

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ-MELEZ ENERJİLİ İNSANSIZ HAVA ARACI

SELİN ENGİN

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. İLYAS KANDEMİR

ŞUBAT 2025

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

GÜNEŞ-MELEZ ENERJİLİ İNSANSIZ HAVA ARACI

SELİN ENGİN

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF. DR. İLYAS KANDEMİR

ŞUBAT 2025

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL

**SOLAR-HYBRID POWERED UNMANNED AERIAL
VEHICLE**



SELİN ENGİN

A THESIS OF DOCTORATE
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

ADVISOR: PROF. İLYAS KANDEMİR

FEBRUARY 2025

DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun 20/01/2025 tarih ve 2025/06 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 07/02/2025 tarihinde tez savunma sınavı yapılan SELİN ENGİN'in tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. İlyas KANDEMİR

ÜYE

: Prof. Dr. Süleyman KARSLI

ÜYE

: Prof. Dr. Ali ATA

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi İbrahim GENÇ

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Hasan ÇINAR

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR



*Bu tez, hayatım boyunca yanımda
olan, bana desteklerini ve sevgilerini
esirgemeyen sevgili anneme*

ve

*bugün aramızda olmasa da
varlığıyla her zaman bana güç veren
canım babama ithaf edilmiştir.*

ÖZET

Günümüzde iklim değişikliği ve fosil yakıtların tükenmesi, yenilenebilir enerji kullanan melez elektrikli insansız hava araçlarının (İHA) geliştirilmesini teşvik etmektedir. Büyük kanat açıklığına ve yüksek kütleye sahip İHA'lar üzerine yoğun araştırmalar yapılırken, küçük ölçekli İHA'lar konusunda çalışmalar sınırlı kalmıştır. Bu çalışmada, güneş enerjisini maksimum düzeyde kullanarak havada kalma süresini artırmayı hedefleyen sabit kanatlı bir melez mini İHA geliştirilmiştir.

1,8 m kanat açıklığına ve 3,3 kg kütlesine sahip güneş enerjili mini VTOL (dikey kalkış ve iniş) İHA için, güneş hücreleri, batarya, süperkapasitör ve DC/DC dönüştürücüden oluşan bir sistem tasarlanmış ve MATLAB/Simulink yazılımında modellenmiştir. Sisteme, kural tabanlı (RB) bir enerji yönetim stratejisi (EMS) olan durum makinesi kontrolü (SMC) uygulanmıştır. Güneş enerjisinden elde edilen güç, diğer enerji bileşenleri arasında dağıtılırken, fazla enerji yükseklik enerjisi olarak depolanmıştır. Bu yaklaşımla, enerji tasarrufu %11,11 olarak hesaplanmış ve İHA'nın havada kalma süresi 1,79 saat artırılmıştır.

Ayrıca, çalışmada enerji yönetim stratejilerinin karşılaştırılması amacıyla sisteme Bulanık Mantık (Fuzzy Logic), Eşdeğer Tüketim Minimizasyonu (ECMS) ve Kuantum Parçacık Sürü Optimizasyonu (QPSO) algoritmaları uygulanmıştır. Bu bağlamda, QPSO algoritması güneş enerjisi yönetim sistemine ilk kez entegre edilmiştir. Her bir algoritmanın İHA'nın havada kalma süresine sağladığı katkılar oransal olarak değerlendirilmiş ve sonuçlara göre QPSO algoritmasının, SMC algoritmasına kıyasla havada kalma süresini yaklaşık 1,22 saat daha arttırdığı belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmaları, QPSO algoritmasının diğer stratejilere kıyasla güneş enerjisinden daha hızlı ve etkili bir şekilde faydalandığını ve bu hızın İHA'nın havada kalma süresi üzerinde önemli bir katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

Güneş enerjisinden yararlanma oranı ise yaklaşık %124,19 olarak bulunmuştur. Bu oran, sistemin yalnızca güneş enerjisinden değil, aynı zamanda batarya ve süperkapasitör gibi yardımcı enerji kaynaklarından da güç sağlayarak talep edilen gücü aşan bir enerji üretme kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma, enerji yönetim stratejilerinin küçük ölçekli güneş enerjili İHA'lara başarıyla entegre edilebileceğini göstererek, yenilikçi yaklaşımlar ile sistem performansını artırma yönünde önemli bir katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir Enerji, Güneş Enerjili Mini İHA, Enerji Yönetim Stratejisi, Kural Tabanlı Strateji, Durum Makinesi Kontrolü, Kuantum Parçacık Sürü Optimizasyonu.

ABSTRACT

A solar-powered mini VTOL (Vertical Take-Off and Landing) UAV with a wingspan of 1,8 m and a weight of 3,3 kg was designed, incorporating a system composed of solar cells, batteries, supercapacitors, and DC/DC converters. The system was modeled using MATLAB/Simulink software. A rule-based (RB) energy management strategy (EMS), specifically the State Machine Control (SMC), was implemented to manage energy distribution. Solar energy was distributed among the energy components, and any surplus energy was stored as potential (altitude) energy. This approach resulted in a calculated energy savings of 11,11%, increasing the UAV's flight time by 1,79 hours.

Additionally, energy management strategies such as Fuzzy Logic, Equivalent Consumption Minimization Strategy (ECMS), and Quantum Particle Swarm Optimization (QPSO) were applied to the system for comparative analysis. In this context, the QPSO algorithm was integrated into a solar energy management system for the first time. The contributions of each algorithm to the flight endurance of the UAV were evaluated proportionally, and the results indicated that the QPSO algorithm increased the flight endurance by approximately 1,22 hours compared to the SMC algorithm. Optimization studies demonstrated that the QPSO algorithm utilized solar energy more quickly and effectively than other strategies, significantly contributing to the UAV's flight endurance.

The utilization rate of solar energy was found to be approximately 124,19%. This rate indicates that the system has the capacity to produce energy exceeding the required power by utilizing not only solar energy but also auxiliary energy sources such as batteries and supercapacitors.

This study highlights the successful integration of energy management strategies into small-scale solar-powered UAVs, providing a significant contribution to improving system performance through innovative approaches.

Keywords: Renewable Energy, Solar-Powered Mini UAV, Energy Management Strategy, Rule-Based Strategy, State Machine Control, Quantum Particle Swarm Optimization.

TEŞEKKÜR

Doktora sürecimin her aşamasında mesleki gelişimime katkı sağlayan, beni her zaman destekleyen ve yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. İlyas Kandemir'e en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Çalışmam boyunca bana rehberlik ederek yön gösteren, desteğini ve emeğini hiçbir zaman esirgemeyen hocamın öğrencisi olmaktan büyük bir gurur ve mutluluk duydum. Konu seçiminden araştırmanın yürütülmesine kadar beni sınırlamayıp özgür bıraktığı ve kendi akademik yeterliliğimi göstermeme olanak tanıdığı için, aynı zamanda cesaretlendirici yaklaşımıyla beni her zaman yüreklendirdiği için kendisine minnettarım. Danışmanlığı ve değerli katkıları için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitemde yer alarak değerli görüşleri ile araştırmamın şekillenmesini sağlayan hocalarım Prof. Dr. Süleyman Karslı, Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Genç ve Dr. Öğr. Üyesi Sedat Tokgöz'e teşekkür ederim.

Tez savunmama katılarak kritik noktalarda yapıcı eleştiriler getirerek tezin son şeklini almasını sağlayan değerli hocalarım Prof. Dr. Ali Ata ve Dr. Öğr. Üyesi Hasan Çınar'a teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın hazırlanmasında bilgi ve deneyimleriyle bana destek olan Dr. Öğr. Üyesi Hasan Çınar'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Sağladığı rehberlik, fikir alışverişlerimiz ve çalışma süresince gösterdiği özveri, bu tezin tamamlanmasında önemli bir rol oynamıştır.

Bu çalışma Yükseköğretim Kurulu (YÖK) 100/2000 Doktora Bursu Programı tarafından desteklenmiştir ve Yenilenebilir Enerji ve Enerji Depolama araştırma alanı kapsamında yürütülmüştür. Bu destek için YÖK'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasını yürütürken, doğrudan araştırma konumla ilgili olmasa da farklı alanlardaki desteği, değerli fikirleri ve teşvik edici yaklaşımıyla sürecime katkıda bulunan sevgili arkadaşım Dr. Esmâ Pala Öngül'e içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmam boyunca yanımda olan, manevi desteği ve sevgisiyle bana güç veren aileme en derin teşekkürlerimi sunuyorum. Onların varlığı ve desteği, bu sürecin üstesinden gelmemde en büyük dayanağım oldu. Annem, hayata dair sabrın ve fedakârlığın en güzel örneği oldun. Babam, bana azimle çalışmanın ve dürüstlüğün önemini öğrettin. Sizin değerleriniz, bu çalışmayı tamamlamamda rehberim oldu.

Sizlere sonsuz minnet ve sevgiyle...

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLOLAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti	2
1.2. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği	12
1.3. Proje Bilgileri	14
2. İNSANSIZ HAVA ARACI	15
2.1. İnsansız Hava Araçlarının Sınıflandırılması	15
2.1.1. Kullanım Amacına Göre Sınıflandırma	16
2.1.2. Uçuş Prensibine Göre Sınıflandırma	16
2.1.3. Boyutlarına Göre Sınıflandırma	17
2.1.4. Menziline ve Havada Kalma Süresine Göre Sınıflandırma	17
2.2. İnsansız Hava Araçlarının Bileşenleri	19
2.2.1. Mekanik Bileşenler	20
2.2.2. Elektriksel Bileşenler	20
2.2.3. İletişim ve Veri Bağlantı Sistemleri	21
2.3. İnsansız Hava Araçlarında Enerji Depolama ve Üretim Sistemleri	22
2.3.1. Bataryalar	23
2.3.2. Süperkapasitörler	24
2.3.3. Güneş Hücreleri	25
2.3.4. Yakıt Hücreleri	28
2.3.5. Melez Sistemler	30
3. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA ENERJİ YÖNETİMİ	33
3.1. Kural Tabanlı Enerji Yönetimi	34
3.2. Optimizasyon Tabanlı Enerji Yönetimi	35
3.3. Öğrenme Tabanlı Enerji Yönetimi	36
4. GÜNEŞ-MELEZ ENERJİLİ İNSANSIZ HAVA ARACI	38
4.1. Materyal ve Yöntem	39
4.2. Melez Güç Sisteminin Yapısı	41
4.3. Batarya Modeli	45
4.4. Süperkapasitör Modeli	46
4.5. DC/DC Dönüştürücü Modeli	48
4.6. Güneş Hücresi Modeli	49
4.7. Talep Gücü Hesabı	52
5. GÜNEŞ-MELEZ ENERJİLİ İHA'YA UYGULANAN ENERJİ YÖNETİM ALGORİTMALARI	55
5.1. Durum Makinası Kontrol Algoritması (SMC)	56
5.2. Bulanık Mantık Stratejisi (Fuzzy Logic)	61
5.3. Eşdeğer Tüketim Minimizasyonu Stratejisi (ECMS)	66

5.4. Kuantum Parçacık Sürü Optimizasyonu (QPSO)	71
6. KARŞILAŞTIRMA SONUÇLARI	77
7.TARTIŞMA VE YORUM	88
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	107
TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR	108



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Üstel voltaj (V)
A_i	: Elektrotlar ve elektrolit arasındaki ara yüzey alanı (m ²)
B	: Üstel kapasite (Ah ⁻¹)
c	: Mol konsantrasyonu (mol/m ³)
C_D	: Sürüklenme katsayısı
$C_{D,0}$	: Sıfır taşıma sürüklenme katsayısı
C_L	: Taşıma katsayısı
d	: Moleküler yarıçap
E_0	: Sabit voltaj (V)
e^-	: Elektron (9,107.10 ⁻³¹ kg)
ε_0	: Boş alan geçirgenliği (F/m)
ε	: Malzeme geçirgenliği (F/m)
$ECMS$	: Eşdeğer tüketim minimizasyonu stratejisi
F	: Faraday sabiti (C)
$Fuzzy Logic$	: Bulanık mantık stratejisi
H_2	: Hidrojen gazı (g/mol)
H_2O	: Su (g/mol)
I_d	: Diyot akımı (A)
I_{dc}	: DC dönüştürücü sistem akımı (A)
I_{pv}	: Güneş hücresi akımı (A)
$I_{pv,MPP}$	: Maksimum güç noktası akımı (A)
I_{SC}	: Kısa devre akımı (A)
I_0	: Diyot doyma akımı (A)
i	: Batarya akımı (A)
it	: Çekilen kapasite (Ah)
i_{SC}	: Süperkapasitör akımı (A)
i^*	: Düşük frekanslı akım dinamiği (A)
$\dot{I}HA$	: İnsansız hava aracı
k	: Boltzmann sabiti (1.3806 × 10 ⁻²³ J.K ⁻¹)
K	: Polarizasyon sabiti (V/Ah)
$(L/D)_{max}$	: Maksimum taşıma/sürüklenme oranı
MPP	: Maksimum güç noktası
nl	: Diyot idealite faktörü (genellikle 1'e yakın bir sayı)
N_{cell}	: Bir modülde seri bağlanmış hücre sayısı
N_e	: Elektrot katmanlarının sayısı
N_p	: Paralel bağlanmış süperkapasitör sayısı
N_s	: Seri bağlanmış süperkapasitör sayısı
O_2	: Oksijen gazı (g/mol)
P_{alt}	: İrtifa gücü (W)
P_{batt}	: Batarya gücü (W)
P_{batt_max}	: Batarya maksimum gücü (W)
P_{batt_min}	: Batarya minimum gücü (W)
P_{load}	: Talep gücü (W)
P_{pv}	: Güneş hücresi gücü (W)
P_{pv_max}	: Güneş hücresi maksimum gücü (W)

P_{pv_min}	: Güneş hücresi minimum gücü (W)
Q	: Maksimum batarya kapasitesi (Ah)
Q_T	: Elektrik yükü (C)
q	: Elektron yükü (1.6022×10^{-19} C)
$QPSO$	: Kuantum parçacık sürü optimizasyonu
R	: İdeal gaz sabiti (J/K.mol)
R_{SC}	: Toplam direnç (ohm)
$(R/C)_{max}$	: Maksimum tırmanma oranı (m/s)
S	: Kanat alanı (m ²)
SOC	: Şarj durumu (%)
SOC_{max}	: Maksimum şarj durumu (%)
SOC_{min}	: Minimum şarj durumu (%)
SMC	: Durum makinası kontrol algoritması
T	: Çalışma sıcaklığı (K)
T_r	: İtke (N)
V	: Havalanma hızı (m/s)
V_d	: Diyot voltajı (V)
V_{dc}	: DC dönüştürücü sistem voltajı (V)
V_{dc_min}	: DC dönüştürücü sistem minimum voltajı (V)
V_{dc_max}	: DC dönüştürücü sistem maksimum voltajı (V)
$V_{pv,MPP}$	: Maksimum güç noktası voltajı (V)
V_{SC}	: Süperkapasitör voltajı (V)
V_{tf}	: Kalkış hızı (m/s)
W	: Ağırlık (N)
W_0	: Uçağın kalkış ağırlığı (N)
W_{MC}	: Seyir esnasındaki ağırlık (N)
ρ_∞	: Hava yoğunluğu (kg/m ³)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1: İHA'ların temel sınıflandırılması.	16
Şekil 2.2: Sabit kanatlı İHA ve enerji topolojisi.	19
Şekil 2.3: Sabit kanatlı İHA'nın enerji bileşenleri ve enerji yönetim yapısı.	23
Şekil 2.4: Güneş hücrelerinin eşdeğer devre modeli.	26
Şekil 2.5: Bir güneş hücresinin I-V çalışma prensibi.	27
Şekil 2.6: Yakıt hücresinin temel yapısı.	29
Şekil 2.7: Enerji kaynaklarının enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu karşılaştırması.	31
Şekil 3.1: Elektrikli araçlar için enerji yönetim stratejilerinin sınıflandırılması.	33
Şekil 4.1: Güneş-melez enerjili İHA'nın tasarımı.	40
Şekil 4.2: Güneş-melez enerjili mini VTOL İHA ve bileşenleri.	42
Şekil 4.3: Güç paylaşım algoritmasının akış diyagramı.	43
Şekil 4.4: Melez güç sistemi topolojisi.	44
Şekil 4.5: Melez güç sistemindeki bataryanın deşarj eğrisi.	46
Şekil 4.6: Melez güç sisteminde süperkapasitör şarj eğrisi.	47
Şekil 4.7: Melez güç sisteminde izole edilmemiş DC/DC yükseltici.	48
Şekil 4.8: Monokristal yarı esnek güneş hücresi.	50
Şekil 4.9: Melez güç sisteminde güneş hücresi dizisinin I-V ve P-V değişimi.	51
Şekil 4.10: Güneş hücrelerinin deney düzeneği.	51
Şekil 4.11: Güneş hücresi deney verileri.	52
Şekil 4.12: Motor-pervane deney düzeneği.	53
Şekil 4.13: Melez tahrik sistemi için güç talebi hesabı.	54
Şekil 5.1: SMC algoritması durum diyagramı.	57
Şekil 5.2: SMC algoritmasında bataryanın şarj durumu, akım ve güç değişimi.	58
Şekil 5.3: SMC algoritmasında süperkapasitörün şarj durumu, akım ve güç değişimi.	58
Şekil 5.4: SMC algoritmasında batarya-DC dönüştürücü giriş gerilimi ve DC bara gerilim, akım değişimi.	59
Şekil 5.5: SMC algoritmasında güneş hücrelerinin voltaj, akım ve güç değişimi.	60
Şekil 5.6: SMC algoritmasında kaynaklar arasındaki güç paylaşımındaki değişim.	60
Şekil 5.7: Fuzzy Logic algoritması durum diyagramı.	62
Şekil 5.8: Fuzzy Logic algoritmasında bataryanın şarj durumu, akım ve güç değişimi.	63
Şekil 5.9: Fuzzy Logic algoritmasında süperkapasitörün şarj durumu, akım ve güç değişimi.	64
Şekil 5.10: Fuzzy Logic algoritmasında batarya-DC dönüştürücü giriş gerilimi ve DC bara gerilim, akım değişimi.	64
Şekil 5.11: Fuzzy Logic algoritmasında güneş hücrelerinin voltaj, akım ve güç değişimi.	65
Şekil 5.12: Fuzzy Logic algoritmasında kaynaklar arasındaki güç paylaşımındaki değişim.	66
Şekil 5.13: ECMS algoritması durum diyagramı.	67
Şekil 5.14: ECMS algoritmasında bataryanın şarj durumu, akım ve güç değişimi.	68
Şekil 5.15: ECMS algoritmasında süperkapasitörün şarj durumu, akım ve güç	

değişimi.	69
Şekil 5.16: ECMS algoritmasında batarya-DC dönüştürücü giriş gerilimi ve DC bara gerilim, akım değişimi.	70
Şekil 5.17: ECMS algoritmasında güneş hücrelerinin voltaj, akım ve güç değişimi.	70
Şekil 5.18: ECMS algoritmasında kaynaklar arasındaki güç paylaşımındaki değişim.	71
Şekil 5.19: QPSO algoritması durum diyagramı.	72
Şekil 5.20: QPSO algoritmasında bataryanın şarj durumu, akım ve güç değişimi.	73
Şekil 5.21: QPSO algoritmasında süperkapasitörün şarj durumu, akım ve güç değişimi.	74
Şekil 5.22: QPSO algoritmasında batarya-DC dönüştürücü giriş gerilimi ve DC bara gerilim, akım değişimi.	75
Şekil 5.23: QPSO algoritmasında güneş hücrelerinin voltaj, akım ve güç değişimi.	75
Şekil 5.24: QPSO algoritmasında kaynaklar arasındaki güç paylaşımındaki değişim.	76
Şekil 6.1: Batarya SOC karşılaştırma grafiği.	77
Şekil 6.2: Batarya gücü karşılaştırma grafiği.	78
Şekil 6.3: Süperkapasitör SOC karşılaştırma grafiği.	80
Şekil 6.4: Süperkapasitör gücü karşılaştırma grafiği.	81
Şekil 6.5: DC bara voltajı karşılaştırma grafiği.	82
Şekil 6.6: Güneş hücresi-DC dönüştürücü giriş voltajı değişimi karşılaştırması.	84
Şekil 6.7: Güneş hücresi gücü karşılaştırma grafiği.	84

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1: İHA'ların menzil ve havada kalma sürelerine göre sınıflandırılması.	18
Tablo 4.1: Melez güç sistemindeki batarya özellikleri.	46
Tablo 4.2: Melez güç sistemindeki süperkapasitör özellikleri.	47
Tablo 4.3: Melez güç sistemindeki C60 güneş hücresi (1 adet) özellikleri.	50
Tablo 4.4: 920kV motor ve 11x7 pervane test sonuçları.	53
Tablo 4.5: Melez güç sisteminde güneş enerjili mini VTOL İHA için kütle tahmini.	54
Tablo 6.1: Algoritmaların batarya üzerindeki SOC etkileri.	77
Tablo 6.2: Algoritmaların maksimum batarya gücüne ulaşma süreleri.	79
Tablo 6.3: Algoritmaların süperkapasitör üzerindeki SOC etkileri.	79
Tablo 6.4: Algoritmaların maksimum süperkapasitör gücüne ulaşma süreleri.	81
Tablo 6.5: Algoritmaların bara voltajına ulaşma süreleri.	83
Tablo 6.6: Algoritmaların güneş hücresinin maksimum güce ulaşma süresi.	83
Tablo 6.7: Literatürdeki güneş hücreli İHA'ların karşılaştırılması.	86

1. GİRİŞ

Günümüzde artan enerji krizleri, iklim değişikliği ve fosil yakıt kaynaklarının tükenmesi, yenilenebilir enerji kullanımını zorunlu kılan önemli unsurlardan biri haline gelmiştir. Bununla birlikte, çevre kirliliği ve karbon emisyonlarının azaltılması amacıyla sürdürülebilir enerji kaynaklarının araştırılması, başta ulaşım, sanayi ve tarım olmak üzere pek çok alanda yoğun ilgi görmektedir. Bu gelişmelerden insansız hava araçları (İHA) etkilenmiş ve yenilenebilir enerji kaynaklarının İHA'lara entegrasyonu, uçuş dayanıklılığını artırmak ve çevresel etkileri en aza indirmek amacıyla önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir [1-5].

İHA'lar, izleme, arama-kurtarma, tarım, haberleşme ve teslimat gibi çeşitli sivil ve askeri görevlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. İHA'ların enerji gereksinimlerini karşılayan elektrikli tahrik sistemleri genellikle bataryalarla çalışmakta, ancak bataryaların sınırlı enerji yoğunluğu İHA'ların uçuş sürelerini kısıtlamakta ve istenen menzile ulaşmasını engellemektedir [6,7]. Bu kısıtlamaların aşılması amacıyla melez (hibrit) güç sistemleri geliştirilmekte olup, bu sistemlerde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı büyük bir potansiyel taşımaktadır [8,9].

Melez güç sistemleri, yakıt hücreleri (fuel cell, FC), bataryalar (battery, B), süperkapasitörler (supercapacitor, SC) ve güneş (photovoltaic, PV) hücreleri gibi çeşitli bileşenlerin bir arada kullanılmasıyla oluşturulabilir. Özellikle PV hücreler, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çevirerek İHA'ların sürdürülebilir enerji ihtiyacını karşılayabilecek önemli bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır [10]. Bu sayede İHA'lar, gündüzleri güneş enerjisini PV hücrelerle toplarken, geceleri batarya ile uçuşlarına devam edebilir. Güneş enerjili İHA'lar, sürdürülebilirlik ve çevre dostu enerji arayışları çerçevesinde neredeyse sınırsız uçuş süreleri sunma potansiyeline sahiptir [9-14].

Enerji yönetim sistemleri de bu süreçte önemli bir rol oynamakta olup, kaynaklar arasındaki güç dengesini optimize ederek hem enerji verimliliğini hem de tahrik sistemlerinin ömrünü uzatmaya yönelik stratejiler geliştirilmesini sağlar [15].

Bu tezde, İHA'ların enerji ihtiyaçlarını karşılamak için geliştirilen melez güç sistemleri ve enerji yönetim stratejileri ele alınacaktır. Aynı zamanda, farklı güç

kaynaklarının avantaj ve dezavantajları analiz edilerek, enerji verimliliği ve çevresel etkilerin en aza indirgenmesi açısından en uygun sistemler incelenecektir.

1.1. Literatür Özeti

Literatürde, İHA'ların sınıflandırılması ve tasarım zorlukları, tahrik sistemleri, otonom kontrol sistemleri, enerji kaynakları ve enerji yönetim sistemleri, yakıt depolama teknolojileri, sabit kanatlı İHA'ların yol planlama algoritmalarının geliştirilmesi gibi İHA'ların farklı yönlerini ele alan birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların enerji bakımından önemli bir hedefi, son yıllarda gelişen teknolojilerle birlikte İHA'ların havada kalma süresini artırmaya yöneliktir.

Gao vd. [8], 35 kg kütle ve 22,5 m kanat açıklığına sahip yüksek irtifa uzun dayanıklılık (HALE) tipi bir İHA için lityum-kükürt batarya ve güneş hücresinden oluşan bir sistem için kural tabanlı bir enerji yönetim algoritması geliştirdi. Bu enerji yönetim sisteminde, güneş hücresi tarafından gün boyunca üretilen enerji potansiyel enerji olarak depolanır ve daha sonra bu depolanan enerji gece kullanılır. Böylece, bir günlük döngü boyunca bataryada %23,5 enerji tasarrufu sağlandı. Ancak, enerji yönetimi yalnızca bataryaya uygulandı ve çalışma büyük bir İHA üzerinde gerçekleştirildi.

Liu vd. [16], dinamik tırmanma ve güneş teknolojisini birlikte kullanarak enerji tüketimini %32,3 oranında ve gereken batarya kütlesini %6,7 oranında azalttı. Uçuş hızı ve uçuş tutum açıları, optimum toplam enerji kazanımı üzerinde önemli etkilere sahipti.

Morton ve Papanikolopoulos [17], çalışmalarında literatürde ilk kez 2 m kanat açıklığına sahip güneş enerjili bir İHA'nın performansını araştırdılar. Bu çalışmada, sadece güneş hücrelerine sahip bir mini İHA'nın güneş enerjisiyle 10 saatten fazla uçuşunu hesapladılar.

Morton vd. [18], gövde verimliliğini optimize etmek için güneş enerjili bir İHA tasarım yöntemi önerdiler. Geliştirilen prototip üzerinde yapılan deneysel testler, alınan güneş enerjisi miktarının, güneş sisteminin ek yükünü taşıyarak İHA'nın havada kalma süresini artırmak için yeterli olduğunu gösterdi.

Harvey vd. [19], güneş hücrelerinin kullanılmasının %59'a kadar yakıt tasarrufu sağlayabileceğini ve İHA kütlesini azaltabileceğini kanıtladı. Bu nedenle, güneş enerjisinden yararlanmak, İHA'ların dayanıklılığını artırmaya önemli bir katkıda bulunur.

Yang vd. [20], talep gücüne ve bataryanın şarj durumuna göre bir yakıt hücresi ve batarya sisteminden oluşan bir İHA için beş aşamalı bir durum makinesi stratejisi önermiştir.

Savvaris vd. [21], bir batarya ve yakıt hücresi melez sistemini kontrol etmek için kural tabanlı bir enerji yönetimi stratejisi önermiştir. İlk aşamada, iki kaynak İHA'ya güç vermekte, ikinci aşamada batarya şarj edilir ve üçüncü aşamada önceki aşamalardan gelen güç durumu izlenmektedir. Simülasyonlara ek olarak deneyler de yapılmıştır.

Zhang vd. [22], 2,87 m kanat açıklığına ve 13,5 kg kütleye sahip İHA'nın, durum makinesi stratejisi ve bulanık mantık stratejilerinin bir kombinasyonu olan bulanık durum makinesi (FSM) adı verilen güneş hücresi, yakıt hücresi ve bataryadan oluşan bir melez sisteme sahip yeni bir yöntem uyguladılar. Çalışmada, İHA için MATLAB/Simulink programında bir simülasyon modeli oluşturuldu. Çalışmada, yakıt hücresi ana enerji kaynağı olarak, güneş hücresi ve batarya ise yardımcı kaynaklar olarak kullanıldı. Simülasyon sonuçlarına göre, FSM stratejisinin kısıtlı termostat kontrolü (CTC) stratejisine kıyasla hidrojen tüketiminde %26,7 tasarruf sağladığı görüldü.

Lee vd. [23,24], kanat açıklığı 6,4 m ve kütlesi 18 kg olan bir İHA'nın güneş hücresi, yakıt hücresi ve bataryadan oluşan bir melez sistemi MATLAB/Simulink programında modellemiştir. Bu sistemde, kural tabanlı hem aktif hem de pasif enerji yönetim teknikleri uygulanmıştır. Pasif enerji yönetiminde, herhangi bir DC/DC dönüştürücü kullanılmadan her bir kaynak doğrudan DC barasına bağlanır. Aktif enerji yönetim stratejisi olarak kural tabanlı termostat kontrol stratejisi uygulanmıştır. Aktif enerji yönetimi ile batarya şarj seviyesinin %45'te kaldığı, pasif enerji yöntemi ile azaldığı görülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda aktif enerji yönetim sisteminde güç dağıtımının daha verimli olduğu kanıtlanmıştır. Bu çalışma, küçük insansız hava araçlarında aktif enerji yönetim sistemini uygulayan ilk çalışmadır.

Fredericks vd. [25], dikey kalkış ve iniş (vertical take-off and landing, VTOL) İHA'larının manevralarında otonom olarak seyreden uçuş durumları için kontrol

yöntemlerinin geliştirilmesi üzerine dikkate değer bir ilerleme kaydetmiştir. Elektrikli tahrik sisteminin bir VTOL İHA'ya uygulanmasının, geleneksel helikopter konfigürasyonlarının son teknolojisinin yaklaşık dört katı olan aerodinamik verimlilikte bir iyileştirme sağladığını tespit etmişlerdir. Ancak buradaki rotorlu İHA tasarımının, yüksek havada kalma süresine sahip İHA'ların gerçekleştiremeyeceği birçok görev manevrasını gerçekleştirebilse de uçuş süresinin kısa olması ve maliyetli olması sebebiyle verimli olmadığı görülmüştür.

Jenson vd. [26-29], güneş enerjisi ile çalışan SUAV-Q olarak adlandırılan dört rotorlu ve sabit kanatlı konfigürasyonlar arasında dönüşüm yapabilen bir İHA dizayn etmişlerdir. Bu enerji hiyerarşisi, sistemin sabit kanat durumunda büyük mesafeleri kat etmesine ve dört rotorlu durumda havada asılı kalmasına (hover) izin verir. Daha sonra tasarımda, değişken hatveli pervanelerin ve modüler yük kapasitesi tasarımının eklenmesi gibi iyileştirmeler yapılmıştır.

Gang ve Kwon [30], PV-batarya sistemi ile yakıt hücresi arasında değişen enerji kaynağına dayalı bir kural tabanlı enerji yönetim sistemi (EMS) modeli önerdiler. Önerilen modelde yakıt hücresi sistemini etkinleştirdiğinde, PV-batarya sistemi enerjiyi depolar, üretilen bu enerji bataryayı şarj etmek için kullanılır ve böylece şarj olan batarya uçuş süresini artırabilmektedir. Çalışmanın sonuçlarına göre her kanatta 80 W enerjiye sahip güneş hücresi sistemi, bir MPPT (maximum power point tracing, maksimum güç noktası izleme) ve bir bataryadan oluşuyordu ve yük talebini karşılayabiliyordu. Ancak kanattaki güneş hücrelerinde toplanan güneş ışıınımı, İHA'nın manevrasının oluşturduğu ve kanat yapılarının sallanmasına neden olan titreşim nedeniyle önemli ölçüde dalgalandı. Bu nedenle, daha büyük kanatlar çok sayıda güneş hücresini barındıracak şekilde tasarlanmadıkça, güneş hücreleri yük değişimlerini karşılamak için güç sağlayamaz. Bu nedenle, bataryanın ürettiği gibi destekleyici enerji, sürekli enerji sağlamak ve kanat boyutlarını küçültmek için gereklidir.

Klesh ve Kabamba [31], tek enerji kaynağının güneş enerjisi olduğu İHA'nın enerji yoğunluğunu en üst düzeye çıkarmaya odaklandılar. Bunun için birinci ve ikinci mertebeden optimallik koşullarını kullanarak, güneş enerjisiyle çalışan İHA'ların menzilin verimli tasarım ve optimum yol planlamasıyla artırılabilceğini hesapladılar.

Peng vd. [32], yüksek irtifalara çıkabilen ve uzun süre havada kalabilen uzun menzile sahip İHA'lar geliştirmek amacıyla alınan güneş enerjisi miktarını maksimuma çıkarmayı hedeflemiştir. Çalışmaya göre, güneş enerjisiyle çalışan bu İHA'ların büyük kanatları olmalıdır. Bunun için, değişen güneş ışınımları altında PV sistemleri için yüksek verimlilik elde etmek amacıyla bir maksimum güç noktası izleme algoritması gereklidir.

Karabestky [33], güneş enerjisiyle şarj edilebilen uçaklar için enerji sisteminin yapısını tanımlayarak, MPPT alt sisteminin analizine odaklanmaktadır. Güneş enerjisiyle çalışan İHA uçuşu sırasında, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürür, ardından MPPT, güneş hücrelerinin maksimum çıkış gücünü kontrol eder ve ana güç kaynağı devresine taşır, güç kontrol cihazı da gücü motor-pervane sistemine gönderir. MPPT donanım sistemi ise, düşük maliyetli bir mikro denetleyici, akım ve voltaj sensörleriyle ilişkili basit bir dönüştürücü içerir. Güneş enerjisiyle çalışan İHA'larda MPPT kullanımının güneş hücrelerinin verimini artırdığını vurgular.

Liu [34], güneş enerjisiyle çalışan İHA'ların kanat açıklığını azaltmak ve taşıma kapasitesini artırmak ve seyir sırasında enerji tüketimini azaltmak için dağıtılmış bir tahrik sistemi tasarımını optimize etmiştir ve deneysel olarak test etmiştir. Çalışmasında 2,1 m kanat açıklığına sahip bir İHA'nın kanatlarının hem üst yüzeyinde hem de alt yüzeyinde güneş hücreleri kullanmıştır. Çalışmanın sonuçları, dağıtılmış tahrik sistemlerinin uygulanmasının, uçuş süresini kısaltmadan güneş enerjili İHA'ların boyutunu küçültmeyi mümkün kıldığını doğrular. Dağıtılmış bir tahrik sistemi, tek motorlu bir sisteme kıyasla aynı güç tüketimi için daha fazla taşıma kuvveti kazanır ve bu da İHA'nın batarya kütlesini azaltmasına olanak tanır ve şarj süresi kısaltır. Dağıtılmış bir tahrik sisteminin enerji tüketimi, aynı miktarda taşıma için monolitik bir tahrik sistemine kıyasla %154,3'e kadar azaltılabilir. Çok rotorlu İHA'lar ve sabit kanatlı İHA'lar bazen saha görevlerinin karmaşık gereksinimlerini karşılayamamaktadır. Bu nedenle araştırmacı dağıtılmış tahrik sistemi uygulamasının dikey kalkış ve iniş yapabilen hem sabit kanatlı hem de rotorlu melez uçaklarda daha verimli sonuçlar elde edileceğini öngörmektedir.

Lee ve Yu [35], çalışmalarında, güneş enerjisiyle çalışan bir İHA'nın uçuş rotasını yerçekimi potansiyeli kullanarak optimize etmişlerdir. 48 saatlik simülasyon sonuçları, optimal yol planlamasının İHA'nın uçuş süresini artırmada etkili olduğunu göstermektedir. Gece uçuşlarında yerçekimi potansiyel enerjisinin kullanılması, güneş

ışınımına olan bağımlılığı azaltabilir ve İHA'nın kütlesinin azalmasına ve uçuş süresinin uzamasına katkıda bulunur. Bu durumda gündüz fazla enerji kullanılarak elde edilen yerçekimi potansiyel enerjisi, gece uçuşu için enerji depolama elemanı olarak kullanılır. Simülasyonda optimal uçuş yolu ile düz uçuş yolunu karşılaştırılmıştır. Sonuçlar gündüz 1,2 MJ enerjiyi yerçekimi potansiyeline dönüştürmek ile gün batımından sonra batarya enerjisini 0,23 MJ azaltmakla aynı olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, optimize edilmiş batarya için kalan seviye, düz uçuşa göre %27 artar. Bu nedenle, gece uçuş süresi artar ve optimal uçuş rotası ile Mart-Ekim ayları arasında daha uzun sürekli uçuş mümkün iken sadece düz uçuş durumunda Nisan-Ağustos ayları arasında kesintisiz uçuş yapılabilir.

Gao vd. [36], makalelerinde yüksek irtifa güneş enerjisiyle çalışan uçaklar için batarya kütlesi ve uçuş yörüngesinin ortak optimizasyon problemini ele almaktadır. Uçak dinamik modeli, aerodinamik parametreler ve itme modelini içeren sistem modeli sunulmuştur. Daha sonra optimize edilecek problem formüle edilmiş ve parçacık sürü optimizasyonu ve Gauss pseudo-spektral yöntemini kullanan yeni bir optimizasyon yöntemi önerilmiştir. Gauss pseudo-spektral yöntemi, verilen yüksek irtifa güneş enerjili uçak konfigürasyonunda uçuş yörüngesini takip ederek tüketilen minimum gücü üretmek için kullanılırken, parçacık sürüsü optimizasyonu, uçağın optimal batarya kütlesini hesaplamak için kullanılır. Simülasyon sonucu, önerilen ortak optimizasyon yönteminin, yüksek irtifa güneş enerjisiyle çalışan uçakların batarya kütlesini 16 kg'dan 13,6 kg'a düşürebileceğini ve bu sonucun, enerji yoğunluğunu %19,7 oranında artırmaya eşdeğer olduğunu göstermektedir.

Moelyadi ve Zulkarnain [37], Endonezya Cumhuriyeti topraklarını gözetlemek ve kontrol etmek için kullanılabilecek yüksek irtifa uzun dayanımlı (HALE) İHA geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışma üç ayrı durum için yapılmıştır: Durum 1; 20.000 ft irtifa ve 21 saat uçuş süresi, Durum 2; 20.000 ft irtifa ve 24 saatten fazla uçuş süresi ve Durum 3; 50.000 ft irtifa ve 24 saatten fazla uçuş süresi. Durum 1 için görev profili; 9 saat boyunca 20.000 ft'e tırmanır ve seyir yapar, ardından 5.000 ft'e süzülür ve 6 saat boyunca seyir yapar. Tırmanış, saat 7'de başlamıştır. Böylece güneş enerjisinden daha fazla yararlanılarak batarya kütlesi azaltılmıştır. Durum 2'nin görev profili; gündüz İHA 20.000 ft'te seyir yapar ve geceleri 5.000 ft'e iner. 1. Gün batarya gereksinimi, düşük irtifada gece uçuşu ile belirlendiğinden İHA, Durum 1'e göre 1 saat daha erken (saat 6'da veya daha erken) tırmanış yapabilir. 2. Gün İHA saat 9'da

5.000 ft'ten 20.000 ft'e tırmanmaya başlar. Durum 3'ün görev profili; batarya gereksinimini azaltmak için tırmanış 1. Gün için saat 6.30 ve 2. Gün için saat 9'da başlar. Uçak gündüz 50.000 ft'te seyrederek ve geceleri 25.000 ft'e iner. İHA'nın yüksek irtifa seyrinin toplam süresi, gündüz-gece farkı ve yüksek irtifalardaki büyük farklar nedeniyle Durum 2'ye kıyasla daha düşüktür.

Zhang vd. [38], güneş enerjili İHA'nın güç sisteminde 24 saatlik enerji döngüsü kayıplara yol açabileceğinden belirleyici bir faktör olduğunu düşünerek enerji yönetimi ve optimizasyonu için bir temel sağlamayı amaçlamaktadırlar. Doğrudan güneş ışını radyasyonu, güneş geliş açısı ve rüzgâr alanı gibi faktörlerin güç dengesi ve enerji döngüsü üzerindeki etkileri hâlâ belirsizdir. Bu araştırma ile güç sistemine dayalı güç dengesinin matematiksel modeli kurulmuş ve farklı eğim açılarındaki PV hücreleri deneysel olarak analiz edilmiştir. Deney sonuçlarına göre doğrudan güneş ışını radyasyonu ve güneş geliş açısı, güç dengesi için iki önemli faktördür.

He vd. [39], güneş enerjisiyle çalışan küçük bir İHA için yeni bir enerji yönetim sistemi (EMS) kontrol stratejisi önermiştir. DC bara voltajının değerine göre, EMS, PV modüllerinin MPPT modunda veya güç limit modunda çalışmasını sağlar ve depolama sisteminin sistem enerji güç akışını esnek bir şekilde koordine etmesini destekler. İHA, EMS'yi uygulayarak atmosferik koşulların olası hızlı değişimleri altında istikrarlı bir şekilde çalışabilir. Hem simülasyon hem de deneysel sonuçlar, önerilen EMS'nin etkinliğini ve uygulanabilirliğini doğrulamaktadır.

Feng vd. [40], esnek CIGS (bakır, indiyum, galliyum ve selenyum) ince film güneş hücrelerinin düşük fiyat, ışınım absorpsiyonu, yüksek özgül enerjisi, İHA'nın kanat profili yüzeyine daha iyi uyarlanabilirliği gibi nedenlerle güneş enerjili küçük İHA'lar için en iyi seçim olduğunu söylemektedirler. Bu çalışma, CIGS güneş enerjili küçük İHA'ların enerji ve güç sisteminin temel özelliklerini ve tasarımı analiz etmektedir.

Zhao vd. [41], makalelerinde, 3,2 m kanat açıklığı ve 2,9 kg kütleyle sahip elle fırlatılan güneş enerjili bir İHA'nın kavramsal tasarım yöntemi, ayrıntılı tasarım, dinamik modelleme, kontrol şeması tasarımı, sayısal simülasyon ve döngü simülasyon deneyindeki donanımdan saha deneylerine kadar eksiksiz bir araştırma önerdiler. Sonuçlar, güneş enerjili İHA'nın farklı yüklere sahip seyir gücü verileri yaz aylarında 4600 m yüksek irtifalarda gece-gündüz sürekli uçuşmasının mümkün olduğunu göstermektedir.

Thipyopas vd. [42], 4 m kanat açıklığına sahip, 5 kg kütlesinde, 48 adet güneş hücresine sahip, 1000 metre yüksekliğe kadar tırmanabilen ve 6 saat uçuş yapabilen bir güneş enerjili İHA tasarlamışlardır. Çalışma sonuçlarına göre güneş hücrelerinin %22,6 verimlilik oranı ile 09:00-15:00 saatleri arasında minimum ışık absorpsiyonunda 96,96 W elektrik çıkışı üretmesi beklenmektedir. Ayrıca 1 kg alternatif batarya enerjisinin, kalkış, tırmanma ve acil iniş durumlarında 1 saatlik uçuşun enerjisini sağlaması beklenmektedir.

Gadalla vd. [43], 3,83 m kanat açıklığı ve 2,5 kg yapı kütlesine sahip bir İHA tasarlayarak, küçük İHA'lar için hidrojen yakıt hücresi, PV hücreler ve bataryadan oluşan melez enerji kaynaklarının optimizasyonu ile tahrik sisteminin verimliliği araştırmıştır. Bu çalışma, aynı uçuş performansını elde etmek için gerekli olacak daha büyük ve maliyetli yakıt hücreli insanlı hava aracının güç sistemini araştırmak üzerine alternatif bir çalışma olarak yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarına göre, hidrojen yakıt hücresi ve PV hücreli melez güç sisteminin kullanılmasıyla İHA'nın uçuş süresi 470 dakikadan 970 dakikaya çıkarıldı. Çalışma ayrıca motor ve pervaneler gibi İHA tahrik sistemi bileşenlerinin modellenmesini içerdiği için önemlidir.

Khoshnoud vd. [44], gövde boyutları sırasıyla 3×2×1 m, 2,5 m çapında ve 2,2 m uzunluğunda, 1,8 m genişliğinde ve 1,1 m yüksekliğinde quadrotor, octorotor ve trirotor modelleri sunulan güneş enerjisi ve taşıma kuvvetinin birlikte kullanımı ile kesintisiz havada kalma süresine sahip güneş enerjili İHA çalışması yapmışlardır. Bu İHA'lar, uçuş kontrol sistemleri ve ivme ölçerler, jiroskoplar, küresel konumlandırma sistemleri, manyetometreler, barometreler gibi sensörler ile donatılmıştır. Bu İHA'ları havada tutmak için itme kuvveti olmadan veya azaltılmış itme kuvveti ile taşıma kuvvetinden yararlanır. Güneş enerjisi sisteminde ise quadrotor İHA'larda monokristal PV hücreler, octorotor İHA'larda organik PV hücreler ve trirotor İHA'larda amorf silikon PV hücreler enerji sağlar. PV hücreler, yüksek güç yoğunluğu kaynağı olarak bataryaları şarj eder ve trirotor İHA ayrıca bir yakıt hücresi sistemi ile donatılmıştır. Çalışma sonucunda, quadrotor, octorotor ve trirotor konfigürasyonlarının, balonların boyutları ve geometrileri nedeniyle kontrol ve stabilite yönleri, aerodinamik, çeviklik, performans ve enerji tüketimi açısından farklı dinamik davranışlar sergiledikleri ve bu tür İHA'lar için güç talebinin, 100 W ile KW mertebeleri aralığında olduğu saptanmıştır.

Nguyen vd. [45], İHA'ların uçuş süresini artırmak amacıyla güneş ve radyo frekansı (RF) enerji kaynaklarından aynı anda güç toplayabilen melez bir sistem önermektedirler. Güneş enerjisi, güneş panelleri tarafından toplanır ve daha sonra elektrik enerjisine dönüştürülür. Çevreden elde edilen RF enerjisi, ışık olmadığında yani güneş panellerinden hiçbir güç çekilemediğinde gündüz ve gece uçuşuna enerji sağlamak için alternatif bir güç kaynağı olarak kullanılır. İHA'ları çalıştırmak için şarj edilebilir bataryalar her iki kaynaktan da güç alır. İHA'ların aniden gücü kesmesini önlemek için, melez sistemin çıkış gücü, batarya aracılığıyla İHA'lar için kullanılır. Bu sistemler tek başına ve melez olarak simülasyonlar ile analiz edilmiştir. Sonuç olarak ölçülen akım ve voltaj değerleri beklenildiği şekilde bulunmuş ve melez sistemin, pratikte İHA'lar için enerji sorunlarını iyileştirme olasılığının daha yüksek olduğu görüşüne varılmıştır.

Shah vd. [46], çalışmalarında MPPT güneş şarj kontrolcüsü ve darbe genişlik modülasyonu (PWM) güneş şarj kontrolcüsünü karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar, zayıf kablo bağlantılarının ve güneş hücrelerindeki küçük hasarların, güç kaybına neden olduğunu ve güneş panellerinin güç çıkışını azalttığını bulmuşlardır. Bunların yanı sıra, güneş enerjisi şarj sisteminin tipi de güç çıkışının verimliliğini etkilemektedir. Bu nedenle, PV hücrelerinde maksimum güç çıkışını izlemek ve bataryayı şarj etmek için bir güneş şarj kontrolcüsü kullanılmıştır. Hem MPPT hem de PWM güneş şarj kontrolcülerinin değişen güneş yoğunluğu ile sabit çıkış voltajını koruyabildiği sonucuna varmaktadırlar. Ancak şarj kontrolcüsü olarak PWM ve MPPT kullanıldığında güneş ışıınımına karşı verimlilik grafiklerinden elde edilen sonuçlara göre, MPPT şarj kontrol cihazı, PWM şarj kontrol cihazına kıyasla %1 daha yüksek verimliliğe sahiptir. Bunun nedeni, MPPT'nin güneş ışıınımı koşullarına göre şarjı otomatik olarak değiştirme yeteneğine sahip olması ve güneş ışıınımı koşullarından bağımsız olarak güneş hücresinden maksimum gücü alabilmesidir.

Türk vd. [47], Hydra İHA adlı çalışmalarında, güneş ışıınım miktarını hesaplamak için kullanılan ışıınım modeli ile karasal iklime sahip Eskişehir bölgesinin aylık ortalama ışıınım seviyesini kullanarak güneş enerjisi üretme verimliliğini araştırmışlardır. Sonuçlar İHA'nın, 1,084 m² kanat alanı içerisinde üretilmesi gereken 472,29 Wh elektrik enerjisi ile Eskişehir'de dört ile onuncu aylar arasında altı saatlik uçuş gerçekleştirebildiğini ve enerjinin, Nisan ayının başından Eylül ayının ortasına kadar gerekli miktarı aştığını hesaplamışlardır. Ayrıca çalışmaya göre yaz aylarında uçuş

süresinin artırılabilceği değerlendirilmiştir. Güneş ışıının yıl içindeki değışimi, sistemden üretilebilecek toplam enerjiyi etkiler. Işınım; konuma, zamana, yönlendirmeye, hava koşullarına ve zemin yüzeyinin yansıtma kalitesine bağlıdır.

Bakar vd. [48], irtifa, seyir hızı gibi terimler için kullanıcı tanımlı statik tolerans değerleri girilebilen Matlab ortamında genetik algoritma kullanarak İHA'lar için kanat profili optimize etmişlerdir. Amaç, genel performans ve kütle tahminini göz önünde bulundurarak, belirli uçuş koşulları için bir kanat profili tasarlamaktır. Optimize edilmiş bu kanat profili, veterin %25'inde %9,7 kalınlığa ve %43,5'inde %4,6 maksimum kamburluğa sahiptir. Kanat profili büyük ölçüde pürüzsüz ve fırar kenarlarının kalitesi oldukça iyidir. 21 Haziran ve 1 Mayıs için enerji simülasyonları gerçekleştirilmiştir. 21 Haziran'da güneş enerjili İHA tamamen boş bir batarya ile (şarj durumu, SOC = 0) saat 07:00'de tırmanışa başlar. Kullanılabilir güneş enerjisi, gerekli güçten daha yüksektir. Batarya 6 saat içinde tamamen şarj olur (SOC = 1). Mevcut güneş enerjisi, bir irtifa elde etmek veya hızı artırmak için kullanılabilir. Yaklaşık saat 19:00'da mevcut güneş enerjisi gerekenden daha azdır ve batarya enerji sağlamaya başlar. Saat 20:00'de güneş enerjisi kullanılamaz hale gelir ve İHA tamamen batarya ile çalışır. Ertesi sabah, güneş enerjisi gerekenden daha yüksek olduğunda, batarya 335 Wh'lık bir kalan kapasite gösterir. Bu, 0,41'lik bir SOC'na karşılık gelir. 1 Mayıs'ta daha düşük güneş ışıını nedeniyle bataryanın tam olarak şarj olması daha uzun sürer. Gecelerin uzaması nedeniyle tam gece uçuşu gerçekleştirmek için daha fazla batarya enerjisi tüketilir. Ertesi sabah, mevcut güneş enerjisi gerekli güce eşit olduğunda, batarya minimum 0,37 SOC gösterir. Buna göre İHA'nın sürekli uçuş operasyonlarını gerçekleştirme potansiyeline sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Rajendran ve Smith [49], mini güneş enerjili İHA'nın aerodinamik performansını tahmin etmek için matematiksel model geliştirmişler ve deneysel analizini yapmışlardır. Simülasyon sonucunun aksine, güneş enerjili İHA, güneş enerjisi olmayan İHA'dan neredeyse iki kat daha fazla sıfır-taşıma sürüklenme katsayısına sahiptir. Bu fark, güneş paneli ile İHA'nın kanadının bağlantısında esas olarak lehim çıkıntıları sebebiyle yüzeyin pürüzlü olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak bu sürüklenme, otomatik lehimleme makinesi kullanılarak önemli ölçüde azaltılabilir.

Chu vd. [50], 2 m kanat açıklığına sahip bir 759-2 Phoenix 2000 RC İHA'yı, güneş enerjisi ve bataryadan oluşan bir melez sisteme modifiye etmişlerdir. Amaç, elle

fırlatılan, sabit kanatlı, mini, güneş enerjisiyle çalışan bir İHA'nın geliştirilmesi ve güneş hücrelerinden üretilen güçle İHA'nın uçuş süresini büyük ölçüde artırmaktır. Modifiye edilmiş ve edilmemiş İHA'nın güç sistemi performansını karşılaştırmak için uçuş testleri yapılır. Uçuş kontrol sistemi, uçuş testleri yapmak ve güç sistemi performansını doğrulamak için otonom olarak yapılandırılmıştır. Deney sonuçlarına göre İHA'nın güneş enerjisi sisteminin kullanımında %22,5 tasarruf sağlanmıştır. Böylece, güneş enerjisinin İHA'lara entegrasyonunun uçuş süresini uzatabildiği sonucuna varılmıştır. Bunun yanı sıra, İHA'nın sabit irtifada uçuşu sırasında, güneş enerjisi sistemi kullanıldığında akü voltajının azalma hızının çok daha yavaş olduğu bulunmuştur.

Cosson vd. [51], ince film galyum arsenit fotovoltaik hücreler ile kaplanmış dört kanatlı otonom bir İHA için fotovoltaik enerjinin üretimini ve lityum-iyon (li-ion) bataryalarda depolanmasını ölçen bir simülatör geliştirmiştir. Bu simülatör, İHA uçarken güneş hücreleri tarafından üretilen etkin gücün ve bataryaların voltajının tahmin edilmesini sağlar. PV hücreler olmadan da bir simülasyon yapıldı ve kesme voltajına sadece 4 saat sonra ulaşıldığını görüldü. Böylece, PV elektrik üretimi sayesinde uçuş süresinin üç katına çıktığı tespit edildi. Bu çalışma, iklimsel ve coğrafi koşulların İHA üzerindeki etkilerini göstermektedir. Simülasyon sonuçlarına göre optimum hava ve coğrafi koşullar altında bu İHA 12 saat uçabilmektedir.

Khan vd. [52], güneş hücresi, lityum-polimer (li-po) batarya ve süperkapasitörden oluşan öğrenme tabanlı enerji yönetimi uygulanmış bir melez elektrikli tahrik sistemi (HEPS) kullanarak bir İHA'nın uçuş süresini artırmayı amaçlamaktadır. SC ile İHA'nın hızlı şarj olmasının sağlanması; güneş enerjisi, SC ve li-po tabanlı HEPS kullanarak uçuş süresinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Farklı çalışma koşulları altında bir Phantom II DJI için simülasyonlar (MATLAB/Simulink) ve deneysel analizler yapıldı. Önerilen çalışmada, havada kalma süresinde sırasıyla %50, %75 ve %100 gaz keleşbeği için 572 s, 426 s, 295,5 s kadar bir artış gösterdi.

Meng vd. [53], bir melez hava aracına (HAV) güç sağlamak için güneş hücrelerini, yakıt hücrelerini ve lityum bataryaları birleştiren bir melez enerji sistemi önermişlerdir. Çeşitli enerji alt sistemlerini daha iyi yönetmek ve optimum uçuş performansı elde etmek için, HAV'ın melez enerji sistemi için tipik bir kural tabanlı EMS olan bir güç izleme yönetim stratejisi oluşturulur. EMS, kalkış ve iniş sırasında

manevra kabiliyetini sağlarken HAV'ın dayanıklılığını artırmak için lityum bataryaların yüksek özgül gücünü ve yakıt hücrelerinin yüksek özgül enerjisini dikkate alır. Çok loblu HAV, daha yüksek taşıma-sürüklenme oranı elde etmek için birkaç lobu karıştırarak geleneksel statik yüzdürme hava gemilerinin uzun süreli dayanıklılığını sabit kanatlı uçakların manevra kabiliyeti ile birleştirebilir. Güneş enerjisi, stratosferdeki ideal ışık durumu nedeniyle bir HAV için en iyi yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilir. Ayrıca, gündüz ve gece boyunca uzun süreli uçuş sağlamak için uygun enerji depolama yöntemlerinin bulunması, kalkış ve iniş sırasında manevra kabiliyeti gereksinimlerinin dikkate alınması büyük önem taşımaktadır.

1.2. Tezin Amacı, Katkısı ve İçeriği

Fosil yakıtların tükenmesi ve sera gazı emisyonlarının artışı, çevreye daha az zarar veren, sürdürülebilir ve verimli enerji sistemlerine duyulan ihtiyaç artırmıştır. Bu bağlamda, son yıllarda İHA'lar da melez enerji sistemlerinin kullanımı üzerine yapılan araştırmalar hız kazanmıştır. Literatürde, güneş hücreleri ve lityum türevleri bataryalar gibi melez enerji kaynaklarıyla çalışan güneş enerjili İHA'lara yönelik çalışmalar mevcuttur. Ancak bu çalışmalar genellikle büyük İHA'lar üzerinde yoğunlaşmakta ve güneş enerjisinden maksimum verimi elde etmeye odaklanmaktadır. Mini İHA'lar ise, enerji kapasiteleri ve kütle kısıtlamaları gibi zorluklar nedeniyle daha az araştırma konusu olmuştur. Oysa güneş enerjili mini İHA'lar, askeri ve sivil alanlarda geniş kullanım potansiyeline sahiptir.

Bu çalışma, güneş enerjili mini İHA'lara enerji yönetimi uygulayarak onun sahip olduğu enerjiyi en verimle şekilde kullanmasını sağlayarak havada kalma sürelerini uzatmayı hedeflemektedir. Bu amaç doğrultusunda, güneş hücreleri ve bataryalardan oluşan bir melez enerji sistemine sahip sabit kanatlı bir mini İHA tasarlanarak, literatürdeki bu boşluğun doldurulması amaçlanmaktadır. Şu ana kadar yapılan çalışmalar, genellikle batarya teknolojilerindeki gelişmelerin uzun vadeli hedeflere odaklanması nedeniyle sınırlı kalmış ve güneş enerjili mini İHA'ların sahip olduğu geniş uygulama alanları göz önünde bulundurulduğunda önemli bir araştırma açığı oluşturmıştır.

Bu çalışmanın amacı, seyir aşamasında maksimum düzeyde güneş enerjisi kullanabilen sabit kanatlı bir mini İHA geliştirmektir. Geliştirilen İHA'nın uçuş süresi,

menzil ve genel performansı iyileştirilerek, yenilenebilir enerji teknolojilerinin İHA'lara uygulanması açısından önemli bir katkı sağlanması hedeflenmektedir. Çalışmanın sonuçlarının akademik yayınlar ve sektörel uygulamalar için değerli katkılar sunması beklenmektedir. Bu bağlamda, çalışma sadece akademik çevreler için değil, aynı zamanda havacılık ve yenilenebilir enerji sektörlerinde de ilgi görebilecek potansiyele sahiptir.

Bu çalışmada, güneş hücresi, batarya ve süperkapasitörlerden oluşan melez bir enerji sistemi tasarlanmış ve güneş enerjisinin en verimli şekilde kullanılarak İHA'nın havada kalma süresinin artırılması amaçlanmıştır. Çalışma, teorik modelleme, simülasyon, imalat, veri toplama ve optimizasyon süreçlerini kapsamaktadır. Ayrıca, güneş hücrelerinin dinamik güç testleri yapılmış ve melez enerji yönetim sisteminin performansı değerlendirilmiştir. Geliştirilen sistemde, kanat açıklığı 1,8 metre ve kütlesi 3,3 kg olan güneş enerjili mini VTOL İHA tasarlanmış, enerji yönetimi ise öncelikle güneş hücreleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Güneşten elde edilen enerji, batarya ve süperkapasitöre aktarılırken, fazla enerji irtifa olarak depolanmaktadır.

Bu çalışma, mini sabit kanatlı dikey kalkış ve iniş yapabilen (VTOL) İHA'larda melez bir elektrikli tahrik sistemi için kural tabanlı enerji yönetim stratejisinin performansını incelemektedir. Çalışma, irtifa ile enerji depolama dikkate alınarak sistem verimliliğini analiz etmiştir. İlk olarak, güneş hücreleri, batarya ve süperkapasitörlerden oluşan melez enerji sistemi MATLAB/Simulink yazılımında modellenmiş, ardından İHA'nın uçuş sırasında talep ettiği güç, temel uçuş denklemlerine göre hesaplanarak Simulink ortamına aktarılmıştır. Geliştirilen kural tabanlı enerji yönetim algoritması, talep edilen gücün batarya, güneş hücreleri ve süperkapasitör arasında dengeli bir şekilde dağıtılmasını sağlamaktadır. Ayrıca, talep gücünün karşılanmasının ardından kalan enerji irtifa olarak depolanmakta ve sistemde potansiyel enerji formunda saklanmaktadır. Bu yaklaşım, enerji yönetim algoritmasının irtifa enerjisini dikkate alması bakımından literatüre yeni bir katkı sunmaktadır.

Çalışmada ayrıca, SMC, Fuzzy Logic, ECMS ve QPSO enerji yönetim yöntemleri ile optimizasyon gerçekleştirilmiş ve verimlilik açısından karşılaştırılmıştır. Literatürde kural tabanlı [22] ve optimizasyon tabanlı enerji yönetim sistemlerine ilişkin yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu yakıt hücresi sistemlerine odaklanmıştır [54-57]. Güneş enerjisi genellikle ana enerji kaynağı olarak değil, yardımcı bir enerji kaynağı olarak

sisteme entegre edilmektedir. Ayrıca, güneş enerjisi sistemlerinde sadece pasif enerji yönetimi uygulanan çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmalar, genellikle büyük kanat alanlarına sahip büyük İHA'lar üzerinde yoğunlaşmakta ve güneşten maksimum enerji elde etmeyi hedeflemektedir. Enerji yönetim sistemlerinde, güneş hücrelerinden gelen ışınımı optimize etmek için maksimum güç noktası takibi (MPPT) gibi denetleyiciler kullanılmaktadır [46,54,58]. Bu çalışmanın literatüre katkısı, aktif bir enerji yönetim stratejisiyle MPPT gibi denetleyicilere ihtiyaç duymadan güneş enerjisinin etkin kullanımını sağlamaktır. Güneş enerjili mini İHA'larda güç verimliliğini artırmaya yönelik literatürdeki çalışmaların büyük bir kısmı enerji yönetim sistemleri yerine, kanat profili [29,48], güneş açıları [38] ve kanat-batarya topolojisi [59] gibi alanlarda yapılan optimizasyonlara odaklanmıştır. Bu çalışma, doğrudan güneş enerjisi ile uçuş süresini artırmaya yönelik bir enerji yönetim stratejisi kullanımına odaklanarak, mevcut araştırmalara önemli bir katkı sağlamaktadır.

Bu çalışma şu şekilde yapılandırılmıştır. Bölüm 1, literatür özetini, tezin amacını, katkısını, içeriğini ve proje bilgilerini kapsamaktadır. Bölüm 2, İHA'ların sınıflandırılması, melez güç sistemlerinin bileşenleri ve enerji depolama ve üretim sistemleri hakkında bilgi sunmaktadır. Bölüm 3, İHA'larda kullanılan enerji yönetim sistemlerini detaylı bir şekilde incelemektedir. Önerilen İHA'nın modelleme sürecine ilişkin ayrıntılı bilgiler ise Bölüm 4'te yer almaktadır. Bölüm 5, İHA'ya uygulanan enerji yönetim algoritmalarını tanıtmakta ve analiz sonuçlarını vermektedir. Karşılaştırmalı analiz sonuçları Bölüm 6'da sunulurken, enerji yönetimi algoritmasına ilişkin tartışmalar ve yorumlar Bölüm 7'de ele alınmıştır.

1.3. Proje Bilgileri

Bu tez 100/2000 YÖK Doktora Bursu Yenilenebilir Enerji ve Enerji Depolama araştırma alanı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Gebze Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü Uçuş Sistemleri ve İnsansız Hava Araçları Tasarım laboratuvarları imkanlarından yararlanılmıştır.

2. İNSANSIZ HAVA ARACI

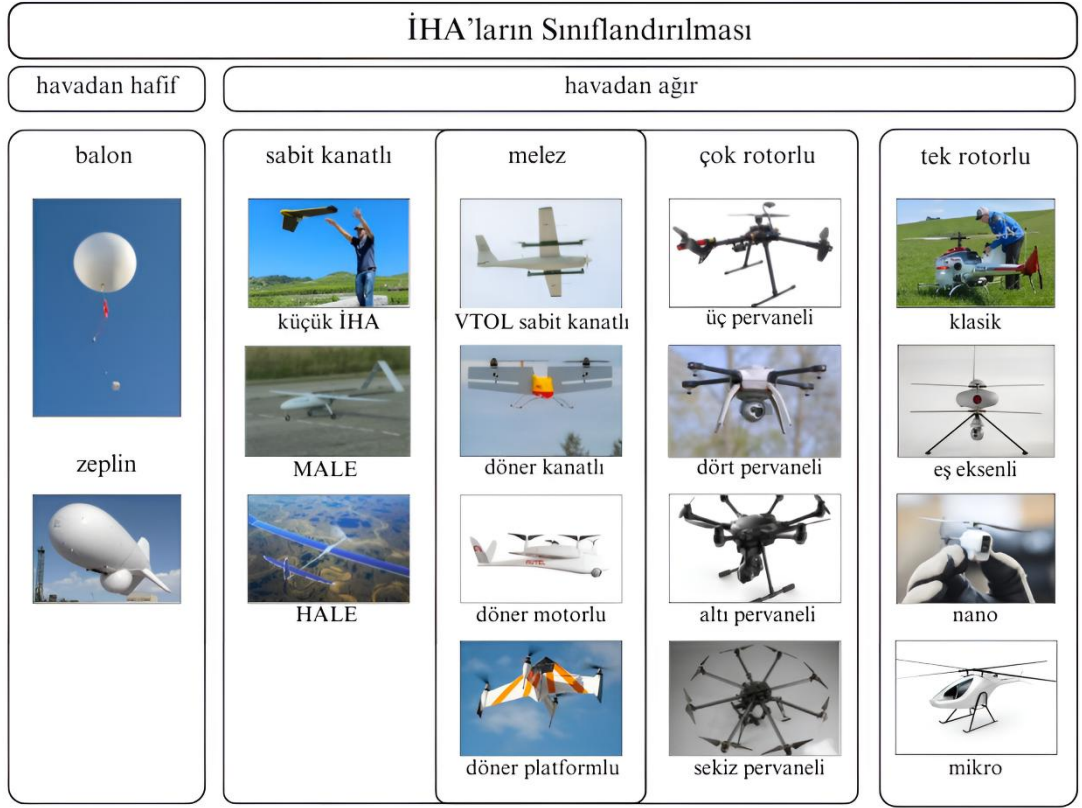
İnsansız hava araçları, genellikle belirli bir insan müdahalesi olmadan görev gerçekleştiren, uzaktan kumanda ile ya da otonom olarak uçabilen hava araçlarıdır. İHA'lar, özellikle askeri ve sivil alanlarda geniş bir kullanım alanı bulmuş olup, son yıllarda bu araçların geliştirilmesine yönelik ilgi büyük ölçüde artmıştır. İHA'lar, keşif, izleme, sınır güvenliği, haritalama, tarım ve yangın söndürme gibi çeşitli görevlerde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, lojistik hizmetlerinde ve kargo taşımacılığında da potansiyel kullanım alanları bulunmaktadır [60].

İHA'ların kullanımı, özellikle enerji yönetimi ve aerodinamik verimlilik gibi konularda karşılaşılan teknik zorluklarla sınırlıdır. Bu araçların uzun süre havada kalabilmesi, özellikle enerji verimliliği açısından önemli bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Bu kapsamda, güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile melez enerji sistemlerinin entegrasyonu, İHA'ların uçuş sürelerini ve görev etkinliklerini artırmada büyük bir potansiyel sunmaktadır [61].

Bu çalışmada, sabit kanatlı, dikey kalkış ve iniş yapabilen (VTOL) güneş enerjili mini İHA'da irtifa ile enerji depolamayı dikkate alan bir enerji yönetim stratejisi uygulanarak melez elektrikli tahrik sisteminin verimliliği analiz edilmiştir. Bu sebeple bu bölümde insansız hava araçlarının sınıflandırılması, bileşenleri ve enerji yönetim sistemleri hakkında genel bilgi verilmiştir.

2.1. İnsansız Hava Araçlarının Sınıflandırılması

İnsansız hava araçları Şekil 2.1'de görüldüğü gibi taşıma kaynaklarına göre havadan hafif ve havadan ağır olmak üzere temelde iki kategoriye ayrılırlar [62,135]. Bu çalışmanın konusu olan güneş enerjili mini VTOL İHA havadan ağır İHA'lar kategorisindedir. Havadan ağır İHA'lar ise kullanım amaçlarına, uçuş yeteneklerine, boyutlarına ve işlevlerine göre genel olarak dört ana kategoriye ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma hem askeri hem de sivil İHA'ların uygun kullanım alanlarını belirlemek açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 2.1: İHA'ların temel sınıflandırılması¹.

2.1.1. Kullanım Amacına Göre Sınıflandırma

İHA'lar kullanım amaçlarına göre temelde askeri ve sivil olarak ikiye ayrılır. Askeri İHA'lar, istihbarat, keşif, gözetleme, hedef belirleme gibi görevlerde kullanılan İHA'lardır. Sivil İHA'lar, tarım, haritalama, arama-kurtarma, medya, inşaat ve altyapı denetimleri gibi sivil alanlarda kullanılır. Bu İHA'lar genellikle daha küçük boyutlu olup, küresel konumlama sistemi (global positioning system, gps) ve kamera sistemleri ile donatılır.

2.1.2. Uçuş Prensibine Göre Sınıflandırma

İHA'lar uçuş prensiplerine göre sabit kanatlı ve döner kanatlı olmak üzere iki temel kategoriye ayrılmaktadır [63].

¹ MALE: Orta irtifa ve uzun dayanıklılık, HALE: Yüksek irtifa ve uzun dayanıklılık.

Sabit kanatlı İHA'lar, geleneksel uçaklar gibi sabit kanat yapılarına sahiptir ve ileri hareket ile taşıma kuvveti elde ederler. Uzun menzilli uçuşlar, yüksek irtifada görev yapabilme kapasiteleri ve daha az enerji tüketimi avantajları sayesinde keşif ve gözetleme görevleri için kullanılabilirler.

Döner kanatlı İHA'lar ise, dikey iniş ve kalkış yeteneğine ve birden fazla pervane kullanarak manevra kabiliyetine sahiptirler. Bu özellikleri, sınırlı alanlarda iniş ve kalkış gerektiren görevler için avantaj sağlar. Genellikle kısa menzilli, yüksek manevra gerektiren görevlerde kullanılırlar.

2.1.3. Boyutlarına Göre Sınıflandırma

İHA'lar, **Tablo 2.1**'de görüldüğü gibi boyutlarına göre mikro, nano, mini, orta ve büyük olmak üzere sınıflandırılabilir [64-67].

Mikro İHA'lar; 2 kg'dan daha hafif olan bu araçlar, özellikle kapalı alanlarda, kısa mesafeli keşif görevlerinde kullanılır.

Mini İHA'lar; 2-15 kg arasındaki kütleye sahip İHA'lar, kısa menzilli keşif ve gözetleme görevlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Orta Sınıf İHA'lar; 150-600 kg kütlesindeki İHA'lar, daha uzun menzil ve daha yüksek irtifa görevleri için tercih edilir.

Büyük İHA'lar; 600 kg'dan daha ağır olan bu araçlar, genellikle askeri ve stratejik gözetleme görevlerinde kullanılır.

2.1.4. Menziline ve Havada Kalma Süresine Göre Sınıflandırma

İHA'lar, uçuş menzilleri ve havada kalma sürelerine göre kısa, orta ve uzun menzilli olmak üzere sınıflandırılmaktadır. **Tablo 2.1**'de, Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü (NATO)'nın standartlarına göre İHA'ların sınıflandırılması verilmiştir [67].

Kısa menzilli İHA'lar; 50 km'den az menzile sahiptirler ve birkaç saat süresince görev yaparlar. Tarım, güvenlik ve medya uygulamaları gibi kısa süreli görevler için uygundur.

Orta menzilli İHA'lar; 200 km menzile sahip olan bu İHA'lar, daha uzun süreli keşif ve gözetleme görevlerinde kullanılmaktadır. Orta irtifa uçuş kabiliyeti sayesinde geniş alanların taranması mümkündür.

Uzun menzilli İHA'lar; sınırsız menzil ve 24 saati aşan havada kalma süreleri ile bilinirler. Askeri operasyonlar, sınır güvenliği ve büyük coğrafi alanların gözlemlenmesi gibi görevlerde kullanılırlar.

Tablo 2.1: İHA'ların menzil ve havada kalma sürelerine göre sınıflandırılması.

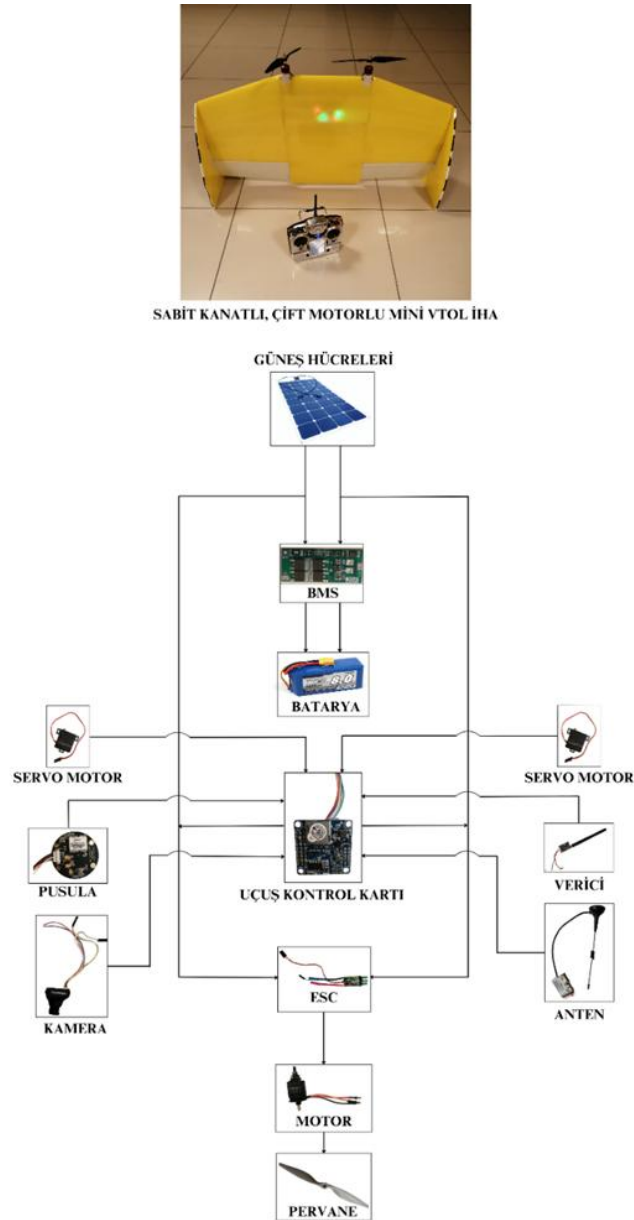
Sınıf	Kategori	Görev	İrtifa	Menzil
Sınıf III (> 600 kg)	Savaş uçağı	Stratejik/Ulusal	> 65000 ft	Sınırsız
	HALE	Stratejik/Ulusal	> 65000 ft	Sınırsız
	MALE	Stratejik/Ulusal	> 45000 ft	Sınırsız
Sınıf II (150 kg – 600 kg)	Taktiksel	Taktiksel oluşum	> 18000 ft	200 km
Sınıf I (< 150 kg)	Küçük (> 15 kg)	Taktiksel alt birim (manuel veya elle fırlatma)	> 5000 ft	50 km
	Mini (<15 kg)	Taktiksel alt birim (manuel veya elle fırlatma)	> 3000 ft	> 25 km
	Mikro (< 66 J)	Taktiksel alt birim (manuel veya elle fırlatma)	> 200 ft	> 5 km

İHA'ların bu sınıflandırmaları, her bir uygulama alanına yönelik doğru aracı seçmeyi kolaylaştırmakta ve teknolojik gelişmelerin yönünü belirlemektedir. Özellikle enerji yönetimi, otonom uçuş teknolojileri ve sensör sistemlerindeki ilerlemeler, her bir sınıftaki İHA'ların yeteneklerini artırmaktadır.

Bu çalışmada, incelenen melez elektrikli tahrik sisteminde, kaynaklar arası güç paylaşımından sorumlu olan enerji yönetim sistemi, İHA'nın sınıfından bağımsızdır. Aynı enerji yönetim tekniği ile farklı sınıflardaki İHA'ların enerji kontrolü yapılabilir. Ancak çalışmanın tasarım kısmında, mini türde (mini-type) sabit kanatlı VTOL bir İHA için çalışmalar yürütülmüştür.

2.2. İnsansız Hava Araçlarının Bileşenleri

İHA'lar, karmaşık ve çok yönlü sistemler olup, verimli ve güvenilir bir şekilde çalışmaları, mekanik ve elektriksel bileşenlerin tasarımı, entegrasyonu ve yönetimine bağlıdır. Sabit kanatlı, mini VTOL İHA ve sahip olduğu bileşenlerin bağlantı şeması **Şekil 2.2**'de gösterilmiştir. Bu sistemde, İHA'nın enerji sağlayıcısı olarak güneş hücresi ve batarya bağlantı şeması kurulmuştur.



Şekil 2.2: Sabit kanatlı İHA ve enerji topolojisi².

² Bu tez çalışması kapsamında Gebze Teknik Üniversitesi Uçuş Sistemleri Laboratuvarı'nda üretilmiş olan sabit kanatlı, çift motorlu mini VTOL İHA.

2.2.1. Mekanik Bileşenler

Mekanik bileşenler, İHA'nın uçuşunu sağlayan, yapısal dayanıklılığını belirleyen ve çeşitli manevraları gerçekleştirmesini mümkün kılan parçalardır.

İHA'larda elektronik ekipmanların, batarya ve sensörlerin monte edildiği gövde (fuselage), sürtünmeyi en aza indirecek şekilde aerodinamik formda tasarlanır [68]. Sabit kanatlı İHA'larda, uçuş sırasında İHA'nın dengeli bir şekilde kalmasını sağlayan ve taşıma kuvvetini üreten ana bileşen kanatlardır [63]. Döner kanatlı İHA'larda hız, irtifa ve yön kontrolü için ise, motor gücünü doğrudan itiş gücüne dönüştüren pervaneler kanat görevini üstlenir [69].

İHA'nın iniş ve kalkışında hasar görmeden yere temas etmesini sağlayan bileşen ise iniş takımlarıdır. Bazı İHA'lar iniş takımlarına sahip olmayabilir veya dikey iniş ve kalkış yapabilen (vertical take-off and landing, VTOL) özellikli olabilirler [70].

İHA kullanılan kanatçıklar (aileronlar) ve flaplar, sabit kanatlı İHA'ların uçuş dinamiklerini yönlendiren ve hava aracının manevra kabiliyetini arttıran temel kontrol yüzeyleridir. Kanatçıklar, İHA'nın yuvarlanma (roll) hareketini kontrol eder, flaplar ise taşıma kuvvetini artırarak daha düşük hızlarda güvenli uçuş sağlar [71]. Bu iki bileşenin etkin kullanımı, İHA'nın manevra kabiliyetini artırır, yakıt verimliliğini optimize eder ve uçuş güvenliğini sağlar.

İHA'larda kullanılan kuyruk, hava aracının denge, stabilite ve kontrol özelliklerini sağlamada kritik rol oynayan bir bileşendir [71]. Sabit kanatlı İHA'larda kuyruk yapısı, uçağın hem yatay dengeleyicideki yükseklik dümeni (elevatör) ile ileri-geri (pitch) hareketini, hem de dikey dengeleyicideki dümen (rudder) ile sağa-sola (yaw) hareketini kontrol ederek hava aracının düzgün bir şekilde uçmasını sağlar. Elevatör ve rudder gibi hareketli kontrol yüzeyleri sayesinde İHA, tırmanma, alçalma ve yönlendirme gibi temel manevraları gerçekleştirebilir.

2.2.2. Elektriksel Bileşenler

Elektriksel bileşenler, İHA'nın gücünü yönetmek, sensör verilerini toplamak ve uçuş kontrolünü sağlamak için kullanılır. İlerleyen teknoloji ile birlikte, bu bileşenler üzerindeki gelişmeler, daha yüksek performanslı, daha uzun menzilli ve daha otonom İHA'ların geliştirilmesine olanak tanımaktadır.

Hız, yön, irtifa gibi İHA'nın tüm kritik uçuş parametrelerini kontrol eden uçuş kontrol ünitesi (flight controller), sensörlerden gelen verileri işleyerek İHA'nın dengede kalmasını ve otonom uçuş gerçekleştirmesini sağlar.

GPS, düzdöner (gyroskop), barometre ve ivmeölçer gibi sensörler, İHA'nın uçuş dinamiklerini ve konumunu belirlemek için kullanılır. Kameralar, mesafe sensörü (light detection and ranging, LIDAR) ve termal sensörler gibi görüntüleme sensörleri ise keşif ve gözetleme görevlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [61].

İHA'larda kullanılan servo motorlar, uçuş kontrol yüzeylerinin (aileron, rudder ve elevatör gibi) hassas bir şekilde hareket ettirilmesi ve çeşitli görevlerin gerçekleştirilmesi için kullanılan önemli bileşenlerden biridir [71].

Pervaneleri döndürerek itiş gücünün sağlanması için genellikle fırçasız (brushless) elektrik motorları tercih edilir.

Elektronik hız kontrol cihazı (electronic speed controller, ESC), güç kaynağı ve motor arasındaki bağlantıyı sağlar. Uçuş kontrol ünitesinden gelen komutları elektrik motorlarına ileterek motorun güç çıkışını ve dönüş hızını kontrol eder ve bataryadan gelen akımı düzenler [72].

Yüksek enerji yoğunluğu sunan, lityum-polimer (li-po) veya lityum-iyon (li-ion) bataryalar İHA'nın uzun süre havada kalmasını sağlayan güç kaynaklarıdır. Ayrıca, güneş hücreleri gibi yenilenebilir enerji kaynakları da melez İHA sistemlerinde güç kaynağı olarak kullanılabilir.

İHA'larda batarya yönetim sistemleri (BMS), bataryaların verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayan önemli bir unsurdur. BMS, bataryanın şarj seviyesini, sıcaklığını ve voltajını izleyerek bataryanın ömrünü uzatır ve aşırı şarj veya deşarj durumlarını önler. Ayrıca, İHA'nın uçuş sırasında ihtiyaç duyduğu enerjiyi optimize ederek bataryanın kullanım süresini maksimum seviyeye çıkarır [73].

2.2.3. İletişim ve Veri Bağlantı Sistemleri

İHA'ların güvenli ve etkin bir şekilde uzaktan kontrol edilebilmesi için çeşitli iletişim ve veri bağlantı sistemleri kullanılır. İHA ile yer kontrol istasyonu arasındaki iletişimi sağlayan radyo iletişim sistemleri, genellikle radyo frekansı üzerinden çalışır. Uzun menzilli uçuşlarda ise uydu tabanlı iletişim sistemleri kullanılmaktadır. İHA

üzerindeki sensörler tarafından toplanan veriler ise yer istasyonuna gerçek zamanlı olarak iletilir. Veri toplama ve aktarma sistemleri, görev sırasında karar verme süreçlerini hızlandırmak için kritik öneme sahiptir [74].

2.3. İnsansız Hava Araçlarında Enerji Depolama ve Üretim Sistemleri

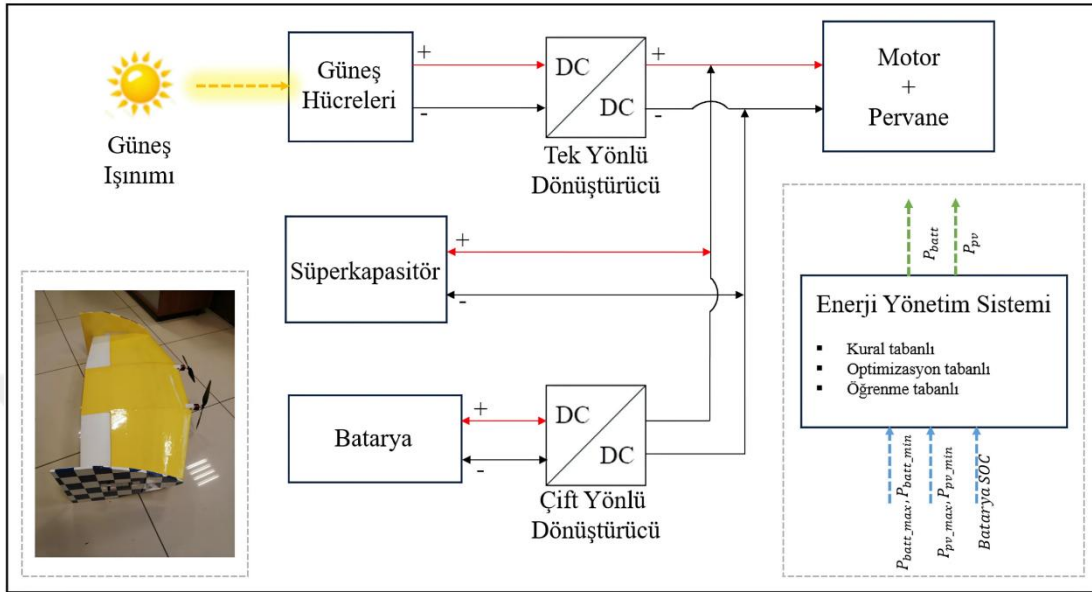
İHA'ların görev sürelerini artırmak ve enerji kullanımını optimize etmek için gelişmiş enerji yönetim sistemlerinin kullanılması gerekmektedir. İHA'ların tahrik sistemlerinde kullanılan başlıca enerji depolama ve üretim bileşenleri; termal motorlar, bataryalar, yakıt hücreleri, güneş hücreleri ve süperkapasitörlerdir. Fosil yakıtların tükenmesi ve sera gazı emisyonlarının çevreye verdiği zararlar, İHA'larda termal motorların kullanımını azaltarak elektrikli tahrik sistemlerine olan ilgiyi artırmıştır [75].

Elektrikli tahrik sistemleri, fosil yakıtlarla çalışan sistemlere göre bazı avantajlar sağlamaktadır. Elektrikli İHA'lar, güvenilirlik, düşük gürültü seviyesi, yüksek enerji verimliliği, kirletici emisyonlarının olmaması, kendi kendine çalışabilme ve yüksek manevra kabiliyeti gibi üstün özellikleri sayesinde sıklıkla tercih edilmektedir [76]. Bu sistemlerde tahrik gücü bataryalar, yakıt hücreleri, güneş hücreleri ve süperkapasitörler ile sağlanabilir. Ancak tek bir enerji kaynağına bağlı kalmak yerine, melez enerji yönetim sistemleri kullanılarak birden fazla enerji kaynağının entegrasyonu, enerji verimliliğini artırabilir ve görev sürelerini uzatabilir.

Enerji yönetim sistemi, kullanılan algoritma ile İHA üzerindeki batarya, yakıt hücresi, güneş hücresi ve süperkapasitör gibi farklı enerji kaynakları arasında dinamik enerji paylaşımı yaparak, kaynakların kapasitesine ve kullanım koşullarına göre akımın akışını düzenler. Bu melez yapının doğru şekilde yönetilmesi, İHA'nın operasyon süresini uzatarak enerji tüketiminde önemli bir optimizasyon sağlar. Bu durum İHA'nın görev etkinliğini artırarak sürdürülebilir uçuşlar için önemli bir katkı sunmaktadır.

Şekil 2.3'te verilen İHA'nın melez enerji sistemi, elektriksel sistemlerin entegrasyonu ile oluşturulabilecek olası enerji bileşenlerini ve enerji yönetim sisteminin yapısını göstermektedir. Enerji yönetim sistemi, çeşitli enerji kaynaklarından gelen gücü etkin bir şekilde paylaşarak, İHA'nın enerji ihtiyacını en

verimli şekilde karşılar. Bu sistemin kontrolü, DC/DC dönüştürücülere gönderilen akım komutlarıyla gerçekleştirilir ve böylece enerji kaynaklarının optimum kullanımı sağlanır.



Şekil 2.3: Sabit kanatlı İHA'nın enerji bileşenleri ve enerji yönetim yapısı.

Bu çalışmada, melez elektriksel tahrik sistemine sahip İHA'nın tasarımı, üretimi ve melez enerji sağlayıcı sistemin enerji yönetim stratejileri ele alınmaktadır. Bu kapsamda, güneş hücresi, bataryadan ve süperkapasitörden oluşan bir melez sistemin, mini bir İHA için kural tabanlı ve optimizasyon tabanlı boyutlandırması yapılmıştır. Güneş ışınımından elde edilen maksimum enerji referans alınarak güneş hücresi, batarya, süperkapasitör ve İHA'nın temel boyutlandırma hesaplamaları gerçekleştirilmiştir.

2.3.1. Bataryalar

İHA'ların uzun menzilli, yüksek irtifalı ve enerji verimliliği yüksek uçuşlar gerçekleştirebilmesi için doğru batarya seçimi ve batarya yönetimi kritik rol oynar.

İHA'larda kullanılan bataryaların enerji yoğunluğu, kütle, güvenlik ve kullanım ömrü gibi parametreler açısından optimize edilmesi gerekmektedir. Son yıllarda, İHA'ların performansını artırmak amacıyla daha hafif ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip batarya teknolojileri üzerine pek çok araştırma yapılmaktadır [38]. Literatürde

İHA’larda yaygın olarak kullanılan bataryaların genellikle lityum (li-po, lityum-polimer ve li-ion, lityum-iyon) bazlı olduğu görülmektedir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilen melez enerji sistemleri, İHA’ların enerji verimliliğini artırmak amacıyla batarya kullanımını optimize etmek için tercih edilmektedir. Özellikle güneş hücresi ile entegre edilmiş sistemler, İHA’nın havada kalma süresini artırarak batarya üzerindeki yükü azaltmaktadır.

İHA’larda uçuş menzili ve süresini doğru tahmin edebilmek ve enerji yönetim algoritmalarının etkinliğini artırmak için bataryaların şarj durumu (state of charge, SOC) ve kullanım ömrü (state of health, SOH) değerlerinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi kritik öneme sahiptir. SOC, bataryada kalan enerji miktarını belirtir ve enerji yönetim algoritmalarının etkinliği ile İHA’nın güvenli uçuşu açısından doğru bir şekilde belirlenmesi gereklidir [77]. Bununla birlikte, bataryalar şarj-deşarj oranı, yük profili, hücre termodinamiği ve kimyası gibi faktörlere bağlı, doğrusal olmayan bir yapıya sahip olduğundan, bu sistemlerin modellenmesi zorluk taşımaktadır. Literatürde elektrikli araçlara yönelik yapılan simülasyon çalışmalarında lityum-iyon batarya modelleri için genellikle MATLAB/Simulink ortamında verilen eşitlik (2.1) ve eşitlik (2.2) kullanılmaktadır [78].

Deşarj Modeli ($i^* > 0$);

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} i^* - K \frac{Q}{Q-it} it + A \exp(-B \cdot it) \quad (2.1)$$

Şarj Modeli ($i^* < 0$);

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{it+0.1Q} i^* - K \frac{Q}{Q-it} it + A \exp(-B \cdot it) \quad (2.2)$$

2.3.2. Süperkapasitörler

İHA’larda kullanılan süperkapasitörler, enerji depolama teknolojisi açısından giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bataryalarla birlikte veya alternatif bir enerji depolama aracı olarak kullanılan süperkapasitörler, yüksek güç yoğunluğu, hızlı şarj-deşarj yetenekleri ve uzun ömürleri ile dikkat çekmektedir. Bu özellikleri, süperkapasitörleri İHA’lar için uygun bir enerji depolama çözümü haline getirir.

Özellikle kısa süreli yüksek güç talepleri olan uçuşlarda avantaj sağlar. Örneğin, İHA'ların kalkış ve iniş gibi manevralarında veya ani hızlanma ve yavaşlama gereksinimlerinde süperkapasitörler büyük avantaj sağlar.

Süperkapasitörler, çoğunlukla bataryalarla birlikte melez enerji sistemlerinde kullanılır. Bu melez sistemler, İHA'ların farklı güç taleplerini karşılamak için optimize edilmiş bir çözüm sunar. Bataryalar yüksek enerji yoğunluğu ile uzun süreli enerji sağlarken, süperkapasitörler kısa süreli yüksek güç ihtiyaçlarını karşılar. Bu melez yapı, enerji verimliliğini artırır ve bataryanın aşırı yüklenmesini önler. Bataryaların aşırı yüklenmesi durumunda, bataryanın ömrü kısalabilir. Ancak süperkapasitörlerin hızlı enerji sağlama yeteneği, bataryaların bu tür zorlayıcı durumlardan korunmasına yardımcı olur. Ayrıca, süperkapasitörler ani güç taleplerini karşılarken bataryaların enerji sağlayıcı rolünü dengeleyerek sistemin genel performansını artırır [79].

Günümüzde süperkapasitörlerin enerji yoğunluğu bataryalardan daha düşüktür; bu durum, süperkapasitörlerin tek başına enerji kaynağı olarak kullanılmasını sınırlamaktadır [80]. Süperkapasitörlerin teknolojik gelişimi, enerji yoğunluklarının artırılması ve maliyetlerin düşürülmesi yönünde ilerlemektedir. Melez sistemlere entegre edilen süperkapasitörler, gelecekte İHA'ların daha uzun menzilli, yüksek performanslı ve güvenilir uçuşlar gerçekleştirmesini sağlayabilir. Literatürde elektrikli araçlara yönelik yapılan simülasyon çalışmalarında süperkapasitör modelleri için genellikle MATLAB/Simulink ortamında eşitlik (2.3) ve eşitlik (2.4) kullanılmaktadır [81].

$$V_{SC} = \frac{N_S Q_T d}{N_p N_e \epsilon \epsilon_0 A_i} + \frac{2 N_e N_S R T}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{Q_T}{N_p N_e^2 A_i \sqrt{8 R T \epsilon \epsilon_0 C}} \right) - R_{SC} i_{SC} \quad (2.3)$$

$$Q_T = \int i_{SC} dt \quad (2.4)$$

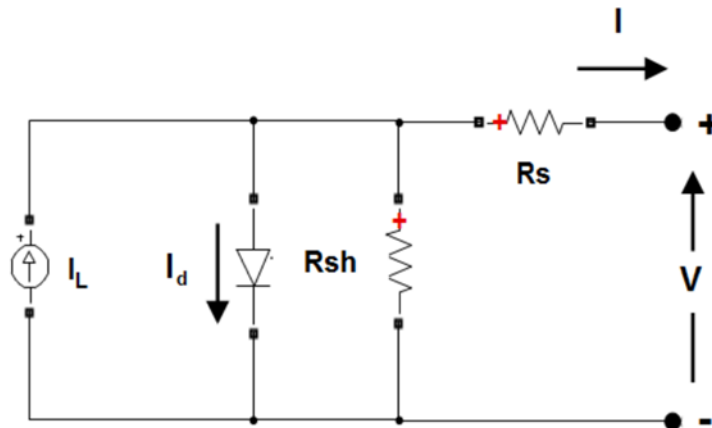
2.3.3. Güneş Hücreleri

Güneş enerjisiyle çalışan İHA'lar, bataryalarını şarj etmek veya uçuş sırasında motorları doğrudan beslemek için üretilen elektrik enerjisinden faydalanmaktadır [82]. Bu durum, fosil yakıt bağımlılığını azaltarak İHA'ların daha uzun süre havada

kalabilmesini sağlar. Güneş hücreleri, yenilenebilir enerji teknolojilerinin bir parçası olarak, İHA'ların enerji verimliliğini ve menzillerini artırmak amacıyla giderek daha yaygın bir enerji kaynağı olarak tercih edilmektedir. Güneş hücreleri, İHA'ların kanat yüzeyleri ve gövde gibi geniş alanlarına entegre edilerek aracın aerodinamik yapısını koruyacak şekilde monte edilmektedir. Genellikle silikon bazlı güneş hücreleri yaygın olarak kullanılmakla birlikte, daha hafif, maliyet ve uygulanabilirlik açısından verimli mono ve polikristal ince-film PV malzemeler üzerine yapılan araştırmalar artmıştır [83-85].

Güneş hücresi paketi, güneş ışınımını dönüştürerek elektrik enerjisi üreten genellikle yarı iletken malzemeden oluşan, paralel ve seri bağlı fotovoltaik (PV) dizilerden oluşur [86]. Bir güneş hücresi dizisinin eşdeğer elektrik devresini tanımlamak için üç model kullanılır: tek diyotlu (one-diyot), iki diyotlu (two-diyot) ve deneysel model [86]. Bu çalışmada, PV hücrelerinde enerji üretimini tahmin etmek için kullanılan en yaygın model olan tek-diyot devre modeli kullanılmıştır. Bu model, Matlab/Simulink/Simscape kütüphanesinde mevcuttur. Güneş hücrelerinin parametreleri ise üreticinin veri sayfasından edinilmiştir [132].

Devresi Şekil 2.4'te verilen güneş hücresi dizisi, bir akım kaynağı (I_L), diyot, seri bağlı direnç (R_s) ve paralel bağlı direnç (R_{sh}) kullanan bir tek-diyot eşdeğer devre modelidir. I-V değişimi ışıyım şiddetine ve sıcaklığa bağlıdır [54].



Şekil 2.4: Güneş hücrelerinin eşdeğer devre modeli.

Kirchoff yasası uygulanarak, tek-diyot tipindeki, tek bir güneş hücresi modülü için akım ve voltaj arasındaki ilişkiyi veren eşitlik (2.5) ve eşitlik (2.6) elde edilir [87,88].

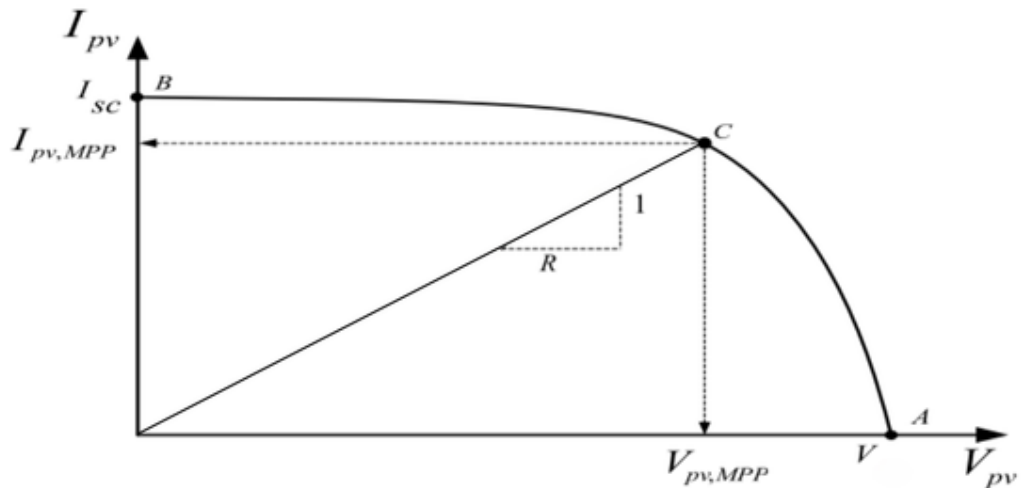
$$I = I_L - I_d = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \ln N_{cell} \quad (2.6)$$

Güneş enerjisi kullanımı, bataryaya olan bağımlılığı azaltarak uzun süreli görevlerde kesintisiz enerji sağlaması açısından avantaj sunmaktadır. Bu sayede, İHA'lar gün boyunca bataryalarını şarj edebilir ve güneş ışığının yetersiz olduğu gece saatlerinde veya bulutlu günlerde batarya enerjisinden faydalanarak uçuşlarına devam edebilir. Bu melez sistem hem batarya ömrünü uzatmakta hem de havada kalma süresinin artmasına katkı sağlamaktadır [89,90].

Şekil 2.5 ile bir güneş hücresinin I-V çalışma prensibi göstermektedir. *A* noktası açık devre voltajı, *B* noktası kısa devre akımı ve *C* noktası maksimum güç noktasını (MPP) ifade eder. Sabit ışınlım ve hücre sıcaklığı altındaki bir PV dizisinin çalışma noktası, I-V karakteristiklerinin ve yük karakteristiklerinin kesişme noktasıdır. Sistem çalışma noktası, yük direnci sıfırdan sonsuza doğru arttıkça, I-V karakteristik eğrisi boyunca *B* noktasından *A* noktasına doğru hareket eder.

Güneş enerjili İHA'larda maksimum güç noktası takibi (MPPT) yapılması, hücrelerin maksimum verimle çalışmasını sağlamak adına önemlidir. Güneş hücrelerinden elde edilen elektrik enerjisi doğrusal olmayan bir yapıya sahip olduğundan, maksimum güç noktasının bulunması performans için gereklidir [91,145].



Şekil 2.5: Bir güneş hücresinin I-V çalışma prensibi.

Güneş hücreleri genellikle yüksek irtifa ve uzun menzil (high altitude long range, HALE) İHA'larında enerji kaynağı olarak kullanılmakta olup, bu tür İHA'ların uçuş profilleri gündüzleri güneş hücreleri, geceleri ise bataryaların devreye girmesi prensibine dayanmaktadır. Ayrıca, gündüz saatlerinde üretilen enerjinin bir kısmı, irtifa kazandırılarak potansiyel enerji olarak depolanmakta ve bu enerji gece saatlerinde kayma hareketiyle kullanılmaktadır. Görüldüğü üzere bu tür İHA'lar uzun süreli uçuş sağlayabilmeleri için yüksek verimlilik ve irtifa yönetimi gerektirmektedir [9]. Güneş hücreleriyle donatılmış İHA'larda enerji yönetim sistemleri, yerçekimi potansiyel enerjisini ve diğer enerji kaynaklarını optimize ederek kesintisiz ve uzun süreli uçuşları mümkün kılmaktadır [8,12,92]. Bu çalışma, HALE İHA'larında kullanılan bu enerji yönetim sistemini mini İHA'lara uyarlayarak, güneş ışığı ve batarya kaynakları arasındaki etkin enerji dağılımını sağlamayı hedeflemektedir.

2.3.4. Yakıt Hücreleri

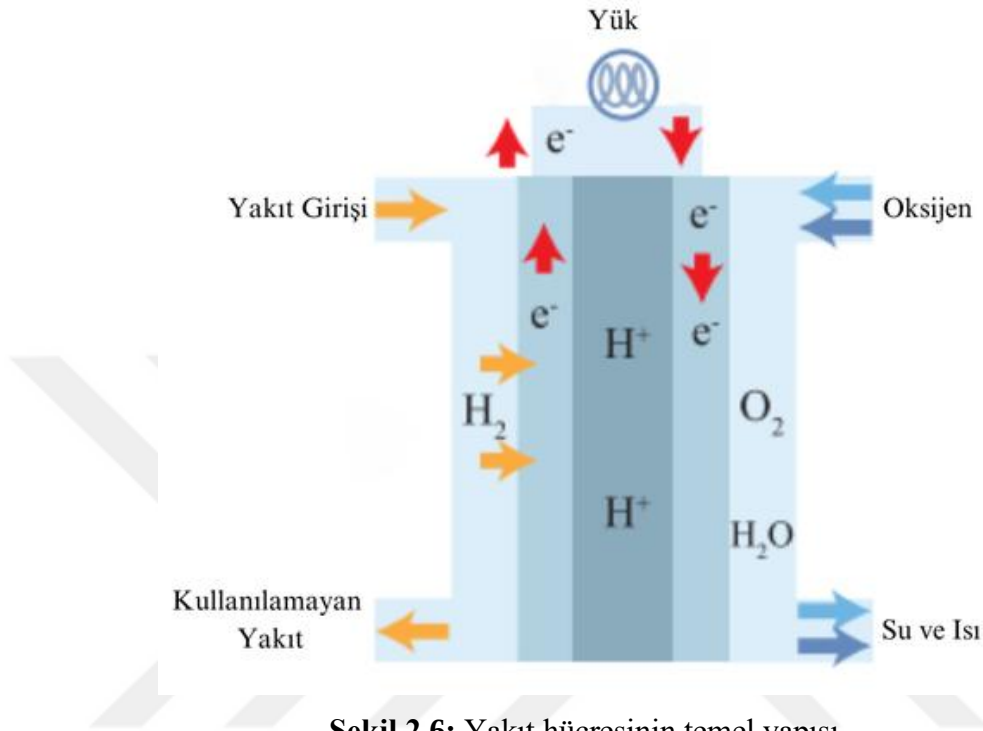
İHA'larda kullanılan yakıt hücreleri, uzun menzil, düşük gürültü, yüksek enerji yoğunluğu ve çevresel sürdürülebilirlik gibi avantajlar sunan yenilikçi enerji kaynaklarıdır. Yakıt hücreleri, özellikle hidrojen gibi temiz yakıtları kullanarak kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür ve bu sayede fosil yakıtlı sistemlere göre daha çevre dostu bir alternatif oluşturur.

Şekil 2.6'da temel yapısı görülen yakıt hücreleri, elektrokimyasal bir reaksiyonla yakıt (genellikle hidrojen) ve oksijenin bir araya getirilmesiyle elektrik üretir. Reaksiyon sırasında yakıt, yakıt hücresinin anot tarafına, oksijen ise katot tarafına verilir. Yakıt hücresinde gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyon, elektronların dış bir devrede hareket etmesine neden olarak elektrik akımı üretir. Bu işlem sırasında üretilen yan ürünler genellikle su ve ısıdır, bu da yakıt hücrelerini çevreye zararsız hale getirir [93].

Yakıt hücrelerinin en önemli avantajlarından biri, diğer enerji kaynaklarına göre daha uzun süreli enerji sağlamasıdır. Özellikle bataryalarla karşılaştırıldığında, yakıt hücreleri daha uzun menzil ve havada kalma süresi sunar. Ayrıca, yakıt hücreleri hidrojen yakıtının kullanımı sırasında sadece su buharı üretir, bu da karbon ayak izini azaltır ve fosil yakıt tüketimine bağımlılığı düşürür.

Ancak yakıt hücrelerinin İHA'lar üzerindeki kullanımı bazı zorluklarla da karşı karşıyadır. Yakıt hücrelerinin enerji yoğunluğu, lityum-iyon bataryalara göre yüksek

olmasına rağmen, hidrojen yakıtının depolanması ve taşınması zordur [94]. Hidrojen gazı, düşük enerji yoğunluğuna sahip bir gazdır ve sıkıştırılmış halde taşınması veya sıvılaştırılması gerekir, bu da İHA'ların kütle ve tasarımına ek zorluklar getirir.



Şekil 2.6: Yakıt hücresinin temel yapısı.

Yakıt hücrelerinin maliyeti de önemli bir faktördür. Gelişen teknolojiye rağmen, yakıt hücresi sistemleri hâlâ bataryalardan daha pahalıdır ve geniş çapta ticari kullanıma uygun hale gelmesi için maliyetlerinin düşmesi gerekmektedir. Ayrıca, yüksek verimlilikle çalışması için gerekli olan yüksek saflıkta hidrojen üretimi de enerji yoğun bir süreçtir [95].

Yakıt hücrelerinin kullanımında karşılaşılan bir diğer zorluk ise düşük dinamik cevap hızlarına sahip olmalarının yanı sıra İHA'ların sürekli değişken dinamik bir güç talebine ihtiyaç duymaları ve bu nedenle bu talebi karşılama kapasitesinin uçuş performansını etkilemesidir. Batarya ve süperkapasitörün dinamik cevap hızı yakıt hücrelerinden daha büyük olduğundan İHA'larda çoğunlukla batarya ve yakıt hücresi ya da süperkapasitör ve yakıt hücresi melez sistemleri oluşturulmaktadır [96].

Tüm bu kısıtlamalar değerlendirildiğinde, özellikle uzun süreli gözlem ve keşif görevlerinde, yakıt hücresel (batarya ve süperkapasitör dahil) melez sistem, uzun süreli enerji depolaması ve hava koşullarından bağımsız olarak çalışabilme avantajına

sahipken, kütle ve taşınabilirlik yönünden hafif olması, bakım maliyetinin düşük olması, sessiz, yakıt gerektirmeyen yenilenebilir bir enerji kaynağı sunması ve böylece sıfır emisyonu sahip olması sebebiyle çevre dostu bir çözüm sunması gibi avantajları açısından güneş hücreli (batarya ve süperkapasitör dahil) melez sisteme sahip İHA'ların kesintisiz havada kalmasının sağlanması üzerine çalışmaların artırılması oldukça önemlidir.

2.3.5. Melez Sistemler

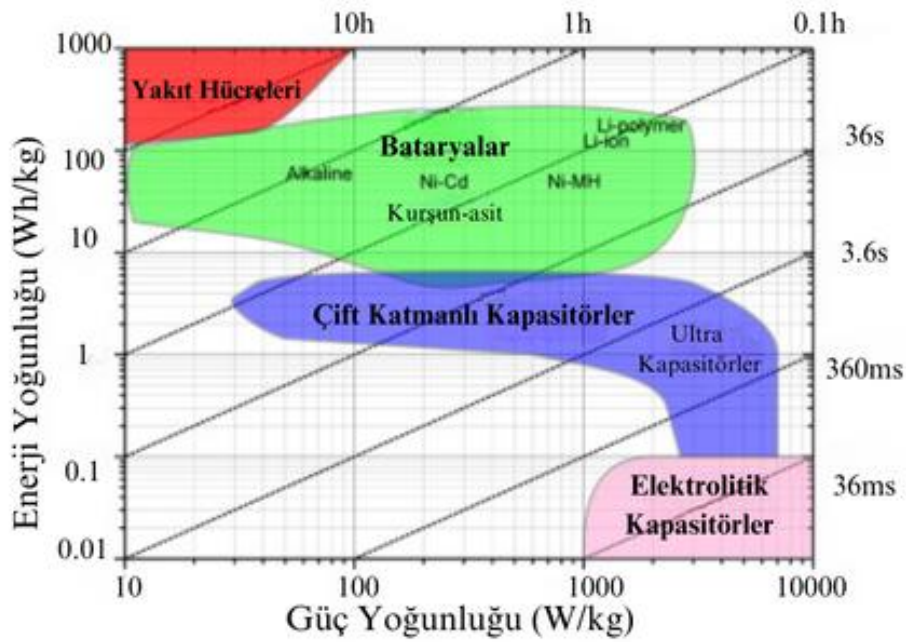
İHA'larda melez enerji yönetim sistemleri, iki veya daha fazla enerji kaynaklarının bir arada kullanılarak enerji verimliliğini artırmayı, menzil ve uçuş süresini uzatmayı enerji maliyetlerini düşürmeyi ve çevresel etkileri azaltmayı hedefleyen sistemlerdir. Melez enerji yönetim sistemleri, içten yanmalı motor ve batarya, elektrikli itki sistemleri ve birden çok elektrik motorlu sistemler için kurulmaktadır.

Bataryalarda kullanılan bu şarj etme sistemlerini **Şekil 2.7**'de görüldüğü gibi yakıt hücreleri ile kıyasladığımızda enerji yoğunluğunun daha düşük olduğunu görmekteyiz [94,97]. Örneğin hidrojen tanklı bir yakıt hücresi sistemi olan bir İHA'nın enerji yoğunluğu li-po bataryaya oranla daha fazladır. Bunun yanı sıra yakıt ikmali işlemi neredeyse anında yapılırken, bataryalarda şarj işlemi uzun zaman alır. Ancak yakıt hücresi sistemi büyük kütleye sahip daha yüksek dayanıklı İHA'lar için tercih edilebilir bir çözüm olarak düşünülmelidir. Çünkü hidrojen tankı hacmini düşündüğümüzde yakıt hücreleri, lityum bataryalara oranla daha düşük enerji yoğunluğuna sahip olabilir. Bunun yanı sıra yakıt hücreleri, lityum bataryalara göre daha pahalıdır ve sistemleri daha karmaşıktır. Ayrıca verimlilik açısından yakıt hücreleri %60 gibi bir seviyeye ulaşırken lityum bataryalar %90'ın üzerinde verimliliğe sahiptir.

Hem bataryalar hem de yakıt hücreleri için tüm bu sınırlandırmalar düşünüldüğünde enerji verimliliğini artırmanın bir çözümü olarak yakıt hücresi ve bataryanın birlikte kullanıldığı ya da yardımcı enerji kaynağı olarak süperkapasitör veya güneş hücrelerinin kullanıldığı melez enerji kaynakları geliştirilmesine yönelik çalışmalar başlatılmıştır [98,99].

Bu çalışmalarda, elektrikli itki sistemleri genellikle bataryalar, süperkapasitörler, yakıt hücreleri ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını bir arada kullanır. Bu

sistemlerde güneş enerjisi veya yakıt hücreleri gibi yenilenebilir enerji kaynakları, bataryalar ile birleştirilerek İHA'ların daha uzun süreli görevler gerçekleştirmesini ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın azalmasını ve karbon salınımını minimize eder. Yakıt hücreleri, hidrojen gibi yenilenebilir yakıtlarla çalışarak sürekli enerji üretir ve bataryaları şarj edebilir. Güneş hücreleri ise, gündüz uçuşlarında sürekli enerji sağlarken, güneş ışınımının yetersiz olduğu gece uçuşlarında bataryalar ve/veya süperkapasitörlerde depoladıkları enerjiyi kullanabilir. Süperkapasitörler, kısa süreli yüksek enerji taleplerine yanıt verebildiği için bataryaların ömrünü uzatır [100]. Bu durum enerji sisteminin dayanıklılığını artırır ve İHA'nın bakım maliyetlerini düşürür.



Şekil 2.7: Enerji kaynaklarının enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu karşılaştırması.

Birden çok elektrik motoru ile kurulan melez sistemler de bulunmaktadır. Bu sistemlerde, İHA'da tüketim karakteristikleri farklı veya İHA'nın görevine bağlı olarak tüketim karakteristikleri aynı olan birden çok motor arasında melez enerji sistemi kurulabilir [101,102].

Enerji yönetim sistemi, her bir kaynağın durumu ve uçuş sırasında İHA'nın enerji taleplerine göre hangi kaynağın kullanılacağını belirler. Bu sistemlerde kullanılan denetleyici algoritmalar, enerji kullanımını optimize etmek ve İHA'da maksimum verimlilik sağlamak için tasarlanmıştır. Talep edilen güce bağlı olarak enerji

kaynakları arasında geçiş yaparak, her kaynağın ömrünü uzatmak ve verimliliğini artırmak hedeflenir [64].

Bu çalışmada, **şekil 2.2** ve **şekil 2.3** ile verilen sabit kanatlı İHA'nın enerji topolojisi ve enerji yönetim yapısına sahip sabit kanatlı güneş-melez enerjili mini VTOL İHA tasarlanmıştır. Modelde, uçuş sırasında güneş hücreleri tarafından üretilen fazla enerji bataryalarda depolanırken, güneş ışığının olmadığı durumlarda bu enerji bataryalardan sağlanır. Bu denge, İHA'nın sürekli enerji kaynağına erişimini sağlayarak havada kalma süresini artırır. Aynı zamanda süperkapasitörler, ani enerji ihtiyaını karşılamak için hızlı enerji depolama ve boşaltma kapasiteleri sayesinde bataryaların ömrünü uzatır [100].

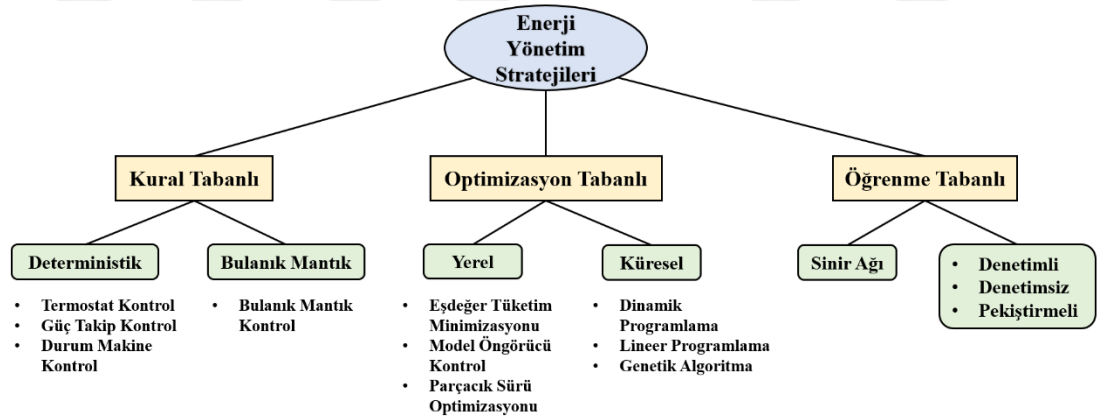
Enerji kaynakları arasındaki dengeyi sağlamak için kullanılan kontrol algoritmaları, enerji verimliliğini en st düzeye çıkarmak amacıyla geliştirilmiştir. Kural tabanlı ve optimizasyon tabanlı yaklaşımlar, enerji talebine ve mevcut koşullara göre enerji kaynakları arasında akıllı bir dağılım sağlar. Bu denetleyici sistemler sayesinde, İHA'ların uçuş süresi artırılırken, enerji yönetimi optimize edilir ve kaynaklar en verimli şekilde kullanılır.

3. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA ENERJİ YÖNETİMİ

İHA’larda enerji yönetimi, farklı enerji kaynaklarını bir araya getirerek, kaynaklar arasında enerjiyi etkili bir şekilde dağıtarak, toplam sistem verimliliğini artırmak ve maksimum uçuş süresi, menzil ve görev performansı sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir.

İHA’lar, sınırlı enerji kaynaklarıyla çalıştığı için bu enerjinin verimli bir şekilde kullanılması, özellikle uzun süreli uçuşlarda enerji kaynaklarının etkin bir şekilde yönetilmesiyle sağlanabilir. Bu nedenle, kullanılan enerji kaynaklarının özelliklerine ve görev gereksinimlerine göre İHA’lara enerji yönetimi uygulanır. Ayrıca, enerjiyi optimize etmek, aynı zamanda batarya gibi diğer enerji kaynaklarının ömrünü uzatmayı ve İHA’nın görev sürekliliğini artırmayı hedefler [64].

İHA’larda uygulanan enerji yönetimi stratejileri, **Şekil 3.1**’de verildiği gibi, kural tabanlı (rule-based), optimizasyon tabanlı (optimization-based) ve öğrenme tabanlı (learning-based) olarak üç ana grupta sınıflandırılmaktadır [57,103,104].



Şekil 3.1: Elektrikli araçlar için enerji yönetim stratejilerinin sınıflandırılması.

Literatürde, İHA’larda enerji yönetimine yönelik çalışmalarda, düşük hesaplama yüklerinden dolayı çevrimiçi uygulanabilirliğe sahip olmaları nedeniyle genellikle sezgisel olmayan kural tabanlı yaklaşımlara odaklanılmıştır [105]. Bunun yanı sıra, İHA’larda enerji yönetimi için üst sezgisel (meta-heuristic) optimizasyon ve öğrenme tabanlı enerji yönetimi üzerine araştırma konuları son birkaç yılda hız kazanmıştır.

3.1. Kural Tabanlı Enerji Yönetimi

İHA’larda kullanılan kural tabanlı enerji yönetimi, enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamak için önceden tanımlanmış bir dizi kural ve mantığa dayanan stratejileri ifade eder [104,106,111]. Bu yaklaşım, enerji talebini karşılamak, batarya ve güneş hücreleri veya yakıt hücreleri gibi diğer enerji kaynaklarının ömrünü uzatmak ve İHA’nın operasyonel sürekliliğini artırmak amacıyla geliştirilmiştir.

Kural tabanlı enerji yönetimi, uçuş durumu, mevcut enerji kaynaklarının durumu ve enerji talebine göre belirli bir uçuş görevi boyunca enerji kaynaklarının kullanımını optimize etmeyi ve enerjinin verimli bir şekilde yönetilmesini sağlar. Bu süreçte, bataryaların doluluk seviyesi, güneş hücrelerinin ürettiği enerji miktarı, süperkapasitörlerin durumu, İHA’nın uçuş aşamasına (kalkış, tırmanma, seyir, iniş) ve ihtiyaç duyulan güce bağlı olarak değişen enerji talebi gibi sistemin fiziksel koşulları ile uçuş irtifası, hava durumu ve güneş ışınımı gibi çevresel koşullarını dikkate alır. Örneğin, bir İHA’nın yüksek enerji talebinin olduğu kalkış aşamasında bataryalar öncelikli olarak kullanılırken, seyir aşamasında daha düşük enerji tüketimi olan güneş hücreleri tercih edilebilir ya da batarya güç seviyesi düşükse, sistem otomatik olarak güneş hücrelerinden elde edilen enerjiyi kullanarak bataryayı şarj edebilir [111]. Bu enerji yönetim stratejileri, İHA’nın görev süresini uzatmayı ve görev esnasında enerji kaynaklarının dengeli kullanımını sağlamayı amaçlar.

İHA enerji yönetiminde kullanılan kural tabanlı stratejiler, genellikle deterministik ve bulanık mantık (fuzzy logic) olarak iki ana kategoriye ayrılır [107]. Deterministik stratejiler, kesin ve sabit kurallar üzerine kuruludur [57,111]. Karar mekanizmaları, belirli girdilere karşılık sabit çıktılar üretecek şekilde tasarlanmıştır. Bu stratejiler, genellikle daha az hesaplama gücü gerektirir ve öngörülebilir sonuçlar sağlar. Bulanık mantık, kesin kurallar yerine bulanık kümelerle dayalı kararlar alır [22]. Bu yöntem, belirsizliklerin ve karmaşık sistemlerin yönetilmesinde daha esnekler. Değişken çevresel koşullarda veya geleneksel deterministik yaklaşımların yetersiz kaldığı durumlarda enerji optimizasyonunun kritik olduğu durumlarda tercih edilir.

Kural tabanlı sistemler, genellikle düşük hesaplama yükleri gerektiren ve daha hızlı tepki süreleri sundukları için çevrimiçi uygulanabilir sistemlerdir. Bu nedenle, sınırlı enerji kaynaklarına sahip küçük ve orta ölçekli İHA’larda yaygın olarak kullanılırlar [56,57].

3.2. Optimizasyon Tabanlı Enerji Yönetimi

Optimizasyon tabanlı enerji yönetimi, İHA'ların enerji verimliliğini ve operasyonel sürekliliğini artırmak için kullanılan gelişmiş bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, çeşitli matematiksel modeller ve algoritmalar aracılığıyla enerji kaynaklarını dinamik olarak yönetir ve optimum uçuş performansı sağlar [104,106]. Ayrıca, güneş panelleri, bataryalar, yakıt hücreleri gibi farklı enerji kaynakları kullanan melez enerji sistemlerine sahip İHA'ların, enerji kaynakları ve enerji talepleri arasında optimum dengeyi sağlayarak, sistemin enerjisinin verimli bir şekilde kullanılmasıyla görev süresini ve başarısını artırmayı amaçlar.

Enerji yönetimi stratejilerinin optimizasyonu, özellikle karmaşık ve uzun süreli uçuş görevlerinde, İHA'nın enerji talebi, enerji arzı, görev süresi, uçuş rotası gibi birçok değişkeni dikkate alır. Optimizasyon tabanlı stratejilerde, şarj durumu, yakıt tüketimi, çevrim ömrü ve emisyon değeri gibi özelliklerin optimizasyonu için kurulan bir amaç fonksiyonunun önceden belirlenen kısıtlara göre minimum veya maksimum değerinin bulunması hedeflenir [106,108].

Enerji tüketimini minimize, görev süresini maksimize etmek ve enerji kaynaklarının etkin bir şekilde yönetilmesi amacıyla oluşturulan bu stratejiler, küresel optimizasyon (nedensel) ve gerçek zamanlı optimizasyon (nedensel olmayan) olarak iki gruba ayrılır [107,109]. Küresel optimizasyon stratejileri içerisinde, dinamik programlama (dynamic programming), evrimsel algoritmalar (evolutionary algorithms), genetik algoritmalar (genetic algorithms) yer alır ve büyük ölçüde uçuş profilinin önceden bilinmesine bağlıdır [107,110]. Bu stratejiler genel olarak küresel bir optimumu garanti eder, ancak hesaplama yükleri çok yüksek olduğu için gerçek zamanlı olarak uygulanamazlar. Dinamik programlama, özellikle karmaşık görev profillerinde, uçuş sürecindeki enerji tüketimini zaman dilimlerine bölerek her aşamada en uygun enerji yönetimi kararlarını belirler [104,112]. Genetik algoritmalar, büyük arama alanlarına sahip problemlerde, evrimsel prensiplere dayanan, doğadan ilham alan bir optimizasyon süreci uygular [113]. Hesaplama gücüne ve algoritmanın sadeleştirilmiş bir versiyonunun kullanımına bağlı olarak evrimsel ve genetik algoritmalar (evolutionary and genetic algorithms), bazı durumlarda gerçek zamanlı optimizasyona da uyarlanabilir. Gerçek zamanlı optimizasyon stratejileri, doğrusal programlama (linear programming), ve yapay zekâ (AI-based approaches) ve makine öğrenimi tabanlı yaklaşımları içerir ve problemin gerçek zamanlı olarak çözülebilen ve düşük

hesaplama yükü olan bir anlık amaç fonksiyonunun yerel minimuma dönüştürülmesiyle elde edilir. Doğrusal programlama, enerji kaynakları ve enerji tüketimi arasındaki ilişkiyi doğrusal denklemler ve kısıtlar üzerinden tanımlar. Çevresel koşullardaki değişimlere hızlı ve etkili bir şekilde adapte olmayı sağlayarak, enerji yönetim stratejilerinin dinamik olarak öğrenilmesi ve uyarlanması için yapay zekâ ve makine öğrenimi teknikleri kullanılır [114].

Optimizasyon tabanlı enerji yönetim sistemleri, kural tabanlı sistemlere göre daha karmaşık ve gelişmiş algoritmalar kullanır. Bu sistemler, değişen koşullara göre enerji yönetimini anlık olarak ayarlayabilir ve daha esnek bir yaklaşım sunar. Böylece, enerji kaynaklarının etkin kullanımını sağlamak için sürekli olarak farklı koşulları gözden geçirir ve enerji kaynaklarını gerçek zamanlı olarak optimize eder. Bu süreç, İHA'nın enerji kaynaklarını özelliklerine en uygun şekilde kullanılmasını sağlar, böylece uçuş süresi ve görev verimliliği önemli ölçüde artırılabilir. Ayrıca, güneş ışınımı, hava koşulları gibi çevresel faktörler ve görev gereksinimleri dikkate alınarak enerji yönetim stratejilerinin anlık olarak ayarlanması sağlanır.

Optimizasyon tabanlı yaklaşımlar, daha gelişmiş analizler ve algoritmalar gerektirdiğinden uzun menzilli büyük İHA'lar ve daha karmaşık enerji sistemlerine sahip olan İHA'lar için daha uygun olabilir.

3.3. Öğrenme Tabanlı Enerji Yönetimi

İHA'larda öğrenme tabanlı enerji yönetimi, yapay zekâ ve makine öğrenimi tekniklerinin kullanıldığı yenilikçi bir enerji yönetim yaklaşımıdır. Bu yöntem, İHA'nın enerji kaynaklarını, tüketimini ve çevresel değişkenleri göz önünde bulundurarak enerji yönetimini optimize etmek için dinamik ve adaptif kararlar almayı sağlar. Bu sistemler, gerçek zamanlı veri akışını ve uçuş sırasında meydana gelen değişiklikleri analiz ederek enerji tüketim modellerini öğrenir ve uyum sağlar [115]. Böylece enerji kaynaklarının, çevresel koşullara ve görev gereksinimlerine göre daha uygun bir şekilde dağıtılması sağlanır. Optimumu bulmak için büyük veri kümelerini kullanan öğrenmeye dayalı (learning-based) enerji yönetimi tekniklerinde önceden tanımlanmış kurallara ihtiyaç yoktur [116,117]. Bu teknikler, farklı sistemlere uygulanabilme ve modelsiz kontrol gibi avantajlara sahiptirler [117].

Makine öğrenimi, İHA'ların enerji yönetiminde çeşitli teknikler aracılığıyla kullanılabilir. En yaygın kullanılan makine öğrenimi algoritmaları arasında denetimli öğrenme (supervised learning), denetimsiz öğrenme (unsupervised learning), pekiştirmeli öğrenme (reinforcement learning) ve sinir ağları (neural network) bulunur [118].

Denetimli öğrenmede, eğitim aşaması, veri seti istenilen doğruluk seviyesine ulaşana kadar devam eder. Böylece enerji kullanımına ilişkin öngörüler daha hassas bir şekilde yapılabilir [119,120].

Denetimsiz öğrenme, herhangi bir veri setine bağlı kalmaksızın, yalnızca mevcut girdilerden anlam çıkararak öğrenmeyi gerçekleştiren bir yaklaşımdır [120].

Pekiştirmeli öğrenmede, İHA'nın özellikle dinamik ve öngörülemeyen uçuş koşullarında, çevresel koşullardan ve enerji tüketim durumlarından elde ettiği geri bildirimlere göre enerji yönetim stratejilerini günceller. Pekiştirmeli öğrenme stratejilerinde öğrenme, bir etmen ve bir çevre arasındaki sürekli etkileşime dayanır. Öğrenme süreci, önceden hazırlanmış bir veri setine bağlı kalmadan, gerçek zamanlı olarak alınan verilere dayalı şekilde gerçekleşir [115,121,122].

Sinir ağları, çoklu giriş ve çıkış yapısına sahip sistemlerin modellemesi ve kontrolü için uygundur. Bu yöntem, adaptif bir öğrenme mekanizmasıyla farklı sistemlere kolayca uyum sağlayabilir. Hesaplama yükünün düşük olması, sinir ağlarını gerçek zamanlı uygulamalarda etkin bir çözüm haline getirir. Ancak, performansı büyük ölçüde, kullanılan öğrenme verilerinin kalitesine ve modelin tahmin doğruluğuna bağlıdır. Bunun yanı sıra, sinir ağlarının eğitim süreci zaman alabilir ve yakınsama süreci belirli durumlarda zorlayıcı olabilir [98,123,124].

Öğrenme temelli enerji yönetimi, ayrıca İHA'nın batarya ömrünü uzatabilir ve enerji tüketimini en aza indirebilir. Gerçek zamanlı veriler kullanılarak sistem, enerji yönetim stratejilerini sürekli olarak optimize eder ve bu da İHA'nın görev süresini ve uçuş verimliliğini artırır.

4. GÜNEŞ-MELEZ ENERJİLİ İNSANSIZ HAVA ARACI

Küresel enerji krizinin, artan petrol fiyatları ve iklim değişikliği ile derinleşmesi, ayrıca çevre kirliliğinin büyüyen etkileri, karbon emisyonlarını azaltmak amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını önemli bir araştırma alanı haline getirmiştir. Bu kapsamda, İHA’larda yenilenebilir enerji entegrasyonu üzerine yapılan çalışmalar artmıştır.

İHA’ların havada kalmasını ve kontrolünü sağlayan elektrikli tahrik sistemleri genellikle bataryalarla çalışmaktadır. Ancak bataryaların sınırlı enerji yoğunluğu, İHA’ların uçuş sürelerini kısıtlamaktadır. Bu kısıtlamaların aşılması ve uçuş dayanıklılığının artırılması amacıyla yenilenebilir enerji kaynaklarıyla desteklenen melez güç sistemleri geliştirilmiştir. Melez güç sistemleri; yakıt hücreleri, bataryalar, güneş hücreleri ve süperkapasitörler gibi farklı enerji bileşenlerini bir araya getirerek, güç kaynaklarının avantajlarını birleştirirken sınırlamalarını dengeleyebilmektedir. Örneğin, güneş hücreleriyle donatılmış İHA’lar, gündüz güneş enerjisini depolayarak, gece ise batarya enerjisini kullanarak günlerce havada kalabilmektedir. İlk çalışmalar, güneş hücrelerinin %59’a kadar enerji tasarrufu sağlayarak İHA kütlesini azaltabileceğini göstermiştir [19]. Bu nedenle, güneş enerjisinin etkin kullanımı, İHA’ların operasyonel verimliliği ve dayanıklılığı açısından kritik öneme sahiptir.

Son yıllarda, melez güç sistemlerine yönelik çalışmalar hız kazanmış ve farklı güç kaynakları arasında optimum enerji dağılımını sağlayan enerji yönetim sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler, mevcut enerji kaynakları arasında gerçek zamanlı güç dağılımını düzenlerken, tahrik bileşenlerinin ömrünü uzatarak genel enerji verimliliğini artırmayı hedeflemektedir. İHA’larda uygulanan enerji yönetim stratejileri genel olarak üç kategoriye ayrılmaktadır: optimizasyon tabanlı, öğrenme tabanlı ve kural tabanlı yaklaşımlar [115,125].

Bu çalışmada, sabit kanatlı mini VTOL İHA’lar için melez tahrik sistemlerinde irtifaya bağlı enerji depolamayı içeren kural tabanlı güç yönetim sisteminin performansı incelenmiştir. Çalışmada, güneş hücreleri, bataryalar ve süperkapasitörlerden oluşan melez sistemin modeli MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur. Uçuş sırasında ihtiyaç duyulan güç, temel uçuş dinamikleri denklemleri kullanılarak hesaplanmış ve Simulink platformuna entegre edilmiştir. Geliştirilen güç yönetim algoritması, ihtiyaç

duyulan gücü tanımlanan kural tabanlı durum makinesi kontrolü (state machine control, SMC) yöntemi ile güneş hücreleri, batarya ve süperkapasitörler arasında dağıtarak kalan enerjiyi irtifa enerjisi olarak depolamayı hedeflemektedir. Bu bağlamda, çalışma, enerji yönetim algoritmasının irtifa enerjisini dikkate alması nedeniyle literatüre özgün bir katkı sunmaktadır. Ayrıca, güneş hücreleriyle donatılmış tahrik sistemlerinin dinamik güç testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, sisteme yine kural tabanlı bir enerji yönetim tekniği olan bulanık mantıksal kontrol (Fuzzy Logic) ve optimizasyon tabanlı stratejiler sınıfına giren üst sezgisel algoritmalara (ECMS ve QPSO) dayalı enerji yönetimi uygulanmıştır. Bu bölümde öncelikle, sistemin yapısal özellikleri, uygulanan yöntem ve sistem bileşenlerinin modellemeleri sunulmuştur.

4.1. Materyal ve Yöntem

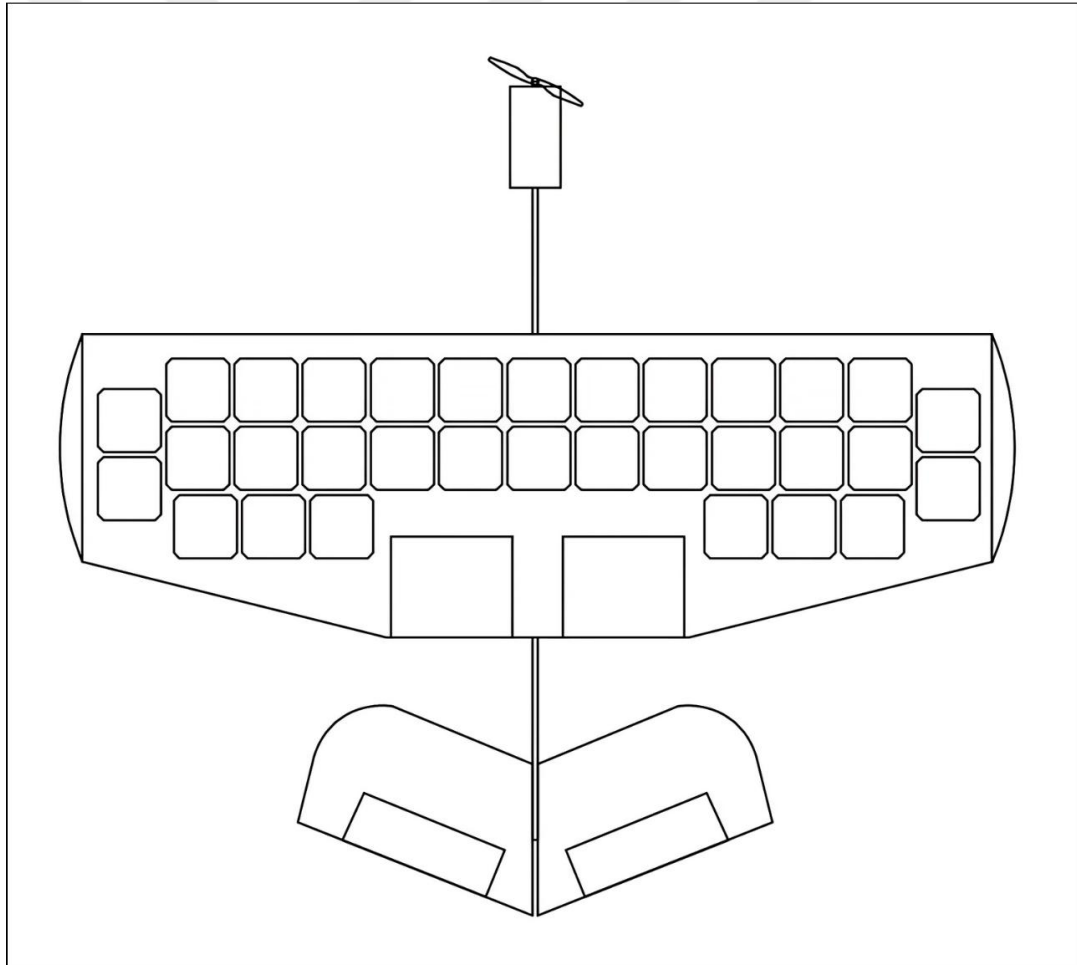
İHA'lar, kanat açıklıkları ve kütlelerine göre büyük, orta, küçük ve mikro olmak üzere dört ana gruba ayrılmaktadır [126]. Küçük İHA'lar ise kendi içinde küçük taktik İHA'lar (yakın menzilli İHA'lar), mini İHA'lar ve mikro İHA'lar olarak sınıflandırılabilir [65]. Güneş enerjili mini İHA'lar, batarya kapasiteleri ve enerji depolama sınırlamaları nedeniyle sürekli uçuş sürelerinde kısıtlamalar yaşamaktadır. Bu kısıtlamaların üstesinden gelmek ve güneş enerjisinden maksimum düzeyde yararlanabilmek amacıyla, büyük kanat açıklığına sahip daha büyük güneş enerjili İHA'ların kullanımı tercih edilmektedir.

VTOL (dikey kalkış ve iniş) tipi İHA'lar, sabit kanatlı (kanatlar ve gövde) ve çok rotorlu (yatay pervaneler) sistemlerin özelliklerini bir araya getirir. Bu özellikleri sayesinde, zorlu hava koşullarında, sınırlı alanlarda ve pist gereksinimi olmaksızın dikey olarak kalkış ve iniş yapabilme yeteneğine sahiptirler [70,127]. Ayrıca, VTOL İHA'ların kanat yüzeyleri güneş hücreleriyle kaplanmaya elverişli bir yapıya sahiptir.

Sabit kanatlı İHA'lar genellikle uzun menzilli uçuşlar ve düşük enerji tüketimi avantajları ile ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte, sabit kanatlı bir VTOL İHA, hem dikey kalkış ve iniş yeteneği hem de yatay uçuş sırasında enerji tasarrufu sağlama avantajlarını bir araya getirir.

Bu çalışmada **Şekil 4.1**'deki, sabit kanatlı, dikey kalkış ve iniş (VTOL) tipi bir mini İHA tasarlanmıştır. İHA'nın tasarımında, enerji verimliliği ve uzun süreli uçuş kapasitesini artırmak amacıyla 32 adet güneş hücresi kanat yüzeyine entegre

edilmiştir. Bu güneş panelleri, uçuş sırasında enerji ihtiyacını karşılamak ve bataryayı desteklemek için optimize edilmiştir. İHA'nın kanat yapısı, güneş hücrelerinin yerleştirilmesine olanak sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede sürekli uçuş süresi ve enerji verimliliğinin artırılmasına katkı sağlamak hedeflenmiştir. İHA, sabit kanat yapısına sahip olmanın yanı sıra, ön bölümde bir adet batarya ve birer adet motor-pervane düzeneği içermektedir. Gövdesinde ve kuyruk bölümünde yer alan yükseklik dümenleri (elevatörler), aracın ileri-geri (pitch) hareketlerini kontrol etmek için tasarlanmıştır. İHA'nın kuyruğu hem stabiliteyi artırmak hem de dengeli uçuş sağlamak için kritik bir bileşen olarak tasarlanmıştır. Tasarımda kullanılan yükseklik dümeni ve diğer hareketli kontrol yüzeyleri, İHA'nın tırmanma, alçalma ve yönlendirme gibi temel manevralarını gerçekleştirebilmesini sağlar [71].

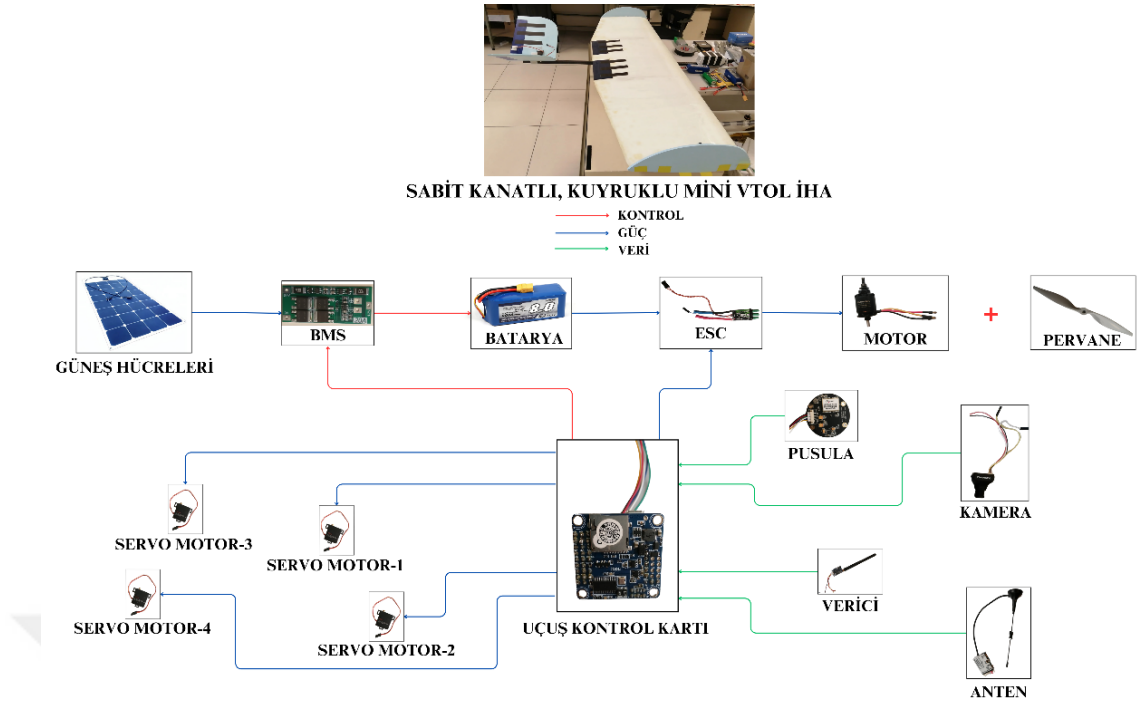


Şekil 4.1: Güneş-melez enerjili İHA'nın tasarımı.

4.2. Melez Güç Sisteminin Yapısı

Bu çalışmada Şekil 4.2’ de tasarlanan sabit kanatlı, VTOL tipi güneş enerji İHA’nın enerji topolojisi, melez bir güç yapısına sahiptir. Melez güç sistemi, güneş enerjisi ve batarya kaynaklı enerjiyi bir arada kullanarak enerji yönetiminde esneklik ve verimlilik sağlamaktadır. İHA’nın güç dağıtımı ve bileşen entegrasyonu, uçuş sırasında enerji ihtiyaçlarının dinamik bir şekilde karşılanmasına olanak tanımaktadır. Melez güç sisteminin temel bileşenleri, uçuş kontrol kartına bütünleşmiş bir şekilde çalışmaktadır.

- **Güneş Hücreleri:** Kanat yüzeyine entegre edilen güneş hücreleri, uçuş sırasında güneş ışığından elektrik enerjisi üretir. Üretilen enerji, hem doğrudan motor-pervane sistemi gibi bileşenlere güç sağlamakta hem de bataryanın şarj edilmesi için kullanılmaktadır.
- **Batarya:** Enerji depolama işlevi gören batarya, güneş enerjisinin yetersiz olduğu durumlarda veya yüksek enerji ihtiyacı anlarında devreye girmektedir. Batarya yönetim sistemi (BMS) ile kontrol edilmektedir.
- **Batarya Yönetim Sistemi (BMS):** Bataryanın güvenli ve verimli bir şekilde şarj-deşarj edilmesini sağlayan BMS, aynı zamanda güneşten elde edilen enerji kullanımını optimize etmektedir.
- **Elektronik Hız Kontrol Cihazı (ESC):** Motor-pervane sistemi için gerekli olan enerji akışını düzenleyerek motorların doğru şekilde çalışmasını sağlar.
- **Motor-Pervane Sistemi:** İHA’nın ileri hareketi ve VTOL modundaki dikey hareketleri için güç üretir. Sistem topolojisi tek elektrik motoru için oluşturulmuştur, ancak benzer bir yaklaşımla daha fazla motor ihtiyaç doğrultusunda sisteme eklenebilir.
- **Servo Motorlar:** Gövde ve kuyruğa yerleştirilen 4 adet servo motor, yükseklik dümeni ve diğer kontrol yüzeylerinin hareketini sağlar.
- **Sensörler ve Yardımcı Sistemler:** Pusula, kamera, anten ve verici gibi bileşenler, uçuş sırasında kontrol ve iletişim işlevlerini destekler.



Şekil 4.2: Güneş-melez enerjili mini VTOL İHA ve bileşenleri³.

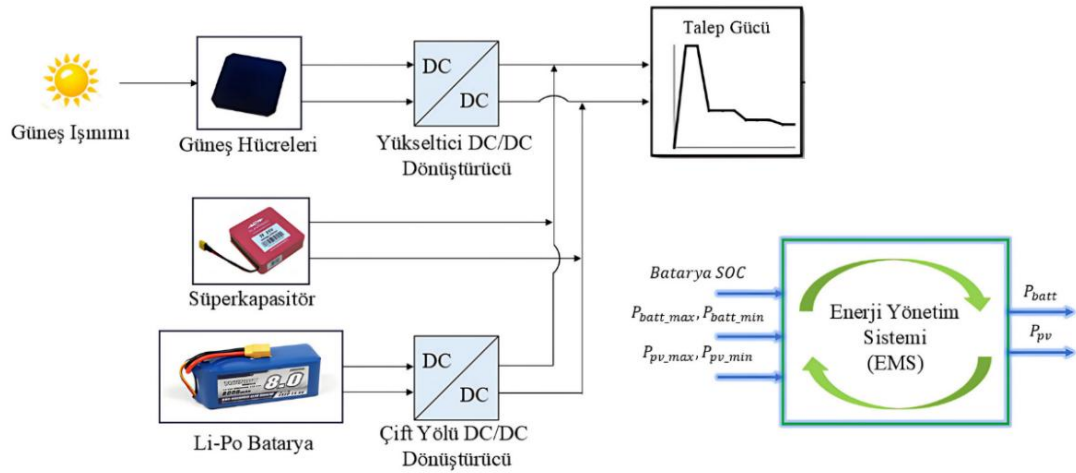
Bu şekilde uygulanan güç paylaşım algoritmasının akış diyagramı ise **Şekil 4.3**'te sunulmuştur [102]. Melez güç sisteminde, enerji üretimi ve tüketimi dinamik bir şekilde izlenerek, uçuş koşullarına uygun bir güç paylaşımı yapılmaktadır. Tasarlanan algoritmanın temel işleyişi şu şekildedir:

- Güneş hücrelerinden gelen enerji öncelikli olarak motor-pervane ve servo motor sistemine yönlendirilir.
- Enerji fazlası durumunda, önce batarya şarj edilir, sistemde hâlen daha, fazla enerji bulunuyorsa irtifa enerjisi olarak depolanır.
- Güneş enerjisinin yetersiz olduğu durumlarda, batarya devreye girerek enerji ihtiyacını karşılar.

Sonuç olarak, uçuş sırasında değişen enerji ihtiyaçlarına esnek bir şekilde cevap verebilen melez güç sistemi, İHA'nın enerji verimliliğini ve havada kalma süresini artırmaktadır.

³ Bu tez çalışması kapsamında Gebze Teknik Üniversitesi Uçuş Sistemleri Laboratuvarı'nda üretilmiş olan sabit kanatlı, tek motorlu, kuyruklu mini VTOL İHA.

Güneş enerjili mini VTOL İHA'nın melez enerji sisteminin topolojisi ise **Şekil 4.4**'te gösterilmiştir. Bu melez sistem, bir adet lityum-polimer batarya, 32 adet güneş hücresi ve bir adet süperkapasitörden oluşmaktadır. Güneş hücreleri ve batarya sisteme DC/DC dönüştürücüler aracılığıyla bağlanırken, süperkapasitör doğrudan bağlanır. Enerji yönetim sisteminin giriş değerleri; batarya şarj durumu (SOC), bataryanın maksimum ve minimum gücü ve güneş hücrelerinin maksimum ve minimum gücüdür. Enerji yönetim sisteminin çıkış değerleri ise güneş hücreleri ve bataryadan çekilen güçtür. Batarya ve güneş hücrelerinden çekilen akım, DC/DC dönüştürücüler tarafından kontrol edilir. Burada amaç, güneşten maksimum güç elde ederek talep gücünü karşılamaktır.



Şekil 4.4: Melez güç sistemi topolojisi.

Eşitlik (4.1), eşitlik (4.2), eşitlik (4.3) ve eşitlik (4.4) problemin kısıtlarıdır. Bu kısıtlara göre sistemden, kural tabanlı enerji yönetimi için algoritma oluşturularak ve optimizasyon tabanlı enerji yönetimi için ise amaç fonksiyonu tanımlanarak, maksimum değerin hesaplanması istenir. Böylece kullanım sınırları içinde kalınarak güneş hücrelerinden maksimum enerji elde edilecektir. Eşitlik (4.1) güneş hücrelerinin gücünün minimum ve maksimum değerlerini sınırlandırmaktadır. Batarya şarj durumu kontrolü eşitlik (4.2) ile sağlanır. Eşitlik (4.3) batarya gücünün minimum ve maksimum değerlerini sınırlandırmaktadır. Benzer şekilde eşitlik (4.4) sistem voltajını

sınırlandırmaktadır. Bu çalışmada enerji yönetim sisteminin amacı maksimum güneş enerjisi ile talep gücünü karşılamaktır. Ayrıca amaç fonksiyonunda bazı değişiklikler yapılarak veya birden çok amaç fonksiyonu oluşturularak sistemde başka özellikler kontrol edilebilir.

$$P_{pv_min} \leq P_{pv} \leq P_{pv_max} \quad (4.1)$$

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (4.2)$$

$$P_{bat_min} \leq P_{bat} \leq P_{bat_max} \quad (4.3)$$

$$V_{dc_min} \leq V_{dc} \leq V_{dc_max} \quad (4.4)$$

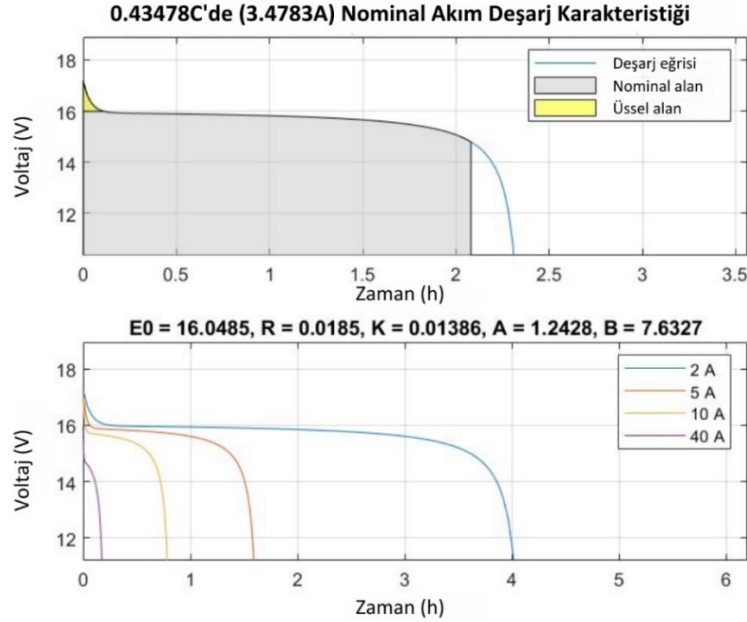
4.3. Batarya Modeli

Güneş hücrelerinden elde edilen enerji, sıcaklık ve nem gibi çalışma koşullarından önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu nedenle, güneş hücrelerinden üretilen elektrik enerjisinin depolanması, melez güç sistemleri içerisinde giriş ve çıkış arasındaki güç dengesini sağlamak için etkili bir çözüm olarak öne çıkar. Yüksek enerji yoğunlukları ve uzun ömürleri sayesinde, lityum-iyon bataryalar bu amaç doğrultusunda yaygın olarak tercih edilmektedir [38]. Bu çalışmada kullanılan batarya modeli, Matlab/Simulink/Simscape kütüphanesinde mevcut olan bir model üzerinden simüle edilmiştir [128].

Şekil 4.5, bu bataryanın deşarj eğrisini göstermektedir. Deşarj eğrisi, **Tablo 4.1**'de sunulan özelliklerin Simulink batarya modeli parametrelerine uygun şekilde ayarlanmasıyla elde edilmiştir. Bu özellikler doğrultusunda gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarına göre, bataryanın deşarj eğrisi **Şekil 4.5**'teki gibi hesaplanmıştır. Batarya deşarj olurken voltaj, kapasitenin tükenmesine bağlı olarak düşer ve yüksek akım çekildiğinde, iç direnç nedeniyle voltaj düşüşü hızlanır. Zamanla bataryanın voltajı, belirli bir değere oturur ve eksponansiyel olarak azalmaya devam

eder. Bu eğri, enerji yönetimi sisteminde, bataryanın ne kadar süre çalışabileceğini veya ne kadar sürede şarj olacağını tahmin etmek için kullanılır.

İncelenen sistemde, 8 Ah kapasiteye sahip lityum-polimer bir batarya modellenmiştir. Bu bataryanın temel özellikleri **Tablo 4.1**'de detaylandırılmıştır.



Şekil 4.5: Melez güç sistemindeki bataryanın deşarj eğrisi.

Tablo 4.1: Melez güç sistemindeki batarya özellikleri.

Özellikler	Değer	Birim
Model	Lityum-polimer	-
Kütle	1300	g
Nominal voltaj	14,8	V
Anma kapasitesi	8	Ah
Başlangıç şarj durumu	80	%

4.4. Süperkapasitör Modeli

Bir İHA'nın güç talebi, görevi sırasında sürekli olarak değişiklik gösterebilir ve ani yüksek güç ihtiyaçları ortaya çıkabilir. Bu gibi durumlarda, yüksek güç yoğunluğu sayesinde, süperkapasitörler melez sistemlerde toplam verimliliği artırmak ve ani yüksek güç taleplerini karşılamak amacıyla tamamlayıcı bir enerji kaynağı olarak işlev görür [80]. Bu özellikleri sayesinde, süperkapasitörlerin eklenmesiyle melez sistem,

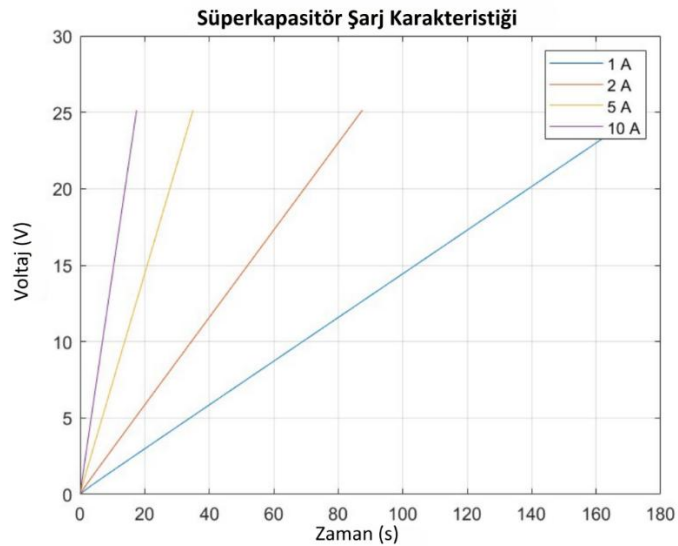
dinamik yükler karşısında daha kararlı bir hale gelir. Bununla birlikte, süperkapasitörlerin kullanımı, hem diğer enerji kaynaklarının ömrünü uzatmakta hem de İHA'nın manevra kabiliyetini artırmaktadır. Bu çalışmada kullanılan süperkapasitör modeli, Matlab/Simulink/Simscape kütüphanesinde bulunmaktadır ve simülasyonlar bu model üzerinden gerçekleştirilmiştir [128].

Tablo 4.2, güneş enerjili mini VTOL İHA'nın güç sisteminde kullanılan süperkapasitörün teknik özelliklerini göstermektedir.

Tablo 4.2: Melez güç sistemindeki süperkapasitör özellikleri.

Özellikler	Değer	Birim
Kütle	279	g
Maksimum nominal voltaj	25	V
Anma kapasitesi	7	F
Maksimum akım	10 (sürekli)	A
Özgül enerji	2,2	Wh/kg
Özgül güç	2,7	kW/kg

Şekil 4.6, süperkapasitörün şarj eğrisini sunmakta olup, bu eğri **Tablo 4.2**'de yer alan özelliklere göre modellenmiş ve hesaplanmıştır. Bu eğri, süperkapasitörün anlık voltaj seviyesini gösterir ve enerji yönetimi için kritik bir parametredir. Süperkapasitörün voltajı, depolanan yük miktarıyla doğru orantılıdır. Kapasitans ne kadar büyükse, yük için voltaj değişimi o kadar az olur. Şarj süresince voltaj ve akım doğrusal olarak artar, deşarj süresince ise doğrusal olarak azalarak süperkapasitör boşalır.



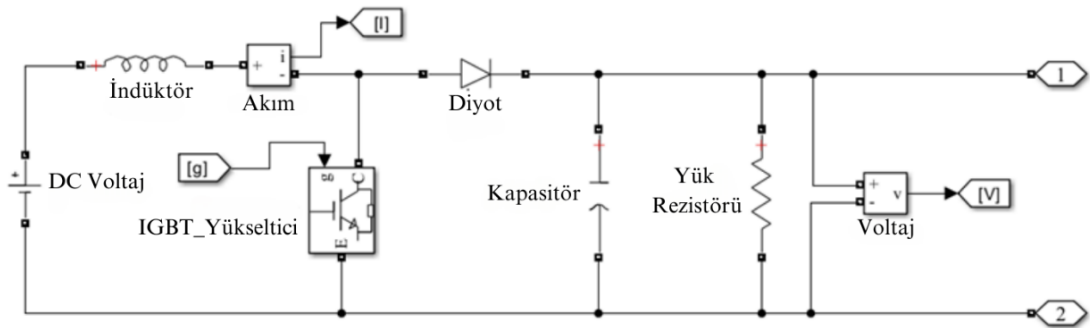
Şekil 4.6: Melez güç sisteminde süperkapasitör şarj eğrisi.

4.5. DC/DC Dönüştürücü Modeli

Melez sistem topolojilerinde, enerji yönetimi genellikle DC/DC dönüştürücüler yardımıyla aktif bir şekilde gerçekleştirilir. Enerji yönetim birimi, dönüştürücüler yardımıyla talep edilen gücü enerji kaynakları arasında en uygun şekilde dağıtır. **Şekil 4.4**'te görüldüğü gibi, batarya sisteme bir DC/DC dönüştürücü aracılığıyla bağlanırken, süperkapasitör doğrudan bağlanmıştır. Bu yapı, güneş hücresinin ürettiği enerjinin İHA'nın talep ettiği enerjiden fazla olduğu durumlarda bataryanın şarj edilmesine olanak tanır. Bu nedenle, enerji kaynaklarının ve topolojilerin seçimi, İHA'nın görev profili göz önünde bulundurularak yapılmalıdır.

Çift yönlü bir DC/DC dönüştürücü, bataryanın enerji depolaması, şarj edilmesi ve boşaltılması işlemlerinde kullanılmaktadır. Bu dönüştürücüler, enerji kaynağının şarj durumu ve akımın yönüne bağlı olarak şarj ve deşarj süreçlerini kontrol eder [88]. Her bir dönüştürücü, maksimum akım kapasitesi, verimlilik, güç/kütle oranı ve güç yoğunluğu gibi kendine özgü özelliklere sahiptir [20]. İHA uygulamaları için güç/kütle oranı ve dönüştürücünün dinamik tepki hızı, kalkış kütlesi ve uçuş verimliliği üzerinde doğrudan etkili olduğundan kritik öneme sahiptir [38].

Modelde kullanılan dönüştürücü, **Şekil 4.7**'de gösterildiği gibi bir indüktör, kapasitör, direnç ve diyot içeren izole edilmemiş çift yönlü bir DC/DC dönüştürücü devresinden oluşmaktadır [129,130,136].



Şekil 4.7: Melez güç sisteminde izole edilmemiş DC/DC yükseltici.

Güneş hücrelerinden gelen voltaj ve akımı düzenlemek, bataryanın voltaj ve akım değerlerini kontrol ederek enerji kayıplarını minimize etmek amacıyla sisteme bir oransal-integral (proportional-integral, PI) kontrolör eklenmiş ve bir DC/DC dönüştürücü bağlanmıştır [128].

Gündüz saatlerinde, güneş panelinden toplanan enerji DC/DC dönüştürücü aracılığıyla bataryayı şarj etmek için kullanılırken, güneş enerjisinin bulunmadığı durumlarda batarya, dönüştürücü aracılığıyla sistemi beslemek için deşarj edilir.

4.6. Güneş Hücresi Modeli

Güneş hücreleri, foton enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir ve negatif ile pozitif türde yarı iletkenlerden oluşur [131]. Bu iki tür yarı iletken birlikte bir çift oluşturur ve yeterli miktarda foton enerjisine maruz kaldığında, yarı iletkenlerdeki elektronlar serbest hale gelir. Sistem bir dış devreye bağlandığında, bu devre boyunca akım akışı gerçekleşir ve doğru akım (DC) formunda elektrik üretilir. Ancak, foton enerjisinin olmadığı durumlarda yarı iletkenler bir diyot gibi davranır ve enerji üretimi mümkün olmaz.

Güneş ışığının mevcut olduğu durumlarda, yüksek irtifalarda uzun süreli görevler için güneş hücreleri, sürekli ve etkili bir enerji kaynağı olarak dikkat çekmektedir. Bu sistemler, uçuş sürelerini uzatarak enerji maliyetlerini azaltma potansiyeli sunar ve aynı zamanda karbon salınımını düşürme açısından çevre dostu bir seçenek olarak öne çıkar.

Güneş enerjisiyle çalışan mini VTOL İHA'larda, güneş hücreleri enerji yönetim sisteminin ana enerji kaynağıdır. Bu hücrelerin performansı güneş ışıınımı ve sıcaklık gibi çevresel faktörlere bağlıdır [91] ve doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir [10,131]. Güneş hücrelerinin çalışma eğrilerinin belirlenmesi zaman alıcıdır [87], bu nedenle enerji üretiminin simüle edilmesi amacıyla MATLAB/Simulink gibi araçlar için modeller geliştirilmiştir. Güneş hücrelerinin enerji üretim kapasitesini hesaplamak için genellikle tek diyotlu devre modeli kullanılmaktadır [88]. Melez güç tahrik sisteminde yer alan güneş hücresi modeli, Matlab/Simulink/Simscape kütüphanesi üzerinden elde edilmiştir [128].

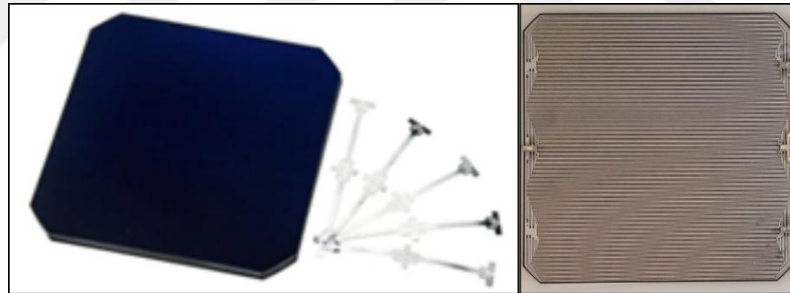
İHA uygulamalarında sıklıkla ince film ve silikon güneş hücreleri tercih edilmektedir [85]. Bunlar verimlilik, kütle, maliyet ve uygulanabilirlik açısından avantajlar sunar [84]. İnce film güneş hücrelerinin belirli uygulamalarda verimliliği silikon hücrelere göre daha yüksek olsa da, kütleleri silikon hücrelerin yaklaşık üç katıdır. Bu durum, İHA'larda genellikle silikon güneş hücrelerinin kullanılmasını teşvik eder.

Bu çalışmanın melez güç sisteminde, özellikleri **Tablo 4.3**'te sunulan ve **Şekil 4.8**'de gösterilen güneş hücresi modellenmiştir [132].

Modelde, güneş enerjili mini VTOL İHA'ya modül başına 32 adet güneş hücresi bağlanmış ve bu yapılandırmada İHA'nın çalışma gerilimi 18,368 V, hücrelerin maksimum güç kapasitesi ise 107,085 W olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.3: Melez güç sistemindeki C60 güneş hücresi (1 adet) özellikleri.

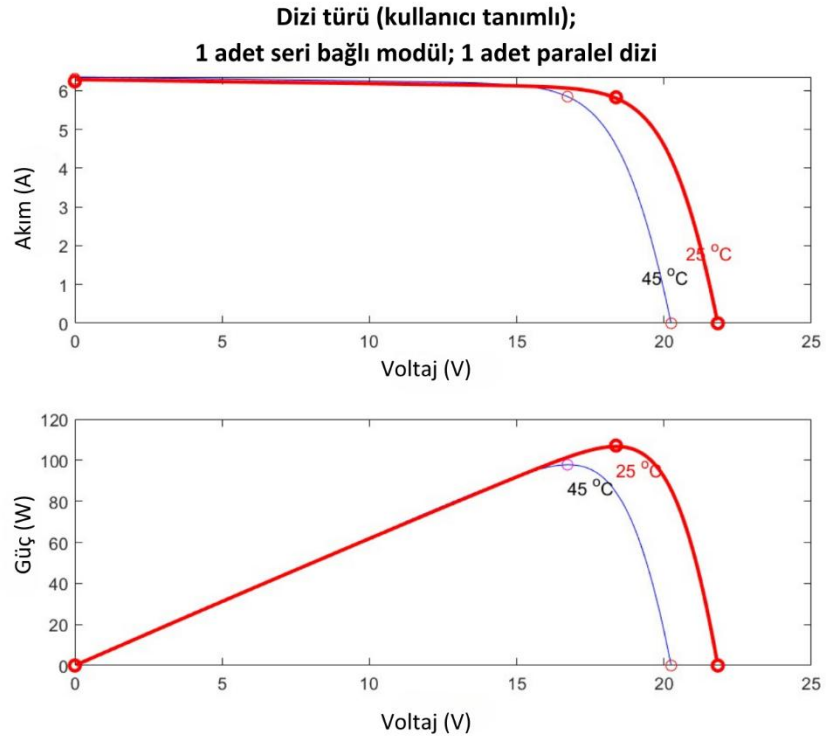
Özellikler	Değer	Birim
Malzeme	Yarı esnek monokristal	-
Ölçüler	$125 \times 125 \pm 0,5$	mm
Alan	0,015	m ²
Kütle	8	g
Verimlilik	21,8	%
Maksimum Güç	3,34	W
Maksimum güç noktası voltajı, $V_{pv,MPP}$	0,574	V
Maksimum güç noktası akımı, $I_{pv,MPP}$	5,83	A
Açık devre voltajı, V_{oc}	0,682	V
Kısa devre akımı, I_{sc}	6,24	A



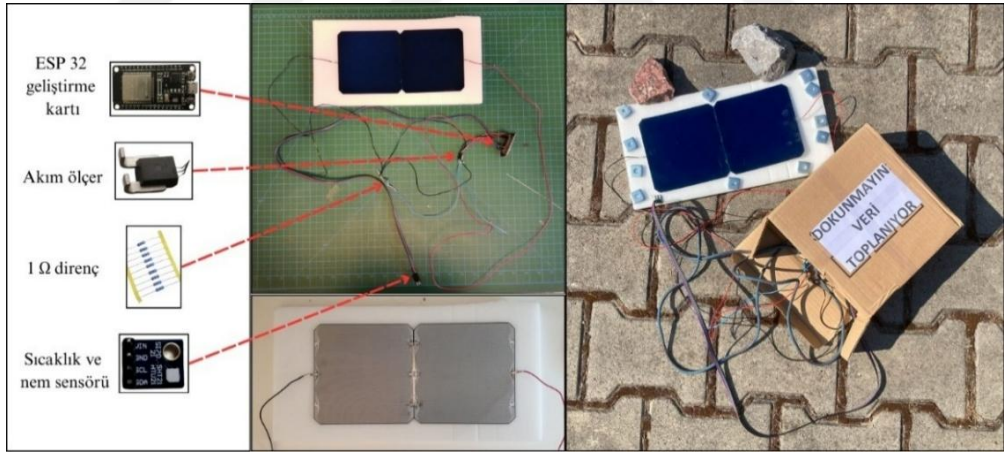
Şekil 4.8: Monokristal yarı esnek güneş hücresi.

Güneş hücresinden daha fazla elektrik üretilmesi için maksimum güç noktasının yakınılarındaki bölgelerde çalıştırılması gerekmektedir. Bu yüzden güneş hücresi sistemleri maksimum güç noktası takibine (MPPT) ihtiyaç duyarlar. Melez güç sisteminin güneş hücresi dizisinin I-V ve P-V değişimi **Şekil 4.9**'da gösterildiği gibi hesaplanmıştır [128].

Özellikleri **Tablo 4.3**'te verilen yarı esnek güneş hücreleri üzerinde lehim testleri gerçekleştirdik. Daha sonra, bu iki güneş hücresini seri olarak bağladık. ESP32, akım ölçer, direnç ve sıcaklık sensöründen oluşan **Şekil 4.10**'daki test düzeneğini hazırladık. Güneş hücrelerini güneşli bir günde test ettik ve **Şekil 4.11**'deki sıcaklık, nem ve voltaj değerleri verilerini elde ettik.



Şekil 4.9: Melez güç sisteminde güneş hücresi dizisinin I-V ve P-V değişimi.

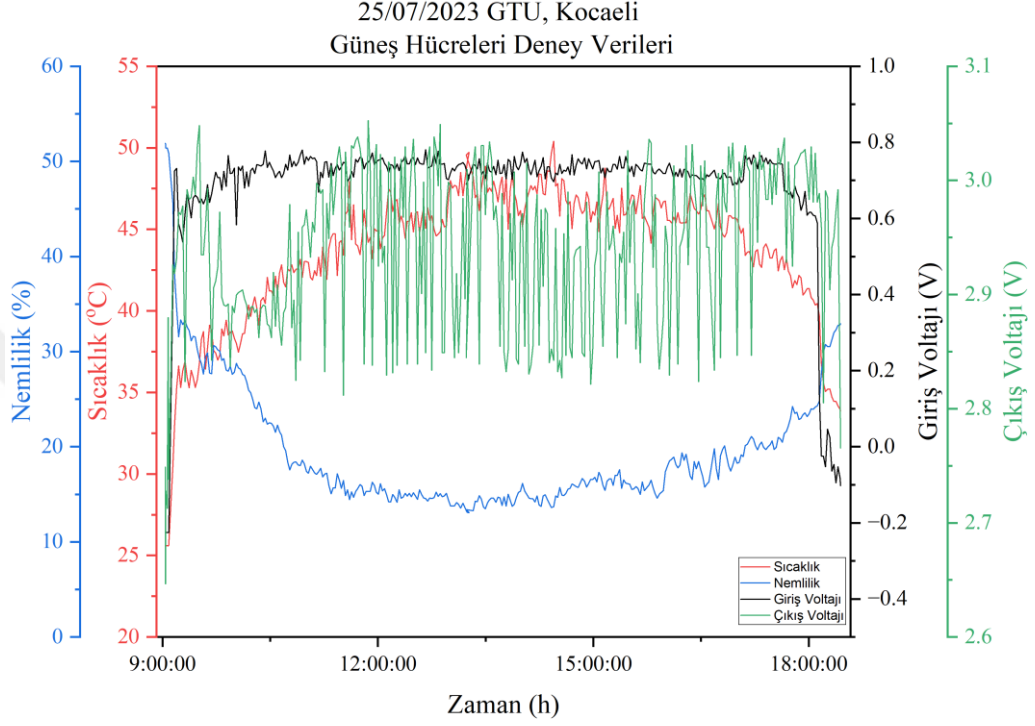


Şekil 4.10: Güneş hücrelerinin deney düzeneği⁴.

Sıcaklık artışı, güneş hücrelerinin verimliliğini düşüren bir etkidir, çünkü sıcaklık arttıkça hücrelerin band aralığı daralır ve bu durum voltaj kaybına neden olur. Buna karşın, nemliliğin azalması yüzey performansını iyileştirebilir. Nem, genellikle yüzeylerde yoğunlaşma veya izolasyon kayıpları nedeniyle güneş hücrelerinin performansını olumsuz etkileyebilir. Yüksek sıcaklıklarda nemin azalması, hücre

⁴ Bu tez kapsamında, Gebze Teknik Üniversitesi Uçuş Sistemleri Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen güneş hücrelerinin deneysel çalışması.

yüzeyindeki yoğuşma etkilerini azaltarak bir avantaj sağlayabilir. Giriş ve çıkış voltajında oluşan dalgalanma, güneş hücrelerinin genelde kararlı bir şekilde enerji topladığını ve ciddi bir performans düşüklüğü yaşanmadığını göstermektedir. Ayrıca, elde edilen bu veriler uçağın rotasını çizmek için kullanılabilir.



Şekil 4.11: Güneş hücresi deney verileri.

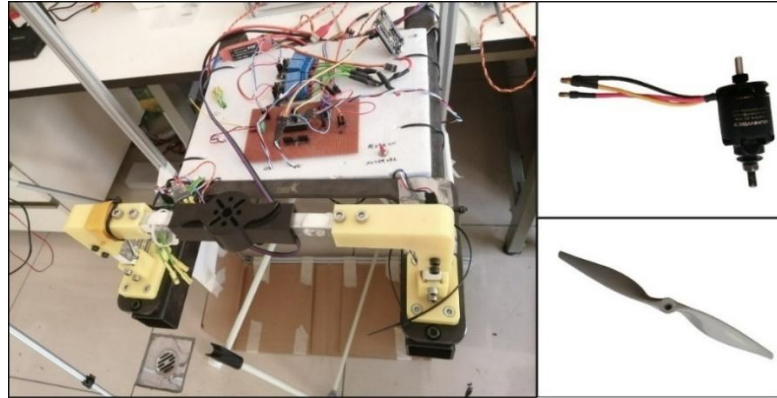
4.7. Talep Gücü Hesabı

Melez güç sistemiyle uyumlu bir şekilde çalışabilecek motor-pervane sisteminin seçiminde **Şekil 4.12**'de test düzeneği kullanılmıştır.

Test sonucu, **Tablo 4.4**'te dikey kalkış ve iniş sırasında yüksek itki sağlamak için seçilen motorun itki, akım, güç ve verimlilik verileri elde edilmiştir. Buna göre seyir ve dayanıklılık modlarında ise düşük güç tüketimiyle maksimum verim elde etmek amacıyla pervane çapı ve hatvesi seçilmiştir. Böylece İHA farklı uçuş modlarındaki güç gereksinimlerini dengeleyebilir. Ayrıca seçilen motorun özellikleri talep gücü hesabında da kullanılmaktadır.

Tablo 4.5, hesaplamalarda kullanılan güneş enerjili mini VTOL İHA'nın kütle parametrelerini içermektedir. Bu verilere dayanarak, kalkış, maksimum hız,

maksimum tırmanma oranı ve dayanıklılık modları için gerekli güç değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.12: Motor-pervane deney düzeneği⁵.

Tablo 4.4: 920kV motor ve 11x7 pervane test sonuçları.

Voltaj (V)	İtki (g)	Akım (A)	Güç (W)	Verim (g/W)
14,8	500	4,7	6,56	7,19
14,8	750	8,2	121,36	6,18
14,8	1000	12,3	182,04	5,49
14,8	1250	16,8	248,64	5,03
14,8	1500	21,7	321,16	4,67
14,8	1750	26,5	392,20	4,46
14,8	2000	33,1	489,88	4,08
14,8	2250	39,4	583,12	3,86
14,8	2540	45	666,00	3,81

Yük profilinin hesaplamaları, eşitlik (4.5), eşitlik (4.6) ve eşitlik (4.7) temel alınarak gerçekleştirilmiştir [71].

İHA'nın kalkış modu (takeoff) için gereken güç eşitlik (4.5) ile hesaplanır [71].

$$P_{tf} = \frac{T_r}{W} W_0 V_{tf} \quad (4.5)$$

Seyir modu (cruise) için gereken güç eşitlik (4.6) ile hesaplanır [71].

⁵ Bu tez çalışması kapsamında yararlanılan, Gebze Teknik Üniversitesi Uçuş Sistemleri Laboratuvarı'nda bulunan motor-pervane deney düzeneği.

$$P_{cr} = \sqrt{\frac{2W_{MC}^3 C_D^2}{\rho_{\infty} S C_L^3}} \quad (4.6)$$

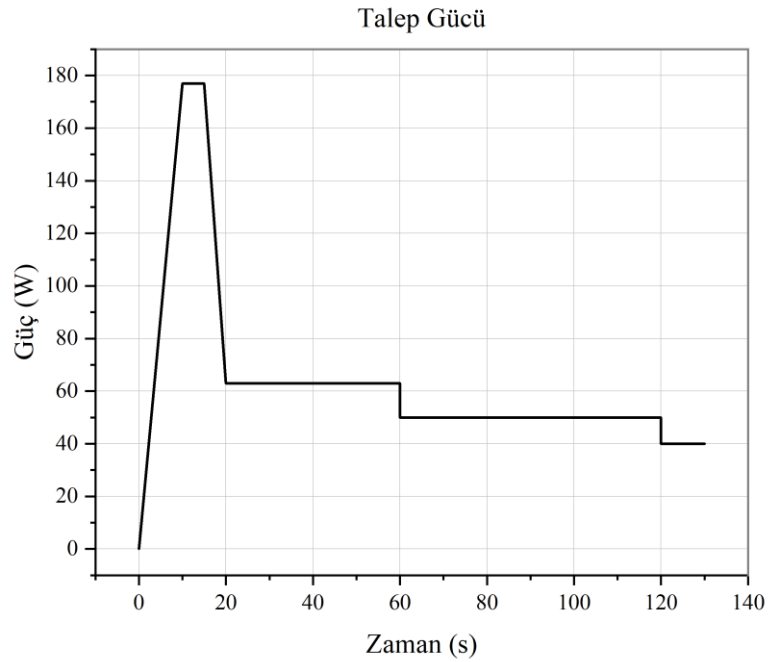
Tırmanma modu (climb) için gereken güç eşitlik (4.7) ile hesaplanır [71].

$$\left(\frac{R}{C}\right)_{max} = \frac{\eta_{pr} P_{climb}}{W} - \left(\frac{2}{\rho_{\infty}} \sqrt{\frac{K}{3C_{D,0}}} \frac{W}{S}\right)^{1/2} \frac{1.155}{\left(\frac{L}{D}\right)_{max}} \quad (4.7)$$

Tablo 4.5: Melez güç sisteminde güneş enerjili mini VTOL İHA için kütle tahmini.

Özellikler	Değer	Birim
Güneş hücreleri	256	g
Motor	56	g
Batarya	1300	g
İHA'nın kaplamalı kütlesi (boş)	1580	g
İHA'nın toplam kütlesi (dolu)	3300	g

Melez güç sistemine sahip güneş enerjili mini VTOL İHA'nın yük profiline ilişkin veriler **Şekil 4.13**'te sunulmaktadır. İHA'nın itki gücü gereksinimleri, uçuş modlarına (kalkış, tırmanma, seyir, dayanıklılık ve iniş) bağlı olarak değişiklik göstermektedir.



Şekil 4.13: Melez tahrik sistemi için güç talebi hesabı.

5. GÜNEŞ-MELEZ ENERJİLİ İHA'YA UYGULANAN ENERJİ YÖNETİM ALGORİTMALARI

Enerji yönetim stratejileri (energy management strategies, EMS), İHA'ların performansını artırmak ve görev sürelerini optimize etmek için kritik öneme sahiptir. İHA'lara uygulanan EMS yaklaşımları, genellikle üç ana gruba ayrılmaktadır: kural tabanlı, öğrenme tabanlı ve optimizasyon tabanlı yöntemler [15,56,57].

Kural tabanlı yöntemler, önceden belirlenmiş kurallar ve karar mekanizmalarına dayanarak çalışır [104,106,111]. Bu yöntemler, düşük hesaplama yükleri ve çevrimiçi uygulanabilirlik avantajlarıyla öne çıkar. Ancak, karmaşık sistem dinamiklerine karşı yeterince esnek olmayabilirler [56,57]. Optimizasyon tabanlı stratejiler ise enerji kaynaklarının etkin kullanımını sağlamak için matematiksel modeller ve algoritmalar kullanır. Bu yöntemler, enerji tüketimini minimize ederek veya görev performansını maksimize ederek sistem verimliliğini artırmayı hedefler [104,106-108]. Özellikle, melez enerji sistemine sahip İHA'lar için güç kaynaklarının optimum dağılımı bu yöntemlerle sağlanabilir.

Bu çalışmada, güneş enerjili mini VTOL İHA için geliştirilmiş enerji yönetim algoritmaları hem kural tabanlı hem de optimizasyon tabanlı yöntemlerle incelenmiştir. Kural tabanlı yöntem, düşük hesaplama yükü avantajı ile gerçek zamanlı uygulanabilirliği sağlarken; optimizasyon tabanlı yaklaşım, enerji kaynaklarının etkin ve verimli bir şekilde kullanılmasını hedeflemiştir. Sunulan algoritmaların performansı, Simulink ortamında gerçekleştirilen benzetimlerle Bölüm 5 ve 6'da değerlendirilmiştir.

Enerji yönetim sistemi, **Şekil 4.4**'te gösterilen 8 Ah kapasiteli li-po batarya, 7 F kapasiteli süperkapasitör ve 107 W gücündeki güneş hücresi paketini içeren melez güç sistemi üzerinde uygulanmıştır. Bu sistemde, güneş hücreleri ve batarya, DC/DC dönüştürücüler aracılığıyla sisteme entegre edilirken, süperkapasitör doğrudan bağlanmıştır. Talep edilen güç, **Şekil 4.13**'te verilen grafikte gösterilmiş olup, Bölüm 4.7'de hesaplanarak melez güç sistemine girdi olarak tanımlanmıştır.

Simülasyon çalışmaları, MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir [133]. Güneş hücresi [134], batarya [78] ve süperkapasitör [81] modellerinin geliştirilmesinde MATLAB/Simulink/Simscape (R2023b) kütüphanesi kullanılmıştır.

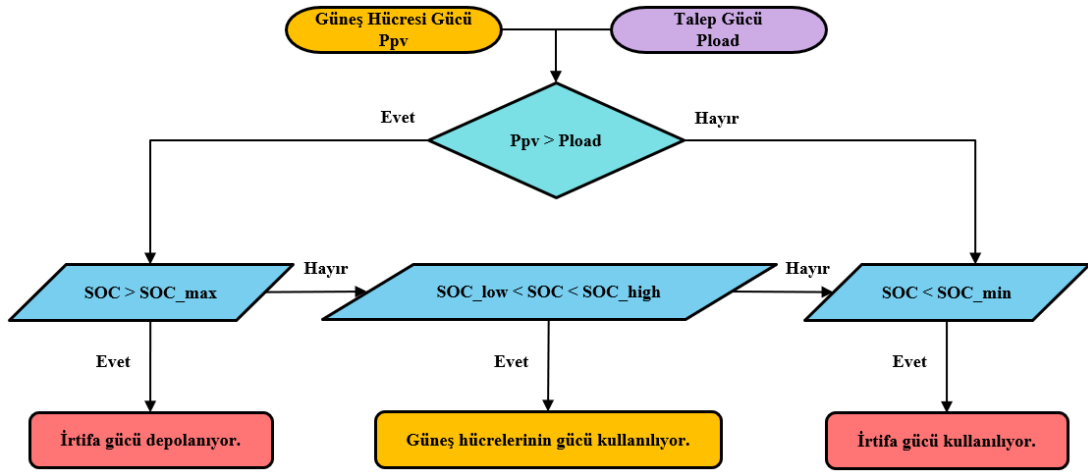
Ayrıca, uygulanan algoritmaların fonksiyonları, MATLAB/Simulink ortamında fonksiyon bloğu aracılığıyla yazılarak simülasyon sistemine entegre edilmiştir.

5.1. Durum Makinası Kontrol Algoritması (SMC)

Durum makinası kontrolü (SMC), bir sistemin farklı durumlar arasında geçiş yaparak çalıştığı üst sezgisel olmayan (non-metaheuristic), kural tabanlı bir kontrol yöntemi olup, her bir durum önceden belirlenmiş kurallara dayalıdır [22,57]. SMC'nin en önemli avantajlarından biri, sistemin durumlar arasında sistematik ve etkin bir şekilde geçiş yapmasını sağlamasıdır. Yüksek hassasiyetli kontrol sağlar ancak karmaşık matematiksel modelleme gerektirir. Durum geçişleri, genellikle if-else mantığına veya belirli eşik değerlerine dayalıdır. **Şekil 5.1**, bu enerji yönetim algoritmasının durum diyagramını göstermektedir [111].

SMC'nin temel prensibi, İHA'nın enerji sistemini, enerji kaynaklarının kullanımını optimize edecek şekilde kontrol etmek ve talep gücünü karşılamaktır. Bu çalışmada SMC'nin durumları şu şekilde tanımlanmıştır:

- **Durum 1:** Güneş hücrelerinin maksimum gücü (P_{pv}), talep gücünden (P_{load}) daha yüksektir. Bataryanın şarj durumu (SOC) maksimum kapasitededir ve şarj edilmeye gerek yoktur. Bu durumda, sistem fazla enerjiyi potansiyel enerji olarak irtifa enerjisi (P_{alt}) şeklinde depolar. Depolama stratejisi, İHA'nın maksimum irtifasını 25 metreyle sınırlandırır.
- **Durum 2:** Güneş hücrelerinin gücü, talep gücünü tam olarak karşılar. Bataryanın şarj durumu (SOC) yeterlidir, dolayısıyla ek bir enerji kaynağı kullanılmaz.
- **Durum 3:** Talep gücü (P_{load}), güneş hücrelerinin maksimum gücünden (P_{pv}) daha yüksektir. Güneş hücreleri güç talebini tek başına karşılayamaz, eksik kalan enerji, batarya (P_{batt}) tarafından sağlanır. Eğer güneş ve batarya enerjisi tükenirse, depolanan potansiyel enerji (P_{alt}) devreye girer ve sistemin çalışmasını sağlar.



Şekil 5.1: SMC algoritması durum diyagramı.

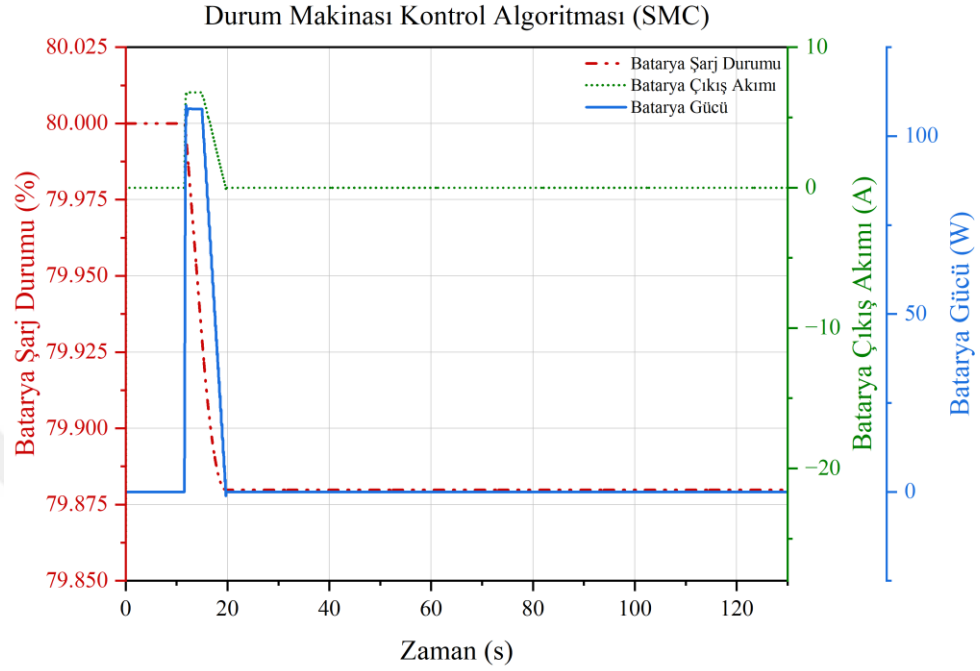
SMC, çevrimiçi kontrol ve düşük hesaplama maliyeti gibi avantajlar sunar. Ayrıca, duruma dayalı enerji yönetimi sayesinde, enerji kaynakları daha verimli kullanılabilir. Örneğin, fazla enerjinin potansiyel enerji olarak depolanması, bataryanın aşırı şarjdan korunmasını ve enerji dengesinin sağlanmasını destekler.

Bu çalışmada, güneş enerjisiyle çalışan mini VTOL İHA'nın talep gücünün, kural tabanlı bir enerji yönetim algoritması (rule-based energy management strategy) kullanılarak güneş hücreleri ve batarya arasında nasıl paylaştırıldığı incelenmiştir.

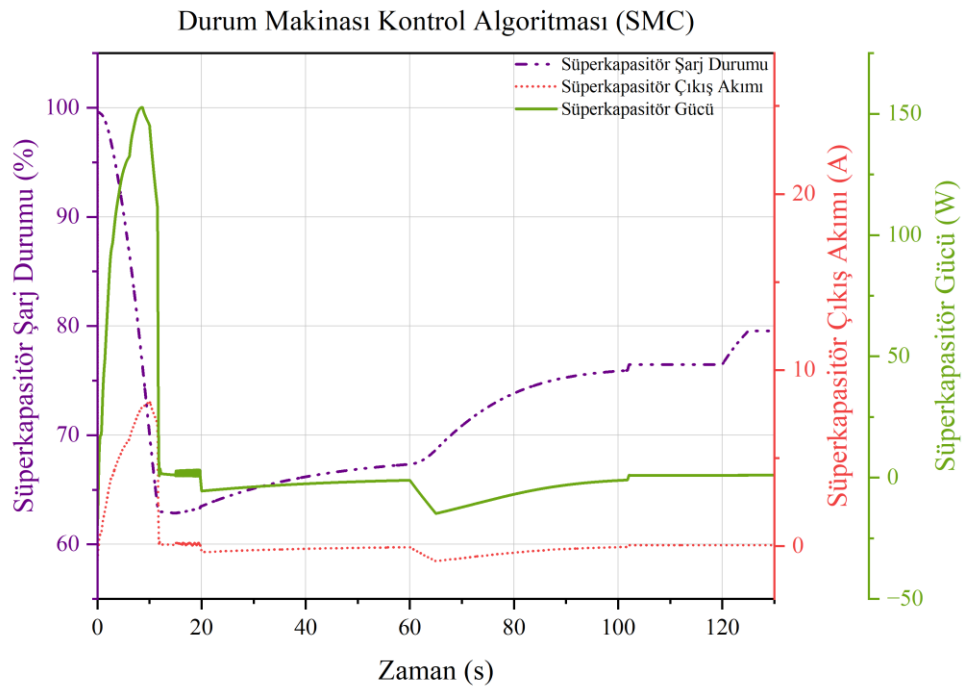
Şekil 5.2'de, simülasyon sırasında bataryanın şarj durumu gösterilmektedir. Simülasyonda, başlangıçta bataryanın şarj durumu %80 olarak belirlenmiştir. Grafiğe göre, güneş hücreleri güç talebini tek başına karşılayamadığı için 10 ile 20. saniyeler arasında bataryadan güç çekilmiştir. Bataryanın şarj seviyesi %79,88'e ulaştığında, batarya devre dışı kalmıştır. Bu süreçte, bataryadan çekilen maksimum gücün yaklaşık 105 W olduğu tespit edilmiştir. 20. saniyeden itibaren ise güneş hücrelerinin ürettiği güç, talep edilen gücü aşmış ve batarya kullanımına ihtiyaç duyulmamıştır. 0-20. saniyeler arasında bataryadan geçen akım -25 ile 6,78 A arasında değişmektedir.

Şekil 5.3'te, süperkapasitörün şarj durumu gösterilmektedir. Süperkapasitör, herhangi bir DC/DC dönüştürücü olmaksızın doğrudan bara hattına bağlanmıştır. Başlangıçta süperkapasitörün şarj durumu %98 olarak belirlenmiştir ve simülasyon süresince değişim göstermiştir. Simülasyon sırasında süperkapasitörün güç değişiminin -16 W ile 150 W arasında olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, 40-60 ve 100-130 saniye aralıklarında süperkapasitör sisteme güç sağlamamış, ancak diğer enerji bileşenlerinden aldığı güç sayesinde SOC seviyesinde bir artış meydana gelmiştir.

Simülasyon boyunca süperkapasitörden geçen akım -1 ile 25 A arasında değişmektedir.

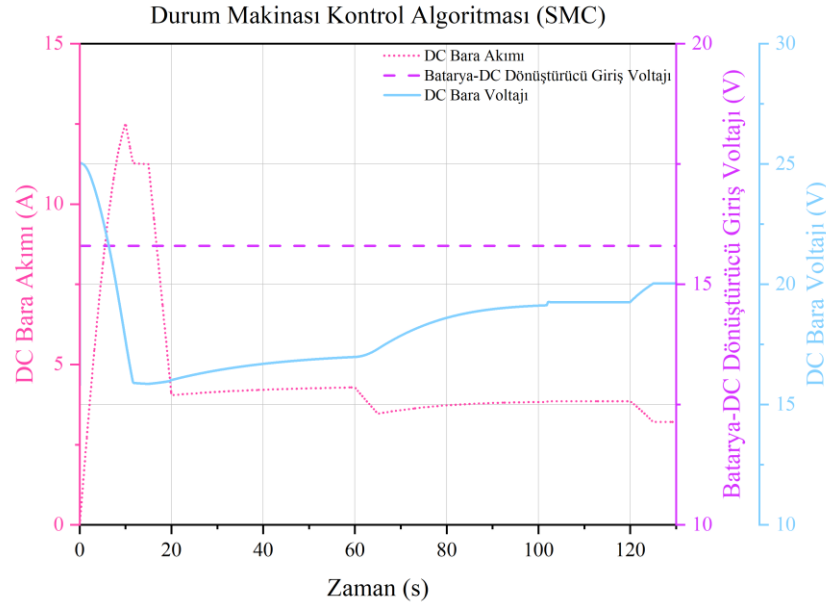


Şekil 5.2: SMC algoritmasında bataryanın şarj durumu, akım ve güç değişimi.



Şekil 5.3: SMC algoritmasında süperkapasitörün şarj durumu, akım ve güç değişimi.

Şekil 5.4'de, batarya-DC dönüştürücü giriş voltajı, DC bara voltajı ve akımındaki değişim gösterilmektedir. Modelde, bataryanın DC dönüştürücü giriş voltajı 15,8 V olarak hesaplanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, DC bara voltajının 15,8 V ile 25 V arasında ve DC bara akımının 0 A ile 12,5 A arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

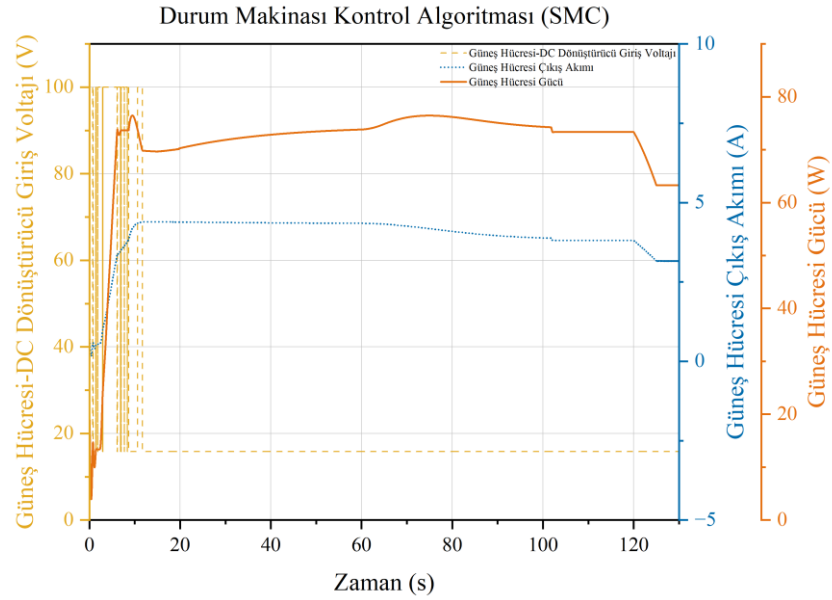


Şekil 5.4: SMC algoritmasında batarya-DC dönüştürücü giriş gerilimi ve DC bara gerilim, akım değişimi.

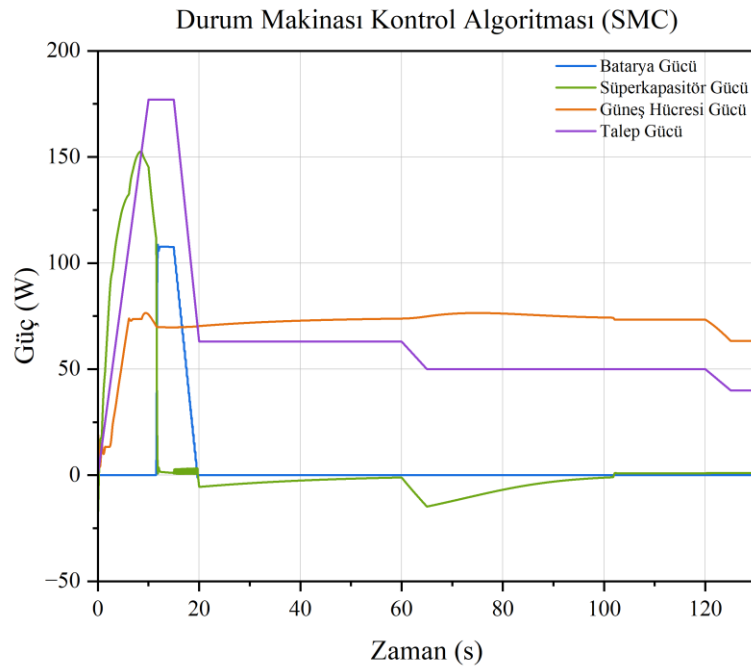
Güneş hücresi modülünün voltaj, akım ve güç değişimi **Şekil 5.5'**te gösterilmiştir. Voltaj değeri 15 V ve çıkış akımı 0 ile 4,5 A aralığında gözlemlenmiştir. Güç, 10. saniyede 77 W'lık maksimum değere ulaşmıştır. **Şekil 4.9'**da, güneş hücresi modülünün sağladığı değer, sistemin çalışmadığı durumda beklenen doğrusal değeri temsil etmektedir. Ancak, sistem çalışırken, enerji yönetim stratejisine göre güneş hücreleri, ihtiyaç duyduğunda bataryadan ve süperkapasitörden ek güç çekerek güç talebini karşılamaktadır. Bu durum, sistemin çalışma süresince güç dalgalanmalarına yol açmaktadır.

Şekil 5.6'da, simülasyon sırasında güç paylaşımındaki değişim gösterilmektedir. Talep gücündeki ilk artışın, yaklaşık 10 saniye boyunca güneş hücreleri ve süperkapasitör tarafından karşılandığı gözlemlenmektedir. Ardından, 5 saniye süresince sabit kalan maksimum talep gücü, yalnızca güneş hücreleri tarafından karşılanmıştır. Sonraki aşamada, talep gücü 15. ile 20. saniye arasında azalmış ve bu

süre boyunca güç talebi, güneş hücreleri ile batarya tarafından karşılanmıştır. 20. saniyeden sonra, güneş hücrelerinin ürettiği güç, talep edilen gücü aşmış ve fazla güç, irtifa olarak depolanmıştır. Bu depolanan irtifa enerjisi, daha sonra süperkapasitör ve bataryaların şarj edilmesinde kullanılmıştır.



Şekil 5.5: SMC algoritmasında güneş hücrelerinin voltaj, akım ve güç değişimi.



Şekil 5.6: SMC algoritmasında kaynaklar arasındaki güç paylaşımındaki değişim.

5.2. Bulanık Mantık Stratejisi (Fuzzy Logic)

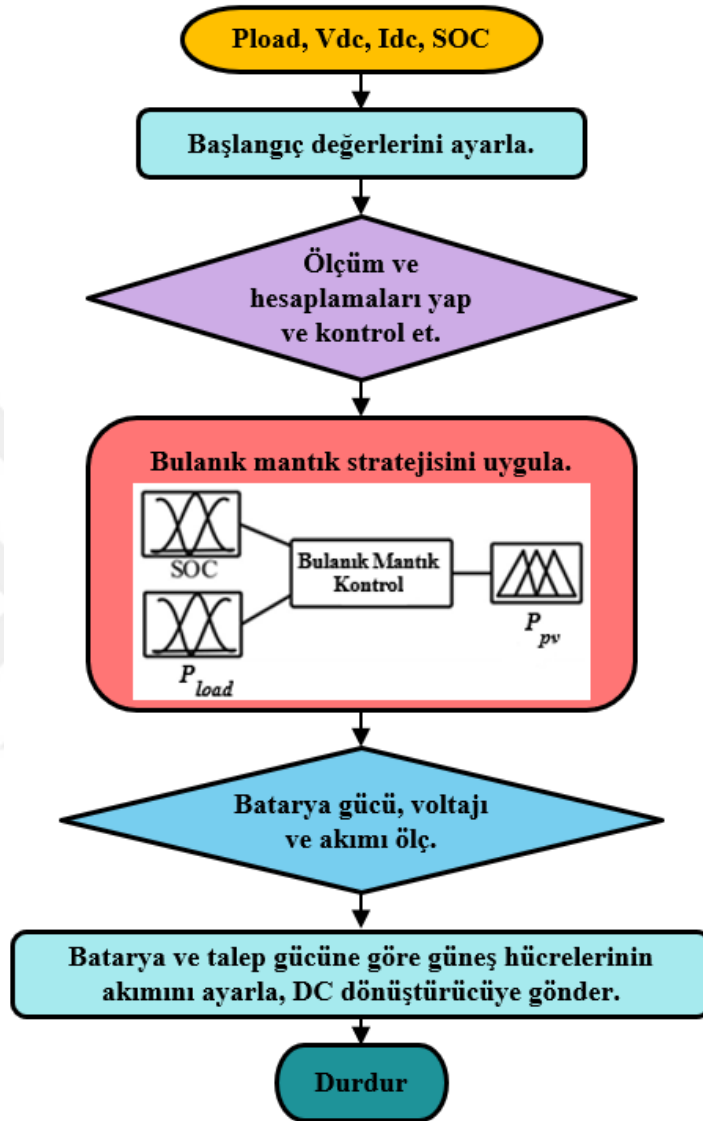
Bulanık mantık (Fuzzy Logic) stratejisi, melez İHA'ların enerji yönetim sistemlerinde, geleneksel kontrol yöntemlerine kıyasla esnek ve daha verimli çözümler sunan üst sezgisel (metaheuristic), kural tabanlı bir kontrol algoritması olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır [57,137]. Özellikle, güneş enerjisi, batarya ve diğer enerji kaynaklarının karmaşık ve değişken doğası, klasik kontrol yöntemlerinin yetersiz kalmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, bulanık mantık, kural tabanlı enerji yönetim stratejileri arasında daha dinamik ve doğru bir güç dağılımı sağlamak için tercih edilmektedir.

Bulanık mantık, belirli bir girdi-çıkı ilişkisi kurarak, sistemdeki enerji kaynakları arasındaki güç dağılımı belirsizliklerini ve karmaşıklıkları çözmek için kullanılan bir tekniktir [54,141,144]. Böylece, enerji yönetim stratejilerinde esneklik sağlar ve sistemin ani değişen güç taleplerine yanıt vermesini kolaylaştırır. Hem kural tabanlı hem de sezgisel bir yaklaşım olmasından dolayı geleneksel kontrol sistemlerinin öngörülemeyen durumlar karşısında gösterdiği zayıflıkları giderir. Kural kümesinin iyi tanımlanması, performansı doğrudan etkiler. Enerji kaynakları arasında, özellikle güneş enerjisi ve batarya arasındaki enerji akışını dengelemeye yardımcı olur. Güneş enerjisinin üretimi, çevresel koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Bataryaların şarj durumu ve güç talebi de zamanla değişebilir. Bu belirsizlikleri etkili bir şekilde yönetmek için bulanık mantık tabanlı bir kontrol stratejisi, enerji kaynaklarının optimal şekilde yönlendirilmesini sağlar.

Şekil 5.7'de durum diyagramı verilen güneş enerjili melez güç sisteminin enerji yönetimine göre, bulanık mantık stratejisi kullanılarak optimize edilmiş bir kontrol algoritması tasarlanmıştır.

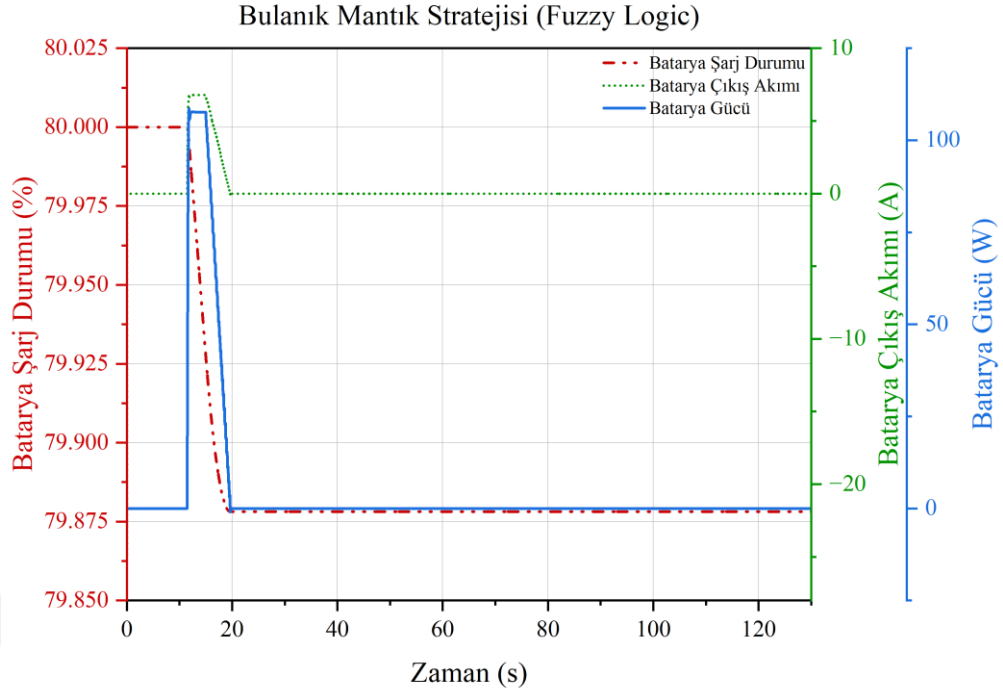
Bu akış diyagramında, talep gücü, DC dönüştürücü gerilimi ve akımı ile batarya doluluk oranı giriş değerleri olarak alınmıştır. İlk olarak, sistemin başlangıç parametreleri ayarlanarak kontrol döngüsü başlatılır. Ardından, sistemden alınan anlık ölçümler ve hesaplamalar yapılarak giriş değerleri değerlendirilir ve kontrol koşulları doğrulanır. Bulanık mantık kontrol stratejisi, bu giriş değerlerini işleyerek sistemin enerji yönetimini sağlar. Bu doğrultuda, bataryanın gücü, voltajı ve akımı ölçülür. Batarya ve talep gücü değerlerine dayanarak, güneş hücrelerinden elde edilmesi gereken akım miktarı dinamik bir şekilde ayarlanır. Güneş hücrelerinden elde edilen

enerji, sistemin gereksinimlerini karşılamak üzere DC dönüştürücüye iletilir. Bu yaklaşım, sistemin enerji kaynaklarının verimli bir şekilde yönetilmesini ve farklı çalışma koşullarına adaptasyonunu mümkün kılmaktadır.



Şekil 5.7: Fuzzy Logic algoritması durum diyagramı.

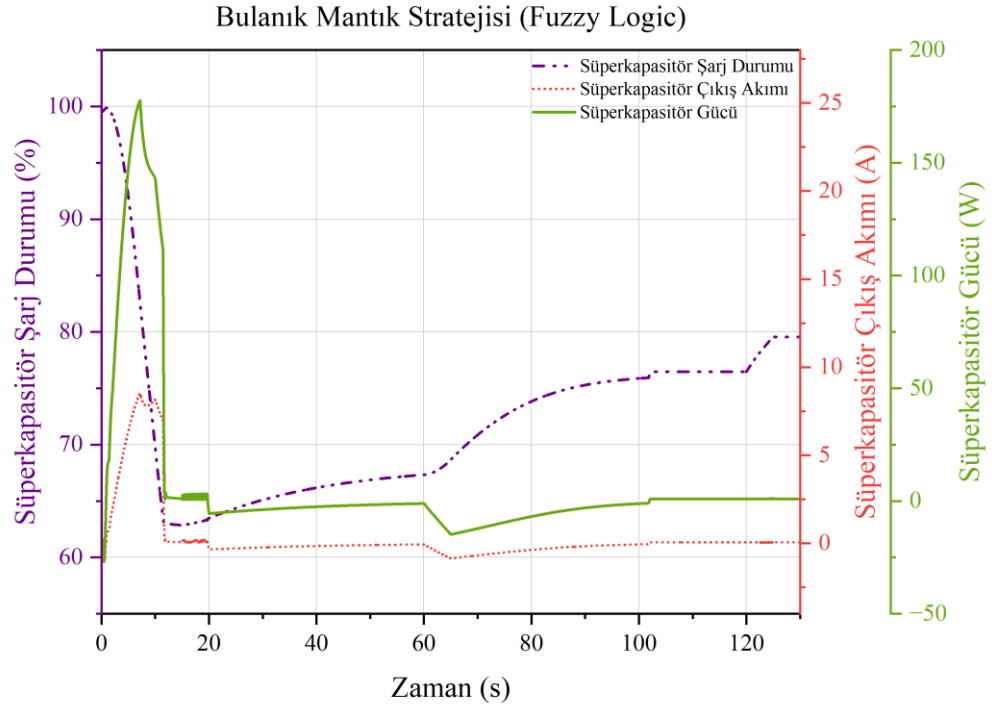
Şekil 5.8’de, bataryanın şarj durumu başlangıçta %80’dir. 10 ile 20. saniyeler arasında, güneş hücreleri güç talebini tek başına karşılayamaz ve bataryadan güç çekilmesiyle SOC değeri %79,88 seviyesine düşer. 20. saniyede batarya devre dışı kalmıştır. Bu süreçte, bataryadan çekilen maksimum güç yaklaşık 108 W olarak tespit edilmiştir. 20. saniyeden itibaren ise güneş hücreleri, talep edilen gücün üzerine çıkmış ve batarya kullanımına ihtiyaç kalmamıştır. Simülasyon süresince, bataryadan geçen akımın 0-20. saniyeler arasında -25 ile 6,78 A aralığında değiştiği görülmektedir.



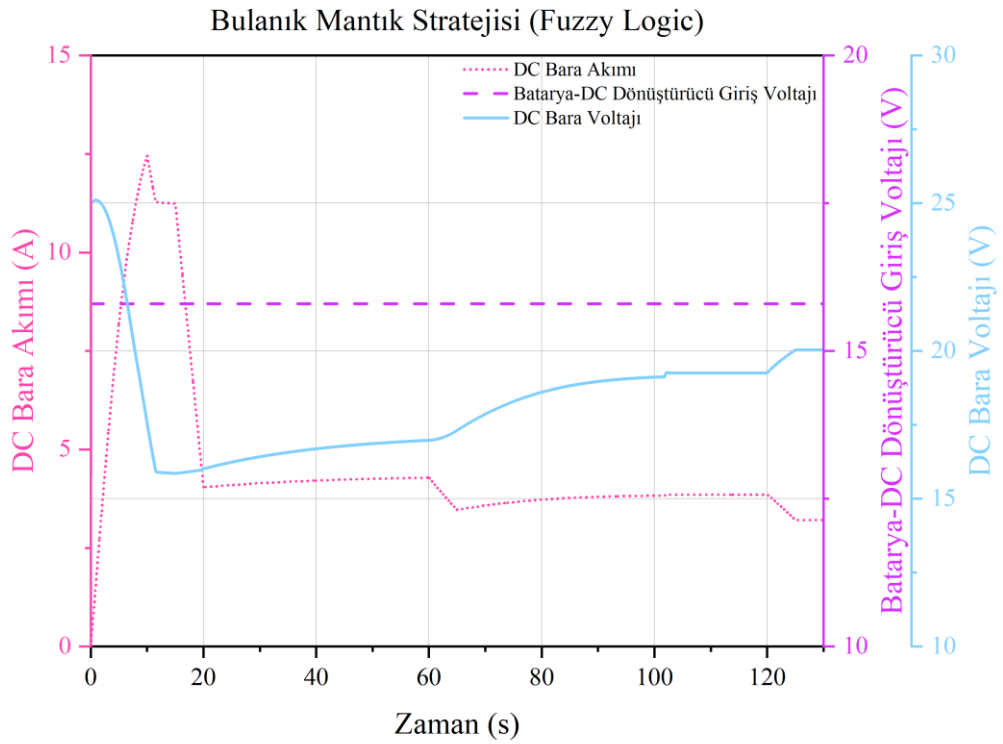
Şekil 5.8: Fuzzy Logic algoritmasında bataryanın şarj durumu, akım ve güç değişimi.

Şekil 5.9'da, süperkapasitörün şarj durumu başlangıçta %98 olarak belirlenmiştir. Simülasyon sırasında süperkapasitörün güç değişiminin yaklaşık -25 W ile 175 W arasında olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle, 40-60 ve 100-130 saniye aralıklarında süperkapasitör sisteme güç sağlamamış, ancak diğer enerji bileşenlerinden aldığı güç ile SOC seviyesinde bir artış meydana gelmiştir. Bu artışın diğer enerji kaynaklarından sağlanması, enerji yönetim stratejilerinin etkili şekilde çalıştığını göstermektedir. Simülasyon boyunca, süperkapasitörden geçen akım -1 A ile 25 A arasında değişmektedir. Süperkapasitörün enerji depolama ve güç destekleme kapasitesi, sistemin dengesini koruma açısından önemlidir.

Şekil 5.10'da, batarya-DC dönüştürücü giriş voltajı, DC bara voltajı ve DC bara akımının simülasyon süresince nasıl değiştiği gösterilmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre, DC dönüştürücü giriş voltajı 15,8 V sabit değerindeyken, DC bara voltajının 15,8 V ile 25 V arasında ve DC bara akımının 0-12,5 A arasında değiştiği gözlemlenmiştir. DC bara voltaj ve akım değişimleri, sistemdeki enerji akışının kontrol altında olduğunu ve enerji bileşenleri arasındaki dinamik bir kontrolün sağlandığını ortaya koymaktadır.



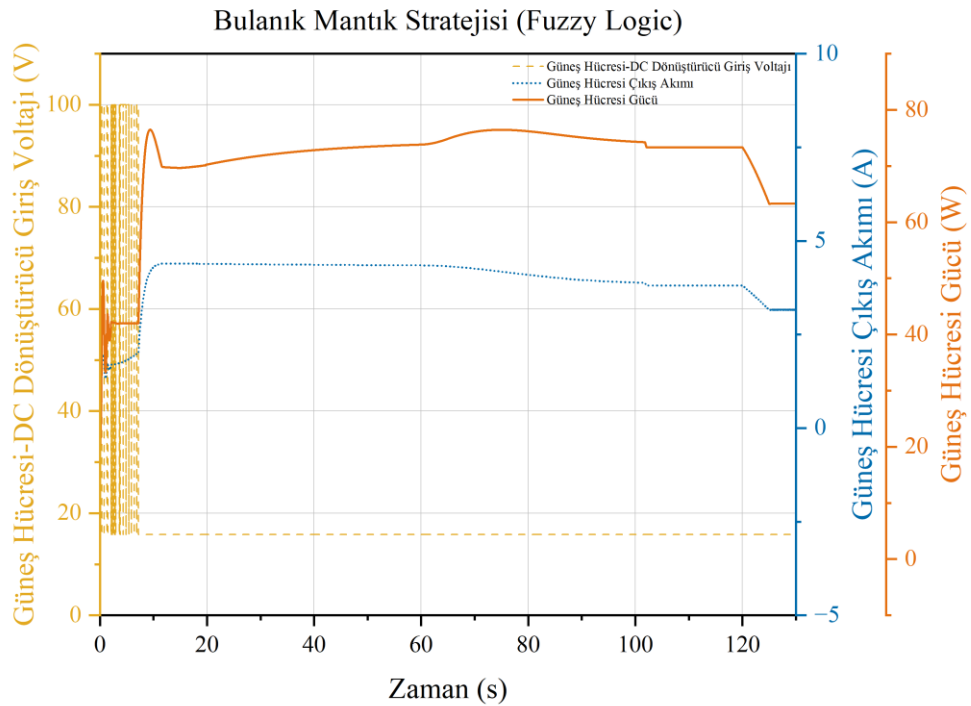
Şekil 5.9: Fuzzy Logic algoritmasında süperkapasitörün şarj durumu, akım ve güç değişimi.



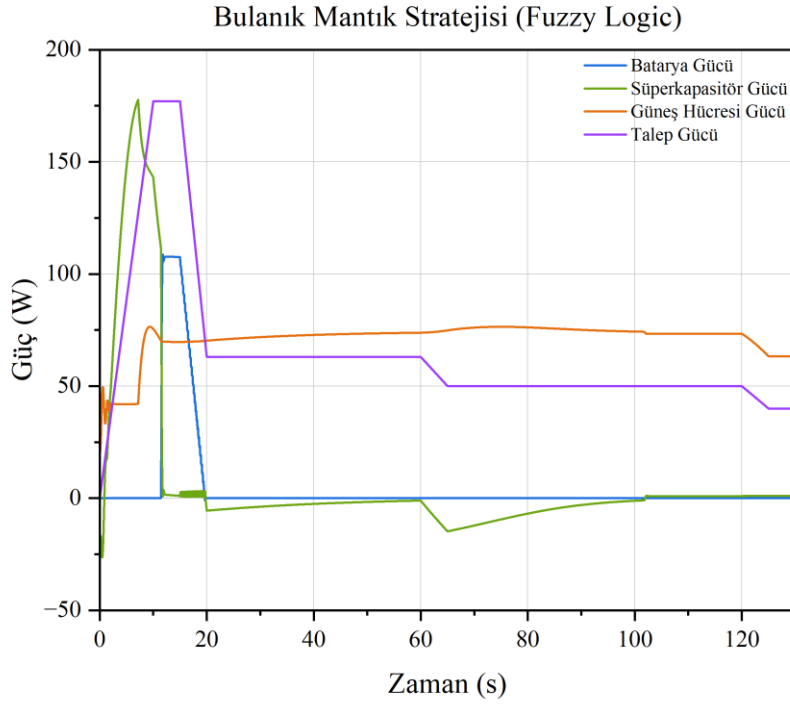
Şekil 5.10: Fuzzy Logic algoritmasında batarya-DC dönüştürücü giriş gerilimi ve DC bara gerilim, akım değişimi.

Şekil 5.11'de güneş hücresinin voltaj, akım ve güç değişimi gösterilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre güneş hücresinin voltaj değeri 15 V seviyesinde sabit kalırken, çıkış akımının 0-4,5 A aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Güneş hücresinin gücü, 10. saniyede 77 W'lık maksimum seviyeye ulaşmıştır.

Şekil 5.12'de, simülasyon sırasında güç paylaşımındaki değişim analiz edilmiştir. İlk güç talebi artışının, yaklaşık 10 saniye boyunca güneş hücreleri ve süperkapasitör tarafından karşılandığı tespit edilmiştir. Takip eden 5 saniyelik süre boyunca maksimum talep gücü yalnızca güneş hücreleri tarafından sağlanmıştır. 15 ile 20. saniyeler arasında talep gücünde azalma meydana gelmiş ve bu süreçte güç talebi, güneş hücreleri ve batarya tarafından karşılanmıştır. 20. saniyeden itibaren, güneş hücrelerinin ürettiği güç, talep edilen gücü aşar. Güneş hücrelerinin güç üretim kapasitesinin anlık değişimlere hızlı yanıt verebilmesi ve enerji depolama bileşenlerinin güç paylaşımındaki etkin rolü, sistemin dinamik taleplerini karşılaması açısından verimli olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.11: Fuzzy Logic algoritmasında güneş hücrelerinin voltaj, akım ve güç değişimi.



Şekil 5.12: Fuzzy Logic algoritmasında kaynaklar arasındaki güç paylaşımındaki değişim.

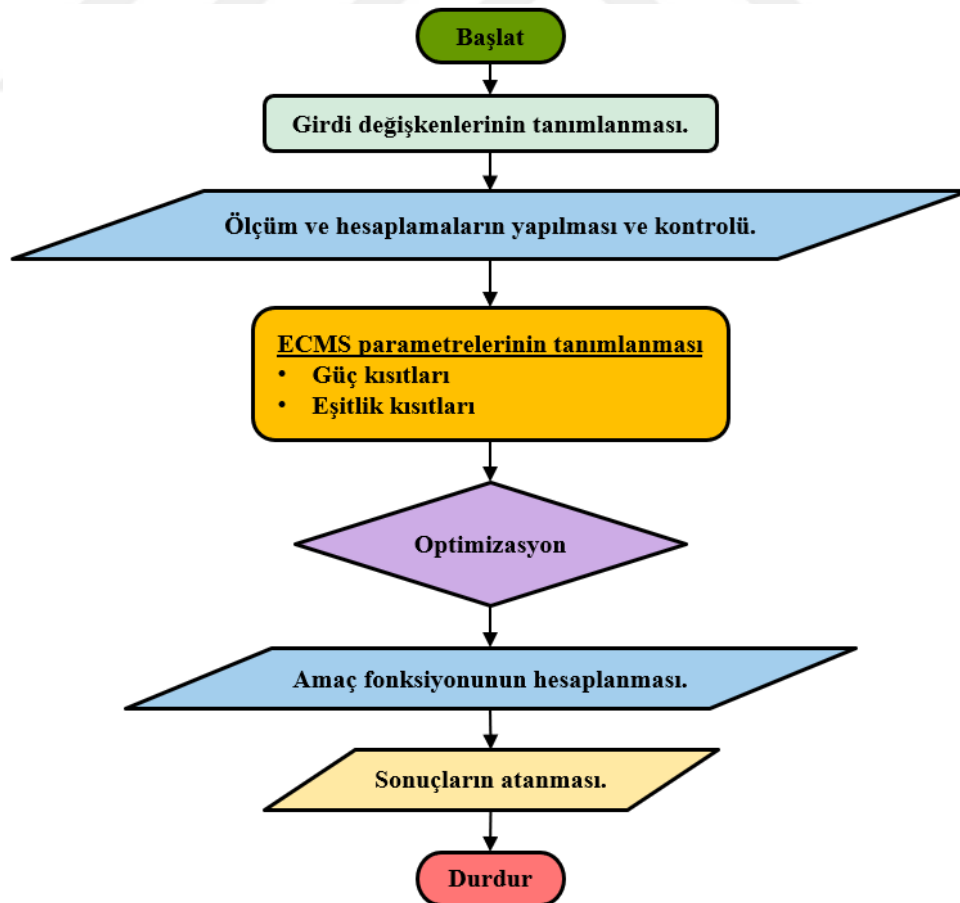
5.3. Eşdeğer Tüketim Minimizasyonu Stratejisi (ECMS)

Melez İHA’larda kullanılan eşdeğer tüketim minimizasyon stratejisi (equivalent consumption minimization strategy, ECMS), enerji yönetimde optimum dengeyi sağlamak için tasarlanmış üst sezgisel olmayan (non-metaheuristic), optimizasyon tabanlı, gerçek zamanlı bir kontrol yöntemidir. ECMS, ilk olarak melez elektrikli araçların enerji tüketimini minimize etmek için geliştirilmiş, daha sonra İHA’ların enerji yönetiminde de uygulanmaya başlanmıştır.

ECMS, İHA’nın enerji tüketimini azaltırken sistem performansını artırmayı hedefleyen bir amaç fonksiyonunu minimize ederek çalışır [57]. Bu yöntem, enerji tüketimini minimize ederken, güç gereksinimlerini dengeler ve enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar. Bu strateji, özellikle sürekli enerji yönetimi gerektiren uzun süreli görevler için ideal bir çözüm sunar. Doğruluğu, sistemin enerji talep profiline bağlıdır.

Bu çalışmada **Şekil 5.13**’e göre ECMS’nin durumları şu şekilde tanımlanmıştır:

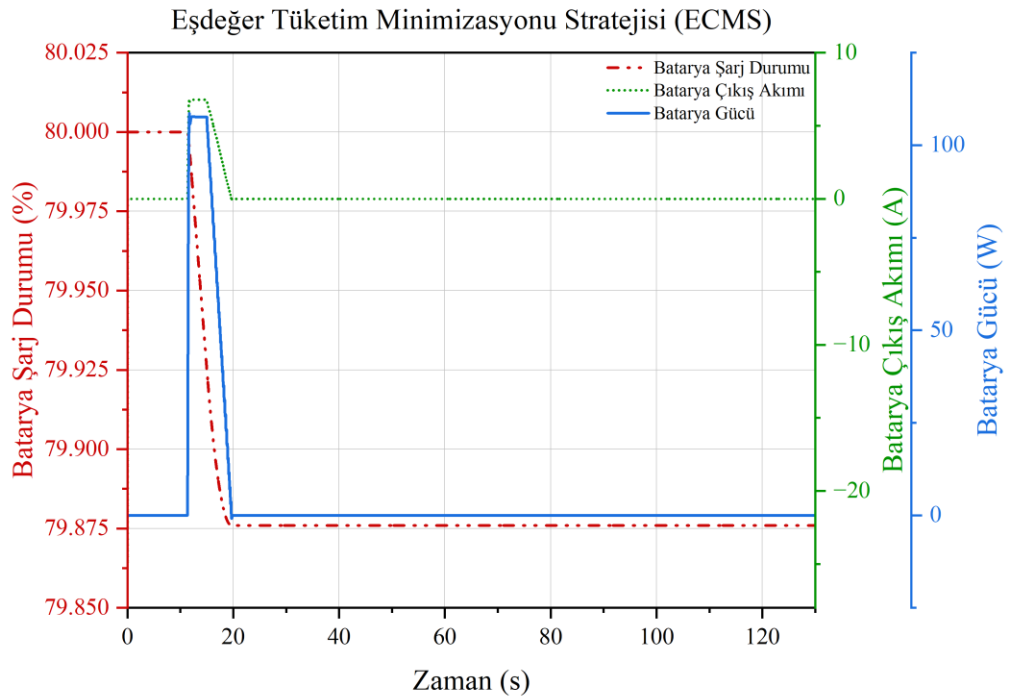
- Girdi değişkenleri ile sistemin anlık enerji ihtiyaçlarını ve mevcut enerji kaynaklarının durumunu temsil eden parametreler tanımlanır.
- Bu değişkenler üzerinden ölçüm ve hesaplamalar yapılır. Sistemin çalışma koşulları kontrol edilerek enerji yönetimi için gerekli bilgiler toplanır.
- Eşitlik kısıtları ve güç kısıtları gibi parametreler tanımlanır. Bu kısıtlar, enerji kaynaklarının kapasiteleri ve yük gereksinimleri göz önünde bulundurularak optimize edilmesi gereken alanları oluşturur.
- Optimizasyon işlemi gerçekleştirilir. Optimizasyon sürecinde, sistemin enerji kaynaklarının en verimli şekilde kullanılması hedeflenir.
- Amaç fonksiyonunun hesaplanması, ECMS'nin temel aşamalarından biridir. Bu fonksiyon, enerji kaynaklarının kullanımını minimize etmek ve enerji tüketimi ile üretimi arasında denge sağlamak amacıyla belirlenir.
- Optimizasyon sonucunda elde edilen en iyi çözüm değerleri, sistem parametrelerine atanır ve enerji yönetimi bu sonuçlar doğrultusunda gerçekleştirilir.



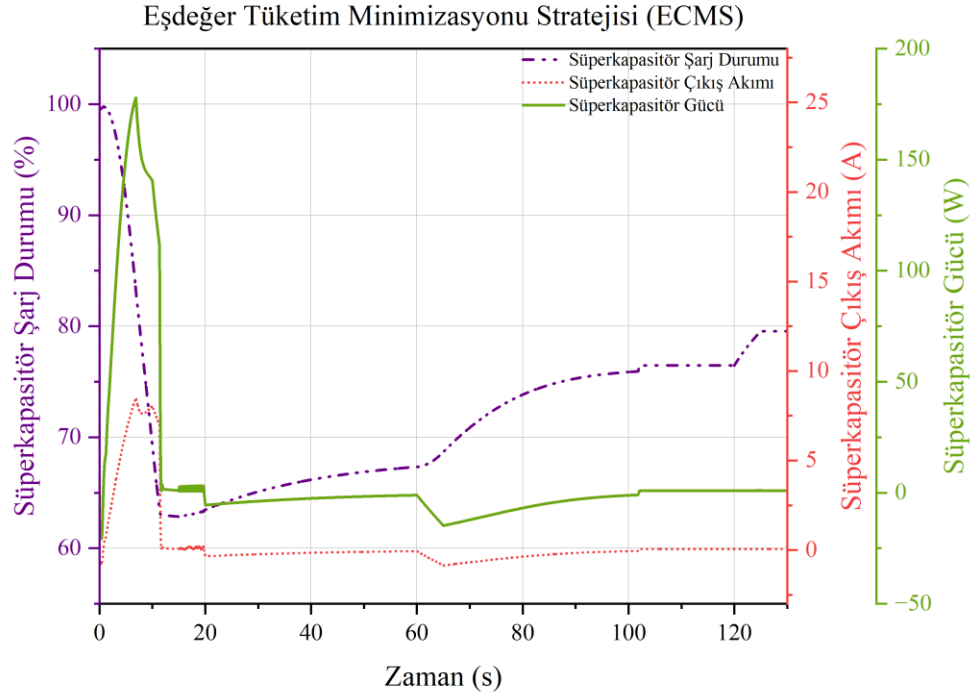
Şekil 5.13: ECMS algoritması durum diyagramı.

Şekil 5.14'de, başlangıçta %80 olan bataryanın şarj durumu, 10-20. Saniyeler arasında güneş hücrelerinin güç talebini tam olarak karşılayamaması nedeniyle bataryadan güç çekilmesi sonucu %79,88'e düştüğü tespit edilmiştir. 20. Saniye itibarıyla bataryanın kullanım dışı kaldığı gözlemlenmiştir. Bu süreçte bataryadan çekilen maksimum güç yaklaşık olarak 108 W olarak ölçülmüştür. 20. Saniyeden sonra ise güneş hücrelerinin ürettiği enerji talep edilen gücün üzerine çıkmış ve batarya kullanımına gerek kalmamıştır. Simülasyon süresince, bataryadan geçen akım değerinin -25 A ile 6,78 A arasında değiştiği belirlenmiştir.

Şekil 5.15'te, süperkapasitörün başlangıç şarj seviyesi %98 olarak belirlenmiştir. Simülasyon sırasında, süperkapasitörün güç değişiminin yaklaşık -20 W ile 178 W arasında olduğu gözlemlenmiştir. 100-130 saniye aralıklarında süperkapasitör sisteme güç sağlamamış, ancak diğer enerji bileşenlerinden aldığı güç sayesinde SOC seviyesinde bir artış meydana gelmiştir. Süperkapasitörün, güç paylaşımına dahil olmadığı zamanlarda, diğer kaynaklardan aldığı enerji ile şarj seviyesinin artırılması, sistemde enerji optimizasyonunun etkili bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Simülasyon boyunca süperkapasitörden geçen akım -1 A ile 25 A arasında değişmektedir.



Şekil 5.14: ECMS algoritmasında bataryanın şarj durumu, akım ve güç değişimi.

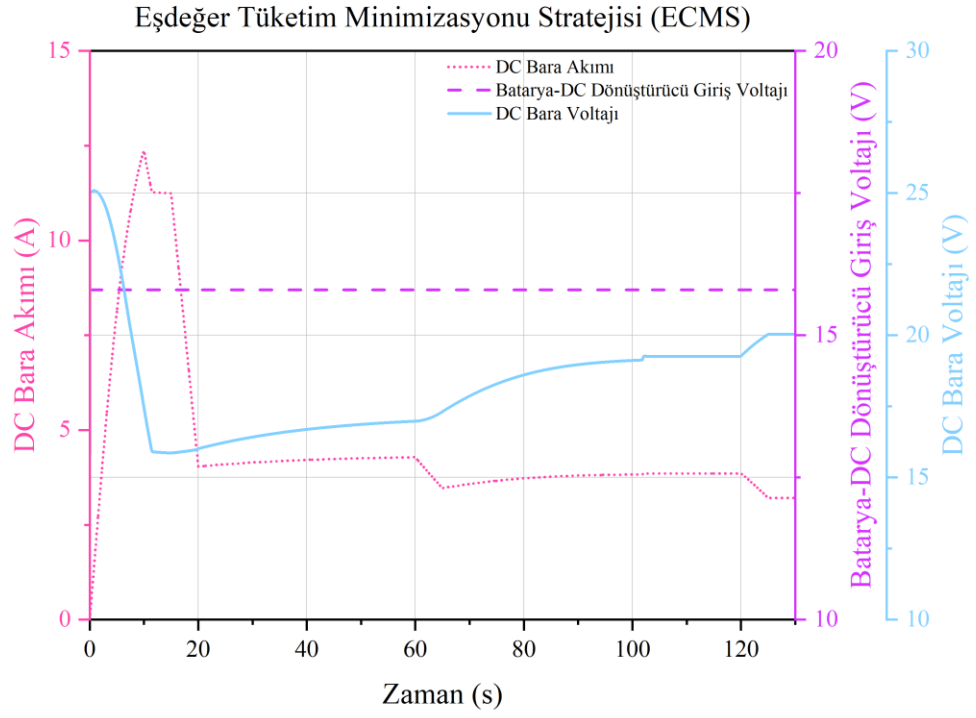


Şekil 5.15: ECMS algoritmasında süperkapasitörün şarj durumu, akım ve güç değişimi.

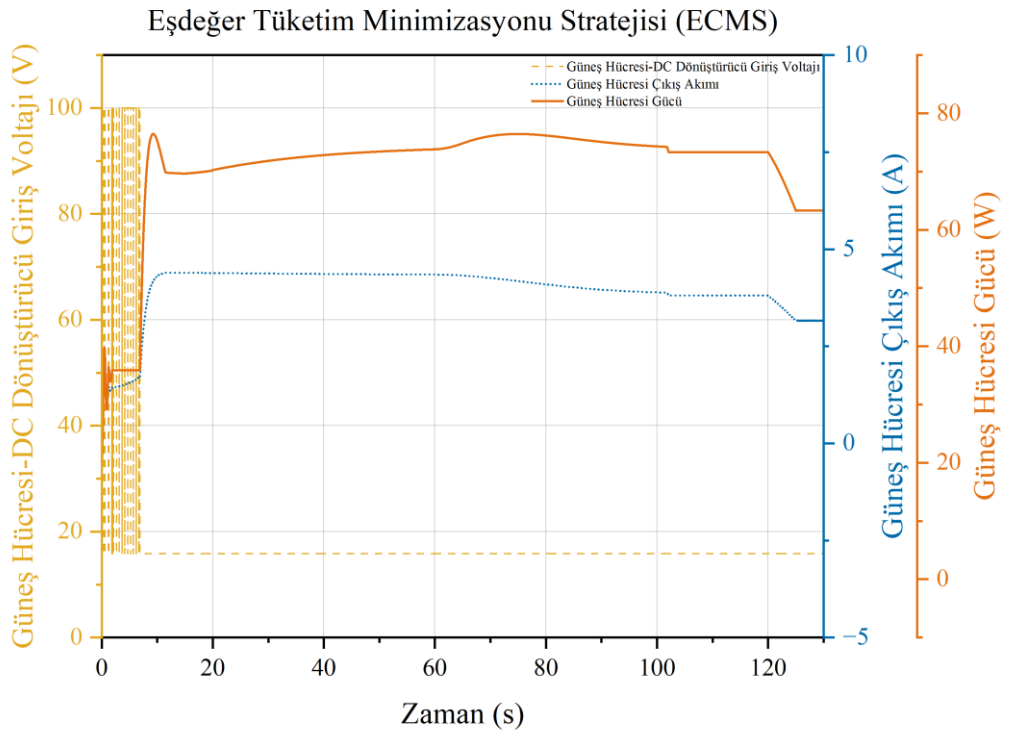
Şekil 5.16'da, batarya-DC dönüştürücü giriş voltajı, DC bara voltajı ve akımı için zamanla değişim grafiği gösterilmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre, DC dönüştürücü giriş voltajı sabit 15,8 V, DC bara voltajının 15,8 V ile 25 V arasında dalgalandığı ve DC bara akımının 0 ile 12,5 A arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu grafik sonucuna göre, enerji sisteminin kararlı çalıştığı görülmektedir.

Şekil 5.17'de güneş hücresinin voltaj ve güç değişimi analiz edilmiştir. Güneş hücresinin voltaj değeri sabit 15 V ve çıkış akımı 0 ile 4,5 A arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Güneş hücresinin gücü, 10. saniyede 77 W'lık maksimum seviyeye ulaşmıştır.

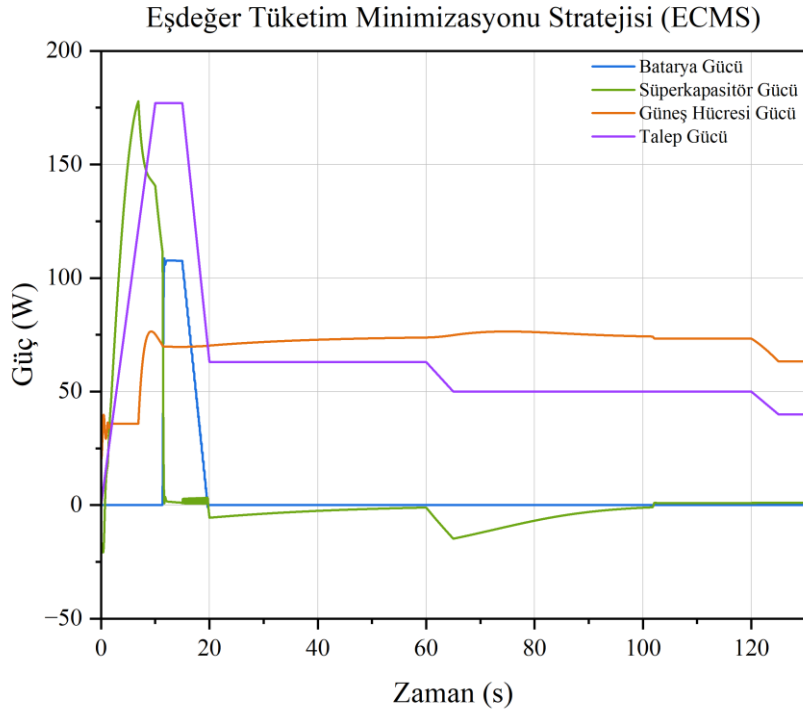
Şekil 5.18'de, sistemin güç paylaşımı sürecindeki değişim gösterilmektedir. Talep gücündeki ilk artışın, yaklaşık 10 saniye boyunca güneş hücreleri ve süperkapasitör tarafından karşılandığı gözlemlenmektedir. Ardından, 5 saniye süresince sabit kalan maksimum talep gücü, yalnızca güneş hücreleri tarafından karşılanmıştır. Sonraki aşamada, talep gücü 15 ile 20. saniye arasında azalmış ve bu süre boyunca güç talebi, güneş hücreleri ve batarya tarafından karşılanmıştır. 20. saniyeden sonra, güneş hücrelerinin ürettiği güç, talep edilen gücü aşar.



Şekil 5.16: ECMS algoritmasında batarya-DC dönüştürücü giriş gerilimi ve DC bara gerilim, akım değişimi.



Şekil 5.17: ECMS algoritmasında güneş hücrelerinin voltaj, akım ve güç değişimi.

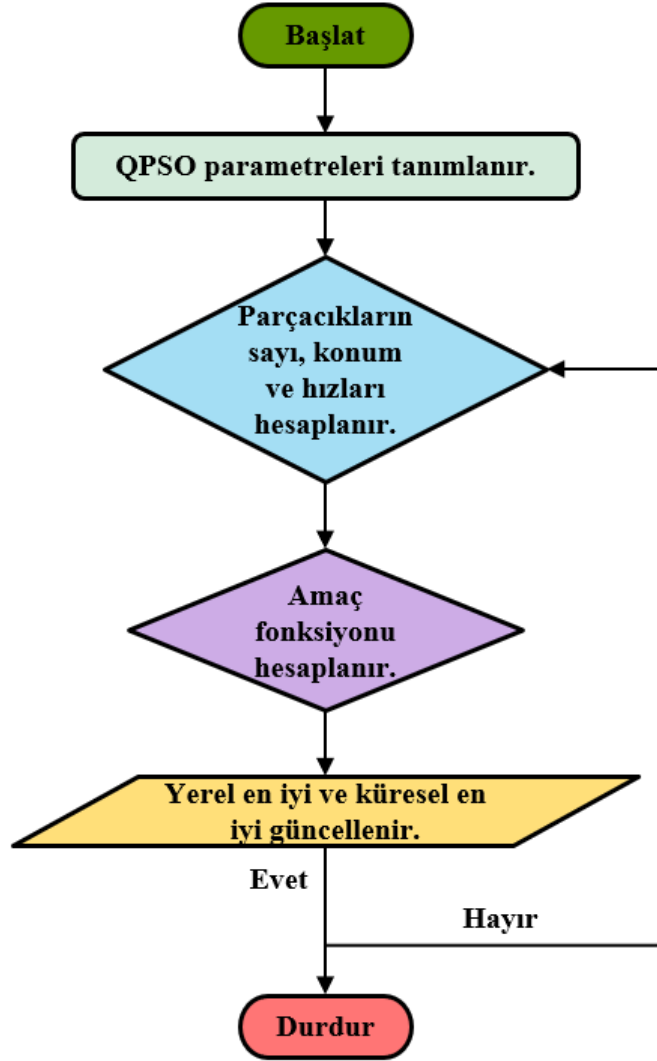


Şekil 5.18: ECMS algoritmasında kaynaklar arasındaki güç paylaşımındaki değişim.

5.4. Kuantum Parçacık Sürü Optimizasyonu (QPSO)

1995 yılında Kennedy ve Eberhart kuş sürüleri veya balık sürülerinin toplu hareketlerinden ilham alan parçacık sürü algoritmasını (PSO) geliştirmişlerdir [138,139]. Kuantum parçacık sürü optimizasyonu (QPSO) ise klasik PSO algoritmasının kuantum mekaniği prensipleriyle geliştirilmiş bir versiyonudur. İlk olarak 2004 yılında Sun ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir [142,143]. Bu algorithmada, her bir parçacık hız ve konum gibi parametrelerle bir kuantum potansiyel kuyusunda hareket eder ve pozisyonları olasılık dağılımları ile belirlenir. Bu yaklaşım, küresel optimizasyon yeteneklerini artırır ve daha hızlı yakınsama sağlar [140]. QPSO, enerji yönetim sistemlerinde daha karmaşık çözüm uzaylarında küresel optimumu bulma kapasitesine sahiptir. Daha az iterasyon ile çözüme ulaşır, bu da gerçek zamanlı enerji yönetim uygulamaları için uygundur. Güneş enerjisi üretimi gibi değişken çevresel koşullara daha iyi uyum sağlayabilir. QPSO, melez İHA'ların enerji üretimi, depolama ve tüketim süreçlerinin optimizasyonunda kullanılabilir. Optimizasyon tabanlı ve sezgisel bir strateji olmasından ötürü enerji verimliliğini artırmada hızlı ve etkili bir çözüm sunar.

Bu çalışmada **Şekil 5.19**'a göre QPSO algoritmasının durumları şu şekilde tanımlanmıştır:



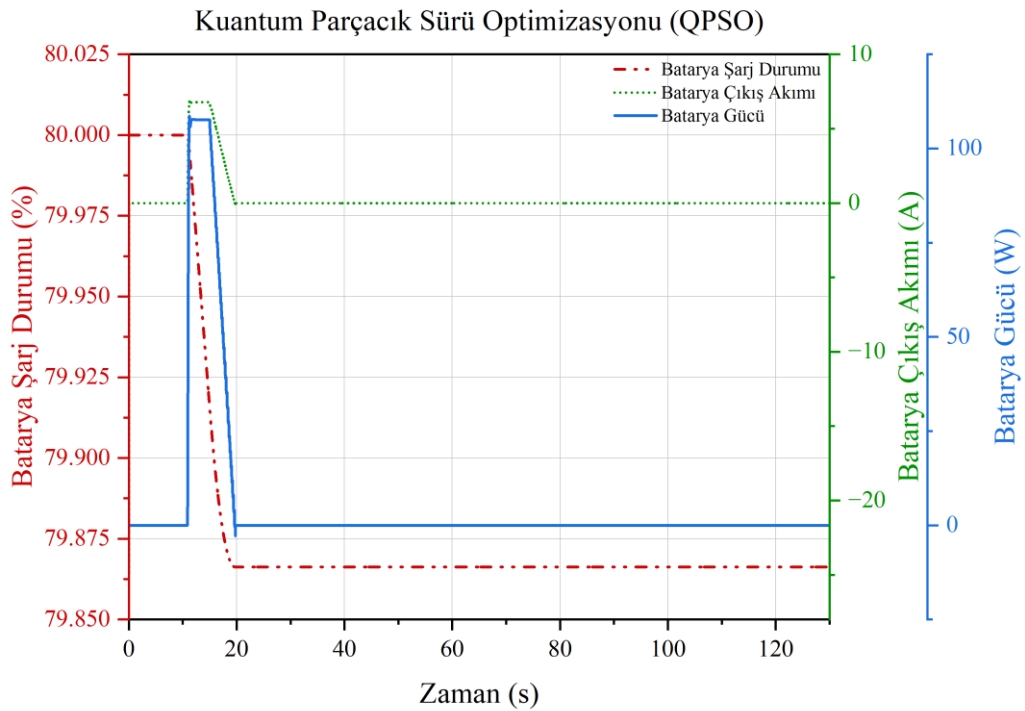
Şekil 5.19: QPSO algoritması durum diyagramı.

- Optimizasyon algoritmasında kullanılacak temel parametreler tanımlanır. Bu parametreler, parçacıkların sayısını, başlangıç konumlarını ve hızlarını içermektedir.
- Parçacıkların sayı, konum ve hızları hesaplanır. Parçacıklar, enerji yönetimi sorununu çözmek için çözüm uzayında rastgele dağıtılır ve bu konumlar optimizasyon sürecine başlangıç noktası oluşturur.
- Her parçacığın performansı, amaç fonksiyonunun hesaplanması yoluyla değerlendirilir. Amaç fonksiyonu, enerji verimliliğini ve enerji kaynaklarının

kullanımını optimize etmek amacıyla belirlenmiş bir hedefe ulaşmayı sağlayan matematiksel bir ifadedir.

- Optimizasyon süreci boyunca, her parçacığın bulunduğu konum için hesaplanan yerel en iyi değere ve tüm parçacıklar arasındaki küresel en iyi değere sürekli olarak güncellenir. Bu güncellemeler, parçacıkların daha iyi çözümler aramak için pozisyonlarını ve hızlarını ayarlamalarına olanak tanır. QPSO algoritmasının kuantum özelliği, parçacıkların olası konumlarını geniş bir çözüm uzayında araştırmasına olanak sağlayarak, sistemin yerel minimumlara takılmadan en iyi çözüme ulaşmasını destekler.

Şekil 5.20’de, başlangıçta %80 olan bataryanın şarj durumu 10 ile 20. saniyeler arasında, güneş hücreleri güç talebini tek başına karşılamada yetersiz kalması nedeniyle %79,87 seviyesine azalmıştır. Bu sürede, bataryadan maksimum yaklaşık 108 W güç çekildiği tespit edilmiştir. 20. saniye itibarıyla bataryanın devreden çıkarak artık kullanılmadığı, çünkü güneş hücrelerinin ürettiği gücün talep edilen miktarı aşmaya başladığı görülmüştür. Ayrıca, bataryadan geçen akımın -25 A ile 6,78 A arasında değiştiği belirlenmiştir.

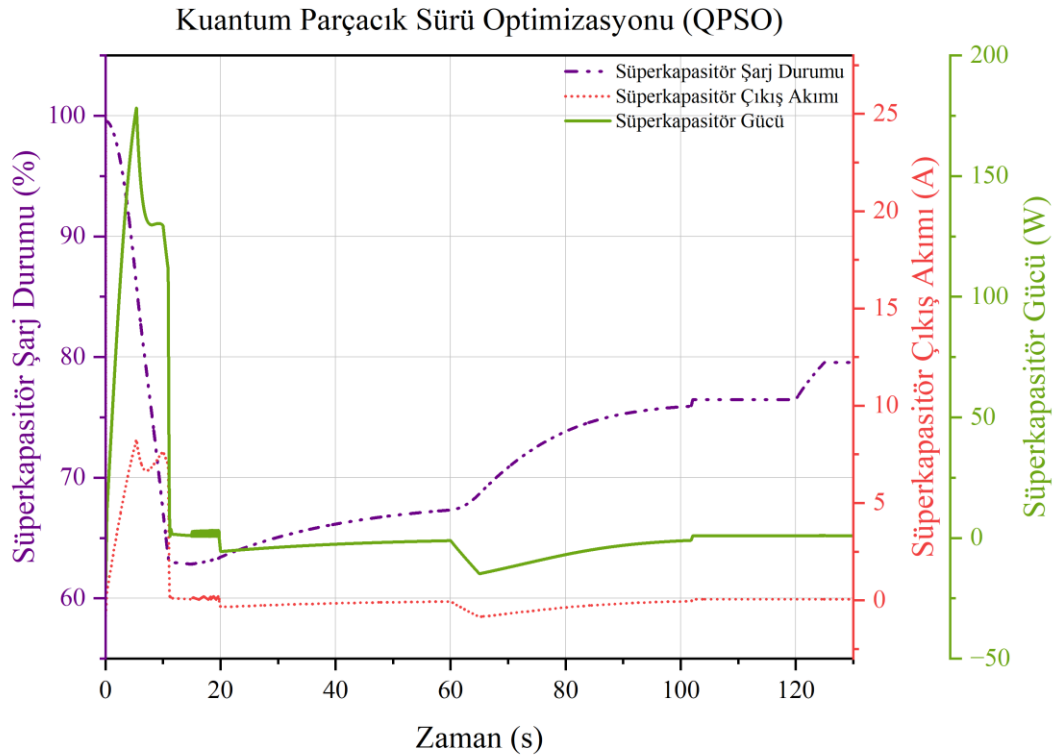


Şekil 5.20: QPSO algoritmasında bataryanın şarj durumu, akım ve güç değişimi.

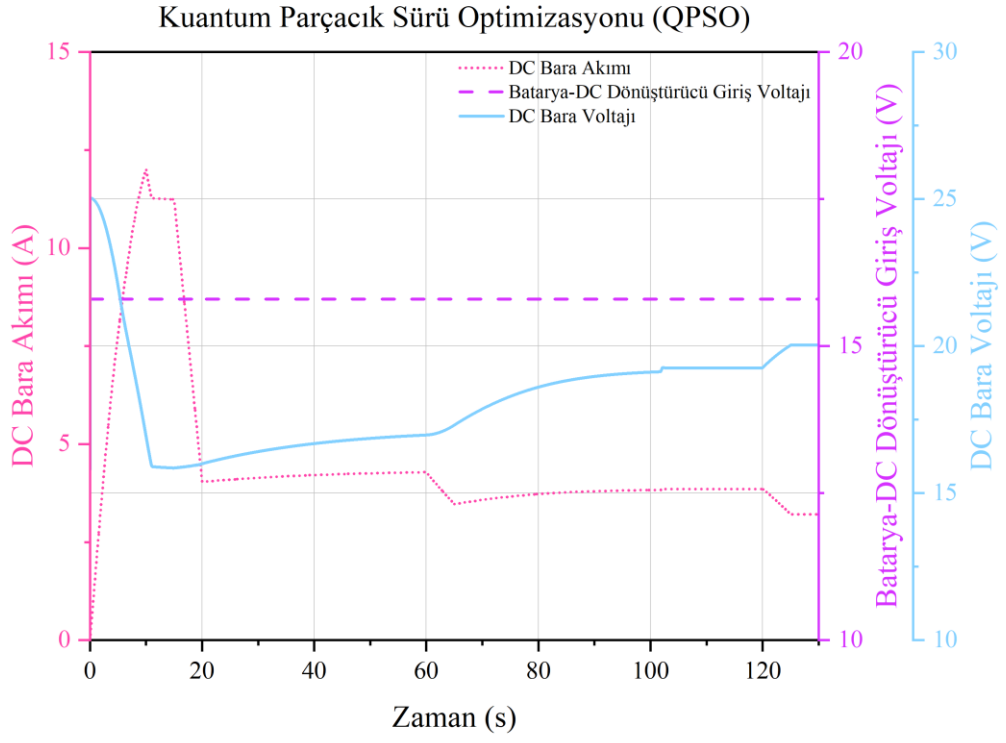
Şekil 5.21'de, süperkapasitörün şarj seviyesi başlangıçta %98 olduğu, simülasyon süresince güç değişiminin yaklaşık -20 W ile 178 W arasında değiştiği gözlenmiştir. Süperkapasitörün, özellikle 100-130 saniye aralığında sisteme güç vermediği ve diğer enerji bileşenlerinden aldığı güç ile SOC seviyesinde bir artış meydana geldiği görülür. Simülasyon boyunca geçen akım değeri -1 A ile 25 A arasında değişmektedir.

Şekil 5.22'de, batarya-DC dönüştürücü giriş voltajı, DC bara voltajı ve DC bara akımı için değişim gösterilmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre, DC dönüştürücü giriş voltajı 15,8 V, DC bara voltajının 15,8 V ile 25 V arasında ve DC bara akımının 0-12,5 A arasında değiştiği gözlemlenmiştir. DC bara voltaj ve akımındaki bu değişimler, sistemdeki güç akışının düzenli ve dengeli bir şekilde yönetildiğini göstermektedir.

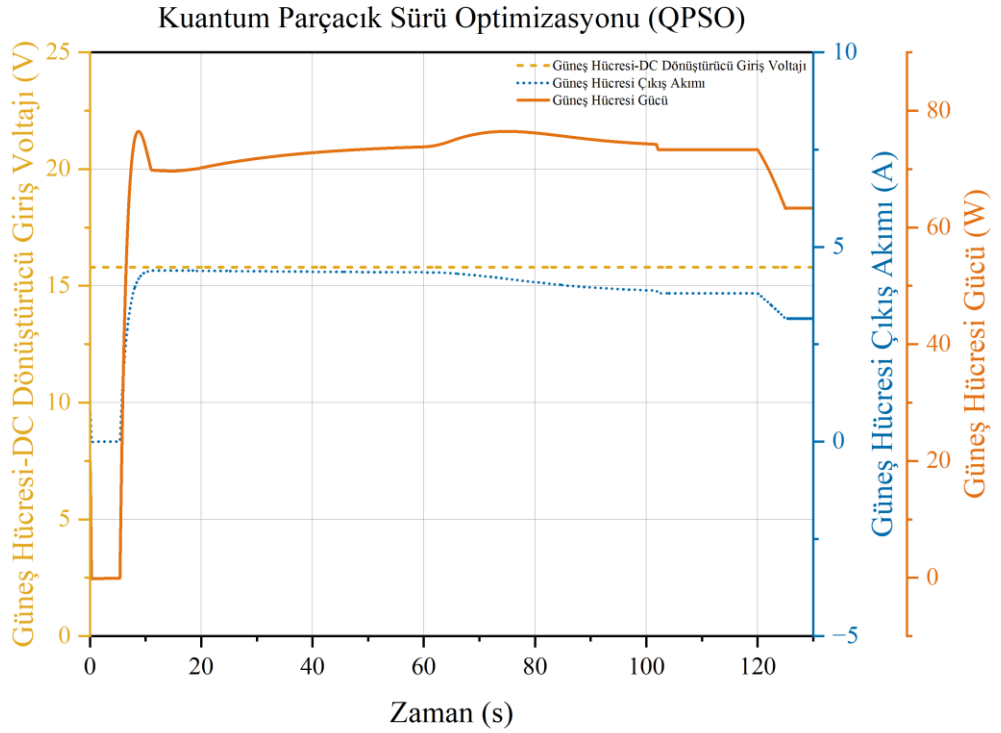
Şekil 5.23'te güneş hücresinin voltaj, akım ve güç değişimi gösterilmiştir. Voltaj değeri 15,8 V sabit değerde ve çıkış akımı 0 ile 4,5 A aralığında gözlemlenmiştir. Güneş hücresinin gücü, 10. Saniyede 77 W'lık maksimum değere ulaşmıştır.



Şekil 5.21: QPSO algoritmasında süperkapasitörün şarj durumu, akım ve güç değişimi.

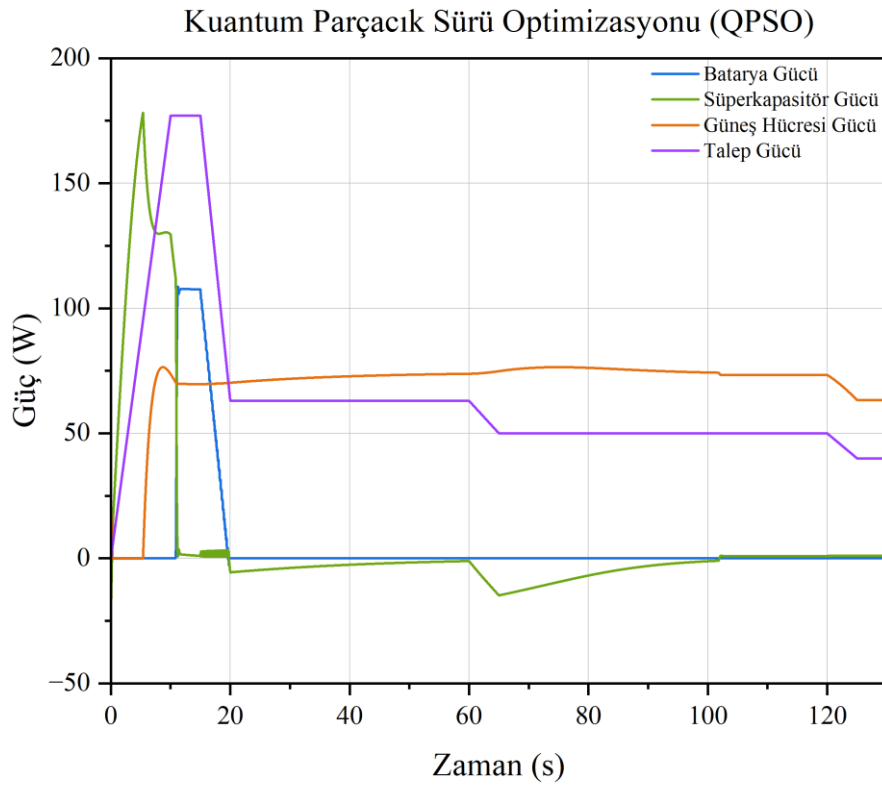


Şekil 5.22: QPSO algoritmasında batarya-DC dönüştürücü giriş gerilimi ve DC bara gerilim, akım değişimi.



Şekil 5.23: QPSO algoritmasında güneş hücrelerinin voltaj, akım ve güç değişimi.

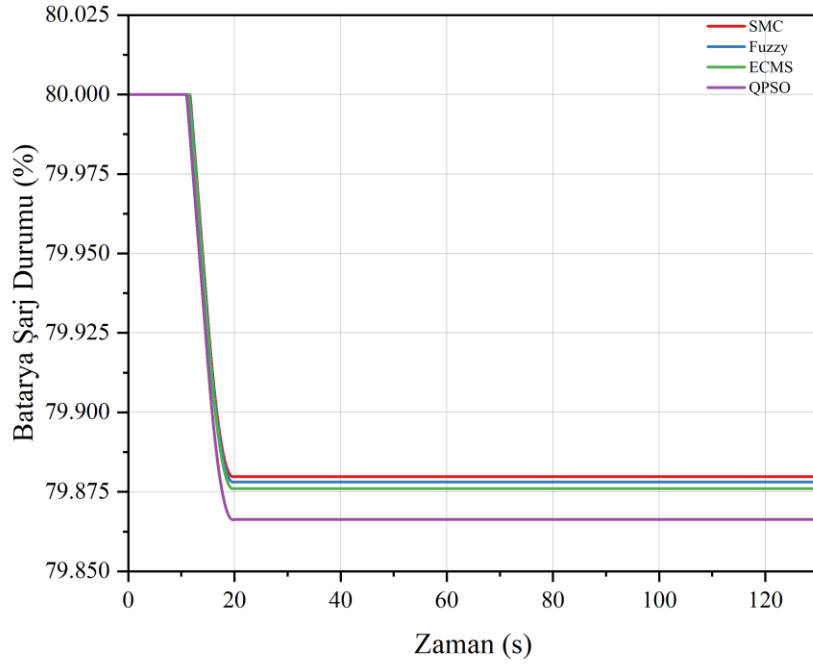
Şekil 5.24'te, simülasyon sırasında gerçekleşen güç paylaşım süreçleri detaylı bir şekilde sunulur. İlk 10 saniye boyunca talep edilen gücün güneş hücreleri ve süperkapasitör tarafından karşılandığı görülürken, ardından maksimum talep gücünün yalnızca güneş hücreleriyle sağlandığı anlaşılmıştır. 15 ile 20. Saniyeler arasında güç talebinde azalma olmuş ve bu esnada enerji, güneş hücreleri ve batarya tarafından karşılanmıştır. 20. Saniyeden sonra ise güneş hücreleri, talep gücünü aşar.



Şekil 5.24: QPSO algoritmasında kaynaklar arasındaki güç paylaşımındaki değişim.

6. KARŞILAŞTIRMA SONUÇLARI

Başlangıçta batarya doluluk oranı (SOC) %80 seviyesindedir. **Şekil 6.1**'de görüldüğü gibi 10. ile 20. saniye aralığında güneş hücrelerinin enerji talebini tek başına karşılayamaması nedeniyle bataryadan enerji çekilmiştir. Bu süreçte, farklı enerji yönetim algoritmalarının batarya üzerindeki etkileri analiz edilmiş ve 20. saniyede SOC değerleri **Tablo 6.1**'de olduğu gibi hesaplanmıştır.



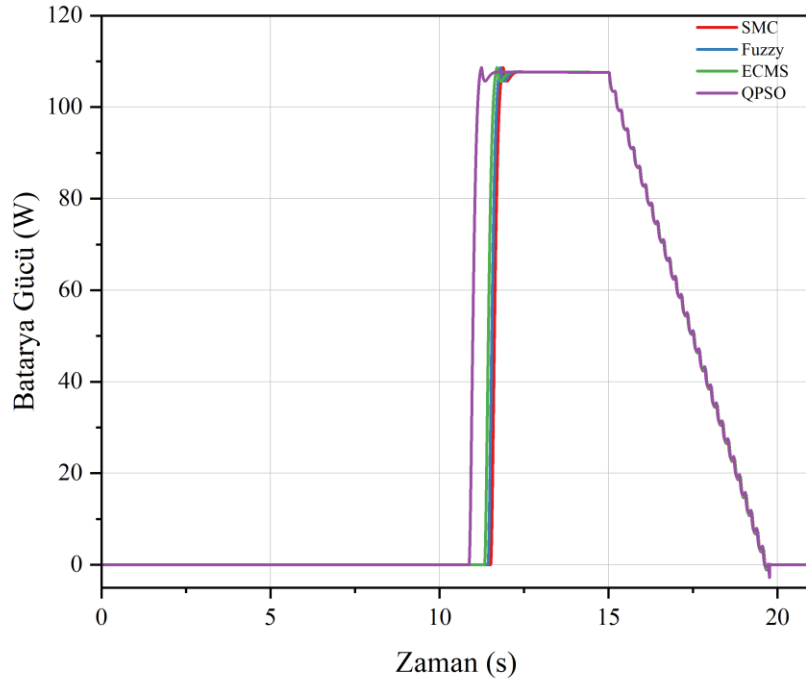
Şekil 6.1: Batarya SOC karşılaştırma grafiği.

Tablo 6.1: Algoritmaların batarya üzerindeki SOC etkileri.

Algoritmalar	SOC
Durum makinası kontrol algoritması (SMC)	% 79,8798
Bulanık mantık stratejisi (Fuzzy Logic)	% 79,8781
Eşdeğer tüketim minimizasyonu stratejisi (ECMS)	% 79,8759
Kuantum parçacık sürü optimizasyonu (QPSO)	% 79,8662

Elde edilen sonuçlara göre, batarya tüketimi açısından en verimli algoritma QPSO olarak belirlenmiştir. SMC ve QPSO algoritmaları arasında %0,0136'lık, Fuzzy ve QPSO algoritmaları arasında %0,0119'luk, ECMS ve QPSO algoritmaları arasında ise %0,0097'lik bir SOC farkı tespit edilmiştir. Bu veriler, QPSO algoritmasının diğer algoritmalarla kıyasla daha düşük bir enerji tüketimi sağladığını ortaya koymaktadır.

Şekil 6.2'de, 10. ile 20. saniye aralığında bataryadan enerji çekilmesi sonucu batarya gücünün zamanla değişimi gözlemlenmiştir. Bu süreçte, 20. saniyede batarya devre dışı kalmış ve güneş hücrelerinin ürettiği güç, talep edilen gücü karşılayarak batarya kullanımına ihtiyaç bırakmamıştır. Bataryadan çekilen maksimum güç, SMC için yaklaşık 105 W iken, diğer algoritmalar için yaklaşık 108 W olarak belirlenmiştir. Bu durum, SMC'nin sistem kararlılığına odaklanırken, diğer algoritmaların optimizasyonu önceliğini ifade eder. Farklı algoritmaların maksimum güç değerine ulaşma süreleri **Tablo 6.2**'de verilmiştir.



Şekil 6.2: Batarya gücü karşılaştırma grafiği.

Bu veriler, QPSO algoritmasının maksimum güç değerine diğer algoritmalarından daha hızlı ulaştığını ve bu nedenle dinamik güç talebine daha etkili bir şekilde yanıt

verebildiğini göstermektedir. Buna göre, QPSO algoritması maksimum güce, SMC'ye göre 0,6441 s, Fuzzy'ye göre 0,5608 s ve ECMS'ye göre 0,4581 s daha hızlı ulaşmıştır.

Tablo 6.2: Algoritmaların maksimum batarya gücüne ulaşma süreleri.

Algoritmalar	Maksimum Güce Ulaşma Süresi
Durum makinası kontrol algoritması (SMC)	11,5215 s
Bulanık mantık stratejisi (Fuzzy Logic)	11,4382 s
Eşdeğer tüketim minimizasyonu stratejisi (ECMS)	11,3355 s
Kuantum parçacık sürü optimizasyonu (QPSO)	10,8774 s

Bu sonuçlar, QPSO algoritmasının yalnızca enerji tüketiminde değil, aynı zamanda sistemin güç taleplerine yanıt verme hızında da avantaj sağladığını ortaya koymaktadır.

Şekil 6.3'te, süperkapasitörün şarj durum değerinin simülasyon sırasında 0-12 saniye aralığında başlangıç değeri olan %98'den %63'e düştüğü gözlemlenmiştir. Bu düşüş, sistemin başlangıç aşamasında yüksek enerji talebi nedeniyle süperkapasitörün enerji sağlaması ile ilişkilendirilmektedir. Özellikle, güneş hücrelerinin enerji talebini karşılamada yetersiz kaldığı bu süreçte, süperkapasitör ana enerji kaynağı olarak devreye girmiştir.

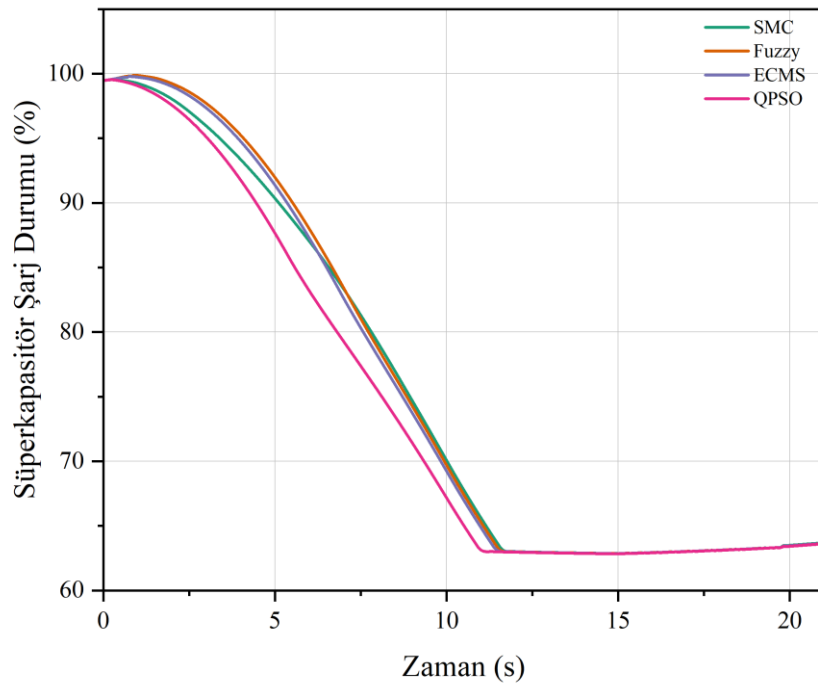
Süperkapasitörün SOC değerlerindeki bu düşüşe ulaşma süreleri, farklı enerji yönetim algoritmaları için **Tablo 6.3'**te belirtilmiştir.

Tablo 6.3: Algoritmaların süperkapasitör üzerindeki SOC etkileri.

Algoritmalar	SOC
Durum makinası kontrol algoritması (SMC)	11,6850 s
Bulanık mantık stratejisi (Fuzzy Logic)	11,6515 s
Eşdeğer tüketim minimizasyonu stratejisi (ECMS)	11,5318 s
Kuantum parçacık sürü optimizasyonu (QPSO)	11,0434 s

QPSO algoritması SOC düşüşünü, SMC'ye göre 0,6416 s, Fuzzy'ye göre 0,6081 s, ECMS'ye göre 0,4884 s daha erken tamamlamıştır.

QPSO algoritmasının süperkapasitör üzerindeki yükü diğer algoritmalarından daha kısa sürede dengelemesi, bu algoritmanın dinamik enerji yönetimi açısından bir avantaj sağladığını ortaya koymaktadır.



Şekil 6.3: Süperkapasitör SOC karşılaştırma grafiği.

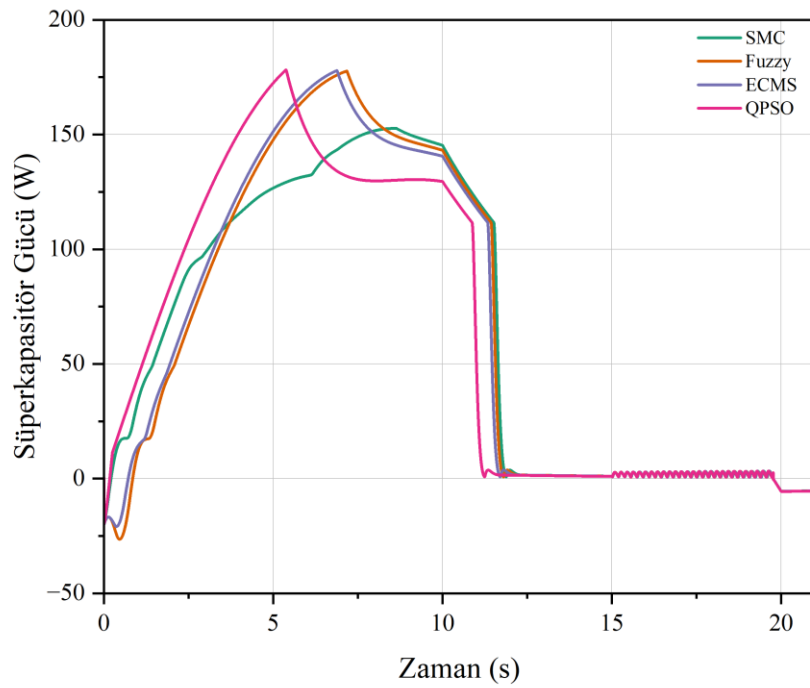
Şekil 6.4'te, simülasyon sırasında süperkapasitörün güç değişiminin yaklaşık -25 W ile 178 W arasında olduğu gözlemlenmiştir. Süperkapasitörün güç taleplerine verdiği yanıt ve farklı enerji yönetim algoritmalarının bu yanıt üzerindeki etkisi, maksimum güç değerine ulaşma süreleriyle analiz edilmiştir. Bu süreler **Tablo 6.4**'de belirtilmiştir.

QPSO algoritmasının maksimum güce ulaşma süresi diğer algoritmalarından belirgin ölçüde daha kısadır. Örneğin, QPSO algoritması, Fuzzy algoritmasına kıyasla 1,7948 s, ECMS algoritmasına kıyasla 1,5028 s, ve SMC algoritmasına kıyasla 3,1786 s daha

hızlıdır. Bu sonuç, QPSO algoritmasının hızlı dinamik yanıt kabiliyetine sahip olduğunu ve ani güç taleplerine daha verimli bir şekilde yanıt verdiğini göstermektedir.

Tablo 6.4: Algoritmaların maksimum süperkapasitör gücüne ulaşma süreleri.

Algoritmalar	Maksimum Güce Ulaşma Süresi
Durum makinası kontrol algoritması (SMC) – 150 W	8,5584 s
Bulanık mantık stratejisi (Fuzzy Logic) – 175 W	7,1746 s
Eşdeğer tüketim minimizasyonu stratejisi (ECMS) – 178 W	6,8826 s
Kuantum parçacık sürü optimizasyonu (QPSO) – 178 W	5,3798 s



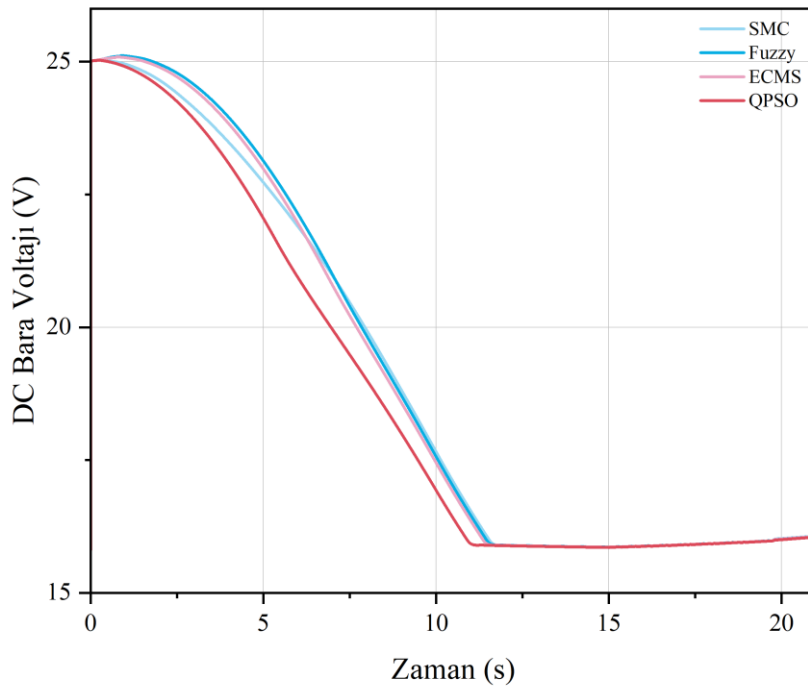
Şekil 6.4: Süperkapasitör gücü karşılaştırma grafiği.

Süperkapasitör, 40-60 ve 100-130 saniye aralıklarında sisteme güç sağlamamış, ancak diğer enerji bileşenlerinden aldığı güç sayesinde SOC seviyesinde bir artış meydana gelmiştir. Bu durum, enerji yönetim sisteminin, süperkapasitörün yeniden şarj

olmasını ve sistemin kararlılığını korumasını sağladığını göstermektedir. Süperkapasitörün bu süreçte pasif bir rol oynaması, diğer enerji kaynaklarının etkili bir şekilde sisteme güç sağladığının bir göstergesidir.

Sonuçlar, QPSO algoritmasının maksimum güce ulaşma hızı açısından üstünlüğünü ortaya koymakla birlikte, sistemin genel enerji yönetim performansı üzerinde de etkili olduğunu göstermektedir. Ancak, süperkapasitörün güç sağlamadığı zaman aralıklarındaki SOC artışı, diğer enerji kaynaklarının yük dengelemesi açısından kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

Şekil 6.5'te, DC bara voltajının 0-11. saniye aralığında 15,8 V ile 25 V arasında değiştiği görülmektedir. Özellikle, 15,8 V bara voltajına ulaşma süreleri, farklı enerji yönetim algoritmalarına göre analiz edilmiştir ve **Tablo 6.5**'te belirtilmiştir.



Şekil 6.5: DC bara voltajı karşılaştırma grafiği.

QPSO algoritması, bara voltajını 15,8 V seviyesine diğer algoritmalarından daha hızlı bir şekilde ulaştırmıştır. QPSO algoritması, SMC'ye göre 0,6704 s, Fuzzy'ye göre 0,5650 s, ECMS'ye göre 0,4597 s daha hızlıdır.

Bu veriler, QPSO algoritmasının dinamik yanıt hızındaki üstünlüğünü bir kez daha vurgulamaktadır. QPSO'nun hızlı tepki süresi, enerji talebine daha etkin bir şekilde yanıt verebildiğini ve DC bara voltajındaki dalgalanmaları daha kısa sürede dengeleyebildiğini göstermektedir.

Tablo 6.5: Algoritmaların bara voltajına ulaşma süreleri.

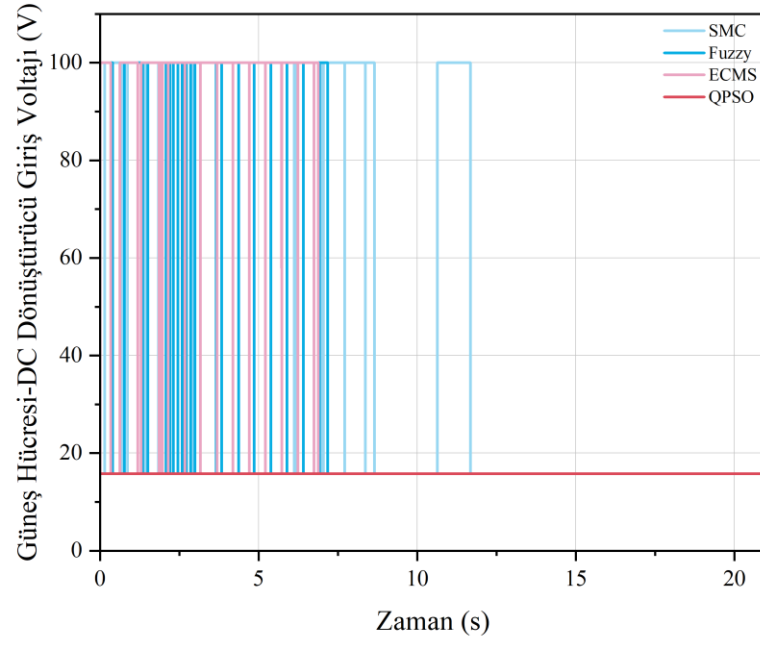
Algoritmalar	15.8 V Bara Voltajına Ulaşma Süresi
Durum makinası kontrol algoritması (SMC)	11,6898 s
Bulanık mantık stratejisi (Fuzzy Logic)	11,5844 s
Eşdeğer tüketim minimizasyonu stratejisi (ECMS)	11,4791 s
Kuantum parçacık sürü optimizasyonu (QPSO)	11,0194 s

Şekil 6.6'da gösterildiği üzere, güneş hücresi-DC dönüştürücü giriş voltajı 15,8 V olarak gözlemlenmiştir. Sistem çalışırken, enerji yönetim stratejisi doğrultusunda güneş hücreleri, güç talebini karşılamak için ihtiyaç duyulduğunda batarya ve süperkapasitörden ek güç sağlamaktadır. Bu durum, sistemin 12. Saniyeye kadar olan çalışma süresi boyunca güç dalgalanmalarına neden olmaktadır.

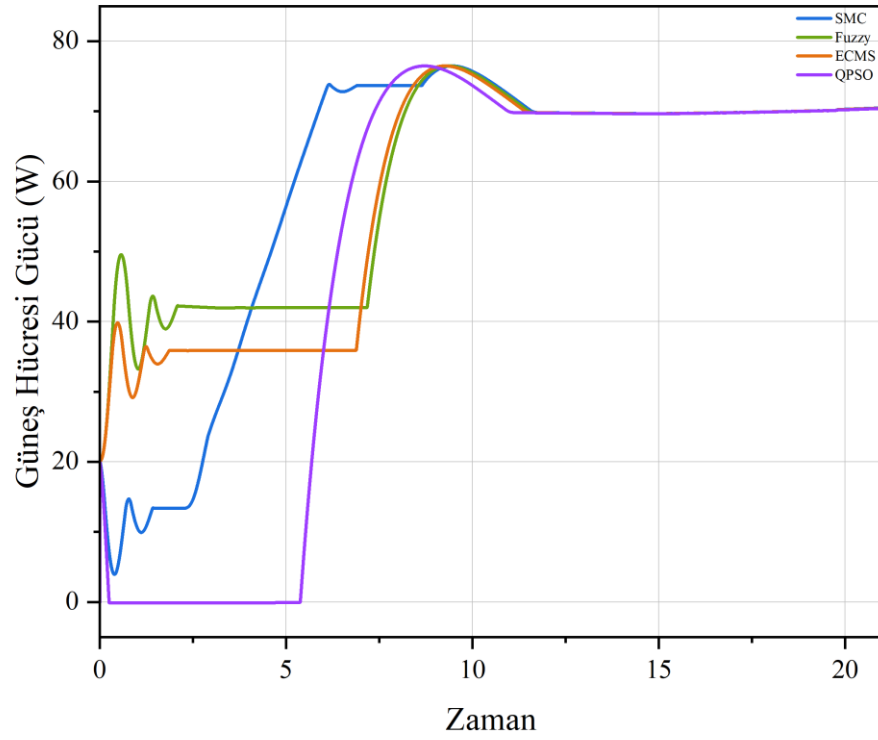
Şekil 6.7'de, güneş hücresinin güç değişimi farklı enerji yönetim algoritmaları için gösterilmiştir. Güneş hücresi, simülasyon sırasında 77 W'lık maksimum güce ulaşmış olup, **Tablo 6.6'**da verildiği şekilde bu değere, algoritmalara göre farklı sürelerde erişilmiştir.

Tablo 6.6: Algoritmaların güneş hücresinin maksimum güce ulaşma süresi.

Algoritmalar	Maksimum Güce Ulaşma Süresi
Durum makinası kontrol algoritması (SMC)	9,5275 s
Bulanık mantık stratejisi (Fuzzy Logic)	9,4861 s
Eşdeğer tüketim minimizasyonu stratejisi (ECMS)	9,1952 s
Kuantum parçacık sürü optimizasyonu (QPSO)	8,7305 s



Şekil 6.6: Güneş hücresi-DC dönüştürücü giriş voltajı değişimi karşılaştırması.



Şekil 6.7: Güneş hücresi gücü karşılaştırma grafiği.

QPSO algoritmasının maksimum güce ulaşma süresi diğer algoritmalarla kıyasla belirgin şekilde daha kısadır. QPSO algoritması, SMC'ye göre 0,797 s, Fuzzy'ye göre 0,756 s, ECMS'ye göre 0,465 s daha hızlıdır. Bu sonuçlar, QPSO algoritmasının enerji taleplerine daha hızlı yanıt verebildiğini ve sistemin dinamik ihtiyaçlarına daha etkin bir şekilde uyum sağlayabildiğini göstermektedir. Bu grafik, algoritmaların enerji yönetim sistemlerinde güneş enerjisinden faydalanma potansiyellerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek için güçlü bir referans sağlamaktadır.

QPSO algoritması, İHA'larda uçuş rotası optimizasyonu amacıyla kullanılan etkili bir yöntemdir. Bu çalışma, QPSO algoritmasının ana enerji kaynağı güneş enerjisi olan mini bir İHA'nın enerji yönetim sistemine ilk kez uygulanmasını kapsamaktadır. Küçük ölçekli ve enerji kaynağı olarak değişken koşullara sahip güneş enerjisini kullanan İHA'larda, aerodinamik etkiler nedeniyle havada kalma süresini artırmak için daha hassas optimizasyon yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, çalışmada QPSO algoritması uygulanmış ve algoritmanın enerji yönetiminde daha verimli olduğu, ayrıca İHA'nın havada kalma süresini artırdığı gözlemlenmiştir.

Tablo 6.7, güneş enerjisili İHA'lar için farklı enerji yönetim sistemlerini ve bunların sağladığı katkıları karşılaştırmaktadır. Çalışmalar, farklı sistem topolojileri ve enerji yönetim stratejileri kullanarak enerji verimliliği, havada kalma süresi ve batarya tasarrufu gibi performans kriterlerine odaklanmaktadır. Mevcut çalışma, hem kural tabanlı hem de optimizasyon tabanlı stratejileri uygulayarak İHA'nın havada kalma süresini artırmayı hedeflemiş ve fazla enerjiyi irtifa olarak depolayarak enerji kullanımını daha verimli hale getirmiştir. Bu karşılaştırma, farklı yaklaşımların etkinliğini değerlendirerek, güneş enerjili İHA'ların enerji yönetim sistemleri açısından geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Tablo 6.7: Literatürdeki güneş hücreli İHA'ların karşılaştırılması.

Ref.	İHA'nın Kütlesi (kg) / Kanat Açıklığı (m)	Sistem Topolojisi	Enerji Yönetim Sistemi	Katkı
[8]	35 kg / 22,5 m	B + PV	Kural tabanlı	Bir günlük döngü boyunca bataryada %23,5 enerji tasarrufu sağlandı.
[16]	5,44 kg / 4,32 m	Dinamik tırmanış + PV	Yörünge optimizasy onu	Enerji tüketimi %32,3 oranında ve gereken batarya kütlesi %6,7 oranında azaltıldı.
[17]	2 m	PV	Elektrikli tahrik sistemi	Sadece güneş enerjisi ile 10 saatten fazla uçuş sağlandı.
[19]	5 kg / 3 m	B + PV + FC	Güç sistemi modeli	Güneş hücrelerinin kullanılmasının %59'a kadar yakıt tasarrufu sağlayabileceğini ve İHA kütlesini azaltabileceğini kanıtladı.
[22]	13,5 kg / 2,87 m	B + PV + FC	Bulanık durum makinesi	Hidrojen tüketiminde %26,7 tasarruf sağladığı görüldü.
[23]	18 kg / 6,4 m	B + PV + FC	Kural tabanlı: Elektrikli güç sistemi	Aktif enerji yönetimi ile batarya şarj seviyesinin %45'te kaldığı, pasif enerji yöntemi ile ise azaldığı görülmüştür.
[34]	2,1 m	B + PV	Elektrikli tahrik sistemi	Dağıtılmış tahrik sistemi, uçuş süresini kısaltmadan güneş enerjili İHA'ların boyutunu küçültmenin mümkün olduğunu doğrular.
[38]	2 kg	B + PV	Elektrikli tahrik sistemi	Farklı eğim açılarında PV hücreleri deneysel olarak analiz edilmiştir.
[42]	5 kg / 4m	B + PV	Tek motorlu ve çift motorlu enerji sistemi	Güneş hücrelerinin enerjisi, kalkış, tırmanma ve acil iniş durumlarında alternatif batarya enerjisinin 1 saatlik uçuş enerjisini sağlar.

Tablo 6.7 Devamı: Literatürdeki güneş hücreli İHA'ların karşılaştırılması.

[43]	2,5 kg / 3,83 m	B + PV + FC	Melez güç sistemi	İHA'nın uçuş süresi 470 dakikadan 970 dakikaya çıkarıldı.
[45]	-	B + PV + RF	RF-Solar sistem	Melez sistemlerin, İHA'lar için enerji sorunlarını iyileştirme olasılığının daha yüksek olduğu doğrular.
[50]	2 m	B + PV	Güç sistemi	İHA'nın güneş enerjisi sisteminin kullanımında %22,5 tasarruf sağlanmıştır.
[52]	-	B + SC + PV	Öğrenme tabanlı	Havada kalma süresinde güneş enerjisi 572 s, SC 426 s ve batarya 295,5 s kadar artış gösterdi.
Mevcut Çalışma	3,3 kg / 1,8 m	B + SC + PV	Kural tabanlı + Optimizas yon tabanlı	Sistemde oluşan fazla enerji irtifa olarak depolanmıştır. Hem kural tabanlı hem de optimizasyon tabanlı stratijiler ile İHA'nın havada kalma süresi artırılmıştır.

7. TARTIŞMA VE YORUM

Bu çalışmada, güneş hücresi yığını, batarya ve süperkapasitörden oluşan melez bir enerji yönetim sistemi incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, güneş enerjisinden maksimum düzeyde faydalanarak İHA'ların havada kalma sürelerini artırmak ve yenilenebilir enerji kullanımını teşvik etmektir. Bu doğrultuda, enerji yönetim stratejileri kural tabanlı ve optimizasyon tabanlı yaklaşımlar kullanılarak değerlendirilmiştir.

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde analiz edilmiş ve ilgili literatürle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Çalışmanın bulguları ışığında, kullanılan enerji yönetim stratejilerinin avantajları ve sınırlılıkları tartışılmıştır. Ayrıca, gelecekteki araştırmalar için potansiyel geliştirme alanları ve öneriler sunulmuştur.

Gao vd. [8], 35 kg kütle ve 22,5 m kanat açıklığına sahip yüksek irtifa uzun dayanıklılık (HALE) tipi bir İHA için lityum-kükürt batarya ve güneş hücresinden oluşan bir melez enerji sistemi üzerine bir enerji yönetim algoritması geliştirmiştir. Söz konusu enerji yönetim sisteminde, güneş hücresinin gün boyunca ürettiği enerji potansiyel enerji olarak depolanmış ve bu enerji, gece saatlerinde kullanılmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, günlük bir döngü boyunca bataryada %23,5 enerji tasarrufu sağlanmıştır. Ancak, bu enerji yönetim sistemi yalnızca batarya üzerinde uygulanmış ve çalışma, nispeten büyük bir İHA modeli üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu durum, enerji yönetim algoritmasının daha küçük ölçekli İHA'lara ve diğer enerji depolama sistemlerine uygulanabilirliğini sınırlamaktadır.

Liu vd. [16], dinamik tırmanma ve güneş enerjisi teknolojisini bir arada kullanarak enerji tüketimini %32,3 oranında, gereken batarya kütlelerini ise %6,7 oranında azaltmayı başarmıştır. Çalışmada, uçuş hızı ve uçuş açıları gibi parametrelerin, optimum toplam enerji kazanımı üzerinde önemli etkilere sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, yenilikçi enerji yönetim stratejilerinin İHA performansı üzerindeki potansiyel etkisini vurgulamaktadır.

Morton ve Papanikolopoulos [17], literatürde ilk kez 2 m kanat açıklığına sahip güneş enerjili bir İHA'nın performansını araştırmıştır. Çalışmalarında, yalnızca güneş

panelleriyle donatılmış bir mini İHA'nın, güneş enerjisiyle 10 saatten fazla uçuş gerçekleştirebildiğini hesaplamışlardır. Bu çalışma, güneş enerjisi kullanımının küçük ölçekli İHA'larda uzun süreli uçuşlar için uygunluğunu göstermesi açısından önem taşımaktadır.

Zhang vd. [22], 2,87 m kanat açıklığına ve 13,5 kg kütleye sahip bir İHA üzerinde, güneş hücresi, yakıt hücresi ve bataryadan oluşan melez bir enerji sistemi için bulanık durum makinesi (FSM) adı verilen yeni bir yöntem uygulamışlardır. Bu yöntem, durum makinesi stratejisi ile bulanık mantık stratejilerinin bir kombinasyonunu içermektedir. Çalışma kapsamında, İHA için MATLAB/Simulink programında tam kapsamlı bir simülasyon modeli geliştirilmiştir. Modelde, yakıt hücresi ana enerji kaynağı olarak kullanılırken, güneş hücresi ve batarya yardımcı enerji kaynakları olarak görev yapmıştır. Simülasyon sonuçları, FSM stratejisinin, kısıtlı termostat kontrolü (CTC) stratejisine kıyasla hidrojen tüketiminde %26,7 oranında tasarruf sağladığını göstermiştir. Ayrıca, çalışmada İHA'nın performansını artırmak amacıyla yörünge optimizasyonu da gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, melez enerji sistemlerinde verimliliği artırmak için yenilikçi stratejilerin uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır.

Lee vd. [23,24], 6,4 m kanat açıklığına ve 18 kg kütleye sahip bir İHA'nın güneş hücresi, yakıt hücresi ve bataryadan oluşan melez enerji sistemini MATLAB/Simulink ortamında modellemiştir. Bu melez sistemde hem aktif hem de pasif enerji yönetim teknikleri uygulanmıştır. Pasif enerji yönetiminde, enerji kaynakları herhangi bir DC/DC dönüştürücü kullanılmadan doğrudan DC barasına bağlanmıştır. Aktif enerji yönetiminde ise, kural tabanlı bir termostat kontrol stratejisi uygulanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, aktif enerji yönetimi sayesinde bataryanın şarj seviyesinin %45'te sabit kaldığı, pasif enerji yönetimi kullanıldığında ise şarj seviyesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, aktif enerji yönetim stratejisinin güç dağıtımında daha verimli olduğu kanıtlanmıştır. Bu çalışma, küçük ölçekli İHA'larda aktif enerji yönetim sisteminin uygulanabilirliğini araştıran ve bu stratejinin üstünlüğünü ortaya koyan ilk çalışma olması nedeniyle literatürde önemli bir yere sahiptir.

Literatürde, kural tabanlı ve optimizasyon tabanlı enerji yönetim sistemleri üzerine yapılan çalışmaların büyük bir kısmı, yakıt hücresi sistemlerine odaklanmıştır. Bu çalışmalar kapsamında, enerji yönetimi doğrudan güneş hücresi sistemine uygulanmamış, güneş genellikle yardımcı enerji kaynağı olarak değerlendirilmiştir.

Bunun yanı sıra, sadece pasif enerji yönetiminin uygulandığı güneş enerjisi sistemleri üzerine araştırmalar da bulunmaktadır. Ancak, bu tür çalışmalar genellikle büyük kanat açıklığına sahip, geniş yüzey alanlı bulunan ve dolayısıyla daha büyük İHA'lar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Güneş hücrelerine gelen ışıınımdan maksimum enerji elde etmek ve bu enerjiyi sabit bir seviyede tutmak için, literatürde maksimum güç noktası takibi (MPPT), enerji yönetim sistemlerinde bir kontrolcü olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ancak, bu çalışmada aktif enerji yönetim stratejisini kontrol ederek, MPPT'ye ihtiyaç duyulmadan bir güneş enerjisi sistemi uygulanmaktadır. Geliştirilen sistem, talep edilen gücün üzerinde üretilen fazla güneş enerjisini irtifa enerjisi olarak depolayarak, batarya enerjisi tükendiğinde bu potansiyel enerjiden faydalanmayı mümkün kılmaktadır.

Ayrıca, literatürde güneş enerjili mini İHA'larda güneşten elde edilen gücü artırmaya yönelik çalışmalar, genellikle enerji yönetim sistemi üzerine değil, güneş ışınlarının açılarının optimize edilmesi, kanat-batarya topolojilerinin geliştirilmesi ve kanat profillerinin iyileştirilmesi gibi diğer teknik alanlarda yürütölmektedir.

Bu çalışmada, literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak, 1,8 m kanat açıklığına ve 3,3 kg kütleyle sahip güneş enerjili bir mini VTOL İHA tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemde enerji yönetimi, ana enerji kaynağı olan güneş hücreleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Güneşten elde edilen enerjiye kontrol uygulayarak, gücü kaynaklar arasında etkin bir şekilde bölüştürmek suretiyle İHA'nın havada kalma süresi artırılmış ve fazla enerji depolanarak gerektiğinde kullanılabilir hâle getirilmiştir.

Sonuçlar, güneş hücreleri tarafından üretilen gücün talep gücünü aştığı durumları ortaya koymuştur. Güneş hücreleri tarafından üretilen güç 70 W olarak ölçölmüşken, talep edilen güç 63 W olarak belirlenmiştir. Bu durum, %11,11'lik bir güç artışı sağlamış ve bu fazla güç sistemde irtifa enerjisi olarak depolanmıştır. İrtifa enerjisi, İHA'nın havada kalma süresini 1,79 saat artırmıştır.

Çalışmada incelenen dört farklı enerji yönetim algoritması (SMC, Fuzzy Logic, ECMS, QPSO) için, güneş hücresinin 77 W maksimum gücüne ulaşma süresi dikkate alınarak havada kalma süresi üzerine katkılar hesaplanmıştır. SMC algoritması, diğer algoritmalara kıyasla daha uzun bir sürede maksimum güce ulaşmaktadır. Bu süreye

göre, her bir algoritmanın havada kalma süresine sağladığı katkılar oransal olarak hesaplanmıştır. Sonuçlara göre, Fuzzy Logic algoritması, en düşük katkıyı sağlamış ve havada kalma süresine yalnızca 0,06 saat katkı yapmıştır. ECMS algoritması ise, havada kalma süresini yaklaşık 0,51 saat artırmaktadır. QPSO algoritması, SMC'ye kıyasla havada kalma süresini yaklaşık 1,22 saat artırmaktadır. Bu optimizasyon çalışmasında, QPSO algoritmasının, diğer algoritmalarla göre daha hızlı bir enerji üretimi sağladığını ve bu hızın havada kalma süresine önemli bir katkı sunduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, dört farklı algoritmanın (SMC, Fuzzy Logic, ECMS, QPSO) güneş enerjisi kullanımı bakımından verimlilikleri, maksimum güce ulaşma süreleri dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Her algoritma, maksimum güce 10 saniye içinde ulaşacak şekilde performans göstermiştir. Algoritmaların performansları, maksimum güce ulaşma sürelerinin en uzun süren algoritmaya (SMC) oranlanması ile hesaplanmıştır. Fuzzy Logic algoritması, SMC algoritmasına göre %0,44 oranında nispeten daha yüksek bir verimlilik sunmuştur. ECMS algoritması, SMC'ye göre %3,61 oranında daha verimli çalışmıştır. QPSO algoritması ise %9,13 ile en yüksek verimliliği sağlamıştır. Bu sonuçlar, güneş enerjisi kullanımında daha hızlı maksimum güce ulaşan algoritmaların, enerji kaynaklarının etkin bir şekilde değerlendirilmesi açısından daha verimli olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, **Şekil 4.9'**da görüldüğü üzere, güneş hücresi modülünün sağladığı güç değeri, sistem çalışmadığı durumdaki beklenen doğrusal performansı temsil etmektedir. Ancak, sistem çalışırken enerji yönetim stratejisi doğrultusunda, güneş hücreleri ihtiyaç duyulduğunda batarya ve süperkapasitörden ek güç çekerek güç talebini karşılamaktadır. Bu durum, sistemin çalışma süresi boyunca güç dalgalanmalarına neden olmaktadır. Özellikle, 10. saniyede güneş hücrelerinin ürettiği gerçek güç değeri 77 W olarak ölçülmüşken, güneş hücresi modülü bu noktada 62 W göstermektedir. Bu sonuç, sistemin beklenenden daha verimli çalıştığını ve uygulanan enerji yönetim stratejisinin 15 W'lık bir güç fazlası sağladığını ortaya koymaktadır. Bu güç fazlası, enerji kaynaklarının etkin bir şekilde entegre edildiğini ve enerji yönetim algoritmalarının talep edilen güç üzerindeki olumlu etkisini kanıtlamaktadır. Buna bağlı olarak, güneş enerjisinden yararlanma oranı yaklaşık %124,19 olarak hesaplanmıştır. Bu oran, bir güneş enerjisi sisteminin güneş ışıınından elde edebileceği teorik maksimum gücün ne kadarını gerçekten ürettiğini gösterir. Sistem,

yalnızca güneş enerjisinden değil, aynı zamanda batarya ve süperkapasitör gibi yardımcı enerji kaynaklarından güç alarak talep edilen gücü aşan bir enerji sağlar. Bu durum, enerji yönetim stratejisinin sistem verimliliğini artırmada büyük bir etkisi olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Enerji yönetim sisteminin, toplam sistem maliyetindeki oranı %40,22 olarak hesaplanmıştır. Bu durum İHA'nın maliyetinin büyük bir kısmının enerji üretimi, depolanması ve yönetimi için kullanılan bileşenlerden oluştuğunu göstermektedir. Güneş hücreleri, batarya, süperkapasitör ve DC/DC dönüştürücüler gibi bileşenlerin maliyetinin toplam sistem maliyetinde önemli bir paya sahip olması, bu bileşenlerin stratejik önemini vurgular. Bu oran, İHA'nın uzun süreli görevler için tasarlandığını ve verimliliği büyük ölçüde enerji yönetim sistemine bağlı olduğunu gösterir. Sistemin yenilenebilir enerji kaynaklarını etkin bir şekilde kullanması için gerekli olan enerji yönetim sistemine yapılan yatırım, uzun vadede enerji maliyetlerini azaltabilir. EMS'nin optimize edilmesi, İHA'nın daha uzun uçuş süreleri elde etmesine olanak sağlayacaktır.

Bu çalışmada geliştirilen melez enerji yönetim sistemine sahip mini İHA'nın amorti süresi yaklaşık 2,71 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, batarya, süperkapasitör ve güneş hücrelerinin birlikte kullanıldığı sistemlerin ekonomik sürdürülebilirliğini artırdığını göstermektedir. Özellikle, farklı enerji kaynaklarının birlikte kullanılması, yalnızca güneş enerjisi veya batarya kullanan sistemlere kıyasla daha kısa amorti süresi ve daha yüksek verimlilik sağlamaktadır. Ayrıca, ticari kullanım potansiyeli yüksek olduğundan, amorti süresi daha da kısaltılabilir. Bu bağlamda, melez enerji yönetimi stratejileri, uzun menzilli ve düşük maliyetli İHA uygulamalarında önemli bir avantaj sunmaktadır.

Simülasyon çalışması ile maksimum güneş enerjisi elde edilmiş ve talep edilen güç başarıyla karşılanmıştır. Bu süreçte, batarya ve süperkapasitörlerin şarj durumu sürekli olarak izlenmiş ve kontrol edilmiştir. Sistemde, batarya ve süperkapasitörler, güneş hücrelerinin güç talebini karşılamakta yetersiz kaldığı durumlarda yardımcı enerji kaynakları olarak etkin bir şekilde görev yapmıştır. Ayrıca, nem ve sıcaklık gibi çevresel koşulların güneş hücreleri üzerinde oluşturabileceği olumsuz etkileri önlemek amacıyla, bu enerji depolama birimleri gerektiğinde sisteme güç sağlamış ve sistemin kararlılığını desteklemiştir. Uygulanan enerji yönetim stratejisi ve kontrol yöntemleri sayesinde, fazla enerjinin, irtifa olarak depolanabileceği yöntem geliştirilmiştir. Bu

yaklaşım, enerji kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamış ve İHA'nın havada kalma süresini önemli ölçüde artırmıştır.

Simülasyon çalışmaları, 0,0001 s örnekleme süresi ile ayrık tipte gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, QPSO algoritmasının hem maksimum güce ulaşma süresi hem de genel enerji verimliliği açısından üstün olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, yenilikçi enerji yönetim stratejilerinin İHA sistemlerine uygulanabilirliğini başarılı bir şekilde ortaya koyarak, sistem performansını artırmak için önemli bir katkı sunmaktadır.

Bu çalışma, entegre enerji yönetim stratejilerinin yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını optimize etme potansiyelini ortaya koyarken, aynı zamanda sistem kararlılığını ve uzun vadeli dayanıklılığı artırmaya yönelik önemli katkılar sunmaktadır. Batarya ve süperkapasitörlerin, hem doğrudan enerji sağlama hem de sistemin çevresel etkilere karşı korunmasındaki rolleri vurgulanmış ve bu bileşenlerin enerji yönetim süreçlerindeki stratejik önemi detaylandırılmıştır. Bu yaklaşım, yenilikçi enerji yönetim sistemlerinin temel bir parçası olarak değerlendirilmektedir.

Ayrıca, bu çalışma, enerji yönetim sistemlerinde aktif stratejilerin kullanılmasına öncelik vererek, güneş enerjisinden elde edilen verimliliğin artırılmasına yönelik literatüre özgün bir katkı sunmaktadır. Geliştirilen yöntem, küçük ölçekli İHA'lar için yenilikçi enerji depolama ve yönetim stratejilerinin uygulanabilirliğini göstermesi açısından önemli bir adım teşkil etmektedir. Bu sonuçlar, küçük ölçekli sistemler için enerji verimliliğini artıran sürdürülebilir yaklaşımların geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır.

Gelecekte, bu çalışma şu şekilde geliştirilebilir. Dinamik süzülme ile farklı irtifalarda rüzgar hızını kullanarak enerji tüketimi olmadan uzun menzilli uçuş sağlanabilir. Katlanabilir veya genişleyebilir kanat profili gibi aerodinamik tasarımın iyileştirilmesi ile daha düşük enerji ile daha uzun menzil elde edilebilir. Uçuş rotası planlaması ve optimizasyonu ile havada kalma süresi arttırılabilir.

Gelecekte, yenilenebilir enerji kaynaklarının melez sistemlere entegrasyonu, İHA'ların çevre dostu ve enerji açısından daha bağımsız hale gelmesini sağlayacaktır. Optimizasyon tabanlı stratejilerin kullanımı, sadece uçuş sürelerini artırmakla kalmayacak, aynı zamanda enerji maliyetlerini ve karbon ayak izini de azaltacaktır.

Ayrıca, melez enerji yönetim sistemlerinin daha gelişmiş teknolojilerle desteklenmesi, İHA'ların performansını artırma potansiyeline sahiptir. Bu kapsamda, laboratuvar

ortamında deneysel çalışmaların sürdürülmesi, elde edilen deneysel verilerin, uçağın rotasının belirlenmesinde kullanılması ve gerçek uçuş sonuçlarının Simulink simülasyonları ile karşılaştırılması, melez sistemlerin doğrulanması ve iyileştirilmesi açısından kritik bir rol oynayacaktır.

Bunun yanı sıra ileriki çalışmalarda, yapay zekâ ve makine öğrenimi gibi ileri teknolojilerin melez enerji yönetim sistemlerine entegre edilmesi beklenmektedir. Bu tür sistemler, enerji tüketimi ve kaynak durumlarını gerçek zamanlı olarak izleyerek, enerji kullanımını optimize edebilir. Yapay zekâ tabanlı algoritmalar ve adaptif öğrenme sistemleri, uçuş sırasında dinamik enerji yönetimi için yeni standartlar oluşturabilir. Özellikle, melez enerji yönetiminde yapay zekâ, makine öğrenimi ve optimizasyon tabanlı yaklaşımların entegrasyonu, çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli katkılar sunarak İHA'ların görev etkinliğini artırabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Hassan Q., Sameen A. Z., Salman H. M., Jaszczur M., Al-Jiboory A. K., (2023). Hydrogen energy future: Advancements in storage technologies and implications for sustainability. *J. Energy Storage*, 72, 108404.
- [2] Le T. T., Sharma P., Bora B. J., Tran V. D., Truong T. H., Le H. C., Nguyen P. Q. P., (2023). Fueling the future: A comprehensive review of hydrogen energy systems and their challenges. *Int. J. Hydrogen Energy*, 54, 791–816.
- [3] Sharma R., Almasi M., Punia R. C., Chaudhary R., Nehra S. P., Dhaka M. S., Sharma A., (2023). Solar-driven polymer electrolyte membrane fuel cell for photovoltaic hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy*, 48, 37999–38014.
- [4] Ates E. B., Calik E., (2023). Public awareness of hydrogen energy: A comprehensive evaluation based on statistical approach. *Int. J. Hydrogen Energy*, 48, 8756–8767.
- [5] Hossain M. A., Islam M. R., Hossain M. A., Hossain M. J., (2023). Control strategy review for hydrogen-renewable energy power system. *J. Energy Storage*, 72, 108170.
- [6] Milidonis K., Eliades A., Grigoriev V., Blanco M. J., (2023). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the planning, operation and maintenance of concentrating solar thermal systems: A review. *Sol. Energy*, 254, 182–194.
- [7] Luca R., Whiteley M., Neville T., Shearing P. R., Brett D. J. L., (2022). Comparative study of energy management systems for a hybrid fuel cell electric vehicle-A novel mutative fuzzy logic controller to prolong fuel cell lifetime. *Int. J. Hydrogen Energy*, 47, 24042–24058.
- [8] Gao X. Z., Hou Z. X., Guo Z., Liu J. X., Chen X. Q., (2013). Energy management strategy for solar-powered high-altitude long-endurance aircraft. *Energy Conversion and Management*, 70, 20–30.
- [9] Zhu X., Guo Z., Hou Z., (2014). Solar-powered airplanes: A historical perspective and future challenges. *Progress in Aerospace Sciences*, 71, 36–53.
- [10] Shiao J. K., Ma D. M., Yang P. Y., Wang G. F., Gong J. H., (2009). Design of a solar power management system for an experimental UAV. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 45, 1350.
- [11] Jashnani S., Nada T. R., Ishfaq M., Khamker A., Shaholia P., (2013). Sizing and preliminary hardware testing of solar powered UAV. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 16(2), 189-198.
- [12] Gao X. Z., Hou Z. X., Guo Z., Fan R. F., Chen X. Q., (2013). The equivalence of gravitational potential and rechargeable battery for high-altitude long-endurance solar-powered aircraft on energy storage. *Energy Conversion and Management*, 76, 986-995.

- [13] Fazelpour F., Vafaeipour M., Rahbari O., Shirmohammadi O., (2013). Considerable parameters of using PV cells for solar-powered aircrafts. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 81-91.
- [14] Wei X., Zhou Z., (2012). Analysis on flight dynamics of solar UAV with multiple propulsion systems. *Applied Mechanics and Materials*, 138-139, 453-458.
- [15] Zhang F., Wang L., Coskun S., Pang H., Cui Y., Xi J., (2020). Energy management strategies for hybrid electric vehicles: Review, classification, comparison, and outlook. *Energies*, 13, 3352.
- [16] Liu S., Bai J., Wang C., (2021). Energy acquisition of a small solar UAV using dynamic soaring. *Aeronaut. J.*, 125, 60–86.
- [17] Morton S., Papanikolopoulos N., (2016), “Two meter solar UAV: Design approach and performance prediction for autonomous sensing applications”, In Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Daejeon, South Korea, 9–14 October.
- [18] Morton S., D’Sa R., Papanikolopoulos N., (2015), “Solar powered UAV: Design and experiments”, In Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Hamburg, Germany, 28 September–2 October.
- [19] Harvey J. R., Jarvis R. A., Verstraete D., Bagg R. L., Honnery D., Palmer J. L., (2012), “Development of a hybrid-electric power-system model for a small surveillance aircraft”, In Proceedings of the 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, ICAS 2012, Brisbane, Australia, 23–28 September.
- [20] Yang Z., Lei T., Lin Z., Fu H., Zhang X., (2018), “The Testing Platform of Hybrid Electric Power System for a Fuel Cell Unmanned Aerial Vehicle”, In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference, ESARS-ITEC 2018, Nottingham, UK, 7–9 November.
- [21] Savvaris A., Xie Y., Malandrakis K., Lopez M., Tsourdos A., (2016), “Development of a fuel cell hybrid-powered unmanned aerial vehicle”, In Proceedings of the 24th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2016, Athens, Greece, 21–24 June.
- [22] Zhang X., Liu L., Dai Y., (2018). Fuzzy state machine energy management strategy for hybrid electric UAVs with PV/Fuel cell/battery power system. *Int. J. Aerosp. Eng.*, 2018, 16.
- [23] Lee B., Kwon S., Park P., Kim K., (2014). Active power management system for an unmanned aerial vehicle powered by solar cells, a fuel cell, and batteries. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 50, 3167–3177.
- [24] Lee B., Park P., Kim C., Yang S., Ahn S., (2012). Power managements of a hybrid electric propulsion system for UAVs. *J. Mech. Sci. Technol.*, 26, 2291–2299.

- [25] Fredericks W., Moore M., Busan R., (2013), “Benefits of hybrid-electric propulsion to achieve 4x cruise efficiency for a VTOL UAV”, 2013 International Power Lift Conference, 171–191, Los Angeles, California, USA, 12-14 August.
- [26] Jenson D., D’Sa R., Henderson T., Kilian J., Schulz B., Papanikolopoulos N., (2017), “Energy characterization of a transformable solar-powered unmanned aerial vehicle”, 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 5142-5148, Vancouver, BC, Canada, 24–28 September.
- [27] D’Sa R., Jenson D., Henderson T., Kilian J., Schulz B., Calvert M., Heller T., Papanikolopoulos N., (2016), “SUAV: Q-An improved design for a transformable solar-powered UAV”, 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 1609-1615, Daejeon, South Korea, 9-14 October.
- [28] D’Sa R., Henderson T., Jenson D., Calvert M., Heller T., Schulz B., Kilian J., Papanikolopoulos N., (2017), “Design and experiments for a transformable solar-UAV”, 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 3917-3923, Singapore, 29 May-3 June.
- [29] D’sa R. R., (2020), “Design of a Transformable Unmanned Aerial Vehicle”, Thesis of Doctorate, University of Minnesota.
- [30] Gang B. G., Kwon S., (2018). Design of an energy management technique for high endurance unmanned aerial vehicles powered by fuel and solar cell systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(20), 9787-9796.
- [31] Klesh A. T., Kabamba P. T., (2007), “Energy-optimal path planning for solar-powered aircraft in level flight”, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, 2966–2982, South Carolina, 20-23 August.
- [32] Peng L., Zheng S., Chai X., Li L., (2018). A novel tangent error maximum power point tracking algorithm for photovoltaic system under fast multi-changing solar irradiances. *Applied Energy*, 210, 303-316.
- [33] Karabetsky D., (2017), “Conceptual design of maximum power point tracking for solar rechargeable airplane”, 2017 IEEE 4th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD), 58-60, Kiev, Ukraine, 17-19 October.
- [34] Liu S., (2020), “Sustainable autonomous solar uav with distributed propulsion system”, Master of Science, Faculty of Purdue University.
- [35] Lee J. S., Yu K. H., (2017). Optimal path planning of solar-powered uav using gravitational potential energy. *IEEE Transactions On Aerospace and Electronic Systems*, 53(3).
- [36] Gao X. Z., Hou Z. X., Guo Z., Chen X. Q., Chen X. Q., (2014). Joint optimization of battery mass and flight trajectory for high-altitude solar-powered aircraft. *Journal of Aerospace Engineering*, 228(13), 2439–2451.

- [37] Moelyadi M. A., Zulkarnain M. F., (2021). Hale uav itb perpetual flight. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1109 012028.
- [38] Zhang C., Zhang C., Li L., Guo Q., (2021). Parameter analysis of power system for solar-powered unmanned aerial vehicle. *Applied Energy*, 295 117031.
- [39] He X., Sun X., Wang F., Li X., Zhuo F., Luo S., (2018), “Design of energy management system for a small solar-powered unmanned aerial vehicle”, IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Charlotte, NC, USA, 25-28 June.
- [40] Feng S., Li P., Xue Y., Gao F., Bai Z., Zhang L., Guo Q., (2020). Characteristics and design key points of small cigs solar uav. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 508 012208.
- [41] Zhao X., Zhou Z., Zhu X., Guo A., (2020). Design of a hand-launched solar-powered unmanned aerial vehicle (uav) system for plateau. *Applied Sciences*, 10, 1300.
- [42] Thipyopas C., Sripawadkul V., Warin N., (2019), “Design and development of a small solar powered uav for environmental monitoring application”, IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering, Yunlin, Taiwan, 3-6 October.
- [43] Gadalla M., Zafar S., (2016). Analysis of a hydrogen fuel cell-pv power system for small uav. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 6422-6432.
- [44] Khoshnouda F., Esatb I., Silvac C., Rhodesd J. D., Kiesslingd A. A., Quadrellid M. B., (2020). Self-powered Solar Aerial Vehicles: Towards Infinite Endurance UAVs. *Unmanned Systems*, 8(2), 95–117.
- [45] Nguyen C. V., Quyen T. V., Le A. M., Truong L. H., Nguyen M. T., (2020). Advanced hybrid energy harvesting systems for unmanned aerial vehicles (UAVs). *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 5(1), 34-39.
- [46] Shah S. A., Hamid S. A, Kamal N. L. M., Norhashim N., Sahwee Z., Azaldin A. R. R., Zolkifli M. I., (2021). Experimental evaluation of solar charge controller installed in a solar-powered unmanned aerial vehicle (UAV). *Science & Technology Research Institute for Defence (STRIDE)*, 14(2), 198-210.
- [47] Turk I., Ozbek E., Ekici S., Karakoc T. H., (2021). A conceptual design of a solar powered UAV and assessment for continental climate flight conditions. *International Journal of Green Energy*, 1-11.
- [48] Bakar A., Ke L., Liu H., Xu Z., Wen D., (2021). Design of low altitude long endurance solar-powered UAV using genetic algorithm. *Aerospace*, 8, 228.
- [49] Rajendran P., Smith H., (2020). Experimental Analysis of Small Solar Unmanned Aerial Vehicle to Predict Aerodynamic Performance. *Incas Bulletin*, 12(4), 173 – 182.

- [50] Chu Y., Ho C., Lee Y., Li B., (2021). Development of a Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicle for Extended Flight Endurance. *Drones*, 5, 44.
- [51] Cosson M., David B., Arzel L., Poizot P., Rhallabi A., (2022). Modelling of photovoltaic production and electrochemical storage in an autonomous solar drone. *eScience*, 2(2), 235-241.
- [52] Khan M. A., Khan A., Ahmad M., Saleem S., Aziz M. S., Hussain S., Khan F. M., (2021). A Study on Flight Time Enhancement of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Using Supercapacitor-Based Hybrid Electric Propulsion System (HEPS). *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46, 1179–1198.
- [53] Meng J., Ma N., Meng F., Zhang X., Liu L., (2022). Energy management strategy of hybrid energy system for a multilobes hybrid air vehicle. *Energy*, 255, 1-16.
- [54] Suryoatmojo, H., Mardiyanto, R., Riawan, D. C., Setijadi, E., Anam, S., Azmi, F. A., Putra, Y. D., (2018), “Design of MPPT based fuzzy logic for solar-powered unmanned aerial vehicle application. In Proceedings of the 4th International Conference on Engineering”, Applied Sciences and Technology: Exploring Innovative Solutions for Smart Society, ICEAST 2018, Phuket, Thailand, 4–7 July.
- [55] Dhillon J., Unni A., Singh N., (2023). Design and Simulation of a PV System with Battery Storage Using Bidirectional DC-DC Converter Using Matlab Simulink. *Int. J. Sci. Technol. Res.*, 6, 1–5.
- [56] Xiao C., Wang B., Wang C., Yan Y., (2023). Design of a novel fully-active PEMFC-Lithium battery hybrid power system based on two automatic ON/OFF switches for unmanned aerial vehicle applications. *Energy Convers. Manag.*, 292, 117417.
- [57] Lei T., Yang Z., Lin Z., Zhang X., (2019). State of art on energy management strategy for hybrid-powered unmanned aerial vehicle. *Chin. J. Aeronaut.*, 32, 1488–1503.
- [58] Yilmaz U., Kircay A., Borekci S., (2018). PV system fuzzy logic MPPT method and PI control as a charge controller. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 81, 994–1001.
- [59] Zhang Z., Zhang R., Zhu J., Gao T., Chen F., Zhang W., (2021). Integrated batteries layout and structural topology optimization for a solar-powered drone. *Chin. J. Aeronaut.*, 34, 114–123.
- [60] Boucher R. J., (1995). History of Unmanned Aerial Vehicles. *Journal of Aircraft*, 32(4), 1-8.
- [61] Zhang C., Kovacs J. M., (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693-712.
- [62] Drone Industry Insights, <https://droneii.com/wp-content/uploads/2019/07/UAV-configurations-slide.pdf>. Erişim Tarihi: 12/10/2024

- [63] Valavanis K. P., Vachtsevanos G. J., (2015), “Handbook of Unmanned Aerial Vehicles”, Springer.
- [64] Boukoberine M. N., Zhou Z., Benbouzid M., (2019). A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects. *Applied Energy*, 255, 1–55.
- [65] Cai G., Dias J., Seneviratne L., (2023). Survey of Small-Scale Unmanned Aerial Vehicles: Recent Advances and Future Development Trends. *Unmanned Systems: Best of 10 Years*, (2), 101–125.
- [66] Babayomi O. O., Makarfi A. U., (2019), “Energy Efficiency in Unmanned Aircraft Systems: A Review”, IEEE PES/IAS PowerAfrica Conference, 569–574, Abuja, Nigeria, 20-23 August.
- [67] NATO, (2019), Minimum Training Requirements for Unmanned Aircraft Systems (UAS) Operators and Pilots, ATP-3.3.8.1 Edition B Version 1, NATO Standardization Office (NSO).
- [68] Austin R., (2010), “Unmanned Aircraft Systems: UAV Design, Development and Deployment”, Wiley.
- [69] Colomina I., Molina P., (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97.
- [70] Peciak M., Skarka W., Mateja K., Gude M., (2023). Impact Analysis of Solar Cells on Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Fixed-Wing UAV. *Aerospace*, 10(3).
- [71] Anderson J., (1999), “Aircraft Performance and Design”, The McGraw-Hill Companies, Chicago, USA.
- [72] Gong A., Verstraete, D., (2017), “Experimental testing of electronic speed controllers for UAVs”, 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Atlanta, GA, 10-12 July.
- [73] Jiao S., Zhang G., Zhou M., Li G., (2023). A comprehensive review of research hotspots on battery management systems for UAVs. *IEEE Access*, 11, 84636-84650.
- [74] Sharma A., Vanjani P., Paliwal N., Basnayaka C. M. W., Jayakody D. N. K., Wang H. C., Muthuchidambaranathan P., (2020). Communication and networking technologies for UAVs: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 168, 102739.
- [75] Adnan N., Nordin S. M., Rahman I., Vasant P., Noor M. A., (2018), “An overview of electric vehicle technology: a vision towards sustainable transportation”, IGI Global, Pennsylvania, USA.
- [76] Bongermينو E., Mastrorocco F., Tomaselli M., Monopoli V. G., Naso D., (2017), “Model and energy management system for a parallel hybrid electric unmanned aerial

vehicle”, 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Edinburgh, UK, 19-21 June.

[77] Xiong R., Cao J., Yu Q., He H., Sun F., (2018). Critical Review on the Battery State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicles. *IEEE Access*, 6, 1832-1843.

[78] The MathWorks,
<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/battery.html>. Erişim Tarihi: 14 Mayıs 2024

[79] Burke A., (2000). Ultracapacitors: why, how, and where is the technology. *Journal of Power Sources*, 91(1), 37–50.

[80] Çınar H., Kandemir I., (2021). Active energy management based on metaheuristic algorithms of fuel cell/battery/supercapacitor energy storage system for aircraft. *Aerospace*, 8, 85.

[81] The MathWorks,
https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/supercapacitor.html?searchHighlight=supercapacitor&s_tid=srchtitle_support_results_2_supercapacitor. Erişim Tarihi: 15 Mayıs 2024

[82] Green M. A., (1982), “Solar cells: Operating principles, technology, and system applications”, Prentice-Hall.

[83] Razykov T. M., Ferekides C. S., Morel D., Stefanakos E., Ullal H. S., Upadhyaya H. M., (2011). Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects. *Solar Energy*, 85(8), 1580-1608.

[84] Gao X. Z., Hou Z. X., Guo Z., Chen X. Q., (2015). Reviews of methods to extract and store energy for solar-powered aircraft. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 96-108, 2015.

[85] Abbe G., Smith H., (2016). Technological development trends in Solar-powered Aircraft Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 770-783.

[86] Lee B., Park P., Kim K., Kwon S., (2014). The flight test and power simulations of an UAV powered by solar cells, a fuel cell and batteries. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(1), 399–405.

[87] Nguyen X. H., Nguyen M. P., (2015). Mathematical modeling of photovoltaic cell/module/arrays with tags in Matlab/Simulink. *Environmental Systems Research*, 4(1).

[88] Alazrag A., Sbata L., (2023). PV System with Battery Storage Using Bidirectional DC-DC Converter. *International Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 5, 11–21.

- [89] Li K., Wu Y., Bakar A., Wang S., Li Y., Wen D., (2022). Energy System Optimization and Simulation for Low-Altitude Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicles. *Aerospace*, 9(6), 331.
- [90] El-Atab N., Mishra R. B., Alshanbari R., Hussain M. M., (2021). Solar Powered Small Unmanned Aerial Vehicles: A Review. *Energy Technology*, 9(12), 1–18.
- [91] Wang H., Shen J., (2018). Analysis of the Characteristics of Solar Cell Array Based on MATLAB/Simulink in Solar Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE Access*, 6, 21195-21201.
- [92] Gao X. Z., Hou Z. X., Zheng G., Zhu X. F., Liu J. X., Chen X. Q., (2013). Parameters determination for concept design of solar-powered, high-altitude long-endurance UAV. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 85(4), 293–303.
- [93] Barbir F., (2012), “PEM Fuel Cells Theory and Practice”, Second Edition, Elsevier.
- [94] Gong A., Verstraete D., (2017). Fuel cell propulsion in small fixed-wing unmanned aerial vehicles: Current status and research needs. *Int. J. Hydrogen Energy*, 42 (33), 21311-21333.
- [95] Dicks A. L., Rand D. A. J., (2018), “Fuel Cell Systems Explained”, Second Edition, Wiley.
- [96] Thounthong P., Rael S., Davat B., (2009). Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power source for vehicle applications. *Journal of Power Sources*, 193 (1), 376–385.
- [97] Cai Q., Brett D. J. L., Browning D., Brandon N. P., (2010). A sizing-design methodology for hybrid fuel cell power systems and its application to an unmanned underwater vehicle. *Journal of Power Sources*, 195(19), 6559-6569.
- [98] Harmon F. G., Frank A. A., Joshi S. S., (2005). The control of a parallel hybrid-electric propulsion system for a small unmanned aerial vehicle using a CMAC neural network. *Neural Networks*, 18 (5-6), 772-780.
- [99] Xie Y., Savvaris A., Tsourdos A., (2019). Fuzzy logic based equivalent consumption optimization of a hybrid electric propulsion system for unmanned aerial vehicles. *Aerospace Science and Technology*, 85, 13-23.
- [100] Gong A., MacNeill R., Verstraete D., Palmer J. L., (2018), “Analysis of a Fuel-Cell/Battery /Supercapacitor Hybrid Propulsion System for a UAV Using a Hardware-in-the-Loop Flight Simulator”, 2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium, 1-17, Cincinnati, Ohio, USA, 9-11 July.
- [101] Moffitt B. A., Bradley T. H., Mavris D., Parekh D. E., (2006), “Design space exploration of small-scale PEM fuel cell long endurance aircraft”, AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference, 1-16, Wichita, Kansas, USA, 25-27 September.

- [102] Yavasoglu H. A., Shen J., Shi C., Gokasan M., Khaligh A., (2015), “Power Split Control Strategy for an EV Powertrain With Two Propulsion Machines”, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1, (4), 382-390.
- [103] Tian W., Liu L., Zhang X., Shao J., Ge J., (2023). A coordinated optimization method of energy management and trajectory optimization for hybrid electric UAVs with PV/Fuel Cell/Battery. *International Journal of Hydrogen Energy*, 50, 1110-1121.
- [104] Zhao X., Wang L., Zhou Y., Pan B., Wang R., Wang L., Yan X., (2022). Energy management strategies for fuel cell hybrid electric vehicles: Classification, comparison, and outlook. *Energy Conversion and Management*, 270, 116179.
- [105] Lü X., Li S., He X. H., Xie C., He S., Xu Y., Yang X., (2022). Hybrid electric vehicles: A review of energy management strategies based on model predictive control. *Journal of Energy Storage*, 56, 106112.
- [106] Huang Y., Wang H., Khajepour A., Li B., Ji J., Zhao K., Hu C., (2018). A review of power management strategies and component sizing methods for hybrid vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 132-144.
- [107] Zhang P., Yan F., Du C., (2015). A comprehensive analysis of energy management strategies for hybrid electric vehicles based on bibliometrics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 88–104.
- [108] Xie Y., Savvarisal A., Tsourdos A., Zhang D., Gu J., (2021). Review of hybrid electric powered aircraft, its conceptual design and energy management methodologies. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(4), 432–450.
- [109] Salmasi F. R., (2007). Control strategies for hybrid electric vehicles: Evolution, classification, comparison, and future trends. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(5 I), 2393–2404.
- [110] Li H., Ravey A., N’Diaye A., Djerdir A., (2017), “A review of energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicle”, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1-6, Belfort, France, 11-14 December.
- [111] Engin S., Çınar H., Kandemir İ., (2024). A rule-based energy management technique considering altitude energy for a mini UAV with a hybrid power system consisting of battery and solar cell. *Energies*, 17(16), 4056.
- [112] Bellman R., (1967). Dynamic Programming. *Mathematics in Science and Engineering*, 40(P1), 101–137.
- [113] Lü X., Wu Y., Lian J., Zhang Y., Chen C., Wang P., Meng L., (2020). Energy management of hybrid electric vehicles: A review of energy optimization of fuel cell hybrid power system based on genetic algorithm. *Energy Conversion and Management*, 205, 112474.
- [114] Azoulay R., Haddad Y., Reches S., (2021). Machine learning methods for UAV flocks management-A survey. *IEEE Access*, 9, 139146–139175.

- [115] Tran D. D., Vafaeipour M., El Baghdadi M., Barrero R., Van Mierlo J., Hegazy O., (2020). Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109596.
- [116] Li H., Ravey A., N'Diaye A., Djerdir A., (2018). A novel equivalent consumption minimization strategy for hybrid electric vehicle powered by fuel cell, battery and supercapacitor. *Journal of Power Sources*, 395, 262–270.
- [117] Li K., Zhou J., Jia C., Yi F., Zhang C., (2024). Energy sources durability energy management for fuel cell hybrid electric bus based on deep reinforcement learning considering future terrain information. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 821–833.
- [118] Song C., Kim K., Sung D., Kim K., Yang H., Lee H., Cho G. Y., Cha S. W., (2021). A Review of Optimal Energy Management Strategies Using Machine Learning Techniques for Hybrid Electric Vehicles. *International Journal of Automotive Technology*, 22, 1437–1452.
- [119] Goodfellow I., Bengio Y., Courville A., (2016), “Deep Learning”, MIT Press.
- [120] Murphy K. P., (2012), “Machine Learning: A Probabilistic Perspective”, MIT Press.
- [121] Lin X., Wang Y., Bogdan P., Chang N., Pedram, M., (2015), “Reinforcement learning based power management for hybrid electric vehicles”, 2014 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD), 32–38, San Jose, CA, USA, 02-06 November.
- [122] Zou Y., Liu T., Liu D., Sun F., (2016). Reinforcement learning-based real-time energy management for a hybrid tracked vehicle. *Applied Energy*, 171, 372–382.
- [123] Harmon F. G., (2005), “Neural Network Control of a Parallel Hybrid-Electric Propulsion System for a Small Unmanned Aerial Vehicle”, Thesis of Doctorate, University of California.
- [124] Harmon F. G., Frank A. A., Chattot J. J., (2006). Conceptual design and simulation of a small hybrid-electric unmanned aerial vehicle. *Journal of Aircraft*, 43 (5), 1490-1498.
- [125] Cao Y., Yao M., Sun X., (2023). An Overview of Modelling and Energy Management Strategies for Hybrid Electric Vehicles. *Appl. Sci.*, 13, 5947.
- [126] Zakaria M., Abdallah M., Elshafie M., (2012), “Design and Production of Small Tailless Unmanned Aerial Vehicle”, In Proceedings of the International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering, Macau, 14–15 November.
- [127] Abd Rahman Y. A., Hajibeigy M. T., Al-Obaidi A. S. M., Cheah K. H., (2017), “Design and Fabrication of Small Vertical-Take-Off-Landing Unmanned Aerial

Vehicle”, In Proceedings of the 9th Eureka 2017 International Engineering Research Conference, Selangor, Malaysia, 6 December.

[128] The MathWorks, Inc. MATLAB.(2023). 23.2.0.2409890 (R2023b) Update 3; The MathWorks Inc.: Natick, MA, USA, 2023.

[129] The MathWorks,
<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/54360-dc-dc-converters-using-circuitry-method>. Erişim Tarihi: 16 Mayıs 2024

[130] The MathWorks,
<https://www.mathworks.com/help/sps/ref/bidirectionaldcdcconverter.html>. Erişim Tarihi: 16 Mayıs 2024

[131] Ulleberg O., (1998), “Stand-alone Power Systems for The Future: Optimal Design, Operation & Control of Solar-Hydrogen Energy Systems”, Thesis of Doctorate, Norwegian University of Science and Technology.

[132] SunPower Corporation Product Brochure, SunPower C60 Solar Cell,
https://eshop.terms.eu/_data/s_3386/files/1379942540-sunpower_c60_bin_ghi.pdf. Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2024

[133] GitHub-Malopolo/EMS-Aircraft: Energy Management System of an Aircraft Powered by FC/PV/BATT/SC, <https://github.com/malopolo/EMS-aircraft>. Erişim Tarihi: 16 Mayıs 2024

[134] The MathWorks,
https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/pvarray.html?s_tid=srchtitle_site_search_17_photovoltaic%20in%20simulink%20library. Erişim Tarihi: 20 Mayıs 2024

[135] Zhang C., Qiu Y., Chen J., Li Y., Liu Z., Liu Y., Zhang J., Hwa C. S., (2022). A comprehensive review of electrochemical hybrid power supply systems and intelligent energy managements for unmanned aerial vehicles in public services. *Energy and AI*, 9, 100175.

[136] Han K., Qian H., Zhang Q., Liu L., Hu X., (2019), “Optimization of Energy Management System for Fuel-Cell/Battery Hybrid Power in Unmanned Aerial Vehicle”, 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2019, 11–14 August.

[137] De Carli A., Liguori P., Marroni A., (1994). A fuzzy-PI control strategy. *Control Engineering Practice*, 2(1), 147–153.

[138] Eberhart R., Kennedy J., (1995), “New Optimizer Using Particle Swarm Theory”, MHS’95. In Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, 4–6 October.

- [139] Chen Z., Xiong R., Cao J., (2016). Particle swarm optimization-based optimal power management of plug-in hybrid electric vehicles considering uncertain driving conditions. *Energy*, 96, 197–208.
- [140] Huang C., Fei J., Deng W., (2020). A Novel Route Planning Method of Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicle Based on Improved QPSO. *IEEE Access*, 8, 65071–65084.
- [141] Zhang X., Liu L., Dai Y., Lu T., (2018). Experimental investigation on the online fuzzy energy management of hybrid fuel cell/battery power system for UAVs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(21), 10094–10103.
- [142] Jun S., Wenbo X., Bin F., (2004), “A global search strategy of quantum-behaved particle swarm optimization”, IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, 111-116, Singapore, 1-03 December.
- [143] Omkar S. N., Khandelwal R., Ananth T. V. S., Naik G. N., Gopalakrishnan S., (2009). Quantum behaved Particle Swarm Optimization (QPSO) for multi-objective design optimization of composite structures. *Expert Systems with Applications*, 36(8), 11312-11322.
- [144] Zadeh L. A., (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8, 338–353.
- [145] Krismadinata R., Nasrudin A. R., Ping H. W., Selvaraj J., (2013). Photovoltaic Module Modeling using Simulink/Matlab. *Procedia Environmental Sciences*, 17, 537–546.

ÖZGEÇMİŞ

Selin Engin, 2018 yılından bu yana Gebze Teknik Üniversitesi'nde Makine Mühendisliği doktora programında öğrenimime devam etmekteyim. Eğitim hayatımda, 2012 yılında Trakya Üniversitesi'nde Makine Mühendisliği alanında yüksek lisansımı tamamladım. Yüksek lisans tezimde, "Binaların Isıtılmasında Enerji Verimliliğinin Termodinamik Değerlendirmesi" başlıklı çalışma ile termodinamik yasalar, ısı yalıtımı ve enerji verimliliği konularında araştırmalar gerçekleştirdim. Lisans eğitimimi ise 2009 yılında Uludağ Üniversitesi Fizik bölümünde tamamladım. Ardından, 2018 yılında İstanbul Üniversitesi İşletme lisans programını tamamladım. Akademik çalışmalarım süresince güneş enerjisi, ısı transferi, termodinamik sistemler ve enerji verimliliği gibi önemli konularda çeşitli seminerler verdim, dersler hazırladım ve makale çalışmaları gerçekleştirdim. 2024 yılında, Dr. Öğr. Üyesi Hasan Çınar ve Prof. Dr. İlyas Kandemir ile hazırladığımız ve doktora tez çalışmamdan üretilmiş olan "A Rule-Based Energy Management Technique Considering Altitude Energy for a Mini UAV with a Hybrid Power System Consisting of Battery and Solar Cell" başlıklı makalem yayımlanmıştır. Bu çalışma, melez enerji sistemi kullanan mini İHA'lar için kural tabanlı enerji yönetim stratejisinin performansını değerlendirmekte ve irtifa enerjisinin enerji yönetimine entegrasyonunu incelemektedir. Akademik yayınlarım arasında, 17-20 Nisan 2013 tarihlerinde İzmir'de gerçekleştirilen TESKON 2013 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi'nde, Prof. Dr.-Ing. Ahmet CAN ile hazırladığımız "Enerji Verimli Bina Isıtılmasının Termodinamik ve Ekonomik Değerlendirmesi" başlıklı makalemizi sunduk. Aynı şekilde, 3-4 Ekim 2013 tarihlerinde İstanbul'da düzenlenen VII. Akdeniz İklimlendirme Kongresi'nde, yine Prof. Dr.-Ing. Ahmet CAN ile hazırladığımız "Binalarda Sürdürülebilir Enerji Kullanımı ve Enerji Verimliliği" başlıklı makalemizi sunduk. İş hayatımda, 2014-2016 yılları arasında Has Group Makina Endüstri A.Ş.'de Metod Mühendisi olarak çalıştım. Öncesinde, 2013-2014 yılları arasında Yıldız Kazan Sanayi A.Ş.'de Proje Mühendisi olarak görev aldım. Bu pozisyonlarda, çeşitli mühendislik projelerinin yönetimi ve uygulamaları üzerine deneyimler kazandım. Bugün, doktora çalışmalarımda enerji verimliliği, yenilenebilir enerji ve insansız hava araçlarının enerji yönetim sistemleri konularında araştırmalar gerçekleştirmekte ve bu alanlara yönelik literatüre katkı sağlamayı hedeflemekteyim.

TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR

Engin, S., Çınar, H., Kandemir İ., (2024), “A Rule-Based Energy Management Technique Considering Altitude Energy for a Mini UAV with a Hybrid Power System Consisting of Battery and Solar Cell”, *Energies*, 17 (16), 4056.

