

## TRANSFORMATÖRLERİN NÜVE SICAKLIĞININ HESAPLAMA YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

**Yıldırım ÖZÜPAK<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> Dicle Üniversitesi, Silvan MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, Diyarbakır, 21000, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 04.05.2021 Kabul Tarihi/Accepted Date: 24.08.2021 DOI: 10.54365/adyumbd.932496

### ÖZET

Elektrik güç transformatörleri, güç iletim ve dağıtım sistemlerinin en önemli bileşenlerinden biridir. Bu transformatörler, hem çalışma hem de sabit durum modunda kendiliğinden ısı-yayarlar. Transformatörlerde bulunan bu termal radyasyon izin verilebilir eşiğin üzerine çıkarsa, transformatörün veriminde bir azalma meydana gelir. Bu durum, sistemdeki diğer bileşenlerin arızalanmasına da neden olabilir. Bu yüzden transformatörlerin üretiminden önce tasarım aşamasında termal kayıplarının tahmin edilmesi önem teşkil etmektedir. Çekirdek tipi güç transformatörlerinin sıcaklık artışının hesaplanması tasarım sürecinde temel bir sorudur ancak bu sorun ön optimizasyon sürecinde hesap karmaşasından dolayı ihmal edilebilmektedir. Bu çalışmada, hesaplama yöntemleri kısaca sınıflandırılarak tanıtılmış ve ön tasarım süreci için uygulanabilirlikleri incelenmiştir. Yöntemlerin performanslarının karşılaştırılması için, Roth'un transformatörü ve 15 MVA üç fazlı transformatör analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, Sonlu Elemanlar Yönteminin (SEY) en doğru çözümü sağladığı ve ön tasarım sürecinde daha iyi uyum gösterdiği anlaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Termal alan, Transformatör, SEY, Tasarım.

## COMPARISON METHODS OF CORE TEMPERATURE OF TRANSFORMERS

### ABSTRACT

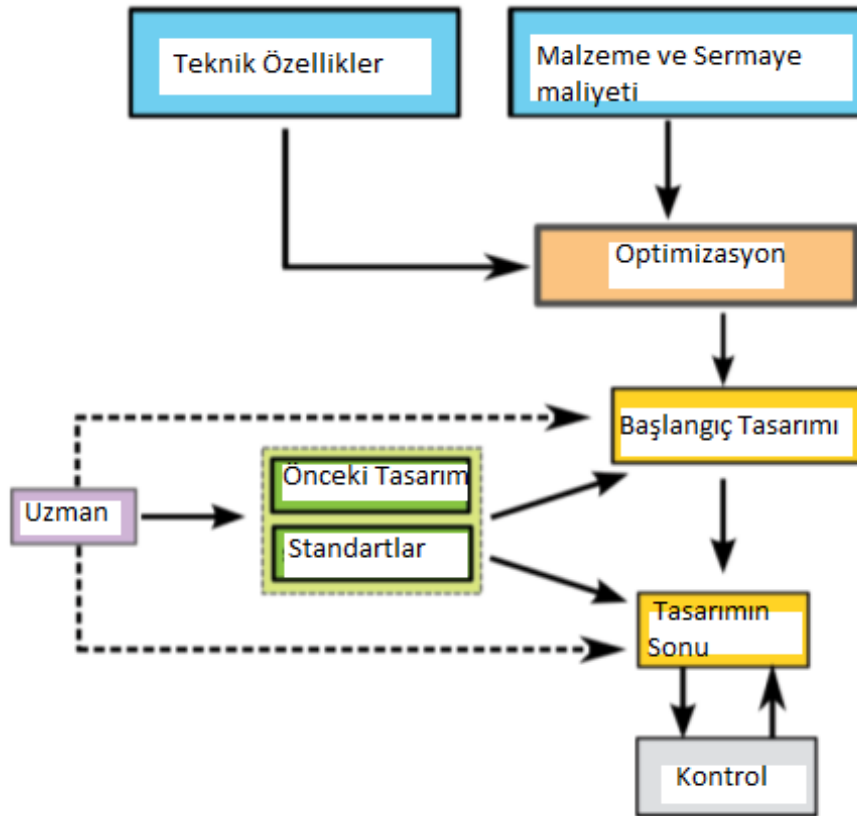
Electric power transformers are one of the most important components of power transmission and distribution systems. These transformers heat-dissipate spontaneously in both operating and steady-state mode. If this thermal radiation contained in transformers rises above the allowable threshold, a decrease in the efficiency of the transformer occurs. This can also cause other components in the system to malfunction. Therefore, it is important to estimate thermal losses at the design stage before transformers are manufactured. Calculation of temperature rise of core-type power transformers is a fundamental question during the design process, but this can be neglected during the pre-optimization process. In this study, calculation methods are briefly classified and introduced and their applicability for the preliminary design process has been examined. To compare the performance of the methods, Roth's transformer and 15 MVA three-phase transformer were analyzed. From the results obtained, it was understood that the Finite Element Method (FEM) provided the most accurate solution and adapted better in the preliminary design process.

**Keywords:** Thermal field, Transformer, FEM, Design.

\*<sup>1</sup> e-mail: [yildirimoakupak@gmail.com](mailto:yildirimoakupak@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8461-8702> (Sorumlu Yazar),

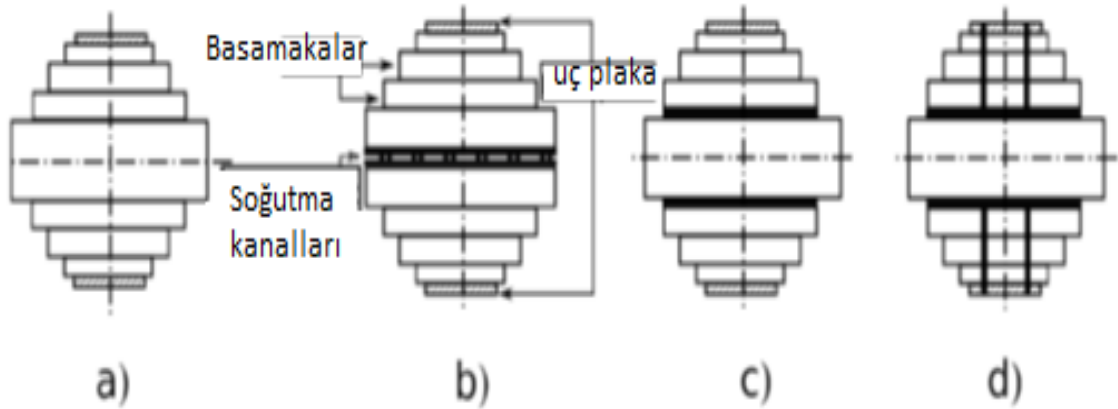
## 1. Giriş

Transformatörler, iletim ve dağıtım şalt merkezlerindeki sermaye yatırımının en büyük bölümünü temsil eder ve bunların doğru çalışmaları güç sistemleri için hayati önem taşır. Bir transformatörün tasarım sürecindeki ilk adım, en ekonomik transformatörün tasarımının ana parametrelerini ve boyutlarını elde etmektir [1]. Bu ana parametreleri, çekirdek geometrisindeki ve sütunlardaki akı yoğunluğunun belirlediği yaygın olarak kabul edilmektedir [2]. Bu nedenle, bu optimal tasarım değişkenlerini binlerce olası çözümden elde etmek için temel parametrelerin hızlı ve doğru bir hesaplama yöntemi ile belirlenmesi gerekmektedir. Parametrelerin belirlenmesi için Şekil 1'de bir algoritma örneği sunulmuştur.



Modern nüvenin tasarım süreci, yalnızca elektrik gereksinimlerinin karşılanması için değil aynı zamanda diğer bileşenlerin ve soğutma yağının kendi kendine zarar vermesini önlemek için çekirdek sıcaklığını tahmin etmek ve sınırlamak için de gereklidir. Yaklaşık olarak çapı büyük veya daha büyük olan çekirdekler için maksimum çekirdek sıcaklığını sınırlandırmak için nüvenin yüzeyine farklı düzenlemelerle daha fazla soğutma kanallarının uygulanması gereklidir [3-5]. Bu durum Şekil 2'de verilmiştir.

Genel olarak, çekirdek içi (maksimum sıcaklık) ve yüzey arasındaki sıcaklık farkının kabul edilen değeri yaklaşık 15 ile 20 °C arasındadır [6]. Bu sıcaklık aralığı, karmaşık yapıya sahip çekirdek düzeninde sıcaklık profilini belirlemek için doğru bir yöntem gerektirir. Bu sorun, anizotropik termal malzeme özelliklerinin dikkate alınması ile üç boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak tam olarak çözülebilir.



Bu algoritmaların nihai tasarım sürecinde önemli bir rolü vardır [7-8]. Ancak bu yöntemlerin tüm ana parametrelerin bilinmediği erken tasarım aşamasında kullanımı çok zahmetli ve yanstır. Nüvenin ısınma sorununun önemi nedeniyle, birçok araştırmacı çeşitli yöntemler önermişlerdir [9-14]. Bununla birlikte, önceki tekniklerin çoğunda, çekirdeğin net geometrisi, anizotropiler veya sınır katmanındaki farklılıklar ve SEY tabanlı hesaplamalar dikkate alınmamıştır. Ancak bu yöntemlerden bazıları çok basit ve hızlıdır. Bu yüzden en ekonomik tasarım parametrelerini elde etmek için optimizasyon aşamasında kullanılmaktadır.

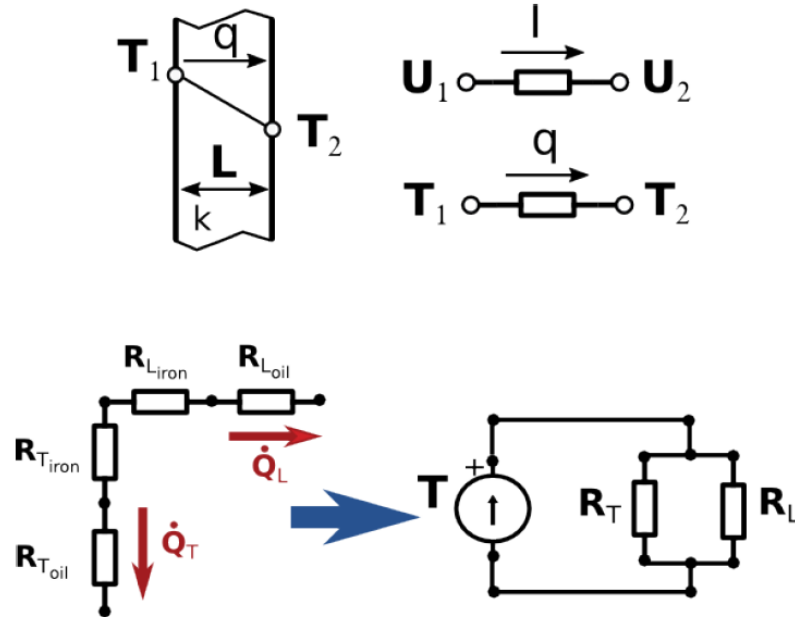
Son yıllarda, transformator tasarımı alanında çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bununla birlikte, önceki çalışmaların çoğu, transformator tasarımının ön aşamasındaki transformatorün nüvesinde meydana gelen ısı üretimi sorununu hesaba katmamaktadır. Bu çalışmada, anizotropik katılarda ısı akışının hesaplanması ve modellenmesi ile ilgili önceki çalışmalar incelenmiştir. Performans analizi yapmak için SEY tabanlı hesaplama ile iki örnek üzerinde karşılaştırma yapılmıştır. Modelleme ve simülasyonlarda SEY'e dayanarak mühendislik problemlerini çözen ANSYS@Maxwell yazılım programı kullanılmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem

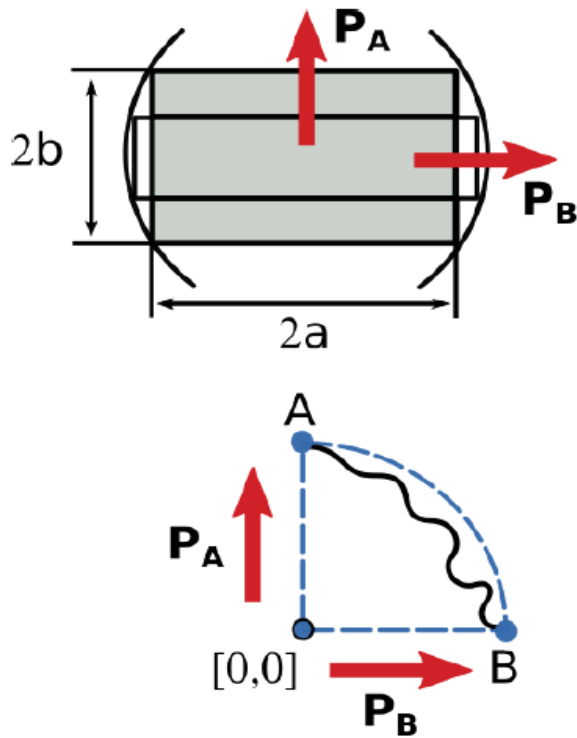
### 2.1 Termal dirençler

Bu yöntem, çekirdek sıcaklık hesaplaması için literatürde bulunan en eski ama hala en çok kullanılan yaklaşımlardan biridir. Bu yöntem ilk olarak Gotter tarafından önerilmiştir. Son olarak Ryder tarafından bahsedilen yöntemin bazı değişikliklerle optimizasyon sürecinde doğru bir şekilde kullanılabileceğini kanıtlamıştır [15].

Elektrik benzetimini kullanarak, çekirdek boyunca dağıtılan kayıplar, ele alınan bileşenin merkezinde yer alan bir noktanın kaynağı ile değiştirilebilir. Şekil 3'te verildiği gibi, çekirdek malzemesinin ve soğutma yağının sınırı, ayrı termal dirençler olarak tanımlanabilir. Çekirdeğin lamine malzemesindeki ısı iletkenliğinin anizotropisi nedeniyle, maksimum çekirdek sıcaklığı, birbirine paralel bağlı iki kolun toplam direnci ile hesaplanır.



Yöntem, çekirdek geometrisinin incelenen kısmını Şekil 4'te gösterilen eşdeğer bir dikdörtgenle değiştirir. Burada ısı akışının yönü yalnızca boyuna veya enine doğru mümkündür. Bu durum, etkili dikdörtgen normalleşmesi ile çekirdek düzeni nedeniyle kararlı hal ısı akışının iki boyutlu Poisson denkleminin 2x1 boyut yaklaşımının kullanılabilceği anlamına gelir.



Bu blok içindeki sıcaklık dağılımının bulunması için çekirdekdeki termal direnç Fourier yasasından türetebilir. Denklem (1) ile çekirdekdeki termal direnç açıklanmaktadır:

$$R_{L_{iron}} = \frac{2b}{8k_L a} \quad (1)$$

$$R_{T_{iron}} = \frac{2a}{8k_T b} \quad (2)$$

Burada  $k_L$  ve  $k_T$  eş-laminedeki ısı iletkenliği anlamına gelir, a ve b eşdeğer dikdörtgenin genişlik ve yükseklik boyutlarıdır.

Yağ sınır tabakasındaki ısı direnç, ısı aktarım hızına, yağ sıcaklığına, yağ tipine ve kanal boyutuna bağlıdır. Transformatör yağına batırılmış yüzeyler için sıcaklık dağılımı ilişkisinin deneysel kanıtı Taylor tarafından örnek olarak verilmiştir. Ryder, yağ sınır tabakasının termal direncini hesaplamak için yağ özelliklerinden bir ifade türetmiştir. Doğal yağ akışı durumunda, şu basit ifadeyi bulmuştur:

$$R_{oil} = \frac{1}{0.1029} \left( \frac{\beta \rho_L^2 \theta c_p g k_L^2}{\mu} \right)^{-1/3} \quad (3)$$

Burada,  $\beta$  yağın kübik genişmesini [ $1/K$ ],  $P_L$  soğutma sıvısının yoğunluğunu [ $kg/m^3$ ],  $\Theta$  [ $K$ ] cinsinden yağ sınır tabakasındaki sıcaklık gradyanını,  $CP$  sabit basınçta özgül ısı kapasitesini [ $J/ kg / K$ ],  $g$  yerçekimine bağlı ivmeyi ve  $k_L$  soğutma sıvısının termal [ $W/m/K$ ] iletkenliğini ifade etmektedir. Yüzey ısı iletkenliği buradan Fourier yasası ile türetilebilir. Başka bir yaklaşımda ise Grasshof ve Prandtl sayılarından çok daha karmaşık bir şekilde yüzey ısı iletkenliğini ( $h$ ) türetir. Dolayısıyla, yağ sınırı katmanında Şekil 3'teki ısı direnci tanımlayan formül aşağıdaki gibidir:

$$R_{L_{oil}} = \frac{1}{8h_L a} \quad (4)$$

$$R_{T_{oil}} = \frac{2a}{8h_T b} \quad (5)$$

Burada  $h_L$  ve  $h_T$ , [ $W/m^2/K$ ] cinsinden çekirdeğin yüzey termal iletkenliğini tanımlar. Çekirdeğin merkezinde, plaka kenarlarında ve yüzeylerinde maksimum sıcaklık artışı yasasına göre hesaplanabilir. Aşınmadan dolayı, transformatör bağlantılarında ek kayıplar oluşur. Ryder'in gösterdiği gibi, sıcaklık artışları L ve T eklemlerinde ayrı ayrı hesaplanırsa, bu yöntemin performansı önemli ölçüde artırılabilir.

## 2.2 Poisson Denkleminin Analitik Çözümü

Weh ve Delvecchio, kanalsız dairesel çekirdeklerdeki sıcaklık dağılımının iki boyutlu problemi için analitik bir çözümden bahsetmişlerdir. Çözüm, eşit ısı üretimi, yağ sıcaklığı ve çekirdeğin çevresinin etrafında eşit ısı direnç durumu için türetilmiştir. Bu yöntem, kararlı hal ısı iletiminin yaklaşık bir çözümdür. Poisson denklemi [15]:

$$\Delta T = \frac{q_v}{k} \quad (6)$$

şeklinde. Burada  $T$  [K] cinsinden sıcaklık,  $q_v$  [ $W/m^3$ ] cinsinden birim hacim kaybı ve  $k$  [ $W/m/K$ ] cinsinden ısı iletkenlik vektörüdür. Çekirdek ince yalıtımlı elektrikli çelik saclardan yapıldığından, ısı iletkenliğinde anizotropiye sahiptir. Basitlik için  $q_v$  bu hesaplamada sabittir. Yani dikdörtgen koordinatlarda denklem (6) bu durumda:

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_v = 0 \quad (7)$$

Burada termal iletkenlik her iki yönde farklıdır. Çözüm şu biçimde yazılabilir:

$$T = A + Bx + Cx^2 + Dy + Ey^2 \quad (8)$$

sonraki sınır koşullarını karşılayan:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} \quad (9)$$

dikdörtgenin merkezinde, simetri için bu gereklidir.

$$-k_x \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_{oil}) \quad (10)$$

$x=a$  ve  $y=0$  olduğunda

$$-k_y \frac{\partial T}{\partial y} = h(T - T_{oil}) \quad (11)$$

$x = 0$ 'da,  $y = b$ . Bu denklemler, konvektif sınır koşullarının eksenlerin yüzey noktalarında tam olarak sağlandığı anlamına gelir. Aynı zamanda, hesaplanan alanın tam olarak bir dikdörtgen olmadığı anlamına da gelir. Bir daire şekli veya kademeli bir çekirdek gibi bir şekil de kullanılabilir.

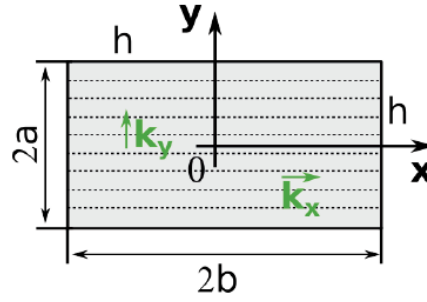
$$a = \frac{ha}{2k_x} \quad (12)$$

$$\beta = \frac{hb}{2k_y} \quad (13)$$

$$T(x, y) - T_{oil} = \frac{q_v}{h} \frac{1 - \frac{a}{a+1}(x/a)^2 - 1 - \frac{\beta}{\beta+1}(y/\beta)^2}{1/(a(1+a)) + 1/(\beta(1+\beta))} \quad (14)$$

### 2.3 Sınır Değerli Sorunlar - Higgins Yöntemi

Bu yöntem, ısının matematiksel teorisindeki bir sınır değeri problemdir. İki boyutlu ısı iletim probleminin ilk kesin çözümü olan türetilen benzer formüllerdir. Bu formül, Şekil 5'teki gibi lamine dikdörtgen şekilli çekirdekler için kullanılır.



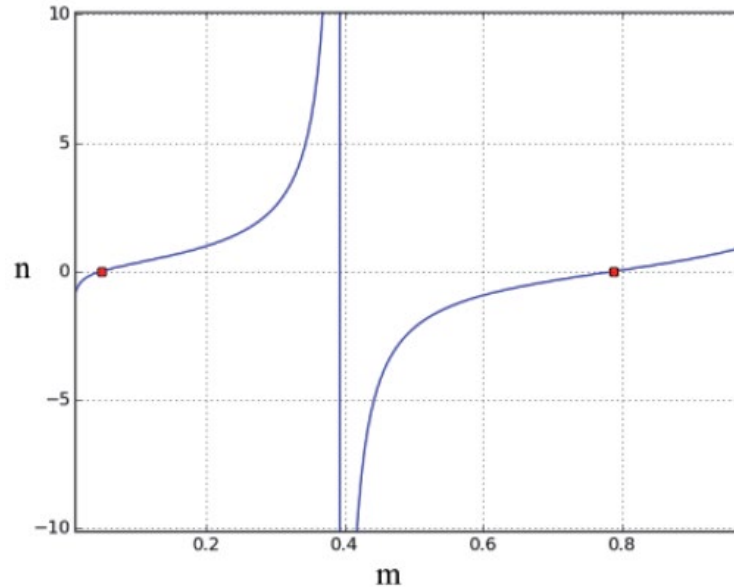
Çözümün temeli, değişkenlerin ayrılması için kullanılan yöntemdir. Bu yöntem, doğrusal olmayan sınır koşullarında da çalışır. Buchholz&Roth sınır koşullarında bazı iyileştirmeler ve ek kısıtlamalar yapmışlar. Higgins'in formülü bu öncüllerden daha geneldir, çekirdeğin içine bir soğutma kanalı uygulandığında bu tür pratik durumları kapsayabilir. Farklı ısı dirençlere sahip tek tip olmayan ısı üretimini ve iki boyutlu problemleri sınırlı eşit yağ sıcaklıkları durumu için her tarafı kapsar. Higgins'in formülü iki boyutlu çekirdek ısı probleminin maksimumunu hesaplamak için aşağıdaki gibidir:

$$T_{max} = 4C'' \sum_{i=1}^{\infty} \sin \frac{m_i a}{m_i^2(2m_i a + \sin(2m_i a))} \left(1 - (\cosh(n_i b) + K_3 n_i \sinh(n_i b))^{-1}\right) \quad (15)$$

burada  $T_{max}$ , [K] 'deki maksimum sıcaklık düşüşü,  $k$  termal iletkenlik oranıdır  $k = k_y/k_x$ ,  $C'' = qv/k$ ,  $m_i$  ve  $n_i$  sonraki iki denklemin köklerinden hesaplanır. Şekil 6'da bu durumun grafiği verilmiştir.

$$\tan(m_i a) = \frac{1}{k_i m_i} \quad (16)$$

$$n_i = \frac{m_i}{k^{0.5}} \quad (17)$$

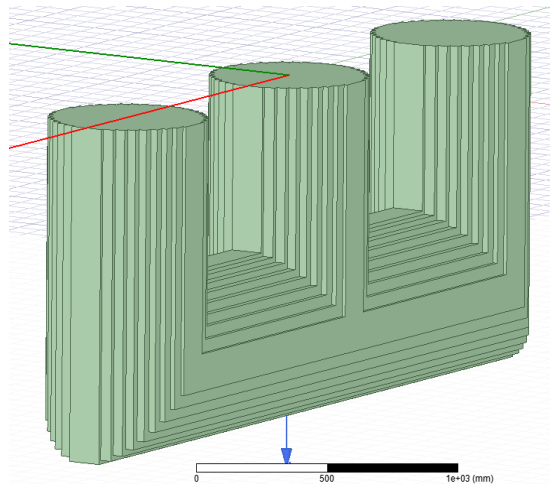
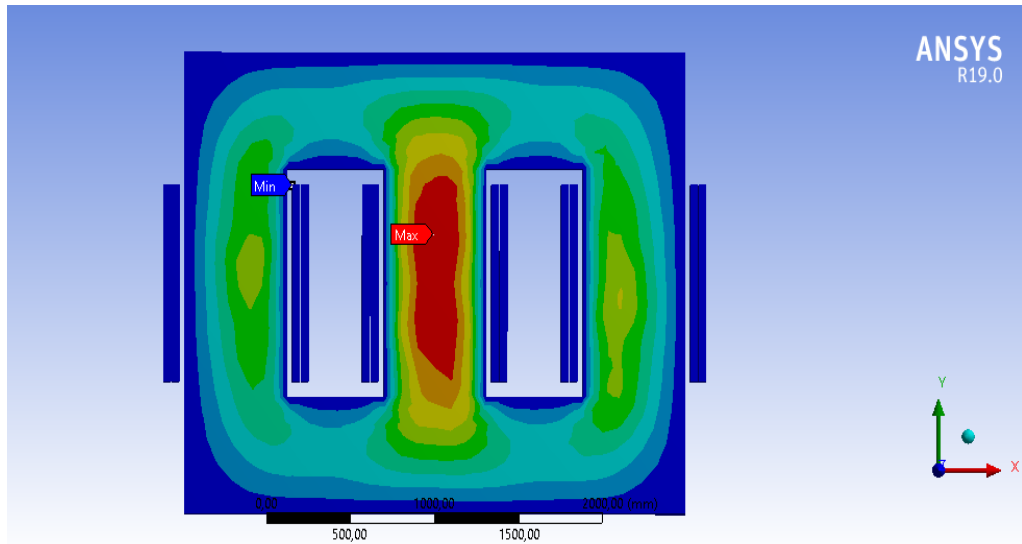


Bu formül, sargılarda ve dikdörtgen kesitli baralarda sıcaklık dağılımını belirlemek için de geçerlidir.

## 2.4 Sonlu Fark ve Sonlu Elemanlar Yöntemi

Gelişmiş 3D simülasyon tekniklerinin kullanılması, büyük güç transformatörlerinin tasarım ve performans parametrelerinin bazı kritik yönlerinin doğrulanması için gereklidir. Biraz basitleştirmeden sonra, günlük trafo tasarımında etkili bir şekilde kullanılabilirler. Bu nedenle, çekirdek kaybı hesaplaması için literatürde bulunan çok sayıda SEY ve Sonlu Faklar (SF) tabanlı çözüm vardır. Ancak bunlardan çok azı çekirdek sıcaklık artışındaki termal yönere dikkat ediyor. Bu ısı transferi problemi, anizotropik termal malzeme özellikleri hesaba katılarak üç boyutlu sonlu elemanlar veya sonlu farklar termal formülasyonlar kullanılarak çözülebilir. Bu SEY tabanlı yöntemler, çoğu durumda orijinal ampirik yöntemlerden daha büyük doğruluk göstermiştir. Bu basitleştirilmiş 2B yöntemler, günlük bir transformatör tasarım uygulaması için uygundur. Ancak ön tasarım sürecinde bu kontrolün yapılması gerektiğinde eksik kalabilirler. Bununla birlikte, bu çalışma çok daha basit bir yöntemle benzer doğruluk sağlayan Ryder modeli gibi önceden var olan yeni deneysel çözümleri hesaba katmamaktadır.

Bu çalışmada, serbest şekilli nüvelerin sıcaklık dağılımını hesaplamak için iki boyutlu SEY yöntemlerini incelenmiştir. Isı konveksiyonunu modellemek için üçüncü tip sınır koşullarıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de verilen bir ANSYS modeli oluşturulmuştur.





## 2.5 İşlevsel Yaklaşım Yöntemi

Bu yöntem ile rastgele seçilen bir nüve geometrisinde sıcaklığı doğru bir şekilde çözülmüştür. Bu yöntem, sınır koşulunun doğrusal olduğunu ve çekirdeğin fiziksel özelliklerinin sıcaklıktan bağımsız olduğunu varsayar. Bu yöntemin temeli, ısı iletiminin Poisson denkleminin Laplace denklemine dönüştürülmesidir. Bu fonksiyonların katsayıları, sınırın birçok noktasında sınır koşulu kullanılarak yinelemeli olarak değerlendirilir [16-20].

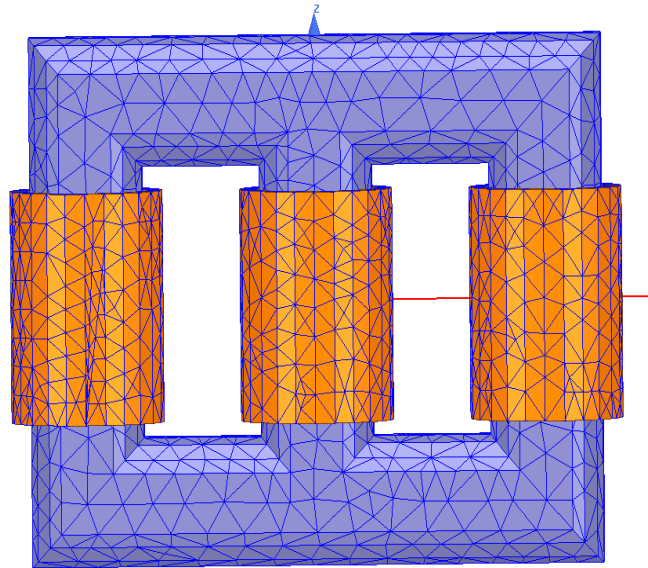
## 2.6 Elektriksel Analog Yöntemler

Poisson alanlarının iki boyutlu eşpotansiyel modellerini belirlemek için metalize bir iletken kağıt kullanılmıştır. Kararlı durum veya geçici ısı akışı koşulları için tek biçimli veya tek biçimli olmayan dağıtılmış kaynaklar tarafından oluşturulan bu alanlar, Simmons yüzeydeki birçok noktada akımları besleyerek bu yöntem genişletilmiştir. Fiziksel özellikler ve yüzey ısı transfer katsayısı, problemin sınırları dahilinde zamanın veya sıcaklığın bir fonksiyonu olamaz. Üstel tipteki zamana bağlı kaynak fonksiyonları bu yöntemle simüle edilebilir. Potansiyel ölçümler, standart bir direnç kullanılarak sıcaklıklara dönüştürülür.

Birke&Palmer, modifiye edilmiş elektriksel iletken kağıt kullanan bir yöntem tanımlamışlar (Birke ve Palmer, 1970). Sac, lamine demir çekirdeğin ana termal iletkenlik oranına eşit hale getirilen elektrik iletkenlik oranıyla ortotropik hale getirilebilir. Sınırlarda demir yüzeylerden yağa ısı transferi, Kayan'ın uzunluktaki uzatma şartlarını kullanma tekniği ile açıkça simüle edilebilir.

## 3. Silasyon ve Analiz

Önceki bölümde incelenen çözüm tekniklerinin performansını karşılaştırmak için, her gruptan beş farklı yöntem seçilerek ve iki farklı çekirdek sıcaklık hesaplama problemi üzerinde analiz edilmiştir. İlki, Roth tarafından test edilen ve ölçülen tek fazlı bir transformatördeki sıcaklık yükselmesidir. İkinci karşılaştırma Şekil 9'da verilen modern üç fazlı, 15 MVA güç transformatörü çekirdeğinin bir ayağı üzerinde gerçekleştirilmiştir.



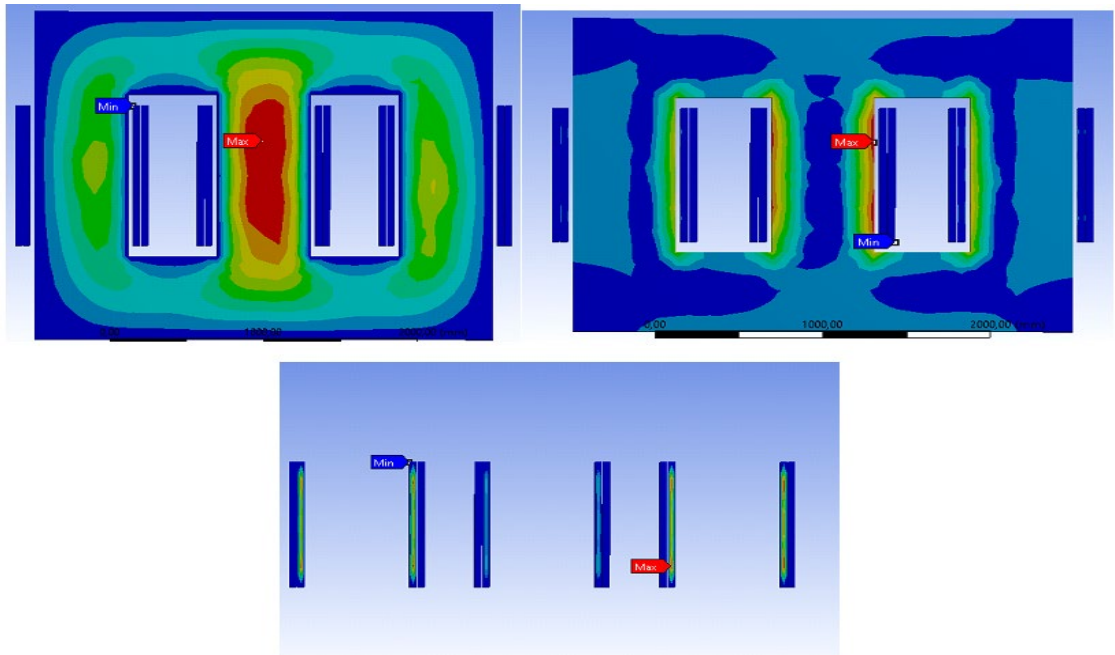
Şekil 9. İncelenen 3 fazlı transformatörün şematik görünümü.

### 3.1 15 MVA trafonun nüvesi

Seçilen yöntemler, üç fazlı, 15 MVA transformatörlerin çekirdeğinde karşılaştırılmıştır. Bu çekirdek, M125-027S sınıfı elektrikli çelik saclardan yapılmıştır. Çekirdekdeki akı yoğunluğunun tepe değeri  $B_0 = 1.7$  T'dir. Kullanılan malzemenin yüksüz kaybı  $P_0 = 12$  kW'tır. Bu tasarımda kademeli bağlantılar kullanılmıştır. İstifleme faktörü yaklaşık  $sf = 0.95$ 'tir. Boyunduruğun ve sütunların şekli ve kesiti aynıdır. Tasarlanan nüve Şekil 8'de verilmiştir. Kesit alanı Oluşturulan ısı yoğunluğu bu hesaplamada homojen kabul edilir. Hesaplanan ve simüle edilen sonuçlar karşılaştırma için Çizelge 1'de verilmiştir. ANSYS modeli ile hesaplanan sonuç Şekil 10'da gösterilmektedir. Tablo 1'de modellenen trafonun özellikleri verilmiştir.

**Tablo 1.** Trafoya ait tasarım bilgileri

Parametre	Değer
Nominal güç	15 MVA
Nominal Frekans	50 Hz
Gerilim oranı ( Primer/Sekonder)	33/11 kV
Yoke uzunluğu	2950 mm
Bacak yüksekliği	2380 mm
İki bacak arası uzaklık	1185 mm
Sargı yüksekliği	1040 mm
Sac kalınlığı (M125-27S)	0.27 mm
İletkenlik(M125-27S)	5000000 S/m
Yığıma faktörü	0.95



**Şekil 10.** 15 MVA transformatörünün sonlu eleman çözümü.

**Tablo 2.** Trafo çekirdeğindeki hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması

	$\Delta T_{max}$	$\delta$ [%]	$\Delta T$ [K]
Del Vecchios	87.6	4.1	87.1
Gotter	79.1	-6.9	78.1
Higgins	86.01	0.4	-
SEY	89.1	0.32	84.1
Deneysel	91.3	-1.98	89.2

Deneysel sonuçlar, simülasyonda kullandığımız gerçek bir trafo modelini bizimle paylaşan bir transformatör fabrikasından alınmıştır. Nüvedeki maksimum sıcaklık değeri nüvenin orta bacağında meydana gelmiştir. Bu nedenle nüvede meydana gelen kayıplar, açığa çıkan ısıya bağlı olarak sargılarda meydana gelen kayıplardan daha düşük olmuştur.

Tasarlanan termal model ile transformatörün simülasyonu ve analizi başarılı bir şekilde tamamlanmıştır. Standart sıcaklık değerleri kıyaslandığında sargıların ve nüvenin maksimum sıcaklık değerlerinde yaklaşık % 2'lik bir fark oluştuğu belirlenmiştir. Bu değer, transformatörün termal alanının simülasyonunun gerçeğe çok yakın olduğunu göstermektedir.

Modellenen transformatörünün hesaplamalarının sonuçları, SEY yöntemlerinin deneylerle pratik olarak aynı sonucu gösterdiği görülmüştür. Bu nedenle, SEY yönteminin sonucu, bu karmaşık düzenleme için karşılaştırmanın temeli olacaktır. İki basit yöntemin sonuçları SEY sonuçları ile karşılaştırıldığında, bu yöntemlerin doğruluğunun önceki düzenlemeye benzer olduğu ve Gotter yönteminin sonucunun daha düşük değerler sağladığı söylenebilir. Bu üç aşamalı düzenlemede, Higgins'in yönteminin sonucu da SEY'e en yakın olmuştur.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, çekirdek tip güç transformatörlerinin sıcaklık artışının hesaplama yöntemlerine genel bir araştırma sunulmuştur. Bu çalışmada, ilk analitik çözümlerden son teknoloji olan SEY'e kadar yöntemler açıklanmıştır. Ayrıca, yaygın olarak kullanılan dört hesaplama yöntemi pratik örneklerle karşılaştırılmıştır. Modellenen transformatörün sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, ölçülen ve SEY hesaplanan değerler arasındaki farkın, sıcaklık ölçümünün belirsizliğinden daha az olduğunu göstermektedir. Higgins'in yöntemi de çok hassastır, ancak SEY veya SF çözümleri kadar karmaşık hesaplama gerektirir. Gotter'ın termal direnç çözümü çok basit ve hızlıdır. Bu yöntemin kesinliği yaklaşık %10'dur ve Ryder'ın yöntemiyle kolayca geliştirilebilir. Sonuçlar, basit yöntemlerin çok daha az hesaplama süresi ile iyi sonuçlar sağladığını göstermektedir. Bu nedenle, son bir tasarım sürecinde, bir SEY yöntemine dayalı hesaplama en iyi doğruluğu verir. Ancak ön tasarım aşamasında, Gotter'ın termal direnç yöntemi en verimli olabilir.

#### Teşekkür

Bu çalışma İnönü Üniversitesi BAP birimince destek almıştır. Proje No: FBA-2017-639. Katkılarından dolayı teşekkürler.

**Kaynaklar**

- [1] Lee M., Abdullah H. A., Jofriet J. C., Patel D., (2010). Thermal modeling of disc-type winding for ventilated dry-type transformers. *Electric Power Systems Research*, 80 121–129. doi.org/10.1016/j.epsr08.007
- [2] Del V., R. M., Poulin, B., Feghali, P. T., Shah, D. M., Ahuja, R. (2001). Transformer design principles with applications to core-form power transformers. CRC Press, doi: 10.1201/ebk1439805824
- [3] Ryder, S. A., Vaughan, I. J. (2004). A simple method for calculating core temperature rise in power transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 19(2), pp. 637–642. doi: 10.1109/tpwr.2003.820222
- [4] Gotter, G (1954). *Erwärmung und Kühlung elektrischer Maschinen. (Heating and Cooling of Electrical Machines.)* Springer-Verlag, (in German). doi: 10.1007/978-3-642-50337-5
- [5] Buchholz, H (1934). Die zweidimensionale wärmeströmung des beharrungszustandes im rechteckigen querschnitt geblatterter eisenkörper bei flachenhaft, un stetig oder stetig verteilten wärmequellen. *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/ Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 14(5), pp. 285– 294. in German doi: 10.1002/zamm.19340140505
- [6] Higgins, T. J. (1945). Formulas for calculating temperature distribution in transformer cores and other electric apparatus of rectangular cross section. *Electrical Engineering*. 64(4), pp. 190–194. 19 doi: 10.1109/ee.1945.6440972
- [7] IEEE (2006-2007). Standard for standard general requirements for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers. *IEEE Std C57.12.00-* doi: 10.1109/IEEESTD.2007.323389.
- [8] Birke P., Palmer S. (1970). A capacitively coupled magnetic ux mapper. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-89(7)*, pp. 1635– 1642. doi: 10.1109/tpas.1970.292811.
- [9] Kayan C. (1945). An electrical geometrical analogue for complex heat flow. *Transactions of ASME*. 67(8), pp. 713–716. doi: 10.1109/ee.1945.6440972
- [10] Kuchler, R (1966). *Die Transformatoren: Grunlagen Fur Ihre Berechnung und Konstruktion. Transformers: calculation and design fundamentals.* Springer-Verlag, (in German) doi: 10.1007/978-3-642-52496-7
- [11] Muthanna K.T., Sarkar A., Das K., Waldner K. (2006). Transformer Insulation Life Assessment. *IEEE Trans, Power Deliv.* 21150 – 156.
- [12] Nageswara M. R, Malay M. (2011). Impact of Harmonics, Estimation of Losses and Life expectanc & Mitigation of ill effects. [https://www.academia.edu/6676494/Distribution\\_Transformer\\_Impact\\_of\\_Harmonics\\_IEEE\\_Format\\_2](https://www.academia.edu/6676494/Distribution_Transformer_Impact_of_Harmonics_IEEE_Format_2). Erişim tarihi 10.10.2017
- [13] Soh T. L. G, Said D. M, Ahmad N, Nor K. M, Salim F (2013). Experimental study on the impact of harmonics on transformer. *IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, pp.686-690.
- [14] Sadati S.B., Tahani A., JafariM ., Dargahi M., (2008). Derating of Transformers under Non-sinusoidal Loads. in: *11th International Conferenec on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM*, pp.263-268.
- [15] Weh, H. (1951). Die zweidimensionale wärmeströmung im geschichteten transformator kern. The two-dimensional heat-flow in transformer core. *Electrical Engineering Archiv fur Elektrotechnik*. 41(2), pp. 122–126. 195 (in German) doi: 10.1007/bf01576220
- [16] Roth, E (1927). *Introduction a l'étude analytique de l'échauffement des machines électriques. Introduction to the analytical study of the heating of electrical machines.* E. Chiron, Paris. France.
- [17] Teke, I. H., ÖZÜPAK, Y., & MAMIŞ, M. S. (2019). Electromagnetic Field and Total Loss Analysis of Transformers by Finite Element Method. *International Journal of Engineering and Computer Science*. 8(01), 24451–24460. Retrieved from <http://www.ijecs.in/index.php/ijecs/article/view/4262>.

- [18] Taylor, E. D., Berger, B., Western, B. E (1958). An experimental approach to the cooling of transformer coils by natural convection. *Proceedings of the IEEPart A: Power Engineering*, 105(20), pp. 141–152. doi: 10.1049/pi-a.0034
- [19] Tenyenhuis, E. G., Girgis, R. S., Mechler, G. F., Zhou, G. (2002). Calculation core hot-spot temperature in power and distribution transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17(4), pp. 991–995. doi: 10.1109/tpwr.2002.803703
- [20] Özüpak Y, MAMIS M. S (2019). Realization of electromagnetic flux and thermal analyses of transformers by finite element method. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 14(10), 1478-1484. doi: 10.1002/tee.22966.
- [21] Tamás O, Gábor K, Tamás I, Z. Ádám T., (2016). Comparison of Methods for Calculation of Core-Form Power Transformer's Core Temperature Rise. *Periodica Polhtecnica Electrical Engineering and Computer Science*. DOI:10.3311/PPee.8893.