

# Kendi kendine soğuyan kuru tip güç transformatörlerinde sıcaklık dağılımının belirlenmesi

Güven KÖMÜRĞÖZ\*, Nurdan GÜZELBEYOĞLU

İTÜ Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 80626, Maslak, İstanbul

## Özet

Yüksek gerilim sargısı yüksekliği  $537,6 \cdot 10^3$  m olan, 13 bobinden meydana gelmiş, dilimli, silindirik sargılı kendi kendine soğuyan kuru tip bir güç transformatöründe Ansys sonlu elemanlar programı ile sıcaklık dağılımı çıkarılmıştır. Alt, üst gerilim sargıları ve çekirdek ayrı alınarak sargılar ve çekirdek arasındaki yağ kanalının soğutma etkisi de dikkate alınmıştır. Akışkan özelliklerinin sıcaklıkla değişmesinden dolayı akışkan ve sıcaklık beraber çözülmüştür. Sargılar ve çekirdeğin sıcaklık dağılımlarının yanında bu parçaların etrafında bulunan havanın hareketi ve sıcaklığı da bulunmuştur. En çok ısınan noktanın yeri ve büyüklüğü belirlenmiştir. Yüksek gerilim sargı yüksekliği boyunca sıcaklık dağılım eğrisi çıkartılmıştır. Sıcaklık dağılım eğrisi deneysel çalışmayla elde edilen eğriyle karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Transformatör, sargı, sıcak nokta sıcaklığı, sıcaklık dağılımı, hız dağılımı.

## Determining of the temperature distribution of self-cooled dry-type power transformer

### Abstract

In order to find the location and the temperature level of hot spots, the temperature distribution of the transformer must be determined. The life of the transformer, the duration in which the transformer is safely overloaded and the loading capability of the transformer can be increased greatly if the temperature of the hot spot is known. Therefore, it's crucial to determine the hot spot temperature along the windings. In this study, the temperature distribution of a dry-type power transformer with thirteen coils was determined using the ANSYS based on finite elements method. Each winding was cylindrical and disc-type. The upper voltage winding that was  $537,6 \cdot 10^3$  m height and the core were taken into account separately. The solution was determined by taking into account the change of fluid properties with temperature. As well as the temperature distribution of the windings and the core, the temperature distribution and the movement of the surrounding air was also determined. The temperature level and the location of the hot spot were determined. The temperature distribution curve was determined along the height of the high voltage winding. The temperature distribution curve was compared with the experimental results. The results obtained are in good enough agreement with experimental results

**Keywords:** Transformer, winding, hot spot temperature, temperature distribution, flow distribution.

---

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Güven KÖMÜRĞÖZ. guven@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 67 72

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Elektrik Elektronik Fakültesi'nde tamamlanmış "Kendi kendine soğuyan kuru tip güç transformatörlerinde sargı ısınma hesabına katkılar" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 29.05.2002 tarihinde dergiye ulaşmış, 10.07.2002 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.12.2002 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Giriş

Elektrik üretiminin çeşitli aşamalarında elektrik akım ve gerilim dönüştürücüsü olarak transformatörler kullanılmaktadır. Transformatör, güç dağıtım zinciri içerisinde büyük maliyeti ve yatırımı açısından en önemli elemandır. Verim-leri çok yüksek olan transformatörlerde çekirdek ve sargılarda oluşan kayıplar önemli ısı artışlarına neden olur. Bir kaç vatlık transformatör-lerden en büyük güç transformatörlerine kadar işletme sırasında karşılaşılan en büyük sorun ısınmadır.

Elektrik şebekelerinin en önemli elemanlarından olan transformatörlerde kayıpların oluşturdukları ısı, sargı yüksekliği boyunca oluşur. Isınmanın kullanılan yalıtkan malzemesi üzerine etkisi, transformatörün ömrünü belirleyeceğinden, izolasyon malzemelerinin iyi seçilmesi gerekir. Bu nedenle çeşitli güçlerde ve soğutma düzenlerindeki transformatörler için belirlenmiş olan sınır ısınmayı sağlayan yalıtkan sınıfları çeşitli şartnamelerden saptanır (TS 10091, 1993). Ayrıca transformatör yüklenirken yine bu yalıtkan sınıfının dayanabileceği sınır sıcaklıklar gözö-nüne alınır. Ancak, standartlarda belirtilmiş olan bu sınır sıcaklıklar, transformatör anma gücünde çalışırken sargılardan küçük zaman aralıklarında doğru akım geçirilmesiyle yapılan ısınma dene-yi sonucunda bulunan ortalama sıcaklıklardır. Transformatör sargısının üst kısmında bulunan değeri deneysel olarak ölçülemeyen, bu ortalama değerin üzerinde daha büyük sıcaklıklar oluşmaktadır. Sargının üst tarafında bulunan ve ortalama sıcaklığın üzerinde olan bu noktaların değeri ve yerinin tesbiti için bir çok deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır (Lampe v. diğ., 1984; Soliman v. diğ., 1990; Pierce, 1994b). Yapılan çalışmalarda bazı varsayımlar yapılarak formüllerle sıcak nokta sıcaklığını belirlemek mümkün olabilmektedir. Ancak bu yaklaşımlar hala tartışma konusudur. Bugüne kadar uygun bir yöntem bulunamamıştır ve bu konudaki standartlar da açık ve yeterli değildir (Pierce, 1993, 1994c; Hwang v. diğ., 1988).

Transformatörün yükleme sınırını belirleyen sıcak nokta sıcaklığını doğrudan ölçümlerle

bulmak zordur. Sargının en sıcak yerinin sıcaklığının direkt olarak ölçülmesi için de birçok araştırmalar yapılmış olup, bu deneyler de yetersiz kalmıştır. Fluoroptik termometrelerle de yapılan bu ölçmelerde ise kararsızlıklar görülmüştür. Sargıya imalat sırasında yerleştirilen fiber optik sensörler kullanılarak doğrudan ölçüm yapılabilmesi için, optik sensörlerin doğru yerlere yerleştirilmesini sağlamak üzere bir mate-matikselsel modelden yararlanılabilir. Hesaplanı-lan sıcaklık dağılımına göre yerleştirilen optik sensörlerle yapılan testlerle en doğru sonuca ulaşılabilir.

Zaman zaman transformatörler aşırı yüklenmelere maruz kalabilir. Bu aşırı yüklenmeler, kısa süreli de olsa transformatör sargısının ortalama sıcaklıklarının üzerinde olan bu yüksek sıcaklık-ların daha da büyümesine neden olur. Isı da sargının yalıtkan malzemesinin zamansız yaşlan-masına neden olur. Bu yaşlanma sargının kısa devresine kadar giden arızalara yol açar. Bu nedenle transformatör sargılarının normal çalış-ma koşulları altında sargı ısınmasının sargı yüksekliği boyunca eşit olmamasından dolayı, en çok ısınan yerin sıcaklığının bilinmesi büyük önem taşır. Bu ısınmayı tespit etmek, ancak sargı yüksekliği boyunca detaylı ısıl analizi yapmakla mümkündür. Böylece transformatör sargısının en sıcak yeri tespit edilebilirse transformatörün aşırı yüklenme süreleri ve sınırları artırılabilir.

Yapılan tasarımlarda sıcaklık dağılımı tam olarak bilinirse işletim ve imalat masrafları en aza indirgenebilir. Isınmanın hangi kısımlarda daha fazla olduğunun ve değerlerinin bilinmesi için, sıcaklık dağılımının bilinmesine ihtiyaç vardır. Transformatör daha küçük boyutlarda, daha hafif olarak ve ekonomik tasarımlarla optimize edilebilir. Dolayısıyla sargı yüksekliği boyunca en çok ısınan noktanın saptanması çok önemlidir. Ayrıca, sıcaklık dağılımının bilinmesi, izleme ile hata tanısı koyma sistemlerine kriter oluşturmaktadır (Guardado v diğ., 2001). Bil-gisayar destekli tasarımın, hızla ilerlemesiyle birlikte, sayısal yöntemler

kullanılarak güç transformatörlerinde detaylı ısı dağılımı büyük doğrulukla elde edilebilir.

Bu çalışmada, yapılacak olan sıcaklık analiz sonuçlarının deneysel çalışmayla karşılaştırılabilmesi için, yüksekliği  $537,6 \cdot 10^{-3}$  m olan, yüksek gerilim sargısı 13 bobinden meydana gelmiş, dilimli, silindirik sargılı, kendi kendine soğuyan kuru tip bir güç transformatöründe Ansys sonlu elemanlar programı kullanılarak alt ve üst gerilim sargısı ile çekirdekten oluşan transformatörün bir bacağına ilişkin sıcaklık dağılımı çıkarılmıştır. Transformatörün ısınmasına neden olan çekirdek, alt ve üst gerilim sargıları daha önceki çalışmaların aksine ayrı ayrı düşünülmüştür. Sıcaklık ve akışkan alanı aynı zamanda çözümlenerek daha doğru sonuçlar elde edilme-ye çalışılmıştır. Yüksek gerilim sargısının yüksekliği boyunca sıcaklık dağılım eğrisi çıkartılarak, en çok ısınan noktanın yeri ve büyüklüğü belirlenmiştir. sıcaklık dağılım eğrisi deneysel çalışmayla elde edilen eğriyle karşılaştırılmıştır.

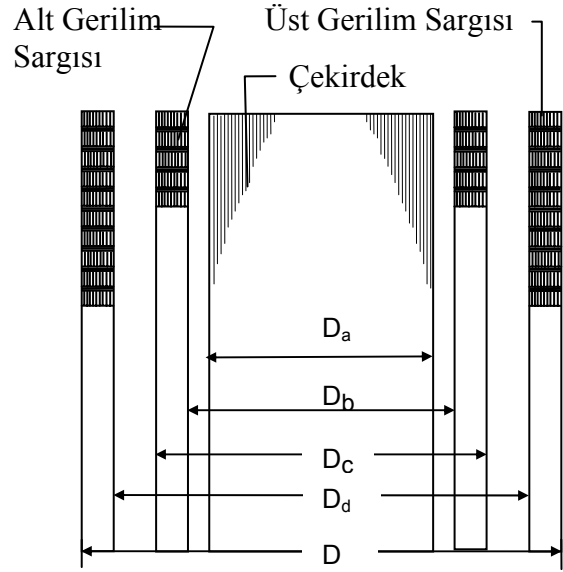
### Model

Yapılacak olan sıcaklık analiz sonuçlarının deneysel çalışmayla karşılaştırılabilmesi için, yüksekliği  $537,6 \cdot 10^{-3}$  m olan, yüksek gerilim sargısı 13 bobinden meydana gelmiş dilimli silindirik kendi kendine soğuyan kuru tip transformatör sargısı referans alınmıştır (Boduroğlu, 1962).

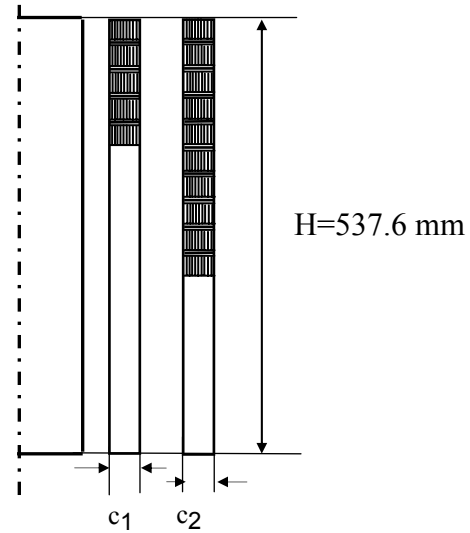
Şekil 1’de transformatörün bir bacağına ilişkin model ve boyutları, Şekil 2’de ise sargının yarım pencere açıklığında bir bacağına ilişkin boyutları gösterilmiştir. Şekil 1 ve Şekil 2’ye ait büyüklükler:

Çekirdek çapı:	$D_a=157$ mm
Alt Gerilim Sargısı İç Çapı:	$D_b=175$ mm
Alt Gerilim Sargısı Dış Çapı:	$D_c=207$ mm
Üst Gerilim Sargısı İç Çapı:	$D_d=271$ mm
Üst Gerilim Sargısı Dış Çapı:	$D=303$ mm
Sargı Yüksekliği:	$H=537,6$ mm
Alt ve Üst Gerilim Sargısı Genişliği:	$c_1=c_2=16$ mm dir.

Sargılar 13 bobinden oluşmaktadır. Bobinlerin ilk 4’ü 3’er, diğer 9 bobin 4’er dilimden



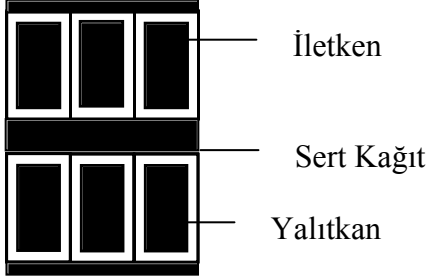
Şekil 1. Alt, üst gerilim sargısı ve çekirdeğe ilişkin boyutlar



Şekil 2. Yarım pencere açıklığında bir bacağına ilişkin boyutlar

meydana gelmiştir. Her dilim 10 sarımdan oluşmak üzere alt ve üst gerilim sargıları 480 sarımlıdır. Bobinleri teşkil eden iletkenler  $1 \times 8$  mm<sup>2</sup> kesitinde olmak üzere dikdörtgen şeklindedir. Bakır iletkenlerin üzeri 0.3 mm kalınlığında yağ emdirilmiş kağıt yalıtkanla kaplıdır. Bobinler ve dilimler arasında aksenal yönde karşılıklı iletkenler arasında 3.2 mm’lik uzaklık vardır. Bunun  $2 \times 0.3$  mm’si iletken üzerindeki yağ emdirilmiş kağıt,  $2 \times 1.3$  mm’si ise sert kağıttır (Şekil 3).

Bilgisayar işlemcisi, ayrıntılı bir geometrik modellemeyi ve eleman sayısının artırılmasını dolayısıyla çözüm süresini sınırlandırır. Bu nedenle, modelin sonlu eleman analizinde alt geri-lim sargısı bütün, üst gerilim sargısı da



Şekil 3. Bobin kesiti

bobinlerden oluşmak üzere yine bütün olarak düşünül-müşür.

### Matematik model

Transformatörün sıcaklık dağılımının elde edilmesi için sargılar, çekirdek ve akışkan içerisinde-deki ısı dağılımını ve akışkan hız dağılımını yansıtan genel denklemler çözümlenmelidir. İki boyutta, sürekli halde korunum yasaları kullanılarak çıkarılan denklemler,

Süreklilik denklemi,

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi:

$$\rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) + X \quad (2)$$

$$\rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) + Y \quad (3)$$

Enerji denklemi:

$$\rho c_p (u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}) = k(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}) + q + \mu \Phi \quad (4)$$

denklemlerde,

- P = basınç (N/m<sup>2</sup>)  
 ρ = yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)  
 u, v = x, y yönünde hız bileşenleri (m/s)  
 X, Y = Ayrı ayrı x,y yönünde birim hacimdeki kütleli kuvvetler (N/m<sup>3</sup>)  
 μ = dinamik viskozite (kg/m s)  
 c<sub>p</sub> = özgül ısı (Ws/kgK)  
 k = ısı iletim katsayısı (W/mK)  
 q̇ = birim hacimde üretilen ısı (W/m<sup>3</sup>)  
 Φ = iç sürtünme kaybı (s<sup>-1</sup>)

olmak üzere

$$\Phi = 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \quad (5)$$

ifade edilir (Bejan, 1993). Katı bölge içerisinde hızın iki yönde bileşeni sıfır olurken, denklem 4'te tanımlanan ısı iletim katsayısı iki yön için ayrı ayrı düşünülmelidir.

Doğal taşınım problem çözümlerinde sıcaklık ve hız birbirine bağımlı olduğu için bütün temel denklemler aynı anda iteratif olarak çözülür (Kotake v. diğ., 1993). Denklemlerin çözümünden, akış alanının elde edilmesi, katı ve akışkan olmak üzere tüm sistemin sıcaklık alanının bulunması, yüzey ile akışkan arasındaki ısı transfer katsayısının belirlenmesi sağlanır.

### Sargılarda birim hacimde üretilen ısı

Sargılarda birim hacimde üretilen ısı,

$$\dot{q} = i^2 \cdot \rho \cdot \eta \cdot 10^6 \quad (6)$$

olarak belirlenir. İfadede,

- i = akım yoğunluğu (A/mm<sup>2</sup>)  
 ρ = iletkenin özgül direnci (Ω.mm<sup>2</sup>/m)  
 η = doldurma faktörü

olmak üzere, transformatör alt gerilim sargısı ve üst gerilim sargı bobinleri, izolasyon ve iletken beraber tüm olarak düşünüldüğü için doldurma faktörü denen bir faktör ile bu değer düzeltilir. Doldurma faktörü aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\eta = \frac{\text{Bobindeki toplam iletken kesiti}}{\text{Toplam bobin alanı}} \quad (7)$$

### Efektif ısı iletim katsayısı

Transformatör modeli geliştirilirken, transformatör boyutlarını sınırlandıran bilgisayar kapasitesi ve çözüm süresidir. Bu nedenle model oluşturulurken bazı basitleştirmeler ve parametrelerde sınırlamalar yapılmıştır. Çekirdek ve alt gerilim sargısı tüm olarak incelenirken üst gerilim sargısı bobinlerden oluşturulmuştur. Sargıların tüm düşünülmesinin yarattığı olumsuz etki hesaplara yansıtılmıştır. Sargı homojen bir yapı göstermediği için boyuna ve enine yönde efektif ısı iletim katsayısı sabit ısı akı modeli ve sabit sıcaklık modeli kullanılarak hesaplanmıştır (Soliman v. diğ., 1990; Crane v. diğ., 1977).

### Ansysis programı ile transformatörün sıcaklık dağılımının bulunması

Kendi kendine soğuyan kuru tip transformatörün, yukarıda tanımlanan model için sıcaklık dağılımı Sonlu Elemanlar yöntemine dayanan Ansys programıyla çıkarılmıştır. Bunun için aşağıdaki adımlar sırasıyla gerçekleştirilmiştir:

1. Eleman tipi olarak dörtgen eleman seçilmiş, eleman için aksel simetri özelliği tanımlanmıştır.
2. Transformatörün 13 bobinli geometrik modeli oluşturulmuştur. Transformatör bacağı yarı pencere açıklığında aksel simetri özelliği kullanılarak üç boyutlu problem yerine iki boyutlu olarak modellenmiştir. Bu durumda x yönü radyal yöne, y'de aksel yöne karşılık gelir.
3. Sargı iletkenleri bakırdan olmak üzere iletken üzeri yağ emdirilmiş kağıtla kaplanmıştır. Dilimler arasında sert kağıt bulunmaktadır. Çekirdek kağıtla yalıtılmış sac paketinden oluşmuştur. Transformatörün alt, üst sargısına ve çekirdeğine ilişkin değerler; yoğunluk ( $\rho$ ), viskozite ( $\nu$ ), ısı iletim katsayısı ( $k$ ) ve özgül ısı ( $c_p$ ) değerleri malzeme özellikleri olarak girilmiştir (Incropera v. diğ., 1996).
4. Alt gerilim sargısı bütün ve üst gerilim sargısı bobinlerden oluşmak üzere bütün modellendiği için sargılara ilişkin efektif ısı iletim katsayıları hesaplanmış, bu değer veri olarak girilmiştir.

Şekil 3'teki bobin kesiti ve bobini oluşturan iletken ve yalıtkan kısımların (bakır, yağ emdirilmiş kağıt, sert kağıt) ısı iletim katsayıları kullanılarak, boyuna ve enine yönde olmak üzere sargıların efektif ısı iletim katsayısı belirlenmiştir.

5. Sonlu elemanlar ağının yaratılmasında sıcaklık farkının büyüklüğü önemli bir etkidir. Sargı yüzeylerine yakın bölgelerde sıcaklık farkları büyüktür. Bu nedenle bu bölgelerde eleman sayısı daha fazla kullanılmıştır. Yapılan incelemede ortalama 22000 eleman kullanılmıştır.

6. Alt gerilim sargısının ve üst gerilim sargısı bobinlerinin tüm düşünülmesinden dolayı dikkate alınan doldurma faktörleri denklem (7)'den, sargılarda birim hacimde üretilen ısı denklem (6)'dan hesaplanıp, yük koşulu olarak

	Birim Hacimde Üretilen Isı $\dot{q}$ (W/m <sup>3</sup> )	Doldurma Faktörü ( $\eta$ )
Alt Gerilim Sargısı	23985.285	0.4464
Üst Gerilim Sargısı	70502.35676	0.4464
Çekirdek	12010.51	-

uygulanmıştır. Bölgelere ilişkin doldurma faktörleri ve birim hacimde üretilen ısılar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Transformatör sargılarında ve çekirdekte birim hacimde üretilen ısı ve doldurma faktörleri

7. Sıcaklık dağılımının elde edilmesinde kullanılan (1)-(5) denklemleri çözülürken sınır koşulları dikkate alınır. Transformatörün bir bacağı yarı pencere açıklığında modellenmiştir. Sol kenar simetri eksenini alınmıştır. Katı yüzeyler üzerinde akışkanın hareketsiz olduğu kabul edilerek hızın iki yönde bileşeni 0'dır. Transformatörün aktif kısmı 20 °C hava içerisinde bulunmaktadır.

8. Akışkan bölge hava olarak tanımlanarak havanın yoğunluğu, özgül ısı, viskozitesi veri olarak girilmiştir.

9. Sıcaklık ve akışkan alan dağılımı sürekli halde elde edilmiştir. Akış rejiminin laminer olduğu, akışkanın sıkıştırılmaz olduğu ve ısının doğal taşınımıyla iletildiği kabul edilmiş, yapılan tüm analizlerde matris çözümünde TDMA çözücü (Bant genişliği üç olan matris çözücü) kullanılmıştır. Radyasyonla ısı taşınımının etkisi küçük olduğundan ihmal edilmiştir.

10. Sıcaklık ve hız birbirine bağımlı olduğu için programda (1)-(5) denklemleri aynı anda ardışıl, iteratif olarak çözülür. Bunun için hız, sıcaklık ve basınç için hata değerleri, referans değerler ve kararlılık için global iterasyon sayısı belirlenir. Hata değeri verilen tolerans içerisinde değilse sonlu eleman ağı ve denklemlerin çözümüne ilişkin tanımlanan çözümler ve bu çözümlere ilişkin parametreler değiştirilerek çözüm tekrarlanır. Toleranslar sağlandıktan sonra iterasyon sayısı da sağlanıyorsa çözüm elde edilmiş olur. Aksi durumda aynı şekilde çözüm tekrar edilir.

Yukarıda tanımlanan koşullar altında örnek alınan kendi kendine soğuyan kuru tip transformatörün sıcaklık dağılımı çıkarılmıştır.

### Sonuçlar ve tartışma

Yukarıda tanımlanan adımlar sırasıyla uygulanarak, model alınan transformatörün bir bacağına ilişkin sıcaklık dağılımı Şekil 4'deki gibi bulunmuştur.

Şekilde belirtilen sıcaklıkların birimi Kelvin olup, 20 °C ortam sıcaklığında bulunan transformatör sargısının maksimum ortam üstü sıcaklık farkı, 50.865 °C olarak bulunmuştur. Bu değer hot spot olarak tanımlanan sıcak nokta sıcaklığıdır. Yani bu transformatör için sıcak nokta sıcaklığı 70.865 °C olarak belirlenmiştir.

Şekil 4'te de görüldüğü gibi sıcaklık yukarıya doğru artmaktadır. Sargının üst kısımlarındaki sıcaklık, sargının alt kısımlarına göre daha

yüksektir. Yüksek gerilim sargı yüzeyi boyunca bobinlerin orta kısımlarından alınan sıcaklık değerleri bir grafikte gösterilirse, sıcaklığın yüksek gerilim sargısı boyunca değişimi Şekil 5'teki gibi bulunur.

Şekil 5 incelendiğinde, sıcaklığın sargı boyunca artmakta olduğu ve sargının %74.4'lük kısımda en büyük değerine ulaştığı görülmektedir. Yapılan analiz sonucunda transformatörün yarı pencere açıklığında havanın hız dağılımı Şekil 6 daki gibi elde edilmiştir.

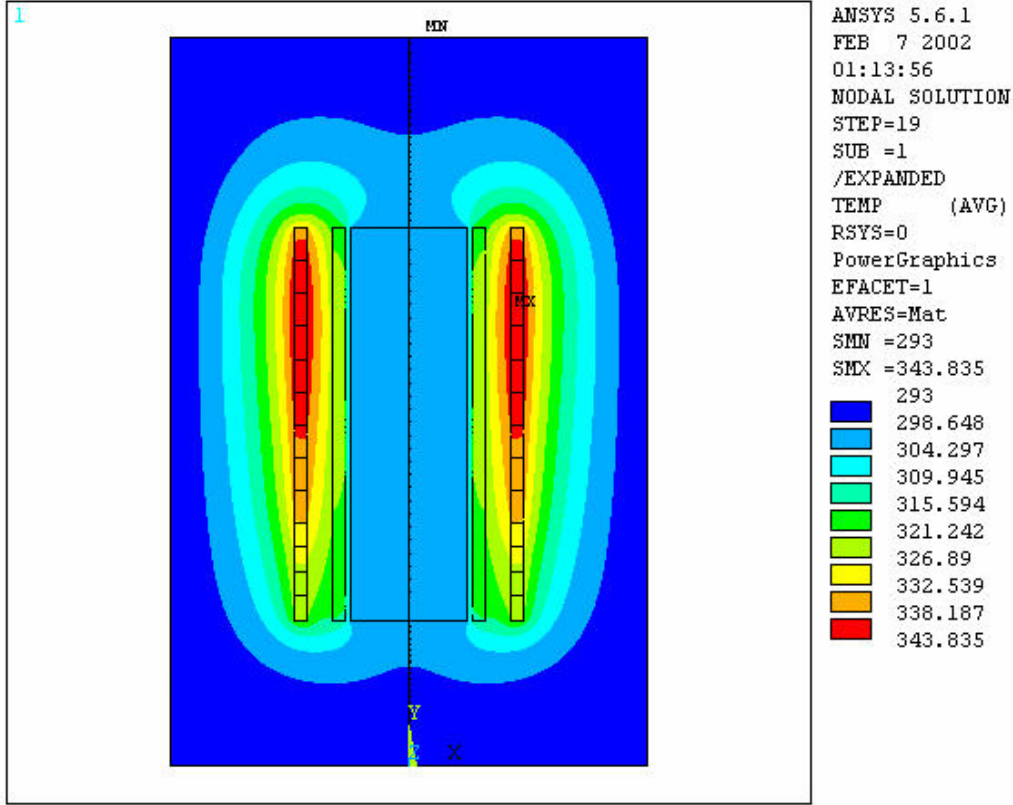
Şekilde görüldüğü gibi akışkan yukarı doğru çıkıp, kontrol hacminin altından dolaşıp tekrar aşağıya inerek, yağ kanalı ve üst gerilim sargısı yüzeyinden tekrar yukarı çıkmaktadır. Akışkan kapalı bir devre oluşturmaktadır. İki sargı arasında sıcaklık yüksek olduğundan ve kanal boru özelliği gösterdiğinden dolayı, akışkan hızı burada daha yüksektir. Sargının yaklaşık 2/3'ü civarında akış ipelikçikleri karışmaya başlamaktadır. Bu da akış rejiminin laminerden türbülansa girmeye başladığı nokta hakkında bir fikir vermektedir.

Klasik sargı için deneysel ve Ansys paket programı ile bulunan sıcaklıkların karşılaştırılması Şekil 7'de gösterilmiştir. Doğru geometrik modelleme ve geometrinin uygun elemanlara bölünmesiyle, sargı, çekirdek ve akışkanın ısı iletim katsayısı, özgül ısı ve yoğunluğu veri olarak girilerek; laminer akışta, akışkanın sıkıştırılmaz olması gözönüne alınarak transformatörlerde sargı yüksekliği boyunca, Ansys paket programı ile sıcaklık dağılımının çıkarılabileceği görülmektedir. Bu suretle sargının en çok ısınan yeri ve büyüklüğü hemen belirlenebilir. Hesaplamalar sonucunda bulunan sıcaklık dağılım eğrisi, deney sonucu bulunan eğriyle karşılaştırıldığında iyi bir yaklaşım saptanmıştır

### Sonuçlar

Bu çalışmada, kendi kendine soğuyan kuru tipte bir transformatörün sıcaklık dağılımının çıkarılması, sıcak nokta sıcaklığı olarak bilinen sargının en sıcak nokta sıcaklığının değeri ve yerinin belirlenmesi, böylece bu konuda uygulamaya

## Kuru tip güç transformatörlerinde sıcaklık dağılımı

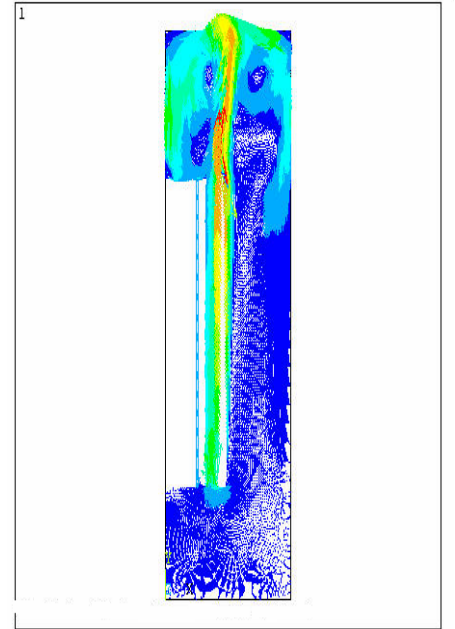


Şekil 4. Örnek alınan transformatör sargısının sıcaklık dağılımı

yönelik eksikliklere cevap verilmesi amaçlanmıştır.

Akışkan özelliklerinin sıcaklıkla değişmesinden ve akışkan alanı ile sıcaklıkla olan etkileşiminden dolayı akışkan ve sıcaklık beraber çözülmüştür. Sargılar ve çekirdeğin sıcaklık dağılımlarının yanında bu parçaların etrafında bulunan havanın hareketi ve sıcaklığı da bulunmuştur. Daha önceki çalışmaların aksine alt, üst gerilim sargıları ve çekirdek ayrı ayrı alınarak sargılar ve çekirdek arasındaki yağ kanalının soğutma etkisi de dikkate alınmıştır.

İşletmede, transformatörlerin aşırı yüklenmesinde, bu sıcaklığın bilinmesi transformatörün ömrü açısından büyük önem taşımaktadır. Böylece transformatörün aşırı yüklenme miktarı ve süresi belirlenebilir.



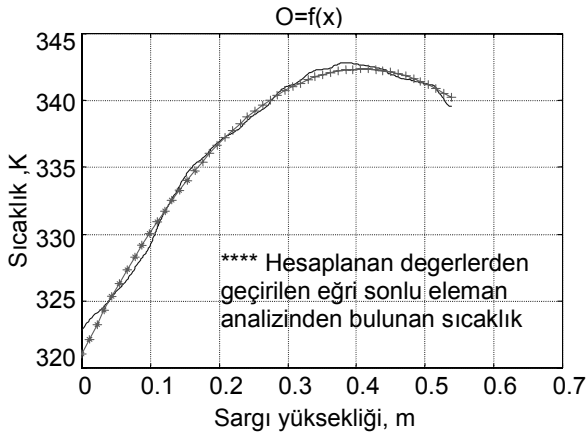
Şekil 6. Örnek model transformatörde havanın hız dağılımı

Yapılan çalışmaların çoğunda, sıcaklık dağılımının elde edilmesinde yaklaşım formülleri kullanılarak bulunan ısı transfer katsayısı kullanılmaktadır (Hwang v. diğ., 1988; Pierce, 1994a, 1994b; Puncher v. diğ., 1989). Bu çalışma ile sıcaklık dağılımı çalışma yüzeyinin her yerinde belirlendiğinden, sargı ve çekirdek gibi hava akışkanına göre daha yüksek sıcaklıkta bulunan yüzeyler boyunca ısı transfer katsayısı bulunabilir.

Ansys programıyla yüksek gerilim sargı yüzeyi için çıkarılan sıcaklık dağılım eğrisi, daha önceden yapılmış olan deney sonucu çıkarılan eğriyle karşılaştırıldığında iyi bir yaklaşım elde edilmiştir.

## Kaynaklar

- Bejan, A., (1993). *Heat Transfer*, External Forced Convection, Natural Convection, John Wiley & Sons.
- Boduroğlu, T., (1962). Beitrag zur Entwicklung kupferarmer Luft-und Öltransformatoren Durch Mehrfache Stufung der äußeren Wicklung, *Elektrotechnische Zeitschrift. Ausgabe A: Zentralblatt*



Şekil 5. Yüksek gerilim sargısı boyunca sıcaklığın değişimi

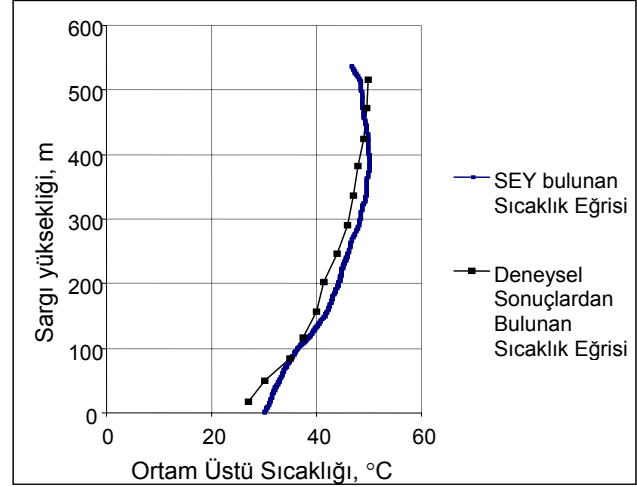
für *Electrotechnik ETZ-A*, **82**, H.3, 68-75

- Crane, R. A., Vachon, R., I., (1977). A Prediction of the Bounds on the Effective Thermal Conductivity of Granular Materials, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **20**, 711-723.
- Guardado, S. L., Naredo, J. L., Moreno, P., Fuerte, L. R., (2001). A Comparative Study of Neural Network Efficiency in Power Transformers Diagnosis Using Dissolved Gas Analysis, *IEEE*

*Transactions On Power Delivery*, **16**, 4, October, 567-569.

- Hwang, M. S., Grady, W. M., Sanders, W., (1988). Calculation of Winding Temperatures Distribution Transformer Subjected to Harmonic Current, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **3**, 3, 1074-1079.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., (1996). *Introduction to Heat Transfer*, 743sh, John Willey & Sons.
- Kotake, S., Hijikata, K., Fusegi, T., (1993). *Numerical Simulations of Heat Transfer and Fluid Flow on a Personal Computer*, Elsevier, New York.

Lampe, W., Petterson, L., Ovren, C., Wahlström, B.,



Şekil 7. Sargı yüksekliği boyunca deneysel ile sayısal olarak hesaplanan sıcaklıkların karşılaştırılması

- (1984). Hot Spot Measurements in Power Transformers, *International Conference on Large High Voltage Electric Systems*, Paris. Cigre, 1-10.
- Pierce, L. W., (1993). Specifying and Loading Cast-Resin Transformers, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **29**, 3, 590-599.
- Pierce, L. W., (1994a). Hottest Spot Temperatures in Ventilated Dry-Type Transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **9**, 1, January, 257-263.
- Pierce, L. W., (1994b). Predicting Hottest Spot Temperatures in Ventilated Dry Type Transformer Windings, *IEEE Trans. on Power Delivery*, **9**, 2, April, 1160-1171.
- Pierce, L. W., (1994c). Thermal Considerations in Specifying Dry Type Transformers, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **30**, 4, July/Aug., 1090-1098.
- Puchner, G., Lindner, M., Roseburg, D., (1989). Numerische Magnet-und



*Kuru tip güç transformatörlerinde sıcaklık dağılımı*

- Wärmefeldberechnungen in Conduction in Composite Walls, *Int. Comm. Großtransformatoren, *Elektrie**, **43**, 12, 450-452. *Heat Mass Transfer*, **17**, 305-316.
- Slangen, J. H. M., (1990). Hot Spot Measurement, *Elektrotechnik*, **68**, 6, June, 543-547. TS10901, *Türk Standardları*, (1993). Güç Transformatörleri Sıcaklık Artışı.
- Soliman, H. M., Sims, G. E., Trim, D. W., (1990). On the one Dimensional Aproximation of Heat