

A New Core Geometry for Wireless Power Transfer Based on Magnetic Resonance

 Zafer DOĞAN^{1,*}, Mustafa ÖZSOY², İres İSKENDER³
^{1,2} Tokat Gaziosmanpaşa University, Department of Electrical-Electronics Engineering, 60150, Merkez/TOKAT

³ Çankaya University, Department of Electrical-Electronics Engineering, 06790, Etimesgut/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 29/07/2019

Revision 22/11/2019

Accepted: 30/11/2019

Highlights

- WPT System based on Magnetic Resonance
- Series-Series Topology
- Circular-Sliced Segmented Ferrite Core

Keywords

 Wireless Power Transfer
 Magnetic resonance
 Core

The most important goal in Wireless Power Transfer (WPT) applications is to provide efficient energy transfer. In this study, a WPT system based on magnetic resonance is designed. In the proposed design, the system efficiency was calculated over the wireless power transfer system with serial-series topology based on magnetic resonance.

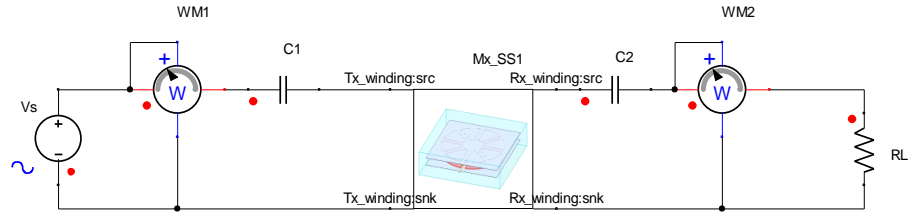


Figure A. Designed WPT system

Purpose: In this study, it is aimed to design a 50 mm air gap magnetic resonance based high efficiency WPT system which can be used in power transfer applications such as mobile phone charging, electric vehicle charging etc.

Theory and Methods: Firstly WPT transformer design was made by using split core structure. In this study, analytical calculations for transformer design are given. Finite element method (FEM) analysis of the designed transformer was performed with ANSYS Maxwell. Then, a high efficient serial-series system topology was determined. Circuit design of WPT system determined in Simplorer was performed.

Results: According to the FEM analysis results, no magnetic saturation was observed in the transformer. The inductances of the transmitter and receiver coils obtained in the magnetic analysis results are 298.5245598 μ H and 298.5192085 μ H respectively and these values are compatible with the analytic calculations. In the WPT system, 1.92 kW of power is transmitted from the transmitter side to 1.88 kW on the load on the receiving side.

Conclusion: In this study, in order to determine the maximum efficiency of the transformer with 50 mm air gap in the WPT system, power transmission was performed on a fixed ohmic (R_L) load by transformer feeding from 10 kHz frequency sinusoidal source with 97 % efficiency. This value was found to be an important result when compared with the studies in the literature. These results showed that the proposed circular-sliced segmented core structure can be used successfully in WPT transformer applications.

GU J Sci, Part C, 7(4): 1012-1024 (2019)

Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ

<http://dergipark.gov.tr/guisc>

Manyetik Rezonansa Dayalı Kablosuz Güç Transferi İçin Yeni Bir Nüve Geometrisi

Zafer DOĞAN^{1,*}, Mustafa ÖZSOY², İres İSKENDER³^{1,2}Tokat Gaziosmanpaşa University, Department of Electrical-Electronics Engineering, 60150, Merkez/TOKAT³Çankaya University, Department of Electrical-Electronics Engineering, 06790, Etimesgut/ANKARA

Öz

Kablosuz Güç Transferi (KGT) uygulamalarında en önemli hedef, verimli bir enerji transferi sağlamaktır. KGT günümüzde cep telefonu şarjı, elektrikli araç şarjı, aydınlatma, kontrol vb. birçok alanda uygulanmaktadır. Yüksek verimi, çevresel olumsuz etkilerinin az olması gibi avantajlarından dolayı, manyetik rezonans yöntemi kısa hava aralıklı mesafelerde KGT için en çok tercih edilen yöntemdir. Manyetik rezonansa dayalı KGT sistemlerinde, sistem verimini artırmak için yüksek verimli bir KGT transformatörü kullanılmalıdır. Bu çalışmada manyetik rezonansa dayalı bir KGT sisteminin tasarımı yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle hibrit (hava-ferrit) nüveli özgün bir transformatör tasarlanmıştır. Transformatörün Dairesel-Dilimli Parçalı(D-DP) ferrit nüve yapısı ilk defa bu çalışmada kullanılmıştır. Transformatörün sargıları litz iletken olarak tasarlanmıştır. Transformatörde kaçak akıları en aza indirmek amacıyla sargıların dış yüzeylerine alüminyum levhalar kullanılarak manyetik akı sargılar arasında kalmaya zorlanmıştır. Tasarlanan transformatörün sonlu elemanlar yöntemi ile manyetik analizleri yapılmış ve sonuçları nümerik hesaplarla doğrulanmıştır. Manyetik analiz sonuçları kullanılarak, KGT transformatörü benzetim devresi üzerinden yüklenmiş ve 5 cm'lik bir hava aralığında % 97 verim ile güç transferi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar D-DP ferrit nüve yapısının KGT transformatörü uygulamalarında başarı ile kullanılabileceğini göstermiştir.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 29/07/2019
Düzeltilme: 22/11/2019
Kabul: 30/11/2019

Anahtar Kelimeler

Kablosuz Güç Transferi
Manyetik Rezonans
Nüve

Keywords

Wireless Power Transfer
Magnetic resonance
Core

A New Core Geometry for Wireless Power Transfer Based on Magnetic Resonance

Abstract

The most important goal in Wireless Power Transfer (WPT) applications is to provide efficient energy transfer. WPT is applicable at mobile phone charging, electric vehicle charging, lighting, control etc. Due to its high efficiency and low environmental impact, magnetic resonance is the most preferred method for short-range distances. In WPT systems based on magnetic resonance, a high efficiency WPT transformer should be used to increase system efficiency. In this study, a WPT system based on magnetic resonance is designed. For this purpose, firstly, a transformer with air-ferrite hybrid core is designed. The transformer's circular-sliced segmented (C-SS) ferrite core structure was used for the first time in this study. The transformer windings are designed as litz conductors. In order to minimize leakage fluxes in the transformer, the magnetic field was forced to stay between the windings by using aluminum plates on the outer surfaces of the windings. Magnetic analysis of the designed transformer was made with finite element method and the results were confirmed by numerical calculations. Using the magnetic analysis results, the WPT transformer was loaded over the simulation circuit and power transfer was achieved in a 5 cm air gap with 97% efficiency. The results showed that C-SS ferrite core structure can be used successfully in WPT transformer applications.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik enerjisinin günlük hayatta farklı amaçlarla kullanımı, beraberinde Kablosuz Güç Transferi (KGT) ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. KGT, günümüzde artan elektrikli cihaz sayısının getirdiği kablo karmaşası gibi dezavantajları ortadan kaldırmakla birlikte, özellikle son yıllarda popüler hale gelen cep telefonu şarjı ve elektrikli araç şarjı gibi konularda da kendisine uygulama alanları bulmaktadır [1, 2]. 19.yy 'da temelleri Nikola Tesla tarafından atılan KGT fikri bu çalışmaların temelini teşkil etmektedir [3, 4, 5]. KGT ışınımsal ve ışınımsal olmayan yöntemlerle yapılmaktadır. Işınımsal olmayan yöntemlerden manyetik rezonans

(MR) yöntemi; insan sağlığına zarar vermemesi ve yüksek verimliliği yönüyle araştırmacılar arasında oldukça ilgi görmektedir. Kurs ve arkadaşları 2007 yılında MR kuplaj yöntemini kullanarak 2 m mesafedeki 60 W gücündeki bir lambayı % 40 civarında bir verimle enerjilendirmişlerdir [6]. İlk başlarda daha çok düşük güç seviyelerinde KGT uygulamaları yapılmaktayken, özellikle son 10 yılda, farklı aktarım mesafelerinde 7-10 kW güç seviyelerine ulaşabilen, % 80-95 arasında verim değerlerine sahip uygulamalar yapıldığı görülmüştür [7].

MR kuplajlı KGT sistemleri; besleme devresi, transformatör devresi ve yük devresinden oluşmaktadır. Transformatör devresi; alıcı-verici bobinler ve nüve yapısını içermektedir. Bu sistemde maksimum enerji transferini sağlamak için, bobinlerin rezonansı, manyetik devre (nüve) ve verici bobinin besleme frekansı önemli bir rol oynamaktadır.

MR kuplajlı KGT sistemlerinin rezonans durumunda çalışması verim açısından önemlidir [6, 8,9]. Rezonans, KGT sistemlerinde kaynak ile yük arasındaki güç aktarımını oransal olarak artırır ve böylece sistem verimini yükseltmektedir. Bununla beraber MR'nin gerçekleştirilmesinde; alıcı ve verici bobinlerin hizalanmış olması, eğer hizalanma yapılamıyorsa rezonans kondansatörlerinin değerlerinin yeni duruma göre güncellenmesi gereklidir [10]. KGT sistemlerinde verici tarafın şebeke frekansına göre oldukça yüksek frekanslı bir kaynak ile beslenmesi sistem verimi artıran diğer bir faktördür [11]. Bu sebeple aktarımı yapan bobinlerin tasarımında ve beslenmesinde bu durum göz önünde bulundurulmalıdır [12].

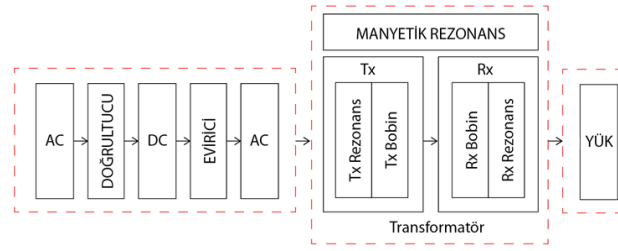
KGT sistemlerinde verimi etkileyen en önemli noktalardan diğer biri de düşük kayıp kuplajlı transformatör kullanılmaktır. Bir transformatörde elektrik enerjisi transferi birincil ve ikincil bobinler arasında manyetik enerji kuplajıyla gerçekleşmektedir. Verimli bir transfer için bu bobinler arasında maksimum manyetik akı geçişi sağlanmalıdır. Hava nüveli transformatörlü KGT sistemlerinde manyetik devre tamamen hava üzerinden tamamlanır. Bu yapı uzun mesafelere enerji aktarımında tercih edilir. Kısa mesafeli enerji aktarımlarında ise hibrit yapılar (hava- manyetik nüve) tercih edilir [13]. Manyetik nüve kullanımı, özellikle yüksek frekanslarda çalışan transformatörlerde beraberinde yüksek nüve kayıplarını da ortaya çıkarmaktadır. Bu durum yüksek frekanslarda çalışan KGT sistemlerinde verimi olumsuz yönde etkileyen önemli bir sorundur. Bu sistemlerde nüve kayıplarını minimize etmek için nüve geometrilerinde değişiklikler yapılmaktadır [5, 14]. Yapılan çalışmalarda parçalı manyetik nüve yapıları kullanımı [15], bobin geometrisini dikkate alan manyetik nüve yapıları ve akı yönlendirmeli manyetik nüve yapıları farklı araştırmacılar tarafından çalışılmıştır [16].

Bu çalışmada cep telefonu şarjı, elektrikli araç şarjı vb. güç transferi uygulamalarında kullanılacak, 5 cm hava aralıklı MR'ye dayalı yüksek verimli bir KGT sisteminin tasarımı amaçlanmıştır. Bu amaçla nüve kayıplarını en aza indirecek Dairesel-Dilimli Parçalı (D-DP) nüve yapılı özgün bir KGT transformatörü tasarlanmıştır. D-DP ferrit nüve yapısı literatürde ilk defa bu çalışmada kullanılmıştır. Tasarlanan transformatörün öncelikle sonu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak manyetik analizleri yapılmış, daha sonra ANSYS Simplerer modülünde benzetime sokulmuş ve sistem verimi hesaplanmıştır.

Bu çalışma 6 bölümden oluşmaktadır: 1. bölümde giriş bilgileri, 2. bölümde MR'ye dayalı KGT sistemi, 3. bölümde KGT transformatörü ve devre tasarımı, 4. bölümde bulgular ve 5. bölümünde sonuçlar açıklanmıştır.

2. MANYETİK REZONANSA DAYALI KGT SİSTEMİ (MAGNETIC RESONANCE BASED WPT SYSTEM)

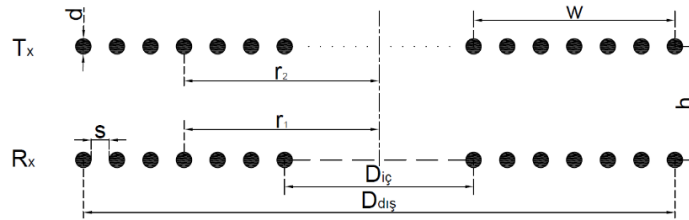
KGT sistemleri; besleme devresi, transformatör KGT sistemleri; besleme devresi, transformatör ve yük sistemi olmak üzere 3 ana bileşenden oluşmaktadır. Şekil 1'de temel bir KGT sisteminin blok şeması görülmektedir.



Şekil 1. KGT Sistemi blok diyagramı

Besleme devresi transformatör giriş gerilimin koşullandırıldığı bölümdür. Bir transformatörde birincil taraftan ikincil tarafa aktarılan elektrik enerjisi besleme kaynağının frekansına, manyetik nüve yapısına ve birincil ve ikincil devre sarım sayılarına bağlıdır. Demir nüveli transformatörlerde maksimum akı geçişi alçak frekans düzeylerinde sağlanabilirken, hava nüveli ve hibrit nüveli transformatör yapılarında aynı işlem yüksek frekans ile gerçekleştirilebilir. Bu nedenle KGT sistemlerinin endüstriyel uygulamalarında besleme devresi yüksek frekanslı inverter (YFİ) yapısındadır.

KGT sistemi transformatörlerinde, verici bobin (T_x) ve alıcı bobin (R_x) için çoğunlukla spiral dairesel geometrik yapılar tercih edilmektedir [21]. Şekil 2’de spiral dairesel bobinin geometrisi görülmektedir.



Şekil 2. Spiral dairesel bobin geometrisi

Bobinler oluşturuldukları geometrik yapıya ve manyetik ortamlara göre öz endüktans değerleri gösterirler. Bobinlerin öz endüktans hesabında çeşitli yöntemler kullanılmasına rağmen bu yöntemler içerisinde Wheeler yöntemi hem tek katmanlı ve çok katmanlı bobinlerin endüktans hesaplamalarında kullanılabilmesi, hem de hata payının düşük olması nedeniyle en çok tercih edilen yöntemlerin başında gelmektedir [17]. İçi dolu yuvarlak bir telden yapılmış spiral dairesel bir bobininin öz endüktansı Wheeler’ın yöntemine göre aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$L = \frac{31.33\mu_0 N^2 r^2}{8r + 11w} \quad 1$$

Burada; N bobinin sarım sayısı, r bobinin ortalama yarıçapı, w bobinin kalınlığıdır. Bobinlerin ortak endüktansının hesaplanmasında ise Neumann’ın formülü kabul gören bir formüldür [4]. Dairesel spiral bobinlerin ortak endüktans hesabında nümerik analiz yaklaşımlarıyla çözüm yapılır [18]. Bu yaklaşımlara göre dairesel spiral bobinlerin ortak endüktansı M ,

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2}{4\pi} \iint \frac{r_1 r_2 \cos(\varphi - \varphi') d\varphi d\varphi'}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2 + h^2 - 2r_1 r_2 \cos(\varphi - \varphi')}} \quad 2$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Burada sırasıyla alıcı ve verici bobinlerin, r_1 ve r_2 ortalama yarıçapları, N_1 ve N_2 sarım sayılarıdır. h bobinler arası mesafedir.

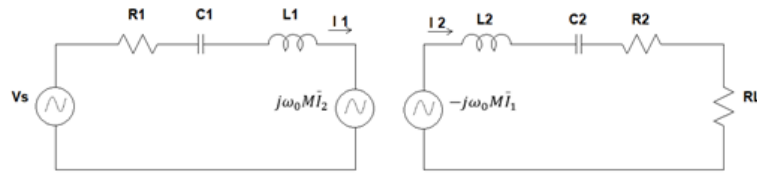
Eşitlik 1 ve Eşitlik 2’deki ifadeler hava nüveli bobinler için geçerlidir. Eğer manyetik nüve kullanılıyorsa eşitliklerdeki boşluğun manyetik geçirgenliği μ_0 yerine $\mu = \mu_0 \mu_r$ eşitliği kullanılmalıdır. Bu eşitlikte μ_r malzemenin manyetik geçirgenliğidir.

Alıcı ve verici bobinlerin öz endüktansları ve ortak endüktansı giriş sinyaline göre belli bir faz kaymalarına sebep olmaktadır. Bu faz kaymasını gidermek için devreye kondansatörler bağlanarak sistem rezonansa sokulmaktadır. KGT sistemlerinde, rezonans verim üzerinde kilit rol oynayan önemli bir parametredir [6, 19, 20]. Endüktansı L ve kapasitesi C olan bir devrede rezonans frekansı Eşitlik 3'deki ifadeyle hesaplanabilir.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad 3$$

Bu sistemlerinde rezonans işlemini sağlayacak olan kondansatörlerin devreye bağlanmasına göre devre topolojileri, Seri-Seri topolojisi (SS), Seri-Paralel topolojisi, Paralel-Seri topolojisi, ve Paralel-Paralel topolojisi isimlendirilir.

SS topolojisinde verici taraf bir akım kaynağı gibi davranarak sabit bir çıkış akımı verme eğilimindedir [7]. Dahası SS topolojisi geniş bir yük direnci aralığında diğer topolojilerden daha yüksek bir verime sahiptir [21]. Bu avantajlarından dolayı Şekil 3'te görülen SS topolojisi sıklıkla kullanılmaktadır [3, 22].



Şekil 3. Seri-seri topolojisi [21]

Bu devre yüksek frekanslı bir AC gerilim kaynağı (V_s) ile beslenir. Devrede R_1 , L_1 , C_1 verici tarafın, sırasıyla eşdeğer omik direncini, endüktansını ve kapasite değerini göstermektedir. R_2 , L_2 , C_2 , R_L alıcı tarafın, sırasıyla eşdeğer omik direncini endüktansını, kapasite değerini ve yük direncini temsil etmektedir [21]. Bu devrede alıcı ve verici tarafın gerilim eşitlikleri,

$$\begin{cases} \bar{V}_s = \dot{Z}_1 \bar{I}_1 + j\omega_0 M \bar{I}_2 \\ -j\omega_0 M \bar{I}_1 = \dot{Z}_2 \bar{I}_2 \end{cases} \quad 4$$

olarak yazılabilir. Burada \dot{Z}_1 ve \dot{Z}_2 sırasıyla verici ve alıcı tarafın eşdeğer empedansları ve ω_0 rezonans frekansındaki açısal frekanstır. Verici ve alıcı bobinlerden akan akımlar Eşitlik 5'te verilmiştir.

$$\begin{cases} \bar{I}_1 = \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \omega_0^2 M^2} \bar{V}_s \\ \bar{I}_2 = -\frac{j\omega M}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_2 + \omega_0^2 M^2} \bar{V}_s \end{cases} \quad 5$$

Devre rezonans kondansatörlerinin değerleri Eşitlik 6'daki gibidir.

$$\begin{cases} C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 L_1} \\ C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 L_2} \end{cases} \quad 6$$

Rezonans durumunda yük ve kaynağı içeren tüm sistemin toplam verimi η Eşitlik 7'deki gibi verilebilir.

$$\eta = \frac{M^2 \omega_0^2 R_L}{(R_R + R_L)^2 R_S + M^2 \omega_0^2 (R_R + R_L)} \quad 7$$

Burada R_s direnci kaynak ve anahtarlama devresi eşdeğer direncidir.

KGT için en önemli parametrelerden biri olan bağlantı faktörü (k) ile bobinler arasındaki ortak endüktans değeri hesaplanabilir. Birincil taraftan ikincil tarafa aktarılan gücün maksimum olması için bağlantı faktörünün mümkün olduğunca 1'e yakın olması gereklidir. Eş merkezli bobinlerin bağlantı faktörü hesabı için Eşitlik 8'deki formül kullanılır [23].

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad 8$$

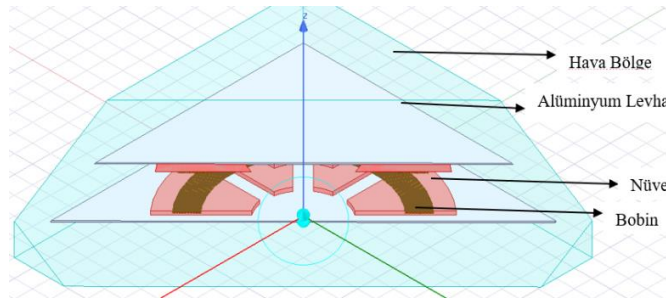
Transformatörlerde manyetik nüve malzemesi seçimi kuplaj açısından önemlidir. Geleneksel transformatörlerde demir nüve kullanılırken [24], KGT sistemlerinde yüksek frekanslı çalışmalar söz konusu olduğu için, ferrit nüveler tercih edilmektedir. KGT'de manyetik akının verici ve alıcı bobinler arasında dağılması ve bu alan dışında bir alana kaçmaması da verimi etkileyen önemli bir durumdur [25]. Kaçak akıları önlemek amacıyla, ferrit nüvenin dış yüzeyini alüminyum desteklemek sistem verimini artıracaktır [26, 27].

3. KGT SİSTEMİ TASARIMI (WPT SYSTEM DESIGN)

Bu çalışmada KGT sistemi oluşturulurken öncelikle transformatör tasarımı yapılmıştır. Daha sonra özgün bir nüve yapısı ortaya konularak oluşturulan transformatörünün, elektriksel verilerinin elde edilebilmesi için SS rezonans topolojisi ile bir benzetim devresi tasarlanmıştır.

3.1 KGT Transformatörü (WPT Transformer)

MR'ye dayalı KGT sistemi tasarımlarının en önemli bölümü, transformatör tasarımıdır. Bu tasarımlarda ana hedef yüksek verimli transformatör yapmaktır. Bu çalışmada tasarlanan KGT transformatörü yapısı; verici ve alıcı bobinler, manyetik nüve ve alüminyum levhalardan oluşmaktadır. KGT transformatörü tasarımı SEY'e dayalı olarak ANSYS Maxwell ile 3D olarak yapılmıştır. Gerçekleştirilen tasarımın kesit görünümü Şekil 4'te gösterilmiştir.

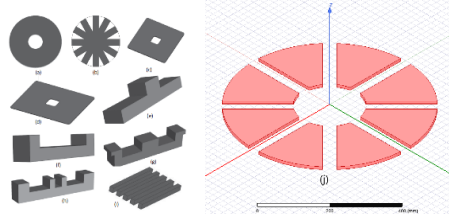


Şekil 4. Tasarlanan KGT transformatörü

Bu transformatörde alıcı ve verici bobinler özdeştir. Yüksek frekansta çalışan bobinlerde deri etkisi dolayısıyla kayıplar meydana gelmektedir. Bu etkiyi ortadan kaldırmak için bobin telleri çok damarlı yapılır. Fakat çok damarlı bir telde birbirine paralel olarak yan yana yerleştirilmiş damarlardan geçen akımın oluşturduğu manyetik akılar, telde yakınlık etkisi denilen başka bir kaybı meydana getirir. Yakınlık etkisini ortadan kaldırmak için çok damarlı teller bükümlü yapılıdır [18]. Bu çalışmada tasarlanan KGT transformatöründe bobinlerin yüksek frekanstaki deri ve yakınlık etkilerini önlemek amacıyla çok damarlı bükümlü yapıya sahip olan litz tel kullanılmıştır. Kullanılan bobinlerin özellikleri şunlardır: Bobin Dış çapı ($D_{dış}$) 262 mm, Bobin İç çapı ($D_{iç}$) 19, Paralel tel sayısı 384, Tel çapı (d) 2 mm, Bobinler arası mesafe (h) 50 mm.

Transformatörlerde yüksek verimin elde edilebilmesi için alıcı ve verici bobinler arasında kayıpsız bir manyetik kuplajın sağlanması zorunludur. Endüstride kullanılan transformatörlerde alıcı verici bobinler tek bir demir nüve üzerine sarılarak neredeyse kayıpsız manyetik akı geçişleri elde edilebilmektedir. KGT transformatörlerinde ise alıcı ve verici bobinlerin tek bir nüve üzerinde kullanılması mümkün değildir. Bu

nedenle yapılan çalışmalarda kısa mesafeler için tasarlanan KGT transformatörlerinde hava ve parçalı nüve birlikte kullanılmaktadır. Önceki çalışmalarda kullanılan dairesel, dairesel-çubuklu, kare, dikdörtgen, T-nüve, U-nüve, E-nüve, Çift U ve çubuklu nüve yapıları Şekil 5'te gösterilmiştir. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda farklı parçalı nüve yapıları kullanılmasına rağmen [28, 29], Şekil 5 (j)'de görülen Dairesel-Dilimli Parçalı (D-DP) ferrit nüve yapısı literatürde ilk defa bu çalışmada tasarlanmıştır.



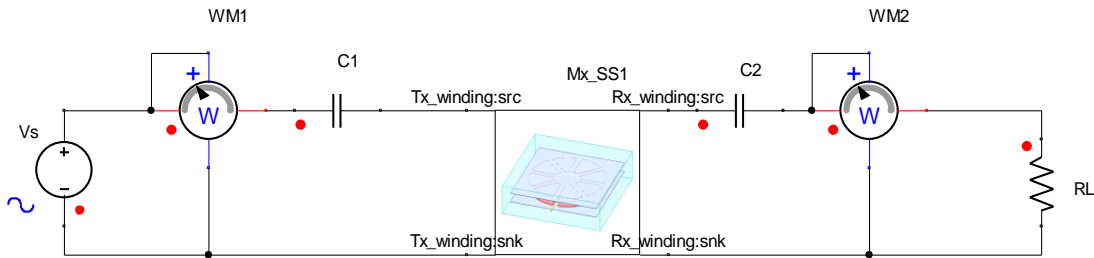
Şekil 5: (a) Dairesel (b) Dairesel-çubuklu (c) Kare (d) Dikdörtgen (e) T-nüve (f) U-Nüve (g) E-Nüve (h) Çift U (i) Çubuklu [16] (j) D-DP Nüve

D-DP nüve tasarımında, manyetik akı yolunun mümkün oldukça verici ve alıcı bobinler arasında kalmasını sağlayarak manyetik akı yönlendirmesini doğru şekilde yapmak amaçlanmıştır. Burada kullanılan D-DP nüve 10 mm kalınlığındadır. Dış yarıçapı 300 mm, iç yarıçapı 101 mm ölçülerindedir. Bu nüvede yüksek frekans çalışma uyumluluğundan dolayı ferrit malzeme kullanılmıştır.

Yapılan KGT transformatörü tasarımında kaçak akıyı minimuma indirerek kayıpları azaltmak amacıyla her bir bobin için D-DP nüvenin dış yüzeylerine bir alüminyum levha yerleştirilmiştir. Böylelikle akının bobinler arasındaki bölgede kalması zorlanmıştır.

3.2 KGT Devresi (WPT Circuit)

Tasarlanan KGT transformatör modeli ANSYS Simplorer ortamında SS topolojisine sahip bir devrede kullanılarak KGT devresi oluşturulmuştur. Şekil 6'da görülen bu devrede sinüzoidal kaynaktan KGT transformatörü beslenerek sabit bir omik R_L yükü üzerine güç aktarımı gerçekleştirilmiştir. Bu devrenin kurulum amacı ideal besleme koşulunda KGT transformatörünün maksimum verimini tespit etmektir. Bu devrede, yükün karalı olması ve besleme kaynağının sabit 220V gerilimli, 10 kHz frekanslı sinüzoidal bir kaynak olması bakımından ideal bir çalışma durumu söz konusudur. Bu ideal çalışma koşulları, tasarlanan transformatör sisteminin anma değerlerinin ve veriminin hesaplanması açısından önemlidir. Devrede R_L yükünün değeri maksimum güç transferini dikkate alınarak, ANSYS Maxwell'de Genetik Algoritma optimizasyon yöntemi kullanılarak 26.5 Ω olarak hesaplanmıştır.

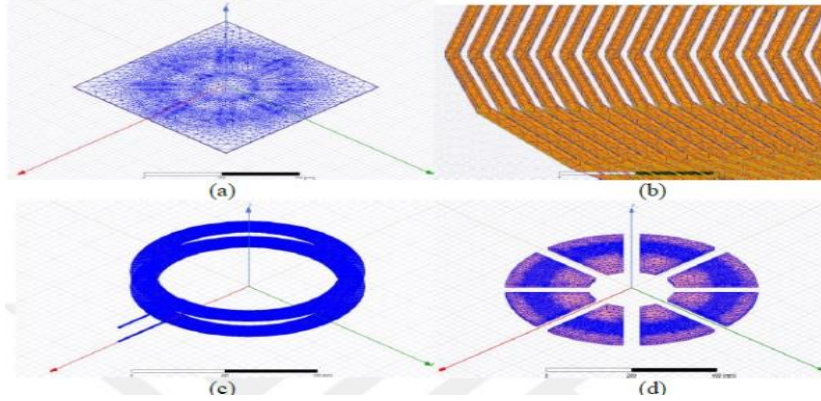


Şekil 6. Sinüzoidal kaynak beslemeli sabit omik yüklü KGT sistemi

4. BULGULAR (RESULTS)

Bu çalışmada önerilen düşük kayıp kuplajlı bir transformatörün SEY'e dayalı manyetik analizlerinden endüktans, ortak endüktans, bağlantı faktörü değerlerinin yanı sıra her bobinin direnç değeri, nüve ve sargı kayıpları elde edilmiştir. Manyetik analizlerde KGT sisteminin 3D model analizleri yapılmıştır. Daha sonra bu analiz sonuçları Şekil 6'daki benzetim devrelerinde kullanılarak KGT sistem verimi hesaplanmıştır.

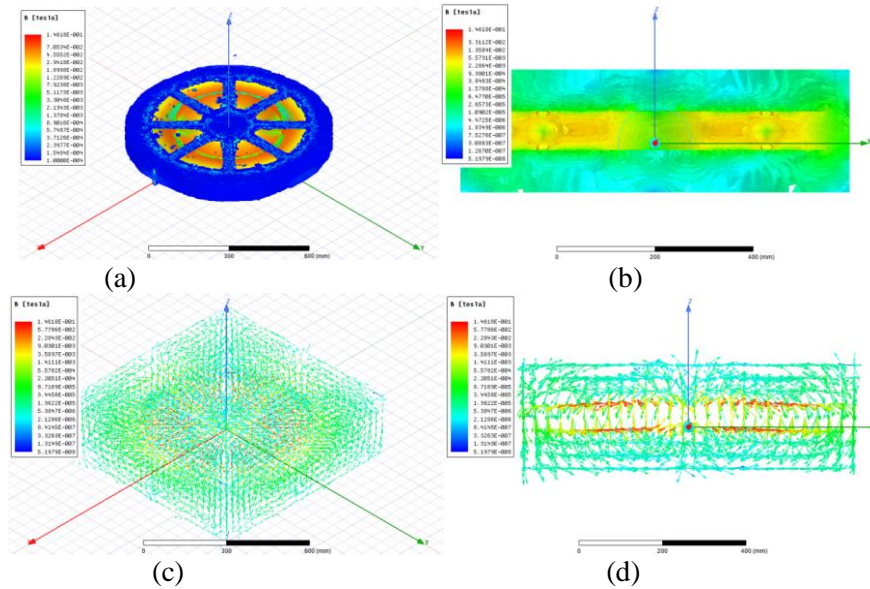
ANSYS Maxwell'de SEY'e dayalı 3D manyetik analizlerinde tetrahedron ağ yapısı kullanılmıştır. Bu yapı özellikle üç boyutlu manyetik alan hesaplamalarında güvenilir sonuçlar vermektedir. Şekil 7'de KGT transformatör parçalarının ağ yapıları görülmektedir.



Şekil 7. KGT transformatörü ağ uygulamaları

4.1 Manyetik Analiz Sonuçları (Magnetic Analysis Results)

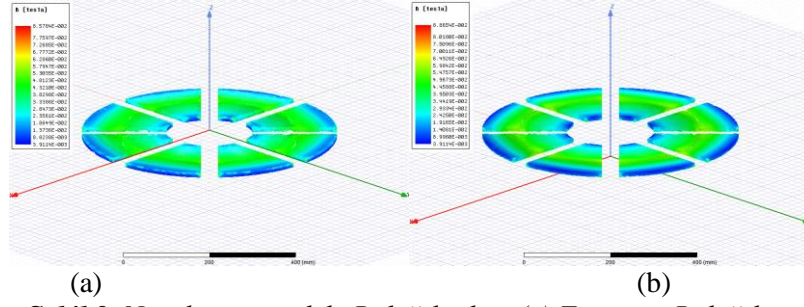
Bu analizlerde Şekil 5(j)'de görülen D-DP Nüveli KGT transformatörünün rezonans frekansında 3D SEY analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerden elde edilmiş manyetik akı yoğunluğunun (B) havadaki dağılımları Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Transformatörün havadaki B dağılımları: (a) 3D model B skaler dağılımı (b) Yan profil B skaler dağılımı (c) 3D model B vektörel dağılımı (d) Yan profil B vektörel dağılımı

Burada verici ve alıcı bobinler arasındaki maksimum B değeri 30-40 mT'dir. Alüminyum levhaların dış kısmında B 'nin 0.001 mT değerlerine düştüğü görülmektedir. Bobinlerin alt ve üst kısmına yerleştirilmiş olan bu levhalar manyetik akının yönlendirilmesinde başarılı olmuştur. Levha bulunmayan yan bölgelerde ise B yaklaşık 0.15 mT büyüklüğünde olup, kaçak akıların az da olsa var olduğu görülmektedir.

Şekil 9'da nüveler üzerindeki B dağılımları gösterilmiştir. Şekil 9 (a)'daki verici taraf nüvesi üzerinde maksimum B değeri 80 mT, bobin hizasında bulunan bölgelerde en fazla 55 mT 'dir. Şekil 9 (b)'deki alıcı taraf nüvesi üzerindeki bobin hizası bölgelerde 55-60 mT, diğer bölgelerde 80-85 mT değerlerindedir. Nüve üzerinde doyum bölgesinde çalışma görülmemektedir.



Şekil 9. Nüveler üzerindeki B dağılımları (a) T_x nüvesi B dağılımı
(b) R_x nüvesi B dağılımı

Rezonans frekansında, 3D manyetik analizlerden elde edilen sonuçlar ve analitik hesaplamalardan elde edilen sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’den de görüleceği gibi analitik sonuçlar ve benzetim sonuçlarının yaklaşık olarak uyumludur. Bağlantı (kuplaj) faktörü hava-ferrit hibrit nüve için 0.64 değerinde olup bu tür nüveler için iyi bir değerdir.

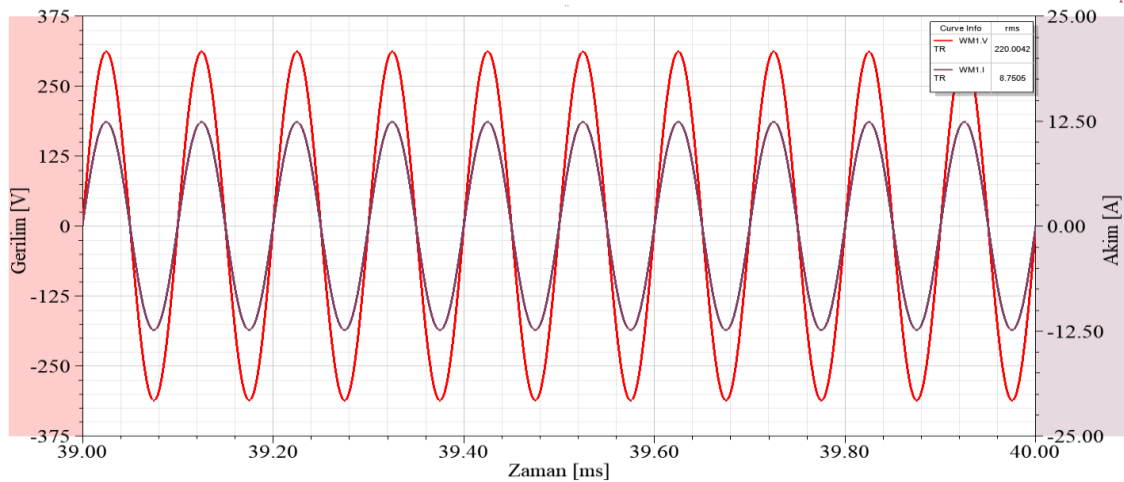
Tablo 1. Rezonans frekansındaki değerler

	ANSYS MAXWELL 3D	Hesaplanan Değer
LT_x (μH)	298.5245598	301
LR_x (μH)	298.5192085	301
k	0.641523069	0.64

4.2 Devre Analizleri Sonuçları (Circuit Analysis Results)

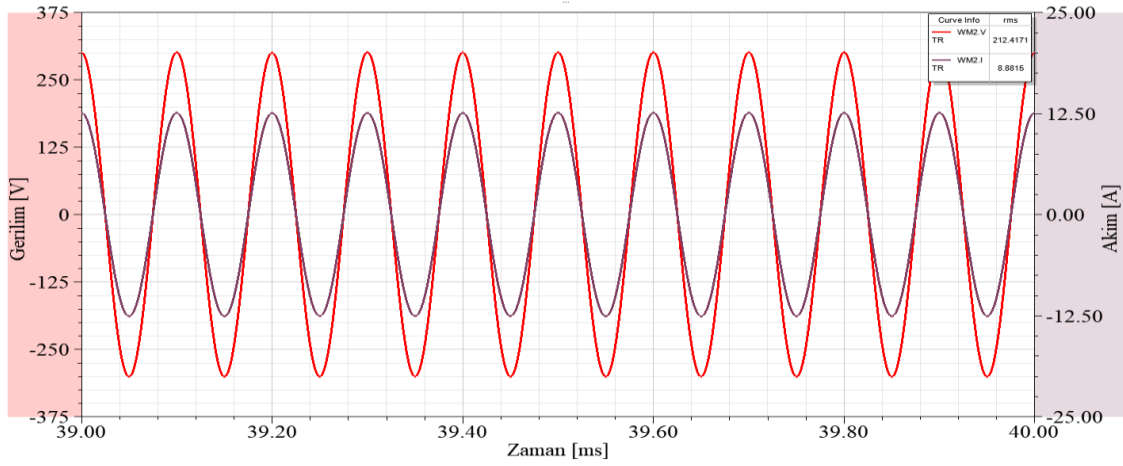
KGT devresinin analizlerinde Şekil 6’da görülen devrenin benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, manyetik analiz sonuçlarının benzetim devresine gömülerek çalıştırılmasından elde edilmiştir. Analiz sonucunda devrenin akım, gerilim, güç sonuçları elde edilmiştir.

Şekil 10’da verici tarafa ait akım-gerilim grafikleri görülmektedir. 10 kHz frekanslı 220 V’lik sinüzoidal bir kaynaktan 8.75 A bir akım, verici taraftan çekilmektedir.



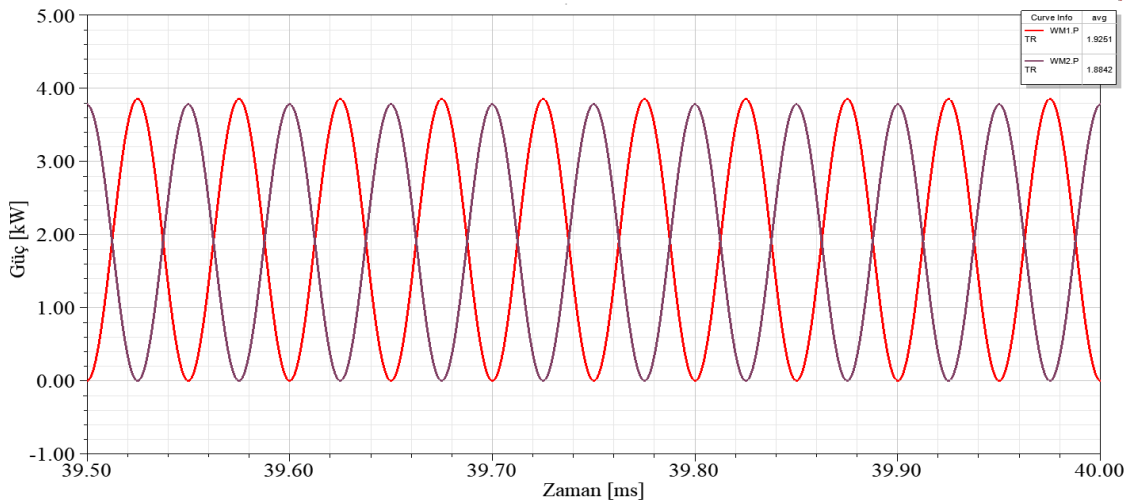
Şekil 10. Verici taraf akım-gerilim grafikleri

Şekil 11’de alıcı tarafa ait akım-gerilim grafikleri görülmektedir. Sistemin alıcı tarafına aktarılan gerilim 212.4 V’luk sinüzoidal bir gerilimdir. 26.5 Ω ’luk R_L yükü 8.88 A akım çekmiştir.



Şekil 11. Alıcı taraf akım ve gerilim grafikleri

Şekil 12’de verici ve alıcı taraflarına ait güç grafikleri görülmektedir. KGT sisteminde verici taraftan 1.92 kW değerinde bir güç, 1.88 kW olarak alıcı taraftaki yük üzerine aktarılmıştır.





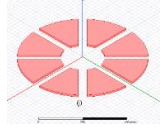


Şekil 12. Alıcı ve verici tarafların güç grafikleri

Alıcı ve verici tarafların akım ve gerilimleri arasında faz farkları bulunmaması ve güçlerin negatif değerler almaması sistemin rezonansa olduğunu doğrulamaktadır.

Genel bir değerlendirme açısından bu çalışmada önerilen D-DP ferrit nüveli KGT sistemi ve farklı geometrilerde nüve yapısına sahip literatürde yapılan çalışmalarda KGT sistemlerine ilişkin yapılan çalışmalarda kullanılan yöntemler ve verim sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Bu tablodan görüleceği gibi; Kaynak [30]’da 20 kHz rezonans frekanslı Paralel-Paralel devre yapısına sahip endüktif şarj sisteminde, hizalı pozisyonda 26.5 cm’lik hava aralığında şebekeden batarya yükü üzerine %90 verimle güç aktarımı yapılmıştır. Kaynak [31]’de 60 kHz rezonans frekanslı SS devre yapısına sahip endüktif bir güç kaynağı sisteminde, 0.1 cm ile 2.8 cm arası hava aralığında sırasıyla %93 - %85 toplam sistem verimi ile güç aktarımı yapılmıştır. Kaynak [5]’de 50 kHz rezonans frekanslı Seri-Paralel devre yapısına sahip manyetik rezonans güç aktarımı sisteminde, hizalı pozisyonda 20 cm’lik hava aralığında batarya yükü üzerine %90 verimle güç aktarımı yapılmıştır. Kaynak [3]’de 20 kHz rezonans frekanslı Seri-Seri devre yapısına sahip elektrikli araçları sürmek için tasarlanan manyetik rezonansa dayalı KGT sisteminde, hizalı pozisyonda 26 cm’lik hava aralığında batarya yükü üzerine %80 verimle güç aktarımı yapılmıştır. Bu çalışmada önerilen 10 kHz rezonans frekanslı Seri-Seri devre yapısına sahip D-DP ferrit nüveli KGT sistem ise 5 cm’lik hava aralığında, sinüzoidal bir kaynaktan sabit bir omik yük üzerine % 97 verim ile güç aktarımı gerçekleştirmiştir.

Tablo 2. Literatürde yapılan çalışmalar ve önerilen nüve yapılı KGT sistemi sonuçları

Nüve Geometrisi					
KGT Yöntemi	MR	MR	MR	MR	MR
Devre Topolojisi	Seri-Seri	Paralel-Paralel	Seri-Paralel	Seri-Seri	Seri-Seri
Sistem verimi	%85 [31]	%90 [30]	%90 [5]	80% [3]	%97
Hava aralığı	2.8 cm	26.5 cm	20 cm	26 cm	5 cm
Rezonans frekansı	60 kHz	20 kHz	50 kHz	20 kHz	10k Hz

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada cep telefonu şarjı, elektrikli araç şarjı vb. kısa mesafeli güç transferi uygulamalarında kullanılabilmesi amacıyla, 5 cm'lik hava aralıklı manyetik rezonans kuplajlı bir KGT sisteminin tasarımı yapılmıştır. Öncelikle düşük kayıp kuplajlı özgün bir KGT transformatörü tasarlanmıştır. Tasarlanan transformatörün D-DP ferrit nüve yapısı ilk defa bu çalışmada kullanılmıştır. Transformatörün bobin yapısı bakır yüksek frekanstaki deri ve yakınlık etkilerini önlemek amacıyla litz telden oluşturulmuştur. Transformatörün manyetik nüve yapısında ferrit malzeme kullanılmış olup alıcı ve verici bobinler arasındaki hava nüve 50 mm uzunluğundadır. Transformatörde kaçak akıları önlemek amacıyla D-DP nüvenin dış yüzeylerine alüminyum levhalar kullanılarak manyetik akı sargılar arasında kalmaya zorlanmış, bu sayede enerji kayıpları en aza indirgenmiştir. Transformatörün SEY ile yapılan manyetik analizleri sonuçları, nümerik olarak hesaplanarak doğrulanmıştır. Tasarlanan KGT transformatörü SS rezonans topolojisi ile bir benzetim devresi yardımı ile test edilmiştir. Bu devrede ideal koşulda transformatörün maksimum verimini tespit etmek amacıyla, 10 kHz frekanslı sinüzoidal kaynaktan transformatör beslemesi yapılarak sabit bir omik (R_L) yük üzerine % 97 verimle güç aktarımı gerçekleştirilmiştir. Bu verim değeri literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında önemli bir sonuç olduğu görülmüştür. Elde edilen bu sonuçlar önerilen D-DP nüve yapısının KGT transformatörü uygulamalarında başarı ile kullanılabileceğini göstermiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] E. Aydın, A. Pashei, E. Yıldırım, M. T. Aydemir, "Manyetik Rezonanslı Kuplaj ile Kablosuz Enerji Transferinde Hizalanmış ve Hizalanmamış Durumların Limitlerinin İncelenmesi," Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol. 30, no. 3, pp.1-6, 2018.
- [2] A. Pashei, E. Aydın, M. Polat, E. Yıldırım, M. T. Aydemir, "Elektrikli Araçlar için Temassız Güç Aktarım Sistemleri," EMO Bilimsel Dergi, vol. 6, no 11, pp. 1-12, 2016.
- [3] J. Shin, S. Shin, Y. Kim, S. Ahn, S. Lee, G. Jung, S.-J. Jeon, D.-H. Cho, "Design and Implementation of Shaped Magnetic-Resonance-Based Wireless Power Transfer System for Roadway-Powered Moving Electric Vehicles," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 3, pp. 1179-1192, 2013.
- [4] T. Imura, Y. Hori, "Maximizing Air Gap and Efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer Using Equivalent Circuit and Neumann Formula," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 10, pp.4746-4752, 2011.
- [5] H. Takanashi, Y. Sato, Y. Kaneko, S. Abe, T. Yasuda, "A large air gap 3 kW wireless power transfer system for electric vehicles," 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 269-274, 2012,

- [6] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, 2007.
- [7] M. Cederlöf. "Inductive Charging of Electrical Vehicles," Stockholm: KTH, School of Electrical Engineering (EES), Electromagnetic Engineering", Master Thesis, 2012.
- [8] A. Karalis, J.D. Joannopoulos, M Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, vol. 323, no. 1, pp. 34–48, 2008.
- [9] A. L. Máñez. "Optimization of Inductive Resonant Coupling Links for low Power and Mid-Range Wireless Power Transfer", Master Thesis, 2014.
- [10] A. Ağçal, N. Bekiroğlu, S. Özçira, "Manyetik Rezonanslı Kuplaj ile Kablosuz Enerji Transferinde Hizalanmış ve Hizalanmamış Durumların Limitlerinin İncelenmesi," *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol. 30, no. 3, pp. 67-73, 2018.
- [11] R. Zhang, C. K. Ho, "MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 5, pp. 1989-2001, 2013.
- [12] J. M. Miller, O. C. Onar, M. Chinthavali, "Primary-Side Power Flow Control of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Charging," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 147-162, 2014.
- [13] K. Aditya, S. S. Williamson, "Design Guidelines to Avoid Bifurcation in a Series–Series Compensated Inductive Power Transfer System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 5, pp. 3973-3982, 2018.
- [14] S. Ludvik, P. Mojca, B. V. Boštjan, "Optimization, design, and modeling of ferrite core geometry for inductive wireless power transfer," *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 49, no. 1, pp. 145-155, 2015.
- [15] T. Diekhans , R. W. De Doncker, "A Dual-Side Controlled Inductive Power Transfer System Optimized for Large Coupling Factor Variations and Partial Load," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 11, pp. 6320-6328, 2015.
- [16] C. Panchal, S. Stegen, J. Lu, "Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 21, no. 5, pp. 922-937, 2018.
- [17] B. Fincan, Ö. Üstün, "A study on comparing analytical methods for coil design in high frequency wireless energy transfer," 2015 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power (2015 WoW), Daejeon, South Korea: IEEE. 2015.
- [18] Y. Tezcan, H. Ünal, T. Sürgevil, M. Boztepe, "Optimum Coil Design Considering Skin and Proximity Effects for a Wireless Battery Charger of Electric Vehicle," 2017 World Electro Mobility Conference, 2017.
- [19] A. P. Sample, D. T. Meyer, J. R. Smith, "Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 544-554, 2010.
- [20] T. Imura, "Study on maximum air-gap and efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer using Equivalent Circuit," 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Bari, Italy, 2010.
- [21] G. Buja, M. Bertoluzzo, and K. N. Mude, "Design and Experimentation of WPT Charger for Electric City Car," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 12, pp. 7436-7447, 2015.

- [22] S. Samanta, R. A. Kumar, "Small-Signal Modeling and Closed-Loop Control of a Parallel-Series/ Series Resonant Converter for Wireless Inductive Power Transfer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 1, pp. 172-182, 2018.
- [23] O. Kaplan "Kablosuz Güç Aktarımı İçin Karşılıklı Endüktans Hesaplama Aracının Geliştirilmesi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 7, no. 1, pp. 37-48, 2019.
- [24] J. Barranger, "Hysteresis and Eddy-Current Losses of a Transformer lamination Viewed as an application of the Poynting Theorem," *NASA Technical Note*, Cleveland, Ohio, 1965.
- [25] M. Budhia, G. A. Covic, J. T. Boys, "Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 11, pp. 3096 – 3108, 2011.
- [26] K. Ogawa, N. Oodachi, S. Obayashi, H. Shoki, "A study of efficiency improvement of wireless power transfer by impedance matching," *2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications*, Kyoto, Japan, 2012.
- [27] S. Y. Choi, B. W. Gu, S. Y. Jeong, C. T. Rim, "Advances in Wireless Power Transfer Systems for Roadway-Powered Electric Vehicles," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 18-36, 2014.
- [28] S. Li, C. C. Mi, "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 4-17, 2014.
- [29] O. C. Onar, J. M. Miller, S. L. Campbell, C. Coomer, C. P. White, L. E. Seiber, "Oak Ridge National Laboratory Wireless Power Transfer Development for Sustainable Campus Initiative," *2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Detroit, MI, USA, 2013.
- [30] H. H. Wu, A. Gilchrist, K. D. Sealy, D. Bronson, "A High Efficiency 5 kW Inductive Charger for EVs Using Dual Side Control," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 8, no.3, pp. 585-595, 2012.
- [31] A. J. Moradewicz, M. P. Kazmierkowski, "Contactless Energy Transfer System With FPGA-Controlled Resonant Converter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no.9, pp. 3181-3190, 2010.