

# TRANSFORMATOR BAĞLANTI İLETKENLERİNİN TANK KAPAĞINDA OLUŞTURDUĞU KAYIPLARIN AZALTILMASI

## REDUCTION OF LOSSES CAUSED BY TRANSFORMER CONNECTION CONDUCTORS ON THE TANK COVER

İrem Dağlı<sup>1</sup>, Necmettin Mert Koçanalı<sup>1</sup>, Necmettin Toprak<sup>2</sup>, Ramazan Altay,<sup>1</sup> Ahmet Kerem Köseoğlu<sup>1</sup>, Utkan Yurtyapan<sup>2</sup>, Seyit Ahmet Sis<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Balıkesir Elektromekanik Sanayi Tesisleri Anonim Şirketi

irem.dagli@besttransformer.com, mert.kocanalı@besttransformer.com,  
ramazan.altay@besttransformer.com, kerem.koseoglu@besttransformer.com

<sup>2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü

toprakn@itu.edu.tr  
yurtyapan19@itu.edu.tr

<sup>3</sup>Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

seyit.sis@balikesir.edu.tr

### Özet

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak transformatör içerisinde kullanılan bağlantı iletkeninin oluşturduğu kaçak akıların, tank yüzeyinde kullanılan düşük karbonlu çelik ve paslanmaz çelik malzemesinin üzerinde meydana getirdiği kayıplar karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Düşük karbonlu çelik malzemeden üretilen tank modeli yerine paslanmaz çelik malzemeden üretilen tank modeli kullanıldığında kayıplar üzerindeki etkisinin kayda değer ölçüde azaldığı gözlenmektedir. Elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında oluşan toplam kayıpların kullanılan bu yöntemlere bağlı olarak %43,57 oranında azaltılabildiği görülmektedir.

**Anahtar kelimeler:** kaçak akılar, transformatör kayıpları, transformatör, sonlu elemanlar yöntemi, düşük karbonlu çelik, paslanmaz çelik

### Abstract

In this work, the losses caused by leakage flux due to the current passing through the connection conductors are analyzed in detail. The analyses are performed for two cases; in the first case the tank cover is made of low carbon steel and in the second case it is made of stainless steel. Based on the analysis results, it is observed that when the tank is modeled by stainless steel material instead of low carbon steel material, the loss is significantly reduced. Simulation results show that the total losses can be reduced by 43.57% depending on the utilized material.

**Keywords:** stray losses, transformer losses, transformer, finite element method, mild steel, stainless steel

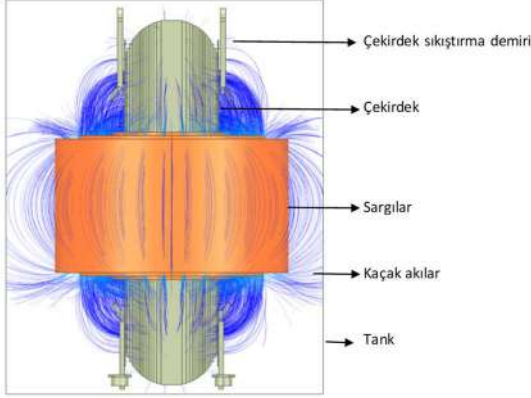
### 1. Giriş

Elektrik enerjisine olan talebin artmasıyla birlikte şebekelerin vazgeçilmez ve önemli bir ekipmanı olan transformatörlerin güç kapasiteleri artmaya başlamıştır. Güç ihtiyacı ile doğru orantılı olarak verimlilik de önemli bir konu haline gelmektedir.

Transformatörlerdeki güç kayıpları iki tipe ayrılabilir: boşa ve yükte kayıplar; boşa kayıplar trafo çekirdeğinden kaynaklanır. Yükte kayıplar, sargılardaki omik kayıplardan ve eddy kayıplarından ve kaçak akı kaynaklı oluşur. Transformatörlerde anma gücü arttıkça kaçak kayıplar önemli ölçüde artar. Tank gibi yapısal bileşenlerdeki kaçak kayıplar, transformatörün verimini önemli ölçüde azaltır [1]. Güç transformatörlerindeki yapısal bileşenlerdeki kayıplar, kaçak akılardan kaynaklanır; zamanla değişen bir akı manyetik iletken bir elemana çarptığında, içinde bir akım indükleyerek Joule kayıpları oluşturur. Güç kayıplarının yanı sıra, bu fenomenin neden olduğu yapısal bileşenlerde sıcak noktalar ortaya çıkabilir. Bu nedenlerle, nihai maliyeti gereksiz yere artırmadan kayıpları azaltmak için çeşitli teknikler vardır. Bir transformatörün önemli bir yapısal parçası, tank bölgesidir. Bu bölgedeki alan

konsantrasyonu ve aşırı ısınma transformatörün ömrüne zarar verebilir

Transformatör gücü arttıkça bu tür kayıplar da artacağı için, kaçak akıların azaltılması yüksek güçlü transformatörler için hayati öneme sahiptir. Nitekim sargılardaki ve bağlantı iletkenlerindeki kaçak akıların doğru bir şekilde belirlenmesi ve kontrol altına alınarak azaltılması transformatör alanında uzun yıllardır çalışılan önemli bir araştırma konusudur [2][3].



Şekil 1. Transformatörün Kısa Kenar Tarafından Görünümü ve Çekirdek Dışına Çıkan Kaçak Akı Dağılımı

Şekil-1 de görüldüğü üzere tank duvarı ve çekirdek sıkıştırma demirleri gibi çeşitli metal parçalar kaçak akıya maruz kalmaktadır. Eğer bu manyetik akı çok güçlüyse etrafındaki metal parçalarda girdap alanlar ve kayıplar oluşur. Bu kayıplar bölgesel ısınmalara sebep olur. Bu kayıpların ve dolayısıyla kayıp kaynaklı oluşan ısının doğrudan matematiksel olarak hesaplanabilmesi çok zordur. En az hatayla doğru sonuç alınabilmesi için sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilmesi gerekmektedir. Buradaki en önemli husus, transformatör tasarımını yaparken doğru bir hesaplama yöntemi ile tasarımı ortaya çıkarmaktır. Transformatör doğru bir şekilde tasarlandıktan sonra meydana gelmeye devam eden kayıpların azaltılması için yine sonlu elemanlar yöntemi üzerinden sistematik analizler yaparak optimal malzeme türü ve yerleşiminin belirlenmesi gerekmektedir.

Literatürde kaçak akıların neden olduğu kayıpları azaltmak için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Kaçak akıları azaltmak için en çok kullanılan yöntem tank duvarlarına monte edilen manyetik silisli saçlar ile şöntleme yaparak kaçak akıların üzerine toplanmasını sağlamaktır [4][5][6].

Alüminyum malzeme kullanılarak da kaçak akılar lokal olarak azaltılabilir. Yüksek akım geçen bağlantı iletkenleri ya da sargılara yakın olan köşe noktalarda alüminyum malzeme kullanılması önerilmektedir. Bu sayede lokal olarak oluşabilecek kayıpların ve ısınmanın önüne geçiş olunur [7][8].

Diğer bir yöntem ise, karbon çeliği yerine paslanmaz çelik malzeme kullanılarak kayıpları azaltmaktır. Bu yöntem yardımıyla de toplam kayıpların önemli bir ölçüde azaldığı görülmektedir [9][10].

Yüzey derinliği, ya da diğer bir ifade ile deri kalınlığı, ise elektromanyetik alanlara maruz kalan bir iletkenin davranışını açıklamada çok önemli bir parametredir. İyi bir iletkenin yüzeyindeki tüm alanlar, birkaç deri derinliğine nüfuz ettikçe hızla azalır. Deri etkisi formülü (1) de yer almaktadır. [3]

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \times 50 \times \mu_0 \mu_r \times \epsilon}} \quad (1)$$

$\mu_r$  = Malzemenin geçirgenliği (henrys/m)

$\mu_0$  = Havanın geçirgenliği (henrys/m)

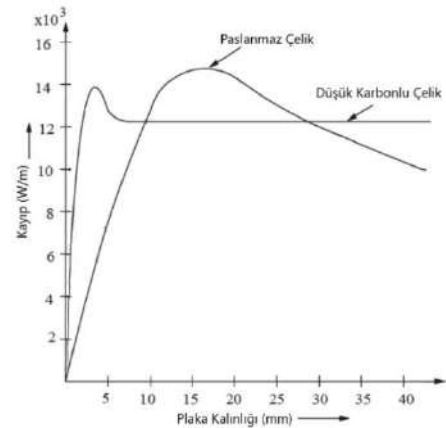
$\epsilon$  = etkenlik (mhos/m).

$\delta$  = Deri etkisi (m)

Bir transformatörün içindeki yapısal elemanların çoğu ya yumuşak çelikten ya da paslanmaz çelikten yapılmıştır. Göreceli geçirgenliğe sahip tipik bir yumuşak çelik malzeme sınıfı için 50Hz'de;  $\mu_r = 100$  ve iletkenliği  $7 \times 10^6$  mho/m, deri etkisi 2,69mm'dir. Girdap akımları ve kayıpları sadece yüzeyde yoğunlaştığından, levha kalınlığının birkaç yüzey derinliğinin ötesinde artırılması, girdap akımlarına sunulan etkin direnci değiştirmez ve dolayısıyla kayıp sabit kalır [3].

Manyetik olmayan paslanmaz çelik, yüksek akımlar nedeniyle alanların yakınında yapısal bileşenler için yaygın olarak kullanılır. Göreceli geçirgenliği 1 ve iletkenliği  $1,136 \times 10^6$  mho/m olan tipik bir paslanmaz çelik malzeme sınıfı için, deri etkisi derinliği 50 Hz'de 66,78 mm'dir. Diğer bir fark ise kalınlık arttıkça kaybın yumuşak çelik malzemeden daha yüksek, ancak manyetik çelik levhaninkinden daha düşük sabit bir değere yaklaşmasıdır [3].

Şekil-2'de görüldüğü gibi; sargılardaki belirli akım değerleri için levha kalınlığındaki artışla birlikte yumuşak çelik ve paslanmaz çelik levhalardaki kayıp değerleri sırasıyla 12,2 kW/m ve 5,7 kW/m'ye sabitlenir.



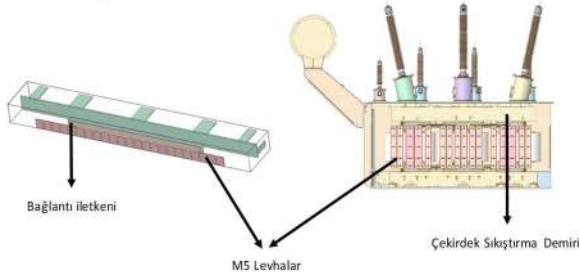
Şekil 2. Düşük Karbonlu Çelik ve Paslanmaz Çelik Plaka Kalınlığının Kayıplar Üzerindeki Etkisi [3]

Şekil 2’den görüldüğü üzere daha düşük kalınlık değerleri için paslanmaz çelik levhadaki kaybın yumuşak çelik levhadan daha az olduğu açıktır. Bu nedenle, bir yapısal bileşen paslanmaz çelikten yapıldığında, daha düşük bir kayıp değeri elde etmek için kalınlığı mümkün olduğunca küçük olmalıdır. Bu nedenle, yumuşak çelik bir levha paslanmaz çelik bir levha ile değiştirilmek istenirse paslanmaz çelik levha kalınlığı 10 mm’den daha düşük olmalıdır.

Bu çalışmada, ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak 9275 A akım geçen bağlantı iletkenlerinin sebep olduğu kaçak akıların tank yüzeyinde meydana getirdiği manyetik alan analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonrasında, ANSYS Mechanical kullanılarak kayıpların tank yüzeyi ve elemanları üzerindeki termal dağılımları analiz edilmiştir. Bu analizler ile tank yüzeyinde oluşan kayıpların değerlerinin ve konumlarının belirlenerek bu kayıpların azaltılması için yapılabilecek değişikliklerin sonuçları sunulmaktadır.

## 2. Analiz Modeli

Çalışma yapılan güç transformatörü 640MVA – 550kV gerilim seviyesindedir ve 3-boyutlu çizimi Şekil-3 verilmektedir. Bağlantı iletkenlerinin sebep olduğu kaçak akıların tank kapak ve yan duvarları, metal bileşenler ve domlar üzerinde oluşacak hot-spot noktasının doğru şekilde belirlenebilmesi için birleştirilmiş elektromanyetik-termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Elektromanyetik analizler ANSYS Maxwell Çözücü içerisinde, termal analizler ise ANSYS Mechanical Termal Çözücü içerisinde çözdürülmüştür. ANSYS Maxwell yazılımı ile elde edilen kayıp değerleri ve dağılımı çıktıları, ANSYS Mechanical yazılımı içerisinde girdi olarak kullanılmıştır.



**Şekil 3.** Transformatör üzerinde Bağlantı İletkenlerinin ve M5 Levhaların Konumlandırıldığı Lokal Alanların Gösterimi

3-D tam model üzerinden çalışmak yerine yalnızca bağlantı iletkenlerinin etkilediği durumu ve bu duruma uygulanacak çözümü bulabilmek için Şekil-4’te yer aldığı gibi lokal bir alan seçilmiştir. Analiz çalışmasında ANSYS Maxwell programının özelliği gereği malzemeler tanımlanmıştır. Transformatör analizinde ekran saç malzemesi olarak M5 kullanılırken, sıkıştırma demiri ve tank için sırasıyla düşük karbonlu çelik ve paslanmaz çelik kullanılmıştır. İletkenler ise bakır malzeme ile modellenmiştir. Duvarda ve kapakta bulunan M5 ekranların laminasyon yönü koordinat

düzlemi referans alındığında Y eksenine yönünde yapılmıştır. Ekranlar 25mm kalınlığındadır.

Ağaç gerilim (AG) bağlantı iletkenlerinin her biri Şekil-4’te görüldüğü şekliyle 9275 A ile uyarılmıştır.



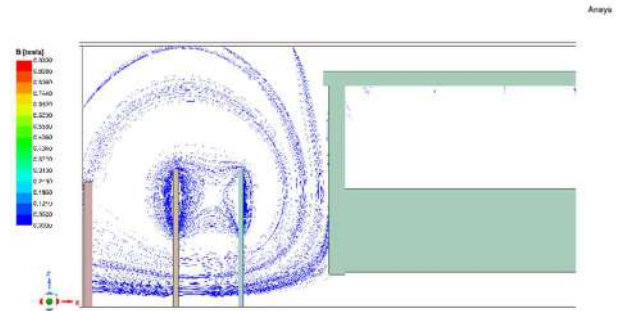
**Şekil 4.** AG Bağlantı İletkeni Üzerinde Uyarım Akımının Gösterimi

**Çalışma boyunca toplam 2 durum değerlendirilmiştir. Bu durumlar;**

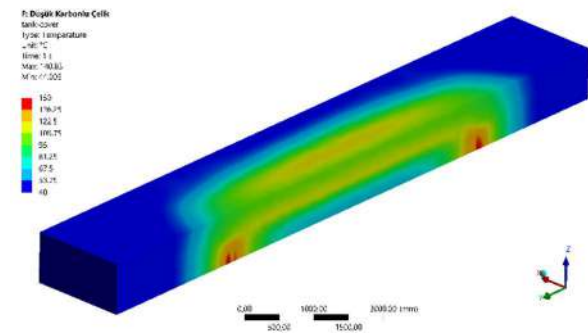
**1.Durum :** Düşük Karbonlu Çelik Malzemesi İçerisindeki Yüksek Akım Geçen İletkenin Etkileri

**2.Durum :** Paslanmaz Çelik Tank Malzemesi İçerisindeki Yüksek Akım Geçen İletkenin Etkileri

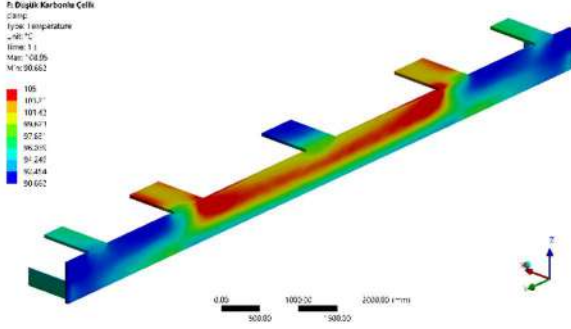
### 2.1.1. Düşük Karbonlu Çelik Malzemesi Kullanılması Durumu



**Şekil 5.** Düşük Karbonlu Çelik Malzeme İçerisindeki, Yüksek Akım Geçen İletkenin Çevresinde Oluşturduğu Manyetik Alan Dağılımı

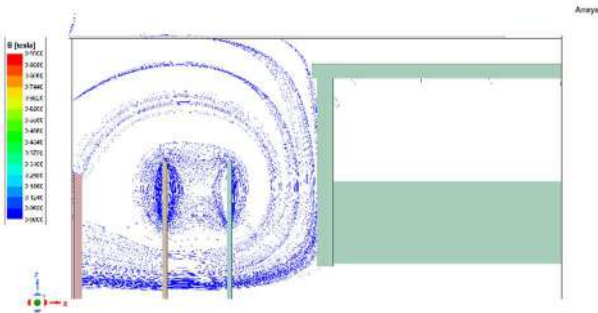


**Şekil 6.** Düşük Karbonlu Çelik Tank Malzemesi Kullanıldığında Tank Üzerindeki Sıcaklık Dağılımı

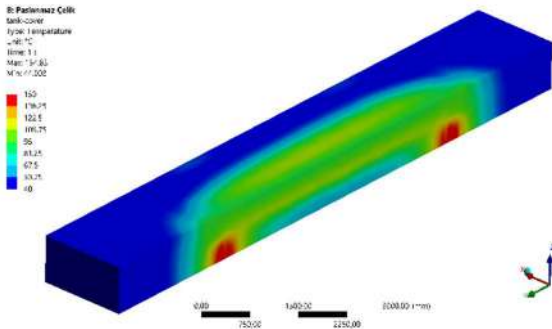


Şekil 7. Düşük Karbonlu Çelik Tank Malzemesi Kullanıldığında Çekirdek Sıkıştırma Demiri Üzerindeki Sıcaklık Dağılımı

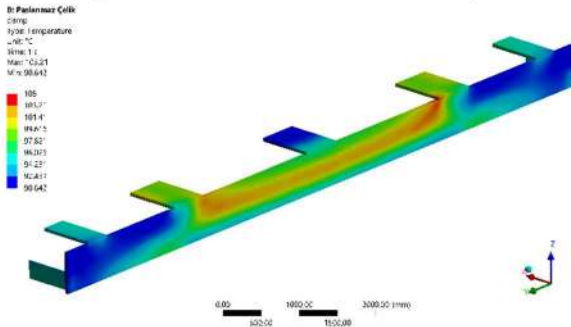
### 2.1.2. Paslanmaz Çelik Tank Malzemesi Kullanılması Durumu



Şekil 8. Paslanmaz Çelik Kazan Malzemesi İçerisindeki, Yüksek Akım Geçen İletkenin Çevresinde Oluşturduğu Manyetik Alan Dağılımı



Şekil 9. Paslanmaz Çelik Tank Malzemesi Kullanıldığında Tank Üzerindeki Sıcaklık Dağılımı



Şekil 10. Paslanmaz Çelik Tank Malzemesi Kullanıldığında Çekirdek Sıkıştırma Demiri Üzerindeki Sıcaklık Dağılımı

Tablo 1. Yüzey kayıp değerleri

	Durum-1	Durum-2
Tank kapağındaki kayıp değeri (kW)	5,35	0,19
Tank duvarında oluşan kayıp değeri (kW)	7,82	6,19
Sıkıştırma demiri kayıp değeri (kW)	4,32	3,49
Toplam kayıp değeri (kW)	17,49	9,87

### 3. Sonuçlar

Transformatör yükte çalışması sonucu ortaya çıkan kaçak akımlar transformatörlerin metal parçalarında kayba sebep olmaktadır. Bu kayıp sonucunda bölgesel ısınmalar olabileceği gibi transformatörün sürekli çalışma anındaki sıcaklığını da arttırmaktadır. Sıcaklığın artması transformatör ömrünü belirlemektedir. Bu yüzden sıcaklık dağılımının bilinmesi ve sıcaklık değerlerinin azaltılması oldukça önemli araştırma konusudur.

Bu çalışmada Düşük karbonlu çelik ve paslanmaz çelik tank malzemesinin kaçak kayıp bileşenleri üzerindeki etkisini anlamak için bir dizi 3-D FEM simülasyonu yapılmıştır. Simülasyonlar, malzemelerinin geçirgenliğine bağlı olduğunu, doygunluk nedeniyle geçirgenliğin azalmaması için yeterli kalınlığa sahip olmaları gerektiğini göstermiştir.

Düşük karbonlu çelik malzemeden üretilen tank modeli yerine paslanmaz çelik malzemeden üretilen tank modeli kullanıldığında kayıplar üzerindeki etkisinin kayda değer ölçüde azaldığı gözlenmektedir. Elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında oluşan toplam kayıpların kullanılan bu yöntemlere bağlı olarak %43,57 oranında azaltılabildiği görülmektedir.

### 4. Kaynaklar

- [1] Karsai, K., vd. *Studies in Electrical and Electronic Engineering*, 25. Cilt., 1987.
- [2] Del Vecchio, R.M., vd. *Transformer design principles: Third edition*, 2017.
- [3] Kulkarni, S.V., ve Khaparde, S.A., *Transformer Engineering - Design and Practice: Second Edition*, 2017.
- [4] Yongbin, C., vd. "Study on eddy current losses and shielding measures in large power transformers", *IEEE Transactions on Magnetics*, 30. Cilt, s. 3068-3071, 1994.
- [5] Moghaddami, A., vd. "Reduction of Stray Loss in Power Transformers Using Horizontal Magnetic Wall Shunts", *IEEE Transactions on Magnetics*, 53. Cilt, s. 1-7, 2017.

- [6] Tsili, M.A., vd. "Geometry optimization of magnetic shunts in power transformers based on a particular hybrid finite-element boundary-element model and sensitivity analysis", *IEEE Transactions on Magnetics*, 41. Cilt, s.1776-1779, 2005.
- [7] Olivares, J.C., vd. "Reducing losses in distribution transformers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18. Cilt, s. 821-826, 2003.
- [8] Allan, D.J., vd. "Some effects of eddy currents in aluminium transformer tanks", *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 120. Cilt, s. 681-685, 1973.
- [9] Kumbhar, G.B., vd. "Reduction of Loss and Local Overheating in the Tank of a Current Transformer", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25. Cilt, s. 2519-2525, 2010.
- [10] Kulkarni, S.V., ve Khaparde, S.A., "Stray loss evaluation in power transformers-a review", *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2000, s. 2269-2274.