



Elektrikli Lokomotif Sistemlerinde Cer Transformatörü ve Baraların Oluşturduğu Manyetik Alanların Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Hesaplanması

Serenay ÇÜRÜKOVA KALE^{*1}, Yunus Berat DEMİROL², Oluş SÖNMEZ¹, Mehmet Aytaç ÇINAR³, Bora ALBOYACI⁴

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

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

³ Kocaeli Üniversitesi, İzmit Meslek Yüksek Okulu, Kocaeli, Türkiye

⁴ Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

*s.curukova@sonmeztrafo.com.tr

(Alınış/Received: 15.09.2022, Kabul/Accepted: 31.10.2022, Yayınlama/Published: 31.01.2023)

Öz: Güç sistemi ekipmanlarının etrafında oluşturduğu manyetik alan yoğunluğunun insan sağlığı üzerine olan etkileri çeşitli kuruluşlar tarafından incelenmektedir. İnsanların güç sistemi ekipmanlarının şebeke frekansında oluşturduğu manyetik alan yoğunluğuna maruz kalması durumunda izin verilen sınır değerler International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) tarafından belirlenmiştir. Buna göre kamuya açık alanlar ve çalışma ortamları için izin verilen en yüksek manyetik alan yoğunluğu değerleri sırası ile 0,2mT ve 1mT olarak belirtilmiştir. Bu kapsamda lokomotiflerde cer gücünü sağlamak için kullanılan cer transformatörü, bara, sürücü ve motor gibi elemanların oluşturduğu manyetik alan yoğunluklarının önemli bir parametre olduğu görülmektedir. Bu bileşenlerin etrafında oluşan manyetik alan yoğunluklarının yolcuların ve personelin sağlığı için belirlenen sınırların altında kalması önerilmektedir. Bu sebepten dolayı lokomotif sistemlerinin tasarımı aşamasında bileşenlerin etrafında oluşan manyetik alan yoğunluklarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında lokomotiflerde kullanılmakta olan bir cer transformatörünün ve örnek bir bara yapısının oluşturduğu manyetik alan yoğunluklarının hesaplanması hedeflenmiştir. Bu amaç ile cer transformatörü, basit bir lokomotif kasası ve bara yapısının geometrik modeli üç boyutlu koordinat sisteminde oluşturulmuş ve Ansys Electronics Suite sonlu elemanlar analizi yazılımına aktarılıp analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre belirlenen ölçüm düzlemlerinde manyetik alan yoğunluklarının sınır değerlerin altında kaldığı görülmektedir. Manyetik alan yoğunluğu değerleri modelin geometrik yapısına, malzeme parametrelerine ve işletme durumuna bağlı olarak değiştiğinden dolayı bu analizlerin tasarım aşamasında değerlendirilmesinin gerekliliği çalışma kapsamında vurgulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Cer transformatörü, Sonlu elemanlar analizi, Manyetik alan, Ekranlama, Maxwell denklemleri

Calculation of Magnetic Fields Generated by Traction Transformers and Busbars in Electric Locomotive Systems by Finite Element Method

Abstract: The effects of the magnetic field intensity created around the power system equipment on human health are examined by various organizations. Permissible limit values have been determined by the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) when people are exposed to the magnetic field intensity generated by the power system equipment at a low frequency. Accordingly, the maximum allowable magnetic field intensity values for public areas and working environments are specified as 0.2mT and 1mT, respectively. In this context, it is seen that the magnetic field intensity generated by components such as traction transformer, busbar, driver, and motor used to provide traction power in locomotives are essential parameters. Therefore, it is recommended that the magnetic field intensities around these components remain below the limits for the health of passengers and personnel. For this reason, it is necessary to determine the magnetic field intensities around the components during the design phase of the locomotive systems. This study aimed to calculate the magnetic field densities generated by a traction transformer and a sample busbar structure used in locomotives. For this purpose, the geometric

Atıf için/Cite as: S. Çürükova Kale, Y.B. Demirool, O. Sönmez, M.A. Çınar, B. Alboyacı, "Elektrikli lokomotif sistemlerinde cer transformatörü ve baraların oluşturduğu manyetik alanların sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanması," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 54-65, Jan. 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1175771

model of the traction transformer, a simple locomotive casing, and busbar structure was created in a three-dimensional coordinate system and transferred to the Ansys Electronics Suite finite element analysis software, and analysis studies were carried out. Finally, it is seen that the magnetic field intensities in the measurement planes determined according to the analysis results are below the limit values. Since the magnetic field intensity values change depending on the geometric structure of the model, material parameters, and operational status, the necessity of evaluating these analyses at the design stage has been emphasized within the scope of the study.

Keywords: Traction transformer, Finite element analysis, Magnetic field, Shielding, Maxwell equations

1. Giriş

Demiryolu sistemlerinde kullanılmakta olan cer transformatörü, bara ve kablo gibi akım taşıyan bileşenler manyetik alan kaynağıdır. Manyetik alanların canlıların sağlığı üzerindeki etkileri literatürde yer alan çeşitli çalışmalarda incelenmiştir. Bu etkilerden kaynaklanan olumsuzlukların en aza indirilebilmesi amacıyla canlıların karşı karşıya kalabileceği elektromanyetik alanlara ilişkin sınır değerler ICNIRP tarafından belirlenmiştir. Bu sebepten dolayı tren sistemlerinde bulunan lokomotiflerde kullanılan cer transformatörü [1], bara, sürücü ve motor gibi elemanların [2] etrafında oluşan manyetik alanların tasarım aşamasında hesaplanması gerekmektedir. Literatürde baralı kanal birimi sistemlerinin etrafında oluşan manyetik alanların incelendiği [3-5] endüstriyel ortamların ve transformatör merkezlerinin etrafında oluşan manyetik alanların incelendiği [6-7], yüksek güçlü transformatörlerin etrafında oluşan manyetik alanların incelendiği [8-9], cer tren transformatörlerinin etrafında oluşan manyetik alanların incelendiği [10], çalışmalar bulunmaktadır. Bunun yanında katener sistemlerin etrafında oluşan manyetik alanların değerlendirildiği [11-14], lokomotiflerde kullanılan pantograf sistemlerinin elektriksel ve mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmalar bulunmaktadır [15-18]. Buna karşın lokomotiflerin etrafında ve içerisinde cer transformatörü ve baralardan kaynaklı oluşan manyetik alanların hesaplandığı çalışmaların literatürde çok sınırlı olduğu görülmektedir. Manyetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkilerini araştıran çalışmalarda belirlenen maruz kalma seviyelerinin gerçek hayatta karşılığının anlaşılabilmesi için sistemlerin etrafında oluşan manyetik alan seviyelerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında örnek bir cer transformatörünün ve bara modelinin etrafında oluşan manyetik alanların hesaplanması hedeflenmektedir. Bu amaç ile sistemler bilgisayar ortamında modellenmiş ve Ansys Electronics Suite sonlu elemanlar analizi yazılımı ile analizler gerçekleştirilmiştir.

1.2. Manyetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkilerinin ve sınır değerlerin incelenmesi

Kamuya açık alanlar ve çalışma ortamları için şebeke frekansında izin verilen en yüksek manyetik alan yoğunluğuna maruz kalma değerleri ICNIRP tarafından sırası ile 0,2mT ve 1mT olarak belirtilmiştir [19]. Elektromanyetik alanlara mesleki olarak maruz kalan insanlar, genellikle bilinen koşullar altında elektromanyetik alana maruz kalan, buna bağlı olarak oluşabilecek potansiyel risklerin farkında olan ve bunun için uygun önlemleri almak üzere eğitilmiş yetişkin insanlardır. Bunun yanında genel halk her yaştan ve farklı sağlık durumuna sahip bireylerden oluşur, özellikle elektromanyetik alanlara karşı özel bir duyarlılığı olan insanları içerebilir. Genel halk çoğu zaman elektromanyetik alana maruz kaldığının farkında bile değildir. Bunun yanında halkın bireysel üyelerinin elektromanyetik alana maruz kalmayı en aza indirmek için önlemler alması veya elektromanyetik alanın sağlıklarına etkisini bilmesi beklenmez. Elektromanyetik alana maruz kalma konusunda halk için alınan önlemlerin daha geniş kapsamlı ve fazla olmasının sebebi budur [20-24].

İnsan ve hayvan bedenleri elektrik alandan önemli derecede etkilenir. İnsan vücudunun manyetik geçirgenliği hava ile aynıdır, dolayısıyla manyetik alan içeren bir çevrede bulunduğumuzda vücudumuzda çevre ile yaklaşık aynı miktarda manyetik alan oluşur. İnsan vücudu manyetik alan çizgilerinin yönelimine etki etmez. Manyetik alanların vücuda etkilerinden biri Faraday

prensibinden dolayı vücut yüzeyinde oluşan akımlardır [23-25]. İnsanların manyetik alana maruz kalmasındaki dozimetri değerinin temel olarak baz aldığı özellikler şunlardır;

Belirli bir manyetik alan büyüklüğü ve yönelimi için, vücut boyutu daha büyük insanların bedenlerinde daha çok elektrik akımı indüklenir, çünkü vücut iletken olduğu için büyük insanlarda iletken boyutu da daha büyüktür. Vücutta indüklenen akım vücudun maruz kaldığı manyetik alanın yönelimine bağlıdır. Manyetik alan bedenin önünden arkasına doğru yöneldiğinde genel olarak vücutta indüklenen akım en büyük olur ancak bazı organlar için en yüksek indüklenen akım değerleri farklı yönelme durumları için oluşabilir. Manyetik alan bedene dik olarak yöneldiğinde ise vücutta en az akım indüklenir. Bunun yanında vücutta indüklenen akımın dağılımı çeşitli organ ve dokuların iletkenliğinden etkilenir [26-27].

2.2. Manyetik ekranlama prensibi

Transformatör kazanlarında kullanılmakta olan yapısal çelik malzeme ve lokomotif kasasında kullanılmakta olan alüminyum malzeme doğal bir ekran görevi görmektedir. Bu bölümde manyetik alan ekranlama prensipleri açıklanmıştır. Biot-Savart yasasına göre uzayın belirli bir noktasındaki manyetik alan, bu alanı oluşturan akıma bağlı olarak bulunabilir. Biot-Savart yasası Denklem 1. ile ifade edilmektedir.

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{dlx\hat{r}}{r^2} \quad (1)$$

Burada, B manyetik alan yoğunluğu (T), I iletken içerisinde geçen akım (A), μ_0 serbest uzayın manyetik geçirgenliği, r ilgili noktasının içerisinde akım geçen iletkene uzaklığı (m) olarak tanımlanmaktadır. Akım taşıyan iletkenlerin veya bobinlerin etrafında oluşan manyetik alan şiddetini azaltmak için ekranlama uygulaması yapılabilir. Ekranlama, elektromanyetik kaynak ile gözlem noktası arasına uygun malzeme ve yapıda elemanlar yerleştirilerek gözlem noktasındaki manyetik alan şiddetinin azaltılmasıdır. Bu amaç için genelde elektriksel iletkenlik değeri veya manyetik geçirgenlik değeri yüksek olan malzemeler kullanılır [28].

Yüksek iletkenlik değerine sahip olan malzemelerde ekranlama, girdap akımları yardımı ile gerçekleşir. Ekran malzemesinin maruz kaldığı manyetik alandan dolayı içerisinde girdap akımları oluşur ve oluşan bu girdap akımları kendini oluşturan manyetik alana ters bir yönde manyetik alan oluşturur. Bunun sonucunda manyetik alan ekranın yüzeyine paralel bir biçimde şekillenmeye zorlanır. Yüksek manyetik geçirgenlik özelliğine sahip malzemelerde ekranlama prensibi ise akı yönlendirilmesi yoluyla olur. Yüksek manyetik geçirgenliğe sahip ferromanyetik malzemelerde akı metalin içine doğru, alana dik olarak ve yoğunlukla ekrandan geçmeden ekran içi boyunca şekillenir.

2. Metot

Elektrik sistemlerinde kullanılan bileşenlerin etrafında oluşan manyetik alanların hesaplanması basit yapılar dışında teorik yöntemler ile mümkün olmamaktadır. Bu kapsamda teorik olarak hesaplanması oldukça zor veya mümkün olmayan parametrelerin hesaplanması için sonlu elemanlar analizi yönteminin kullanılması günümüzde vazgeçilmez olmaktadır.

2.1. Sonlu elemanlar yöntemi (FEM)

Sonlu elemanlar yöntemi ile ilgili model geometrilerinde manyetik alanlar hesaplanabilmektedir. Bu yöntem ile, ilgili geometri üzerinde sonlu sayıda bir ağ yapısı oluşturulmakta ve bu ağ yapısı üzerinde Denklem 2.-Denklem 5. çözülmektedir [29].

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3)$$

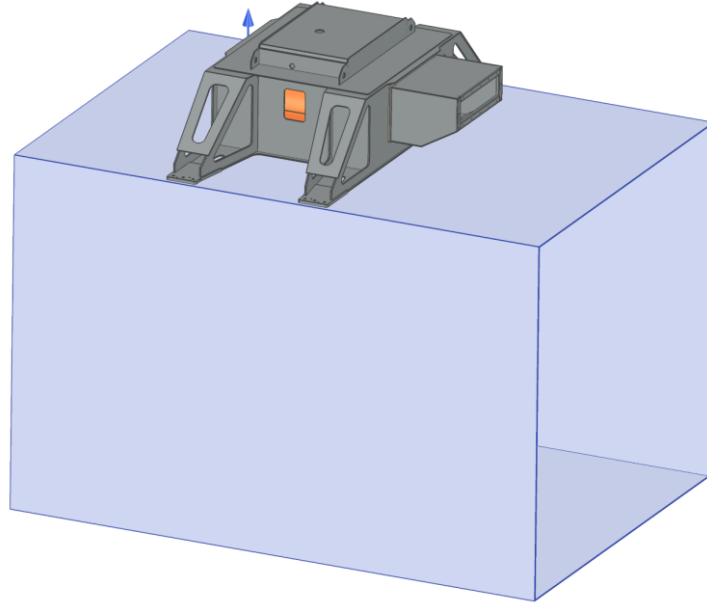
$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (5)$$

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/m²) olarak tanımlanmaktadır.

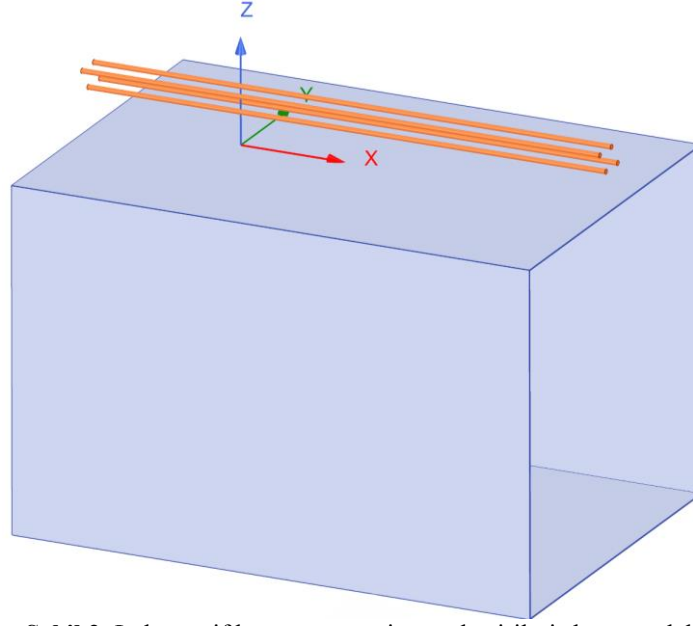
2.1. Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme çalışmaları

Sonlu elemanlar yönteminde analizi gerçekleştirilecek olan cer transformatörü modeli SolidWorks programında üç boyutlu olarak çizilmiştir. Analizlerin gerçekleştirilebilmesi için cer transformatörünün detaylı olarak tüm parçalarının çizildiği modelin analizlerde kullanılmasına gerek yoktur. Bu kapsamda cer transformatörü modeli basitleştirilmiş ve örnek bir lokomotif kasası üzerine yerleştirilmiştir. Bu durum Şekil 1. üzerinde gösterilmiştir.



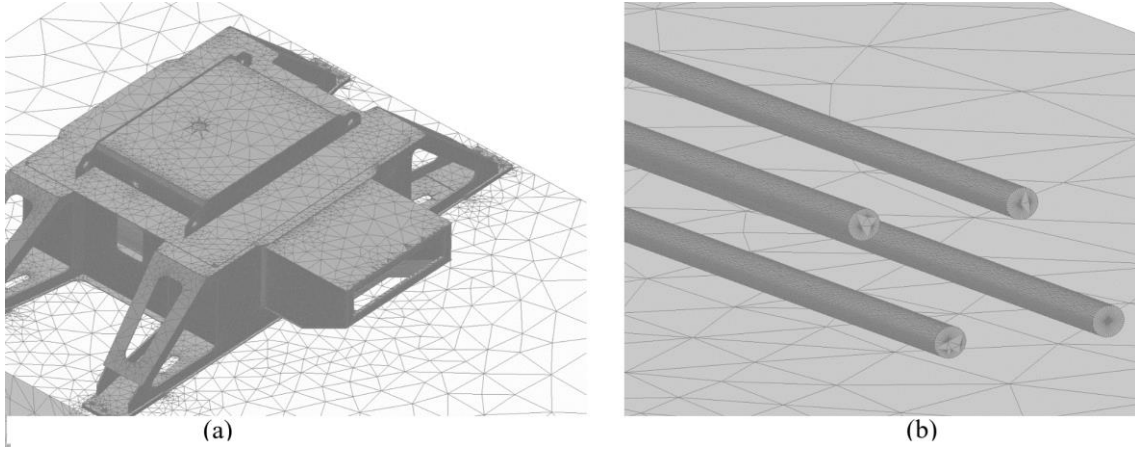
Şekil 1. Cer transformatörünün basitleştirilmiş ve lokomotif kasası üzerine eklenmiş modeli

Cer transformatörüne ek olarak lokomotif üzerinde bulunması muhtemel bara yapısı için de sonlu elemanlar analizi modeli oluşturulmuştur. Bu kapsamda cer transformatörünün buşing bağlantılarından bakır baraların çıktığı ve bu baraların lokomotifin üzerinde doğrusal olarak devam ettiği varsayılmıştır. Gerçek durum bundan farklı olabilir fakat bu analiz sadece manyetik alan etkisinin anlaşılabilmesi için oluşturulmuştur. Şekil 2. Üzerinde lokomotifin üzerinde bulunan baraların yapısı gösterilmiştir. Analizlerde Şekil 2.'de kullanılmış olan modelin etrafında oluşan manyetik alan dağılımı belirlenmiştir. Manyetik alan analizleri için ortamdaki manyetik alan şiddeti sıfır Tesla olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2. Lokomotif kasasının üzerine yerleştirilmiş bara modeli

Analizlerde kullanılan cer transformatörünün iki adet cer sargısı bulunmakta ve her sargıdan 1000A geçmektedir. Buna bağlı olarak bara modellerinden de aynı akım geçmektedir. Analizler üç boyutlu koordinat sisteminde eddy akımı çözücüsü 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. Analizlerde kullanılan mesh yapısı cer transformatörü ve bara modelleri için Şekil 3. üzerinde gösterilmiştir. Analizlerde kullanılan malzeme parametreleri Tablo-1 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3. (a) Cer transformatörü analizlerinde kullanılan mesh yapısı (b) Bara analizlerinde kullanılan mesh yapısı

Tablo 1. Analizlerde kullanılan malzeme parametreleri

Modeldeki kısım	Elektriksel iletkenlik (S/m)	Görelî manyetik geçirgenlik (μ_r)
Nüve	2000000	B-H eğrisi
Sargılar	58000000	0,999991
Transformatör kazanı	2000000	B-H eğrisi
Bara	58000000	0,999991
Lokomotif gövdesi	38000000	1,000021

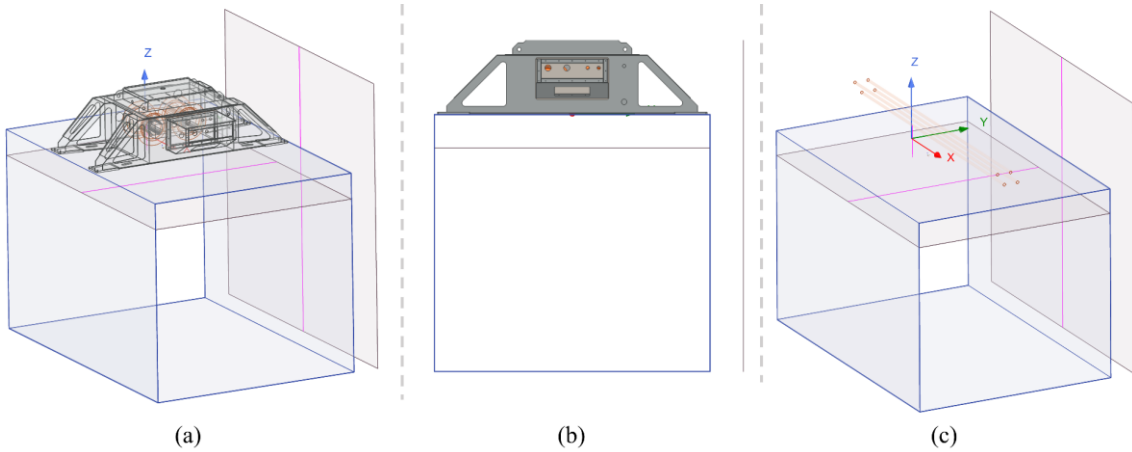
3. Bulgular

Analizler ile hesaplanması hedeflenen parametre cer transformatörünün ve baraların etrafında oluşturduğu manyetik alanlardır. Bu manyetik alanlar hem lokomotifin içinde hem de dışında oluşmaktadır. Lokomotifin içinde oluşan manyetik alan dağılımı yolcular ve tren personeli için önemli olmaktadır. Lokomotifin dışında oluşan manyetik alan ise tren perona geldiğinde, peronda bekleyen yolcular için önemli olmaktadır.

Bu kapsamda oluşturulan sonlu elemanlar modellerinde çeşitli düzlemler ve çizgiler belirlenmiştir. Cer transformatörlerine özel olarak hazırlanmış olan TS EN 60310 (Demiryolu uygulamaları- Trenlerdeki cer transformatörleri ve indüktörler) standardında transformatörün etrafında oluşan manyetik alanın ölçülmesi ile ilgili olarak opsiyonel bir test bulunmaktadır. Bu test için transformatör üreticisi ve müşteri arasında manyetik alan ölçüm noktaları ve oluşacak sınır değerler belirlenmelidir [30]. Cer transformatörü etrafına oluşacak manyetik alanların ölçüm prensipleri ise TS EN 50500 (Demiryolu ortamlarındaki elektrikli ve elektronik sistemlerden kaynaklanan insanların maruz kaldığı manyetik alan seviyelerinin ölçülmesi) standardında anlatılmaktadır [31].

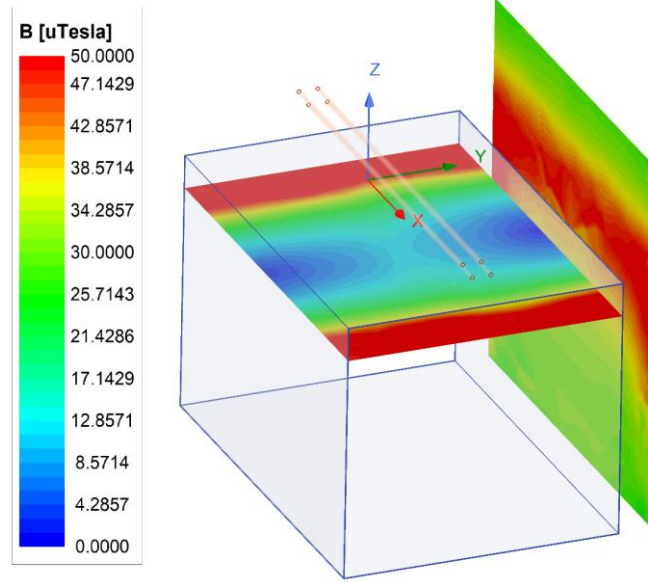
Cer transformatörü ve bara modeli için üzerinde oluşan manyetik alan dağılımı değerlendirilecek olan iki adet düzlem belirlenmiştir. Bunlardan biri lokomotifin içerisinde X-Y düzlemine paralel ve lokomotifin en üst yüzeyinden aşağı doğru 300 mm ötelenmiş olan Düzlem-1'dir. Diğer düzlem ise X-Z düzlemine paralel ve lokomotifin sağ yüzeyinden, sağ tarafa doğru 300 mm ötelenmiş olan Düzlem-2'dir. Bunun yanında her düzlem üzerinde bir adet çizgi belirlenmiştir. Düzlem-1 üzerinde Çizgi-1, Düzlem-2 üzerinde Çizgi-2 bulunmaktadır.

Oluşturulan düzlem ve çizgiler Şekil 4. üzerinde gösterilmiştir. Bunların yanında transformatör kazanı ve lokomotif kasasının ekranlama özelliğinin anlaşılması için Çizgi-3 tanımlanmıştır ve Şekil 5. üzerinde gösterilmiştir, Çizgi-3 için detaylar bölüm 3.1 içerisinde açıklanmıştır.



Şekil 4. (a) Cer transformatörü analizlerinde oluşturulan düzlem ve çizgiler (b) Cer transformatörü analizlerinde oluşturulan düzlem ve çizgilerin Z-Y eksenine karşısından görünümü (c) Bara analizlerinde oluşturulan düzlem ve çizgiler

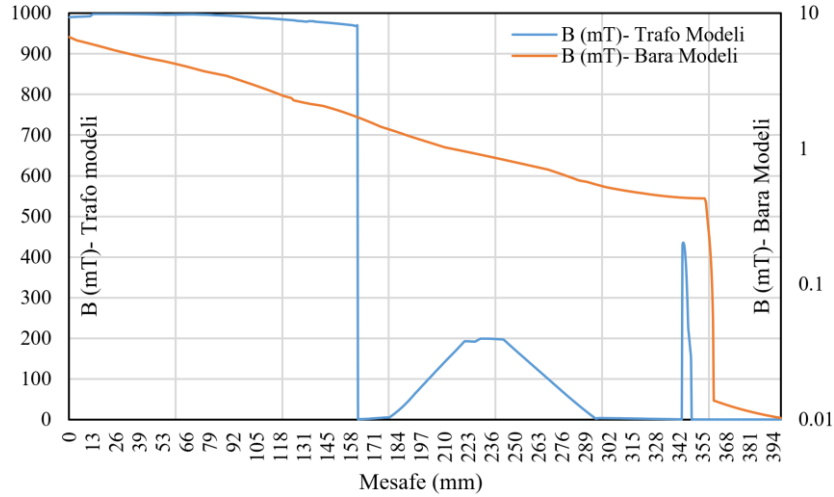
ekranlama malzemesi bulunmamaktadır. Analizlerde kullanılmış olan transformatör modelinin gerçek bir model olmasına karşın, bara modeli endüstriyel olarak kullanılmış bir yapı değildir. Bu analizin amacı bara yapısının etkisinin görülmesidir. Farklı bara yapıları ile farklı sonuçlar elde edilebilir. Elde edilen sonuçlara göre optimizasyon çalışmaları yapılabilir.



Şekil 7. Bara modeli analizi için düzlemlerde oluşan manyetik alan dağılımı

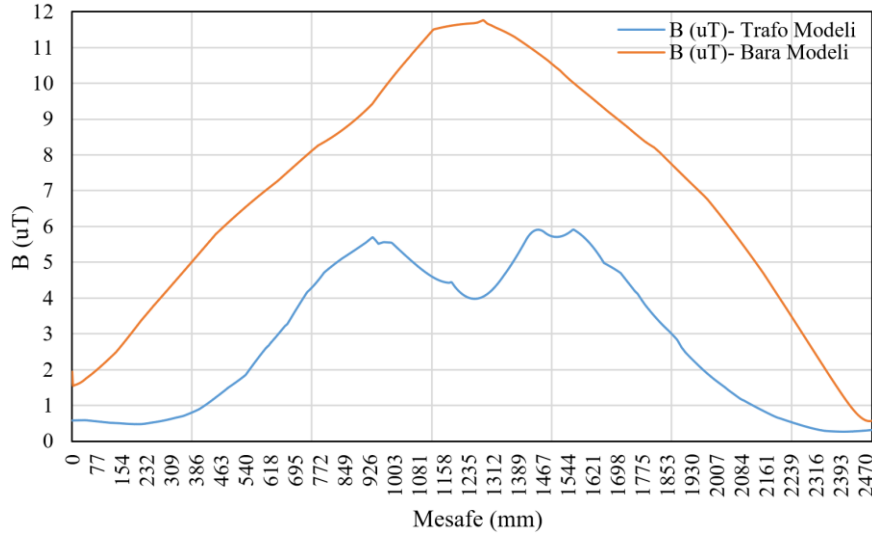
3.1. Belirlenen çizgiler üzerinde oluşan manyetik alan dağılımının karşılaştırılması

Analizler sonucunda belirlenen çizgiler üzerinde oluşan manyetik alan dağılımları incelenmiştir. İlk olarak transformatör modelinde ve bara modelinde malzemelerin ekranlama durumunun anlaşılması için Çizgi-3 üzerinde oluşan manyetik alan değerleri Şekil 8. üzerinde gösterilmiştir.

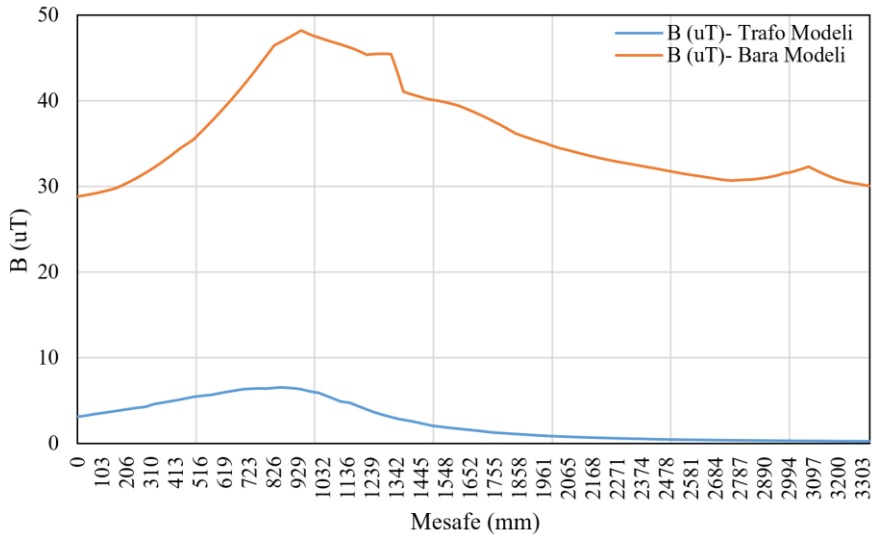


Şekil 8. Transformatör ve bara modelleri için Çizgi-3 üzerinde oluşan manyetik alan dağılımları

Burada mavi grafik trafo modeli üzerinde oluşan, turuncu grafik bara modeli üzerinde oluşan manyetik alan dağılımını ifade etmektedir. Mavi grafik için 0-158 mm aralığı nüve malzemesi içerisinde kaldığından dolayı oluşan manyetik alan yüksektir. 184-302 mm arası ise yüksek gerilim sargısının içi ve cer sargısının dışı arasında kalan alanı ifade etmektedir. 342-348 mm arası ise transformatör tankını ifade etmektedir.



Şekil 9. Transformator ve bara modelleri için Çizgi-1 üzerinde oluşan manyetik alan dağılımları



Şekil 10. Transformator ve bara modelleri için Çizgi-2 üzerinde oluşan manyetik alan dağılımları

Şekil 9. üzerinde Çizgi-1'de oluşan manyetik alanlar gösterilmiştir. Transformator modeli için maksimum manyetik alanın yaklaşık 6 uT, bara modeli için ise 12 uT olduğu görülmektedir. Şekil 10. üzerinde ise Çizgi-2'de oluşan manyetik alanlar gösterilmiştir. Transformator modeli için maksimum manyetik alanın yaklaşık 7 uT, bara modeli için ise 50 uT olduğu görülmektedir. Bara modeli için Çizgi-1 ve Çizgi-2 arasında oluşan fark ekranlama durumundan kaynaklanmaktadır. Çizgi-1 için alüminyum lokomotif kasası ekranlama özelliği sağlarken Çizgi-2 için ekranlama özelliği gerçekleştiren bir yapı bulunmamaktadır. Bunun yanında bara modelinde oluşan manyetik alan dağılımının transformator modeline göre daha fazla olduğu görülmektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada elektrikli lokomotiflerde kullanılmakta olan cer transformatorü ve bara yapısının oluşturduğu manyetik alan dağılımı hesaplanmıştır. Bu kapsamda sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda cer transformatorü ve bara modelinin oluşturduğu manyetik alan dağılımının incelenen düzlemler için ICNIRP tarafından belirlenen sınır değerlerin altında kaldığı görülmektedir. Bunun yanında cer transformatorü modelinde buluna kazan yapısından dolayı ekranlama performansı bara modeline göre daha iyi

olmaktadır. Analizlerde kullanılan cer transformatörü gerçek bir model olmasına karşın bara yapısı sadece bir örnek olarak oluşturulmuştur. Sonuç olarak raylı sistemlerde kullanılan elektrikli lokomotiflerde manyetik alan dağılımı hesaplarının gerçekleştirilmesinin gerekliliği bu çalışmada açıklanmış ve bir örnek üzerinden uygulama gerçekleştirilmiştir.

Teşekkür

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

Kaynakça

- [1] S. Çürükova, Y. B. Demiroğlu, O. Sönmez, M. A. Çınar, and B. Albayrak, "Cer transformatörlerinde elektriksel parametrelerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 66–78, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1110515.
- [2] N. Polater, P. Tricoli, "Technical review of traction drive systems for light railways", *Energies*, vol. 15, no. 9, pp. 1-26, 2022.
- [3] D. Kusiak, "The Magnetic field and impedances in three phase rectangular busbars with a finite length," *Energies*, vol. 12, no. 8, pp. 1–20, 2019.
- [4] T. Keikko, J. Kotiniitty, and L. Korpinen, "Calculations of magnetic fields from indoor distribution substation bus bars," in *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, 2000, vol. 4, pp. 2309–2314, doi: 10.1109/pess.2000.867351.
- [5] Y. B. Demiroğlu, M. A. Çınar, B. Albayrak, "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
- [6] S. Nikolovski, Z. Klaić, Z. Kraus, and M. Stojkov, "Computation and measurement of electromagnetic fields in high voltage transformer substations," *MIPRO 2010 - 33rd Int. Conv. Inf. Commun. Technol. Electron. Microelectron. Proc.*, no. April, pp. 641–646, 2010.
- [7] S. Graubner, D. Filistovich, S. Hiebel, R. Wengerter, "Practical examples of magnetic field measurements in industrial and environmental surroundings" 2015. [Online]. Available: https://www.sekels.de/fileadmin/PDF/Englisch/45_3_Magnetic_Field_Measurement_Publication_.pdf [Accessed: 31 October 2022]
- [8] G. Apaydin and S. S. Seker, "Theoretical and Experimental Study of Electromagnetic Fields Around High Power Transformer," in *2nd International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 2021, pp. 1–4, [Online]. Available: https://www.emo.org.tr/ekler/14d37f84c3f41a6_ek.pdf.
- [9] L. Štrac, F. Kelemen, and D. Žarko, "Modeling and calculation of electromagnetic field in the surroundings of a large power transformer," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 17, no. 3, pp. 301–314, 2009, doi: 10.3906/elk-0908-182.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] G. Lucca and M. Moro, "Environmental 50Hz magnetic field produced by a railway line equipped with autotransformers," *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, 2008, doi: 10.1109/EMCEUROPE.2008.4786794.
- [13] G. Lucca, M. Moro, R. Florio, and G. Lidonnici, "Measurements and calculations of 50Hz magnetic field produced by Italian High Speed Railway system," *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, pp. 10–15, 2012, doi: 10.1109/EMCEurope.2012.6396900.
- [14] C. Buccella and M. Feliziani, "Three dimensional magnetic field computation inside a high speed train with a.c. electrification," *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility.*, pp. 1-4, 2003, doi: 10.1109/icsmc2.2003.1428334.
- [15] M. Ö. Baştürk, V. Yüksel, Y. E. Tetik, M. Yılmaz, M. Güner, and T. Kaya, "Detection of Pantograph Horn Defects Based on Deep Learning and Image Processing," *Demiryolu Mühendisliği*, no. 16, pp. 102–115, 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1132123.

- [16] Z. Dai, T. Li, N. Zhou, J. Zhang, and W. Zhang, "Numerical simulation and optimization of aerodynamic uplift force of a high-speed pantograph," *Railw. Eng. Sci.*, vol. 30, no. 1, pp. 117–128, 2022, doi: 10.1007/s40534-021-00258-7.
- [17] G. Wu et al., "Pantograph–catenary electrical contact system of high-speed railways: recent progress, challenges, and outlooks," *Railw. Eng. Sci.*, 2022, doi: 10.1007/s40534-022-00281-2.
- [18] G. Wu, W. Wei, G. Gao, J. Wu, and Y. Zhou, "Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph–catenary system," *J. Mod. Transp.*, vol. 24, no. 2, pp. 132–138, 2016, doi: 10.1007/s40534-016-0099-1.
- [19] "International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1Hz–100kHz).," *Heal. Phys.*, vol. 99, no. 6, pp. 818–836, 2010.
- [20] M. N. Bates, "Extremely low frequency electromagnetic fields and cancer: The epidemiologic evidence," *Environmental Health Perspectives*, vol. 95, pp. 147–156, 1991, doi: 10.1289/ehp.9195147.
- [21] J. Grellier, P. Ravazzani, and E. Cardis, "Potential health impacts of residential exposures to extremely low frequency magnetic fields in Europe," *Environ. Int.*, vol. 62, pp. 55–63, 2014, doi: 10.1016/j.envint.2013.09.017.
- [22] M. W. Khan, J. Juutilainen, and P. Roivainen, "Registry of Buildings With Transformer Stations as a Basis for Epidemiological Studies on Health Effects of Extremely Low-Frequency Magnetic Fields," *Bioelectromagnetics*, vol. 41, no. 1, pp. 34–40, 2020, doi: 10.1002/bem.22228.
- [23] SCENIHR, Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks: Potential Health Effects of Exposure to Electromagnetic Fields (EMF)., January. 2015.
- [24] J. Bernhardt, "The direct influence of electromagnetic fields on nerve- and muscle cells of man within the frequency range of 1 Hz to 30 MHz," *Radiat. Environ. Biophys.*, vol. 16, no. 4, pp. 309–323, 1979, doi: 10.1007/BF01340569.
- [25] "IEEE Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz," IEEE Std C95.1-2005 (Revision IEEE Std C95.1-1991), vol. 2005, no. April, pp. 1–238, 2006.
- [26] S. Ozen, E. G. Ogel, and S. Helhel, "Residential area medium voltage power lines; public health, and electric and magnetic field levels," *Gazi Univ. J. Sci.*, vol. 26, no. 4, pp. 573–578, 2013.
- [27] S. Ozen, H. F. Carlak, O. H. Colak, and S. Helhel, "Magnetic field risk analysis for employees and patients due to power transformers in hospital buildings," *Prog. Electromagn. Res. Symp.*, pp. 1743–1746, 2017, doi: 10.1109/PIERS.2017.8262031.
- [28] O. Bottauscio, E. Carpaneto, M. Chiampì, D. Chiarabaglio, and I. Panaitescu, "Numerical and experimental evaluation of magnetic field generated by power busbar systems," *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 143, no. 5, pp. 455–460, 1996, doi: 10.1049/ip-gtd:19960557.
- [29] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer Engineering Design, Technology, and Diagnostics*. 2004.
- [30] Demiryolu uygulamaları - Trenlerdeki cer transformatörleri ve indüktörler, TS EN 60310, 09.12.2016
- [31] Demiryolu ortamlarındaki elektrikli ve elektronik sistemlerden kaynaklanan insanların maruz kaldığı manyetik alan seviyelerinin ölçülmesi, TS EN 50500, 19.01.2010

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



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



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. Transformatör 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.