



## Cer Transformatörlerinde Elektriksel Parametrelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi

Serenay ÇÜRÜKOVA KALE<sup>1</sup>, Yunus Berat DEMİROL<sup>2</sup>, Oluş SÖNMEZ<sup>1</sup>,  
Mehmet Aytaç ÇINAR<sup>3</sup>, Bora ALBOYACI<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Sönmez Transformatör Sanayi ve Ticaret A.Ş., Kocaeli, Türkiye

<sup>2</sup> GENETEK Güç & Enerji Ltd. Şti., Kocaeli Üniversitesi Teknopark, Kocaeli, Türkiye

<sup>3</sup> Kocaeli Üniversitesi, İzmit Meslek Yüksek Okulu, Kocaeli, Türkiye

<sup>4</sup> Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

\*aytac@kocaeli.edu.tr

(Alınış/Received: 28.04.2022, Kabul/Accepted: 17.06.2022, Yayımlama/Published: 31.07.2022)

**Öz:** Demiryolu sistemlerinde kullanılan elektrikli trenlerin hareket gücünü sağlamak için kullanılan motor sürücülerini cer transformatörleri beslemektedir. Cer transformatörleri lokomotiflerin altında veya üstünde, boyutları sınırlı bir alana yerleştirilmektedir. Bunun yanında tren sistemlerinde kullanılmakta olan ekipmanların güç ihtiyaçlarını karşılayabilmek için farklı gerilim seviyelerinde çok sayıda sargı yapıları cer transformatörlerinde bulunmaktadır. Demiryolu sistemlerinde sürdürülebilirlik, verim ve işletme güvenliğinin yüksek seviyede olması için cer transformatörlerinin tasarım parametrelerinin özel olarak incelenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda tasarım aşamasında detaylı analizlerin gerçekleştirilmesi ve standartlar referans alınarak değerlendirilmesi önemli olmaktadır. Cer transformatörlerinde kısa devre empedansı, inrush akımları, kazan kayıpları, çekirdek kayıpları gibi kritik öneme sahip elektriksel parametrelerin doğru bir şekilde hesaplanması teorik yöntemler ile her zaman mümkün olmamakta veya çok zahmetli olmaktadır. Bu durumda sonlu elemanlar analizi yönteminin birçok açıdan avantajı bulunmaktadır. Sonlu elemanlar analizleri ile yüksek doğrulukta ve kısa sürede hesaplamalar yapılabilmektedir. Bu çalışmada örnek bir cer transformatörünün elektriksel parametreleri Ansys Electronics Suite sonlu elemanlar analizi yazılımı ile hesaplanmıştır. Hesaplanan parametreler ile ilgili olarak özet bilgiler verilmiş, analiz adımları açıklanmıştır. Bu kapsamda demiryolu sistemlerinde kullanılan trenlerin kritik elemanlarından biri olan cer transformatörlerinin elektriksel analizi için sonlu elemanlar yönteminin gerekliliği ifade edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Cer transformatörü, Sonlu elemanlar analizi, Kısa devre empedansı, Manyetik indüksiyon, İnrush akımı, Eddy kayıpları.

### Analysis of Electrical Parameters in Traction Transformers by Finite Element Method

**Abstract:** Traction transformers feed the motor drivers used in electric locomotives in railway systems. Traction transformers are placed in a limited area above or below the locomotives. Due to the power needs of the equipment used in train systems, there are many winding structures at different voltage levels in traction transformers. Therefore, the design parameters of traction transformers should be specifically evaluated for providing a high level of sustainability, efficiency, and operational safety in railway systems. It is crucial to carry out detailed analyses during the design phase and evaluate them according to standards. Accurate calculation of critical electrical parameters such as short circuit impedance, inrush currents, tank losses and core losses in traction transformers is not always possible or very laborious with theoretical methods. In this case, the finite element analysis method has many advantages. With finite element analysis, calculations can be made with high accuracy and in a short time. This study calculated the electrical parameters of a sample traction transformer with Ansys Electronics Suite finite element analysis software. Summary information about the calculated parameters is given, and the analysis steps are explained. In this context, the necessity of the finite element method for the electrical analysis of traction transformers, which is one of the most critical components in railway systems, has been expressed.

Atıf için/Cite as: S. Çürükova Kale, Y.B. Demirel, O. Sönmez, M.A. Çınar, B. Alboyacı, "Cer transformatörlerinde elektriksel parametrelerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 66-78, July. 2022 doi: 10.47072/demiryolu.1110515

**Keywords:** Traction transformer, Finite element analysis, Short circuit impedance, Magnetic induction, Inrush current, Eddy loss.

## 1. Giriş

Transformatörlerin dizayn parametreleri hem elektrik şebekesinin güvenli bir şekilde işletilebilmesi için, hem de transformatörün kullanıldığı makinelerde sürdürülebilirlik ve güvenilirlik için son derece önemli olmaktadır. Trenlerin hareket etmesi için gerekli olan cer gücünün üretilmesi amacıyla cer transformatörleri kullanılmaktadır. Cer transformatörleri elektrik enerjisini katener sistemden alıp uygun gerilim dönüşümünü gerçekleştirdikten sonra trenin motor sürücülerine aktarmaktadır. Cer transformatörlerinin çeşitli elektriksel parametreler açısından bazı özellikleri sağlaması gerekmektedir. Bu parametrelerden bazıları kısa devre empedansı, sargı dönüştürme oranları, nüve indüksiyonu, çekirdek kayıpları, kısa devre kuvvetleri, inrush akımı, harmonikli yüklenme durumunda oluşan kayıplar ve metal yapısal bileşenlerde oluşan kayıplar olarak sıralanabilir. Cer transformatörleri lokomotifin altında veya üzerinde dar bir alanda konumlandırıldığı için tasarım aşamasında bazı sınırlamalar olmakta ve tasarımın bu sınırlamalara uygun olarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Elektriksel parametrelerin tasarım aşamasında doğru bir şekilde hesaplanması, oluşabilecek istenmeyen durumların önüne geçmektedir.

Cer transformatörleri standart dağıtım veya güç transformatörlerine göre karmaşık yapıda olabilmektedir. Farklı nüve tiplerinde ve farklı sargı yapılarında üretilen cer transformatörlerinin elektriksel parametreleri özel olarak incelenmelidir. Bunun yanında trenlerde farklı güç ihtiyaçlarını karşılamak için cer transformatörlerinde birbirinden bağımsız, seri veya paralel bağlantıda farklı sargılar bulunmaktadır. Bu sargılara örnek olarak cer sargısı, ısıtma sargısı, yardımcı sargı ve filtre sargısı gibi sargılar verilebilir. Trenlerin tasarımına ve güç ihtiyacına bağlı olarak sargıların tasarımı değişebilmektedir. Bu kapsamda üretilen her cer transformatörü için detaylı analiz ve incelemelerin yapılması gerekmektedir. Gerek cer transformatörlerinin karmaşık yapısından dolayı gerek transformatörlerde gerçekleştirilmesi gereken hesaplamaların kompleks yapısından dolayı analizler için teorik yöntemler yetersiz kalabilmekte veya çok uzun süreler alabilmektedir. Bundan dolayı uygun modelleme çalışmaları yapılarak sonlu elemanlar yöntemi gibi çözüm yöntemleri ile analizler kısa zamanda yüksek doğruluk ile gerçekleştirilebilmektedir.

Literatürde, cer transformatörlerinin çeşitli tasarım parametreleri ile çalışma koşullarının incelendiği çeşitli çalışmalara rastlanmaktadır. Bu bağlamda, farklı sargı dizilimleri [1] ve sargı tiplerinin [2] kısa devre empedanslarına ve sargı endüktans değerlerine [3] olan etkileri incelenmiş ve deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır.

[4-6]'da kaçak reaktans değerlerinin analitik olarak hesaplanmasına yönelik farklı yöntemler verilmiştir. Bununla birlikte bu yöntemler ile elde edilen sonuçların cer transformatörleri için doğruluk düzeyinin çok yüksek olmadığı görülmekte ve benzetim çalışmalarının önemi ortaya çıkmaktadır.

Transformatörlerin tasarım parametrelerinin [7, 8] ve fiziksel boyutların [9] transformatörün manyetik devresi ve güç kayıplarına olan etkileri incelenmiştir. Ek olarak, [10]'da çalışma koşullarında sargılar arasında meydana gelen kısa devre olayları [11]'de ise farklı yüklenme durumları incelenerek inrush akımları ve kısa devre kuvvetlerinin etkileri belirlenmiştir. [12, 13]'te harmonikli akım dalga şekli ile çalışma durumları incelenmiş ve güç kayıplarının değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. [14, 15]'te sırasıyla cer transformatörünün çevresinde meydana gelen elektromanyetik alanlar ve transformatörün termal çalışma koşulları incelenmiştir.

Çalışma koşullarında transformatörlerinde meydana gelen yapısal bozulmalar ve etkileri incelenmiş olup bu bozulmaların tespiti amacıyla kısa devre testi [16, 17], SFRA [18, 19], FRA [20-23], ultrasonik ölçüm elemanlarının kullanımı [24] ve verici-alıcı antenlerin transformatör içerisine yerleştirilmesi [25, 26] gibi yöntemler açıklanmıştır.

[27-29]'da ise cer transformatörlerinin çalışma sürekliliği ve güvenilirliğinin sağlanması bakımından kısmi boşalma olayları ve izolasyon şartları incelenerek sağlık durumunun tespiti gerçekleştirilmektedir.

Bunun yanında demiryolu sistemlerinde sonlu elemanlar analiz yöntemi ile çeşitli konularda gerçekleştirilmiş termal [30] ve yapısal analiz [31, 32] çalışmaları da bulunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, örnek bir cer transformatörü Ansys Electronics Suite sonlu elemanlar analizi yazılımında modellenmiş ve çeşitli analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu makale içerisinde hem sayfa sayısını azaltmak hem de okuyucuyu sıkmamak adına gerçekleştirilen tüm analizlerde çok detaylı veriler gösterilmemiştir. Gerçekleştirilen tüm analizler başlı başına bir çalışma konusu olmakla beraber, bu çalışma içerisinde sonlu elemanlar yönteminin kabiliyetleri, üstünlükleri ve cer transformatörleri için gerçekleştirilebilecek olan analizler gösterilmiştir.

## 2. Metot

Elektrik sistemlerinde kullanılan ekipmanların performanslarının tasarım kriterlerine göre üretim aşamasından önce değerlendirilebilmesi günümüzde işletme güvenliği, verimlilik ve sürdürülebilirlik için kritik öneme sahiptir. Bu kapsamda teorik olarak hesaplanması oldukça zor veya mümkün olmayan parametrelerin hesaplanması için sonlu elemanlar analizi yönteminin kullanılması günümüzde vazgeçilmez olmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile tüm model geometrilerinde deri, yakınlık, eddy etkilerine bağlı olarak kayıplar, akım dağılımları, geçici durumlar, kuvvetler, kaçak reaktans gibi birçok elektriksel parametre hesaplanabilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile, ilgili geometri üzerinde sonlu sayıda bir ağ yapısı oluşturulmakta ve bu ağ yapısı üzerinde Denklem 1.-Denklem 4. çözülmektedir [33].

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4)$$

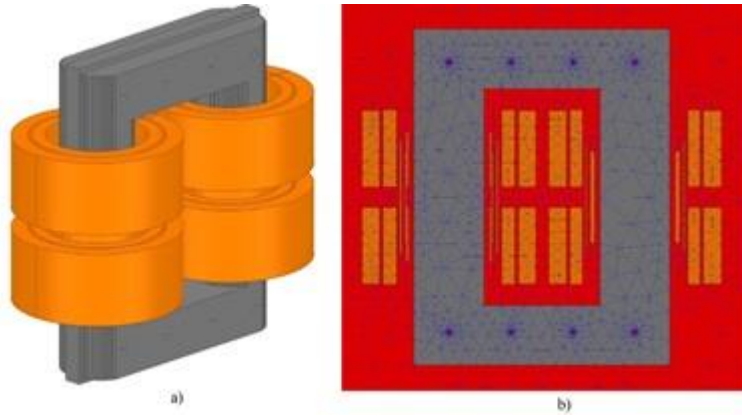
Burada,  $H$  manyetik alan şiddeti vektörü (A/m),  $J$  akım yoğunluğu vektörü (A/m<sup>2</sup>),  $D$  elektrik akı yoğunluğu vektörü (C/m<sup>2</sup>),  $t$  zaman (s),  $E$  elektrik alan şiddeti vektörü (V/m),  $B$  manyetik alan yoğunluğu vektörü,  $\rho$  yük yoğunluğu (C/m<sup>2</sup>) olarak tanımlanmaktadır.

### 2.1. Modelleme çalışmaları

Sonlu elemanlar yönteminde analizi gerçekleştirilecek olan cer transformatörü modeli SolidWorks programında 3 boyutlu olarak çizilmiştir ve Şekil-1 üzerinde gösterilmiştir.



SolidWorks programında çizilen modelin aktif kısımları (sargılar ve nüve) sonlu elemanlar programı içerisine aktarılmıştır (Şekil-2 (a)). Analizi gerçekleştirilecek olan parametrelerin özelliklerine göre sonlu elemanlar programının kullandığı model geometrisi düzlemine ve çözücüyü değiştirmek gerekmektedir. Değerlendirilmesi hedeflenen parametrelerin hesabına yönelik olarak kullanılan matematiksel denklemlerin gerekliliklerine göre manyetik analiz çözücülerinden transient, eddy veya magnetostatik çözüm yöntemleri üç boyutlu, kartezyen veya silindirik model geometrilerinde kullanılabilir.



Şekil 2. Sonlu elemanlar programına aktarılan cer transformatörü modeli a) Aktif kısımların 3D görünümü b) 2D XY koordinat düzleminde ağ yapısı

## 2.2. Uyarma devresi

Analizlerde incelenen cer transformatörünün sargı bilgileri Tablo-1 üzerinde gösterilmiştir. Analiz modelinde fiziksel olarak bulunan her sargı, bir adet endüktansı ifade etmektedir. Bu endüktanslar program içerisinde external devre ile uygun şekilde bağlanıp ilgili analizler çalıştırılmıştır. Transient analizlerde uyarma gerilimi eksponansiyel olarak yapılmıştır, bu sayede geçici durum atlanmıştır (Şekil-4).

**Tablo 1.** Cer transformatörü sargı verileri

Sargı ismi	Gerilim (V)	Güç (kVA)	Açıklama
Yüksek gerilim	25000	1703	Dört adet paralel
Cer	1050	1413	Dört adet bağımsız
Filtre	1126	500	Bir adet
Yardımcı	370	180	Bir adet
Isıtma	1500	800	İki adet 1000 V ve 1500 V kademeli

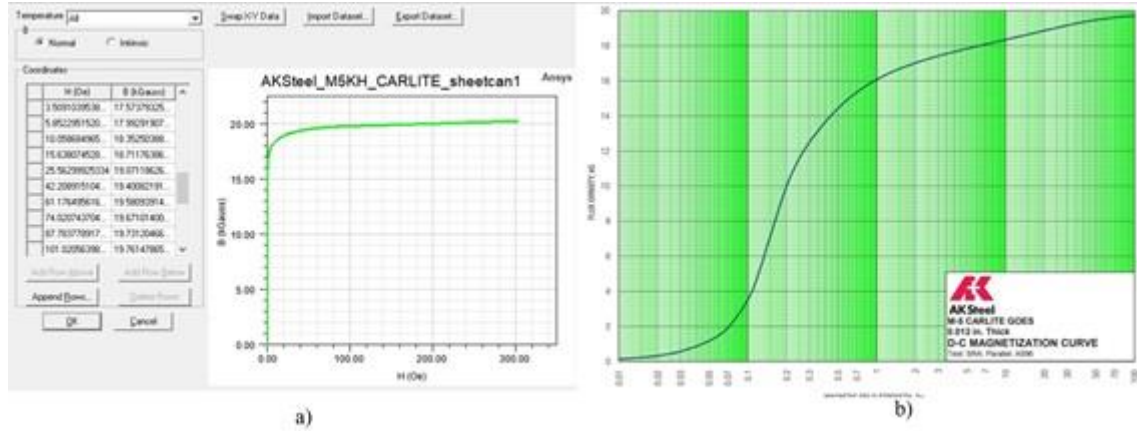
### 2.3. Ağ yapısı

Sonlu elemanlar yazılımında oluşturulan ağ yapısının yoğunluğu hesaplanması hedeflenen parametrenin özelliklerine göre değişmektedir. Örneğin harmonikli durumlarda oluşan kayıpları incelerken eddy etkisine bağlı olan kayıpların hesaplanabilmesi için deri kalınlığı içerisinde yüksek miktarda dört yüzlü bulunması gerekmektedir. Benzer şekilde kazan kayıpları hesaplanırken oluşturulan ağ yapısının kazan duvarının deri kalınlığı içerisinde kalması gerekmektedir. Farklı analizler için farklı ağ yapısı oluşturulması gerekmektedir. Ansys Electronic Suite yazılımı ile adaptif ağ yapısı oluşturulabilmektedir. Bunun yanında 11 adet farklı ağ yapısı oluşturma ayarı ile yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilebilmektedir.

Oluşturulan ağ yapısının yoğunluğuna göre analiz süresi önemli derecede değişkenlik göstermektedir. Örnek olarak kısa devre empedansının hesaplandığı üç boyutlu model için toplam 260123 dörtyüzlü oluşturulmuştur ve analizler %0.809 enerji hatası ile gerçekleştirilmiştir. Analizlerin gerçekleştirildiği iş istasyonunda “128 Gb 1866 Mhz” bellek, “NVIDIA Quadro K2000” ekran kartı ve iki adet “Intel(R) Xenon(R) CPU E5-2683 v3 işlemci kullanılmıştır.

### 2.4. Malzeme parametreleri

Analizlerde kullanılan malzemelerin elektriksel parametreleri analiz sonuçları için kritik önem taşımaktadır. Malzemelerin iletkenlik değeri, göreceli manyetik geçirgenlik değeri gibi elektriksel parametrelerin doğru bir şekilde programa tanımlanması gerekmektedir. Sıcaklığa bağlı parametre tanımlaması da gerçekleştirilebilmektedir. Lineer olmayan B-H (Şekil-3) veya B-P gibi eğriler ne kadar yüksek örnekleme ile programa aktarırsa sonuçlar o kadar güvenilir olmaktadır.

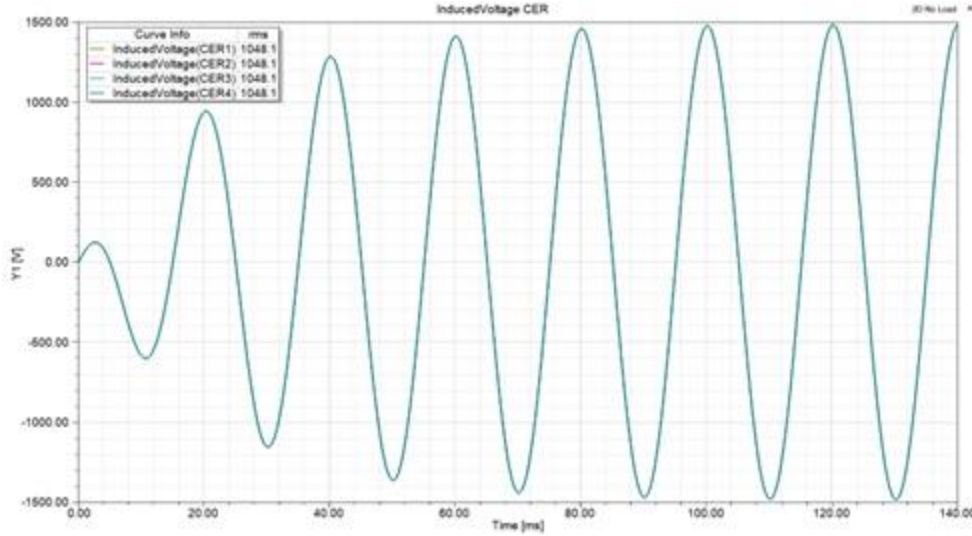


Şekil 3. B-H eğrisi a) Programa tanımlanan veri b) Üretici kataloğunda bulunan eğri [34]

## 3. Bulgular

Bu çalışma kapsamında incelenen cer transformatörünün sargı dönüştürme oranı, nüve manyetik induksiyonu, çekirdek kayıpları, boşta çalışma akımı, kısa devre empedansı, kazan kayıpları, harmonikli durumda oluşan sargı kayıpları ve inrush akımı incelenmiştir. İncelenen parametreler hakkında bu bölümde bilgiler verilmiştir.

### 3.1. Sargı dönüştürme oranları

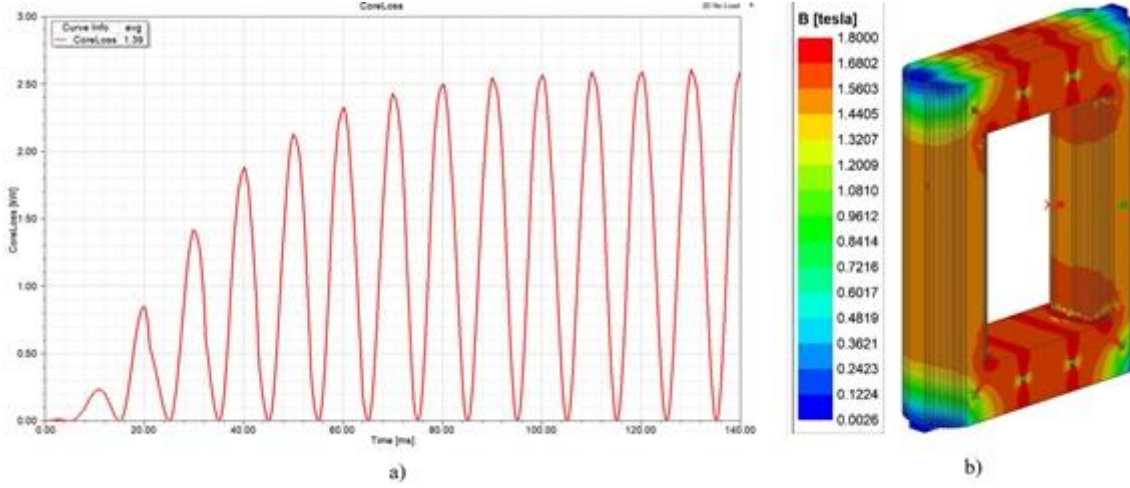


Şekil 4. Sargı dönüştürme oranlarının doğrulanması için analiz sonucu

Cer transformatörü için analizlerde, modelleme gerçekleştirilip sargı bağlantıları oluşturulduktan sonra ilk olarak gerilim dönüştürme oranları doğrulanmıştır. Gerilim dönüştürme oranı doğrulandıktan sonra diğer analizlere devam edilmiştir. Sargı dönüştürme oranlarının doğrulanmasına yönelik analiz üç boyutlu, iki boyutlu kartezyen eksen veya iki boyutlu silindirik eksen sisteminde transient veya eddy akımı çözücülerinde gerçekleştirilebilmektedir. Analitik olarak dönüştürme oranı sarım sayısı oranlarına göre hesaplanabilmektedir fakat buna göre sargı dirençleri, kaçak reaktans, çekirdek kayıpları ve B-H eğrisinin etkisi ihmal edilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile bu parametreler de değerlendirilmeye alınmaktadır. Bunun yanında sargı bağlantılarının doğruluğu ve sarım yönleri de teyit edilmektedir. İncelenen model için cer sargısı gerilimleri Şekil-4 üzerinde gösterilmiştir.

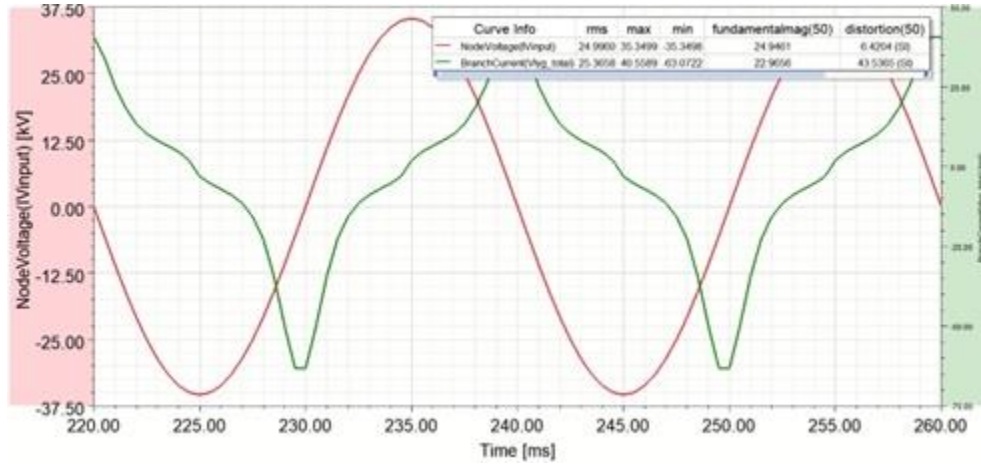
### 3.2. Nüve manyetik indüksiyonu ve çekirdek kayıpları

Nüve indüksiyonu programa tanımlanan B-H eğrisine göre, çekirdek kayıpları ise B-P eğrisine göre hesaplanmaktadır [35]. Şekil-5 (a) üzerinde çekirdek kayıpları, Şekil-5 (b) üzerinde nüve indüksiyonu gösterilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile çekirdek üzerinde manyetik alanın yoğunlaştığı, kayıpların yükseldiği bölgeler tespit edilebilmektedir. Cer transformatörlerinde bulunan karmaşık sargı yapılarının oluşturduğu manyetik indüksiyon yüksek doğruluk ile hesaplanabilmektedir.



Şekil 5. a) Çekirdek kayıpları b) Nüve indüksiyonu

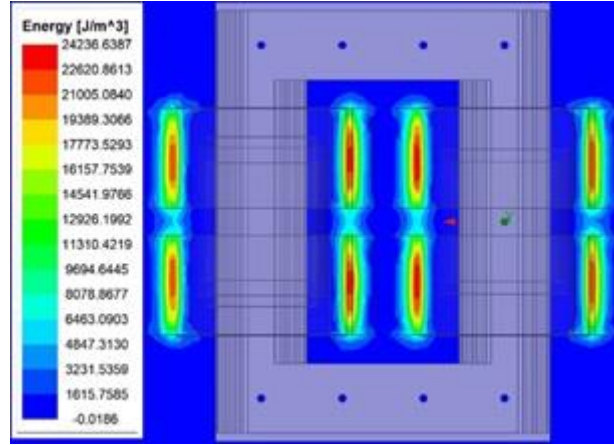
### 3.3. Boşta çalışma akımı



Şekil 6. Sonlu elemanlar analizi sonucunda bulunan boşta çalışma akımı

Boşta çalışma akımının dalga formu sonlu elemanlar analizi ile hesaplanabilmektedir. Boşta çalışma akımı cer transformatörü enerjilendirildikten sonra geçici durumun bitmesi halinde çekilen akım formudur. Bu akım formu nüve özelliklerine, uyarma gerilimine ve modelin geometrik yapısına bağlıdır [36]. Uygun analiz ayarları ile birlikte Şekil-6 üzerinde gösterilen boşta çalışma akımı bulunabilmektedir.

### 3.4. Kısa devre empedansı

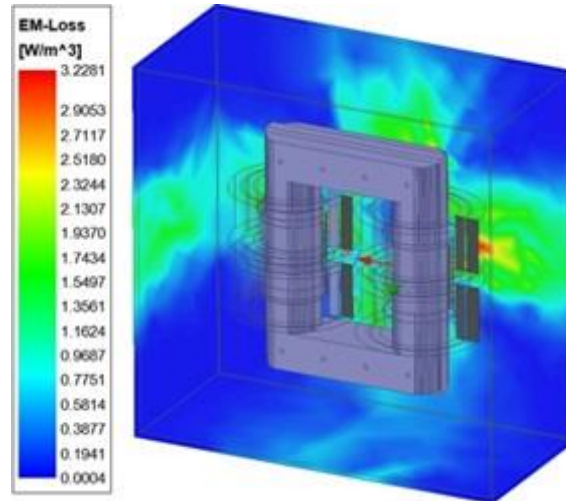


Şekil 7. Kısa devre empedansı hesabında oluşan enerji dağılımı

Kısa devre empedansı cer transformatörleri için en önemli parametrelerden biridir. Cer transformatörlerinin kısa devre empedansı gereksinimleri genellikle transformatör üreticisinden özel olarak istenmektedir. Bu sebepten dolayı henüz tasarım aşamasındayken transformatörün kısa devre empedansı değerinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi önem taşımaktadır. IEEE C57.12.00 standardına göre transformatörlerde belirlenen kısa devre empedansı değerine göre  $\pm 10\%$  tolerans ile üretim kabul edilmektedir [37].

Kısa devre empedansı basit sargı yapıları için teorik yöntemler ile hesaplanabilmektedir [4-6]. Cer transformatörleri gibi çok sayıda sargı içeren, paralel veya seri sargı gruplarından oluşan, nüve bacalarına dağılmış sargıları bulunan modeller için sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen analizler yüksek güvenilirlikte sonuçlar vermektedir. Bundan dolayı kısa devre empedansı hesaplanırken sonlu elemanlar yöntemi kullanmanın birçok avantajı bulunmaktadır. Kısa devre empedansı hesabında oluşan enerji dağılımı Şekil-7 üzerinde gösterilmiştir.

### 3.5. Kazan kayıpları



Şekil 8. Kazan kayıpları

Kazan kayıpları sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanabilmektedir [38, 39]. Bu hesaplamalar yapılırken cer transformatörünün tankı üzerinde deri kalınlığının içerisinde kalan ağ yapısı oluşturulup bu ağ yapısı içerisinde eddy analizi gerçekleştirilebilir [40]. Fakat bu yöntem çok



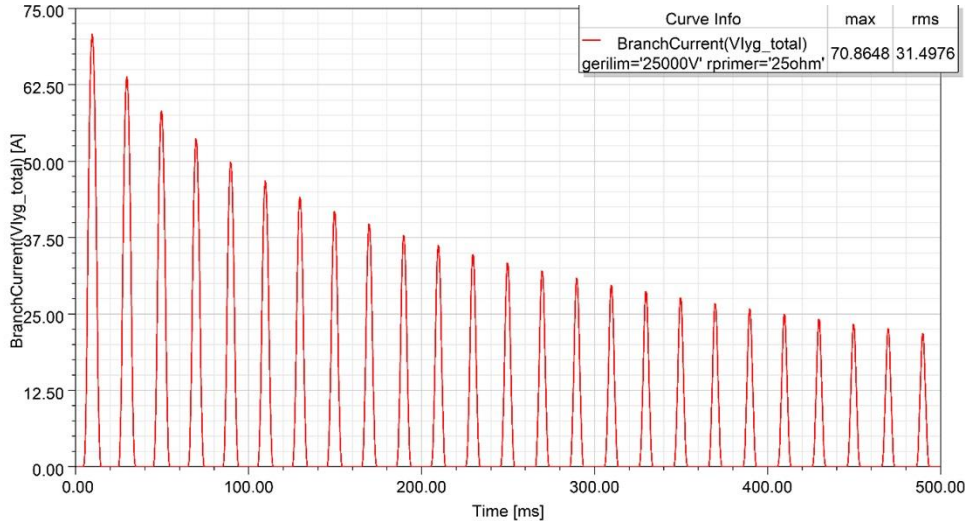
önemli derecede zaman almaktadır. Bu yöneme alternatif olarak ‘impedance boundry’ yöntemi de kullanılabilir [41]. Şekil-8 üzerinde kazan kayıplarının hesaplanmasına yönelik bir analiz sonucunda oluşan kayıp dağılımı gösterilmiştir.

### 3.6. Harmonikli durumlarda oluşan kayıplar

Cer transformatörünün harmonikli akımlar ile yüklenmesi durumunda sargılarda oluşan eddy kayıpları sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanabilmektedir. Bunun için transformatör sargısı içerisinde bulunan iletkenlerin tek tek modellenmesi gerekmektedir. Sargılar tek tek modellendikten sonra uygun ağ yapısı tanımlanarak transient veya eddy analizi yapılabilir. Transient analizlerde harmonik spektrumu uyartım dalgası içerisine tanımlanıp bir tek bir analizde tüm harmonik bileşenlerinin oluşturduğu kayıp değerleri hesaplanabilmektedir. Bu uygulama için analiz zaman adımının, yüksek frekanslı bileşenlerin etkisinin ihmal edilmeyeceği seviyede küçük olması gerekmektedir. Bunun yanında eddy analizi ile harmonik spektrumu içerisinde bulunan tüm bileşenler için ayrı ayrı analizler ile hesaplanıp kayıp değerleri süper pozisyon teoremine göre toplanabilmektedir.

Özellikle akım formunun harmonik bileşenleri içermesi durumunda bu analizlerin yapılması gerekmektedir. Analizler sonucunda sargı üzerinde oluşan hot-spot noktalar görülebilmekte [42, 43] yüksek kayıp durumunda revizyonlar gerçekleştirilebilmektedir. Bunun yanında yüksek güçlü sargılarda paralel iletkenler kullanılması durumunda iletkenler arasında oluşan akım dağılımları bu analizler ile hesaplanabilmektedir. Paralel iletkenlerin dengesiz yüklenmesi durumunda transpozisyon yapılması durumunun etkisi incelenip performans değerlendirmesi gerçekleştirilebilmektedir.

### 3.7. Inrush akımı



Şekil 9. Cer transformatörü için inrush akımı

Transformatörler enerjilendirildiğinde tasarım parametrelerine bağlı olarak inrush akımları çekmektedir (Şekil-9). Transformatörün mekanik tasarımı inrush akımlarında zarar görmeyecek şekilde olmalıdır. Bundan dolayı inrush akımlarının hesaplanması önemli olmaktadır. Inrush akımları sargı parametrelerine, nüve parametrelerine, enerjilendirme anındaki faz açısına, transformatörün sekonderinin yük durumuna göre değişmektedir [30]. Inrush akımının hesaplanmasına yönelik olarak teorik formüller bulunmakla beraber bu formüllerin bazı durumlarda yetersiz olduğu görülmektedir. Bu kapsamda sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen hesaplamalarda yüksek doğruluk ile sonuçlar elde edilmektedir.

#### 4. Sonuç

Cer transformatörlerinin çok sayıda sargı içermesi ve kompleks yapılarından dolayı elektriksel parametrelerinin teorik yöntemler ile hesaplanması zahmetli olmaktadır. Bu kapsamda sonlu elemanlar analizi yöntemi hesaplama hızı ve doğruluk açısından önemli derecede avantaj sağlamaktadır. Bu çalışmada örnek bir cer transformatörünün elektriksel parametrelerinin sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanması gösterilmiştir. Sargı dönüştürme oranı, nüve manyetik indüksiyonu, çekirdek kayıpları, boşta çalışma akımı, kısa devre empedansı, kazan kayıpları, harmonikli yüklenme durumlarında oluşan kayıplar ve inrush akımını hesaplayamaya yönelik analiz çalışmalarından bahsedilmiştir. Bahsedilen analizlerin hepsi kendi içerisinde çok detaylı analizler olduğundan dolayı bu çalışma içerisinde sadece özet bilgiler gösterilmiştir. Sonuç olarak cer transformatörlerinin elektriksel parametrelerinin analizi için sonlu elemanlar yönteminin gerekliliği gösterilmiş, örnekler üzerinden açıklanmıştır.

#### Kaynakça

- [1] Z. Ye *et al.*, “A calculation method to adjust the short-circuit impedance of a transformer,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 223848–223858, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3042983.
- [2] D. Azizian and M. Bigdeli, “Leakage inductance calculations in different geometries of traction transformers,” *ECTI Trans. Electr. Eng. Electron. Commun.*, vol. 12, no. 2, pp. 28–34, 2014.
- [3] B. G. Park, T. S. Kim, K. J. Lee, R. Y. Kim, and D. S. Hyun, “Magnetic-field analysis on winding disposition of transformer for distributed high-speed train applications,” in *IEEE Trans. Magn.*, 2010, vol. 46, no. 6, doi: 10.1109/TMAG.2010.2043646.
- [4] W. H. Ali, M. N. O. Sadiku, S. L. Abood, *Fundamentals of Electric Machines: A Primer with MATLAB*. Boca Raton, USA: CRC Press, 2019.
- [5] S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde. *Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics*. Boca Raton, USA: CRC Press, 2017.
- [6] K. Dawood, B. Alboyaci, M. A. Cinar, O. Sonmez, “A new method for the calculation of leakage reactance in power transformers”, *J. Electr. Eng. & Tech.*, vol. 12, no. 4, pp. 1883-1890, 2017, doi: 10.3390/JEET.2017.12.5.1883.
- [7] I. Sitar, M. Bilo, and D. Vale, “New design of traction transformers for fixed installations,” in International Colloquium Transformer Research and Asset Management, 2009, pp. 1–10.
- [8] I. Sitar and M. Jurković, “Modern design of EMU traction transformers,” in *Automation in transportation*, 2014, pp. 234–237.
- [9] D. Liu, B. Xiong, Z. Cheng, and F. Liu, “Effects of axial gap length between disc windings on magnetic fields and power losses of evaporative cooling traction transformers,” in *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Nanjing, China, 2020, pp.1-7.
- [10] C. Yang, Y. Ding, H. Qiu, and B. Xiong, “Analysis of turn-to-turn fault on split-winding transformer using coupled field-circuit approach,” *Processes*, vol. 9, no. 8, pp. 1–13, 2021, doi: 10.3390/pr9081314.
- [11] D. Azizian, “Nonlinear behavior analysis of split-winding dry-type transformer using a new star model and a coupled field-circuit approach,” *Arch. Electr. Eng.*, vol. 65, no. 4, pp. 773–787, 2016, doi: 10.1515/aee-2016-0054.
- [12] J. Smajic, G. Di Pino, C. Stemmler, W. Mönig, and M. Carlen, “Numerical study of the core saturation influence on the winding losses of traction transformers,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 3, pp. 1–4, 2015, doi: 10.1109/TMAG.2014.2360918.
- [13] J. El Hayek, “Influence of harmonics on traction transformers losses,” in *ICEMS 2003 – Proc. 6th Int. Conf. on Elect. Mach. and Syst.*, Beijing, China, 2003, vol. 1, pp. 347–350.
- [14] I. Sitar, Z. Janic, and B. Cucic, “External magnetic field density of main traction transformer for EMU,” *COMPEL - Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 31, no. 2, pp. 716–725, 2012, doi: 10.1108/03321641211200680.
- [15] S. Yuan *et al.*, “Modelling method for thermal field of turbulent cooling dry-type on-board traction transformer in EMUs,” *IEEE Trans. Transp. Electr.*, vol. 8, no. 1, pp. 298–311, 2021, doi: 10.1109/TTE.2021.3097876.

- [16] A. Palani, S. Santhi, S. Gopalakrishna, V. Jayashankar, “Real-time techniques to measure winding displacement in transformers during short-circuit tests”. *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 2, pp. 726-732, 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2007.911110.
- [17] M. Wang, A. J. Vandermaar, K. D. Srivastava, “Review of condition assessment of power transformers in service”. *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 18, no. 6, pp. 12-25, 2002, doi: 10.1109/MEI.2002.1161455.
- [18] J. R. Secue, E. Mombello, “Sweep frequency response analysis (SFRA) for the assessment of winding displacements and deformation in power transformers”. *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 6, pp. 1119-1128, 2008, doi: 10.1016/j.epsr.2007.08.005
- [19] N. Swamy, U. Savadamuthu, “Sweep frequency response based statistical approach for locating faults in transformer windings using sliding window technique”, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 194, no. 1, pp. 1-8, 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107061.
- [20] Zhao Z, Tang C, Islam S. Interpretation of transformer winding deformation fault by the spectral clustering of FRA signature. *Int. J. Electr. Power & Energy Syst.*, vol. 130, no. 1, pp. 1-8, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.106933.
- [21] CIGRE, *Advances in the interpretation of transformer frequency response analysis (FRA)*. Technical Note 812, 2020
- [22] L. Zhou, J. Jiang, W. Li, Z. Wu, S. Gao, L. Guo, H. Liu, “FRA modelling for diagnosing axial displacement of windings in traction transformers”, *IET Electr. Power Appl.*, vol. 13, no. 12, pp. 2121-2127, 2019, doi: 10.1049/iet-epa.2019.0362.
- [23] M. F. M. Yousof, C. Ekanayake, T. K. Saha, “Frequency response analysis to investigate deformation of transformer winding”. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 4, pp. 2359–2367, 2015, doi: 10.1109/TDEI.2015.004750.
- [24] S. Naiqiu, Z. Can, L. Fang, L. Qisheng, Z. Lingwei, “Study on ultrasonic measurement device for transformer winding deformation”. in *IEEE Conference on Power System Technology*, Kunming, China, 2002. pp. 1401-1404.
- [25] M. A. Hejazi, G. B. Gharehpetian, G. Moradi, H. A. Alehosseini, M. Mohammad, “On-line monitoring of transformer winding axial displacement and its extent using scattering parameters and k-nearest neighbor method”, *IET Gener. Trans. & Distr.*, vol. 5, pp. 824-832, 2011, doi: 10.1049/iet-gtd.2010.0802.
- [26] S. A. Mousavi, M. Bigdeli, S. M. Mousavi, “A feasibility study on application of positioning sensors to online detect of the transformer winding axial displacement”. in *IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications*, Kuching, Malaysia, 2013. pp. 1-3.
- [27] X. Li et al., “Partial discharge characteristics of oil-paper insulation for on-board traction transformers under superposed inter-harmonic AC voltages,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 27, no. 1, pp. 240–248, 2020, doi: 10.1109/TDEI.2019.008404.
- [28] B. Jia, P. Zhang, and Z. Li, “Aging life assessment of oil-paper insulation of traction transformer under shock load,” in *Asia Energy and Electrical Engineering Symposium*, Chengdu, China, 2020, pp. 1045–1050.
- [29] L. Zhou et al., “Experimental studies on the estimated life of oil-immersed insulation paper in traction transformers,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 36, no. 5, pp. 2646–2657, 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3024839.
- [30] A. Ünal, N. Akkuş, and S. Kandil, “Demiryolu aracı disk balatalarının tasarımında yüksek sıcaklığın neden olduğu fren zayıflama probleminin belirlenmesi için sonlu elemanlar yöntemi yaklaşımı,” *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 1, no. 15, pp. 134–144, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1027982.
- [31] F. Çeçen and B. Aktaş, “Lamine CFRP donatılı traverslerin deneysel ve sonlu eleman analizleriyle incelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 1, no. 14, pp. 26–38, 2021, doi: 10.47072/demiryolu.869946.
- [32] M. E. Arı and İ. Esen, “Design of a metro train and structural analysis of the metro vehicle body by finite element method,” *Railway Engineering*, vol. 1, no. 15, pp. 30–45, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1018663.
- [33] V. Shrikrishna, S. V. Kulkarni, and S. A. Khaperde, *Transformer engineering: design and practice*. CRC Press, 2004.
- [34] AkSteel, “AkSteel Product Catalog,” 2022. [Online]. Available: [https://www.aksteel.de/files/downloads/AK\\_CARLITE\\_GOES\\_BV\\_060412.pdf](https://www.aksteel.de/files/downloads/AK_CARLITE_GOES_BV_060412.pdf).
- [35] M. A. Cinar, “Evaluation of the technical and economic feasibility of mixed grade cores in transformer design according to EN50588-1,” *Teh. Vjesn.*, vol. 28, no. 4, pp. 1136–1144, 2021, doi: 10.17559/TV-20200402220152.

- [36] T. R. Specht, "Transformer magnetizing inrush currents," *Electr. Eng.*, vol. 70, no. 4, pp. 324–324, 1951, doi: 10.1109/ee.1951.6437380.
- [37] *IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*, IEEE Std C57.12.00-2015 (Revision of IEEE Std C57.12.00-2010), 2016.
- [38] M. A. Çınar, B. Alboyacı, S. Çürükova, O. Sönmez, and R. Yapıcı, "Calculation of optimum dimensions of magnetic shunt elements to reduce stray losses on transformer tank walls," *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, vol. 32, no. 4, pp. 1337–1346, 2017, doi: 10.17341/gazimmfd.369855.
- [39] Y. Li, S. L. Ho, N. Wang, and R. Y. Tang, "Numerical analysis of eddy current field in the ascending flange for the bushings and tank wall of a large transformer", in *Joint Int. Conf. Power Syst. Tech. And IEEE Power India Conference*, New Delhi, India, 2008, pp. 1-7.
- [40] C. Guérin and G. Meunier, "Surface impedance for 3D non-linear eddy current problems - application to loss computation in transformers," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 32, no. 3 PART 2, pp. 808–811, 1996, doi: 10.1109/20.497364.
- [41] M. A. S. Masoum, P. S. Moses, and A. S. Masoum, "Derating of asymmetric three-phase transformers serving unbalanced nonlinear loads," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 4, pp. 2033–2041, 2008, doi: 10.1109/TPWRD.2008.923057.
- [42] D. Pejovski, K. Najdenkoski, and M. Dugalovski, "Impact of different harmonic loads on distribution transformers," in *Procedia Engineering*, 2017, vol. 202, pp. 76–87, doi: 10.1016/j.proeng.2017.09.696.
- [43] J. E. Holcomb, "Distribution transformer magnetizing inrush current," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng. Part III Power Appar. Syst.*, vol. 80, no. 3, 1961, doi: 10.1109/AIEEPAS.1961.4501117.

### Özgeçmiş



#### Serenay ÇÜRÜKOVA KALE

Elektrik mühendisliği lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesi'nde 2013 yılında, yüksek lisans eğitimini ise 2017 yılında aynı üniversitede 'Transformatörlerin Kazan Duvarlarında Meydana Gelen Kayıpların Azaltılması için En Uygun Şönt Eleman Boyutunun Belirlenmesi' konulu tez çalışması ile tamamlamıştır. 2013 yılından beri Sönmez Transformator Sanayi ve Ticaret A.Ş. 'de tasarım müdürü olarak görev yapmaktadır. İlgili alanına giren çalışma konuları, transformatörler ve bunlara dair hesapların geliştirilmesidir.

E-Posta: s.curukova@sonmeztrafo.com.tr



#### Yunus Berat DEMİROL

Elektrik mühendisliği lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesi'nde 2020 yılında tamamlamıştır. İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir. 2020 yılından beri GENETEK Güç & Enerji Ltd. Şti.'nde elektrik mühendisi olarak transformatörler başta olmak üzere güç sistemi ekipmanlarının sonlu elemanlar analizi ile elektriksel parametrelerinin hesaplanması alanında çalışmaktadır.

E-Posta: yunusberat.demirol@genetek.com.tr



#### Oluş SÖNMEZ

Elektrik mühendisliği alanında lisans eğitimini 2009 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi'nde, yüksek lisans eğitimini ise 2012 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde tamamladı. Halen İstanbul Teknik Üniversitesi'nde doktora eğitimine devam etmektedir. Transformator ve reaktör tasarımı, elektriksel ve termal modellenmesi ve benzetimi konu başlıklarında araştırmalar gerçekleştirmektedir.

E-Posta: osonmez@sonmeztrafo.com.tr

**Mehmet Aytaç ÇINAR**

Elektrik mühendisliği alanında lisans, yüksek lisans ve doktora eğitimini sırasıyla 1999, 2002 ve 2008 yıllarında Kocaeli Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Halen Kocaeli Üniversitesi İzmit Meslek Yüksekokulu'nda Dr.Öğr.Üyesi unvanıyla görev yapmaktadır. Transformatör ve reaktörler başta olmak üzere elektrik makinalarının tasarımı, optimizasyonu, modellenmesi ve benzetimlerinin gerçekleştirilmesi konularında çalışmaktadır.

E-Posta: aytac@kocaeli.edu.tr

**Bora ALBOYACI**

Elektrik mühendisliği lisans eğitimini 1995 yılında Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi'nde, yüksek lisans ve doktora eğitimlerini ise sırasıyla 1995 ve 1998 yıllarında Kocaeli Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Halen aynı üniversitede Elektrik Tesisleri ABD'da öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. 2008-2010 yılları arasında Milli Güç Kalitesi Projesi'nde ODTÜ'de doktora sonrası araştırmacı olarak görev yapmıştır.2012 yılından bu yana Kocaeli Üniversitesi Teknoparkta bulunan GENETEK Güç & Enerji Ltd. Şti.'nde Ar-Ge Müdürlüğü görevini yürütmektedir. Uzmanlık alanları enerji dağıtım sistemleri, güç kalitesi ve manyetik dizayn uygulamalarıdır.

E-Posta: alboyaci@kocaeli.edu.tr

**Beyanlar:**

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Yazar katkıları belirtilmemiştir.