genellikle trafo sargılarında oluşan en yüksek sıcaklık ile doğrudan ilişkili olduğundan bu değer en doğru şekilde bilinmesi gerekir. Yalıtım malzemesindeki her 6 °C' lik sıcaklık artışı yaşlanma hızını iki katına çıkarmaktadır [2]. Trafolardaki her bir sargının sıcaklık artışı normal işletme durumu için tasarlanır. Bu yüzden ısınma testi sırasında da sınır değerler aşılmamalıdır. Ayrıca, trafolarda en sıcak bölgenin tasarımı belirlenmesi ve bu değer belirli sınırlar içinde tutulması gerekmektedir. Kuru tip trafoların yalıtım sınıflarına göre anma işletme durumları için ortalama sargı sıcaklık artışları ve en sıcak nokta sıcaklıkları Tablo 1'de verilmektedir [3-4-10].

Tablo 1. Sürekli yüklenme durumunda kuru tip trafo sargıları için sıcaklık artış sınırları
(Limits of temperature rise for continuously rated dry-type transformer windings)

Yalıtım Sınıfı Sıcaklığı (°C)	Anma Akımında Ortalama Sargı Sıcaklık Artış Sınırı(°C)		Sargı En Sıcak Nokta (Hottest-Spot) Sıcaklık Sınırı (°C)	Sargı En Sıcak Nokta (Hottest-Spot) Sıcaklık Artışı (°C)
	IEC 60076-11	IEEE C57.12.01	IEC 60076-11	IEEE C57.12.01
105 (A)	60	-	130	-
120 (E)	75	-	145	-
130 (B)	80	75	155	90
155 (F)	100	95	180	115
180 (H)	125	115	205	140
200	135	135	225	160
220	150	150	245	180

Kuru tip trafoların hastaneler, madenler, okullar, çok katlı binalar, kimya fabrikaları ve ulaşım sistemleri gibi birçok ticari ve endüstriyel alanlarda kullanımı artmaktadır. Kuru tip trafolar sıvı içine daldırılmış trafolarla göre oldukça avantajlıdır. Bu avantajlar şunlardır:

- Yangın riski kuru tip trafo kullanıldığında önemli ölçüde azalır. Bazı sıvıya daldırılmış trafolar çabuk yanan yağlarla doldurulmuştur ki bu da ticari ve endüstriyel tesislerde uzak durulan bir durumdur.
- Sıvıya daldırılmış trafolar PCB (Poliklorobifenil) özellikli kimyasallar ile doldurulduklarından bu tehlikeli kimyasalların toprağa veya suya sızmaları oldukça tehlikelidir ve temizlenmesi oldukça masraflıdır. Bu tür çevresel endişeler kuru tip trafoları çekici hale getirmektedir.
- Kuru tip trafolar sıvıya daldırılmış trafolardan boyut olarak büyük olmalarına rağmen radyatör gibi ilave soğutma sistemlerine ihtiyaç duymadıklarından toplam boyutları daha küçüktür.
- Kuru tip trafoların bakımı, sıvıya daldırılmış trafolardan daha ucuz ve kolaydır. Sıvı soğutmalı trafolarda çekirdek ve sargıların tanktan atölyelerde çıkarılması karmaşık ve maliyetli bir işlemdir [5].

2. TANIMLAR (DEFINITIONS)

Sıcaklık artış testi sargı sıcaklığının gerek standart ve gerekse teknik özelliklere uygunluğunun doğrulandığı bir tip testtir [6]. Sıcaklık artış testi ile trafonun bir veya daha fazla sargısının

çevre sıcaklığı üzerindeki sıcaklık artışının belirlenmesi sağlanır. Test ile yapılan ölçümler o sargıya ait ortalama sıcaklık artışını vermekte olup belli bir noktaya ait değerler değildir. Sıcaklık artış deneyinden elde edilen verileri daha iyi anlayabilmek için aşağıdaki verilen tanımların bilinmesi gerekir.

Ortalama Sargı Sıcaklık Artışı: Direnç değişiminden elde edilen ortalama sargı sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki farktır.

Hot spot: (Sıcak Nokta) Bir sargının sıcaklık artışının en yüksek olduğu ya da en sıcak noktası için sıkça kullanılan ve tavsiye edilmeyen kısaltılmış terimdir.

En Yüksek (Hottest-spot) Sargı Sıcaklığı: Yalıtım veya yalıtım sıvısı ile temas halindeki bir trafo sargısının akım taşıyan bileşenlerinin en yüksek sıcaklığıdır.

En Yüksek (Hottest-spot) Sargı Sıcaklığı Artışı: En yüksek (hottest-spot) sargı sıcaklığı ile ortam sıcaklığı arasındaki aritmetik farktır.

Prototip Trafo: Mühendislik verilerini elde etmek, üretim veya tasarımın uygunluğunu belirlemek amacıyla üretilen trafodur.

Sıcaklık Artışı: Üretilen parçanın sıcaklığı (genellikle ortalama sargı sıcaklığı veya en yüksek sargı sıcaklığı) ile ortam sıcaklığı arasındaki farktır.

Ortam Sıcaklığı: Deneyin yapıldığı hava ortamının sıcaklığıdır [7].

3. SICAKLIK ÖLÇÜMLERİ (TEMPERATURE MEASUREMENTS)

Trafo ısınma testinde kullanılabilecek sıcaklık ölçüm elemanları şunlardır:

- a) Optik sıcaklık sensörleri
- b) Termokupullar
- c) Direnç köprüleri
- d) Direnç sıcaklık dedektörleri
- e) Kızılötesi sıcaklık dedektörleri
- f) Sıcaklık etiketleri

Kuru tip trafolarında en yüksek sıcaklık değerini doğru belirlemek için ortalama sıcaklık artışının doğru ölçülmesi gerekir. Kullanılan yöntem, tekrarlanabilir ve en yüksek sıcaklığın ölçümünü doğru bir biçimde yapabilir olmalıdır. Bir ölçüm yöntemi, birçok farklı tipte sıcaklık okuma elemanın kullanımını gerektirebilir. En yüksek sıcaklığın doğru olarak ölçülebilmesi için en sıcak yerin konumunun bilinmesine gerek vardır. En sıcak bölge konumunun belirlenmesinde tercih edilen genel yöntem sıcaklık sensörlerinin sargı içlerine yerleştirilmesidir. Soğutma kanallarının erişilebilir olduğu ve tamamıyla sargılar etrafına yayıldığı bazı trafo tasarımlarında en sıcak bölge konumu yüzey sıcaklık ölçümleri ile de belirlenebilir. En sıcak bölge konumunun belirlenmesinde, bir sargının yüzeyi boyunca yeterli ölçüm noktasının bulunduğu bir sıcaklık ölçüm yönteminden yararlanılmalıdır. Basit bir yöntem olarak üstten alta eşit aralıklarla her bir sargı için soğutma kanallarının içine yerleştirilmiş terslemesiz sıcaklık gösteren etiketler kullanılabilir. Termokupullar, fiber optik probalar veya diğer bazı sıcaklık gösteren devreler benzer mantıkla kullanılabilir. Bu yöntem, farklı geometri ve elektriksel oranlardaki trafolar için kullanılabilir [7].

Aşağıda seçilmiş bazı sıcaklık ölçüm aygıtlarının kısa bir değerlendirmesi verilmiştir.

- Optik Sıcaklık Sensörleri

Fiber optik dönüştürücülerin çalışma ilkesi fiber optik içine gömülmüş küçük bir kristalin farklı sıcaklıklardaki ışığın farklı bir dalga boyunda yayılması esasına dayanır. Sargı yüzeyine doğru monte edilmesi çok önemlidir. Günümüz teknolojisinde optik sıcaklık sensörleri pahalı olmasına rağmen maliyetler düşmektedir. Probalar ve kablolar (kılavuzlar) kırılmalıdır ve

endüstriyel bir laboratuvar ortamında kullanılmalıdır. Ölçümler otomatikleştirilebilir. Yüksek gerilime karşı yalıtkanlık özelliği gösterir.

-Termokupullar

Termokupullar otomatik test sistemine bağlanabilirler. Güvenilir, dayanıklı ve düşük maliyetlidirler. Manyetik alanlardan ve gerilimden etkilenebilirler ve bunun göz önüne alınması gerekir. Doğru ölçüm için sargı yüzeyine iyi temas etmelidir.

- Direnç Sıcaklık Detektörleri (RTD)

RTD' ler termokupullar ile aynı şekilde uygulanır. RTD' ler ölçümleri etkileyebilecek büyük yüzey alanına sahip olabilirler. Bu yüzden küçük yüzeyli RTD' ler kullanılmalıdır.

-Kızılötesi Sıcaklık Dedektörleri

Kızılötesi sıcaklık dedektörleri temassız bir ölçüm yöntemini kullanırlar. Otomatik ölçüme uygun olup hızlı cevap verme süresine sahiptirler. Fiyat açısından pahalıdır. Standart hava mesafesinin korunması gerekmektedir. Boyutları büyüktür. Ölçüm aralıkları sınırlıdır ve doğru ölçüm için kalibre edilmelidir.

- Sıcaklık Etiketleri

Sıcaklık etiketleri tipik olarak sekiz farklı seviyeli sıcaklık basamak dizileri şeklindedir. Beş etiket oranı 40°C ' den 300°C ' ye kadar kapsayacak şekilde kullanılmak zorundadır. Bu etiketler kalıcı göstergeli, düşük maliyetli ve dayanıklıdır. En iyi çözünürlük 4°C civarındadır. Doğruluk için yüzeye teması kritik öneme sahiptir ve pürüzlü sargı yüzeyi bunu zorlaştırmaktadır. Örneğin, ölü bir hava aralığı düşük okuma olasılığı oluşturur. Yapıştırıcılar, yatay yüzeyler üzerinde üreticiler tarafından kalibre edilir. Trafo üzerinde sıcaklık ölçümü dikey olarak yapılır. Bu etiketlerin kullanımında kalıcı olmayan ve süreksiz sıcaklık kaydı oluşabilir. Ölçüm sistemi veri toplama için otomatikleştirilemez [7].

Sıcaklık ölçümü için kullanılan ölçüm elemanları, sadece elemanların yerleştirildiği konumlarda ölçüm yapma yeteneğine sahiptir. Doğru sıcaklık ölçümü yapılabilmesi için yeterli sayıda elemanın doğru konumlara yerleştirilmesi gerekir. Yüzey sıcaklığı, bobin yüzeyine yakın yerleştirilen sensörler ile ölçülebilir. Bu tür elemanlar iyi bir temas için, uygun bir yapıştırıcı madde ile yapıştırılmalıdır. En yüksek sargı sıcaklık değeri ile bobin yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı bir termal model kullanılarak hesaplanabilir veya ölçüm ile belirlenebilir.

Ortalama sargı sıcaklık artışı, tüm yüzey sıcaklık artışlarının ortalaması alınarak (dış düzeltme katsayısının iç düzeltme katsayısına oranı ile) belirlenebilir. Bu, yüzey sıcaklığı ölçüm yöntemini doğrulamanın bir başka yoludur [7].

4. SARGININ SICAK BÖLGE SICAKLIĞININ BELİRLENMESİ (HOTTEST-SPOT TEMPERATURE DETERMINATION)

Prototip trafolarında en yüksek sargı sıcaklık artışını belirlemek için doğrudan yükleme test yöntemi tercih edilmelidir. Bu yöntem çok sayıda test donanımına ihtiyaç duymakta olup trafo boyutları arttıkça uygulanması zor olan bir yöntemdir. Kısa devre test yöntemi, en yüksek sargı sıcaklık artışının belirlenmesinde kullanılır. Bu yöntem doğrudan yükleme test yöntemiyle karşılaştırıldığında çok da farklı olmayan sonuçlar verir. Ancak prototip tasarımlardaki en yüksek sargı sıcaklık artışlarını kanıtlayabilmesi için üreticilerin araçlar olmadan doğrudan yükleme testlerine izin vermesi gerekir [7].

Aşağıda, bahsedilen her iki yöntem adımlar halinde kısaca açıklanmıştır.

4.1. Kısa Devre Yöntemi (Short-Circuit Method)

- a) En yüksek sargı sıcaklığını ölçmek için bir prototip trafonun sargı içlerine termokupullar veya fiberoptik probalar gibi doğrudan okunmalı sıcaklık sensörlerinden

yeterli sayıda (trafo boyutlarıyla orantılı olarak yaklaşık 25-300 arası sensör) yerleştirilir. Sıcaklık sensörleri, ölçme hatalarını azaltmak için küçük boyutlu olmalıdır. Sensör çapının 0.13 mm ile 0.25 mm arasında olması önerilmektedir. Sensörlerin yerleri, bobin geometrisi boyunca beklenen yüksek sargı sıcaklık konumunda olmalıdır. Sıcaklık sensörlerinin yeri bobin çevresi boyunca olmalıdır. Sıcaklık sensörlerinin, bir matematiksel model geliştirmek ve dikey sıcaklık dağılımının elde edilmesi amacıyla sargıların altından üstüne doğru yerleştirilmesi önerilmektedir.

- Ortamın ve kararlı sargı sıcaklıklarının izlenmesinde IEEE Std C57.12.91™ sıcaklık artış bölümüne bakılmalıdır. Trafonun düşük gerilimli sargısı kısa devre edilerek sıcaklık artışı sabitlenene kadar anma akımı uygulanır. Sıcaklıklar kaydedilir.
- Kısa devre kaldırılır ve sıcaklık artışı sabitlenene kadar sadece uyarım gerilimi uygulanır. Sıcaklıklar kaydedilir.
- Anma koşulları için en yüksek sargı sıcaklık artışlarının değerleri, IEEE Std C57.134 standardına göre Eş. 1 ve Eş. 2 ile değerler yakınsayana kadar iteratif hesaplamalar yapılır.

$$\theta_{CN} = \theta_C \left[\frac{\theta_{HS} + T_A + T_K}{\theta_C + T_{AT} + T_K} \right]^N \quad (1)$$

$$\theta_{HS} = \theta_{CN} \left[1 + \left(\frac{\theta_E}{\theta_{CN}} \right)^{\frac{1}{N}} \right]^N \quad (2)$$

Burada

- θ_C : Kısa devre testinde ortam sıcaklığı üzerindeki en yüksek sargı sıcaklık artışı
 θ_{CN} : Kısa devre testinde ortam sıcaklığı üzerindeki düzeltilmiş en yüksek sargı sıcaklığı
 θ_E : Boşta çalışma testinde ortam sıcaklığı üzerindeki en yüksek sargı sıcaklık artışı
 θ_{HS} : Anma koşulları için ortam sıcaklığı üzerindeki en yüksek sargı sıcaklık artışı
 T_A : Anma ortam sıcaklığı, genellikle 30 °C
 T_{AT} : Kısa devre testi sırasındaki ortam sıcaklığı
 T_K : Bakır için 234.5 °C, alüminyum için 225 °C
 N : Doğal soğutmalılar için 0.8, zorlamalı soğutmalılar için 0.9 [7].

IEC 60076-11 standardına göre de aynı test adımları sonunda yapılan direnç ölçümleri kullanılarak bulunan ortalama sargı sıcaklık artışları ile toplam sargı sıcaklık artışı Eş. 3 ile bulunur.

$$\Delta\theta'_c = \theta_c \left[1 + \left(\frac{\theta_e}{\theta_c} \right)^{1/K1} \right]^{K1} \quad (3)$$

- $\Delta\theta'_c$: Toplam sargı sıcaklık artışı
 $\Delta\theta_c$: Kısa devre testindeki sargı sıcaklık artışı
 $\Delta\theta_e$: Açık devre testindeki sargı sıcaklık artışı
 $K1$: Doğal hava soğutmalı için 0,8 ve zorlamalı hava soğutma için 0,9 [3].

4.2. Doğrudan Yükleme Yöntemi (Direct Loading Method)

- Sıcaklık sensörleri prototip trafonun içine yerleştirilir.
- Anma frekansı ve anma uyarım gerilimi uygulanır. Sıcaklık sabit kalana kadar anma akımı akıtılır.
- Sıcaklıklar kaydedilerek sistem kapatılır [8].

5. DİRENÇ ÖLÇÜMLERİ (RESISTANCE MEASUREMENTS)

Direnç ölçümü, trafo sargılarının ortalama sıcaklık artışlarının bulunması için yapılan ölçümlerden biridir. Genel olarak her bir sargı için soğuk ve sıcak sargı direnci olmak üzere iki durumda ölçülür. Trafonun soğuk sargı dirençlerinin ölçümünde şunlara dikkat edilmelidir; Trafo içinden ve dışındaki muhafazadan yapılan sıcaklık ölçümleri ile çevre sıcaklıkları arasındaki fark 2 °C' yi aşmamalıdır. Son 3 saat boyunca çevre sıcaklığındaki değişim ise 3 °C' yi aşmamalıdır. Direnç ölçümü yapılacak trafonun boyutuna bağlı olarak son 24 saat ile 72 saat boyunca herhangi bir gerilim veya akım uygulanmamış olması gerekmektedir. Bu şartlar sağlandıktan sonra sargıların soğuk dirençleri voltmetre ampermetre yöntemi veya köprü yöntemi kullanılarak ölçülür ve kaydedilir [8]. Sıcak sargı direnci ölçümünde çevre sıcaklığının üzerindeki trafo yüzey sıcaklığının son 3 saat boyunca 2 °C' lik bir aralıkta sabit kalmasına dikkat edilir. Sıcaklık artışının sabit kaldığı anlaşıldıktan sonra trafo üzerindeki gerilimler ve akımlar kesilerek ölçüme başlanır. İlk sargıdaki direnç ölçümleri 6 dakika içinde tamamlanmalıdır. Ölçümlerin değerleri ve ölçüm anları kaydedilmelidir. Ölçümler tamamlandıktan sonra bir eğri uydurma yöntemi kullanılarak enerjinin kesildiği andaki direnç değerleri hesaplanarak bulunur. En sıcak durumdaki ortalama sargı sıcaklık artışı, sıcak ve soğuk durum dirençleri kullanılarak Eş. 4 ile bulunur.

$$T = \frac{R}{R_0} (T_K + T_0) - T_K \quad (4)$$

Burada,

T: Sıcak durumdaki ortalama sargı sıcaklığı

T₀: Soğuk durumdaki sargı sıcaklığı

T_K: Bakır için 234,5 °C ve alüminyum için 225 °C

R: Sıcak durum için hesaplanan sargı direnci

R₀: Soğuk durumda ölçülen sargı direnci [8-9].

değerlerini göstermektedir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL WORKS)

Laboratuvar ortamında elektriksel bağlantıları Şek.1' de gösterildiği gibi yapılan 5 kVA 380/220 V tek fazlı kuru tip bir trafo ile deney düzeneği hazırlanmıştır. Akım, gerilim ve güç gibi elektriksel büyüklüklerin ölçümü ve kayıt işlemleri için bir adet Hioki 3198 Enerji Analizörü kullanılmıştır. Testler sırasında trafonun beslemesi için kısa devre testinde varyak ve yükleme testinde de şebeke gerilimi kullanılmıştır. Ayrıca yükleme deneyinde trafoya omik yük (rezistans) bağlanmıştır. Deney çalışmasında kullanılan prototip trafoya ait anma değerleri Tablo 2' de verilmektedir.

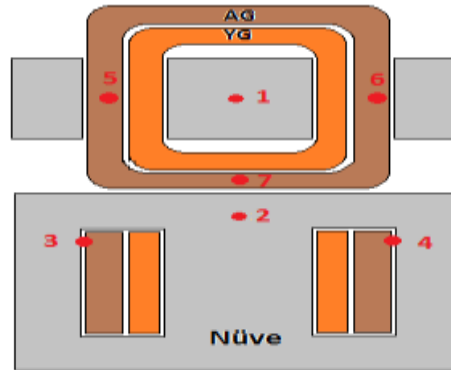


Şekil 1. Deney donanımları ve ölçüm sisteminin bağlantısı
(Experimental assembly and measurement system)

Tablo 2. Prototip trafonun anma değerleri
(Nominal rates of prototype transformer)

Bölüm		Özellik
Kayıplar	Boşta	110W
	Yükte	111W
	Toplam	221W
Anma Gerilimi		380/220V
Anma Kapasitesi		Tek Fazlı, 5kVA,50Hz
Yalıtım Sınıfı		Class F
En Yüksek Çalışma Sıcaklığı		155°C
Sıcaklık Artışı		115°C
Soğutma Yöntemi		Hava Soğutmalı
Tasarım		EN-61558-2-2
Sargı Pozisyonu		AG: Dış Sarım YG: İç Sarım

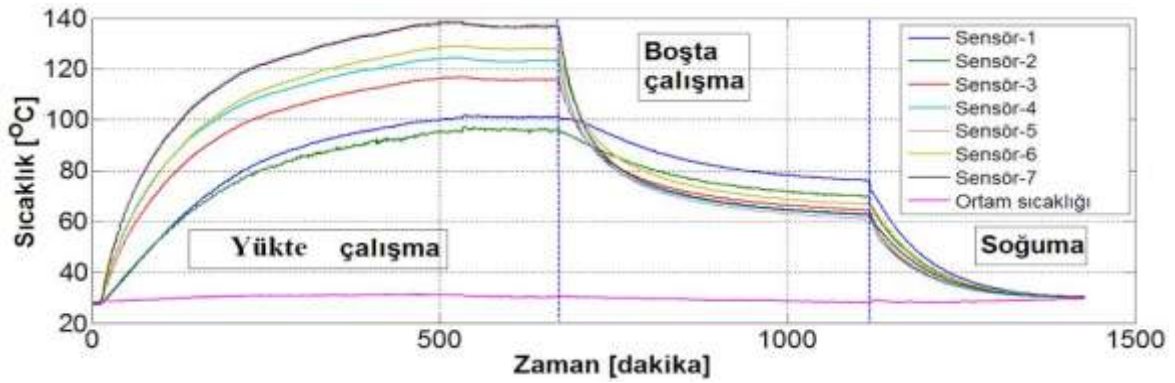
Trafo üzerinde Şek.2' de konumları gösterildiği gibi çekirdek ve sargılar üzerine yerleştirilmiş toplam 7 adet termokupul ile sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Ayrıca çevre sıcaklığı ölçümü için trafonun 3 tarafına 1'er metre mesafeyle 3 adet termokupul yerleştirilerek ortam sıcaklığı ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümü ve kayıt işlemleri Hioki LR8431-20 Datalogger ile yapılmıştır. Ortam sıcaklığı için 3 termokupuldan gelen değerlerin ortalaması alınmıştır.



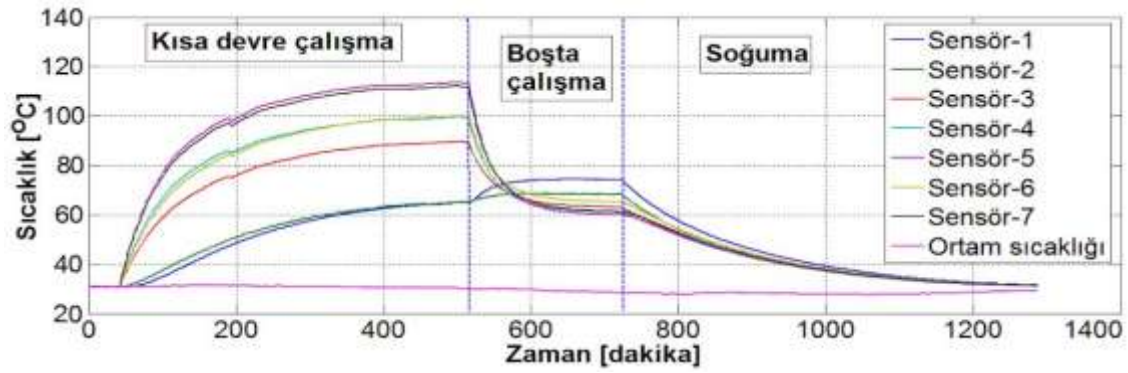
Şekil 2. Sıcaklık sensörlerinin yerleşimi
(The locations of temperature sensors)

Doğrudan yükleme testine başlamadan önce sargıların soğuk dirençleri ölçülmüş ve çevre sıcaklığı kaydedilmiştir. Doğrudan yükleme testi üç aşamada yapılmıştır. İlk aşamada anma gerilimi ve anma akımında yükleme yapılarak sıcaklık değişimleri kararlı hale gelene kadar beklenmiştir. Bu aşamanın sonunda besleme kesilerek hızlı bir şekilde sargı dirençleri ölçülerek kaydedilmiştir. İkinci aşamada, yani boşta çalışma deneyinde, trafoya sadece anma gerilimi uygulanarak sıcaklıkların tekrar kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Bu aşamanın sonunda tekrar sargı dirençleri ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Son aşamada ise trafo uyartım gerilimi kesilerek soğuma evresine geçilmiştir. Bütün bu deney süresince termokupullardan ölçülen sıcaklık değerleri ölçüm anları ile beraber kaydedilmiştir. Bu değişimler Şek. 3' te verilmiştir.

Kısa devre testi IEEE C57.134-2011 standardına göre gerçekleştirilmiş olup deneye başlamadan önce, anma akımı kesildiğinde ve anma gerilimi kesildiğinde sargı dirençleri ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Bütün bu deney süresince termokupullardan ölçülen sıcaklık değerleri ölçüm anları ile beraber kaydedilmiştir. Bu değişimler Şek. 4' te verilmiştir.



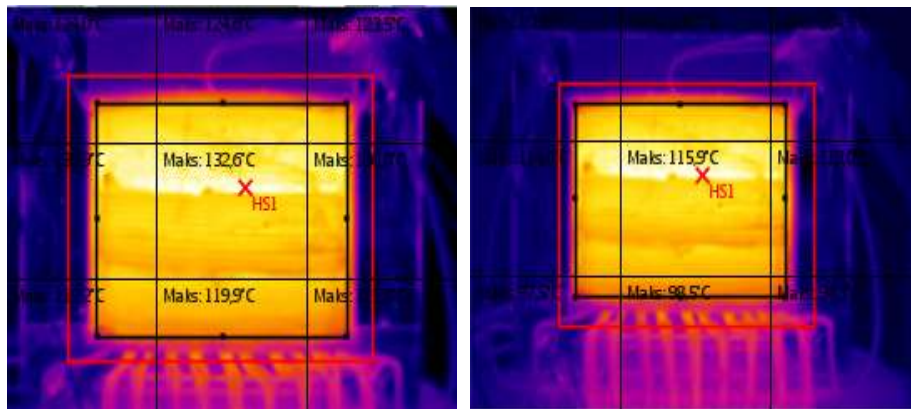
Şekil 3. Doğrudan yükleme testi boyunca elde edilen sıcaklık değişimleri
(Temperature variations during the direct-loading experiment)



Şekil 4. Kısa devre testi boyunca elde edilen sıcaklık değişimleri
(Temperature variations of the short-circuit experiment)

Doğrudan yükleme ve kısa devre testlerinde kararlı durumdayken akım kesilmeden hemen önce termal kamera ile trafo yüzeyinden alınan görüntüler Şek. 5' te verilmiştir.

Termal kamera ile doğrudan yükleme ve anma akımındaki kısa devre testlerinde yapılan ölçümlerden yazılım ile belirlenen sargı yüzeyi ortalama sıcaklığı sırasıyla 116,6 °C ve 101,7 °C'dir.



Şekil 5. Termal kamera görüntüleri
(Images obtained by thermal camera)

7. BULGULAR (FINDINGS)

Oluşturulan deney sistemi ile yapılmış olan kısa devre testinde ölçülen sıcaklık değerleri ile Eş. 1 ve Eş. 2 kullanılarak hesaplanmış sıcaklık değerleri Tablo 3' te verilmektedir. Kısa devre akımı kesilmeden önceki kararlı durumundaki sıcaklık değerlerinden o andaki ortalama çevre sıcaklık değeri çıkarılarak sargı sıcaklık artışı hesaplanmıştır. Daha sonra boşta çalışma deneyinde sıcaklıkların kararlı hale geldiği durumda ölçülen sıcaklık değerlerinden ortalama çevre sıcaklığı çıkarılmış ve sargı sıcaklık artışları hesaplanmıştır. Doğrudan yükleme testinin birinci aşaması sonunda ölçülen sıcaklık değerleri ortalama çevre sıcaklığından çıkarılarak sargı sıcaklık artışları hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 4' te verilmektedir.

Kısa devre ve boşta çalışma deneylerinden hesaplanan ortalama sargı sıcaklık artışları ile Eş. 1 ve Eş. 2 kullanılarak hesaplanan en yüksek sargı sıcaklık artışı değerleri bulunmuştur. Bulunan bu değerlerin anma yüküyle yapılan doğrudan yükleme testi sonunda elde edilen değerler ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 3. Kısa devre testinden elde edilen en yüksek sargı sıcaklıkları
(Maximum winding temperature that obtained by short-circuit experiment)

Kısa Devre Deneyi (Anma Akımı)		Boşta Deneyi (Anma Gerilimi)		Hesaplanan En Yüksek (Hot Spot) Sargı Sıcaklık Artışı (IEEE C57.134-2013)		
Çevre Sıcaklığı (T_C) 30,1°C	$\theta_C = T_S - T_C$	Çevre Sıcaklığı (T_C) 28,6 °C	$\theta_E = T_S - T_C$			
Termokupl Sıcaklıkları (T_S)	θ_C (°C)	Termokupl Sıcaklıkları (T_S)	θ_E (°C)	θ_{HS} (°C)		
CH1	65	34,9	CH1	74,2	45,6	*
CH2	66,6	36,5	CH2	68,6	40	*
CH3	89,6	59,5	CH3	63,1	34,5	86,13
CH4	99,4	69,3	CH4	61,1	32,5	93,87
CH5	113,5	83,4	CH5	60,1	31,5	106,86
CH6	100	69,9	CH6	65,3	36,7	98,30
CH7	112	81,9	CH7	61,4	32,8	106,55

* Nüvedeki sıcaklık değeri olduğu için hesaplama yapılmamıştır.

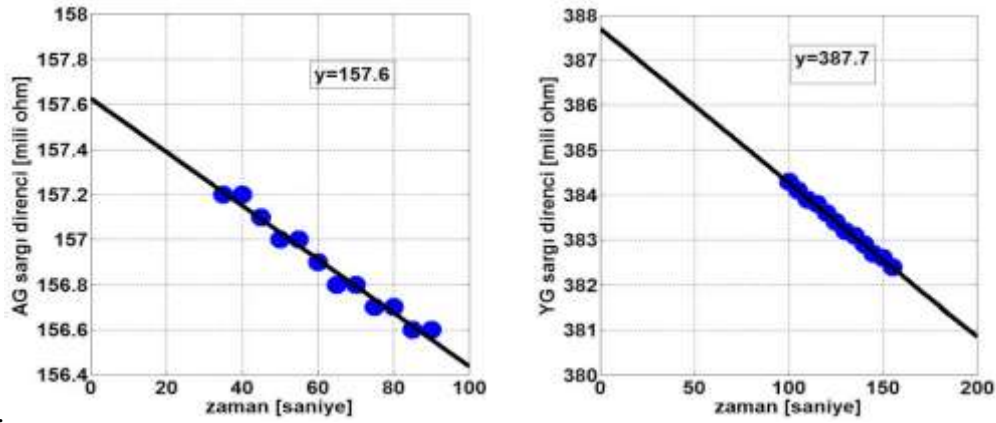
Tablo 4. Doğrudan yükleme testi ile elde edilen sargı sıcaklık artışları
(Winding temperature rise that obtained by direct-loading test)

Doğrudan Yükleme Deneyi (Anma Akımında)		
Çevre Sıcaklığı (T_C) 30,1°C	Sargı Sıcaklık Artışı $\Delta T = T_S - T_C$	
Termokupl Sıcaklıkları (T_S)	°C	
CH1	101,2	71,1
CH2	95,8	65,7
CH3	115,9	85,8
CH4	123,2	93,2
CH5	137,3	107,2
CH6	127,9	97,8
CH7	136,8	106,7

Doğrudan yükleme ve kısa devre testlerinin birinci ve ikinci aşaması sonunda yapılan direnç ölçümlerinin zamana göre değerleri Tablo 5 ve Tablo 6 da verilmiştir. Ölçülen değerler kullanılarak MATLAB yazılımı ile doğrusal ekstrapolasyon yapılmış ve sargının en sıcak durumlarındaki sargı dirençleri hesaplanmıştır. Ölçülen ve hesaplanan değerler Şek. 6 ve Şek. 7'de verilmiştir.

Tablo 5. Doğrudan yükleme testinde ölçülen sargı dirençleri
(Winding resistances that measured in the direct-loading test)

Ölçüm	Anma Yükünün Kesildiği Zaman				Anma Geriliminin Kesildiği Zaman			
	AG Sargı Dirençleri		YG Sargı Dirençleri		AG Sargı Dirençleri		YG Sargı Dirençleri	
	Süre(sn)	Direnç(mΩ)	Süre(sn)	Direnç(mΩ)	Süre(sn)	Direnç(mΩ)	Süre(sn)	Direnç(mΩ)
1	35	157,2	100	384,3	20	126,3	100	299,2
2	40	157,2	105	384,1	25	126,2	105	299,1
3	45	157,1	110	383,9	30	126,1	110	299,1
4	50	157,0	115	383,8	35	126,1	115	299,1
5	55	157,0	120	383,6	40	126,0	120	299,1
6	60	156,9	125	383,4	45	126,0	125	299,1
7	65	156,8	130	383,2	50	126,0	130	299,1
8	70	156,8	135	383,1	55	126,0	135	299,1
9	75	156,7	140	382,9	60	126,0	140	299,1
10	80	156,7	145	382,7	65	125,9	145	299,1
11	85	156,6	150	382,6	70	125,9	150	299,1
12	90	156,6	155	382,4	75	125,9	155	299,1



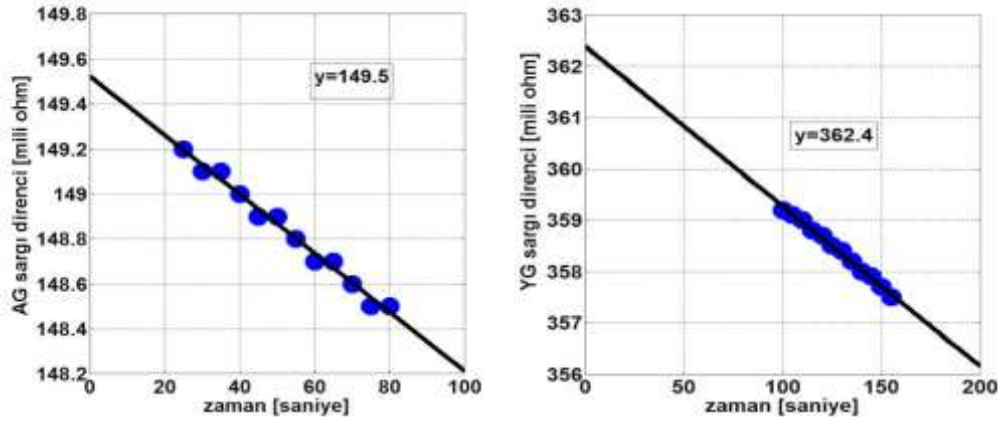
Şekil 6. Anma yüküyle yapılan doğrudan yükleme testinde yük akımı kesildiğinde elde edilen sargı direnç değerlerinin değişimi

(Variations of winding resistances that obtained after de-energized of transformer followed by nominal direct-loading test)

Doğrudan yükleme testinin ikinci aşamasının sonunda (anma gerilimi kesildiğinde) ölçülen direnç değerlerinden MATLAB yazılımı ile AG sargısı direnci 126,33 mΩ ve YG sargı direnci 299,21 mΩ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 6. Anma akımı ile kısa devre deneyinde ölçülen sargı dirençleri
(Winding resistances that measured in therated current and short-circuit tests)

Ölçüm	Anma Yükünün Kesildiği Zaman				Anma Geriliminin Kesildiği Zaman			
	AG Sargı Dirençleri		YG Sargı Dirençleri		AG Sargı Dirençleri		YG Sargı Dirençleri	
	Süre(sn)	Direnç(mΩ)	Süre(sn)	Direnç(mΩ)	Süre(sn)	Direnç(mΩ)	Süre(sn)	Direnç(mΩ)
1	25	149,2	100	359,2	25	123,5	100	297,7
2	30	149,1	105	359,1	30	123,4	105	297,7
3	35	149,1	110	359,0	35	123,4	110	297,7
4	40	149,0	115	358,8	40	123,4	115	297,7
5	45	148,9	120	358,7	45	123,4	120	297,7
6	50	148,9	125	358,5	50	123,4	125	297,7
7	55	148,8	130	358,4	55	123,4	130	297,7
8	60	148,7	135	358,2	60	123,4	135	297,7
9	65	148,7	140	358,0	65	123,4	140	297,7
10	70	148,6	145	357,9	70	123,4	145	297,7
11	75	148,5	150	357,7	75	123,3	150	297,7
12	80	148,5	155	357,5	80	123,3	155	297,7



Şekil 7. Kısa-devre deneyi sonrasında akım kesildiği andan itibaren direnç değerlerinin değişimi (Variations of winding resistances after cutting off current followed by short-circuit test)

Kısa devre testinin ikinci aşamasının sonunda (anma gerilimi kesildiğinde) ölçülen direnç değerlerinden MATLAB yazılımı ile AG sargısı direnci 123,52 mΩ ve YG sargı direnci 297,7 mΩ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 7. Doğrudan yükleme ve kısa devre testlerinden elde edilen ortalama sargı ısınmaları (Average winding temperature rises that obtained by direct-loading and short-circuit tests)

Referans Değerler	Direnç(mΩ)	AG Sargısı	YG Sargısı
		110,4	263,4
	Sıcaklık (°C)	26,4	
Anma Yükünde Akım Kesildiği Zaman	¹ Direnç(mΩ)	157,6	387,7
	² Ortalama Sargı Sıcaklığı (°C)	138,16	149,76
	Çevre Sıcaklığı (°C)	30,1	
	³ Ortalama Sargı Sıcaklık Artışı (°C)	107,66	119,26
Anma Yükünde Anma Gerilimi Kesildiği Zaman	¹ Direnç(mΩ)	126,33	299,21
	² Ortalama Sargı Sıcaklığı (°C)	64,12	61,94
	Çevre Sıcaklığı (°C)	28,1	
	³ Ortalama Sargı Sıcaklık Artışı (°C)	36,02	33,84
Kısa Devre Deneyinde Anma Akımı Kesildiği Zaman	¹ Direnç(mΩ)	149,5	362,4
	² Ortalama Sargı Sıcaklığı (°C)	118,98	124,65
	Çevre Sıcaklığı (°C)	30,1	
	³ Ortalama Sargı Sıcaklık Artışı (°C)	88,88	94,55
Kısa Devre Deneyinde Anma Gerilimi Kesildiği Zaman	¹ Direnç(mΩ)	123,52	297,7
	² Ortalama Sargı Sıcaklığı (°C)	57,46	60,44
	Çevre Sıcaklığı (°C)	28,6	
	³ Ortalama Sargı Sıcaklık Artışı (°C)	28,86	31,84

¹ Tablo 5 ve Tablo 6'daki değerlerin extrapolasyon ile $t=0$ anı için bulunan değerleridir.

² Referans sıcaklık ve direnç ile Eş.4'den elde edilen sıcaklıktır.

³ Ortalama sargı sıcaklığı ile çevre sıcaklığı arasındaki farktır.

Tablo 8. Kısa devre deneyindeki verilerden (Tablo 6) IEC formülü ile elde edilen toplam sargı sıcaklık artışı

(Total winding resistance rises that obtained by IEC equation from short-circuit test data)

	Açık Devre Testindeki Sargı Sıcaklık Artışı $\Delta\theta_c$ (°C)	Kısa Devre Testindeki Sargı Sıcaklık Artışı $\Delta\theta_c$ (°C)	Toplam Sargı Sıcaklık Artışı $\Delta\theta'_c$ (°C)
AG Sargı	28,86	88,88	105,91
YG Sargı	31,84	94,55	113,50

Tablo 7'deki AG ve YG sargılarına ait toplam sargı sıcaklık artış değerleri ile Tablo 8'deki anma yükü ile yükleme sonrasındaki ortalama sargı sıcaklık artış değerleri yaklaşık olarak birbirine benzerdir. Bu değerler Tablo 7'de sırasıyla AG sargısı için 107,66 °C, YG sargısı için de 119,26 °C olarak hesaplanmıştır. Böylece doğrudan yükleme deneyi ve kısa devre deneylerinden elde edilen ortalama sargı sıcaklık artışlarının benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca Tablo 8'deki ortalama sargı sıcaklık artışı değerlerine bakıldığında YG sargısı iç sarım olmasından dolayı daha fazla sıcaklık artışı meydana geldiği anlaşılmıştır.

Deney trafosunun AG sargısı dış sarım olduğundan termal kamera ile yapılan ölçümlerde AG sargısına ait sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Bu değerler Tablo 8'de sırasıyla doğrudan yükleme ve kısa devre testleri için verilmiştir.

Tablo 9. Termal kamera ile yapılan ölçüm sonuçları
(Measurement results of thermal camera)

	Yükleme Testi	Kısa Devre Testi
Sargı Yüzeyi En Yüksek Sıcaklık (°C)	132,6	115,9
Sargı Yüzeyi Ortalama Sıcaklığı (°C)	116,6	101,7
Çevre Sıcaklığı (°C)	30,1	30,1
Sargı Yüzeyi En Yüksek Sıcaklık Artışı (°C)	102,5	85,8
Sargı Yüzeyi Ortalama Sıcaklık Artışı (°C)	86,5	71,6

8. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Kısa devre testinde ölçülen değerlerden hesaplanan en yüksek sargı sıcaklık artışı değeri (106,86 °C) ile doğrudan yükleme testinde ölçülen değerlerden elde edilen sargı sıcaklık artışı değerleri (107,2 °C) birbirini doğrulamaktadır. Dolayısıyla kısa devre testi ile doğrudan yükleme testleri yaklaşık olarak aynı sonuçları verdiklerinden yapılması daha kolay olan ve daha az maliyetli kısa devre testi tercih edilmektedir. Testler sonundaki direnç ölçümleri ile elde edilen AG sargısının ortalama sargı sıcaklık artışının (107,66 °C) sıcaklık sensöründen elde edilen en yüksek sargı sıcaklık artışına (107,2°C) ve IEC formülü ile hesaplanan toplam sargı sıcaklık artışı değerlerine (105,91 °C) yaklaşık olarak eşit olduğu görülmektedir. Bu da seçilen sensör bölgesinde ki ortalama ve en yüksek sargı sıcaklık artışı değerlerinin birbirine çok yakın olduğunu göstermektedir. IEC formülü ile elde edilen YG sargısının toplam sargı sıcaklık artışının değeri (113,50 °C) ile hesaplanan ortalama sargı sıcaklık artışı değeri (119,26 °C) arasında %5 fark olduğu göstermektedir. Doğrudan yükleme testinde AG sargısına ait direnç yöntemi ile hesaplanan ortalama sargı sıcaklık artış değeri (107,66 °C) ile termal kamerayla ölçülen yüzey ortalama sargı sıcaklık artış değerleri (86,5 °C) arasında %19,6 fark vardır. Aynı şekilde kısa devre deneyinde direnç yöntemi ile hesaplanan ortalama sargı sıcaklık artış değeri (88,88 °C) ile termal kamerayla ölçülen yüzey ortalama sargı sıcaklık artışı değerleri (71,6 °C) arasında %19,4 fark vardır. Bu veriler bize termal kamera ile yapılan ölçümlerde dış sargıya ait ortalama ve en yüksek sargı sıcaklık artışlarında yaklaşık %20 oranında farklı değer ölçüldüğünü göstermektedir. Doğrudan yükleme testinde sıcaklık sensöründen ölçülen en sıcak noktaya ait sıcaklık artışı değeri (107,2 °C) ile termal kameradan ölçülen yüzeydeki en sıcak noktaya ait sıcaklık artış değeri (102,5 °C) arasında %4,4 fark bulunmaktadır. Bu da bize dış yüzeyde bulunan AG sargısının en sıcak nokta sıcaklık artışı açısından yaklaşık olarak aynı bilgiyi verdiğini göstermektedir.

9. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Amasya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi FMB-BAP-14-078 nolu “Transformatör Sargı Sıcaklığı Tahmini İçin Yeni Bir Yöntem Geliştirilmesi” ve FMB-BAP-15-0138 nolu “Transformatörlerde Isınma Testlerinin Optimizasyonu” projeleri kapsamında desteklenmiştir.

10. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kömürgöz, G., and Güzelbeyoğlu, N., (2002). Kendi Kendine Soğuyan Kuru Tip Güç Transformatörlerinde Sıcaklık Dağılımının Belirlenmesi. *İTÜ Mühendislik Dergisi*, 1(1).
- [2] Haliloğlu, A. B., Mamizadeh, A., and İskender İ., (2011). Yük Harmoniklerinin Yağlı Tip Güç Transformatörlerindeki Sıcak Nokta Sıcaklığına Dinamik Termal Model Üzerindeki Etkisi. *II. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi*.
- [3] IEC 60076-11-2004, International Standard, Power Transformers, Dry-Type Transformer.
- [4] IEEE C57.01.2015: IEEE Standard for General Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers
- [5] Mamizadeh, A., İskender, I. (2010). Winding Thermal Analyzing Of Dry Type Transformers. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 2(4), 80-84.
- [6] Odaoğlu, H., (2012). Transformatör ve Şönt Reaktör Deneyleri, Elektrik Mühendisleri Odası Yayınları, ISBN:978-605-01-0465-3.
- [7] IEEE C57.134-2013: IEEE Guide for Determination Of Hottest-Spot Temperature in Dry-Type Transformers
- [8] IEEE C57.12.91-2011: IEEE Standart Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers
- [9] Kweon D. J., Koo K. S., Woo J.W., Kwak J. S. (2012). A Study on the Hot Spot Temperature in 154kV Power Transformers. *Journal of Electrical Engineering&Technology*, 7(3), 312-319.
- [10] IEC 60076-12 -2008: Loading Guide For Dry-Type Power Transformers.