

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ KABLOSUZ ŞARJI İÇİN
KATLANABİLİR BOBİN TASARIMI**

Tuğba Halime DOĞAN

**Danışman
Dr. Ali AĞÇAL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elekrik ve Elektronik Mühendisliği ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2025**

© 2025 [Tuğba Halime DOĞAN]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
3. KABLOSUZ ENERJİ TRANSFERİ	10
3.1. Manyetik Rezonanslı Kuplaj Devresi.....	11
3.2. Bobin Tasarımı	13
3.2.1. Spiral Dairesel Bobin.....	14
3.2.2. Dikdörtgen Bobin	15
3.2.3. DD Bobin.....	15
3.2.4. Kare Bobin.....	16
3.2.5. Hekzagonal Bobin	17
3.2.6. Taichi Bobini	18
4. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ KABLOSUZ ŞARJI İÇİN DDD BOBİN TASARIMI.....	19
4.1. Yatay DDD Bobin KET Tasarımı	19
4.2. İHA için Katlanır KET Sistem Tasarımı	22
5. DDD BOBİN VE KATLANIR BOBİN SİMÜLASYON SONUÇLARI	30
5.1. DDD Bobin için Simülasyon Sonuçları	30
5.2. Katlanır KET Sistemi Simülasyon ve Deneysel Sonuçlar	34
6. KARŞILAŞTIRMA	49
7. SONUÇ VE ÖNERİLER (TARTIŞMA VE SONUÇLAR)	51
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	56

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ KABLOSUZ ŞARJI İÇİN KATLANABİLİR BOBİN TASARIMI

Tuğba Halime DOĞAN

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Ali AĞÇAL

Bu tez çalışmasında, insansız hava araçları (İHA) kablosuz şarjı için iki farklı bobin tasarımı yapılmıştır. İHA'lar uzun süreli çalışması gereken uygulamalarda, batarya kapasitesinin düşük olması nedeniyle bataryalarının bir insan tarafından sürekli olarak değiştirilmesi gerekmektedir. Kablosuz güç aktarımı (KGA) ile bu sorun ortadan kalkmaktadır. Kablosuz şarj kullanılarak güvenilir, etkili ve otonom bir çözüm sunulabilmektedir. İHA'ların yakın mesafeden kablosuz şarjı için en uygun teknik endüktif güç aktarım (EGA) tekniğidir. Bu tezde, İHA'ların kablosuz olarak şarj edilmesi için sabit düzlemsel ve katlanabilir DDD bobin tasarımları olarak iki farklı bobin tasarımı yapılmıştır. DDD bobin tasarımında EGA, İHA bacaları ve şarj istasyonu üzerine yerleştirilen alıcı ve verici bobinler ile sağlanmaktadır. Alıcı bobinler, İHA üzerinde dengesizlik ve ağırlık yaratmamak için İHA'nın her iki ayağına hafif ve dengeli bir şekilde yerleştirilmektedir. Tasarım iki adet dikey alıcı bobinden ve yere yerleştirilen 3 adet yatay verici bobinden oluşmaktadır. Katlanabilir bobin tasarımında farklı olarak iki hareketli kenar sargısı ve sabit bir orta sargısı olan üç dikdörtgen düzlemsel spiral bobin yer almaktadır. Vericinin katlanır sargıları, iniş sırasında İHA'nın hizalanmama toleransı en düşük olan eksenini de hizalamayı sağlamaktadır ve böylelikle manyetik kuplajı arttırmaktadır. İHA'nın katlanabilir kablosuz şarj sistemi, 138,1 kHz frekansında 100 W çıkış gücü için tasarlanmıştır. Katlanabilir bobin tasarımının deneysel ölçümlerinde, hizalanmış durumda %97,66 verimliliğe kadar ulaşılmıştır. İki tasarımında ayrı ayrı düşey eksenindeki yanlış hizalama toleransları incelenmiştir. Katlanır tasarım ile 10 cm'ye kadar dikey yanlış hizalanması için %85,48'in üzerinde verimlilik elde edilmiştir. Ayrıca tasarımların manyetik akı yoğunluğu dağılımı incelenerek manyetik saçılım analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İnsansız hava araçları, endüktif kuplaj, manyetik rezonans kuplajı, kablosuz güç aktarımı, kablosuz şarj, iha şarjı.

2025, 68 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

FOLDABLE COIL DESIGN FOR WIRELESS CHARGING OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Tuğba Halime DOĞAN

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ali AĞÇAL

In this thesis, two different coil designs were developed for the wireless charging of unmanned aerial vehicles (UAVs). In applications requiring long operational durations, UAVs face challenges due to limited battery capacity, necessitating frequent manual battery replacements. Wireless power transfer (WPT) offers a solution to this issue, enabling reliable, efficient, and autonomous charging through wireless methods. The most suitable technique for short-range wireless charging of UAVs is inductive power transfer (IPT). This study proposes two distinct coil designs for the wireless charging of UAVs: a fixed planar design and a foldable Double D Double D (DDD) coil design. In the DDD coil design, IPT is achieved using receiver and transmitter coils positioned on the UAV's legs and the charging station, respectively. To avoid instability and additional weight, the receiver coils are lightweight and symmetrically integrated into both legs of the UAV. The design comprises two vertical receiver coils and three horizontal transmitter coils placed on the ground. In contrast, the foldable coil design incorporates three rectangular planar spiral coils: two movable edge windings and one fixed central winding. The foldable transmitter windings enhance alignment along the axis with the lowest alignment tolerance during landing, thereby improving magnetic coupling. The foldable wireless charging system for UAVs is designed to operate at a frequency of 138.1 kHz, delivering an output power of 100 W. Experimental measurements of the foldable coil design demonstrated an efficiency of up to 97.66% in aligned conditions. The vertical misalignment tolerances of both designs were independently analyzed. The foldable design achieved an efficiency greater than 85.48% for vertical misalignments up to 10 cm. Additionally, the magnetic flux density distribution of the designs was evaluated to analyze magnetic leakage.

Keywords: Unmanned aerial vehicles, inductive coupling, magnetic resonance coupling, wireless power transfer, wireless charging, drone charging.

2025, 68 pages

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Dr.Ali AĞÇAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Tuğba Halime DOĞAN
ISPARTA, 2024



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Kablosuz enerji transfer diyagramı (Ağçal, 2014).....	10
Şekil 3.2. Seri-Seri topolojili manyetik rezonans devresi	11
Şekil 3.3. Farklı bobin yapıları (Chittoot vd.,2021)	14
Şekil 3.4. Spiral dairesel bobin (Ağçal vd., 2021)	14
Şekil 3.5. Merkezi solenoidli (RCS) ve Dairesel alıcılı. (Rxc) dikdörtgen ped (Sivagami vd., 2021)	15
Şekil 3.6. Tasarlanmış DD bobini (a) Tx bobini (b) Rx bobini(Song vd., 2020)	16
Şekil 3.7. Dairesel ve kare düzlemsel spiral bobinlerin görüntüsü (Luo vd,2017)	17
Şekil 3.8. Hekzagonal bobin (Castillo vd., 2019)	18
Şekil 3.9. Tx ve Rx bobinlerinin yanal bobin yanlış hizalama konfigürasyonu (a) Taichi bobini (b) DD bobini (c) Dairesel bobin (Li, vd., 2019)	18
Şekil 4.1. İnsansız hava aracı ve DDD bobinli kablosuz şarj istasyonu.....	20
Şekil 4.2. İHA için dikey alıcılı ve yatay DDD vericili bobin tasarımı	22
Şekil 4.3. Eşit uzunlukta iki paralel tel	23
Şekil 4.4. Birbiriyle örtüşen farklı uzunlukta paralel iletkenler	24
Şekil 4.5. Farklı uzunlukta bir kısmı üst üste binen iki paralel iletken.....	24
Şekil 4.6. Üst üste binmeyen iki farklı uzunlukta paralel iletken.....	25
Şekil 4.7. Eşit uzunlukta ve ortak uçlu paralel olmayan teller	25
Şekil 4.8. Farklı uzunlukta ve ayrılmış paralel olmayan teller	26
Şekil 4.9. Katlanır KET şarj istasyonu ve İHA	27
Şekil 4.10. İHA için klasik kesitli bobin tasarımı	28
Şekil 4.11. İHA için katlanır DDD bobin tasarımı	29
Şekil 5.1. Karşılıklı endüktansın değişimi x ve y eksenindeki yanlış hizalamaya göre değişimi (a) bir eksende hizalanmalı diğer eksen hizalama bozulurken ve (b) Her iki eksende hizalanmalı	31
Şekil 5.2. KET Sisteminin (a) dikey ve yatay ekseninde (b) dikey ekseninde manyetik akı yoğunluğu dağılımı	32
Şekil 5.3. MATLAB eşdeğer devresi	33
Şekil 5.4. (a) 0, (b) 45 ve (c) 90 katlama açıları için bobin tasarımları	35
Şekil 5.5. Öz ve karşılıklı endüktans, katlanma açılarına göre değişimi.....	36
Şekil 5.6. X eksenindeki yanlış hizalamaya göre karşılıklı endüktans değişimi.....	37
Şekil 5.7. Farklı katlama açılarına ve yanlış hizalama mesafelerine göre karşılıklı endüktans değişimi	38
Şekil 5.8. Simplorer'daki KET sisteminin ortak simülasyon devresi.....	39
Şekil 5.9. Önerilen katlanabilir kablosuz şarj sisteminin deney düzeneği	40
Şekil 5.10. 90 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış.....	41
Şekil 5.11. 80 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış.....	41
Şekil 5.12. 70 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış.....	42
Şekil 5.13. 60 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış.....	42

Şekil 5.14. 50 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış.....	43
Şekil 5.15. 40 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış.....	43
Şekil 5.16. 30 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış.....	44
Şekil 5.17. 20 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış.....	44
Şekil 5.18. 10 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış.....	45
Şekil 5.19. 0 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış.....	45
Şekil 5.20. 90 derecelik katlama açısında 5 cm yanlış hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış.....	46
Şekil 5.21. 90 derecelik katlama açısında 10 cm yanlış hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış.....	47
Şekil 5.22. 90 derecelik katlama açısında 15 cm yanlış hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış.....	47
Şekil 5.23. Önerilen tasarımın manyetik akı yoğunluğu.....	49

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 5.1. MATLAB/Simulink sonuçları	33
Çizelge 5.2. 90 derecelik katlama açısında hizalanmış ve kritik yanlış hizalama durumları için simülasyon sonuçları	39
Çizelge 5.3. 0 ila 90 katlama açısı için deneysel sonuçlar	46
Çizelge 5.4. 90 derecelik katlanma açısında çeşitli yanlış hizalamalar için deneysel sonuçlar	48
Çizelge 6.1. Diğer çalışmalar ile karşılaştırma	50



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Amper
C	Kondansatör
C ₁	Verici kondansatör
C ₂	Alıcı kondansatör
C _R	Alıcı uyumlandırma kondansatör
C _T	Verici uyumlandırma kondansatör
d	İki tel arası mesafe
EGA	Endüktif güç aktarımı
H	Henry
I ₁	Verici akım
I ₂	Alıcı akım
ICNIRP	The international commission on non-ionizing radiation protection
IEEE	The institute of electrical and electronics engineers
k	Bağlantı katsayısı
KET	Kablosuz enerji transferi
kHz	Kilohertz
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
l	Tel uzunluğu
L ₁	Verici bobin öz endüktansı
L ₂	Alıcı bobin öz endüktansı
L _M	Karşılıklı endüktans
L _R	Alıcı uyumlandırma bobin
L _T	Verici uyumlandırma bobin
nF	Nano farad
PP	Paralel paralel kompanzasyon
PS	Paralel seri kompanzasyon
SS	Seri seri kompanzasyon
SP	Paralel seri kompanzasyon
R	Direnç
R ₁	Verici iç direnç
R ₂	Alıcı iç direnç
R _L	Yük
R _R	Alıcı uyumlandırma iç direnç
R _T	Verici uyumlandırma iç direnç
Q	Kalite faktörü
Q ₁	Verici kalite faktörü
Q ₂	Alıcı kalite faktörü
w	Kablo çapı
ω	Açısal frekans
ω ₀	Doğal Rezonans Frekansı
η	Verim
η _{opt}	En yüksek verim

1. GİRİŞ

KET sistemleri 1890'lı yıllarda Tesla ile başlayıp günümüze kadar devam etmiştir ve güncelliğini korumaktadır. KET sistemleri birçok uygulama alanına sahiptir. Biyomedikal cihazlarda, elektrikli araçlarda, sualtı araçlarda, İHA'larda vb. alanlarda kullanılmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte KET sistemleri daha çok rağbet görmeye başlamıştır. KET sistemleri kullanmak çoğu alanda avantaj sağlamaktadır.

KET sistemlerinin temel motivasyon kaynağı kablo kullanılarak yapılan enerji aktarma sistemlerinin sorunlarına çözüm sunmaktadır. Örneğin; vücut içi implant cihazlarının şarjında kablo kullanımı enfeksiyon riski taşımaktadır. Vücuttan sürekli kablo dışarı kablo çıkartılamaz ve cihazın şarjı bitğinde pilinin değiştirilmesi gerekmektedir. Bu pil değiştirme operasyonunda yine çeşitli riskler taşımaktadır. KET sistemi ise bu sorunlara daha güvenilir bir çözüm sunmaktadır (Ağcal vd.,2022). Bir başka alan olan elektrikli araçlar için ise, KET sistemi elektrikli araçların hareket halinde şarjına imkan tanıyarak araçların menzillerini artırmaktadır ve hareket özgürlüğü tanımaktadır (Ağcal vd.,2023).

KET sisteminde bobin tasarımı oldukça önem taşımaktadır. Bobin tasarlanmadan önce hangi alanda kullanılacağı belirlenmelidir. Dairesel bobin, dikdörtgen bobin, DD bobin, DDQ bobin gibi çeşitli bobin türleri bulunmaktadır. Dairesel bobinin elektromanyetik alan maruziyeti ve kaçak akısı DD bobine göre daha fazladır (Chittoot vd.,2021).

Manyetik rezonanslı KET sistemleri 10 kHz ve üzeri frekanslarda çalışan sistemlerdir. Bu yüzden bobin sarımlarında kullanılan kabloların deri ve yakınlık etkisini önlemek için litz teli kullanılarak sarılmaktadır. Ayrıca kaçak akıyı önlemek için ferrit nüve ve alüminyum levhalar kullanılabilir (Pashaei vd.,2016).

KET sistemlerinde Seri-Seri topoloji (SS), Seri-Paralel topoloji, Paralel-Seri topoloji, ve Paralel-Paralel topoloji gibi çeşitli kompanzasyon topolojileri kullanılmaktadır. SS topoloji diğer topoloji türlerinden daha verimlidir (Doğan vd.,2019).

Günümüzde yapılan uygulamalarda insan etkisinin en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. İHA'lar teslimat, gözetleme, denetim gibi alanlarda

kullanılmaktadır ve kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Zamandan ve insan kaynaklarından tasarruf etmek için kablosuz şarj yapısı önemli bir yer tutmaktadır. İHA şarjını otonom hale getirip daha verimli bir şarj yapısı elde etmek için kablosuz şarj yapısı kullanılmaktadır. İHA kablosuz şarj tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar bulunmaktadır. İHA uygulamalarında yüksek frekanstan kaynaklanan İHA ekipmanlarındaki (kamera, GPS, vb.) manyetik alan hasarı önlemek için manyetik alan yüksekliği sınırlandırılmalıdır. Bunun için çeşitli kalkanlama yöntemleri kullanılmaktadır. Dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise İHA üzerine konumlandırılacak olan alıcı bobinin ağırlığı sınırlı tutulmalıdır. Bobin yanlış hizalaması manyetik akının artmasına, bağlantı katsayısının düşmesine ve verimin azalmasına sebep olmaktadır.

Bu tez İHA kablosuz şarjı için yeni tip bir bobin tasarımının yapılması, manyetik alanının İHA ekipmanlarına zarar vermeyecek şekilde tasarlanmasıdır. İki farklı bobin tasarımı yapılmıştır. İlk tasarımda sabit DDD bobin yapısı kullanılmıştır. İHA ayakları ve şarj istasyonu üzerine konumlandırılmış alıcı ve verici bobinler ile oluşturulmuştur. Alıcı bobinler, İHA'nın dengesini bozmamak ve ağırlık oluşturmamak amacıyla, İHA'nın her iki ayağına hafif ve dengeli bir şekilde yerleştirilmiştir. Bu tasarım, iki dikey alıcı bobin ile zemine konumlandırılmış üç yatay verici bobinden meydana gelmektedir. Katlanabilir bobin tasarımında, iki hareketli kenar sargısı ve sabit bir orta sargıdan oluşan üç dikdörtgen şeklinde düzlemsel spiral bobin bulunmaktadır. Bu tasarımda, İHA üzerine monte edilecek alıcı bobinin sarım sayısının azaltılarak İHA üzerindeki ağırlığın minimumda tutulması hedeflenmiştir. İHA'nın iki bacağına yerleştirilecek dikey bir alıcı bobin yapısı önerilmekte ve verici olarak DDD yapısının daha gelişmiş bir versiyonu düşünülmektedir. Yanlış hizalamayı önlemek amacıyla, verici taraftaki bobinlerin belirli bir açıyla yerleştirilmesi planlanmaktadır.

Bu çalışmada, devre parametrelerinin hesabının MATLAB programında analitik olarak hesaplanması ve devrenin analitik benzetiminin MATLAB-Simulink kullanılarak yapılması planlanmaktadır. Bobin tasarımı ise ANSYS Maxwell 3D programı ile Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak yapılacaktır. Bu çalışmada, İHA için 140 kHz frekansında 100 W çıkış gücüne sahip iki farklı kablosuz şarj tasarımı yapılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

KET sistemleri kabloların kullanımının tehlikeli olduğu yerlerde ya da kablo kirliliği ve maliyetini en aza indirme amacıyla kullanılabilen avantajlı bir yöntem sunmaktadır. KET mikrodalga, lazer, endüktif kuplaj, kapasitif kuplaj gibi yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Manyetik rezonans kuplaj yöntemi ise daha uzak mesafeli iletim sağlamaktadır ve en verimli yöntem olduğu için literatürde sıklıkla kullanılmaktadır (Özder,2020).

KET sisteminde iletim mesafesini ve verimi iyileştirmek için belirli hususlar vardır. Çevrim için kullanılan malzeme ve çevrim geometrisi verimi etkilemektedir. Sistemde kullanılan alıcı ve verici bobinin yanal ya da açısalları hizalanması da üç iletimini etkilemektedir. Ayrıca KET sisteminde yüksek verim elde etmek için uygun frekans değeri elde edilmelidir (Orta, 2019).

KET sisteminin İHA şarjı ile ilgili bazı literatür çalışmaları aşağıda verilmiştir.

T. Campi vd. (2016), İHA'nın KET sistemi ile şarjı için ortaya çıkan elektromanyetik girişim ve elektromanyetik uyumluluk sorunlarını incelemiştir. Sistemi ferrit nüve kullanılmadan ve ferrit nüve kullanıldıktan sonraki manyetik akı ve bağlantı faktörü üzerindeki değişimleri incelemiştir. Ferrit nüve kullanımı ile manyetik akı saçılımı sınırlanmış ve daha yüksek bağlantı faktörü elde edilmiştir. Ferrit nüve alıcı taraftaki ağırlığı arttırmamak için sadece verici tarafta kullanılmıştır. Ayrıca yanal yanlış hizalamanın giriş akımını ve girişten çekilen gücü arttırıp giriş gerilimini ve verimi düşürdüğünü gözlemlemiştir.

Wang vd. (2021), manyetik akıyı modüle etmek ve yanlış hizalama toleransını geliştirmek için vadi doldurma yöntemi (VFM) ve tepe kırpma yöntemi (PCM) olmak üzere iki farklı bobin tasarım yöntemini incelemişlerdir. Yapılan simülasyon ve deneysel sonuçlara göre PCM yönteminin kullanılmasıyla yanlış hizalama toleransının diğer yöntemlere göre daha iyi sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir.

Li vd. (2022), İHA kablosuz şarjı için yüksek dönel yanlış hizalama toleransına sahip yeni bir bobin tasarımı önermişlerdir. Önerilen verici bobin, iç bobin ve dairesel bir dış bobinden oluşmaktadır. Alıcı bobin ise İHA'nın yapısına uygun olması açısından dikey kare hava çekirdekli bobin olarak tasarlanıp İHA'nın iniş takımına yerleştirilmektedir. Bipolar bobinin özelliğinden esinlenerek tasarlanan bu bobin İHA'nın gövdesine nüfus eden manyetik akıyı önemli ölçüde azaltmaktadır. Deneysel sonuçlara göre önerilen bobinin 360° dönme yanlış hizalanmasına karşın kararlı bir çıkış elde edildiği görülmektedir.

Cai vd. (2020), İHA kablosuz şarjında endüktif güç aktarımını kullanmışlardır. İHA ekipmanlarındaki yüksek frekanstan kaynaklanan ısınmayı azaltmak için manyetik alan yüksekliğinin sınırlandırmak için tasarım yapmışlardır. Alıcı bobin İHA'nın iki bacağına da sarılmıştır böylece gövdede meydana gelebilecek dengesizlik probleminin önüne geçilmiştir. Önerilen manyetik kuplör, verici bobinin üzerinden 145 mm yükseklikte manyetik alanın İHA ekipmanlarına zarar vermeyecek derecede sınırlandırmıştır. Ayrıca sistem 260 W gücündeki İHA'yı x eksen yönünde 25 mm, y eksen yönünde 40 mm ve 25° dönel yanlış hizalanma durumunda %91.5 verimlilikle şarj edebilmektedir.

Cai vd., (2021), burada kullanılan sistem, birden fazla paralel enerji aktarım yolu sunarak şarj kapasitesini artırmıştır. Kompakt alıcı bobinler kullanılmıştır. Bu sebeple İHA'nın ağırlığını ve hava akımını olumsuz etkilememiştir. Şarj işlemi sırasında, genişletilmiş verici bobinleri kullanılarak şarj alanı genişletilmiş ve manyetik alan kaçakları azaltılmıştır. Sistemin bir diğer özelliği, her şarj kanalındaki çıkış akımlarının aynı fazda ve eşit genlikte olmasını sağlamaktır. Bu, akım farklılıklarından kaynaklanan olumsuz etkileri en aza indirmiştir ve sistemdeki stabiliteyi artırmıştır. Yapılan deneylerde, sistemin %83.5'e kadar verimlilik sunduğu ve aynı anda dört kanaldan 221 watt güç iletebildiği doğrulanmıştır.

Dawen Ke vd. (2017), elektrikli insansız hava aracının (e-İHA) şarjı için KET önerisi sunmuşlardır. İHA'nın ağırlığı sınırlı olduğu için alıcı bobin küçük boyutta verici bobin ise daha büyük boyutta tasarlanmıştır. Önerilen sistem, e-İHA'nın şarj pedinin üzerindeki farklı noktalarda yeterli enerjiyi almasına

müsaade eden yaklaşık olarak eşit bir manyetik alan üretebilmektedir. Ayrıca, sistem yeterli gücü yüksek verimlilikte iletebilmektedir. Önerilen sistemin doğruluğu simülasyon ve deneysel sonuçlarla kanıtlamıştır.

Zhang vd. (2020), İHA'nın dinamik koşullar altındaki kararlılıklarını ve şarj aralığını geliştirmek için sabit bir çalışma frekansı ile DC bağlantılı ve anahtarlama kapasitör kontrolüne dayalı bir hibrit kontrol yöntemi önerilmiştir. Sistemde yükseltici PFC dönüştürücüsü ile çıkış gerilimi yumuşatılmıştır. Anahtarlı kapasitör ile dinamik koşullar altında self endüktansı dengelemek için kullanılmıştır. Önerilen sistemin %91.9 verimlilik ile 500 W'lık bir İHA'yı şarj edebildiği deneysel düzenek ile doğrulanmıştır.

Yoshitsugu Otomo vd. (2019), KET için manyetik kuplör topoloji optimizasyonu ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu optimizasyonun amacı kaçak akıyı en aza indirip bağlantı katsayısını ise yükseltmektir. Optimizasyon Gauss temel fonksiyonları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Manyetik kuplörün şekli değiştirilerek iki farklı optimizasyon yapılmıştır. Optimize edilmiş manyetik kuplörlerin yanlış hizalamaya karşı bağlantı kat sayısının nispeten daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Fakat kaçak manyetik akının ise optimize edilmemiş geleneksel manyetik kuplöre göre daha yüksek olduğu görülüp bu durumun ilerdeki çalışmalarda inceleneceği belirtilmektedir.

Cancan Rong vd.(2021), kablosuz güç aktarım teknolojisiyle drone şarj etme sistemlerinde bobin hizalama toleransını iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Çalışma, özellikle düşük hizalama durumlarında güç aktarım performansını artırmak için genetik algoritmaya (GA) dayalı bir bobin optimizasyon yöntemini tanıtmaktadır. Çalışmada, verici (Tx) bobin tasarımı geleneksel eşit aralıklı bobinlerden farklı olarak, eşit olmayan aralıklarla düzenlenmiştir. Bu yöntem, manyetik alan dağılımını daha homojen hale getirerek güç aktarımını iyileştirmiştir. Ayrıca, alıcı (Rx) bobininin her dönüşünün farklı yarıçaplara sahip olacak şekilde yapılandırılması, İHA'nın şarj ünitesine uyumunu artırmış ve ağırlığı dengelemiştir. Eşit aralıklı bobinler ile karşılaştırıldığında, önerilen sistemin güç aktarım verimliliği %56.23 oranında daha iyi performans sergilemiştir. Optimize edilmiş iletim bobini, İHA şarjında istikrar sağlamak amacıyla geniş bir hizalama toleransı sağlamıştır. Bobin yapısının, hizalama

hatalarına karşı optimum performans göstermesi için genetik algoritma kullanılarak optimize edilmiştir. Genetik algoritma, çözüm alanında farklı parametreleri değerlendirerek en verimli bobin tasarımını belirlemiştir. Bu yaklaşım, hizalama hatalarından bağımsız olarak enerji iletimi sırasında daha kararlı bir performans sağlamıştır.

Wu vd. (2020), insansız hava araçları için kablosuz şarj sisteminde dik açılı (ortogonal) manyetik yapı kullanan bir bobin tasarımını önermektedir. Bu tasarım, şarj verimliliğini artırmak ve hizalama hatalarını azaltmak amacıyla geliştirilmiştir. Verici bobin, iki dikdörtgen bobini ve bir U şeklinde ferrit çekirdeği içermektedir. Bobinler, U şeklindeki çekirdeğin yan sütunlarına sarılarak akımın ters yönde hareket etmesi sağlanmış, böylece manyetik akının belirli bir alan üzerinde odaklanması amaçlanmıştır. Bu yapı, manyetik devredeki dirençleri düşürerek şarj verimliliğini artırmakta ve elektromanyetik paraziti azaltmaktadır. Ayrıca, alüminyum bir arka plaka kullanılarak gönderici bobinin manyetik akısının sadece istenen yönde yoğunlaşması sağlanmıştır. Alıcı bobin, dikey olarak yerleştirilmiş bir dikdörtgen bobin ve esnek nanokristal yapılı bir yumuşak manyetik çekirdekten oluşmaktadır. Bobin, İHA'nın iniş takımına kolayca entegre edilmiştir, böylece yapısal uyumluluğu artırırken rüzgar direncini minimumda tutar. Dikey yerleştirilmiş olan alıcı bobin, göndericiden gelen yatay manyetik akıyı daha iyi yakalayarak verimli enerji aktarımını sağlar. İHA'nın iniş sırasında yanlış hizalanmasını engellemek için ayrıca pozisyon düzeltme cihazı ile desteklenmiştir, böylece her seferinde yüksek hassasiyetli hizalama sağlanmıştır. Bu mekanizma, İHA iniş yaptığında harekete geçerek alıcı ve gönderici bobinleri tam olarak hizalamakta ve manyetik kuplajın optimum seviyede olmasını sağlamaktadır.

Budhia vd., (2011), elektrikli araçların (EA) kablosuz şarjı için tasarlanan döngüsel manyetik yapılar (güç pedleri) üzerine yoğunlaşmaktadır. Çalışmanın temel amacı, güvenli ve verimli enerji aktarımını mümkün kılacak yüksek performanslı bir manyetik yapı geliştirmektir. Bu doğrultuda, çeşitli güç pedleri üzerinde üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş ve en uygun tasarım parametreleri belirlenmiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen 700 mm çapındaki güç pedi, 200 mm hava boşluğu ve 260 mm çapında bir şarj bölgesi ile

2 kW'lık güç aktarımı sağlamaktadır. Bu durum, araçların kablosuz olarak kolay ve etkin bir şekilde şarj edilmesini mümkün kılmaktadır. Optimizasyon sürecinde, en az sayıda ferrit çubuk kullanılarak maksimum güç aktarımının sağlanması hedeflenmiş ve bu sayede hafif, düşük maliyetli ve dayanıklı ped tasarımları elde edilmiştir. Dairesel bobin tasarımı, elektrikli araçların sabit konumda şarj edilmesi gereken park alanları veya garajlar gibi sabit pozisyonlarda yüksek verimlilikle çalışabilmesi nedeniyle ideal bir çözümdür. Bununla birlikte, bobin çapının %40'ı kadar yatay pozisyon değişikliği, güç aktarımında azalmaya neden olabilir. Bu da yatay pozisyon toleransını sınırlamaktadır. Ayrıca, dairesele tasarım çevreye kaçak manyetik alan yayabileceğinden, insan sağlığını koruma amacıyla ICNIRP gibi güvenlik standartlarına uyum sağlanması gerekmektedir. Bobinin verimli çalışabilmesi için ferrit kullanımı zorunlu olsa da fazla miktarda ferrit kullanımı hem ağırlığı hem de maliyeti artırabilmektedir.

Sivagami vd., (2021), elektrikli araçların kablosuz enerji transferi için merkezi solenoide sahip dikdörtgen verici pad kullanılarak, dikdörtgen ve dairesele alıcı geometrilerinin performansları karşılaştırılmıştır. Analizler, yanlış hizalamaya tolerans, bağlanma katsayısı, kendinden endüktans ve manyetik akı sızıntısı gibi parametreler üzerinden yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlar, dikdörtgen yapının Y eksenindeki yanlış hizalamalara karşı daha dayanıklı olduğunu ve X ekseninde ise endüktans değişiminde daha tutarlı bir yapı sergilediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, dairesele yapının aynı verim için iki katı bakır kullanması gerektiğinden, ağırlık ve maliyet açısından dezavantajlı olduğu belirlenmiştir. Merkezi solenoid sayesinde bağlanma katsayısının arttığı ve özellikle küçük X eksen sapmalarının olduğu durumlarda dikdörtgen yapının daha yüksek performans sunduğu görülmüştür. Sonuç olarak, dikdörtgen geometrinin maliyet etkinliği ve dayanıklılığı nedeniyle kablosuz enerji transferi uygulamalarında daha uygun bir seçenek olduğu saptanmıştır.

Song vd., (2020), Yüksek hizalama toleransı ve düşük elektromanyetik alan yayılımına sahip bir çift-D (DD) bobin tasarımını incelemektedir. Çalışma, Society of Automotive Engineers (SAE) tarafından önerilen J2954 standardındaki DD bobin yapısını temel almakta ve çeşitli yenilikçi tasarım

iyileştirmeleri sunmaktadır. Makalede, bobin hizalama toleransını artırmak için verici (Tx) ve alıcı (Rx) bobin parametreleri optimize edilmiştir. Öne çıkan noktalar arasında, manyetik kaçakları en aza indiren ve elektromanyetik alan yayılımını azaltan bir E şeklinde çekirdek ile merkezi çökertilmiş bobin yapısının kullanılması yer almaktadır. Çalışmada, deneysel olarak 6.6 kW güç aktarımı ve %95'e varan verimlilik elde edilmiştir. Tasarım, elektromanyetik yayılımı ICNIRP'nin belirlediği 27 μ T limitinin altında tutarken hizalama toleransını da iyileştirmiştir. DD bobin yapısı, alıcı ve verici bobinler tam hizalı olmadığında bile enerji aktarım verimliliğini koruyarak daha geniş bir şarj alanı sunmaktadır. Bu özellik, araç park yerlerinde veya araçların tam hizalanmadığı durumlarda etkili bir şarj imkanı sağlamaktadır. Ayrıca, elektromanyetik alan (EMF) yayılımını azaltarak insan sağlığı açısından güvenliği artırmaktadır ve diğer elektronik cihazlarla olan etkileşimi en aza indirmektedir. Optimum performans elde edebilmek için uzunluk, genişlik oranı ve sargı sayısı gibi çeşitli parametrelerin titizlikle tasarlanması gerekmektedir. Bu durum DD bobin yapısını diğer bobin yapılarına kıyasla daha karmaşık bir tasarım süreci haline getirmektedir.

Cai vd., (2020), alıcı bobin dikey olarak yerleştirilmiş ve verici pedine dik olarak konumlandırılmıştır. Alıcı bobin İHA'nın tek bacağına yerleştirilmiştir. Bu durum İHA'da bir dengesizlik oluşturmuştur. Sistem %98'lik bir verimlilik ile İHA'ya 500W'lık gücü iletebilmiştir.

Yang vd., (2019), İHA ile şarj platformu arasındaki hizalama hatalarını telafi edebilen, orta menzilde yüksek verimli şarj yapabilen manyetik olarak bağlanmış rezonant kablosuz güç aktarım (MCR-WPT) teknolojisini kullanmıştır. Sistem tasarımında asimetrik dairesel bobin kullanılmıştır. Sistem, %57,94 verimlilik ile 64,87 W güç aktarımı sağlamıştır. Tasarımda seri paralel (SP) kompanzasyon topolojisi kullanılmıştır. Sistemin 0,5 metre mesafede minimum enerji kaybıyla verimli güç aktarımı sağlayabileceği gösterilmiştir.

Cai vd., (2020), İHA'ların iç ekipmanlarına zarar verebilecek yüksek frekanslı manyetik alan etkilerini önlemek için yeni bir çapraz tip manyetik kaplin geliştirilmiştir. Sistemin 260 W güç ile İHA'ları %91.577 verimlilikle şarj

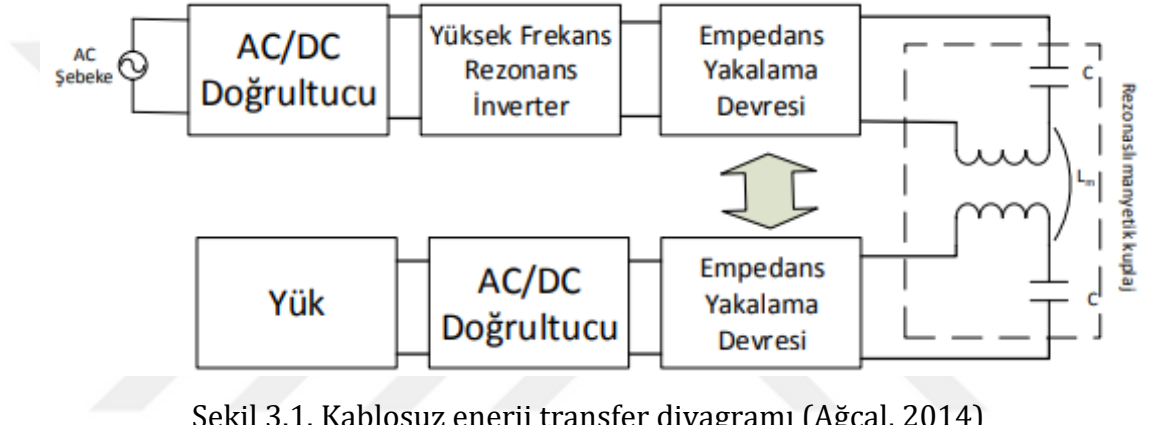
edebildiği görülmüştür. Ayrıca, X ekseninde 25 mm, Y ekseninde 40 mm ve 25° rotasyon toleransı ile hizalamaya karşı dayandığı görülmüştür. Alıcı bobin, İHA'nın iki iniş takımına eşit olarak bölünerek yerleştirilmiştir. Böylece İHA'nın dengesinin bozulması önlenmiştir. Ayrıca bu tasarım, sistemin ağırlığını ve hacmini azaltarak İHA'ların performansını etkilemeden etkili güç transferi sağlanmıştır.

Chai vd., (2022), İHA'lar için iki ortogonal vericili ve çift L tipi ferritli manyetik bir kaplini temel alan kablosuz şarj sistemini ele almıştır. Alıcı bobin İHA'nın tek bir bacağına yerleştirildiği için dengesizlik oluşmuştur. İki ortogonal vericili manyetik yapı, diğer mevcut tasarımlara kıyasla daha yüksek bir bağlanma katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Deneysel prototipte maksimum %91,02 verimlilikle 102 W çıkış gücü elde edilmiştir.

Wang vd., (2023), sistem birden fazla enerji aktarım modülünün paralel çalıştırılmasıyla İHA'ların şarj kapasitesini artırırken, aktif bir dalgalanma azaltma stratejisi ile şarj esnasındaki enerji kayıplarını ve pil ömrünü etkileyen dalgalanmaları minimuma indirmeyi amaçlamıştır. Birden fazla kablosuz enerji aktarım modülü paralel olarak çalıştırılarak şarj kapasitesi artırılmıştır. Akım dalgalanmalarını azaltmak için gerçek zamanlı bir akım tahminine dayalı aktif bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem, İHA'nın üzerine ek sensörler eklenmeden, şarj sırasında oluşan enerji dalgalanmalarını %79,06 oranında azaltmıştır. Deneysel çalışmalar, sistemin tek modüle göre %145,5 daha fazla güç ürettiğini ve dalgalanma azaltma tekniği sayesinde şarj verimliliğinin %5 oranında iyileştirildiğini göstermiştir.

3. ENDÜKTİF KUPLAJLI KABLOSUZ ENERJİ TRANSFER SİSTEMLERİ

Kablosuz güç aktarımı elektrik enerjisinin kablolar yerine manyetik bağlantı ile iletilmesi durumudur. Bu teknoloji mobil cihazlarda, vücut içi implant cihazlarında, elektrikli araç şarjında, İHA şarjında olmak üzere birçok uygulama alanına sahiptir. Kablosuz güç aktarımı çeşitli yollarla yapılabilir. Yakın alanda en verimli ve sık kullanılan yöntem manyetik rezonanslı kuplaj yöntemidir. Manyetik rezonanslı kuplajlı KET sisteminin diyagramı Şekil 3.1 de gösterilmiştir (Ağçal, 2014).

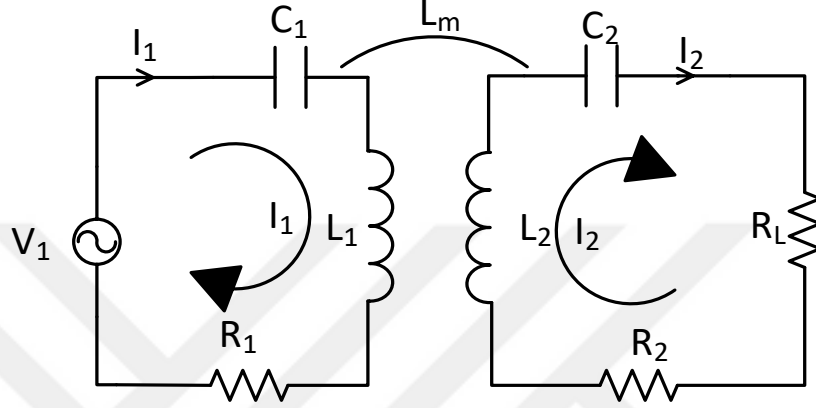


Şekil 3.1. Kablosuz enerji transfer diyagramı (Ağçal, 2014)

Şekil 3.1’de verilen KET diyagramına göre, giriş gücü genellikle AC/DC doğrultucudan sağlanmaktadır. Ayrıca PV sistem ya da akü grubundanda direk DC besleme alınabilir. Verici rezonatörünün çalıştırılması amacıyla, DC gerilim, hedeflenen rezonans frekansında kare dalga gerilime dönüştürülmek üzere yüksek frekanslı bir evirici aracılığıyla işlenmektedir. Empedans yakalama devresi ise verici rezonatörünün empedansını alıcı rezonatöre uygun bir empedansa çevrilmesini sağlamaktadır. KET’in kalbi ise manyetik rezonanslı kuplaj kısmıdır. Burada verici ve alıcı endüktanslar arasında manyetik bağlantı sağlanır. Verici ve alıcı arasındaki enerji aktarımının daha verimli olması için kompanzasyon görevi yapan alıcı ve verici kondansatörler kullanılmaktadır. İkinci empedans yakalama devresi rezonatörden yüke verimli enerji aktarımı sağlamaktadır. Son olarak DC gerilime ihtiyaç duyan yüklerden dolayı doğrultucu kullanılarak alternatif akım doğru akıma çevrilmektedir (Ağçal, 2014).

3.1. Manyetik Rezonanslı Kuplaj Devresi

Manyetik rezonans kuplajı, yakın alan WPT için en uygun yöntemdir. Verici ve alıcı arasında enerji transferi için bobinlerin manyetik kuplajını kullanır. Ayrıca, bobinlere bağlı kapasitörler kullanılarak WPT'ye rezonans frekansında maksimum verimlilik sağlanır. SS topolojili manyetik rezonanslı KET eşdeğer devresi Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Seri-Seri topolojili manyetik rezonans devresi

Şekil 3.2'deki eşdeğer devreye göre V_s giriş gerilimini, R_1 ve R_2 verici ve alıcı sistemlerin iç dirençlerini, C_1 ve C_2 alıcı ve vericinin rezonans kondansatörlerini, L_1 verici bobini, L_2 alıcı bobini, M karşıt endüktansı R_L ise yük direncini göstermektedir. Elektrik devrelerinde bir kondansatör ve bir bobin varsa aralarında enerji salınımı meydana gelmektedir. Kondansatördeki enerjinin hepsi bobine aktarılmaktadır, bobindeki enerji ise tekrar kondansatöre aktarılmaktadır. Bu salınımın en yüksek olduğu frekansa ise rezonans frekansı denilmektedir. Rezonatörün doğal açısal rezonans frekansı denklem (3.1)'de, kalite faktörü ise denklem (3.2)'de verilmiştir.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

$$Q = \sqrt{\frac{L}{C}} \times \frac{1}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} \quad (3.2)$$

KET sistemlerinde alıcı ve verici bobinler arasındaki manyetik bağlantı karşılıklı endüktans ile sağlanmaktadır. Manyetik bağlantının oranı karşılıklı endüktans ile alıcı ve verici bobinlerin endüktanslarının geometrik ortalaması oranlanarak

belirlenmektedir. Bu bağlantı oranı ya da diğer adıyla bağlantı faktörü, k ile gösterilmektedir. Bağlantı faktörü ve karşılıklı endüktans arasındaki ilişki denklem (3.3)'te verilmiştir.

$$L_m = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (3.3)$$

Kritik karşılıklı endüktans, doğal rezonans frekansına, yük direncine ve bobinlerin ve kapasitörlerin iç direncine bağlıdır. SS topolojisi için kritik karşılıklı endüktans Denklem (3.4) de verilmiştir. Denklem (3.5)'te KET'in verimliliği en yüksek seviyededir, ancak denklem (3.6)'da bu verimlilik maksimum seviyenin altına düşmektedir (Imura vd., 2011).

$$L_{m_{kritik}}^2 = \frac{R_L^2 - R^2}{\omega^2} \quad (3.4)$$

$$L_m^2 > \frac{R_L^2 - R^2}{\omega^2} \quad (3.5)$$

$$L_m^2 < \frac{R_L^2 - R^2}{\omega^2} \quad (3.6)$$

$L_{mkritik}$, kritik karşılıklı endüktans olarak tanımlanmaktadır ve bu büyüklük doğal rezonans frekansı, yük direnci ve rezonatörlerin iç direnci gibi parametrelere bağlıdır. Karşılıklı endüktans, kritik karşılıklı endüktanstan büyük olduğunda, KET en yüksek verimlilikle çalışmaktadır. Bu durumda, karşılıklı endüktansın artırılması verimlilik üzerinde bir değişiklik yaratmamaktadır, ancak rezonans frekansı doğal rezonans frekansından sapmaktadır. Öte yandan, karşılıklı endüktans kritik karşılıklı endüktanstan daha düşükse, verimlilik maksimum seviyenin altında kalmaktadır ve rezonans frekansı doğal rezonans frekansına eşit olmaktadır. Bu durumda, karşılıklı endüktansın azalması verimliliği hızla düşürmektedir.

Sistemin optimum verimini belirlemek için yararlılık katsayısı kullanılır ve U ile gösterilmektedir. Optimum verim sistemin ulaşabileceği en yüksek verim olup, η_{opt} ile gösterilir. Yararlılık katasayısı denklem (3.7)'de ve U fonksiyonuna bağlı optimum verim denklem (3.8)'de verilmiştir.

$$U = k\sqrt{Q_1 Q_2} \quad (3.7)$$

$$\eta_{opt} = \frac{U^2}{(1+\sqrt{1+U^2})^2} \quad (3.8)$$

Şekil 3.2’de SS devre topolojisi kullanılan KET sistemi için eşdeğer empedans denklem (3.9)’da ve verim denklem (3.10)’da verilmiştir (Doğan vd., 2024).

$$Z_{E\dot{s}} = \frac{V_S}{I_1} = Z_1 + \left(\frac{1}{j\omega C_1} \right) + \left(\frac{L_m^2 \omega^2}{Z_2 + \left(\frac{1}{j\omega C_2} \right) + R_L} \right) \quad (3.9)$$

$$\eta = \left| \left(\frac{j\omega L_m}{j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2 + R_L + R_2}} \right)^2 * \frac{R_L}{Z_{E\dot{s}}} \right| \quad (3.10)$$

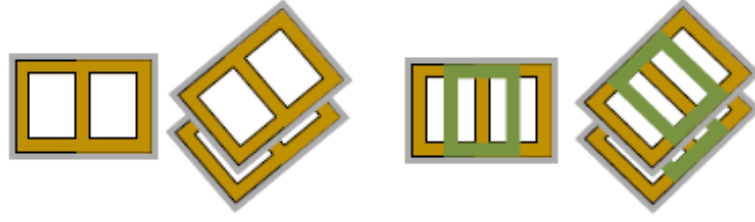
Verilen teorik denklemlerle devrenin analitik hesabı MATLAB kullanılarak yapılmıştır.

3.2. Bobin Tasarımı

Bobin tasarımı manyetik rezonanslı kuplajlı KET sisteminde önemli bir rol oynar. Bobinlerin tasarımı ve yapısı sistemin güç aktarımını ve gücün ne kadar mesafeye aktarılacağını belirlemektedir (Chittoot vd.,2021). Bobinler genellikle tam hizalanma durumu için tasarlanır. Bazı çalışmalarda belirli bir hizalanma toleransında çalışacak şekilde de tasarlanmaktadır. Sadece hizalanmış durumda çalışan sistemlerde hizalanmama durumu enerji kaybına sebep olduğundan dolayı verimi düşürmektedir (Arslan vd., 2022).

Literatürde İHA şarjı için kullanılan bazı bobin yapıları Şekil 3.3’te verilmiştir.



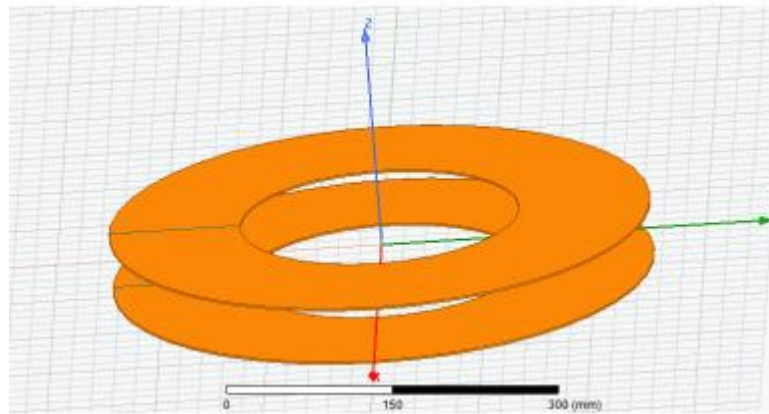


Şekil 3.3. Farklı bobin yapıları (Chittoot vd.,2021)

3.2.1 Spiral Dairesel Bobin

KET sistemlerinde dairesel bobin tasarımı basit yapısı ve girdap akımlarının daha az olması sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Chittoot vd.,2021).

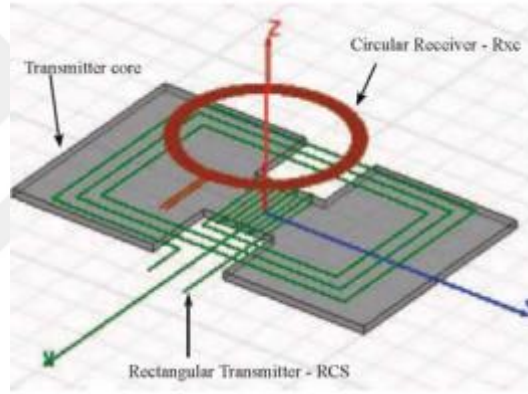
Dairesel bobin tasarımı, elektrikli araçların sabit konumda şarj edilmesi gereken park alanları veya garaj gibi belirli alanlarda yüksek verimlilik sağlaması nedeniyle ideal bir çözüm sunmaktadır. Ancak dairesel tasarımın çevreye kaçak manyetik alan yayma potansiyeli olduğundan, insan sağlığını korumak amacıyla ICNIRP gibi uluslararası güvenlik standartlarına uyum sağlanması gereklidir. Bobinin verimli çalışması için ferrit kullanılması gerekmektedir. Ancak faza ferrit kullanımı hem cihazın ağırlığını hem de maliyetini önemli ölçüde artırabilmektedir (Budhia vd., 2011). Ayrıca, spiral dairesel bobin geniş bir yüzey alanı kapladığı için İHA üzerinde ciddi bir hava sürtünmesi ve ağırlık yapmaktadır. Şekil 3.4'te düzlemsel dairesel spiral bobin yapısı verilmiştir.



Şekil 3.4. Spiral dairesel bobin (Ağçal vd., 2021)

3.2.2 Dikdörtgen Bobin

Dikdörtgen bobin yapısı, uzun kenarı eksenini boyunca hizalama hatalarına karşı daha dayanıklı olup, kısa kenarın ekseninde ise ortak endüktans değişiminde daha duyarlı bir performans göstermektedir. Ayrıca, dairesel yapının aynı verim seviyesine ulaşabilmesi için iki katı bakır kullanması gerektiğinden, ağırlık ve maliyet açısından dezavantajları bulunmaktadır. Dikdörtgen geometrinin maliyet etkinliği ve dayanıklılığı sayesinde kablosuz enerji transferi uygulamaları için daha uygun bir seçenek olduğu belirlenmiştir (Sivagami vd., 2021). Şekil 3.5'te düzlemsel dikdörtgen spiral bobin yapısı gösterilmiştir.

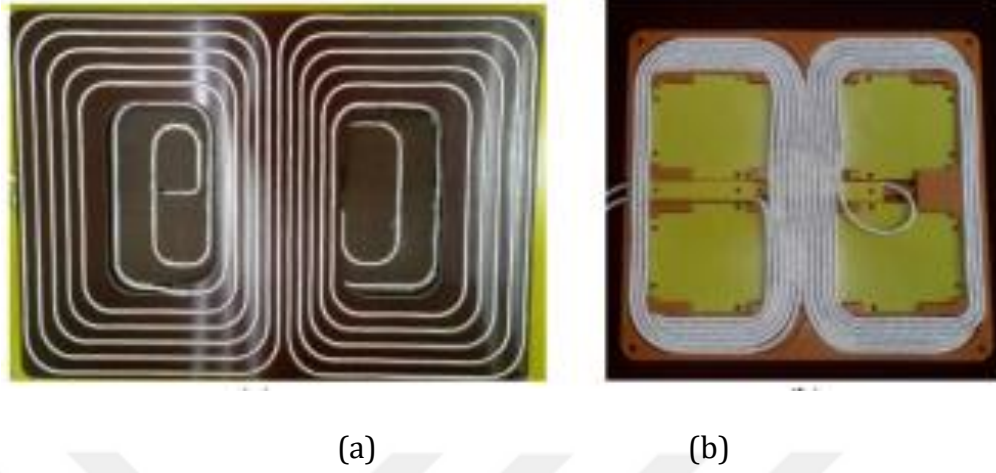


Şekil 3.5. Merkezi solenoidli (RCS) ve Dairesel alıcılı (Rxc) dikdörtgen ped (Sivagami vd., 2021)

3.2.3 DD Bobin

DD bobin yapısı, alıcı ve verici bobinlerin tam hizalı olmaması durumunda dahi enerji aktarım verimliliğini koruyarak daha geniş bir şarj alanı sağlamaktadır. Araç park alanlarında veya araçların tam hizalanmadığı durumlarda etkili bir şarj olanağı sunmaktadır. Ayrıca, elektromanyetik alan yayılımını azaltarak insan sağlığı açısından güvenliği artırmakta ve diğer elektronik cihazlarla etkileşimi en aza indirmektedir. Optimum performans elde etmek için uzunluk-genişlik oranı ve sargı sayısı gibi çeşitli parametrelerin özenle tasarlanması gerekmektedir. Bu durum, DD bobin yapısını diğer bobin yapılarına kıyasla daha

karmaşık bir tasarım süreci haline getirmektedir (Song vd., 2020). Düzlemsel spiral DD bobin yapısı Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Tasarlanmış DD bobini. (a) Tx bobini. (b) Rx bobini (Song vd., 2020)

3.2.4 Kare Bobin

Spiral kare bobinler, geniş endüktif alan ve yüksek öz indüktanslar gibi özelliklerle kablosuz güç dağıtım uygulamalarında avantaj sağlamaktadır. Ancak maliyet, üretim karmaşıklığı ve manyetik alan gibi dezavantajlar nedeniyle çok tercih edilmemektedir.

Elektrikli cihazların kablosuz güç aktarımı sistemlerinde kare ve dairesel düzlemsel spiral bobinler karşılaştırıldığında, aynı boyutlardaki kare bobinlerin öz indüktans değerleri, dairesel bobinlere kıyasla daha hızlı artmakta ve daha yüksek değerler göstermektedir. Kare bobinlerin, özellikle yüksek manyetik geçirgenlikli ferrit malzemelerle desteklendiklerinde KET sistemlerinde dairesel bobinlere göre daha güçlü bir endüktif bağlantı desteği göstermektedir. Geniş endüktif alan oluşturma kapasitesi sayesinde kare bobinler, elektrikli araçlar kablosuz şarj platformları gibi uygulamalar için ideal bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, kare bobinlerin, yuvarlak bobinlere kıyasla yanıl yanıl hizalanma durumunda, bağlantı akışındaki değişimin daha kontrollü bir düşüş sergilediği görülmüştür (Luo vd,2017). Ancak, kare düzlemsel spiral bobin geniş bir yüzey alanı kapladığı için İHA üzerinde ciddi bir hava sürtünmesi

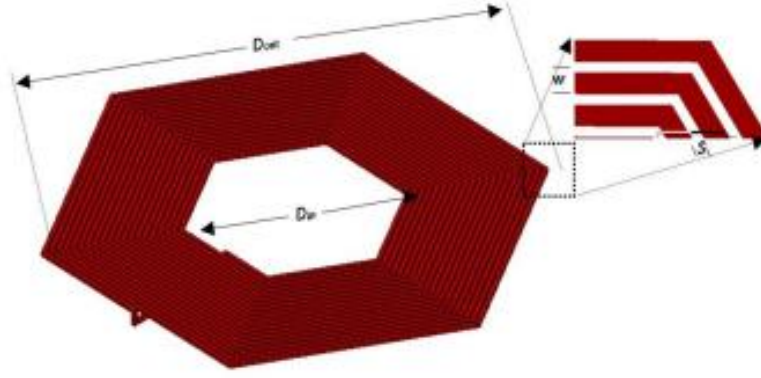
yapmaktadır. Düzlemsel spiral dairesel ve kare bobin yapısı Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Dairesel ve kare düzlemsel spiral bobinlerin görüntüsü (Luo vd,2017)

3.2.5 Hekzagonal Bobin

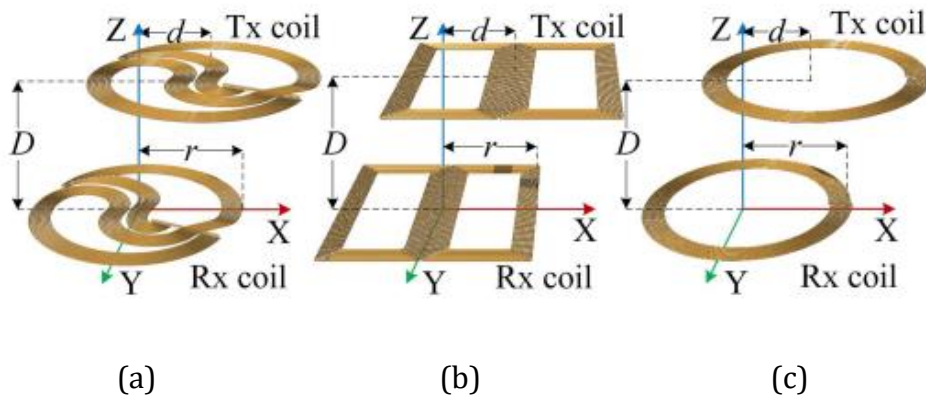
Endüktif kablosuz güç aktarımı için çeşitli bobin geometrileri kullanılmakta olup, her birinin belirli uygulamalar için avantajları ve sınırlamaları vardır. Dairesel bobinler, elektrikli araçların yüksek güç gereksinimlerini karşılamada yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, farklı bobin yapılarını incelemek önemlidir. Hekzagonal bobin tasarımı sistem verimliliğini artırırken nüve ve bakır kullanımını azaltan, dolayısıyla KET sisteminin ağırlığını hafifleten bir bobin tasarımıdır. Altıgen bobin, dairesel bir bobin pedi ile karşılaştırıldığında bobin ağırlığını çok daha fazla azaltmıştır. Ancak, altıgen bobinin dönüşlerindeki bükülme ve sapma açılarından kaynaklanan hava boşlukları, sistemin verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle, bobin imalat sürecinde özellikle geometrinin köşelerindeki dönüşlere özen gösterilmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Castillo vd., 2019). Düzlemsel spiral hekzagonal bobin yapısı Şekil 3.8’da gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Hekzagonal bobin (Castillo vd., 2019)

3.2.6. Taichi Bobini

Kablosuz güç aktarımı uygulamalarında hizalama sorunlarına karşı dayanıklı bir bobin tasarımı olarak Taichi bobin yapısında önermektedir. Taichi bobini özellikle hizalama hatalarına daha yüksek tolerans sağlayarak KGA sistemlerinin verimliliğini artırabileceği öne sürülmektedir. DD ve dairesel bobinlere kıyasla Taichi bobininin yatay hizalama hatalarına karşı daha iyi performans sergilediği tespit edilmiştir. Taichi bobini, merkezden kenara kadar sabit ve yüksek yoğunlukta manyetik akı sağlayarak, hizalama sırasında enerji verimliliğinin korunmasına katkı sağlamaktadır. DD ve dairesel bobinlere göre hizalama hatalarından daha az etkilendiği ve sistemin verimliliğini daha yüksek bir seviyede tuttuğu gözlemlenmiştir (Li, vd., 2019). Düzlemsel spiral Taichi bobin yapısı Şekil 3.8’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Tx ve Rx bobinlerinin yanıl bobin yanıl hizalama konfigürasyonu (a) Taichi bobini (b) DD bobini (c) Dairesel bobin (Li, vd., 2019)

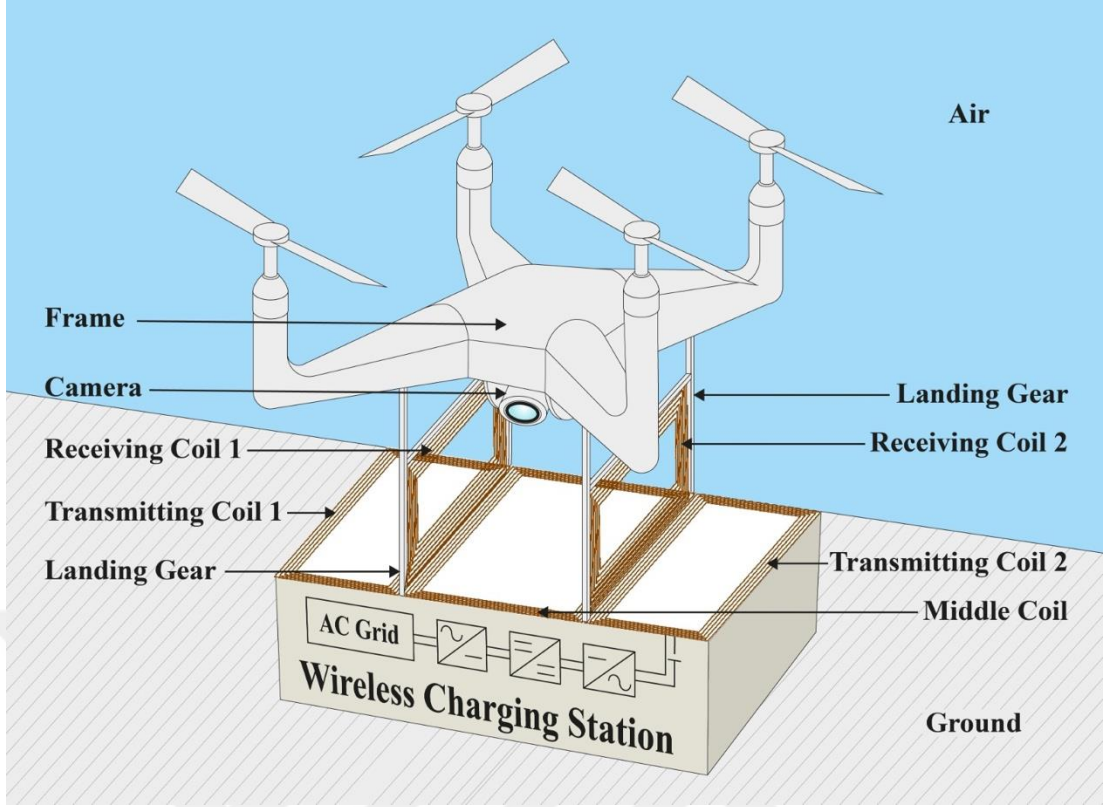
Bu çalışmada, KET sistemi için sabit düzlemsel DDD bobin ve katlanabilir bobin tasarımı yapılacaktır. Bobin tasarımı ANSYS® Maxwell 3D programı ile gerçekleştirilecektir.

4. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ KABLOSUZ ŞARJI İÇİN DDD BOBİN TASARIMI

Bu bölümde İHA'ların kablosuz şarjı için tasarlanan iki farklı DDD bobin tasarımı anlatılmaktadır.

4.1 Yatay DDD Bobin KET Tasarımı

İHA bataryalarının şarjı için KET sistemlerinin kullanımı İHA'ya hareket özgürlüğü sağlar ve otonom şarj için imkan tanır. Manyetik rezonanslı kuplaj metodu yakın alan KET için en uygun yöntemdir. Verici ve alıcı sistem arasındaki güç aktarımı, bobinler arasındaki manyetik bağlantı ile sağlanmaktadır. Ayrıca, KET sistemi, bobinlere bağlanan kapasitörler sayesinde rezonans frekansında en yüksek verimlilikle çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Bu tür KET sistemleri, insansız hava araçlarının (İHA) otonom olarak daha uzun mesafelere ulaşmasını mümkün kılmaktadır. Şekil 4.1'de, İHA ve DDD bobinli KET ünitesi örnek bir tasarım olarak sunulmuştur.



Şekil 4.1. İnsansız hava aracı ve DDD bobinli kablosuz şarj istasyonu

Bu sistemde kompanzasyon topolojisi olarak seri-seri (SS) topolojisi tercih edilmiştir. Rezonans frekansında, endüktif ve kapasitif reaktif güçler birbirini dengeler. Bu dengeleme sayesinde sistemde reaktif güç minimuma iner ve giriş empedansı yalnızca aktif bileşenden oluşur. Bu durum, enerji transferinin verimli bir şekilde gerçekleşmesine olanak tanır, çünkü güç faktörü maksimum seviyeye ulaşır ve sistemde enerji kayıpları azalır. Sistemin verimliliği, frekans (f), yük direnci (R_L), karşılıklı endüktans (L_M) ve rezonans frekansında bobinlerin iç direncine bağlıdır.

Karşılıklı endüktans, paralel tellerin birbirine olan mesafesi ve tellerin uzunluğuyla ilişkilidir. Paralel teller arasındaki karşılıklı endüktans, teller eşit uzunlukta olduğunda Denklem (4.1), eşit uzunlukta olmadığında ise Denklem (4.2) ile ifade edilmektedir.

$$L_m(l, d) = 0.002l \left[\ln \left(\frac{l}{d} + \sqrt{1 + \frac{l^2}{d^2}} \right) - \sqrt{1 + \frac{l^2}{d^2}} + \frac{l}{d} \right] \quad (4.1)$$

$$L_m = \frac{1}{2} [(L_m(m + p, d) + L_m(m + q, d)) - (L_m(p, d) + L_m(q, d))] \quad (4.2)$$

Burada l , uzun iletkenin uzunluğunu; d , iletkenler arasındaki mesafeyi; m , kısa iletkenin uzunluğunu ifade etmektedir. Uzun iletkenin, sol ve sağ tarafındaki kısa iletkenlerle arasındaki uzunluk farkları sırasıyla p ve q olarak ifade edilmektedir. Bu bağlamda, tüm uzunluklar santimetre (cm) biriminde belirtilmiştir.

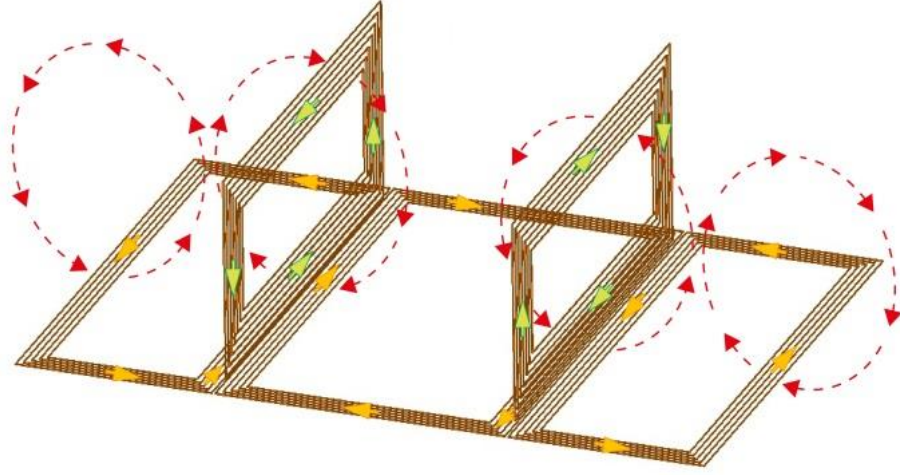
Eğer sistemde birden fazla iletken bulunuyorsa, eşdeğer ortak endüktans, pozitif ve negatif karşılıklı endüktansların farkı üzerinden hesaplanmaktadır. Bu yöntem, sistemdeki toplam endüktansın belirlenmesinde temel bir rol oynamaktadır. Bu işlem, Denklem (4.3)'te gösterildiği şekilde ifade edilmektedir.

$$L_{mE} = L_{m+} - L_{m-} \quad (4.3)$$

Aynı akım yönündeki iletkenler pozitif karşılıklı endüktansa katkıda bulunurken, zıt akım yönündeki iletkenler negatif karşılıklı endüktansa katkıda bulunmaktadır. Bobinler tasarlanırken karşılıklı endüktansın maksimum olmasına özen gösterilmelidir.

İHA kablosuz şarjına yönelik literatürde farklı bobin tasarımları bulunmaktadır. En yaygın kullanılanlar arasında dairesel, kare ve dikdörtgen düzlemsel spiral bobinler yer almaktadır. Bu tasarımlar İHA'nın bacaklarının altına yerleştirilmektedir. Geniş hacimli ve yüzey alanlı bu tasarımlar İHA'nın aerodinamiğini bozacak kadar yer kaplamaktadır. İHA ayağına yerleştirilen bobin tasarımları daha hafiftir ve İHA üzerinde daha az manyetik alan etkisi yaratmaktadır. Ancak, tek bir ayağa monte edilen bobin tasarımları, İHA'nın ağırlık merkezini kaydırarak denge sorunlarına yol açabilmektedir. Bu nedenle Şekil 4.2'deki gibi 2 ayak üzerine yerleştirilen dengeli bobin tasarımları tercih edilmektedir. Bu çalışmada önerilen tasarım, İHA'nın ayaklarına yerleştirilen iki dikey alıcı bobin ile yere konumlandırılmış üç yatay verici bobinden oluşmaktadır. Bu yaklaşım, denge problemlerini minimize ederek sistemin

stabilitesini artırmayı hedeflemektedir. Dikey alıcılı ve yatay DDD vercili bobin tasarım modeli Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. İHA için dikey alıcılı ve yatay DDD vercili bobin tasarımı

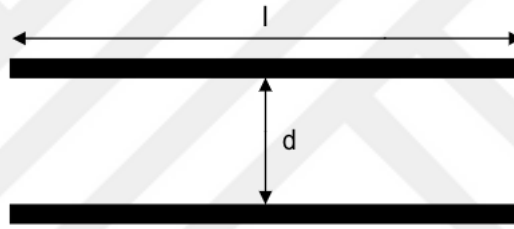
Şekil 4.2'deki bobin tasarımı incelendiğinde alıcı bobinin alt ayakları ile verici bobinin orta ayakları aynı akım yönünde yerleştirildiğinden pozitif karşılıklı endüktans oldukça yüksektir. Bu tasarımda, verici bobinin saçtığı manyetik alan yönlendirilmiş şekilde düzenlendiği için İHA üzerinde oluşan manyetik alan etkisi minimize edilmektedir.

4.2. İHA için Katlanır KET Sistem Tasarımı

KET sistemi verimliliği, frekans, yük, karşılıklı endüktans ve iç dirençten etkilenir. KET sistemlerinin verimliliğini en fazla etkileyen faktörlerden biri, bobinler arasındaki karşılıklı endüktanstan kaynaklanmaktadır. Bobinler arasındaki karşılıklı endüktans, bobinlerin fiziksel konumlarına ve hizalarına bağlıdır. Bobinler birbirinden uzaklaştıkça veya hizalama bozuldukça, karşılıklı endüktans değeri azalarak sistemin verimliliği üzerinde olumsuz bir etki yaratmaktadır. Bu nedenle, bobinlerin tasarımlarının ve birbirlerine göre konumlarının doğru bir şekilde ayarlanması, KET sistemlerinin verimli çalışması için kritik öneme sahiptir.

Uygun bir bobin tasarımı yapmak için, öncelikle teller arasındaki karşılıklı endüktansın farklı durumlarda nasıl değiştiğini matematiksel olarak analiz etmek gereklidir. Bu analiz, sistemin optimize edilmesi ve yüksek verimlilik sağlanması açısından kritik öneme sahiptir.

Eşit uzunluktaki iki paralel telin karşılıklı endüktansı, tellerin uzunluğu ve aralarındaki mesafeye bağlıdır. Paralel tellerin konumu ve geometrisi, bu değerlerin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 4.3'te, eşit uzunlukta iki paralel telin bu ilişkiyi açıklayan bir düzenlemesi gösterilmektedir. Bu yapı, karşılıklı endüktansın doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için temel bir referans niteliği taşımaktadır. Sistem tasarımında bu parametrelerin dikkate alınması, hesaplamaların doğruluğunu ve sistem performansını artırmada önemli bir rol oynamaktadır.

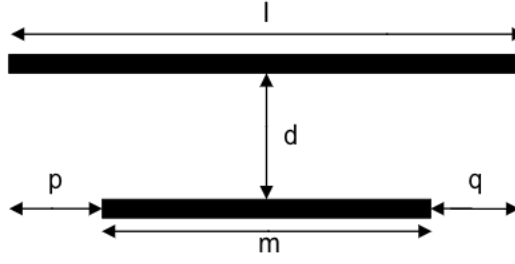


Şekil 4.3. Eşit uzunlukta iki paralel tel.

Burada l , iletkenlerin uzunluğunu, d ise paralel teller arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Eşit uzunluktaki iki paralel tel arasında oluşan karşılıklı endüktans, bu iki parametreye bağlıdır ve Denklem (4.4)'te matematiksel olarak ifade edilmiştir. Bu denklem, tellerin fiziksel özelliklerine göre karşılıklı endüktansı hesaplamak için kullanılmaktadır.

$$M(l, d) = \frac{\mu_0}{2\pi} l \left[\ln \left(\frac{l}{d} + \sqrt{1 + \frac{l^2}{d^2}} \right) - \sqrt{1 + \frac{d^2}{l^2}} + \frac{d}{l} \right] \quad (4.4)$$

Karşılıklı endüktans, iletkenlerin birbirine göre konumlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Farklı uzunluklardaki paralel iletkenler tamamen üst üste gelebilir, kısmen örtüşebilir veya hiç örtüşmeyebilir. Bu durumlarda, paralel iletkenler arasındaki karşılıklı endüktans hesaplama yöntemleri birbirinden farklıdır. İlk durumda, birbiriyle örtüşen farklı uzunlukta paralel iletkenler Şekil 4.4'te gösterilmektedir.

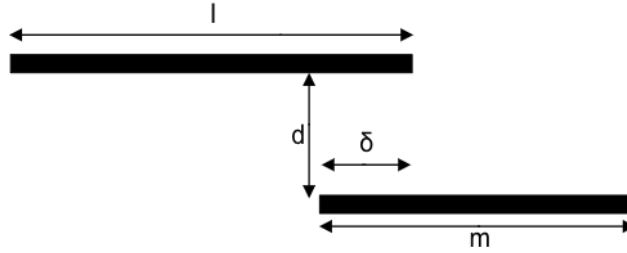


Şekil 4.4. Birbiriyle örtüşen farklı uzunlukta paralel iletkenler.

Burada m ve l, sırasıyla kısa ve uzun iletkenlerin uzunluklarını ifade etmektedir. Uzun iletkene göre p ve q, kısa iletkenin soldan sağa doğru olan uzunluk farklarını ifade eder. Şekil 4.4'te, birbiriyle örtüşen iki farklı uzunlukta paralel iletken için karşılıklı endüktans denklem (4.5)'de verilmiştir.

$$L_m = \frac{(M(m+p,d)+M(m+q,d))-(M(p,d)+M(q,d))}{2} \quad (4.5)$$

İkinci durumda, sadece bir kısmı üst üste örtüşen farklı uzunlukta paralel iletkenler Şekil 4.5.'de gösterilmektedir.

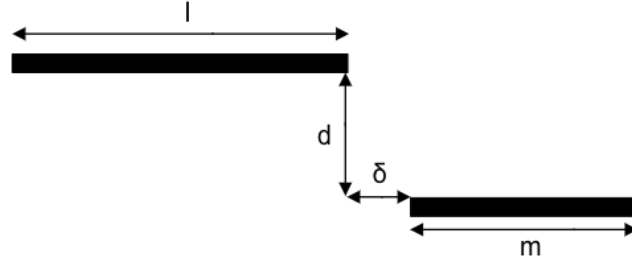


Şekil 4.5. Farklı uzunlukta bir kısmı üst üste binen iki paralel iletken

Burada δ , üst üste binen parçanın uzunluğunu ifade eder. Şekil 4.5'te, bir kısmı üst üste binen iki farklı uzunlukta paralel iletken için karşılıklı endüktans denklem (4.6)'de verilmiştir.

$$L_m = \frac{(M(l+m-\delta,d)+M(\delta,d))-(M(l-\delta,d)+M(m-\delta,d))}{2} \quad (4.6)$$

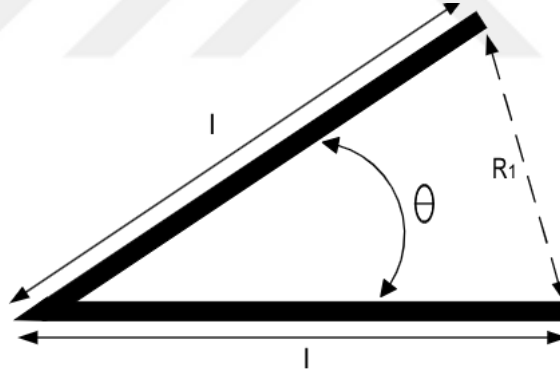
Üçüncü durumda, üst üste binmeyen farklı uzunlukta paralel iletkenler Şekil 4.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Üst üste binmeyen iki farklı uzunlukta paralel iletken

Burada δ , iki iletken arasındaki yatay mesafedir. Örtüşmeyen iki farklı uzunlukta paralel iletken için karşılıklı endüktans (4.7)'de verilmiştir.

$$L_m = \frac{(M(l+m+\delta,d)+M(\delta,d))-(M(l+\delta,d)+M(m+\delta,d))}{2} \quad (4.7)$$

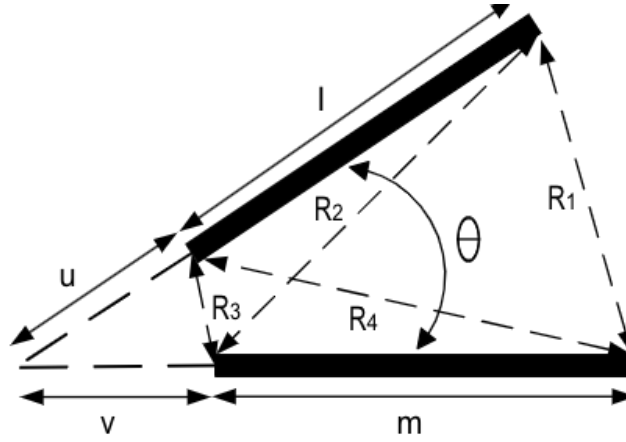


Şekil 4.7. Eşit uzunlukta ve ortak uçlu paralel olmayan teller

Bu ifadede l , telin uzunluğunu, θ ise teller arasındaki açıyı temsil eder. R_1 , tellerin ortak olmayan uçları arasındaki mesafeyi göstermektedir. Ortak uca sahip, paralel olmayan ve eşit uzunlukta tellerin karşılıklı endüktansı, Denklem (4.8) ile tanımlanmıştır.

$$L_m = \frac{\mu_0}{\pi} l \cos \theta \tanh^{-1} \frac{l}{l+R_1} \quad (4.8)$$

Aynı düzlemde farklı uzunlukta ve ayrılmış paralel olmayan teller Şekil 4.8.'de gösterilmektedir.



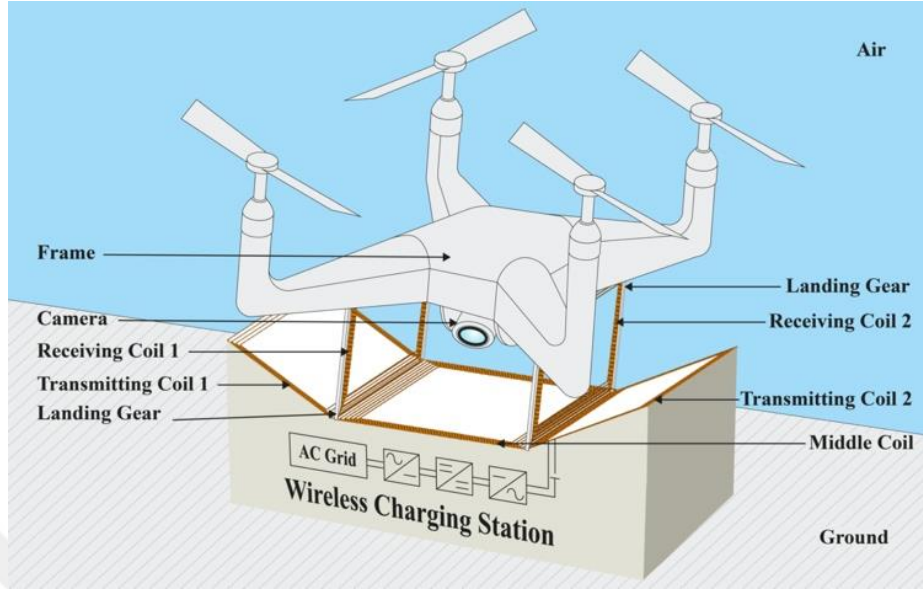
Şekil 4.8. Farklı uzunlukta ve ayrılmış paralel olmayan teller

Bu ifadede l ve m , paralel olmayan iletkenlerin uzunluklarını temsil eder. u ve v , çizgilerin kesişme noktasının sırasıyla l ve m iletkenlerine olan uzaklıklarını ifade eder. R_1 ve R_2 , sırasıyla l iletkeninin kesişme noktasından uzak ucuyla m iletkeninin kesişme noktasından uzak ve yakın uçları arasındaki mesafeleri ifade etmektedir. Benzer şekilde, R_3 ve R_4 , l iletkeninin kesişme noktasına yakın ucuyla m iletkeninin kesişme noktasından yakın ve uzak uçları arasındaki mesafeleri tanımlamaktadır. Bu tanımlar, iletkenler arasındaki geometrik ilişkiyi ve mesafeleri net bir şekilde belirlemek için kullanılmaktadır. Aynı düzlemde, farklı uzunluklara sahip ve ayrılmış paralel olmayan tellerin karşılıklı endüktansı, Denklem (4.9)'da verilmiştir.

$$L_m = \frac{\mu_0}{2\pi} \cos \theta \left[(\mu + l) \tanh^{-1} \frac{m}{R_1 + R_2} + (v + m) \tanh^{-1} \frac{l}{R_1 + R_4} - \mu \tanh^{-1} \frac{m}{R_3 + R_4} - v \tanh^{-1} \frac{l}{R_2 + R_3} \right] \quad (4.9)$$

Bobinlerde birden fazla iletken bulunduğunda, eşdeğer karşılıklı endüktans, pozitif ve negatif karşılıklı endüktansların farkı kullanılarak hesaplanmaktadır. Aynı yönde akım taşıyan iletkenler arasında pozitif karşılıklı endüktans, zıt yönde akım taşıyan iletkenler arasında ise negatif karşılıklı endüktans oluşur. Bu iki tür endüktans arasındaki fark, sistemin eşdeğer karşılıklı endüktansını belirlemede kritik bir rol oynar. Katlanabilir KET şarj istasyonu ve İHA'nın tasarımı, bu prensipleri dikkate alarak optimize edilmiştir. Söz konusu şarj istasyonu ve İHA'nın yerleşimi Şekil 4.9'da görselleştirilmiştir. Bu düzenek, hem

verimliliği artırmayı hem de manyetik alan etkilerini minimize etmeyi hedeflemektedir.



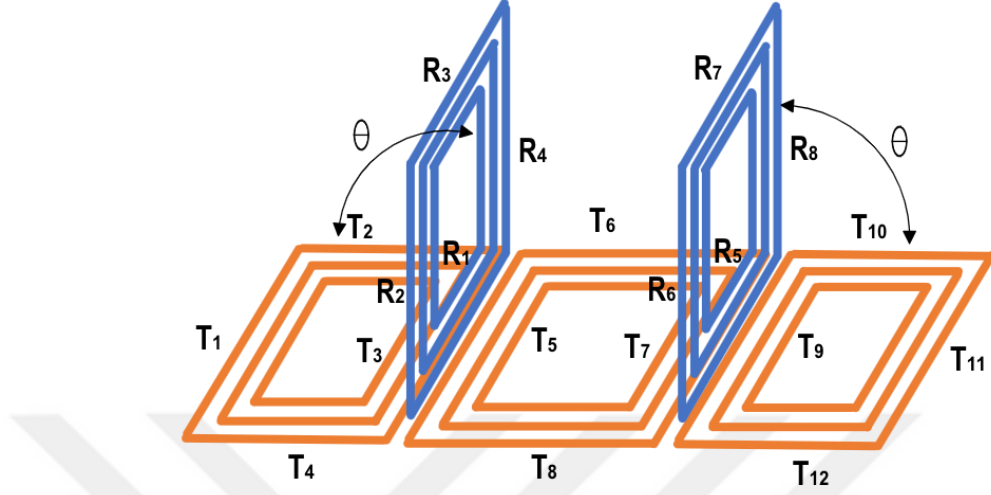
Şekil 4.9. Katlanır KET şarj istasyonu ve İHA

İHA kablosuz şarjı için bobin tasarımları literatürde farklı şekillerde sunulmaktadır. En çok kullanılan tasarımlar, dikdörtgen, kare ve dairesel şekilli düzlemsel spiral ile sarmal bobinlerdir. KET uygulamalarında, yüksek bağlantı verimliliği, yanlış hizalamaya karşı tolerans ve üretim kolaylığı avantajları nedeniyle genellikle spiral dikdörtgen bobinler tercih edilmektedir.

Bu bobinler genellikle İHA'nın ayaklarının altına yatay bir şekilde monte edilmektedir. Bu yerleşim, bobinlerin manyetik kuplajını artırırken, sistemin ağırlık merkezini dengelemeye ve İHA'nın stabilitesini korumaya yardımcı olur. Ancak, bu tür bobinler geniş bir alan kapladığından İHA'nın aerodinamiğini olumsuz etkileyebilir, yoğun manyetik alan pozlaması ve sürüklenme kuvveti oluşturabilmektedir. Alternatif olarak, spiral dikdörtgen bobinler İHA'nın bacaklarına dikey olarak monte edildiğinde daha hafif olmaktadır, yatay bobinlere kıyasla daha az sürüklenme kuvveti ve manyetik alan saçılımı oluşturmaktadır. Ancak, tek bir bacak üzerine dikey monte edilen bobinler dengesizlik yaratabilmektedir.

Bu nedenle, denge sağlamak için iki bacak üzerine dikey olarak monte edilen bobin tasarımları tercih edilmektedir. Bu KET tasarımı, İHA'nın bacaklarına

yerleştirilen iki dikey düzlemsel dikdörtgen alıcı bobin ile zemine yerleştirilmiş üç yatay düzlemsel dikdörtgen verici bobinden oluşmaktadır. Tasarımın detayları Şekil 4.10'da sunulmuştur.



Şekil 4.10. İHA için klasik kesitli bobin tasarımı

İHA'nın bacakları, verici bobinlerin merkezi iletkenlerine hizalanacak şekilde yerleştirilerek maksimum manyetik kuplaj sağlanmaktadır. Klasik kesitli bobin tasarımı için iletken grupları arasındaki pozitif ve negatif karşılıklı endüktanslar, sırasıyla Denklem (4.10) ve Denklem (4.11) ile ifade edilmektedir.

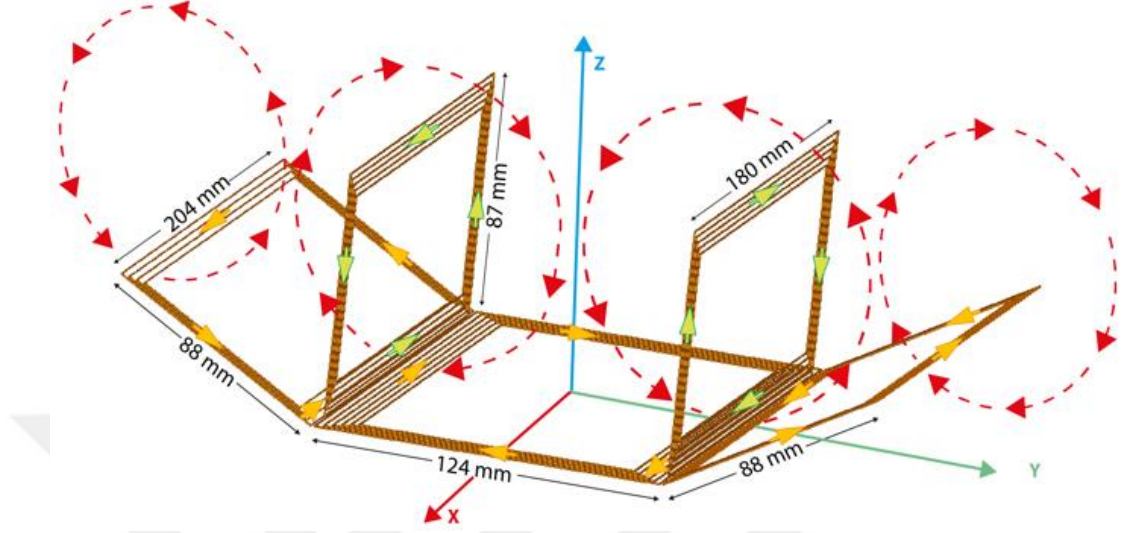
$$L_{m+classic} = M_{T_1R_3} + M_{T_1R_5} + M_{T_3R_1} + M_{T_3R_7} + M_{T_5R_1} + M_{T_5R_7} + M_{T_7R_5} + M_{T_7R_3} + M_{T_9R_5} + M_{T_9R_3} + M_{T_{11}R_7} + M_{T_{11}R_1} \quad (4.10)$$

$$L_{m-classic} = M_{T_1R_1} + M_{T_1R_7} + M_{T_3R_3} + M_{T_3R_5} + M_{T_5R_3} + M_{T_5R_5} + M_{T_7R_7} + M_{T_7R_1} + M_{T_9R_7} + M_{T_9R_1} + M_{T_{11}R_5} + M_{T_{11}R_3} \quad (4.11)$$

Maksimum karşılıklı endüktans, alıcı bobinlerin alt iletkenleri (R₁ ve R₅) ile verici bobinlerin orta iletkenleri (T₃, T₅, T₇ ve T₉) örtüşüğünde elde edilir. Ancak, bu klasik tasarım, bobinlerin diğer iletken gruplarını tam olarak değerlendirememekte ve bu grupların katkısını sınırlamaktadır. Karşılıklı endüktansı artırmak için, diğer iletken bobin gruplarını da etkin bir şekilde kullanabilen yeni bir tasarım önerilmiştir.

Bu çalışmada önerilen KET tasarımında, zemindeki yatay verici bobinlerin kenar kısımları katlanabilir bir yapıda tasarlanmıştır. Bu sayede, verici ve alıcı

bobinlerin iletkenleri birbiriyle daha yakın bir konuma getirilerek enerji transfer verimliliği artırılmıştır. Söz konusu tasarım, Şekil 4.11'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.11. İHA için katlanır DDD bobin tasarımı

Önerilen katlanır bobin tasarımı için, pozitif ve negatif karşılıklı endüktans değerleri sırasıyla Denklem (4.12) ve (4.13) ile ifade edilmiştir.

$$L_{m+fold} = M_{T_1R_3} + M_{T_1R_5} + M_{T_2R_4} + M_{T_2R_6} + M_{T_3R_1} + M_{T_3R_7} + M_{T_4R_2} + M_{T_4R_8} + M_{T_5R_1} + M_{T_5R_7} + M_{T_7R_5} + M_{T_7R_3} + M_{T_9R_5} + M_{T_9R_3} + M_{T_{10}R_2} + M_{T_{10}R_8} + M_{T_{11}R_7} + M_{T_{11}R_1} + M_{T_{12}R_4} + M_{T_{12}R_6} \quad (4.12)$$

$$L_{m-fold} = M_{T_1R_1} + M_{T_1R_7} + M_{T_2R_2} + M_{T_2R_8} + M_{T_3R_3} + M_{T_3R_5} + M_{T_4R_4} + M_{T_4R_6} + M_{T_5R_3} + M_{T_5R_5} + M_{T_7R_7} + M_{T_7R_1} + M_{T_9R_7} + M_{T_9R_1} + M_{T_{10}R_4} + M_{T_{10}R_6} + M_{T_{11}R_5} + M_{T_{11}R_3} + M_{T_{12}R_2} + M_{T_{12}R_8} \quad (4.13)$$

Bu tasarımda, T_1 - R_3 ve T_{11} - R_7 arasındaki mesafeler katlanabilir yapı sayesinde minimuma indirilmiştir. Önerilen yöntem, alıcı bobinleri katlayarak karşılıklı endüktansı artırmayı hedeflemektedir. Klasik tasarımda, birbirine dik konumda olan bazı iletkenler (T_2 - R_4 , T_4 - R_2 , T_{12} - R_6 ve T_{10} - R_8) arasında bağlantı oluşmamaktadır. Katlanabilir tasarım, iletkenler arasındaki açığı sıfıra yaklaştırarak karşılıklı endüktansı önemli ölçüde artırmaktadır. Önerilen bu katlama yöntemi, enerji transfer verimliliğini artırmak amacıyla, iletkenler arasındaki açığı minimum seviyeye indirerek sistemin performansını optimize

etmektedir. Bu tasarımda, özellikle T_2-R_4 , T_4-R_2 , $T_{12}-R_6$ ve $T_{10}-R_8$ arasındaki açı, katlanabilir yapı sayesinde en aza indirilmiştir. Bu yaklaşım, bobinler arasındaki manyetik kuplajı güçlendirerek daha verimli bir enerji aktarımı sağlar.

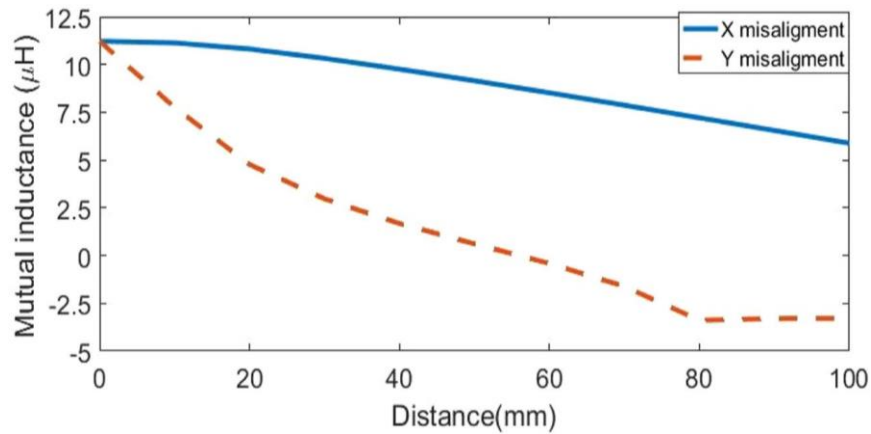
Katlama açısının 90 derece olması durumunda iletkenler arasındaki açı sıfırlanmaktadır ve karşılıklı endüktans maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Denklem (4.12) ve (4.13) incelendiğinde, iletkenler arasındaki açı azaldıkça karşılıklı endüktansın arttığı görülmektedir. Bu tasarım sayesinde, istenen karşılıklı endüktans daha az bobin dönüşü ve daha kısa bir iletken uzunluğu ile elde edilebilmektedir. Böylece alıcı bobin daha hafif hale gelirken, KET sisteminin iç direnci ve manyetik alan saçılması da azalmaktadır.

5. SABİT DDD BOBİN VE KATLANIR BOBİN SİMÜLASYON SONUÇLARI

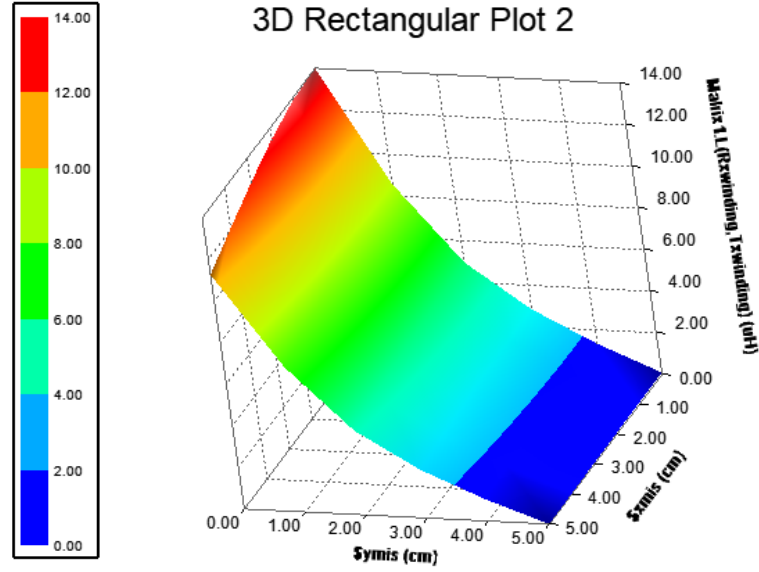
Bu bölümde, Sabit ve katlanır DDD bobin tasarımları için gerçekleştirilen simülasyon sonuçları incelenecektir.

5.1 Sabit DDD Bobin için Simülasyon Sonuçları

Alıcı bobinin x ve y eksenindeki yanlış hizalanmasının karşılıklı endüktansa bağlı değişimi Şekil 5.1.'de verilmiştir.



(a)

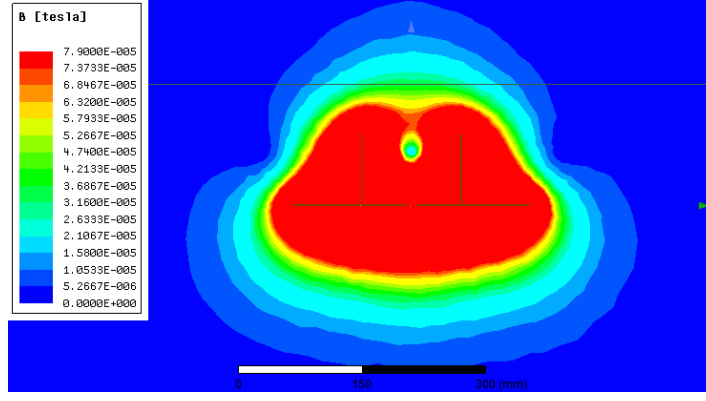


(b)

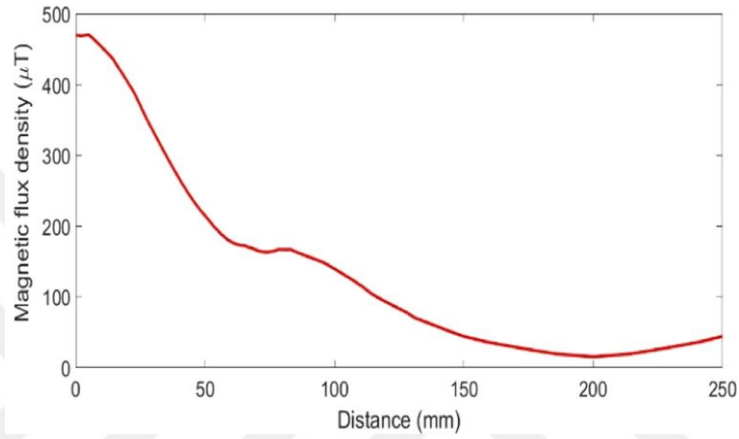
Şekil 5.1. Karşılıklı endüktansın değişimi x ve y eksenindeki yanlış hizalamaya göre değişimi (a) bir eksende hizalanmalı diğer eksen hizalama bozulurken ve (b) Her iki eksende hizalanmalı

Şekil 5.2(a)'de, bir ekseninde hizalama bozulurken diğer eksen aynı hizada tutularak karşılıklı endüktans incelenmiştir. Şekil 5.2(b)'de, her iki eksenindeki yanlış hizalama durumlarındaki karşılıklı endüktans incelenmiştir. Bu bobin tasarımında, karşılıklı endüktansın x eksenindeki yanlış hizalamadan ziyade y eksenindeki yanlış hizalamadan daha fazla etkilendiği görülmüştür.

X eksenini yanlış hizalama toleransı y ekseninin yanlış hizalanma toleransından daha yüksektir. Maksimum verimlilik KET sisteminde x ekseninde 10,3 cm'ye kadar yanlış hizalama ve y ekseninde 1,7 cm'ye kadar yanlış hizalama elde edilmiştir. Her iki eksenin birden aynı anda yanlış hizalanması durumunun ise en kötü durum olduğu görülmüştür. KET'in verimliliği en fazla Y ekseninin yanlış hizalanmasından etkilenmektedir. Verici ve alıcı bobinleri ortamda bir manyetik alan oluşturur. Bobinler tarafından üretilen manyetik akının yoğunluğunun dağılımı Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



(a)

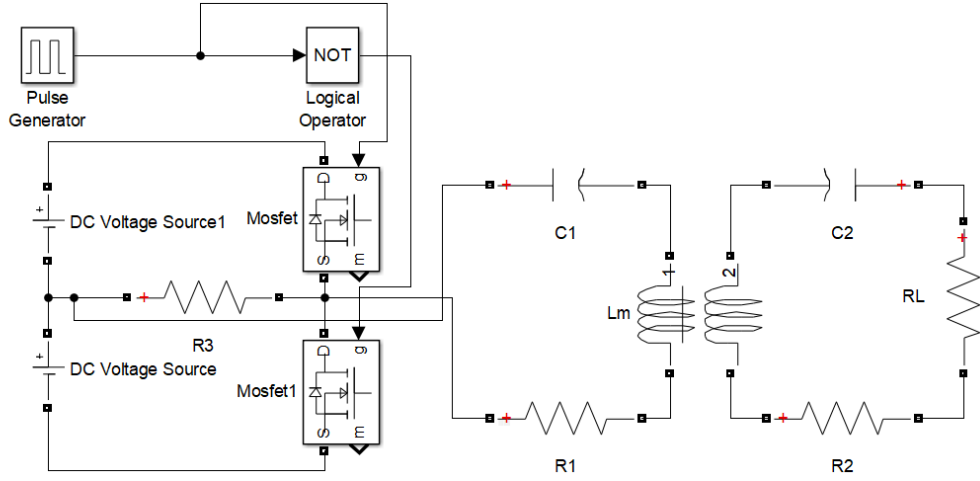


(b)

Şekil 5.2. KET sisteminin (a) dikey ve yatay ekseninde (b) dikey ekseninde manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Manyetik akı yoğunluğu, bu ekipmana dokunan insana ve İHA ekipmanına manyetik akı saçılmasının etkisini azaltmak için $27 \mu\text{T}$ ile sınırlı olmalıdır. Z ekseninde 16.5 cm yükseklikte manyetik akı yoğunluğu $27 \mu\text{T}$ seviyesinin altına düşmektedir. Bu nedenle, tasarımda İHA'nın ekipmanları (örneğin, GPS, kamera ve diğer hassas cihazlar) veya gövdesi, verici pedin en az 16.5 cm üzerinde konumlandırılmalıdır. Bu düzenleme, manyetik alan etkilerini azaltarak cihazların güvenliğini ve performansını korumayı hedeflemektedir.

KET sisteminin devre analizi, MATLAB-Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Analizlerde yük direnci 5Ω olarak belirlenmiştir. Bu tasarımı temsil eden MATLAB-Simulink tabanlı KET devresi, Şekil 5.3'te detaylı bir şekilde sunulmuştur.



Şekil 5.3. MATLAB eşdeğer devresi

Analiz, her iki ekseninde hizalanmış durum için yapılmıştır. Çıkış gücünün 100 W olması için giriş gerilimi kontrol edilmiştir. Simulink simülasyonunun sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. MATLAB/Simulink sonuçları

k=0.31	
$L_m = 11.22 \mu\text{H}$	$f_r = 125930 \text{ Hz}$
$Z_{Eş} = 6.81 \Omega$	$\eta = \%94$
$V_1 = 29.96 \text{ V}$	$V_2 = 22.37 \text{ V}$
$I_1 = 3.94 \text{ A}$	$I_2 = 4.47 \text{ A}$
$P_1 = 106.1 \text{ W}$	$P_2 = 100.3 \text{ W}$
$V_{C1} = 152.9 \text{ V}$	$V_{C2} = 138.3 \text{ V}$

P_{in} ve P_{out} sırasıyla giriş ve çıkış gücüdür. k , bağlantı faktörüdür, f_r rezonans frekansıdır ve $Z_{Eş}$ eşdeğer empedanstır. V_1 , V_2 , I_1 ve I_2 sırasıyla giriş-çıkış gerilimleri ve akımlarıdır. V_{C1} ve V_{C2} , sırasıyla verici ve alıcı rezonans kapasitörlerinin gerilimidir. Bu tasarım, hizalama hatasında kritik karşılıklı indüktans değerine kadar yüksek verimlilikle çalışmaktadır. Kritik bağlama faktörü 0.31'in altında, verimlilik maksimum verimliliğin altına düşmektedir.

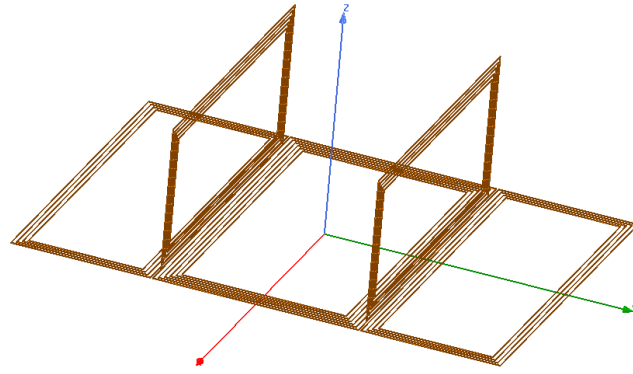
Bu çalışmada 100 watt güç ile sarj olan bir IHA için KET sistem tasarımı yapılmıştır. Doğal rezonans frekansı 140 kHz olacak şekilde sistemin endüktans değeri $L=34.105 \mu\text{H}$ ve kapasitans değeri ise $C=37.89 \text{ nF}$ hesaplanmıştır.

Verici bobin yatay ekseninde üç tane dikdörtgen düzlemsel spiral bobinden oluşmaktadır. Vericide kenarlardaki bobinlerin boyutu 204 mm- 84 mm ve ortadaki bobinin boyutu 204 mm- 124 mm'dir. Sarım sayısı 5, kablo kalınlığı 1 mm, kablolar arası boşluk 0.1 mm'dir. Alıcı bobin dikey ekseninde iki tane dikdörtgen düzlemsel spiral bobinden oluşmaktadır. Alıcı bobinlerin boyutu ise 180 mm-87 mm, sarım sayısı 7, kablo kalınlığı 1 mm, kablolar arası boşluk ise 3 mm'dir. Bu tasarımda alıcıda 7.1 m ve vericide 8.77 m kablo kullanılmıştır. Verici ve alıcı iç dirençleri sırasıyla 0.191 Ω ve 0.154 Ω bulunmuştur.

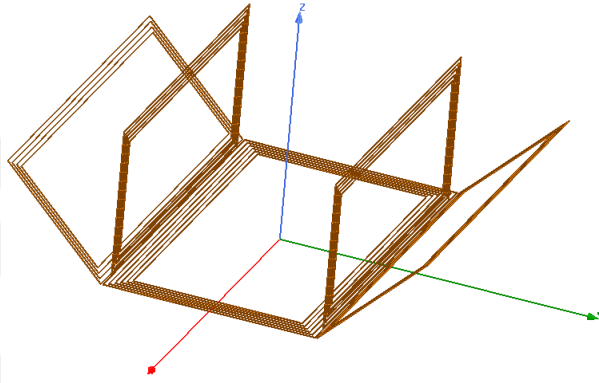
İHA'lar, kendini şarj etmek dışında otonom olarak çalışmaktadır. KET teknolojileri, İHA'ların otonom olarak şarj edilmesini sağlar. Bu bobin tasarımında, alıcıda iki dikey düzlem spiral bobin ve vericide üç yatay düzlem spiral bobin sunulmaktadır. İHA'nın kablosuz şarj cihazı, 100 W çıkış gücü sağlamak üzere tasarlanmış olup 140 kHz frekansında çalıştırılmıştır. Bu çalışmada ayrıca KET sisteminin x ve y eksenindeki hizalama tolere ediciliğini ve manyetik akı yoğunluğu dağılımlarını araştırmaktadır. Bu tasarım, minimal manyetik saçılma, daha yüksek bağlantı faktörü, alıcıda azaltılmış kablo ağırlığı ve geliştirilmiş hizalama tolere ediciliği göstererek birçok mevcut alternatiften daha verimlidir. Bu tasarım, yatayda 10.3 cm ve dikeyde 1.7 cm hizalama hatası durumunda bile %94 verimlilikle KET 'i sağlamaktadır.

5.2 Katlanır KET Sistemi Simülasyon ve Deneysel Sonuçlar

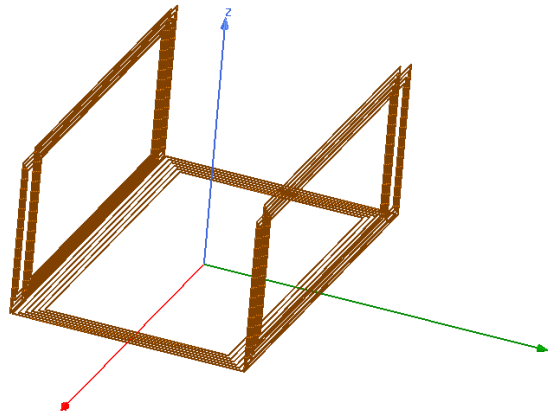
Bu çalışmada, insansız hava aracı (İHA) için kullanılan kablosuz enerji transfer (KET) sistemi ve bobinler, 100 watt şarj gücüne uygun olacak şekilde tasarlanmıştır. KET sisteminin doğal rezonans frekansı, Qi standardına uyumlu olarak 138.1 kHz olarak belirlenmiştir. Önerilen katlanır bobin, tasarım ve simülasyon süreçleri için Maxwell 3D yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Önerilen katlanır bobinin için farklı katlama açıları Şekil 5.4'de gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

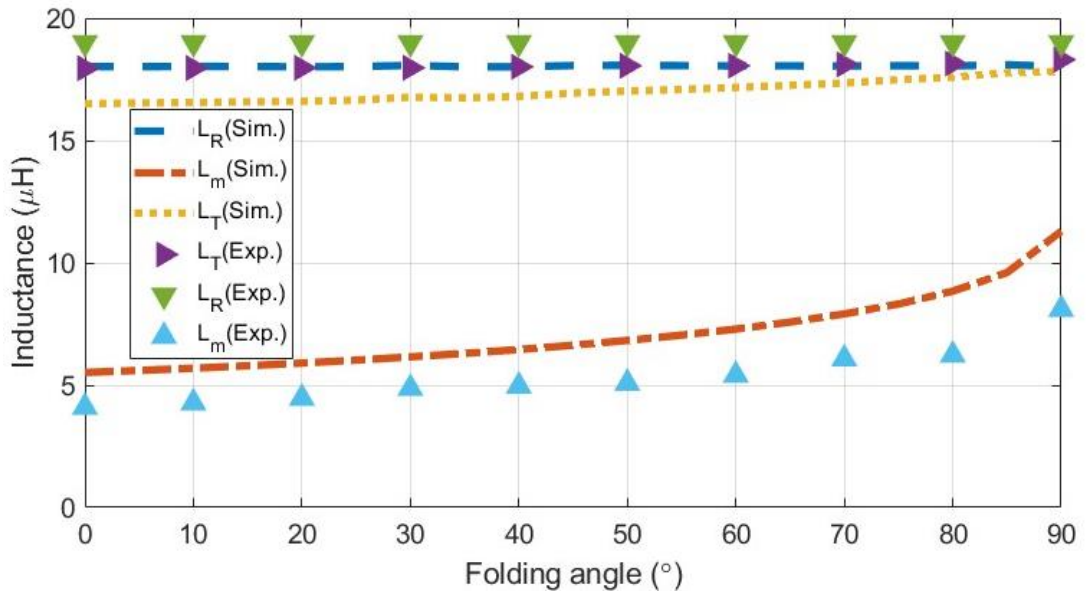
Şekil 5.4. (a) 0, (b) 45 ve (c) 90 katlama açıları için bobin tasarımları

Verici bobini, aynı yatay düzlemde yer alan üç dikdörtgen düzlemsel spiral bobinden oluşmaktadır. Bu bobinler, birbirlerine seri bağlantı ile bağlanmıştır. Vericideki sağ, sol ve orta bobinlerin boyutları sırasıyla 204 mm × 88 mm, 204 mm × 88 mm, ve 204 mm × 124 mm olarak tasarlanmıştır. Sarım sırasında, bobin telleri arasında 0.1 mm boşluk bırakılmıştır.

Verici bobininin sarım sayısı 3'tür. Her biri teli 40 AWG olan 100 adet litz telinden oluşan ve eşdeğer kablo kalınlığı 1 mm olan Litz telli kullanılmıştır.

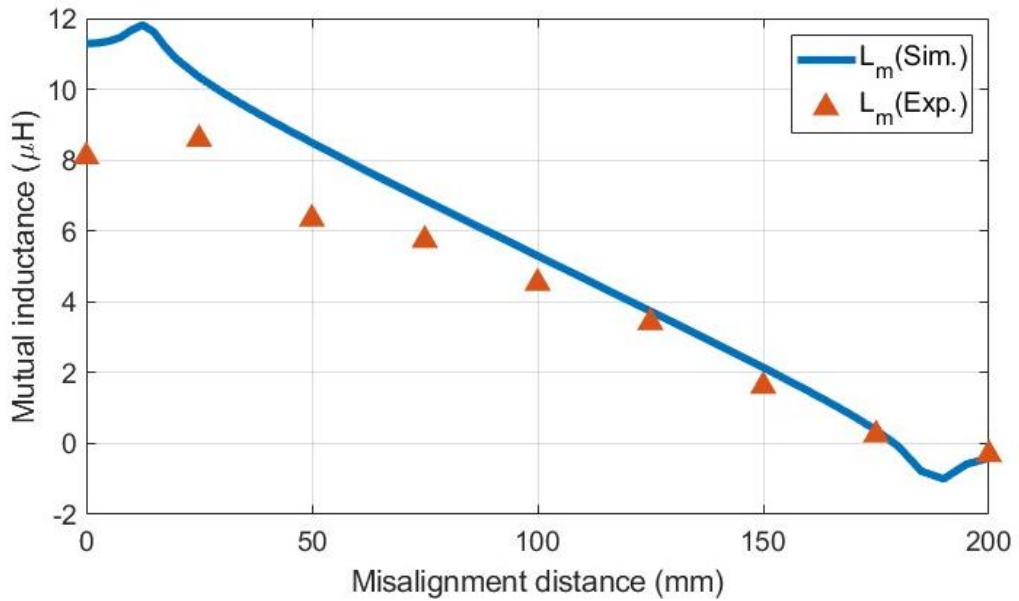
Alıcı bobin ise dikey düzlemde konumlanmış ve birbirine seri bağlanmış iki dikdörtgen düzlemsel spiral bobinden oluşmaktadır. Alıcı bobinlerin boyutları 180 mm × 87 mm olup, her bir bobinin sarım sayısı 3'tür. Bu tasarımda, verici bobin toplamda 5.39 m, alıcı bobin ise 5.16 m kablo kullanılarak oluşturulmuştur. Verici ve alıcı bobinlerin iç dirençleri sırasıyla $R_1 = 0.109 \Omega$ ve $R_2 = 0.104 \Omega$ olarak ölçülmüştür.

Önerilen tasarım, farklı katlanma açıları ve hizalama hataları durumunda performans açısından değerlendirilmiştir. Farklı katlanma açlarına bağlı olarak öz ve karşılıklı endüktans değerlerinin değişimi, Şekil 5.5'da grafiksel olarak sunulmuştur. Bu incelemeler, sistemin farklı kullanım koşullarındaki dayanıklılığını ve verimliliğini değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.5. Öz ve karşılıklı endüktans, katlanma açlarına göre değişimi

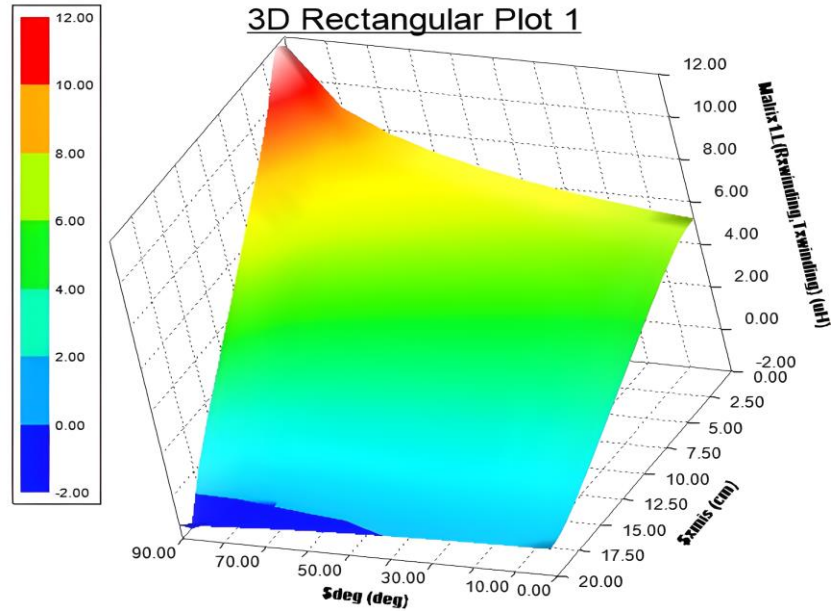
Katlama açısı 0° 'den 90° 'ye yaklaştıkça, alıcı ve verici bobinler arasındaki karşılıklı endüktans artış göstermektedir. En yüksek manyetik kuplaj 90° katlama açısında elde edilirken, en düşük kuplaj ise 0° açıda gözlemlenmektedir. Yanlış hizalama toleransı, alıcı bobinlerin dik eksen olan Y ekseninde daha düşük bir seviyededir. Ancak bobinler 90° katlandığında, Y eksen boyunca tam hizalama sağlanmakta ve bu eksenindeki tolerans minimum düzeye inmektedir. Buna karşılık, yatay eksen olan X ekseninde, İHA'nın konum hatalarından kaynaklı hizalama tam olarak sağlanamayabilir. Yine de, X eksen boyunca yanlış hizalama toleransı alıcıya paralel olduğu için daha yüksek seviyededir. Bu durum, sistemin dinamik koşullar altında daha verimli çalışmasına olanak tanımaktadır. Bu eksenindeki yanlış hizalamaya bağlı olarak karşılıklı endüktans değişiminin nasıl etkilendiği, Şekil 5.6'de grafiksel olarak sunulmuştur. Bu durum, KET sisteminin farklı açılarda ve hizalama durumlarında performansını değerlendirmek açısından kritik bir öneme sahiptir.



Şekil 5.6. X eksenindeki yanlış hizalamaya göre karşılıklı endüktans değişimi

Yanlış hizalama mesafesi arttıkça, bağlantı katsayısı ve karşılıklı endüktans azalmaktadır. Hizalama koşulundaki karşılıklı endüktans $11.29 \mu\text{H}$ olduğu görülmüştür. Kritik karşılıklı endüktans, Denklem (3.4) kullanıldığında $4.6 \mu\text{H}$

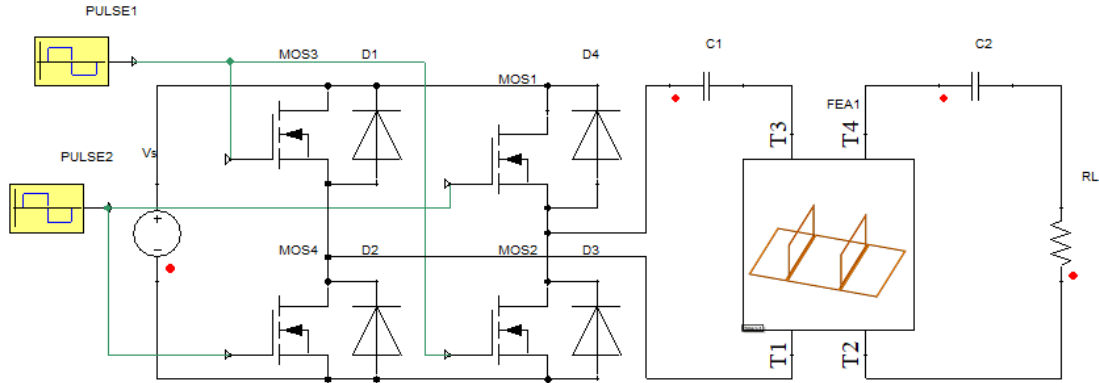
olarak hesaplanmıştır. Kritik karşılıklı endüktans, 90 derecelik bir katlama açısı için 11 cm'lik bir ofsetteki karşılıklı endüktansa eşittir. Yanlış hizalama mesafesi belirli bir sınırı aştığında, sistemin verimliliği düşmeye başlamaktadır. Katlama açısının 90°'den azaltılması, X eksenindeki yanlış hizalama toleransını da beraberinde azaltmaktadır. Bu durum, bobinlerin doğru hizalanma gerekliliğini artırır ve performans üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulmalıdır. Katlanabilir ve katlanamaz sistemlerin manyetik kuplaj performansını karşılaştırmak için, farklı katlama açıları ve yanlış hizalama mesafelerine bağlı olarak karşılıklı endüktans değerlerinin detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Bu analiz, sistemlerin enerji aktarım verimliliği üzerindeki etkilerini anlamak ve katlanabilir tasarımın avantajlarını ortaya koymak açısından önemlidir. Farklı katlanma açılara ve yanlış hizalama mesafelerine bağlı olarak karşılıklı endüktans değişiminin grafiği, Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Bu grafik, sistem tasarımı ve optimizasyonu için yol gösterici bir rehber niteliğindedir.



Şekil 5.7. Farklı katlama açılara ve yanlış hizalama mesafelerine göre karşılıklı endüktans değişimi

KET devresi Ansys Simplorer kullanılarak analiz edilmiştir. Ansys Simplorer, Maxwell 3D'de tasarlanan önerilen bobinlerle sürme devresini birlikte simüle

etmek için kullanıldı. KET sisteminin ortak simülasyon devresi Şekil 5.8'da verilmiştir.



Şekil 5.8. Simplorer'daki KET sisteminin ortak simülasyon devresi

Yük direnci (R_L) 4 ohm olarak belirlenmiştir. Önerilen bobin tasarımında, vericinin öz endüktansı, katlanma açısına bağlı olarak değişim göstermektedir. 90° katlama açısında, vericinin öz endüktansı $17.8 \mu H$, alıcının öz endüktansı ise $18.1 \mu H$ olarak ölçülmüştür. Her iki bobin için rezonans kondansatör değerleri 72.65 nF olarak hesaplanmıştır.

90° katlanmış KET sistemi için hizalanmış ve kritik yanlış hizalama durumlarında yapılan simülasyonların sonuçları Çizelge 5.2'de sunulmuştur.

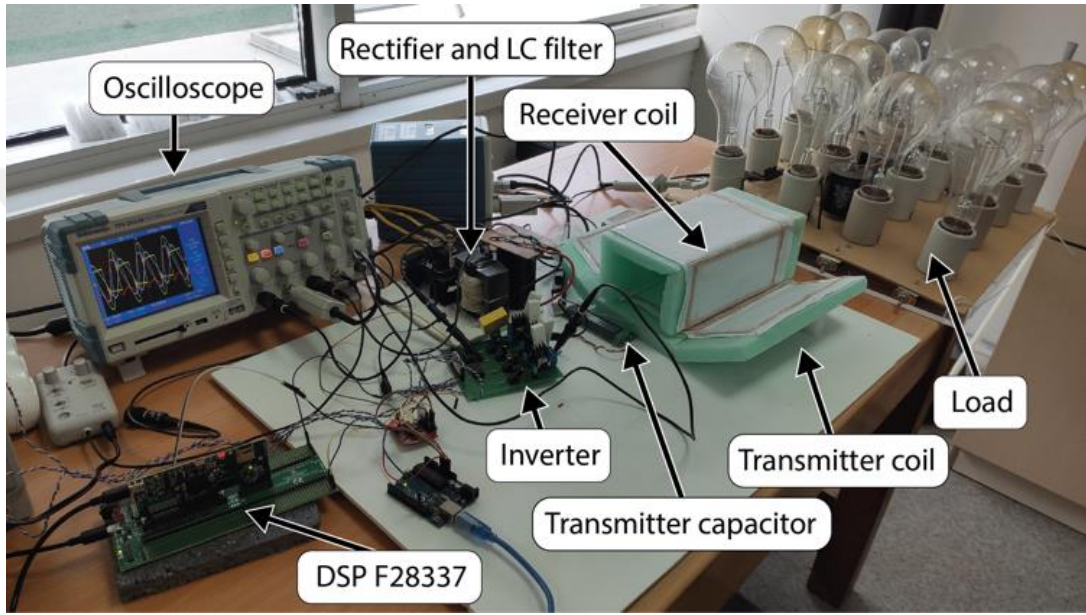
Çizelge 5.2. 90 derecelik katlama açısında hizalanmış ve kritik yanlış hizalama durumları için simülasyon sonuçları

Hizalama Durumu		Kritik Yanlış Hizalama Durumu	
$L_m = 11.29 \mu H$	$Z_{Eq} = 24.42 \Omega$	$L_m = 4.6 \mu H$	$Z_{Eq} = 4.4 \Omega$
$f_r = 138.1 \text{ kHz}$	$\eta = 97.2 \%$	$f_r = 138.1 \text{ kHz}$	$\eta = 95.1 \%$
$V_{in} = 54.7 \text{ V}$	$I_{in} = 2.24 \text{ A}$	$V_{in} = 22.86 \text{ V}$	$I_{in} = 5.19 \text{ A}$
$V_{out} = 20.09 \text{ V}$	$I_{out} = 5.02 \text{ A}$	$V_{out} = 20.09 \text{ V}$	$I_{out} = 5.02 \text{ A}$
$V_{CT} = 33.7 \text{ V}$	$P_{in} = 103.6 \text{ W}$	$V_{CT} = 82.51 \text{ V}$	$P_{in} = 105.8 \text{ W}$
$V_{CR} = 79.1 \text{ V}$	$P_{out} = 100.7 \text{ W}$	$V_{CR} = 79.4 \text{ V}$	$P_{out} = 100.6 \text{ W}$

f_r rezonans frekansıdır. V_{in} ve V_{out} , sırasıyla sistemin giriş ve çıkışındaki rms (kök ortalama kare) voltajlarını, P_{in} ve P_{out} , giriş ve çıkıştaki güç değerlerini ifade eder. I_{in} ve I_{out} , giriş ve çıkıştaki akımları, V_{CT} ve V_{CR} ise sırasıyla verici ve alıcı rezonans kapasitörlerinin voltaj değerlerini temsil etmektedir. Sistem, yanlış hizalama sonucu karşılıklı endüktans kritik değerinin altına düşene kadar yüksek verimlilikle çalışmaya devam etmektedir. Önerilen tasarım, 11 cm 'lik bir

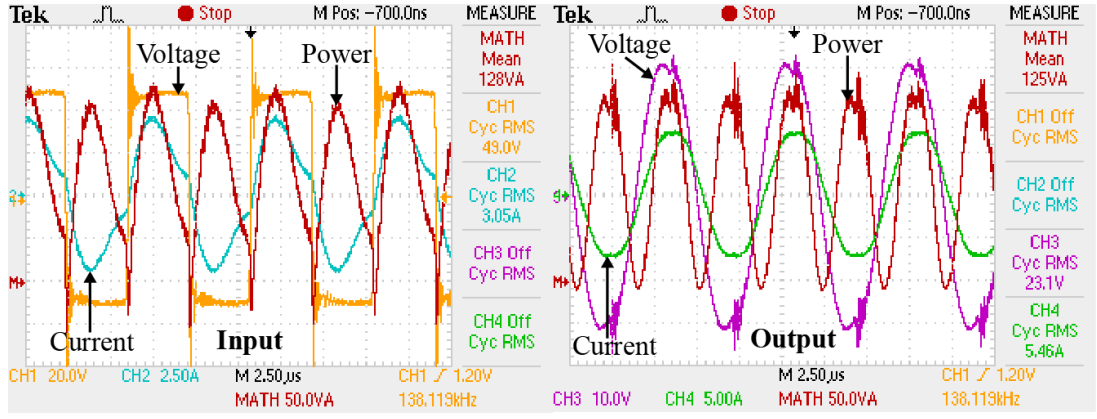
yanlış hizalamaya kadar %95 verimlilik sağlayarak oldukça etkileyici bir performans göstermektedir.

Bu sistemin deneysel düzenek yapısı, detaylı olarak Şekil 5.9'da sunulmuştur. Bu görselleştirme, sistemin tasarım özelliklerini ve çalışma prensiplerini anlamada rehberlik etmektedir. Bu düzenek, sistemin pratikteki uygulanabilirliğini ve tasarım parametrelerinin doğruluğunu test etmek amacıyla geliştirilmiştir.



Şekil 5.9. Önerilen katlanabilir kablosuz şarj sisteminin deney düzeneği

Deney düzeneğinde $R_{yük}$ olarak akkor lambalar kullanılmıştır. 140 Khz çalışma frekansında saf omik yüke en yakın degree sahip olduğu için akkor flemanlı lamba tercih edilmiştir. Inverter DSP F28337 ile kontrol edilmiştir. 40 AWG Litz kablosu, AC direncini azaltmak için alıcı ve verici sargılarında kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar Tektronix TPS2024B osiloskopu kullanılarak elde edilmiştir. Hizalanmış durumda, 90 katlama açısı için invertörün çıkış ve yükün giriş voltajı, akımı ve gücünü gösteren deneysel sonuçlar Şekil 5.10'de gösterilmektedir.

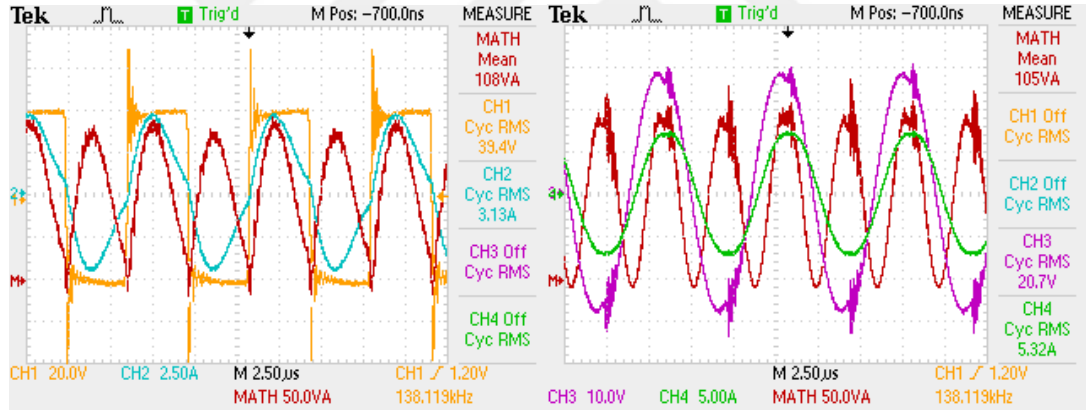


(a)

(b)

Şekil 5.10. 90 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış

Hizalanmış durumda, 80 katlama açısı için invertörün çıkış ve yükün giriş voltajı, akımı ve gücünü gösteren deneysel sonuçlar Şekil 5.11'de gösterilmektedir.

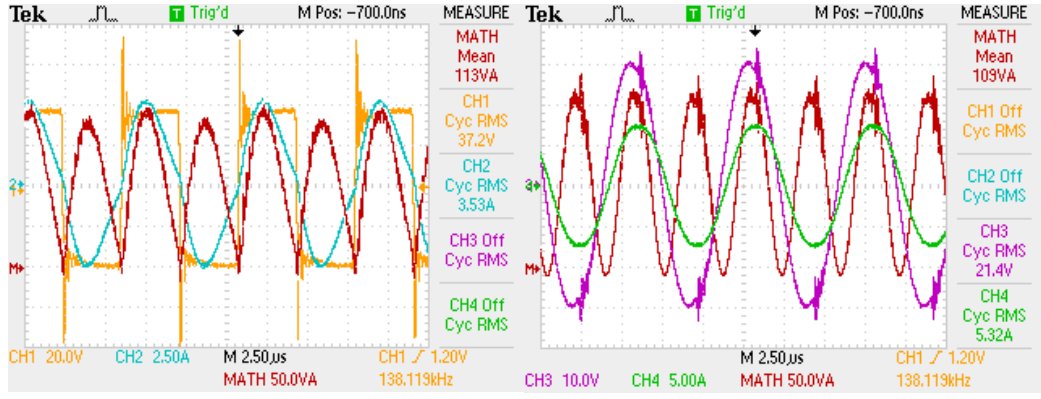


(a)

(b)

Şekil 5.11. 80 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış

Hizalanmış durumda, 70 katlama açısı için invertörün çıkış ve yükün giriş voltajı, akımı ve gücünü gösteren deneysel sonuçlar Şekil 5.12'de gösterilmektedir.

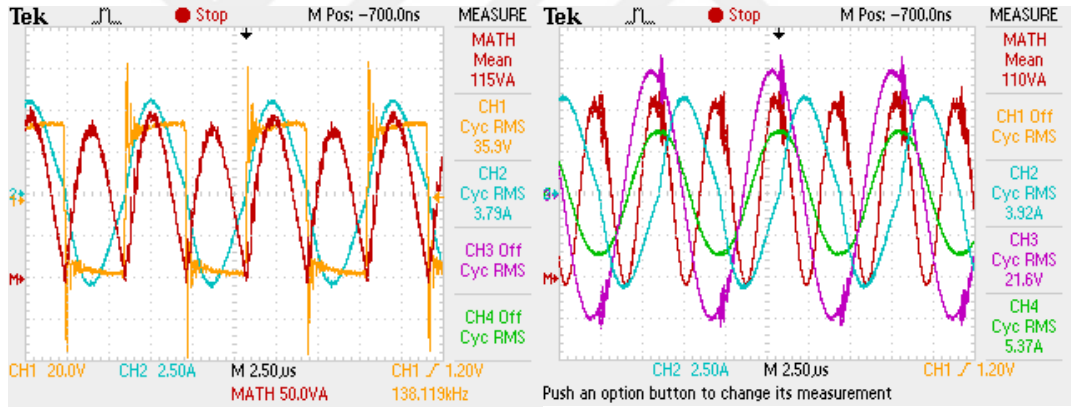


(a)

(b)

Şekil 5.12. 70 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış

Hizalanmış durumda, 60 katlama açısı için invertörün çıkış ve yükün giriş voltajı, akımı ve gücünü gösteren deneysel sonuçlar Şekil 5.13'de gösterilmektedir.

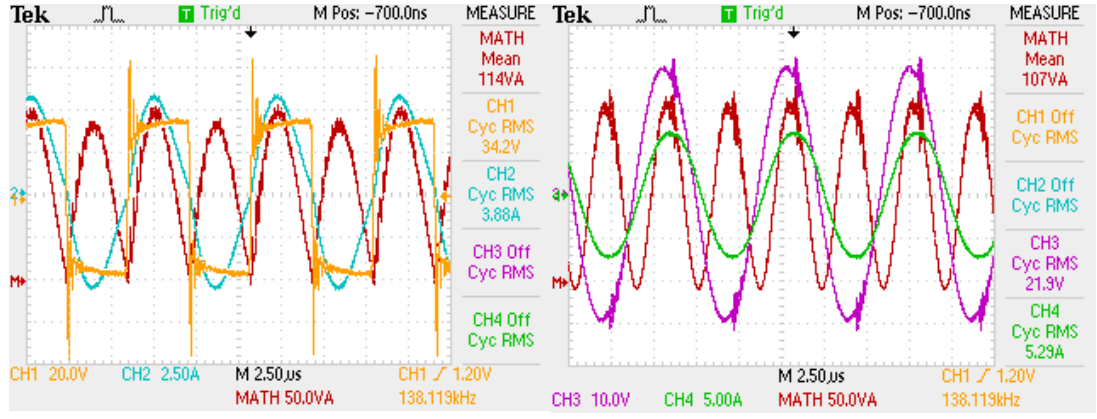


(a)

(b)

Şekil 5.13. 60 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış

Hizalanmış durumda, 50 katlama açısı için invertörün çıkış ve yükün giriş voltajı, akımı ve gücünü gösteren deneysel sonuçlar Şekil 5.14'de gösterilmektedir.

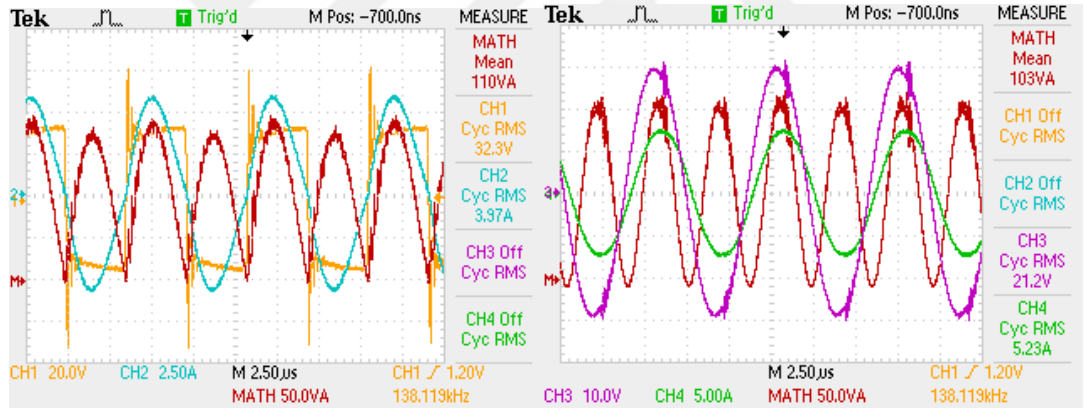


(a)

(b)

Şekil 5.14. 50 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış

Hizalanmış durumda, 40 katlama açısı için invertörün çıkış ve yükün giriş voltajı, akımı ve gücünü gösteren deneysel sonuçlar Şekil 5.15'de gösterilmektedir.

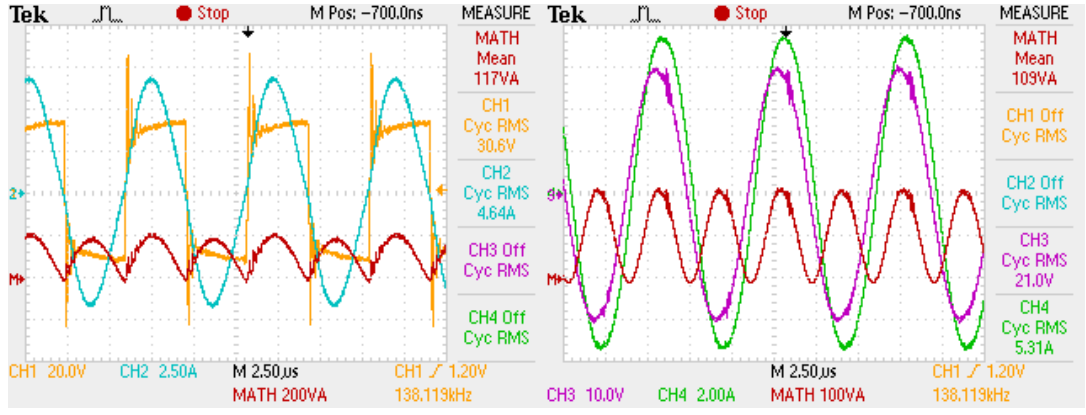


(a)

(b)

Şekil 5.15. 40 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış

Hizalanmış durumda, 30 katlama açısı için invertörün çıkış ve yükün giriş voltajı, akımı ve gücünü gösteren deneysel sonuçlar Şekil 5.16'de gösterilmektedir.

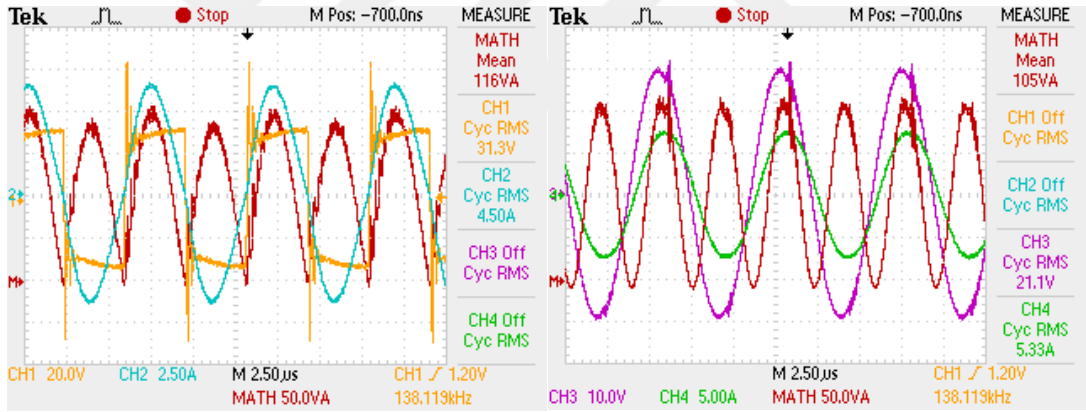


(a)

(b)

Şekil 5.16. 30 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış

Hizalanmış durumda, 20 katlama açısı için invertörün çıkış ve yükün giriş voltajı, akımı ve gücünü gösteren deneysel sonuçlar Şekil 5.17'de gösterilmektedir.

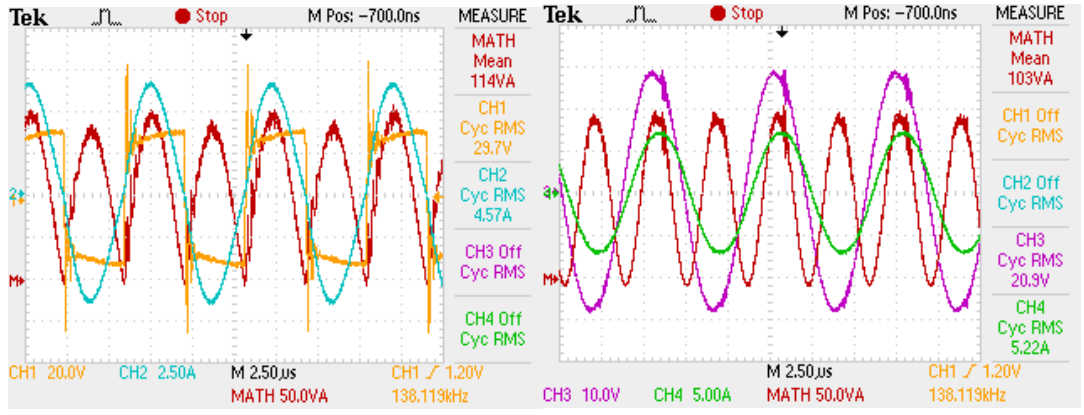


(a)

(b)

Şekil 5.17. 20 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış

Hizalanmış durumda, 10 katlama açısı için invertörün çıkış ve yükün giriş voltajı, akımı ve gücünü gösteren deneysel sonuçlar Şekil 5.18'de gösterilmektedir.

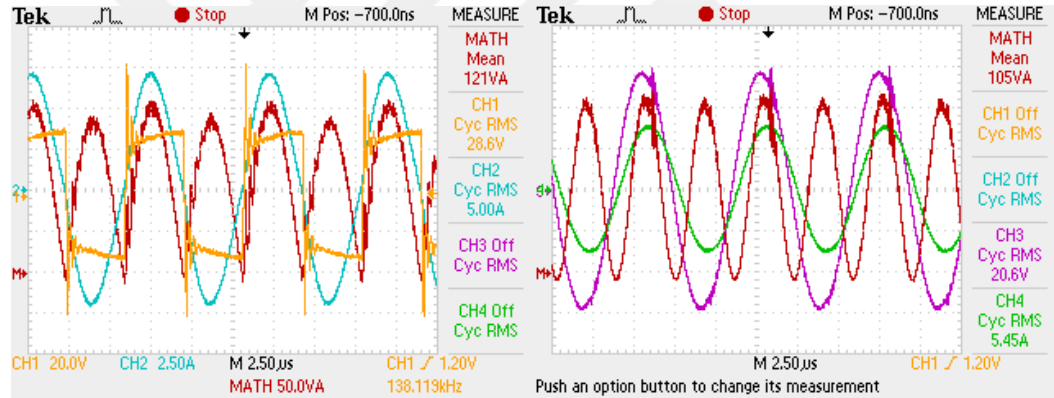


(a)

(b)

Şekil 5.18. 10 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış

Hızalanmış durumda, 0 katlama açısı için invertörün çıkış ve yükün giriş voltajı, akımı ve gücünü gösteren deneysel sonuçlar Şekil 5.19'de gösterilmektedir.



(a)

(b)

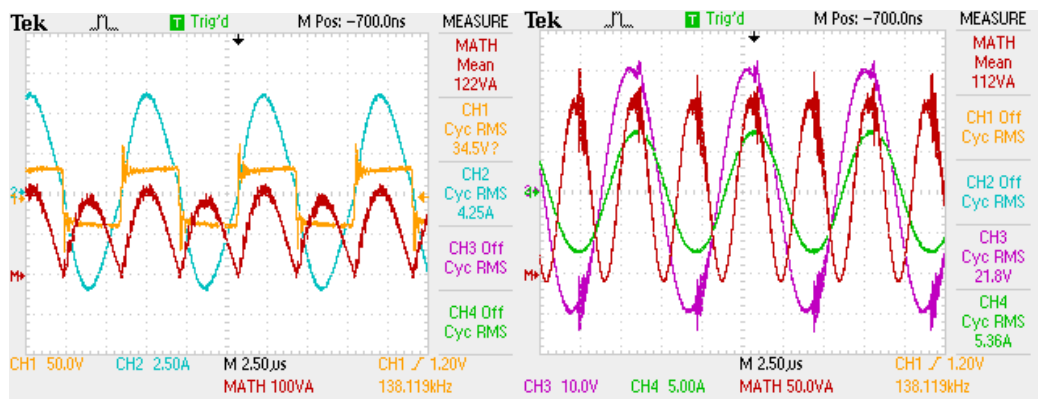
Şekil 5.19. 0 derecelik katlama açısında hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış

0 ila 90 katlama açısı için deneysel sonuçların detayları Tablo 2'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.3. 0 ila 90 katlama açısı için deneysel sonuçlar

Katlama Açısı	Giriş Gücü (Avg.)	Çıkış Gücü (Avg.)	Giriş Akımı (rms)	Çıkış Akımı (rms)	Giriş Gerilimi (rms)	Çıkış Gerilimi (rms)	η (%)	$Z_{Eş}$ (Ω)	$R_{yük}$ (Ω)
90	128 W	125 W	3.02 A	5.46 A	49 V	23.1 V	97.66	16.23	4.23
80	108 W	105 W	3.13 A	5.32 A	39.4 V	20.7 V	97.22	12.59	3.89
70	113 W	109 W	3.53 A	5.32 A	37.2 V	21.4 V	96.46	10.54	4.02
60	115 W	110 W	3.79 A	5.37 A	35.9 V	21.6 V	95.65	9.47	4.02
50	114 W	107 W	3.88 A	5.29 A	34.2 V	21.9 V	93.86	8.81	4.14
40	110 W	103 W	3.97 A	5.23 A	32.3 V	21.2 V	93.64	8.14	4.05
30	117 W	109 W	4.64 A	5.31 A	30.6 V	21 V	93.16	6.59	3.95
20	116 W	105 W	4.5 A	5.33 A	31.3 V	21.1 V	90.52	6.96	3.96
10	114 W	102 W	4.57 A	5.1 A	29.7 V	20.3 V	89.47	6.50	3.98
0	121 W	105 W	5 A	5.45 A	28.6 V	20.6 V	86.78	5.72	3.78

Katlama açısı arttıkça karşılıklı endüktans ve eşdeğer empedans artmaktadır. Eşdeğer empedansın artırılması, besleme voltajında bir artışa yol açmaktadır ve sabit bir çıkış gücü sağlamak için giriş akımını düşürmektedir. Daha düşük giriş akımı ile aynı gücün aktarılması, verici rezonatöründeki bakır kayıplarını azaltmaktadır. Bu durum, sistemin genel enerji verimliliğini olumlu yönde etkilemektedir. Sonuç olarak, katlama açısının artması, hem manyetik bağlantıyı iyileştirerek hem de bakır kayıplarını azaltarak verimliliğin artmasını sağlamaktadır. Kablosuz şarj sistemi, çeşitli yanlış hizalama mesafelerinde test edilmiştir. 90 derecelik katlama açısında 5 cm'lik yanlış hizalama için invertörün çıkış ve yükün giriş voltajı, akımı ve gücünü gösteren deneysel sonuçlar Şekil 5.20'de gösterilmektedir.



(a)

(b)

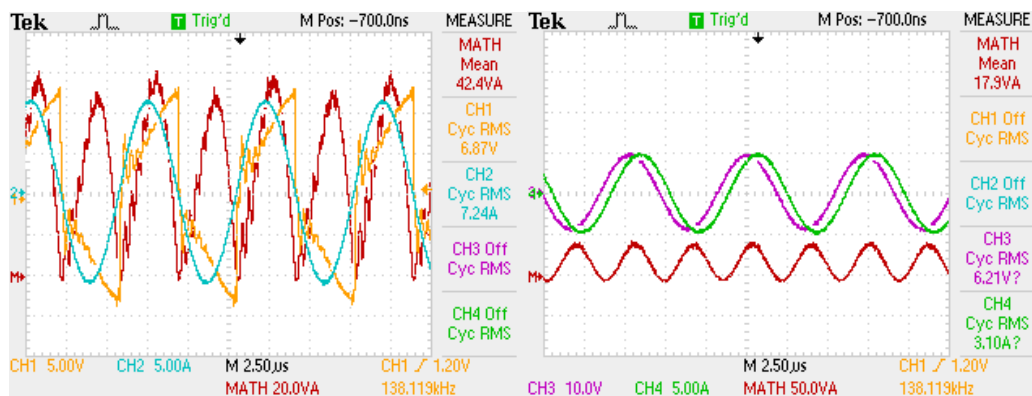
Şekil 5.20. 90 derecelik katlama açısında 5 cm yanlış hizalamalı durum için deneysel sonuçlar (a) giriş ve (b) çıkış

The figure consists of two side-by-side oscilloscope screenshots. Both show a red sine wave (CH1) and a green square wave (CH2). The top of each screen shows 'Tek', a trigger icon, 'Trig'd', and 'M Pos: -700.0ns'. The bottom of each screen shows 'CH1 50.0V', 'CH2 5.00A', 'M 2.50µs', and 'MATH 200VA'.

Left Screenshot: The CH1 measurement is set to 'Off Cyc RMS'. The CH1 Off Cyc RMS value is 20.7V. The CH2 Off Cyc RMS value is 7.31A. The CH3 Off Cyc RMS value is 20.8V. The CH4 Off Cyc RMS value is 5.18A.

Right Screenshot: The CH1 measurement is changed to 'Cyc RMS'. The CH1 Cyc RMS value is now 124VA. The CH2 Off Cyc RMS value is 7.31A. The CH3 Off Cyc RMS value is 20.8V. The CH4 Off Cyc RMS value is 5.18A.

90 derecelik katlama açısında 15 cm'lik yanlış hizalama için invertörün çıkış ve yükün giriş voltajı, akımı ve gücünü gösteren deneysel sonuçlar Şekil 5.22'de gösterilmektedir.



Yanlış hizalama için deneysel sonuçlar Çizelge 5.4'te gösterilmektedir.

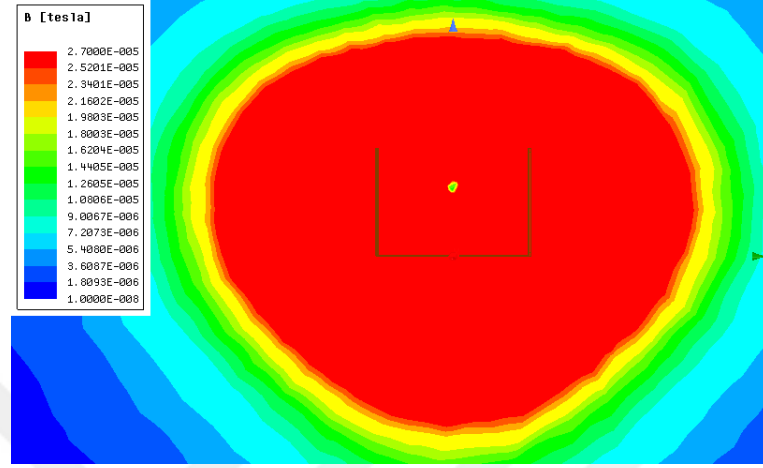
Çizelge 5.4. 90 derecelik katlanma açısında çeşitli yanlış hizalamalar için deneysel sonuçlar

Offset	Giriş Gücü (Avg.)	Çıkış Gücü (Avg.)	Giriş Akımı (rms)	Çıkış Akımı (rms)	Giriş Gerilimi (rms)	Çıkış Gerilimi (rms)	η (%)	$Z_{Eş}$ (Ω)	$R_{yük}$ (Ω)
0 mm	128 W	125 W	3.02 A	5.46 A	49 V	23.1 V	97.66	16.23	4.23
50 mm	122 W	112 W	4.25 A	5.36 A	34.5 V	21.8 V	91.80	8.12	4.07
100 mm	124 W	106 W	7.31 A	5.18 A	20.7 V	20.8 V	85.48	2.83	4.02
150 mm	42.4 W	17.9 W	7.24 A	3.1 A	6.87 V	6.21 V	42.22	0.86	2

Yanlış hizalama mesafesi arttıkça, karşılıklı endüktanstaki azalma nedeniyle eşdeğer empedans ve verimlilik azalmaktadır. Verimlilik, kritik karşılıklı endüktans değerinin altında hızlı bir şekilde düşüş göstermektedir. Önerilen sistemde, 90 derecelik katlama açısı ile 10 cm'ye kadar olan yanlış hizalamalarda %85'in üzerinde bir verimlilik sağlanmıştır. Ancak, yanlış hizalama 10 cm'yi aştığında, alıcı ve verici bobinler arasındaki manyetik bağlantı önemli ölçüde zayıflamakta, giriş akımı aşırı derecede artmakta ve verimlilik kabul edilemeyecek seviyelere gerilemektedir.

KET sistemleri, İHA üzerinde ve çevresinde elektromanyetik girişime neden olabilmektedir. Bu durum, hem İHA'nın elektronik bileşenleri hem de çevredeki insanlar için potansiyel riskler taşımaktadır. Bu nedenle, İHA ile insanlar arasındaki güvenli mesafenin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. IEEE (2019) ve ICNIRP (2020) standartlarına göre, elektromanyetik maruziyetin sınır değerlerin altında olduğu mesafeler belirlenerek, insanlar için güvenli alanlar tanımlanmalıdır. İHA üzerinde yer alan elektronik bileşenler de elektromanyetik girişime karşı korunmalıdır. Bu bileşenlerin maruziyet sınırları, genellikle üreticiler tarafından belirlenmektedir. Söz konusu sınırların aşılması durumunda, bileşenlerin iletkenleri üzerinde voltaj ve akım indüklenebilir, bu da parazitlere yol açabilmektedir. Bunun sonucunda sensörlerin işlevleri zayıflayabilir veya tamamen arızalanabilmektedir. Ayrıca, bileşenlerin aşırı ısınmasına veya fiziksel hasar görmesine neden olabilmektedir. Önerilen tasarımda, elektromanyetik saçılımın güvenli seviyelerde tutulması için kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Elektromanyetik saçılma, Ansys Maxwell 3D yazılımı kullanılarak incelenmiş ve güvenli mesafelerin belirlenmesi için gerekli veriler elde edilmiştir. Bu analizler,

hem İHA'nın elektronik bileşenlerinin korunmasını hem de insan sağlığına yönelik risklerin minimize edilmesini sağlamayı hedeflemiştir. Önerilen tasarımın manyetik akı yoğunluğu Şekil 5.23'te gösterilmiştir.



Şekil 5.23. Önerilen tasarımın manyetik akı yoğunluğu

138.1 kHz için IEEE ve ICNIRP için manyetik akı yoğunluğuna maruz kalma sınırı $27 \mu\text{T}$ 'dir (ICNIRP, 2020, IEEE, 2019). X eksen, Y eksen ve Z eksen üzerinde vericiden sırasıyla 6,5 cm, 12 cm ve 8,9 cm uzaklaştırıldığında manyetik akı yoğunluğu $27 \mu\text{T}$ 'nin altına düşmektedir. Bir insan veya canlı bu mesafelerden daha yakın yaklaştığında KET sisteminin kapatılması önerilmektedir.

6. KARŞILAŞTIRMA

Önerilen katlanır KET sisteminin performansı diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Performans karşılaştırmalarının Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Diğer çalışmalar ile karşılaştırma

Çalışmalar	Güç	η (%)	Hizalama Toleransı	Ağırlık Dengesi	Sürüklenme Kuvveti	Çalışma Frekansı	Bobin Tasarımı
Cai (2020)	vd., 500W	%90.8	-	Dengesiz	Daha az	100 kHz	İHA'nın bir ayağında dikey alıcı ve yatay DD vericisi
Yang vd., (2019)	64.88 W	%57.94	6 cm	Dengeli	Yüksek	364.4 kHz	Asimetrik dairesel bobin
Cai (2021)	vd., 221 W	%83.7	3 cm	Dengeli	Daha az	301 kHz	Çok kanallı asimetrik dairesel bobin.
Cai (2020)	vd., 259.9 W	%91.58	2,5 cm	Dengeli	Daha az	50 kHz	İHA'nın iki ayağında dikey alıcı ve yatay DDD vericisi.
Chai (2022)	vd., 102 W	%91.02	0,5 cm	Dengesiz	Daha az	85 kHz	İHA'nın tek ayağında L tipi manyetik kuplör.
Wang (2023)	vd., 135 W	%77.5	6 cm	Dengeli	Daha az	300 kHz	Çok kanallı dairesel bobin.
Bu Çalışma	125 W	%97.66	10 cm	Dengeli	Daha az	138.1 kHz	İHA'nın iki ayağında dikey alıcı ve katlanır düzlemsel spiral DDD vericisi.

Önerilen yöntem, güç verimliliği, ofset toleransı, ağırlık dengesi, sürüklenme kuvveti, çalışma frekansı ve bobin tasarımı açısından literatürde yer alan çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Çizelge 6.1. 'da önerilen yöntemin birçok açıdan diğer yöntemlere göre verimli olduğu görülmektedir. Tasarımlar arasında en verimli olanlardan biridir ve en yüksek yanlış hizalama toleransına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, her iki bacağa yerleştirilen ince tasarım, İHA üzerinde ağırlık dengesizliği oluşturmamıştır. Aynı zamanda düşük bir hava sürtünmesi elde edilmiştir.

Literatürdeki diğer tasarımların kaynak özeti aşağıda verilmiştir.

Cai ve arkadaşları tarafından yapılan tasarımda, alıcı bobin dikey olarak yerleştirilmiştir ve verici pedine dik olarak konumlandırılmıştır. Alıcı bobin İHA'nın tek bacağına yerleştirilmiştir. Bu durum daha az sürüklenme kuvvetine sahip olmasını sağlamıştır ancak İHA'da bir dengesizlik meydana getirmiştir (Cai vd., 2020).

Yang ve arkadaşları tarafından yapılan tasarımda, dairesel bobin dengeli bir tasarımdır. Ancak daha geniş bir alan kapladığı için sürüklenme kuvveti yüksektir. Hava sürtünmesi yüksek olduğu için İHA'nın daha fazla güç

harcamasına neden olacağından dolayı İHA'larda kullanılmaya uygun değildir. Ayrıca sistemin verimi de %57,94 olarak düşük bir seviyede kalmıştır (Yang vd., 2019).

Cai ve arkadaşları ile Wang ve arkadaşları tarafından yapılan tasarımlarda, İHA'nın her bir bacağına alıcı bobinler yerleştirilerek dengesizlik sorununun önüne geçilmiştir. Aynı zamanda daha az sürüklenme kuvveti elde edilmiştir. Ancak birden fazla alıcı ve verici bobin kullanılması sistemi daha kompleks hale getirmiştir ve maliyetleri artırmıştır (Cai vd., 2021, Wang vd., 2023).

Cai ve arkadaşları tarafından yapılan tasarımda, alıcı bobinler İHA'nın iki bacağına yerleştirildiği için dengeli ve daha az sürüklenme kuvvetine sahip bir sistem elde edilmiştir. Sistem %91,58 yüksek bir verimle güç aktarımı sağlayabilmektedir. Bu tezde önerilen katlanabilir bobin tasarımı ile yanıl yanlış hizalanma durumunun önüne geçilip sistemin daha verimli bir hale getirildiği ortaya konmuştur (Cai vd., 2020).

Chai ve arkadaşları tarafından yapılan tasarımda, alıcı bobin İHA'nın tek bir bacağına yerleştirildiğinden dolayı İHA'da dengesizlik meydana gelmiştir. Hizalama toleransının oldukça düşük olduğu görülmüştür. Manyetik alan saçılımını azaltmak için nüve kullanılmıştır. Bu da daha fazla maliyete sebep olmuştur. Bu tezde önerilen sistem ile nüve kullanılmadan manyetik alan saçılımı azaltılmıştır (Chai vd., 2022).

7. SONUÇ VE ÖNERİLER (TARTIŞMA VE SONUÇLAR)

Günümüzde İHA'lar, otonom çalışma özellikleriyle yaygın bir şekilde kullanılmakta ve kendi kendini şarj edebilme özelliğinin geliştirilmesi üzerine çalışılmaktadır. İHA'lar, KET teknolojileri sayesinde otonom olarak şarj edilebilmektedir. Bu çalışma, endüktif kuplaj kullanarak İHA'ları kablosuz olarak şarj etmek için iki farklı tasarım yapılmıştır ve yeni bir tasarım ortaya çıkarılmıştır. İlk olarak DDD bobin tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımda, İHA üzerinde dengesizlik veya ekstra ağırlık oluşmaması için alıcı bobinler, İHA'nın iki ayağına hafif ve dengeli bir şekilde yerleştirilmiştir. Bu tasarım, iki dikey alıcı

bobin ve zemine yerleştirilmiş üç verici bobinden oluşmaktadır. İkinci tasarımda ise İHA'nın yatay ve dikey yanlış hizalama durumunun önüne geçebilmek için yeni tip bir katlanır bobin tasarlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan tasarımda, alıcı iki dikey düzlemsel spiral bobine, verici ise bir yatay ve iki katlanabilir düzlemsel spiral bobine sahiptir. Verici ve alıcı bobinler, ANSYS Maxwell 3D yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Alıcı bobinlerin ince tasarımı ve İHA'nın bacaklarına dengeli bir şekilde yerleştirilmesi sayesinde, ağırlık dengesizliği yaratılmamış ve hava sürtünmesi minimum düzeye indirilmiştir. Vericide bulunan katlanabilir bobinler, alıcı ve verici bobinler arasındaki manyetik bağlantıyı artırmış ve aynı zamanda İHA'nın inişi mekanik olarak yönlendirilmiştir. Mekanik yönlendirme sayesinde İHA, Y ekseninde tam olarak hizalanmıştır. Ayrıca, katlanabilir tasarım X eksenindeki yanlış hizalamalara karşı toleransı artırmıştır. Bu katlanabilir kablosuz şarj cihazı, 138,1 kHz çalışma frekansında ve 100 W çıkış gücü sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Tam hizalanmış durumda, önerilen katlanabilir bobin tasarımı ile kablosuz şarj verimliliği %97,66'ya ulaşmıştır. Bunun yanı sıra, 10 cm'ye kadar olan yanlış hizalamalarda bile %85,48'in üzerinde verimlilik sağlanmıştır. Bu sonuçlar, önerilen tasarımın hem yüksek verimlilik hem de yanlış hizalamalara karşı dayanıklılık sunduğunu göstermektedir. Bu tasarım, diğer İHA kablosuz şarj tasarımlarına göre manyetik saçılmayı azaltarak, bağlantı faktörünü artırarak, alıcı kablo ağırlığını azaltarak ve yanlış hizalama toleransını iyileştirerek diğer seçeneklerden daha iyi performans göstermiştir.

KAYNAKLAR

- Ağçal, A. (2014). Kablosuz enerji transferinde farklı hava aralıkları ve karakteristik empedanslara göre verim analizi.
- Ağçal, A., & Doğan, T. H. (2021). 1 KW GÜCÜNDE KABLOSUZ ENERJİ TRANSFER SİSTEMİ TASARIMI VE İNSAN SAĞLIĞINA ETKİLERİ. *Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, 9(3), 856-865. <https://doi.org/10.21923/jesd.936058>
- Ağçal, A., Ozcira, S., Gokcek, T., Bekiroglu, N., Obdan, H., & Erdinc, O. (2023). A Novel Closed-Loop Frequency Control Approach for Wireless Power Transfer Systems in On-Road Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
- Arslan, M. T., & Erkan, K. (2022). Manyetik Rezonans Kuplaj Yöntemiyle Kablosuz Güç Aktarımı Üzerine Literatür Taraması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (42), 118-125.
- Budhia, M., Covic, G. A., & Boys, J. T. (2011). Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26(11), 3096-3108.
- Cai, C., Liu, J., Wu, S., Zhang, Y., Jiang, L., Zhang, Z., & Yu, J. (2020). Development of a cross-type magnetic coupler for unmanned aerial vehicle IPT charging systems. *IEEE Access*, 8, 67974-67989.
- Cai, C.; Wu, S.; Jiang, L.; Zhang, Z.; Yang, S. A 500-W wireless charging system with lightweight pick-up for unmanned aerial vehicles. *IEEE Trans. Power Electron.* 2020, 35, 7721–7724.
- Cai, C., Wang, J., Zhang, F., Liu, X., Zhang, P., & Zhou, Y. G. (2021). A multichannel wireless UAV charging system with compact receivers for improving transmission stability and capacity. *IEEE Systems Journal*, 16(1), 997-1008.
- Campi, T., Dionisi, F., Cruciani, S., De Santis, V., Feliziani, M., & Maradei, F. (2016, May). Magnetic field levels in drones equipped with wireless power transfer technology. In 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC) (Vol. 1, pp. 544-547). IEEE.
- Castillo-Zamora, I. U., Huynh, P. S., Vincent, D., Perez-Pinal, F. J., Rodriguez-Licea, M. A., & Williamson, S. S. (2019). Hexagonal geometry coil for a WPT high-power fast charging application. *IEEE transactions on transportation electrification*, 5(4), 946-956.

- Chittoor, P. K., Chokkalingam, B., & Mihet-Popa, L. (2021). A review on UAV wireless charging: Fundamentals, applications, charging techniques and standards. *IEEE access*, 9, 69235-69266.
- Doğan, Z., Özsoy, M., & İskender, İ. (2019). Manyetik Rezonansa Dayalı Kablosuz Enerji Transferi İçin Yeni Bir Nüve Geometrisi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 7(4), 1012-1024.
- Doğan, T.H.; Ağçal, A. DDD coil design for wireless charging of unmanned aerial vehicles. *Microw. Opt. Technol. Lett.* 2024, 66, e33985. <https://doi.org/10.1002/mop.33985>.
- Institute of Electrical and Electronic Engineers. IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz. New York: Institute of Electrical and Electronic Engineers; IEEE Std C95.1-2019; 2019.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2020). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health physics*, 118(5), 483-524.
- Imura, T., & Hori, Y. (2011). Maximizing air gap and efficiency of magnetic resonant coupling for wireless power transfer using equivalent circuit and Neumann formula. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 58(10), 4746-4752.
- Ke, D., Liu, C., Jiang, C., & Zhao, F. (2017, October). Design of an effective wireless air charging system for electric unmanned aerial vehicles. In *IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 6949-6954). IEEE.
- Li, Y., Sun, W., Liu, J., Liu, Y., Yang, X., Li, Y., ... & He, Z. (2022). A new magnetic coupler with high rotational misalignment tolerance for unmanned aerial vehicles wireless charging. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(11), 12986-12991.
- Luo, Z., & Wei, X. (2017). Analysis of square and circular planar spiral coils in wireless power transfer system for electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(1), 331-341.
- Orta, E. (2019). Kablosuz güç transfer sistemleri için devre modeli temelli çevrim tasarımı (Master's thesis, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Otomo, Y., & Igarashi, H. (2019, October). Topology optimization of magnetic couplers for wireless power transfer considering electromagnetic shields. In *IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (Vol. 1, pp. 4341-4344). IEEE.

- Özder, Ö. (2020). Kablosuz güç transferinde kullanılan bobin yapılarının incelenmesi (Master's thesis, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Pashaei, A., Aydın, E., Polat, M., Yıldırım, E., Et Al. (2016). Elektrikli Araçlar İçin Temassız Güç Aktarım Sistemleri. *Emo Bilimsel Dergi*, 6(11), 1-11.
- Rong, C., He, X., Wu, Y., Qi, Y., Wang, R., Sun, Y., & Liu, M. (2021). Optimization design of resonance coils with high misalignment tolerance for drone wireless charging based on genetic algorithm. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58(1), 1242-1253.
- Sivagami, K., Prathap, G. V. T., Channegowda, J., & Damodharan, P. (2021, February). Analysis of hybrid solenoid coupler as transmitter with rectangular and circular coupler as receiver for wireless power transfer. In 2021 7th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES) (pp. 299-304). IEEE.
- Song, K., Yang, G., Guo, Y., Lan, Y., Dong, S., Jiang, J., & Zhu, C. (2020). Design of DD coil with high misalignment tolerance and low EMF emissions for wireless electric vehicle charging systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(9), 9034-9045.
- Wang, W., Xu, C., Zhang, C., & Yang, J. (2021). Optimization of transmitting coils based on uniform magnetic field for unmanned aerial vehicle wireless charging system. *IEEE Transactions on Magnetics*, 57(6), 1-5.
- Wang, J.; Wang, C.; Cai, C.; Chen, R. A combinable wireless power transfer design for extensible-capacity and adaptive charging of route UAVs with active ripple mitigation. *AEU-Int. J. Electron. Commun.* 2023, 162, 154579.
- Wu, S., Cai, C., Jiang, L., Li, J., & Yang, S. (2020). Unmanned aerial vehicle wireless charging system with orthogonal magnetic structure and position correction aid device. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(7), 7564-7575.
- Yang, C.; He, Y.; Qu, H.; Wu, J.; Hou, Z.; Lin, Z.; Cai, C. Analysis, design and implement of asymmetric coupled wireless power transfer systems for unmanned aerial vehicles. *AIP Adv.* 2019, 9, 025206.
- Zhang, H., Chen, Y., Jo, C. H., Park, S. J., & Kim, D. H. (2020). DC-link and switched capacitor control for varying coupling conditions in inductive power transfer system for unmanned aerial vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(5), 5108-5120.