



**BİR YÜKSEK İRTİFA UZUN TAKAT
İNSANSIZ HAVA ARACINDA HİBRİT
ELEKTRİK TAHRİK SİSTEMİNİN MENZİL
ÜZERİNE ETKİLERİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Sadık Ata YALÇINKAYA

Eskişehir 2024

**BİR YÜKSEK İRTİFA UZUN TAKAT İNSANSIZ HAVA ARACINDA
HİBRİT ELEKTRİK TAHRİK SİSTEMİNİN MENZİL ÜZERİNE
ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

Sadık Ata YALÇINKAYA

Yüksek Lisans Tezi

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Elif KORUYUCU

(İkinci Danışman: Prof. Dr. Önder ALTUNTAŞ)

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak 2024

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Sadık Ata YALÇINKAYA'nın BİR YÜKSEK İRTİFA UZUN TAKAT İNSANSIZ HAVA ARACINDA HİBRİT ELEKTRİK TAHRİK SİSTEMİNİN MENZİL ÜZERİNE ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ başlıklı çalışması 16/01/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Elif KORUYUCU

Üye

: Doç. Dr. Işıl YAZAR

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Birsen YÖRÜK
AÇIKEL

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

16/01/2024

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Sadık Ata YALÇINKAYA, BİR YÜKSEK İRTİFA UZUN TAKAT İNSANSIZ HAVA ARACINDA HİBRİT ELEKTRİK TAHRİK SİSTEMİNİN MENZİL ÜZERİNE ETKİLERİNİN DEğERLENDİRİLMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Dr. Öğr. Üyesi Elif KORUYUCU

ÖZET

BİR YÜKSEK İRTİFA UZUN TAKAT İNSANSIZ HAVA ARACINDA HİBRİT ELEKTRİK TAHRİK SİSTEMİNİN MENZİL ÜZERİNE ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Sadık Ata YALÇINKAYA

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2024

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Elif KORUYUCU

(İkinci Danışman: Prof. Dr. Önder ALTUNTAŞ)

Fosil yakıtların hava araçlarında yaygın olarak kullanılması sonucunda oluşan olumsuz çevresel etkileri azaltmak, bu alanda fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak ve ileride yaşanabilecek arz problemlerinin önüne geçmek için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Temel amaç uzun vadede tamamen elektrikli hava araçlarının kullanılması olup, mevcut teknolojiye bu henüz mümkün değildir. Geçiş adımı olarak hibrit tahrik sistemleri gündeme gelmiştir. Bu çalışmada hibrit elektrikli tahrik sistemi kullanan hava araçları için daha önce literatürde yayınlanmış olan menzil denkleminde faydalananarak, farklı motor tipleri ve farklı irtifalarda HALE sınıfı bir İHA için menzil hesabı yapılmıştır. Çalışma, hibrit elektrikli tahrik sistemlerinde kullanılan bataryaların enerji yoğunluğunun, motor verimliliğinin ve seyir irtifasının hibrit elektrikli İHA'ların menzili üzerinde önemli bir etki yarattığını göstermektedir. Ayrıca bu çalışma, batarya enerji yoğunluğu, itki sistemini oluşturan alt sistemlerin verimliliği ve hibridizasyon derecesi ile İHA'nın menzili arasındaki bağlantıyı ortaya koyan bir vaka çalışması sunmaktadır. Mevcut batarya teknolojisi kullanıldığında hibridizasyon derecesi ile menzilin ters orantılı olduğu belirlenmiştir. Literatürde görülen çalışmalardan farklı olarak; irtifa faktörünün hibrit elektrikli itki sistemine sahip bir İHA'nın menzili üzerindeki etkileri de bu çalışmada incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Havacılık, İHA, Hibrit tahrik, Menzil, HALE

ABSTRACT

EVALUATION OF THE EFFECTS OF A HYBRID ELECTRIC PROPULSION SYSTEM ON RANGE IN A HIGH ALTITUDE LONG ENDURANCE UNMANNED AERIAL VEHICLE

Sadık Ata YALÇINKAYA

Department of Airframe and Powerplant Maintenance

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2024

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Elif KORUYUCU

(Co-Supervisor: Prof. Dr. Önder ALTUNTAŞ)

Various studies are being carried out to reduce the negative environmental impact resulting from the widespread use of fossil fuels in aircraft, to reduce dependence on fossil fuels in this field, and to prevent future supply problems. The main goal is to use fully electric aircraft in the long term, but this is not yet possible with current technology. Hybrid propulsion systems are considered as a transition step. In this study, using the range equation previously published in the literature for aircrafts using hybrid electric propulsion systems, range calculations were made for a HALE class UAV with different engine types and different altitudes. The study shows that the energy density of the batteries used in hybrid electric propulsion systems, engine efficiency and cruise altitude have a significant impact on the range of hybrid electric UAVs. Additionally, this study presents a case study that reveals the connection between battery energy density, the efficiency of the subsystems that make up the propulsion system, the degree of hybridization, and the range of the UAV. It has been determined that when current battery technology is used, the degree of hybridization and range are inversely proportional. Unlike the studies seen in the literature, the effects of altitude factor on the range of a UAV with a hybrid electric propulsion system were also examined in this study.

Keywords: Aviation, UAV, Range, Hybrid propulsion, HALE

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince her aşamada bana yardımcı olan ve özellikle hibrit itki sistemleri konusunda ufkumu açan danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Elif KORUYUCU'ya;

Tez çalışmama değerli katkıları ve geri bildirimleri için ikinci danışmanım Prof. Dr. Önder ALTUNTAŞ'a, tezimi değerlendiren ve yorumlarıyla ilerlememi sağlayan jüri üyeleri Doç. Dr. Işıl YAZAR ve Dr. Öğr. Üyesi Birsen YÖRÜK AÇIKEL'e;

Yüksek lisans eğitimimi mümkün kılan TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş.'ye ve süreç boyunca beni destekleyen yöneticilerim Esra ALPAN, Necati DURMAZ ve Merve Nur TEZCAN ÇAMCI'ya;

Eğitim hayatım boyunca beni yönlendiren, teşvik eden ve destekleyen annem A.Gülsün YALÇINKAYA ve babam İsmail YALÇINKAYA'ya;

Hiçbir konuda beni asla yalnız bırakmayan, maddi ve manevi hayatın her anında yanımda olan, hayat ortağım, biricik değerli eşim Sena TARIM YALÇINKAYA'ya;

Kıymetli önerileri, teknik konularda bana eşlik ettiği beyin fırtınaları ve dostluğu için, arkadaşım Hasan Hüseyin YÜKSEL'e;

Saygı ve sevgilerimi sunar, içtenlikle teşekkür ederim.

Sadık Ata YALÇINKAYA

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Sadık Ata YALÇINKAYA

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI.....	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	II
DANIŞMAN ONAYI.....	III
ÖZET	IV
ABSTRACT	V
TEŞEKKÜR.....	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
GÖRSELLER DİZİNİ.....	XIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIV
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI.....	6
3.1. İnsansız Hava Araçlarının Tarihçesi	6
3.2. Dünyada ve Türkiye’de İHA’lar	8
3.2.1. Dünyada İHA kullanımı.....	8
3.2.2. Türkiye’de İHA kullanımı.....	9
3.2.2.1. Baykar Bayraktar TB2.....	10
3.2.2.2. TUSAŞ Anka	10
3.2.2.3. TUSAŞ Aksungur.....	11
3.2.3. İHA kullanımının avantajları	11
3.3. İnsansız Hava Araçlarında Hibrit İtki Sistemleri	12
3.3.1. Güncel elektrikli hibrit İHA örnekleri.....	12
3.3.1.1. SkyFront Perimeter 8.....	12

3.3.1.2. <i>Advanced Aircraft HAMR İHA</i>	13
3.3.2. Askeri İHA'larda elektrik enerjisine olan ihtiyacın artması	13
3.3.3. HALE sınıfı askeri İHA'larda hibrit elektrikli tahrik sistemlerinin potansiyel faydaları.....	14
3.3.3.1. <i>Uzatılmış menzil ve dayanıklılık</i>	14
3.3.3.2. <i>Azaltılmış gürültü ve ısı</i>	14
3.3.3.3. <i>Çok yönlülük</i>	14
3.3.3.4. <i>Arttırılmış operasyonel irtifa</i>	15
3.3.4. Askeri İHA'larda itki sistemlerinin hibridizasyonu ile ilgili gelecek perspektifi	15
3.4. İHA'lar için Menzilin Önemi.....	16
3.5. Menzil Hesaplama Yöntemleri	17
3.5.1. Analitik yöntemler	18
3.5.2. Ampirik (deneysel) yöntemler	18
3.5.3. Menzil hesabındaki zorluklar	19
3.6. Havacılık İtki Sistemlerinde Hibridizasyon Oranı.....	19
3.7. Hibrit İtki Konsepti ve Çeşitleri.....	20
3.7.1. Sınıflandırma ve özellikler	21
3.7.1.1. <i>Paralel konfigürasyon</i>	21
3.7.1.2. <i>Seri konfigürasyon</i>	22
3.8. Hibrit İtki Sistemini Oluşturan Elemanlar	23
3.9. Hava Araçlarının Hibridizasyonunda Karşılaşılan Zorluklar	24
4. METODOLOJİ	26
4.1. Hibrit Elektrikli İtki Sistemi Entegrasyonu İçin Vaka Analizi.....	26
4.2. Hibrit İHA İçin Menzil Hesaplama Yöntemi.....	28
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	33
5.1. Pistonlu-Seri Konfigürasyon İçin Menzil Hesabı	33
5.2. Pistonlu-Paralel Konfigürasyon İçin Menzil Hesabı.....	34
5.3. Turboşaft-Seri Konfigürasyon İçin Menzil Hesaplama	35
5.4. Turboşaft-Paralel Konfigürasyon İçin Menzil Hesabı.....	37
5.5. Hibridizasyon Oranı Sıfırlanarak Genel Brequet Denklemi ile Hesaplanan Menzil	38

6. SONUÇ VE YORUMLAR39

KAYNAKÇA41

EKLER

ÖZGEÇMİŞ



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. Yerli İHA'ların başlıca özellikleri [32]	11
Tablo 3.2. Çeşitli batarya tiplerine dair teknik özellikler [42]	16
Tablo 4.1. Northrop Grumman RQ-4B Global Hawk insansız hava aracına dair teknik bilgiler	26
Tablo 5.1. Hesaplama yapılan irtifalara karşılık gelen pistonlu motor verimi	33
Tablo 5.2. Pistonlu-seri hibrit konfigürasyonda menzil hesabı için kabul edilen değerler	34
Tablo 5.3. Hesaplama yapılan irtifalara karşılık gelen turboşaft motor verimi	35
Tablo 5.4. Turboşaft-seri hibrit konfigürasyonda menzil hesabı için kabul edilen değerler	36

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Farklı yakıt türlerinin enerji yoğunluklarının karşılaştırılması [68]	25
Şekil 4.1. İHA için serbest cisim diyagramı	28
Şekil 5.1. Turbodizel bir motorun termal veriminin irtifa ile değişimi [73]	33
Şekil 5.2. Pistonlu-seri konfigürasyon için irtifa ve menzil grafiği	34
Şekil 5.3. Pistonlu-Paralel Konfigürasyon için İrtifa ve Menzil Grafiği	35
Şekil 5.4. Dizel ve gaz türbinli motorların termal veriminin irtifa ile değişimi [74]	36
Şekil 5.5. Turboşaft-seri konfigürasyonu için irtifa ve menzil grafiği.....	37
Şekil 5.6. Turboşaft-paralel konfigürasyon için irtifa ve menzil grafiği.....	38
Şekil 5.7. Çeşitli motor tipleri için pervane veriminin hıza göre değişimi [75].....	38

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 3.1. V1 Füzesi [19].....	6
Görsel 3.2. V2 Füzesinin Peenemünde Müzesindeki maketi [21].....	7
Görsel 3.3. Baykar Bayraktar TB2 İHA [29]	10
Görsel 3.4. TUSAŞ Anka [30].....	10
Görsel 3.5. TUSAŞ Aksungur [31].....	11
Görsel 3.6. SkyFront Perimeter 8 İHA [40]	13
Görsel 3.7. Advanced Aircraft HAMR İHA [41]	13
Görsel 3.8. Paralel hibrit itki sisteminin şematik gösterimi[62]	22
Görsel 3.9. Seri hibrit itki sisteminin şematik gösterimi[62].....	22
Görsel 4.1. Northrop Grumman RQ-4B Global Hawk İHA [70]	27

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

EM	: Elektrik motoru
HALE	: Yüksek irtifa uzun takat (high altitude long endurance)
HD	: Hibridizasyon derecesi
HEA	: Hibrit elektrikli araç
İHA	: İnsansız hava aracı
İYM	: İçten yanmalı motor
KT	: Konvansiyonel taşıt
MALE	: Orta irtifa uzun takat (medium altitude long endurance)
SİHA	: Silahlı insansız hava aracı
C_D	: Sürüklenme katsayısı
C_L	: Taşıma katsayısı
D (N)	: Sürüklenme kuvveti
E	: Fines oranı
$E_{0, \text{toplam}}$ (J)	: Kalkış anındaki toplam enerji
E_{bat} (J)	: Batarya enerjisi
e_{bat} (Wh/kg)	: Bataryanın enerji yoğunluğu
E_y (J)	: Yakıt enerjisi
$e_{\text{yakıt}}$ (Wh/kg)	: Yakıt enerji yoğunluğu
L (N)	: Taşıma kuvveti
P (W)	: Güç
P_{bat} (W)	: Batarya gücü
P_e (W)	: Elektriksel güç
$P_{\text{İHA}}$ (W)	: İnsansız hava aracının uçuşu için ihtiyacı olan güç
P_m (W)	: Mekanik güç
P_y (W)	: Yakıt gücü
R (m)	: Menzil
S (m ²)	: Kanat alanı
T (N)	: İtme kuvveti
$T_{\text{İHA}}$ (N)	: İnsansız hava aracının uçuşu için ihtiyacı olan itme
V (m/s)	: Hız
$V_{\text{İHA}}$ (m/s)	: İnsansız hava aracının hızı
W (N)	: Ağırlık
$W_{\text{Boş}}$ (N)	: İHA boş ağırlığı
W_{FY} (N)	: İHA faydalı yük ağırlığı
W_{bat} (N)	: İHA batarya ağırlığı

$W_{\text{yakıt}} \text{ (N)}$	:	İHA yakıt ağırlığı
η_e	:	Elektriksel verim
η_m	:	Mekanik verim
$\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$	:	Yoğunluk
Ψ	:	Hibridizasyon oranı



1. GİRİŞ

Modern askeri ortamda savunma sanayi uygulamaları için insansız hava araçlarının (İHA) menzilini arttırmak büyük öneme sahiptir [1]. İHA'lar, farklı ortamlarda otonom olarak gezinme, kritik görevleri hassasiyet ve verimlilikle yerine getirme konusundaki olağanüstü yetenekleri nedeniyle vazgeçilmez unsurlardır. Bu görevler, gözetleme, keşif, arama ve kurtarma operasyonları ve hatta parazit önleyici konumlandırma sistemleri de dahil olmak üzere çok çeşitli faaliyetleri kapsamakta ve böylece İHA'ların savunma uygulamalarındaki çok yönlülüğünün ve kullanışlılığının altını çizmektedir [2].

Ülkemizin coğrafyasının deprem yatkinlığı ve 6 Şubat 2023 tarihinde ülkemizde yaşanan deprem felaketi göz önüne alındığında İHA'ların maliyet etkinliği ve uyarlanabilirliğinin, kritik altyapıların denetlenmesi ve afetten zarar gören alanların araştırılması gibi sivil, ticari ve endüstriyel görevlerde de yaygın olarak benimsenmelerine katkıda bulunduğunu da belirtmekte fayda vardır [3]. Tarımda ise pestisit ilaçlamasında İHA kullanımının özellikle insan erişiminin zor olduğu ve meteorolojik koşulların yetersiz olduğu bölgelerde oldukça avantajlı olduğu kanıtlanmıştır [4]. Ayrıca İHA menzilinin genişletilmesi, hücresel iletişim sistemlerinin kapsama alanını ve trafik yönetimini geliştirmenin yanı sıra gerçek zamanlı karayolu trafiği izleme ve askeri uygulamaları destekleme konusunda da muazzam bir potansiyele sahiptir [5].

Sayırsız uygulama ve İHA'lara artan güven göz önüne alındığında, savunmayla ilgili görevlerdeki etkinliklerini optimize etmek için operasyonel menzillerini genişletmek zorunlu hale gelmiştir. Örneğin, dikey kalkış ve iniş yeteneğini korurken menzili artırmak, İHA görevlerinin kusursuz bir şekilde yürütülmesine izin verdiği için büyük önem taşımaktadır [6]. Bu menzil genişletmesi, özellikle afet bölgeleri veya askeri operasyonlar gibi karadan erişimin sınırlı olabileceği senaryolarda, daha geniş alanları kapsama ve daha uzun mesafelerde operasyon yapma ihtiyacı göz önüne alındığında daha da kritik hale gelmektedir [7].

Savunma bağlamında, İHA'ların menzilinin genişletilmesi, anti-parazit konumlandırma ve kuşatma gibi zorlukların çözümünde de önemli bir rol üstlenmektedir. İHA'lar, GSM şebekesi çapa düğümleri olarak hareket ederek, sıkışma durumunda yer kullanıcılarına konumlandırma hizmetleri sağlayabilir; bu gibi örnekler düşman koşullarının üstesinden gelmek için menzil genişletmenin kritikliğini vurgulamaktadır.

[8]. Ek olarak, İHA kuşatmasının savunma uygulamalarında kullanılması, daha uzun iletişim mesafelerini gerektirmektedir. Bu da operasyonel menzillerin genişletilmesiyle elde edilebilecektir [9].

Silahlı insansız silahlı araçları (SİHA'lar), sundukları havadan keşif, hassas saldırı ve sürekli gözetim gibi özellikleriyle geçtiğimiz üç on yılda savaş alanında devrim yaratmıştır. Ancak operasyonel etkinlikleri sınırlı bir menzile bağlı olduğu için çoğu zaman görev kapsamını ve esnekliğini engellemektedir. Bu darboğazın üstesinden gelmek için geleneksel tahrik sistemlerinin ötesine geçen bir paradigma değişikliği gereklidir. Hibrit tahrik sistemleri bu sorun için oyun değiştirici olabilme potansiyeline sahiptir. Hibrit tahrik sistemlerinin birincil kazancı menzil olmakla beraber platforma entegre bataryalar sayesinde hem fosil yakıt tüketimini hem de fosil yakıt kullanımının çevreye verdiği olumsuz etkileri azaltacaktır. Bu sayede gerçekten otonom ve kalıcı İHA operasyonları çağı açabilecektir. Bu tez, çeşitli hibrit konfigürasyonlarının kapsamlı bir analizi yoluyla İHA'ların uzun süreli görevlerinin mümkün kılındığı ve sonuç olarak savaş alanında belirleyici üstünlük sağlandığı bir geleceğe doğru bir yol çizmeyi amaçlamaktadır.

Yüksek İrtifa Uzun Dayanıklılık (HALE) askeri İHA'larda hibrit elektrikli itki sistemlerinin geliştirilmesi, aktif araştırma ve geliştirme alanı olmaya devam etmektedir. Birçok askeri projenin gizli doğası nedeniyle operasyonel HALE sınıfı hibrit İHA'ların özel örnekleri kolayca erişilebilir olmasa da bu tür sistemlerin genel eğilimleri ve potansiyel faydaları ortaya koyulabilmektedir. Bu çalışmada, bir vaka analizi olarak hem uzun menzili ile öne çıkan bir İHA olması hem de yaygın kullanıma sahip olması göz önünde bulundurularak, Northrop Grumman RQ-4B Global Hawk insansız hava aracı incelenmiştir. Bu İHA'nın hibrit elektrik tahrikli olması durumunda, farklı irtifalar için ve farklı hibridizasyon dereceleri için menzil hesaplamaları yapılarak karşılaştırılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Hibrit elektrikli uçakların menziline ilişkin açık literatürde yapılan araştırma sonucunda aşağıdaki çalışmalar elde edilerek incelenmiştir.

Elektrikli veya hibrit elektrikli bir uçağın menzilinı doğru bir şekilde hesaplamak veya tahmin etmek için çeşitli yöntemler ve faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. McQueen ve arkadaşlarına göre, tamamen elektrikli güç aktarma sistemleri, seçilen referans uçağın menzilinın %30'una kadar ulaşabilirken, hibrit elektrikli durumlarda, yakıt hacmi ve enerji dağıtım stratejisine bağılı olarak %30 ile %73 arasında bir menzil elde edilebilir. Bu, güç aktarma sistemi ve enerji dağıtım stratejisinin elektrikli ve hibrit elektrikli uçakların menzili üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir [10].

Başka bir çalışmada, McQueen ve arkadaşları, hibrit elektrikli uçakların menzilinın yakıt kütlesine yakından bağılı olduğunu vurgulamıştır. Hibrit elektrikli uçaklar, geleneksel itki sistemine sahip uçakların menzilinın yaklaşık %44'üne erişebilmektedir. Bu, hibrit elektrikli uçakların menzilinı belirlemede yakıt kütlesinin önemini vurgulamaktadır [11].

Zong ve arkadaşları, geleneksel itki sistemine sahip uçakların tasarım aşamalarında kanat alanını ve boyutlarını hesaplamak için kullanılan iterasyon yöntemlerinin, hibrit-elektrikli uçaklar için de uygulanabilir olduğunu belirtmiştir. Bu, iterasyon temelli yöntemlerin hibrit-elektrikli uçakların boyut ve kanat alanını hesaplamada önemli bir rol oynadığını, dolayısıyla menzillerini tahmin etmekte de etkili olduğunu göstermektedir [12].

Yezegulian ve Işıkveren, Eulair insansız hava aracının havada kalma süresini artırmak için Autarkic-Parallel-Hibrit mimarisinin uygulanabilirliğini araştırmıştır. Araştırmacılar, ORC termal enerji geri kazanım cihazı ve 2020 yılı batarya teknolojisi ile bir Autarkic-Parallel-Hibrit mimarisinin uygulanmasıyla, hava aracının dayanıklılığının yaklaşık %11 veya yaklaşık 28 saat artırılabilceğini bulmuşlardır. Bu, buz çözme sistemi, uçuş sırasında şarj etme ve acil hava aracı kurtarma kapasiteleri dâhil olmak üzeredir. Araştırmacılar ayrıca, aynı hava aracından buz çözme işlevselliğini çıkarmanın, maksimum dayanıklılıkta %20'lik bir artışa, yani 30 saat operasyon süresi sağladığını ifade etmişlerdir. Bu sonuçlar, hibrit mimarinin İHA'ların dayanıklılığını önemli ölçüde

artırabileceğini göstermektedir. Dahası, hibrit tahrik sistemleri ile enerji geri kazanım yöntemlerinin birleştirilmesi, İHA'lar için şu anda mevcut olmayan veya geleneksel yaklaşımlar kullanılarak uygulanması pratik olmayan ek işlevlerin etkinleştirilmesine de olanak tanıyabileceği gösterilmiştir [13].

İncelenen diğer bir çalışma ise De Vries ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, fosil yakıtla çalışan geleneksel uçaklar, tamamen elektrikli uçaklar ve sabit hibridizasyon oranına sahip hibrit-elektrikli uçaklar için bir menzil denklemi türetilmiştir. Hibridizasyon oranı sıfır olduğunda, bu denklemin geleneksel Breguet menzil denklemiyle aynı olduğu kanıtlanmıştır. Benzer şekilde, hibridizasyon oranı tamamen elektrikli konfigürasyonlar için 1'e eşit olduğunda, denklem mevcut literatürde bulunan ifadelerle uyumludur. Ayrıca, denklem, uçak konfigürasyonu hakkında kapsamlı bir anlayış gerektirmeden, hibrit-elektrikli uçaklarda batarya teknolojisi seviyesinin ve diğer tasarım faktörlerinin etkisine dair bilgiler sunmaktadır. Denklemin, hibrit-elektrikli uçakların kurulu güç ve boş ağırlığını tahmin etme yeteneğine sahip yöntemlerle birleştirilmesi sonucunda, tasarım alanını analiz etmenin veya daha gelişmiş tasarım rutinleri için ilk değerler sağlamanın mümkün olduğu belirtilmiştir [14].

Bu konuyla ilgili literatürde rastlanan en kapsamlı örnek Batra ve arkadaşları tarafından verilmiştir. Bu çalışma, hibrit-elektrikli uçaklar için yeni bir menzil denklemi sunmakta, daha önce literatürde yayınlanan, sabit güç paylaşımına sahip hibrit-elektrikli uçaklar için menzil denklemiyle ilgili mevcut teoriyi yeniden ele almaktadır. Dahası, elektrik ve yakıtla çalışan tahrik sistemlerinin verimliliğini hesaba katan, verimlilik tabanlı yeni bir hibridizasyon derecesi tanımı sunmaktadır. Çalışma, ilgili tahrik sistemlerinin verimliliğinin, uçağın menziline tahminini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Bu ilişkiyi göstermek için, bir vaka çalışması kullanılarak, batarya enerji yoğunluğu, tahrik sistemi verimliliği ve uçağın menziline göre hibridizasyon derecesinin modifiye edilmesi arasındaki etkileşim araştırılmaktadır. Çalışma, her uçak tasarımı için, altındaki hibridizasyon derecesinin menzil ile ilişkisiz hale geldiği bir batarya enerji yoğunluğu eşiğinin var olduğunu ortaya koymaktadır. Hibridizasyon derecesi bu eşik altında arttıkça menzil azalmaktadır. Tersine, bu eşikten sonra, hibridizasyon derecesindeki bir artış uçağın menziline artırmaktadır. Araştırma, hibridizasyon derecesi tanımının, literatürdeki önceki yayınlarla karşılaştırıldığında bu eşiği önemli ölçüde yükselttiğini göstermektedir. Sonuç olarak, yüksek derecede hibritleştirilmiş bir uçak

tasarlamının güncel batarya teknolojisi ile menzil açısından faydalı olmadığı vurgulanmıştır [15].

İncelenen başka bir alışma Wroblewski ve Ansell tarafından yayınlanan bir konferans bildirisidir. Bu çalışmada, geleneksel Bréguet Menzil Denklemi, hibrit-elektrikli jet uçağında elektrik motoru ve batarya enerji kaynağını kapsayacak şekilde değıştirilmiştir. Kavramsal hibrit-elektrikli uçaklar için elde edilen menziller, Embraer ERJ-175 bölgesel jet uçağı için açık kaynaklı uçak teknik verileri kullanılarak yapılan hibrit-elektrikli uçuş performansı simülasyonu ile karşılaştırılmıştır. Farklı hibridizasyon seviyeleri, zaman adımlı uçuş performansı modeli kullanılarak simüle edilmiş ve Hibrit-Elektrikli Bréguet Menzil Denklemi (HEBRE) sonuçları ile karşılaştırılmıştır. HEBRE ve zaman adımlı model, hibridizasyon derecesi ve batarya özgül enerji değerleri eşitlendiğinde tutarlı bir şekilde benzer maksimum menziller elde edilmiştir. HEBRE tarafından elde edilen menzil değerleri, simülasyonlarda sıfır ve %100 hibridazasyon dereceleri kullanıldığında, geleneksel ve tamamen elektrikli Bréguet Menzil Denklemleri tarafından retilenlerle tutarlı olduğu görülmüştür. Hem zaman adımlı modelden hem de HEBRE'den elde edilen sonuçlar, çeşitli hibridizasyon değerleri arasında maksimum menzil için karşılaştırılabilir seyir Mach sayıları olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, itki sistemindeki hibridizasyon derecesi arttıkça, maksimum ulaşılabilir menzil için seyir Mach sayısının azaldığını göstermektedir [16].

Yapılan literatür taraması neticesinde, hibrit elektrikli tahrik sistemine sahip hava araçları için çeşitli menzil hesaplama yaklaşımları incelenmiştir. Bu çalışmada ise, en güncel çalışma olan, Batra ve arkadaşlarının 2023 yılında yayınlamış oldukları çalışma baz alınarak bir vaka çalışması yapılmıştır. Batra ve arkadaşlarından farklı olarak, irtifa kaynaklı faktörlerin de menzil üzerindeki etkileri irdelenmiştir.

3. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI

3.1. İnsansız Hava Araçlarının Tarihçesi

İHA'ların kullanımı, çok eski tarihlere dayanmaktadır. İlk İHA'lar, 19. yüzyılın ortalarında kullanılan balonlardır. Avusturya, 22 Ağustos 1849 tarihinde Venedik şehrini bombalamak amacıyla iki yüz adet insansız balon kullanmıştır. Bu balonlarda zaman ayarlı fitilli bombalar kullanılmıştır. Bu saldırı, tarihteki ilk insansız hava saldırısı olarak kabul edilmektedir [17].

Askeri havadan keşif tarihindeki ilk adımlardan biri, İspanyol-Amerikan Savaşı'nda Amerikalı bir mühendisin düşman mevzilerini görüntülemek için uçurtmaya bağladığı kamerayla atılmıştır. İnsansız hava araçlarının gelişiminde ise en büyük sıçrama, İkinci Dünya Savaşı'nın sonlarında Nazilerin Londra'ya ulaşabilen, Görsel 3.1'de gösterilen V1 füzesini kullanmasıyla gerçekleşmiştir. Bu füzenin savaşta etkinliği tartışmalı olsa da uzaktan hedeflere saldırma yeteneği savaş alanını köklü bir şekilde değiştirmiştir [18].



Görsel 3.1. V1 Füzesi [19]

İkinci Dünya Savaşı'nda düşman hedeflerine saldırmak için Almanların kullandığı V1 ve V2 füzeleri (Görsel 3.1 ve 3.2) insansız hava aracı örneklerindendir.

Soğuk Savaş döneminde ise İHA'lar, keşif ve gözetleme, silahlı saldırılar ve iletişim için kullanılmıştır. Bu dönemde, İHA'lar giderek daha gelişmiş hale gelmiştir.

1991 Körfez Savaşı'nda, İHA'lar, keşif ve gözetleme için yaygın olarak kullanılmıştır. Bu durum, İHA'ların savaş alanındaki rolünün arttığının bir göstergesi olarak kabul edilmektedir [20].



Görsel 3.2. V2 Füzesinin Peenemünde Müzesindeki maketi [21]

İHA'ların tarihi, havacılık teknolojisinin sürekli evrimine dair net bir örnek teşkil etmektedir. İHA'ların geçmişi, 19. yüzyılın ortalarına dayanan zengin bir tarihsel birikime sahiptir [22]. İHA'ların gelişimi, havacılık ve mühendislik alanında yenilikçi çözümlere duyulan ihtiyaçtan doğmuştur. Zaman içinde, İHA teknolojisi, çevre bilimleri, uzaktan algılama, askeri kullanım ve geomatik gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak benimsenmesine yol açan önemli ilerlemeler yaşamıştır.

İHA'ların tarihsel ilerleyişi, İHA görev profili ve rota optimizasyonu için gelişmiş hesaplama tekniklerinin entegrasyonu dâhil olmak üzere önemli teknolojik kilometre taşlarına sahiptir. Ayrıca, İHA iletişim ağlarının tarihsel gelişimi, sürü İHA araştırmalarına da imkân sağlamıştır. İHA teknolojisinin tarihsel gelişimi, İHA

yeteneklerini ve performansını artırmada önemli bir rol oynayan yapay zeka ve makine öğrenimi gibi araştırma konularının ilerlemesiyle de iç içe geçmiştir [23-25].

İHA'ların sivil kullanımdaki tarihsel önemi, ormancılık, inşaat, altyapı, mimari gibi çeşitli endüstrilerdeki uygulamalarına kadar uzanmaktadır [26, 27].

3.2. Dünyada ve Türkiye’de İHA’lar

İnsansız hava araçları, son yıllarda askeri ve sivil uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir teknoloji haline gelmiştir. İHA'lar, düşük maliyetleri, yüksek manevra kabiliyetleri ve uzun görev süreleri gibi avantajları nedeniyle birçok farklı alanda kullanılabilmektedir.

3.2.1. Dünyada İHA kullanımı

Dünyada İHA kullanımı, askeri alandan sivil alana doğru hızla yayılmaktadır. İHA'lar, askeri alanda keşif, gözetleme, taarruz ve eğitim gibi görevlerde kullanılmaktadır. Sivil alanda ise İHA'lar, paket teslimatı, havacılık fotoğrafçılığı, acil durum müdahalesi ve çevre izleme gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır.

İHA'ların askeri alandaki kullanımı, özellikle son yıllarda artmıştır.

Modern İHA'lar, keşif ve gözetleme görevleri için geliştirilmiştir. Ancak, zamanla silahlandırılarak, keşif ve gözetleme görevlerinin yanı sıra silahlı saldırılar gerçekleştirme yeteneğine de kavuşmuşlardır [28].

Bu dönüşüm, İHA'ların askeri alandaki önemini önemli ölçüde artırmıştır. İHA'lar, hem keşif hem de saldırı görevleri için yüksek maliyet ve risk etkinliği sunmaktadır. İHA'lar, askeri alanlarda aşağıdaki görevlerde kullanılabilmektedir:

- **Keşif:** İHA'lar, sınır bölgeleri, savaş meydanları vb. gözetlemek ve terör/düşman unsurlarını tespit etmek için kullanılmaktadır. İHA'lar, yüksek çözünürlüklü kameralar ve radarlar ile donatılarak, terör/düşman unsurlarını uzun mesafelerden tespit edebilmektedir.
- **Gözetleme:** İHA'lar, terör/düşman unsurlarının hareketlerini izlemek ve hedefleri tespit etmek için kullanılmaktadır. İHA'lar, uzun süreler havada kalabildikleri için, terör/düşman unsurlarının hareketlerini sürekli olarak izleyebilmektedir.

- **Taarruz:** İHA'lar, düşman hedeflerine karşı saldırılarda kullanılmaktadır. İHA'lar, bombalar, füzeler ve diğer silahlarla donatılarak, düşman hedeflerini vurabilmektedir.
- **Eğitim:** İHA'lar, askerlerin eğitimlerinde kullanılmaktadır. İHA'lar, askerlere savaş meydanını anlama ve düşman unsurlarını tespit etme becerileri kazandırmak için kullanılmaktadır.

Sivil alanda İHA kullanımı ise, özellikle son yıllarda hızla artmıştır. İHA'lar, sivil alanda aşağıdaki görevlerde kullanılabilir:

- **Paket teslimatı:** İHA'lar, küçük ve orta boyutlu paketlerin teslimatı için kullanılmaktadır. İHA'lar, hava trafiğini azaltarak, paket teslimatında verimliliği artırmaktadır.
- **Havacılık fotoğrafçılığı:** İHA'lar, yüksek çözünürlüklü fotoğraflar ve videolar çekmek için kullanılmaktadır. İHA'lar, ulaşılması zor yerlerden fotoğraf ve video çekerek, yeni perspektifler sunmaktadır.
- **Acil durum müdahalesi:** İHA'lar, acil durum müdahalelerinde kullanılmaktadır. İHA'lar, arama kurtarma, yangın söndürme ve diğer acil durum müdahalelerinde kullanılmaktadır.
- **Çevre izleme:** İHA'lar, çevreyi izlemek için kullanılmaktadır. İHA'lar, orman yangınlarını tespit etmek, çevre kirliliğini izlemek ve diğer çevresel sorunları tespit etmek için kullanılmaktadır.
- **Tarım:** İHA'lar tarım alanında özellikle zararlılarla mücadele, ilaçlama, gözlem, gübreleme vb. işlemler için kullanılmaktadır.

3.2.2. Türkiye'de İHA kullanımı

Türkiye'de İHA kullanımı, askeri ve sivil alanda hızla yaygınlaşmaktadır. İHA'lar, Türk Silahlı Kuvvetleri (TSK) tarafından keşif, gözetleme ve taarruz gibi görevlerde kullanılmaktadır. Ayrıca, İHA'lar, Türk güvenlik güçleri tarafından da terörle mücadelede kullanılmaktadır.

Sivil alanda İHA kullanımı ise, Türkiye'de oldukça yeni bir gelişmedir.

Türkiye'de kullanılan bazı İHA modelleri, aşağıdaki gibidir:

3.2.2.1. Baykar Bayraktar TB2

Baykar tarafından geliştirilen ve üretilen Bayraktar TB2 (Görsel 3.3), orta boyutlu bir İHA'dır. Bayraktar TB2, keşif, gözetleme ve taarruz gibi görevlerde kullanılmaktadır.



Görsel 3.3. Baykar Bayraktar TB2 İHA [29]

3.2.2.2. TUSAŞ Anka

Görsel 3.4'te görüldüğü üzere TUSAŞ tarafından geliştirilen ve üretilen Anka, orta boyutlu bir İHA'dır. Anka, keşif, gözetleme, taarruz ve eğitim gibi görevlerde kullanılmaktadır.



Görsel 3.4. TUSAŞ Anka [30]

3.2.2.3. TUSAŞ Aksungur

TUSAŞ tarafından geliştirilen ve üretilen Aksungur (Görsel 3.5), büyük boyutlu bir İHA'dır. Aksungur, taarruz, eğitim ve araştırma geliştirme gibi görevlerde kullanılmaktadır.



Görsel 3.5. TUSAŞ Aksungur [31]

Yerli İHA'ların başlıca özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Yerli İHA'ların başlıca özellikleri [32]

Özellik	Bayraktar TB2	Bayraktar Akıncı	TUSAŞ Anka	TUSAŞ Aksungur
Uçak Sınıfı	MALE	MALE	MALE	MALE
Kullanılan Motor	Rotax 912	PT6A-135A	Thielert	2 adet TEI PD-170
Motor Gücü	100 Hp	750 Hp	150 Hp	170 Hp
Maksimum Kalkış Ağırlığı	700 kg	6.000 kg	1.700 kg	3.300 kg

3.2.3. İHA kullanımının avantajları

İHA'ların kullanımının birçok avantajı bulunmaktadır. İHA'lar, düşük maliyetlidir, yüksek manevra kabiliyetine ve uzun görev sürelerine sahiptir. İHA'lar, insansız oldukları için, insan hayatını riske atmadan görev yapabilmektedir. Ayrıca, aerodinamik ve performans açısından, özellikle sabit kanatlı İHA'lar yüksek hızlar ve büyük faydalı yüklerle uzun menzilli görevler için üstün verimlilik sergiler [33].

İHA kullanımının bir diğer avantajı ise; sağlık sektöründe, aşı teslimatı ve tedarik zincirlerini iyileştirmek ve dolayısıyla insan sağlığına katkıda bulunmaktadır [34, 35].

3.3. İnsansız Hava Araçlarında Hibrit İtki Sistemleri

Modern havacılık araştırmalarında, temiz ve daha verimli uçak teknolojisine geçiş ön plandadır. Modern insansız hava araçları çoğunlukla içten yanmalı motorlar veya elektrikli motor tahrik sistemlerinden oluşur. Hibrit elektrikli itki sistemleri, içten yanmalı motorların dayanıklılığı ve elektrikli motorların verimliliğini birleştiren bir tahrik sistemidir. Hibrit elektrikli itki sistemlerinin İHA'lara entegrasyonu, performansı artırmak, emisyonları azaltmak ve askeri uygulamalarda artan elektrik enerjisi talebini karşılamak için umut verici bir yöntemdir. Devam eden araştırmalar, bu sistemleri optimize etmeye ve çeşitli İHA platformlarında potansiyellerini araştırmaya odaklanmıştır.

İHA'lardaki hibrit itki sistemlerinin mimarisi, paralel hibrit-elektrik itki, dağıtılmış itki ve tamamen elektrikli itki sistemleri gibi seçenekleri içerebilmektedir [36]. Örneğin, paralel hibrit-elektrikli itki sistemleri, askeri ve gözetleme görevlerinde kullanılan küçük İHA'lar için faydalı olarak kabul edilmektedir, çünkü daha iyi yakıt ekonomisi ve daha düşük emisyon sunmaktadırlar [37].

Ek olarak, çalışmalar; hibrit-elektrik itki sistemlerinin, dağıtılmış itki yoluyla yeni ve sıra dışı İHA platformu konfigürasyonları oluşturulabilmesi ve motor arızası durumunda artan yedeklilik yeteneği gibi birtakım avantajlar sunabileceğini göstermiştir [38].

Ayrıca, askeri İHA'larda elektrik enerjisine olan talep artmakta ve bu da gelişmiş operasyonel gereksinimleri karşılamak için hibrit elektrikli sistemler gibi gelişmiş itki sistemlerinin araştırılmasını gerektirmektedir [39].

3.3.1. Güncel elektrikli hibrit İHA örnekleri

3.3.1.1. SkyFront Perimeter 8

SkyFront tarafından geliştirilen ve üretilen İHA sistemidir. 2023'te piyasaya sürülmüştür; çeşitli güvenlik ve gözetim uygulamaları için tasarlanmıştır.

Uzun dayanıklılık ve yüksek taşıma kapasitesi ile öne çıkan hibrit İHA'dır. 10 kg'a kadar yükü bir saate kadar veya 5 kg'a kadar yükü 2-3 saat boyunca taşıyabilmektedir.

Güç yönetimi için elektronik yakıt enjeksiyonuna sahip, hibrit benzin-elektrikli tahrik sistemine sahiptir. Görsel 3.6’da gösterilmiştir.



Görsel 3.6. SkyFront Perimeter 8 İHA [40]

3.3.1.2. Advanced Aircraft HAMR İHA

HAMR (Hibrit Gelişmiş Çoklu Rotor) İHA, uzun dayanıklılığı ve çok yönlülüğü ile öne çıkan hibrit elektrikli bir İHA’dır. 3,5 saatten fazla maksimum uçuş süresi ve 6 lbs'ye kadar faydalı yük taşıma kapasitesi sunmaktadır. Görsel 3.7’de verilen HAMR, batarya ile çalışan çoklu rotora kıyasla uçuş süresini önemli ölçüde uzatmaktadır. HAMR'ın hibrit sistemi, elektronik yakıt enjeksiyonlu Pegasus Aeronautics GE35 motoru ile çalışmaktadır ve iki zamanlı yağ karışımıyla 91 oktan benzin kullanmaktadır.



Görsel 3.7. Advanced Aircraft HAMR İHA [41]

3.3.2. Askeri İHA'larda elektrik enerjisine olan ihtiyacın artması

Askeri İHA'larda elektrik enerjisine olan talep, temel olarak daha uzun dayanıklılık, daha fazla faydalı yük kapasitesi ve daha düşük tespit edilebilirlik gibi gelişmiş yeteneklere ihtiyaç duyulmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca gelişmiş radar ve silah

sistemleri, gün geçtikçe daha fazla elektrik enerjisine ihtiyaç duymaktadır. Bu durum da konvansiyonel itki sistemlerine, ağırlık açısından büyük bir dezavantaj yaratan büyük alternatörler entegre edilmesini gerektirmektedir. Daha büyük alternatörlerin konvansiyonel sistemlere montajı için doğal olarak daha büyük dişli kutularına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle; hibrit elektrikli olarak tasarlanmış, boyut, dayanım, yapısal bütünlük ve ağırlık gibi alanlarda bu konuda özel olarak optimize edilmiş sistemler büyük ilgi uyandırmaktadır

Yüksek İrtifa ve Uzun Süreli Uçuş (HALE) kapasiteli askeri insansız hava araçlarında (İHA) hibrit elektrik itki sistemlerinin geliştirilmesi, yoğun araştırma ve geliştirme çabalarının devam ettiği bir alandır. Askeri projelerin genellikle gizli yapısı sebebiyle, HALE sınıfı hibrit İHA'ların spesifik örneklerine doğrudan erişim zor olsa da bu sistemlerin genel trendleri ve potansiyelleri belirlenebilmektedir. Bu bağlamda, özellikle uzun menzili ve geniş kullanımıyla dikkat çeken Northrop Grumman RQ-4B Global Hawk insansız hava aracı, bu çalışmada detaylı bir vaka analizi olarak ele alınmıştır.

Genel eğilim; askeri İHA'larda hibrit elektrikli sistemlere geçiş, daha uzun dayanıklılık, daha geniş menzil ve daha düşük termal ve akustik imza ihtiyacı tarafından yönlendirilir. Bu İHA'lar genellikle uzun süreler boyunca yüksek irtifalarda çalışır ve verimli güç yönetimi gerektirir.

3.3.3. HALE sınıfı askeri İHA'larda hibrit elektrikli tahrik sistemlerinin potansiyel faydaları

3.3.3.1. Uzatılmış menzil ve dayanıklılık

Elektrik motorlarını geleneksel içten yanmalı motorlarla birleştirmek, yeterli enerji yoğunluğuna sahip bataryalar kullanıldığında, daha uzun havada kalma süresi ve yakıt ikmali ihtiyacı olmadan daha uzun menzil sağlayabilir.

3.3.3.2. Azaltılmış gürültü ve ısı

Elektrik motorları geleneksel motorlara kıyasla daha sessizdir ve daha az ısı üretir, bu da İHA'ları termal ve akustik olarak daha az algılanabilir (izlenebilir) hale getirir.

3.3.3.3. Çok yönlülük

Hibrit sistemler, İHA'ların görev gereksinimlerine göre güç kaynakları arasında geçiş yapmasına izin verebilir, örneğin hassas alanlarda sessiz çalışma için elektrik gücü

kullanabilir. Ayrıca, özel görev profilleri için özel platformlar tasarlanmasına imkân verebilir. Öte yandan, konvansiyonel itki sistemlerine nazaran aerodinamik açıdan daha verimli platform tasarımlarını mümkün hale getirebilir. Buna turbofan motorların dişli kutuları örnek verilebilir. Turbofan motorlu insansız hava araçlarında, motorun ve uçağın ihtiyacı olan tüm elektrik, hidrolik sıvı, basınçlı yakıt gibi gereksinimler, motora entegre edilmiş büyük bir dişli kutusu üzerinden mekanik olarak pompa ve benzeri yapılar ile sağlanmaktadır. Tüm bu mekanik aksesuarların elektrikli hale gelmesi, platformdaki uygun boşluklara homojen olarak dağıtılarak yerleştirilebilmesine ve dolayısıyla aerodinamik olarak daha verimli gövde ve kanat tasarımlarına imkân sağlayabilmektedir.

3.3.3.4. Arttırılmış operasyonel irtifa

Elektrik motorlarının verimi irtifa ile bağlantılı olmadığı için, ihtiyaç halinde şaft çıkış gücü değişmeden daha yüksek irtifalarda hava aracını çalıştırabilmek mümkün olacaktır.

3.3.4. Askeri İHA'larda itki sistemlerinin hibridizasyonu ile ilgili gelecek perspektifi

Askeri İHA'larda itki sistemlerinin hibridizasyonu, gelecekte de artmaya devam etmesi beklenen bir trenddir. Batarya teknolojisindeki gelişmeler, hibrit itki sistemlerinin verimliliğini ve güç çıkışını daha da artıracaktır. Tablo 3.2'de güncel batarya teknolojilerine dair teknik özellikler görülebilmektedir. Ayrıca, hibrit itki sistemlerinin maliyeti daha da düşecektir. Bu gelişmeler, hibrit askeri İHA'ları daha da çekici ve etkili hale getirecektir.

Çeşitli savunma ve havacılık araştırmaları İHA'lar için hibrit elektrikli itkiyi gündeminde tutmaktadır. Bu araştırmalar, hibrit sistemlerin ek ağırlığını ve karmaşıklığını çözenin yanı sıra, daha verimli bataryalar, hafif malzemeler, yakıt hücreleri, gelişmiş elektrik motorları, gaz türbinli motorların içine entegre edilmiş marş motoru/jeneratör tasarımlarını ve güç optimizasyonu gibi konuları içermektedir.

Tablo 3.2. *Çeşitli batarya tiplerine dair teknik özellikler [42]*

Batarya Çeşitleri	Nominal Gerilim (V)	Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	Şarj/Deşarj Ömrü	Çalışma Sıcaklığı Aralığı (°C)
Kurşun Asit	2	35	1000	-15, +50
Nikel Kadmiyum	1,2	50-80	2000	-20, +50
Nikel Metal Hidrat	1,2	70-95	<3000	-20, +60
Lityum İyon	3,6	118-250	2000	-20, +60
Lityum İyon Polimer	3,7	130-225	>1200	-20, +60
Lityum Demir Fosfat	3,2	120	>2000	-45, +70
Lityum Sülfür	2,5	350-650	300	-60, +60

3.4. İHA'lar için Menzilin Önemi

İnsansız hava araçları, hem sivil hem de askeri olmak üzere çeşitli uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır. Bu durum; ağırlık, irtifa, maksimum kalkış ağırlığı, menzil ve hız gibi performans özelliklerini ön plana çıkarmaktadır [43]. İHA'lar için maksimum menzilin önemi yadsınamaz, zira operasyonel yeteneklerini doğrudan etkilemektedir.

Ayrıca, İHA'lar için otonom hava yakıt ikmal (AAR) tekniklerinin geliştirilmesi, uzun menzilli veya uzun süreli uçuşlar için yeni olanaklar açmış, böylece İHA operasyonlarında kullanılan hava araçlarının maksimum menzili ayırt edici bir faktör haline gelmiştir [44].

Dahası, İHA'ların lojistik sektörü ve kargo teslimatında kullanımı, emisyon azaltımı ve enerji tasarrufu sağlaması sebebiyle giderek genişlemektedir. Bu da İHA menziline maksimuma çıkarılmasının çevresel ve ekonomik faydalarını vurgulamaktadır [45]. Ayrıca, gelecekte çok sayıda İHA aynı anda havada olduğunda, hava sahasının güvenliği kritik bir risk haline gelecek ve bu da İHA'ların güvenli ve etkili bir şekilde çalışabilmeleri için gerekli menzile sahip olmalarının önemini arttıracaktır [46].

Askeri İHA'lar için de maksimum menzil, uçağın etkinliğini ve çok yönlülüğünü belirleyen kritik bir faktördür. Bu durum doğrudan doğruya uçağın gözetleme, keşif ve

uzun mesafeler boyunca muharebe operasyonları gibi görevleri yürütme yeteneğini etkiler. Ayrıca, maksimum menzil, uzun süreli görevler ve stratejik konuşlanma becerisini de etkiler. Dahası, askeri İHA'ların menzili, düşmandan kaçma ve hedeflerle etkili bir şekilde çatışma yeteneklerini etkilediği için hayatta kalma ve gizlilik yetenekleriyle yakından bağlantılıdır [47-49].

Genişletilmiş menzil yeteneğine sahip İHA'lar, daha geniş görev alanlarını kapsayabilir, kritik bölgelerde uzun süreli varlık gösterebilir ve ortaya çıkan tehditlere çeviklikle yanıt verebilir. Ayrıca, uzun mesafeler boyunca operasyon yapabilme yeteneği, ileri üslere olan bağımlılığı azaltır ve askeri kuvvetlerin stratejik menzilini genişletir, böylece ulusal güvenliğe ve savunmaya katkıda bulunur [50, 51].

Askeri havacılık bağlamında, maksimum menzilin önemi, görev planlaması ve yürütme üzerindeki etkisiyle de ön plana çıkmaktadır. Daha uzun menzile sahip uçaklar, uzak düşman bölgelerine erişebilir, sürekli operasyonlar gerçekleştirebilir ve sınırlı yakıt kapasitesi ile kısıtlanmadan kara kuvvetlerine kritik destek sağlayabilir. Bu yetenek, özellikle uzak yerlere ulaşma yeteneğinin çok önemli olduğu, seferberlik operasyonları, insani yardım misyonları ve deprem/orman yangını gibi hızlı müdahale senaryoları için hayati önem taşımaktadır [52, 53].

3.5. Menzil Hesaplama Yöntemleri

Çevresel olarak sürdürülebilir seyahat talebinin ve uçakların elektrik enerjisi ihtiyacının artması, elektrikli ve hibrit elektrikli uçakların geleneksel fosil yakıtlı uçakların yerine geçmesi ihtimalini güçlendirmiştir. Gerek askeri gerekse sivil kullanımda en önemli performans parametrelerinden biri olan menzil; tek bir şarjla veya sınırlı miktarda yakıtla ne kadar uzağa uçulabileceği olarak tanımlanabilir. Hava aracının menzilini doğru bir şekilde hesaplamak veya tahmin etmek, tasarım ve operasyonel kararlar için kritik öneme sahiptir. Bu çalışma, hibrit elektrikli bir insansız hava aracının menzilini tahmin etmekle ilgili mevcut yöntemleri ele almakta ve özgün bir vaka çalışması sunmaktadır.

Menzil hesaplamasında hem analitik hem de ampirik yaklaşımlar mevcuttur.

3.5.1. Analitik yöntemler

Analitik yöntemler, hibrit elektrikli uçuş üzerinde etkili olan temel fiziksel prensipleri göz önünde bulunduran matematiksel modellere dayanır. Bu modeller genellikle şu faktörleri dikkate alır:

- Uçak aerodinamiği: Kaldırma, sürüklenme ve aerodinamik verimlilik gibi faktörler menzilin önemli belirleyicileridir. Modeller, genellikle uçak geometrisi ve irtifa, hız gibi uçuş koşullarına dayalı bu parametreler için belirli katsayılar kullanır.
- İtki sistemi: Elektrik motorları, hibrit motorlar ve itki sistemini oluşturan farklı elemanların verimlilikleri ve hibridizasyon oranı menzili önemli ölçüde etkiler.
- Batarya enerji yoğunluğu: Bataryanın birim ağırlığı başına depoladığı enerji miktarı, ulaşılabilir maksimum menzili doğrudan etkiler.
- Görev profili: Kalkış, tırmanma, seyir, alçalma ve iniş, her biri farklı güç gereksinimlerine sahip olup genel menzili etkiler.
- Çevresel faktörler: Sıcaklık, rüzgar hızı ve irtifa, hem aerodinamik hem de itki sistemi verimliliğini etkiler, bu nedenle modelde yer alması gereklidir. En yaygın analitik yöntemlerden biri olan Breguet menzil denklemi, uçağın kaldırma-sürüklenme oranını, itici verimliliğini ve taşıdığı enerji kaynağının özgül enerjisini menzil ile ilişkilendirir.

Breguet Menzil Denklemi, havacılıkta bir uçağın uçabileceği menzili veya mesafeyi tahmin etmek için kullanılan önemli bir formüldür. Fransız havacılık öncüsü Louis Charles Breguet'in adını almıştır. Bu denklem, özellikle uçakların tasarımında ve analizinde, uçağın ne kadar uzağa gidebileceğini yakıt kapasitesi, yakıt tüketim hızı ve diğer faktörlere göre belirlemeye yardımcı olur. Basit ve anlaşılır olmasına rağmen, bu denklem genellikle hibrit itki ve enerji yönetimi stratejileri gibi karmaşık faktörleri hesaba katmak için modifikasyonlar ve ek modeller gerektirir. Başka bir analitik yaklaşım, belirli görev gereksinimleri için menzili maksimize etmek üzere güç aktarma sistemleri ve uçuş profillerini optimize etmeyi içerir. Bu, çeşitli tasarım ve operasyonel parametreler arasında iterasyon temelli hesaplama algoritmaları kullanmayı gerektirir.

3.5.2. Ampirik (deneysel) yöntemler

Ampirik yöntemler, hibrit elektrikli hava araçlarının menzilini tahmin etmek için gerçek uçuş verilerine veya laboratuvar ölçümlerine dayanır. Bu yöntemler analitik

modelleri doğrulama noktasında, model tahminlerini gerçek dünya verileriyle karşılaştırmak, modelin doğruluğunu ve uygulanabilirliğini artırmak açısından faydalıdır.

Ancak, ampirik yöntemlerin de sınırlamaları vardır:

- Yüksek maliyet ve karmaşıklık: Uçuş testleri pahalı ve zaman alıcı olabilir ve sağlam modeller oluşturmak için yeterli veri elde etmek zor olabilir.
- Sınırlı genelleştirilebilirlik: Veriler genellikle belirli bir hibrit itki konfigürasyonuna ve çevresel koşullara özgüdür, bu da diğer senaryolara genelleştirmeyi zorlaştırır.

3.5.3. Menzil hesabındaki zorluklar

Hibrit elektrikli hava araçlarının menzilinı doğru bir şekilde tahmin etmede birkaç zorluk bulunmaktadır:

- Hibrit sistem karmaşıklığı: Hibrit itki sistemindeki çeşitli bileşenler arasındaki etkileşimi doğru bir şekilde modellemek ve farklı uçuş aşamaları için operasyonu optimize etmek zordur.
- Çevresel belirsizlikler: Rüzgar, hava durumu ve atmosferik koşullar menzili önemli ölçüde etkileyebilir, operasyonel tahminlerde önemli değişkenlikler getirebilir.

3.6. Havacılık İtki Sistemlerinde Hibridizasyon Oranı

Hava araçlarının hibridizasyonuna bakıldığında, belirli bir uygulamaya özel senaryoya uygun güç kaynağını seçmenin yanı sıra tasarımcı, sistemin öncelikli olarak termal elemanlarla mı yoksa elektrikli elemanlarla mı yönetildiğini tespit etmelidir [54]. Bu amaca ulaşmak için, zaman içinde çeşitli yazarlar tarafından bu oranın ölçülmesine yönelik çok sayıda parametre tanımlanmıştır. Aşağıda bu tanımlardan bazılarının kronolojik bir incelemesi sunulmaktadır.

Baumann ve arkadaşları güç aktarma sistemindeki enerji dönüşüm makinelerinin maksimum güç çıkışının oranı olarak tanımlanan hibrit elektrikli araç için hibritleşme derecesi kavramının tanıtılmasında öncü olmuşlardır. Bu bağlamda $P_{maks,EM}$ elektrik motorunun nominal güç çıkışını, $P_{maks,IYM}$ içten yanmalı motorun nominal güç çıkışını temsil etmektedir. Bu tanımlama konvansiyonel taşıtlar için $HD_{KT}=0$, tamamen elektrikli araçlar için ise $HD_{HEA}=1$ olarak kabul edilmiştir. Tasarımcı, bu parametreyi kullanarak

aracın paralel mi yoksa seri hibrit mi olduğu gibi aracın konfigürasyonunun yanı sıra uygun kontrol stratejisini de belirleyebilmektedir [54].

$$HD_{HEA} = 1 - \frac{|P_{maks,EM} - P_{maks,iYM}|}{P_{maks,EM} + P_{maks,iYM}} \quad (3.1)$$

2004 yılında Lukic ve Emadi, paralel hibrit elektrikli araçlar için en uygun hibridizasyon düzeyine ilişkin kapsamlı bir araştırma yürütmek amacıyla bir hibridizasyon faktörü tanımı sunmuşlardır. P olarak gösterilen parametrenin hem elektrikli makinenin hem de içten yanmalı motorun maksimum güç çıkışını kapsadığını, $P_{taşıt}$ ise aracın tahriki için gereken maksimum toplam çekiş gücünü temsil ettiğini ve bunun sabit olduğunu belirtmişlerdir. Bu spesifik denklemle ilgili olarak hibridizasyon faktörü, geleneksel bir aracı belirten 0'dan tamamen elektrikli bir aracı belirten 1'e kadar herhangi bir değer alabilir [55].

$$HF = \frac{P_{EM}}{P_{EM} + P_{iYM}} = \frac{P_{EM}}{P_{taşıt}} \quad (3.2)$$

Buecherl ve diğerleri tarafından, özellikle hibridizasyonun iki faktörü ve P'nin hem elektrikli hem de içten yanmalı motorların çekişi için mevcut gücü temsil ettiği diğer tanımlar önerilmiştir. Yazarlar, yukarıda belirtilen tanımlayıcıları kullanarak yakıt tüketimi, ek maliyet, ağırlık, güvenilirlik ve boyutlar dahil olmak üzere hibrit araçların performansını tahmin etmek için kullanılabilecek parametreleri tek seferde belirlemeyi amaçlamışlardır. Önceki tanımlardan farklı olarak HF_1 , 0'dan sonsuza kadar değişebilirken HF_2 , 0 ile 1 arasındaki değerlerle sınırlıdır. Ancak yazarlar, HF tanımlayıcılarının enerji depolama cihazlarının teknik ve ekonomik özelliklerini dikkate almadığını ileri sürmektedir [56].

$$HF_1 = \frac{P_{EM}}{P_{iYM}} \quad (3.3)$$

$$HF_2 = \frac{P_{EM}}{P_{EM} + P_{iYM}} \quad (3.4)$$

3.7. Hibrit İtke Konsepti ve Çeşitleri

Hibrit elektrikli tahrik sistemleri, havacılıkta çevresel etkilerini azaltma ve yakıt verimliliğini artırma potansiyeline sahip olduklarından önemli ölçüde ilgi görmüştür. Bu sistemler, genellikle geleneksel gaz türbinlerinin veya içten yanmalı pistonlu motorların batarya ile çalışan elektrik motorları ile bir kombinasyonunu içermekte ve performansı

optimize etmek için çeşitli güç yönetim stratejileri sunmaktadır [57]. Hibrit-elektrikli tahrik sistemlerinin büyük nakliye uçaklarına entegrasyonu, gelecek nesil uçaklar için özellikle ilgi çekicidir ve bu teknolojinin havacılık endüstrisindeki önemini vurgulamaktadır [58]. Ayrıca, hibrit-elektrikli tahrikin sivil havacılığın olumsuz çevresel etkilerini azaltma potansiyeli vurgulanmış, sera gazları gibi çevresel kaygıları ele alma konusundaki önemi belirtilmiştir [59]. Geleneksel itki sistemlerinin aksine, hibrit elektrikli itki sistemleri, artan elektrik enerjisi ihtiyacı, menzil gereksinimleri, emisyon değerlerinin düşürülmesi gibi alanlarda belirli gelişmelerin önünü açmıştır. Bu kısımda, havacılıkta hibrit elektrikli itki sistemlerinin sınıflandırılması ve özellikleri ele alınacaktır.

Hibrit tahrik sistemi mimarileri bağlamında, çeşitli tasarım ve metodolojiler geliştirilmiştir.

Örneğin, bir çalışma, küçük uçaklarda elektrikli ve hibrit elektrikli tahrik sistemleri için yeni bir kavramsal tasarım yöntemi sunarak, farklı uçak boyutları için yenilikçi itki sistemi mimarileri önermektedir [60]. Ek olarak, başka bir araştırma, hibrit-elektrikli tahrikin dağıtılmış elektrikli tahrik ile entegrasyonuna odaklanmıştır ve bu alandaki sürekli ilerlemelere dikkat çekmiştir [61].

Hibrit/elektrikli uçak tahrikinin geliştirilmesi, elektrik sistemleri alanındaki etkin teknolojilerin gelişimi ile paralel olarak ilerlemiştir ve bu alandaki teknolojik ilerlemenin iç içe geçmiş doğasını vurgulamaktadır [39]. Dahası, hibrit-elektrikli tahrikin fakir karışım yanmalı (lean-burn combustion) turbofan motorlarını mümkün kılma potansiyeli vurgulanmıştır, bu da hibrit mimarilerin mevcut tahrik teknolojilerini geliştirme konusundaki etkisini göstermektedir [59].

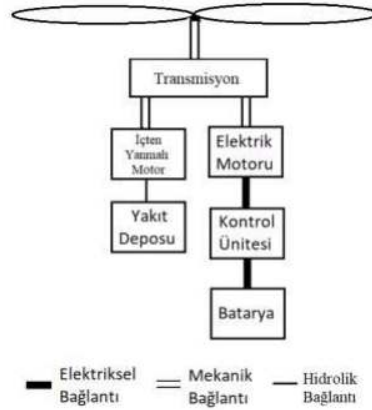
3.7.1. Sınıflandırma ve özellikler

Havacılıkta kullanılan hibrit elektrikli itki sistemleri, genellikle paralel, seri ve seri-paralel konfigürasyonlarda bulunmaktadır.

3.7.1.1. Paralel konfigürasyon

Elektrik motoru ve içten yanmalı motorun mekanik olarak bağlı olduğu bir sistemdir. İtkiyi sağlamak için, görev profilindeki güç optimizasyonuna göre, itkiyi beraber veya ayrı ayrı sağlayabilirler. Uçuş profilindeki gerekliliklere göre elektrik motoru ve içten yanmalı motordan alınan şaft gücü belirli oranlarda

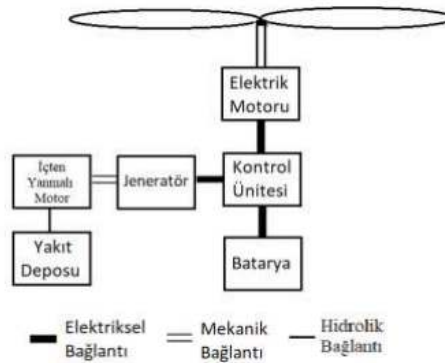
değiştirilebilmektedir. Ayrıca paralel konfigürasyonda; elektrik motorunun ihtiyaç duyulması halinde bir jeneratör görevi görmesi de mümkündür. İçten yanmalı motordan alınan şaft gücünün bir kısmı elektrik motorunun jeneratör olarak kullanılabilmesi sayesinde batarya grubunu şarj etmek için de kullanılabilir. Paralel hibrit itki sisteminin şematik gösterimi Görsel 3.8’de verilmiştir.



Görsel 3.8. Paralel hibrit itki sisteminin şematik gösterimi [62]

3.7.1.2. Seri konfigürasyon

Sadece elektrik motorunun itki için kullanıldığı, içten yanmalı motorun ise, bir jeneratör vasıtasıyla, elektrik motorunun enerji ihtiyacını sağlayan bataryaları şarj ettiği bir sistemdir. Seri hibrit itki sisteminin şematik gösterimi Görsel 3.9’da verilmiştir.



Görsel 3.9. Seri hibrit itki sisteminin şematik gösterimi [62]

Seri hibrit itki sistemine sahip bir konfigürasyonda, sistem mimarisi paralel konfigürasyona göre daha sade ve yönetimi kolay bir yapı sergiler. Ayrıca, birbirinden mekanik olarak bağımsız birden fazla elektrikli motor kullanımı için uyumludur.

Seri konfigürasyonun temel faydası, İçten Yanmalı Motorun (İYM) Elektrik Motorundan (EM) mekanik olarak ayırmanın mümkün olmasıdır, böylece içten yanmalı motorun bağımsız çalışması mümkün hale gelir. İYM, gerekli gücü sağlarken yakıt tüketimini en aza indirmek için yakıt akışı ve dolayısıyla tork, güç ve motor devri (RPM) en optimal çalışma noktasında hassas bir şekilde kalibre edilebilir.

Fakat seri konfigürasyonun kendine has birtakım dezavantajları da mevcuttur. Elektrik motorunun veya motorlarının tüm itici gücü sağlayabilmesi için uygun şekilde boyutlandırılması zorunludur, bu da havacılık alanında, elektrik motorunun gücü ile ağırlığı doğru orantılı olduğu için, yüksek ağırlık kaynaklı bazı zorluklar çıkarabilir [63].

Ayrıca, sistemdeki enerji dönüşümü sırasında meydana gelen kaçınılmaz kayıplar da seri mimarinin dezavantajlarından biridir. Fosil yakıtta depolanan kimyasal enerji, içten yanmalı motor vasıtasıyla mekanik enerjiye dönüştürülür, ardından jeneratörde elektrik enerjisine dönüştürülür. Daha sonra, jeneratörden elde edilen elektrik enerjisi sisteme verilir. Bu enerjinin bir kısmı batarya grubunu şarj etmek için kullanılabileceği gibi, tamamı da elektrik motoru (EM) tarafından shaft gücüne çevrilerek pervaneye aktarılabilir. Tüm bu enerji dönüşümleri sırasında, komponentlerin verimlilikleri göz önüne alındığında ciddi enerji kayıpları ile karşılaşılabilir [64].

3.8. Hibrit İtki Sistemini Oluşturan Elemanlar

Hibrit elektrikli itki sistemlerinin ana bileşenleri, bu sistemlerin verimli ve güvenilir çalışmasını sağlamak için birlikte çalışan çeşitli üniteleri içerir. Bu bileşenler, farklı uygulamalarda hibrit elektrik itki sistemlerinin entegrasyonu ve işletimi için kritik öneme sahiptir.

Hibrit elektrikli tahrik sistemlerinin ana bileşenleri şunlardır:

- **İçten Yanmalı Motor (İYM):** Gerektiğinde elektrik jeneratörü veya doğrudan mekanik tahrik için güç sağlar. Pistonlu veya gaz türbinli olabilir.
- **Elektrik Motoru/Jeneratörü:** İYM'den gelen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine ve tam tersine çevirir. Ayrıca, uçağı yalnızca elektrikli çalışması sırasında tahrik eder.
- **Bataryalar:** Elektrik motorunun kullanımı için elektrik enerjisini depolar. Ayrıca, kalkış ve iniş aşamalarında veya sessiz çalışma gerektiğinde güç sağlarlar.

- **Güç Elektroniği:** Motor, jeneratör, bataryalar ve elektrik motoru arasındaki elektrik enerjisi akışını kontrol eder.
- **Tahrik Ünitesi:** Sistemin konfigürasyonuna ve çalışma aşamasına bağlı olarak elektrik motoru veya İYM tarafından tahrik edilen bir pervane veya fan olabilir.
- **Kontrol Sistemleri:** İYM, elektrik motoru ve bataryalar arasındaki güç dağıtımını yönetir, optimum performans ve verimlilik sağlar.

3.9. Hava Araçlarının Hibridizasyonunda Karşılaşılan Zorluklar

Hibrit uçak itki sistemlerinin hibridizasyonu, başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için ele alınması gereken birçok zorlukla karşı karşıyadır. Bu zorluklar temelde geleneksel itki sistemlerine kıyasla hibrit-elektrikli uçak itki sistemlerinin daha karmaşık bir tasarıma sahip olmasıdır [65].

Ayrıca, hibrit itki sistemleri için batarya geliştirme, elektrikli sistemlerin yönetimi ve kontrol stratejileri gibi konular kritik zorluklardır [66].

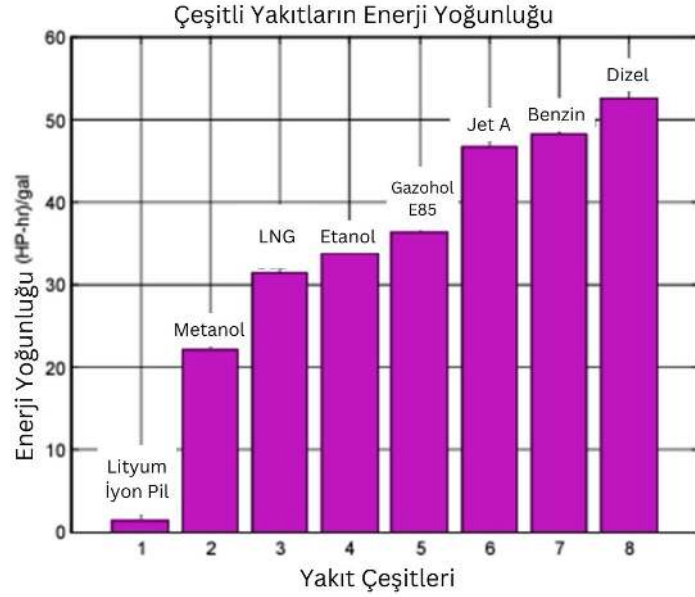
Hibrit elektrikli itki sistemlerinin uygulanmasında elektrikli motor ve pervane bağlantı tasarımının elektrikli uçak gürültüsü ve performansı üzerindeki etkisi önemli bir husustur [67].

Hibrit elektrik tahrik sistemleri kullanan insansız hava araçlarına ilişkin deneysel araştırmalardan elde edilen sonuçlar, itki sistemlerinin tasarımını önemli ölçüde etkilemektedir. Ancak, tasarımın optimizasyonu için de önemli miktarda detaylı simülasyon ve analitik hesaplama gereklidir.

Bu hesaplamalarda en önemli noktalardan biri, kalkıştaki yakıt veya batarya ağırlığını hesaplamaktır. Bunun için modifiye edilmiş bir Breguet menzil denklemi kullanmak, literatürdeki en geçerli ve en yaygın yöntemdir.

Şimdiye kadar havacılık kullanımı için tasarlanmış hibrit konseptlerin çoğu, içten yanmalı ve elektrikli motorların yanında batarya sistemleri de içermektedir. İçten yanmalı motorun boyutlandırılması, maksimum kalkış ağırlığını optimize edebilmek için önemli bir parametredir. Bu nedenle, kalkış anındaki toplam enerji stoğunun bir kısmı yakıt, bir kısmı ise batarya grubunda depolanmalıdır. Bataryalar ayrıca, uçuş fazlarının uygun zamanlarında içten yanmalı motor sayesinde enerji depolayabilmek için de gereklidir.

Hava araçlarının hibridizasyonunda karşılaşılan zorluklar incelenirken karşımıza çıkan en büyük dezavantaj ağırlık konusundaki zorluklardır. Günümüzdeki batarya teknolojisi, fosil yakıtlara göre oldukça düşük bir enerji yoğunluğu sunmaktadır. Bu da 1 kg bataryada depolanabilen enerjinin, 1 kg yakıttan elde edilebilecek enerjiden çok daha az olması ile sonuçlanmaktadır. Şekil 3.1’de çeşitli yakıtların enerji yoğunlukları verilmiştir.



Şekil 3.1. Farklı yakıt türlerinin enerji yoğunluklarının karşılaştırılması [68]

Ayrıca, mevcut batarya teknolojinin bir diğer dezavantajı da etkili kullanılabilir enerji aralığının sınırlı olmasıdır. Bunun nedeni, bataryaların aşırı şarj ve tam deşarj olması durumunda elektrotlarına zarar gelmesi ve kalıcı olarak performans düşüşü yaşamasıdır. Özellikle lityum-iyon bataryaların çekilen akım arttıkça voltajlarında düşüş yaşamaları karakteristik özelliklerindendir. Hava aracının ağırlığının ve dolayısıyla talep edilen enerjinin miktarı arttıkça, bataryalar ile ilgili bu sorunlar daha da belirgin şekilde gün yüzüne çıkmaktadır. Bu sorunun etkilerini azaltmak için yüksek akım-düşük voltaj stratejisi izlenebilir. Ancak bu yöntemin de kendine has dezavantajları mevcuttur. Örneğin; yüksek akımdan kaynaklı aşırı ısınma (sistem bileşenlerinin termal yönetimi) ve hava aracının elektronik kontrol sistemlerini ve diğer hassas elektronik komponentlerini (radarlar, kameralar ve silah sistemleri gibi) etkileyebilecek elektromanyetik parazitlenme (bir diğer adıyla elektronik gürültü) gibi sorunlar sayılabilir [69].

4. METODOLOJİ

4.1. Hibrit Elektrikli İtke Sistemi Entegrasyonu İçin Vaka Analizi

Bu çalışmada, Brequet menzili denkleminden yola çıkarak, daha önce literatürde hibrit hava araçlarının menzili için elde edilmiş denklemleri kullanarak, HALE sınıfı bir insansız hava aracı için vaka analizi yapılmıştır [14, 15].

Yüksek İrtifa ve Uzun Süreli Uçuş (HALE) kapasiteli askeri insansız hava araçlarında (İHA) hibrit elektrik itki sistemlerinin geliştirilmesi sürekli bir araştırma ve geliştirme konusu olup, askeri projelerin gizli yapısı nedeniyle HALE sınıfı hibrit İHA'ların özel örneklerine erişim zorluğu bulunmaktadır. Ancak, bu sistemlerin genel eğilimleri ve potansiyelleri tespit edilebilmektedir. Bu bağlamda, özellikle uzun menzili ve yaygın kullanımıyla dikkat çeken Northrop Grumman RQ-4B Global Hawk insansız hava aracı, detaylı bir vaka analizi için seçilmiştir. Bu seçim, tezin amacı doğrultusunda hem aracın öne çıkan özellikleri hem de genel kullanım alanları göz önünde bulundurularak yapılmıştır.

Northrop Grumman RQ-4B Global Hawk insansız hava aracına dair teknik bilgiler Tablo 4.1'de bulunmaktadır [70]:

Tablo 4.1. Northrop Grumman RQ-4B Global Hawk insansız hava aracına dair teknik bilgiler

Parametre	Değer
İtke Seviyesi (lbf)	7600
Motor	Rolls-Royce North America AE3007H Turbofan
Kanat Açıklığı (m)	39,8
Uzunluk (m)	14,5
Yükseklik (m)	4,7
Boş Ağırlık (kg)	6781
Maksimum Kalkış Ağırlığı (kg)	14628
Yakıt Kapasitesi (kg)	7847
Faydalı Yük (kg)	1360
Seyir Hızı (mph)	357
Menzil (nm)	12300
Dayanım (saat)	34

Northrop Grumman tarafından ABD ordusu için geliştirilen RQ-4B Global Hawk, teknik özellikleri ve kullanım alanlarının çeşitliliği ile öne çıkan ileri bir insansız hava

aracıdır. NASA tarafından da sivil amaçlı kullanım imkanlarına değinilen bu yüksek irtifa, uzun menzilli (HALE) İHA, gözetleme ve keşif görevleri için tasarlanmıştır [71].

Gelişmiş radar ve kamera sistemlerine sahip RQ-4B Global Hawk'ın (Görsel 4.1) teknik özellikleri, operasyonel gereksinimlerine göre tasarlanmıştır. Boyut ve itki özellikleri; yüksek irtifa, uzun menzilli olmasına imkan sunacak şekilde seçilmiştir [72].



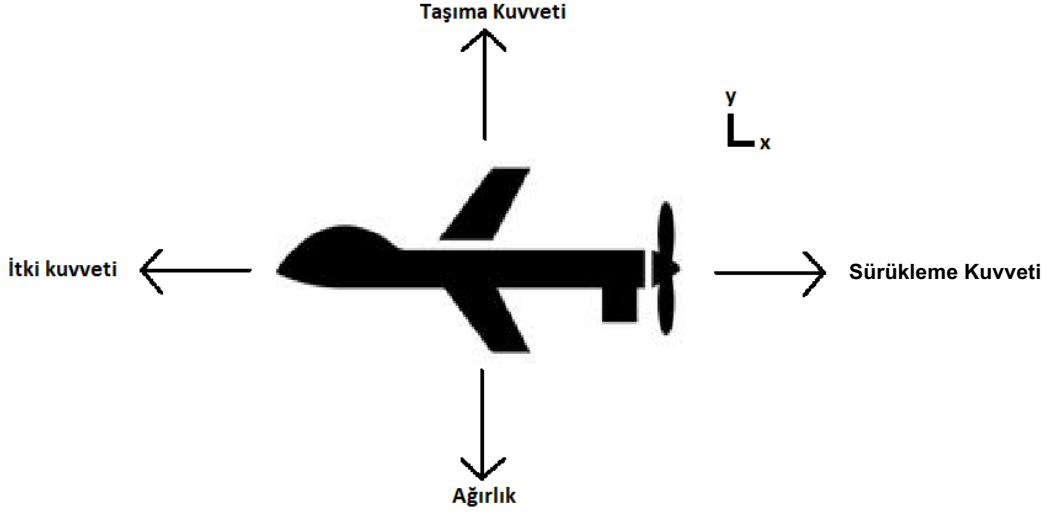
Görsel 4.1. *Northrop Grumman RQ-4B Global Hawk İHA* [70]

Vaka analizi için aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Kalkış ve yükselme fazlarında 7847 kg yakıtın 847 kg'lık kısmı yakılmaktadır.
- Sabit hızda, sabit irtifada seyir durumu incelenmiştir.
- Hem paralel hem seri konfigürasyon için, kalkış anındaki toplam enerji miktarı, İHA'nın teknik dokümanlarında deklare edilen 7847 kg'lık maksimum yakıt kapasitesinin, JP-8 havacılık yakıtının enerji yoğunluğu olan 11900 Wh/kg ile çarpılması ile hesaplanmıştır (299.8 GJ).
- Gerek İHA'nın gelişmiş radar-kamera sistemlerinin, motorunun, tüm elektronik kontrol sistemlerinin uçuş boyunca yüksek enerji ihtiyacına sahip olması, gerekse bataryaların sağlığı ve uçuş güvenliği açısından tüm yakıt ve bataryanın bitmesine müsaade edilmeden iniş yapılması gerekliliğinden ötürü, kullanılabilir toplam enerji; 238.8 GJ olarak hesaplanmıştır.
- Hibrit mimari İHA'ya uygulanırken, mevcut turbofan motorunun uçaktan söküldüğü ve yerine takılacak tüm alt sistemlerin toplam ağırlığının sökülen turbofan motorun ağırlığına eşit olduğu varsayılmıştır (Pistonlu/Turboşaft motor, dişli kutusu, jeneratör ve elektrikli motor).

4.2. Hibrit İHA İçin Menzil Hesaplama Yöntemi

Bir İHA için serbest cisim diyagramını (Şekil 4.1) çizilirse;



Şekil 4.1. İHA için serbest cisim diyagramı

$$\sum F_x = 0 \rightarrow T - D = 0 \quad (4.1)$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow W - L = 0 \quad (4.2)$$

$$T = D \quad (4.3)$$

$$W = L \quad (4.4)$$

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho v^2 s \quad (4.5)$$

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho v^2 s \quad (4.6)$$

Denklem (4.3) ve (4.4) düzenlenirse;

$$\frac{W}{T} = \frac{L}{D} \rightarrow \frac{W}{T} = E \quad (4.7)$$

$$\frac{W}{T} = E = \frac{C_L}{C_D} \quad (4.8)$$

Bir İnsansız Hava Aracının sabit hızda gitmesi için gereken itki gücü denklem (4.9) ile bulunabilir.

$$P_{İHA} = T_{İHA} V_{İHA} \quad (4.9)$$

Hibridizasyon oranı daha önce tanımlanmıştı. Bu kısımda da matematiksel olarak tanımlanırsa;

$$\Psi = \frac{P_{bat}}{P_y + P_{bat}} \quad (4.10)$$

Bu denklemde P_{bat} bataryadan gelen gücü temsil ederken, P_y yakıttan gelen gücü temsil etmektedir, yani hibridizasyon oranı elektriksel gücün toplam güce oranı olarak özetlenebilir.

Denklem (4.10)'a güçlerden alınan verimler de hesaba katıldığında denklem (4.11) aşağı şekilde yeniden düzenlenirse;

$$\Psi = \frac{P_{bat}\eta_e}{P_y\eta_m + P_{bat}\eta_e} \quad (4.11)$$

şeklinde yazılabilir. Burada η verimi temsil ederken, η_m mekanik verimi, η_e elektriksel verimi temsil eder.

Denklem (4.11) matematiksel operasyonlar ile yeniden düzenlendiğinde denklem (4.12) elde edilecektir.

$$P_{bat} = P_y \left(\frac{\Psi}{1-\Psi} \right) \left(\frac{\eta_m}{\eta_e} \right) \quad (4.12)$$

P_{bat} bataryadan gelen gücü, P_y ise yakıttan gelen gücü temsil etmektedir. Bir hibrit motorlu İHA için 2 farklı güç kaynağı olabilir. Bu kaynaklar yakıt veya batarya olabilir. Dolayısıyla, hibrit motorlu bir İHA'nın toplam gücü denklem (4.13) ile bulunabilir.

$$P_{IHA} = \eta_{IHA} (P_y\eta_m + P_{bat}\eta_e) \quad (4.13)$$

Ayrıca P_y ve P_{bat} zamanla değişken olacaktır. Bu da matematiksel olarak denklem (4.14) ve (4.15) şeklinde ifade edilebilir.

$$P_y = - \frac{dE_y}{dt} \quad (4.14)$$

$$P_{bat} = - \frac{dE_{bat}}{dt} \quad (4.15)$$

E_{pil} ve E_y , bataryadan ve yakıttan gelen enerjiyi sembolize etmektedir.

$$\frac{P_{IHA}}{\eta_{IHA}} = \eta_m \left(- \frac{dE_y}{dt} \right) + \eta_e \left(- \frac{dE_{bat}}{dt} \right) \quad (4.16)$$

Denklem (4.9) kullanarak denklem (4.16) yeniden yazılırsa, denklem (4.17) elde edilecektir.

$$\frac{T_{IHA} V_{IHA}}{\eta_{IHA}} = \eta_m \left(-\frac{dE_y}{dt} \right) + \eta_e \left(-\frac{dE_{bat}}{dt} \right) \quad (4.17)$$

Denklem (4.8) yeniden düzenlenerek yazılırsa, denklem (4.18) elde edilecektir.

$$T_{IHA} = \frac{W}{\frac{C_L}{C_D}} \quad (4.18)$$

Denklem (4.17) ve (4.18) birleştirilerek yeniden yazıldığında, denklem (4.19) elde edilecektir.

$$\frac{W \times V_{IHA}}{\eta_{IHA} \frac{C_L}{C_D}} = \eta_m \left(-\frac{dE_y}{dt} \right) + \eta_e \left(-\frac{dE_{bat}}{dt} \right) \quad (4.19)$$

Denklem (4.19) yeniden düzenlenirse, denklem (4.20) elde edilecektir.

$$\frac{W \times V_{IHA}}{\eta_{IHA} \frac{C_L}{C_D}} = \left(-\frac{dE_y}{dt} \right) \left(\eta_m + \eta_e \left(\frac{\Psi}{1-\Psi} \right) \left(\frac{\eta_m}{\eta_e} \right) \right) \quad (4.20)$$

Bu formülü kullanarak V_{IHA} eşitliğini bulunacaktır.

$$V_{IHA} = -\frac{C_L}{C_D} \frac{1}{W} \eta_m \eta_{IHA} \left(\frac{dE_y}{dt} \right) \left(1 + \frac{\Psi}{1-\Psi} \right) \quad (4.21)$$

En temel şekilde menzil gidilen süre boyunca tüm hızların toplanması şeklinde ifade edilebilir. Bunun matematiksel karşılığı ise integralin sınırlarına başlangıç ve bitiş anlarını yazılıp, hızın o sınırlar boyunca integre edilmesi şeklindedir.

$$R = \int_{t_{ilk}}^{t_{son}} V dt \quad (4.22)$$

(4.21) denkleminin integrali alınır;

$$R = - \int_{t_{ilk}}^{t_{son}} \frac{C_L}{C_D} \frac{1}{W} \eta_m \eta_{IHA} \left(\frac{dE_y}{dt} \right) \left(1 + \frac{\Psi}{1-\Psi} \right) dt \quad (4.23)$$

Bu integrali sadeleştirmek için zamana bağlı olmayan terimler, integralden çıkarılmalıdır.

Bu durumda integral aşağıdaki forma evrilecektir.

$$R = -\frac{C_L}{C_D} \eta_m \eta_{iHA} \left(1 + \frac{\Psi}{1-\Psi}\right) \int_{t_{ilk}}^{t_{son}} \frac{1}{W} \left(\frac{dE_y}{dt}\right) dt \quad (4.24)$$

Buradaki ağırlık komponenti olan W içerisinde farklı terimleri barındırır. Bunlar, boş uçak ağırlığı, faydalı yük ağırlığı, batarya ağırlığı ve yakıt ağırlığıdır. Matematiksel olarak;

$$W(t) = W_{Boş} + W_{FY} + W_{bat} + W_{yakıt}(t) \quad (4.25)$$

denklemden de anlaşılacağı üzere ağırlık aslında zamana bağlı bir terimdir, zaman geçtikçe uçağın içindeki yakıt azalacağından uçağın toplam ağırlığı da azalacaktır.

$$R = -\frac{C_L}{C_D} \eta_m \eta_{iHA} \left(1 + \frac{\Psi}{1-\Psi}\right) \int_{t_{ilk}}^{t_{son}} \frac{1}{W_{Boş} + W_{FY} + W_{bat} + W_{yakıt}(t)} \left(\frac{dE_y}{dt}\right) dt \quad (4.26)$$

W_{bat} ve $W_{yakıt}$ için enerji yoğunluğu denklemleri kullanılarak tekrar yazılırsa;

$$W_{bat} = \frac{g}{e_{bat}} E_{bat,0} \quad (4.27)$$

$$W_{yakıt}(t) = \frac{g}{e_{yakıt}} E_{yakıt}(t) \quad (4.28)$$

$$R = -\frac{C_L}{C_D} \eta_m \eta_{iHA} \left(1 + \frac{\Psi}{1-\Psi}\right) \int_{t_{ilk}}^{t_{son}} \frac{1}{W_{Boş} + W_{FY} + \frac{g}{e_{bat}} E_{bat,0} + \frac{g}{e_{yakıt}} E_{yakıt}(t)} \left(\frac{dE_y}{dt}\right) dt \quad (4.29)$$

$$R = -\frac{C_L}{C_D} \eta_m \eta_{iHA} \left(1 + \frac{\Psi}{1-\Psi}\right) \int_{t_{ilk}}^{t_{son}} \frac{d}{dt} \ln \left(W_{Boş} + W_{FY} + \frac{g}{e_{bat}} E_{bat,0} + \frac{g}{e_{yakıt}} E_{yakıt}(t) \right) \frac{e_y}{g} dt \quad (4.30)$$

$$R = -\frac{C_L}{C_D} \eta_m \eta_{iHA} \left(1 + \frac{\Psi}{1-\Psi}\right) \frac{e_{yakıt}}{g} \ln \left(\frac{W_{Boş} + W_{FY} + \frac{g}{e_{bat}} E_{bat,0} + \frac{g}{e_{yakıt}} E_{yakıt}(t_{son})}{W_{Boş} + W_{FY} + \frac{g}{e_{bat}} E_{bat,0} + \frac{g}{e_{yakıt}} E_{yakıt}(t_{ilk})} \right) \quad (4.31)$$

Bu türetilen menzil denklemi Fines'in, uçuş hızının ve verimliliklerin sabit olduğu durumlarda; seri, paralel veya tamamen elektrikli konfigürasyonlar için kullanılabilir.

Türetilen denklemin kontrolü adına hibridizasyon oranı 0 yapılarak klasik Brequet Menzil denklemi ile karşılaştırılabilir. Bu bağlamda yeni denklem (4.32) olacaktır.

$$R = -\frac{C_L}{C_D} \eta_m \eta_{iHA} \frac{e_{yakıt}}{g} \ln \left(\frac{W_{Boş} + W_{FY} + \frac{g}{e_{bat}} E_{bat,0} + \frac{g}{e_{yakıt}} E_{yakıt}(t_{son})}{W_{Boş} + W_{FY} + \frac{g}{e_{bat}} E_{bat,0} + \frac{g}{e_{yakıt}} E_{yakıt}(t_{ilk})} \right) \quad (4.32)$$

Görüldüğü üzere hibridizasyon oranının 0 olduğu durumda Brequet menzili elde edilmiştir, bu da çalışmanın doğruluğu anlamında önemli bir parametredir.

Denklem (4.12) düzenlenerek yeniden yazılırsa

$$E_y = E_{bat} \left(\left(\frac{1-\Psi}{\Psi} \right) \left(\frac{\eta_e}{\eta_m} \right) \right) \quad (4.33)$$

Bu denklem de ana menzil denklemiyle birleşirse

$$R = -\frac{C_L}{C_D} \eta_m \eta_{iHA} \left(1 + \frac{\Psi}{1-\Psi} \right) \frac{e_{yakıt}}{g} \ln \left(\frac{W_{Boş} + W_{FY} + \frac{g}{e_{bat}} E_{bat}}{W_{Boş} + W_{FY} + \frac{g}{e_{bat}} E_{bat} + \frac{g}{e_{yakıt}} E_{bat} \left(\frac{1-\Psi}{\Psi} \right) \left(\frac{\eta_e}{\eta_m} \right)} \right) \quad (4.34)$$

$$R = -\frac{C_L}{C_D} \eta_m \eta_{iHA} \left(1 + \frac{\Psi}{1-\Psi} \right) \frac{e_{yakıt}}{g} \ln \left(\frac{W_{Boş} + W_{FY} + \frac{g}{e_{bat}} E_{0toplam} \frac{\Psi}{\eta_e}}{W_{Boş} + W_{FY} + \frac{g E_{0toplam}}{e_{bat}} \left(\frac{\Psi}{\eta_e} + \left(\frac{e_{bat}(1-\Psi)}{e_{yakıt} \eta_m} \right) \right)} \right) \quad (4.35)$$

Bu denklem için, paralel ve seri konfigürasyonlar düşünülürse ve verimlilik faktörleri de hesaba katılırsa;

Seri konfigürasyon için;

$$R = -\eta_{ym} \eta_{eg} \eta_{em} \eta_{gb} \eta_p \frac{C_L}{C_D} \left(1 + \frac{\Psi}{1-\Psi} \right) \frac{e_{yakıt}}{g} \ln \left(\frac{W_{Boş} + W_{FY} + \frac{g}{e_{bat}} E_{0toplam} \frac{\Psi}{\eta_e}}{W_{Boş} + W_{FY} + \frac{g E_{0toplam}}{e_{bat}} \left(\Psi + \left(\frac{e_{bat}(1-\Psi)}{e_{yakıt} \eta_{ym} \eta_{eg}} \right) \right)} \right) \quad (4.36)$$

Paralel konfigürasyon için;

$$R = -\eta_{ym} \eta_{gb} \eta_p \frac{C_L}{C_D} \left(1 + \frac{\Psi}{1-\Psi} \right) \frac{e_{yakıt}}{g} \ln \left(\frac{W_{Boş} + W_{FY} + \frac{g}{e_{bat}} E_{0toplam} \frac{\Psi}{\eta_{em}}}{W_{Boş} + W_{FY} + \frac{g E_{0toplam}}{e_{bat}} \left(\frac{\Psi}{\eta_{em}} + \left(\frac{e_{bat}(1-\Psi)}{e_{yakıt} \eta_{gt}} \right) \right)} \right) \quad (4.37)$$

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Pistonlu-Seri Konfigürasyon İçin Menzil Hesabı

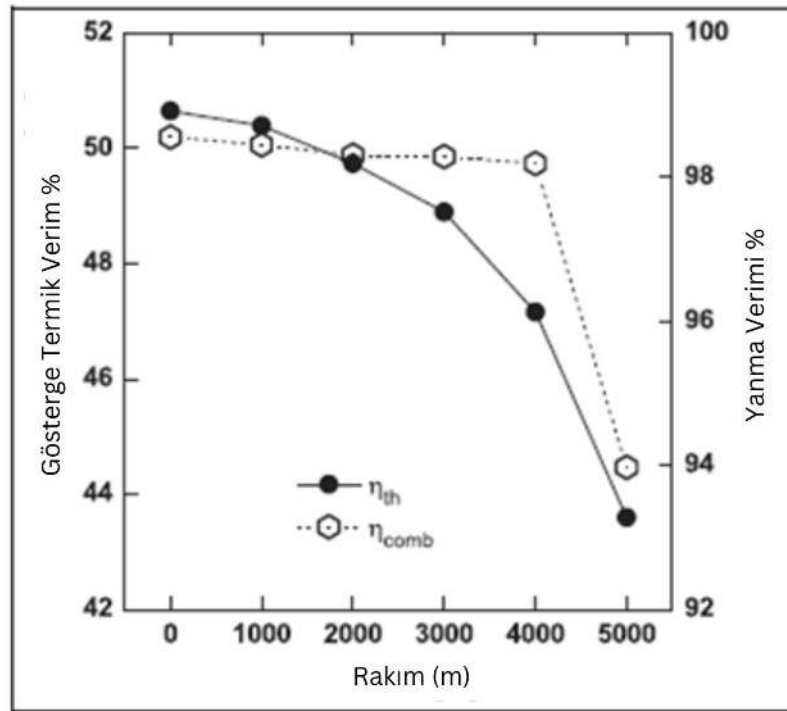
Pistonlu motor ve elektrik motorunun birbirine seri olarak bağlandığı seri hibrit mimariye dair menzil 3 farklı irtifa için hesaplanmıştır.

Hesaplama yapılan irtifalar ve bu irtifalara karşılık gelen pistonlu motor verimi kabulleri Tablo 5.1’de görülmektedir:

Tablo 5.1. Hesaplama yapılan irtifalara karşılık gelen pistonlu motor verimi

İrtifa (ft)	Pistonlu Dizel Motorun Termal Verimi
10.000	0,51
16.500	0,43
25.000	0,25

Pistonlu dizel motorun irtifaya göre değişen verim kabulleri için Şekil 5.1’den yararlanılmıştır.



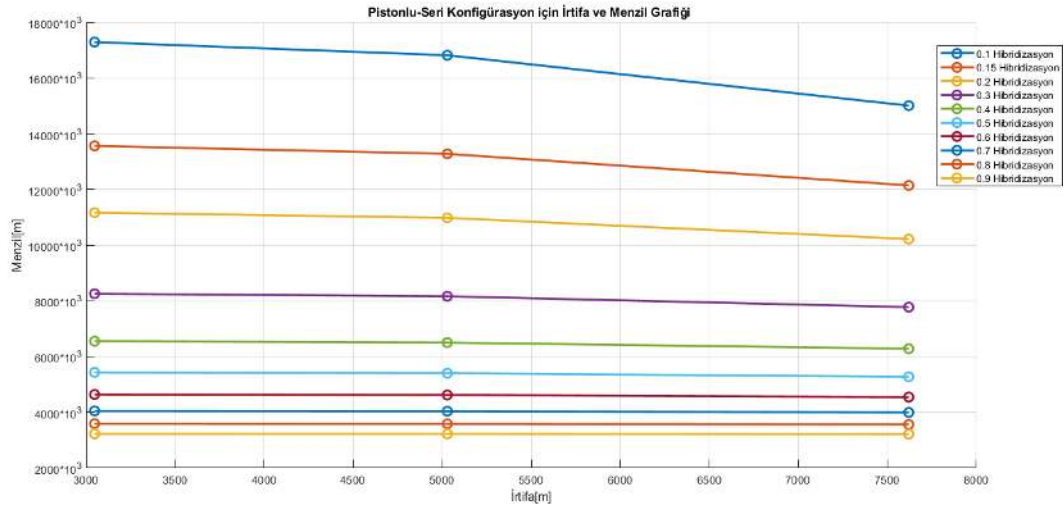
Şekil 5.1. Turbodizel bir motorun termal veriminin irtifa ile değişimi [73]

Pistonlu motora sahip, seri mimari için Brequet menzil denkleminde türetilen (4.36) nolu denklemde, menzil hesaplaması yapılırken Tablo 5.2’de belirtilen parametreler kullanılmıştır:

Tablo 5.2. Pistonlu-seri hibrit konfigürasyonda menzil hesabı için kabul edilen değerler

Parametre	Değer
İHA'nın Boş Ağırlığı (N)	66500
Faydalı Yük Ağırlığı (N)	13500
L/D Oranı	29
Elektrik Motorunun Verimi	0,95
Elektrik Jeneratörünün Verimi	0,98
Pervane Verimi	0,85
Dişli Kutusu Verimi	0,95
Uçak Yakıtının Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	11900
Yerçekimi Katsayısı (m/s^2)	9,81
Kalkıştaki Toplam Enerji (GJ)	238,8
Bataryanın Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	400
Hibridizasyon Oranı	0,1/0,15/0,2/0,3/0,4/0,5/0,6/0,7/0,8/0,9

Denklem (4.36)'nın çözümü için, Ek-1'de verilen MATLAB kodu kullanılmıştır. On farklı hibridizasyon oranı için yapılan hesaplamaların sonucu Şekil 5.2'de görülebilmektedir:



Şekil 5.2. Pistonlu-seri konfigürasyon için irtifa ve menzil grafiği

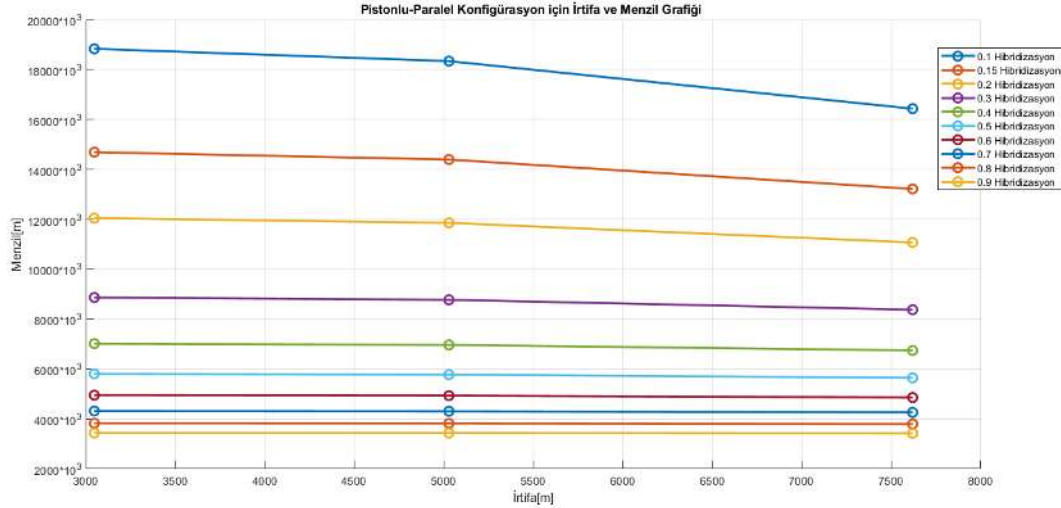
5.2. Pistonlu-Paralel Konfigürasyon İçin Menzil Hesabı

Pistonlu motor ve elektrik motorunun birbirine paralel olarak bağlandığı paralel hibrit mimariye dair menzil 3 farklı irtifa için hesaplanmıştır. Kullanılan parametreler seri

mimaride menzıl hesabı için kullanılan parametreler ile aynıdır. Paralel mimaride menzıl hesabı için tek fark, kullanılan denklemdir.

Denklem (37)'nin çözümü için, Ek-1'de verilen MATLAB kodu kullanılmıştır.

On farklı hibridizasyon oranı için yapılan hesaplamaların sonucu Şekil 5.3'te görülebilmektedir:



Şekil 5.3. Pistonlu-Paralel Konfigürasyon için İrtifa ve Menzıl Grafiği

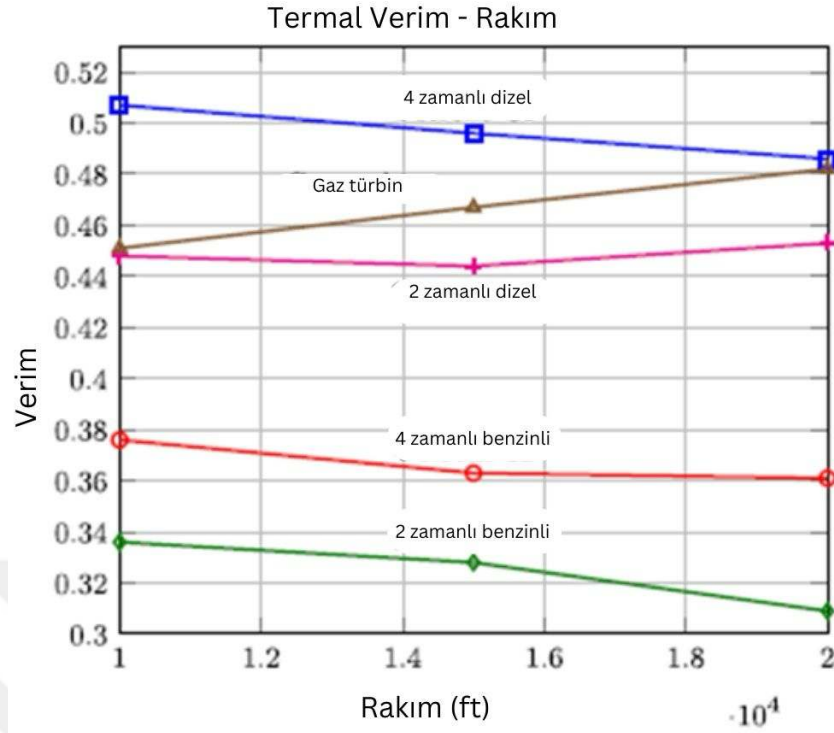
5.3. Turboşaft-Seri Konfigürasyon İçin Menzıl Hesaplama

Turboşaft motor ve elektrik motorunun birbirine seri olarak bağlandığı seri hibrit mimariye dair menzıl 3 farklı irtifa için hesaplanmıştır. Hesaplama yapılan irtifalar ve bu irtifalara karşılık gelen turboşaft motor verimi kabulleri Tablo 5.3'te görülmektedir. Pervane, jeneratör, elektrik motoru ve dişli kutusu verimlerinin irtifa ile değişmediği varsayılmıştır.

Tablo 5.3. Hesaplama yapılan irtifalara karşılık gelen turboşaft motor verimi

İrtifa (ft)	Turboşaft Motorun Termal Verimi
10.000	0,45
16.500	0,47
25.000	0,49

Turboşaft motorun irtifaya göre değişen verim kabulleri için Şekil 5.4'ten yararlanılmıştır.



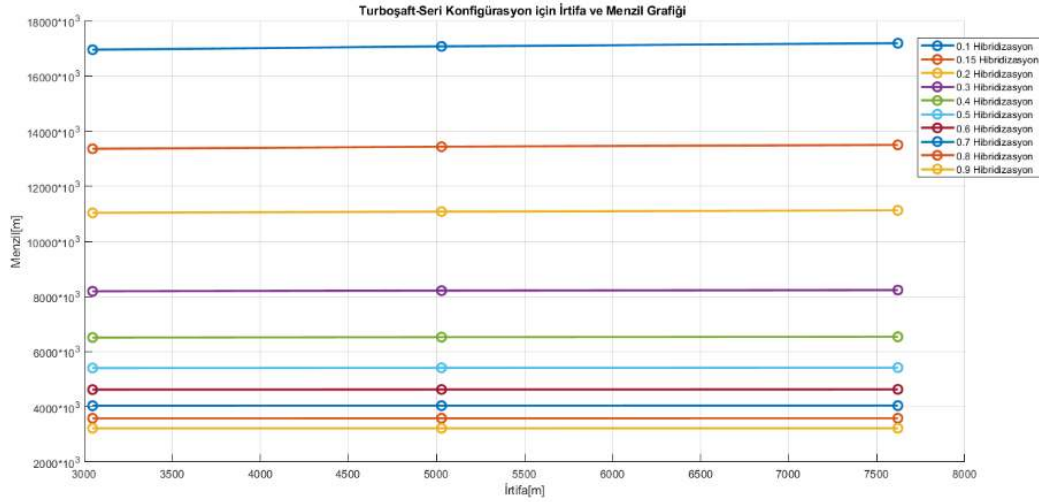
Şekil 5.4. Dizel ve gaz türbinli motorların termal veriminin irtifa ile değişimi [74]

Turboşaft motora sahip, seri mimari için Brequet menzil denkleminde türetilen (4.36) no'lu denklemde, menzil hesaplaması Tablo 5.4'te belirtilen parametreler kullanılmıştır:

Tablo 5.4. Turboşaft-seri hibrit konfigürasyonda menzil hesabı için kabul edilen değerler

Parametre	Değer
İHA'nın Boş Ağırlığı (N)	66500
Faydalı Yük Ağırlığı (N)	13500
L/D Oranı	29
Elektrik Motorunun Verimi	0,95
Elektrik Jeneratörünün Verimi	0,98
Pervane Verimi	0,85
Dişli Kutusu Verimi	0,95
Uçak Yakıtının Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	11900
Yerçekimi Katsayısı (m/s^2)	9,81
Kalkıştaki Toplam Enerji (GJ)	238,8
Bataryanın Enerji Yoğunluğu (Wh/kg)	400
Hibridizasyon Oranı	0,1/0,15/0,2/0,3/0,4/0,5/0,6/0,7/0,8/0,9

Denklem (4.36)'nın çözümü için, Ek-1'de verilen MATLAB kodu kullanılmıştır. On farklı hibridizasyon oranı için yapılan hesaplamaların sonucu Şekil 5.5'te görülebilmektedir.

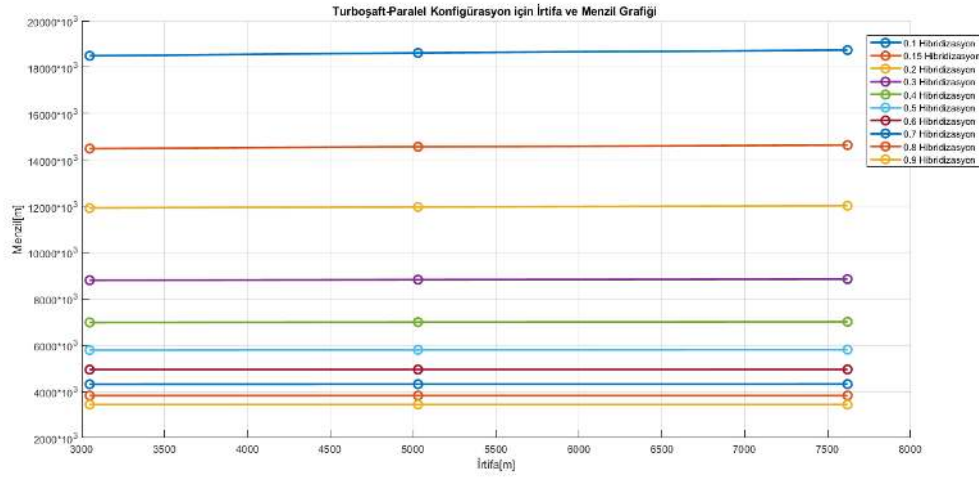


Şekil 5.5. Turboşaft-seri konfigürasyonu için irtifa ve menzil grafiği

5.4. Turboşaft-Paralel Konfigürasyon İçin Menzil Hesabı

Turboşaft motor ve elektrik motorunun birbirine paralel olarak bağlandığı paralel hibrit mimariye dair menzil 3 farklı irtifa için hesaplanmıştır. Kullanılan parametreler seri mimaride menzil hesabı için kullanılan parametreler ile aynıdır. Paralel mimaride menzil hesabı için tek fark, kullanılan denklemdir.

Denklem (4.37)'nin çözümü için, Ek-1'de verilen MATLAB kodu kullanılmıştır. On farklı hibridizasyon oranı için yapılan hesaplamaların sonucu Şekil 5.6'da görülebilmektedir.



Şekil 5.6. Turboşaft-paralel konfigürasyon için irtifa ve menzil grafiği

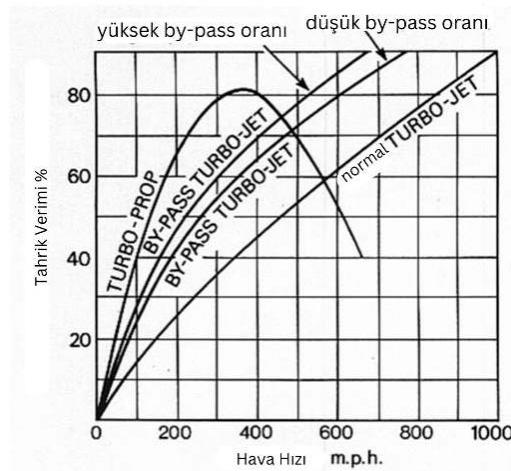
5.5. Hibridizasyon Oranı Sıfırlanarak Genel Brequet Denklemi ile Hesaplanan Menzil

Hibrit mimarinin etkilerini daha iyi anlayabilmek için, kontrol amaçlı, hibridizasyon oranı sıfırlanarak, genel Brequet menzil denklemi ile, söz konusu görev profili için menzil hesabı gerçekleştirilmiştir.

Denklem (4.32) Ek-1’de bulunan MATLAB kodu ile çözülmüş ve menzil 25988 km bulunmuştur.

Bu hesaplamada, örnek İHA turbofan bir motora sahip olduğu için, pervane verimi 0,55 olarak öngörülmüştür. Termal verim ise 0,45 olarak sabit kabul edilmiştir.

Pervane verim kabulü için Şekil 5.7’den faydalanılmıştır:



Şekil 5.7. Çeşitli motor tipleri için pervane veriminin hıza göre değişimi [75]

6. SONUÇ VE YORUMLAR

Hava araçlarının çevresel etkilerini azaltmak ve sürdürülebilirliği sağlamak için birçok bilimsel çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar arasında motorların daha verimli hale getirilmesi, hava araçlarının ağırlığının azaltılması, malzeme ağırlıklarının azaltılması, aerodinamik iyileştirmeler yapılması ve alternatif yakıt çalışmaları örnek olarak verilebilir. Gerek çevresel etkilerin azaltılması gerekse fosil yakıtların sürdürülebilirlik sorunu nedeniyle, son yıllarda öne çıkan bir diğer alternatif ise hibrit itki konseptidir. Batarya teknolojisi tamamen elektrikli hava araçları üretebilmek için gerekli olgunluğa ulaşana kadar, hibrit elektrikli itki sistemleri verimli ve kullanışlı bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışma, daha önceki çalışmalar ile elde edilen, hibrit-elektrikli uçakların menzilini hesaplamak için kullanılan denklemlerden yararlanarak, insansız hava araçları özelinde bir inceleme sunmaktadır. Ayrıca önceki çalışmalardan farklı olarak, irtifa etkileri de incelenmektedir. Çalışma, turbofan motoru ile tahrik edilen HALE sınıfı bir insansız hava aracının,

- Piston motorun elektrik motoru ile seri olarak bağlanması
- Piston motorun elektrik motoru ile paralel olarak bağlanması
- Turboşaft motorun elektrik motoru ile seri olarak bağlanması
- Turboşaft motorun elektrik motoru ile paralel olarak bağlanması

sonucunda farklı hibridizasyon oranları ve farklı irtifalarda elde edilen menzillerinin katalog değerindeki menzile göre değerlendirilmesini içermektedir.

Çalışmadan elde edilen bulgulara göre, güç aktarma verimliliğinin, kalkışta yakıtta ve bataryada depolanmış bulunan enerjinin itici güce dönüştürülmesinde kritik bir rol oynadığı, ayrıca hibridizasyon oranının ve irtifanın menzil denklemini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Çalışmadan varılabilecek en önemli sonuç, mevcut batarya teknolojisinin, HALE sınıfı bir insansız hava aracının menzilini arttırmak için uygun bir yöntem olmadığıdır. Öte yandan, menzil artışı amacı göz ardı edilirse, HALE sınıfı askeri bir insansız hava aracının hibridizasyonu belirli avantajlar da vadetmektedir. Örneğin, gelişmiş silah ve radar sistemlerinin artan elektrik enerjisi ihtiyacına bir çözüm olarak uygulanabileceği bir gerçektir. Ayrıca, paralel hibrit mimaride, içten yanmalı motor ve elektrik motoru birbirini yedeklemekte ve motor kaynaklı itki kaybına neden olabilecek

arızalarda hava aracının güvenli bir şekilde yere iniş yapabilme ihtimalini arttırmaktadır. Bu çalışmadaki vaka analizi, HALE sınıfı bir askeri İHA’da hibrit itki sistemleri kullanarak menzil arttırmanın mümkün olmadığını gösterse de daha kısa menzilli ve düşük irtifada seyreden küçük insansız hava araçları için hibrit mimari hala geçerli bir menzil arttırma yöntemi olabilir.

Ayrıca; menzil arttırmak dışında birçok fayda için hibrit tahrik sistemleri araştırmaya değer bir konu olacaktır. Zira özellikle askeri İHA’lardaki elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayabilmek için daha güçlü marş/jeneratör sistemlerine olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Hava araçlarında rejeneratif şarj olanakları da araştırılmakta olan konulardan bir tanesidir, bu da hibrit tahrik sistemli İHA’larda menzilin artışı için pozitif etki yapacaktır. Ayrıca, performans parametreleri dışında güvenilirlik konusunda da hibrit tahrik sistemleri fayda sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] N. Alamin ve M. Khedir, "Detection and Tracking of UAV Targets Using Deep Learning", *Journal of Karary University for Engineering and Science*, Ara. 2021, doi: 10.54388/jkues.v1i2.51.
- [2] Z. Wang, R. Liu, Q. Liu, L. Han, ve J. S. Thompson, "Feasibility Study of UAV-Assisted Anti-Jamming Positioning", *IEEE Trans Veh Technol*, c. 70, sy 8, ss. 7718-7733, Ağu. 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3090403.
- [3] M.-A. Stamate, C. Pupăză, F.-A. Nicolescu, ve C.-E. Moldoveanu, "Improvement of Hexacopter UAVs Attitude Parameters Employing Control and Decision Support Systems", *Sensors*, c. 23, sy 3, s. 1446, Oca. 2023, doi: 10.3390/s23031446.
- [4] B. Unal, T. Savas, ve I. Yazar, "Design of a Pesticide Spraying Quadcopter", *International Journal of Aviation Science and Technology*, c. vm01, sy is01, ss. 9-13, Eyl. 2020, doi: 10.23890/IJAST.vm01is01.0102.
- [5] C.-J. Huang, K.-W. Hu, ve H.-W. Cheng, "An Electric Vehicle Assisted Charging Mechanism for Unmanned Aerial Vehicles", *Electronics (Basel)*, c. 12, sy 7, s. 1729, Nis. 2023, doi: 10.3390/electronics12071729.
- [6] M. Okulski ve M. Ławryńczuk, "A Small UAV Optimized for Efficient Long-Range and VTOL Missions: An Experimental Tandem-Wing Quadplane Drone", *Applied Sciences*, c. 12, sy 14, s. 7059, Tem. 2022, doi: 10.3390/app12147059.
- [7] Y. Park ve I. Moon, "UAV Set Covering Problem for Emergency Network", 2019, ss. 84-90. doi: 10.1007/978-3-030-29996-5_10.
- [8] A. Wang vd., "GuideLoc: UAV-Assisted Multitarget Localization System for Disaster Rescue", *Mobile Information Systems*, c. 2017, ss. 1-13, 2017, doi: 10.1155/2017/1267608.
- [9] L. Davoli, E. Pagliari, ve G. Ferrari, "Hybrid LoRa-IEEE 802.11s Opportunistic Mesh Networking for Flexible UAV Swarming", *Drones*, c. 5, sy 2, s. 26, Nis. 2021, doi: 10.3390/drones5020026.
- [10] M. McQueen, A. E. Karataş, G. Bramesfeld, ve O. Arenas, "Model-Based Analysis of Lithium-Ion Battery Technology Predictions in Light-Sport Aircraft", *IEEE Access*, c. 10, ss. 109299-109310, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3213068.
- [11] M. McQueen, A. E. Karataş, G. Bramesfeld, E. Demir, ve O. Arenas, "Feasibility Study of Electrified Light-Sport Aircraft Powertrains", *Aerospace*, c. 9, sy 4, s. 224, Nis. 2022, doi: 10.3390/aerospace9040224.
- [12] J. Zong, B. Zhu, Z. Hou, X. Yang, ve J. Zhai, "Sizing and Mission Profile Analysis of the Hybrid-Electric Propulsion System for Retrofitting a Fixed Wing VTOL

- Aircraft”, *International Journal of Aerospace Engineering*, c. 2022, ss. 1-10, Şub. 2022, doi: 10.1155/2022/9384931.
- [13] A. Yezeguelian ve A. T. Isikveren, “Methods to improve UAV performance using hybrid-electric architectures”, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, c. 92, sy 5, ss. 685-700, May. 2020, doi: 10.1108/AEAT-11-2019-0227.
- [14] R. de Vries, M. F. M. Hoogreef, ve R. Vos, “Range Equation for Hybrid-Electric Aircraft with Constant Power Split”, *J Aircr*, c. 57, sy 3, ss. 552-557, May. 2020, doi: 10.2514/1.C035734.
- [15] A. Batra, R. Raute, ve R. Camilleri, “On the Range Equation for Hybrid-Electric Aircraft”, *Aerospace*, c. 10, sy 8, s. 687, Tem. 2023, doi: 10.3390/aerospace10080687.
- [16] G. E. Wroblewski ve P. J. Ansell, “Hybrid-Electric Breguet Range Equation: Development & Validation Against a Hybrid-Electric Aircraft Simulation”, içinde *AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum*, Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Ağu. 2020. doi: 10.2514/6.2020-3579.
- [17] N. Can ve M. Kahveci, “İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI: TARİHÇESİ, TANIMI, DÜNYADA VE TÜRKİYE DEKİ YASAL DURUMU”, *Selcuk University Journal of Engineering ,Science and Technology*, c. 5, sy 4, ss. 511-535, Ara. 2017, doi: 10.15317/Scitech.2017.109.
- [18] R. Groh, “A Brief History of Aircraft Structures”. Erişim: 02 Kasım 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://aerospaceengineeringblog.com/aircraft-structures/>
- [19] SavunmaSanayiST.com, “Havadan Atılan Seyir Füzesi (ALCM) Nedir?” Erişim: 15 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.savunmasanayist.com/havadan-atilan-seyir-fuzesi-alcml-nedir/>
- [20] L. R. Newcome, *Unmanned Aviation: A Brief History of Unmanned Aerial Vehicles*. Reston ,VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004. doi: 10.2514/4.868894.
- [21] “V-2”. Erişim: 15 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://tr.wikipedia.org/wiki/V-2>
- [22] G. Fu, Y. Gao, L. Liu, M. Yang, ve X. Zhu, “UAV Mission Path Planning Based on Reinforcement Learning in Dynamic Environment”, *Journal of Function Spaces*, c. 2023, ss. 1-11, Mar. 2023, doi: 10.1155/2023/9708143.
- [23] M. Liu, Y. Wang, Y. Chen, ve H. Jia, “Joint Stochastic Computational Resource and UAV Trajectory for Wireless-Powered Space-Air-Ground IoRT Networks”, *IEEE Access*, c. 8, ss. 193728-193743, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3033615.

- [24] P.-Q. Huang, Y. Wang, K. Wang, ve K. Yang, “Differential Evolution With a Variable Population Size for Deployment Optimization in a UAV-Assisted IoT Data Collection System”, *IEEE Trans Emerg Top Comput Intell*, c. 4, sy 3, ss. 324-335, Haz. 2020, doi: 10.1109/TETCI.2019.2939373.
- [25] L. Bian, W. Sun, ve T. Sun, “Trajectory Following and Improved Differential Evolution Solution for Rapid Forming of UAV Formation”, *IEEE Access*, c. 7, ss. 169599-169613, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2954408.
- [26] B. E. Berrett vd., “Large-Scale Reality Modeling of a University Campus Using Combined UAV and Terrestrial Photogrammetry for Historical Preservation and Practical Use”, *Drones*, c. 5, sy 4, s. 136, Kas. 2021, doi: 10.3390/drones5040136.
- [27] A. Michez vd., “How Far Can Consumer-Grade UAV RGB Imagery Describe Crop Production? A 3D and Multitemporal Modeling Approach Applied to Zea mays”, *Remote Sens (Basel)*, c. 10, sy 11, s. 1798, Kas. 2018, doi: 10.3390/rs10111798.
- [28] I. Jurily, *Havacılığın 110 Yıllık Tarihi Gelişimi ve Teknik Evrimi*. Ankara: Akademisyen Kitabevi, 2021.
- [29] Baykar Teknoloji, “Bayraktar TB2”. Erişim: 15 Kasım 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://baykartech.com/tr/uav/bayraktar-tb2/>
- [30] “TAI’s UAV ‘ANKA’ Rolled Out”, *Defence Turkey*, c. 5, sy 23, 2010.
- [31] “TUSAŞ Aksungur”. Erişim: 15 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://tr.wikipedia.org/wiki/TUSA%C5%9E_Aksungur
- [32] A. E. Yüksel, “Havacılıkta Hibrit İtki Sistemleri ve Uygun Disli Kutusu Tasarımı”, Master’s Thesis, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2022.
- [33] L. Dincă, J.-I. Corcău, ve D. Cuman, “Two Numerical Studies for Longitudinal Movement of a Canard UAV with Vectored Thrust”, *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering Series*, c. 45, sy 1, ss. 90-97, Şub. 2022, doi: 10.52846/AUCEE.2021.1.13.
- [34] E. F. Griffith, J. M. Schurer, B. Mawindo, R. Kwibuka, T. Turibyarive, ve J. H. Amuguni, “The Use of Drones to Deliver Rift Valley Fever Vaccines in Rwanda: Perceptions and Recommendations”, *Vaccines (Basel)*, c. 11, sy 3, s. 605, Mar. 2023, doi: 10.3390/vaccines11030605.
- [35] B. Hiebert, E. Nouvet, V. Jeyabalan, ve L. Donelle, “The Application of Drones in Healthcare and Health-Related Services in North America: A Scoping Review”, *Drones*, c. 4, sy 3, s. 30, Tem. 2020, doi: 10.3390/drones4030030.

- [36] R. de Vries, M. Brown, ve R. Vos, “Preliminary Sizing Method for Hybrid-Electric Distributed-Propulsion Aircraft”, *J Aircr*, c. 56, sy 6, ss. 2172-2188, Kas. 2019, doi: 10.2514/1.C035388.
- [37] F. G. Harmon, A. A. Frank, ve J.-J. Chattot, “Conceptual Design and Simulation of a Small Hybrid-Electric Unmanned Aerial Vehicle”, *J Aircr*, c. 43, sy 5, ss. 1490-1498, Eyl. 2006, doi: 10.2514/1.15816.
- [38] J. Matlock, S. Warwick, P. Sharikov, J. Richards, ve A. Suleman, “Evaluation of energy efficient propulsion technologies for unmanned aerial vehicles”, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, c. 43, sy 4, ss. 481-489, Ara. 2019, doi: 10.1139/tcsme-2018-0231.
- [39] M. Fioriti, S. Vaschetto, S. Corpino, ve G. Premoli, “Design of hybrid electric heavy fuel MALE ISR UAV enabling technologies for military operations”, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, c. 92, sy 5, ss. 745-755, May. 2020, doi: 10.1108/AEAT-05-2019-0109.
- [40] Skyfront Inc., “SkyFront 8 UAV”. Erişim: 18 Kasım 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://skyfront.com/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiA1rSsBhDHARIsANB4EJZpvySvhIqvPLkbZxuMFshEEryqbqz6EiSLgcaqkgwEZuFbS64cAEaAgoDEALw_wcB
- [41] Advanced Aircraft Company, “HAMR: Hybrid Advanced Multi Rotor”.
- [42] S. Bayram, “İNSANSIZ YAKIT HÜCRELİ HİBRİT HAVA ARAÇLARININ ENERJİ YÖNETİMİ”, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2021.
- [43] S. Çoban ve T. Oktay, “Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) According to Engine Type”, *Journal of Aviation*, Ara. 2018, doi: 10.30518/jav.461116.
- [44] X. Dai, Q. Quan, J. Ren, Z. Xi, ve K.-Y. Cai, “Terminal Iterative Learning Control for Autonomous Aerial Refueling Under Aerodynamic Disturbances”, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, c. 41, sy 7, ss. 1577-1584, Tem. 2018, doi: 10.2514/1.G003217.
- [45] M. ElSayed ve M. Mohamed, “The Impact of Airspace Discretization on the Energy Consumption of Autonomous Unmanned Aerial Vehicles (Drones)”, *Energies (Basel)*, c. 15, sy 14, s. 5074, Tem. 2022, doi: 10.3390/en15145074.
- [46] A. A. Periola ve E. Obayiuwana, “Intelligent learning diversity mechanism for unmanned aerial vehicles applications”, *Nigerian Journal of Technology*, c. 39, sy 2, ss. 514-527, Tem. 2020, doi: 10.4314/njt.v39i2.22.
- [47] R. K. Nangia, “‘Greener’ civil aviation using air-to-air refuelling – relating aircraft design efficiency and tanker offload efficiency”, *The Aeronautical Journal*, c. 111, sy 1123, ss. 589-592, Eyl. 2007, doi: 10.1017/S0001924000001858.

- [48] K. Biswas, "Military Aviation Principles", içinde *Military Engineering*, IntechOpen, 2020. doi: 10.5772/intechopen.87087.
- [49] K. Ferguson ve D. Thomson, "Performance comparison between a conventional helicopter and compound helicopter configurations", *Proc Inst Mech Eng G J Aerosp Eng*, c. 229, sy 13, ss. 2441-2456, Kas. 2015, doi: 10.1177/0954410015577997.
- [50] S. Kisson, F. S. Mastropierro, D. K. Nalianda, A. Rolt, ve B. Sethi, "Assessment of the BWB aircraft for military transport", *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, c. 92, sy 5, ss. 769-776, May. 2020, doi: 10.1108/AEAT-09-2019-0188.
- [51] E. Massingham, "Radio Silence Autonomous Military Aircraft and the Importance of Communication for their Use in Peace Time and in Times of Armed Conflict under International Law", 2020.
- [52] Y. Zhao ve S. Zheng, "Nozzle dimension design for aircraft engine infrared signature and thrust active control using MOEA/D", *Proc Inst Mech Eng G J Aerosp Eng*, c. 234, sy 15, ss. 2133-2138, Ara. 2020, doi: 10.1177/0954410020932805.
- [53] J. Parry ve S. Hubbard, "Review of Sensor Technology to Support Automated Air-to-Air Refueling of a Probe Configured Uncrewed Aircraft", *Sensors*, c. 23, sy 2, s. 995, Oca. 2023, doi: 10.3390/s23020995.
- [54] B. M. Baumann, G. Washington, B. C. Glenn, ve G. Rizzoni, "Mechatronic design and control of hybrid electric vehicles", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, c. 5, sy 1, ss. 58-72, Mar. 2000, doi: 10.1109/3516.828590.
- [55] S. M. Lukic ve A. Emadi, "Effects of Drivetrain Hybridization on Fuel Economy and Dynamic Performance of Parallel Hybrid Electric Vehicles", *IEEE Trans Veh Technol*, c. 53, sy 2, ss. 385-389, Mar. 2004, doi: 10.1109/TVT.2004.823525.
- [56] D. Buecherl, I. Bolvashenkov, ve H.-G. Herzog, "Verification of the optimum hybridization factor as design parameter of hybrid electric vehicles", içinde *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, IEEE, Eyl. 2009, ss. 847-851. doi: 10.1109/VPPC.2009.5289758.
- [57] J. Hoelzen vd., "Conceptual Design of Operation Strategies for Hybrid Electric Aircraft", *Energies (Basel)*, c. 11, sy 1, s. 217, Oca. 2018, doi: 10.3390/en11010217.
- [58] A. Sgueglia vd., "Multidisciplinary Design Optimization Framework with Coupled Derivative Computation for Hybrid Aircraft", *J Aircr*, c. 57, sy 4, ss. 715-729, Tem. 2020, doi: 10.2514/1.C035509.

- [59] S. Vouros, M. Kavvalos, S. Sahoo, ve K. Kyprianidis, “Enabling the potential of hybrid electric propulsion through lean-burn-combustion turbofans”, *Journal of the Global Power and Propulsion Society*, c. 5, ss. 164-176, Eyl. 2021, doi: 10.33737/jgpps/140592.
- [60] J. Köhler ve P. Jeschke, “Conceptual design and comparison of hybrid electric propulsion systems for small aircraft”, *CEAS Aeronaut J*, c. 12, sy 4, ss. 907-922, Kas. 2021, doi: 10.1007/s13272-021-00536-4.
- [61] G. Palaia, D. Zanetti, K. Abu Salem, V. Cipolla, ve V. Binante, “THEA-CODE: a design tool for the conceptual design of hybrid-electric aircraft with conventional or unconventional airframe configurations”, *Mechanics & Industry*, c. 22, s. 19, Mar. 2021, doi: 10.1051/meca/2021012.
- [62] E. Koruyucu, “Hibrit (piston prop-elektrik) tahrikli hafif genel maksat helikopterin enerji ve çevresel etkilerinin matematiksel incelenmesi ”, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, 2018.
- [63] T. J. Wall ve R. Meyer, “A Survey of Hybrid Electric Propulsion for Aircraft”, içinde *53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Tem. 2017. doi: 10.2514/6.2017-4700.
- [64] J. Schoemann ve M. Hornung, “Modeling of Hybrid Electric Propulsion Systems for Small Unmanned Aerial Vehicles”, içinde *12th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference and 14th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*, Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Eyl. 2012. doi: 10.2514/6.2012-5610.
- [65] A. Spinelli, L. Anderson, H. B. Enalou, B. Zaghari, T. Kipouros, ve P. Laskaridis, “Application of Probabilistic principles to Set-Based Design for the optimisation of a hybrid-electric propulsion system”, *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, c. 1226, sy 1, s. 012064, Şub. 2022, doi: 10.1088/1757-899X/1226/1/012064.
- [66] M. Janovec, J. Čerňan, F. Škultéty, ve A. Novák, “Design of Batteries for a Hybrid Propulsion System of a Training Aircraft”, *Energies (Basel)*, c. 15, sy 1, s. 49, Ara. 2021, doi: 10.3390/en15010049.
- [67] B. Zaghari vd., “The Impact of Electric Machine and Propeller Coupling Design on Electrified Aircraft Noise and Performance”, içinde *AIAA SCITECH 2023 Forum*, Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Oca. 2023. doi: 10.2514/6.2023-2133.
- [68] L. A. Costello, “State of the Art of Piloted Electric Airplanes, NASA’s Centennial Challenge Data and Fundamental Design Implications”, Embry-Riddle Aeronautical University - Daytona Beach, 2011.

- [69] J. M. T. Matlock, "Evaluation of hybrid-electric propulsion systems for unmanned aerial vehicles", University of Victoria, 2020.
- [70] Airforce Technology, "RQ-4A/B Global Hawk HALE Reconnaissance UAV". Erişim: 09 Kasım 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.airforce-technology.com/projects/rq4-global-hawk-uav/?cf-view>
- [71] R. V. Petrescu *vd.*, "About Northrop Grumman", *Journal of Aircraft and Spacecraft Technology*, c. 1, sy 3, ss. 162-185, Mar. 2017, doi: 10.3844/jastsp.2017.162.185.
- [72] D. F. Waters, S. Vannoy, ve C. P. Cadou, "Influence of Flow Path Configuration on the Performance of Hybrid Turbine - Solid Oxide Fuel Cell Systems for Aircraft Propulsion and Power", içinde *51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Tem. 2015. doi: 10.2514/6.2015-4109.
- [73] Z. Liu ve J. Liu, "Effect of altitude conditions on combustion and performance of a turbocharged direct-injection diesel engine", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, c. 236, sy 4, ss. 582-593, Mar. 2022, doi: 10.1177/09544070211026204.
- [74] D. Cirigliano, A. M. Frisch, F. Liu, ve W. A. Sirignano, "Diesel, Spark-Ignition, and Turboprop Engines for Long-Duration Unmanned Air Flights", *J Propuls Power*, c. 34, sy 4, ss. 878-892, Tem. 2018, doi: 10.2514/1.B36547.
- [75] F. C. Barbosa, "Ultra High Bypass Ratio Engine Technology Review - The Efficiency Frontier for the Turbofan Propulsion", Şub. 2022. doi: 10.4271/2021-36-0032.

EKLER

EK-1 HESAPLAMALAR İÇİN KULLANILAN MATLAB KODLARI

```
C1=0.03*29
Cd=0.03

eff_pil=1      %eff2

eff_pr=0.85 % eff_p
eff_ym1=0.45 % efficiency yakıt motoru
eff_ym2=0.47
eff_ym3=0.49
eff_eg=0.98 % efficiency elektrik generator
eff_em=0.95 %efficiency elektrik motor
eff_gb=0.95 %efficiency vites kutusu

hydzt1=0.1 %hibridizasyon oranları
hydzt2=0.2
hydzt3=0.3
hydzt4=0.4
hydzt5=0.5
hydzt6=0.6
hydzt7=0.7
hydzt8=0.8
hydzt9=0.9

g=9.81

W_bos=66500
W_FY=13350
e_pil=400*3600 % Wh/kg
E0total=238880000000 % J
e_yakit=11900*3600 %enerji yoğunluğu j/kg

E_yakitson=0
E_yakitilk=21*10^9

C=(W_bos+W_FY+((g*hydzt*E0total)/(e_pil*eff_pil)))
D=(C+(E0total*g*e_pil*(1-hydzt))/(e_pil*e_yakit*eff_yakit))

Range=eff_yakit*eff_pr*(i)*(1+hydzt/(1-
hydzt))*(e_yakit/g)*log(D/C) % general

Eff_Seri1=eff_ym1*eff_eg*eff_em*eff_gb*eff_pr
Eff_Seri2=eff_ym2*eff_eg*eff_em*eff_gb*eff_pr
Eff_Seri3=eff_ym3*eff_eg*eff_em*eff_gb*eff_pr
Eff_Paralel1 =eff_ym1*eff_gb*eff_pr; %10000ft
Eff_Paralel2 =eff_ym2*eff_gb*eff_pr; %16500ft
Eff_Paralel3 =eff_ym3*eff_gb*eff_pr; %250000
```

```

Seri_payda1=(W_bos+W_FY+(g*hydzt1*E0total)/(e_pil));
Seri_payda2=(W_bos+W_FY+(g*hydzt2*E0total)/(e_pil));
Seri_payda3=(W_bos+W_FY+(g*hydzt3*E0total)/(e_pil));
Seri_payda4=(W_bos+W_FY+(g*hydzt4*E0total)/(e_pil));
Seri_payda5=(W_bos+W_FY+(g*hydzt5*E0total)/(e_pil));
Seri_payda6=(W_bos+W_FY+(g*hydzt6*E0total)/(e_pil));
Seri_payda7=(W_bos+W_FY+(g*hydzt7*E0total)/(e_pil));
Seri_payda8=(W_bos+W_FY+(g*hydzt8*E0total)/(e_pil));
Seri_payda9=(W_bos+W_FY+(g*hydzt9*E0total)/(e_pil));

Seri_pay1=(Seri_payda1+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt1)/(e_pil*e_yakit*eff_ym1*eff_eg))); % irtifa0 10000ft için
Seri_pay2=(Seri_payda2+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt2)/(e_pil*e_yakit*eff_ym1*eff_eg)));
Seri_pay3=(Seri_payda3+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt3)/(e_pil*e_yakit*eff_ym1*eff_eg)));
Seri_pay4=(Seri_payda4+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt4)/(e_pil*e_yakit*eff_ym1*eff_eg)));
Seri_pay5=(Seri_payda5+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt5)/(e_pil*e_yakit*eff_ym1*eff_eg)));
Seri_pay6=(Seri_payda6+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt6)/(e_pil*e_yakit*eff_ym1*eff_eg)));
Seri_pay7=(Seri_payda7+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt7)/(e_pil*e_yakit*eff_ym1*eff_eg)));
Seri_pay8=(Seri_payda8+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt8)/(e_pil*e_yakit*eff_ym1*eff_eg)));
Seri_pay9=(Seri_payda9+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt9)/(e_pil*e_yakit*eff_ym1*eff_eg)));

Seri_pay11=(Seri_payda1+(E0total*g*e_pil*(1-
fhydzt1)/(e_pil*e_yakit*eff_ym2*eff_eg))); % irtifa 16500ft için
Seri_pay12=(Seri_payda2+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt2)/(e_pil*e_yakit*eff_ym2*eff_eg)));
Seri_pay13=(Seri_payda3+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt3)/(e_pil*e_yakit*eff_ym2*eff_eg)));
Seri_pay14=(Seri_payda4+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt4)/(e_pil*e_yakit*eff_ym2*eff_eg)));
Seri_pay15=(Seri_payda5+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt5)/(e_pil*e_yakit*eff_ym2*eff_eg)));
Seri_pay16=(Seri_payda6+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt6)/(e_pil*e_yakit*eff_ym2*eff_eg)));
Seri_pay17=(Seri_payda7+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt7)/(e_pil*e_yakit*eff_ym2*eff_eg)));
Seri_pay18=(Seri_payda8+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt8)/(e_pil*e_yakit*eff_ym2*eff_eg)));
Seri_pay19=(Seri_payda9+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt9)/(e_pil*e_yakit*eff_ym2*eff_eg)));

Seri_pay21=(Seri_payda1+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt1)/(e_pil*e_yakit*eff_ym3*eff_eg))); % irtifa 25000ft için
Seri_pay22=(Seri_payda2+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt2)/(e_pil*e_yakit*eff_ym3*eff_eg)));
Seri_pay23=(Seri_payda3+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt3)/(e_pil*e_yakit*eff_ym3*eff_eg)));
Seri_pay24=(Seri_payda4+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt4)/(e_pil*e_yakit*eff_ym3*eff_eg)));

```

```

Seri_pay25=(Seri_payda5+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt5)/(e_pil*e_yakit*eff_ym3*eff_eg)));
Seri_pay26=(Seri_payda6+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt6)/(e_pil*e_yakit*eff_ym3*eff_eg)));
Seri_pay27=(Seri_payda7+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt7)/(e_pil*e_yakit*eff_ym3*eff_eg)));
Seri_pay28=(Seri_payda8+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt8)/(e_pil*e_yakit*eff_ym3*eff_eg)));
Seri_pay29=(Seri_payda9+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt9)/(e_pil*e_yakit*eff_ym3*eff_eg)))

```

```

Range_Seri1=Eff_Seri1*(Cl/Cd)*(1+hydzt1/(1-
hydzt1))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay1/Seri_payda1) % Seri için range
|parametrik| 10000 ft

```

```

Range_Seri2=Eff_Seri1*(Cl/Cd)*(1+hydzt2/(1-
hydzt2))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay2/Seri_payda2)
Range_Seri3=Eff_Seri1*(Cl/Cd)*(1+hydzt3/(1-
hydzt3))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay3/Seri_payda3)
Range_Seri4=Eff_Seri1*(Cl/Cd)*(1+hydzt4/(1-
hydzt4))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay4/Seri_payda4)
Range_Seri5=Eff_Seri1*(Cl/Cd)*(1+hydzt5/(1-
hydzt5))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay5/Seri_payda5)
Range_Seri6=Eff_Seri1*(Cl/Cd)*(1+hydzt6/(1-
hydzt6))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay6/Seri_payda6)
Range_Seri7=Eff_Seri1*(Cl/Cd)*(1+hydzt7/(1-
hydzt7))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay7/Seri_payda7)
Range_Seri8=Eff_Seri1*(Cl/Cd)*(1+hydzt8/(1-
hydzt8))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay8/Seri_payda8)
Range_Seri9=Eff_Seri1*(Cl/Cd)*(1+hydzt9/(1-
hydzt9))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay9/Seri_payda9)

```

```

Range_Seri11=Eff_Seri2*(Cl/Cd)*(1+hydzt1/(1-
hydzt1))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay11/Seri_payda1) % Seri için range
|parametrik| 16500 ft

```

```

Range_Seri12=Eff_Seri2*(Cl/Cd)*(1+hydzt2/(1-
hydzt2))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay12/Seri_payda2)
Range_Seri13=Eff_Seri2*(Cl/Cd)*(1+hydzt3/(1-
hydzt3))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay13/Seri_payda3)
Range_Seri14=Eff_Seri2*(Cl/Cd)*(1+hydzt4/(1-
hydzt4))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay14/Seri_payda4)
Range_Seri15=Eff_Seri2*(Cl/Cd)*(1+hydzt5/(1-
hydzt5))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay15/Seri_payda5)
Range_Seri16=Eff_Seri2*(Cl/Cd)*(1+hydzt6/(1-
hydzt6))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay16/Seri_payda6)
Range_Seri17=Eff_Seri2*(Cl/Cd)*(1+hydzt7/(1-
hydzt7))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay17/Seri_payda7)
Range_Seri18=Eff_Seri2*(Cl/Cd)*(1+hydzt8/(1-
hydzt8))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay18/Seri_payda8)
Range_Seri19=Eff_Seri2*(Cl/Cd)*(1+hydzt9/(1-
hydzt9))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay19/Seri_payda9)

```

```

Range_Seri21=Eff_Seri3*(Cl/Cd)*(1+hydzt1/(1-
hydzt1))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay21/Seri_payda1) % Seri için range
|parametrik| 25000 ft

```

```

Range_Seri22=Eff_Seri3*(Cl/Cd)*(1+hydzt2/(1-
hydzt2))*(e_yakit/g)*log(Seri_pay22/Seri_payda2)

```

```

Range_Seri23=Eff_Seri3*(Cl/Cd)*(1+hydzt3/(1-
hydzt3))* (e_yakit/g)*log(Seri_pay23/Seri_payda3)
Range_Seri24=Eff_Seri3*(Cl/Cd)*(1+hydzt4/(1-
hydzt4))* (e_yakit/g)*log(Seri_pay24/Seri_payda4)
Range_Seri25=Eff_Seri3*(Cl/Cd)*(1+hydzt5/(1-
hydzt5))* (e_yakit/g)*log(Seri_pay25/Seri_payda5)
Range_Seri26=Eff_Seri3*(Cl/Cd)*(1+hydzt6/(1-
hydzt6))* (e_yakit/g)*log(Seri_pay26/Seri_payda6)
Range_Seri27=Eff_Seri3*(Cl/Cd)*(1+hydzt7/(1-
hydzt7))* (e_yakit/g)*log(Seri_pay27/Seri_payda7)
Range_Seri28=Eff_Seri3*(Cl/Cd)*(1+hydzt8/(1-
hydzt8))* (e_yakit/g)*log(Seri_pay28/Seri_payda8)
Range_Seri29=Eff_Seri3*(Cl/Cd)*(1+hydzt9/(1-
hydzt9))* (e_yakit/g)*log(Seri_pay29/Seri_payda9)

```

```

Paralel_Payda1=(W_bos+W_FY+(g*hydzt1*E0total)/(e_pil*eff_em));
Paralel_Payda2=(W_bos+W_FY+(g*hydzt2*E0total)/(e_pil*eff_em));
Paralel_Payda3=(W_bos+W_FY+(g*hydzt3*E0total)/(e_pil*eff_em));
Paralel_Payda4=(W_bos+W_FY+(g*hydzt4*E0total)/(e_pil*eff_em));
Paralel_Payda5=(W_bos+W_FY+(g*hydzt5*E0total)/(e_pil*eff_em));
Paralel_Payda6=(W_bos+W_FY+(g*hydzt6*E0total)/(e_pil*eff_em));
Paralel_Payda7=(W_bos+W_FY+(g*hydzt7*E0total)/(e_pil*eff_em));
Paralel_Payda8=(W_bos+W_FY+(g*hydzt8*E0total)/(e_pil*eff_em));
Paralel_Payda9=(W_bos+W_FY+(g*hydzt9*E0total)/(e_pil*eff_em));

```

```

Paralel_Pay1=(Paralel_Payda1+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt1)/(e_pil*e_yakit*eff_ym1)));
Paralel_Pay2=(Paralel_Payda2+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt2)/(e_pil*e_yakit*eff_ym1)));
Paralel_Pay3=(Paralel_Payda3+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt3)/(e_pil*e_yakit*eff_ym1)));
Paralel_Pay4=(Paralel_Payda4+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt4)/(e_pil*e_yakit*eff_ym1)));
Paralel_Pay5=(Paralel_Payda5+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt5)/(e_pil*e_yakit*eff_ym1)));
Paralel_Pay6=(Paralel_Payda6+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt6)/(e_pil*e_yakit*eff_ym1)));
Paralel_Pay7=(Paralel_Payda7+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt7)/(e_pil*e_yakit*eff_ym1)));
Paralel_Pay8=(Paralel_Payda8+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt8)/(e_pil*e_yakit*eff_ym1)));
Paralel_Pay9=(Paralel_Payda9+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt9)/(e_pil*e_yakit*eff_ym1)));

```

```

Paralel_Pay11=(Paralel_Payda1+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt1)/(e_pil*e_yakit*eff_ym2)));
Paralel_Pay12=(Paralel_Payda2+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt2)/(e_pil*e_yakit*eff_ym2)));
Paralel_Pay13=(Paralel_Payda3+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt3)/(e_pil*e_yakit*eff_ym2)));
Paralel_Pay14=(Paralel_Payda4+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt4)/(e_pil*e_yakit*eff_ym2)));
Paralel_Pay15=(Paralel_Payda5+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt5)/(e_pil*e_yakit*eff_ym2)));
Paralel_Pay16=(Paralel_Payda6+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt6)/(e_pil*e_yakit*eff_ym2)));
Paralel_Pay17=(Paralel_Payda7+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt7)/(e_pil*e_yakit*eff_ym2)));

```

```

Paralel_Pay18=(Paralel_Payda8+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt8)/(e_pil*e_yakit*eff_ym2)));
Paralel_Pay19=(Paralel_Payda9+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt9)/(e_pil*e_yakit*eff_ym2)));

Paralel_Pay21=(Paralel_Payda1+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt1)/(e_pil*e_yakit*eff_ym3)));
Paralel_Pay22=(Paralel_Payda2+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt2)/(e_pil*e_yakit*eff_ym3)));
Paralel_Pay23=(Paralel_Payda3+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt3)/(e_pil*e_yakit*eff_ym3)));
Paralel_Pay24=(Paralel_Payda4+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt4)/(e_pil*e_yakit*eff_ym3)));
Paralel_Pay25=(Paralel_Payda5+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt5)/(e_pil*e_yakit*eff_ym3)));
Paralel_Pay26=(Paralel_Payda6+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt6)/(e_pil*e_yakit*eff_ym3)));
Paralel_Pay27=(Paralel_Payda7+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt7)/(e_pil*e_yakit*eff_ym3)));
Paralel_Pay28=(Paralel_Payda8+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt8)/(e_pil*e_yakit*eff_ym3)));
Paralel_Pay29=(Paralel_Payda9+(E0total*g*e_pil*(1-
hydzt9)/(e_pil*e_yakit*eff_ym3)));

Range_Paralel1=Eff_Paralel1*(Cl/Cd)*(1+hydzt1/(1-
hydzt1))*(e_yakit/g)*log(Paralel_Pay1/Paralel_Payda1) % Paralel için
range |parametrik| 10000 ft
Range_Paralel2=Eff_Paralel1*(Cl/Cd)*(1+hydzt2/(1-
hydzt2))*(e_yakit/g)*log(Paralel_Pay2/Paralel_Payda2)
Range_Paralel3=Eff_Paralel1*(Cl/Cd)*(1+hydzt3/(1-
hydzt3))*(e_yakit/g)*log(Paralel_Pay3/Paralel_Payda3)
Range_Paralel4=Eff_Paralel1*(Cl/Cd)*(1+hydzt4/(1-
hydzt4))*(e_yakit/g)*log(Paralel_Pay4/Paralel_Payda4)
Range_Paralel5=Eff_Paralel1*(Cl/Cd)*(1+hydzt5/(1-
hydzt5))*(e_yakit/g)*log(Paralel_Pay5/Paralel_Payda5)
Range_Paralel6=Eff_Paralel1*(Cl/Cd)*(1+hydzt6/(1-
hydzt6))*(e_yakit/g)*log(Paralel_Pay6/Paralel_Payda6)
Range_Paralel7=Eff_Paralel1*(Cl/Cd)*(1+hydzt7/(1-
hydzt7))*(e_yakit/g)*log(Paralel_Pay7/Paralel_Payda7)
Range_Paralel8=Eff_Paralel1*(Cl/Cd)*(1+hydzt8/(1-
hydzt8))*(e_yakit/g)*log(Paralel_Pay8/Paralel_Payda8)
Range_Paralel9=Eff_Paralel1*(Cl/Cd)*(1+hydzt9/(1-
hydzt9))*(e_yakit/g)*log(Paralel_Pay9/Paralel_Payda9)
Range_Paralel11=Eff_Paralel2*(Cl/Cd)*(1+hydzt1/(1-
hydzt1))*(e_yakit/g)*log(Paralel_Pay11/Paralel_Payda1)
Range_Paralel12=Eff_Paralel2*(Cl/Cd)*(1+hydzt2/(1-
hydzt2))*(e_yakit/g)*log(Paralel_Pay12/Paralel_Payda2)
Range_Paralel13=Eff_Paralel2*(Cl/Cd)*(1+hydzt3/(1-
hydzt3))*(e_yakit/g)*log(Paralel_Pay13/Paralel_Payda3)
Range_Paralel14=Eff_Paralel2*(Cl/Cd)*(1+hydzt4/(1-
hydzt4))*(e_yakit/g)*log(Paralel_Pay14/Paralel_Payda4)
Range_Paralel15=Eff_Paralel2*(Cl/Cd)*(1+hydzt5/(1-
hydzt5))*(e_yakit/g)*log(Paralel_Pay15/Paralel_Payda5)
Range_Paralel16=Eff_Paralel2*(Cl/Cd)*(1+hydzt6/(1-
hydzt6))*(e_yakit/g)*log(Paralel_Pay16/Paralel_Payda6)
Range_Paralel17=Eff_Paralel2*(Cl/Cd)*(1+hydzt7/(1-
hydzt7))*(e_yakit/g)*log(Paralel_Pay17/Paralel_Payda7)
Range_Paralel18=Eff_Paralel2*(Cl/Cd)*(1+hydzt8/(1-
hydzt8))*(e_yakit/g)*log(Paralel_Pay18/Paralel_Payda8)

```

```

Range_Paralel19=Eff_Paralel2*(Cl/Cd)*(1+hydzt9/(1-
hydzt9))* (e_yakit/g)*log(Paralel_Pay19/Paralel_Payda9)
Range_Paralel21=Eff_Paralel3*(Cl/Cd)*(1+hydzt1/(1-
hydzt1))* (e_yakit/g)*log(Paralel_Pay21/Paralel_Payda1)
Range_Paralel22=Eff_Paralel3*(Cl/Cd)*(1+hydzt2/(1-
hydzt2))* (e_yakit/g)*log(Paralel_Pay22/Paralel_Payda2)
Range_Paralel23=Eff_Paralel3*(Cl/Cd)*(1+hydzt3/(1-
hydzt3))* (e_yakit/g)*log(Paralel_Pay23/Paralel_Payda3)
Range_Paralel24=Eff_Paralel3*(Cl/Cd)*(1+hydzt4/(1-
hydzt4))* (e_yakit/g)*log(Paralel_Pay24/Paralel_Payda4)
Range_Paralel25=Eff_Paralel3*(Cl/Cd)*(1+hydzt5/(1-
hydzt5))* (e_yakit/g)*log(Paralel_Pay25/Paralel_Payda5)
Range_Paralel26=Eff_Paralel3*(Cl/Cd)*(1+hydzt6/(1-
hydzt6))* (e_yakit/g)*log(Paralel_Pay26/Paralel_Payda6)
Range_Paralel27=Eff_Paralel3*(Cl/Cd)*(1+hydzt7/(1-
hydzt7))* (e_yakit/g)*log(Paralel_Pay27/Paralel_Payda7)
Range_Paralel28=Eff_Paralel3*(Cl/Cd)*(1+hydzt8/(1-
hydzt8))* (e_yakit/g)*log(Paralel_Pay28/Paralel_Payda8)
Range_Paralel29=Eff_Paralel3*(Cl/Cd)*(1+hydzt9/(1-
hydzt9))* (e_yakit/g)*log(Paralel_Pay29/Paralel_Payda9)

Motor_Verimi = [1,1,1]
Altitude = [10000,16500,25000]
hydzt_ratio = [0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9]

%RRRan_Seri1=[0,0,0]
%RRRan_Seri2=[0,0,0]
%RRRan_Seri3=[0,0,0]
%RRRan_Seri4=[0,0,0]
%RRRan_Seri5=[0,0,0]
%RRRan_Seri6=[0,0,0]
%RRRan_Seri7=[0,0,0]
%RRRan_Seri8=[0,0,0]
%RRRan_Seri9=[0,0,0]
RRRan_Paralel11=[Range_Paralel11 , Range_Paralel11 ,
Range_Paralel21];
RRRan_Paralel12=[Range_Paralel12 , Range_Paralel12 ,
Range_Paralel22];
RRRan_Paralel13=[Range_Paralel13 , Range_Paralel13 ,
Range_Paralel23];
RRRan_Paralel14=[Range_Paralel14 , Range_Paralel14 ,
Range_Paralel24];
RRRan_Paralel15=[Range_Paralel15 , Range_Paralel15 ,
Range_Paralel25];
RRRan_Paralel16=[Range_Paralel16 , Range_Paralel16 ,
Range_Paralel26];
RRRan_Paralel17=[Range_Paralel17 , Range_Paralel17 ,
Range_Paralel27];
RRRan_Paralel18=[Range_Paralel18 , Range_Paralel18 ,
Range_Paralel28];
RRRan_Paralel19=[Range_Paralel19 , Range_Paralel19 ,
Range_Paralel29];

figure ;
hold on
plot(Altitude, RRRan_Paralel11, 'o-', 'LineWidth', 2,
'MarkerSize', 8);

```

```

        plot(Altitude,      RRRan_Paralel2,      'o-',      'LineWidth',      2,
'MarkerSize', 8);
        plot(Altitude,      RRRan_Paralel3,      'o-',      'LineWidth',      2,
'MarkerSize', 8);
        plot(Altitude,      RRRan_Paralel4,      'o-',      'LineWidth',      2,
'MarkerSize', 8);
        plot(Altitude,      RRRan_Paralel5,      'o-',      'LineWidth',      2,
'MarkerSize', 8);
        plot(Altitude,      RRRan_Paralel6,      'o-',      'LineWidth',      2,
'MarkerSize', 8);
        plot(Altitude,      RRRan_Paralel7,      'o-',      'LineWidth',      2,
'MarkerSize', 8);
        plot(Altitude,      RRRan_Paralel8,      'o-',      'LineWidth',      2,
'MarkerSize', 8);
        plot(Altitude,      RRRan_Paralel9,      'o-',      'LineWidth',      2,
'MarkerSize', 8);

```

```

xlabel('İrtifa[ft]');
ylabel('Menzil[m]');
ytickformat('%0.5g*10^3');
yticks(get(gca, 'YTick'));
yticklabels(arrayfun(@(x) sprintf('%0.1f*10^3', x/1000), get(gca,
'YTick'), 'UniformOutput', false));

```

```

legend('0.1 Hibridizasyon', '0.2 Hibridizasyon', '0.3
Hibridizasyon', '0.4 Hibridizasyon', '0.5 Hibridizasyon', '0.6
Hibridizasyon', '0.7 Hibridizasyon', '0.8 Hibridizasyon', '0.9
Hibridizasyon');

```

```

brege=0.45*0.55*0.95*0.98*0.95*(Cl/Cd)*(e_yakit/g)*log((W_bos+
W_FY+(E0total*g)/(e_yakit*0.45*0.98))/(W_bos+W_FY)) % general

```

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0009-0009-4423-171X

Ad Soyad : Sadık Ata YALÇINKAYA

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2019- , Mühendis, TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş
- 2013-2019, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği

