

# ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA ELEKTROMANYETİK ALAN SEVİYELERİNİN ELEKTROMANYETİK GİRİŞİM VE UYUMLULUK AÇISINDAN İNCELENMESİ

Berke GÜNEŞ, Kayhan ATEŞ, Halil İbrahim KESKİN, Şükrü ÖZEN

Akdeniz Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Dumlupınar Bulvarı, Akdeniz Üniversitesi Yerleşkesi,  
Konyaaltı / Antalya, 07058, Türkiye  
berkegunes1912@gmail.com, kayhanates@akdeniz.edu.tr,  
eem.halilkeskin@gmail.com, sukruozen@akdeniz.edu.tr

## ÖZET

Elektrikli otomobiller, sergiledikleri yüksek verim ve barındırdıkları gelişmiş teknoloji ile son yıllarda insan yaşamında hızla yer edinmeye başlamıştır. Bunun yanında, elektrikli otomobillerin içten yanmalı motorlarla çalışan araçlara kıyasla doğaya daha az zarar vermesi sebebiyle gösterilen ilgi, daha da artmıştır. Bu çalışmada, elektrikli otomobillerdeki pil sistemlerinin neden olduğu elektrik alanın ve bu sistemlere bağlı güç hatlarının oluşturduğu manyetik alanın insan dokusu üzerindeki davranışları incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, doku ile pil modeli arasındaki mesafe 30 cm iken elektrik alanın en yüksek değeri 327 V/m ile deri dokusunda, en düşük değer ise 300 V/m ile kas dokusunda gözlenmiştir. Manyetik alan sonuçlarına göre ise, iletim hattı ile insan dokusu arasındaki mesafe 30 cm iken manyetik alan şiddeti 120  $\mu$ T olarak belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrikli araçlar, elektromanyetik uyumluluk, statik elektrik ve manyetik alan, hesaplamalı elektromanyetik.

## 1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte otomotiv sektöründe hızla yayılan elektrikli araçlar ve teknolojileri, sergiledikleri yüksek verimin yanı sıra sahip oldukları elektronik donanım ve çevreci özellikleri ile son yıllarda dikkat çekmektedir. Bunun yanında elektrikli araçlar; yüksek teknolojiyi teşvik etme, yeni endüstriler yaratma ve ekonomik gelişme sağlama potansiyeline sahiptir [1]. Elektrikli araçların ana bileşenleri Şekil.1’de belirtildiği gibi elektrik motoru, güç dönüştürücüsü, güç kaynağı ve diğer bileşenleri bağlayan bağlantı kabloları olarak belirtilebilir. Bu bileşenlerin her biri farklı birer mühendislik ürünü olmasına rağmen, beraber kullanılmaları

sonucu çoklu disiplinli bakış açısına göre elektrikli araçlar incelenmektedir.



**Şekil.1:** Elektrikli araçlardaki batarya, güç dönüştürücü ve elektrik motoru gibi güç bileşenlerinin konumu (a) arkadan itişli araç (b) önden çekişli araç [2]

Elektrikli araçlarda hareketin sağlanabilmesi için gereken enerji, doğru akım kaynağı olan pil ve batarya sistemleri ile karşılanır. Bu yüzden, petrol türevi yakıt tüketen araçlara kıyasla elektrikli otomobillerde söz konusu sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır [3]. Pil

ve batarya sistemi sayesinde üretilen yüksek güç, HV-Bus ağı olarak bilinen tamamen yalıtılmış bir iletim ağı ile güç dönüştürücülerine ve elektrik motorlarına iletilmektedir. Bahsedilen yüksek enerjili güç üniteleri ve iletim hatları nedeniyle elektrikli otomobillerde elektromanyetik uyumluluk (EMU) kavramı göz önünde bulundurulması gereken önemli bir husustur. Ayrıca, elektrikli araçlarda oluşan statik manyetik alanlar ile zamanla değişen manyetik alanların insan sağlığı üzerine etkisi, araştırmacılar tarafından incelenen konular arasındadır [4-6].

Statik elektrik alan maruziyeti üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda bu alanların insan sağlığı üzerine olumsuz etkilerine dair kanıt sağlanamamasına karşın Amerikan Hükümet Endüstri Hijyenistler Konferansı (ACGIH) 25 kV/m değerini limit olarak kabul etmiştir. Bunun yanında statik manyetik alan etkileri tıbbi cihaz kullanan bireyler için ACGIH tarafından 0.5 mT olarak belirtilirken çalışan ve genel halk için uzuvlarda belirlenen değerler Tablo.1 ile gösterilmiştir.

**Tablo.1:** Uluslararası kuruluşlarca insan uzuvları için belirlenen statik manyetik alan limitleri [7-9]

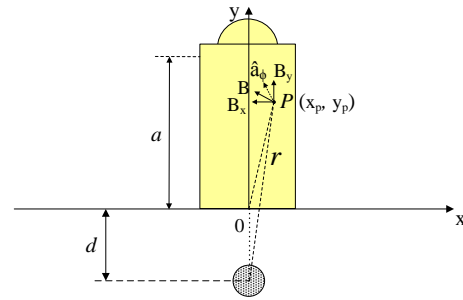
	ICNIRP	IEEE	ACGIH
<b>Çalışanlar</b>	8 T	353 mT	20 T
<b>Genel Halk</b>	400 mT	353 mT	400 mT

Bu çalışmada, elektrikli arabalardan yayılan statik alanların bilgisayar ortamında farklı nümerik yöntemleri temel alan simülasyonlar sayesinde çözümlenmeleri yapılmıştır. Bu kapsamda, elektrikli arabanın yapısında bulunan pillerden kaynaklanan statik elektrik alan CST Microwave Studio ile hesaplanırken güç kablolarından yayılan statik manyetik alanlar COMSOL Multiphysics ile

benzetimi yapılmıştır. Simülasyonlar sonucunda, insan dokusu modelinde gözlenen elektrik ve manyetik alanların davranışları incelenmiştir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, elektrikli arabalarda elektrik ve manyetik alanın meydana gelmelerine dair temel bilgiler sunulmuştur. Ardından, simülasyon sonuçları değerlendirilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT

Elektrikli araçlardaki güç kablosunun belirli bir mesafedeki insan dokusu modelinde oluşturacağı manyetik alanı elde etmek için, basit ve doğru bir yaklaşım olarak Biot-Savart Yasası temel alınabilir. Buna göre, bir iletkenden akan akım biliniyorsa herhangi bir gözlem noktasındaki manyetik akı yoğunluğu elde edilebilir [10, 11]. Şekil.2’de, iletim hattından yayılan ve insan dokusu üzerinde gözlenen manyetik akı yoğunluğu ile yönlü bileşenleri gösterilmiştir.



**Şekil.2:** Güç kablosunun  $P (x_p, y_p)$  gözlem noktasında oluşturduğu manyetik akı yoğunluğu

Şekil.2’de B, manyetik akı yoğunluğunu gösterirken,  $B_x$  ve  $B_y$  ise sırasıyla x yönündeki ve y yönündeki manyetik akı yoğunluğu bileşenlerine karşılık gelmektedir.  $d$  insan vücuduna en yakın nokta ile güç kablosu arasındaki mesafeyi göstermektedir.  $P (x_p, y_p)$ , gözlem noktası

olup,  $r$  ise iletim hattı ile  $P(x_p, y_p)$  noktası arasındaki uzaklıktır.  $\mathbf{a}_\phi$  ise birim vektörünü temsil etmektedir. Bir iletkenin çevresinde gözlenen manyetik akı yoğunluğu, Eşitlik.1 ile ifade edilmektedir.

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi r} \mathbf{a}_\phi \quad (1)$$

$$r^2 = (x_p)^2 + (y_p + d)^2 \quad (2)$$

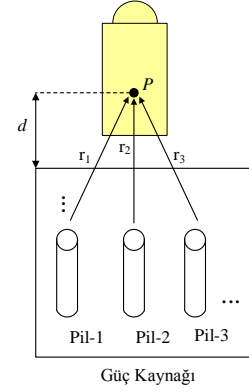
Burada  $I$ , güç kablosunun taşıdığı akımı göstermektedir ve birimi A'dir. Yukarıdaki eşitlikte  $\mu_r$ , manyetik akı yoğunluğunun yayıldığı ortamın manyetik geçirgenliğine karşılık gelmektedir.  $P(x_p, y_p)$  noktasındaki toplam manyetik akı yoğunluğu, yönlü bileşenleri olan  $B_x$  ve  $B_y$ 'nin bileşkesi olarak belirlenir ve şu şekilde belirtilebilir.

$$B_x = \frac{-\mu_0 I}{2\pi r^2} (y_p + d) \quad (3)$$

$$B_y = \frac{-\mu_0 I}{2\pi r^2} (x_p) \quad (4)$$

Analitik hesaplamalar yapılırken, iletim hattı kablosunun kılıf ve ekranında indüklenen akımların manyetik alana etkisi olmadığı ve her bir kablonun düz ve sonsuz uzunlukta olduğu varsayımları yapılmıştır.

Elektrikli arabaların güç kaynakları, başka bir deyişle pilleri, gerilim depolayan sistemlerdir. Güç kaynağının sebep olduğu elektrik alanının belirli bir uzaklıkta bulunan üç katmanlı doku modeline etkisini incelemek için Şekil.3 ile belirtilen senaryo temel alınmıştır.



**Şekil.3:** Güç kaynağının  $d$  mesafesinde oluşturduğu toplam elektrik alanının hesabı

Pilden kaynaklı statik elektrik alan, farklı konumlara yerleştirilmiş  $n$  tane ayrı pil oluşturduğu bileşke alan olarak elde edilebilir. Bir noktadaki bileşke elektrik alan şiddetini elde etmek için, bütün bireysel pil yüklerinin neden olduğu alanlar vektörel olarak toplamıdır ve Eşitlik.5 ile ifade edilmiştir.

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{k=1}^n \frac{q_k (\mathbf{R} - \mathbf{R}'_k)}{|\mathbf{R} - \mathbf{R}'_k|^3} \quad (5)$$

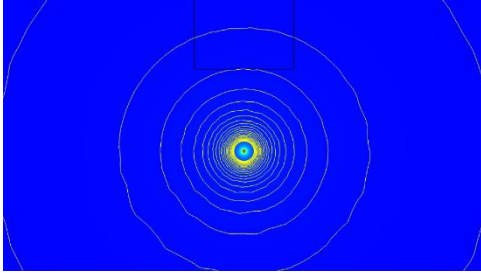
Burada  $q_1, q_2 \dots q_n$  ayrı yükleri temsil ederken  $\mathbf{R}'_1, \mathbf{R}'_2 \dots \mathbf{R}'_n$  karşılık gelen konum vektörlerini belirtmektedir.  $\mathbf{R}$  ise elektrik alanın oluştuğu  $P$  noktasının konum vektörüdür.

### 3. BULGULAR

Oluşturulan senaryolara göre, güç kablosundan yayılan manyetik akı yoğunluğu için, sonlu elemanlar yöntemi tabanlı COMSOL Multiphysics programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), parçalı diferansiyel denklemleri ve sınır koşullarını kullanarak sınır değer problemlerini çözen bir nümerik yöntemdir. Ana fikir, problem uzayını sonlu elemanlar olarak adlandırılan küçük parçalara bölüp uygun sınır

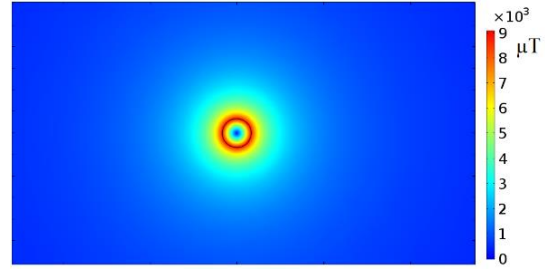
koşulları gözetiminde genel çözüme ulaşmaktır. Şekil.2’de belirtilen  $d$  mesafesi, 30 cm olarak kabul edilmiştir. Problem uzayının her yerindeki manyetik geçirgenlik  $\mu_r = 1$  (H/m) olarak kabul edilmiştir. Söz konusu güç kablosu 3.33 mm yarıçapında bakır seçilerek modellenmiştir. Kablonun maksimum akım taşıma kapasitesi 150 A olarak belirlenmiş ve maksimum akım taşıma kapasitesinde çalıştığı kabul edilmiştir. İnsan vücudu oturur vaziyette düşünülmüş ve silindirik yapı olarak modellenmiştir. Silindirin boyu 1 m eni 30 cm’dir olarak seçilmiştir. İnsan dokusu olarak ortalama kas kütlesi düşünülmüş ve elektriksel iletkenliği  $\sigma=0.2$  S/m olarak kabul edilmiştir [12].

Şekil.4, güç kablosundan yayılan ve insan dokusu üzerinde gözlenen manyetik akı yoğunluğu sonuçlarını göstermektedir. Beklendiği gibi, manyetik akı yoğunluğunun kaynaktan uzaklaştıkça genliğinin azaldığı görülmektedir.



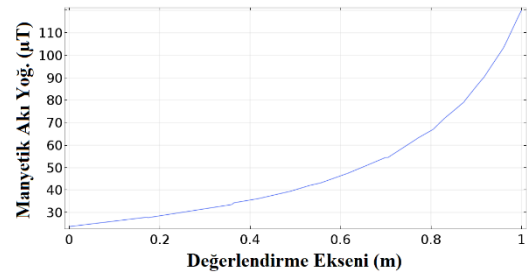
**Şekil.4:** Güç kablosundan yayılan manyetik akı yoğunluğunun iki boyutlu gösterimi

Şekil.5, iletim hattı ve çevresinde yayılan manyetik alan şiddeti sonuçlarını göstermektedir. Burada manyetik akı yoğunluğu  $\mu T$  mertebesinde. Buna göre, kabloya yaklaştıkça manyetik akı yoğunluğu yüksek mertebelere çıkmaktayken deri etkisine bağlı olarak kablunun iç bölgesinde düşük olduğu gözlenmektedir.



**Şekil.5:** Güç kablosunda ve çevresinde oluşan manyetik alan şiddetinin değişimi

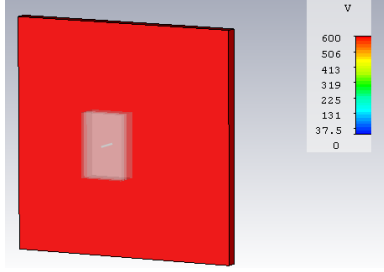
Şekil.6’da, vücut modelindeki değerlendirme eksenini boyunca gözlenen manyetik akı yoğunluğu sonuçları bulunmaktadır. Belirtilen değerlendirme eksenini, vücut modelini orta noktasından inceleyen doğru parçası olarak belirtilmektedir. Grafiğe göre, güç kablosuna en uzak noktada yaklaşık 22  $\mu T$  elde edilmişken en yakın noktada ise yaklaşık 120  $\mu T$  mertebesinde sonuçlar hesaplanmıştır.



**Şekil.6:** Değerlendirme eksenini boyunca manyetik alanın değişimi

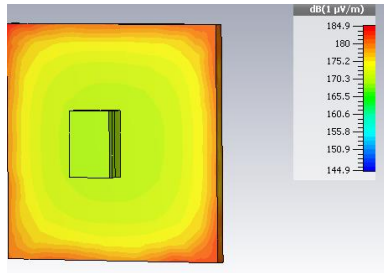
Elektrik alan simülasyonları ise, sonlu integrasyon tekniği (SİT) tabanlı CST Microwave Studio ile gerçekleştirilmiştir. Söz konusu yöntemde, problem uzayı ayrıklaştırılırken çözüme Maxwell denklemlerinin integral formu sayesinde ulaşılır. İnsan dokusu, elektrik alan simülasyonları için deri, yağ ve kas olmak üzere üç katmanlı olarak incelenmiştir ve arabanın iç yapısında bulunan güç kaynağının insan dokusu üzerinde yaratacağı statik elektrik alan değerlerini elde etmek amaçlanmıştır.

Şekil.7’de belirtilen problem senaryosunda, insan dokusunun 30 cm uzağında 600 V geriliminde güç kaynağı belirtilmiştir.



**Şekil.7:** Simülasyonlar için modellenen katmanlı doku modeli ve güç kaynağı

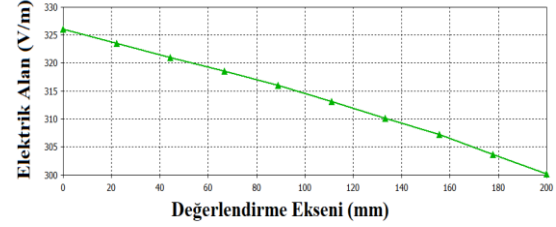
Şekil.8’de, güç kaynağından yayılan statik elektrik alanının katmanlı doku modeline maruziyet simülasyonu sonuçları gösterilmiştir. Burada, güç kaynağı modeli için süreksizlik noktalarında ışımaların olduğu gözlenmektedir. Bunun yanında, güç kaynağına yakın bölgelerde göreceli olarak daha fazla etkileşim gerçekleşmekteyken uzak bölgelerde daha az etki gözlenmektedir.



**Şekil.8:** Güç kaynağından yayılan statik elektrik alanının katmanlı doku modelinde değişimi

Şekil.9, elektrikli arabaların güç kaynaklarından yayılan statik elektrik alanının bir değerlendirme eksenini boyunca sonuçlarını göstermektedir. Söz konusu değerlendirme eksenini, çok katmanlı insan dokusu modelinin tam ortasından geçen bir doğru parçasıdır. Grafiğe göre, güç kaynağına en yakın nokta olan deri

katmanında gözlenen elektrik alan yaklaşık 327 V/m iken en uzak noktası olan kas dokusunda gözlenen elektrik alan yaklaşık 300 V/m'dir.



**Şekil.9:** Değerlendirme eksenini boyunca katmanlı doku modelinde gözlenen statik elektrik alan değişimi

#### 4. SONUÇLAR

Sunulan bu çalışmada, son yıllarda insan yaşamına hızla yerleşen elektrikli otomobillerin güç ünitelerinden kaynaklanan elektromanyetik alanların insan dokusu üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Elde edilen bulgulara göre elektrikli otomobillerdeki pil sistemlerinden kaynaklı elektrik alan seviyelerinin oldukça yüksek seviyelerde olduğu, insan dokusuna indüklenen seviyelerin sağlık açısından incelenmesinin gerekli olduğu, bu sistemlere bağlı güç hatlarının oluşturduğu manyetik alanların uluslararası standartlar ile belirlenen değerleri aşmayacak şekilde sınırlandırılması gerektiği gözlenmiştir. Ayrıca, elektrikli arabalardaki artış ve beklenmeyen etkileri göz önüne alındığında; hassas grup olarak değerlendirilen hamileler ve çocuklardaki elektromanyetik etkileri, olumsuz sonuçlara sebep olabilir. Tüm bu bulgular ışığında, elektrikli araçlarda bulunan güç sistemleri ve hatlarının elektromanyetik girişim çözümlerini göz önüne alınarak ele alınması gerektiği değerlendirilmiştir.

## 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından desteklenmektedir (Proje No: 1919B011801429).

## KAYNAKLAR

[1] Chan, C. C., “The past, present and future of electric vehicle development.” *Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS'99 (Cat. No. 99TH8475)* (Vol. 1, pp. 11-13). (1999).

[2] Moreno-Torres, P., et al. “Passenger exposure to magnetic fields in electric vehicles.” *Modeling and Simulation for Electric Vehicle Applications*, pp.47-71, 2016.

[3] Guttowski, S., Weber, S., Hoene, E., John, W., and Reichl, H., “EMC issues in cars with electric drives.” *IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No. 03CH37446)* (Vol. 2, pp. 777-782). (August 2003)

[4] Vassilev, A., Ferber, A., Wehrmann, C., Pinaud, O., Schilling, M., and Ruddle, A. R., “Magnetic field exposure assessment in electric vehicles.” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 57(1), 35-43, 2014.

[5] Ruddle, A. R., Low, L., and Vassilev, A., “Evaluating low frequency magnetic field exposure from traction current transients in electric vehicles.” *International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. (pp. 78-83), (Eylül 2013).

[6] Ruddle, A. R., and Low, L., “Impact of bodyshell on low frequency magnetic fields due to electric vehicle power cables.” *International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE*. (pp. 1-6), (September 2012).

[7] ICNIRP, “Guidelines on limits for exposure to static magnetic fields.” *Health Phys*. 96(4), pp. 504–514, 2009.

[8] IEEE, “Standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0–3 kHz.” *IEEE Standard C95.6-2002*, 2002.

[9] Anonim 1: <http://www.emfs.info/static-fields/static-limits/> [Son erişim tarihi: 06.04.2019].

[10] Arı, N. ve Özen, Ş., “Elektromanyetik alanlar.” Palme Yayıncılık, 2008.

[11] Ates, K., Carlak, H. F., and Ozen, S., “Magnetic field exposures due to under ground power cables: A simulation study.” *2nd World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Science (EECSS'16)*. (pp. 133-1), (August 2016).

[12] Andreuccetti, D., Fossi, R. and Petrucci, C.: An Internet resource for the calculation of the dielectric properties of body tissues in the frequency range 10 Hz - 100 GHz. IFAC-CNR, Florence (Italy), 1997. Based on data published by C. Gabriel et al. in 1996. <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/> [Son erişim tarihi: 06.04.2019].