



## Design and analysis of different transformer models used for charging electric vehicles with wireless power transmission system

Yıldırım Özüpak\*

Dicle University, Silvan Vocational School, 21640, Diyarbakır, Türkiye

### Highlights:

- In this study, a high frequency WPT transformer was designed
- Obtaining wireless power transmission parameters such as coupling coefficient and mutual inductance is analyzed
- An experimental setup was set up and the experimental and simulation results were compared

### Keywords:

- WPT
- Efficiency
- FEM
- Maxwell-3D
- Transformer

### Article Info:

Research Article  
Received: 09.11.2022  
Accepted: 11.06.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1202033

### Correspondence:

Author: Yıldırım Özüpak  
e-mail:  
yildirim.ozupak@dicle.edu.tr  
phone: +90 532 015 4796

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, the design of a high-frequency transformer designed for the electric vehicle charging system is presented in Figure A. In this design, various transformer configurations with different distances between transmit and receive coils are analyzed to obtain wireless power transmission parameters such as coupling coefficient and mutual inductance. The designs were simulated using Finite Element Method (FEM) based ANSYS-Maxwell software and the results were obtained. In addition, using the simulation system given in Figure A, a comparison of circular and rectangular type transformer designs for wireless power transmission has been made.

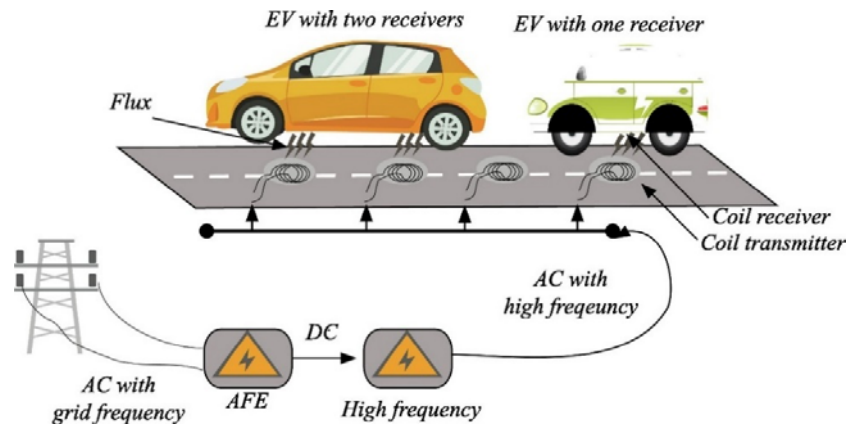


Figure A. Power conversion circuit of the WPT system

### Purpose:

The aim of this study is the design and analysis of a high frequency WPT transformer for electric vehicle charging system. In this design, various transformer configurations with different distances between the transmit and receive coils are aimed to obtain wireless power transfer parameters such as coupling coefficient and mutual inductance. The effect of these parameters on productivity was investigated.

### Theory and Methods:

The designs are simulated using Finite Element Method (FEM) based ANSYS-Maxwell software for the analysis of various transformer configurations with different distances between the transmit and receive coils, and the results are obtained. In order to confirm the results, an experimental setup was set up and the data obtained were compared.

### Results:

Wireless power transmission circular and rectangular type transformer designs were compared. An experimental setup was set up and the experimental and simulation results were compared. The results were found to be consistent and satisfactory.

### Conclusion:

When transformers are examined, considering factors such as the length of the copper coil, the volume of the ferrite core, the volume of the aluminum shield, and the base clearance, it is concluded that the performance of the circular coil transformer is better than the rectangular coil transformer of similar dimensions.



## Elektrikli araçların kablosuz güç aktarım sistemi ile şarj edilmesi için kullanılan farklı transformatör modellerinin tasarımı ve analizi

Yıldırım Özupak\*<sup>ID</sup>

Dicle Üniversitesi, Silvan Meslek Yüksekokulu, 21640, Diyarbakır, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- Bu çalışmada yüksek frekanslı bir WPT transformatörü tasarlanmıştır
- Kuplaj katsayısı ve karşılıklı endüktans gibi kablosuz güç iletim parametrelerinin elde edilmesi analiz edilir
- Bir deney düzeneği kurulmuş ve deney ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 09.11.2022

Kabul: 11.06.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1202033

### Anahtar Kelimeler:

KGA

verimlilik

maxwell-3d

transformatör

### ÖZ

Kablosuz Güç Aktarımı (KGA), elektrikli araçların, tıbbi cihazların, cep telefonlarının ve bilgisayarların şarj edilmesinde geniş uygulama alanı bulması nedeniyle gelişmekte olan bir teknolojidir. Bu nedenle, KGA alanındaki bilgi, modern güç elektroniği mühendisi için giderek daha önemli hale gelmektedir. Kablosuz güç aktarımını daha verimli ve kullanıcı dostu haline getirebilmek için KGA tasarımcıları için bu uygulamanın gerekliliklerinin iyi bilinmesi önem arz etmektedir. Bu uygulamaların önemli bir kısmı, kablosuz güç aktarım sisteminde yüksek frekanslı bir transformatörün uygun tasarımına dayanmaktadır. Yüksek frekanslı bu transformatör, gücün kablosuz aktarımı esnasında kayıpların en aza indirilmesi için endüktif yolla güç aktarım ilkesine göre tasarlanmaktadır. Bu çalışmada, elektrikli araçların kablosuz şarj sistemlerinde kullanılmak üzere yüksek frekanslı bir KGA sistemi transformatörünün tasarımı sunulmuştur. Bu tasarımlarda, verici ve alıcı bobinler arasındaki farklı hava aralıkları için bazı transformatör konfigürasyonları, kuplaj katsayısı ve ortak endüktansın gibi kablosuz güç aktarım parametrelerinin elde edilmesi için analiz edilmiştir. Bir deney düzeneği kurularak deneysel ve benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır.

## Design and analysis of different transformer models used for charging electric vehicles with wireless power transmission system

### HIGHLIGHTS

- In this study, a high frequency WPT transformer was designed
- Obtaining wireless power transmission parameters such as coupling coefficient and mutual inductance is analyzed
- An experimental setup was set up and the experimental and simulation results were compared

### Article Info

Research Article

Received: 09.11.2022

Accepted: 11.06.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1202033

### Keywords:

WPT

efficiency

fem

maxwell-3d

transformer

### ABSTRACT

Wireless Power Transfer (WPT) is an emerging technology as it finds wide application in charging electric vehicles, medical devices, mobile phones and computers. Therefore, knowledge in the WPT field is becoming more and more important to the modern power electronics engineer. In order to make wireless power transmission more efficient and user-friendly, it is important for WPT designers to be well aware of the requirements of this application. A significant number of these applications are based on the appropriate design of a high-frequency transformer in a wireless power transmission system. This high frequency transformer is designed according to the principle of inductive power transmission in order to minimize the losses during the wireless transmission of power. In this study, the design of a high-frequency WPT system transformer for use in wireless charging systems of electric vehicles is presented. In these designs, some transformer configurations for the different air gaps between the transmit and receive coils are analyzed to obtain wireless power transmission parameters such as coupling coefficient and common inductance. An experimental setup was set up and the experimental and simulation results were compared.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*yildirim.ozupak@dicle.edu.tr / Tel: +90 532 015 4796

## 1. Giriş (Introduction)

Kablosuz güç aktarımı (KGA), özellikle elektrikli otomobil sektöründe çalışan araştırmacılar için en heyecan verici konulardan biridir. Araç ve kaynak arasında fiziksel temas olmaksızın gücü aktarmak için kullanılan güçlü bir tekniktir. Günümüzde, KGA, biyomedikal cihazlar, elektrikli araçlar, sensör ağları ve endüstriyel otomasyon gibi farklı uygulamalarda kullanılmaktadır [1]. Son yıllarda ulaşım ve biyomedikal alanlarında bu konuda yapılan araştırmalar, kablosuz şarj önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Kablosuz güç aktarım sistemi genel anlamda endüktif güç aktarımı (EGA) ve kapasitif güç aktarımı (CGA) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [2]. Endüktif yolla güç aktarım sisteminin çalışma prensibi, elektrik gücü kaynağından alınan gücün manyetik indüksiyon yoluyla şarj edilecek cihazın depolama alanına aktarılması şeklindedir. Şarj cihazlarında bulunan gücü dönüştüren düzenek sayesinde, düşük frekansa sahip olan besleme enerjisini yüksek frekanslı alternatif akıma (AC) çevirir. Alıcı bobin ile verici bobin arasında yüksek frekanslı AC akışı sağlanır. Daha sonra, AC güç dönüştürücüsü sayesinde doğru akıma (DC) dönüştürülerek bataryanın şarj edilmesi için kullanılır. Yeni geliştirilen bir teknoloji olan kapasitif güç aktarım sisteminde güç aktarımı için bir çift kuplaj kapasitörü kullanılır. Doğrultucu ve evirici dahil olmak üzere diğer güç dönüştürme sistemleri EGA sistemi ile aynı kalır. CGA'nın boyutları ve maliyeti EGA sistemine oranla düşük olmasına rağmen sadece düşük güçlü uygulamalar için kullanılabilir [3]. Dolayısıyla araçların çoğunun KGA şarj sisteminde EGA sistemi tercih edilmektedir. EGA şarj uygulamalarında iletkenlerin olmaması, verici ve alıcı bobinlerinin şekli, bu bobinlerin boyutu ve konumu gücün verimli bir şekilde aktarılmasında büyük önem taşımaktadır.

Birçok araştırmacı, Elektrikli Araçların (EA) şarjının verimliliğini artırmak için farklı bobin şekillerini kullanmaktadır. Daniel Ongayo vd., kablosuz şarj için tek ve çift taraflı endüktif güç aktarımına (EGA) dayanan transformator sargı tasarımını karşılaştırmışlar [4]. Çift sargılı KGA transformatorlerinin fiziksel olarak daha sıkı olduğunu, ağırlıklarının daha az olduğunu ve trafo sargılarının farklı hizalarda olma durumunda bile iyi çalıştığını öne sürmüşlerdir. Aynı yazarlar farklı bir çalışmalarında EGA transformatorlerinin tasarımı için dairesel ve dikdörtgen gibi farklı bobin tasarımlarını benimsemişlerdir [5]. Son olarak, yazarlar dairesel bobinli transformator modelinin alıcı ve verici bobinlerinin arasında dikdörtgen bobinlere sahip modele oranla daha iyi bir kuplaj katsayısının olduğunu söylemişlerdir. Öztoprak Y., kablosuz güç aktarımı için elektrikli araçların kablosuz güç transfer sistemlerini incelemiştir [6]. Bir çalışmada aynı bobin modellerine sahip bir KGA sistem transformatorünün daha yüksek bir bağlantı faktörüne sahip olduğunu ve bu modelin verimliliğin daha

yüksek olduğunu öne sürmüştür [7]. Chinthavali vd., tasarladıkları KGA sistemindeki alıcı ve verici bobinler için yalıtılmış bir sargı modeli önermişlerdir. Önerilen bu modelin en yüksek verimliliğinin % 85 olduğunu belirtmişlerdir [8]. Genel olarak, KGA sistemlerinde bobinler arasındaki hava boşluğu mesafesinin artması ve bobinlerin yanlış konumlandırılması sistemin güç aktarım verimliliğini hızla düşürmektedir. Verimliliğin artırılması için rezonatörlerin kullanımı, çok alıcılı kompanzasyon ağları ve iki taraflı güç akışı kontrol yöntemleri gibi bazı yeni teknikler önerilmiştir [9-11] Bu çalışmada, kablosuz güç aktarımı sisteminde verimi etkileyen parametrelerin elde edilmesi için endüktif güç aktarım prensibine göre çalışan KGA transformatorü tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Dairesel ve dikdörtgen bobini, nüveli, nüvesiz ve alüminyum kalkan kaplamalı transformator gibi çeşitli tasarım konfigürasyonları ANSYS-Maxwell yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca bir deney düzeneği kurularak transformatorün deneysel analizi de gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak tablo halinde sunulmuştur.

## 2. Materyal ve Metot (Material and Method)

### 2.1. Elektrikli Araç Şarj Uygulamaları için WPT Sistemi (WPT System for Electric Vehicle Charging Applications)

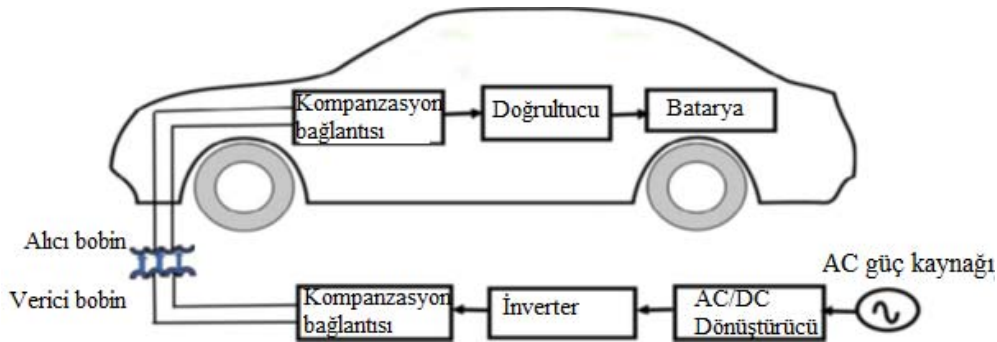
Kablosuz güç aktarım sisteminin temel blok diyagramı Şekil 1'de, kablosuz şarj uygulamasının enerji dönüşüm sisteminin devresi Şekil 2'de verilmiştir. Besleme kaynağından alınan AC güç, kontrol devresi olmayan bir doğrultucu aracılığıyla DC beslemeye dönüştürülmektedir. Elde edilen DC güç, yalıtımlı tam köprü bir DC-DC dönüştürücü vasıtasıyla enerji depolama birimine aktarılır. Kullanılan DC-DC dönüştürücü, inverter, yüksek frekanslı transformator ve doğrultucu gibi üç yapının bir araya getirilmesi ile oluşturulmaktadır. Yüksek frekanslı transformatorde birincil sargı şarj istasyonunda ikincil sargı ise elektrikli araçta bulunmaktadır. DC kaynağından alınan güç bir dönüştürücü aracılığıyla yüksek frekanslı AC besleme enerjisine dönüştürülerek transformatorün primer bobinine verilmiştir. Transformatorün sekonder kısmında bulunan yüksek frekanslı AC besleme çıkışı elektrikli aracın depolama birimini beslemek amacıyla DC'ye çevrilmiştir.

Sistemde yer alan kontrolör, güç akışının devamlılığını sağlamak için dönüştürücünün giriş parametrelerini değiştirmektedir.

### 2.3. Endüktif Güç Aktarımlı Transformatorün Matematiksel Modellemesi

(Mathematical Modeling of Inductive Power Transmission Transformer)

Endüktif güç aktarım transformatorünün modellemesi Şekil 3'te verilen eşdeğer kuplaj devresi göz önünde bulundurularak



Şekil 1. Elektrikli araçlar için KGA temel yapısı (WPT basic structure for electric vehicles)

gerçekleştirilmiştir. Devredeki primer bobin verici, sekonder bobin alıcı olarak ele alınmıştır. Modelinin eşdeğer devresindeki  $L_p$  ve  $R_p$  verici bobinin öz endüktansını ve direnci temsil etmektedir. Alıcı bobinin öz endüktansı ve direnci ise  $L_s$  ve  $R_s$  ile ifade edilmektedir. Bu bobinler arasında oluşan ortak endüktans  $M$  ile gösterilmiştir.  $M$  ile kuplaj katsayısı olan  $k$  arasındaki ilişki Eş. 1'deki gibi ifade edilmektedir [11]:

$$M = k\sqrt{L_p L_s} \quad (1)$$

Şekilde,  $L_p$  primer bobinin öz endüktansını,  $R_p$  primer bobinin direncini,  $L_s$  sekonder bobinin öz endüktansı ve  $R_s$  ise sekonder direnci temsil etmektedir. Transformatörün kuplaj katsayısı  $K$  ile ifade edilmiştir. Yukarıdaki eşdeğer devrenin kuplajlı devre çalışmasına dayanarak, EGA transformatörünün eşdeğer devresi elde edilmiştir. Devre Şekil 4'te sunulmuştur.

Eşdeğer devre modelinde verilen endüktans değerleri aşağıda verilen Eş. 2 ve Eş. 3 ile ifade edilmektedir.

$$L_1 = L_p - M \quad (2)$$

$$L_2 = L_s - M \quad (3)$$

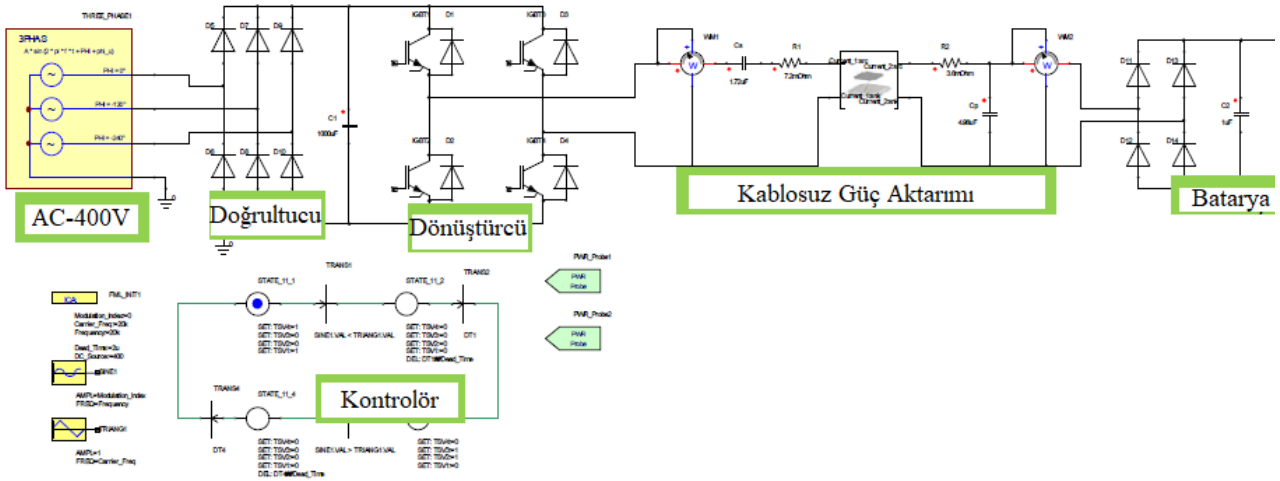
Burada  $L_1$  ve  $L_2$  verici ve alıcı bobinlerin kaçak endüktanslarını  $M$  ortak endüktansı ifade etmektedir.

Genel olarak, bu transformatörünün çıkış performansını açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ) ve kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) belirlemektedir. Devreden ( $R_L$ ) yük direnci çıkarıldığında verici bobinde meydana gelen akım nedeniyle alıcı bobinde indüklenen gerilim açık devre gerilimi olarak tanımlanır [12-14]. Eş. 4, Eş. 5 ile bu durum ifade edilmiştir.

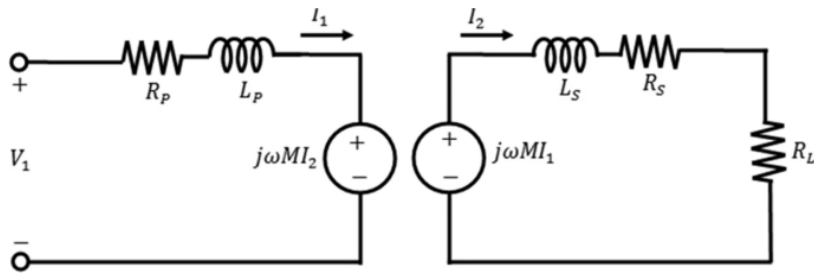
$$V_{oc} = j\omega M I_1 \quad (4)$$

$$I_{sc} = \frac{M I_1}{L_2} \quad (5)$$

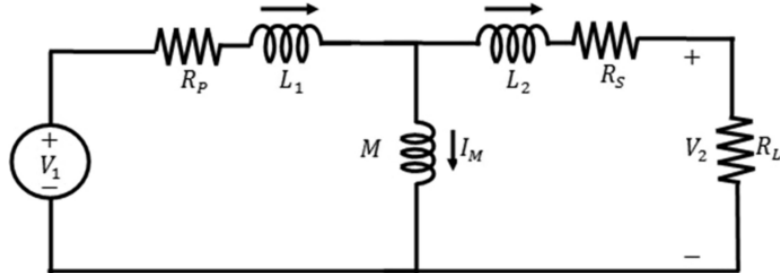
Yük direncinin kısa devre olması durumunda transformatörden elde edilen en yüksek kısa devre akımı  $I_{sc}$  akımıdır. Alıcı bobinin



Şekil 2. KGA sisteminin güç dönüşüm devresi (Power conversion circuit of WPT system)



Şekil 3. EGA transformatörünün kuplaj devre modeli (Coupling circuit model of IPT transformer)



Şekil 4. EGA transformatörünün eşdeğer devre modeli (Equivalent circuit model of IPT transformer)



endüktansının  $j\omega L_2$  empedans değeri ile bu akım sınırlandırılmıştır. Transformatörün alıcı bobininin kompanzasyon olmadığı zamanki gücü Eş. 6’da verildiği gibi ( $P_T$ ),  $I_{Sc}$  ve  $V_{oc}$  nin çarpımı ile elde edilir.

$$P_T = V_{oc} * I_{Sc} = \omega I_1^2 \frac{M^2}{L_2} \quad (6)$$

Alıcı bobinin endüktans etkisi bir kapasitör vasıtasıyla tolere edilerek gücün en yüksek seviyeden aktarılması sağlanabilir. Maksimum güç aktarımı esnasında LC besleme frekansında rezonansa girer. Dengeleme kondansatörü (C) genel olarak seri veya paralel bir şekilde bağlanabilir. Seri kompanzasyon durumunda alıcı bobinin akımı bobinin kalite faktörü (Q) ile artırılabilir. Fakat paralel kompanzasyon durumunda alıcı bobinin gerilim değeri artmaktadır. Eş. 7’de bu faktör sunulmuştur.

$$Q = \omega L_s / R_s \quad (7)$$

Kompanzasyon durumundaki endüktif güç aktarım sisteminin çıkış gücü Eş. 8’de verildiği gibi ifade edilebilir [15].

$$P_o = P_T * Q = V_{oc} * I_{Sc} = \omega I_1^2 \frac{M^2}{L_2} * Q \quad (8)$$

Ayrıca Eş. 9’da verildiği gibi de ifade edilebilir [16].

$$P_o = V_{in} I_1 * Qk^2 \quad (9)$$

Burada  $V_{in}$  verici bobin tarafındaki terminal gerilim ve  $I_1$  besleme akımıdır. Eş. 8, çıkışı gücünün, besleme tarafındaki parametre değerlerine ( $\omega I_1^2$ ) ortak bobinlerin kuplaj bağlantısı katsayısına ( $\frac{M^2}{L_2}$ ) ve alıcı taraftaki bobininin kalite faktörüne (Q) bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Eş. 9’da görüldüğü gibi sekonder tarafındaki çıkış gücü bağlantı katsayısının karesiyle orantılıdır. Bundan dolayı, kuplaj katsayısının iyi bir değere yükseltilebilmesi transformatörün tasarımına bağlıdır. İdeal bir kuplaj katsayısı, bobin kayıplarına, transformatörün nüvesine ve çevresine bağlı olduğu için bu ideal katsayıyı elde etmek zordur. Kuplaj katsayısının etkisi farklı transformatör tasarım modelleri incelenerek gerçekleştirilebilir. Bu sebeple, bu çalışmada farklı tasarım özelliklerine sahip dairesel ve dikdörtgen bobinli transformatör modelleri incelenmiştir.

#### 2.4. Dairesel bobinli Trafo Modeli (Circular coil Transformer Model)

Üç boyutlu dairesel bobinli transformatör modellerini tasarlamak ve analiz etmek için Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) tabanlı ANSYS-Maxwell platformu kullanılmıştır. Bu çalışmada, optimal kablosuz güç aktarım parametrelerini elde etmek için dairesel bobinli KGA transformatörü incelenmiştir. Bu transformatör ANSYS-Maxwell kullanılarak modellenmiştir. Modellenen KGA sistem transformatörünün boyutları Tablo 1’de kullanılan bobin iletkeninin özellikleri ise Tablo 2’de verilmiştir.

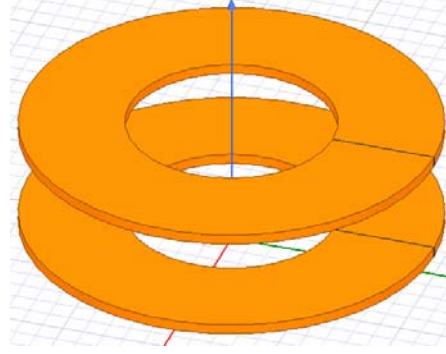
**Tablo 1.** KGA transformatörünün boyutları  
(Dimensions of WPT transformer)

Parametre	Verici bobin	Alıcı bobin
Sarım sayısı	42	24
Malzeme kalınlığı	2 mm	2 mm
Nüve yarıçapı	200 mm	200 mm
Alüminyum kalkan	205 mm	205 mm

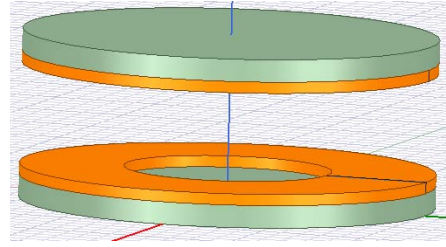
**Tablo 2.** Litz iletkeni ve parametre değerleri  
(Litz conductor and parameter values)

Litz	0,25φ×384 paralel sarım
Frekans	20kHz
$R_{AC}/R_{DC}$	1,034
İletkenlik	$5,8 \times 10^7$ [S/m]

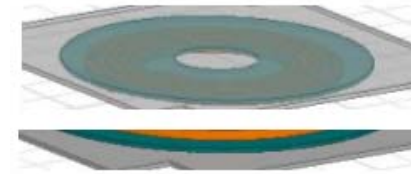
Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7’de verilen KGA trafo modelleri ANSYS-Maxwell yazılımı kullanılarak belirtilen malzeme ve boyutlarda oluşturulmuştur. Şekil 5’te transformatörün bobin modelleri gösterilmiştir. Bobin bakırdan yapılmış olup tasarımdaki alıcı ve verici bobinlerin boyutları aynıdır. Şekil 6’da ise ferrit nüveli, düzgün dairesel bobinlerin transformatör modeli sunulmuştur. Şekil 7’de ise ferrit nüveli ve alüminyum kalkanlı dairesel transformatör modeli verilmiştir.



**Şekil 5.** Transformatörün bobin modeli (Coil model of the transformer)



**Şekil 6.** Ferrit nüveli transformatör modeli  
(Transformer model with ferrite core)



**Şekil 7.** Ferrit nüveli ve alüminyum kalkanlı transformatör modeli  
(Transformer model with ferrite core and aluminum shield)

Ferrit nüveli yapı, kaçak manyetik akıyı sınırlar ve bobinler arasındaki bağlantıyı güçlendirir. Manyetik kaçak akımın düşürülmesi sayesinde enerji kaybı büyük oranda önlenmiş olur. Genel olarak, ferrit plakalar farklı tiplerde tasarlanırlar. Bunlar, gerekli akı yolunu gerçekleştirmek için gereken büyük ferrit parçalarının boyutları nedeniyle kırılğan ve maliyetlidirler [17-19].

### 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

#### 3.1. Dairesel bobinli Transformatörün Analizi (Analysis of Circular coil Transformer)

SEY tabanlı ANSYS-Maxwell simülasyon aracı ile Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7’de verilen KGA sistemi transformatör modelleri simüle edilmiş ve sonuçlar Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5’te sunulmuştur. Tabloda verilen d, alıcı ve verici bobin arasındaki mesafe,  $L_p$  verici bobinin öz endüktansı,  $L_s$  alıcı bobinin öz endüktansıdır. M karşılıklı

**Tablo 3.** Dairesel bobinli nüvesiz transformatörün benzetim sonuçları (Simulation results of a circular coil coreless transformer)

Mesafe	Kuplaj katsayısı (k)	Verici bobin endüktansı ( $\mu H$ )	Alıcı bobin endüktansı ( $\mu H$ )	Ortak endüktans (M) ( $\mu H$ )
10 cm	0,4517	531,783	526,621	301,254
20 cm	0,4182	535,876	526,145	282,643
40 cm	0,3631	538,315	526,348	253,402
60 cm	0,2924	538,924	527,023	220,014
80 cm	0,2467	540,124	527,146	187,378
100 cm	0,1972	544,062	527,102	149,935

**Tablo 4.** Dairesel bobinli ferrit nüveli transformatörün benzetim sonuçları (Simulation results of ferrite core transformer with circular coil)

Mesafe	Kuplaj katsayısı(k)	Verici bobin endüktansı ( $\mu H$ )	Alıcı bobin endüktansı ( $\mu H$ )	Ortak endüktans (M) ( $\mu H$ )
10 cm	0,5651	525,644	998,832	354,146
20 cm	0,5273	514,452	976,601	318,654
40 cm	0,4734	481,745	961,487	281,105
60 cm	0,4461	358,941	949,503	226,157
80 cm	0,3565	287,784	941,249	161,564
100 cm	0,3006	248,912	932,154	135,781

**Tablo 5.** Ferrit nüveli ve alüminyum kalkanlı dairesel transformatörün benzetim sonuçları (Simulation results of circular transformer with ferrite core and aluminum shield)

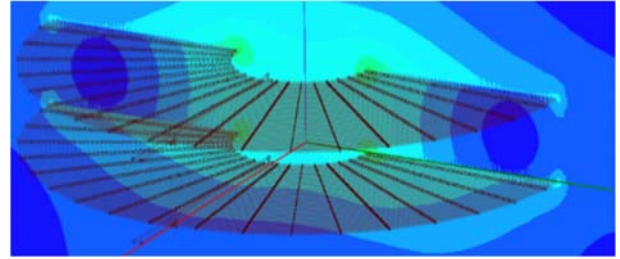
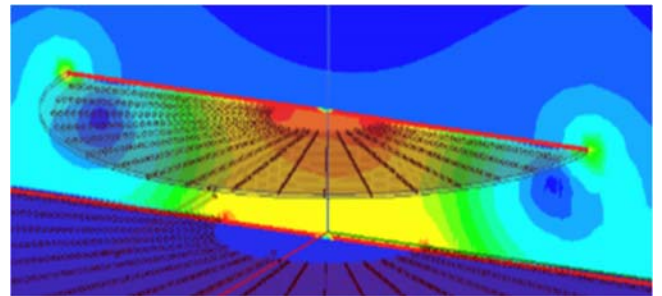
Mesafe	Kuplaj katsayısı(k)	Verici bobin endüktansı ( $\mu H$ )	Alıcı bobin endüktansı ( $\mu H$ )	Ortak endüktans (M) ( $\mu H$ )
10 cm	0,5561	526,521	997,382	352,451
20 cm	0,5148	516,245	971,543	314,316
40 cm	0,4613	480,448	959,412	278,208
60 cm	0,3942	360,124	947,431	221,517
80 cm	0,3476	290,246	938,235	159,418
100 cm	0,2983	249,201	930,147	134,545

endüktans, k ise bağlantı katsayısıdır. Bobinler arası mesafe 10 cm ile başlayıp belirli bir adım ile bu mesafe artırılarak 100 cm'ye yükseltilmiştir. Bu test, elektrikli araçların şarj edilmesi sırasında kuplaj katsayısı ile bobinler arasındaki hava aralığı mesafesinin ilişkisinin doğrulanması için yapılmaktadır.

Tablo 2'de sunulan sonuçlar incelendiğinde d mesafesi değiştiğinde, ortak endüktanstaki (M) değişimin, öz endüktans olan  $L_p$  ve  $L_s$  meydana gelen değişime oranla daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Tablo 2, Tablo 3, Tablo 4'te verilen farklı tasarımlarda verici ve alıcı bobinler arasındaki hava boşluğu azaldığında M ve k değerlerinin yükseldiği görülmüştür. M ve k'nin daha yüksek değerleri, (8) ve (9) eşitlikleriyle sonuçlanmıştır. Yani alıcı bobine daha fazla güç aktarımı sağlanmıştır. Ferrit nüveli transformatör tasarımında elde edilen M ve k'nin nüvesiz transformatör tasarımında elde edilen değerlerinden daha büyük olduğunu görülmüştür. Nüvesiz transformatör modeli daha hafif ve daha az maliyeti olmasına rağmen, karşılıklı endüktans ve kuplaj katsayısının düşük olması yüksek verimlilikle güç aktarımını sınırlamaktadır. Alıcı ve verici bobinler arasındaki 10 mm'lik mesafe için manyetik alan yoğunluğunu (B) Şekil 8 ve Şekil 9'da sunulmuştur. Manyetik alan yoğunluğunun gücü renklerle ifade edilecek olursa; mavi, en düşük değeri kırmızı ise manyetik alanın en yüksek yoğunluk değerini temsil eder.

Şekil 9'da elde edilen en güçlü manyetik alan yoğunluğu, ferrit nüvenin tasarıma dahil edilmesine bağlanabilir. Şekil 8'de, nüvesiz transformatör modelinin manyetik akı yoğunluğu verilmiştir. Burada manyetik akı çizgilerinin bobinlerin üst tarafına kadar uzandığı görülmektedir. Bununla birlikte, ferrit nüveli transformatör modelinde, akı bobinlerin üst tarafına geçememiştir. Alüminyum katmanlı transformatör modelinin daha verimli çalıştığı ve manyetik akının daha fazla bobinlerin arasında kaldığı gözlemlenmiştir. Şekil 8

ve Şekil 9'da gösterilen sonuçlar, transformatörün bir ferrit nüve ve alüminyum kalkan ile tasarlanması durumunda kaçak akının azaltılabileceğini açıkça göstermektedir.

**Şekil 8.** Dairesel nüvesiz transformatörün manyetik akı dağılımı (Magnetic flux distribution of circular coreless transformer)**Şekil 9.** Dairesel ferrit nüveli ve alüminyum plakalı transformatörün manyetik akı dağılımı (Magnetic flux distribution of transformer with circular ferrite core and aluminum plate)

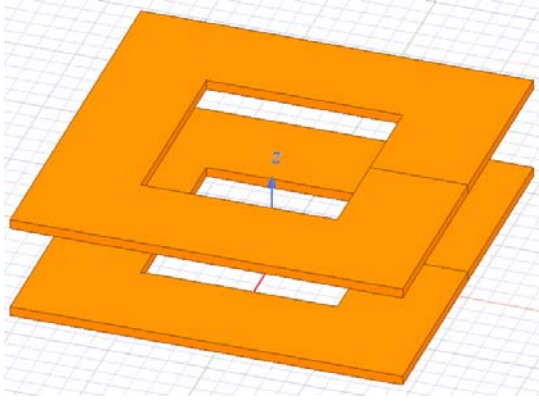
### 3.2. Dikdörtgen Trafo Modelinin Tasarımı ve Analizi (Design and Analysis of Rectangular Transformer Model)

Bu bölümde ANSYS-Maxwell yazılımı kullanılarak dikdörtgen bobinli transformatorlerin tasarlanması anlatılmıştır. Bu çalışmada, Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12'de gösterildiği gibi dört benzersiz dikdörtgen bobin düzenlemesi ele alınmıştır. Dikdörtgen transformator modeli, dikdörtgen biçiminde sarıli dairesel bir kesit bobinden oluşur. Dikdörtgen transformator modelinin kenar uzunlukları dairesel transformator modelinin çapına eşit alınmıştır. Dikdörtgen transformator modelinin boyutları Tablo 6'te verilmiştir.

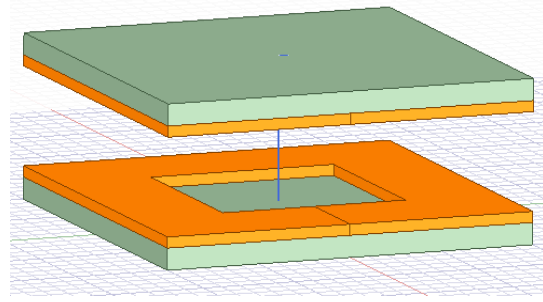
**Tablo 6.** Dikdörtgen KGA transformatorünün boyutları  
(Dimensions of rectangular WPT transformer)

Parametre	Verici bobin	Alıcı bobin
Sarım sayısı	42	24
Malzeme kalınlığı	2 mm	2 mm
Bobin boyutları	(395x395) mm	(395x395) mm
Nüve boyutları	(398x398) mm	(398x398) mm
Alüminyum kalkan boyutları	(400x400) mm	(400x400) mm

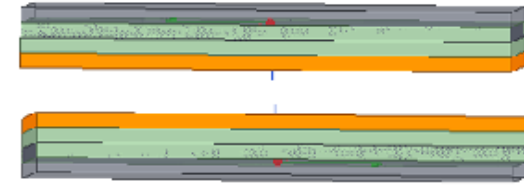
Bu modelin primer ve sekonder sarım sayıları dairesel transformator modeli ile aynı seçilmiştir. Şekil 11'de dikdörtgen bobinlere sahip nüvesiz dikdörtgen transformator modeli gösterilmektedir. Şekil 12'de ferrit nüveli dikdörtgen bobinleri, Şekil 13'te ferrit nüveli ve alüminyum kalkanlı dikdörtgen bobinleri verilmiştir. Şekil 13'te modelin mesh edilmiş hali sunulmuştur.



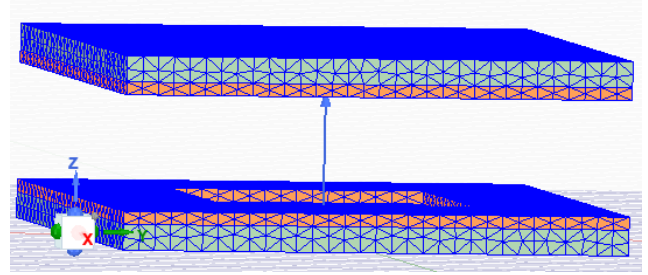
**Şekil 10.** Nüvesiz transformator modeli (Coreless transformer model)



**Şekil 11.** Nüveli transformator modeli (Core transformer model)



**Şekil 12.** Nüveli ve alüminyum kalkanlı transformator modeli  
(Transformer model with core and aluminum shield)



**Şekil 13.** Modelin analiz için mesh edilmiş hali  
(Anointed version of the model for analysis)

Tablo 7, Tablo 8 ve Tablo 9'da verilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, bobinler arasındaki hava aralığı mesafesinin değişimi sırasında bobinlerin ortak endüktansındaki (M) değişimin  $L_p$  ve  $L_s$  endüktanslarındaki değişime oranla küçük olduğu görülmektedir. Üç tasarımda da verici bobin ile alıcı bobin arasındaki hava aralığı mesafesi azaldığı sürece M ve kuplaj katsayısı k artmıştır.

**Tablo 7.** Nüvesiz dikdörtgen bobinli transformatorün benzetim sonuçları (Simulation results of coreless rectangular coil transformer)

Mesafe	Kuplaj katsayısı(k)	Verici bobin endüktansı ( $\mu H$ )	Alıcı bobin endüktansı ( $\mu H$ )	Ortak endüktans (M) ( $\mu H$ )
10 cm	0,4603	532,361	527,261	302,204
20 cm	0,4217	536,942	527,213	284,436
40 cm	0,3689	539,012	527,832	255,309
60 cm	0,2945	540,347	528,031	221,834
80 cm	0,2398	542,213	528,410	189,251
100 cm	0,2001	545,921	528,982	150,992

**Tablo 8.** Ferrit nüveli transformatorün benzetim sonuçları (Simulation results of ferrite core transformer)

Mesafe	Kuplaj katsayısı(k)	Verici bobin endüktansı ( $\mu H$ )	Alıcı bobin endüktansı ( $\mu H$ )	Ortak endüktans (M) ( $\mu H$ )
10 cm	0,586	401,436	1012,501	437,546
20 cm	0,534	382,251	1000,105	417,501
40 cm	0,481	360,803	987,587	397,506
60 cm	0,412	320,156	962,543	377,557
80 cm	0,343	311,784	950,015	357,452
100 cm	0,285	307,214	937,541	337,012

M ve k değerlerinin büyük olması alıcı bobine daha yüksek güç iletilmesi anlamına gelir. Tasarımda ferrit çekirdeğin bulunması nedeniyle ortak endüktans (M) ve kuplaj katsayısı (k) değerleri nüvesiz transformatöre göre daha büyük olmuştur. Ferrit nüve meydana gelen manyetik alanı uygun şekilde yoğunlaştırarak iki bobin arasında kalmasını sağlar. Böylece daha yüksek M ve k değerleri elde edilebilir. Yukarıdaki transformatör tasarımı için yerleşik bir manyetik alanın yoğunluğundaki (B) ve manyetik alan yoğunluğundaki vektörel varyasyon Şekil 14'te gösterildiği gibi olmuştur.

### 3.3. Farklı yapılarıdaki KGA Transformator Modellerinin Sonuçlarının Karşılaştırılması (Comparison of the Results of KGA Transformer Models of Different Structures)

KGA sistemi için farklı transformator tasarım modellerinin analiz edilmesi ile elde edilen kuplaj katsayısı ve ortak endüktans sonuçları Tablo 10'da sunulmuştur. Nüvesiz KGA transformatorü için M ve k'nin, maksimum akı bağlantı alanı nüveli transformatöre oranla düşük olduğu görülmektedir. Alüminyum kalkanlı ve kalkansız simülasyon sonuçlarında ihmal edilebilir bir fark olmuştur. Ferrit

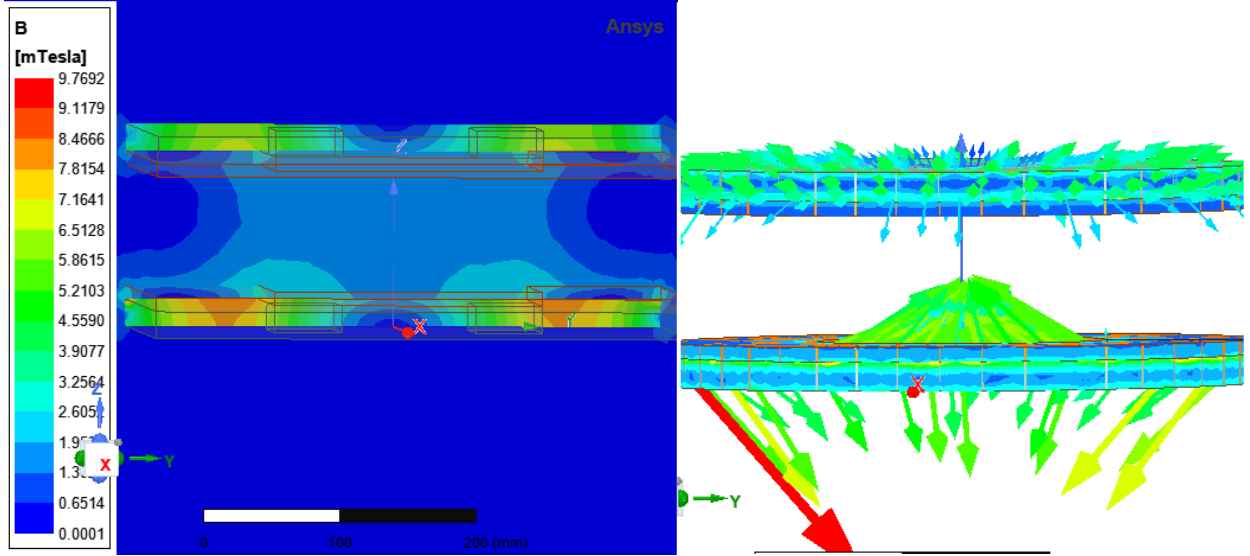
nüveli dikdörtgen bobinlerden elde edilen ortak endüktans ve kuplaj katsayısı değerleri daha iyi olsa da bobin uzunluğu, nüve hacmi, alüminyum plağın hacmi ve zemin alanı gibi parametreler dikkate alındığında dairesel modelin daha iyi olduğu söylenebilir.

### 3.4. Deneysel Kurulum ve Sonuçlar (Experimental Setup and Results)

Kablosuz güç aktarımı için dairesel bobin transformatorünün alıcı ve verici sargılarının kurulumu Şekil 15'de verilmiştir. Yumuşak anahtarlamalı izole tam köprü DC-DC dönüştürücü kullanılmış ve geçit darbelerini vermek için mikrodenetleyici kullanılmıştır. Deneysel analiz, anahtarlamalı izole tam köprü dönüştürücüye besleme verilerek yapılmıştır. Tam köprü dönüştürücünün çıkışı, transformatorün primer bobinine bağlanmıştır. Son olarak, transformatorün sekonder bobininden gelen çıkış, köprü doğrultucuya bağlanmıştır. Bobinler arasındaki mesafe arttıkça, belirli bir gerilim değerinde primer bobine aktarılan enerji miktarı azalmıştır. Bobinler arasındaki mesafe azaltıldığında aktarılan enerjinin arttığı tespit edilmiştir. KGA sisteminin verimliliği hesaplanarak karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 11'de sunulmuştur.

**Tablo 9.** Ferrit nüveli ve alüminyum kalkanlı transformatorün benzetim sonuçları  
(Simulation results of transformer with ferrite core and aluminum shield)

Mesafe	Kuplaj katsayısı(k)	Verici bobin endüktansı ( $\mu H$ )	Alıcı bobin endüktansı ( $\mu H$ )	Ortak endüktans (M) ( $\mu H$ )
10 cm	0,572	401,016	1009,562	436,912
20 cm	0,530	380,125	998,603	415,015
40 cm	0,473	359,317	985,368	395,713
60 cm	0,401	319,012	960,354	375,772
80 cm	0,334	308,465	949,018	356,001
100 cm	0,276	305,237	935,415	334,987

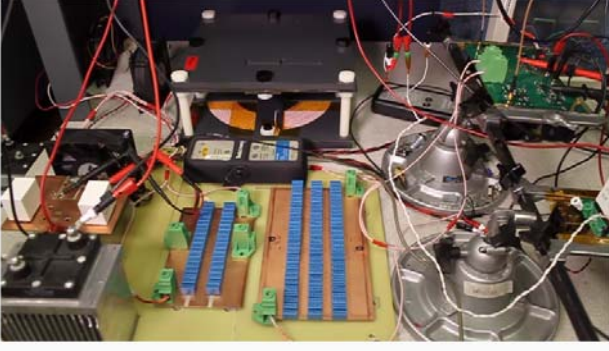


**Şekil 14.** Ferrit nüveli transformatorün manyetik akı dağılımı ve vektörel dağılımı (Magnetic flux distribution of ferrite core transformer)

**Tablo 10.** Tasarlanan transformator modellerinin analiz sonuçlarının karşılaştırılması  
(Comparison of the analysis results of the designed transformer models)

Transformator modeli	Kuplaj katsayısı (k)	Ortak endüktans (M)-( $\mu H$ )
Nüvesiz Dairesel Transformator modeli	0,4517	301,254
Nüveli Dairesel Transformator modeli	0,5651	354,146
Nüveli ve alüminyum kalkanlı Dairesel Transformator modeli	0,5561	352,451
Nüvesiz Dairesel Transformator modeli	0,4603	302,204
Nüveli Dairesel Transformator modeli	0,5860	433,546
Nüveli ve alüminyum kalkanlı Dairesel Transformator modeli	0,5720	436,912





Şekil 15. Deneysel analiz platformu (Experimental analysis platform)

Tablo 11. Deneysel analiz ile simülasyonun analizinin KGA verimlerinin sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of the results of the experimental analysis and simulation analysis of the WPT efficiencies)

Parametre	Deneysel analiz	SEY analizi
Verimlilik	%91,03	%92,97

Tablo 10'daki SEY için verim değerleri, bobinler arasındaki mesafeye, kullanılan nüve malzemesine, alüminyum plak olup olmamasına, manyetik akının bobinler arasında kalan değerine, kaçak akılara, kullanılan iletken, transformatörün yapısına, frekans değerine ve kublaj faktörüne bağlı olarak farklılık göstermiştir. Deneysel analizde verimin daha az olması ortamın değişken sıcaklığına, hava aralığı malzemesine titreşim kayıplarına bağlı olarak daha az olmuştur.

Anahtarlama kayıpları az olmuştur. Kullanılan topoloji ve topolojide kullanılan güç elektroniği elemanlarının doğru seçimi bu kayıpları azaltma amacını hedeflemiştir. Girdap akım kayıpları kullanılan ferrit nüve ve alüminyum kalkan sayesinde en aza indirgenmeye çalışılmıştır. Bu iki yapı kaçak akıların dağılmasını önlemektedir. Proximity etkisi sonucunda oluşan kayıpları en düşük seviyeye indirmek için sargı nasıl seçileceği önceden Sargı yapıları ve iletken çeşitleri araştırılmıştır. Sargı kayıplarında önemli bir rolü olan besleme akımındaki harmonikler, deri ve yaklaşım etkisi ile birlikte düşünülmüştür.

#### 4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, elektrikli araçların şarj uygulamalarında kullanılan ve endüktif güç aktarımına dayanan KGA sistemleri için bir transformatörün farklı konfigürasyonlarının tasarımı ve analizi sunulmuştur. Bu transformatör tasarımları SEY tabanlı ANSYS-Maxwell platformu kullanılarak simüle edilmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir. Bu çalışmada çeşitli konfigürasyonlar için ayrıntılı manyetik alan yoğunluğu grafikleri de elde edilmiştir. Tasarımların analiz sonuçları, KGA üzerindeki öz endüktansın sistemde bulunan hava aralığı mesafesine bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Ayrıca, bobinlerin arasındaki hava aralığı mesafenin azaldıkça iki bobin arasındaki kuplajın arttığı da görülmüştür. Farklı konfigürasyonlar için dairesel ve dikdörtgen transformatör modelleri arasındaki karşılaştırmada dikdörtgen bobinli modelin parametre varyasyonlarının dairesel bobinli modelin parametre varyasyonlarına çok yakın olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bakır bobinin uzunluğu, ferrit çekirdeğin hacmi, alüminyum kalkanın hacmi ve taban boşluğu gibi faktörler göz önüne alındığında, dairesel bobinli transformatörün performansının benzer boyutlardaki dikdörtgen bobinli transformatörden daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Kurulan

deneysel düzenek ile elde edilen verim değerleri simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığında sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür.

#### Kaynaklar (References)

- Zeng Y, Qiu D, Meng X, Zhang B, Tang SC., Optimised design of coils for wireless power transfer in implanted medical devices. *IEEE J Electromagn, RF Microwav Med Biol*, 2 (4), 277–285, 2018
- Musavi F, Eberle W., Overview of wireless power transfer technologies for electric vehicle battery charging. *IET Power Electron* 7, 60–67, 2014.
- Kline M, Izyumin I, Boser B, Sanders S., Capacitive power transfer for contactless charging. *IEEE Applied Power Electronics Conf. and Exposition (APEC)*, 1398–1404, 2011.
- Daniel O, Moin H., An overview of single-sided and double-sided winding inductive coupling transformers for wireless electric vehicle charging. *IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC)*, 2015.
- Daniel O, Moin H., Comparison of circular and rectangular coil transformer parameters for wireless power transfer based on finite element analysis. *IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, 2015
- Özupak Y., Analysis of the Model Designed for Magnetic Resonance Based Wireless Power Transfer Using FEM, *Journal of Engineering Research*, DOI: 10.36909/jer.17631, 2022.
- Özupak, Y., Elektrikli Araçların Kablosuz Güç Transferi Sistemi için Dairesel Bobinli Bir Transformatörün Tasarımı ve Veriminin Analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37 (1), 209-219, 2022.
- Chinthavali M, Onar OC, Campbell SL, Tolbert LM., Integrated charger with wireless charging and boost functions for PHEV and EV applications. *Oak Ridge National Laboratory Contract with the US Department of Energy*, No. DE-AC05-00OR22725, 2015.
- Navid R., Jun W. and Xibo Y., In-Situ Measurement and Investigation of Winding Loss in High-Frequency Cored Transformers Under Large-Signal Condition. *IEEE open journal Industry Applications*, 3, 2022.
- Yi Z, Li M, Muneer B, Zhu Q., High-efficiency mid-range inductive power transfer employing alternative-winding coils". *IEEE Trans Power Electron*, 34 (7), 6706–6721, 2019.
- K. Parkavi Kathirvelu, G. G. V. Sandeep, J. Swathi, Rengarajan Amirtharajan, R. Balasubramanian1, Design of Transformer for Wireless Power Transfer in Electric Vehicles, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering* 45, 1311–1324, 2021.
- Zhang Y., Chen K., F. He, Z. Zhao, T. Liu, and L. Yuan, Closed-form oriented modeling and analysis of wireless power transfer system with constant-voltage source and load, *IEEE Trans. Power Electron.*, 31 (5), 3472-3481, May 2016.
- Kim H. et al., "Coil design and measurements of automotive magnetic resonant wireless charging system for high-efficiency and low magnetic field leakage," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, 64 (2), 383-400, Feb. 2016.
- Zhenjie Li, Chunbo Zhu, Jinhai Jiang, Kai Song, Member, and Guo Wei, A 3-kW Wireless Power Transfer System for Sightseeing Car Supercapacitor Charge, *IEEE transactions on power electronics*, 32 (5), MAY 3301. 2017.
- Rasekh N, Mirsalim M Evaluation study on an integration method for a DDQP using LCC and series compensation topologies for inductive power transfer. *IET Electr Power Appl* 12 (9), 1320–1327, 2018.
- Moghaddami M, Sundararajan A, Sarwat AI A powerfrequency controller with resonance frequency tracking capability for inductive power transfer systems. *IEEE Trans Ind Appl* 54 (2), 1773–1783, 2018.
- Yang S, Deng X, Lu J, Wu Z, Du K light-load efficiency optimization for an LCC-parallel compensated inductive power transfer battery charger. *Electron (Switz)*, 9 (12), 1–13, 2020.
- Yi Z, Li M, Muneer B, Zhu Q High-efficiency mid-range inductive power transfer employing alternative-winding coils, *IEEE Trans Power Electron*, 34 (7), 6706–6721, 2019.
- Özupak Y., Elektrikli Araçların Kablosuz Güç Transferi Sistemleri için Farklı Transformatör Modellerinin Tasarımı ve Analizi, *DUJE (Dicle University Journal of Engineering)* 13, 1 Sayfa 11-18, 2022.
- Gül M.N. Yazar O., Coşkun S., Zhang F., Li L., Ersöz Kaya İ., Predictive equivalent consumption minimization strategy for power-split hybrid electric vehicles using Monte Carlo algorithm, *Journal of*

- the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (3), 1615-1630, 2023.
21. İnan R., Güçkıran M., Altınışık Y.E., Tek S., Potuk M., Real-time implementation of battery management system designed with improved passive balancing technique for electric vehicles, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (3), 1757-1768, 2023.