



## Araştırma Makalesi / Research Article

## Elektrikli Araçların Kablosuz Güç Transferi Sistemleri için Farklı Transformatör Modellerinin Tasarımı ve Analizi

*Design and Analysis of Different Transformer Models for Wireless Power Transfer Systems of Electric Vehicles*

Yıldırım Özüpak\*

Dicle Üniversitesi, Silvan MYO, Elektrik ve Enerji Programı, [yildirim.ozupak@dicle.edu.tr](mailto:yildirim.ozupak@dicle.edu.tr)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1780-3152>

## MAKALE BİLGİLERİ

## Makale Geçmişi:

Geliş 26 Şubat 2022  
Revizyon 26 Mart 2022  
Kabul 27 Mart 2022  
Online 30 Mart 2022

## Anahtar Kelimeler:

KGA Transformatör,  
Manyetik Rezonans,  
SEY.

## ÖZ

Kablosuz güç aktarımı, elektrikli araçların, implante edilmiş tıbbi cihazların vb. kablosuz şarjın geniş uygulamaları nedeniyle gelişmekte olan bir teknolojidir. Tasarımcıların kablosuz güç aktarımını (KGA) daha verimli ve kullanıcı dostu haline getirebilmeleri için bu uygulamaların önemli noktalarını bilmeleri gerekmektedir. KGA sisteminin tasarımı için yüksek frekanslı bir transformatörün uygun tasarımı en önemli adımdır. Bu yüksek frekanslı transformatörlerden güç aktarımı sırasında minimum kayıpları elde etmek için endüktif güç aktarım ilkesi kullanılmaktadır. Bu çalışmada, elektrikli araç şarjı için tasarlanmış yüksek frekanslı bir transformatörün tasarımı ve analizi sunulmuştur. Bu tasarımda, primer ve sekonder bobinler arasındaki farklı mesafelere sahip çeşitli transformatör konfigürasyonları, bağlantı katsayısı ve karşılıklı endüktans gibi kablosuz güç aktarım parametreleri için analiz edilmiştir. Tasarımlar, Sonlu Elemanlar Yöntemine dayalı çözüm gerçekleştiren ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak simüle edilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Son olarak bu çalışmada, KGA sistemi için dairesel ve dikdörtgen tip transformatör tasarımlarının analiz sonuçları karşılaştırılmış ve optimum tasarım belirlenmeye çalışılmıştır.

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 26 February 2022  
Received in revised form 26 March 2022  
Accepted 27 March 2022  
Available online 30 March 2022

## Keywords:

WPT Transformer,  
Magnetic Resonance,  
FEM

## ABSTRACT

Wireless power transmission, electric vehicles, implanted medical devices, etc. It is an emerging technology due to the wide applications of wireless charging. Designers need to know the key points of these applications in order to make wireless power transmission (WPT) more efficient and user-friendly. Appropriate design of a high frequency transformer is the most important step for the design of the WPT system. The principle of inductive power transfer is used to obtain minimum losses during power transfer from these high frequency transformers. In this study, the design and analysis of a high-frequency transformer designed for electric vehicle charging is presented. In this design, various transformer configurations with different distances between primary and secondary coils are analyzed for wireless power transfer parameters such as coupling coefficient and mutual inductance. The designs are simulated using ANSYS Maxwell software, which performs solutions based on the Finite Element Method, and the results are obtained. Finally, in this study, the analysis results of circular and rectangular type transformer designs for the WPT system were compared and the optimum design was tried to be determined.

Doi: 10.24012/dumf.1079729

\* Sorumlu Yazar

## Giriş

Kablosuz güç aktarımı (KGA), otomobil sektöründe çalışan araştırmacıların merak ve ilgi oldağı haline gelen konulardan biridir. KGA sistemi araç ile güç kaynağı arasında iletken olmadan elektrik gücünü aktarmak için kullanılan önemli bir tekniktir. Bu sistem, biyomedikal implantlar (Zeng ve diğerleri 2018), elektrikli araçlar, sensör ağları ve endüstriyel otomasyon dahil olmak üzere çok çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Ulaşım ve biyomedikal alanlarında da son on yılda yapılan araştırmalar, kablosuz şarjın kaçınılmaz olduğunu ortaya koymaktadır [1-3].

KGA sistemi genel olarak endüktif güç aktarımı (EGA) ve kapasitif güç transferi (KGT) olmak üzere iki sınıfta incelenmektedir [4]. EGA'nın çalışma prensibi, elektrik prizinden alınan enerjinin manyetik rezonans yoluyla araçların akülerine aktarılması şeklindedir. Şarj cihazındaki güç dönüştürme aşaması, düşük frekanslı besleme gücünü yüksek frekanslı alternatif akıma (AC) dönüştürür. Alıcı olarak belirlenen sekonder bobin, verici olarak belirlenen primer bobinden yüksek frekanslı AC'yi alıp AC doğrultucu tarafından doğru akıma (DC) dönüştürülür. DC güç, akünün şarj edilmesi için kullanılır. KGT sistemi gelişmekte olan bir teknolojidir. Bu teknolojiye güç aktarımı için çift kuplaj kapasitörü kullanılmaktadır. Kapasitörler haricinde diğer güç dönüştürme sistemleri, doğrultucu ve evirici dahil olmak üzere, EGA sistemi le aynı özelliklere sahiptir. KGT sisteminin boyutu ve maliyeti nispeten düşük olsa da bu sistem yalnızca düşük güçlü uygulamalar için uygundur [5]. Bundan doolayı dört tekerlekli araçların çoğu şarj cihazları EGA sismine dayanmaktadır.

Bir EGA sistemli şarj cihazında fiziksel temasın olmamasından dolayı, verici ve alıcı sargılarının şekli, boyutu ve konumu verimli bir güç aktarımında hayati bir rol oynamaktadır. KGA transformatörlerinde kullanılan U-nüveleri ve E-nüveleri daha önceki çalışmalarda yüksek kuplaj katsayısı elde etmek için kullanılmıştır. Ancak bu nüve şekillerinin kalın olmaları KGA sistemlerinde uyumsuzluk meydana getirmekteydi. Birçok araştırmacı, elektrikli araçlar şarj sisteminin verimliliğini artırmak için farklı bobin şekillerini kullanmaktadır. Bir çalışmalarda kablosuz şarj için tek ve çift taraflı EGA transformatör sargı tasarımı karşılaştırılmıştır [6]. Çift taraflı sargılı transformatörlerin boyut olarak kompakt olduğunu, daha az ağırlığa sahip olduğunu ve transformatör bobinlerinin yanlış hizalanmasına karşı iyi bir esnekliğe sahip olduğunu öne sürmüşlerdir. Aynı yazar farklı farklı bir çalışmalarda EGA transformatörleri için dairesel ve dikdörtgen tasarım gibi iki farklı bobini kullanmışlardır. Dairesel bobinin primer ve sekonder bobinler arasında daha iyi bir kuplaj katsayısı olduğu sonucuna varmışlardır. Kablosuz güç aktarımı için tek taraflı ve çift taraflı dikdörtgen çekirdekli transformatör tasarımı yapılmıştır [7]. Çift taraflı sargılı dikdörtgen çekirdekli bir transformatörün kompakt olduğunu ve bobinlerin yanıl yönlerde yanlış hizalanmasına karşı daha az duyarlı olduğunu öne sürmüşlerdir. Onar ve ark. 2016 yılında Toyota RAV4 aracı için uyumlu ve benzersiz transformatör bobini ile yüksek

güçlü KGA tabanlı bir şarj şeması önermişler [8]. Eşleştirilmiş bobinli KGA'nın daha yüksek bir bağlantı faktörü ve verimlilik ile sonuçlandığını öne sürmüşlerdir. Chinthavali ve ark. KGA sisteminde bobinleri enerjiyi iletme ve almak için çift izole bir sargı önermişler ve sistemim maksimum %85 verimlilikle çalıştığı sonucunu elde etmişler [9].

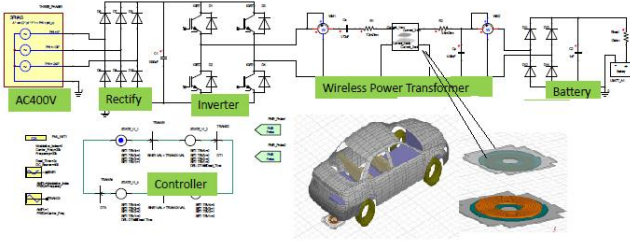
Genel olarak, KGA sistemlerinde, artan hava boşluğu ve bobinlerin yanlış hizalanması ile sistemin güç aktarım verimliliği hızla azalır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, rezonans yöntemi ve çoklu alıcıların kullanımı gibi bazı yeni teknikler önerilmiştir [10]. Kompanzasyon ağları ve çift yönlü güç akışı kontrol yöntemleri sistem verimliliğini arttırmak için kullanılmaktadır [11].

Bu çalışmada, kablosuz güç aktarım sistemi için EGA transformatörünün tasarımı yapılmıştır. Aynı sargı yapısına sahip dairesel nüveli transformatör, farklı sargı yapısına sahip dairesel nüveli transformatör ve dikdörtgen dilimli ferit nüveli transformatör gibi çeşitli tasarım konfigürasyonları ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, kablosuz güç aktarım teknolojisinde ve kablosuz şarjdaki uygulamalarda ilerleme kaydedildiğini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, Ansys-Maxwell ortamında modelleme yapılarak KGA sisteminin yapısıyla ilgili hususlar ayrıntılı olarak incelenmiştir. Elektrikli araçlar ve bileşenleri için KGA'nın blok şeması, EGA'nin modellenmesi ilgili matematiksel denklemleri, simülasyon sonuçlarını ve dikdörtgen bobinin performansı analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar tablolar halinde sunulmuştur.

## Materyal ve Metot

### Transformatörün Modellenmesi Elektrikli Araçlar için KGA Sisteminin Blok Şeması

KGA sisteminin temel yapı taşı ve kablosuz şarj sisteminin devre şeması Şekil 1'de sunulmuştur. Şekillerden de görüleceği üzere şebekeden gelen AC beslemesi, kontrolsüz bir doğrultucu tarafından DC'ye dönüştürülmektedir. DC gücü, tam köprü izoleli bir DC-DC dönüştürücü aracılığıyla aküye aktarılmaktadır. Tam köprü izoleli DC-DC dönüştürücü, evirici, yüksek frekanslı transformatör ve doğrultucu gibi üç bloğun bir araya gelmesi ile elde edilmiştir. Yüksek frekanslı KGA transformatörlerinde, primer sargı şarj istasyonunda, sekonder sargı ise elektrikli araçta bulunmaktadır. DC kaynağı, bir invertör kullanılarak yüksek frekanslı AC'ye dönüştürülmüş ve transformatörün primerine verilmiştir. Transformatörün sekonder tarafında bulunan yüksek frekanslı AC çıkışı, elektrikli aracın aküsünü beslemek için DC'ye dönüştürülmüştür. Kontrolör, inverterin giriş parametrelerini değiştirerek sürekli bir güç akışı sağlamaktadır.

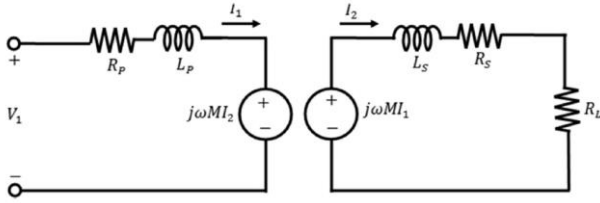


Şekil 1. KGA sisteminin temel yapısı ve kablosuz şarj sisteminin devre şeması.

EGA sistemine dayanan KGA transformatörünün modellemesi Şekil 2'de verilen eşdeğer kuplajlı devre modeli dikkate alınarak yapılmıştır. Primer sargı verici, sekonder sargı alıcı olarak tanımlanmıştır. EGA trafo modelinin eşdeğer devresinde primer taraf öz endüktansı ve direnci  $L_p$  ve  $R_p$  olarak belirtilmiştir. Sekonder tarafın öz endüktansı ve direnci sırasıyla  $L_s$  ve  $R_s$  olarak gösterilmiştir. Sargılar arasındaki karşılıklı endüktans  $M$  olarak ifade edilmiştir.  $M$  ile kuplaj katsayısı  $k$  arasındaki ilişki denklem (1)'de verilmiştir.

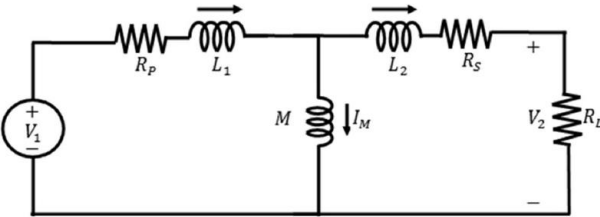
$$M = k\sqrt{L_p L_s} \quad (1)$$

Burada  $k$ , transformatörün kuplaj katsayısıdır.



Şekil 2. EGA transformatörünün kuplaj devre modeli

Yukarıdaki eşdeğer devrenin kuplaj devre çalışmasına dayanarak, Şekil 3'te gösterildiği gibi EGA transformatörünün iletken olarak kuplajlı eşdeğer devresi elde edilmiştir.  $I_M$ , mıknatıslanma akımını,  $L_1$  ve  $L_2$  verici ve alıcı taraflardaki kaçak endüktansları,  $M$  ise karşılıklı endüktansı ifade etmektedir.



Şekil 3. İletkenle bağlanmış bir EGA transformatörünün eşdeğer devresi

$L_1$  ve  $L_2$  parametreleri şu Denklem (2) ve (3)'te verildiği gibi ifade edilmektedir.

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

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

Genel olarak, EGA sistemine dayalı transformatörün güç çıkış performansı, açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ) ve kısa devre akımından ( $I_{sc}$ ) elde edilmektedir. Açık devre gerilimi, yük direnci  $R_L$  devreden çıkarıldığında verici bobin akımından dolayı alıcı bobinde indüklenen gerilimdir [12]. Bu değerler aşağıdaki denklemlerle ifade edilmektedir.

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

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

$I_{sc}$ , yük direnci  $R_L$  kısa devresi sırasında transformatör tarafından sağlanan maksimum kısa devre akımını temsil etmektedir. Bu akım, alıcı bobin endüktansının  $\omega L_2$  empedansı ile sınırlandırılmıştır. Transformatörün sekonder bobininin kompanze edilmemiş VA cinsinden güç değeri (PT)  $I_{sc}$  ve  $V_{oc}$  parametrelerinin çarpımı ile elde edilmektedir [13].

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

Maksimum güç aktarımı için alıcı bobinin endüktans etkisi bir kapasitör kullanılarak telafi edilebilir. LC kombinasyonu, maksimum güç aktarımı sırasında besleme frekansında rezonansa girmektedir. Genel olarak, kompanzasyon kondansatörü ( $C$ ) seri veya paralel olarak bağlanabilir. Seri kompanzasyonda, alıcı tarafının akımı alıcı bobinin kalite faktörü ( $Q$ ) ile artırılır, ancak paralel kompanzasyon için alıcı bobin voltajı artırılır.

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

Bir EGA'nın kompanzasyon üzerindeki güç çıkışı ( $P_o$ ) şu şekilde ifade edilebilir [14]:

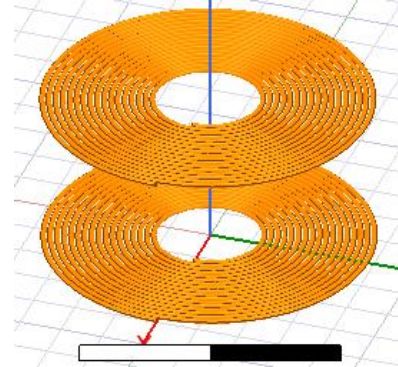
$$P_o = P_T * Q = V_{oc} * I_{sc} * Q = \omega I_1^2 M^2 Q / L^2 \quad (8)$$

Ayrıca güç çıkışı Denklem (9) ile de ifade edilebilir.

$$P_o = V_{in} I_1 k^2 Q \quad (9)$$

Burada  $V_{in}$ , verici bobin tarafındaki terminal gerilimi,  $I_1$  ise besleme akımıdır.

Denklem (8), güç çıkışının, besleme tarafı parametrelerine ( $\omega I_1^2$ ), karşılıklı bobinler kuplaj katsayısına ( $M^2/L^2$ ) ve alıcı taraf bobininin kalite faktörüne (Q) bağlı olduğunu açıkça göstermektedir. Denklem (9) sekonder güç çıkışının kuplaj katsayısının karesiyle orantılı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, transformatörün uygun tasarımı seçilerek kuplaj katsayısı optimal bir değere yükseltilebilir. Bobinin kayıpları, transformatörün çekirdeği ve çevresel faktörler nedeniyle ideal bir kuplaj katsayısı elde etmek çok zordur. Transformatör tasarımında kuplaj katsayısının etkisi, çeşitli transformatörler incelenerek gerçekleştirilir. Bu nedenle, bu çalışmada optimum kablosuz güç aktarım parametreleri elde etmek için farklı bobin düzenlemelerine sahip dairese ve dikdörtgen transformatör modelleri analiz edilmiştir.



Şekil 4. Aynı şekilde tasarlanan bobinlere sahip sargılı dairese transformatör modeli

## Araştırma Sonuçları ve Tartışım

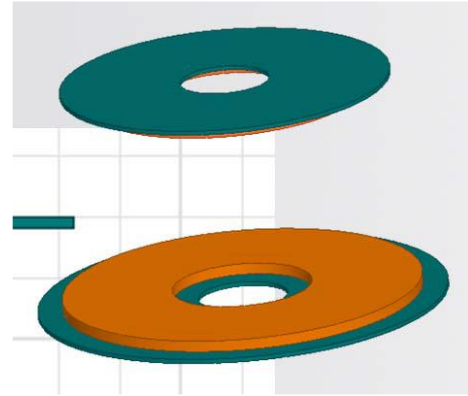
### Dairesel Transformatörün Analizi

Transformatör Üç boyutlu sonlu eleman yöntemine (SEY) dayanan ANSYS Maxwell ile dairese bobinli transformatör modelleri tasarlanmıştır. Bu çalışmada üç farklı tasarım düzeni ile optimal kablosuz güç aktarım parametrelerine ulaşmak için dairese bir bobin transformatörü incelenmiştir. Dairesel bobin transformatörü ANSYS Maxwell kullanılarak modellenmiş ve transformatörün boyutları Tablo 1'de verilmiştir.

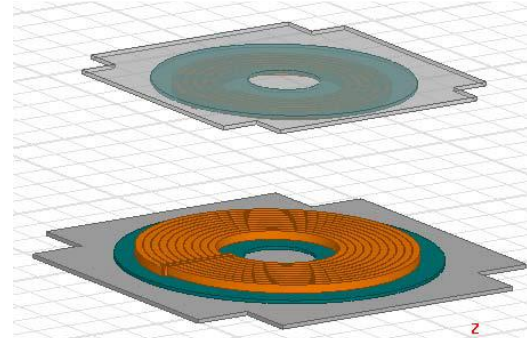
Tablo 1. KGA transformatörünün boyutları

Sargı Parametreleri	Primer tarafı	Sekonder tarafı
Sarım sayısı	55	37
İç kalınlık	55 mm	30 mm
Dış kalınlık	220 mm	140 mm
İletken kalınlığı	2.2 mm	2.2 mm
Demir nüve yarıçapı	222.5 mm	139 mm
Demir nüve kalınlığı	2.2 mm	2.2 mm
Alüminyum plak yarıçapı	231 mm	149 mm
Alüminyum plak kalınlığı	2.2 mm	2.2 mm

Şekil 4, 5 ve 6'da verilen dairese bobin modelleri ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak belirtilen malzeme ve ölçülere göre oluşturulmuştur. Şekil 4'te, düzgün sargılı dairese transformatör modeli verilmiştir. Bobin bakırdan yapılmıştır ve tek tip bobin tasarımındaki primer ve sekonder bobinlerin boyutları aynıdır. Şekil 5'te, farklı bobinlere sahip dairese transformatör modeli ve Şekil 6'da ferrit çekirdekli dairese bobin modeli ile tasarlanan KGA transformatörü sunulmuştur



Şekil 5. Farklı boyutlarda tasarlanan bobinlere sahip dairese transformatör modeli



Şekil 6. Ferrit çekirdekli dairese transformatör modeli

Ferrit çekirdekli alan yapısı, manyetik akıyı sınırlar ve bobinler arasındaki bağlantıyı iyileştirir. Kaçak manyetik akı en aza indirilerek enerji kaybı önlenmiş olur. Genel olarak, ferrit plaka, U-şekli nüve, ferrit diskler vb. gibi farklı tiplerde tasarımlar kullanılmaktadır. Bu tasarımlar, akıyı dengede tutabilmek için kullanılan ferrit parçalarının boyutları nedeniyle kırılğan ve maliyetlidirler [14].

### Dairesel Transformatörlerin Analizi

ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak Şekil 5, 6, 7'de gösterilen transformatör modelleri simüle edilerek sonuçlar Tablo 2, 3 ve 4'te sunulmuştur. Burada d, primer ve

sekonder bobin arasındaki hava boşluğu mesafesi,  $L_p$  primer bobinin öz endüktansı ve  $L_s$  sekonder bobin öz endüktansı,  $M$  karşılıklı endüktans,  $k$  ise bağlantı katsayısıdır. Başlangıçtaki iki bobin arasındaki mesafe 55 mm olarak alınıp, bu mesafe kademeli olarak 110 mm'ye yükseltilmiştir. Bu analiz, elektrikli araçların şarj edilmesi sırasında kuplaj katsayısı ile uzaklık mesafesi arasındaki ilişkiyi doğrulamak için yapılmıştır.

Tablo2. Nüvesiz ve boyutları aynı olan bobinlerle tasarlanan transformatörün analiz sonuçları

Mesafe(m m)	Kuplaj katsayı sı (k)	Primer dndükta nsı $L_p$ ( $\mu H$ )	Ortak dndükta nsı $M$ ( $\mu H$ )	Sekonder dndükta nsı $L_s$ ( $\mu H$ )
55	0.461	503.61	230.13	480.63
65	0.398	505.81	199.62	480.71
75	0.321	507.12	172.85	480.72
85	0.296	508.01	149.83	480.69
95	0.259	508.98	131.68	480.65
110	0.199	510.15	112.17	480.56

Tablo3. Nüvesiz ve boyutları farklı olan bobinlerle tasarlanan transformatörün analiz sonuçları

Mesafe(m m)	Kuplaj katsayı sı (k)	Primer dndükta nsı $L_p$ ( $\mu H$ )	Ortak dndükta nsı $M$ ( $\mu H$ )	Sekonder dndükta nsı $L_s$ ( $\mu H$ )
55	0.340	137.12	86.61	480.73
65	0.289	137.43	74.83	480.82
75	0.246	138.05	64.76	480.79
85	0.213	138.16	55.62	480.89
95	0.189	138.23	48.01	480.93
110	0.158	138.67	41.71	480.96

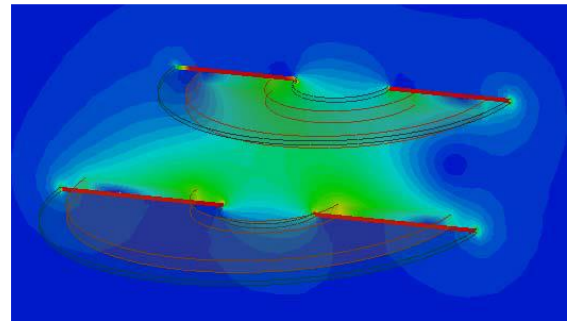
Tablo 4. Ferrit nüve ile tasarlanan transformatörün analiz sonuçları

Mesafe(m m)	Kuplaj katsayı sı (k)	Primer dndükta nsı $L_p$ ( $\mu H$ )	Ortak dndükta nsı $M$ ( $\mu H$ )	Sekonder dndükta nsı $L_s$ ( $\mu H$ )
55	0.489	287.62	259.32	949.46
65	0.488	269.11	215.63	924.31
75	0.489	260.81	180.89	908.91
85	0.312	253.23	152.01	898.12
95	0.269	247.51	127.63	889.61
110	0.229	243.18	107.26	883.15

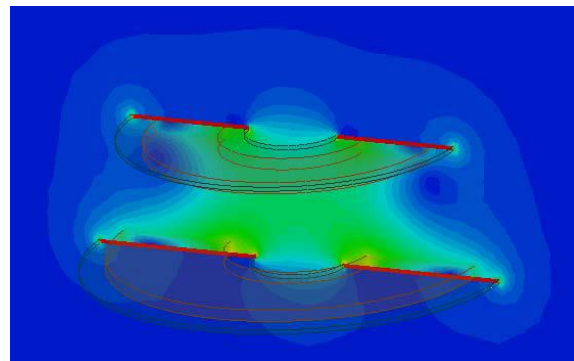
Tablo 2'de verilen simülasyon sonuçlarından, mesafe değiştiğinde, karşılıklı endüktanstaki ( $M$ ) değişimin, öz endüktans  $L_p$  ve  $L_s$  'nin değişimine oranla daha yüksek olduğu sonucu çıkarılmaktadır. Tablo 2, 3, 4'te sunulan sonuçlardan her üç durum için de, verici ve alıcı bobinler arasındaki hava boşluğu azaldığında  $M$  ve  $k$  değerlerini yükseldiği görülmektedir. Eşit çaplı bobinlerde  $k$  değeri nispeten daha yüksek olmasına rağmen, verici bobine oranla daha küçük bir alıcı bobin kullanılması tercih edilebilir.

$M$  ve  $k$ 'nin daha yüksek değerleri, alıcı bobine daha fazla güç aktarımı sağlayan denklemler (8) ve (9) ile sonuçlandırılmıştır. Simülasyon sonuçları, ferrit çekirdekli transformatör tasarımında  $M$  ve  $k$ 'nin ferrit çekirdek nedeniyle çekirdeksiz transformatörden daha büyük olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda, çekirdeksiz transformatör ağırlık olarak daha hafiftir ve maliyeti daha ucuzdur. Ancak yüksek verimle güç aktarımında belirli sınırlamaları vardır. Çekirdeksiz transformatörün sınırlaması, karşılıklı endüktans ve kuplaj katsayısının düşük değerinden kaynaklanmaktadır.

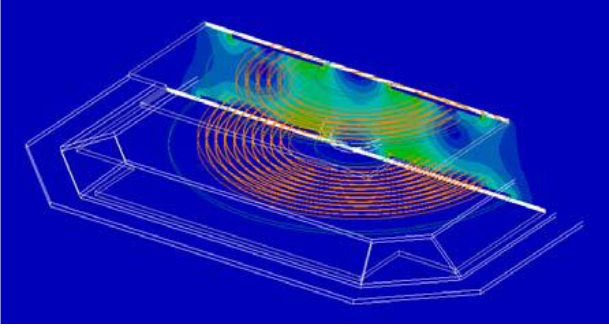
Şekil 7, 8 ve 9'da primer ve sekonder bobinler arasında 55 mm'lik bir aralıkta manyetik alan yoğunluğu ( $B$ ) verilmiştir. Manyetik alan yoğunluğu grafiğinde gösterilen ölçek, manyetik alan aralığı yoğunluğunun gücünü gösterir. Altta mavi renk, en düşük değeri temsil ederken üstteki kırmızı renkle gösterilen bölgeler manyetik alanın yoğunluğunun en yüksek değerini temsil etmektedir. Şekil 9'da elde edilen en güçlü manyetik alan yoğunluğu, bobinin konsantre bir manyetik alan oluşturduğu ferrit çekirdeğin dahil edilmesine bağlanabilir. Yukarıdaki grafikler, uç bobinin manyetik akısını alma uç bobini ile gönderme etkileşimini gösterir. Şekil 8, çekirdeksiz transformatör manyetik akı yoğunluğu grafiğini göstermektedir ve şekilden manyetik akının bobinlerin ötesine uzandığı görülmektedir. Bununla birlikte, ferrit çekirdekli transformatörde, akı bobinlerin ötesine geçmez. Şekil 7-9, transformatörün bir ferrit çekirdek ile tasarlanması durumunda kaçak akının azaltılabileceğini açıkça göstermektedir.



Şekil 7. Farklı bobinlere sahip dairesel nüvesiz transformatörün manyetik akı dağılımı



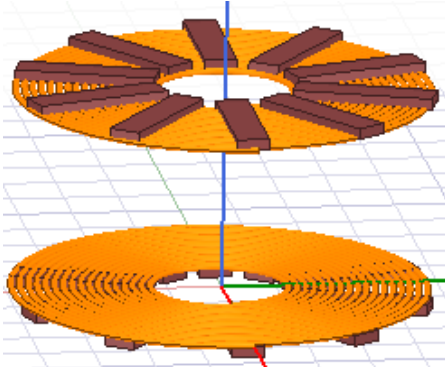
Şekil 8. Aynı bobin boyutlarıyla tasarlanan dairesel nüvesiz transformatörün manyetik akı dağılımı



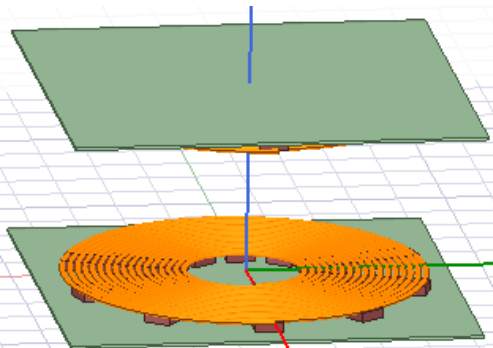
Şekil 9. Alüminyum kalkan ve ferrit çekirdekli dairesel transformatör tasarımının manyetik akı dağılımı

### Dikdörtgen Nüve Dilimli Trafo Modelinin Analizi

Bu bölümde, 3-D SEY'e dayalı ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak dikdörtgen dilimli ferrit nüveli transformatörlerinin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, Şekil 10 ve 11'de sunulan dikdörtgen dilimli ferrit nüveli transformatör modeli ele alınmıştır. Bu transformatör modelinin genişliği dairesel transformatör modelinin çapına eşit alınmıştır. Dikdörtgen transformatörün primer ve sekonderdeki sarım sayısı dairesel transformatör modeli ile aynıdır.



Şekil 10. Dikdörtgen dilimli ferrit nüveli transformatör modeli



Şekil 11. Dikdörtgen dilimli ferrit nüveli alüminyum kalkanlı transformatör modeli

KGA sistemine ait transformatörlerin Tablo 5 ve 6'da verilen simülasyon sonuçları incelendiğinde hava boşluğu değişimi sırasında bobinin karşılıklı endüktansındaki ( $M$ ) değişime oranla  $L_p$  ve  $L_s$  değişimlerinin küçük olduğunu anlaşılmaktadır. İki durumda da verici bobin ile alıcı bobin arasındaki hava boşluğu mesafesi azaldıkça  $M$  ve  $k$  değeri artmıştır.

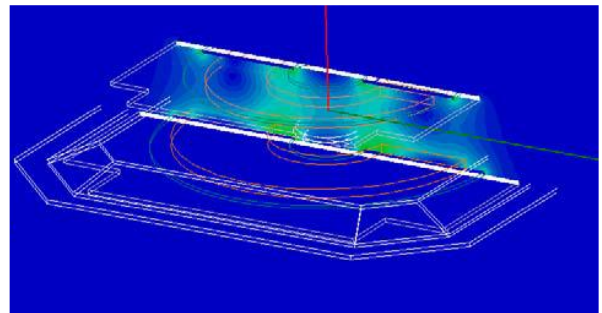
Tablo 5. Dikdörtgen dilimli Ferrit nüve ile tasarlanan transformatörün analiz sonuçları

Mesafe(mm)	Kuplaj katsayısı (k)	Primer dndüktansı $L_p$ ( $\mu H$ )	Ortak dndüktansı $M$ ( $\mu H$ )	Sekonder dndüktansı $L_s$ ( $\mu H$ )
55	0.490	336.21	297.23	1.021
65	0.412	316.79	248.01.	0.965
75	0.379	304.12	209.65	0.942
85	0.315	293.24	178.52	0.934
95	0.278	288.61	151.03	0.912
110	0.244	284.47	128.89	0.901

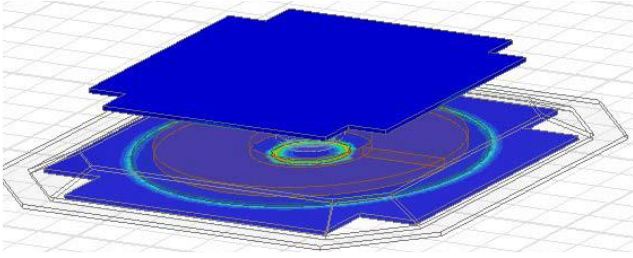
Tablo 6. Dikdörtgen dilimli Ferrit nüve ve alüminyum kalkan ile tasarlanan transformatörün analiz sonuçları

Mesafe(m m)	Kuplaj katsayısı (k)	Primer dndüktansı $L_p$ ( $\mu H$ )	Ortak dndüktansı $M$ ( $\mu H$ )	Sekonder dndüktansı $L_s$ ( $\mu H$ )
55	0.489	335.41	295.31	0.982
65	0.402	315.02	247.23	0.979
75	0.371	301.62	208.89	0.973
85	0.310	294.21	177.56	0.961
95	0.285	287.63	150.98	0.958
110	0.239	283.04	127.87	0.942

Denklem (8) ve (9)'daki  $M$  ve  $k$ 'nin değerlerinin büyük olması, alıcı bobine daha fazla güç aktarılması anlamına gelmektedir. Tasarımda ferrit çekirdeğin bulunması nedeniyle karşılıklı endüktans ( $M$ ) ve kuplaj katsayısı ( $k$ ) değerleri çekirdeksiz transformatöre göre daha büyük olmuştur. Ferrit çekirdek tasarımı, manyetik alanı uygun şekilde yoğunlaştırır. Böylece daha yüksek  $M$  ve  $k$  değerleri elde edilebilir. Alüminyum kalkan, bobinler arasında meydana gelen manyetik alanı sınırlamak için transformatör tasarımında kullanılmaktadır. Dört farklı trafo tasarım tipi için Şekil 12 ve 13'te transformatörlerin manyetik alanın yoğunluğu ( $B$ ) dağılımları verilmiştir.



Şekil 12. Ferrit çekirdekli dikdörtgen bir bobinin transformatör modeli



Şekil 13. Ferrit çekirdekli ve Alüminyum ekranlı dikdörtgen bir bobinin transformator modeli

### Farklı KGA Transformator Konfigürasyonlarının Sonuçlarının Karşılaştırılması

Farklı KGA transformator tasarım modelleri için kuplaj katsayısının ve karşılıklı endüktansın simülasyon sonuçları Tablo 7'de verilmiştir. Aynı sargı özelliklerine sahip dairesel transformator için M ve k'nin değerinin, maksimum manyetik akıdan dolayı farklı sargı özelliklerine sahip dairesel transformatörden daha yüksek olduğu görülmektedir. Aynı sargı özelliklerine sahip dairesel transformatorün en büyük eksikliği, bakır bobininin uzunluğu ve akı dağılımıdır. Bu eksiklik, sekonder bobinin tamamen primer bobin etrafındaki manyetik alan küresi içinde yer aldığı, farklı sargı özelliklerine sahip dairesel transformator kullanılarak aşılmıştır. Ayrıca ferrit çekirdekli tasarımlarda M ve k değerlerinin farklı sargı özelliklerine sahip dairesel transformatöre göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Alüminyum kaplamalı ve kaplamasız simülasyon sonuçlarında ihmal edilebilir bir fark meydana gelmiştir.

### Sonuç

Bu çalışmada, elektrikli araçların şarj sisteminde kullanılan kablosuz güç aktarım (KGA) sistemleri için bir transformator tasarımı sunulmuştur. Farklı transformator tasarımları ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak simüle edilmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir. Transformatorlerin farklı tasarım konfigürasyonları için ayrıntılı manyetik alan yoğunluğu değerleri, endüktans ve kuplaj katsayısı değerleri elde edilmiştir. Tasarım sonuçları, öz endüktansın KGA üzerindeki etkisinin, sistemde doğal olarak bulunan hava boşluğundan dolayı tolere edilebildiğini ortaya koymaktadır. Simülasyon sonuçları, hava boşluğu mesafesi

### Kaynakça

- [1] Ahmad A, Alam MS, Chabaan R (2018) A comprehensive review of wireless charging technologies for electric vehicles. IEEE Trans Transp Electrifi 4(1):38–63
- [2] Bosshard R, Kolar JW (2016) Inductive power

Tablo 7. Farklı KGA transformator tasarım modelleri için kuplaj katsayısı ve karşılıklı endüktans değerleri

Transformatorün tasarım yapısı	Kuplaj katsayısı (k)	Ortak endüktans(M)
Aynı sargı özelliklerine sahip dairesel transformator	0.468	230.12
Farklı sargı özelliklerine sahip dairesel transformator	0.340	86.31
Farklı sargı özelliklerine sahip dairesel ferrit nüveli transformator	0.489	258.99
Dikdörtgen dilimli nüve yapısına sahip transformator	0.498	297.28
Dikdörtgen dilimli nüve ve alüminyum kalkan yapısına sahip transformator	0.499	294.98

Ferrit çekirdekli dikdörtgen bobin daha iyi karşılıklı endüktans ve kuplaj katsayısı değerlerine sahip olsa da, dairesel bobin tasarımı bakır bobinin uzunluğu, ferrit çekirdek hacmi, alüminyum kalkanın hacmi ve taban alanı parametreler dikkate alındığında daha iyi olduğu görülebilmektedir. Genel olarak, dikdörtgen bir çekirdek, dairesel bir çekirdekten daha az mekanik desteğe sahiptir. Bu nedenle, transformatorün dairesel bobin tasarımı, kablosuz güç aktarım uygulamaları için daha elverişlidir.

azaldıkça iki bobin arasındaki kuplajın arttığını göstermektedir. Dairesel nüveli ve dikdörtgen dilimli nüveli transformator modellerinin sonuçları karşılaştırıldığında, dikdörtgen dilimli nüveli trafo parametre varyasyonlarının farklı konfigürasyonlar için dairesel bobin parametrelerine çok yakın olduğu anlaşılmaktadır. Bakır bobinin uzunluğu, ferrit çekirdeğin hacmi, alüminyum kalkanın hacmi ve taban alanı gibi faktörler göz önüne alındığında, dairesel nüveli transformatorün performansının benzer boyutlardaki dikdörtgen dilimli nüveli transformatörden daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

transfer for electric vehicle charging: technical challenges and trade-offs. IEEE Power Electron Mag 3(3):22–30

- [3] Chinthavali M, Onar OC, Campbell SL, Tolbert LM (2015) 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-AC05-000R22725
- [4] Daniel Ongayo, Moin Hanif (2015a) 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)
- [5] Gati E, Kampitsis G, Manias S (2017) Variable frequency controller for inductive power transfer in dynamic conditions''. IEEE Trans Power Electron 32(2):1684-1696
- [6] Hashemi Z, Zohrabi F, Mardaneh M (2019) A multi-objective optimization of switched reluctance motor using a hybrid analytic-ANFIS model considering the vibrations. Iran J Sci Technol - Trans Elect Eng 43(2):361-371
- [7] Houran MA, Yang X, Chen W (2021) Two-degree-of-freedom WPT system using cylindrical-joint structure for applications with movable parts. IEEE Trans Circuits Syst II: Express Briefs 68(1):366-370
- [8] Huang X, Gao Y, Zhou J, Ma J, Zhang J, Fang Y (2016) Magnetic field design for optimal wireless power transfer to multiple receivers''. IET Power Electron 9(9):1885-1893
- [9] Joseph PK, Devaraj E, Gopal A (2019) Overview of wireless charging and vehicle-to-grid integration of electric vehicles using renewable energy for sustainable transportation''. IET Power Electron 12(4):627-638
- [10] Khan-ngern W, Zenkner H (2014) Wireless power charging on electric vehicles. International Electrical Engineering Congress (IEECON), 2014. Chonburi, pp 1-4
- [11] Zhong W, Hui SYR (2017) Charging time control of wireless power transfer systems without using mutual coupling information and wireless communication system''. IEEE Trans Industr Electron 64(1):228-235
- [12] Zeng Y, Qiu D, Meng X, Zhang B, Tang SC (2018) Optimised design of coils for wireless power transfer in implanted medical devices. IEEE J Electromagn, RF Microwav Med Biol 2(4):277-285
- [13] Yi Z, Li M, Muneer B, Zhu Q (2019) High-efficiency mid-range inductive power transfer employing alternative-winding coils''. IEEE Trans Power Electron 34(7):6706-6721
- [14] Yang S, Deng X, Lu J, Wu Z, Du K (2020) light-load efficiency optimization for an LCC-parallel compensated inductive power transfer battery charger. Electron (Switz) 9(12):1-13
- [15] Wang X, Xu J, Ma H, Zhang Y (2020) A reconstructed S-LCC topology with dual-type outputs for inductive power transfer systems. IEEE Trans Power Electron 35(12):12606-12611
- [16] Trung NK, Minh TT (2020) Wireless charging system for electric bicycle application. Int J Power Electron Drive Syst 11(4):1926-1935
- [17] Tian X, Chau KT, Liu W, Lee CHT (2021) Selective wireless power transfer using magnetic field editing. IEEE Trans Power Electron 36(3):2710-2719
- [18] Rasekh N, Mirsalim M (2018) 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
- [19] Raj U, Shankar R (2020) Deregulated automatic generation control using novel opposition-based interactive search algorithm cascade controller including distributed generation and electric vehicle. Iran J Sci Technol - Trans Elect Eng 44(3):1233-1251
- [20] Prasad Jayathurathnage A (2017) Review on wireless power transfer technology. IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC).
- [21] Onar OC, Campbell SL, Seiber LE, White CP, Chinthavali M (2016) A high-power wireless charging system development and integration for a toyota RAV4 electric vehicle. Oak Ridge National Laboratory Contract with the US Department of Energy No. DE-AC05-000R22725
- [22] Patil D, McDonough MK, Miller JM, Fahimi B, Balsara PT (2018) Wireless power transfer for vehicular applications: overview and challenges. IEEE Trans Transp Electrification 4(1):3-37
- [23] Moghaddami M, Sundararajan A, Sarwat AI (2018) A powerfrequency controller with resonance frequency tracking capability for inductive power transfer systems. IEEE Trans Ind Appl 54(2):1773-1783
- [24] Lu J, Zhu G, Lin D, Zhang Y, Wang H (2021) Realizing constant current and constant voltage outputs and input zero phase angle of wireless power transfer systems with minimum component counts. IEEE Trans Intell Transp Syst 22(1):600-610