

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNSANSIZ HAVA ARACININ FOTOVOLTAİK SİSTEM
VASITASIYLA OTONOM ŞARJ EDİLMESİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRAH ARSLAN

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ

TEZ DANIŞMANI

Prof. Dr. Nezir YILDIRIM

BİNGÖL-2026

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İNSANSIZ HAVA ARACININ FOTOVOLTAİK SİSTEM
VASITASIYLA OTONOM ŞARJ EDİLMESİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRAH ARSLAN

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ

TEZ DANIŞMANI

Prof. Dr. Nezir YILDIRIM

BİNGÖL-2026

**İNSANSIZ HAVA ARACININ FOTOVOLTAİK SİSTEM VASITASIYLA
OTONOM ŞARJ EDİLMESİNİN İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Nezir YILDIRIM danışmanlığında, Emrah ARSLAN tarafından hazırlanan bu çalışma 10/09/2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yenilenebilir Enerji Sistemleri Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Dr. Öğr. Üyesi Ebubekir BOZKURT	İmza	:
Üye	: Prof. Dr. Kazım HANBAY	İmza	:
Üye	: Prof. Dr. Nezir YILDIRIM	İmza	:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun// tarih ve/
nolu kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Murat DENER
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Tez çalışmaları süresince yardımlarını ve bilgi birikimini esirgemeyen, çalışmaların tamamlanabilmesi için gerekli desteği veren değerli hocam Prof. Dr. Nezir YILDIRIM'a teşekkür ederim. Tez çalışmasına desteklerinden dolayı Bingöl Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar esnasında yardımlarını gördüğüm başta değerli arkadaşlarım Bülent DANACI ve Sinan DÖNMEZ'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Son olarak bende büyük emekleri olan, benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan ve dualarını esirgemeyen anne ve babama, tezin hazırlanması sırasında gösterdikleri sabır, fedakârlık ve desteklerinden dolayı eşim ve biricik kızıma özellikle teşekkürü bir borç bilirim.

Emrah ARSLAN

Bingöl 2026

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	vi
ÖZET	vii
ABSTARCT	viii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1. Manyetik Kuplajın Temel Prensibi	3
2.2. Manyetik Kuplaj Katsayısı ve Enerji Verimliliği	3
2.3. Endüktif ve Rezonanslı Manyetik Kuplaj	4
2.3.1. Endüktif Kuplaj	5
2.3.2. Rezonanslı Manyetik Kuplaj	6
2.4. Otonom Sistemlerde Manyetik Kuplajın Avantajları	6
2.5. Otonom Sistemlerde Manyetik Kuplajın Dezavantajları	7
3. MATERYAL VE YÖNTEMLER	8
3.1. Tam Otonom Sistem İçin Misina Tabanlı Mekanik Merkezleme Sistemi	8
3.2. Sistemin Montajı ve Kontrol Birimi	10
3.3. Sistemin Çalışma Prensibi	13
3.6. Kablosuz Şarj Sistemi ile Entegrasyon	16
3.7. Doğru Akım Güç Sistemi Bileşenleri ve Seçim Kriterleri	19
3.7.1. Aylık Ortalama Günlük Fotovoltaik Enerji Üretimi	22
3.7.2. Şarj Kontrol Ünitesi	23
3.7.3. Enerji Depolama Birimi (Akü Sistemi)	23
3.7.4. Doğru Akım Yükleri ve İnvertörsüz Besleme Yaklaşımı	24
3.8. Enerji Üretim ve Tüketim Hesapları	25
3.8.1. Günlük Enerji Tüketimi Hesabı	25
3.8.2. Toplam Günlük Enerji Tüketimi	28
3.9. Akü Kapasitesi ve Enerji Depolama Analizi	29

3.10. Güneş Paneli ile Enerji Üretimi.....	30
3.11. Enerji Denge Değerlendirmesi	31
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	33
4.1. Mekanik Merkezleme Sistemine İlişkin Bulgular	33
4.2. Kablosuz Şarj Sistemine İlişkin Bulgular.....	33
4.3. Fotovoltaik Enerji Üretimine İlişkin Bulgular	35
4.4. Enerji Tüketimine İlişkin Bulgular	35
4.5. Enerji Dengesi ve Otonom Sistemine İlişkin Bulgular	36
4.6. Bulguların Literatürle Karşılaştırılması.....	38
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	41
KAYNAKLAR	44

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AA	: Alternatif akım
DA	: Doğru akım
İHA	: İnsansız hava aracı
KGA	: Kablosuz güç aktarımı (Wireless Power Transfer)
WPC	: Wireless Power Consortium (Kablosuz güç konsorsiyumu)
Qİ	: Wireless Power Consortium tarafından geliştirilen kablosuz güç aktarım standardı
FV	: Fotovoltaik
PVGİS	: Photovoltaic Geographical Information System
GEPA	: Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası
MGNT	: Maksimum güç noktası takibi (Maximum Power Point Tracking)
LiFePo ₄	: Lityum demir fosfat
TX	: Verici (Transmitter)
RX	: Alıcı (Receiver)
PTx	: Güç vericisi (Power Transmitter)
PRx	: Güç alıcısı (Power Receiver)
EMK	: Elektromotor kuvvet
GPS	: Global Positioning System (Küresel Konumlama Sistemi)
USB-C	: USB-C
ESP32	: ESP32 tabanlı mikrodenetleyici ve kontrol platformu
IP	: Muhafaza koruma derecesi (Ingress Protection)
STC	: Standart test koşulları (Standard Test Conditions)
AM	: Hava kütlesi (Air Mass)
V _{oc}	: Açık devre gerilim
V _{mp}	: Maksimum güç noktası gerilimi
I _{sc}	: Maksimum güç noktası akımı
IEEE	: Institute of electrical and electronics engineers
WPCT	: Wireless Power Transfer Conference

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Qi tabanlı endüktif kablosuz enerji aktarımının çalışma prensibi.....	5
Şekil 3.1.	Platformun genel ölçüleri ve İHA için kullanılabilir iniş alanı.....	9
Şekil 3.2.	Merkezleme sistemi mekanik bileşenlerinin platform üzerine montajı	10
Şekil 3.3.	İHA iniş takımlarına eklenen merkezleme aparatları.....	11
Şekil 3.4.	ESP32 tabanlı kontrol birimi ve elektronik bağlantıları.....	12
Şekil 3.5.	ESP32 tabanlı kontrol birimi ve elektronik bağlantıların muhafazasıyla beraber platformun alt tarafına montajı.....	12
Şekil 3.6.	HA'nın platform üzerine örnek bir iniş gerçekleştirdiği konum ve manyetik şarj bölgesine göre başlangıç konumu gösterilmektedir.....	13
Şekil 3.7.	Merkezleme işlemi sonrasında İHA'nın platform merkezindeki konumu.....	14
Şekil 3.8.	İHA merkezleme sisteminin kontrol algoritması.....	15
Şekil 3.9.	Bu çalışmada kullanılan Qi tabanlı kablosuz şarj verici (TX) bobini...	17
Şekil 3.10.	İHA üzerine monte edilen alıcı (RX) bobininin genel görünüm.....	17
Şekil 3.11.	Balkona kurulan platform güneş enerjisi destekli otonom İHA şarj istasyonunun verici (TX) biriminin gerçek uygulama görünümü.....	18
Şekil 3.12.	Montajı yapılan 395 W monokristal güneş paneli.....	20
Şekil 3.13.	Sincan ilçesi aylık güneşlenme süreleri (saat) (GEPA).....	21
Şekil 3.14.	PVGIS programından elde edilen analiz sonuçları (PVGIS).....	22
Şekil 3.15.	Montajı yapılan 40 Amper (MGNT) şarj kontrol ünitesi.....	23
Şekil 3.16.	Montajı yapılan 12 V 100 Ah LiFePO ₄ (Lityum Demir Fosfat) akü....	24
Şekil 4.1.	Geliştirilen manyetik kuplajlı kablosuz şarj sistemine ait deneysel görüntüler: (a) gece ortamında (b) İHA'nın şarj platformu üzerinde (c) yaklaşık 4 mm hava boşluğunda alıcı (RX) ile verici (TX) bobinlerin hizalanması.....	34
Şekil 4.2.	Sistemin enerji akışını gösteren blok diyagramı.....	38

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 3.1.	Çalışmada kullanılan fotovoltaik panelin üretici teknik veri föyüne göre teknik özellikleri.....	21
Tablo 3.2.	DC yüklerin güç değerleri ve günlük enerji tüketim hesabı.....	28

İNSANSIZ HAVA ARACININ FOTOVOLTAİK SİSTEM VASITASIYLA OTONOM ŞARJ EDİLMESİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, güneş enerjisi ile beslenen, tamamen 12 V doğru akım (DA) güç barası esaslı şebekeden bağımsız bir güç sistemi tasarlanmış ve analiz edilmiştir.

Tasarlanan sistem, enerji dönüşüm kayıplarını azaltmak ve saha koşullarında güvenilir bir çalışma sağlamak amacıyla AA invertör kullanılmadan yapılandırılmıştır. Enerji üretimi güneş paneli aracılığıyla sağlanmış, üretilen enerji LiFePO₄ aküde depolanmış ve sistem yükleri sigortalı DA dağıtım hattı üzerinden beslenmiştir.

İHA'nın iniş sonrasında kablosuz şarj vericisi ile uygun şekilde hizalanabilmesi amacıyla elektromekanik bir merkezleme sistemi geliştirilmiştir. İHA'nın platform üzerine inişinin algılanmasının ardından motorlu merkezleme mekanizması devreye girerek İHA'yı platformun merkezinde bulunan kablosuz şarj noktasına yönlendirmektedir. Merkezleme işleminin tamamlanmasıyla verici ve alıcı bobinlerin uygun konuma getirilmesi ve kablosuz enerji aktarımının daha güvenilir şekilde gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu kapsamda, otonom sistemlerde insan müdahalesini azaltmak ve mekanik temas kaynaklı problemleri ortadan kaldırmak amacıyla manyetik kuplaj temelli kablosuz enerji aktarım sistemi değerlendirilmiştir. Kablosuz şarj yaklaşımı DA güç altyapısı ile uyumlu olacak şekilde entegre edilmiş ve düşük gerilimli yüklerin adaptörsüz olarak beslenmesi sağlanmıştır. Bu sayede sistem verimliliğinin artırılması, bakım ihtiyacının azaltılması ve güvenli bir enerji aktarımının sağlanması hedeflenmiştir. Yapılan enerji üretim ve tüketim hesapları, sistem bileşenlerinin birbiriyle uyumlu olduğunu ve günlük enerji ihtiyacının uygun güneşlenme koşullarında karşılanabileceğini göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen sistemin otonom İHA istasyonları ve benzeri şebekeden bağımsız uygulamalar için uygulanabilir ve ölçeklenebilir bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Güneş enerjisi, Şebekeden bağımsız güç sistemi, Manyetik Kuplaj, Kablosuz şarj, İHA merkezleme sistemi.

INVESTIGATION OF AUTONOMOUS CHARGING OF AN UNMANNED AERIAL VEHICLE VIA A PHOTOVOLTAIC SYSTEM

ABSTARCT

In this thesis, a solar-powered off-grid power system based entirely on a 12 V direct current (DC) power bus was designed and analyzed. The proposed system was configured without an AC inverter in order to minimize energy conversion losses and ensure reliable operation under field conditions. Electrical energy was generated by a photovoltaic panel, stored in a LiFePO₄ battery, and supplied to the system loads through a fused DC distribution line.

An electromechanical centering system was developed to ensure proper alignment of the unmanned aerial vehicle (UAV) with the wireless charging transmitter following landing. Once the UAV landing on the platform is detected, the motor-driven centering mechanism is activated to guide the UAV toward the wireless charging point located at the center of the platform. Upon completion of the centering process, the transmitter and receiver coils are brought into appropriate alignment, thereby enabling more reliable wireless power transfer.

Within this framework, a magnetic coupling-based wireless power transfer system was evaluated with the aim of reducing human intervention in autonomous systems and eliminating problems associated with mechanical contact. The wireless charging approach was integrated with the DC power infrastructure, allowing low-voltage loads to be supplied without the use of AC adapters. This configuration was intended to improve overall system efficiency, reduce maintenance requirements, and ensure safe energy transfer. The energy generation and consumption calculations demonstrated that the system components were mutually compatible and that the daily energy demand could be met under suitable solar irradiation conditions. The obtained results indicate that the developed system provides a feasible and scalable solution for autonomous UAV stations and similar off-grid applications.

Keywords: Solar energy, Off-grid power system, Magnetic zoupling, Wireless charging, UAV centering system.

1. GİRİŞ

Günümüzde İnsansız Hava Araçları (İHA) ve otonom sistemlerin kullanımı; güvenlik, haberleşme, gözlem ve veri toplama gibi birçok alanda hızla yaygınlaşmaktadır. Bu sistemlerin saha koşullarında kesintisiz, güvenilir ve minimum insan müdahalesi ile çalışabilmesi, enerji ihtiyacının verimli ve sürdürülebilir yöntemlerle karşılanmasını zorunlu kılmaktadır. Özellikle şebeke elektriğine erişimin sınırlı veya mümkün olmadığı bölgelerde, güneş enerjisi tabanlı şebekeden bağımsız güç sistemleri önemli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Fotovoltaik etkinin bilimsel temelleri, Alexandre-Edmond Becquerel'in 1839 yılında güneş ışınımının elektriksel etkilerini inceleyen çalışmalarıyla atılmıştır (Becquerel, 1839). Günümüzde fotovoltaik enerji üretiminde yaygın olarak kullanılan teknolojilerden biri monokristal silikon güneş hücreleridir. Monokristal silikon hücreler, tek kristal yapıları ve yüksek enerji dönüşüm verimleri nedeniyle fotovoltaik uygulamalarda önemli bir yere sahiptir (Green, 1993). Özellikle kurulum alanının sınırlı olduğu uygulamalarda yüksek güç yoğunluğu sağlamaları önemli bir avantaj oluşturmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle monokristal fotovoltaik paneller, şebekeden bağımsız enerji sistemlerinde uygun bir enerji üretim seçeneği oluşturmaktadır. Klasik enerji besleme yöntemlerinde kablolu bağlantılar ve mekanik temas gerektiren şarj çözümleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemler, dış ortam koşullarında aşınma, oksitlenme, temas problemleri ve bakım ihtiyacı gibi çeşitli dezavantajlar ortaya çıkarmaktadır. Bu sorunların önüne geçebilmek amacıyla son yıllarda manyetik kuplaj temelli kablosuz enerji aktarım sistemleri, otonom ve mobil platformlar için alternatif bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

Manyetik kuplaj prensibine dayalı kablosuz enerji aktarımında, birincil (verici) ve ikincil (alıcı) bobinler arasında oluşan manyetik alan sayesinde fiziksel temas olmaksızın enerji transferi gerçekleştirilmektedir. Bu yaklaşım; mekanik temasın ortadan kaldırılması, çevresel etkilere karşı dayanıklılık, güvenli şarj ve sistem ömrünün uzatılması gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Özellikle otonom iniş-kalkış veya sabit istasyon uygulamalarında, manyetik kuplajlı şarj sistemleri insan müdahalesi gerektirmeden enerji aktarımına olanak tanımaktadır.

Bu tez çalışmasında, güneş enerjisi ile beslenen, tamamen 12 V doğru akım (DA) ana güç barasına sahip bir güç sistemi ile birlikte, manyetik kuplaj esaslı kablosuz şarj yaklaşımı değerlendirilmiştir. Tasarlanan sistem; haberleşme ekipmanları, kamera sistemleri ve kablosuz şarj vericisi gibi düşük gerilimli DA yükleri beslemek üzere optimize edilmiştir. Enerji dönüşüm kayıplarını azaltmak amacıyla AA invertör kullanılmamış, DA uyumlu yükler doğrudan doğru akım barasından beslenmiştir. Bu kapsamda çalışma, hem şebekeden bağımsız DA güç altyapısını hem de manyetik kuplajlı kablosuz enerji aktarımının otonom sistemler için uygulanabilirliğini birlikte ele alarak, saha koşullarına uygun, verimli ve modüler bir çözüm sunmayı amaçlamaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Manyetik Kuplajın Temel Prensibi

Manyetik kuplaj temelli kablosuz enerji aktarımı, elektrik enerjisinin fiziksel bir iletken bağlantı olmaksızın, manyetik alan aracılığıyla aktarılmasını sağlayan bir yöntemdir. Manyetik rezonans kuplaj yöntemi ile kablosuz enerji aktarımında, aynı frekansta rezonansa girecek şekilde ayarlanmış alıcı ve verici iki bobin arasında oluşan güçlü manyetik alandan faydalanılarak enerji verimli bir şekilde kaynaktan hedefe temassız olarak aktarılmaktadır (Barman ve ark. 2015). Sistem, temel olarak elektromanyetik indüksiyon prensibine dayanmaktadır.

Birincil bobine alternatif akım (AA) uygulandığında, bobin etrafında değişken bir manyetik alan oluşur. Bu manyetik alan, yakın konumda bulunan ikincil bobini kestiğinde, Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasasına göre ikincil bobin üzerinde bir elektromotor kuvvet (EMK) indüklenir. Böylece elektrik enerjisi, iki bobin arasında doğrudan temas olmaksızın aktarılmış olur.

2.2. Manyetik Kuplaj Katsayısı ve Enerji Verimliliği

Manyetik kuplajın etkinliği, bobinler arasındaki kuplaj katsayısı (k) ile ifade edilir. Bu katsayı, 0 ile 1 arasında değer alır ve bobinler arasındaki manyetik alanın ne kadarının ikincil bobine bağlandığını gösterir. Kuplaj katsayısı, karşılıklı endüktansın bobinlerin öz endüktanslarının geometrik ortalamasına oranı olarak tanımlanan boyutsuz bir parametredir ve iki bobin arasındaki manyetik bağın gücünü ifade etmektedir. Kuplaj katsayısı kavramının teorik temel, Maxwell'in elektromanyetik alan kuramına ve Neumann tarafından geliştirilen karşılıklı endüktans yaklaşımına dayanmaktadır (Maxwell 1879; Neumann, 1843).

İki bobin arasındaki manyetik kuplaj katsayısının hesaplanmasında kullanılan matematiksel ifade Denklem (2.1)'de verilmiştir. Bu denklem, karşılıklı endüktansın verici

ve alıcı bobinlerin öz endüktansları ile olan ilişkisini tanımlamakta ve kuplaj katsayısının boyutsuz bir parametre olarak hesaplanmasını sağlamaktadır.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (2.1)$$

Denklemden k kuplaj katsayısı, M karşılıklı endüktans, L_1 verici bobinin endüktansı ve L_2 alıcı bobinin endüktansını ifade etmektedir.

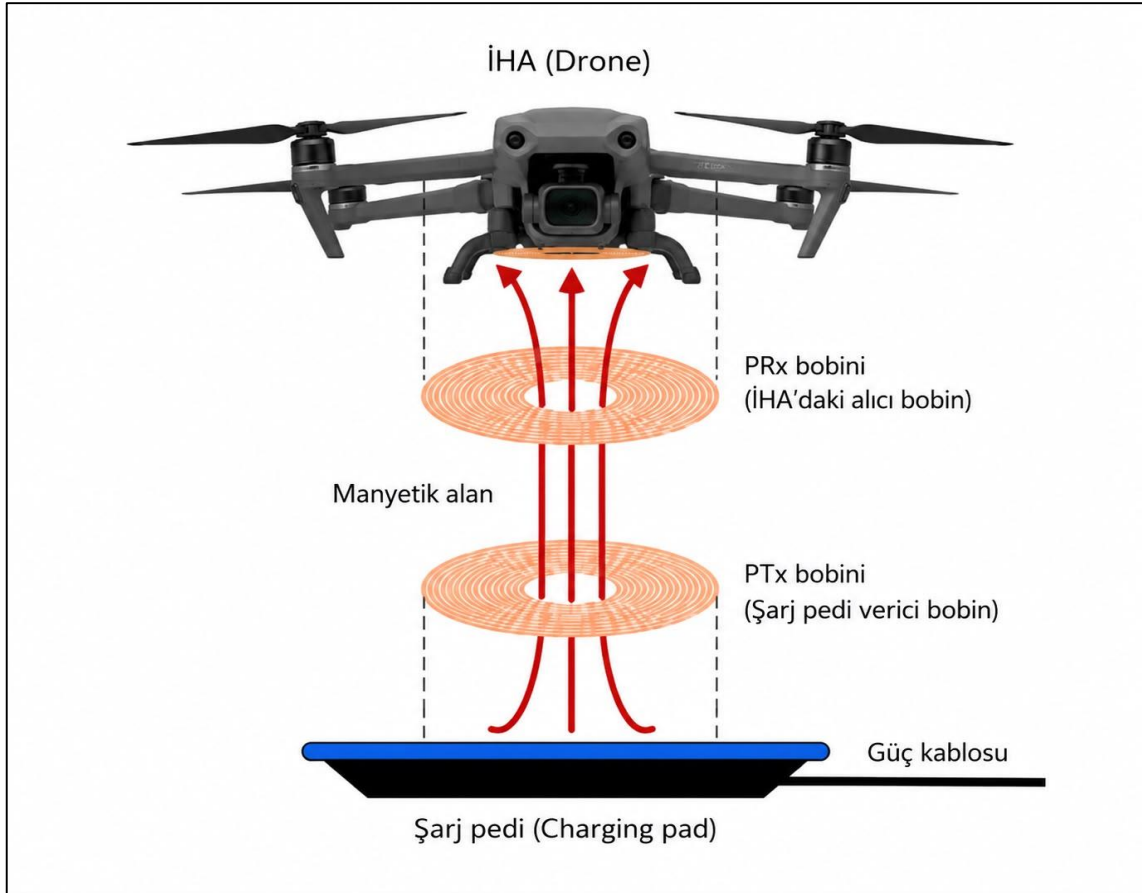
Kuplaj katsayısı; bobinler arasındaki mesafe, bobinlerin çapı ve sarım sayısı, bobinlerin hizalanma doğruluğu ile kullanılan manyetik çekirdek veya ferrit malzemenin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

Kuplaj katsayısının artması, enerji transfer verimliliğini doğrudan artırmaktadır. İHA tabanlı kablosuz güç aktarım sistemlerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, alıcı bobinin konumundaki küçük değişimlerin dahi enerji aktarım verimini önemli ölçüde etkileyebileceği gösterilmiştir. Bu nedenle otonom iniş yapan İHA’larda yalnızca kablosuz güç aktarım sisteminin tasarımı değil, aynı zamanda verici ve alıcı bobinlerin uygun hizalanmasını sağlayacak merkezleme mekanizmalarının geliştirilmesi de enerji aktarım veriminin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır (Jeong vd. 2017).

2.3. Endüktif ve Rezonanslı Manyetik Kuplaj

Manyetik kuplaj temelli kablosuz enerji aktarım sistemleri, çalışma prensiplerine göre genel olarak iki ana başlık altında incelenmektedir: endüktif kuplaj ve rezonanslı manyetik kuplaj. Kablosuz güç aktarım teknolojileri; enerji aktarım mesafesi, çalışma frekansı ve kuplaj mekanizmasına göre farklı yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemler arasında en yaygın kullanılan endüktif kuplaj ve manyetik rezonans kuplajıdır. Endüktif kuplaj kısa mesafelerde yüksek verim sunarken, manyetik rezonans kuplaj yöntemi daha büyük hava aralıklarında enerji aktarımına olanak sağlayabilmektedir. Bu nedenle kablosuz güç aktarım sistemlerinin tasarımında; güç ihtiyacı, çalışma mesafesi, hava aralığı ve hedeflenen enerji aktarım verimi dikkate alınarak uygun kuplaj yöntemi belirlenmektedir (Arslan ve Erkan, 2022).

Şekil 2.1’de Qi tabanlı endüktif kablosuz enerji aktarımının çalışma prensibi gösterilmektedir. Platform üzerinde bulunan PTx (Power Transmitter) verici bobini tarafından oluşturulan alternatif manyetik alan, İHA üzerinde bulunan PRx (Power Receiver) alıcı bobininde indüklenerek elektrik enerjisinin temassız şekilde aktarılmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.1. Qi tabanlı endüktif kablosuz enerji aktarımının çalışma prensibi

2.3.1. Endüktif Kuplaj

Endüktif kuplajda enerji transferi, verici bobin tarafından oluşturulan değişken manyetik alanın alıcı bobin üzerinde elektromotor kuvvet indüklemesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem, kısa mesafelerde yüksek kuplaj katsayısı ile enerji aktarımının gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Endüktif kuplaj sistemleri, genellikle düşük güçlü uygulamalarda ve bobinler arası mesafenin sınırlı olduğu sistemlerde tercih edilmektedir.

Kablosuz şarj teknolojilerinde yaygın olarak kullanılan Qi standardı, Wireless Power Consortium (WPC) tarafından geliştirilen ve kısa mesafeli endüktif kablosuz enerji aktarımını standartlaştıran küresel bir protokoldür. Qi, verici ve alıcı bobinler arasında güvenli, uyumlu ve verimli enerji transferini sağlamayı amaçlamaktadır. (WPC 2026). Qi standardı, elektromanyetik indüksiyon prensibine dayanmakta olup özellikle mobil cihazlar ve düşük güçlü taşınabilir sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu tez kapsamında kullanılan Qi tabanlı kablosuz şarj sistemi, kısa mesafede yüksek verim ve düşük maliyet avantajları nedeniyle endüktif kuplaj prensibine dayanmaktadır. Ayrıca sistemde geliştirilen mekanik merkezleme yapısı ile bobin hizalamasının optimize edilmesi hedeflenmiş ve enerji aktarım performansının artırılması amaçlanmıştır.

Çalışmada ticari olarak temin edilen, Qi prensibiyle çalışan düşük güçlü bir endüktif kablosuz şarj modülü kullanılmıştır. Modülün WPC sertifikasyon durumu ayrıca doğrulanmadığından bu çalışma, ürün düzeyinde Qi uygunluk belgelendirmesini değil, Qi tabanlı enerji aktarım yaklaşımının prototip sisteme entegrasyonunu kapsamaktadır.

2.3.2. Rezonanslı Manyetik Kuplaj

Rezonanslı manyetik kuplajda ise verici ve alıcı bobinler aynı rezonans frekansına ayarlanır. Bu sayede bobinler arasındaki mesafe artsa dahi enerji transferi mümkün hale gelir. Rezonanslı sistemler, daha geniş tolerans aralığı sunduğu için otonom iniş ve sabit istasyon uygulamalarında avantaj sağlamaktadır. 2006 yılının sonlarında Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde bir grup, burada varsayılan rezonanslı alıcı kullanılarak 2 metreden fazla bir mesafede yaklaşık %40 verimlilikle 60 W güç aktarımı deneyleri sundular (Kurs vd. 2007).

2.4. Otonom Sistemlerde Manyetik Kuplajın Avantajları

Manyetik kuplaj temelli kablosuz enerji aktarımı, otonom sistemler açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Fiziksel temas gerektirmemesi mekanik aşınmayı azaltırken, nem,

toz ve oksitlenme gibi çevresel etkilere karşı daha dayanıklı bir yapı sağlamaktadır. Ayrıca insan müdahalesine ihtiyaç duyulmadan otomatik şarj işleminin gerçekleştirilebilmesine olanak tanımakta, elektriksel kıvılcım ve açık kontak risklerini azaltmakta ve uzun vadede bakım gereksiniminin düşürülmesine katkı sağlamaktadır. Bu özellikler, manyetik kuplajlı sistemleri insansız hava araçları, mobil robotlar ve sabit otonom istasyonlar için uygun bir şarj çözümü haline getirmektedir.

2.5. Otonom Sistemlerde Manyetik Kuplajın Dezavantajları

Genellikle, küçük hava araçları için yük kapasitesi birkaç yüz gramla sınırlıdır ve boyut maksimum 50 cm civarındadır. Bu nedenle, WPT bobinlerinin eklenmesi, hava aracı tarafından taşınabilecek ek yük kapasitesine ciddi kısıtlamalar getirecektir. İniş yapılan sistemlerde otonom olarak iki bobinin üst üste hizalanması yeni bir sistemin yapılandırılması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında manyetik kuplaj temelli kablosuz enerji aktarımı, güneş enerjisi ile beslenen 12 V DA tabanlı şebekeden bağımsız güç sistemi ile birlikte ele alınmıştır. Tasarlanan yapı, otonom sistemlerin sahada minimum insan müdahalesi ile çalışmasını hedeflemekte olup, manyetik kuplajlı şarj yöntemi bu hedef doğrultusunda destekleyici bir unsur olarak değerlendirilmiştir.

Manyetik kuplajlı şarj birimi, DA güç altyapısı ile uyumlu olacak şekilde tasarlanmış ve sistem genelinde enerji verimliliği ön planda tutulmuştur. Böylece kablolu şarj sistemlerine kıyasla daha güvenli, dayanıklı ve modüler bir çözüm ortaya konmuştur.

3. MATERİYAL VE YÖNTEMLER

3.1. Tam Otonom Sistem İçin Misina Tabanlı Mekanik Merkezleme Sistemi

Kablosuz enerji aktarım sistemlerinde verim, verici ve alıcı bobinlerin hizalanma doğruluğuna doğrudan bağlıdır. İHA'nın iniş sırasında merkezden sapması, manyetik kuplajın zayıflamasına ve enerji kayıplarına neden olmaktadır. Bu nedenle, İHA'nın iniş sonrası otomatik olarak merkez noktaya getirilmesini sağlayan bir mekanik sistem gereklidir. Literatürde bu problem üzerine yapılan çalışmalarda, kablosuz güç aktarım verimliliğini artırmak amacıyla farklı yöntemler önerilmiştir. 2017 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)'de sunulan bir çalışmada, insansız hava araçlarının konumunun doğru şekilde belirlenmesi ve kablosuz güç aktarım veriminin artırılması amacıyla makine öğrenmesi tabanlı konum tahmin yöntemi geliştirilmiştir. Söz konusu çalışmada, 13.56 MHz çalışma frekansına sahip kablosuz güç aktarım sisteminde İHA'nın konum doğruluğunun artırılmasının enerji aktarım performansını doğrudan etkilediği gösterilmiştir. Bu durum, kablosuz güç transfer sistemlerinde hassas hizalamanın kritik bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır. (Jeong vd. 2017). Bu durum literatürde yapılan güncel inceleme çalışmaları ile de desteklenmektedir. Mou ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen sistematik incelemede, insansız hava araçları için yakın alan kablosuz güç aktarım sistemlerinde bobin hizalama hassasiyetinin enerji aktarım verimliliği üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu belirtilmiştir. Çalışmada, bobinler arasındaki yanlış hizalamanın kuplaj katsayısını düşürdüğü ve buna bağlı olarak sistem verimliliğinde önemli kayıplara yol açtığı ifade edilmiştir (Mou vd.. 2023). İndüktif kablosuz güç aktarım sistemlerinde verici ve alıcı bobinler arasındaki konumsal hizalama, manyetik kuplajın ve enerji aktarım performansının belirlenmesinde önemli bir etkidir. Nadi ve Zhang, İHA'ların kablosuz şarjına yönelik gerçekleştirdikleri çalışmada, tam hizalama durumunda 0,38 olan kuplaj katsayısının X ekseninde 10 mm ve Y ekseninde 50 mm konumsal sapma meydana geldiğinde yaklaşık 0,26 seviyesine düştüğünü göstermiştir. Çalışmada ayrıca 10 mm hava aralığında 11,1 V'luk bir batarya 48,2 W çıkış gücü ve %88,2 verimle şarj edilmiştir (Nadi ve Zhang 2024).

Bu sonuçlar doğrultusunda, bu tez kapsamında geliştirilen mekanik merkezleme sistemi ile İHA'nın iniş sonrasında verici ve alıcı bobinlerin uygun konumda bulunmasını sağlayacak şekilde merkezlenmesi amaçlanmıştır.

Sistemin yapısı şu şekilde tasarlanmıştır. Geliştirilen merkezleme sistemi, iniş platformunun dört tarafına yerleştirilen bağımsız merkezleme mekanizmalarından oluşmaktadır. Sistemde dört adet elektrik motoru, dört adet palet (kasnak) mekanizması, dört adet palet kayışı, dört adet ultrasonik sensör, dört adet sabit gerilim misinası ve ESP32 tabanlı kontrol birimi bulunmaktadır.

Tüm bileşenler, $1,2 \times 1,2$ m boyutlarındaki kare biçimli iniş platformu üzerine yerleştirilmiştir. Platformun kenarlarında motor, palet mekanizması ve diğer sistem bileşenleri için ayrılan alanlar nedeniyle İHA'nın kullanılabilir iniş alanı yaklaşık 1×1 m (1 m^2) olarak belirlenmiştir. Platformun genel ölçüsü Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



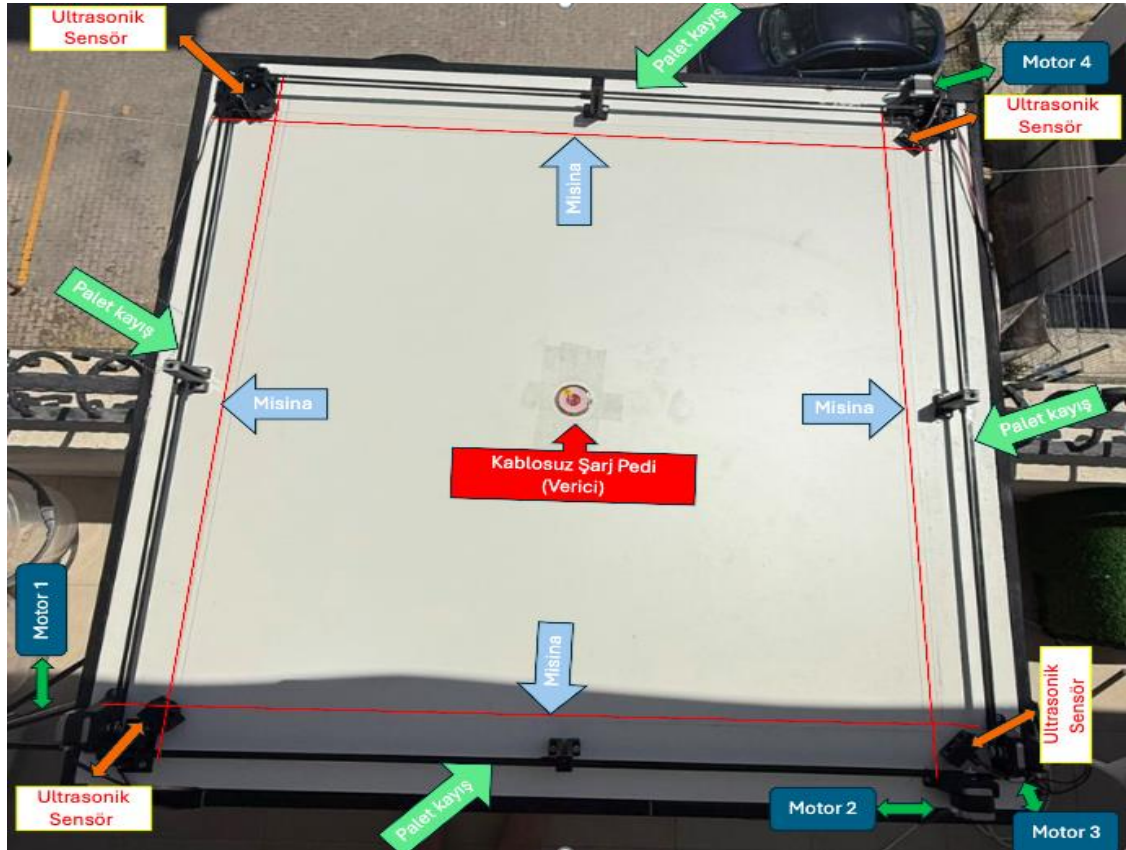
Şekil 3.1. Platformun genel ölçüleri ve İHA için kullanılabilir iniş alanı

İHA'nın platform üzerindeki konumu ultrasonik sensörler aracılığıyla belirlenmekte, elde edilen veriler ESP32 tabanlı kontrol birimi tarafından değerlendirilmektedir. Kontrol

birimi, platformun dört tarafındaki merkezleme mekanizmalarını kontrol ederek İHA'nın platform merkezine yönlendirilmesini sağlamaktadır.

3.2. Sistemin Montajı ve Kontrol Birimi

Merkezleme sistemine ait motorlar, palet mekanizmaları, misina hatları ve ultrasonik sensörlerin montajı iniş platformu üzerine gerçekleştirilmiştir. Motor ve palet mekanizmaları platformun dört kenarına karşılıklı olarak yerleştirilmiş, misina hatları ise palet mekanizmalarının hareketi ile İHA'nın iniş takımına temas edebilecek şekilde sisteme bağlanmıştır. Merkezleme sisteminin mekanik bileşenlerinin platform üzerindeki montajı Şekil 3.2'te gösterilmiş olup mekanik merkezleme elemanları platformun dört tarafına yerleştirilerek İHA'nın merkez noktaya yönlendirilmesini sağlayacak bir yapı oluşturulmuştur.



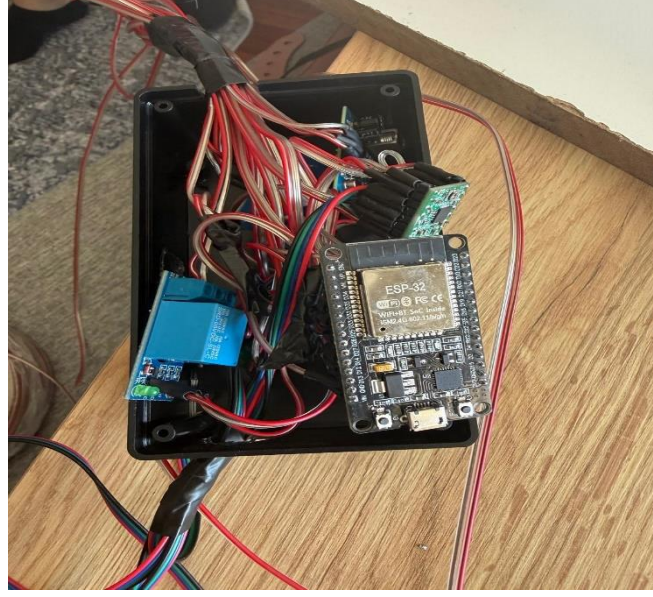
Şekil 3.2. Merkezleme sistemi mekanik bileşenlerinin platform üzerine montajı.

Merkezleme işlemi sırasında misina hatlarının İHA gövdesi ve pervaneleri ile temas etmesini önlemek ve merkezleme kuvvetinin iniş takımları üzerinden aktarılmasını sağlamak amacıyla İHA'nın iniş takımlarına merkezleme aparatları eklenmiştir. Kullanılan merkezleme aparatlarının İHA üzerindeki yerleşimi Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. İHA iniş takımlarına eklenen merkezleme aparatları

İHA'nın platforma inişinin algılanması amacıyla ultrasonik sensörler kullanılmıştır. Sistemin elektronik kontrolü ise ESP32 tabanlı kontrol birimi ile gerçekleştirilmiştir. ESP32, ultrasonik sensörlerden gelen sinyallerin alınması ve merkezleme sisteminde bulunan elektrik motorlarının kontrol edilmesi amacıyla kullanılmıştır. Sistemde kullanılan ESP32 tabanlı kontrol birimi ve elektronik bağlantıları Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. ESP32 tabanlı kontrol birimi ve elektronik bağlantıları

ESP32'nin programlanmasında Arduino IDE geliştirme ortamından yararlanılmıştır. ESP32 ve elektronik bağlantılar, dış ortam koşullarından ve mekanik etkilerden korunması amacıyla bir muhafaza içerisine yerleştirilerek iniş platformunun alt kısmına monte edilerek Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. ESP32 tabanlı kontrol birimi ve elektronik bağlantıların muhafazasıyla beraber platformun alt tarafına montajı

3.3. Sistemin Çalışma Prensibi

İHA'nın platforma inişi ultrasonik sensörler aracılığıyla algılanmaktadır. İnişin tamamen gerçekleşmesi ve İHA'nın platform üzerinde kararlı hâle gelmesi amacıyla iniş algılandıktan sonra 10 saniyelik bekleme süresi uygulanmaktadır.

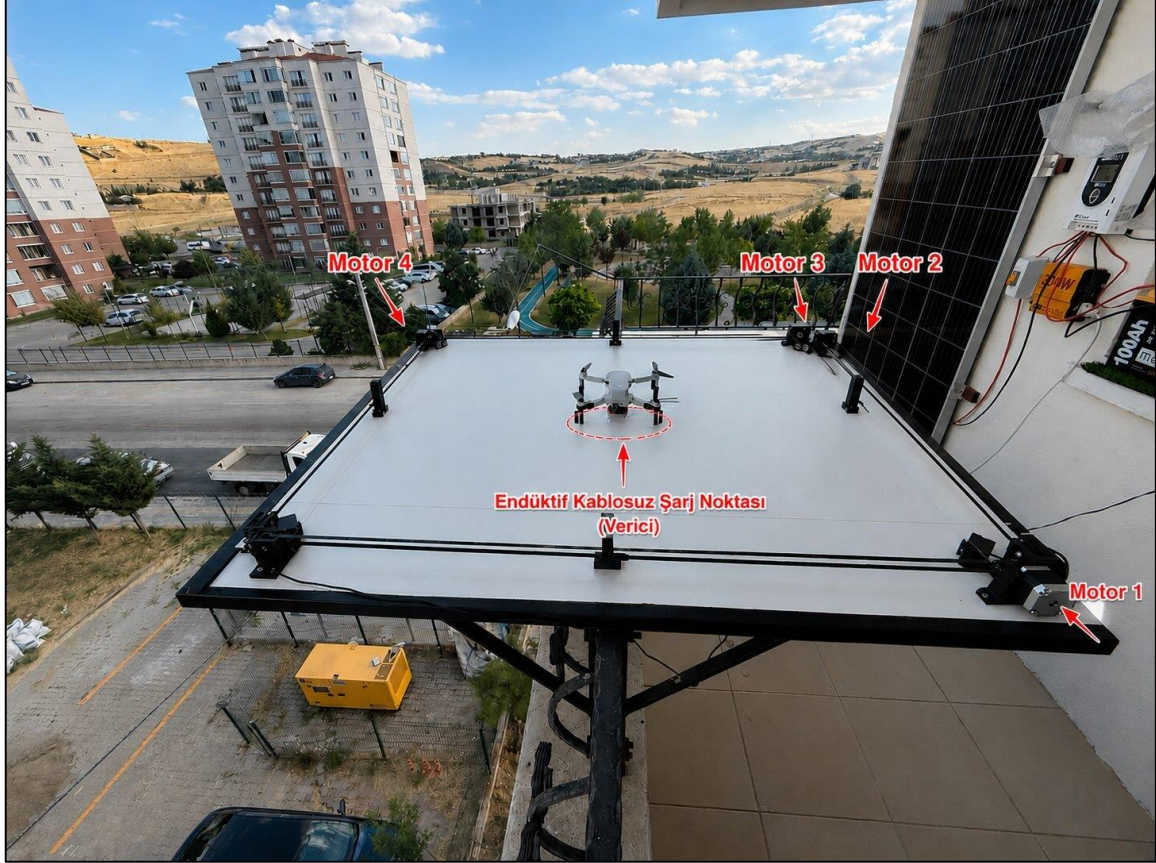
İHA'nın platform üzerine her zaman tam merkezden iniş yapması mümkün olmadığından, iniş sonrasında kablosuz şarj için mekanik merkezleme işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. İHA'nın merkezleme işlemi öncesindeki örnek iniş konumu Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. İHA'nın platform üzerine örnek bir iniş gerçekleştirdiği konum ve manyetik şarj bölgesine göre başlangıç konumu gösterilmektedir

Şekil 3.6'da görüldüğü üzere İHA, iniş sonrasında platformun merkezinde bulunan kablosuz şarj vericisi ile hizalı konumda bulunmamaktadır. Bekleme süresinin tamamlanmasının ardından elektrik motorları çalıştırılarak palet mekanizmaları harekete geçirilmektedir. Palet mekanizmalarına bağlı misina hatları İHA'nın iniş takımına fiziksel olarak temas ederek İHA'yı platform merkezine doğru yönlendirmektedir.

Gerçekleştirilen mekanik merkezleme işlemi sonucunda İHA'nın platform merkezine getirilmiş konumu Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



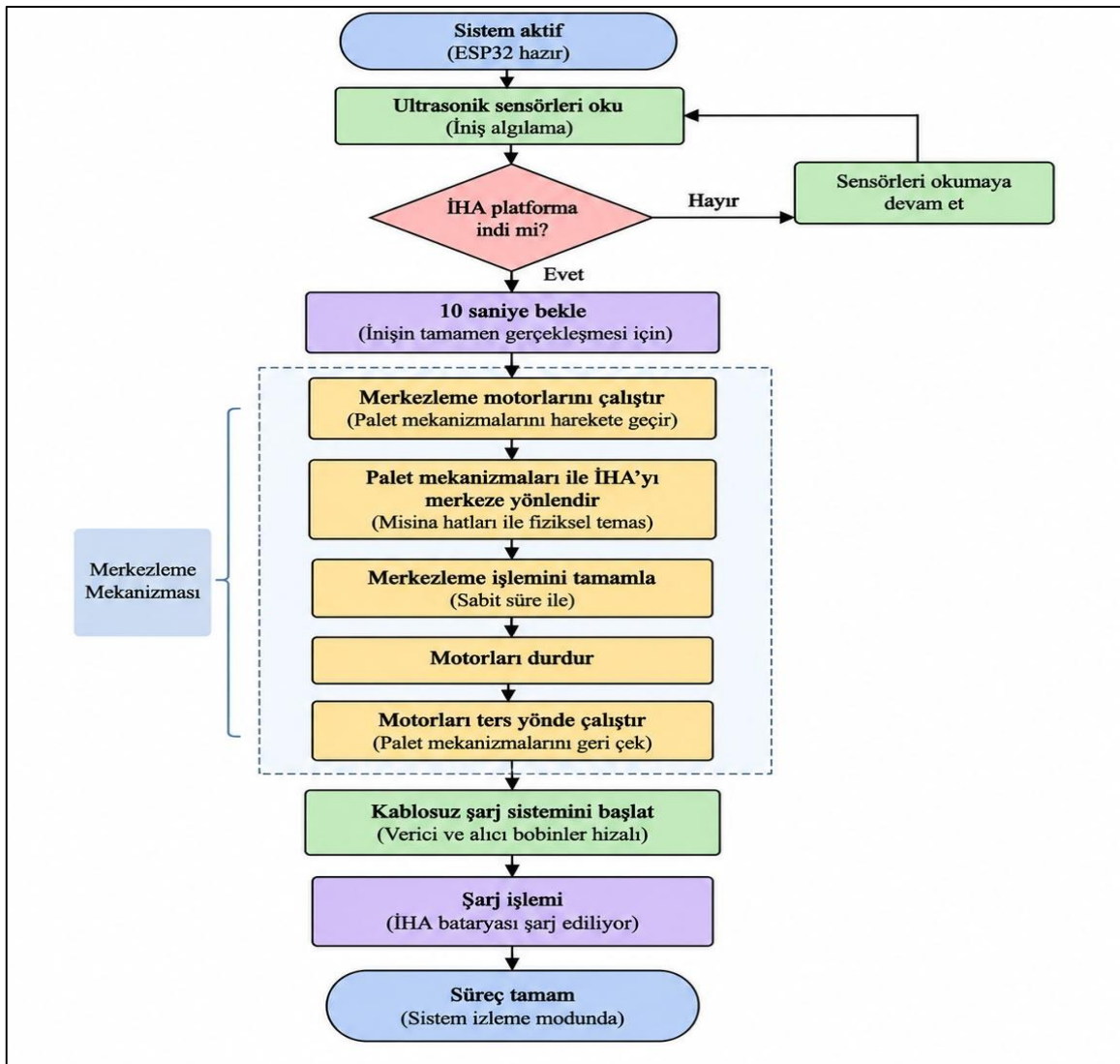
Şekil 3.7. Merkezleme işlemi sonrasında İHA'nın platform merkezindeki konumu

Şekil 3.7'de görüldüğü üzere merkezleme işlemi sonucunda İHA, platform merkezindeki kablosuz şarj vericisi ile hizalanacak konuma getirilmektedir. Böylece platformda bulunan verici bobin ile İHA üzerinde bulunan alıcı bobinin birbirine göre uygun konumda bulunması sağlanmaktadır.

Merkezleme işleminin tamamlanmasının ardından motorlar ters yönde çalıştırılarak palet mekanizmaları başlangıç konumlarına geri çekilmektedir. Böylece misina hatlarının İHA ile fiziksel teması kesilmektedir. Merkezleme mekanizmasının geri çekilmesinin ardından kablosuz şarj sistemi etkinleştirilerek İHA bataryasının şarj işlemi başlatılmaktadır.

3.4. Merkezleme Algoritması

Merkezleme sisteminin otomatik olarak çalışmasını sağlamak amacıyla ESP32 üzerinde çalışan bir kontrol algoritması geliştirilmiştir. Algoritma, İHA'nın platforma inişinin algılanmasından merkezleme işleminin gerçekleştirilmesine ve kablosuz şarjın başlatılmasına kadar sistem tarafından uygulanacak işlemlerin sırasını belirlemektedir. Geliştirilen merkezleme kontrol algoritmasının işlem basamakları Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



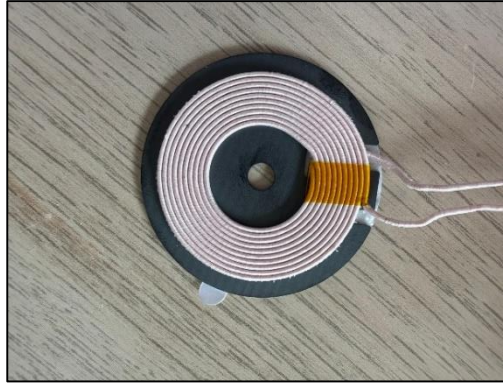
Şekil 3.8. İHA merkezleme sisteminin kontrol algoritması

Şekil 3.8’de görüldüğü üzere sistem, İHA’nın platforma inişi algılanıncaya kadar ultrasonik sensörlerden gelen sinyalleri takip etmektedir. İniş algılandıktan sonra belirlenen bekleme süresi uygulanmakta, ardından merkezleme mekanizması devreye alınmaktadır. Merkezleme işleminin tamamlanmasının ardından mekanizma başlangıç konumuna geri çekilmekte ve kablosuz şarj işlemi başlatılmaktadır.

Önerilen mekanik merkezleme sistemi, İHA’ya herhangi bir fiziksel bağlantı gerektirmeden çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. Basit ve düşük maliyetli yapısı sayesinde sistemin kurulumu ve uygulanması kolaylaştırılmıştır. Sabit misina yapısı ile İHA’nın platform üzerinde doğrusal ve kararlı biçimde hareket ettirilmesi sağlanırken, yüksek merkezleme hassasiyeti sayesinde İHA’nın şarj bölgesine doğru konumlandırılması amaçlanmıştır. Ayrıca sistemin otonom kontrol yapısıyla uyumlu olması, merkezleme işleminin kullanıcı müdahalesine ihtiyaç duyulmadan gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Literatürde mekanik hizalamayı kablosuz şarj sistemiyle bütünleştiren farklı yaklaşımlar da bulunmaktadır. Ali vd. (2025), İHA’ların kablosuz şarjına yönelik geliştirdikleri sistemde konik biçimli bobin yapısını iniş takımıyla bütünleştirerek pasif mekanik hizalama yaklaşımı uygulamıştır. Çalışmada bu yapıyla %94’e kadar güç aktarım verimi elde edilmiştir. Bu tezde ise İHA üzerinde özel bir mekanik düzenleme gerektirmeden, iniş sonrasında İHA’yı şarj bölgesine taşıyan aktif bir merkezleme yaklaşımı benimsenmiştir.

3.6. Kablosuz Şarj Sistemi ile Entegrasyon

Merkezleme sistemi ile kablosuz enerji aktarım sistemi birbirini tamamlayacak şekilde tasarlanmıştır. Ultrasonik sensörler İHA’nın platform üzerine iniş yaptığını algıladıktan sonra 10 saniyelik bekleme süresi uygulanmaktadır. Bekleme süresinin sonunda motorlar çalışarak İHA’yı platform merkezine getirmektedir. Verici bobin platform merkezinde, alıcı bobin ise İHA’nın alt kısmında bulunduğundan merkezleme işlemi tamamlandığında iki bobin optimum hizaya gelmektedir. Bu çalışmada kullanılan Qi tabanlı kablosuz şarj verici (TX) bobini, şarj platformunun merkezine yerleştirilmiştir. Kullanılan verici (TX) bobini Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Bu çalışmada kullanılan Qi tabanlı kablosuz şarj verici (TX) bobini

Alıcı (RX) bobin ise kablosuz enerji aktarımının gerçekleştirilebilmesi amacıyla İHA üzerine monte edilmiştir. İHA üzerine monte edilen alıcı (RX) bobinin genel görünümü Şekil 3.10’da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. İHA üzerine monte edilen, alıcı (RX) bobininin genel görünümü

Palet mekanizmalarının başlangıç konumuna geri çekilmesinden sonra kablosuz şarj sistemi aktif edilmekte ve enerji aktarımı başlamaktadır. Böylece merkezleme ve şarj işlemleri ardışık olarak gerçekleştirilmekte, herhangi bir manuel müdahaleye ihtiyaç duyulmamaktadır. İHA şarj işlemini tamamlayarak platformdan ayrıldıktan sonra sistem

yeniden bekleme moduna geçmekte ve bir sonraki iniş için hazır hâle gelmektedir. Merkezleme sistemi, kablosuz şarj ünitesi ile entegre olarak çalışmaktadır. İHA'nın platform üzerindeki merkez noktaya getirilmesiyle alıcı ve verici bobinlerin hizalanması sağlanmakta, böylece bobinler arasındaki manyetik kuplaj artırılarak enerji aktarım veriminin yükseltilmesi amaçlanmaktadır.

Verici (TX) ve alıcı (RX) birimlerin sisteme entegrasyonunun ardından kablosuz şarj sistemi, balkon ortamında kurulan deney platformu üzerinde uygulanmıştır. Verici birimin platform üzerindeki gerçek uygulama görünümü Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Balkona kurulan platform güneş enerjisi destekli otonom İHA şarj istasyonunun verici (TX) biriminin gerçek uygulama görünümü

Bu bölümde geliştirilen mekanik merkezleme sistemi ile kablosuz enerji aktarım sistemi bütünleşik olarak ele alınmıştır. Geliştirilen algoritma sayesinde İHA platform üzerine iniş yaptıktan sonra otomatik olarak algılanmakta, belirlenen bekleme süresinin ardından merkezlenmekte ve kablosuz şarj işlemi güvenilir şekilde başlatılmaktadır. Merkezleme sonrasında palet mekanizmalarının başlangıç konumuna geri dönmesi, şarj süresince mekanik temasın ortadan kaldırılmasını sağlamaktadır. Bu yaklaşım hem sistem

güvenilirliğini artırmakta hem de hareketli mekanizmaların gereksiz çalışmasını önleyerek uzun ömürlü kullanım sunmaktadır.

Sonuç olarak önerilen sistem, İHA'nın insan müdahalesi olmadan merkezlenmesini ve kablosuz enerji aktarımı için uygun hizalamaya getirilmesini sağlayarak otonom görevlerde kesintisiz operasyon gerçekleştirilmesine katkı sağlamaktadır.

3.7. Doğru Akım Güç Sistemi Bileşenleri ve Seçim Kriterleri

Doğru akım (DA) tabanlı güç sistemleri, özellikle şebekeden bağımsız ve mobil uygulamalarda yüksek enerji verimliliği, basit mimari ve düşük kayıp oranları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Güneş panelleri ve batarya sistemleri doğal olarak DA karakterde çalıştığından, DA omurgalı sistemler enerji dönüşüm basamaklarını azaltarak toplam sistem verimini artırmaktadır. Sistemin ana güç barası 12 V DA olarak yapılandırılmış; 12 V ile çalışan yükler doğrudan, 5 V ile çalışan kontrol, sensör ve kablosuz şarj bileşenleri ise uygun DA-DA düşürücüler üzerinden beslenmiştir.

Güneş panelleri, fotovoltaik (FV) hücreler aracılığıyla güneş ışınlarını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Fotovoltaik teknoloji, yenilenebilir enerji sistemlerinin temel bileşenlerinden biri olup yüksek verimlilik, çevre dostu yapısı ve uzun kullanım ömrü nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Günümüzde fotovoltaik paneller; monokristal, polikristal ve ince film olmak üzere farklı teknolojilerle üretilmektedir. Bu çalışma kapsamında yüksek verimlilik sağlaması nedeniyle monokristal silikon panel tercih edilmiştir.

Monokristal silikon paneller, tek kristal yapısındaki silikondan üretilmekte olup homojen hücre yapısı sayesinde diğer panel türlerine göre daha yüksek enerji dönüşüm verimi sağlamaktadır. Bu paneller genel olarak %15–22 arasında değişen verimlilik değerlerine sahip olup düşük ışıyım koşullarında da kararlı performans göstermektedir. Ayrıca uzun kullanım ömrü ve yüksek dayanıklılığı sayesinde güneş enerjisi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte üretim maliyetleri polikristal panellere göre daha yüksektir (Sonawane vd. 2025).

Bu çalışmada panel seçiminde; nominal güç değeri (W), panel verimliliği (%), açık devre gerilimi (Voc), maksimum güç noktası gerilimi (Vmp), maksimum güç noktası akımı (Imp), sıcaklık katsayısı ve dış ortam koşullarına dayanıklılık (IP koruma vb.) kriterleri dikkate alınmıştır. Sistemde kullanılan panel, günlük enerji ihtiyacını karşılayacak kapasitede seçilmiş ve şarj kontrol ünitesi ile uyumlu olacak şekilde konfigüre edilmiştir. Panel çıkışı doğrudan aküye bağlanmamış, enerji yönetiminin güvenli ve verimli şekilde gerçekleştirilebilmesi amacıyla şarj kontrol ünitesi üzerinden sisteme dâhil edilmiştir.

Sistemde kullanılan 395 W gücündeki monokristal güneş panelinin balkon bölümüne montaj görünümü Şekil 3.12’de verilmiştir.



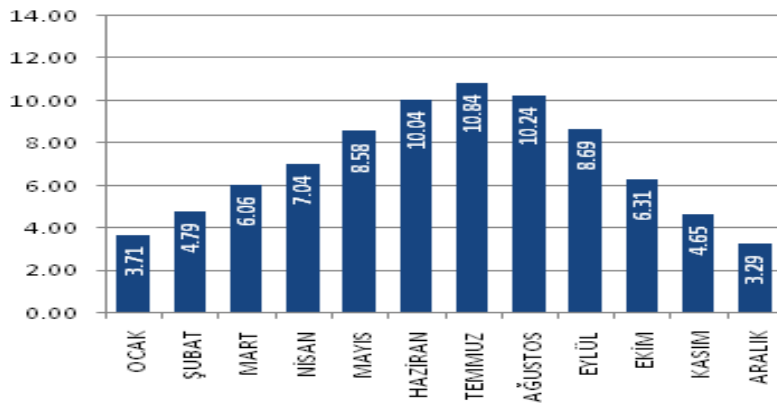
Şekil 3.12. Montajı yapılan 395 W monokristal güneş paneli

Çalışmada kullanılan fotovoltaik panele ait temel elektriksel ve mekanik teknik özellikler üretici firma tarafından sağlanan teknik veri föyünden alınmış olup Tablo 3.1’de sunulmuştur.

Tablo 3.1. Çalışmada kullanılan fotovoltaik panelin üretici teknik verilerine göre

TEKNİK ÖZELLİKLER	DEĞER
Panel tipi	Monokristal silikon
Nominal güç(Pmpp)	395 W
Maksimum güç gerilimi (Vmpp)	40.52 V
Maksimum gğç akımı (Impp)	9.75 A
Açık devre gerilimi (Voc)	49.72 V
Kısa devre akımı (Isc)	10.11 A
Panel verimi	%19.95
Hücre tipi	Monokristal, 158.75 x 158.75 mm
Boyutları (U x G x Y)	1980 x 1000 x 40 mm
Ağırlık	23 kg
Ön cam	3.2 mm tamperli cam
Çerçeve	Anodize alüminyum alaşım
İşletme sıcaklığı	-40 C'dan +85 C'a kadar
Yüzey maksimum yük kapasitesi	5400 Pa 'a kadar
STC test koşulları	1000 W/m ² , AM 1.5, 25 °C

Güneş enerjisi sistemlerinin boyutlandırılmasında panel gücünün yanı sıra kurulum bölgesinin günlük ortalama güneşlenme süresi de önemli bir parametredir. Bir güneş panelinin günlük üretebileceği enerji, panel gücü ile eşdeğer tam güneşlenme süresinin çarpımı esas alınarak hesaplanmaktadır. Güneş panelinin kurulduğu bölge Ankara'nın Sincan ilçesidir. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan Güneş Enerjisi Potansiyel Enerjisi (GEPA) sisteminden alınan güneşlenme süreleri 3.13'te gösterilmiştir.

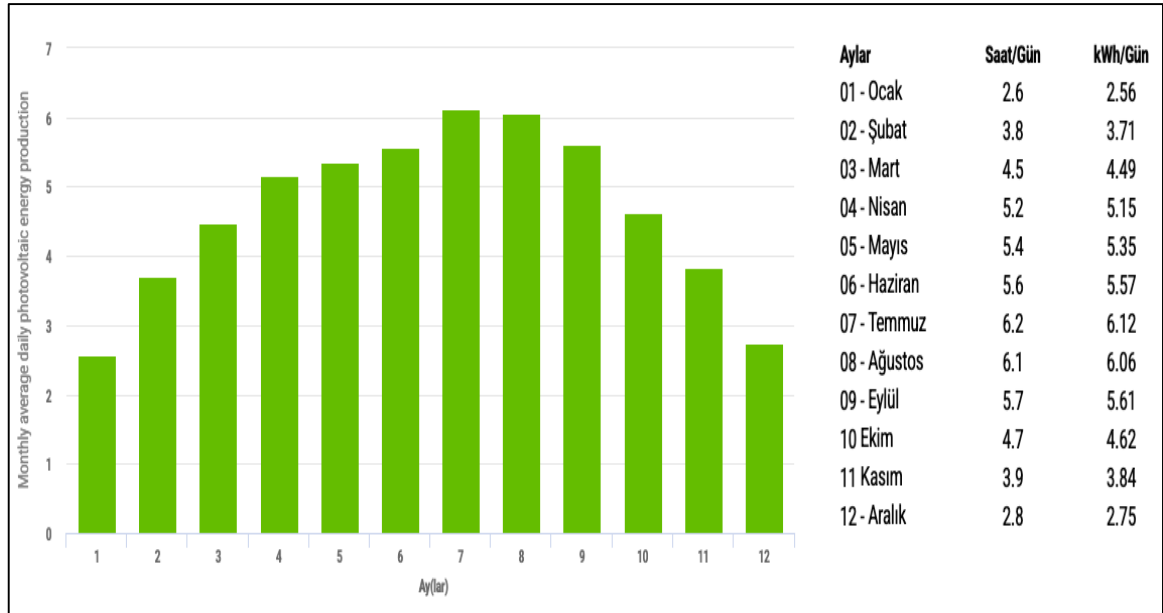


Şekil 3.13. Sincan ilçesi aylık güneşlenme süreleri (saat) (GEPA)

Güneşlenme süresinin en düşük değeri aralık ayında 3.29 saat ve en yüksek değeri ise temmuz ayında 10.84 saat olmak üzere değişim göstermektedir. Buna göre Ankara ili Sincan ilçesinde yıllık toplam güneşlenme süresi yaklaşık 2567 saat olarak belirlenmiştir.

3.7.1. Aylık Ortalama Günlük Fotovoltaik Enerji Üretimi

PVGIS yazılımı kullanılarak Ankara ili Sincan ilçesi için fotovoltaik enerji üretim analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında fotovoltaik enerji üretim hesaplamalarında teorik güneşlenme süresi yerine PVGIS yazılımından elde edilen üretim verileri esas alınmıştır. Analiz sonucunda, 1 kWp kurulu güce sahip bir fotovoltaik sistemin yıllık ortalama günlük enerji üretiminin 4,65 kWh/gün olduğu belirlenmiştir. Bu değer esas alınarak, çalışmada kullanılan 395 W gücündeki fotovoltaik panelin ortalama günlük enerji üretimi 1,84 kWh/gün (1840 Wh/gün) olarak hesaplanmıştır. PVGIS programından elde edilen analiz sonuçları Şekil 3.14’de gösterilmiştir.

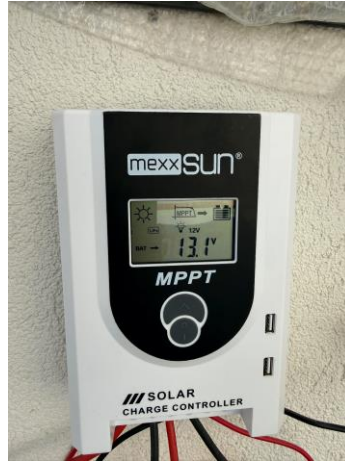


Şekil 3.14. PVGIS programından elde edilen analiz sonuçları (PVGIS)

Varlı vd. (2022), İç Anadolu Bölgesi’nde yer alan Ankara ili Sincan ilçesinin güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olduğunu ve bölgenin fotovoltaik enerji yatırımları açısından uygun koşullara sahip olduğunu belirtmiştir. (Varlı vd. 2022).

3.7.2. Şarj Kontrol Ünitesi

Şarj kontrol ünitesi, güneş paneli ile akü arasındaki enerji akışını düzenleyen kritik bir bileşendir. Bu ünitenin temel görevleri; akünün aşırı şarj edilmesini önlemek, şarj akımını ve gerilimini kontrol etmek, akü kimyasına uygun şarj profilini uygulamak ve geri akımı engellemektir. Sistemde kullanılan 40 A kapasiteli şarj kontrol ünitesi, güneş panelinden elde edilen enerjinin aküye güvenli ve verimli bir şekilde aktarılmasını sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Şarj kontrol ünitesi, sistemin korunması ve kolay erişilebilirliğinin sağlanması amacıyla balkon bölümüne monte edilmiştir. Ünitenin montajına ait görünüm Şekil 3.15’de gösterilmektedir.



Şekil 3.15. Montajı yapılan 40 Amper (MGNT) şarj kontrol ünitesi

3.7.3. Enerji Depolama Birimi (Akü Sistemi)

Enerji depolama birimi olarak 12 V 100 Ah LiFePO₄ (Lityum Demir Fosfat) akü kullanılmıştır. Bu akü teknolojisi, geleneksel kurşun-asit akülere kıyasla yüksek çevrim ömrü, derin deşarja dayanıklılık, düşük iç direnç, yüksek enerji yoğunluğu ile termal ve kimyasal güvenlik gibi avantajlar sunmaktadır. Akü, güneş panelinden elde edilen enerjinin depolanmasını ve sistem yüklerinin kesintisiz beslenmesini sağlamaktadır. Tüm yükler aküye paralel bağlanmış ve sistem gerilimi sabit tutularak Şekil 3.16’da gibi montajı yapılmıştır.



Şekil 3.16. Montajı yapılan 12 V 100 Ah LiFePO₄ (Lityum Demir Fosfat) akü

Doğru akım güç sistemlerinde güvenli ve düzenli bir enerji dağıtımını sağlamak amacıyla sigortalı DA dağıtım hattı kullanılmıştır. Akü çıkışına yerleştirilen ana sigorta sistemin tamamını aşırı akım ve kısa devre durumlarına karşı korurken, kamera, haberleşme modemi ve manyetik kuplajlı kablosuz şarj vericisi gibi her bir yük için ayrı hat sigortaları kullanılmıştır. Böylece herhangi bir yükte meydana gelebilecek arızanın sistemin tamamını etkilemesi önlenmiş, her bir yükün bağımsız olarak korunması sağlanmış ve bakım ile arıza tespit işlemleri kolaylaştırılmıştır.

3.7.4. Doğru Akım Yükleri ve İnvertörsüz Besleme Yaklaşımı

Bu tez kapsamında kullanılan yükler, 12 V DA ana dağıtım hattı üzerinden beslenmiştir. Haberleşme modemi gibi 12 V ile çalışan yükler doğrudan DA dağıtım hattına bağlanırken, farklı çalışma gerilimlerine ihtiyaç duyan kamera, ESP32 tabanlı kontrol sistemi, ultrasonik sensörler ve kablosuz şarj vericisi 12 V girişli adaptör veya uygun gerilim düzenleyici devreler aracılığıyla beslenmiştir. Sistemde 220 V AA adaptör ve invertör kullanılmamış, gerekli gerilim seviyeleri DA tabanlı dönüştürücüler aracılığıyla sağlanmıştır. Bu yaklaşım sayesinde enerji dönüşüm kayıpları azaltılmış, sistem karmaşıklığı düşürülmüş ve invertör ihtiyacı ortadan kaldırılmıştır. Bu mimari, özellikle saha koşullarında uzun süreli ve kesintisiz çalışması gereken otonom sistemlerde enerji verimliliğinin artırılmasına, donanım karmaşıklığının azaltılmasına ve sistem güvenilirliğinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Bu mimari, özellikle saha koşullarında uzun süreli ve kesintisiz çalışması gereken otonom sistemlerde enerji verimliliğini artırmakta, donanım karmaşıklığını azaltmakta ve sistem güvenilirliğine katkı sağlamaktadır.

3.8. Enerji Üretim ve Tüketim Hesapları

Şebekeden bağımsız ve otonom sistemlerde enerji sürekliliğinin sağlanabilmesi için, enerji üretimi ile tüketimi arasındaki dengenin doğru şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Yetersiz enerji üretimi sistemin kesintiye uğramasına neden olurken, aşırı kapasite seçimi ise maliyet ve verim açısından dezavantaj oluşturmaktadır. Bu nedenle güneş paneli gücü, akü kapasitesi ve yük tüketimleri birlikte değerlendirilmelidir.

Bu tez kapsamında enerji analizi, 12 V DA ana güç barası esas alınarak gerçekleştirilmiştir. 5 V ile çalışan bileşenlerin beslenmesinde kullanılan DA–DA dönüştürücülerin kayıpları ayrıca değerlendirilmelidir. AA invertör kullanılmadığı için hesaplamalarda DA–AA dönüşüm kayıpları dikkate alınmamıştır.

Tasarlanan sistemde başlıca elektriksel yükler; haberleşme modemi (4.5G), kamera sistemi, manyetik kuplajlı kablosuz şarj vericisi (Qi TX), dört adet merkezleme motoru, ultrasonik sensörler ve ESP32 tabanlı kontrol sisteminden oluşmaktadır. Bu yükler, 12 V DA ana dağıtım hattından doğrudan veya ihtiyaç duyulan çalışma gerilimine uygun DA–DA dönüştürücüler aracılığıyla beslenmektedir.

3.8.1. Günlük Enerji Tüketimi Hesabı

Sistemde yer alan elektriksel yüklerin günlük enerji tüketimi, her bir yükün güç değeri ve günlük çalışma süresi dikkate alınarak hesaplanmıştır. Günlük enerji tüketiminin belirlenmesinde kullanılan temel eşitlik Denklem (3.1)'de verilmiştir.

$$E_{günlük} = P \times t \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte $E_{günlük}$, bir elektriksel yükün bir gün boyunca tükettiği toplam enerji miktarını ifade etmekte ve birimi watt-saat (Wh/gün) olarak verilmektedir. P, yükün anlık güç

tüketimini ifade etmekte ve watt (W) cinsinden ölçülür. Bu değer, yükün çalışma anındaki gerilim ve akım değerlerinin çarpımı ile belirlenir. t ise yükün gün içerisindeki toplam çalışma süresini ifade etmekte ve saat (h) cinsinden verilmektedir. Güç değeri, gerilim ve akımın çarpımı ile elde edilmekte olup Denklem (3.2)'de verilmiştir.

$$P=V \times I \quad (3.2)$$

Burada V , yükün çalışma gerilimini ifade etmekte ve volt (V) cinsinden; I ise yük üzerinden geçen akımı ifade eder ve amper (A) cinsindendir. Bu iki eşitlik birlikte değerlendirildiğinde, bir yükün günlük enerji tüketimi hem elektriksel parametrelere (gerilim ve akım) hem de kullanım süresine bağlı olarak değişmektedir. Dolayısıyla sistemde yer alan her bir bileşen için ayrı ayrı güç ve çalışma süresi değerleri belirlenmiş ve günlük enerji tüketimleri hesaplanarak toplam sistem tüketimi elde edilmiştir.

Sistemin 24 saat kesintisiz çalıştığı varsayılarak günlük enerji tüketimi aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

Haberleşme modemi için; Sistemde uzaktan izleme, veri aktarımı ve internet haberleşmesinin sağlanması amacıyla 4.5G destekli kablosuz modem kullanılmıştır. Modemin 12 V besleme gerilimi altında ortalama 1 A akım çektiği kabul edilmiştir. Modemin günlük enerji tüketimi ile çalışma süresinin çarpımına dayalı olarak hesaplanmıştır.

$$E_{modem} = P \times t = 12 \times 24 = 288 \text{ Wh/gün} \quad (3.3)$$

Kamera sistemi iniş platformunun uzaktan izlenmesi ve güvenliğinin sağlanması amacıyla kullanılmıştır. Üretici teknik özelliklerine göre kameranın tipik güç tüketimi 2 W olarak kabul edilmiştir. Kameranın gün boyunca kesintisiz çalıştığı varsayılarak günlük enerji tüketimi hesaplanmıştır.

$$E_{kamera} = 2 \times 24 = 48 \text{ Wh/gün} \quad (3.4)$$

Kablosuz şarj vericisi ise İHA bataryasının kablosuz olarak şarj edilmesi amacıyla Qi prensibine göre çalışan, 5 V–2 A giriş değerlerine sahip düşük güçlü bir kablosuz şarj

vericisi kullanılmıştır. Üretici teknik özelliklerine göre vericinin maksimum giriş gücü 10 W olarak kabul edilmiştir. Deneysel çalışmalarda İHA bataryasının bir tam şarj süresi yaklaşık 4 saat olarak belirlenmiş ve günlük görev senaryosu kapsamında sistemin günde 5 kez şarj döngüsü gerçekleştirdiği kabul edilmiştir. Bu doğrultuda kablosuz şarj vericisinin günlük enerji tüketimi çalışma süresi dikkate alınarak hesaplanmıştır.

$$E_{şarj} = P \times t = 10 \times 20 = 200 \text{ Wh/gün} \quad (3.5)$$

Bu hesaplama, kablosuz şarj vericisinin tam güçte çalıştığı kabulüne dayanmaktadır. Gerçek çalışma koşullarında şarjın son evresinde güç tüketiminin azalması ve kablosuz güç aktarımındaki verim kayıpları nedeniyle gerçek enerji tüketimi farklılık gösterebilir.

Merkezleme motor sisteminde İHA'nın merkezlenmesi amacıyla dört adet NEMA 17 tip step motor kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda her bir motorun 12 V besleme geriliminde yaklaşık 1,5 A akım çektiği belirlenmiştir. Bu durumda dört motorun aynı anda çalışması hâlinde toplam güç tüketimi yaklaşık 72 W olmaktadır. Deneysel çalışmalar sırasında İHA'nın günde beş kez şarj istasyonuna döndüğü ve her merkezleme işleminde motorların ileri ve geri hareketleri dâhil toplam yaklaşık 20 saniye çalıştığı ölçülmüştür. Bu doğrultuda merkezleme motorlarının günlük enerji tüketimi çalışma süresi esas alınarak hesaplanmıştır.

$$E_{motor} = P \times t = 72 \times 0.0278 = 2 \text{ Wh/gün} \quad (3.6)$$

Ultrasonik sensörler sistemde İHA'nın inişinin algılanması amacıyla toplam dört adet kullanılmıştır. Sensörlerin 5 V besleme geriliminde yaklaşık 15 mA akım çektiği kabul edilmiştir. Buna göre bir sensörün güç tüketimi 0,075 W, dört sensörün toplam güç tüketimi ise 0,30 W olarak hesaplanmıştır. Sensörlerin gün boyunca kesintisiz çalıştığı dikkate alınmıştır. Dört adet ultrasonik sensörün günlük enerji tüketimi ve çalışma süresi dikkate alınarak hesaplanmıştır.

$$E_{sensör} = P \times t = 0,3 \times 24 = 7,2 \text{ Wh/gün} \quad (3.7)$$

Sistemde motorların, sensörlerinin ve kablosuz haberleşme birimlerinin kontrolünün sağlanması amacıyla ESP32 tabanlı kontrol sistemi kullanılmıştır. Kontrol kartının 5 V besleme geriliminde ortalama 160 mA akım çektiği kabul edilmiştir. Buna göre kontrol kartının günlük enerji tüketimi, güç tüketimi ve günlük çalışma süresi dikkate alınarak hesaplanmıştır.

$$E_{ESP32} = P \times t = 0,8 \times 24 = 19,2 \text{ Wh/gün} \quad (3.8)$$

3.8.2. Toplam Günlük Enerji Tüketimi

Sistemin toplam günlük enerji tüketimi, sistem bileşenlerinin günlük enerji tüketimleri dikkate alınarak hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} E_{\text{günlük tüketim}} &= E_{\text{modem}} + E_{\text{kamera}} + E_{\text{şarj}} + E_{\text{motor}} + E_{\text{sensör}} + E_{ESP32} \\ &= 288 + 48 + 200 + 2 + 7,2 + 19,2 \\ &= 564,4 \text{ Wh/gün} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Bu değer, sistemin bir günde ihtiyaç duyduğu toplam enerji miktarını ifade etmektedir. İnsansız Hava Aracının 5 kez şarj olması ve bu sürelerde misina tabanlı mekanik sistem içinde sekiz kez kullanılarak hesap edilmiştir. Sonuçlar Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. DC yüklerin güç değerleri ve günlük enerji tüketim hesabı

Yük	Adet	Gerilim (V)	Akım (A)	Güç (W)	Günlük Çalışma Saati (H)	Günlük Enerji (Wh/Gün)
Haberleşme Modemi	1	12	1	12	24	288
Kamera Sistemi	1	5	0,4	2	24	48
Kablosuz Şarj Vericisi	1	5	2	10	20	200
Merkezleme Motorları	4	12	1,5	72	0,0278	2
Ultrasonik Sensörler	4	5	0,015	0,30	24	7,2
ESP32	1	5	0,16	0,8	24	19,2
Toplam						564,4

3.9. Akü Kapasitesi ve Enerji Depolama Analizi

Enerji depolama birimi olarak 12.8 V – 100 Ah LiFePO₄ akü kullanılmıştır. Akünün teorik enerji kapasitesi, beslenme gerilim ve kapasite değeri dikkate alınarak hesaplanmıştır.

$$WhE_{akü} = V \times Ah = 12.8 \times 100 = 1280 \text{ Wh} \quad (3.10)$$

LiFePO₄ aküler derin deşarja uygun olmakla birlikte, sistem güvenliği ve uzun ömür açısından %80-%90 arasında kullanım oranı esas alınmıştır. Akünün kullanabilir enerji kapasitesi, %80 deşarj derinliği esas alınarak hesaplanmıştır.

$$E_{kullanilabilir} = 1280 \times 0.8 = 1024 \text{ Wh} \quad (3.11)$$

Bu durumda akünün, sistemin tek başına besleyebileceği süre kullanabilir enerji kapasitesi ile sistemin günlük enerji tüketimi dikkate alınarak hesaplanmıştır.

$$\text{Gün sayısı} = \frac{E_{kullanilabilir}}{E_{gunluk \text{ tüketim}}} \quad (3.12)$$

Akünün %80 kullanabilir enerji kapasitesine göre sistemi besleme süresi hesaplanmıştır.

$$\frac{E_{kullanilabilir}}{E_{gunluk \text{ tüketim}}} = \frac{1280 \times 0.8}{564,4} = \frac{1024}{564,4} = 1.81 \text{ gün} \quad (3.13)$$

Akünün %90 kullanabilir enerji kapasitesine göre sistemi besleme süresi hesaplanmıştır.

$$\frac{E_{kullanilabilir}}{E_{gunluk \text{ tüketim}}} = \frac{1280 \times 0.9}{564,4} = \frac{1152}{564,4} = 2,04 \text{ gün} \quad (3.14)$$

Sonuç olarak, 12,8 V 100 Ah LiFePO₄ akü, %80–%90 kullanabilir enerji kapasitesi dikkate alındığında sistemi yaklaşık 1,81–2,04 gün süreyle kesintisiz olarak besleyebilmektedir.

3.10. Güneş Paneli ile Enerji Üretimi

Sistemde kullanılan 395 W gücündeki güneş panelinin günlük enerji üretimi, PVGIS yazılımından Ankara/Sincan bölgesi için elde edilen fotovoltaiik üretim verileri esas alınarak hesaplanmıştır. PVGIS analizine göre 1 kWp kurulu güce sahip bir sistemin yıllık ortalama günlük enerji üretimi 4,65 kWh/gün olarak belirlenmiştir. Buna göre 395 W gücündeki fotovoltaiik panelin ortalama günlük enerji üretimi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır

$$E_{panel} = 0,395 \times 4,65 = 1,84 \text{ kWh/gün} = 1840 \text{ Wh/gün} \quad (3.15)$$

Şarj kontrol ünitesi ve kablo kayıpları dikkate alındığında %85 verim kabul edilerek net enerji üretimi hesaplanmıştır.

$$E_{üretim} = 1840 \times 0,85 = 1564 \text{ Wh/gün} \quad (3.16)$$

Şebekeden bağımsız sistemlerin enerji yeterliliğinin değerlendirilmesinde yalnızca yıllık ortalama üretim değerinin kullanılması yeterli değildir. Güneş ışınımının düşük olduğu aylardaki üretim miktarının da değerlendirilmesi gerekmektedir. PVGIS analiz sonuçlarına göre en düşük ortalama günlük fotovoltaiik enerji üretimi ocak ayında 2,56 kWh/kWp-gün olarak belirlenmiştir. Buna göre 395 W gücündeki panelin ocak ayındaki tahmini günlük enerji üretimi aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$E_{ocak,brüt} = 0,395 \times 2,56 = 1,0112 \text{ kWh/gün} \quad (3.17)$$

Şarj kontrol ünitesi ve kablo kayıpları için kabul edilen %85 sistem verimi dikkate alındığında:

$$E_{ocak,net} = 1,0112 \times 0,85 = 0,8595 \text{ kWh/gün} \quad (3.18)$$

Bu sonuç, sistemin en düşük güneş enerjisi üretiminin gerçekleştiği ocak ayında dahi yaklaşık 860 Wh/gün net enerji üretebileceğini göstermektedir. Ancak ardışık kapalı günler, panel yüzeyindeki kirlenme, sıcaklık etkileri, batarya doluluk oranı ve yüklerin

saatlik çalışma profili gerçek sistem performansını etkileyebilir. Bu nedenle enerji sürekliliğinin değerlendirilmesinde sistemin akü kapasitesiyle birlikte ele alınması gerekmektedir.

Ocak ayı için hesaplanan yaklaşık 860 Wh/gün net enerji üretimi, sistemin günlük enerji tüketimi olan 564,4 Wh/gün değerinin yaklaşık 1,52 katına karşılık gelmektedir. Bu durum en düşük üretim döneminde dahi teorik olarak pozitif enerji dengesinin korunabildiğini göstermektedir.

3.11. Enerji Denge Değerlendirmesi

Bu çalışmada tasarlanan otonom kablosuz şarj sisteminin enerji yeterliliği, fotovoltaik panel tarafından üretilen günlük enerji miktarı ile sistem yüklerinin toplam günlük enerji tüketiminin karşılaştırılması yoluyla analiz edilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, güneş panelinin günlük ortalama enerji üretimi 1564 Wh/gün, sistemin toplam günlük enerji tüketimi ise 564,4 Wh/gün olarak belirlenmiştir.

Enerji dengesi, fotovoltaik panel tarafından üretilen günlük enerji miktarı ile sistemin toplam günlük enerji tüketimi arasındaki farktır.

$$E_{net} = 1564 - 564,4 = 999,6 \text{ Wh/gün} \quad (3.19)$$

Elde edilen bu sonuç, sistemin günlük enerji ihtiyacını karşıladıktan sonra 999,6 Wh/gün düzeyinde fazla enerji ürettiğini göstermektedir. Bu durum, sistemin enerji açısından pozitif dengede çalıştığını ortaya koymaktadır. Sistemin üretim-tüketim oranı incelendiğinde,

$$\frac{E_{\text{üretim}}}{E_{\text{türetim}}} = \frac{1564}{564,4} = 2,77 \quad (3.20)$$

olarak hesaplanmıştır. Bu oran, fotovoltaik panelin sistemin günlük enerji gereksiniminin yaklaşık 2,77 katı enerji üretme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. En düşük

üretim değerinin görüldüğü ocak ayı için net günlük üretim yaklaşık 860 Wh/gün olarak hesaplanmıştır. Sistemin toplam günlük enerji tüketiminin 564,4 Wh/gün olduğu dikkate alındığında, ocak ayında yaklaşık 295,6 Wh/gün teorik enerji fazlası oluşmaktadır.

$$E_{\text{ocak,net}} = 860 - 564,4 = 295,6 \text{ Wh/gün} \quad (3.21)$$

Ocak ayındaki üretim-tüketim oranı:

$$\frac{E_{\text{üretim}}}{E_{\text{tüketim}}} = \frac{860}{564,4} = 1,52 \quad (3.22)$$

Yani yıllık ortalamada sistem tüketimin 2,77 katını, en kötü ay olan ocakta ise yaklaşık 1,52 katını üretmektedir. Ancak bu sonuç günlük ortalama içindir; birkaç kapalı gün art arda gelirse akü devreye girecektir. Elde edilen enerji fazlası ise aküde depolanarak özellikle güneşlenmenin yetersiz olduğu durumlarda (gece saatleri, bulutlu hava koşulları vb.) sistemin kesintisiz çalışmasına katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, sistemin enerji üretim kapasitesinin, tüketim gereksinimlerini karşılamak açısından yeterli olduğu ve seçilen fotovoltaik panel-akü kombinasyonunun tasarım hedefleriyle uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Mekanik Merkezleme Sistemine İlişkin Bulgular

İHA'nın kablosuz şarj işleminin gerçekleştirilebilmesi için platform üzerinde bulunan verici (TX) bobin ile İHA üzerinde bulunan alıcı (RX) bobinin uygun şekilde hizalanması gerekmektedir. Bu amaçla geliştirilen misina tabanlı mekanik merkezleme sisteminin, İHA'nın platform üzerine inişinden sonra şarj bölgesine yönlendirilmesindeki işlevi uygulamalı olarak incelenmiştir.

İHA'nın platform üzerine inişinin ultrasonik sensörler tarafından algılanmasının ardından, iniş hareketinin tamamlanması ve sistemin kararlı duruma gelmesi amacıyla 10 saniyelik bekleme süresi uygulanmıştır. Bu sürenin sonunda merkezleme mekanizması devreye alınmış ve motorlara bağlı misina hatları aracılığıyla İHA platformun merkezinde bulunan kablosuz şarj bölgesine doğru yönlendirilmiştir..

Merkezleme işlemi sonucunda İHA'nın platform merkezine taşınarak alıcı ve verici bobinlerin karşılıklı konuma getirilebildiği görülmüştür. Merkezleme tamamlandıktan sonra mekanizma başlangıç konumuna geri çekilmiş ve böylece şarj işlemi sırasında İHA ile merkezleme mekanizması arasındaki mekanik temas ortadan kaldırılmıştır.

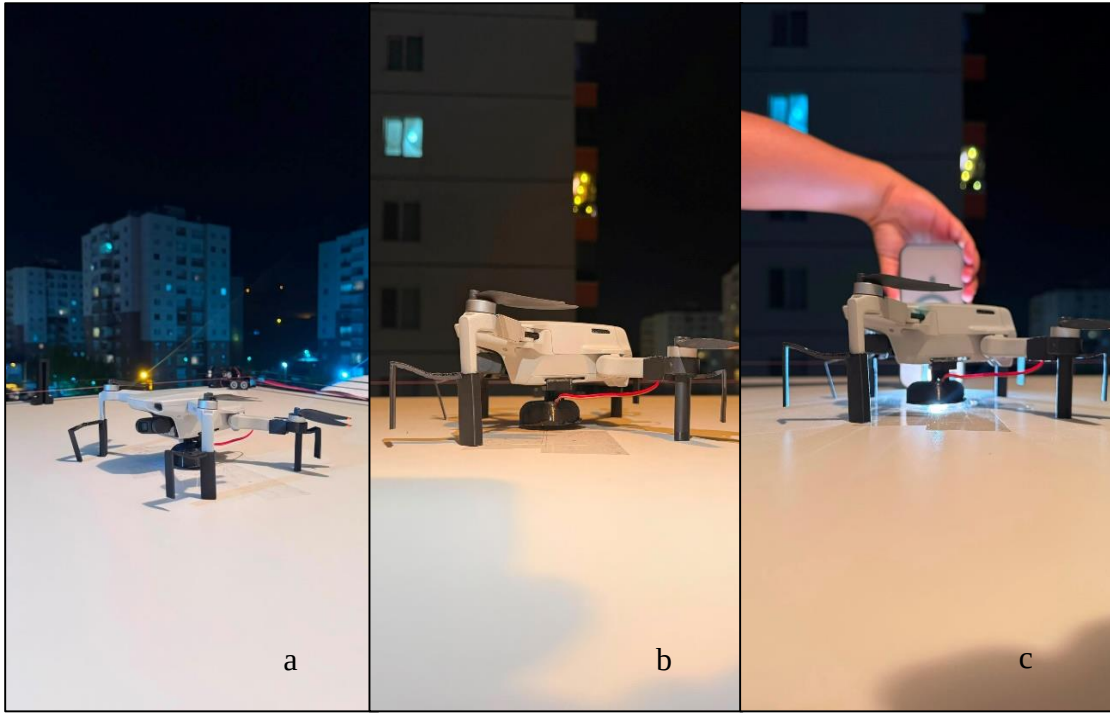
Elde edilen bulgular, geliştirilen merkezleme sisteminin İHA'nın platform üzerine şarj bobiniyle tam hizalı olarak iniş yapması gereksinimini azaltabileceğini ve kablosuz enerji aktarımı öncesinde gerekli TX-RX bobin hizalamasının sağlanmasına katkıda bulunduğunu göstermektedir.

4.2. Kablosuz Şarj Sistemine İlişkin Bulgular

Geliştirilen sistemde kablosuz enerji aktarımının gerçekleştirilebilmesi amacıyla verici (TX) bobin şarj platformunun merkezine, alıcı (RX) bobin ise İHA üzerine yerleştirilmiştir.

Mekanik merkezleme işlemi sonrasında İHA'nın şarj bölgesine getirilmesiyle verici ve alıcı bobinlerin karşılıklı olarak hizalanması sağlanmıştır.

Gerçekleştirilen deneysel uygulamalarda alıcı (RX) ve verici (TX) bobinler arasında yaklaşık 4 mm hava boşluğu bırakılmış ve bu konumda kablosuz enerji aktarımının gerçekleştirilebildiği gözlemlenmiştir. Sistem gündüz ve gece koşullarında test edilmiş ve yaklaşık 4 mm hava boşluğunda enerji aktarımının sürdürülebildiği görülmüştür. Deneysel uygulamalara ait görüntüler Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Geliştirilen manyetik kuplajlı kablosuz şarj sistemine ait deneysel görüntüler: (a) gece ortamında, (b) İHA'nın şarj platformu üzerinde ve (c) yaklaşık 4 mm hava boşluğunda alıcı (RX) ile verici (TX) bobinlerin hizalanması

İndüktif kablosuz güç aktarım sistemlerinde bobinler arasındaki mesafe ve hizalama durumu enerji aktarımını etkileyen önemli parametrelerdir. Waffenschmidt ve Staring (2009), bobinler arasındaki hava aralığının artmasının ve eksenel hizalamanın bozulmasının enerji aktarım performansını sınırlandırabildiğini belirtmiştir. Bu nedenle bu çalışmada geliştirilen mekanik merkezleme sisteminin, İHA'yı şarj bölgesine getirerek verici ve alıcı bobinlerin uygun konumda bulunmasına katkı sağladığı değerlendirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında kablosuz enerji aktarım verimi yüzde olarak deneysel biçimde ölçülmemiştir. Bu nedenle elde edilen bulgu, sistemin yaklaşık 4 mm hava boşluğunda kablosuz enerji aktarımını gerçekleştirebildiğini göstermektedir.

4.3. Fotovoltaik Enerji Üretimine İlişkin Bulgular

Sistemin şebekeden bağımsız olarak çalışabilme durumunun değerlendirilmesi amacıyla, kullanılan 395 W monokristal fotovoltaik panelin günlük enerji üretim kapasitesi incelenmiştir. PVGIS verilerine göre Sincan bölgesi için yıllık ortalama günlük fotovoltaik enerji üretim değeri 4,65 kWh/kWp-gün olarak belirlenmiştir. Bu değer kullanılarak 395 W gücündeki panelin teorik günlük enerji üretimi 1,84 kWh/gün (1840 Wh/gün) olarak hesaplanmıştır.

Şarj kontrol ünitesi ve kablo kayıpları dikkate alınarak sistem verimi %85 kabul edildiğinde, kullanılabilir net günlük enerji üretimi 1564 Wh/gün olarak elde edilmiştir.

Fotovoltaik enerji üretiminin yıl içerisindeki değişiminin değerlendirilmesi amacıyla en düşük üretimin gerçekleştiği ocak ayı ayrıca incelenmiştir. PVGIS analizinde ocak ayı için belirlenen 2,56 kWh/kWp-gün değeri kullanıldığında 395 W panelin teorik günlük üretimi 1,0112 kWh/gün olarak hesaplanmıştır. %85 sistem verimi dikkate alındığında ocak ayındaki net günlük enerji üretiminin yaklaşık 860 Wh/gün olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar, fotovoltaik panelin yıllık ortalama koşullarda olduğu gibi güneş enerjisi üretiminin en düşük olduğu ocak ayında da sistemin enerji ihtiyacının karşılanmasına katkı sağlayabilecek düzeyde enerji üretebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte gerçek üretim değerlerinin hava koşulları, panel sıcaklığı, yüzey kirlenmesi ve güneşlenme süresindeki değişimlerden etkilenebileceği dikkate alınmalıdır.

4.4. Enerji Tüketimine İlişkin Bulgular

Geliştirilen otonom İHA şarj sisteminde yer alan elektriksel yüklerin günlük enerji tüketimleri, güç değerleri ve çalışma süreleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Yapılan

hesaplamalar sonucunda sistemin toplam günlük enerji tüketimi 564,4 Wh/gün olarak belirlenmiştir.

Sistem bileşenleri ayrı ayrı incelendiğinde, 24 saat sürekli çalışan 4.5G modem 288 Wh/gün ile en yüksek enerji tüketimine sahip yük olduğu görülmüştür. Kablosuz şarj vericisinin (Qi TX), belirlenen günlük çalışma süresine göre enerji tüketimi 200 Wh/gün olarak hesaplanmıştır. Kamera sisteminin günlük tüketimi 48 Wh/gün, ESP32 kontrol biriminin 19,2 Wh/gün, ultrasonik sensörlerin 7,2 Wh/gün ve merkezleme sisteminde kullanılan motorların ise yaklaşık 2 Wh/gün olduğu belirlenmiştir.

Böylece sistemin günlük enerji ihtiyacının büyük bölümünün sürekli çalışan haberleşme birimi ile kablosuz şarj sisteminden kaynaklandığı belirlenmiştir. Merkezleme motorlarının ise kısa süreli çalışmaları nedeniyle toplam günlük enerji tüketimi içerisindeki payının oldukça düşük olduğu görülmüştür.

Elde edilen 564,4 Wh/gün toplam tüketim değeri, fotovoltaik sistemden elde edilen 1564 Wh/gün yıllık ortalama net enerji üretiminin yaklaşık %36'sına karşılık gelmektedir. Bu sonuç, yıllık ortalama üretim koşullarında fotovoltaik sistem tarafından üretilen günlük enerjinin hesaplanan günlük tüketim değerinin üzerinde olduğunu göstermektedir.

4.5. Enerji Dengesi ve Otonom Sistemine İlişkin Bulgular

Fotovoltaik sistem tarafından üretilen enerji ile sistemin günlük enerji tüketimi birlikte değerlendirilerek sistemin enerji dengesi belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalarda fotovoltaik panelin yıllık ortalama net günlük enerji üretimi 1564 Wh/gün, sistemin toplam günlük enerji tüketimi ise 564,4 Wh/gün olarak bulunmuştur. Yapılan değerlendirme sonucunda, yıllık ortalama net günlük enerji üretiminden sistemin toplam günlük enerji tüketimi çıkarıldığında 999,6 Wh/gün enerji fazlası elde edilmiştir. Bu sonuç, yıllık ortalama üretim koşullarında sistemin günlük enerji ihtiyacı karşılandıktan sonra teorik olarak 999,6 Wh/gün enerji fazlası oluştuğunu göstermektedir. Sistemin üretim-tüketim oranı ise 2,77 olarak belirlenmiştir. Buna göre fotovoltaik sistemin yıllık ortalama günlük net enerji üretimi, hesaplanan günlük enerji tüketiminin yaklaşık 2,77 katıdır.

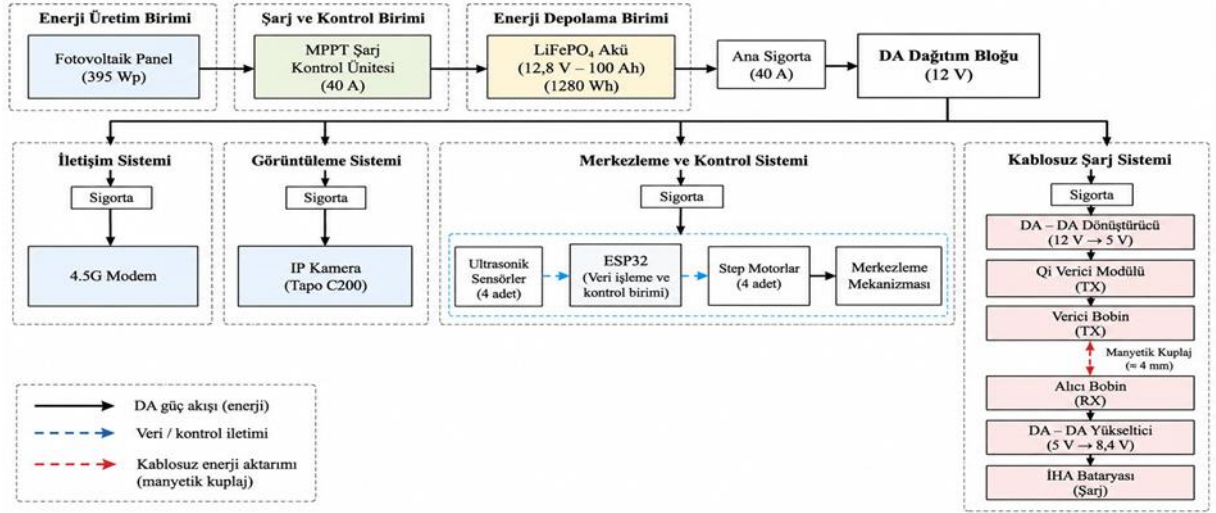
Güneş enerjisi üretiminin en düşük olduğu ocak ayı için yapılan değerlendirmede net günlük enerji üretimi yaklaşık 860 Wh/gün olarak hesaplanmıştır. Sistemin günlük 564,4 Wh enerji tüketimi dikkate alındığında, ocak ayında yaklaşık 295,6 Wh/gün enerji fazlası elde edilmektedir. Ocak ayındaki üretim-tüketim oranı ise yaklaşık 1,52 olarak hesaplanmıştır. Böylece kullanılan PVGIS verileri ve hesaplama kabulleri altında, en düşük üretimin gerçekleştiği ayda da günlük ortalama enerji üretiminin günlük tüketimin üzerinde kaldığı görülmüştür.

Enerji depolama birimi olarak kullanılan 12,8 V 100 Ah LiFePO₄ akünün teorik enerji kapasitesi 1280 Wh'dir. Akünün kullanılabilir kapasitesi dikkate alınarak yapılan hesaplamalarda, fotovoltaik enerji üretiminin bulunmadığı durumda sistemin yaklaşık 1,81–2,04 gün süreyle yalnızca akü üzerinden çalışabileceği belirlenmiştir.

Bu bulgular, fotovoltaik üretim ile enerji depolama sisteminin birlikte kullanılması sonucunda sistemin günlük enerji gereksiniminin karşılanabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte ardışık kapalı günler, panel yüzeyindeki kirlenme, sıcaklık, akü doluluk oranı ve gerçek çalışma koşullarındaki kayıplar enerji sürekliliğini etkileyebileceğinden elde edilen sonuçlar hesaplamalarda kullanılan koşullar kapsamında değerlendirilmelidir.

Geliştirilen sistemde fotovoltaik enerji üretimi, enerji depolama, doğru akım (DA) güç dağıtımı, İHA'nın algılanması, mekanik merkezleme ve kablosuz şarj aşamaları bütünleşik bir yapı içerisinde ele alınmıştır. Sistem bileşenlerinin birbiriyle bağlantılı olarak çalışması sonucunda, İHA'nın platforma inişinden kablosuz şarjın başlatılmasına kadar olan süreç otonom bir çalışma sırası içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Sistemin enerji akışında, fotovoltaik panel tarafından üretilen elektrik enerjisi şarj kontrol ünitesi üzerinden LiFePO₄ aküye aktarılmakta ve depolanan enerji sigortalı DA dağıtım hattı üzerinden sistem bileşenlerine iletilmektedir. Kamera, haberleşme birimi, ESP32 kontrol sistemi, ultrasonik sensörler, merkezleme motorları ve kablosuz şarj vericisi aynı DA güç altyapısı üzerinden beslenmektedir. Sistemin enerji akışını gösteren blok diyagramı Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Sistemin enerji akışını gösteren blok diyagramı

İHA'nın platform üzerine inişinin algılanmasının ardından 10 saniyelik bekleme süresi uygulanmakta ve merkezleme sistemi devreye girmektedir. İHA'nın platform merkezindeki şarj bölgesine getirilmesinden sonra merkezleme mekanizması başlangıç konumuna geri çekilmekte ve verici (TX) ile alıcı (RX) bobinlerin uygun konuma gelmesiyle kablosuz enerji aktarımı gerçekleştirilmektedir.

Bu bütünleşik yapı sayesinde enerji üretimi, depolanması ve kullanımı ile İHA'nın merkezlenmesi ve kablosuz şarj edilmesi aynı sistem içerisinde bir araya getirilmiştir. Ayrıca sistemde AA invertör kullanılmadan DA tabanlı bir güç mimarisinin tercih edilmesi, sistem yüklerinin doğrudan DA dağıtım hattından beslenmesine olanak sağlamıştır.

Böylece geliştirilen sistemin yalnızca kablosuz şarj biriminden oluşmadığı; fotovoltaik enerji üretimi, enerji depolama, kontrol, mekanik merkezleme ve kablosuz enerji aktarımını bütünleştiren otonom bir İHA şarj sistemi olduğu ortaya konulmuştur..

4.6. Bulguların Literatürle Karşılaştırılması

Alıcı (RX) birimi, verici bobin tarafından manyetik kuplaj yöntemiyle aktarılan enerjiyi alarak doğrultmakta ve uygun DA gerilime dönüştürmektedir. Elde edilen enerji, alıcı

modül üzerinden şarj kontrol devresine aktarılmakta ve İHA bataryasının güvenli bir şekilde şarj edilmesini sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında alıcı bobin, İHA'nın üst gövdesine özel olarak tasarlanan 3D yazıcı üretimi bir taşıyıcı aparat kullanılarak monte edilmiştir. Alıcı modülün çıkışı USB-C bağlantısı üzerinden İHA'nın şarj girişine bağlanmış ve herhangi bir yapısal değişiklik yapılmadan kablosuz şarj işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4'de alıcı bobinin İHA üzerine monte edilmiş genel görünümü verilmiştir.

Bu tez çalışmasında geliştirilen otonom İHA şarj sisteminden elde edilen bulgular, kablosuz enerji aktarımında bobin hizalamasının önemli bir parametre olduğunu göstermiştir. Gerçekleştirilen deneysel uygulamalarda İHA'nın mekanik merkezleme sistemi yardımıyla şarj bölgesine yönlendirilmesi sağlanmış ve verici (TX) ile alıcı (RX) bobinler arasında yaklaşık 4 mm hava boşluğu bulunduğu durumda kablosuz enerji aktarımının gerçekleştirilebildiği gözlemlenmiştir.

Nadi ve Zhang (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, bobinlerin tam hizalı olduğu durumda kuplaj katsayısının 0,38 olduğu, konumsal sapma meydana geldiğinde ise bu değer yaklaşık 0,26 seviyesine düştüğü belirtilmiştir. Aynı çalışmada 10 mm hava aralığında 11,1 V batarya için 48,2 W çıkış gücü ve %88,2 enerji aktarım verimi elde edilmiştir. Bu sonuçlar, bobinler arasındaki hizalamanın kablosuz enerji aktarım performansı açısından önemini göstermektedir. Bu tez kapsamında geliştirilen mekanik merkezleme sistemi de İHA'nın iniş sonrasında şarj bölgesine yönlendirilmesi ve bobinlerin uygun konuma getirilmesi amacıyla kullanılmıştır.

Jeong vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da İHA uygulamalarında kablosuz enerji aktarımının gerçekleştirilebilmesi için konumlandırma ve bobin hizalamasının önemli olduğu belirtilmiştir. Benzer şekilde Shen vd. (2024), verici ve alıcı bobinler arasındaki konum değişimlerinin karşılıklı endüktansı ve sistemin çıkış karakteristiğini etkilediğini ortaya koymuştur. Bu çalışmalar, bu tezde kullanılan mekanik merkezleme yaklaşımının kablosuz şarj sistemi açısından önemini desteklemektedir.

Ali vd. (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise İHA'nın iniş sırasında verici ve alıcı bobinlerin hizalanmasına yardımcı olmak amacıyla konik yapıya sahip bir kablosuz

şarj sistemi geliştirilmiş ve %94'e kadar enerji aktarım verimi bildirilmiştir. Söz konusu çalışmada geometrik yapı kullanılarak pasif bir hizalama yaklaşımı uygulanırken, bu tez çalışmasında İHA'nın iniş sonrasında misina tabanlı elektromekanik sistem yardımıyla şarj bölgesine taşındığı aktif bir mekanik merkezleme yaklaşımı kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında kablosuz enerji aktarım verimi doğrudan deneysel olarak ölçülmediğinden, literatürde bildirilen verim değerleri ile doğrudan nicel bir karşılaştırma yapılmamıştır. Bununla birlikte yaklaşık 4 mm hava boşluğunda kablosuz enerji aktarımının gerçekleştirilebilmesi ve mekanik merkezleme sistemi ile bobinlerin uygun konuma getirilebilmesi, geliştirilen sistemin bütünleşik çalışma yaklaşımını ortaya koymuştur.

Literatürdeki çalışmalarla birlikte değerlendirildiğinde, bu tez kapsamında geliştirilen sistemin temel farklılığı; fotovoltaik enerji üretimi, LiFePO_4 enerji depolama birimi, DA güç altyapısı, mekanik merkezleme sistemi ve kablosuz enerji aktarımının tek bir otonom İHA şarj sistemi içerisinde bütünleştirilmiş olmasıdır. Elde edilen bulgular, geliştirilen yaklaşımın şebekeden bağımsız otonom İHA şarj uygulamalarında kullanılabilirliğinin araştırılması açısından bir uygulama örneği ortaya koymaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, güneş enerjisi ile beslenen, tamamen 12 V doğru akım (DA) tabanlı, şebekeden bağımsız ve modüler bir güç sistemi tasarlanmış ve analiz edilmiştir. Tasarlanan sistem; enerji üretimi, depolanması ve tüketimi aşamalarında dönüşüm kayıplarını minimize etmeyi hedefleyen bir mimari anlayışla ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, manyetik kuplaj temelli kablosuz şarj yaklaşımı DA güç altyapısı ile entegre edilerek otonom sistemler için uygulanabilir bir çözüm sunulmuştur.

Sistemde AA invertör kullanılmaması, enerji verimliliği açısından önemli bir tercih olmuş; DA uyumlu yüklerin adaptörsüz olarak doğrudan DA baradan beslenmesiyle hem enerji kayıpları azaltılmış hem de sistem karmaşıklığı ortadan kaldırılmıştır.

Tez kapsamında gerçekleştirilen analiz ve tasarım çalışmaları sonucunda, DA tabanlı güç mimarisinin şebekeden bağımsız sistemlerde enerji dönüşüm basamaklarının azaltılmasına olanak sağladığı görülmüştür. AA-DA dönüşüm basamaklarının azaltılmasıyla sistemde oluşabilecek dönüşüm kayıplarının sınırlandırılması amaçlanmıştır. LiFePO₄ akü kullanımı, uzun çevrim ömrü ve derin deşarja dayanıklılık özellikleri nedeniyle enerji depolama sistemi açısından uygun bir çözüm sunmuştur. Manyetik kuplajlı kablosuz şarj sistemi ise fiziksel elektriksel temas gerektirmeden enerji aktarımının gerçekleştirilmesine olanak sağlamıştır. Geliştirilen sistemin otonom çalışma senaryolarına ve dış ortam koşullarına uygun, modüler bir yapı oluşturduğu değerlendirilmiştir.

Enerji üretim ve tüketim hesapları, sistem bileşenlerinin birbiriyle uyumlu olduğunu ve günlük enerji ihtiyacının güneş enerjisi ile karşılanabildiğini göstermiştir.

Bu çalışmada DA tabanlı şebekeden bağımsız güç sistemleri için sade ve uygulanabilir bir tasarım yaklaşımı sunulmuş, manyetik kuplajlı kablosuz şarj yöntemi otonom sistemlerle bütünleşik olarak ele alınmıştır. Enerji verimliliği ve sistem güvenliği dikkate alınarak saha uygulamalarına uygun bir sistem yapısı geliştirilmiştir. Ayrıca geliştirilen tasarımın, benzer

gereksinimlere sahip sabit istasyonlar ve mobil platformlara uyarlanabilecek modüler bir yapıya sahip olduğu değerlendirilmiştir.

Her mühendislik çalışmasında olduğu gibi bu tez çalışmasının da bazı kısıtları bulunmaktadır. Kablosuz şarj sisteminin enerji aktarım mesafesi, manyetik kuplaj katsayısına bağlı olarak sınırlıdır. Ayrıca sistem performansı, güneşlenme süresi ve çevresel koşullardan etkilenmektedir. Bu durum, özellikle uzun süreli bulutlu hava koşullarında enerji yönetiminin dikkatli yapılmasını gerektirmektedir.

Bu çalışma temel alınarak gelecekte sistemin enerji aktarım performansının, otonom çalışma kabiliyetinin ve saha uygulanabilirliğinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilebilir. Manyetik kuplajlı kablosuz şarj sisteminde rezonanslı kuplaj yöntemlerinin kullanılmasıyla enerji aktarım mesafesinin ve veriminin artırılması araştırılabilir. Kablosuz güç aktarım verimi; farklı bobin hizalama hataları, hava aralıkları ve yük seviyeleri altında deneysel olarak belirlenebilir. Bununla birlikte, uzun süreli çalışma sırasında verici ve alıcı bobinlerde meydana gelen sıcaklık değişimleri izlenerek gerekli olması durumunda aktif veya pasif soğutma yöntemleri geliştirilebilir.

Mekanik merkezleme sisteminin farklı iniş senaryolarındaki başarı oranı, konumlama hassasiyeti ve tekrarlanabilirliği deneysel olarak değerlendirilebilir. İniş algılama, merkezleme ve kablosuz şarj süreçlerinin sensörler ve kontrol yazılımı aracılığıyla bütünleşik şekilde yönetilmesiyle sistemin tam otonom çalışma kabiliyeti geliştirilebilir. Ayrıca enerji yönetimi için akıllı kontrol algoritmaları kullanılarak güneş enerjisi üretimi, akü durumu ve sistem yüklerinin çalışma süreleri daha etkin biçimde yönetilebilir.

Güneş paneli, akü ve sistem yüklerine ait gerçek enerji üretim ve tüketim değerlerinin uzun süreli veri kaydediciler ile ölçülmesi, teorik hesaplamaların gerçek saha verileriyle karşılaştırılmasına imkân sağlayacaktır. Farklı mevsimlerde panel gölgelenmesi, kirlenme, sıcaklık değişimi ve diğer çevresel koşulların enerji üretimine etkisi incelenebilir. Ayrıca PVGIS gibi analiz araçlarından yararlanılarak akünün farklı dönemlerdeki doluluk ve boşalma davranışı değerlendirilerek sistemin enerji özerkliği doğrulanabilir.

Sistemin uzun süreli saha kullanımına yönelik olarak akü ve güç elektroniği bileşenlerinin sıcaklık, aşırı akım, kısa devre ve ters polarite korumaları deneysel olarak doğrulanabilir. Bağlantı kutuları ve elektronik bileşenler dış ortam şartlarına uygun IP koruma sınıfına sahip muhafazalar içerisine alınarak sistemin çevresel dayanıklılığı artırılabilir. Bunun yanında sigorta, koruma devresi ve diğer güvenlik elemanlarının birbiriyle koordinasyonu test edilerek sistem güvenilirliği geliştirilebilir.

Kablosuz haberleşme altyapısı güvenlik yöntemleriyle geliştirilebilir. Ayrıca sistemin farklı İHA platformlarıyla uyumluluğu araştırılabilir. Geliştirilen sistem; afet yönetimi, orman yangını gözetleme, çevresel ve tarımsal gözlem, kritik altyapı denetimi ve uzun süreli otonom devriye görevleri gibi gerçek saha senaryolarında pilot uygulamalarla test edilebilir. Gerçek saha uygulamalarına geçiş aşamasında ise ilgili sivil havacılık mevzuatı, uçuş izinleri, hava sahası kısıtlamaları ve operasyon güvenliği gereklilikleri dikkate alınarak sistemin mevzuata uygunluğu değerlendirilmelidir.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında, güneş enerjisi ile beslenen, enerji verimliliği yüksek, güvenli ve modüler bir DA tabanlı şebekeden bağımsız güç sistemi başarıyla tasarlanmış ve uygulamaya geçirilmiştir. Geliştirilen manyetik kuplajlı kablosuz şarj ve mekanik merkezleme sistemi birlikte değerlendirilerek, otonom İHA'ların insan müdahalesi olmadan güvenilir şekilde şarj edilebileceği gösterilmiştir. Yapılan enerji analizleri ve deneysel çalışmalar, önerilen sistemin teknik açıdan uygulanabilir olduğunu ortaya koymuş ve geliştirilmeye açık, uygulanabilir bir otonom İHA şarj istasyonu altyapısı sunduğunu göstermiştir.

KAYNAKLAR

Ali, A., Saraereh O. A. and Ware, A. (2025). Novel Design of Conical-Shaped Wireless Charger for Unmanned Aerial Vehicles. *Energies*, 18(18), 5015. doi: 10.3390/en18185015.

Arslan, M. T. ve Erkan, K. (2022). Manyetik Rezonans Kuplaj Yöntemiyle Kablosuz Güç Aktarımı Üzerine Literatür Taraması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 42, 118-125.

Barman, S. D., Reza, A. W., Kumar, N., Karim, M. E. and Munir, A. B. (2015). Wireless powering by magnetic resonant coupling: Recent trends in wireless power transfer system and its applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 1525–1552.

Becquerel, A. E. (1839). Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences*, Cilt 9, ss. 561–567.

European Commission, Joint Research Centre (JRC). PVGIS – Photovoltaic Geographical Information System. <https://photovoltaic-geographic-information-system.ec.europa.eu>. Erişim Tarihi: 27.07.2026.

Green, M. A. (1993). Single-Crystal Silicon: Photovoltaic Applications. *MRS Bulletin*, 18(10), 26–28. DOI: 10.1557/S0883769400038240.

Hussain, I. and Wo, D., K. (2022). Self-Inductance Calculation of the Archimedean Spiral Coil. *Energies*, 15 (1), 253. <https://doi.org/10.3390/en15010253>.

Jeong, S., Bito, J. and Tentzeris, M. M. (2017), Design of a Novel Wireless Power System Using Machine Learning Techniques for Drone Applications, Proceedings of the 2017 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), Taipei, Taiwan, 2017.

Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J. D., Fisher, P. and Soljačić, M. (2007), Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances, *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83–86, 2007 doi/10.1126/science.1143254.

Maxwell, J. C. (1873). A Treatise on Electricity and Magnetism, Oxford: Clarendon Press, 1873.

Mou, X., Gladwin, D., Jiang, J., Li, K. and Yang, Z. (2023), Near-field Wireless Power Transfer Technology for Unmanned Aerial Vehicles: A Systematical Review, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 147–158, 2023.

Nadi E. and Zhang H. (2024), Design and Analysis of a Detuned Series-Series IPT System with Solenoid Coil Structure for Drone Charging Applications, IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Chicago, IL, USA, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/ITEC60657.2024.10598984.

Neumann, F. E. (1845), Allgemeine Gesetze der inducirten elektrischen Ströme, Berlin, 1845.

Shen, D., He, X., Zhang, C., Wu, S. and Cai C. (2024), Output Fluctuation Reduction in Unmanned Aerial Vehicle Wireless Charging through Sine-Cosine Mutual Inductance Overlay, IEEE 7th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Harbin, China, 2024, pp. 2813-2818, doi: 10.1109/CIEEC60922.2024.10583569.

Sonawane, T., Shinde, P., Shelar, K., Rohom, S., Thorat, K. and Parjane P. (2024), Solar Panel Installation: A Review of Current Technologies and Future Directions, 2024 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA) , Manama, Bahreyn, 2024, ss. 1-5, doi: 10.1109/DASA63652.2024.10836643.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji İşler Genel Müdürlüğü (2026), Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA), <https://gepa.enerji.gov.tr/pages/6.aspx> , Erişim tarihi: 27 Temmuz 2026.

Varlı, H., Tuna, M. ve Tombul, M.(2022), Bölgesel Güneş Enerji Potansiyeli ve Enerji Santrali Yatırımı Değerlemesi: Sincan Örneği, *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 34(2), 657-666, 2022.

Waffenschmidt, E. and Staring, T. (2009), Limitation of inductive power transfer for consumer applications. 13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2009), 1–10.

Wireless Power Consortium. Qi Wireless Charging Standard (2026), <https://www.wirelesspowerconsortium.com/standards/qi-wireless-charging/> Erişim tarihi: 29 Haziran 2026.