



Cer Transformatörlerinde Boşta Çalışma Kayıplarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Hesaplanması

Serenay ÇÜRÜKOVA KALE¹, Oluş SÖNMEZ¹, Yunus Berat DEMİROL^{*2}, Elif SAKALLIOĞLU², Bora ALBOYACI³

¹ Sönmez Transformatör San. ve Tic. A.Ş., Kocaeli, Türkiye

² Genetek Güç Enerji Ltd. Şti., Kocaeli Üniversitesi Teknopark, Kocaeli, Türkiye

³ Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

* yunusberat.demirol@genetek.com.tr

(Alınış/Received: 23.11.2023, Kabul/Accepted: 29.12.2023, Yayımlama/Published: 31.01.2024)

Öz: Elektrikli lokomotiflerde kullanılmakta olan cer transformatörleri tren sisteminde hareket gücü için gerekli olan gerilim dönüşümünü gerçekleştirmektedir. Trenlerde kritik öneme sahip olan bu elemanların tasarımı aşamasında dikkat edilmesi ve üretimden önce hesaplanması gerekli olan parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler transformatörün kısa devre empedansı, sargıların doğru akım direncine bağlı olarak oluşan kayıplar, sargılarda oluşan girdap akımı kayıpları, transformatörün harmonikli akımlar ile yüklenmesi durumunda oluşan kayıplar, inrush akımı, kazan kayıpları, boşta çalışma kayıpları, kısa devre kuvvetleri, kapasitans değerleri, elektrik alan dağılımları olarak sıralanabilir. Bu parametrelerin tasarım aşamasında hesaplanması sürdürülebilirlik ve güvenilirlik için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada örnek bir cer transformatöründe boşta çalışma kayıpları sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmıştır. Hesaplamalar gerçekleştirilirken cer sisteminde izin verilen maksimum ve nominal gerilim seviyeleri değerlendirilmeye alınmıştır. Daha sonra analiz sonuçları, üretilen cer transformatörü üzerinde gerçekleştirilen test çalışmaları ile doğrulanmıştır. Bu kapsamda, cer transformatörlerinin tasarımında hesaplanması gerekli olan parametrelerden biri olan boşta çalışma akımı ve boşta çalışma kaybı hakkında bilgi verilip hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamaları tasarım aşamasında gerçekleştirilmesinin önemi vurgulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Cer transformatörü, Sonlu elemanlar analizi, Boşta çalışma kaybı, Boşta çalışma akımı, Maxwell denklemleri

Calculation of No-Load Losses in Traction Transformers with Finite Element Method

Abstract: Traction transformers used in electric locomotives perform the voltage conversion required for traction power in the train system. Some parameters need to be considered during the design phase of these elements, which are critical in trains and need to be calculated before production. These parameters can be listed as short circuit impedance of the transformer, losses due to direct current resistance of the windings, eddy current losses in the windings, losses occurring when the transformer is loaded with harmonic currents, inrush current, tank losses, no-load losses, short circuit forces, and capacitance values. Calculating these parameters at the design stage is critical for sustainability and reliability. In this study, no-load losses in a sample traction transformer calculated with the finite element method. While performing the calculations, the maximum and nominal voltage levels allowed in the traction system were considered. After, the analysis results were confirmed with the test results performed on the produced traction transformer. In this context, information was given, and calculations were made about the no-load current and no-load loss, which are one of the parameters that need to be calculated in the design of traction transformers. The importance of performing these calculations at the design stage is emphasized.

Keywords: Traction transformer, Finite element analysis, No-load loss, No-load current, Maxwell's equations

Atıf için/Cite as: S. Çürükova Kale, O. Sönmez, Y.B. Demiroğlu, E. Sakallıoğlu, B. Alboyacı, "Cer transformatörlerinde boşta çalışma kayıplarının sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanması," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 19, pp. 171-183, Jan. 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1395174

1. Giriş

Raylı sistemlerde kullanılmakta olan elektrikli lokomotiflerin hareket gücü için çeşitli elektriksel ekipmanlar kullanılmaktadır. Bu ekipmanların tasarım ve işletme parametreleri sistemlerin sağlıklı çalışması için önemli olmaktadır. Elektrikli lokomotifler pantograf elemanı ile yüksek gerilim hattına bağlanmaktadır. Pantograftan gelen elektrik enerjisi yüksek gerilim kablosu ile lokomotifin üstünde veya altında konumlandırılmış olan cer transformatörüne gelmektedir. Bu aşamada cer transformatörünün yüksek gerilim buşingine kablo başlığı ile bağlantı yapılmaktadır. Daha sonra cer transformatörü uygun gerilim dönüşümünü gerçekleştirip transformatörün sekonder çıkışları konvertör elemanlarına gitmektedir [1]. Konvertör elemanları ise uygun dalga formunda gerilim oluşturup cer motorlarını veya yardımcı sistemleri beslemektedir. Bu sayede hareket gücü ve yardımcı ekipmanların çalışması için gerekli olan güç elde edilmektedir. Bu aşamalarda her bir sistemin kendi içerisinde dikkatle hesaplanması gerekli olan elektriksel parametreler bulunmaktadır. Pantograf elemanında elektrik alan dağılımları ve mekanik hasarlar [2], yüksek gerilim kablolarında izolasyon sorunları, kablo başlıklarında kısmi boşalmalar [3], transformatörlerde aşırı ısınmalar, konvertörlerde yüksek harmonik sorunları gibi problemler görülebilmektedir. Bundan dolayı bu ekipmanların tasarımı aşamasında işletme parametrelerine uygunluğunun hesaplanması ve değerlendirilmeye alınması gerekmektedir. Bu, sistem güvenilirliği ve sürdürülebilirlik için kritik öneme sahiptir.

Literatürde cer transformatörlerinde hesaplanması gerekli olan elektriksel parametrelerin incelendiği [4], elektrikli lokomotiflerde kullanılmakta olan bara ve transformatörlerin oluşturduğu manyetik alanların incelendiği [5], Metro AC cer güç dağıtım sistemlerinde yük paylaşımının modellendiği [6], demiryolu elektrifikasyon sistemlerinde katener sistem tasarımlarının [7], topraklama ve temas gerilimlerinin incelendiği [8], pantograf boynuz hatalarının derin öğrenme ve görüntü işleme teknikleri ile tespit edildiği [2], metro hattında araç kapasitesinin artırılmasının orta gerilim ve cer sistemleri üzerine etkilerinin incelendiği [9], raylı ulaşım sisteminde tahrik amaçlı katı hal transformatörü kullanımının incelendiği [10], elektrikli demiryolu hatlarında kompanzasyon sisteminin incelendiği [11], dizel elektrikli lokomotiflerde cer sistemlerinin gelişimi üzerine bir incelemenin gerçekleştirildiği [12] çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

Elektrikli trenlerde kullanılmakta olan cer transformatörlerinin tasarım parametreleri kritik önem taşımaktadır. Cer transformatörleri tasarlanırken kısa devre empedansı, kazan kayıpları, sargı eddy kayıpları, inrush akımı, boşta çalışma kayıpları, kısa devre kuvvetleri gibi parametreler dikkate alınmalıdır. Literatürde alternatif akım sistemine bağlı olan transformatörlerde yüksek frekanslı harmoniklerin filtrelenmesi için cer transformatörleri ile LCL filtreleme uygulamasının incelendiği [13], [14], cer transformatörlerinde analitik olarak empedans hesaplamalarının gerçekleştirildiği [15], cer transformatörlerinin etrafında oluşan manyetik alanların incelendiği [16], AC demiryolu elektrifikasyon sistemlerinde EMC incelemelerinin gerçekleştirildiği [17] çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

Cer transformatörlerinde boşta çalışma durumunun incelendiği çalışmaların literatürde sınırlı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada örnek bir cer transformatörünün farklı işletme gerilimlerine göre boşta çalışma kayıpları ve boşta çalışma akımları incelenmiştir. Bu amaç ile Ansys Electronic Suite sonlu elemanlar yazılımı ile modelleme ve analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucu olarak cer transformatörlerinde boşta çalışma durumunda oluşan elektriksel parametreler değerlendirilmiş ve analizlerin gerekliliği vurgulanmıştır.

Tren üreticileri için lokomotiflerde kullanılan cer transformatörlerinin elektriksel parametreleri sistemin diğer elemanlarını da etkilediğinden dolayı önemli olmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen hesaplamalar da transformatörün elektriksel parametrelerinin hesabı kısmında katkı sağlamaktadır. Bu kapsamda, tasarım aşamasında boşta çalışma durumu için kayıp ve akım

değerlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanabileceği gösterilmiştir ve bu alanda literatüre katkı sağlanmıştır.

1.1. Demiryolu sistemlerinde gerilim seviyeleri

Demiryolu sistemlerinde bölgelere göre farklı frekans ve gerilim seviyeleri kullanılmaktadır. Farklı sistem frekansları için gerilim seviyeleri Tablo 1. üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 1. Farklı sistem frekansları için demiryolu elektrik sistemi gerilimleri [18]

Sistem frekansı (Hz)	En düşük kalıcı olmayan gerilim (U _{min2}) - (V)	En düşük kalıcı gerilim (U _{min1}) - (V)	Nominal gerilim (V)	En yüksek kalıcı gerilim (U _{max1}) - (V)	En yüksek kalıcı olmayan gerilim (U _{max2}) - (V)
16,7	11000	12000	15000	17250	18000
50	17500	19000	25000	27500	29000

BS EN 50163 standardına göre, gerilimin U_{min1} ile U_{min2} arasında olduğu süre 2 dakikayı geçmemelidir. Gerilimin U_{max1} ile U_{max2} arasında olduğu süre 5 dakikayı geçmemelidir. Normal şartlarda gerilim U_{min1} ile U_{max1} arasında olmalıdır. Buna göre, 25 kV nominal gerilim seviyesi için tasarlanan cer transformatörleri 19 kV ile 27,5 kV arasındaki gerilimler ile işletilmeye uygun olmalıdır. 15 kV nominal gerilim seviyesi için tasarlanan cer transformatörleri ise 12 kV ile 17,25 kV arasındaki gerilimler ile işletilmeye uygun olmalıdır. Transformatör tasarımında nüve indüksiyonu ve buna bağlı olarak boşa çalışma kaybı ile boşa çalışma akımı gerilim seviyesine göre değişecektir. Tasarım aşamasında değişken gerilimler değerlendirilmeye alınmadığında transformatörde ısınma sorunları oluşabilmektedir.

1.2. Cer transformatörleri için elektriksel parametrelerin üretim toleransları

Cer transformatörlerinin sağlaması gerekli olan elektriksel parametrelerin üretim toleransları bulunmaktadır. Transformatör tasarlanıp üretildikten sonra gerçekleştirilen test sonuçları bu sınırların içerisinde kalmalıdır. Bu toleranslar Tablo 2. üzerinde gösterilmiştir. Buna göre verilen tolerans değerleri, nominal değerlerden sapmayı göstermektedir. Örnek olarak, toplam kayıpların 10 kW olarak hesaplandığı bir transformatör için üretim sonrasında kayıp değerinin 11 kW olarak ölçülmesi kabul edilebilir, 11kW üzeri ise kabul edilemez bir durumdur. Empedans için ise, örnek olarak %20 değeri hesaplanan bir trafo için üretim sonrasında %18-%22 arasında ölçülmesi uygun olmaktadır.

Tablo 2. Cer transformatörlerinde elektriksel parametrelerin üretim toleransları [19]

Özellik	Tolerans
Sargı direnci	≤10%
Toplam kayıplar	+10%
Komponent kayıpları	+15%
Gerilim dönüştürme oranı	±0,5%
Empedans	±10%
Boşa çalışma akımı	+30%

Cer transformatörlerinin elektriksel parametrelerinin üretim toleransları içerisinde kalması önemli olmaktadır. Bundan dolayı belirtilen elektriksel parametrelerin üretimden önce hesaplanması gerekmektedir. Boşa çalışma akımı da bu parametrelerden biridir.

1.3. Transformatörlerde nüve indüksiyonu, boşa çalışma kayıpları ve akımları

Cer transformatörlerinin lokomotiflerdeki kullanım amacı, katener sistemden alınan gerilimin uygun oranda düşürülmesi ve konvertör elemanının beslenmesidir. Transformatör elemanının alçak gerilim ve yüksek gerilim sargılarındaki sarım sayılarına göre bir dönüştürme oranı

oluşmaktadır. Bu olay Faraday yasasına dayanmaktadır. Faraday yasasına göre değişken bir manyetik alan içerisinde bulunan iletkenin uçlarında bir gerilim indüklenmektedir. Yüksek gerilim tarafından uygulanan gerilimin oluşturduğu akı nüve içinde kapalı bir yol izlemekte ve alçak gerilim sargısını kesitlemektedir. Bu esnada alçak gerilim sargısında bir gerilim indüklenmektedir. Bu esnada nüve üzerindeki akıdan dolayı bir indüksiyon oluşmaktadır. Bu indüksiyonun uygun seviyede olması gerekmektedir.

Boşta çalışma kayıplarına sebep olan en önemli fizik olayı eddy kayıplarıdır. Nüve içerisinde zamanla değişen akı, laminasyonlar üzerinde bir gerilim indüklemektedir ve bu gerilim laminasyonların kendisi üzerinden kısa devre olmaktadır. Laminasyon kalınlığı azaldıkça oluşacak eddy kaybı da azalmaktadır. Eddy kayıplarının oluşturduğu bu kayıp, boşta çalışma kaybı olarak adlandırılmaktadır. Bu kayıplar, nüve malzemesi üreticileri tarafından sağlanan B-P eğrileri ile transformatörler için hesaplanabilmektedir. B-P eğrileri ağırlık başına oluşacak olan kayıp için verilmektedir. Bu sayede transformatör çekirdek tiplerine göre kayıp hesaplamaları yapılabilir. Transformatörlerde boşta çalışma akımlarının iki bileşeni bulunmaktadır. Bunlardan birisi, çekirdek kayıplarını oluşturan aktif bileşen, diğeri ise transformatör çekirdeğinin mıknatıslanmasını sağlayan reaktif bileşen olarak tanımlanmaktadır.

1.4. Transformatör çekirdeklerinde kullanılan malzemeler

Transformatörlerin nüve imalatında en yaygın şekilde kullanılan malzemeler M grubu olarak adlandırılan yönlendirilmiş nüve malzemeleridir. AISI (American Iron and Steel Institute)'e göre M2, M3, M4, M5 ve M6 olarak sınıflandırılan bu malzemelerde yer alan sayısal ifade kayıp düzeyini göstermektedir. H grubu malzemeler (H0, H1, H2) ise M grubu malzemelere göre daha yüksek permeabilite değerine sahiptir ve daha düşük kayıp değerleri sunar. H grubu malzeme kullanımı ile M grubuna kıyasla %10'a kadar daha düşük kayıp değerleri elde etmek mümkündür. H-DR grubu malzemeler (H0-DR, H1-DR, H2-DR) ise H grubu malzemelere lazer işlemi uygulanarak hücresel yapılarının iyileştirilmesi ile üretilir. Bu sayede eddy kayıplarının azaltılması sağlanır. Tablo 3. üzerinde 50Hz frekansta ve 1,5T indüksiyon değeri için M, H ve H0 grubu malzemelerin kayıp yoğunlukları gösterilmektedir. Literatürdeki araştırmalar daha ince laminasyon kullanımı ve lazer uygulamasıyla beraber iyileştirilmiş malzeme kullanımının nüve kayıplarını %35'e varan oranda azaltılabildiğini göstermektedir.

Tablo 3. Farklı nüve malzemelerinin elektriksel özellikleri

Malzeme tipi	M3	M4	M5	M6	H0	H1	H2	H0-DR	H1-DR	H2-DR
Laminasyon kalınlığı(mm)	0,23	0,27	0,30	0,35	0,23	0,27	0,30	0,23	0,27	0,30
Kayıp yoğunluğu (W/kg)	0,67	0,77	0,86	0,97	0,60	0,70	0,74	0,57	0,65	0,70

2. Metot

Transformatörlerde boşta çalışma kaybı ve boşta çalışma akımı hem analitik hem de nümerik yöntemler ile tasarım aşamasında hesaplanabilir. Bu bölümde hesaplama yöntemleri gösterilmiştir.

2.1. Analitik yaklaşım

Transformatörün temel tasarım parametreleri arasındaki ilişki Denklem 1. ile ifade edilmektedir.

$$E = 4.44 * N * B_m * f * A \quad (1)$$

eşitliği ile yazılmaktadır. Bu eşitlikte; B_m maksimum akı yoğunluğu (T), N sarım sayısı, f frekans (Hz) ve A nüve kesit alanını (m^2) ifade etmektedir. Buna göre, sarım sayısının sabit olması durumunda nüve kesit alanı ile akı yoğunluğu ters orantılı olarak değişmektedir. Sinüs formunda gerilim ile uyarma durumunda nüve kayıpları Denklem 2. ile ifade edilmektedir.

$$P_{total-coreloss} = P_h + P_e + P_i \quad (2)$$

biçiminde yazılmaktadır. Eşitliğin sağ tarafındaki üç parametre sırasıyla histerezis kaybı, eddy akımı kaybı ve ilave kayıpları temsil etmektedir. Bu parametrelerin her biri nüve indüksiyonu ve frekansa bağlı bir fonksiyon şeklinde Denklem 3. ile Denklem 5. arasında ifade edilmektedir [20].

$$P_h = k_h f B^n \quad (3)$$

$$P_e = k_e f^2 B^2 \quad (4)$$

$$P_i = k_i f^{1.5} B^{1.5} \quad (5)$$

Bu eşitliklerde k_h histerezis kaybı katsayısı, k_e eddy kaybı katsayısı ve k_i is ilave kayıp katsayısıdır. Burada n Steinmetz katsayısı olarak adlandırılmakta olup literatürde 1,6 ile 2 arasında kabul edilmektedir. Literatürde yer alan araştırmalar nüve indüksiyonunda meydana gelen %1 oranında artışın güç kayıplarının yaklaşık %2 oranında artmasına sebep olduğunu ortaya koymaktadır. Histerezis kaybı, eddy kaybı ve ilave kayıp katsayıları sırasıyla Denklem 6. ile Denklem 8. arasında tanımlanmıştır.

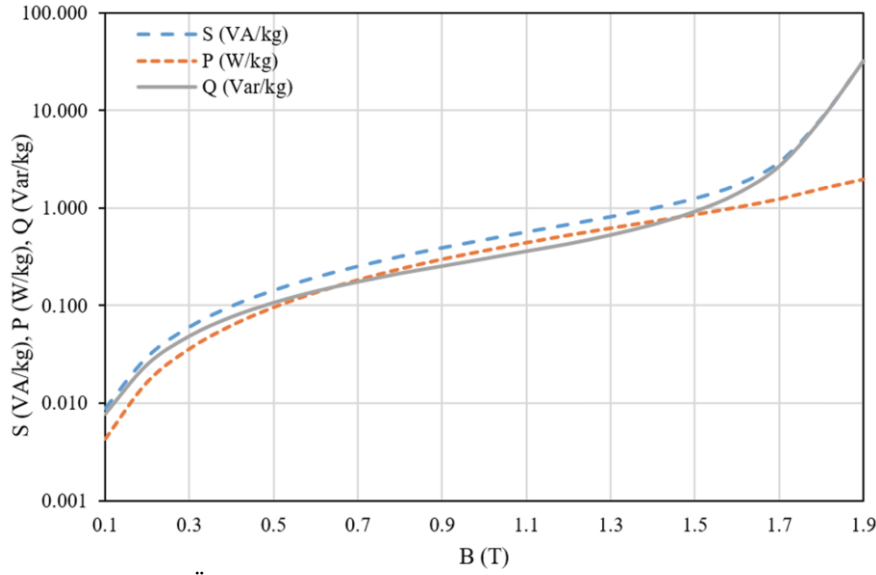
$$k_h = \frac{\pi}{\rho} \frac{H_{irr}}{B_p} \quad (6)$$

$$k_e = \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6 \rho} \quad (7)$$

$$k_i = 7.87 \sqrt{\sigma G V_0 S} \quad (8)$$

olarak yazılmaktadır. Bu eşitliklerde H_{irr} malzemenin histerezis eğrisinde $B=0$ noktasına karşılık gelen pozitif alan şiddeti değeri, σ is elektriksel iletkenlik, d is laminasyon kalınlığı, ρ malzemenin kütle yoğunluğu, S laminasyon kesit alanı, G bir sabit değer ve V_0 malzemenin mikro yapısına bağlı olarak yazılan bir başka sabit değerdir. Denklem 3. ile Denklem 8. arasında görüldüğü üzere, nüve kayıpları nüve üretiminde kullanılan malzemenin fiziksel ve elektromanyetik özelliklerinin yanı sıra frekans ve indüksiyon değerine bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeple, transformatörlerde nüve kayıplarını azaltmak için nüve üretiminde kullanılan malzemenin özelliklerinin yanı sıra transformatörün tasarım büyüklükleri de önem taşımaktadır [21].

Transformatörlerde boşta çalışma akımı ve kaybını belirleyen temel parametrelerden biri çekirdek malzemesidir. Çekirdek malzemesinin tipine göre kayıp yoğunluğu ve mıknatıslanma akımı seviyesi değişmektedir. Şekil 1. üzerinde M5 tipi bir çekirdek malzemesi için B-S (VA/kg), B-P (W/kg) ve B-Q (VAr/kg) eğrileri gösterilmiştir. Bu eğriler nüve malzemenin indüksiyon değişimine göre kullanacağı gücü tanımlamaktadır. Aktif güç B-P eğrisinden bulunmaktadır ve kayıpları oluşturmaktadır. Reaktif güç ise B-Q eğrisinden bulunmaktadır ve malzemenin mıknatıslanması için gerekli olan reaktif gücü ifade etmektedir. Aktif ve reaktif bileşenin karekök içinde karelerinin toplamı görünür gücü vermektedir ve toplam akım hesaplanırken görünür güçten akıma geçilmesi gerekmektedir.



Şekil 1. Örnek bir M5 tipi malzemenin elektriksel parametreleri

Buna göre çekirdek kaybı malzeme üreticisi tarafından sağlanan B-P eğrisi yardımıyla Denklem 9. ile hesaplanabilmektedir.

$$Boşta\ kayıp: w * K_b * W \quad (9)$$

Benzer şekilde boşta çalışma reaktif gücü de bulunabilir. Bu formülde, w üretici tarafından sağlanan B-P eğrisinden ilgili nüve indüksiyonu için hesaplanan watt/kg cinsinden kayıp değeri, K_b yapısal faktör katsayısı, W transformatör nüvesinin (çekirdeğinin) ağırlığıdır. Yapısal faktör Denklem 10. ile hesaplanmaktadır [22]:

$$Yapısal\ faktör = \frac{Transformatör\ çekirdek\ kaybı\ (\frac{watt}{kg})}{Malzeme\ için\ Epstein\ çekirdek\ kaybı\ (\frac{watt}{kg})} \quad (10)$$

2.2. Sonlu elemanlar yöntemi

Nümerik yöntemlerden biri olan sonlu elemanlar yöntemi ile elektrik, makine, inşaat, kimya mühendisliği gibi alanlarda çeşitli analiz çalışmaları yapılabilir. Örnek olarak [23] çalışmasında yüksek hızlı hatlarda granüler alt balast yerine asfalt tabaka kullanımının sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi incelenmiştir. [24] çalışmasında tekerlek ve ray etkileşiminin çeliklerin yorulma hasar direnci üzerine etkisi sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. [25] çalışmasında metro vagonu dizaynı üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. [26] çalışmasında demiryolu aracı disk balatalarının tasarımında yüksek sıcaklığın neden olduğu fren zayıflama probleminin belirlenmesi için sonlu elemanlar yöntemi ile incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Bunların yanında sonlu elemanlar yöntemi ile güç sistemi ekipmanlarında elektriksel parametreler hesaplanabilmektedir ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilebilmektedir. Literatürde kablo başlıklarında oluşan arızaların incelendiği [3], izolatörlerde oluşan elektrik alan dağılımlarının değerlendirildiği [27], korona halkası dizayn parametrelerinin incelendiği [28], yüksek gerilim yeraltı kablolarında sistem tasarım parametrelerinin incelendiği [29], kablo ve busbar sistemlerinin karşılaştırıldığı [30], busbar sistemlerinde farklı dizayn parametrelerinin performanslarının değerlendirildiği [31], dağıtım transformatörlerinde kullanılan nüve malzeme

materyallerinin performanslarının değerlendirildiği [32], Elektrikli araçların kablosuz güç aktarım sistemi ile şarj edilmesi için kullanılan farklı transformatör modellerinin değerlendirildiği [33], elektrik motorlarının tasarımına yönelik incelemelerin gerçekleştirildiği [34] çeşitli çalışmalar bulunmaktadır.

Elektriksel analizler için sonlu elemanlar yöntemi ilgili model geometrisi üzerinde sonlu sayıda ağ elemanı oluşturularak, bu ağ elemanlarının her birinin üzerinde Maxwell denklemlerini (Denklem 11. - Denklem 14.) çözerek sonuç elde etmektedir [22]. Model üzerinde oluşturulan ağ yapısı ise Şekil 2. üzerinde gösterilmiştir.

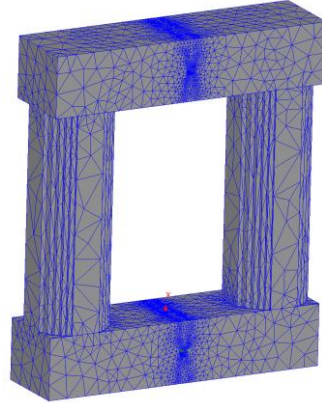
$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (11)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (12)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (13)$$

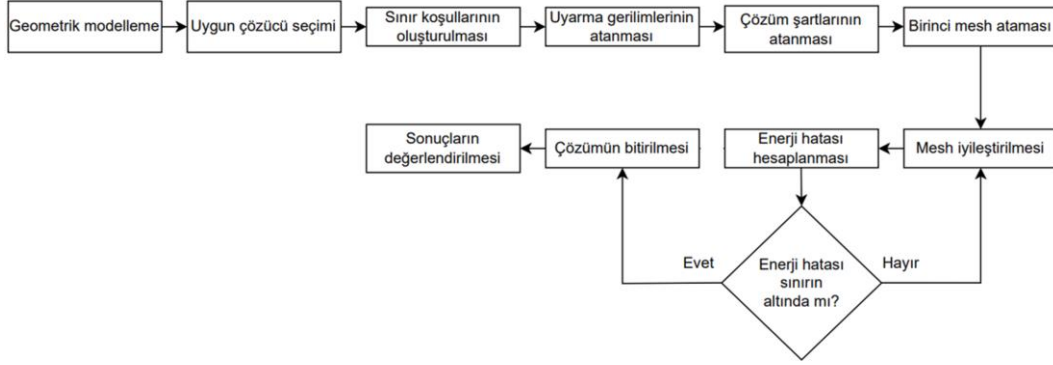
$$\nabla \cdot D = \rho \quad (14)$$

Burada, H manyetik alan şiddeti vektörü (A/m), J akım yoğunluğu vektörü (A/m²), D elektrik akı yoğunluğu vektörü (C/m²), t zaman (s), E elektrik alan şiddeti vektörü (V/m), B manyetik alan yoğunluğu vektörü, ρ yük yoğunluğu (C/m³) olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2. Cer transformatörü çekirdeği üzerinde oluşturulan ağ yapısı

Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme çalışmalarında uygulanması gerekli olan adımlar ve ayarlanması gerekli olan parametreler bulunmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde kullanılmakta olan akış şeması Şekil 3. üzerine gösterilmiştir. Analiz çalışmalarında Ansys Electronics Suite sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Program içerisinde enerji sınır hatası %1 olarak belirlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme çalışmaları diğer transformatör tipleri (dağıtım, konverter, güç...) için de gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 3. Sonlu elemanlar yönteminde kullanılmakta olan akış şeması

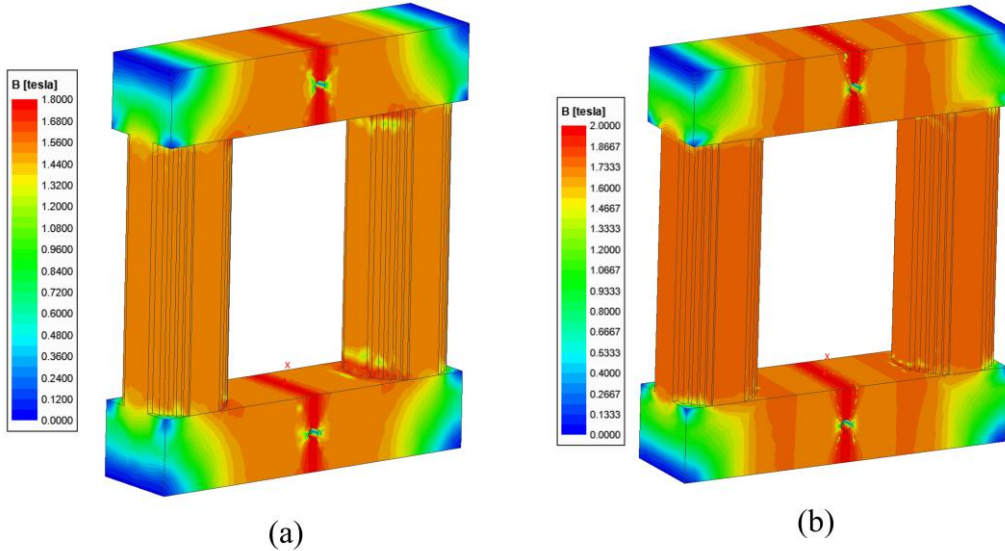
3. Bulgular

Gerçekleştirilen analiz çalışmaları kapsamında örnek bir cer transformatörünün 25 kV ve 29 kV uyarma gerilimleri ile oluşan çekirdek kayıpları ve boştaki çalışma akımları hesaplanmıştır. Hesaplamaların gerçekleştirildiği tek fazlı cer transformatörü parametreleri Tablo 4. üzerinde gösterilmiştir.

Tablo 4. Transformör parametreleri

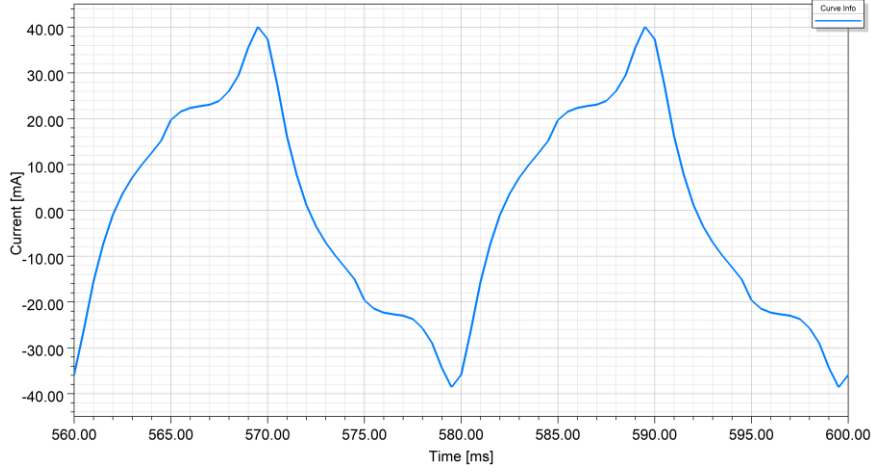
Sargı İsmi	Güç (kVA)	Gerilim (kV)	Anma akımı (A)
Yüksek gerilim	650	25	26
Cer-1	300	0,5	600
Cer-2	30	0,5	600
Filtre	50	0,64	78,125

Gerçekleştirilen analizler sonucunda çekirdek üzerinde oluşan indüksiyon seviyeleri Şekil 4. üzerinde gösterilmiştir.

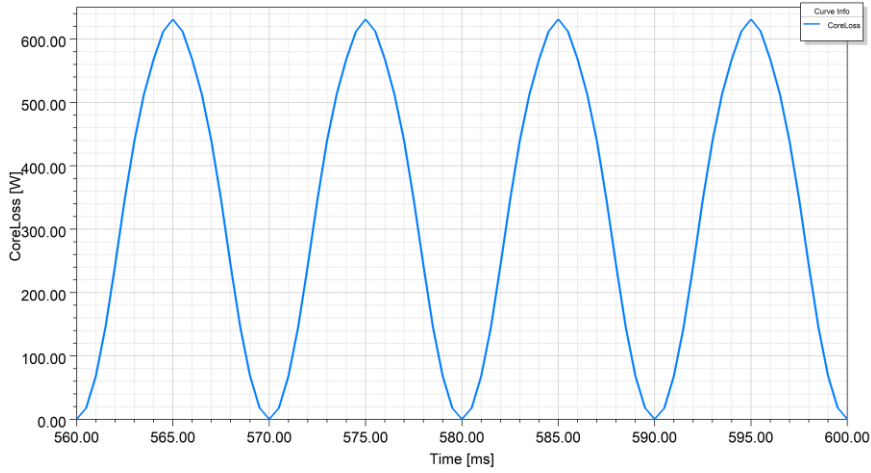


Şekil 4. Cer transformatörü çekirdeği üzerinde oluşan indüksiyon dağılımı (a) 25 kV uyarma durumu (b) 29 kV uyarma durumu

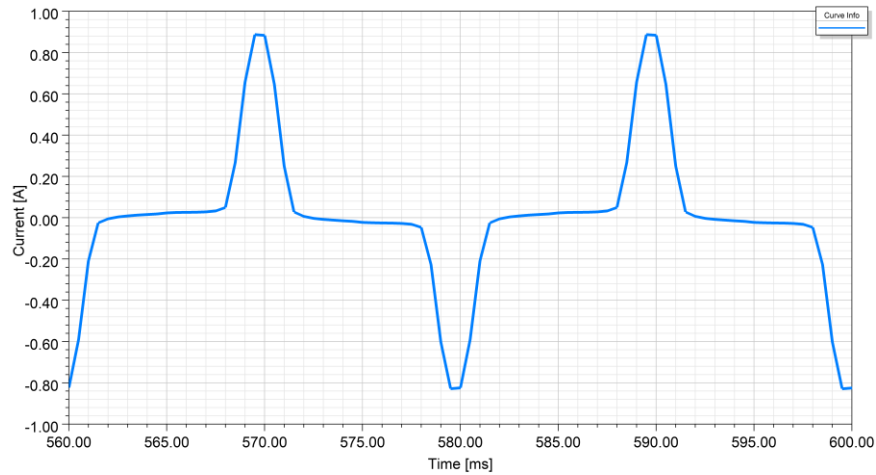
Gerçekleştirilen analiz çalışmaları sonucunda 25 kV gerilim seviyesi için akım dalga formu Şekil 5. üzerinde, çekirdek kayıplarının dalga formu ise Şekil 6. üzerinde gösterilmiştir. 29 kV uyarma durumu için ise akım dalga formu Şekil 7. üzerinde, çekirdek kayıplarının dalga formu ise Şekil 8. üzerinde gösterilmiştir.



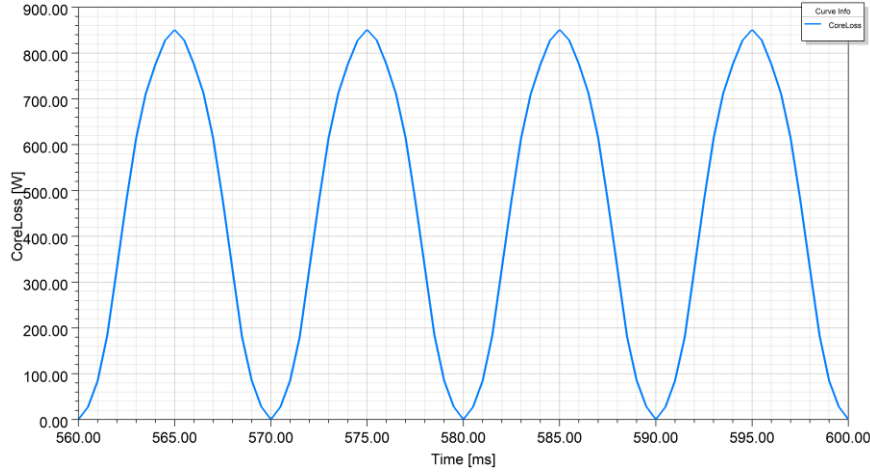
Şekil 5. 25 kV uyarma durumunda oluşan akımın dalga formu



Şekil 6. 25 kV uyarma durumunda oluşan çekirdek kaybının dalga formu



Şekil 7. 29 kV uyarma durumunda oluşan akımın dalga formu



Şekil 8. 29 kV uyarma durumunda oluşan çekirdek kaybının dalga formu

Gerçekleştirilen analiz ve test sonuçları Tablo 5. üzerinde karşılaştırılmıştır. Test sonucu için genişletilmiş ölçüm belirsizliği standart belirsizliğin genişletme katsayısı ile çarpımı sonucunda bulunan değerdir ve %95 oranında güvenilirlik sağlamaktadır.

Tablo 5. Gerçekleştirilen analiz ve test sonuçlarının karşılaştırılması

Durum	Boşta çalışma akımı (mA)	Boşta çalışma kaybı (W)
25 kV uyarma- Test	23,8	324
25 kV uyarma- Analiz	22,28	334
29 kV uyarma- Analiz	329	457
25 kV uyarma- Teorik	20,71	335
29 kV uyarma- Teorik	102	567

Sonuçlar incelendiğinde boşta çalışma akımı için analiz ve test sonucu arasında %6,38, boşta çalışma kaybı için analiz ve test sonucu arasında %3.08 fark olduğu görülmektedir. Buna göre sonuçların oldukça tutarlı olduğu görülmektedir. [19]'a göre boşta çalışma akımı için tasarım ve test sonucu arasında %30'a kadar farka izin verilmektedir. 25 kV ve 29 kV uyarma durumları karşılaştırıldığında ise 29 kV durumu için boşta çalışma akımının 25 kV durumunun 14,76 katı, boşta çalışma kaybının ise 1,37 katı olduğu görülmektedir. Teorik hesaplar ile analiz sonuçları karşılaştırıldığında ise 25 kV için değerlerin tutarlı olduğu görülmekteyken 29 kV için teorik ve analiz sonuçlarının arasındaki farkın arttığı görülmektedir. Bu durum nüvenin doyum noktalarında çalışması durumundaki davranışından kaynaklanmaktadır.

4. Sonuç

Bu çalışma kapsamında örnek bir cer transformatörü için boşta çalışma kayıpları ve boşta çalışma akımı farklı gerilimler ile işletme durumunda sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmıştır. Bunun yanında 25 kV temel gerilim seviyesinde transformatör üzerinde laboratuvar testleri gerçekleştirilmiş ve sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür. 29 kV işletme gerilimi için boşta çalışma akımının 14,76 katına çıktığı, boşta çalışma kaybının ise 1,37 katına çıktığı görülmektedir. Bu değerlerin transformatörde ısınmaya sebebiyet vermemesi gerekmektedir. Bundan dolayı cer transformatörlerinin tasarımı aşamasında bu parametrelerin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi sürdürülebilirlik ve güvenilirlik için kritik öneme sahiptir.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan transformatör modellerinin hazırlanması aşamasında sağladığı katkılarından dolayı Sönmez Transformator Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] N. Polater and P. Tricoli, "Technical review of traction drive systems for light railways," *Energies*, vol. 15, no. 9, 2022, doi: 10.3390/en15093187
- [2] M. Ö. Baştürk, V. Yüksel, Y. E. Tetik, M. Yılmaz, M. Güner, ve T. Kaya, "Pantograf boynuz hatalarının derin öğrenme ve görüntü işleme teknikleri ile tespiti," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 0, no. 16, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1132123
- [3] B. Alboyacı, M. A. Çınar, Y. B. Demirool, and A. Ince, "Evaluation of the effect of structural defects in the heat-shrink cable terminal on electric field distribution," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 132, no. 105920, pp. 1–15, 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105920
- [4] S. Çürükova, Y. B. Demirool, O. Sönmez, M. A. Çınar, ve B. Alboyacı, "Cer transformatörlerinde elektriksel parametrelerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 66–78, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1110515
- [5] S. Çürükova Kale, Y. B. Demirool, O. Sönmez, M. A. Çınar, ve B. Alboyacı, "Elektrikli lokomotif sistemlerinde cer transformatörü ve baraların oluşturduğu manyetik alanların sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanması," *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 17, pp. 54–65, 2023, [Online]. Available: 10.47072/demiryolu.1175771
- [6] T. Ölmez ve B. Kilic, "Metro AC cer güç dağıtım sistemlerinde yük paylaşımının modellenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 12, 2020, doi: 10.47072/demiryolu.680510
- [7] Ş. Kuşdoğan ve Ö. Doğruer, "Demiryolu elektrifikasyonunda katener sistem tasarımı," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 14, 2021, doi: 10.47072/demiryolu.871106
- [8] N. Güzel ve M. Tutucu, "Demiryolu elektrifikasyon sistemlerinde topraklama ve temas gerilimi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 14, pp. 122–129, 2021, doi: 10.47072/demiryolu.936613
- [9] Z. Yener ve Ö. Kalenderli, "Bir metro hattında araç kapasitesinin artırılmasının orta gerilim ve cer sistemleri üzerine etkileri," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 18, 2023, doi: 10.47072/demiryolu.1296406
- [10] U. E. Doğru ve Ö. Kalenderli, "Raylı ulaşım sistemlerinde tahrik amaçlı katı hal transformatörü kullanımı," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 10, pp. 63–74, 2019
- [11] Ö. Doğruer, Ş. Kuşdoğan, ve N. Yörükören, "Elektrikli demiryolu hatlarında kompanzasyon sistemi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 9, pp. 28–37, 2019
- [12] H. Deveci, "Dizel elektrikli lokomotiflerde cer sistemlerinin gelişimi üzerine bir inceleme," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 11, pp. 52–59, 2020
- [13] Y. Liu et al., "A novel harmonic suppression traction transformer with integrated filtering inductors for railway systems," *Energies*, vol. 13, no. 2, 2020, doi: 10.3390/en13020473
- [14] J. Xiang, J. Xu, Q. Wu, Z. Shuai, N. Tong, and Y. Liu, "Traction transformer integrated LCL filtering method for high-frequency harmonic and resonance suppression in AC train," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 148, 2023, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108922
- [15] J. El Hayek and T. J. Sobczyk, "Analytic one-dimensional design method for railways traction transformers," in *IEMDC 2003 - IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 2003, vol. 3, doi: 10.1109/IEMDC.2003.1210690
- [16] 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
- [17] Z. Fei, T. Konefal, and R. Armstrong, "AC railway electrification systems-An EMC perspective," *IEEE Electromagn. Compat. Mag.*, vol. 8, no. 4, pp. 62–69, 2019, doi: 10.1109/MEMC.2019.8985603.
- [18] Railway applications - Supply voltages of traction system, BS EN 50163-2004+A2:2020
- [19] Railway applications - Traction transformers and inductors on board rolling Stock, IEC 60310:2016
- [20] M. A. Cinar, "Investigation of the economical and technical design feasibility of Si-Fe graded distribution transformers according to EN50588-1," *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, vol. 26, no. 2, pp. 295–300, 2020
- [21] M. A. Çınar, B. Alboyacı, and M. Sengul, "Comparison of power loss and magnetic flux distribution in octagonal wound transformer core configurations," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 4, pp. 1290–1295, 2014
- [22] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer engineering design, technology, and diagnostics*. CRC Press, 2004
- [23] C. Gürer, T. Akıllı Törer, ve K. Aslantaş, "Yüksek hızlı hatlarda granüler alt balast yerine asfalt tabaka kullanımının sonlu elemanlarla modellenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 14, 2021, doi: 10.47072/demiryolu.867120

- [24] Y. Sarıkavak, “Tekerlek ray etkileşimi, perlitik ve beynitik çeliklerin yorulma hasar direnci üzerine bir sonlu elemanlar analizi,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 14, 2021, doi: 10.47072/demiryolu.934471
- [25] M. E. Arı and İ. Esen, “Design of a metro train and structural analysis of the metro vehicle body by finite element method,” *Railw. Eng.*, vol. 1, no. 15, pp. 30–45, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1018663
- [26] A. Ünal, N. Akkuş, and S. T. Kandil, “Demiryolu aracı disk balatalarının tasarımında yüksek sıcaklığın neden olduğu fren zayıflama probleminin belirlenmesi için sonlu elemanlar yöntemi yaklaşımı,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1027982
- [27] B. Alboyacı, M. A. Çınar, Y. B. Demiroğlu, and M. Uzar, “Reducing the failures with adding glass insulators to composite insulators of 400 kV transmission line at high altitude,” *Eng. Fail. Anal.*, p. 106678, 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106678
- [28] M. Uzar, Y. B. Demiroğlu, M. A. Çınar, and B. Alboyacı, “Investigation of the Effect of Corona Ring Design Parameters on Electric Field Distribution by Finite Element Method,” *Turk J Electr Power Energy Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–8, 2023, [Online]. Available: <https://tepesjournal.org/en/investigation-of-the-effect-of-corona-ring-design-parameters-on-electric-field-distribution-by-finite-element-method-1679>
- [29] Y. B. Demiroğlu and Ö. Kalenderli, “Investigation of effect of laying and bonding parameters of high-voltage underground cables on thermal and electrical performances by multiphysics FEM analysis,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 227, p. 109987, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109987>
- [30] Y. B. Demiroğlu, M. A. Çınar, and B. Alboyacı, “Evaluation of cable and busbar system in multiconductor distribution systems in terms of current and magnetic field distributions,” *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 29, no. 7, pp. 3119–3132, 2021, doi: 10.3906/ELK-2103-108
- [31] B. Alboyacı, M. A. Çınar, and Y. B. Demiroğlu, “Influence of busbar trunking system design on thermal performance operating with non-sinusoidal currents,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 214, no. 108815, pp. 1–9, 2023
- [32] Y. Özüpak ve M. S. Mamiş, “Dağıtım Transformatörlerinin Nüvesinde Kullanılan Farklı Materyallerin Sac Kombinasyonlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elektromanyetik Alan Analizi”, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, no. 4(1), 2019
- [33] Y. Özüpak, “Elektrikli araçların kablosuz güç aktarım sistemi ile şarj edilmesi için kullanılan farklı transformatör modellerinin sonlu elemanlar yöntemi ile tasarımı ve analizi”, *GUMMFD*, c. 39, sy. 2, ss. 1113–1122, 2023, doi: 10.17341/gazimmfd.1202033
- [34] Y. Özüpak ve M. Çınar, “Design Of The Permanent Magnet Synchronous Motor Used In Electric Vehicles With The Help Of The Particle Swarm Algorithm and Ansys-Maxwell”, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 10, sy. 20, ss. 141–155, 2023, doi: 10.54365/adyumbd.1315079

Özgeçmiş



Serenay ÇÜRÜKOVA KALE

Elektrik mühendisliği lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesi’nde 2013 yılında tamamlamıştır. Yüksek lisans eğitimini 2015-2017 yılları arasında 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 Transformatör Sanayi ve Ticaret A.Ş. ‘de tasarım müdürü olarak görev yapmaktadır. İlgi alanına giren çalışma konuları, transformatörler ve bunlara dair hesapların geliştirilmesidir. E-Posta: s.curukova@sonmeztrafo.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



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 şirketinde 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



Elif SAKALLIOĞLU

Lisans eğitimini Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünde 2022 yılında tamamlamıştır ve yüksek lisans eğitimine Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünde devam etmektedir. 2022 yılından itibaren Genetek Güç Enerji firmasında elektrik mühendisi olarak elektromanyetik ekibinde görev almaktadır. Güç sistemi ekipmanlarının sonlu elemanlar yöntemi ile elektromanyetik analizlerini gerçekleştirmektedir.
E-Posta: elif.sakallioğlu@genetek.com.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.