



*Araştırma Makalesi / Research Article*

## Farklı Nüve Malzemelerinin Transformatörün Verimi Üzerindeki Etkilerinin Analizi

### *Analysis of the Effects of Different Core Materials on Transformer Efficiency*

Yıldırım ÖZÜPAK

*Dicle Üniversitesi, Silvan MYO, Elektrik ve Enerji Bölümü, 21000, Diyarbakır, Türkiye*

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihi

*Alınış, 29 Ocak 2021*

*Revize, 22 Mart 2021*

*Kabul, 25 Mart 2021*

*Online Yayınlama, 01 Nisan 2021*

##### Anahtar Kelimeler

*Transformatör, Manyetik alanı,  
Nüve malzemesi, SEY*

#### ARTICLE INFO

##### Article History

*Received, 29 January 2021*

*Revised, 22 March 2021*

*Accepted, 25 March 2021*

*Available Online, 01 April 2021*

##### Keywords

*Transformer, Magnetic field,  
Core material, FEM*

#### ÖZ

Transformatörler elektrik iletim ve dağıtım şebekesinin en önemli bileşenleri arasındadır. Transformatörlerin yüksek verimlilikle çalışması güç sistemlerinin de verimlilikle çalışması anlamına gelmektedir. Güç sistemlerindeki teknolojik ilerlemeler, transformatör tasarımcılarına da hem daha ekonomik hem de daha verimli transformatörler üretme yönünde sorumluluk yüklemektedir. Transformatör, çekirdek, sargılar, izolasyon ve diğer birçok ekipman gibi çok sayıda modülden oluşan karmaşık üç boyutlu bir yapıdır. Transformatörün nüvesinde kullanılan farklı manyetik malzeme türleri bulunmaktadır. Ancak amorf manyetik malzemeler ve bu malzemelerle tasarlanan transformatörler ilgi odağı olmaya başlamıştır. Bu çalışmada çekirdek tipi transformatörün Sonlu Eleman modeli, aynı boyutlara ve çalışma koşullarına sahip transformatörün kayıplarını bulmak için nüvesi farklı manyetik malzemelerle tasarlanan transformatörün SEY tabanlı ANSYS-Maxwell yazılımı kullanılarak analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler, farklı nüve malzemeleri için manyetik akı yoğunluğu, akım yoğunluğu, nüve kayıpları, girdap akım kayıpları ve manyetik vektör potansiyeli gibi farklı elektromanyetik özelliklerin karşılaştırılması için yapılmıştır.

#### ABSTRACT

Transformers are among the most important components of the electricity transmission and distribution network. The high efficiency of transformers means that power systems work efficiently. Technological advances in power systems impose responsibility on transformer designers to produce both more economical and more efficient transformers. It is a complex three-dimensional structure consisting of a large number of modules such as transformer, core, windings, isolation, and many other equipments. There are different types of magnetic materials used in the core of the transformer. However, amorphous magnetic materials and transformers designed with these materials have started to be the center of attention. In this study, the Finite Element model of the core-type transformer was analyzed by using FEM-based ANSYS-Maxwell software of the transformer whose core was designed with different magnetic materials to

find the losses of the transformer with the same dimensions and operating conditions. Analyzes were made to compare different electromagnetic properties such as magnetic flux density, current density, core losses, eddy current losses, and magnetic vector potential for different core materials.

## 1. GİRİŞ

Elektromanyetik indüksiyon yoluyla elektrik gücünü, aynı frekansta fakat farklı gerilim ve akım seviyeleriyle devreler arasında aktaran üç boyutlu statik elektromanyetik cihaz transformatördür. Transformatör, çekirdek, sargılar, izolasyon, tank ve başka birkaç ekipman gibi çok sayıda modülden oluşan karmaşık üç boyutlu bir yapıdır. Transformatörlerde elektrik ve manyetik alanların yanı sıra fiziksel alanlar da mevcuttur [1]. Transformatörlerdeki elektrostatik ve manyeto statik alanların hesaplanması için sayısal tekniklere ek olarak değişkenlerin ayrılması, görüntü yöntemi, Fourier metodu vb. birçok analitik yöntem bulunmaktadır. Ancak elektrostatik, manyeto statik, termal, elektromanyetik ve fiziksel problemlerin çözümü için sayısal teknikler kullanılır. Günümüzde, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) çekirdek ve sargı malzemelerinin optimizasyonunu, iyileştirici eylemleri ve yeni transformatör tasarımlarının doğrulanmasını birleştirebilen en verimli sayısal araç olarak kabul edilmektedir [2].

Manyetik devre, transformatör tasarımının en önemli dinamik kısmıdır. Lamine demir çekirdekten oluşur. Çekirdek ise sargıları sargılar arasındaki manyetik akıyı taşır. Sargılar arasındaki akı bağı temel olarak bir transformatörün performansını etkiler. Bu nedenle, çekirdek olarak bilinen düşük manyetik isteksizliğe sahip manyetik bir yol, sargılar arasındaki akının verimli bir şekilde aktarılmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Trafo nüvelerinde gelişen teknolojiye de bağlı olarak ucuz ve az kayıplı elektrik çeliklerinin kullanımına talep artmaktadır. Si-Fe alaşımları, günümüzde endüstride çekirdek tasarımında çekirdek malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ancak son zamanlarda muadil malzemelerin geliştirilmesiyle beraber mevcut malzemenin değiştirilmesi araştırma konusu olmuştur [5-7]. Elektrik makinelerinde kullanılan Si-Fe malzemeye ek olarak amorf materyallerin eklenmesi ile farklı çalışmalar yapılmıştır [8]. Histerez ve girdap akımı kayıpları, transformatör çekirdeğindeki temel zorluklardır. Çekirdek için kullanılan malzeme temelde histerezis kayıplarını etkiler. Çelik laminasyon malzemeleri kullanılarak tasarlanan nüvelerdeki girdap ve histerezis kayıpları daha sonra çeliğe silikon eklenmesiyle girdap akımı ve histerezis kayıpları etkili bir şekilde azaltılmış ve transformatörün performansı ve verimi arttırılmıştır.

Transformatörlerde 25 yılı aşkın süredir amorf manyetik malzemeler kullanılmaktadır. 1970'lerin ortalarında, enerji verimliliğinin iyileştirilmesi ihtiyacı nedeniyle, amorf malzemeler ve bunların kullanımı elektrik güç dağıtım sistemlerinde büyük ilgi görmüştür. Ancak amorf malzeme bazlı enerji tasarruflu transformatörlerin yüksek maliyeti nedeniyle, bu eğilim ters bir yön almıştır. Amorf

malzemeler, silikon çeliklere kıyasla daha düşük doymuş manyetik induksiyona sahiptir. Bu durum büyük boyutlu transformatörlerin maliyetinin artmasına neden olmaktadır [9-11]. Ancak enerji verimliliği yüksek olan transformatörlerin kullanım ömrü boyunca bakım maliyetlerinin daha düşük tutulmasıyla bu eksikliğin üstesinden gelinebilir. Trafo çekirdek malzemelerinde yapılan bu araştırmalar, küresel enerji tasarrufu mücadeleleri ve çevresel kaygılar üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur [12,13].

Bu çalışmada transformatöre ait kayıplar ve transformatörlerde kullanılan manyetik malzemelerle ilgili temel kavramlar açıklanmıştır. Aynı zamanda güç kayıpları ve yönlendirilmiş silisli sacı içeren mıknatıslanma mekanizmaları üzerinde durulmuştur. Nüve malzemesinin kayıplar üzerindeki etkisi incelenmiş, malzemelerin nüve manyetik akı yoğunluğu üzerindeki dağılımı belirlenmiş ve nüve için kullanılacak optimum malzeme belirlenme çalışılmıştır. Farklı çekirdek malzemeleri kullanılarak tasarlanan transformatör modelinin sonlu elemanlar yöntemi farklı elektromanyetik özellikler için karşılaştırılması yapılmıştır. Bu çalışma, deneysel olarak test etmenin maliyetli ve zor olduğu bir transformatörün testlerinin sonuçlarının önceden bir program aracılığıyla tahmin edilmesi amacıyla yapılmıştır. Burada transformatörün tasarım aşamasından önce prototip sayısı azaltılarak maliyetin düşürülmesi ve testlerin sonuçlarının önceden tahmin edilebilmesi hedeflenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), analiz edilen alandaki doğrusal olmayan malzemelerin ve anizotropiyi içeren bileşik elektromanyetik komplikasyonların çözümüne yardımcı olan sayısal bir tekniktir. Çözüm için analizi gerçekleştirilecek geometrinin tüm alanı ayrıştırılır ve sonlu elemanlar olarak bilinen küçük üçgen yüzeylerde analiz edilir. Maxwell denklemleri, elektrikli cihazlardaki manyetik alanların dağılımını hesaplamak için Sonlu Elemanlar'a uygulanır. SEY metodolojisi aşamalar halinde çözüm yapmaktadır. Önce nesnenin geometrisi ve sınır koşulları iyi tanımlanır. Geometrinin özellikleri ile malzemeler, nesnenin modeli için tanımlanır. Bir varlığın enine kesiti gibi tüm alan, manyetik vektör potansiyelini (A) değerlendirmek için belirli bir eleman hanesine yayılır. Elde edilen sistemin işleme kısmının ve çıktı sonuçlarının yürütülmesi için Maxwell denkleminin çözülmesi gerekir. Aşağıdaki denkleme göre, alan yoğunluğu (H) ve akı yoğunluğu (B) belirlenir.

Zamana bağlı olarak değişen elektrik ve manyetik alanlar için genel Maxwell denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir;

Faraday İndüksiyon Kanunu

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

Gauss Manyetik Alan Kanunu

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

Amper Akım Kanunu

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3)$$

Gauss Elektrik Alan Kanunu

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (4)$$

Burada  $\mathbf{E}$  elektrik alan şiddeti (Volt/metre),  $\mathbf{D}$  elektrik akı yoğunluğu (Coulomb/m<sup>2</sup>),  $\mathbf{H}$  manyetik alan şiddeti (Amper /metre),  $\mathbf{B}$  manyetik akı yoğunluğu (Weber/m<sup>2</sup>),  $\mathbf{J}$  elektrik akım yoğunluğu (Amper/m<sup>2</sup>) ve  $\rho$  hacimsel elektrik yük yoğunluğudur (Coulomb/m<sup>3</sup>).

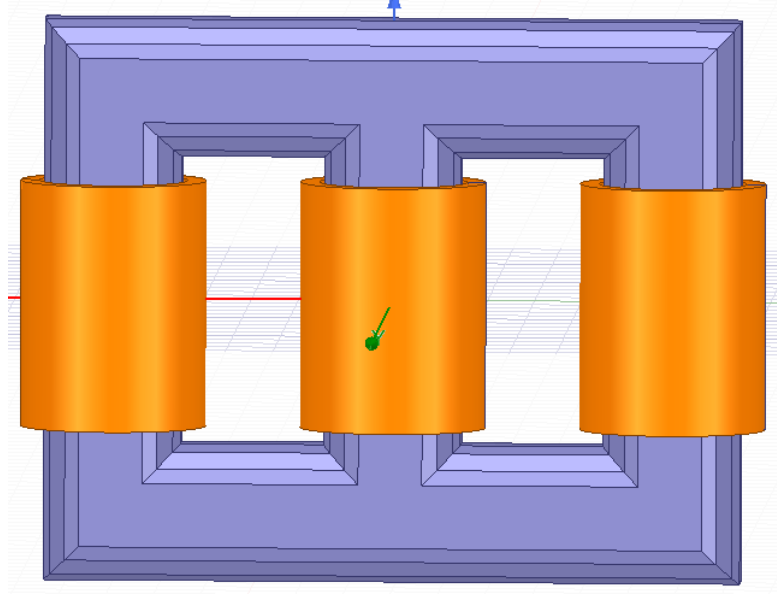
Burada özetlenen olay değişen elektrik alanının manyetik alanı meydana getirdiği, benzer şekilde zamanla değişen manyetik alanın da elektrik alanını doğurduğudur.

Üç fazlı bir transformatörün hareketli parçası yoktur, bu nedenle statik bir elektromekanik cihazdır. Dengeli elektromanyetik alan, sekonder sargılarla elektromanyetik olarak birleştirilen üç fazlı primer sargılar tarafından oluşturulur. İkincil sargıda malzemenin iletkenliği, yapısında döner parça bulunmadığından primerin iletkenliği ile aynı olacaktır. Yüksüz koşullar altında, primer sargı nominal gerilim ile temsil edilirken sekonder sargı açık tutulur, böylece akım akışı olmaz. Yüksüz durumda, malzemede meydana gelen kayıplar aşağıdaki nedenlerden dolayıdır.

- i) Manyetik histerezis olarak adlandırılan, manyetizmayı sürdürme ve içindeki herhangi bir varyasyonla yüzleşme eğilimi
- ii) Malzemede gerilimler ve zamanla değişen akı nedeniyle indüklenen akımlar nedeniyle oluşan kayıplar.

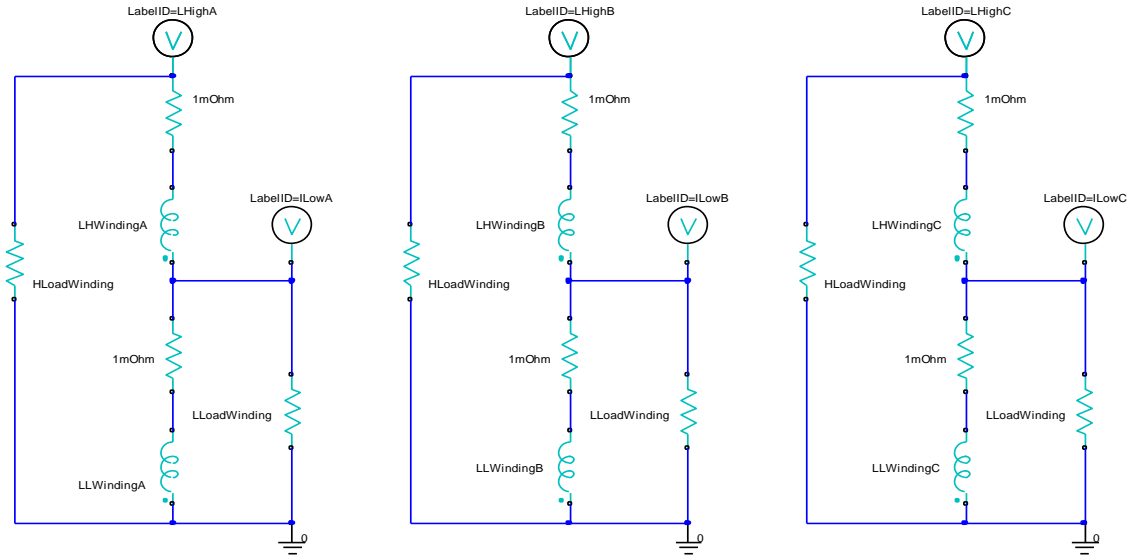
## 2.2 Modelin Geometrisi

Transformatör, elektromanyetik indüksiyon yoluyla devreler arasında güç aktarımı ilkesi üzerine inşa edilmiştir. Burada üç fazlı bir transformatör ele alınmış ve modellenmiştir. Sargılar arasındaki akı bağı temel olarak bir transformatörün performansını etkiler [7]. Analizlerde kullanılan transformatörün primer ve sekonder sargıları, Şekil 1'de verildiği gibi çekirdeğin üç bacağı etrafına yerleştirilmiştir.



Şekil 1. Transformörün geometrisi

Tasarlanan transformörün uyarılması için özel harici devre şeması Şekil 2’de sunulmuştur.



Şekil 2. Harici uyarma devresi şeması

Modellenen transformörün elektriksel ve bazı tasarım verileri Tablo 2’de verilmiştir. Bu veriler programa tanımlanarak analiz gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 1.** Transformatörün özellikleri

Parametre	Değer
Nominal güç	15 MVA
Primer gerilimi	33.000 V
Sekonder gerilimi	11.000 V
Deneysel nüve kaybı	12.500 W
Teorik nüve kaybı	12.360 W
Deneysel bakır kaybı	97.000 W
Teorik bakır kaybı	96.848 W
Çalışma frekansı	50 Hz
Nüve malzemesi	M125-027S, M530-50A
Akım yoğunluğu	1.8 A/m <sup>2</sup>

Üç farklı manyetik çekirdek malzemesi incelenmiştir. Simülasyonun amacı, transformatör çekirdeğindeki manyetik akı yoğunluğu, manyetik vektör potansiyeli ve akım yoğunluğu dağılımlarını incelemektir. Üç fazlı transformatörün analizi, üç farklı çekirdek malzemesi türü değiştirilerek yapılmıştır. Malzeme değişiminin etkisi, manyetik akı yoğunluğu, manyetik vektör potansiyeli ve akım yoğunluğu olarak ifade edilir. Her üç modelde de sınır koşulları, uyarımlar ve diğer ilgili parametreler aynı tutulmuştur. Farklı çekirdek malzemelerinin sahip üç modelin tümüne verilen parametreler Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Farklı nüve malzemelerinin parametreleri

Nüve malzemesi	M125-027S	M530-50A	CRGO silikon çelik
Elektriksel iletkenlik (S/m)	5000000	1960000	1.72117
Bağıl geçirgenlik	1	1	1
Curie sıcaklığı (°C)	810	750	785
Manyetik akı saturasyonu (T)	1.4-2	1.5-2.1	1.5-1.8

### 2.3 Farklı Nüve Malzemesinin Manyetik Akı Yoğunluğu ve Nüve Kayıpları Üzerindeki Etkisi

En temel trafo denklemi:

$$\Psi = \Phi_{\max} \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \frac{d\Psi}{dt} = \omega N_1 \Phi_{\max} \cos(\omega t) \quad (6)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (7)$$

$$E_1 = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N_1 \Phi_{\max} = \sqrt{2}\pi f N_1 \Phi_{\max} \quad (8)$$

$$\Phi_{\max} = \frac{E_1}{\sqrt{2}\pi f N_1} \quad (9)$$

$$\Psi = \int_0^S B \cdot d_A = B \cdot S = B_{\max} \cdot S \cdot \sin(\omega t) \quad (10)$$

$$B_{\max} = \frac{E_1}{\sqrt{2}\pi f S N_1} = \frac{E_1}{4.44 S f N_1} \quad (11)$$

şeklindedir.

Bu çalışmada kullanılan sayısal hesaplama yönteminde, nüve kayıplarının hesaplanması aşağıda verilen denklemlere ve sabit değerlere göre hesaplanmaktadır.

- Eddy akım kayıpları:

$$P_e = k_c (f B_m)^2 \quad (12)$$

- Histeresis kayıplar:

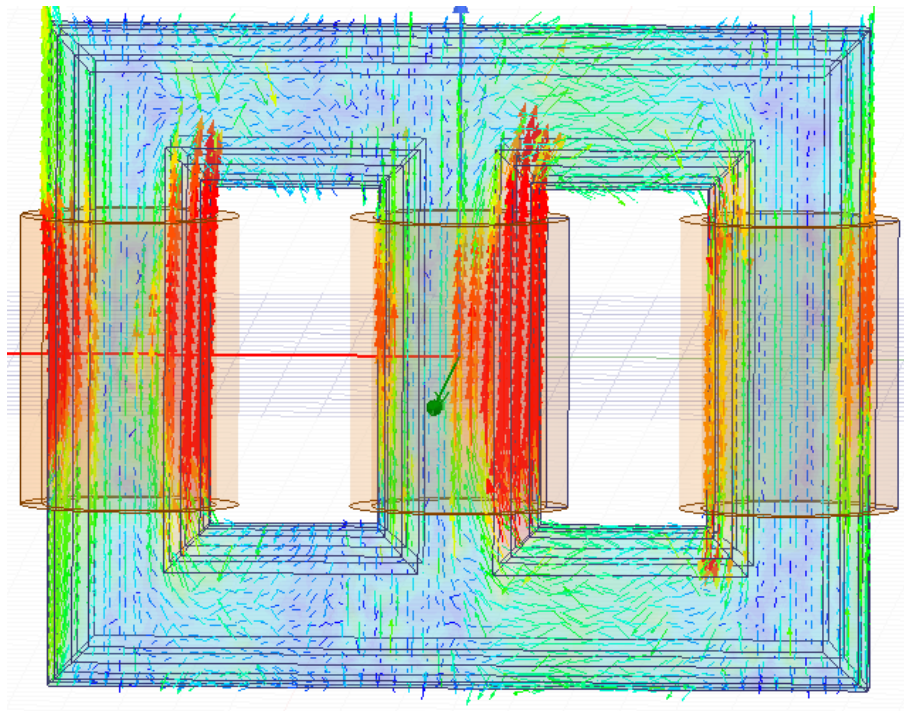
$$P_h = k_h f B_m^2 \quad (13)$$

$$k_c = \pi^2 \sigma \frac{d^2}{6} \quad (14)$$

Burada  $\sigma$  iletkenlik, d sac kalınlığıdır. Katsayılar  $K_1$  ve  $K_2$ , f frekans, B manyetik akıdır.

### 3. ARAŞTIRMA BULGULARI

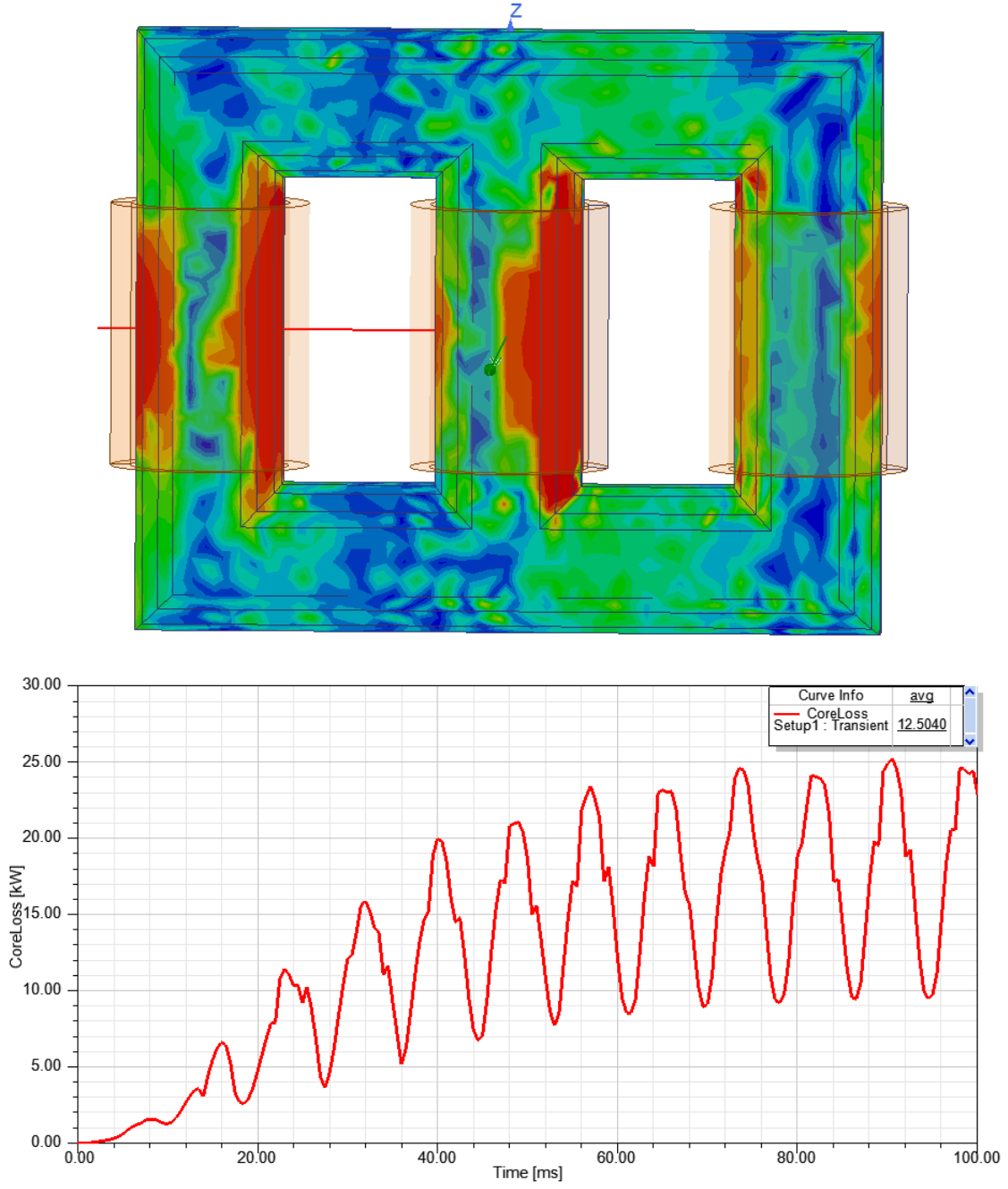
Transformatör çekirdeğindeki girdap kayıpları, yüksek dirençli çekirdek ve daha ince laminasyonlar kullanılarak azaltılabilir. Simülasyon çalışmasında, Şekil 5'te gösterildiği gibi, manyetik vektör potansiyeli ve üç tip çekirdek malzemedeki kaynaklanan akım yoğunluğu için karşılaştırmalı bir çalışma yapılmıştır. Maksimum akı yoğunluğu  $B_{max}$ , kullanılan çekirdek malzemeye bağlıdır. Sonlu Elemanlar Yöntemi, transformatör içindeki manyetik akı dağılımını, transformatörün manyetik parametreleri ve geometrik ölçümleri ile hesaplamak için uygulanır. Şekil 3'te, amorf malzemeli transformatör çekirdeğindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir.



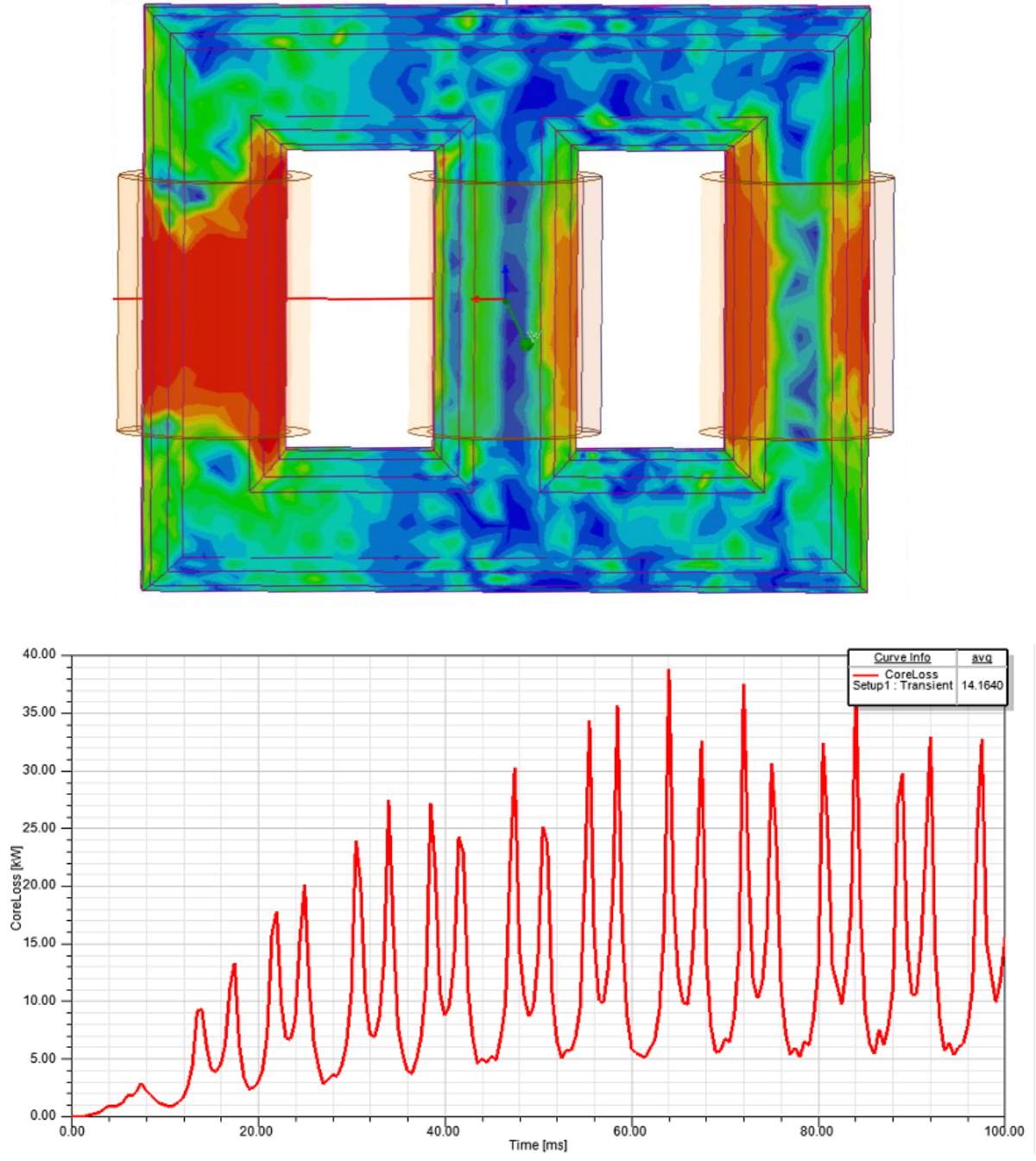
Şekil 3. Trafodaki manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Simülasyon çalışmasında, Şekil 4-6'da verildiği gibi, her üç tip çekirdek malzeme için akı yoğunluğu ve kayıplar için karşılaştırmalı bir çalışma yapılmış ve sonuçlar şekillerle sunulmuştur.

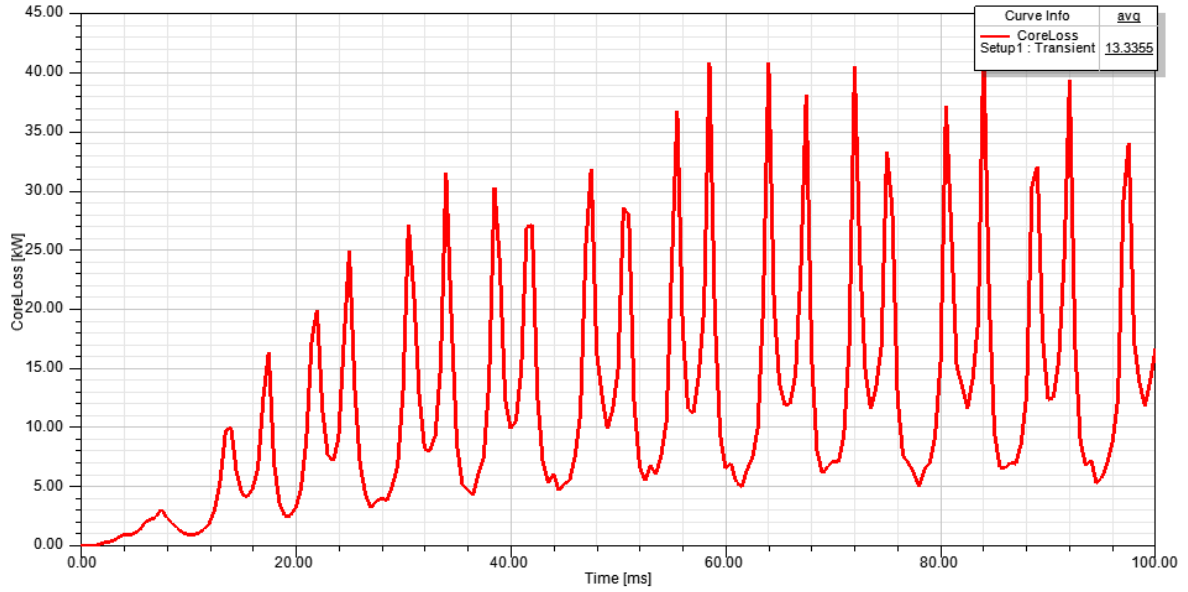
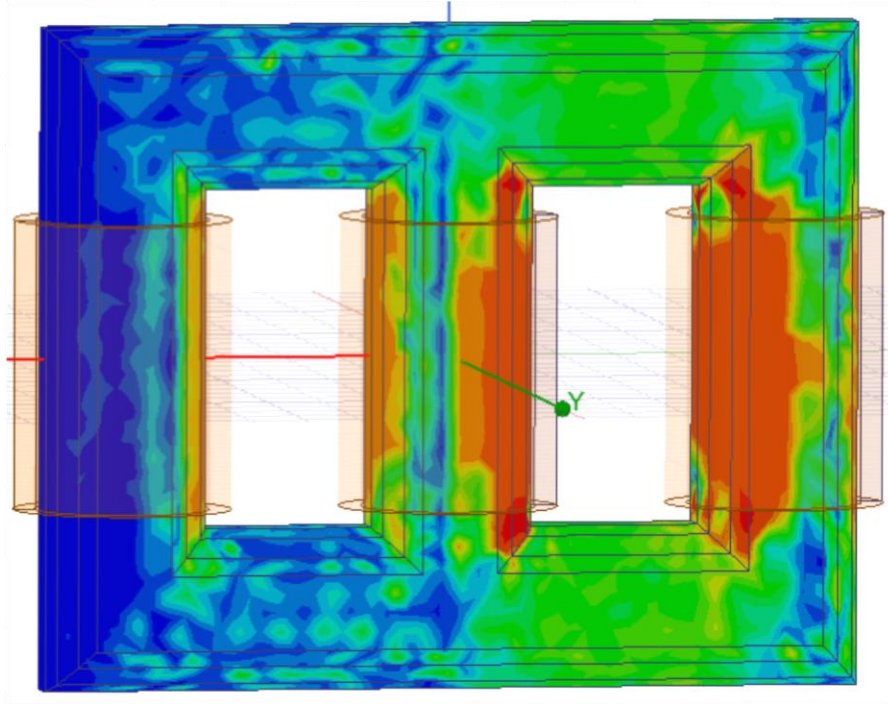




Şekil 4. M125-027S malzemesi için trafodaki manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve nüve kayıp eğrisi



Şekil 5. M530-50A malzemesi için trafodaki manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve nüve kayıp eğrisi



Şekil 6. CRGO malzemesi için trafodaki manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve nüve kayıp eğrisi

Şekil 4, 5 ve 6 karşılaştırıldığında Şekil 4'te nüve üzerindeki manyetik akı değerinin daha düşük olduğu ve bağlı olarak kayıpların daha az olduğu görülmüştür. Farklı malzemelerle detaylı bir karşılaştırma yapmak için elektromanyetik özellikler için sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Üç tasarımın analizinden elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Nüve kayıplarının karşılaştırılması

	M125-027 malzemesi	M530-50A malzemesi	CRGO malzemesi
Nüve Kaybı	12.41 kW	14.1 kW	13.3 kW
Maksimum Akı yoğunluğu	1.84 T	1.98 T	1.93 T

Bu çalışmada, transformatör çekirdeğindeki akı dağılımını, vektör potansiyelini ve akım yoğunluğunu incelemek için bir girişimde bulunulmuştur. Akı yoğunluğu yüksek olduğunda, Amorf tipte transformatör çekirdeği anormal bir anizotropi gösterir. Elektromanyetik özelliklerini incelemek için, amorf çekirdek malzemesinin anizotropisinin etkileri, yüksek akı yoğunluğu koşulları altında gözlemlenmiştir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, üç fazlı transformatörün çekirdeğinde gerçekleştirilen sayısal analizler üzerinde çalışma yapılmıştır. Transformatörün kayıplarının değerlendirilmesinde nüve malzemesinin etkisi üzerine odaklanılmıştır. Bunun için transformatörün elektromanyetik özelliklerinin incelenmesi sırasında amorf çekirdekli transformatörlerin hangi malzeme ile daha düşük kayıplara ve daha düşük elektromanyetik akı yoğunluğuna sahip olduğu belirlenmiştir. Manyetik akı yoğunluğu ve nüve kayıp eğrileri incelendiğinde en uygun nüve malzemesinin M125-027 çeliği olduğu görülmektedir. Amorf malzemeli üç fazlı transformatörlerin analizi hala araştırma aşamasındadır. Tasarım, teknoloji ve uygulama üzerine daha fazla araştırma ile güçlendirilmek istenmektedir. Bu çalışma, deneysel olarak test etmenin maliyetli ve zor olduğu bir transformatörün testlerinin sonuçlarının önceden bir program aracılığıyla tahmin edilmesi amacıyla yapılmıştır. Burada transformatörün tasarım aşamasından önce prototip sayısı azaltılarak maliyetin düşürülmesi ve testlerin sonuçlarının önceden tahmin edilebilmesi hedeflenmiştir.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını bildirmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] T. Zupan, B. Trkulja, R. Obrist, T. Franz, B. Cranganu-Cretu, and J. Smajic. “Transformer windings rlc parameters calculation and lightning impulse voltage distribution simulation”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol.52, no.3, pp.1-4, March 2016.
- [2] T. Zheng, Y.J. Zhao, J. Ying, P.L. Chen, F.F. Zhang “Design and analysis on the turn-to-turn fault protection scheme for the control winding of a magnetically controlled shunt reactor”, *IEEE Transactions*, vol. 30, no.2, pp. 967-975, 2015.
- [3] M. Yazdani-Asrami, M. Mirzaie, A.S. Akmal, No-load loss calculation of distribution transformers supplied by nonsinusoidal voltage using three-dimensional finite element analysis, *Energy*, vol. 50, no. 1, pp. 205-219, 2013.
- [4] M. Ostrenko and B. Andriienko, "Transformer impulse surges calculation by FEM coupled to circuit," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 6, pp. 1-4, June 2017, Art no. 7401804.
- [5] T. Zheng, Y.J. Zhao, J. Ying, P.L. Chen, F.F. Zhang, “Design and analysis on the turn-to-turn fault protection scheme for the control winding of a magnetically controlled shunt reactor”, *IEEE Transactions*, vol. 30, no.2, pp.967-975, 2015.
- [6] B. Qi, X. Zhao, C. Li, H. Wu, Transient electric field characteristics in oil-pressboard composite insulation under voltage polarity reversal. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, pp. 2148–2155, 2015.
- [7] Y. Özüpak, M. S. Mamıs, Realization of electromagnetic flux and thermal analyses of transformers by finite element method. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol.14, no.10, pp. 1478-1484. Doi: 10.1002/tee.22966, 2019.
- [8] Y. Özüpak, M. S. Mamıs, İ. H. Teke, “Electromagnetic Field and Total Loss Analysis of Transformers by Finite Element Method.” *International Journal of Engineering And Computer Science*, vol.8, no.1, pp. 24451-24460. Yayın No: 5774086, 2019.
- [9] P. Huang, C. Mao, D. Wang, “Electric Field Simulations and Analysis for High Voltage High Power Medium Frequency Transformer” *Energies*, vol.10, no.3, pp.371, doi:10.3390/en10030371, 2017.
- [10] M. Ostrenko, B. Andriienko, "Transformer impulse surges calculation by FEM coupled to circuit," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 6, pp. 1-4, June 2017. Art no. 7401804.
- [11] K. Sarpreet, K. Damanjeet, Analysis of effect of core material on the performance of single phase transformer using FEM, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 561, 012129, 2019. doi:10.1088/1757-899X/561/1/012129

- [12] A. Lotfi, M. Faridi, 2012. Design optimization of gapped-core shunt reactor". *IEEE*, vol. 48, no.4, pp.1673-1676
- [13] P. Beckley, *Electrical steels for rotating machines*, No. 37, IET, 2002.
- [14] M. Zare, S.M.P. Razi, H.F. Farahani and A. Khodakarami, Finite Element Analysis of Leakage Inductance of 3-Phase Shell-Type and Core Type Transformers. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 4, no. 12, pp.1721-1728. 2012.