

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETİK REZONANS KUPLAJ YÖNTEMİYLE  
KABLOSUZ GÜÇ AKTARIM SİSTEMİ TASARIMI

Muhammed Turan ARSLAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. Kadir ERKAN

Haziran, 2023

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MANYETİK REZONANS KUPLAJ YÖNTEMİYLE KABLOSUZ  
GÜÇ AKTARIM SİSTEMİ TASARIMI**

Muhammed Turan ARSLAN tarafından hazırlanan tez çalışması 15.06.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekatronik Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Kadir ERKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Kadir ERKAN, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Muhammet GARİP, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Osman KILIÇ, Üye

Marmara Üniversitesi

---

---

---

Danışmanım Doç. Dr. Kadir ERKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Manyetik Rezonans Kuplaj Yöntemiyle Kablosuz Güç Aktarım Sistemi Tasarımı” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Muhammed Turan ARSLAN

İmza



*Aileme*

# TEŐEKKÜR

---

Bu alıőma sűresince tűm bilgilerini benimle paylaőarak oldukça verimli bir yűksek lisans dűnemi geçirmemi saėlayan, her konuda desteėini benden esirgemeyen ve tezimde bűyűk emeėi olan çok deėerli danıőman hocam Doç. Dr. Kadir Erkan'a teőekkűrlerimi sunarım. Bu çalıőmada maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman arkamda duran canım aileme sonsuz teőekkűrlerimi sunarım.

Haziran, 2023

Muhammed Turan ARSLAN

# İÇİNDEKİLER

---

<b>SİMGE LİSTESİ</b>	<b>vii</b>
<b>KISALTMA LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>ix</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>xi</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xiv</b>
<b>1 GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1 Literatür Özeti .....	1
1.2 Tezin Amacı.....	10
1.3 Hipotez.....	11
<b>2 KABLOSUZ GÜÇ AKTARIMI TEKNOLOJİSİ</b>	<b>12</b>
2.1 Kablosuz Güç Aktarımı Teknikleri.....	12
2.2 MRKY ile Kablosuz Güç Aktarımının Çalışma Prensibi.....	16
2.3 Kompanzasyon Topolojileri.....	16
2.4 Seri-Seri Rezonans Devresi ile KGA.....	23
2.5 Kalite Faktörü ve Rezonans Frekansı .....	25
2.6 Ortak Endüktans ve Kuplaj Katsayısı .....	26
<b>3 KGA SİSTEMİ TASARIMI</b>	<b>27</b>
3.1 Bobin Tasarımı.....	27
3.2 Frekans Seçimi.....	31
3.3 Litz Teli Seçimi .....	32
3.4 Kapasitör Seçimi.....	34
3.5 Güç Elektroniği Devresi Tasarımı .....	34

<b>4 BENZETİM ÇALIŞMALARI VE DENEYSEL SONUÇLAR</b>	<b>37</b>
<b>5 SONUÇ VE TARTIŞMA</b>	<b>50</b>
<b>KAYNAKÇA</b>	<b>51</b>
<b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>	<b>57</b>



## SİMGE LİSTESİ

---

$\omega$	Açısal Frekans
$I$	Akım
$N$	Bobin Sarım Sayısı
$R_2$	Çıkış Bobini İç Direnci
$C_2$	Çıkış Kapasitansı
$R$	Direnç
$Z$	Empedans
$L$	Endüktans
$f$	Frekans
$R_1$	Giriş Bobini İç Direnci
$C_1$	Giriş Kapasitansı
$W$	Güç
$\Gamma$	İçsel Kayıp Oranı
$Q$	Kalite Faktörü
$C$	Kapasitans
$I_s$	Kaynak Akımı
$Q_1$	Kaynak Tarafın Kalite Faktörü
$V_s$	Kaynak Voltajı
$k$	Kuplaj Katsayısı
$m$	Metre
$L_m$	Ortak Endüktans
$M$	Ortak Endüktans
$Z_T$	Toplam Empedans
$\eta$	Verimlilik
$V$	Voltaj
$Q_2$	Yük Tarafın Kalite Faktörü
$I_L$	Yükten Geçen Akım
$R_L$	Yük Direnci

## KISALTMA LİSTESİ

---

AWG	Amerikan Tel Göstergesi
CA	Sabit Akım, Değişken Voltaj Modu
CV	Sabit Voltaj, Değişken Akım Modu
KGA	Kablosuz Güç Aktarımı
MIMO	Çoklu Giriş Çoklu Çıkış
MRKY	Manyetik Rezonans Kuplaj Yöntemi
RMS	Karekök Ortalama
PP	Paralel-Paralel
PS	Paralel-Seri
PWM	Sinyal Genişlik Modülasyonu
SAE	Otomotiv Mühendisleri Topluluğu (Society of Automotive Engineers)
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SS	Seri-Seri
SP	Seri-Paralel

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Wardencllyffe kule tesisi .....	1
Şekil 1.2 Manyetik rezonanslı güç aktarımı .....	2
Şekil 1.3 Dört bobinli KGA sistemi .....	3
Şekil 1.4 MagMIMO .....	5
Şekil 1.5 Wang ve diğerlerinin prototip KGA çalışması .....	5
Şekil 1.6 Otonom robotlar için KGA sistemi .....	7
Şekil 2.1 KGA teknikleri .....	12
Şekil 2.2 Endüktif kuplaj yöntemi .....	13
Şekil 2.3 Manyetik rezonans kuplaj yöntemi .....	14
Şekil 2.4 KGA sisteminin blok diyagramı.....	16
Şekil 2.5 Manyetik rezonans kuplaj yönteminin eşdeğer devresi .....	17
Şekil 2.6 Endüktif kuplaj yönteminin eşdeğer devresi .....	17
Şekil 2.7 SS rezonans devresi.....	20
Şekil 2.8 SP rezonans devresi.....	20
Şekil 2.9 PS rezonans devresi.....	21
Şekil 2.10 PP rezonans devresi.....	21
Şekil 3.1 Düz spiral bobinin yan görünüşü.....	28
Şekil 3.2 ANSYS bobin tasarımı.....	30
Şekil 3.3 Bobin üzerindeki manyetik akı yoğunluğu .....	30
Şekil 3.4 Kuplaj katsayısının hava aralığı değişimine göre grafiği.....	31
Şekil 3.5 80,6 kHz'de üretilen kare dalganın osiloskop görseli .....	32
Şekil 3.6 Litz teli .....	33
Şekil 3.7 Tasarlanan güç devresinin şeması .....	35
Şekil 4.1 KGA sistemi benzetim çalışması .....	37
Şekil 4.2 Rezonans öncesi (a) ve rezonans halindeyken (b) vericinin akım ve gerilim değerleri .....	38
Şekil 4.3 Rezonans öncesi (a) ve rezonans halindeyken (b) alıcı bobinin akım-gerilim grafiği.....	39
Şekil 4.4 Rezonans öncesi (a) ve rezonans halindeyken (b) yük üzerindeki akım-gerilim değerleri .....	40
Şekil 4.5 Giriş ve çıkış arasındaki güç karşılaştırması .....	40

<b>Şekil 4.6</b> İvertör devresi.....	41
<b>Şekil 4.7</b> Giriş kapasitör değeri (a), Çıkış kapasitör değeri (b) .....	41
<b>Şekil 4.8</b> 29 sarımda giriş endüktansı (a), çıkış endüktansı (b).....	42
<b>Şekil 4.9</b> 30 sarımda giriş endüktansı (a), çıkış endüktansı (b).....	42
<b>Şekil 4.10</b> Ortak endüktans değerinin bulunması.....	43
<b>Şekil 4.11</b> STM32 ve frekans ayarlayıcı devre.....	44
<b>Şekil 4.12</b> Gerilimölçer (a), Akımölçer (b) .....	44
<b>Şekil 4.13</b> Osiloskop ve güç kaynağı.....	45
<b>Şekil 4.14</b> Verici tarafın elektriksel değerleri (10 VDC).....	46
<b>Şekil 4.15</b> Alıcı tarafın elektriksel değerleri (10 VDC).....	46
<b>Şekil 4.16</b> Alıcı tarafın ölçümü.....	47
<b>Şekil 4.17</b> Verici tarafın elektriksel değerleri (8 VDC).....	48
<b>Şekil 4.18</b> Alıcı tarafın elektriksel değerleri (8 VDC).....	48
<b>Şekil 4.19</b> 5 cm hava aralığında yapılan çalışma.....	49
<b>Şekil 4.20</b> Sistemin karanlık ortamda görseli .....	49

## TABLO LİSTESİ

---

<b>Tablo 1.1</b> MagMIMO sisteminin mesafe-verimlilik sonuçları .....	5
<b>Tablo 2.1</b> Yakın alan KGA tekniklerinin karşılaştırması .....	15
<b>Tablo 2.2</b> Kompanzasyon topolojileri için gereksinimler .....	19
<b>Tablo 2.3</b> Kompanzasyon topolojilerinin karşılaştırılması .....	22
<b>Tablo 2.4</b> Kompanzasyon topolojileri kapasitans ifadeleri .....	22
<b>Tablo 2.5</b> Kompanzasyon topolojileri toplam empedans ve yük ifadeleri .....	23
<b>Tablo 3.1</b> Bobin parametreleri .....	29
<b>Tablo 3.2</b> Çalışma frekansı aralıklarına göre litz teli boyutları .....	33
<b>Tablo 3.3</b> Farklı Sarım Sayısına Göre Parametre Tablosu.....	34
<b>Tablo 4.1</b> Benzetim çalışmaları için sistem parametreleri .....	38
<b>Tablo 4.2</b> Ölçüm sonuçları ile rezonans frekansı belirleme.....	43
<b>Tablo 4.3</b> Sistem parametreleri .....	45

## Manyetik Rezonans Kuplaj Yöntemiyle Kablosuz Güç Aktarım Sistemi Tasarımı

Muhammed Turan ARSLAN

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Kadir ERKAN

Son yıllarda mobil elektronik cihazların kullanımının yaygınlaşmasıyla, kablosuz şarj teknolojisinde de ilerlemeler kaydedilmiştir. Kablodan kaynaklanan sorunların ortadan kalkmasıyla, hareket özgürlüğü ve kullanım kolaylığı gibi avantajları beraberinde getiren bu konu üzerine farklı tekniklerle birçok çalışma yapılmıştır. Ancak, kablosuz şarj teknolojisinin günlük hayatta yaygın şekilde kullanılmasını sağlayacak yeni çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, orta mesafede yüksek verimle kablosuz güç aktarımına olanak sağlaması nedeniyle manyetik rezonans kuplaj yöntemi ile bir sistemin tasarlanması ve prototip gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede elektrikli araçların ve mobil elektronik cihazların kolay bir şekilde ve yüksek verimlilikte şarj edilmesi mümkün olacaktır. Bu tezin, kablosuz güç aktarımı konusu üzerine ilgi duyan ve bu konuda çalışma yapacak olan araştırmacılara, rehber niteliğinde olması hedeflenmektedir. Çalışmamızda öncelikle kablosuz güç aktarımının tarihçesi verilip, ardından farklı kablosuz güç aktarımı tekniklerine yer verilmiştir. Daha sonra manyetik rezonans kuplaj yönteminin temel prensibi açıklanmıştır. Manyetik rezonans kuplaj yöntemindeki temel kompanzasyon topolojileri verilip, ardından çalışmamızda kullanılan

seri-seri rezonans devre topolojisinin detayları ortaya koyulmuştur. Son olarak kablosuz güç aktarımı sisteminin devre tasarımı ve bobin tasarımı aşamalarına değinilmiştir. Sistemin invertör devresi Altium Designer programı kullanılarak çizilmiştir. Sistemde kullanılan bobinler analitik yöntemler kullanılıp tasarlanmış, ANSYS EM programında doğrulanmıştır. Deri ve yakınsaklık etkisinden kaynaklı kayıpları azaltmak için bobinde litz kablo teli kullanılmıştır. Tasarlanan sistemde, 7 cm hava aralığında maksimum enerji verimliliğiyle kablosuz güç aktarımı hedeflenmiştir. Sistem verimliliği MATLAB Simulink ortamında test edilmiştir. Tasarlanan sistem deneysel olarak üretilmiş ve 26,8 W gücün %91,42 verimle; 44,3 W gücün ise %88,49 verimle 7 cm hava aralığında kablosuz olarak başarılı bir şekilde aktarımı gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kablosuz güç aktarımı, kablosuz enerji transferi, kablosuz şarj, manyetik rezonans kuplaj.

## **Wireless Power Transmission System Design Via Magnetic Resonance Coupling**

Muhammed Turan ARSLAN

Department of Mechatronics Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Kadir ERKAN

With the widespread use of mobile electronic devices in recent years, advances have been made in wireless charging technology. Many studies have been conducted with different techniques on this subject, which brings advantages such as freedom of movement and ease of use by eliminating the problems caused by the cable. However, there is a need for new studies that will enable the widespread use of wireless charging technology in daily life. In this study, it is aimed to design and prototype a system with the magnetic resonance coupling method as it enables wireless power transfer with high efficiency at medium distances. In this way, it will be possible to charge electric vehicles and mobile electronic devices easily and with high efficiency. This thesis is intended to serve as a guide for researchers who are interested in wireless power transfer and who will work on this subject. In our study, first, the history of wireless power transfer is given and then different wireless power transfer techniques are given. Then the basic principle of the magnetic resonance coupling method is explained. Finally, the circuit design and coil design stages of the wireless power transfer system are discussed. The inverter circuit of the system is drawn using Altium Designer program. The coils used in the system were designed using analytical methods and verified in the ANSYS EM program. Litz cable wire is used in the coil to reduce losses due to skin and proximity effects. In the system which is designed, wireless power transmission is aimed at the maximum energy efficiency in the 7 cm air gap. The efficiency of the system was tested in the MATLAB

Simulink environment. The system that is designed has been produced experimentally and wireless power transmission has been observed successfully in the 7 cm air gap 26,8 W with 91,42% efficiency and 44,3 W power with 88,49% efficiency.

**Keywords:** Wireless power transfer, wireless energy, wireless charging, magnetic resonance coupling.



## 1.1 Literatür Özeti

Elektrikli araçlar için, kablosuz güç aktarımı (KGA) uygulamaları, fosil yakıtlara olan ulusal bağımlılığı azaltabilir ve sera gazı emisyonlarını en aza indirebilir. Son yıllarda elektronik cihazların sosyal ve endüstriyel hayatta yaygın kullanımı ve elektrikli araçların geliştirilmesi, KGA teknolojisine olan ilgiyi arttırmıştır. Adından da anlaşılacağı gibi, kablosuz güç aktarımı, kaynak ile elektrik yükü arasında herhangi bir kablo bağlantısı olmaksızın elektrik enerjisinin iletilmesi olayıdır. Şarj kablolarının sebep olduğu hareket kısıtlamasını ortadan kaldırmasının yanı sıra güvenliği ve kullanım kolaylığını arttıran bu teknoloji; elektrikli araçların, tüketici elektroniğinin ve medikal uygulamaların ilerlemesine katkıda bulunan önemli faktörlerden biri haline gelmiştir.



**Şekil 1.1** Wardencliff kule tesisi [1]

Günümüzde ışınımlı (mikrodalga, lazer) ve ışınımsız (endüktif güç, kapasitif güç, manyetik rezonans eşleşme) teknikler olarak sınıflandırılan KGA çalışmalarının temelleri; 19.yy'ın sonlarında atılmıştır. Elektromanyetik radyasyonla, gücü dünyanın herhangi bir noktasına iletmeyi hedefleyen Tesla tarafından elektrik alan ve kapasitif kuplaj yoluyla enerjinin aktarılmasını da içeren bir dizi deney ortaya koyulmuştur. (Şekil 1.1)'de görülmekte olan; kablosuz iletişim ve kablosuz güç iletimi için

kullanılması amacıyla Wardencllyffe Kule Tesisi, 1901'de ABD'de kurulmuş, fakat ekonomik ve teknolojik yetersizlikler nedeniyle tesis faaliyete geçememiştir [1].

İkinci Dünya Savaşı'na kadar duraksayan KGA ile ilgili çalışmalar, mikrodalga frekanslarında çalışabilen yüksek güçlü vakum tüplerinin ortaya çıkmasıyla yeniden hız kazanmıştır. William C. Brown 1963'te, ilk mikrodalga kablosuz güç aktarım sistemini göstermiş; 1964'te ise mikrodalga ışınlarından güç alarak çalışan helikopteri tasarlamıştır. Daha sonra, ışınlanmış mikrodalga enerjisini kullanarak çalışan çeşitli model uçaklar tasarlanmıştır [2].

Bir diğer ışınımlı güç aktarım tekniği olan lazerle güç transferi, uzak mesafelerde yüksek güç aktarılabilmesinden dolayı daha çok havacılık ve uzay çalışmalarında kullanılmıştır. 2003 yılında NASA'nın Marshall Uzay Uçuş Merkezi'nde bir lazerden sağlanan güç ile küçük ölçekli bir uçağın başarılı şekilde uçuşu gerçekleştirilmiştir [3].

20. yüzyılın sonlarında taşınabilir elektronik cihazların kullanımının yaygınlaşmasıyla endüktif güç aktarımına ilgi duyulmaya başlanmıştır. Elektromanyetik indüksiyon ilkesini kullanarak kısa mesafede, bir kaynaktan bir cihaza gücü etkin bir şekilde iletebilen bu prensip, elektrikli diş fırçalarının ve cep telefonlarının kablosuz şarj edilmesinde kullanılmaktadır [4].

Kapasitif kuplaj güç aktarımı, elektrik alanı kullanarak yakın alan güç aktarımında kullanılan bir yöntemdir. Artan güç seviyelerinde, yüksek voltaj gerektiğinden ve elektrik alanın yoğunluğuna maruz kalmanın insan vücuduna zarar vereceğinden, bu teknoloji yaygın olarak tercih edilmemektedir [5].



**Şekil 1.2** Manyetik rezonanslı güç aktarımı [6]

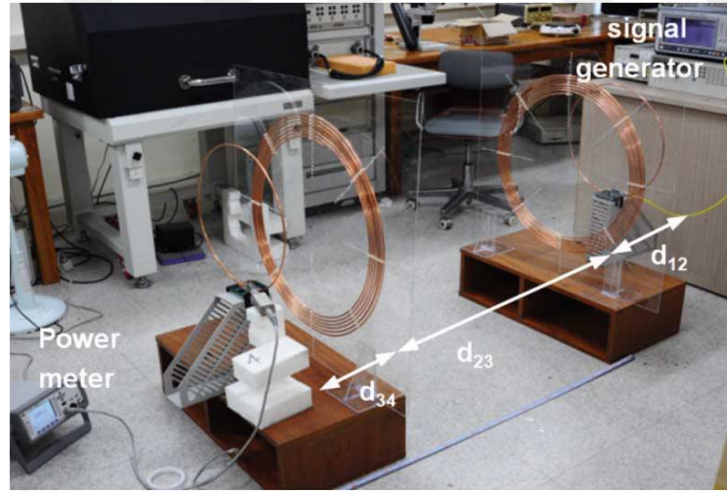
Kablosuz güç aktarımı çalışmalarını hızlandıran ve birçok çalışmaya ilham olan, 2007 yılında Massachusetts Institute of Technology (MIT) bünyesinde Marin Soljačić'in

önderlik ettiği bir araştırma grubu, manyetik rezonans kuplaj yöntemiyle 2 metre mesafeden 60 W gücündeki ampülü %40 verim ile aydınlatabilmişlerdir (Şekil 1.2) [6]. Gücün, alıcı ve verici bobinler arasındaki enerji akışının maksimum olduğu rezonans frekansında aktarılması hedeflenen bu yöntem, kısa ve orta menzilli enerji transferi çalışmaları için ilham verici olmuştur [7].

Imura ve diğerleri, elektrikli aracın altına yerleştirilebilecek boyutta olan 15 cm çapında alıcı ve verici antenlerle, 15,9 MHz frekansta 20 cm hava aralığında %96 verimle 100 W güç aktarabilmişlerdir [8].

Cannon ve diğerleri, bir kaynak bobininden, bir veya birden daha fazla yük bobinine güç sağlamak için manyetik rezonans eşleşme tekniğini kullanmışlardır. Araştırmacılar, alıcıların kaynak bobine ve birbirlerine göre konumları değiştirildiğinde, yük terminallerindeki toplu kapasitansları ayarlamının zorluğuna dikkat çekmişlerdir [9].

Chen ve diğerleri, planlanmış bir miktarda enerjiyi maksimum verimlilikle aktarmak için manyetik olarak eşleşmiş bobinler kullanarak, ışınımsız kablosuz güç aktarımı çalışması yapmışlardır. Bobinler arası transfer mesafesini arttırabilmek için ayarlama yaklaşımı önermişlerdir; ancak araştırma simülasyon sonuçlarıyla sınırlıdır [10].



**Şekil 1.3** Dört bobinli KGA sistemi [11]

Duong ve Lee, rezonans eşleşmeli bir KGA sisteminde yüksek verim elde etmek için dört bobin içeren birleştirme yöntemi önermişlerdir. Rezonans frekansına ulaşmak için hassas bir şekilde ayarlanan bu sistemde; verici (kaynak) ve alıcı (yük) taraflarda ikişer bobin bulunur. Deneysel olarak uygulanan bu teknikle (Şekil 1.3), enerji transfer verimliliği 60 cm ve 100 cm mesafelerde sırasıyla %46,2 ve %29,3 iken, maksimum verim 15 cm hava

aralığında hesaplanmış ve %92,5 olarak elde edilmiştir; ancak ne kadar güç aktarıldığı ile ilgili bilgi verilmemiştir [11].

Ning ve diğerleri, manyetik rezonans eşleşme yöntemiyle 49 kHz frekansta, 270 Voltluk batarya için tasarlanan ve geliştirilen prototip sistemde yaklaşık 3 kW gücü %90 verimle aktarabilmişlerdir [12].

Lee ve diğerleri, manyetik rezonans eşleşme yöntemi ile kablosuz enerji transferinde iki bobin arası mesafenin artmasıyla ve hizalanma problemiyle verimin düşmesine çözüm olarak çoklu verici bobin yapısını önermişlerdir. Yapılan analitik ve simülasyon çalışmalarıyla da çoklu bobin yapısı, farklı mesafe ve açı varyasyonlarında tek vericili sisteme göre daha yüksek verim göstermiştir [13].

Chen ve diğerleri, iletim verimliliğini ve mesafeyi etkin bir şekilde iyileştirebilen bir seri-paralel karışık rezonanslı kuplaj topolojisi sunmuş, seri-seri ve paralel-paralel topoloji ile de kıyaslayarak analizleri yapılmış; deneysel olarak 10 cm çapında bobin çifti ile 10 cm hava aralığında %85, 20 cm hava aralığında %50 verimle enerji transfer edebilmişlerdir [14].

Gao ve diğerleri, kablosuz güç aktarımında bobin parametrelerinin iletim verimliliği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Teorik ve analitik analizler sonucunda, bobinin kendi çevresindeki tur sayısının verim üzerine etkisinin olmadığını bildirmişlerdir [15].

Nguyen ve diğerleri, 20 cm hava aralığında ve 30 cm yanlış hizalama toleransına sahip 8 kW kablosuz şarj cihazı prototipi tasarlamış ve test etmiştir. Sistem %95,66 verime sahip olup, 30 cm yanlış hizalanma durumunda ise %95,39 verimle çalışmıştır [16].

Jadidian ve Katabi, çoklu giriş çoklu çıkışlı (MIMO) hüzme oluşturma (beamforming) fikrinden yararlanarak MagMIMO (Şekil 1.4) adını verdikleri bir sistem tasarlamışlardır, böylece bir cep telefonunun uzaktan şarj edilebildiğini ve telefon kullanıcının cebinde olmasına rağmen konumundan bağımsız olarak çalışabildiğini göstermişlerdir. Kablosuz iletişim sistemindeki hüzme şekillendirmeden farklı olarak bu sistemde, cep telefonuna ve taşınabilir cihazlara yönlendirilebilen, yayılmayan bir manyetik alan geliştirilmiştir. Önerilen MIMO sistemi, 1 MHz'lik tek bir frekansta çalışır ve giriş gücü 20 W olup; ölçülen güç aktarım verimliliği Tablo 1.1'de gösterilmiştir [17].



**Şekil 1.4** MagMIMO [17]

**Tablo 1.1** MagMIMO sisteminin mesafe-verimlilik sonuçları

Mesafe	0,5 cm	2 cm	5 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm
Verimlilik	%89	%87	%74	%53	%34	%19	%11

Li ve Mi, elektrikli araçlar için statik ve dinamik şarj uygulamalarına yer verdiği bu çalışmada, manyetik rezonans eşleşme yöntemi ile kablosuz güç aktarımının teorik altyapısını detaylandırıp, çalışmalarını sistemin güvenilirliği, elektrikli aracın şebekeye katkısı, kablosuz haberleşme standartları ve maliyetleri gibi konular açısından tartışmışlardır [18].



**Şekil 1.5** Wang ve diğerlerinin prototip KGA çalışması [19]

Wang ve diğerleri, bir elektrikli araca 3 kW kablosuz güç aktarmayı hedefledikleri bir prototip geliştirmişlerdir. İlk olarak devre kompanzasyon topolojilerinden LCL-LCL

topolojisi ile LC-LC seri topolojisi kıyaslanmış ve daha verimli olan LC-LC seri topolojisi tasarım için seçilmiştir. Ardından yeni bir güç düzenleme yöntemi önerilmiştir ve nihayetinde deneysel (Şekil 1.3) olarak 20 cm hava aralığında %95 verimle güç aktarımı doğrulanmıştır [19].

Fincan ve Üstün, bobinin öz endüktansını, çekirdekli bobinin sargı içi kapasitans değerini ve de birincil ve ikincil bobin arasındaki karşılıklı endüktans değerini belirleme yöntemlerini detaylandırmış. Ayrıca tasarlamış oldukları bobindeki parametreler; bu analitik yöntemlerle ve sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplanmış, ölçüm sonucunda çıkan değerle de kıyaslanmıştır. Bu çalışmada analitik hesaplama yöntemlerinin, sonlu elemanlar analizi kullanan ANSYS Maxwell programından daha hızlı ve güvenilir olabileceği gösterilmiştir [20].

Ağçal ve diğerleri, ANSYS Maxwell ortamında, manyetik rezonans eşleşme yöntemi ile farklı karakteristik empedans değerleri için, farklı hava aralıklarında verimlilik analizi gerçekleştirmişlerdir [21].

Pashaei ve diğerleri, manyetik rezonans eşleşme yöntemiyle kablosuz güç aktarımının temel bileşenlerini, çalışmaları ve çevresel etkileri; kompanzasyon yapısı, sargı yapısı, güç dönüştürücüler, sistem tasarımı, insan sağlığına etkiler, yabancı nesne algılama, hizalama durumları, ticari uygulamalar ve üniversitelerde yapılan çalışmalar başlıkları altında ele alarak, bir literatür incelemesi ortaya koymuşlardır [22].

Mittleider ve diğerleri, İHA'ya monte edilmiş verici bobinle, uzak konumlardaki erişilmesi zor sensörleri şarj etmek için yeni bir yöntem sundu. Rezonanslı bir kablosuz güç aktarımı sisteminden yayılan manyetik alanı ölçen yerleştirme stratejisiyle, İHA'nın daha yüksek hassasiyetle konumlanmasına izin verilir ve ortalama 15 cm'lik mesafeye konumlanabilen İHA, yaklaşık 4.2 W güç ile sensör pillerini şarj edebilmektedir [23].

Chen ve diğerleri, elektrikli araçları kablosuz şarj edebilmek için uygun maliyetli bobin tasarlamışlardır. Öncelikle dairesel, dikdörtgen ve altıgen bobinlerin hammadde maliyetine, çıktı gücüne, transfer verimliliğine, yatay kayma hizalama toleransına ve akı yoğunluğuna bağlı etkinlik karşılaştırılması yapılmış, daha sonra optimal maliyet etkinliği önerisine dayanarak, yeni bir kombine tip bobin önerilmiştir. Geleneksel tip

bobinler ile karşılaştırılan kombine tip bobinin, hem simülasyon hem de deneysel sonuçlarla daha uygun maliyetli olduğu gösterilmiştir [24].

Li ve diğerleri, kablosuz güç aktarımı sisteminde güç kapasitesini, güvenilirliği ve kullanılabilirliği arttırmayı hedeflemiş; daha düşük maliyet kullanarak, ikili bir alıcı ve verici tabanlı KGA topolojisi önermişlerdir. Önerilen yapı ve ilgili yaklaşım üniversite laboratuvarında ölçeği küçültülmüş bir deney düzeneği ile doğrulanmış olup 70 mm hava aralığında 2,1 kW çıkış gücü, %93,62 sistem verimliliği ile elde edilmiştir [25].

Houran ve diğerleri, Kablosuz güç aktarımı sistemlerini, kompanzasyon topolojileri, yanlış hizalama etkileri olan bobin yapıları ve KGA ile ilgili standartlar gibi çeşitli yönlerden kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Ayrıca iki küresel yapıdan oluşan biyo-ilhamlı bir KGA sistemi tasarlanmış ve deneyler yapılmıştır [26].

Wang ve diğerleri, manyetik rezonans eşleşme yöntemine dayalı kendi kendini şarj edebilen otonom robotlar için kablosuz güç aktarımı sistemi tasarlamışlardır. Şekil 1.4'te görülen prototip deneyin sonucunda; 58 kHz'lik rezonans frekansında, 10 cm hava aralığında, 50 Watt güç, %50'nin üzerinde bir verimle aktarılmıştır [27].



**Şekil 1.6** Otonom robotlar için KGA sistemi [27]

Patil ve diğerleri, elektrikli araçlar için kablosuz şarj teknolojisinin mevcut durumunun ve uygulama konularının kapsamlı bir incelemesini sunmuşlardır. Öncelikle KGA'nın temel ilkelerine yer verilen bu çalışmada, daha sonra bobin yapıları, devre kompanzasyon topolojileri, güç elektroniği konfigürasyonları, yanlış hizalama toleransı, kontrol

teknikleri ve empedans eşleştirme devrelerinin tasarımı detaylandırılmıştır. Son olarak da elektrikli araçlar için dinamik şarj sisteminin uygulanmasındaki başlıca sınırlayıcı faktörler tartışılmıştır [28].

Ayisire ve diğerleri, elektrikli araçları kablosuz şarj edebilmek için manyetik rezonans eşleşme yönteminin enerji transfer verimliliğini simülasyon ile test etmişlerdir. Sistemin rezonans frekansında maksimum %96 verime ulaştığı, rezonans frekansı dışında bir frekansa ayarlandığı takdirde, enerji aktarım verimliliğinde ani bir düşüş olduğunu grafiklerle göstermişlerdir [29].

Machura ve Li, kompanzasyon topolojileri, bobin tasarımı ve iletişim gibi elektrikli araçlar için kablosuz şarj teknolojisinin temel teknik bileşenlerini özetleyip, şarj gücünü arttırmak için bobin tasarımlarında süper iletken malzeme kullanımına yönelik yenilikçi bir yaklaşımın araştırıldığı ve bunların kablosuz şarj üzerindeki potansiyel etkilerini tartışıldığı kapsamlı bir literatür incelemesi sunmuşlardır. Ayrıca kablosuz şarj teknolojisinde sağlık ve güvenlik durumları ve bunların ilgili standartlarına yer verilip, çeşitli kablosuz şarj sistemleri maliyet açısından da ele alınıp karşılaştırılmıştır [30].

Zhang ve diğerleri, KGA tekniklerine; çalışma mekanizmaları, teknik zorluklar ve metamateryaller üzerinden genel bir bakış sundukları bu çalışmada, ilgili mevcut araştırma konularını detaylandırıp, gelecekteki geliştirme eğilimleri hakkında tartışmışlardır [31].

Wang ve diğerleri, manyetik rezonans eşleşme devrelerinin dört genel topolojisini teorik olarak analiz edip, deneysel olarak da doğrulama açısından sunmuşlardır. Dört topolojiden, seri-paralel devre konfigürasyonu, hem yüksek güç aktarım verimliliği hem de yüksek yük elde etme açısından büyük bir yük empedansına sahip bir KGA sisteminin gerçekleştirilmesi için en verimli olduğu çıkarımında bulunmuşlardır [32].

Cheah ve diğerleri, mevcut KGA teknolojilerini incelemiş ve bunların mobil robotlardaki uygulamalarında karşılaşılan zorlukları tartışıp, KGA teknolojisinin mobil robotlarda kullanılabileceği senaryoları sunmuşlardır [33].

Bai ve diğerleri, kontrol edilebilir çok bobinli bir vericinin birden fazla tek bobinli alıcıya enerji aktardığı KGA sistemi üzerine çalışmışlardır. Bilinmeyen konumlara sahip çoklu alıcılara aktarılan gücün verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için makine öğrenmesi destekli bir strateji önermişler ve simülasyon sonuçlarını sunmuşlardır [34].

Manyetik rezonans kuplajlı kablosuz güç aktarımı sistemlerinde verimliliği arttırmak için alıcı ve verici bobinleri arasına yerleştirilen metamateriyaller; güç aktarım verimliliğini arttıracak kaybolan dalga amplitudunu ve negatif kırılma özellikleri gibi olağandışı elektromanyetik özellikler gösteren yapay olarak tasarlanmış malzemelerdir. Lee ve Yoon (2020), metamateriyalleri ve onun KGA teknolojilerine uygulanması konusundaki son gelişmeleri ele almışlardır [35].

Khan ve diğerleri, implante edilebilir tıbbi cihazlarda kablosuz gücü aktarabilmek için uygulanan çeşitli stratejileri inceledikleri bir literatür çalışması sunmuşlardır [36].

Lee ve diğerleri, otonom elektrikli araçlar için, 1,5 m ve 5 m uzunluklarında statik ve dinamik şarj hattı kurdukları bu çalışmada; statik şarj için %90,8'in, dinamik şarj içinse %85'in üzerinde maksimum güç verimliliği elde etmişlerdir [37].

Issı ve Kaplan, manyetik rezonans kuplajlı kablosuz güç aktarımı sisteminde, verimliliği yüksek tutmak amacıyla kullanılan seri kapasite kullanımını ele almışlardır. Geliştirdikleri algoritma sayesinde, alıcı ve verici bobin arasındaki mesafenin değişimine göre empedans eşleşmesinin yapılabileceği en yakın eşdeğer kapasitenin ayarlanması mümkün kılınmış ve kapasitelerin gerçek değerlerine göre tanımlanmasının gerekliliği çeşitli senaryolarla gösterilmiştir [38].

Aydın ve Aydemir, elektrikli araçların bataryalarını kablosuz şarj etmeye yönelik tasarladıkları 1kW'lık KGA sisteminde, deneysel olarak mükemmel hizalanmış altıgen bobinlerle 10 cm hava aralığında %85 verim elde etmişlerdir. Ayrıca alıcı bobinin yanlış konumlandırılmasıyla, hizalama performansı da gözlemlenmiştir [39].

Ağçal ve Doğan, manyetik rezonans kuplaj yöntemiyle 20 kHz çalışma frekansında seri-seri kompanzasyon topolojisine sahip bir KGA sistemi tasarlamışlardır. 1 kW'lık gücün bobinler arası 17 cm hava aralığında %89,4 verimle aktarabildiği simülasyon ortamında gösterilmiştir. Ayrıca bu sistemin insan sağlığına etkisi IEEE ve ICNIRP standartlarına göre ANSYS Maxwell 3D ve HFSS kullanılarak incelenmiştir [40].

Trivino ve diğerleri, elektrikli araçlar için kablosuz şarj sistemleri üzerine yaptığı literatür incelemesinde; indüksiyon, kapasitans, radyo frekansı ve lazer teknolojisi gibi farklı prensipler ile yapılan uygulamaları çeşitli parametreleri ele alarak kıyaslamışlar ve en uygun teknolojinin manyetik rezonans tekniği olduğu çıkarımında bulunmuşlardır [41].

Thiagarajan ve Deepa, elektrikli araçlar için kablosuz güç aktarımında kullanılan yüksek frekanslı invertörleri tasarım ve performans analizleriyle ayrıntılı biçimde inceledikleri bir derleme makalesi sunmuşlardır. Bu makalede mevcut topolojiler için yüksek güç transferi, yanlış hizalama durumları, bobin yapıları ve invertörlerin tasarımı odak noktası olmuştur [42].

Hui ve diğerleri, son yıllarda kablosuz güç aktarımı teknolojisini geliştirmek için ortaya atılan yeni fiziksel etkilerin ve malzemelerin etkisini inceledikleri bu çalışmada, metamateriyallerin ve meta yüzeylerin kullanımının yanı sıra akustik güç aktarımının kullanımını da ele alıp nihayetinde KGA teknolojisinin daha da gelişmesi adına potansiyel yolları vurgulamışlardır [43].

Bir diğer çalışmada, manyetik rezonans kuplaj yöntemiyle mobil robotlara birkaç metre mesafede kablosuz güç aktarabilmesi üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada robotun hareket etmesiyle değişen giriş empedansını eşleştirmek için verici tarafta bir sürücü bobin kullanılmasını önermişlerdir. Deneysel olarak da önerilen sistemin doğruluğunu göstermişlerdir[44].

Literatürde kablosuz enerji transferi üzerine son zamanlarda yayımlanmış birçok derleme çalışması da bulunmaktadır [45], [46], [47], [48], [49], [50].

## **1.2 Tezin Amacı**

Son yıllarda elektrikli araç ve mobil teknolojilerin yaygınlaşması ve kullanımının giderek daha fazla kabul görmesiyle, bu cihazların enerji depolama sistemi ve pil ömrünün uzatılması üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Geleneksel olarak teller veya kablolar kullanarak enerji bir noktadan diğerine iletilmektedir, bu durum enerjinin aktarılacağı alanda kabloların döşenmesini gerektirebilir ve bazı durumlarda bu mümkün ve pratik olmayabilir. Kablosuz enerji transferi, bu tür kısıtlamalardan kaçınmayı hedefleyerek enerji iletiminin esnekliğini ve kolaylığını artırmayı amaçlar. Bu amaç doğrultusunda, bu tezde manyetik rezonans kuplaj yöntemi kullanılarak elektrikli araçlar için orta mesafede, yüksek verimle statik (durağan) kablosuz güç aktarımını gerçekleştirebilecek sistemin tasarlanması hedeflenmiştir. Bununla birlikte tasarlanan sistemin gerçekleştirilerek elektrikli araçlar ve cihazların verimli bir şekilde kablosuz şarj edilebilmesi için bir prototip olması amaçlanmaktadır.

### **1.3 Hipotez**

Bu çalışmada tasarlanan sistem orta mesafede şarj edilmesi mümkün olan elektrikli bisiklet, elektrikli mobilet, elektrikli skuter gibi araçların verimli şekilde kablosuz şarj edilebilmesi için kullanılabilir ve bobin boyutundaki değişikliklerle tüketicilerle elektronik, biyomedikal implantlar ile mobil elektronik cihazlarla da entegrasyonu sağlanabilir.

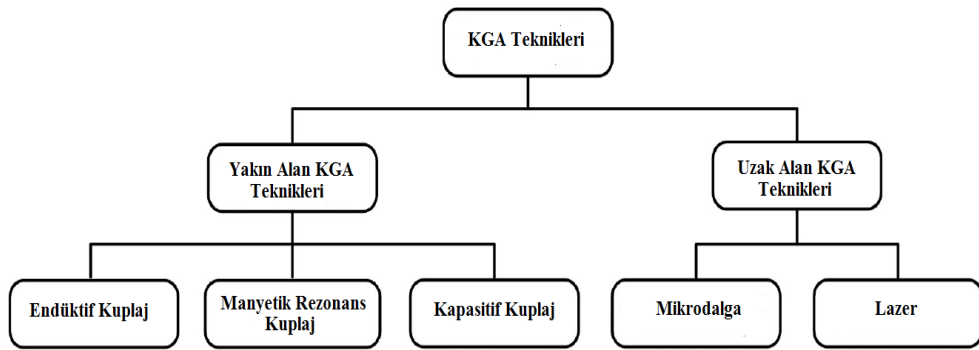


Bu bölümde kablosuz güç aktarım tekniklerinden bahsedilip daha sonra bu tez çalışmasında kullanılan manyetik rezonans kuplaj yönteminin temelleri detaylandırılacaktır.

## 2.1 Kablosuz Güç Aktarımı Teknikleri

Kablosuz güç aktarımı teknolojilerinin sınıflandırılması; aktarım gücü seviyesi, aktarım mesafesi, verimlilik ve uygulama alanları açısından daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır.

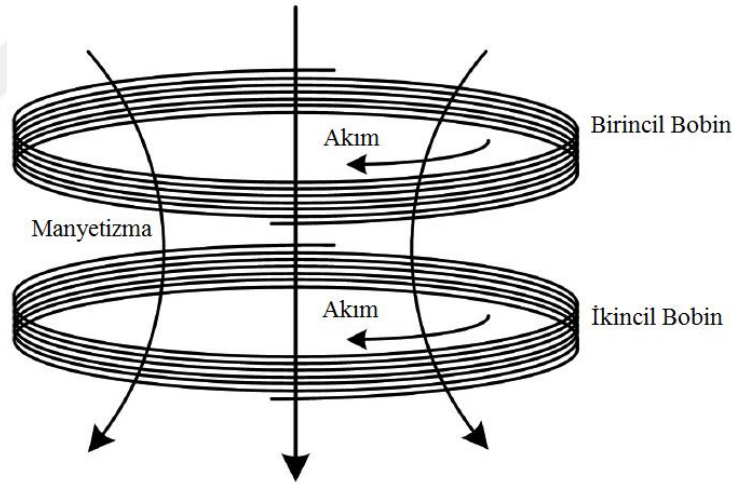
Kablosuz güç aktarım teknikleri genel olarak yakın alan güç aktarımı (ışınımsız) ve uzak alan güç aktarımı (ışınımlı) olarak sınıflandırılmaktadır. Uzak alan güç aktarımı, bir güç kaynağının yüksek frekanslı uyarımına dayanır ve ışınım gücü bir antenden vakum veya hava gibi bir ortam aracılığıyla, antenin boyutundan birçok kat daha büyük, uzun mesafelerde yayılır; ancak düşük verimin yanı sıra, sistem karmaşıklığı ve ışımadan kaynaklanan güvenlik sorunları mevcuttur. Diğer taraftan; ışınımsız alanlar kullanarak güç aktarımının yapıldığı endüktif kuplaj, kapasitif kuplaj ve manyetik rezonans kuplaj yöntemleri enerjiyi bir dalga boyundan daha az bir mesafe boyunca aktarabilen yakın alan güç aktarım teknikleridir [51], [52], [53].



Şekil 2.1 KGA teknikleri [52], [53]

### 2.1.1 Endüktif Kuplaj Yöntemi

Endüktif kuplaj güç aktarımı, elektrik transformatörleri gibi karşılıklı indüksiyon temeline dayanmaktadır. Karşılıklı iki bobinden oluşan sistemde akım, birinci bobinden geçtiğinde üretilen manyetik akı ikinci bobine hareket edip iletken tarafından kesilmekte ve elektrik akımı indüklenmektedir, böylece akım AC olarak yüke akmaktadır [54]. Böylece birincil bobindeki elektrik enerjisi manyetik alan aracılığıyla ikincil bobine aktarılır ve ikincil bobinde oluşturulan akım, alıcı cihazın enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılır. Şekil 2.2’de endüktif kuplaj yöntemi ile kablosuz şarj transferinin referans modeli gösterimi verilmiştir. Elektromanyetik indüksiyon teknolojisi büyük bir aktarım gücüne sahip olmasına rağmen, bobinler arasındaki mesafenin artması ile manyetik alan enerjisi ve bağlantı katsayısı hızla azalmaktadır, bu da iletimin milimetreler veya birkaç santimetre düzeyiyle sınırlı kalmasına neden olmaktadır [55]. Teknolojik gelişmelerle birlikte, endüktif kuplajın verimliliği ve mesafe kısıtlamaları gibi konularda iyileştirmeler yapılmaktadır. Elektrikli diş fırçalarında yaygın olarak bu teknik kullanılmaktadır [56].



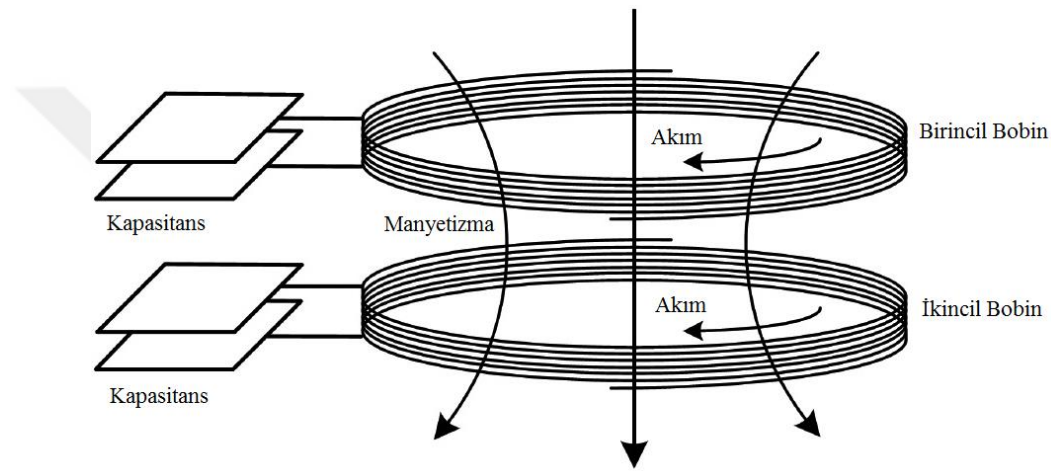
Şekil 2.2 Endüktif kuplaj yöntemi [52]

### 2.1.2 Kapasitif Kuplaj Yöntemi

Kapasitif kuplaj KGA teknolojisi, enerjiyi aktarmak için değişen elektrik alanını kullanır. Elektrik akısı genellikle iletken plakalar arasında hareket ederken, manyetik akı bobinlerden tüm yönlerde doğru yayılır ve kapalı bir akı döngüsü oluşturur. Bu nedenle, kapasitif kuplaj teknolojisi, geleneksel elektromanyetik alan temelli teknolojilere kıyasla daha düşük elektromanyetik uyumluluk (EMI) sağlar. Bunun yanı sıra, kapasitif WPT

teknolojisinin bir avantajı da metal engeller üzerinden enerji transferini gerçekleştirebilmesidir. Metal engelin üst ve alt yüzeyleri, bir elektrik alanında iletken plakalar gibi davranabilir. Bu etki, orijinal elektrik alanını bölmeyi aksine güç transferini etkilemez; ancak küçük eşleşme kapasitansından dolayı pratik zorluklarla karşılaşılabilir. Ayrıca, mevcut hava boşluğu veya eşleşme plakalarının yer değiştirmesi kapasitansı önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu durum, en az 150-200 mm hava boşluğu ve büyük yer değiştirme toleransının gerektiği kablosuz EV şarj uygulamalarında pratik olmayabilir [52] , [57].

### 2.1.3 Manyetik Rezonans Kuplaj Yöntemi



Şekil 2.3 Manyetik rezonans kuplaj yöntemi [52]

Kablosuz güç aktarımında kullanılan bir diğer teknik olan manyetik rezonans kuplaj yöntemi (MRKY), manyetik alanın rezonans prensiplerine dayanır ve enerjinin manyetik alan aracılığıyla aktarılmasını sağlamaktadır. Manyetik rezonans kuplajı, birincil (verici) ve ikincil (alıcı) rezonatörlerden oluşur. Birincil rezonatör, enerji kaynağından gelen elektrik sinyalini alır ve bir manyetik alan oluşturur. İkincil rezonatörse bu manyetik alanın rezonans frekansında çalışan bir bobindir. Endüktif kuplaj yönteminde birincil bobinden ikincil bobine aktarılan güç endüktif güç ile aktif güç arasında bölüşülmekte ve bu durum verimsizliğe yol açmaktayken; bu yöntemde kullanılan kapasitörler sayesinde üretilen kapasitif reaktif güçle, bobin tarafından çekilen endüktif reaktif güç kompanse edilmiş yani dengelenmiş olmaktadır. Manyetik rezonansın gerçekleşmesi için, birincil ve ikincil rezonatörlerin rezonans frekansları birbirleriyle eşleşmelidir. Böylece manyetik alanın güçlü bir şekilde transfer edilmesini sağlanır. İki rezonatör, manyetik alanın

rezonans frekansında titreşir ve enerji aktarımı gerçekleşir. Bu durum daha uzun mesafelerde yüksek verimler elde etmeye olanak sağlar.

Manyetik rezonans kuplaj yönteminin avantajları arasında enerji transferi mesafesindeki esneklik, yüksek verimlilik, daha büyük güç iletimi kapasitesi ve çeşitli cihazları aynı anda şarj etme kabiliyeti bulunur. Ayrıca, araya giren masa, duvar gibi engeller manyetik alan tarafından aşılabildiğinden, enerji transferi için aktarım hattında doğrudan görünürlük gerekmez. Bunun yanı sıra; bu yöntem ışınımsal tekniklerle kıyaslandığında gücün daha verimli aktarılmasını mümkün kılar. Doğasında ışıma olmadığından ve uluslararası standartlara uygun bir şekilde tasarlandığında çevresi için güvenlik tehdidi oluşturmaz [55], [56], [58]. Ancak, manyetik rezonans kuplaj da bazı zorluklarla karşılaşabilir. Örneğin, rezonans frekansının doğru bir şekilde ayarlanması ve enerji transferinin etkin bir şekilde kontrol edilmesi önemlidir. Ayrıca, manyetik rezonans sistemleri karmaşık olabilir ve kurulum maliyetleri yüksek olabilir.

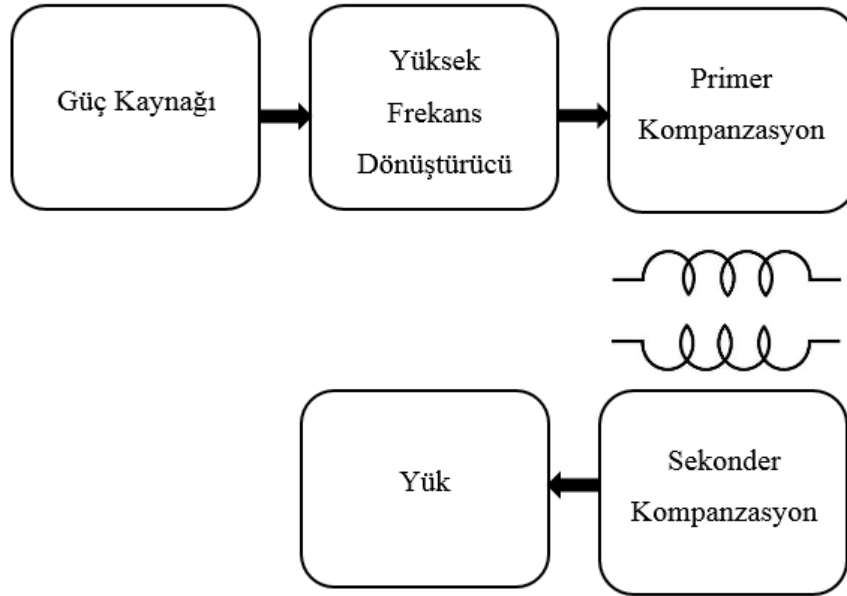
İlk gösteriminden bu yana tıbbi implantasyon makineleri, robotlar, sensörler, tüketici elektroniği, elektrikli araçlar gibi geniş uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılan bir teknik haline gelmiştir [36], [56], [59], [60], [61], [62], [63]. Bu çalışmamızda, orta menzilde yüksek verimle güç aktarılabilmesi ve geniş uygulama alanları olması gibi avantajlarından dolayı manyetik rezonans tekniği tercih edilmiştir. Şekil 2.3'te manyetik rezonans kuplaj yöntemi ile kablosuz şarj transferinin referans modeli gösterilmiştir.

**Tablo 2.1** Yakın alan KGA tekniklerinin karşılaştırması [69]

<b>KGA Teknikleri</b>	<b>Verimlilik</b>	<b>Frekans Aralığı (kHz)</b>	<b>Maliyet</b>	<b>Güç Seviyesi</b>	<b>Elektrikli Araçlara Uygunluk</b>
Endüktif	Orta/Yüksek	10-50	Orta/Yüksek	Orta/Yüksek	Yüksek
Kapasitif	Düşük/Orta	100-600	Düşük	Düşük	Düşük/Orta
Manyetik Rezonans Kuplaj	Orta/Yüksek	10-150	Orta/Yüksek	Orta/Düşük	Yüksek

## 2.2 MRKY ile Kablosuz Güç Aktarımının Çalışma Prensibi

Çoğu uygulamada KGA sistemi bir AC voltaj kaynağı tarafından beslenmektedir ve ardından yüke DC voltaj sağlamaktadır. Şekil 2.4'te KGA sisteminin blok diyagramında gösterildiği gibi, sistem birincil (kaynak) taraf ve ikincil (yük) taraf olarak adlandırılan elektriksel olarak izole edilmiş iki kısımdan oluşmaktadır. AC voltaj kaynağı ile beslenen sistemlerde birincil tarafta AC-DC doğrultucu, DC-AC dönüştürücü ve kompanzasyon ünitesi olmak üzere başlıca üç parça bulunmaktadır. Doğrultucu, güç faktörünü düzeltebileceği gibi DC çıkış gerilimini modüle ederek yardımcı kontrol de sağlayabilir. Yüksek frekans dönüştürücü, birincil bobine enerji vermek için yüksek frekansta alternatif akım üretir ve yüke göre anahtarlama durumu çevrimiçi olarak ayarlanmalıdır. Primer kompanzasyon ünitesi ise sekonder kompanzasyon ünitesinde olduğu gibi, güç aktarımında daha yüksek verim elde edebilmek amacıyla endüktans ve kapasitansı nötralize etmek için kullanılan devredir [64].

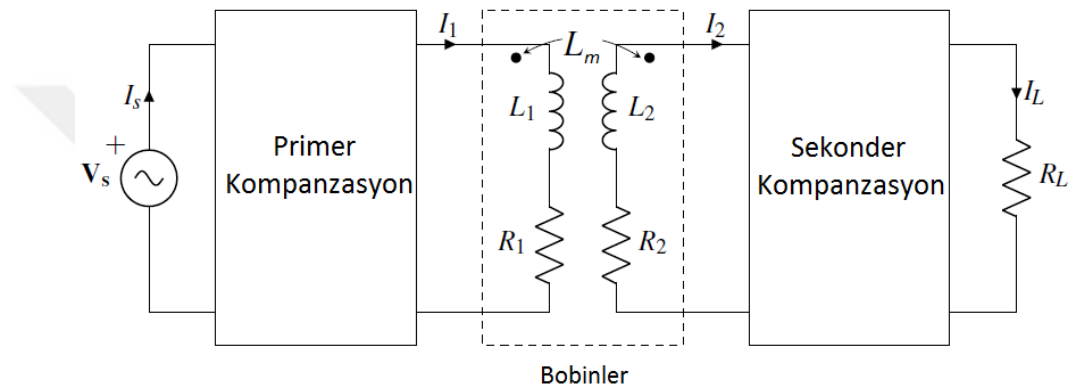


Şekil 2.4 KGA sisteminin blok diyagramı

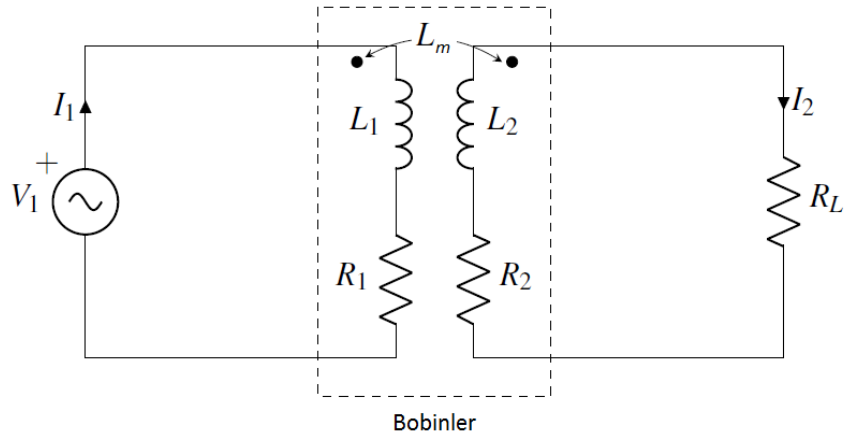
## 2.3 Kompanzasyon Topolojileri

Kablosuz güç aktarımında iki bobin arasındaki hava aralığının artmasıyla güç aktarım verimliliğinde ve aktarım oranında kayıplar olmaktadır. Rezonans frekansında, endüktif yükte kapasitif yük empedanslarının birbirlerini nötrlemesiyle sadece telin direncinin kalması durumunda (omik), akımın genliği maksimum olmaktadır. Bobinlerin boyutları

nedeniyle parazitik kapasitans, çalışma frekans aralığında rezonansı sağlamak için yeterli değildir. Ayrıca belirli uygulamaların getirdiği standartlarla ( $Q_i$  standartları ve SAE standartları vb.) sistemin çalışma frekansları sınırlanmaktadır [65]. Sistemin rezonans frekansında çalışmasını sağlamak ve de enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmak amacıyla, manyetik rezonans teknolojisinde sisteme kompanzasyon yapıları olarak bilinen ek reaktif yapılar dahil edilmektedir (Şekil 2.5) [66]. Kompanzasyon devresindeki bileşenlerin üzerinden geçen gerilim kare dalga formundayken, endüktansın oluşturduğu manyetik alan ile kapasitenin oluşturduğu elektriksel alanın dolup boşalması ile akım, sinüs eğrisi karakteristiği gösteren (sinüzoidal) formda olmaktadır.



Şekil 2.5 Manyetik rezonans kuplaj yönteminin eşdeğer devresi [66]



Şekil 2.6 Endüktif kuplaj yönteminin eşdeğer devresi [66]

Şekil 2.6'da verilen endüktif kuplaj yönteminin eşdeğer devresinde, devre analizi yapılmış ve elde edilen verim denklemi kompanzasyon yapısının öneminin daha iyi anlaşılması için aşağıdaki denklemlerle açıklanmaktadır.

$$V_1 = [R_1 + j\omega L_1]I_1 - j\omega L_m \cdot I_2 \quad (2.1)$$

$$0 = [R_2 + j\omega L_2 + R_L]I_1 - j\omega L_m \cdot I_2 \quad (2.2)$$

Denklem (2.2)'den  $I_1$  ve  $I_2$  çekilerek düzenlenirse denklem (2.3) elde edilir.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2 + j\omega L_2 + R_L}{j\omega L_m} \quad (2.3)$$

Denklem (2.4)'te verilen sistem verimliliği ( $\eta$ ), yüke verilen gücün kaynak tarafından üretilen güce oranıdır.

$$\eta = \frac{R_L I_2^2}{R_L I_2^2 + R_2 I_2^2 + R_1 I_1^2} = \frac{R_L}{R_2 + R_L + R_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2} \quad (2.4)$$

Denklem (2.3), denklem (2.4)'te yerine yazılarak düzenlenirse denklem (2.5) elde edilir.

$$\eta = \frac{R_L}{R_2 + R_L + R_1 \left( \frac{(R_2 + R_L)^2 + (\omega L_2)^2}{\omega^2 L_m^2} \right)} \quad (2.5)$$

Verimlilik denkleminde görüldüğü gibi, kompanzasyon devreleri kullanılmadığında, sistemin verimine ikinci bobinin öz endüktansı da etki etmektedir. Bu değer her zaman pozitif olduğundan verimliliği düşüren bir faktör olarak etkiler. Dolayısıyla doğru tasarlanmış sekonder kompanzasyon yapısıyla bu değer etkisi ortadan kaldırılarak sistem verimliliğini arttırmak mümkün hale gelmektedir. Primer kompanzasyon ise kaynak tarafından üretilen gücü dengelemek için dahil edilir.

Tablo 2.2'de kompanzasyon topolojilerinin temel gereksinimleri verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi kompanzasyon topolojileri kablosuz güç aktarımındaki verim, şarj modu, maksimum güç aktarımı, hizalama duyarlılığı gibi sistemden beklenen durumların çözüm yolu olabilmektedir [67].

Kablosuz şarj gibi belirli sistemler için şarj süreci iki modu içermektedir. Sabit Voltaj (CV), bu modda şarj voltajı sabit tutulurken şarj akımı değiştirilebilmektedir. Diğer mod, Sabit Akımda (CC) ise şarj akımı sabit tutulurken, değişken şarj voltajına izin verilir.

Etkin bir şarj sürecini sürdürebilmek için bu modlarda güç aktarımının yüksek verimliliği sağlanmalıdır. Tasarımda bu durum göz önünde bulundurulmalıdır [67], [68] .

**Tablo 2.2** Kompanzasyon topolojileri için gereksinimler [67]

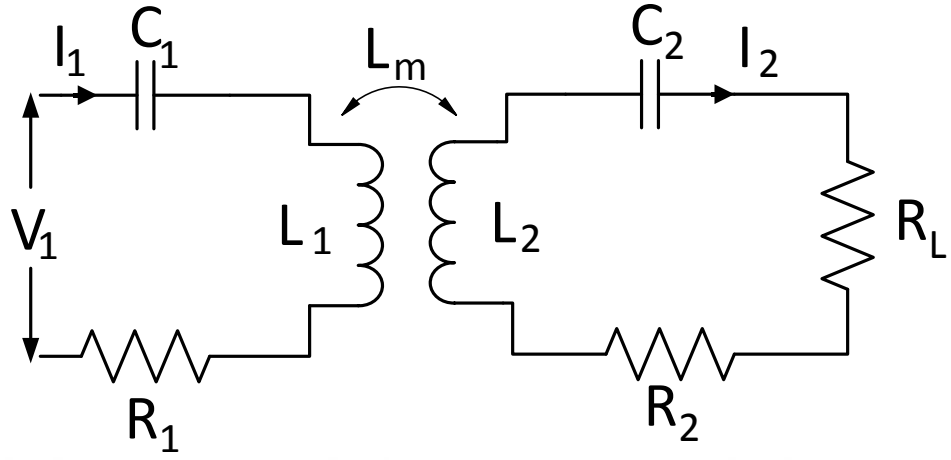
Gereksinimler	Bağlı Olduğu Durumlar
Volt-Amper oranını minimum düzeye indirmek ve güç aktarımını maksimum düzeye çıkarmak	Kaçak endüktansı azaltma, kompanzasyon topolojisi
Şarj modu (SV: Sabit Voltaj ve Değişken Akım Modu, SA: Sabit Akım ve Değişken Gerilim Modu)	Uygulama, kompanzasyon topolojisi
Yüksek verimlilik	Kuplaj katsayısı, kalite faktörü, yumuşak anahtarlama
Bifurkasyona (ayrışma) dayanıklılık	Yük kalite faktörü, kompanzasyon topolojisi ve kapasitör
Hızalama duyarlılığı	Kompanzasyon topolojisi

Rezonans devrelerinde kapasitörün yük ve kaynak tarafında bobine seri veya paralel bağlanma şekillerine göre 4 temel kompanzasyon topolojisi geliştirilmiştir. Ayrıca bu temel yapıların farklı kombinasyonları ile hibrit topolojiler de oluşturulmuştur. Bu bölümde temel kompanzasyon topolojileri verilir, daha sonra sistemimizde kullanılan seri-seri rezonans topolojisi detaylandırılacaktır.

### 2.3.1 Seri-Seri Rezonans Devresi

Şekil 2.7’de gösterilen seri-seri (SS) rezonans devresinde, hem kaynak taraftaki kompanzasyon kapasitansı ( $C_1$ ) ile sargı endüktansı ( $L_1$ ) hem de yük tarafındaki kompanzasyon kapasitansı ( $C_2$ ) ile sargı endüktansı ( $L_2$ ) birbirlerine seri olarak

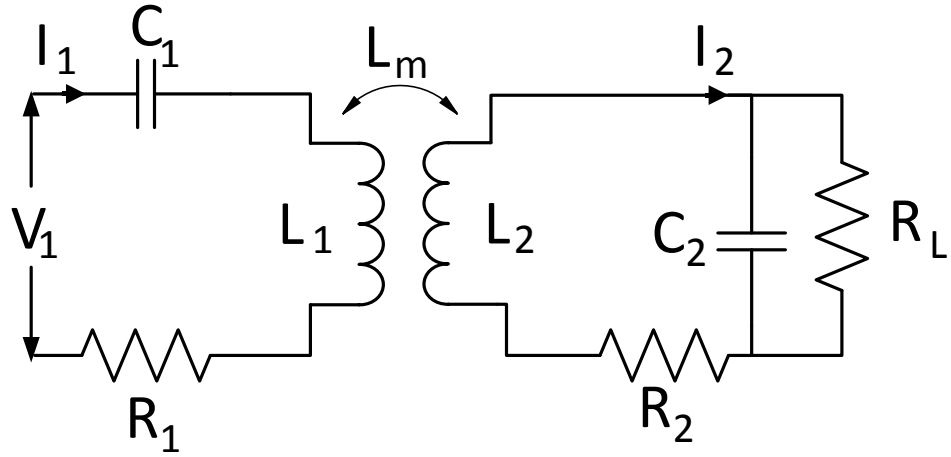
yerleştirilir. İki bobin arasındaki ortak endüktans ( $L_m$ ), kaynak bobininin iç direnci ( $R_1$ ), yük bobinin iç direnci ( $R_2$ ), yük direnci ise ( $R_L$ ) olarak ifade edilmiştir.



Şekil 2.7 SS rezonans devresi

### 2.3.2 Seri-Paralel Rezonans Devresi

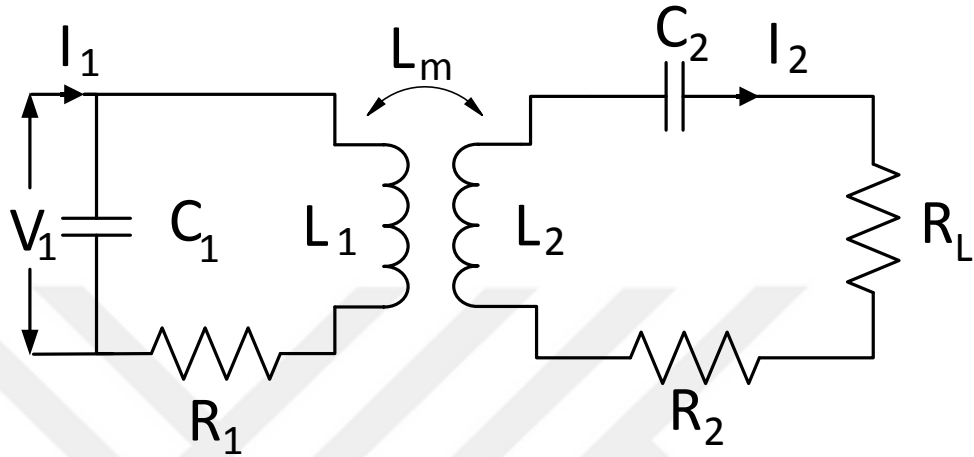
Şekil 2.8’de verilmiş olan seri-paralel rezonans (SP) devresinde, kaynak taraftaki kompanzasyon kapasitansı ( $C_1$ ) ile sargı endüktansı ( $L_1$ ) birbirlerine seri iken yük tarafındaki kompanzasyon kapasitansı ( $C_2$ ) ile sargı endüktansı ( $L_2$ ) birbirlerine paralel olarak yerleştirilir.



Şekil 2.8 SP rezonans devresi

### 2.3.3 Paralel-Seri Rezonans Devresi

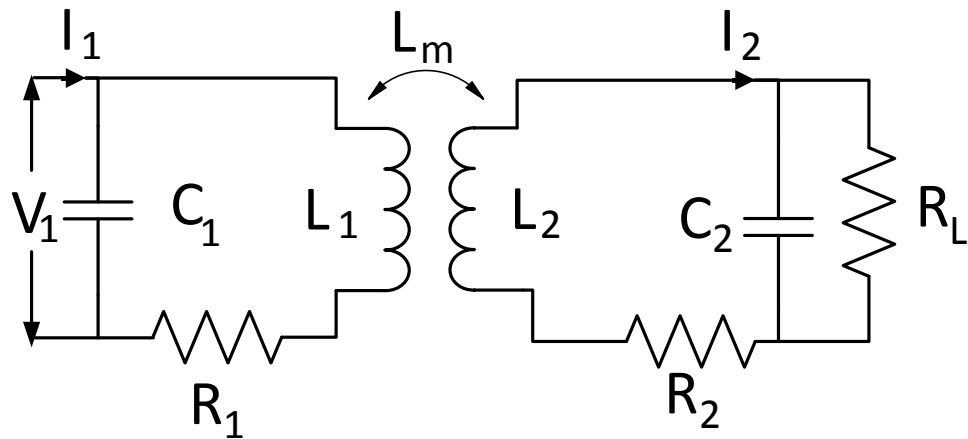
Şekil 2.9’da verilmiş olan paralel-seri rezonans (PS) devresinde, kaynak taraftaki kompanzasyon kapasitansı ( $C_1$ ) ile sargı endüktansı ( $L_1$ ) birbirlerine paralel iken yük tarafındaki kompanzasyon kapasitansı ( $C_2$ ) ile sargı endüktansı ( $L_2$ ) birbirlerine seri olarak yerleştirilir.



Şekil 2.9 PS rezonans devresi

### 2.3.4 Paralel-Paralel Rezonans Devresi

Şekil 2.10’da verilmiş olan paralel-paralel (PP) rezonans devresinde görüldüğü üzere; hem kaynak tarafta hem de yük tarafında kompanzasyon kapasitansı ile sargı endüktansı birbirlerine paralel olarak yerleştirilmektedir.



Şekil 2.10 PP rezonans devresi

**Tablo 2.3** Kompanzasyon topolojilerinin karşılaştırılması [69]

Özellikler	Seri-Seri	Seri-Paralel	Paralel-Seri	Paralel-Paralel
Hizalama Duyarlılığı	Düşük	Düşük	Orta	Yüksek
Şarj Modu (CC, CV)	CC ve CV	CC ve CV	Sadece CV	Sadece CC
Güç Aktarım Kapiliyeti	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük
Rezonans Halindeki Empedans	Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek
Mesafeye Bağlı Güç Faktörü Duyarlılığı	Düşük	Düşük	Orta	Orta
Elektrikli Araçlar için Uygunluk	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta
Verimlilikte Frekans Duyarlılığı	Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek

**Tablo 2.4** Kompanzasyon topolojileri kapasitans ifadeleri [66], [69]

Özellikler	Seri-Seri	Seri-Paralel	Paralel-Seri	Paralel-Paralel
Giriş Kapasitansı ( $C_1$ )	$\frac{1}{\omega^2 L_1}$	$\frac{1}{\omega^2 \left( L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right)}$	$\frac{1}{\omega^2 \left( L_1 + \frac{\omega^2 M^4}{L_2 R} \right)}$	$\frac{1}{\omega^2 \left( L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right) + \frac{\frac{M^4}{i^4} R^2}{\omega^2 \left( L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right)}}$
Çıkış Kapasitansı ( $C_2$ )	$\frac{1}{\omega^2 L_2}$	$\frac{1}{\omega^2 L_2}$	$\frac{1}{\omega^2 L_2}$	$\frac{1}{\omega^2 L_2}$

**Tablo 2.5** Kompanzasyon topolojileri toplam empedans ve yük ifadeleri [67], [70]

Kompanzasyon Türü	Toplam Empedans ( $Z_T$ )	Yük ( $R_L$ )
Seri-Seri	$Z_T = \left( R_1 + j(L_1\omega - \frac{1}{C_1\omega}) \right) + \frac{\omega^2 M^2}{\left( R_2 + R_L + j(L_2\omega - \frac{1}{C_2\omega}) \right)}$	$\frac{\omega L_2}{Q_2}$
Seri-Paralel	$Z_T = \left( R_1 + j(L_1\omega - \frac{1}{C_1\omega}) \right) + \frac{\omega^2 M^2}{\left( R_2 + jL_2\omega + \frac{R_L}{1 + jR_L C_2\omega} \right)}$	$\omega L_2 Q_2$
Paralel-Seri	$Z_T = \frac{1}{(R_1 + jL_1\omega) + \frac{\omega^2 M^2}{\left( R_2 + R_L + j(L_2\omega - \frac{1}{C_2\omega}) \right)} + jC_1\omega}$	$\frac{\omega L_2}{Q_2}$
Paralel-Paralel	$Z_T = \frac{1}{(R_1 + jL_1\omega) + \frac{1}{\frac{\omega^2 M^2 (1 + jR_L C_2\omega)}{(R_2 + (R_2 + jL_2\omega)(1 + jR_L C_2\omega))} + jC_1\omega}}$	$\omega L_2 Q_2$

## 2.4 Seri-Seri Rezonans Devresi ile KGA

Literatürde seri-seri rezonans devre topolojisi, geniş yük aralığına sahip KGA sistemleri için önerilmiştir ve birincil taraf bir gerilim kaynağı invertörü olarak çalışırken ikincil taraf da akım kaynağı davranışına sahiptir, bu da onu batarya ve süper kapasitör şarjı için ideal bir aday yapmaktadır [71]. Diğer topolojilere göre tasarımının daha kolay olması ve güç aktarım verimliliğinin yüksek olması gibi durumlar; pratik uygulamalarda daha çok SS topolojinin tercih edilme sebeplerindedir [67]. Bu topolojide kaynak taraftaki kondansatörün seçilmesinde etkili parametreler, rezonans frekansı ve kaynak bobininin öz endüktans değeridir. Öte yandan Tablo 2.4'te görüleceği üzere diğer topolojilerde bu parametrelerin yanı sıra, birincil kapasitörün değerine; ortak endüktans, ikincil bobinin öz endüktansı gibi parametrelerin etki etmesi SS topolojisini tasarım kolaylığı hususunda öne çıkarmaktadır.

SS kompanzasyon devresinin analiz edilmesiyle denklem (2.6) ve (2.7) elde edilir;

$$V_1 = \left[ R_1 + j \left( j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) \right] I_1 - j\omega L_m \cdot I_2 \quad (2.6)$$

$$0 = \left[ R_2 + R_L + \left( j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right) \right] I_2 - j\omega L_m \cdot I_1 \quad (2.7)$$

Yukarıdaki 2 denklemden giriş empedansı  $Z_1$  elde edilir;

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = R_1 + j \left( \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) + \frac{\omega^2 L_m^2}{(R_2 + R_0) + j \left( \omega L_2 - \frac{1}{j\omega C_2} \right)} \quad (2.8)$$

Tamamen omik bir giriş empedansına sahip olmak için reaktif terimin sıfır olması gerekmektedir. Bu koşul aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} = \frac{\omega^2 L_m^2 \left( \omega L_2 - \frac{1}{j\omega C_2} \right)}{(R_2 + R_L)^2 + j \left( \omega L_2 - \frac{1}{j\omega C_2} \right)^2} \quad (2.9)$$

Sistemin aynı çalışma frekansında, kaynak ve yük rezonans devrelerinin bobin ve kapasitör değerlerinin birbirinden bağımsız olduğu denklem (2.9)'da doğrulanmıştır. Böylece bir SS kompanzasyon devresi tasarlamak için, sistemin çalışma frekansına uygun bobinlerin tasarlanıp, daha sonra ilgili bobinleri rezonans frekansında ( $\omega_0$ ) çalışmasını sağlayacak kapasitörlerin tespit edileceği görülmektedir [66].

$$\omega_0 = 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (2.10)$$

Sistem verimliliği ( $\eta$ ), yüke iletilen aktif güç ile kaynak tarafından üretilen aktif güç arasındaki oran olarak tanımlanır. Bu parametre SS rezonans devrelerinde şu şekilde ifade edilebilir:

$$\eta = \frac{R_L I_2^2}{R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_L I_2^2} = \frac{R_L}{R_L + R_2 + \frac{R_1 I_1^2}{I_2^2}} \quad (2.11)$$

Böylece endüktif kuplaj yönteminin aksine bu yöntemde, yük bobininin öz endüktansı değerinin sistemin verimliliğine etki etmediği görülmektedir.

Denklem (2.7) referans alınarak verimlilik denkleminde  $I_1$  ve  $I_2$  değerlerinin oranı denklem (2.12)'de yerlerine koyularak; sistem verimliliği, denklem (2.13) şeklinde yazılabilir.

$$\left| \frac{I_1}{I_2} \right| = \frac{R_L + R_2}{L_m \omega_0} \quad (2.12)$$

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + R_2 + R_1 \left( \frac{R_L + R_2}{L_m \omega_0} \right)^2} \quad (2.13)$$

SS kompanzasyon devrelerinde, analizlerin sonucunda varılacak avantajlar şu şekilde sıralanabilir; sistemin sabit gerilim kaynağı olarak çalışmasını sağlaması, hatalı hizalamalara karşı düşük duyarlılık sağlaması, giriş empedansının imajiner kısmı karşılıklı endüktansa bağlı olmadığından dolayı çalışma frekansının rezonansa gireceği durumda ayarlanmasıyla karşılıklı endüktanstan bağımsız olmasıdır [66].

## 2.5 Kalite Faktörü ve Rezonans Frekansı

Rezonans, genel olarak enerjinin iki mod arasında salınımı olarak tanımlanabilir. Rezonans halindeki bir sistemde yalnızca zayıf bir uyartım varken bile, büyük miktarda depolanmış enerji birikimi olması mümkündür. İzole edilmiş bir rezonatörün davranışı iki temel parametre ile tanımlanabilir, rezonans frekansı ( $\omega_0$ ) ve içsel kayıp oranı ( $\Gamma$ ).

Bu iki parametrenin oranı kalite faktörü olarak tanımlanmaktadır ( $Q$ ). Bobinlerin kalite faktörünün yüksek olması verimin artmasını sağlayan bir etkidir. Bunun yanı sıra, yüksek kalite faktörünün, rezonans devresinde kondansatörün uçlarındaki gerilimi arttırması dezavantajlı durumdur [72], [73].

Önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi, kompanzasyon devrelerinde enerji, indüktör ile kapasitör arasında rezonans frekansında salınıp, dirençte dağılmaktadır [56]. Denklem (2.10)'da rezonans frekansının formülü, (2.14)'te ise kalite faktörünün formülü verilmektedir. Kalite faktörü ( $Q$ ); rezonans frekansı ( $\omega_0$ ) ve endüktans değeri ( $L$ ) ile doğru orantılı, bobinin iç direnci ( $R$ ) ile ters orantılıdır.

$$Q = \frac{\omega_0}{2\Gamma} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{2\pi f L}{R} \quad (2.14)$$

## 2.6 Ortak Endüktans ve Kuplaj Katsayısı

Ortak endüktans ( $L_m$ ), karşılıklı konumlandırılmış iki bobinin birbirlerine etkisiyle ortaya çıkan endüktans değeridir. Ortak endüktansın hesaplanma denklemi (2.15)'te görülmektedir. Buradaki ( $k$ ), kuplaj katsayısı olarak tanımlanmaktadır ve sistemin verimliliğine doğrudan etki etmektedir. Kuplaj katsayısı; 0 (bağlantısız) ile 1 (tam bağlantılı) arasında birimsiz bir değerdir, birincil ve ikincil bobin arasındaki manyetik akı bağlantısını temsil eder.

İki bobin arasında uzun menzilli ve yüksek verimli KGA için iki kritik parametre; her bobin için kalite faktörü ( $Q$ ) ve bobinler arasındaki kuplaj katsayısı ( $k$ ) 'dır. İki bobin arasında yüksek  $Q$  ve daha güçlü  $k$ , KGA'nın daha uzun bir menzilde daha yüksek verimlilikle gerçekleşmesine olanak sağlar [74]. Ancak yüksek  $Q$ , özellikle alıcı ve verici bobinler eşit boyutta değilse, yüksek  $k$  'yı ima etmez; alıcı ve verici bobinlerin boyutu ve geometrisi,  $Q$  ve  $k$  'yı bağımsız olarak önemli ölçüde etkiler [75].

Formüldeki ( $L_1$ ), yük bobininin; ( $L_2$ ) ise kaynak bobininin öz endüktansını ifade etmektedir.

$$L_m = k\sqrt{L_1L_2} \quad (2.15)$$

KGA sisteminde verimin kuplaj katsayısı ve kalite faktörüne bağlı denklemi (2.17)'de, devre bileşenlerine bağlı olarak ise (2.18)'de ifade edilmiştir.

$$\eta = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{\left(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2}\right)^2} \quad (2.17)$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{(R_2 + R_L)R_1}{\omega^2 L_m^2}} \frac{R_L}{R_2 + R_L} \quad (2.18)$$

Bu bölümde KGA sisteminde bobin tasarımı, çalışma frekansının seçilmesi, kapasitör seçimi ve güç devresinin tasarımı aşamalarına yer verilmiştir.

### 3.1 Bobin Tasarımı

Manyetik rezonans yöntemiyle kablosuz güç aktarımı, bir hava boşluğu aracılığıyla bağlanan bir çift bobine dayanmaktadır. Bu bobin çiftinin geometrisi ve malzemeleri, güç aktarımının manyetik alanını ve verimliliğini belirlemek için çok önemlidir. Ek olarak, bobinlerin öz endüktans ve ortak endüktans değerleri, kompanzasyon şebekelerinin konfigürasyonunu belirleyecektir. Bu nedenlerden dolayı bobin tasarımı, bir kablosuz güç aktarım sistemindeki en önemli adımlardan biridir [66].

Bobin tasarımında dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Bunlar bobin sarım sayısı, aralarındaki boşluk ve dönüşler dahil bobinin geometrik tasarımı; uygulama amacına ve çalışma frekansına en uygun olan telin seçilmesi şeklinde sıralanabilir [76].

Literatürde, dairesel spiral bobinler, kare, dikdörtgen spiral bobinler, çift D pedler ayrıca yenilikçi hibrit bobin yapıları bulunmaktadır. Bu çalışmada tasarım kolaylığı ve çalışma amacımıza uygunluğundan dolayı dairesel spiral bobin tercih edilmiştir.

Sıkı sarılmış dairesel düz spiral bobinlerde, bobin turlarının belirli bir aralıkta artırılması, bobin sistemi verimliliğini artırabilir, ancak çok fazla bobin turu, bobin sistemi verimliliğini sınırlayacak olan hızla artan parazitik direnç nedeniyle bobin sisteminde daha fazla kayba neden olmaktadır. Bobin gevşek sarıldığında, bobin sistemi verimliliği sıkı sarılmış bobinlere kıyasla büyük ölçüde iyileştirilebilir. Bobin dönüşleri ve dış yarıçapın her ikisi de sabitse, kanal genişliğini ve iç yarıçapı ayarlayarak, belirli bir gereksinimi karşılamak için bobin-sistem verimliliği üzerinde küçük etkilerle sistem çıkış gücü ayarlanabilmektedir. Güç aktarım kapasitesi için, her zaman maksimum çıkış gücü teoremine karşılık gelen bir maksimum nokta vardır. Ayrıca, aşırı yüksek bobin öz endüktansının, diğer sistem parametreleri sabitken güç aktarım kapasitesini ciddi şekilde

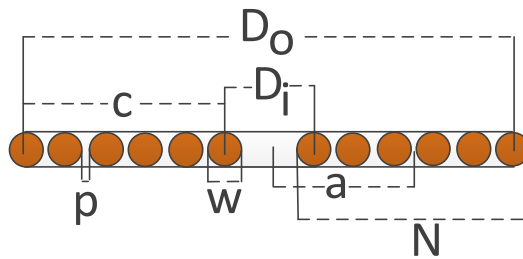
sınırlayacağı da tespit edilebilir. Bu nedenle; kablosuz güç aktarım kapasitesi ve bobin-sistem verimliliği dikkate alınarak bobinin tasarlanması gerekmektedir[77].

### 3.1.1 Dairesel Düz Spiral Bobin Öz Endüktans Hesabı

Kablosuz güç aktarımı için tasarlanan bobinlerin öz endüktans değerleri ve rezonans devresinde kullanılan kapasitörlerin kapasitans değerleri sistemin rezonans frekansının belirlenmesini doğrudan etkileyen parametrelerdir. Sistem tasarımında ilk olarak bobin tasarımı gerçekleştirilmiş olup, daha sonra rezonans frekansında çalışmasını sağlayacak kapasite değerleri belirlenmiştir.

Çalışmamızda daireysel düz spiral bobinlerin tercih edilmesinde etkili olan unsurla şu şekilde sıralanabilir; kablosuz güç aktarımında yüksek verimlilik sağlaması, özellikle kablosuz şarj uygulamalarında yaygın kullanılması, farklı cihaz ve uygulamalara uyum sağlayabilecek esnek tasarıma sahip olması ve orta mesafelerde güç aktarımı için uygun olması.

Çalışmamızda alıcı ve verici bobinler aynı boyutta tasarlanmıştır. Şekil 3.1’de bobinin yandan kesiti verilmiş olup; burada dış çap  $D_o$ , iç çap  $D_i$ , sarım sayısı  $N$ , tel çapı  $w$ , sarımlar arası mesafe  $p$  olarak ifade edilmiştir. Wheeler’in öz endüktans formülünün tek katmanlı düz spiral bobin için düzenlenmiş olan formülü (Denklem 3.1) kullanılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda bu denklemin çeşitli bobinlerde uygulanarak; bobinin tur sayısının çok az olduğu, sarımlar arası mesafenin tel çapından büyük olduğu ve bobinde ( $c/a < 0,2$ ) olduğu durumlar hariç olmak üzere doğrulandığı görülmüştür. Formülde birimler inçten metreye dönüştürülmüş şekilde düzenlenmiştir [75].



Şekil 3.1 Düz spiral bobinin yan görünüşü

$$D_i = D_o - 2N(w + p)$$

$$a = \frac{1}{4}(D_o + D_i) \quad (3.1)$$

$$c = \frac{1}{2}(D_o - D_i)$$

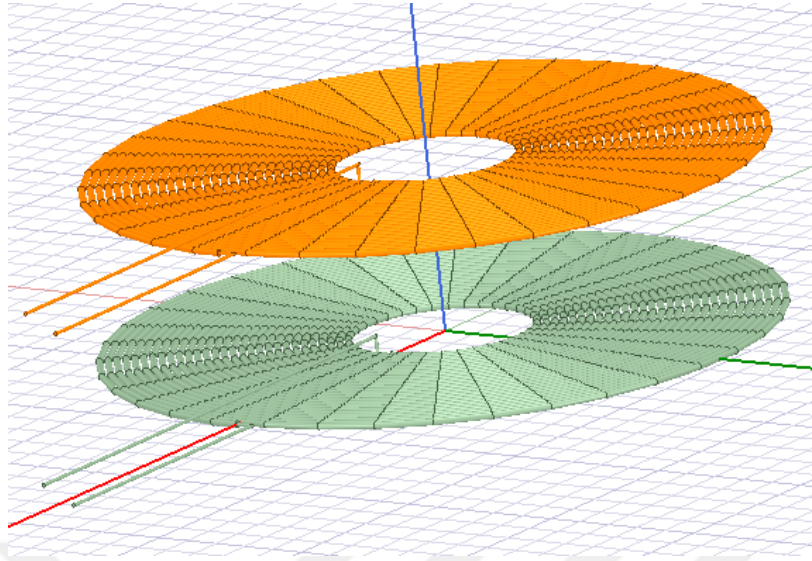
$$L(H) = \frac{N^2 (D_o - N(w + p))^2}{16D_o + 28N(w + p)} \times \frac{39.37}{10^6} \quad (3.2)$$

**Tablo 3.1** Bobin parametreleri

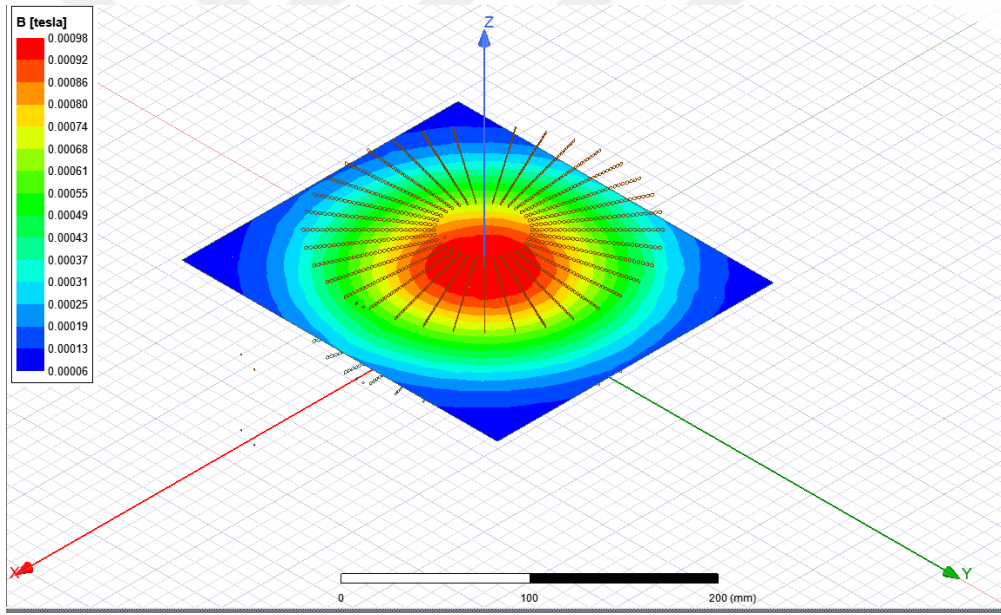
Parametre	Değer	Değer
N (Bobin Tur Sayısı)	30	29
p (Sarımlar Arası Mesafe)	0,5 mm	0,5 mm
D <sub>i</sub> (Bobin İç Çapı)	5 cm	5 cm
D <sub>o</sub> (Bobin Dış Çapı)	20 cm	19,5 cm
w (Tel Çapı)	2 mm	2 mm
L (Öz Endüktans)	104,46 µH	96,48 µH

Uygun kapasitör bulunamama ihtimaline karşın ilk etapta 29 sarım olarak tasarlanan bobin, bir tur sarımlık esnekliğe sahip olacak şekilde pay bırakılarak tasarlanmıştır. Bobine ait parametreler denklemde yerine koyularak MATLAB programında çözdürdüğümüzde öz endüktansımız 104,46 µH ve 96,48 µH olarak bulunmaktadır.

Çalışmamızda bobin tasarımı için ANSYS EM (SEY) programında Magneostatics yöntemi kullanılarak, bobinlerin öz endüktansları, ortak endüktansları ve kuplaj katsayısı tespit edilebilmektedir. Şekil 3.2’de ANSYS programında 29 tur olarak tasarlanan bobinlerin görseline yer verilmiştir. Şekil 3.3’de ise 29 sarım sayısına ait bobinlerin manyetik akı yoğunluğuna ait görseller bulunmaktadır. Analiz sonucunda manyetik akının bobinlerin merkezinde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.2 ANSYS bobin tasarımı



Şekil 3.3 Bobin üzerindeki manyetik akı yoğunluğu

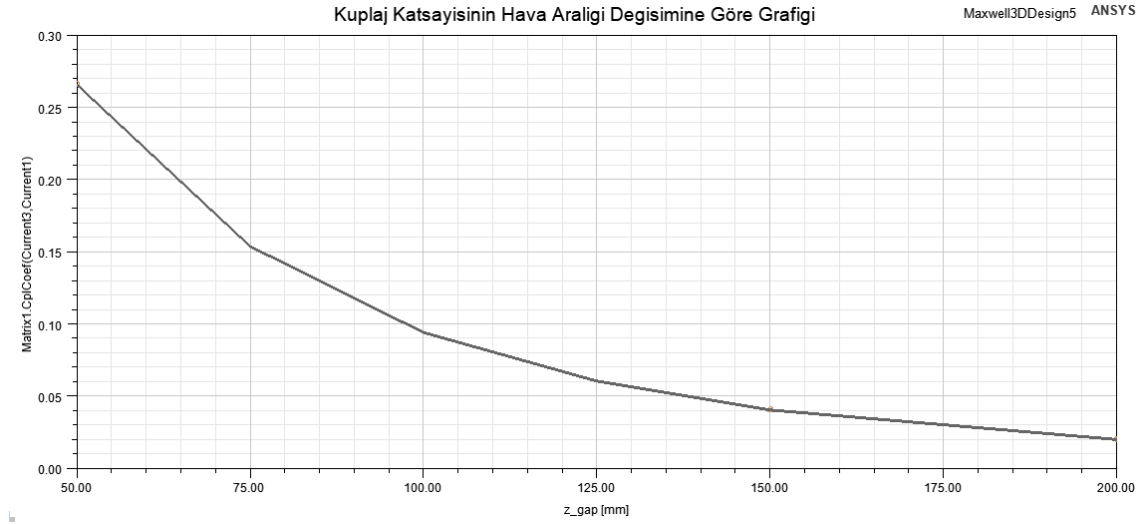
### 3.1.2 Tasarlanan Bobinlerin Kuplaj Katsayısı ve Ortak Endüktansı

Literatürde deneysel olarak iki bobin arasındaki ortak endüktansın yaklaşık olarak bulunabileceği öne sürülmüştür. Denklem 3.2’de bilindiği gibi ( $L_1$ ) alıcı bobinin öz endüktansını ve ( $L_2$ ) verici bobinin öz endüktansını ve ( $L_m$ ) ortak endüktansı ifade

etmektedir. Ayrıca alıcı bobinin bir ucu ve verici bobinin bir ucu LCR metrenin ölçüm uçlarına takıldığında alınan değer  $L^*$  olarak ifade edilmiştir [79].

$$L_m = (L^* - (L_1 + L_2)) / 2 \quad (3.3)$$

Ortak endüktans ve kuplaj katsayısını sonlu elemanlar yöntemi ile analiz ederek bulmak da mümkündür. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi, tasarlanan 29 sarımlı spiral bobinin 5 cm ile 20 cm arasında parametrik analizi yapılmıştır. Denklem (2.5)'te görüldüğü gibi ortak endüktans ( $L_m$ ), kuplaj katsayısı ile doğru orantılı olduğundan ve grafikte de elde edildiği gibi; güç aktarım verimine etki eden kuplaj katsayısı ve ortak endüktans iki bobin arasındaki hava aralığı arttıkça azalmaktadır.



**Şekil 3.4** Kuplaj katsayısının hava aralığı değişimine göre grafiği

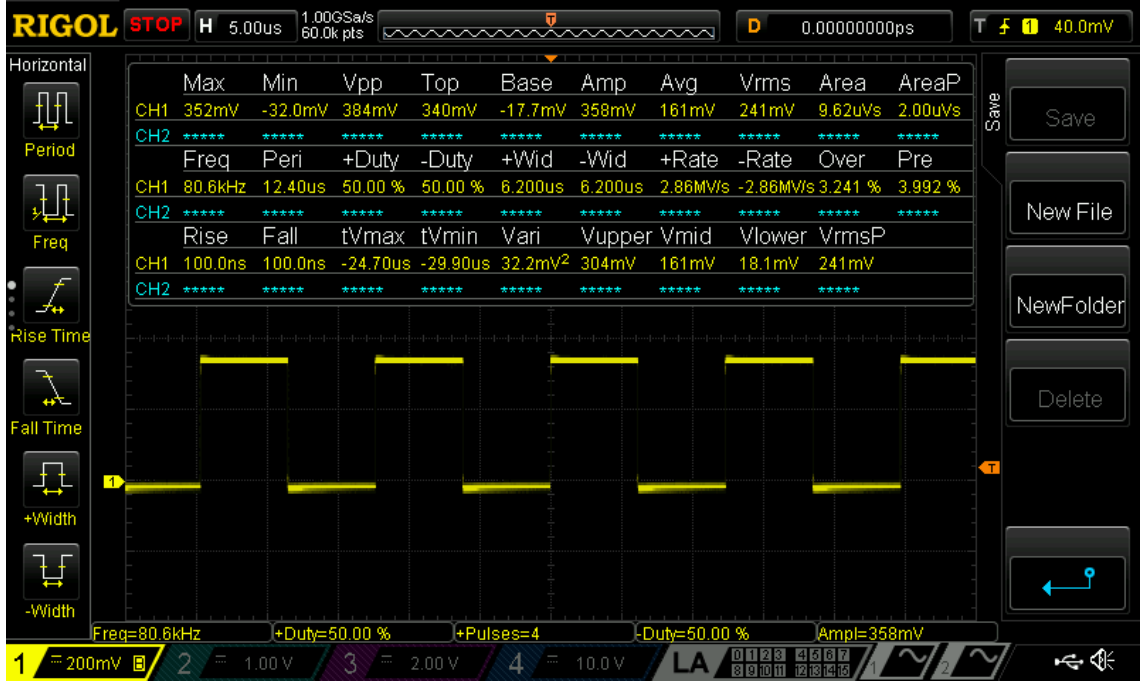
Şekil 3.4'te tasarlanan 29 sarımlı spiral bobinin 5 cm ile 20 cm arasında parametrik analizi yapılmıştır. Denklem (2.15)'te görüldüğü gibi ortak endüktans ( $L_m$ ), kuplaj katsayısı ile doğru orantılı olduğundan ve grafikte de elde edildiği gibi güç aktarım verimine etki eden kuplaj katsayısı ve ortak endüktans iki bobin arasındaki hava aralığı arttıkça azalmaktadır.

### 3.2 Frekans Seçimi

Sistemde frekans seçiminde Otomotiv Mühendisleri Birliği'nin (SAE) belirlediği elektrikli araçlar için kablosuz şarj frekans aralığı olan 81,39 kHz - 90 kHz aralığı dikkate alınmıştır.

Bu çalışmada mikrodenetleyici olarak STM32 İşlemci Kiti NUCLEO-F411RE kullanılmıştır. STM32 CubeMx programı kullanılarak invertör devresinde çalışma

frekansında PWM sinyali (kare dalga) üretilmektedir. Örnek olarak 80,6 kHz’de üretilen kare dalganın görseli Şekil 3.5’te verilmiştir. Sistemi rezonans frekansında çalıştırmak için frekans potansiyometre ile 70 kHz – 100 kHz arasında ayarlanabilir durumda olacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 3.5 80,6 kHz’de üretilen kare dalganın osiloskop görseli

### 3.3 Litz Teli Seçimi

Kablosuz enerji transferinde, kablolu şarj ile rekabet edebilmek adına sistemin güç aktarım verimliliği önem arz etmektedir. Bilindiği üzere alternatif akımda akım yoğunluğunun kablo yüzeyinde daha fazla olup, kablo merkezinden akım geçmemesi deri etkisi (skin effect) olarak adlandırılan kayıptır. Diğer kayıp ise yakınsaklık etkisi (proximity effect), birbirine yakın tellerde bir telden akan akımın yanındaki başka bir telde parazitik akım oluşturmasıdır. Verimin azalmasına ek olarak, her iki etki de homojen olmayan bir akım dağılımına sebep olmaktadır. Dolayısıyla bu durum bobin empedansında bir kaymaya neden olmakta ve sistem ayarını daha karmaşık hale getirmektedir [78]. Literatürde, bu kayıpların azaltılması için KGA sistemlerindeki bobinlerde litz teli (Şekil 3.6) kullanılmıştır. Litz teli, ince teller ile her bir tel üzerindeki yalıtım katmanının bir demet oluşturacak şekilde birden fazla bükülmesiyle oluşturulur.

**Tablo 3.2** Çalışma frekansı aralıklarına göre litz teli boyutları [66]

Çalışma Frekansı Aralığı	AWG	Çap (mm)
60 Hz – 1 kHz	28	0,3211
1 kHz – 10 kHz	30	0,2546
10 kHz – 20 kHz	33	0,1798
20 kHz – 50 kHz	36	0,1270
50 kHz – 100 kHz	38	0,1007
100 kHz – 200 kHz	40	0,0799
200 kHz – 350 kHz	42	0,0635
350 kHz – 850 kHz	44	0,0508
850 kHz – 1,4 MHz	46	0,0398
1,4 MHz – 2,8 MHz	48	0,0316



**Şekil 3.6** Litz teli [66]

Tablo 3.2’de görülmekte olan Amerikan Tel Göstergesi’ne (AWG) göre uygun frekanslarda sınıflandırılan litz teli çizelgesi, bu çalışmamızda referans alınmıştır. SAE standartlarına uygun olan frekans aralığı için AWG değeri 14 olan 5’li sarmal yapıya sahip; 52 adet 38 AWG telden oluşan kablo seçilmiştir.

### 3.4 Kapasitör Seçimi

Seri- seri rezonans devresinde giriş ve çıkış kapasitör formülleri 2. Bölümde Tablo 2.4'teki denklemde öz endüktans ve frekans değerleri yerlerine koyularak elde edilmiştir. Kondansatör seçiminde; 29 sarım ve 30 sarımla tasarlanan bobinlerden teorik olarak elde edilen endüktanslar ve de belirlenen çalışma frekansı ile piyasada bulunan kondansatör değerleri göz önüne alınarak 12 nF, 2 kV ve 1nF, 2 kV'den oluşan kondansatörler temin edilmiştir. 3 adet 12 nF kondansatör paralel bağlanarak 36 nF elde edildiğinde mevcut endüktans değerleriyle oluşan rezonans frekansı hesaplanmıştır. Ayrıca 3 adet 1 nF kapasitörler, 36 nF kapasiteye paralel bağlanarak 39 nF değer oluşturulmuştur. Tablo 3.3'de uygun çalışma frekansı; bu iki sarım sayısı ve kapasite değerinde hesaplanarak gösterilmiştir. Bu hesaplamalara göre; bobin için 30 sarım sayısı ve kondansatör için 36 nF kapasite değeri seçilmiştir.

**Tablo 3.3** Farklı Sarım Sayısına Göre Parametre Tablosu

Sarım Sayısı	30	30	29	29
Öz Endüktans Değeri (L) $\mu$ H	104,46	104,46	96,48	96,48
Kapasite değeri (C) nF	36	39	36	39
Frekans (f) kHz	82,07	78,85	85,4	82,05

### 3.5 Güç Elektroniği Devresi Tasarımı

Kablosuz güç aktarımı sistemlerinde verici bobinde yüksek frekanslı akım üretebilmek için invertör devresine ihtiyaç duyulmaktadır. Kompanzasyon devresinde uygulanmak amacıyla invertör devresi tarafından kare dalga üretilmektedir [22].

Tasarlanan KGA sisteminde DC gerilim kaynağından gelen gerilim H-Bridge invertör ile yüksek frekanslı kare dalga AC gerilime dönüştürülür. Verici rezonans devresinden akan akım ile üretilen manyetik alan sayesinde, alıcı tarafta AC gerilim indüklenerek yükten akım akmaya başlar.



MOSFET kullanılmıştır. MOSFET'lerin kapı beslemesi, 220 Volt AC gerilimi 12 Volt DC gerilime çeviren AC/DC dönüştürücü devreleri ile sağlanmaktadır. MOSFET'lerin iletme geçmesi veya kesime gitmesi için tetikleme zamanları arasında ölü zaman bırakılmıştır, böylece aynı kol üzerinde yer alan MOSFET'lerin anahtarlama anlarında ortaya çıkan anlık kısa devrenin önüne geçilmiştir. Harici bir ölü zaman devresi tasarlanmadan STM32 mikroişlemci üzerinde yazılımla ölü zaman oluşturulmuştur. İki adet potansiyometre kullanılarak PWM sinyallerinin frekansı ve ölü zamanı yazılımla ayarlanabilecek şekilde tasarlanmıştır. HCPL-3180 opto-coupler entegrasyonu kullanılarak mikroişlemciden gelen 3,3 V giriş 12 V'a yükseltılarak 330 ohm direnç üzerinden MOSFET kapısı sürülmektedir. MOSFET'i kesim anında hızlı bir şekilde kesime sokmak için BA159 hızlı akım diyotu kullanılmıştır. Kaçak endüktanstan ötürü MOSFET üzerinde gerilim pikleri oluşur. Bu nedenle kesim aşamasında oluşan gerilim piklerinin değerini sınırlamak için bastırma devresi kurulmuştur.

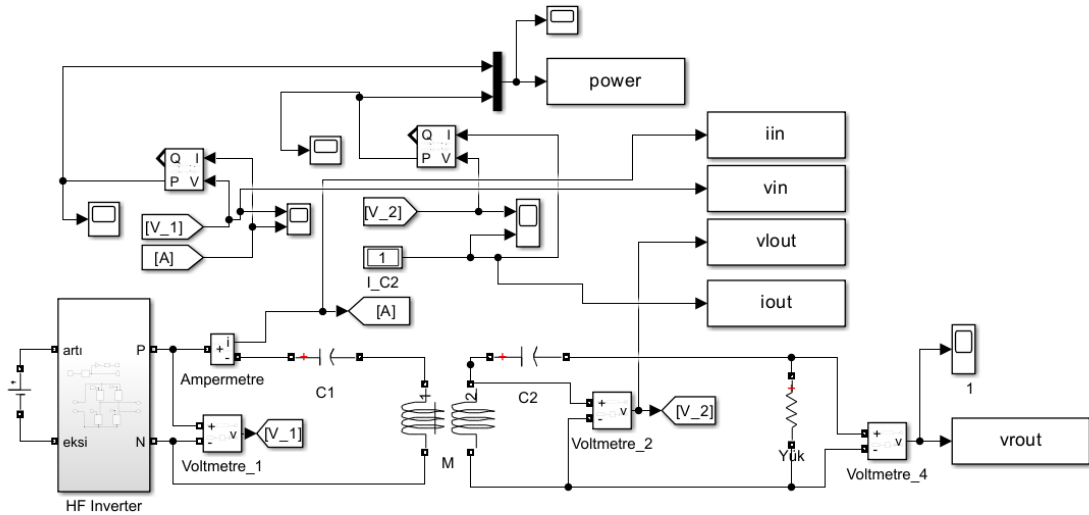
Şekil 3.7'de güç devresi şemasının sol alt kısmında görülmekte olan farklı frekanslı sinyallerden gelen gürültüleri engellemek amacıyla, 3 adet 10 nF kutupsuz kondansatör ve 9 adet 100 nF kutuplu kondansatörden oluşan alçak geçiren filtre (low pass filter) kullanılmıştır. Ayrıca giriş gerilimini filtrelemek amacıyla şemada C11 ve C12 simgeleri ile gösterilen 1000  $\mu$ F 200 V ve 474 nF 630 V kapasitörler kullanılmıştır. Devreden güç kesildiğinde kapının açık kalmasını engellemek için şemada C5, C6, C17, C18 olarak adlandırılan 10 nF'lık internal kapasitörler kullanılmıştır.

## BENZETİM ÇALIŞMALARI VE DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde manyetik rezonans kuplaj yöntemiyle kablosuz güç aktarımı sistemi için MATLAB Simulink ortamında yapılan benzetim aşamalarına yer verilip daha sonra gerçekleştirilen sistemin deneysel sonuçları ortaya koyulmuştur.

### 4.1 MATLAB Simulink Benzetim Sonuçları

Bu bölümde ANSYS EM üzerinden Magneostatics yöntemi kullanılarak elde edilen alıcı ve verici bobinin öz endüktansları ile 7 cm hava aralığındaki ortak endüktans değeri MATLAB Simulink ortamında kullanılarak tasarlanmış sisteme ait görsellere yer verilmiştir. Şekil 4.1’de KGA sistemine ait benzetim çalışması görülmektedir. DC 8 V giriş gerilimi verilen invertör devresine frekansı 81,3 kHz olarak ayarlanmıştır. İnvörtör çıkışları rezonans devresinin girişine verilerek çıkış bobinine gerilim endükleme yapılmıştır. Alıcı tarafta kurulan rezonans devresinde ise bobin ve yük üzerine düşen gerilim ile bunların üzerinden akım incelenmiştir.



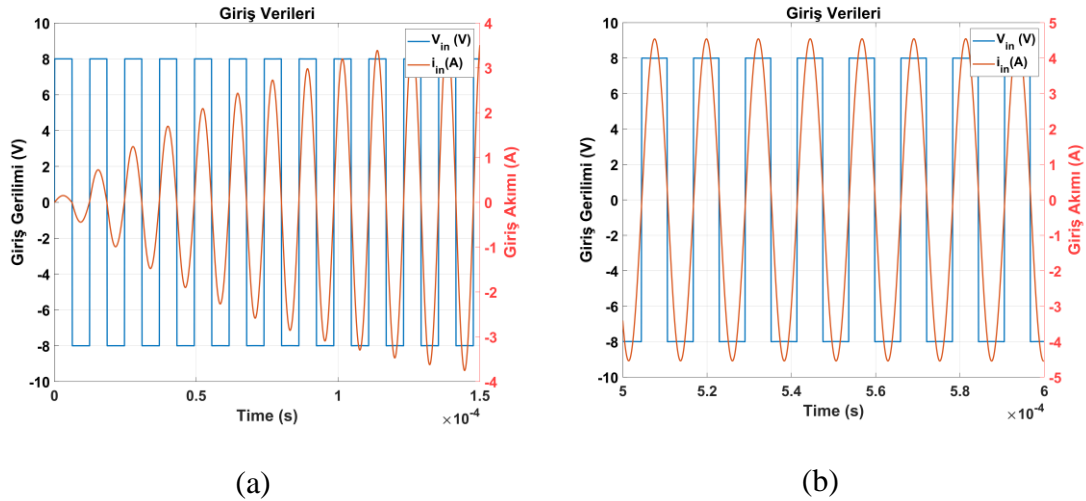
Şekil 4.1 KGA sistemi benzetim çalışması

Benzetim çalışmalarında kullanılan parametreler Tablo 4.1’de gösterilmektedir.

**Tablo 4.1** Benzetim çalışmaları için sistem parametreleri

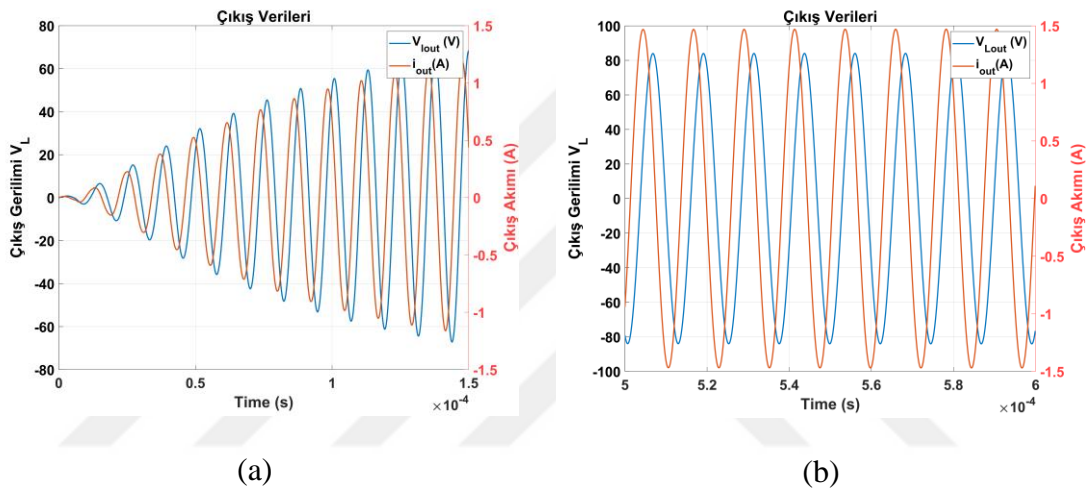
Parametre	Değer	Parametre	Değer
f (kHz)	81,3	$R_L$ (ohm) (Yük direnci)	19,5
$L_1$ ( $\mu$ H) (Verici bobin self endüktansı)	104,46	$C_1$ (nF) (Giriş kapasite değeri)	36,81
$L_2$ ( $\mu$ H) (Alıcı bobin self endüktansı)	104,46	$C_2$ (nF) (Çıkış kapasite değeri)	36,62
$R_1$ (ohm) (Verici bobin iç direnci)	0,14	M ( $\mu$ H) (Ortak Endüktans)	12,5
$R_2$ (ohm) (Alıcı bobin iç direnci)	0,14	Giriş Voltajı (V)	8

Şekil 4.2’de mavi renk ile giriş gerilimi, turuncu renkle ise verici taraftan akan akım ifade edilmektedir. Şekil 4.2 a’da sistemin başlangıç zamanından 0,00015 saniyeye kadar geçen zaman gösterilmiştir; bu zaman aralığında sistemin rezonansa girmeden önceki durumu gözlemlenmektedir. Şekil 4.2 b’de ise sistemin rezonansa girdikten sonraki durumunu gösteren 0,0005 ile 0,0006 saniyeleri arasındaki değerler verilmektedir. Giriş gerilimi 8 V olan sistemde, maksimum akım değerinin 4,54 A olduğu görülmektedir. Grafikte voltaj ve akım değerlerinin üst üste geldiği görülmüş; akım ve gerilim arasında faz farkının olmadığı yani sistemin rezonans frekansında çalıştığı gözlemlenmiştir.



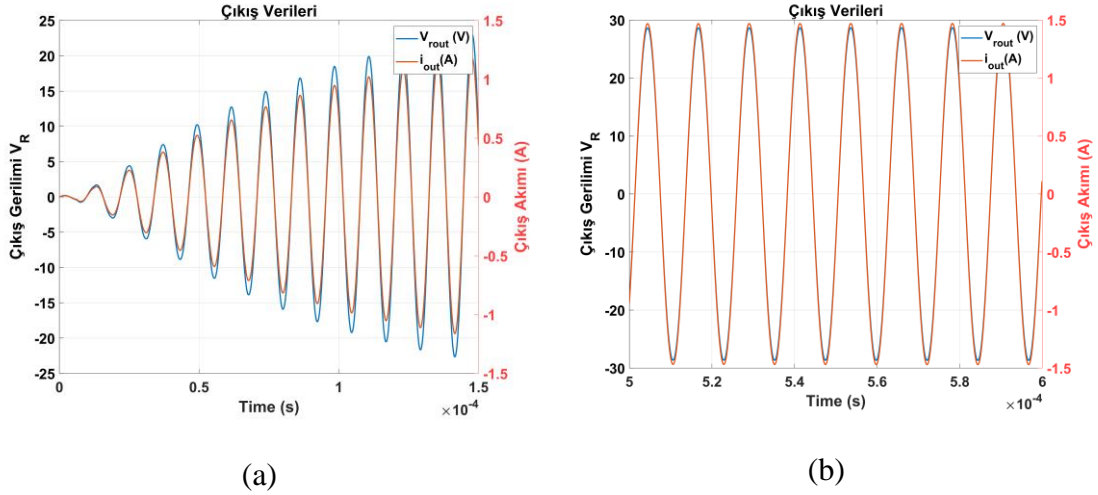
**Şekil 4.2** Rezonans öncesi (a) ve rezonans halindeyken (b) vericinin akım ve gerilim değerleri

Şekil 4.3'te verilen grafikte mavi renk yük tarafındaki bobinin üzerine düşen gerilimi, turuncu renk ise yük tarafındaki bobinin üzerinden akan akımın değerini ifade etmektedir. Şekil 4.2 a'da sistemin başlangıç zamanından 0,00015 saniyeye kadar geçen zaman, bobinin rezonansa girmeden önceki durumunu; Şekil 4.2 b'de ise rezonansa girdikten sonraki durumunu gösteren 0,0005 ile 0,0006 saniyeleri arasındaki çıkış değerleri verilmektedir. Bobin üzerine düşen voltaj değeri maksimum 84,14V ve bobin üzerinden geçen maksimum akım değeri 1,46 A olarak elde edilmiştir. Bobin üzerinden yapılan ölçümde endüktif etkiden dolayı voltaj ve akım değerleri arasında faz farkı olduğu görülmektedir.



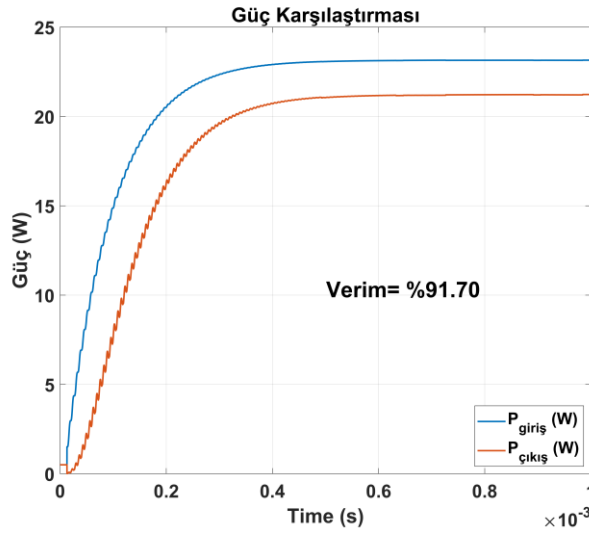
**Şekil 4.3** Rezonans öncesi (a) ve rezonans halindeyken (b) alıcı bobinin akım-gerilim grafiği

Şekil 4.4'de mavi renk ile çıkış bobin gerilimi, turuncu renk ise çıkış direncinin akımını ifade etmekte olup; Şekil 4.2 a'da sistemin başlangıç zamanından 0,00015 saniyeye kadarki geçen zaman yükün rezonansa girmeden önceki durumunu ve şekil 4.2 b'de rezonansa girdikten sonraki durumunu gösteren 0,0005 ile 0,0006 saniyeleri arasındaki çıkış değerleri verilmektedir. Yük üzerine düşen maksimum gerilim değeri 28,70 V ve maksimum akım değeri ise 1,46 A olarak elde edilmiştir. Grafikte yük üzerine düşen voltaj ve yükün üzerinden akan akım değerlerinin arasında faz farkının olmadığı elde edilmiştir. Böylelikle seçilen kapasitör ve bobin değerlerinin doğru seçildiği verilen frekans değerinde rezonansa girdiği doğrulanmıştır.



**Şekil 4.4** Rezonans öncesi (a) ve rezonans halindeyken (b) yük üzerindeki akım-gerilim değerleri

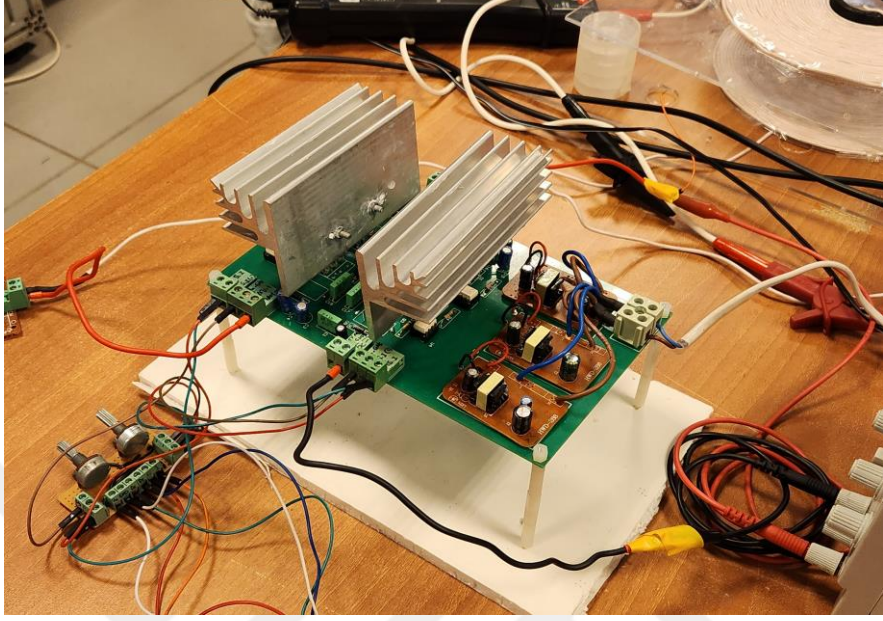
Şekil 4.5'teki giriş güç değerlerine bakıldığında çalışma frekansı rezonansa girdikten sonraki güç değeri göz önüne alındığında maksimum 23,15 W, yük üzerindeki güç hesaplandığında ise maksimum 21,23 W olduğu görülmektedir; böylece verim %91,70 olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 4.5** Giriş ve çıkış arasındaki güç karşılaştırması

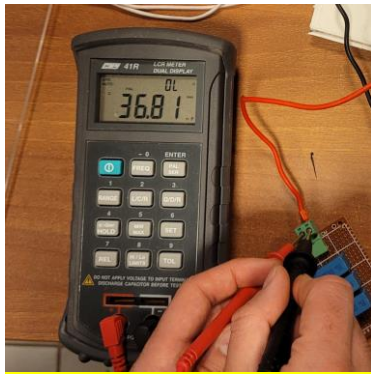
## 4.2 Deneysel Çalışmalar

Bu bölümde kablosuz güç aktarımı sisteminin deneysel çalışmalarına yer verilmiştir. Sistem için gerekli olan invertör devresi üretilmiş ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 İnvörtör devresi

Tablo 3.3'te hesaplanan değerler göz önüne alınarak 12 nF kapasiteye sahip 3 kondansatör paralel olarak bağlanmak suretiyle, rezonans tankının kondansatörleri oluşturulmuştur. Yapılan ölçümlere göre Şekil 4.7 a'da giriş kapasitörü  $C_1 = 36,81$  nF, Şekil 4.7 b'de ise çıkış kapasitörü  $C_2 = 36,62$  nF olarak elde edilmiştir.



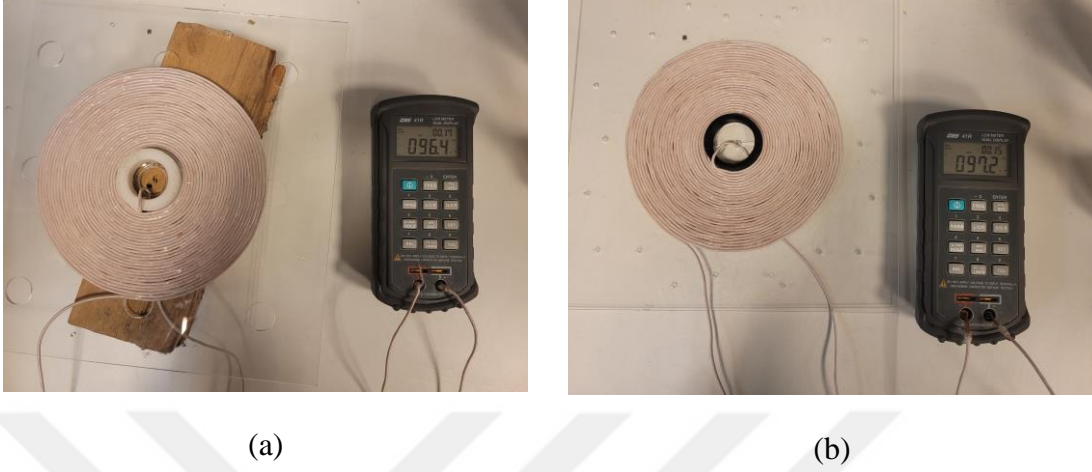
(a)



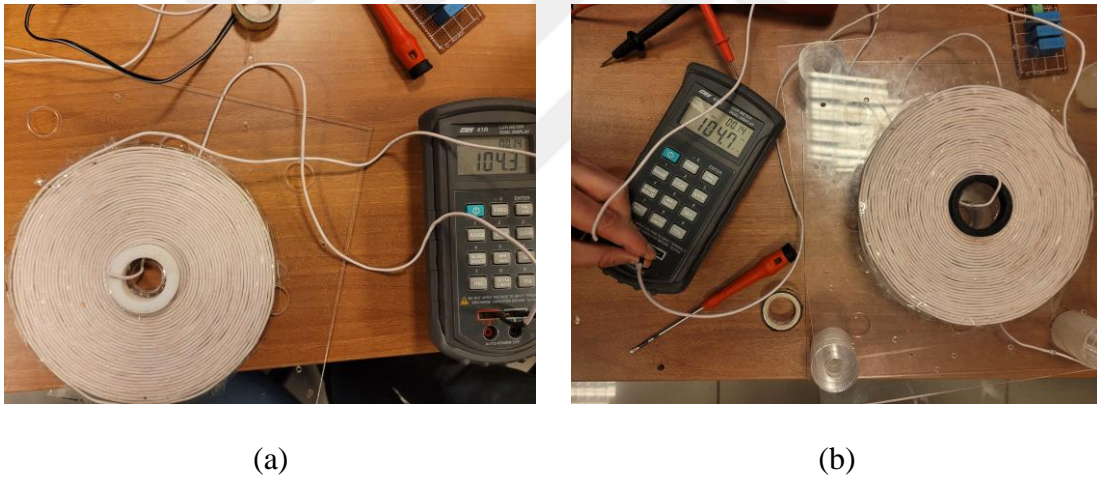
(b)

Şekil 4.7 Giriş kapasitör değeri (a), Çıkış kapasitör değeri (b)

Bobin tasarlanırken 29 sarım yapılmış ve 1 tur pay bırakılmıştır. Böylece bobin, 29 ve 30 sarım olabilecek şekilde ayarlanmıştır. Bobinlerin 29 ve 30 sarımlarda öz endüktans ölçümü yapılmış, şekil 4.8 ve şekil 4.9’da göresellerine yer verilmiştir.



**Şekil 4.8** 29 sarımda giriş endüktansı (a), çıkış endüktansı (b)



**Şekil 4.9** 30 sarımda giriş endüktansı (a), çıkış endüktansı (b)

Denklem (3.3)’ten faydalanılarak alıcı ve verici bobinlerin ortak endüktans değeri hesaplanmıştır. Şekil 4.10’da 7 cm hava aralığında verici bobin ile alıcı bobin seri olarak bağlanarak,  $L^*$  değeri 253,6  $\mu\text{H}$  olarak bulunmuştur. Bu şekilde denklemde yerine koyularak 7 cm hava aralığında ortak endüktans değeri, 22,3  $\mu\text{H}$  olarak elde edilmiştir.



**Şekil 4.10** Ortak endüktans değerinin bulunması

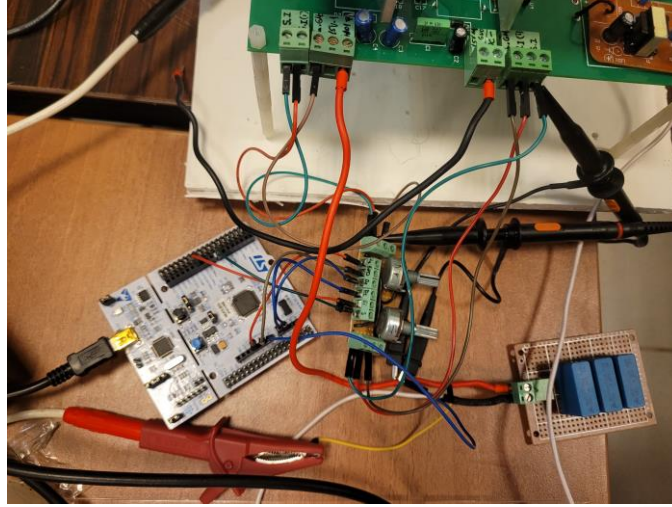
29 sarım ve 30 sarımdan oluşan bobinlerin ölçüm sonuçlarından elde edilen endüktans değerleri ile rezonans devresinde kullanılmak üzere tasarlanan kapasitörlerin ölçüm değerleri Tablo 4.2’de gösterilmiştir. Ayrıca tabloda, bu kapasite ve endüktans değerleri göz önüne alınarak teorik olarak hesaplanarak elde edilen rezonans frekansı değerlerine de yer verilmiştir.

**Tablo 4.2** Ölçüm sonuçları ile rezonans frekansı belirleme

Parametreler	30 Sarım	29 Sarım
Giriş Endüktansı	104,3	96,4
Çıkış Endüktansı	104,7	97,2
Giriş Kapasitörü	36,81	36,81
Çıkış Kapasitörü	36,62	36,62
Giriş Frekansı	81,22	84,35
Çıkış Frekansı	81,28	84,48

İnvertör devresinde PWM çıkışlarının üretilmesi için STM32 İşlemci Kiti NUCLEO-F411RE kullanılmıştır. Sistemin çalışma frekansı, potansiyometre kullanılarak, 70 kHz ile 100 kHz arasında ayarlanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Sistemin rezonans frekansı,

81,7 kHz'e göre ayarlanarak kare dalga üretilmiştir. Şekil 4.11'de STM32 ile frekans ve ölü zaman ayarlayıcı devrenin görseli verilmiştir.



Şekil 4.11 STM32 ve frekans ayarlayıcı devre

Yüksek frekanslarda sistemin giriş ve çıkış gerilimlerinin okunabilmesi için PINTEK DP-100 diferansiyel prob ve akım değerlerinin okunabilmesi için FLUKE 80i-110s akım klampı kullanılmış ve Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



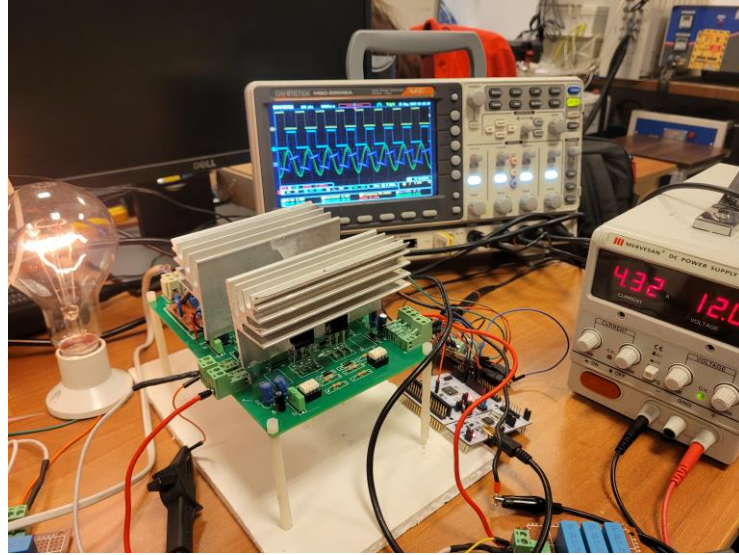
(a)



(b)

Şekil 4.12 Gerilimölçer (a), Akımölçer (b)

Ölçümlerin gösterilebilmesi ve kayıtlarının alınabilmesi için GWINSTEK MSO-2204EA 200 MHz'lik dijital depolamalı osiloskop, DC güç kaynağı olarak ise Mervesan 305B DC (5A, 0-30V) kullanılmış; şekil 4.13'de ise görsellerine yer verilmiştir.

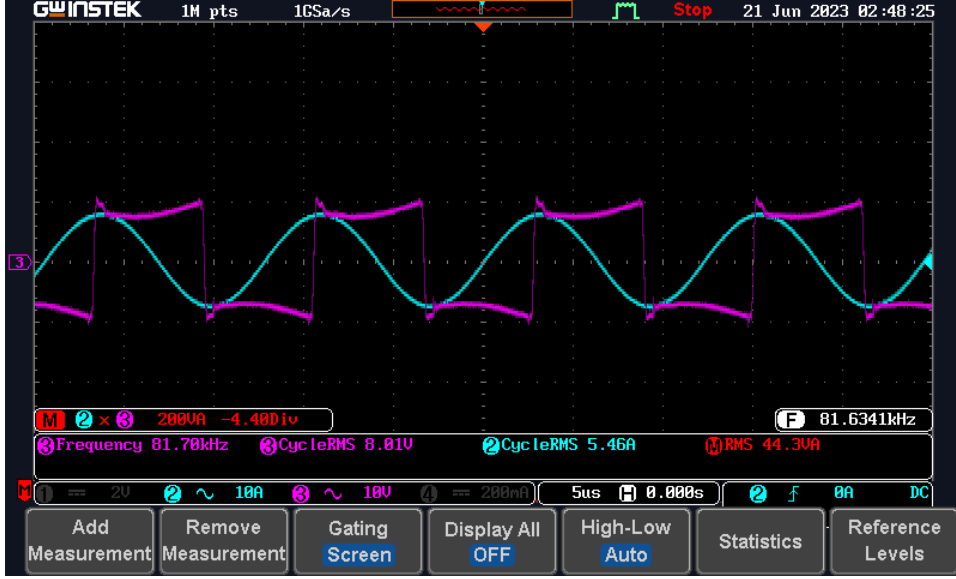


**Şekil 4.13** Osiloskop ve güç kaynağı

Tablo 4.3’de deney düzeneğinde kullanılan malzemelerin parametrelerine yer verilmiştir.

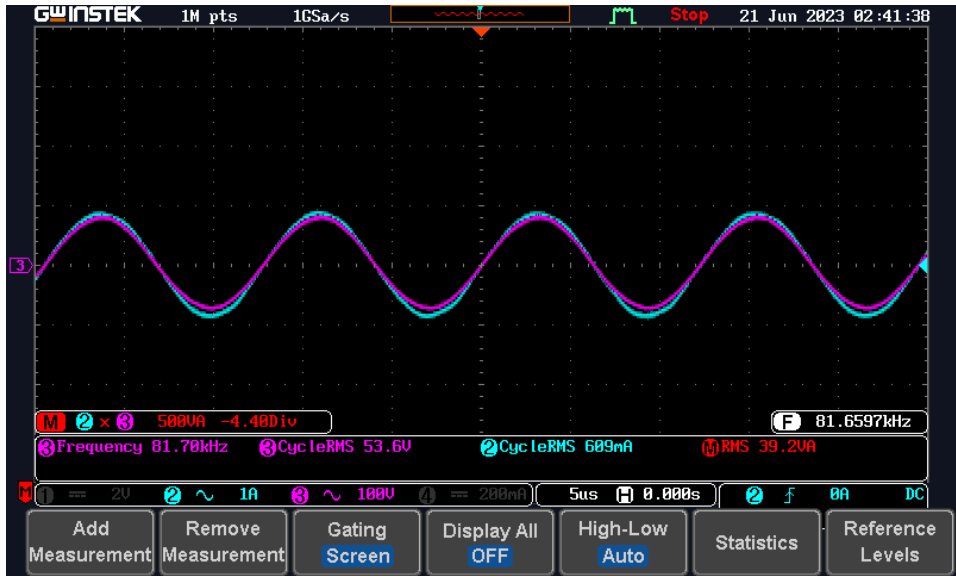
**Tablo 4.3** Sistem parametreleri

Parametre	Değer
f (kHz)	81,7
$L_1$ (uH) (Verici bobin self endüktansı)	104,3
$L_2$ (uH) (Alıcı bobin self endüktansı)	104,7
$R_1$ (ohm) (Verici bobin iç direnci)	0,14
$R_2$ (ohm) (Alıcı bobin iç direnci)	0,14
$R_L$ (ohm) (Yük direnci)	19,5
$C_1$ (nF) (Giriş kondansatörü kapasite değeri)	36,81
$C_2$ (nF) (Çıkış kondansatörü kapasite değeri)	36,62
M (Ortak Endüktans)	22,3
Kaynak Voltajı	10 V



**Şekil 4.14** Verici tarafın elektriksel değerleri (10 VDC)

İnvertör devresinin girişine 10 V DC gerilim verilerek güç aktarım işlemi yapılmıştır. Verici bobin tarafının giriş gerilimi, akımı ve frekansı ölçülerek Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Giriş frekansı potansiyometreyle ayarlanarak ampul parlaklığının en fazla olduğu frekansın 81,7 kHz olduğu görülmüştür. Kaynak taraftan yapılan ölçümde, osiloskop ekranında giriş geriliminin (pembe kanal) efektif değeri 8,01 V ve giriş akımının (mavi kanal) efektif değeri ise 5,46 A olarak tespit edilmiştir. Verici bobin üzerindeki güç, osiloskopun math modülü kullanılarak 44,3 W olarak hesaplanmıştır.



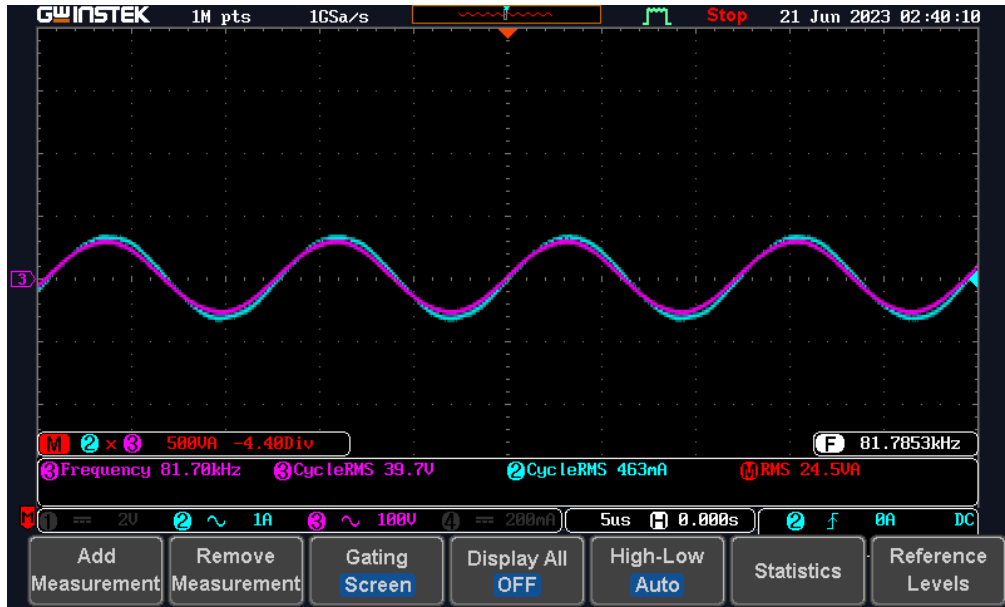
**Şekil 4.15** Alıcı tarafın elektriksel değerleri (10 VDC)



Math modülü kullanılarak 26,8 W olarak hesaplanmıştır. Verici tarafın elektriksel değerleri Şekil 4.17’de alıcı tarafın elektriksel değerleri Şekil 4.18’de verilmiştir. Yük tarafın efektif gerilimi 39,7 V ve efektif akımı 0,463 A ölçülmüştür. Alıcı tarafın güç kısmı osiloskop tarafından 24,5 W olarak hesaplanmış; böylece güç aktarımının %91,42 verimle gerçekleştiği görülmüştür.

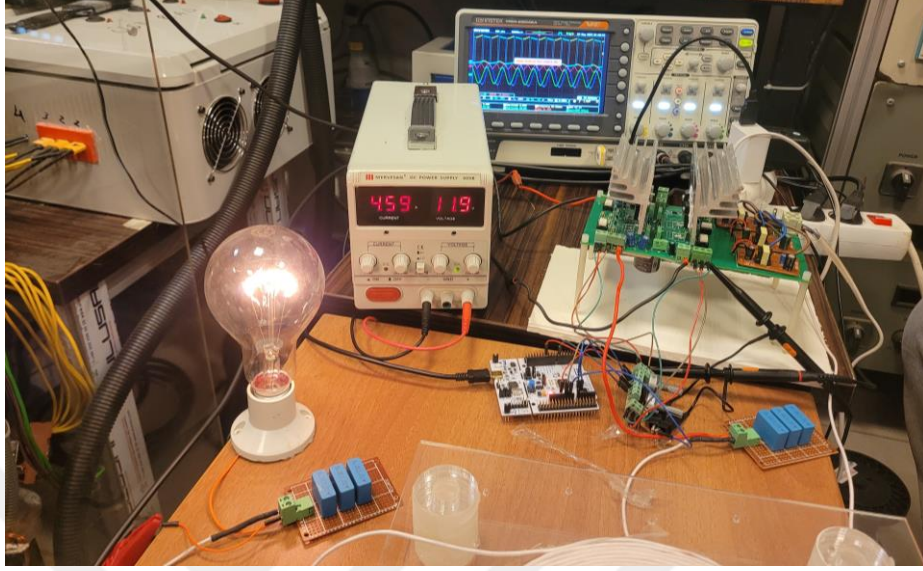


Şekil 4.17 Verici tarafın elektriksel değerleri (8 VDC)

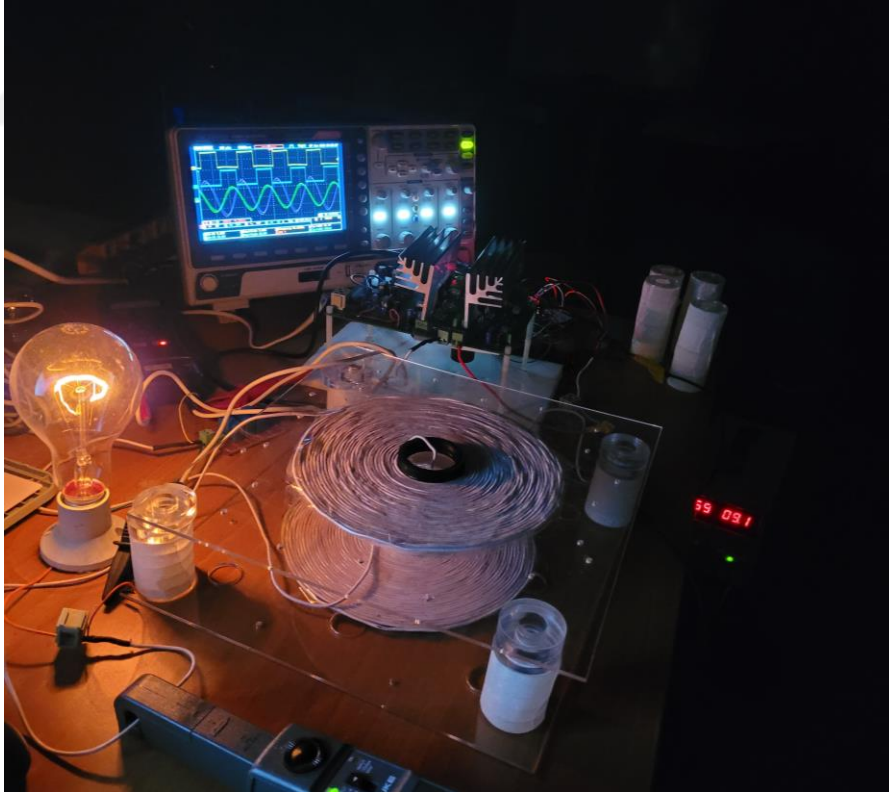


Şekil 4.18 Alıcı tarafın elektriksel değerleri (8 VDC)

Şekil 4.19’de 5 cm hava aralığında girişe 12 V gerilim verildiğinde gerçekleşen kablosuz güç aktarımı gösterilmiştir. Şekil 4.20’de ise karanlık ortamda sistemin çalışır haline ait bir görüntüye yer verilmiştir.



Şekil 4.19 5 cm hava aralığında yapılan çalışma



Şekil 4.20 Sistemin karanlık ortamda görseli

Günümüzde gelişen teknolojiyle elektrikli araçlar yaşamımızın her alanında yer edinmiştir. Bu durum elektrikli araçların şarj edilmesi konusunu da beraberinde gündeme getirmiştir. Bilinen ve yaygın kullanılmakta olan kablolu şarj sisteminin yanı sıra, otonom çalışan sistemler ve mobil araçların pratik bir şekilde şarj edilmesine olanak sağlayan kablosuz güç aktarımı da yakın zamanda popülerleşen konular arasında bulunmaktadır. Otonom çalışan sistemler ve mobil araçların kullanıcılar tarafından pratik bir şekilde şarj edilebilmesi ve kullanımının yaygınlaşması için kablosuz şarj teknolojisinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmamızda öncelikle kablosuz güç aktarımı için daha önce yapılmış çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir. Daha sonra 7 cm hava aralığında kablosuz güç aktarımı gerçekleştirmeyi hedeflediğimiz sistemimiz için orta mesafede yüksek verimle kablosuz enerji transferine olanak sağlayan manyetik rezonans kuplaj yöntemi kullanılmıştır. Tasarım kolaylığı, elektrikli araçlar için uygunluğu ve hizalama problemine karşı daha düşük duyarlılığa sahip olması gibi özelliklerinden dolayı sistemde seri-seri devre topolojisi seçilmiştir. Öncelikle SAE standartları göz önüne alınarak 82 kHz çalışma frekansı belirlenmiş daha sonra bu frekansa uygun spiral düz bobin tasarlanmıştır. ANSYS EM ortamında bobin analizi yapıp ardından KGA sisteminin invertör devresi tasarlanmıştır. Tasarlanan KGA sisteminin MATLAB Simulink ortamında benzetim çalışmaları yapılmış ve deney seti oluşturularak sistem gerçekleştirilmiştir.

Yapılan benzetim çalışmalarında, hesaplanan rezonans frekans değeriyle deneysel çalışmada bulunan rezonans frekans değerinin birbiriyle uyduğu ve aynı zamanda verimin, birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalarda girişte 10 V DC gerilim verildiğinde 44,3 W güç, %88,49 verimle aktarılmışken; girişte 8 V DC gerilim verildiğinde ise 26,8 W güç %91,42 verimle aktarılmıştır. Böylece kablosuz güç aktarımı başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Gelecek çalışmalarda farklı hava aralıklarında, farklı yüklerde, bobinler arası farklı açılı ve hizalamalarda; yüksek verimle güç aktarımının gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

- 
- [1] J. Garnica, R. A. Chinga, and J. Lin, “Wireless power transmission: From far field to near field,” *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1321–1331, 2013, doi: 10.1109/JPROC.2013.2251411.
  - [2] W. C. Brown, “The History of Power Transmission by Radio Waves,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 32, no. 9, pp. 1230–1242, 1984.
  - [3] T. Blackwell, “Recent demonstrations of Laser power beaming at DFRC and MSFC,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 766, no. 1, pp. 73–85, 2005, doi: 10.1063/1.1925133.
  - [4] S. Das Barman, A. W. Reza, N. Kumar, M. E. Karim, and A. B. Munir, “Wireless powering by magnetic resonant coupling: Recent trends in wireless power transfer system and its applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 1525–1552, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.031.
  - [5] Z. Bi, T. Kan, C. C. Mi, Y. Zhang, Z. Zhao, and G. A. Keoleian, “A review of wireless power transfer for electric vehicles: Prospects to enhance sustainable mobility,” *Appl. Energy*, vol. 179, pp. 413–425, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.07.003.
  - [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, pp. 83–86, Aug. 2007, doi: 10.1126/science.1143254.
  - [7] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljačić, “Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer,” *Ann. Phys. (N. Y.)*, vol. 323, no. 1, pp. 34–48, 2008, doi: 10.1016/j.aop.2007.04.017.
  - [8] T. Imura, H. Okabe, and Y. Hori, “Basic experimental study on helical antennas of wireless power transfer for electric vehicles by using magnetic resonant couplings,” *5th IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC '09*, pp. 936–940, 2009, doi: 10.1109/VPPC.2009.5289747.
  - [9] S. C. Cannon, B.L. Hoburg, J.F. Stancil, D.D. Goldstein, “Magnetic Resonant Coupling As a Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 7, pp. 1819–1825, 2009, doi: 10.1109/TPEL.2009.2017195.
  - [10] C. J. Chen, T. H. Chu, C. L. Lin, and Z. C. Jou, “A study of loosely coupled coils for wireless power transfer,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 57, no. 7, pp. 536–540, 2010, doi: 10.1109/TCSII.2010.2048403.
  - [11] T. P. Duong and J. W. Lee, “Experimental results of high-efficiency resonant coupling wireless power transfer using a variable coupling method,” *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 21, no. 8, pp. 442–444, 2011, doi: 10.1109/LMWC.2011.2160163.
  - [12] P. Ning, J. M. Miller, O. C. Onar, and C. P. White, “A compact wireless charging system for electric vehicles,” *2013 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2013*, pp. 3629–3634, 2013, doi: 10.1109/ECCE.2013.6647179.
  - [13] K. Lee and D. H. Cho, “Diversity analysis of multiple transmitters in wireless

- power transfer system,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 6, pp. 2946–2952, 2013, doi: 10.1109/TMAG.2012.2234132.
- [14] L. Chen, S. Liu, Y. C. Zhou, and T. J. Cui, “An optimizable circuit structure for high-efficiency wireless power transfer,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 1, pp. 339–349, 2013, doi: 10.1109/TIE.2011.2179275.
- [15] L. Gao *et al.*, “Optimum design of coil for wireless energy transmission system based on resonant coupling,” *IEEE Int. Conf. Control Autom. ICCA*, vol. 0, no. 3, pp. 190–195, 2013, doi: 10.1109/ICCA.2013.6565157.
- [16] T. D. Nguyen, S. Li, W. Li, and C. C. Mi, “Feasibility study on bipolar pads for efficient wireless power chargers,” *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*, pp. 1676–1682, 2014, doi: 10.1109/APEC.2014.6803531.
- [17] J. Jadidian and D. Katabi, “Magnetic MIMO: How To Charge Your Phone in Your Pocket,” vol. 7, no. 11, pp. 495–506, 2014, doi: 10.1145/2639108.2639130.
- [18] S. Li and C. C. Mi, “Wireless power transfer for electric vehicle charging,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 3, no. 1, pp. 4–17, 2015, doi: 10.1063/5.0032383.
- [19] Z. Wang, X. Wei, and H. Dai, “Design and control of a 3 kW wireless power transfer system for electric vehicles,” *Energies*, vol. 9, no. 1, 2016, doi: 10.3390/en9010010.
- [20] B. Fincan and Ö. Üstün, “A study on comparing analytical methods for coil design in high frequency wireless energy transfer,” *IEEE WoW 2015 - IEEE PELS Work. Emerg. Technol. Wirel. Power, Proc.*, 2015, doi: 10.1109/WoW.2015.7132852.
- [21] A. Agcal, N. Bekiroglu, and S. Ozcira, “Examination of efficiency based on air gap and characteristic impedance variations for magnetic resonance coupling wireless energy transfer,” *J. Magn.*, vol. 20, no. 1, pp. 57–61, 2015, doi: 10.4283/JMAG.2015.20.1.057.
- [22] A. Pashaei, E. Aydın, M. Polat, E. Yıldırım, and M. T. Aydemir, “Elektrikli Araçlar için Temassız Güç Aktarım Sistemleri,” *EMO Bilim. Dergi*, pp. 1–12, 2016.
- [23] A. Mittleider, B. Griffin, and C. Detweiler, “Experimental Analysis of a UAV-Based Wireless Power Transfer Localization System,” vol. 109, 2016, pp. 357–371. doi: 10.1007/978-3-319-23778-7\_24.
- [24] W. Chen, C. Liu, C. H. T. Lee, and Z. Shan, “Cost-effectiveness comparison of coupler designs of wireless power transfer for electric vehicle dynamic charging,” *Energies*, vol. 9, no. 11, 2016, doi: 10.3390/en9110906.
- [25] Y. Li, R. Mai, T. Lin, H. Sun, and Z. He, “A novel WPT system based on dual transmitters and dual receivers for high power applications: Analysis, design and implementation,” *Energies*, vol. 10, no. 2, 2017, doi: 10.3390/en10020174.
- [26] M. A. Houran, X. Yang, and W. Chen, “Magnetically coupled resonance wpt: Review of compensation topologies, resonator structures with misalignment, and emi diagnostics,” *Electron.*, vol. 7, no. 11, 2018, doi: 10.3390/electronics7110296.
- [27] J. Wang, M. Hu, C. Cai, Z. Lin, L. Li, and Z. Fang, “Optimization design of wireless charging system for autonomous robots based on magnetic resonance coupling,” *AIP Adv.*, vol. 8, no. 5, 2018, doi: 10.1063/1.5030445.

- [28] D. Patil, M. K. McDonough, J. M. Miller, B. Fahimi, and P. T. Balsara, "Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges," *IEEE Trans. Transp. Electrifi.*, vol. 4, no. 1, pp. 3–37, 2018, doi: 10.1109/TTE.2017.2780627.
- [29] E. Ayisire, A. El-Shahat, and A. Sharaf, "Magnetic Resonance Coupling Modelling for Electric Vehicles Wireless Charging," *GHTC 2018 - IEEE Glob. Humanit. Technol. Conf. Proc.*, pp. 6–7, 2019, doi: 10.1109/GHTC.2018.8601806.
- [30] P. Machura and Q. Li, "A critical review on wireless charging for electric vehicles," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 104, no. May 2018, pp. 209–234, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.01.027.
- [31] Z. Zhang, H. Pang, A. Georgiadis, and C. Cecati, "Wireless Power Transfer - An Overview," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 2, pp. 1044–1058, 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2835378.
- [32] J. Wang, M. Leach, E. G. Lim, Z. Wang, and Y. Huang, "Investigation of magnetic resonance coupling circuit topologies for wireless power transmission," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 61, no. 7, pp. 1755–1763, 2019, doi: 10.1002/mop.31803.
- [33] W. C. Cheah, S. A. Watson, and B. Lennox, "Limitations of wireless power transfer technologies for mobile robots," *Wirel. Power Transf.*, vol. 6, no. 2, pp. 175–189, 2019, doi: 10.1017/wpt.2019.8.
- [34] T. Bai, B. Mei, L. Zhao, and X. Wang, "Machine Learning-Assisted Wireless Power Transfer Based on Magnetic Resonance," *IEEE Access*, vol. 7, no. M1, pp. 109454–109459, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2933679.
- [35] W. Lee and Y. K. Yoon, "Wireless Power Transfer Systems Using Metamaterials: A Review," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 147930–147947, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3015176.
- [36] S. R. Khan, S. K. Pavuluri, G. Cummins, and M. P. Y. Desmulliez, "Wireless power transfer techniques for implantable medical devices: A review," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 12, pp. 1–58, 2020, doi: 10.3390/s20123487.
- [37] C. H. Lee, G. Jung, K. Al Hosani, B. Song, D. K. Seo, and D. Cho, "Wireless power transfer system for an autonomous electric vehicle," in *In Proceedings of 2020 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), Seoul, Korea (South)*, 2020, no. 4, pp. 467–470. doi: 10.1109/WPTC48563.2020.9295631.
- [38] F. ISSI and O. KAPLAN, "Manyetik Rezonans Kuplajlı Kablosuz Enerji Transfer Sistemi için Empedans Analizi ve Değişken Kapasite Dizisi Uygulaması," *Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol.*, no. December, 2020, doi: 10.29109/gujsc.817922.
- [39] E. Aydın and M. T. Aydemir, "A 1-kW wireless power transfer system for electric vehicle charging with hexagonal flat spiral coil," pp. 2346–2361, 2021, doi: 10.3906/elk-2012-68.
- [40] A. Ağçal and T. H. Doğan, "1 Kw Gücünde Kablosuz Enerji Transfer Sistemi Tasarımı Ve İnsan Sağlığına Etkileri," *Mühendislik Bilim. ve Tasarım Derg.*, vol. 9, no. 3, pp. 856–865, 2021, doi: 10.21923/jesd.936058.
- [41] A. Triviño, J. M. González-González, and J. A. Aguado, "Wireless power transfer

- technologies applied to electric vehicles: A review,” *Energies*, vol. 14, no. 6, 2021, doi: 10.3390/en14061547.
- [42] K. Thiagarajan and T. Deepa, “A Comprehensive Review of High-frequency Transmission Inverters for Magnetic Resonance Inductive Wireless Charging Applications in Electric Vehicles,” *IETE J. Res.*, pp. 1–9, 2021, doi: 10.1080/03772063.2021.1905089.
- [43] M. Song *et al.*, “Wireless power transfer based on novel physical concepts,” *Nat. Electron.*, vol. 4, no. 10, pp. 707–716, 2021, doi: 10.1038/s41928-021-00658-x.
- [44] T. OHORI, W. HIJIKATA, X. LI, H. NAKANISHI, and S. OZAWA, “Wireless Power Transfer System via Magnetic Resonant Coupling for a Mobile Robot with Impedance Matching Mechanism,” *Proc. JSME Annu. Conf. Robot. Mechatronics*, vol. 2021, no. 0, pp. 1P3-G04, 2021, doi: 10.1299/jsmermd.2021.1p3-g04.
- [45] M. K. Uddin, G. Ramasamy, S. Mekhilef, K. Ramar, and Y. Lau, “A Review on High Frequency Resonant Inverter Technologies for Wireless Power Transfer using Magnetic Resonance Coupling,” pp. 412–417, 2014.
- [46] M. M. El Rayes, G. Nagib, and W. G. Ali Abdelaal, “A Review on Wireless Power Transfer,” *Int. J. Eng. Trends Technol.*, vol. 40, no. 5, pp. 272–280, 2016, doi: 10.14445/22315381/ijett-v40p244.
- [47] A. Ahmad, M. S. Alam, and R. Chabaan, “A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles,” *IEEE Trans. Transp. Electrifi.*, vol. 4, no. 1, pp. 38–63, 2017, doi: 10.1109/TTE.2017.2771619.
- [48] E. Aydin, M. T. Aydemir, A. Aksoz, M. El Baghdadi, and O. Hegazy, “Inductive Power Transfer for Electric Vehicle Charging Applications: A Comprehensive Review,” *Energies*, vol. 15, no. 14, pp. 1–24, 2022, doi: 10.3390/en15144962.
- [49] I. Okasili, A. Elkhateb, and T. Littler, “A Review of Wireless Power Transfer Systems for Electric Vehicle Battery Charging with a Focus on Inductive Coupling,” 2022.
- [50] M. T. Arslan and K. Erkan, “Manyetik Rezonans Kuplaj Yöntemiyle Kablosuz Güç Aktarımı Üzerine Literatür Taraması,” *Avrupa Bilim ve Teknol. Derg.*, no. 42, pp. 118–125, 2022, doi: 10.31590/ejosat.1187350.
- [51] S. Y. Hui, “Planar wireless charging technology for portable electronic products and Qi,” *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1290–1301, 2013, doi: 10.1109/JPROC.2013.2246531.
- [52] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, “Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1413–1452, 2016, doi: 10.1109/COMST.2015.2499783.
- [53] M. Dharani and K. Ravi, “Systematic literature review on wireless power transmission,” *Turkish J. Comput. Math. Educ.*, vol. 12, no. 10, pp. 4400–4406, 2021.
- [54] I. Alhamrouni, M. Iskandar, M. Salem, L. J. Awal, A. Jusoh, and T. Sutikno, “Application of inductive coupling for wireless power transfer,” *Int. J. Power Electron. Drive Syst.*, vol. 11, no. 3, pp. 1109–1116, 2020, doi:

10.11591/ijped.v11.i3.pp1109-1116.

- [55] Q. Wang and H. Li, "Research on the wireless power transmission system based on coupled magnetic resonances," *2011 Int. Conf. Electron. Commun. Control. ICECC 2011 - Proc.*, pp. 2255–2258, 2011, doi: 10.1109/ICECC.2011.6067744.
- [56] M. Kesler, "Highly resonant power transfer: Safe, Efficient, over Distance," *WiTricity Corp. Watertown, MA, USA*, 2013.
- [57] C. Qiu, K. T. Chau, C. Liu, and C. C. Chan, "Overview of wireless power transfer for electric vehicle charging," in *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition, EVS 27*, 2013, pp. 1–9. doi: 10.1109/EVS.2013.6914731.
- [58] X. Wei, Z. Wang, and H. Dai, "A critical review of wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Energies*, vol. 7, no. 7, pp. 4316–4341, 2014, doi: 10.3390/en7074316.
- [59] D. C. Ng *et al.*, "Wireless power delivery for retinal prostheses," pp. 8356–8360, 2011.
- [60] V. T. Nguyen, S. H. Kang, J. H. Choi, and C. W. Jung, "Magnetic resonance wireless power transfer using three-coil system with single planar receiver for laptop applications," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 61, no. 2, pp. 160–166, 2015, doi: 10.1109/TCE.2015.7150569.
- [61] O. Jonah and S. V. Georgakopoulos, "Wireless powering of biomedical device via magnetic resonance," *2012 IEEE 13th Annu. Wirel. Microw. Technol. Conf. WAMICON 2012*, pp. 16–21, 2012, doi: 10.1109/WAMICON.2012.6208446.
- [62] J. Liu, X. Zhang, J. Yu, Z. Xu, and Z. Ju, "Performance Analysis for the Magnetically Coupled Resonant Wireless Energy Transmission System," *Complexity*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/6090427.
- [63] K. Na, J. Kim, and Y. J. Park, "Free-Positioning Magnetic Resonance Wireless Power Transfer System for Biomedical Devices," *2019 IEEE Wirel. Power Transf. Conf. WPTC 2019*, pp. 497–501, 2019, doi: 10.1109/WPTC45513.2019.9055698.
- [64] S. Niu, H. Xu, Z. Sun, Z. Y. Shao, and L. Jian, "The state-of-the-arts of wireless electric vehicle charging via magnetic resonance: principles, standards and core technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 114, no. June, p. 109302, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109302.
- [65] S. Y. R. Hui, "Past, Present and Future Trends of Non-Radiative Wireless Power Transfer," vol. 1, no. 1, pp. 83–91, 2016.
- [66] A. Triviño-Cabrera, J. M. González-González, and J. A. Aguado, *Fundamentals of Wireless Power Transfer*. 2020. doi: 10.1007/978-3-030-26706-3\_1.
- [67] V. Shevchenko, O. Husev, R. Strzelecki, B. Pakhaliuk, N. Poliakov, and N. Strzelecka, "Compensation topologies in IPT systems: Standards, requirements, classification, analysis, comparison and application," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 120559–120580, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2937891.
- [68] M. Amjad, M. Farooq-i-Azam, Q. Ni, M. Dong, and E. A. Ansari, "Wireless charging systems for electric vehicles," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 167, no. May 2021, p. 112730, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112730.

- [69] C. Panchal, S. Stegen, and J. Lu, "Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 21, no. 5, pp. 922–937, 2018, doi: 10.1016/j.jestch.2018.06.015.
- [70] P. Vishnuram, P. Suresh, R. Narayanamoorthi, K. Vijayakumar, and B. Nastasi, "Wireless Chargers for Electric Vehicle: A Systematic Review on Converter Topologies, Environmental Assessment, and Review Policy," *Energies*, vol. 16, no. 4, 2023, doi: 10.3390/en16041731.
- [71] Z. Li, C. Zhu, J. Jiang, K. Song, and G. Wei, "A 3-kW Wireless Power Transfer System for Sightseeing Car Supercapacitor Charge," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 5, pp. 3301–3316, 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2584701.
- [72] Ö. F. Tel and Ş. Kuşdoğan, "Elektrikli Araçların Kablosuz Güç İletimi ile Şarj Edilmesi Charging of Electric Vehicles with Wireless Power Transmission," vol. 2, no. 1, 2019.
- [73] B. Fincan and Ö. Üstün, "Kablosuz Enerji Transferinde Bazı Kısıtlar ve Çözümler," *ELECO '2012 Elektr. - Elektron. ve Bilgi. Mühendisliği Sempozyumu*, pp. 455–459, 2012.
- [74] A. P. Sample, D. A. Meyer, and J. R. Smith, "Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 2, pp. 544–554, 2011, doi: 10.1109/TIE.2010.2046002.
- [75] B. H. Waters, B. J. Mahoney, G. Lee, and J. R. Smith, "Optimal coil size ratios for wireless power transfer applications," *Proc. - IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, vol. 1, no. 2, pp. 2045–2048, 2014, doi: 10.1109/ISCAS.2014.6865567.
- [76] N. N. Nanda, S. H. Yusoff, S. F. Toha, N. F. Hasbullah, and A. S. Roszaidie, "A brief review: Basic coil designs for inductive power transfer," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 20, no. 3, pp. 1703–1716, 2020, doi: 10.11591/ijeecs.v20.i3.pp1703-1716.
- [77] X. Liu, C. Xia, and X. Yuan, "Study of the circular flat spiral coil structure effect on wireless power transfer system performance," *Energies*, vol. 11, no. 11, pp. 1–21, 2018, doi: 10.3390/en11112875.
- [78] D. Barth, B. Klaus, and T. Leibfried, "Litz wire design for wireless power transfer in electric vehicles," *WPTC 2017 - Wirel. Power Transf. Conf.*, 2017, doi: 10.1109/WPT.2017.7953819.
- [79] B. Fincan, (2015) *Elektrikli Araçlar İçin Kablosuz Şarj Cihazı Tasarımı* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

# TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

## Makale

1. M. T. Arslan ve K. Erkan, "Manyetik Rezonans Kuplaj Yöntemiyle Kablosuz Güç Aktarımı Üzerine Literatür Taraması", Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, sayı. 42, ss. 118-125, Eki. 2022, doi:10.31590/ejosat.

