

HİBRİT TAHRİK SİSTEMLERİN OPTİMUM MENZİL ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Alihuseyn MAHARRAMOV

Yüksek Lisans Tezi

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Elif KORUYUCU

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak 2024

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Alihuseyn MAHARRAMOV'un HİBRİT TAHRİK SİSTEMLERİN OPTİMUM MENZİL ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ başlıklı çalışması 08/01/2024 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

Danışman

: Dr. Öğr. Üyesi Elif KORUYUCU

Üye

: Prof. Dr. Önder ALTUNTAŞ

Üye

: Doç. Dr. Işıl YAZAR

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

08/01/2024

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Alihuseyn MAHARRAMOV, HİBRİT TAHRİK SİSTEMLERİN OPTİMUM MENZİL ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımda incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı
Dr. Öğr. Üyesi Elif KORUYUCU

ÖZET

HİBRİT TAHRİK SİSTEMLERİN OPTİMUM MENZİL ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Alihuseyn MAHARRAMOV

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı
Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2024

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Elif KORUYUCU

Havacılığa olan talep sürekli bir artış göstermekte, bu da yakıt tüketimi, çevresel etki ve operasyonel verimlilik açısından zorluklar ortaya çıkarmaktadır. COVID-19 pandemisi, havacılık sektöründe sürdürülebilir çözümlere olan ihtiyacı daha da vurgulamıştır. Bu sorunlara çözüm olarak, hibrit elektrikli tahrik sistemleri umut vadeden bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Hibrit elektrikli tahrik sistemleri, uçak performansını artırma ve çevresel etkiyi azaltma potansiyeline sahiptir. Bu tez, hibrit elektrik tahrik sistemlerinin optimum uçak menzili üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. Çalışmada, havacılığın çevresel etkileri, çeşitli hibrit uçak prototipleri, batarya kapasitesi ve yoğunluğuyla ilişkili zorluklar incelenmiştir. Hava aracının ağırlığı arttıkça yakıt tüketimi de artmaktadır. Bu da dolayısıyla daha düşük menzil anlamına gelmektedir. Mevcut teknolojide, hibrit tahrik sistemlerinde enerji depolamada kullanılan bataryaların getirdiği ilave ağırlığın yanı sıra düşük batarya yoğunlukları ve düşük batarya kapasitesi söz konusudur. Yapılan çalışmalar incelendiğinde küçük uçaklar için bu kısıtları aşmanın daha kolay, büyük uçaklar için ise daha zor olduğu görülmüştür. Yapılan çalışma ve araştırmalar sonucunda enerji yoğunluğu ve kapasitesi yüksek, hafif ve güvenilir bataryaların geliştirilmesi ile birlikte hibrit uçakların menzillerinin arttırılması, uzun menzillerde daha verimli bir şekilde kullanılması sağlanacaktır..

Anahtar Sözcükler: Havacılık, Hibrit tahrik sistemleri, Optimum Menzil, Batarya, Hibridizasyon.

ABSTRACT

STUDY OF THE EFFECTS OF HYBRID PROPULSION SYSTEMS ON OPTIMUM RANGE

Alihuseyn MAHARRAMOV

Department of Airframe and Powerplant Maintenance
Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2024
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Elif KORUYUCU

Demand for aviation is constantly increasing, presenting challenges in terms of fuel consumption, environmental impact and operational efficiency. The COVID-19 pandemic has further highlighted the need for sustainable solutions in the aviation industry. As a solution to these problems, hybrid electric drive systems have emerged as a promising technology. Hybrid electric propulsion systems have the potential to increase aircraft performance and reduce environmental impact. This thesis investigates the effects of hybrid electric propulsion systems on optimum aircraft range. The study examined the environmental impacts of aviation, various hybrid aircraft prototypes, and challenges associated with battery capacity and density. As the weight of the aircraft increases, fuel consumption also increases. This therefore means lower range. In current technology, in addition to the additional weight brought by batteries used in energy storage in hybrid drive systems, there are low battery densities and low battery capacity. When the studies were examined, it was seen that overcoming these restrictions was easier for small aircraft and more difficult for large aircraft. As a result of the studies and research carried out, the development of light and reliable batteries with high energy density and capacity will increase the range of hybrid aircraft and enable them to be used more efficiently at long ranges.

Keywords: Aviation, Hybrid propulsion systems, Optimum range, Battery, Hybridization.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca yardım, bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren ve destek olan değerli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Elif Koruyucu'ya sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Değerli geri bildirimlerinden ve önerilerinden dolayı, sınav komitesi üyeleri Prof. Dr. Önder Altunaş ve Doç. Dr. Işıl Yazar'a teşekkür ederim.

Ayrıca, çalışmalarım boyunca her zaman yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme teşekkür ederim..

Alihuseyn MAHARRAMOV



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.

Alihuseyn MAHARRAMOV

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 ÖZETİ.....	3
3. HAVA TAŞIMACILIĞINDAKİ DEĞİŞİMLER VE COVID-19 ETKİSİ.....	13
3.1. Günümüzde Hava Taşımacılığına Artan Talep	13
3.2. Covid-19 Pandemisi ve Talepteki Azalma	16
3.3. Havacılığın Pandemi Sonrası Normalleşme Süreci.....	17
3.4. IATA'nın Hava Taşımacılığına İlişkin Tahminleri	18
4. HAVALİMANI İSTATİSTİKLERİ	20
4.1. Türkiye'deki Havalimanları	20
4.2. ABD'deki Havalimanları.....	20
5. HAVACILIĞIN ÇEVRESEL ETKİLERİ	22
5.1. Hava Kirliliği ve Havacılık.....	22
5.2. Havacılığın Farklı Sektörlerdeki Rolü	23

5.2.1. Ticari Havacılık	24
5.2.2. Askeri Havacılık	24
5.2.3. Arama Kurtarma	25
5.2.4. Tarım	25
5.2.5. Uzay Araştırmaları.....	26
5.2.6. Yangın Söndürme.....	26
6. HİBRİT TAHRİK SİSTEMLERİ.....	28
6.1. Hibrit Tahrik Sistemlerinin Tanımı.....	28
6.2. Seri Hibrit Tahrik Sistemleri	28
6.3. Paralel Hibrit Tahrik Sistemleri.....	30
6.3.1. Motor/Jeneratör Konumuna Göre Paralel Hibrit Tahrik Sistemlerinin Sınıflandırılması.....	31
6.4. Seri-Paralel Hibrit Tahrik Sistemleri	32
6.5. Hibridizasyon Derecesi ve Çeşitleri.....	33
6.5.1. Hafif Hibridizasyon.....	33
6.5.2. Tam Hibridizasyon.....	34
6.5.3. Plug-in Hibridizasyon	34
6.5.4. Hibridizasyon Faktörü.....	34
7. ENERJİ YÖNETİMİ VE HİBRİT UÇAK MODELLERİ.....	36
7.1. Hibrit Tahrik Sistemli Uçak Modellerinin Analizi	37
8. MENZİL ANALİZİ VE OPTİMUM MENZİL	46
8.1. Optimum Menzil Kavramı.....	46
8.2. Menzili Etkileyen Faktörler	46
8.3. Genel Menzil Tanımı ve Formülü.....	48
8.4. Hibrit Tahrikli Hava Araçları İçin Menzil Formülü.....	51
9. BATARYA KAPASİTESİ VE ENERJİ YOĞUNLUĞUNUN MENZİL ÜZERİNDEKİ ETKİSİ.....	53
10. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	56
10.1. Bulguların Değerlendirilmesi.....	56
10.2. Çalışmanın Sınırlamaları	56

10.3. Gelecekteki Araştırmalar İçin neriler.....	56
KAYNAKÇA.....	57
ZGEMİş	



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 8.1. Hava aracının menzilini etkileyen faktörler..... 46

Tablo 9.1. 2035 yılına kadar hücre düzeyinde gelecekteki bataryalardaki eğilimler..... 54



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 6.1. Seri Hibrit Tahrik Konfigürasyonu	29
Şekil 6.2. Paralel Hibrit Tahrik Konfigürasyonu.....	30
Şekil 6.3. Tek Şaft Konfigürasyonlu Paralel Hibrit Tahrik Sistemi.....	32
Şekil 6.4. Seri-Paralel Hibrit Tahrik Konfigürasyonu.....	33



GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 3.1. Küresel Havayolu Endüstrisinin Gerçekleştirdiği Uçuş Sayısı, 2004-2023 (Statista, 2023)	15
Görsel 3.2. Bölgesel Yolcu Toplamları, 2020-2025 (IATA, 2023)	19
Görsel 4.1. 1990'dan 2022'ye kadar ABD'deki Kamu ve Özel Havalimanlarının Sayısı (Statista, 2022)	20
Görsel 5.1. Sektörlere Göre Kişi Başı Sera Gazı Emisyonları, Türkiye, 2020 (Our World in Data, 2023)	22
Görsel 5.2. Sektörlere Göre Kişi Başı Sera Gazı Emisyonları, Dünya, 2020 (Our World in Data, 2023)	23
Görsel 5.3. F16 Falcon (United States Air Force, 2018)	24
Görsel 5.4. Bayraktar TB2 (Bayhaluk, Wikimeda, 2023).....	25
Görsel 5.5. Sikorsky S-92 Arama-kurtarma Operasyonu Zamanı (Flight Global, 2023)	25
Görsel 5.6. Air Tractor AT-802F (Airtractor, 2023).....	26
Görsel 5.7. Boeing 747 SOFIA Uçan Gözlemevi (NASA, 2022)	26
Görsel 5.8. Bombardier CL-415 Yangının üzerine su boşaltıyor (Gérard JOYON)	27
Görsel 6.1. Elektrikli Tahrik Alanındaki Başarıların Zaman Çizelgesi (Airbus, 2020)	28
Görsel 7.1. HYPSTAIR (Skymag, 2016).....	37
Görsel 7.2. Diamond DA36 E-Star (Diamond Aircraft, 2021)	38
Görsel 7.3. E-Genius (University of Stuttgart, 2022)	39
Görsel 7.4. Panthera Hybrid (Pipistrel, 2019).....	39
Görsel 7.5. Airlander 10 (Philbobagshot, 2023)	40
Görsel 7.6. Airlander 50 (Hybrid Air Vehicles, 2023)	41
Görsel 7.7. Zunum Aero (Zunum.aero, 2020)	41
Görsel 7.8. N3-X (NASA, 2023)	42
Görsel 7.9. E-Fan X (Airbus, 2017).....	43
Görsel 7.10. Electric EEL (Ampaire, 2019).....	43
Görsel 7.11. SUGAR Volt (NASA/Boeing)	44
Görsel 7.12. RAPID200FC (G. Romeo, POLİTO).....	45

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ATAG	: Air Transport Action Group
FAA	: Federal Aviation Administration
GSYİH	: Gayri Safi Yurtiçi Hasıl
HET	: Hibrit Elektrikli Tahrik
HETS	: Hibrit Elektrikli Tahrik Sistemi
İYM	: İçten Yanmalı Motor
MAHEPA	: Modular Approach to Hybrid Electric Propulsion Architecture
MTOW	: Maximum Take-off Weight
MTW	: Maximum Taxi Weight
MLW	: Maximum Landing Weight
MRW	: Maximum Ramp Weight
OEW	: Operating Empty Weight
SOFIA	: Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy
SUGAR	: Subsonic Ultra-Green Aircraft Research
ZFW	: Zero Fuel Weight

1. GİRİŞ

Havacılık ve uzay endüstrisinde hibrit elektrikli tahrik sistemlerinin benimsenmesi, daha sürdürülebilir ve çevreye duyarlı havacılığa doğru bir paradigma değişimini temsil etmektedir. Hava yolculuğuna yönelik hızla artan talebin olduğu havacılık endüstrisi, uzun süredir karbon emisyonları, yakıt tüketimi ve verimli tahrik teknolojileri arayışı gibi zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu zorluklara yanıt olarak, havacılık ortamını yeniden şekillendirmeyi vaat eden çok sayıda fayda sunan hibrit elektrikli tahrik sistemlerine bir umut ışığı olarak görülmektedir.

Hibrit elektrikli tahrik sistemleri, özünde, geleneksel yakıtla çalışan motorların gücünü, elektrik motorlarının verimliliği ve çok yönlülüğü ile ustaca birleştirmektedir. Bu sinerji, yalnızca fosil kaynaklı yakıt tüketimini azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda zararlı emisyonları da azaltarak havacılık sektörünün çevresel karbon ayak izinin de azaltılmasına yönelik önemli bir fayda getirmektedir. Havacılık, küresel sürdürülebilirlik hedeflerine uyum sağlamaya ve iklim değişikliğiyle mücadele etmeye çabalarırken, bu teknoloji, hava yolculuğu için daha yeşil bir geleceğe olan bağlılığı bir kanıtı olarak durmaktadır (Decerio ve Hall, 2022).

Hibrit elektrikli tahrikin çok yönlü avantajları, çevresel etkinin azaltılmasının çok ötesine uzanmaktadır. Bu sistemler, gelişmiş güç dağıtımı, yüksek güvenilirlik ve gelişmiş operasyonel esneklik sunarak uçak performansında devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Uçaklar hem geleneksel hem de elektrikli tahrik potansiyelinden yararlanarak daha yüksek düzeyde yeterlilik elde edebilmekte ve havacılıkta kritik bir parametre olan menzillerini optimize edebilmektedir.

Menzil, hava yolculuğunun erişimini ve çok yönlülüğünü doğrudan etkilediğinden, uçaklar için çok önemli bir performans ölçüsüdür. Bu tez, hibrit-elektrikli tahrik sistemleri ile uçak menzilin optimizasyonu arasındaki karmaşık etkileşimi araştırmayı amaçlamaktadır. Hibrit elektrikli tahrik sistemlerinin optimum uçak menzilini nasıl etkilediği araştırılarak, daha sürdürülebilir, daha verimli ve ekonomik açıdan uygun hava yolculuğu potansiyeline ışık tutmaya çalışılmıştır.

Bu amaçla havacılık alanındaki ileri araştırmalar ve teknolojik gelişmeleri araştırılmıştır. Analizler ve araştırmalar yoluyla, hibrit elektrikli tahrik ile optimum menzil arasındaki dinamik ilişkiye dair bilgiler sağlamak ve bunun havacılık endüstrisi için potansiyel etkilerine ilişkin kapsamlı bir anlayış sunmak amaçlanmıştır. Bu araştırma, yalnızca havacılık ve uzay mühendisliğinde artan bilgi birikimine katkıda

bulunmakla kalmayıp, aynı zamanda hava yolculuğunun geleceğini şekillendirme ve onu daha sürdürülebilir ve çevresel açıdan sorumlu bir yöne doğru yönlendirme vaadini de taşımaktadır.

“Hibrit Tahrik Sistemlerin Optimum Menzil Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmada, bu yenilikçi tahrik sistemleri incelenerek bunların uçak performansı, verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmaktadır.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

Uçaklar için hibrit-elektrik tahrik sistemlerinin geliştirilmesi, yakıt tüketimini ve emisyonları azaltma potansiyeli nedeniyle son yıllarda ilgi konusu olmuştur. Açık literatürde bulunan, aşağıda belirtilen çalışmalarda, bu sistemlerin optimum uçak menzili üzerindeki etkilerinin araştırıldığı görülmüştür.

Pornet ve diğerleri, farklı boyutlarda tasarlanmış dar gövdeli nakliye uçakları için yakıt hücreli hibrit elektrikli tahrik sistemi kullanımı üzerine çalışma yaparak, bu tip tahrik sisteminin 2035 yılına kadar hizmete girme potansiyelini değerlendirmişlerdir. Hibrit tahrik sistemli uçak için genel uçak boyutlandırma etkileri ve performans değerlendirmesi için metodoloji önerilmiş ve geleneksel bir uçak ile karşılaştırılmıştır. Tasarlanan hibrit elektrikli tahrik sisteminin, blok yakıt tüketiminde %20'ye kadar azalma sağlayabildiği; bununla birlikte, akü entegrasyonu, ek elektrik sistemleri ve kademeli boyutlandırma etkilerinin, maksimum kalkış ağırlığında (MTOW) önemli bir artışa yol açtığı; bu ağırlık artışının, özellikle daha düşük bataryaya özgül enerji ve daha uzun tasarım aralıkları için hibrit elektrikli tahrik teknolojisinin faydalarını dengelediği belirtilmiştir. Özellikle bölgesel uçak pazarında verimli bir uygulama olarak öne çıkacağı ifade edilmiştir. Bulgular, enerji yoğunluğuna ve tasarım aralıklarına bağlı olarak hibrit konseptin avantajlarını ve zorluklarını ortaya koymaktadır. Bu çalışma, sürdürülebilir havacılık ve gelecekteki gelişmelere rehberlik etmek için önemli bir katkı sağlamaktadır (Pornet vd., 2014).

Friedrich ve Robertson, otomotiv ve havacılık uygulamaları için hibrit elektrikli tahrik sistemlerinin potansiyelini araştırmışlardır. Çalışma, hibrit elektrikli tahrik sistemlerinin havacılık endüstrisi için uygun bir alternatif olduğu, yakıt tasarrufu, düşük kirlilik ve azaltılmış gürültü emisyonları gibi potansiyel avantajları olduğunu vurgulamaktadır. Araştırma, hibrit elektrikli tahrik sistemlerinin çeşitli uçak ölçeklerinde, küçük insansız hava araçlarından şehirler arası uçaklara kadar, havacılık sektöründe nasıl kullanılabileceğini incelemektedir. Ayrıca, hibrit elektrik teknolojilerini analiz etmek ve optimize etmek için yenilikçi bir teorik yaklaşım sunmaktadır. Bulgular, hibrit elektrikli tahrikin küçük ve orta ölçekli uçaklar için önemli bir etkiye sahip olabileceğini göstermektedir, ancak büyük ölçekli uçaklar için etkisinin daha sınırlı olduğu belirtilmiştir. Çalışma ayrıca, güç santralinin hibridizasyonunun yakıt tasarrufunu artırabileceğini, ancak batarya enerji yoğunluğunun menzil üzerinde olumsuz etkisi olduğunu göstermektedir. Havacılık sektörünün, otomotiv endüstrisiyle benzer

zorluklarla karşı karşıya olduğu ve hibrit elektrikli uçakların gelişimine daha fazla önem verilmesi gerektiğine vurgu yapılmaktadır (Friedrich ve Robertson, 2015b).

Yaptıkları başka bir çalışmada Friedrich ve Robertson, uçak tahrik sistemleri için tek koltuklu hibrit-elektrikli göstericinin tasarımını, boyutlandırılmasını, deneysel motor haritalamasını ve elektrik motoru parametrelerini incelemişlerdir. Uçak hibrit elektrikli tahrik sistemi teknolojisini incelemek ve geliştirmek için bilgisayar yazılımı kullanarak devrim niteliğinde bir modelleme metodolojisi yapmışlardır. Çalışma, hem 50 tonluk şehirlerarası yolcu uçağı hem de 20 kg'lık insansız hava aracı için ölçeklendirme sorunlarını kapsayacak şekilde yürütülmüştür. Hibrit elektrik gaz türbiniyle çalışan 50 tonluk şehirlerarası bir uçağın performansını analiz ederken alternatif elektrik takviye güçlerini ve batarya kütle konfigürasyonlarını araştırmıştır (Friedrich ve Robertson, 2015a).

Voskuyl ve diğerleri tarafından yapılan araştırma, tasarım alanını görev aralığı ve hibritleşme düzeyine göre nicelleştirirken, bataryaların yüksek ağırlığının tasarımları önemli ölçüde etkilediğini vurgulamakta, batarya soğutma ve kablolama gibi diğer sistem bileşenlerinin de tasarım sürecinde dikkate alınması gerektiğine işaret etmektedir. Çalışmada, Lityum bataryalarının geleneksel yakıtın yanı sıra birincil enerji kaynağı olarak hizmet ettiği paralel hibrit elektrikli tahrik sistemi mimarisi kullanılmıştır. Araştırmada, 750 ila 1500 Wh/kg arasında değişen özgül enerjiye sahip gelecekteki batarya teknolojisi seviyelerinin kullanıldığı varsayılarak, fizik tabanlı bir analiz ve tasarım aracı kullanılmıştır. Aracın etkinliği, geleneksel turboprop uçaklarla kıyaslama yapılarak doğrulanmıştır. Hibrit elektrikli tahrik, kısa menzilli görevler için tasarlanan turboprop uçaklarda emisyonlarda önemli azalmalar sağlamaktadır. Örneğin, %34 elektrik şaft gücü gerektiren bir tasarım, görev yakıt tüketiminde %28 azalma sağlamaktadır. Bu yapılandırmanın, yerel emisyonlarda azalmaya ve kalkış ve iniş sırasında daha düşük gürültü seviyelerine katkıda bulunabileceği öne sürülmektedir (Voskuyl vd., 2017).

Hibrit elektrikli tahrik sistemleri, içten yanmalı ve elektrikli tahriki birleştirmesi sonucunda çevresel etkiyi azaltarak havacılık ve uzay mühendisliğinde umut vaat etse de, sınırlı enerji depolama kapasitesi gibi zorluklar devam etmektedir. Jacob Sliwinski ve diğerleri tarafından yürütülen çalışma, mevcut uzaktan kumandalı uçak sistemlerinde HETS (Hibrit Elektrikli Tahrik Sistem) için bir güçlendirme tasarım yöntemi geliştirmeyi amaçlamaktadır. Enerji dönüştürücü verimlilik tahminleri için güç durumu değişkenlerini

kullanmakta olan çalışmada, geleneksel, elektrikli ve hibrit konfigürasyonları araştırılarak menzil, dayanıklılık ve yakıt performansı analiz edilmektedir. Bulgular, HETS'in yeterli performansı korurken emisyon azalımı da sunabileceğini, ayrıca, küçük ve orta ölçekli uçaklarda HETS'den potansiyel olarak yararlanabileceğini göstermektedir (Sliwinski vd., 2017).

Hibrit elektrikli uçaklarda güç üretimi ve dağıtım sistemlerinin tasarlanmasına yönelik bir metodolojiyi Çınar ve diğerleri yaptıkları çalışmada sunmuşlardır. Çalışmada, seyir aşamasında hibridizasyona odaklanarak Dornier 328 uçağı kullanılmıştır. Ayrıca, NASA'nın 15 yıllık hedefleri ve gelişmiş batarya teknolojisi de çalışmada yer almaktadır. İncelenen konfigürasyonların hiçbirisi temel uçağın tasarım aralığını tam olarak karşılamasa da, bazıları önemli yakıt tasarrufuyla pratik menzillere ulaşmaktadır. Önemli bir bulgu, görev menzili açısından %50 seyir hibridizasyonunun karşılanabilmesi için 5 kWh/kg özgül enerjiye sahip bir bataryaya ihtiyaç duyulmasıdır. Dornier 328 bir test ortamı olarak hizmet etse de, bu metodoloji çeşitli paralel hibrit elektrikli tahrikli uçak tasarımlarına uygulanabilmektedir (Cinar vd, 2017).

MICADO uçak tasarım paketinde diğer bir tasarım metodolojisinin uygulanması bu alandaki araştırmalar arasında ilgi çekmektedir. Paralel hibrit elektrikli tahrik sistemine vurgu yapan bu metodoloji, elektrikli tahrik sistemlerinin hızlı ve uyarlanabilir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu teknolojiyle bir Airbus A320-200 uçağı, iki adet gaz türbinli motor, iki adet elektrikle çalışan kanallı fan ve bataryalarla donatılmaktadır. Ön araştırmalara göre, iletken malzemeye bağlı olarak yakıt tüketiminde azalma yalnızca 900 deniz milinin altındaki tasarım menzilleri için gerçekleşmektedir. Belirli batarya ağırlıklarına ilişkin tahminler, diğer bulgularla tutarlı olarak enerji veya maliyet tasarrufu sağlamamaktadır (Aigner vd., 2018).

Dean ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen araştırma, genel havacılık uçaklarındaki hibrit elektrikli tahrik sistemlerinin potansiyelini değerlendirmektedir. Tecnam P2006T performans verilerine dayalı bir uçuş performans modeli kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada, farklı senaryolar için paralel ve seri hibrit konfigürasyonlarını değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, mevcut teknolojinin paralel hibrit uçakların maksimum yaklaşık 175 deniz mili menzile sahip olabileceğini ve kısa vadede uygulanabilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Ancak, gelecekteki gelişmelerle birlikte batarya enerji yoğunluğu ve elektrik motoru gücünde artış sağlanması durumunda seri hibrit mimarilerin yakıt verimliliğini artırabileceği ortaya konulmaktadır. Bu çalışma,

genel havacılıkta hibrit elektrikli tahrikin potansiyelini vurgulayarak, daha gelişmiş performans ve sürdürülebilirlik için olası yolları belirlemektedir (Dean vd., 2018).

Centro Italiano Ricerche Aerospaziali (CIRA) ve Napoli Federico II Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nden bir ekip tarafından yapılan çalışma, genel havacılık uçakları için hibrit elektrikli tahrik sistemlerinin fizibilitesine ve çevresel faydalarına odaklanmaktadır. Araştırmacılar, AMESim® yazılımıyla oluşturdukları kapsamlı bir sayısal model kullanarak, içten yanmalı motorlar, elektrikli makineler, görev profilleri, batarya takımları, pervaneler ve güç gereksinimleri dâhil olmak üzere sistem bileşenlerini incelemişlerdir. Farklı batarya konfigürasyonları için araştırma yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, seyir profili için %6'yı aşan yakıt tasarrufu ve emisyonlarda azalma sağlamıştır. Hafif uçaklar için hibrit elektrikli tahrik sistemlerinin avantajları çalışmada vurgulanmıştır. Araştırma, sonuçları doğrulamak için deneysel testlerle devam etmektedir (Frosnia vd., 2018).

Vries ve diğerleri, yaptıkları çalışmada, kanat üstü dağıtımli hibrit elektrikli tahrikli yolcu uçağının ön boyutlandırmasını yapmışlardır. Boyutlandırma, bu hibrit elektrikli konfigürasyonu geleneksel bir bölgesel turboprop uçakla karşılaştırarak aynı yük ve menzil gereksinimlerinde optimum seyir irtifası için yapılmış; tasarım parametrelerinin ve görev gereksinimlerinin enerji verimliliği üzerindeki etkisini değerlendirilmiştir. Araştırma sonuçları, hibrit elektrikli uçağın referans uçağına kıyasla %2,5 daha ağır olduğunu ve %2,5 daha fazla enerji tükettiğini göstermektedir. Hibrit elektrikli konfigürasyonlar ile geleneksel konfigürasyonları karşılaştırırken, optimum seyir irtifasında boyutlandırmanın önemi vurgulanmaktadır. Ancak, dağıtık tahrik sistemi teorik faydalarının uçak seviyesinde tam olarak gerçekleşmediği belirtilmektedir (Vries ve diğerleri, 2019).

Avrupa Temiz Gökyüzü 2 girişiminin “Gelişmiş Motor ve Uçak Yapılandırması” projesi kapsamında Alman Havacılık ve Uzay Merkezi'nde Iwanizki ve diğerleri tarafından yürütülen çalışmalar ilgi çekmektedir. Projeleri, kısa menzilli ticari taşımacılık görevlerine yönelik hibrit elektrikli tahrik donanımlı uçak konfigürasyonlarına yönelik kavramsal tasarım çalışmalarına odaklanmaktadır. Bu düzenlemeler farklı gaz türbinlerini, elektrik motorlarını ve bataryalı hibrit güç aktarma organı tasarımlarını birleştirmektedir. Makalede, uçak konfigürasyonlarının nasıl seçildiğine ilişkin ayrıntılar, araştırılan konseptlere genel bir bakış ve hibrit elektrikli tahrik alanında en umut verici konfigürasyonların kapsamlı bir analizi sunulmaktadır (Iwanizki vd., 2019).

Holsteijn ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, elektrik destekli bir turbofan motorun çalışma özellikleri incelenmiş, A320 sınıfı bir uçakta kısa menzilli bir görevde hibrit elektrikli tahrik sisteminin yakıt tüketimini yaklaşık %7 azaltma potansiyeli vurgulanmıştır. Elektrikli motorlar, kalkış ve tırmanış aşamalarında itiş gücü sağlamak için kullanılırken, turbofanın da seyir verimliliği için optimize edilmesine olanak tanımaktadır. Çalışmada, kalkış ve tırmanış sınırlamalarının gevşetilmesinin turbofanın seyir verimliliğini artırabileceği ancak elektrik gücü miktarının sınırlı olduğu belirtilmektedir. Kısa menzilli görevler için hibrit elektrikli tahrik sistemi, yakıt tasarrufu sağlayabilmekte, sağlanan tasarrufların çoğu, taksi fazında tamamen elektrikli motorun kullanılması yoluyla elde edilmektedir. Ancak elektrikli bileşenlerin ağırlığı seyir uçuşu sırasındaki verimlilik kazanımlarını dengelemektedir. Analiz, yeni nesil uçaklarda paralel hibrit elektrik tahrik sisteminin uygulanmasının olası olmadığını vurgulamaktadır (Holsteijn ve diğerleri, 2020).

He ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, turbofan ve elektrikli fanları kullanan bir hibrit yolcu uçağının, farklı hibridizasyon derecelerindeki performansı değerlendirilmiştir. Yakıt tüketimi, maliyete özgü hava menzili, enerjiye özgü hava menzili, toplam ağırlık, kaldırma-sürüklenme oranı, itme verimliliği ve kalkış performansı gibi ana performans özellikleri üzerindeki etkileri inceleyerek hibridizasyonun avantajları ortaya konulmuştur. Ayrıca, İHA'lar için bir optimizasyon tasarım yöntemi sunan makale, hibrit elektrikli tahrik sistemlerinin çeşitli uçuş modları için güç taleplerini ve ağırlık, yakıt tüketimi modellerini ele almaktadır. Yazarlar, bu optimizasyon yönteminin seri hibrit elektrik sistemleri için tasarım gereksinimlerini hızla optimize etmeye olanak sağladığını göstermektedirler (He vd., 2020).

Sziroczak ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, havacılık sektöründeki çevresel taleplerin ışığında, 2035'e kadar elektrikli ve hibrit elektrikli uçakların piyasaya sürülmesinin aciliyeti ele alınmaktadır. Çalışma, enerji verimliliğini artırmanın zorluklarını vurgulayarak, küçük bir uçak tasarımına uygulanan bir metodoloji ile hibrit elektrikli uçakların kabul edilebilir performans potansiyelini ortaya koymaktadır. Ayrıca, çevresel hedeflere ulaşmada hibrit elektrikli tahrikin önemini vurgulayarak, mevcut batarya teknolojisinin sınırlamalarını aşma yolunda yeni gelişen teknolojilere odaklanan bir metodoloji sunmaktadır (Sziroczak vd., 2020).

Artan çevresel kaygıların ortasında havacılık endüstrisi, aerodinamik, malzeme, tahrik ve operasyonlardaki yenilikler yoluyla sürdürülebilirlik arayışındadır. Finger ve

diğerleri tarafından yapılan çalışmada, uçak segmentlerindeki elektrikli tahrik sistemlerinin çevresel potansiyeli incelenmiştir. Kavramsal hibrit elektrikli uçak tasarımlarından ve batarya çalışmalarından elde edilen verileri birleştirerek bunların etkilerini değerlendirmek için yeni bir yöntem sunulmuştur. Sonuçlar, batarya sistemlerinin uçak yaşam döngüleri boyunca çevresel etkilerini vurgulamakta ve geleneksel yakıtlara göre hibrit elektrikli tahriki destekleyen senaryoları ortaya koymaktadır. Duyarlılık analizi, hibrit elektrikli uçakların, elektrik kaynaklarının sürdürülebilirlik için önemli rolünün altını çizmektedir. Bu çalışma, elektrikli tahrikin uçak sürdürülebilirliğini arttırmadaki rolünün anlaşılmasına da katkıda bulunmaktadır (Finger vd., 2020).

Xie ve diğerleri tarafından yürütülen araştırmada, hibrit elektrikli uçaklar ve enerji yönetimi metodolojileri hakkında bazı değerli bilgiler sunulmuştur. Yapılan çalışma, HETS'nin küçük ölçekli uçaklar için geçerli bir çözüm olduğunu, emisyon azaltmayı, yakıt tüketimini azaltmayı ve menzil ve dayanıklılık performansını dengelediğini göstermektedir. Bununla birlikte, daha büyük uçaklara uyarlanabilirlik bazı araştırmacılar tarafından sorgulanmaktadır. Mevcut orta ölçekli uçakların hibrit teknoloji ile donatılmasına yönelik araştırmalar, potansiyel yakıt tasarrufu göstermektedir. Küçük ölçekli hibrit uçaklar geniş çapta incelenmiş ve uygulanmış olsa da, daha büyük hibrit uçakların geliştirilmesi elektrikli depolama teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olduğu belirtilmiştir (XİE vd., 2021).

Köhler ve Peter yaptıkları çalışmada, küçük uçaklardaki elektrikli ve hibrit elektrikli tahrik sistemleri için yeni bir tasarım yaklaşımını incelemekte ve temel tasarım parametrelerinin etkisini değerlendirmektedir. Çalışmada, tamamen elektrikli, paralel hibrit ve geleneksel içten yanmalı motorlar olmak üzere üç farklı tahrik sistemini incelenmiştir. Paralel hibrit tahrik sistemlerin yüksek güç oranlarıyla dikkat çektiği ve seyir verimliliğinde %12'ye varan artış veya kütlede %10'a kadar azalma sağladığı belirtilmektedir. Tamamen elektrikli sistemlerin operasyonel avantajları olduğu ancak batarya kütlesi sorunu nedeniyle uzun mesafeli uçuşlar için daha az uygun olduğu vurgulanmaktadır. Seri hibrit tahrik sistemlerinin ise karmaşık güç dönüşümü ve ek bileşenler nedeniyle daha az verimli olduğu ve daha ağır bir sistemle sonuçlandığı ifade edilmektedir (Köhler ve Jeschke, 2021).

Havacılık endüstrisinin emisyon azaltma çabaları çerçevesinde, Bravo ve diğerleri tarafından sunulan çalışma, tam elektrikli ve hibrit tahrik sistemlerini incelemektedir. İlk

çalışmada, tamamen elektrikli ve hibrit tahrik sistemleri karşılaştırılarak, tamamen elektrikli tahrik sisteminin batarya kütlesinin fazla olması sorununa sahip olduğu ve pistonlu motorların daha verimli ve maliyet etkili olduğu belirtilmektedir. İkinci çalışma ise dağıtılmış bir hibrit tahrik sisteminin aerodinamik verimliliğini değerlendirmektedir. Sonuçlar, sürüklemenin azaldığı ancak kaldırma kuvvetinin de düştüğüne işaret ederek dikkatli tasarım gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu araştırma, uçaklarda elektrik tahrik ve hibrit tahrik sistemlerinin potansiyelini değerlendirirken, performans artışı ve çevresel sürdürülebilirlik avantajlarına ve sınırlamalarına da odaklanmaktadır (Bravo vd., 2021).

Rendon ve diğerleri yaptığı çalışmada, ticari talepler ve çevre yasalarının etkisiyle gelecek 30 yıl içinde uçak tahrik sistemlerinde önemli değişiklikler beklendiği belirtilmektedir. Kentsel hava hareketliliği için tamamen elektrikli mimariler kısa mesafeli seyahatlerde umut vadederken, hibrit elektrikli bölgesel uçaklar, turbo-elektrik hibrit sistemlerin ve ileri tasarım stratejilerinin yardımıyla 2030 ve 2050 çevresel hedeflerine ulaşma potansiyeline sahip görülmektedir. Bu süreçte, hesaplamalı modeller ve simülasyon araçları, HETS'nin araştırma ve tasarımını ilerletmek için önemli bir rol oynamaktadır (Rendon vd., 2021).

Liu ve diğerleri tarafından yapılan çalışma, yenilenmiş tasarımları kapsamakta ve bölgesel HETS uçaklarının çeşitli uçuş irtifalarında performans değişimlerini incelemektedir. Çalışmada 19 yolcu kapasiteli bölgesel bir turbo-prop uçak olan Harbin Y12F modeli kullanılmaktadır. Çeşitli hibridizasyon seviyelerinde ve farklı batarya özgül enerji teknolojisi senaryolarında güç ihtiyaçlarını karşılamak için retrofit tasarımlarında yalnızca geleneksel tahrik sistemleri boyutlandırılmıştır. Öte yandan çalışma, modern tasarımlar, bataryanın boyutlandırılması ve hibridizasyon seviyelerinin yanı sıra uçak platformu faktörlerini de içermektedir. Her iki strateji de seyir uçuş hızlarını ve irtifalarını hesaba katan hassasiyet değerlendirmelerinden geçmekte ve sonuçta potansiyel hibrit elektrikli tahrik tasarımı seçeneklerini araştırmak için çeşitli senaryolarda maksimum kalkış ağırlığı ve yakıt tüketimi gibi önemli tasarım faktörlerini analiz etmektedir (Liu vd., 2021).

Mcqueen ve diğerleri, hafif spor uçaklara tamamen elektrikli ve seri hibrit elektrikli itiş gücünün uygulamasını analiz etmek için teoriye dayalı bir aerodinamik model sunmuşlardır. Çalışmada, MATLAB/Simulink kullanan araştırmacılar, çeşitli görevler, bataryalar, yakıt kütlesi ve enerji dağıtımları için simülasyonlar yapmışlardır. Çalışmada hibrit elektrikli uçakların, geleneksel uçakların menzilin %44'üne ulaşabileceğini, bu

sonucun yakıt kütlesi ile güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, mevcut batarya teknolojisi ile tamamen elektrikli uçakların menzilinın geleneksel uçakların sadece %5'i kadar olduğu da belirtilmiştir. Araştırma, hafif spor uçaklarda elektrikli tahrikin yaygın kullanımı için batarya güç-ağırlık oranının geliştirilmesinin gerekliliğini vurgulamakta ve enerji dağıtım yöntemlerinin menzil üzerindeki etkisini de ele almaktadır. Genel olarak çalışma, mevcut batarya teknolojisinin sınırlamaları nedeniyle tamamen elektrikli ve hibrit elektrikli tahrik sistemlerinin hafif spor uçaklarda yaygın olarak uygulanmasının henüz uygun olmadığı sonucuna varmaktadır. Ancak, geleceğin daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip batarya teknolojileri, havacılık endüstrisinde çevresel etkiyi azaltma potansiyeli sunmaktadır (Mcqueen vd., 2022).

Ricci ve diğerleri yaptıkları çalışmada, 55 lb'den büyük bir hibrit-elektrikli multirotorun güç sistemi karakterizasyonunu ve uçuş testini incelemişler ve hibrit elektrikli tahrikin, mükemmel genel araç performansına sahip yeni uçak konfigürasyonlarını mümkün kılmak için umut verici bir teknoloji olduğunu belirtmişlerdir (Ricci vd., 2022).

Zong ve diğerleri yaptıkları çalışmada, sabit kanatlı dikey kalkış ve iniş uçağında hibrit elektrikli tahrik sistemi kullanılması durumundaki boyutlandırma ve görev profilini analiz etmişlerdir. Çalışmada, tek enerjili bir tahrik sistemine sahip bir VTOL uçak prototipinin, hibrit elektrik tahrik sistemi ile donatılmış ve görev profili analizi edilerek optimum tasarım noktaları belirlenmiş ve faydalı yük-menzil hassasiyeti araştırılmıştır. Araştırma sonuçları, hibrit elektrikli tahrik sisteminin uçağın görev profilini önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermektedir. Ayrıca, farklı hibridizasyon derecelerinin kalkış irtifası ve seyir mesafesi üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Bulgular, daha yüksek bir hibridizasyon derecesinin içten yanmalı motorun iş verimliliğini artırdığını, daha düşük bir derecenin ise yüksek kalkış irtifasını kolaylaştırdığını göstermektedir (Zong vd., 2022).

Janovec ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, bir eğitim uçağının seri hibrit elektrik tahrik sistemi için batarya tasarım parametreleri araştırılmıştır. Batarya ve menzil hesaplamaları hakkında faydalı bilgiler sunmaktadır. Çalışma, emisyon azaltımı ve sosyo-politik baskıları ele alırken optimum performans ve verimliliğe ulaşmaya odaklanmaktadır. Makale özellikle, hibrit uçak tahrik tasarımında menzilin önemini vurgulamaktadır. Başarılı bir şekilde hibrit elektrikli uçak tasarlayabilmek için; menzil, ağırlık, maliyet ve emisyonlar arasında dengeyi sağlamanın çok önemli olduğu

belirtilmiştir. Bunda önemli bir faktör, hibrit sistemin tasarımını önemli ölçüde etkilemekte olan yakıt ağırlığına göre batarya ağırlığıdır (Janovec vd., 2022).

Affonso ve diğerleri tarafından yapılan çalışma, geleceğin tümünden elektrikli ve hibrit elektrikli hava araçlarının termal yönetimi için potansiyel teknolojilere odaklanmaktadır. Çeşitli termal yönetim teknolojileri, uçak entegrasyonu, güvenlik, operasyonel etkiler ve bakım etkileri gibi faktörler dikkate alınarak kapsamlı bir şekilde analiz edilmiş ve ağırlık, hacim, elektrik gücü tüketimi, pnömatik hava akışı ve soğutma etkisi başına soğutma havası akışı gibi temel parametreler üzerinden karşılaştırılmıştır. Bu analiz, uçak tasarımcıları ve mühendisleri için her teknolojinin performansı ve verimliliği hakkında değerli bilgiler sunarak karar verme sürecine yardımcı olmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, geleceğin daha sürdürülebilir ve verimli uçaklarının geliştirilmesine katkıda bulunmak için süregelen çabaları destekleyerek elektrikli ve hibrit elektrikli tahrik sistemlerinin ortaya çıkardığı zorlukları ele almaktadır (Affonso vd., 2022).

Deceiro ve Hall tarafından yapılan çalışmada, bölgesel nakliye uçaklarının tasarımına sayısal optimizasyon uygulayarak paralel hibrit elektrikli tahrikin verimlilik faydaları sayısallaştırılmıştır. Sonuçlar, en son teknolojinin, geleneksel turboprop motorlara kıyasla enerjide %1 ila %8 oranında tasarruf sağlayabileceğini ve %14'e varan iyileşme tahminlerini ortaya koymaktadır. Bu, menzilin azalmasına neden olsa da, yüksek itme koşullarında gaz türbinli motorlara elektrik gücü takviyesi yapılması genel verimliliği artırabilmektedir. Batarya ve güç elektroniğindeki gelişmeler, verimli hibrit elektrikli uçak tahriki için kritik olarak önemsenmektedir (Deceiro ve Hall, 2022).

Lee ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada geliştirilen metodoloji, şehir içi hava hareketliliği ve şehirlerarası görevlere odaklanan dikey kalkış ve iniş uçaklarının hibrit elektrikli tahrik sistemleriyle tasarımını ele almaktadır. Metodoloji, çeşitli kaldırma ve itme mekanizmalarını barındıran uçuş analizi, geçiş uçuşunu ve farklı hibrit-elektrikli tahrik sistemi mimarilerini dikkate alan HETS boyutlandırması, yeni bir kriter kullanarak batarya kapasitesini ve yakıt tüketimini tahmin eden görev analizi ve mekanik ve elektrikli aktarma organlarının ağırlıklarını hesaplayan ağırlık tahmini olmak üzere dört modülden oluşmaktadır. Bulgular arasında, hibrit elektrikli tahrik ile çalışan VTOL uçakları için optimum çalışma yükseklikleri ve genişletilmiş menzilin yanı sıra şehirlerarası görevlere uygunluk bulunmaktadır. Çalışmada, metodolojinin sınırlamaları

da vurgulanmıştır; özellikle itki dağıtımı ve mevzuata uygunluk gibi faktörlerin daha geniş bir uygulama için ele alınması gerekmektedir (Lee vd., 2022).

Palaia ve Abu Salem yaptıkları çalışmada, hibrit elektrik tahrikli bölgesel uçakların görev etkinliğini incelemişlerdir. Simülasyon yazılımı kullanarak, bu uçakların rutin ve olağandışı operasyonlardaki performansı değerlendirilmiştir. Çalışma, hibrit elektrikli uçakların geleneksel yakıt tahrikli uçaklardan farklı çalışma şekillerini vurgulayarak özellikle yakıt, batarya ve kargo ağırlıklarına bağlı olarak değişen yük-menzil diyagramına önem vermektedir. Hibrit bileşenler arasındaki güç kaynağı tekniklerini optimize etme amacıyla yapılan çalışmada, potansiyel yakıt tasarrufları ve uçuş menzil artışları incelenmiştir (Palaria ve Abu Salem, 2023).

Zaghari ve diğerleri tarafından yürütülen çalışma, çeşitli elektrikli motor tasarımlarının ve pervane tasarımının aerodinamik ve akustik performans dengesini inceleyerek, enerji tüketimini en aza indirmek için aerodinamik optimizasyonun temel bir faktör olduğunu belirlemektedir. Akustik optimizasyonlar tüm uçuş görevi boyunca kümülatif gürültü seviyelerini azaltmada etkili olup, geniş motor verimliliğinin akustik ve aerodinamik performans avantajlarına katkıda bulunduğu gösterilmektedir. Araştırma, gürültü azaltma ve artan aerodinamik verimlilik arasındaki bağlantıyı değerlendirerek, hibrit elektrikli tahrik sistemlerinin sürdürülebilir ve çevre dostu uçak teknolojisi için geliştirilmesine katkıda bulunan değerli bilgiler sunmaktadır (Zaghari vd., 2023).

Salem ve diğerleri, hibrit-elektrikli orta menzilli nakliye uçaklarının genel performansını inceleyerek hava taşımacılığının çevresel etkilerini azaltma potansiyeline odaklanmışlardır. Araştırma, elektrikli tahrik sisteminin taksir, kalkış, tırmanış ve yaklaşma aşamalarında yerel hava kirliliğini azaltmada etkili olduğunu göstermektedir, ancak bataryaların düşük enerji yoğunluğu nedeniyle orta menzilli uçaklarda yakıt tasarrufu sağlamadığını belirtmektedir. Sera gazı emisyonlarını azaltmak için yeni enerji kaynaklarına ve tahrik teknolojilerine ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır. Çalışmada, uzun vadeli operasyonlar için elektrikli tahrik ve sıvı hidrojen gibi sürdürülebilir havacılık yakıtlarının kullanılmasını önerilmektedir (K. Salem vd., 2023).

3. HAVA TAŞIMACILIĞINDAKİ DEĞİŞİMLER VE COVID-19 ETKİSİ

Hava taşımacılığı, insanların ve yüklerin bir yerden başka bir yere ulaşımını kolaylaştırarak küresel ekonominin temellerinden biri olarak hizmet vermektedir. Hava taşımacılığının öne çıkarak diğer ulaşım taşıtlarına göre tercih edilmesinin arkasındaki temel sebep, hava araçlarının benzersiz hızı ve verimliliğidir. Ticari uçaklar, uzun mesafeleri birkaç saat içinde katedebilmektedir ki bu, kara veya deniz gibi diğer ulaşım türlerinin rakip olamayacağı bir başarıdır. Bu hız, daha önce hayal bile edilemeyecek bir zaman diliminde kıtalararası toplantılara, müzakerelere ve ticari sebeplerden iş seyahatinde olanlar vb. için özellikle önem taşımaktadır. Turizm sektörü de bu hızlı ulaşım şeklinin faydalarından yararlanmaktadır; bireyler artık birkaç saat içinde dünya çapındaki destinasyonları keşfetmekte, bu da uluslararası kültürel alışverişi ve ekonomik büyümeyi teşvik etmektedir. Ayrıca hava taşımacılığı, uzak ve izole bölgeler için bir cankurtaran yöntem olup, başka türlü erişilemeyen temel malzemeler ve tıbbi hizmetlerin tedarikini mümkün kılmaktadır.

3.1. Günümüzde Hava Taşımacılığına Artan Talep

Dünyanın farklı yerlerinden temin edilen ürünlere olan talebin artması, hızlı ulaşımı zorunlu kılmaktadır. Örneğin küresel e-ticaret endüstrisi, tüketicilere hızlı teslimat sağlamak için büyük ölçüde havayolu üzerinden kargo taşımacılığına güvenmektedir. İlaç ve çabuk bozulan mal endüstrileri de hassas ürünlerinin zamanında taşınması için hava taşımacılığına bağımlı hale gelmiştir. Sonuç olarak, hava taşımacılığı küresel ticaret ağının ayrılmaz bir parçası haline gelmekte ve ekonomik kalkınmaya ve refaha önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

Hava taşımacılığı, iş ve ticaretteki önemli rolünün yanı sıra afet yardım çalışmalarında da hayati bir rol oynamaktadır. Doğal afetler veya krizlerin ardından, yardım malzemelerinin, sağlık personelinin ve yardım çalışanlarının etkilenen bölgelere; oradaki hasta ve yaralıların hızlı bir şekilde nakledilmesi bir ölüm kalım meselesidir. Hava yolculuğu bu tür senaryolarda kurtarıcı görevi görerek benzersiz hız ve verimlilik sunarak afetlerin etkisini hafifletmekte ve hayat kurtarmaktadır.

Hava taşımacılığına olan talep, çeşitli temel faktörlerin etkisiyle istikrarlı bir şekilde artmaktadır. Başlıca katalizörlerden biri global orta sınıfın genişlemesidir. Daha fazla insanın daha yüksek gelir seviyelerine ulaşması ve daha iyi yaşam standartları elde etmesiyle, hava yolculuğuna olan istek ve kapasite önemli ölçüde artmaktadır.

Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği, 2037 yılına kadar hava yoluyla seyahat eden yolcu sayısının ikiye katlanarak 8,2 milyara çıkacağını tahmin etmektedir (<http-1>).

Ayrıca iş ve ticaretin globalleşmesi, hava kargo hizmetlerine olan ihtiyacı yoğunlaştırmaktadır. Dünya Ticaret Örgütü, zamana duyarlı talepleri karşılamak için yüklerin artan payının hava yoluyla taşınmasıyla birlikte uluslararası ticaretin yıllar içinde önemli ölçüde genişlediğini bildirmektedir. E-ticaretin hızlı bir şekilde artması, çevrimiçi perakendecilerin müşterilere hızlı teslimat seçenekleri sunmak için hava taşımacılığına güvenmesiyle bu eğilimi daha da güçlendirmektedir (Button, 2008).

Teknolojik gelişmeler aynı zamanda hava yolculuğunu daha erişilebilir ve uygun fiyatlı hale getirmektedir. Yakıt tasarruflu uçaklar, gelişmiş hava trafik yönetim sistemleri, kolaylaştırılmış havaalanı operasyonları ve çevrimiçi uzak rezervasyon platformları da dâhil olmak üzere havacılıktaki teknolojik gelişmeler hava yolculuğunu daha verimli ve uygun maliyetli hale getirmektedir.

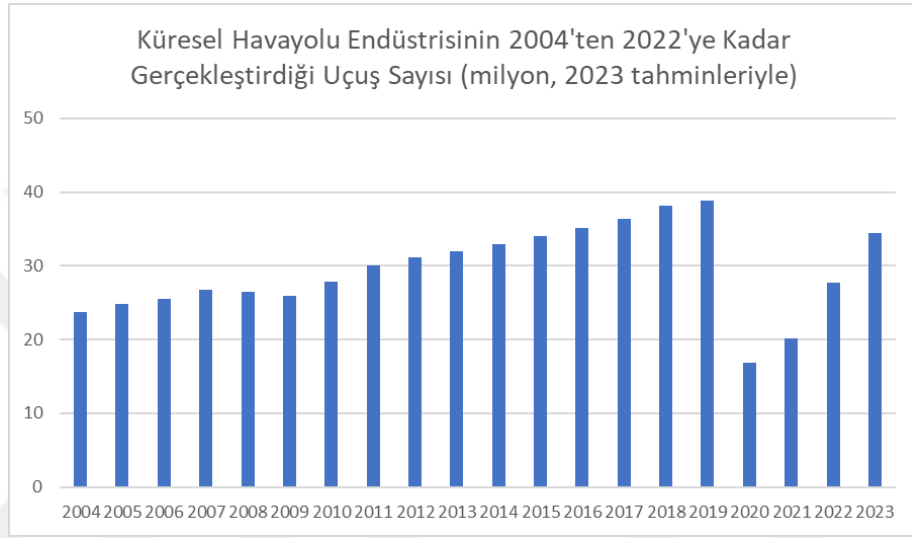
Hava yolu yolcularının sayısı son birkaç on yıldır sürekli artmaktadır. Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği'ne göre, global havayolu endüstrisi her yıl istikrarlı bir şekilde artan sayıda yolcu taşımaktadır ve 2019'da yaklaşık 4,5 milyar yolcu taşımıştır (<http2>). Tüm dünyadaki havayolları şirketleri, artan talebi karşılamak için filolarını genişletmektedir. Dünyanın en büyük uçak üreticilerinden ikisi olan Boeing ve Airbus'tan alınan veriler, global ticari uçak filosunun önümüzdeki yirmi yılda ikiye katlanmasının beklendiğini göstermektedir. Havayolları, artan bu talebi karşılamak için 2019 yılında binlerce yeni uçak siparişi vermiştir (<http-3>; <http-4>).

Hava taşımacılığı, kara ve deniz taşımacılık pazarından daha büyük bir paya sahiptir. Hava araçları, uzun mesafeli yolculuklarda tercih edilen yöntem haline gelmekte ve genellikle tren veya otobüs gibi daha yavaş alternatiflerin yerini almaktadır. Kuzey Amerika ve Avrupa gibi bazı bölgelerde hava yolculuğu pazarın önemli bir bölümünü elinde tutmakta ve tüm seyahatlerin yarısından fazlası hava yoluyla yapılmaktadır (Caputo vd., 2023).

Hava taşımacılığının önemli bir ekonomik etkisi de vardır. Hava Taşımacılığı Eylem Grubu (ATAG), havacılık sektörünün doğrudan 87 milyondan fazla işi desteklemekte olduğunu ve küresel GSYİH'ya (Gayri Safi Yurtiçi Hasıla) 3,5 trilyon dolar katkıda bulunduğunu belirterek, havacılık sektörünün ekonomik büyümedeki kritik rolünü vurgulamaktadır (<http-5>).

Düşük maliyetli taşıyıcıların artması, hava yolculuğunu nüfusun daha geniş bir kesimi için daha erişilebilir hale getirmiştir. Düşük maliyetli tarifeler çeşitli bölgelerde çoğalmış, bu sayede gezginler için bütçe dostu seçenekler sunulmuş ve hava taşımacılığına olan talep, daha da artmıştır.

2004-2023 yılları aralığında dünya çapında havayolu endüstrisinin gerçekleştirdiği uçuş sayısı Görsel 3.1’de gösterilmiştir.



Görsel 3.1. Küresel Havayolu Endüstrisinin Gerçekleştirdiği Uçuş Sayısı, 2004-2023 (Statista, 2023)

Zhukov tarafından yürütülen araştırma, hava taşımacılığı talebinin bölgelerin sosyo-ekonomik özelliklerine ve ulaşım sisteminin kalitesine bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bulgular, 2018 yılında Rusya’da taşımacılık cirosu %2,8 artarak 5640 milyar ton-kilometreye ulaştığını; ayrıca hava taşımacılığında yolcu cirosunun 286,9 milyar yolcu-kilometreye ulaştığını göstermektedir. (Zhukov, 2020).

Havacılık ve ekonomi alanında uzman kişilerin yaptığı araştırma, 2014 yılında hava taşımacılığı sektörünün küresel ölçekte hayati bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Araştırmadan elde edilen bulgular, sektörün yıllık olarak 3 milyardan fazla yolcu ve yaklaşık 50 milyon ton yük taşındığını göstermektedir. Bu önemli faaliyet, küresel ekonomiye 606 milyar dolarlık etkileyici bir katkı sağlayarak dünyanın gayri safi yurtiçi hasılasına önemli bir katkı sağlamıştır. Araştırmada, ATAG’ın 2014 yılında bildirdiği üzere, hava taşımacılığı sektörünün üretkenlik düzeyinin diğer sektörlerden önemli bir farkla 3,5 kat daha yüksek performans gösterdiği vurgulanmıştır. Bu bulgular, sektörün

olağanüstü verimliliğinin ve önemli ekonomik etkisinin altını çizmektedir (Oktal ve García, 2017).

3.2. Covid-19 Pandemisi ve Talepteki Azalma

Havacılık endüstrisi, COVID-19 salgınının ardından benzeri görülmemiş ve ciddi bir düşüş yaşamıştır. Pandeminin hava taşımacılığı üzerindeki etkisi derin ve çok yönlü olmuş; pandemi, hava yolculuğunda keskin bir azalmaya, havayolları için önemli mali kayıplara yol açmıştır (Allain-Dupree vd., 2020). Ülkeler bu dönemde, virüsün yayılmasını engellemek için seyahat kısıtlamaları, tecritler ve karantina önlemleri uyguladıkça yolcu sayıları hızla düşmüştür. Uluslararası ve yurt içi seyahatler neredeyse durma noktasına gelirken, dünyanın dört bir yanındaki havalimanları hayalet kasabaları andırmıştır. Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği'ne göre 2020 yılında küresel yolcu talebi bir önceki yıla göre yaklaşık %65,9 azalmıştır (http-6).

Talepteki ciddi düşüşle başa çıkabilmek için birçok havayolu şirketi, filolarının önemli bir bölümünü yerde tutmak zorunda kalmıştır. Bu durumdan en ciddi şekilde etkilenenlerden biri de uzun mesafeli uluslararası rotaları içeren uçuşlardır. Havayolları, normal kapasitelerinin çok altında çalışmış ve bu da önemli mali kayıplara yol açmıştır. Hava taşımacılığındaki düşüş, havayolları üzerinde yıkıcı bir mali etki yaratmıştır. Birçok havayolu şirketi ciddi krizlerle karşı karşıya kalmış ve hayatta kalabilmek için işten çıkarmalara, ücretsiz izinlere ve maliyet düşürücü başka önlemlere başvurmuştur. Bazıları ise iflas başvurusunda bulunmuş ve çeşitli ülkelerdeki hükümetler, sektörün çöküşünü önlemek için mali kurtarma paketleri sağlamak zorunda kalmıştır.

Araştırmalar, pandemi ile birlikte havacılık sektörünün ve ilgili tüm sektörlerin ciddi bir şekilde etkilendiğini göstermektedir. Yolcu talebindeki önemli düşüş ve çeşitli ülkeler tarafından uygulanan uçuş yasakları, çoğu havayolu şirketini operasyonlarını askıya almaya ve tüm filolarını yere indirmeye zorlamıştır. Buna karşılık birçok havaalanı ya park halindeki uçaklara yer açmak için pistlerini kapatmış ya da faaliyetlerini süresiz olarak durdurmuştur. Ek olarak, havacılık sektöründeki şirketler, sıkı rotasyon programları çerçevesinde minimum personel ile çalışırken, uçak üreticileri ve ilgili endüstriler üretim faaliyetlerini önemli ölçüde azaltmıştır. (Suau-Sanchez vd., 2020; Sun vd., 2020a; Adrienne vd., 2020; Iacus vd., 2020; Truxal, 2020).

Havacılık endüstrisindeki uzmanlardan oluşan bir ekip tarafından yürütülen diğer bir araştırma, yakın geçmişte büyük küresel havayollarının hizmetlerine yönelik yolcu talebinde dikkate değer bir düşüş olduğunu ortaya çıkarmıştır. Talepteki bu düşüş dikkat

çekicidir; azalmalar %70ten %95'e kadar çıkmıştır. Hava yolculuğu talebindeki bu hızlı düşüşün altında yatan neden, küresel sağlık krizinin yarattığı olağanüstü zorluklara bağlanabilir. Bu zorlukların derin bir etkisi olmuş ve bu, önde gelen havayolu şirketlerinin sunduğu hava hizmetlerinden yararlanmayı tercih eden yolcu sayısında önemli bir düşüşe yol açmıştır (Whitely, 2020).

3.3. Havacılığın Pandemi Sonrası Normalleşme Süreci

Yaygın aşılama çabaları sonunda, hava yolculuğuna olan güven önemli ölçüde artmaya başlamıştır. Pek çok ülke aşılama programları uygulamaya koymuş ve havayolları ile havalimanları maske zorunluluğu, gelişmiş temizlik protokolleri ve iyileştirilmiş havalandırma sistemleri dâhil olmak üzere sıkı sağlık ve güvenlik önlemlerini almıştır (http-7). Bu çabalar yolculara hava yolculuğunun güvenliği konusunda güvence vermiştir.

Pandemi dönemi sırasında önlemler alınmaya başladıkça, durum iyileştikçe birçok ülke seyahat kısıtlamalarını ve sınırların kapatılmasını gevşetmeye başlamıştır. Bu, sektörün toparlanmasının önemli bir bileşeni olan uluslararası seyahatin kademeli olarak yeniden başlamasını mümkün kılmıştır. İkili anlaşmalar ve standart sağlık protokollerinin benimsenmesi ile birlikte sınır ötesi hareketlilik kolaylaşmaya başlamıştır.

Pandemi, seyahat planlarının ertelenmesine ve eğlence ve iş seyahatlerine yönelik talebin azalmasına neden olmuştur. Kısıtlamalar kaldırılınca rezervasyonlarda gözle görülür bir artış yaşanmıştır.

Ayrıca pandemi, hava yolculuğunda dijital teknolojilerin benimsenmesini de hızlandırmıştır. Temassız check-in, mobil biniş kartları ve temassız ödeme seçenekleri standart hale gelmiş, fiziksel temas noktaları azaltılmış ve bekleme kuyrukları en aza indirilerek genel yolcu deneyimi iyileştirilmiştir (Jacson vd., 2021).

Hava yolculuğu ile yapılan gerek özel, gerekse iş seyahatlerine talep artmaya başlamıştır. İyileşme devam ederken, bazı zorluklarla da karşı karşıya kalınmıştır. Virüsün çeşitleri, gelişen seyahat kısıtlamaları ve değişen yolcu tercihleri havacılık sektörü tarafından takip edilmiştir. Uzun mesafeli uluslararası seyahatin tamamen toparlanması, yurt içi ve kısa mesafeli rotalara kıyasla daha fazla zaman almıştır (Jacson vd., 2021).

Hava taşımacılığı sektörü, COVID-19 sonrası döneminde yenilenen seyahat talebini karşılamak için uyum sağlamakta ve yeniden inşa edilmektedir. Pandemi

alınan dersler, gelecekteki zorluklar ve belirsizlikler karşısında gelişmeye hazır, daha dirençli, çevik ve teknoloji odaklı bir endüstriyi şekillendirmektedir (Jacson vd., 2021).

3.4. IATA'nın Hava Taşımacılığına İlişkin Tahminleri

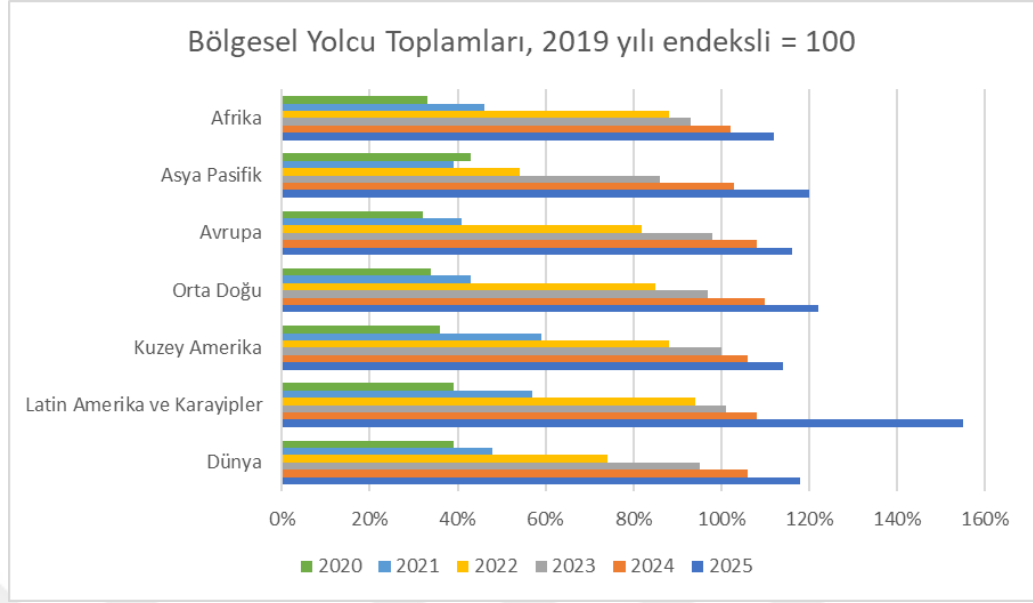
Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği'nin tahminine göre, hava taşımacılığı sektöründeki toparlanmanın kademeli ancak olumlu bir eğilimle gerçekleşmesi beklenilmektedir. Hava yolculuğuna olan talebin, 2040 yılına kadar iki katına çıkması ve yıllık ortalama %3,4 oranında artması öngörülmektedir. 2019'da yaklaşık 4 milyar olan yolcu miktarının, belirtilen dönemin sonunda 8 milyarın biraz üzerine çıkacağı tahmin edilmektedir (http-8).

Çeşitli faktörlerden dolayı mevcut risk dengesi aşağı yönlüdür. Havayolu maliyetleri üzerindeki baskılar, jeopolitik belirsizlik ve halkın gelirini etkileyen makroekonomik olumsuzluklar da dâhil olmak üzere kısa vadeli zorluklar beklenmektedir. Uzun vadeli kaygılar ise, iklim değişikliği belirsizliği ve net sıfır karbon ayak izine geçişin buna bağlı maliyetleri etrafında dönmektedir.

Bölgesel piyasalardaki değişiklikler, kısa vadeli toparlanma görünümünde iyileşmelere yol açmaktadır. Başlangıçta, Kuzey Amerika'nın 2023 yılına kadar tamamen 2019 yılında düşüşten önceki seviyelerine ulaşması beklenilmekte iken, şimdi Latin Amerika ve Karayipler'in de aynı yıl içinde bu dönüm noktasına ulaşması öngörülmektedir. (http-8).

Asya Pasifik bölgesinde, özellikle 2022'deki Omicron dalgasının ardından uzatılan seyahat kısıtlamalarının etkisiyle daha yavaş toparlanmakta iken bu kısıtlamaların kaldırılmasıyla, özellikle de Çin'in yılın başlarında yeniden ulaşımına açılmasıyla birlikte, hava yolcu trafiğindeki toparlanma hızla ilerlemektedir.

Tahmin döneminin tamamı boyunca kalkış-varış yolcularının 3,9 milyar artması beklenmektedir. Kuzey Amerika ve Avrupa gibi köklü havacılık bölgelerinin, diğer bölgelere kıyasla daha yavaş da olsa büyümeye devam edeceği tahmin edilmektedir. Dünya genelinde ise yolcu miktarında 2025 yılı sonunda, 2019 yılına göre yaklaşık %120 oranında artış görülmektedir. 2019 yılını indeks alarak, 2020-2025 yılları için bölgelere göre yolcu miktarlarında beklenen artış oranları Görsel 3.2'de verilmiştir.



Görsel 3.2. *Bölgesel Yolcu Toplamları, 2020-2025 (IATA, 2023)*

4. HAVALİMANI İSTATİSTİKLERİ

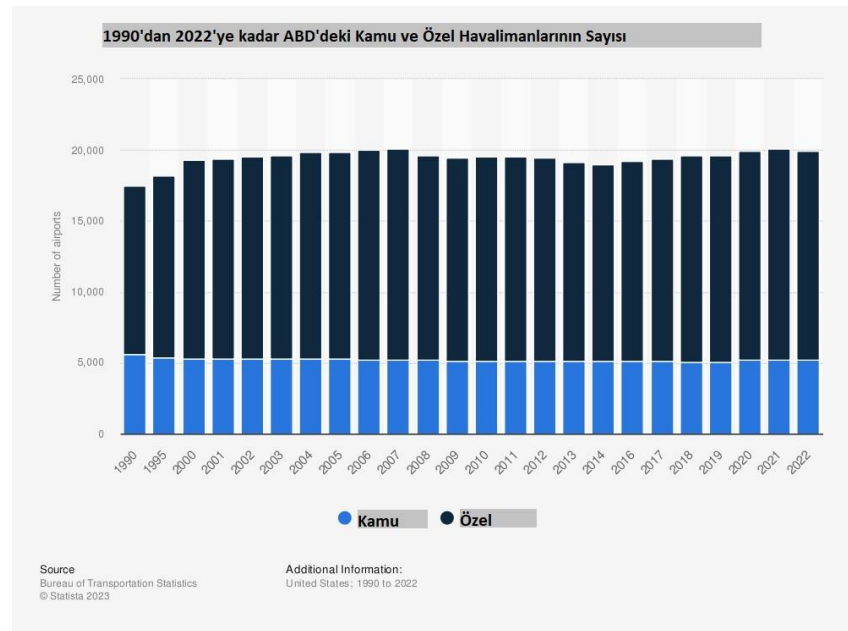
Küresel seyahat alanında havacılık, ilerlemenin ve birbirine bağlılığın sembolü haline gelmiştir. Bu bölümde, Türkiye ve ABD’deki sivil havalimanlarına odaklanarak hava yolculuğuna yönelik artan talebi incelemektedir. Bu ülkelerde bulunan havalimanları istatistikleri incelenerek, bu merkezlerin sorunsuz ulaşımı sağlamada oynadığı rol vurgulanacaktır.

4.1. Türkiye’deki Havalimanları

Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü tarafından, Türkiye genelinde faaliyet gösteren toplam 59 sivil havalimanının içinde, uluslararası uçuşların yapıldığı 37 havalimanı olduğu belirtilmektedir. Aynı zamanda bu havalimanlarından 18 tanesi askeri amaçlarla da kullanılmaktadır. Yalnızca askeri amaçla kullanılan 18 havalimanı vardır.

4.2. ABD’deki Havalimanları

1990 yılından itibaren, Amerika Birleşik Devletleri’nde bulunan halka açık havalimanlarının sayısı azalırken, özel olarak işletilen havalimanlarında bir artış yaşanmaktadır. ABD’de 1990 yılında 5.589 adet kamu havaalanı varken, 2022 yılında 5.193 adet kamu havaalanı faaliyet göstermiştir. Yani 2022 yılındaki kamu havaalanı sayısı 1990 yılına oranla azalmıştır. Buna karşılık, özel havalimanlarının sayısı bu zaman diliminde artarak 11.901’den 14.776’ya çıkmıştır (http-9). ABD’de 1990-2022 yılları arasında değişen havalimanı istatistikleri Görsel 4.2’de gösterilmektedir.



Görsel 4.1. 1990'dan 2022'ye kadar ABD'deki Kamu ve Özel Havalimanlarının Sayısı (Statista, 2022)

Kamu ve özel kullanımlı havalimanları arasındaki fark mülkiyete değil erişilebilirliğe dayanmaktadır. FAA (Federal Aviation Administration), kamu kullanımına açık bir havalimanını, havalimanı sahibinin veya işletmecisinin önceden onayına gerek kalmaksızın halkın kullanımına açık olan bir havalimanı olarak tanımlamaktadır. Ancak, özel kullanımlı havalimanları için önceden onay alınması gerekmektedir. Bu sınıflandırma, helikopter pistlerini, deniz uçağı üslerini ve havacılıkla ilgili diğer çeşitli faaliyetlere yönelik tesisleri de kapsamaktadır.

Geçtiğimiz on yılda, ABD'nin önde gelen havayollarında hem yurt içi hem de yurt dışı uçuşlarda seyahat eden yolcu sayısında tutarlı bir artış olduğu gibi, uçulan yolcu millerinde de genel bir artış görülmektedir. Bu nedenle, kamuya açık havalimanlarının sayısındaki azalma kafa karıştırıcı görünebilmektedir. Bu değişim, en azından kısmen, bölgesel uçuşlardaki, özellikle de COVID-19 salgınının etkisiyle daha da kötüleşen önemli azalmayla açıklanmaktadır (<http-9>).

5. HAVACILIĞIN ÇEVRESEL ETKİLERİ

Çevresel kaygılar ve sürdürülebilirlik sorunları, hava taşımacılığına yönelik giderek artan talebin önünde bir engel teşkil etmektedir. Havacılık endüstrisi, çevresel ayak izini azaltmak amacı ile yakıt açısından daha verimli ve çevre dostu teknolojiler geliştirmek için aktif olarak çalışmaktadır. Sektör, hava yolculuğunun faydalarını çevresel etkileriyle dengelemeye çalışmaktadır. Bu durum, devam eden araştırma ve geliştirme çalışmalarının kritik bir alanını temsil etmektedir.

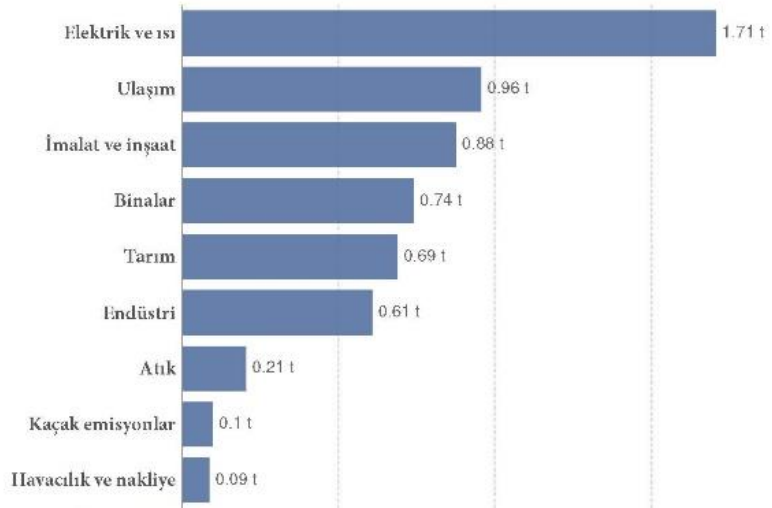
5.1. Hava Kirliliği ve Havacılık

Havacılık endüstrisi, olumsuz çevresel etkilerin üstesinden gelebilmek için, sera gazı emisyonlarını azaltmak amacıyla biyoyakıt ve hidrojen gibi alternatif havacılık yakıt türlerinin araştırılmasına ve geliştirilmesine yönelik çalışmalara yatırım yapmaktadır.

Türkiye’de 2020 yılında kişi başına düşen sera gazı emisyonları sektörler bazında Görsel 5.1’de gösterilmektedir. Görsel 5.1’de belirtilen verilere göre, kişi başına sera gazı emisyonlarının 0.09 ton karbondioksit eşdeğerinin havacılık ve nakliye kaynaklı olduğu görülmektedir (http-10).

Sektörlere göre kişi başı sera gazı emisyonları, Türkiye, 2020

Kişi başına düşen sera gazı emisyonları¹ kişi başına yıllık ton karbondioksit eşdeğeri² cinsinden ölçülür.

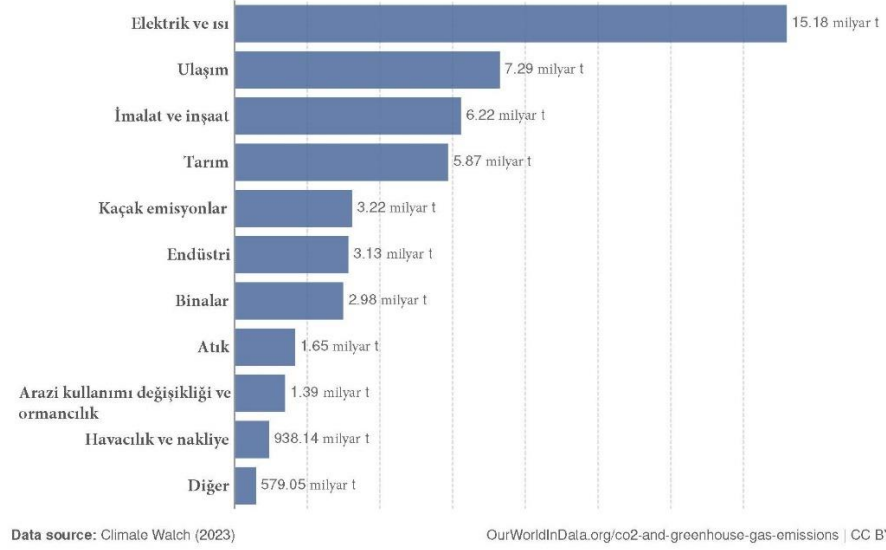


Görsel 5.1. Sektörlere Göre Kişi Başı Sera Gazı Emisyonları, Türkiye, 2020 (Our World in Data, 2023)

Görsel 5.2’de ise 2020 yılında sektörlere göre gerçekleşen kişi başına düşen sera gazı emisyonlarına ilişkin küresel bir perspektifi özetlemektedir. Bu karşılaştırmalı görselleştirme, daha geniş bir bakış açısı sağlayarak, Türkiye’nin çevresel ayak izinin dünya çapındaki manzaraya göre incelenmesine olanak sağlamaktadır.

Sektörlere göre kişi başı sera gazı emisyonları, Dünya, 2020

Kişi başına düşen sera gazı emisyonları¹ kişi başına yıllık ton karbondioksit eşdeğeri² cinsinden ölçülür.



Görsel 5.2. Sektörlere Göre Kişi Başı Sera Gazı Emisyonları, Dünya, 2020 (Our World in Data, 2023)

2022’de havacılık sektörü, enerjiyle ilişkili küresel CO2 emisyonlarının %2’sine neden olarak, son yıllardaki büyümesi ile demiryolu, karayolu ve denizyolu taşımacılığını geride bırakmıştır. Uluslararası seyahat talebi, Covid-19 salgınının ardından yeniden artarken, 2022’deki havacılık emisyonları neredeyse 800 milyon metrik ton CO2’ye ulaşmıştır. Bu değer, pandemi öncesi seviyelerin yaklaşık %80’ine tekabül etmektedir. Emisyonlardaki artışı kontrol etmek ve nihayetinde 2050’ye kadar net sıfır emisyon senaryosu ile uyumlu olarak bu on yıl içinde emisyonları azaltmak için, düşük emisyonlu yakıtlar, uçak tasarımı ve motorlarındaki gelişmeler, operasyonel optimizasyon ve stratejiler dahil olmak üzere çeşitli teknik önlemler alınmaktadır (http-11).

5.2. Havacılığın Farklı Sektörlerdeki Rolü

Hava araçları, yaşama, çalışma ve dünyayı keşfetme şeklimizi yeniden şekillendiren modern harikalardır. Verimli ulaşım, gözetim ve diğer birçok hizmeti sağlama konusundaki çok yönlülükleri ve kapasiteleri, onları birçok alanda vazgeçilmez kılmaktadır. Kullanım amacı öncelikli olarak yolcu ve yük taşımacılığı olarak akla gelse de, ticari havacılığın hareketli terminallerinden yüksek riskli askeri savunma alanına, genel havacılığın çevik özel uçaklarından arama ve kurtarma ekiplerinin hayat kurtarma görevlerine kadar, uçaklar insan yaratıcılığının vücut bulmuş halidir. Aşağıda, hava

araçlarının günlük hayatın nasıl ayrılmaz bir parçası haline geldiklerini ve ilerleme ve yeniliğe yön veren çeşitli endüstrileri hakkında açıklamalar yapılmıştır.

5.2.1. Ticari Havacılık

Yolcu havayolları, günlük milyonlarca insanın uzun mesafeli seyahatlerinde temel taşıyıcı olarak hizmet vermektedir. Geniş kabinleri, uçak içi eğlence sistemleri ve konforlu koltuklar gibi olanaklarla büyük uçaklar, konforlu bir seyahat deneyimi sunmaktadır. Öte yandan, ticari havayolları geniş bir filo ile dünya çapında yüzlerce yolcu taşıyan uçakları işletirken, kargo havayolları küresel ticaretin özünü oluşturmaktadır. Kargo uçakları, özel konteynerler ve yükleme sistemleriyle çeşitli kargoları taşıyarak, dünyanın dört bir yanındaki varış noktalarına mal ve ürünleri ulaştırmaktadır. Özellikle Boeing 747-8F gibi yüksek taşıma kapasitesine sahip kargo uçakları, 140 metrik tonun üzerinde yük taşıma kapasitesine sahiptir (http-12). FedEx ve UPS gibi büyük şirketler, bu alandaki önemli oyuncular olarak bilinmektedir.

5.2.2. Askeri Havacılık

Savaş uçakları bir ülkenin hava sahasının koruyucularıdır. Hızlı tepki vermek, düşman uçaklarıyla çatışmak ve yer hedeflerine hassas saldırılar gerçekleştirmek üzere tasarlanmışlardır. Gelişmiş aviyonikler ve silahlar, onları modern savaşlarda zorlu varlıklar haline getirmektedir. F-16 Falcon (Görsel 5.3) gibi yüksek performanslı savaş jetleri 1.500 mil/saatın üzerindeki hızlara ulaşmaktadırlar ve gelişmiş silahlarla donatılmaktadırlar (http-13).



Görsel 5.3. F16 Falcon (United States Air Force, 2018)

İnsansız Hava Araçları veya drone'lar askeri alanda keşif ve gözetleme görevleri için kullanılmaktadır. Kritik istihbarat toplayabilmekte ve hedeflenen saldırıları hassas bir şekilde gerçekleştirerek insan operatörlere yönelik riski azaltabilmektedirler. Avcılar ve Reaper'lar gözetleme ve hassas saldırılar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Örnek olarak, Baykar tarafından üretilen Bayraktar TB2 modeli Görsel 5.4'te gösterilmiştir.



Görsel 5.4. Bayraktar TB2 (Bayhaluk, Wikimeda, 2023)

5.2.3. Arama Kurtarma

Arama kurtarma uçakları, tehlike altındaki kişilerin yerini tespit etmek ve onlara yardım etmek için en son teknolojiyle donatılmaktadır. Zorlu arazi koşullarında bile geniş alanları hızlı bir şekilde tarayabilmekte ve gerektiğinde havadan müdahale gerçekleştirebilmektedirler. Bu amaçla projektörler, kameralar ve kurtarma vinçleriyle donatılmışlardır. Kullanılan uçaklar arasında Sikorsky S-92 (Görsel 5.5) gibi helikopterler yer almaktadır (http-14).



Görsel 5.5. Sikorsky S-92 Arama-kurtarma Operasyonu Zamanı (Flight Global, 2023)

5.2.4. Tarım

Tarım uçakları, tıpkı mahsul tozlayıcılar gibi, pestisitleri ve gübreleri hassas bir şekilde dağıtarak mahsullerin sağlığını ve verimliliğini sağlamaktadır. Kısa sürede geniş

alanları kaplama yetenekleri, verimli tarım uygulamalarına katkıda bulunmaktadır. Görsel 5.6’da Air Tractor AT-802F tarım uçağı gösterilmektedir (<http-15>).



Görsel 5.6. Air Tractor AT-802F (Airtractor, 2023)

5.2.5. Uzay Araştırmaları

Uzay araştırmalarında yer alan uçaklar, fırlatma platformları ve gözlem araçları olarak hizmet vermektedir. Roketler ve uzay uçakları gibi uzay araçlarını uzay boşluğuna girmeden önce test etmek için kullanılmaktadırlar. Görsel 5.7’de de gösterildiği gibi, gelişmiş bir Boeing 747 olan SOFIA, kızılötesi spektrumdaki gök cisimlerini incelemek için 2,5 metrelik bir teleskop taşımaktadır (<http-16>).



Görsel 5.7. Boeing 747 SOFIA Uçan Gözlemevi (NASA, 2022)

5.2.6. Yangın Söndürme

Yangınla mücadele uçakları, orman yangınlarıyla mücadelede hayati bir rol oynamaktadır. Su veya yangın geciktirici kimyasalları hedef bölgelere hassas bir şekilde

bırakarak yangınların kontrol altına alınmasına ve söndürülmesine yardımcı olmaktadır. CL-415 gibi (Görsel 5.8) su bombardıman uçakları 6.000 litreden fazla su veya yangın geciktirici taşıyabilmektedir ve bunu tam olarak yangın çıkan bölgelerin üzerine bırakabilmektedir (<http-17>).



Görsel 5.8. Bombardier CL-415 Yangının üzerine su boşaltıyor (Gérard JOYON)

Hava araçları bunlardan başka, acil sağlık hizmetleri, hava durumu araştırması, çevresel izleme, kanun operasyonları, fotoğrafçılık ve film yapımı, bilimsel araştırmalar vb. gibi bir çok alanlarda da kullanılmaktadırlar.

6. HİBRİT TAHRİK SİSTEMLERİ.

Havacılık endüstrisinde hibrit elektrikli tahrik sistemlerinin benimsenmesi, daha sürdürülebilir ulaşımına doğru önemli bir adımdır. Bu yenilikçi tahrik sistemleri gelişmiş yakıt verimliliği, azaltılmış emisyonlar ve gelişmiş performans yetenekleri sunduğundan, faydaları çok yönlü ve etkileyicidir.

6.1. Hibrit Tahrik Sistemlerinin Tanımı

Hibrit tahrik sistemleri, geleneksel yakıtle çalışan motorları elektrik motorlarıyla ustaca bir araya getirerek çevresel etkiyi önemli ölçüde azaltırken her seviyede operasyonel yeterliliği en üst düzeye çıkarmakta ve enerji açısından verimli bir sinerji yaratmaktadır. Bu tür ilerlemeler, derin teknolojik gelişmeler ve havacılık teknolojisindeki en son araştırmalar yoluyla hava yolculuğu için daha yeşil bir gelecek yaratmaya yönelik umut verici çalışmalardır. Havacılık alanında da tamamen elektrikli tahrik sistemi kullanımına geçiş aşamasında hibrit tahrik sistemleri kullanımı için çalışmalar yoğunlaşmıştır. Görsel 6.1’de bu alanda öncü araştırmacılarından olan Airbus şirketinin 2010-2021 yıllarında ulaştığı başarıları ve uçakları sıralanmıştır (http-18).

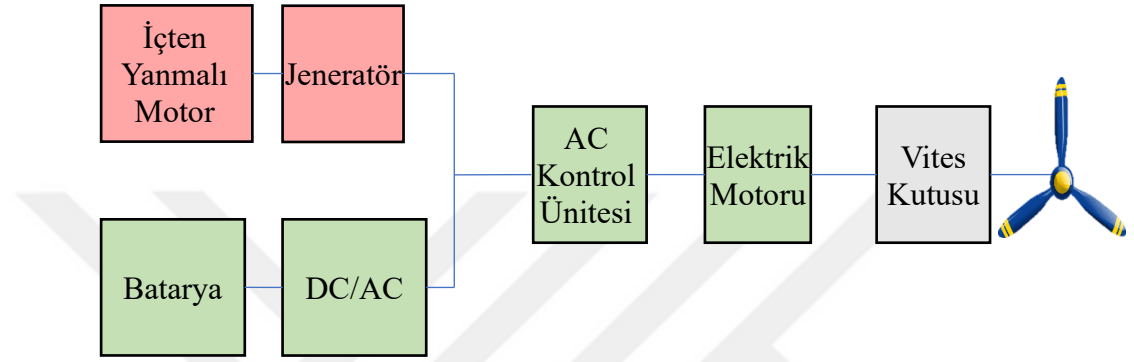


Görsel 6.1. Elektrikli Tahrik Alanındaki Başarıların Zaman Çizelgesi (Airbus, 2020)

6.2. Seri Hibrit Tahrik Sistemleri

Uçaklarda hibrit elektrikli tahrik sistemi olarak kullanılan en yaygın güç sistemlerinden biri seri hibrit konfigürasyondur. Seri hibrit konfigürasyonda, pervane doğrudan gaz türbini tarafından tahrik edilmemektedir. Bunun yerine, şaft mili yalnızca elektrik motoruyla çalışmaktadır (Rendón vd., 2021). Bu sistem turboelektrik mimarisine benzerdir, ancak enerji depolama ve itme katkısı için bir batarya içermektedir. Şekil

6.1’de gösterildiği gibi, bir jeneratör, gaz türbininden gelen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Bu elektrik enerjisi, elektrik motorlarını doğrudan çalıştırmak için kullanılabilmekte veya şarj işlemi yoluyla bir bataryada depolanabilmektedir. Gaz türbini motorunun tek amacı elektrik üretmek olduğundan, bu konfigürasyon en çok dağıtılmış tahrikli uçaklar için uygun görülmektedir (Gogolák vd., 2019).



Şekil 6.1. Seri Hibrit Tahrik Konfigürasyonu

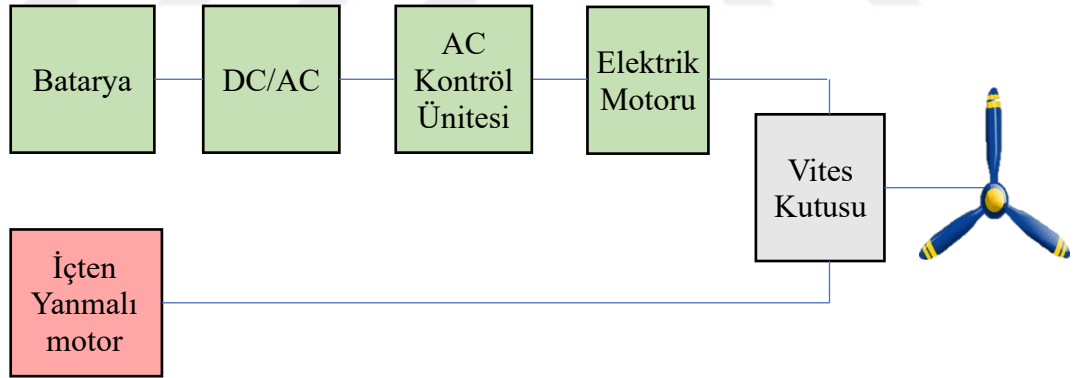
Seri hibrit tahrik sisteminde, pervane ile gaz türbini arasında doğrudan bir bağlantı olmaması nedeniyle, gaz türbini tüm uçuş boyunca en uygun koşullarda çalışabilmektedir ve bu da paralel hibrit konfigürasyona kıyasla yakıt tüketiminde önemli ölçüde azalma sağlamaktadır. Ek olarak, bu konfigürasyon içten yanmalı motorun yerleştirilmesinde basitlik ve daha fazla esneklik sunar ve daha az yer gerektirmektedir (Capata ve Coccia, 2010). Bununla birlikte, bu konfigürasyonda hem bir jeneratörün hem de bir bataryanın dâhil edilmesi, turboelektrik ve paralel hibrit konfigürasyonlara kıyasla sistemin ağırlığını artırmaktadır. Ayrıca, hibrit sistemlerin hibridizasyon faktörü analiz edildiğinde ve motorlara güç sağlamadan önce jeneratör çıkışını dönüştürmek için güç dönüştürücüler kullanıldığında seri sistemlerde paralel sistemlere kıyasla güç kayıpları yaşandığı görülmüştür (Economou vd., 2019). Bu durum, seri konfigürasyonun verimliliğini önemli ölçüde azaltmaktadır. Son olarak, bir motor arızası olması durumunda, bu konfigürasyon yedeklilikten yoksundur.

2011’de Siemens, Diamond Aircraft, Austro Engine ve Airbus, Paris Air Show’da ilk insanlı seri hibrit elektrik tahrikli uçağı sergilemiştir. Bu iki koltuklu DA36 E-Star uçağında Siemens 70 kW’lık bir elektrik motoru ve Austro Engine 30 kW’lık bir içten yanmalı motoru kullanılmıştır. Uçak emisyonlarda ve yakıt tüketiminde %25 azalma

sağlamıştır (http-19; Alvarez vd., 2022). Üreticiler, DA36 E-Star'ın 100 yolcuyu barındıracak şekilde ölçeklenebilirliğinin, seri hibrit tahrik sisteminin ticari hava taşımacılığının geleceği olarak konumlandığını iddia etmiştir. Ancak, üreticiler tarafından bu ölçeklenebilirlik iddiasını desteklemek için hiçbir teknik temel sağlanamamıştır.

6.3. Paralel Hibrit Tahrik Sistemleri

Başka bir hibrit elektrikli uçak konfigürasyonu, Boeing'in SUGAR Volt ve SUGAR Freeze konseptleri tarafından tasarlanmış paralel hibrit mimarisidir (NASA, 12 Aralık 2023). Bu konfigürasyon, uçağa güç sağlamak için hem içten yanmalı hem de elektrik motorunu kullanmaktadır. İçten yanmalı motor ve elektrik motoru, pervaneyi paralel olarak hareket ettiren bir dişli kutusuna bağlanmıştır. Seri hibrit konfigürasyonla karşılaştırıldığında, paralel hibrit mimari, her iki sistemin bağımsız olarak çalışmasıyla elde edilen daha yüksek güvenilirlik ve yedeklilik sunmaktadır. Ek olarak, paralel hibrit konfigürasyon, daha büyük motorlarla aynı güç seviyelerine ulaşmak için daha küçük motorların kullanılmasına izin vermektedir, bu da yakıt tüketimini ve emisyonları azaltmaktadır (Capata ve Corcia, 2010).



Şekil 6.2. Paralel Hibrit Tahrik Konfigürasyonu

Şekil 6.2'de gösterildiği gibi paralel hibrit mimari, mekanik olarak birbirine bağlı iki paralel tahrik milinden oluşmaktadır. Bir şaft bir yanma kaynağı tarafından çalıştırılmaktayken, diğeri bir elektrik kaynağı tarafından çalıştırılmaktadır (Rendon vd., 2021). Hem bataryayla çalışan elektrik motoru hem de içten yanmalı motor milleri, bir fanı veya pervaneyi çalıştıran ortak bir mile bağlanmıştır. Bu düzenleme, içten yanmalı motorun, elektrik motorunun veya her ikisinin de tahrike katkıda bulunmasına izin vermektedir. Ayrıca, içten yanmalı motor pervaneyi çalıştırdığında ve elektrik motoru bir

jeneratör görevi gördüğünden bataryalar şarj edilebilmektedir. Seri ve seri-paralel mimarilerin aksine, içten yanmalı motorun şaftına bağlı bir elektrik jeneratörü yoktur, bu da daha küçük boyutlu bileşenlere ve daha düşük ağırlık sağlamaktadır.

Ancak, bu konfigürasyonun birkaç dezavantajı vardır. İlk olarak, tahrik milleri arasındaki mekanik bağlantı ekstra kütle dezavantajı getirmektedir (Gogolak vd., 2019). İkinci olarak, sistem, daha gelişmiş bir tahrik kontrol sistemi gerektirmektedir. Ek olarak, içten yanmalı motorun optimum çalışması, itme üretimine dahil olduğu için, seri konfigürasyona kıyasla farklı uçuş aşamalarında tehlikeye girebilmektedir (Barelli vd., 2018).

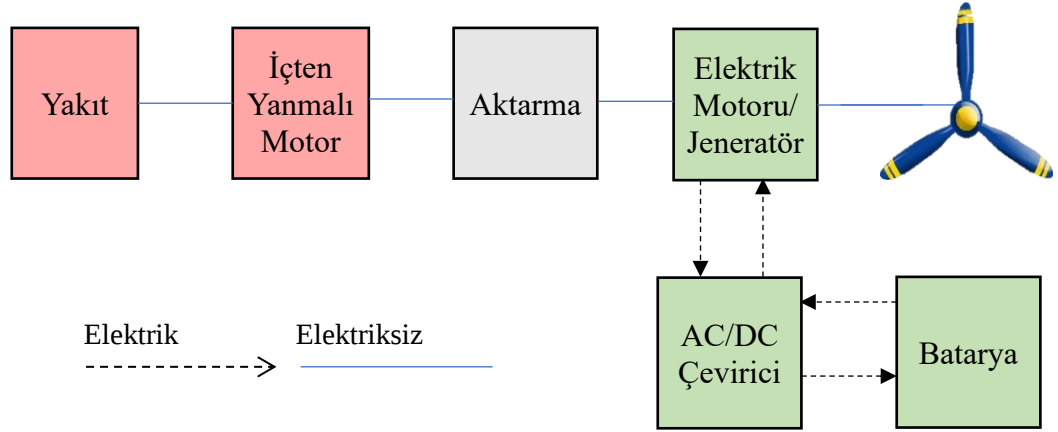
6.3.1. Motor/Jeneratör Konumuna Göre Paralel Hibrit Tahrik Sistemlerinin Sınıflandırılması

Paralel hibrit mimari, motorun/jeneratörün aktarma organlarındaki konumuna göre de sınıflara ayrılmaktadır. Uçak uygulamalarında, çift şaft ve tek şaft mimarileri, en yaygın olarak benimsenen iki konfigürasyon olarak öne çıkmaktadır.

Çift şaft konfigürasyonu, bir şaft içten yanmalı motor ve diğeri elektrik motoru tarafından tahrik edilen iki ayrı tahrik şaftından oluşmaktadır. Gaz türbini, motorunun şaftı tipik olarak ana pervaneler veya fanlar gibi birincil tahrik sistemini geleneksel bir vites kutusu aracılığıyla çalıştırmaktadır. Bu arada, elektrik motorunun şaftı yardımcı sistemlere veya ek elektrikli iticilere güç sağlamaktadır (Xie vd., 2021).

Bu tür şaft düzenlemesi, güç dağıtımının yönetilmesinde daha fazla esneklik sunmaktadır. Uçak kontrol sistemleri, uçuşun farklı aşamalarında verimliliği ve performansı optimize etmek için gaz türbini motorundan ve elektrik motorundan gelen güç çıkışını bağımsız olarak ayarlayabilmektedir. Ek olarak, elektrik motoru ayrı olarak çalışarak taksir veya düşük güçle seyir gibi belirli uçuş segmentleri için yalnızca elektrikle tahrik sağlayarak yakıt tüketimini ve emisyonları önemli ölçüde azaltabilmektedir. Çift şaftlı paralel hibrit konfigürasyon tasarımı Şekil 6.2’de verilmiştir.

Öte yandan, tek şaft konfigürasyonu, içten yanmalı motorun ve elektrik motorunun gücünü tek bir tahrik şaftında birleştirir. Bu kurulum, hem gaz türbini motorunun hem de elektrik motorunun uçağın pervanelerini veya fanlarını aynı anda çalıştırmasını sağlamaktadır (Xie vd., 2021). Uçuş sırasında, gaz türbini motoru ve elektrik motoru, tahrik için birleşik itme kuvveti sağlamak üzere birlikte çalışmaktadır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3. Tek Şaft Konfigurasyonlu Paralel Hibrit Tahrik Sistemi

Uçak alçaldığında veya yavaşladığında, elektrik motoru bir jeneratör görevi görerek kinetik enerjiyi elektrik enerjisine çevirerek uçaktaki bataryayı şarj etmekte veya uçaktaki diğer elektrik sistemlerine güç sağlamaktadır. Tek şaft düzenlemesi, güç kaynaklarının mekanik entegrasyonunu basitleştirmekte ve daha basit bir hibrit uçak tasarımı sunmaktadır.

6.4. Seri-Paralel Hibrit Tahrik Sistemleri

Diğer bir hibrit elektrikli uçak konfigürasyonu türü, hem seri hem de paralel konfigürasyonların özelliklerini birleştiren, Şekil 6.4’de gösterilmiş seri-paralel hibrit tahrik sistemidir. Bu hibrit mimari, bir elektrik jeneratörü ile birleştirilmiş bir içten yanmalı motor ve batarya ile çalışan bir elektrik motoru olmak üzere iki güç kaynağına sahiptir. Elektrik motoru ve jeneratör seri olarak bağlanmıştır ve uçağa itme gücü sağlamaktadır (Xie vd., 2021). Seri-paralel hibrit sistem, farklı uçuş aşamalarında güç kaynağı seçiminde daha fazla esneklik ve rejeneratif frenleme sırasında enerjiyi geri kazanma yeteneği gibi her iki konfigürasyonun avantajlarını sunmaktadır (Jain ve Kumar, 2018). Sistemin seri kısmı, verimli düşük hızlı operasyonlara izin verirken, paralel kısım, kalkış ve tırmanış gibi yüksek güç talepleri sırasında kullanışlıdır. Seri-paralel hibrit sistem, performansı optimize etmek için sofistike bir kontrol sistemi gerektirmektedir ve paralel veya seri mimarilerden daha karmaşıktır (Hong vd., 2018).

6.5.2. Tam Hibridizasyon

Tam hibrit sistem, içten yanmalı motor ile elektrik motoru arasında daha dengeli bir güç dağılımı sağlamaktadır (Boschert, 2006). Her iki güç kaynağı da aracı bağımsız olarak veya birlikte hareket ettirebilir. Sistem, düşük hızlı işlemlerde elektrik gücü sağlamak için veya yüksek talep durumlarında içten yanmalı motora yardımcı olmak için rejeneratif frenleme ve bataryalardaki depolanmış enerjiyi kullanmaktadır. Hem içten yanmalı motorun hem de elektrik motorunun itme gücüne büyük ölçüde katkıda bulunduğu tam hibrit bir sistemdeki hibritleşme derecesi orta düzeydedir.

6.5.3. Plug-in Hibridizasyon

Bir plug-in hibrit sistem, en yüksek derecede hibritleşme sağlamaktadır (Maddumage vd., 2021). Harici bir güç kaynağından, tipik olarak elektrik şebekesinden şarj edilebilen daha büyük bir batarya kapasitesi içermektedir. Elektrik motoru, aracın itilmesinde önemli bir rol oynamaktadır ve içten yanmalı motor, yedek olarak veya uzatılmış menzil için kullanılmaktadır. Plug-in hibrit sistemler, yalnızca elektrik motoruna güvenerek daha kısa mesafeler için tamamen elektrik modunda çalışma yeteneği sunmaktadır (Boschert, 2006). İçten yanmalı motor, öncelikle daha uzun yolculuklar için veya batarya şarjı bittiğinde kullanılmaktadır. Bir plug-in hibrit sistemdeki hibritleşme derecesi en yüksek seviyededir ve elektrik motoru tahrik gücünün önemli bir kısmına katkıda bulunmaktadır.

Hibritleşme derecesi, hibrit elektrikli tahrik sisteminin genel verimliliğini, yakıt ekonomisini ve çevresel etkisini doğrudan etkilemektedir. Tam veya plug-in hibrit sistemlerde olduğu gibi daha yüksek hibritleşme dereceleri, hafif hibrit sistemlere kıyasla enerji geri kazanımı, rejeneratif frenleme ve daha düşük emisyonlar için daha fazla fırsat sunmaktadır. Bununla birlikte, daha yüksek hibridizasyon derecesi genellikle artan sistem karmaşıklığı, maliyeti ve ağırlığı ile birlikte gelmektedir. Hibritleşme derecesinin seçimi, özel uygulamaya, performans gerekliliklerine ve yakıt verimliliği ile sistem karmaşıklığı arasında istenen dengeye bağlıdır.

6.5.4. Hibridizasyon Faktörü

Hibridizasyon faktörü (ψ), hem yakıtta hem de bataryalarda depolanan toplam enerjiye kıyasla bataryalarda depolanan enerjinin oranı olarak ifade edilmektedir (Denklem 6.1) (Voskuyl vd., 2018).

$$\psi = \frac{E_{bat}}{E_{toplaml}} \quad (6.1)$$

Burada, ψ , hibridizasyon faktörü, E_{bat} , bataryanın sağladığı enerji, $E_{toplaml}$, toplam enerji miktarıdır.

Yüksek bir hibridizasyon faktörü, elektrik gücünden daha fazla yararlanıldığını gösterirken, daha düşük hibridizasyon faktörü, daha geleneksel ve yakıtla bağımlı bir güç aktarma organını göstermektedir.

Hibridizasyon faktörü ve hibridizasyon derecesi farklı tanımlardır ve karıştırılmamalıdır. Özetle, hem hibridizasyon faktörü hem de hibridizasyon derecesi bir hibrit uçağın hibrit doğasıyla ilişkili olsa da farklı amaçlara hizmet etmektedirler. Hibritleşme faktörü, batarya ve yakıt arasındaki enerji depolama oranını ifade eden, hava aracının enerji kaynağı dağılımını tanımlayan niceliksel bir ölçüdür. Öte yandan, hibridizasyon derecesi, elektrik ve içten yanmalı güç entegrasyonunun kapsamına dayalı olarak ve aracın niteliksel bir sınıflandırmasını sağlayarak, araçtaki hibrit sistemin genel yeteneklerinin ve işlevselliğinin anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.

7. ENERJİ YÖNETİMİ VE HİBRİT UÇAK MODELLERİ

Hibrit elektrikli hava taşıtlarında enerji yönetiminin amacı, olumsuz çevresel etkiyi azaltırken verimliliği ve performansı en üst düzeye çıkarmaktır (He vd., 2020).

Hibrit elektrikli uçaklarda karşılaşılan başlıca zorluklardan biri, farklı güç kaynakları arasındaki enerji akışını optimize etmektir. Etkili enerji yönetimi, uçuş aşamasına, irtifaya, hıza ve görev gereksinimlerine bağlı olarak gücün gaz türbin motoru ile elektrik motoru arasında akıllıca dağıtılmasını içermektedir. Kalkış ve tırmanış sırasında, daha yüksek güç gerektiğinden, gaz türbin motoru birincil itiş sağlamaktadır. Uçak seyir irtifasına ulaştıkça, elektrik motorunun devreye girdiği ve gaz türbininin en verimli güç aralığında çalışmasına izin verdiği daha elektrik ağırlıklı bir moda geçmektedir.

Rejeneratif frenleme veya alçalma sırasında enerji geri kazanımı, hibrit elektrikli hava taşıtlarında enerji yönetiminin diğer bir temel bileşenidir. Uçak alçaldığında veya yavaşladığında elektrik motoru, kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek bir jeneratör görevi görmektedir (Morishita vd., 2023). Bu yenilenen enerji, daha sonra kullanılmak üzere bataryada depolanmaktadır veya yardımcı sistemlere güç vermek için kullanılmaktadır, bu da gaz türbini motoruna olan bağımlılığı daha da azaltmaktadır.

Güç kaynakları arasında kesintisiz geçiş sağlamak ve enerji verimliliğini optimize etmek için hibrit elektrikli hava taşıtlarında gelişmiş bir güç dağıtım ve yönetim sistemi gerekmektedir (He vd., 2020). Gelişmiş kontrol algoritmaları ve uçuş yönetim sistemleri, çeşitli uçuş parametrelerinin izlenmesinde ve en verimli operasyona ulaşmak için güç ayarlarının otonom olarak ayarlanmasında çok önemli bir rol oynamaktadır. Bu sistemler ayrıca uçuş boyunca sürekli ve istikrarlı bir güç kaynağı sağlayarak güvenliği artırmaktadır.

Hibrit elektrikli araçlar bağlamında, enerji yönetiminin önemli yönlerinden biri güç paylaşımıdır (S). Güç paylaşımı, aracın aktarma organları içerisinde elektrik motoru ile içten yanmalı motor arasındaki güç dağılımını temsil etmektedir. Ayrıca, daha iyi yakıt verimliliği ve performans için çok önemli bir rol oynamaktadır. Denklem 7.1’de verilen, S olarak gösterilen güç paylaşımı oranı, elektrik motoru tarafından sağlanan şaft gücünün, içten yanmalı motor ve elektrik motoru tarafından sağlanan toplam şaft gücüne oranını belirtmektedir. Bu oran, farklı uçuş koşulları için güç kaynaklarının optimum tahsisini belirlemek için kullanılmaktadır (Voskujil vd., 2018).

$$S = \frac{P_{\text{elektrik}}}{P_{\text{toplam}}} \quad (7.1)$$

Burada, S , güç paylaşımı oranı; P_{elektrik} , elektrik sisteminin ürettiği şaft gücü; P_{toplam} , elektrik motorun ve içten yanmalı motorun ürettiği toplam şaft gücüdür.

7.1. Hibrit Tahrik Sistemli Uçak Modellerinin Analizi

Bu bölümde, hem çeşitli hibrit uçak konseptlerine genel bir bakış sağlamaya, hem de performans analizleri incelenmeye çalışılmaktadır. Farklı tahrik teknolojilerinin yenilikçi entegrasyonu ile öne çıkan hibrit tahrik sistemli modeller, geleneksel havacılığa meydan okumakta ve hava taşımacılığının geleceğini yeniden tanımlama potansiyeli sunmaktadır.

Maribor Üniversitesi ve Pipistrel şirketi arasındaki ortak çalışmayla 2016 yılında geliştirilen bir hibrit uçak olan Hypstair (Görsel 7.1), havacılık teknolojisinde öncü bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Hypstair, özünde, 200 kW'lık elektrik motoru, 100 kW'lık güçlü bir batarya ve menzil genişletici işlevini gören içten yanmalı motor içeren, bir hibrit elektrik aktarma organına sahiptir. Bu konfigürasyon, Hypstair'e, geleneksel pistonlu motorlarla karşılaştırıldığında güç-ağırlık oranında altı kat artış sağlayarak verimlilik ve performansta önemli bir artım sağlamaktadır. Kısa menzilli uçak olarak sınıflandırılmasına rağmen Hypstair, 1000 km'ye kadar etkileyici bir operasyonel menzil sergilemektedir. Bu başarı, havacılık dünyasında umut verici bir paradigma değişimini simgeleyen, çok yönlü ve çevre dostu bir ulaşım çözümü olma potansiyelini vurgulamaktadır (http-20).



Görsel 7.1. HYPSTAIR (Skymag, 2016)

Diamond Aircraft ve Boeing arasındaki bir işbirliği sonucu ortaya çıkan Diamond DA36 E-Star (Görsel 7.2), sürdürülebilir havacılık inovasyonunun ön saflarında yer almaktadır. Seri mimaride son teknoloji HETS'i kullanarak, geleneksel ve elektrik güç kaynaklarını harmanlamaktadır. Tahrik, enerjisini 30 kW'lık Austro Engines Wankel motor ve jeneratörden alan tek bir Siemens 70 kW'lık elektrik motorundan oluşmaktadır. Bu tasarım yalnızca performansı artırmakla kalmamakta, aynı zamanda çevreye duyarlı bir yaklaşım sergileyerek yakıt tüketimini ve emisyonları %25'e kadar azalmaktadır. Maksimum kalkış ağırlığı (MTOW) 770 kg olan DA36 E-Star, verimliliği pratiklikle birleştirmektedir. Etkileyici bir şekilde, 1.094 km'lik bir menzile ulaşmaktadır ve bu, karbon ayak izini önemli ölçüde azaltırken bölgesel hava yolculuğunda devrim yaratma potansiyelini göstermektedir (Siddavatam vd., 2023; Arabul vd., 2021).



Görsel 7.2. *Diamond DA36 E-Star (Diamond Aircraft, 2021)*

IFB-Stuttgart'ın dikkat çekici bir modeli olan E-Genius (Görsel 7.3), hibrit havacılık dünyasında önemli bir kilometre taşını temsil etmektedir. Şık bir tasarıma ve sürdürülebilirliğe odaklanan bu uçak, 400 km'lik önemli bir menzille hünerini sergilemektedir. Maksimum 950 kg kalkış ağırlığında çalışan E-Genius, sınırlarını 100 kW'a kadar zorlayabilen, 60 kW'lık bir Sineton elektrik motoruyla çalışmaktadır. Bu güç ünitesi, uçağın 6.000 m'ye kadar yüksekliğe uçmasını sağlayarak potansiyel uygulamalarda çok yönlülük sunmaktadır (http-21).



Görsel 7.3. *E-Genius (University of Stuttgart, 2022)*

Pipistrel'in bir başka dikkat çekici eseri olan Panthera Hibrit (Görsel 7.4), Avrupa'nın Hibrit Elektrikli Tahrik Mimarisine Modüler Yaklaşım (MAHEPA) projesinin ayrılmaz bir parçası olarak sıkı bir uçuş testi kampanyasında ön plana çıkmıştır. İlk uçuş testi aşamasında Panthera'nın performansı, güç aktarma organları ve uçuş yeteneklerine özellikle vurgu yapılarak titizlikle değerlendirilmiştir (Prapotnik Brdnik vd., 2019). Maksimum 1.315 kg kalkış ağırlığına sahip hibrit elektrikli Panthera göstericisi, 177 knot'luk etkileyici bir azami seyir hızıyla uçmuştur ve 350 deniz mili menzil sergilemiştir. Panthera Hybrid, 200 kW'lık nominal güce sahiptir ([http-22](http://22)).



Görsel 7.4. *Panthera Hybrid (Pipistrel, 2019)*

Hybrid Air Vehicles tarafından geliştirilmekte olan Airlander 10 (Görsel 7.5), dikkat çekici bir modeldir. Havada beş güne kadar maksimum dayanıklılık, 10 tonluk

dikkate değer yük kapasitesi ve 4.000 deniz mili kapsamlı operasyonel menzili ile çok yönlü ve çevreye duyarlı bir ulaşım çözümü olarak durmaktadır. 20.000 feet'e kadar irtifalara ulaşan Airlander 10, kargo taşımacılığı ve gözetleme de dâhil olmak üzere çeşitli uygulamalar için sürdürülebilir bir alternatif sunmaktadır. Özellikle, geleneksel uçaklara kıyasla CO2 emisyonlarında %75-90 oranında etkileyici bir azalmaya sahip olması, çevre dostu havacılık arayışında öncü rolünün altı çizilmektedir. Airlander 10, gelişmiş dayanıklılık, verimlilik ve önemli ölçüde azaltılmış çevresel ayak izi sunmaktadır (http-23).



Görsel 7.5. Airlander 10 (Philbobagshot, 2023)

Hybrid Air Vehicles liderliğindeki diğer bir proje olan Airlander 50 (Görsel 7.6), inovasyon ve sürdürülebilirliğin simgesi olarak ortaya çıkan ağır yük taşımacılığı ortamını yeniden tanımlamayı vaat etmektedir. Airlander 10'un başarısını temel alan Airlander 50, minimum altyapı gereksinimleriyle kargo ve yolcu taşımacılığında devrim yaratma potansiyeli sergilemektedir. 50 tonluk ağırlığı ve 200 yolcuya kadar taşıma kapasitesiyle hem yük hem de insan hareketliliği ihtiyaçları için kapsamlı bir çözüm sunmaktadır. Özellikle, 2033 yılına kadar tamamen elektrikli bir Airlander 50'nin ortaya çıkma ihtimali, geleneksel uçaklara kıyasla CO2 emisyonlarını km başına yük miktarını 1,15 kg kadar bir oranda azaltma potansiyeliyle büyük umut vaat etmektedir (http-23).



Görsel 7.6. Airlander 50 (Hybrid Air Vehicles, 2023)

Boeing HorizonX ve JetBlue Technology Ventures tarafından desteklenen bir girişim olan Zunum Aero (Görsel 7.7), 500 kW'lık bir içten yanmalı motor tahrikli elektrik jeneratörüyle donatılmış uçak, saatte 483 km'lik etkileyici bir seyir hızına sahiptir ve verimli, hızlı ulaşım vaat etmektedir. 1.110 km'lik menzili ve yalnızca 670 metrelik kalkış mesafesi olduğu açıklanan Zunum Aero, bölgesel hava yolculuğunu yeniden şekillendirecek gibi görünmekte iken proje, öncelikle şirketin mali sıkıntıları nedeniyle beklenmedik engellerle karşılaşmıştır. Uçağın yenilikçi potansiyeli göz ardı edilmezken, sürekli gelişen havacılık endüstrisinde yeni çıkan teknolojilerin karşılaştığı zorlukları net bir şekilde göstermektedir (Knapp ve Said, 2018) ([http-24](http://24)).



Görsel 7.7. Zunum Aero (Zunum.aero, 2020)

NASA tarafından geliştirilmiş olan N3-X, hibrit havacılık alanında cesur bir atılımı temsil etmektedir. 300 yolcu kapasiteli ve 7.500 deniz mili menzile sahip bir sivil nakliye uçağı olarak tasarlanmış, Görsel 7.8'de gösterilen N3-X, yenilikçiliğin ön saflarında yer almaktadır.. Boeing 777-200LR gibi bir referans uçakla karşılaştırıldığında, N3-X'in görev yakıt tüketiminde %70 oranında bir azalma sağlayacağı tahmin edilmektedir. Bu

başarı, yalnızca önemli ekonomik faydalar sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda çevresel etkide de önemli bir azalma vaat etmekte ve N3-X'i sürdürülebilir ve uzun mesafeli hava taşımacılığının geleceği için bir umut ışığı haline getirmektedir (Doll vd., 2022; http-25).



Görsel 7.8. N3-X (NASA, 2023)

2030'da ilk uçuşunu gerçekleştirmesi planlanan, Görsel 7.9'da gösterilen Airbus E-Fan X projesi büyük ilgi görmüştür. BAe 146 (British Airways) test ortamını kullanan şirket, dört turbofanından birini Rolls-Royce AE2100 turboşaft ve 2 tonluk bataryayla çalışan Siemens 2 MW elektrik motoruyla değiştirmeyi planlamıştır. E-Fan X 1000 km'ye kadar menzile vaat etmiştir. Proje, COVID-19 salgını nedeniyle durdurulurken, seri hibrit-elektrikli tahrik sistemini devreye almayı ve test etmeyi başarmıştır ve havacılıkta gelecekteki karbondan arındırma çabaları için değerli bilgiler sağlamıştır (http-26).



Görsel 7.9. *E-Fan X (Airbus, 2017)*

Ampaire Electric EEL (Görsel 7.10), Cessna 337 Skymaster'ın hibrit elektrikli uyarlaması olarak hizmet vermektedir. Bu uçak, iki motorundan birini elektrik motoruyla değiştirerek kısa mesafeli rotaları daha ekonomik ve çevre açısından uygun seçeneklere dönüştürmeyi amaçlamaktadır. Elektrikli EEL, yakıt maliyetlerinin etkileyici bir şekilde %50 ila %70 oranında azalması ve bakım giderlerinin %25 ila %50 oranında azalmasıyla önemli maliyet tasarrufu sunmaktadır. Yeteneklerini olağanüstü bir şekilde sergileyen Electric EEL, Los Angeles, Kaliforniya'dan Oshkosh, Wisconsin'e kadar 1880 millik zorlu bir yolculuğu tamamlamıştır ([http-27](http://27)).



Görsel 7.10. *Electric EEL (Ampaire, 2019)*

Boeing'in ürünü olan SUGAR Volt (Görsel 7.11), havacılık endüstrisinde 70.262 kg'lık maksimum kalkış ağırlığı, 6.482 km'lik menzili ve 154 yolcu kapasitesiyle ticari uçaklar alanında zorlu bir rakip olarak durmaktadır. 0,7 Mach seyir hızında ve FL420

yükseklikte verimli bir şekilde çalışmakta olan Sugar Volt'un uzatılmış kanatları ve elektrik bataryalı gaz türbini hibrit tahrik sistemi, çevresel sürdürülebilirliğe olan bağlılığının simgesidir. Bu gelişmiş tahrik sistemi, yakıt tüketiminde %70'i aşan önemli bir azalma ve toplam enerji tüketiminde %55 oranında bir azalma elde etmek üzere stratejik olarak tasarlanmıştır (Ratner, 2018) (Bradley ve Droney, 2015).



Görsel 7.11. SUGAR Volt (NASA/Boeing)

Politecnico di Torino liderliğinde ve Avrupa Birliği Altıncı Çerçeve Programı kapsamında on bir ortak tarafından desteklenen ENFICA-FC Projesi, elektrikli uçak tahriki için yakıt hücresine dayalı güç sistemlerinin kullanımına öncülük etmeyi ve doğrulamayı amaçlamıştır. Jihlavan'ın Rapid 200 (Görsel 7.12) ultra hafif uçağını kullanan ENFICA-FC, yüksek talep gören uçuş aşamalarında gücü destekleyen ve yakıt hücresi sorunları durumunda yedek enerji kaynağı olarak hizmet veren Lityum-Polimer bataryalarla bir dizi hibrit-elektrik güç aktarma sistemi tasarımı kullanmıştır. Uçağın, yakıt hücreleri ve bataryalar arasında eşit olarak bölünmüş toplam 40 kW'lık bir güç çıkışı vardır. Güvenilir çalışmayı sağlayan gelişmiş elektronik kontrol sistemleri güvenilirliğe öncelik verilmiştir. Daha da önemlisi, yakıt hücresi alt sisteminin arızalanması durumunda uçak yalnızca batarya gücüyle uçmaya devam edebilmektedir. ENFICA-FC uçağının ağırlığı yalnızca 550 kg'dır; bu, Boeing'inki gibi benzer projelerle karşılaştırıldığında 860 kg'lık önemli bir azalmadır (Correa vd., 2015).



Görsel 7.12. *RAPID200FC (G. Romeo, POLİTO)*

Öne çıkan hibrit uçakların her biri farklı yetenekler ve yenilikler sergilemektedir. Hypstair, güç/ağırlık oranındaki altı kat artış ve 1000 km'ye varan çalışma menzili ile öne çıkmaktadır ve verimliliğinin ve çevre dostu olmasının altını çizmektedir. Buna karşılık E-Genius, sürdürülebilirliğe odaklanması, 400 km'lik menzili ve 6.000 m'ye kadar irtifalarda çalışabilmesiyle etkileyici görülmektedir. Zunum Aero verimli bölgesel hava yolculuğu vaat etse de mali zorluklar nedeniyle mevcut durumu belirsizliğini korumaktadır. Diamond DA36 E-Star, verimliliği ve pratikliği bir araya getirerek 1.094 km'lik menzile ve yakıt tüketimi ile emisyonlarda önemli bir azalmaya sahiptir. Bu arada N3-X, %70'lik iddialı yakıt tüketimini azaltma hedefiyle uzun mesafeli hava yolculuğunda devrim yaratmayı hedeflemektedir. Airlander 10 ve Airlander 50, dayanıklılıkları, yük taşıma kapasiteleri ve çevre dostu olmaları ile, hem kargo hem de yolcu taşımacılığına yönelik çözümler sunmaktadır. Panthera Hybrid ve Ampaire Electric EEL, çeşitli uçuş rejimlerinde hibrit-elektrikli tahrik potansiyelini ortaya koymaktadır. Son olarak, ENFICA-FC Projesi, hafif uçaklar için yakıt hücresi tabanlı güç sistemlerinin kullanımını örnekleyerek hem çevre dostu hem de operasyonel sağlamlığı vurgulamaktadır. Bu hibrit uçaklar toplu olarak sektörün daha yeşil ve daha verimli havacılık çözümleri arayışını temsil etmektedir.

8. MENZİL ANALİZİ VE OPTİMUM MENZİL

8.1. Optimum Menzil Kavramı

Optimum kelimesi Türk Dil Kurumu sözlüğünde, “En uygun, en elverişli, uygun değer” olarak tanımlanmıştır (http-29). Optimum uçuş menzili terimi havacılıkta bir uçağın gitmesi gereken, planlanan mesafeyi ifade etmektedir. Bu mesafe, uçağın motor verimliliği, aerodinamik özellikleri ve yakıt tüketimi gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik göstere bilmektedir. Pilotlar ve uçuş mühendisleri, belirli bir uçağın uçuş menzilini belirlemek için performans grafikleri, uçuş tabloları ve hesaplamalar kullanmaktadır. Bu değer, en az yakıt tüketimi ve en elverişli menzili elde etmek için belirlenmektedir. Farklı uçak tipleri için optimum uçuş menzili farklılıklar gösterebilir ve bu değer, uçuş planlaması ve yakıt veya enerji ekonomisi açısından önemlidir.

Optimum uçuş menzili, hibrit uçaklar için de önemli bir performans ölçütü sayılmaktadır. Bu uçaklarda, geleneksel yakıt motorlarına ek olarak elektrikli tahrik sistemleri de kullanıldığından, belirli hızlarda ve irtifalarda en verimli enerji kullanımı sağlamak için optimize edilebilir. Bu optimizasyon, optimum uçuş menziline ulaşmada önemli bir rol oynamaktadır. Ek olarak, enerji yönetimi, yani, belirli hız ve irtifalarda kullanılacak enerji kaynağı ve motor tipi de göz önünde bulunmaktadır.

8.2. Menzili Etkileyen Faktörler

Geleneksel yakıtlı hava aracı ve hibrit elektrikli hava aracının menzilini etkileyen temel faktörler Tablo 8.1’de gösterilmiştir.

Tablo 8.1. Hava aracının menzilini etkileyen faktörler.

HAVA ARACININ MENZİLİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Geleneksel Yakıtlı Hava Araçları	Hibrit Elektrikli Hava Araçları
İçten yanmalı motor verimliliği	İçten yanmalı motor verimliliği
Yakıt kapasitesi	Yakıt kapasitesi
Yakıt verimliliği	Yakıt verimliliği
Uçak ağırlığı	Uçak ağırlığı
Yük ve yolcu yükü	Yük ve yolcu yükü
Hava koşulları	Hava koşulları
İrtifa ve uçuş profili	İrtifa ve uçuş profili
Hava trafiği ve uçuş operasyonları	Hava trafiği ve uçuş operasyonları
Teknoloji ve motor verimliliği	Teknoloji ve motor verimliliği

Uçak tipi ve görev profili	Uçak tipi ve görev profili
	Batarya kapasitesi
	Elektrik motoru verimliliği
	Enerji yönetimi
	Rejeneratif enerji

- İçten yanmalı motor verimliliği, içten yanmalı motorun etkinliği üzerinden menzili etkilemektedir.
- Uçak ağırlığı, batarya ve diğer bileşenlerin ağırlığıyla birlikte menzili etkilemektedir. Uçak ağırlığı ile ilgili detaylı bilgilere aşağıda yer verilmiştir.
- Aerodinamik tasarım, sürtünmeyi azaltarak daha verimli uçuş ve genişletilmiş menzil sağlamaktadır.
- Çevresel koşullar, rüzgar hızı, sıcaklık ve hava yoğunluğu gibi dış faktörlerle birlikte menzili etkilemektedir.
- Görev profili, uçağın özel amaçlarına bağlı olarak menzil gerekliliklerini etkilemektedir.
- Batarya kapasitesi, uçaktaki depolanan elektrik enerjisi miktarını belirlemektedir ve daha büyük batarya kapasitesi menzili artırmakta yardımcı olmaktadır.
- Elektrik motoru verimliliği, toplam enerji tüketimini etkilemektedir ve yüksek verimlilik, daha az enerji kaybı ve menzil artımı sağlamaktadır.
- Enerji yönetimi ve kontrol sistemleri, güç dağılımını optimize ederek menzili artırabilmektedir.
- Rejeneratif enerji geri kazanımı, frenleme sırasında enerjiyi geri kazanarak menzili olumlu yönde etkileyebilmektedir, bu da uçağa ek güç sağlayabilmek ve bağımlılığı azaltabilmektedir (Woodward ve Scroggs, 1932).

Yakıt tüketimi ve menzil ile doğrudan bağlantılı olan hava aracı ağırlığı, havacılıkta önemli bir rol oynamaktadır. Hava aracı ağırlığı farklı kategorilere ayrılmaktadır:

- Maksimum Kalkış Ağırlığı (MTOW), uçak üreticisi tarafından belirlenen çok önemli bir parametre olmakta ve bir uçağın kalkışına izin verilen maksimum ağırlığı temsil etmektedir.
- MTOW'u tamamlayan Sıfır Yakıt Ağırlığı (ZFW), yakıt dışındaki tüm öğeler de dahil olmak üzere uçağın kullanılabilir yakıt olmadan toplam ağırlığını kapsamaktadır.

- Maksimum İniş Ağırlığı (MLW), güvenli bir iniş için izin verilen maksimum ağırlığı ifade etmektedir; bu değer, genellikle uçak üreticileri veya düzenleyici otoriteler tarafından belirlenmektedir.
- Boş çalışma ağırlığı (OEW), mürettebatla birlikte uçağın ağırlığını, motor yağı gibi operasyonel açıdan gerekli tüm sıvıları (kullanılan yakıtı ve yükü çıkmak şartıyla) kapsar.
- Kritik bir ölçüm olan yük, MTOW ve OEW arasındaki farkı ifade ederek yolcular, kargo veya yük için mevcut maksimum ağırlığı açıklamaktadır.
- Maksimum Taksi Ağırlığı (MTW) veya Maksimum Ramp Ağırlığı (MRW), piste taksi yapmak da dahil olmak üzere yer manevraları için izin verilen maksimum ağırlık anlamına gelmektedir.

Ayrıca, Uçağın Brüt Ağırlığı, herhangi bir operasyon aşamasında yakıt, faydalı yük, mürettebat ve ekipman dahil olmak üzere uçağın toplam ağırlığını kapsamaktadır ve uçuş sırasında, tüketilmekte olan yakıt ve yağ oranlarından dolayı değişmektedir. Bu ağırlık kategorileri, farklı uçuş aşamaları boyunca hassas performans hesaplamaları, düzenlemelere uyum ve operasyonel karar alma açısından son derece önemli olarak bilinmektedir.

8.3. Genel Menzil Tanımı ve Formülü

Bir uçağın menzili, yakıt ikmali veya durma ihtiyacı olmadan belirli bir mesafeyi kat etme kabiliyetini belirleyen kritik bir performans parametresidir. Menzilin hesaplanması, uçağın yakıt verimliliği, ağırlığı, aerodinamik özellikleri ve çalışma koşulları gibi çeşitli faktörlerin dikkate alınmasını içermektedir.

Bir uçağın menzilini tahmin etmek için kullanılan temel denklemlerden biri, adını Fransız mühendis Louis Charles Breguet'den alan Breguet denklemidir.

Breguet denklemi, bir uçağın menzilini yakıt verimliliği ve diğer ilgili parametrelerle ilişkilendiren matematiksel bir ifadedir. Bu denklem, uçağın başlangıç ağırlığından final ağırlığına kadar olan değişimi ve bu değişim sırasında tükettiği yakıt miktarını kullanarak uçağın menzilini hesaplar. Formüldeki diğer terimler de bu hesaplamada kullanılan uçuş parametrelerini temsil eder (http-28).

$$-\frac{dW}{dt} = g\dot{m}_f = T I_{sp} \quad (8.1)$$

Sabit seviyede uçuş için $T=D$, $L=W$, veya

$$W = L = D \left(\frac{L}{D} \right) = T \left(\frac{L}{D} \right) \quad (8.2)$$

olması gerekmektedir.

Uçağın brüt ağırlığının değişim oranı bu nedenle:

$$\frac{dW}{dt} = - \frac{W}{(L/D)I_{sp}} \quad (8.3)$$

L/D ve I_{sp} oranlarının uçuş süresince sabit kaldığını varsayarsak:

$$\frac{dW}{W} = \frac{dt}{(L/D)I_{sp}} \quad (8.4)$$

Ağırlık değişimi ile uçuş süresi arasında bir ilişki elde etmek amacıyla uçak ağırlığındaki değişim için bu denklem entegre edilebilir:

$$\ln \left(\frac{W}{W_i} \right) = - \frac{t}{(L/D)I_{sp}} \quad (8.5)$$

Burada, W_i başlangıç ağırlığıdır. Eğer W_f aracın nihai ağırlığı ise ve $t_i = 0$ ise, hava aracı parametreleri ile uçuş süresi arasındaki ilişki, t_f :

$$\frac{L}{D} I_{sp} \ln \left(\frac{W_i}{W_f} \right) = t_f \quad (8.6)$$

Buradan, menzilin, uçuş süresinin uçuş hızıyla çarpımı veya:

$$R = V t_f = V \frac{L}{D} I_{sp} \ln \left(\frac{W_i}{W_f} \right) \quad (8.7)$$

olduğu görülmektedir. İlaveten, $\frac{L}{D}$ uçağın tasarımı, I_{sp} tahrik sistemi, $\ln \left(\frac{W_i}{W_f} \right)$ bağlantılıdır.

Aşağıdaki formül, genel verimlilik, I_{sp} ve termal verimliliği ilişkilendirmektedir. Δh_{fuel} yakıtın J/kg cinsinden ısıtma değeri ("yanma ısısı", yani yakıt kütlesi birimi başına enerji) olduğunu varsayalım. Enerji salınım oranı $\dot{m}_f \Delta h_{fuel}$ 'dir, yani:

$$V I_{sp} = V \frac{T}{\dot{m}_f} \frac{\Delta h_{fuel}}{\Delta h_{fuel}} = \frac{TV}{\dot{m}_f \Delta h_{fuel}} \quad (8.8)$$

Ve,

$$\frac{TV}{\dot{m}_f \Delta h_{fuel}} = \frac{\text{İtme gücü}}{\text{İdeal mevcut enerji}} = \eta_{overall} (\text{Genel tahrik sistemi verimliliği}) \quad (8.9)$$

Sonuç olarak,

$$R = \frac{\Delta h_{fuel}}{g} \eta_{overall} \frac{L}{D} \ln \left(\frac{W_i}{W_f} \right) \quad (8.11)$$

Veya,

$$R = \frac{V}{g} \frac{1}{SFC} \frac{L}{D} \ln \left(\frac{W_i}{W_f} \right) \quad (8.12)$$

Burada:

R = Uçağın menzili, km

V = Uçuş hızı, km / s

g = Yerçekimi ivmesi, m / san^2

L/D = Kaldırma-sürüklenme oranı

SFC = Özgül yakıt tüketimi, kg / J

$W_{initial}$ = Uçağın başlangıç ağırlığı, kg

W_{final} = Uçağın nihai ağırlığı, kg

Turboprop uçaklar için menzil hesaplamaları bağlamında, Breguet menzil denklemi, İtiş Özgül Yakıt Tüketimi (TSFC) olarak bilinen ve genellikle (C_t) olarak temsil edilen parametreyi içermektedir. Yakıt tüketim oranının (C) kullanıldığı geleneksel jet motorlarının aksine, turboprop motorlar, tahrik sistemlerinin özelliklerini hesaba katmak için TSFC'yi kullanmaktadır. İtme Özel Yakıt Tüketimi, bir birim itme kuvveti oluşturmak için gereken yakıt miktarını ifade etmekte ve motorun yakıt verimliliğinin bir ölçü varsayılmaktadır. Turboprop uçaklar için Breguet menzil denkleminde, TSFC'yi temsil etmek için (C_t) terimi kullanılmaktadır ve denklem ($R = \frac{V}{C_t} \ln \frac{W_i}{W_0}$) formunu şeklinde yazılmaktadır. Bu modifikasyon, turboprop motorlara özgü yakıt tüketimi özelliklerinin daha doğru bir şekilde temsil edilmesine olanak tanımakta ve menzil hesaplamasının bu tip tahrik sisteminin performansını uygun şekilde yansıtmasını sağlamaktadır.

Ancak, geleneksel uçak çalışmalarında yaygın olarak kullanılan Breguet menzil denklemi, hibrit elektrikli uçaklar için uygun değildir. Bunun nedeni, Breguet menzil denkleminin, hibrit uçaklar için her zaman geçerli olmayan, enerji tüketiminin uçak

ağırlığındaki değişiklikle doğrudan ilişkili olduğunu varsaymasıdır (Orkisz ve Kuzniar, 2020).

8.4. Hibrit Tahrikli Hava Araçları İçin Menzil Formülü

Hibrit elektrikli hava taşıtı söz konusu olduğunda, Breguet menzil denkleminin, bu hava taşıtlarının kendine özgü enerji tüketim özelliklerini hesaba katan diğer yöntemlerle değiştirilmesi veya desteklenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, hibrit elektrikli uçakların menzili hesaplanırken, Breguet menzil denklemi, bu tür hava araçlarına özgü enerji tüketimini ve itici etkileri hesaba katmadaki sınırlamaları nedeniyle doğru sonuçlar vermeyebilir.

Mark Voskujil ve diğerleri tarafından yapılan bir analiz makalesinde, paralel hibrit elektrikli tahrik sistemi ile çalışan hava aracının menzil denklemi aşağıda gösterildiği gibi (Bkz. 8.13) tanımlanmıştır (Voskujil vd., 2017).

$$R_{hybr} = \frac{\eta_{prop}}{g \left(c_p \frac{H_{fuel}}{g} (1 - S) + \frac{S}{\eta_{elec}} \right)} \frac{C_L}{C_D} \frac{H_{bat} H_{fuel}}{(\psi H_{fuel} + (1 - \psi) H_{bat})} \ln \left(\frac{(\psi H_{fuel} + (1 - \psi) H_{bat})}{H_{bat} H_{fuel}} \frac{g E_{start} + W_{empty} + W_{payload}}{W_{empty} + W_{payload}} \right) \quad (8.13)$$

Burada:

R_{hybr} - Hibrit uçağın menzili, km

η - İtiş kuvveti verimliliği

g - Yer çekimi ivmesi, m / san^2

c_p - Güce özgü yakıt tüketimi, J / kg

H_{fuel} - yakıt enerjisi, J / kg

S - Güç dağıtımı

$\frac{C_L}{C_D}$ - Kaldırma/sürükleme oranını

H_{bat} - batarya enerjisi, J / m^3

ψ - hibridizasyon faktörü

E_{start} - Uçağın başlatılması için gerekli enerji, J

W_{empty} - Boş ağırlık, kg

$W_{payload}$ - Taşıma kapasitesi, kg

Seri tahrik sistemli hava aracı için menzil denklemi aşağıda (Bkz. 8.14) verilmiştir.

$$R_{series} = \eta_{gt}\eta_{eg}\eta_{em}\eta_{gb}\eta_p \frac{c_L}{c_D} \left(1 + \frac{\varphi}{1 - \varphi}\right) \left(\frac{e_f}{g}\right) \ln\left(\frac{W_{OE} + W_{PL} + \left(\frac{E_{o,tot}g}{e_{bat}}\right) \left(\varphi + \frac{e_{bat}(1 - \varphi)}{e_f\eta_{gt}\eta_{eg}}\right)}{W_{OE} + W_{PL} + \frac{g\varphi E_{o,tot}}{e_{bat}}}\right) \quad (8.14)$$

Burada, R_{series} , seri hibrit tahrik siseminin menzili, η_{gt} , gaz turbinin verimliliğini, η_{gb} , vites kutusu verimliliğini, η_{eg} , elektrik jeneratörü verimliliğini, η_p , pervane verimliliğini, $\frac{c_L}{c_D}$, kaldırma sürüklenme oranını, φ , hibridizasyon faktörünü, e_f , yakıt enerjisi yoğunluğunu, g , yer çekimi ivmesini, W_{OE} , boş çalışma ağırlığını, W_{PL} , yük ağırlığını, $E_{o,tot}$, toplam enerjiyi, e_{bat} , batarya enerjisi yoğunluğunu, η_{em} , elektrik motoru verimliliğini temsil etmektedir (Batra vd., 2023).

Formüllerdeki her parametre, uçağın genel menzil performansını etkilemede çok önemli bir rol oynamaktadır. Gaz türbini verimliliği (η_{gt}), vites kutusu verimliliği (η_{gb}) ve pervane verimliliği (η_p) toplu olarak tahrik sisteminin verimliliğini temsil etmektedir. Kaldırma sürüklenme oranı ($\frac{c_L}{c_D}$), uçuş sırasında kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri arasındaki dengeyi vurgulayarak aerodinamik verimliliği yansıtmaktadır. Hibridizasyon faktörü (φ), genel sistem verimliliğini etkileyerek elektrik ve gaz türbini bileşenleri arasındaki güç tahsisini belirlemektedir. Yakıt enerjisi yoğunluğu (e_f), yakıttan gelen enerji katkısını dikkate almadaki rolünü vurgulamaktadır. Ek olarak, boş çalışma ağırlığı (W_{OE}), yük ağırlığı (W_{PL}), ve depolanan toplam enerji uçağın ağırlığını ve tahrik için mevcut enerjiyi doğrudan etkileyen önemli faktörlerdir. Temelde formül, her bir parametrenin paralel hibrit elektrikli tahrik sistemi kullanan bir uçağın menzili nasıl etkilendiğine dair kapsamlı bir bakış açısı sağlayarak, bu tür gelişmiş tahrik teknolojilerinin performansını optimize etmek ve anlamak için değerli bilgiler sunmaktadır.

9. BATARYA KAPASİTESİ VE ENERJİ YOĞUNLUĞUNUN MENZİL ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Hibrit uçaklarda batarya entegrasyonu, uçağın performansını önemli ölçüde etkileyen bir faktör olarak görülmektedir. Bataryanın ağırlığı, enerji yoğunluğu, kapasitesi ve diğer özellikleri, uçağın optimum menzili ve genel performansı üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır.

Bataryaların hibrit elektrikli uçaklar üzerindeki ve optimum menzil üzerindeki etkisi tartışılırken mevcut batarya teknolojisinin, kapasitesinin, enerji yoğunluğunun ve bunun sonucunda uçağın toplam ağırlığı üzerindeki etkisinin dikkate alınması gerekmektedir.

Batarya kapasiteleri, elektrikli uçaklar için genellikle kilowatt saat (kWh) cinsinden ifade edilir. Son yıllarda, yüksek enerji yoğunluğuna sahip lityum iyon bataryaların ilerlemesiyle batarya kapasitesi teknolojisi önemli gelişmeler yaşamıştır. Şu anda havacılık uygulamalarına yönelik lityum iyon bataryalarının kapasitesi 200-260 Wh/kg arasında değişmektedir (http-30). Bir yakıtın veya enerji kaynağının enerji yoğunluğunu bulmak oldukça basittir. Yakıtın kilogram kütlesi başına watt-saat miktarını bulmak için yakıtta bulunan enerji miktarını kütlesine bölmek gerekmektedir. Laboratuvarlarda şimdiye kadar üretilen en iyi bataryalardan bazıları kg başına 700 Wh'ten fazla güç üretebilmektedir, ancak bu, jet yakıtının kg başına 12.000 Wh saat gücüyle karşılaştırıldığında sönük kalmaktadır (Ward, 2023).

Bataryaların enerji yoğunluğu, büyük ticari uçaklar için büyük bir teknolojik zorluktur, çünkü ulaşabilecekleri optimum menzili etkilemektedir. Bu nedenle menzili en üst düzeye çıkarmak için hibrit elektrikli uçakların yüksek enerji yoğunluğuna sahip bataryalara ihtiyacı vardır. Batarya enerji yoğunluğu, bataryanın belirli bir hacminde veya kütlesinde depolanabilecek enerji miktarını ifade eder. Daha yüksek enerji yoğunluğu, daha fazla enerjinin daha küçük ve daha hafif bir pakette depolanmasına olanak tanıyarak uçağın daha uzağa uçmasını sağlamaktadır. Batarya kimyası ve malzemelerindeki ilerlemeler, enerji yoğunluğunda iyileşmelere yol açmaktadır, ancak mevcut batarya teknolojisi, yaygın ticari hibrit elektrikli uçak operasyonları için gereken seviyelerin hala altında kalmaktadır. Lityum kükürt ve katı hal (*solid state*) piller, geleneksel lityum iyon pillere kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu potansiyeli göstermektedir (Pomerantseva vd., 2019).

Batarya kapasitesi ve enerji yoğunluğu arttıkça, belirli miktarda depolanan enerji için bataryaların ağırlığı azalmaktadır. Batarya ağırlığındaki azalma, uçağın ağırlığını doğrudan etkilemektedir. Daha hafif bataryalar, hibrit elektrikli uçakların menzilini arttırmak için çok önemli olan toplam uçak ağırlığının azaltılmasına katkıda bulunmaktadır (Huang, 2023).

Genel uçak ağırlığındaki azalma, hibrit uçağın menzilini olumlu yönde etkilemektedir. Daha az batarya ağırlığı, uçak için daha fazla yük kapasitesi veya daha uzun menzil anlamına gelmektedir. Bu, uçaklarda hibrit elektrikli tahrik sisteminin kullanılmasının imkânlarını ve pratikliğini doğrudan etkilemektedir (Ward, 2023).

Öte yandan batarya yoğunluğu ve ağırlığıyla ilgili mevcut sınırlamaları vurgulamak da gerekmektedir. Batarya yoğunluğu teknolojisindeki mevcut sınırlamalar nedeniyle kapasite arttıkça bataryaların toplam ağırlığı da artar. Bu, hibrit elektrikli uçağın ağırlığını etkileyen önemli bir faktördür. Batarya kapasitesinin artırılması yönünde ilerlemeler kaydedilmiş olsa da bu senaryodaki ödün, batarya ağırlığının artmasıdır. Enerji yoğunluğundaki sınırlı ilerlemeye rağmen, daha yüksek kapasite nedeniyle batarya ağırlığındaki artış, uçağın toplam ağırlığını da arttırarak olumsuz bir etkiye neden olmaktadır. Uçak ağırlığındaki bu artış, ilave ağırlığın itiş için daha fazla enerji tüketimini gerektirmesi nedeniyle hibrit elektrikli uçağın menzilini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, daha yüksek enerji yoğunluğuna ve daha düşük ağırlığa sahip lityum iyon pillerin geliştirilmesi, hibrit elektrikli uçakların geliştirilmesinde ve uygulanabilirliğinde kritik bir faktör olmaya devam etmektedir (Rendon vd., 2021).

Tablo 9.1. 2035 yılına kadar hücre düzeyinde gelecekteki bataryalardaki eğilimler

Parametre	Birim	Li-Ion	Li-S	Li-O ₂ , açık	Li-O ₂ , kapalı
Spesifik enerji	Wh/kg	250-350	600-700	800-1500	600-1200
Özgül Güç	Wh/kg	500-600	350-500	300-400	300-400
Enerji yoğunluğu	Wh/l	600-800	300-350	1000-1700	1000-1600
Şarj/Deşarj verimliliği	%	90-95	70-90	60-85	60-85
Hayat döngüsü	Devir	1000-3000	1000-2500	500-1000	500-1000
Deşarj Derecesi	%	70-90	90-100	70-90	70-90

Ömür	Yıl	7-15	7-14	5-10	5-10
Maliyet (2010 \$)	\$/kWh	250-350	250-500	400-800	300-700



10. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

10.1. Bulguların Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, hibrit tahrik sistemlerinin havacılık endüstrisindeki potansiyeli ve bu sistemlerin optimum menzile üzerindeki etkileri incelenmiştir. Öncelikle hava taşımacılığına olan talep artışı aşıkardır. Ancak havacılığın da diğer alanlarda olduğu gibi çevreye verdiği olumsuz etkiler söz konusudur. Havacılıkta mevcut teknolojiler kullanılmaya devam ettiği sürece olumsuz çevresel etkiler de talep artışı gibi artacaktır. Bu nedenle havacılıkta yeni teknoloji arayışları gündemdedir. Havacılık sektöründeki artan talep, çevresel endişeler ve enerji verimliliği hedefleri, hibrit tahrik sistemlerini daha sürdürülebilir bir geleceğin anahtarı olarak öne çıkarmıştır.

Hibrit tahrik sistemleri, geleneksel ve elektrikli motorların sinerjisinin avantajlarını kullanarak hava araçlarının performansını artırma potansiyeline sahiptir. Ancak, bu sistemlerin getirdiği ilave ağırlık, ilave maliyet, karmaşık yapılar dezavantaj oluşturmaktadır. Özellikle günümüzde batarya teknolojilerinde karşılaşılan sınırlamalar, hibrit tahrikli uçakların uzak mesafeler katetmesinde, optimum menzile ulaşmada istenen verimliliği sağlamasını zorlaştırmaktadır.

10.2. Çalışmanın Sınırlamaları

Mevcut durumda, lityum iyon bataryaların kapasitesi ve enerji yoğunluğu, hibrit uçakların optimum menzilini kısıtlamaktadır. Bu kısıtlamalar, uzun menzilli uçuşlarda hibrit tahrik sistemlerinin beklenen verimi sağlamasını zorlaştırmaktadır. Ancak, gelecekteki teknolojik gelişmeler ve araştırmalar, bu sınırlamaları aşma potansiyeli taşımaktadır.

10.3. Gelecekteki Araştırmalar İçin Öneriler

Enerji yoğunluğu ve kapasitesi yüksek, hafif ve güvenilir bataryaların geliştirilmesi, hibrit uçakların uzun menzillerde daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlayabilir. Nanoteknoloji, katı hal piller ve diğer yenilikçi yaklaşımlar, batarya teknolojilerindeki ilerlemeleri hızlandırabilir.

Sonuç olarak, hibrit tahrik sistemleri, havacılık endüstrisinin çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında önemli bir rol oynayabilir. Ancak, bu sistemlerin gerçek potansiyelini açığa çıkarmak için batarya teknolojilerindeki sınırlamalara çözümler bulunmalıdır. Gelecekteki çalışmalar, bu konudaki çabaları yönlendirerek hibrit elektrikli uçakların optimal menzilini artırmaya odaklanacaktır.

KAYNAKÇA

- Abu Salem, K., Palaia, G., Quarta, A. A., & Chiarelli, M. R. (2023). Medium-Range Aircraft Conceptual Design from a Local Air Quality and Climate Change Viewpoint. *Energies*, 16(10), 4013. <https://doi.org/10.3390/en16104013>
- Adrienne, N., Budd, L., & Ison, S. (2020). Grounded aircraft: An airfield operations perspective of the challenges of resuming flights post COVID. *Journal of Air Transport Management*, 89, 101921. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101921>
- Affonso, W., Tavares, RenataT., Barbosa, F. R., Gandolfi, R., Dos Reis, R. J. N., Da Silva, C. R. I., Kipouros, T., Laskaridis, P., Enalou, H. B., Chekin, A., Kukovinets, A., Gubernatorov, K., Ravikovich, Y., Ivanov, N., Ponyaev, L., & Holobtsev, D. (2022). System architectures for thermal management of hybrid-electric aircraft - FutPrInt50. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1226(1), 012062. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1226/1/012062>
- Allain-Dupree, D., Isabelle, C., Kornprobst, A., & Michalun, M.-V. (2020, Kasım 10). The territorial impact of COVID-19: Managing the crisis across levels of government. <https://www.oecd.org/coronavirus/policy-responses/the-territorial-impact-of-covid-19-managing-the-crisis-across-levels-of-government-d3e314e1/#>
- Alvarez, P., Satrustegui, M., Elosegui, I., & Martinez-Iturralde, M. (2022). Review of High Power and High Voltage Electric Motors for Single-Aisle Regional Aircraft. *IEEE Access*, 10, 112989-113004. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3215692>
- Arabul, A. Y., Kurt, E., Keskin Arabul, F., Senol, İ., Schrötter, M., Bréda, R., & Megyesi, D. (2021). Perspectives and Development of Electrical Systems in More Electric Aircraft. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2021, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2021/5519842>
- B. Aigner, M. Nollmann, & E. Stumpf. (2018). Design of a Hybrid Electric Propulsion System within a Preliminary Aircraft Design Software Environment. <https://doi.org/10.25967/480153>
- Batra, A.; Raute, R.; Camilleri, R. On the Range Equation for Hybrid-Electric Aircraft. *Aerospace* 2023, 10, 687. <https://doi.org/10.3390/aerospace10080687>
- Barelli, L., Bidini, G., Gallorini, F., Iantorno, F., Pane, N., Ottaviano, P., & Trombetti, L. (2018). Dynamic Modeling of a Hybrid Propulsion System for Tourist Boat. *Energies*, 11(10), 2592. <https://doi.org/10.3390/en11102592>
- Boschert, S. (2006). Plug-in hybrids: the cars that will recharge America. New Society Publishers.
- Bradley, M., & Droney, C. (2015). Subsonic Ultra Green Aircraft Research: Phase II – Volume II Hybrid Electric Design Exploration (Contract Report NASA/CR–

- 2015-218704/Volume II). Boeing Research and Technology.
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20150017039/downloads/20150017039.pdf>
- Bravo, G. M., Praliyev, N., & Veress, Á. (2021). Performance analysis of hybrid electric and distributed propulsion system applied on a light aircraft. *Energy*, 214, 118823. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118823>
- Button, K. (2008). The Impacts of Globalisation on International Air Transport Activity. 40. <https://www.oecd.org/greengrowth/greening-transport/41373470.pdf>
- Capata, R., & Coccia, A. (2010). Procedure for the Design of a Hybrid-Series Vehicle and the Hybridization Degree Choice. *Energies*, 3(3), 450-461. <https://doi.org/10.3390/en3030450>
- Caputo, P., Soderberg, M., Crowley, E., & Daher, M. (2023, Nisan 10). Navigating toward a new normal: 2023 Deloitte corporate travel study. <https://www2.deloitte.com/xe/en/insights/focus/transportation/corporate-travel-study-2023.html>
- Cardoso, D. S., Fael, P. O., & Espírito-Santo, A. (2020). A review of micro and mild hybrid systems. *Energy Reports*, 6, 385-390. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.077>
- Cinar, G., Mavis, D. N., Emeneth, M., Schneegans, A., Riediger, C., Fefermann, Y., & Isikveren, A. (2017, Ocak 9). Sizing, Integration and Performance Evaluation of Hybrid Electric Propulsion Subsystem Architectures. 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting. 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Grapevine, Texas. <https://doi.org/10.2514/6.2017-1183>
- Correa, G., Santarelli, M., Borello, F., Cestino, E., & Romeo, G. (2015). Flight test validation of the dynamic model of a fuel cell system for ultra-light aircraft. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 229(5), 917-932. <https://doi.org/10.1177/0954410014541081>
- De Vries, R., Hoogreef, M., & Vos, R. (2019, Ocak 7). Preliminary Sizing of a Hybrid-Electric Passenger Aircraft Featuring Over-the-Wing Distributed-Propulsion. AIAA Scitech 2019 Forum. AIAA Scitech 2019 Forum, San Diego, California. <https://doi.org/10.2514/6.2019-1811>
- Dean, T. S., Wroblewski, G. E., & Ansell, P. J. (2018). Mission Analysis and Component-Level Sensitivity Study of Hybrid-Electric General-Aviation Propulsion Systems. *Journal of Aircraft*, 55(6), 2454-2465. <https://doi.org/10.2514/1.C034635>
- Decerio, D. P., & Hall, D. K. (2022). Benefits of Parallel Hybrid Electric Propulsion for Transport Aircraft. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8(4), 4054-4066. <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3193622>
- Doll, U., Migliorini, M., Baikie, J., Zachos, P. K., Röhle, I., Melnikov, S., Steinbock, J., Dues, M., Kapulla, R., MacManus, D. G., & Lawson, N. J. (2022). Non-intrusive

- flow diagnostics for unsteady inlet flow distortion measurements in novel aircraft architectures. *Progress in Aerospace Sciences*, 130, 100810. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2022.100810>
- Economou, J. T., Tsourdos, A., & Wang, S. (2019, August 19). Design of a Distributed Hybrid Electric Propulsion System for a Light Aircraft based on genetic algorithm. *AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum*, Indianapolis, IN. <https://doi.org/10.2514/6.2019-4305>
- Finger, D. F., Braun, C., & Bil, C. (2020). Comparative Assessment of Parallel-Hybrid-Electric Propulsion Systems for Four Different Aircraft. *Journal of Aircraft*, 57(5), 843-853. <https://doi.org/10.2514/1.C035897>
- Friedrich, C., & Robertson, P. A. (2015a). Hybrid-Electric Propulsion for Aircraft. *Journal of Aircraft*, 52(1), 176-189. <https://doi.org/10.2514/1.C032660>
- Friedrich, C., & Robertson, P. A. (2015b). Hybrid-electric propulsion for automotive and aviation applications. *CEAS Aeronautical Journal*, 6(2), 279-290. <https://doi.org/10.1007/s13272-014-0144-x>
- Frosina, E., Senatore, A., Palumbo, L., Di Lorenzo, G., & Pascarella, C. (2018). Development of a Lumped Parameter Model for an Aeronautic Hybrid Electric Propulsion System. *Aerospace*, 5(4), 105. <https://doi.org/10.3390/aerospace5040105>
- Gogolák, L., Csikós, S., Molnár, T., Szuchy, P., Bíró, I., & Sárosi, J. (2019). Possibilities of optimizing fuel consumption in hybrid and electronic airplanes. *Analecta Technica Szegedinensia*, 13(2), 65-76. <https://doi.org/10.14232/analecta.2019.2.65-76>
- He, C., Jia, Y., & Ma, D. (2020). Optimization and Analysis of Hybrid Electric System for Distributed Propulsion Tilt-Wing UAV. *IEEE Access*, 8, 224654-224667. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3044449>
- Hong, J., Zhao, L., Lei, Y., & Gao, B. (2018). Architecture Optimization of Hybrid Electric Vehicles with Future High-Efficiency Engine. *Energies*, 11(5), 1148. <https://doi.org/10.3390/en11051148>
- Huang, Z. (2023). Electric and hybrid-electric aircraft propulsion systems: development, difficulties and opportunities. *Theoretical and Natural Science*, 5(1), 28-34. <https://doi.org/10.54254/2753-8818/5/20230263>
- Iacus, S. M., Natale, F., Santamaria, C., Spyrtos, S., & Vespe, M. (2020). Estimating and projecting air passenger traffic during the COVID-19 coronavirus outbreak and its socio-economic impact. *Safety Science*, 129, 104791. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104791>
- Iwanizki, M., Arzberger, M., Plohr, M., Silberhorn, D., & Hecken, T. (2019, Haziran 17). Conceptual Design Studies of Short Range Aircraft Configurations with Hybrid Electric Propulsion. *AIAA Aviation 2019 Forum*. AIAA Aviation 2019 Forum, Dallas, Texas. <https://doi.org/10.2514/6.2019-3680>

- Jackson, J., Weiss, M., & Schwarzenberg, A. (2021). Global Economic Effects of COVID-19. Congressional Research Service. <https://sgp.fas.org/crs/row/R46270.pdf>
- Jain, S., & Kumar, L. (2018). Fundamentals of Power Electronics Controlled Electric Propulsion. *Çinde Power Electronics Handbook* (ss. 1023-1065). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811407-0.00035-0>
- Janovec, M., Černan, J., Škultéty, F., & Novák, A. (2022). Design of Batteries for a Hybrid Propulsion System of a Training Aircraft. *Energies*, 15(1), 49. <https://doi.org/10.3390/en15010049>
- Knapp, M., & Said, W. (2018). Electric Blue Skies. *IEEE Spectrum*, 55(5), 26-52. <https://doi.org/10.1109/MSPEC.2018.8352571>
- Köhler, J., & Jeschke, P. (2021). Conceptual design and comparison of hybrid electric propulsion systems for small aircraft. *CEAS Aeronautical Journal*, 12(4), 907-922. <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00536-4>
- Lee, D., Lim, D., & Yee, K. (2022). Generic Design Methodology for Vertical Takeoff and Landing Aircraft with Hybrid-Electric Propulsion. *Journal of Aircraft*, 59(2), 278-292. <https://doi.org/10.2514/1.C036214>
- Liu, Y., Wang, H., Zhang, J., Jiang, T., & Zheng, Y. (2021). Retrofit and New Design of Regional Aircraft with Hybrid Electric Propulsion. 2021 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), 1-12. <https://doi.org/10.23919/EATS52162.2021.9704854>
- Maddumage, W., Perera, M., Attalage, R., & Kelly, P. (2021). Power Management Strategy of a Parallel Hybrid Three-Wheeler for Fuel and Emission Reduction. *Energies*, 14(7), 1833. <https://doi.org/10.3390/en14071833>
- McQueen, M., Karataş, A. E., Bramesfeld, G., Demir, E., & Arenas, O. (2022). Feasibility Study of Electrified Light-Sport Aircraft Powertrains. *Aerospace*, 9(4), 224. <https://doi.org/10.3390/aerospace9040224>
- Morishita, N., Funaki, M., Kikuchi, Y., Wakiwaka, H., Sonehara, M., & Sato, T. (2023). A basic study on braking and regenerative braking torques for an axial gap type eddy current brake. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 71, S383-S392. <https://doi.org/10.3233/JAE-220184>
- Oktal, H., & García, L. R. (2017). Comparison of Air Transportation Systems of Turkey and Spain as the Competitors in Tourism Sector. *Advances in Hospitality and Tourism Research (AHTR)*, 5(2), 120-138. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ahtr/issue/33824/375455>
- Orkisz, M., & Kuźniar, M. (2020). 3E – A new paradigm for the development of civil aviation. *Combustion Engines*, 181(2), 3-10. <https://doi.org/10.19206/CE-2020-201>

- Palaia, G., & Abu Salem, K. (2023). Mission Performance Analysis of Hybrid-Electric Regional Aircraft. *Aerospace*, 10(3), 246. <https://doi.org/10.3390/aerospace10030246>
- Pomerantseva, E., Bonaccorso, F., Feng, X., Cui, Y., & Gogotsi, Y. (2019). Energy storage: The future enabled by nanomaterials. *Science*, 366(6468), eaan8285. <https://doi.org/10.1126/science.aan8285>
- Pornet, C., Kaiser, S., Isikveren, A. T., & Hornung, M. (2014). Integrated fuel-battery hybrid for a narrow-body sized transport aircraft. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 86(6), 568-574. <https://doi.org/10.1108/AEAT-05-2014-0062>
- Prapotnik Brdnik, A., Kamnik, R., Marksel, M., & Božičnik, S. (2019). Market and Technological Perspectives for the New Generation of Regional Passenger Aircraft. *Energies*, 12(10), 1864. <https://doi.org/10.3390/en12101864>
- Rendón, M. A., Sánchez R., C. D., Gallo M., J., & Anzai, A. H. (2021). Aircraft Hybrid-Electric Propulsion: Development Trends, Challenges and Opportunities. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 32(5), 1244-1268. <https://doi.org/10.1007/s40313-021-00740-x>
- Ricci, M., Varahamurthy, V., Offshore Aviation, & Hicks, R. (2022). Power System Characterization and Flight Testing of a >55lb Hybrid-Electric Multirotor. *Proceedings of the Vertical Flight Society 78th Annual Forum*, 1-8. <https://doi.org/10.4050/F-0078-2022-17529>
- Siddavatam, A. K. R., Rajashekara, K., Reddy, R. P., Huang, H., Krishnamoorthy, H. S., & Wang, F. (2023). A H-type architecture for electric/hybrid-electric aircraft propulsion systems. *IET Electrical Systems in Transportation*, 13(1), e12065. <https://doi.org/10.1049/els2.12065>
- Sliwinski, J., Gardi, A., Marino, M., & Sabatini, R. (2017). Hybrid-electric propulsion integration in unmanned aircraft. *Energy*, 140, 1407-1416. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.183>
- Suau-Sanchez, P., Voltes-Dorta, A., & Cugueró-Escofet, N. (2020). An early assessment of the impact of COVID-19 on air transport: Just another crisis or the end of aviation as we know it? *Journal of Transport Geography*, 86, 102749. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102749>
- Sun, X., Wandelt, S., & Zhang, A. (2020). How did COVID-19 impact air transportation? A first peek through the lens of complex networks. *Journal of Air Transport Management*, 89, 101928. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101928>
- Sziroczak, D., Jankovics, I., Gal, I., & Rohacs, D. (2020). Conceptual design of small aircraft with hybrid-electric propulsion systems. *Energy*, 204, 117937. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117937>

- V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, & Ratner, S. V. (2018). Innovation in the aircraft industry: An analysis of results of research programs for developing alternative types of aviation fuel. *National Interests: Priorities and Security*, 14(3), 492-506. <https://doi.org/10.24891/ni.14.3.492>
- Van Holsteijn, M. R., Gangoli Rao, A., & Yin, F. (2020). Operating Characteristics of an Electrically Assisted Turbofan Engine. Volume 1: Aircraft Engine; Fans and Blowers, V001T01A028. <https://doi.org/10.1115/GT2020-15355>
- Voskuijl, M., van Bogaert, J., & Rao, A. G. (2017). Analysis and design of hybrid electric regional turboprop aircraft. *CEAS Aeronautical Journal*, 9(1), 15-25. <https://doi.org/10.1007/s13272-017-0272-1>
- Ward, C. (2023, Eylül 16). Electric Planes: Are They Really The Future Of Flight? <https://www.slashgear.com/1391420/electric-planes-future-of-flight/>
- Whitely, A. (2020, Nisan 24). How Coronavirus Will Forever Change Airlines and the Way We Fly. *Bloomberg.Com*. <https://www.bloomberg.com/news/features/2020-04-24/coronavirus-travel-covid-19-will-change-airlines-and-how-we-fly>
- Woodward Nutt, A. E., & Scroggs, A. F. (1932). Some Factors Affecting the Range of Aircraft with Special Reference to Height. *The Journal of the Royal Aeronautical Society*, 36(260), 603-655. <https://doi.org/10.1017/S0368393100113045>
- Xie, Y., Savvarisal, A., Tsourdos, A., Zhang, D., & Gu, J. (2021). Review of hybrid electric powered aircraft, its conceptual design and energy management methodologies. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(4), 432-450. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.07.017>
- Zaghari, B., Kiran, A., Sinnige, T., Pontika, E., Enalou, H. B., Kipouros, T., & Laskaridis, P. (2023, Ocak 23). The Impact of Electric Machine and Propeller Coupling Design on Electrified Aircraft Noise and Performance. *AIAA SCITECH 2023 Forum*. AIAA SCITECH 2023 Forum, National Harbor, MD & Online. <https://doi.org/10.2514/6.2023-2133>
- Zhukov, V. E. (2020). Demand Analysis Models for Passenger Air Transportation. *World of Transport and Transportation*, 18(1), 134-144. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-134-144>
- Zong, J., Zhu, B., Hou, Z., Yang, X., & Zhai, J. (2022). Sizing and Mission Profile Analysis of the Hybrid-Electric Propulsion System for Retrofitting a Fixed Wing VTOL Aircraft. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2022, 1-10. <https://doi.org/10.1155/2022/9384931>
- http-1:** <https://airlines.iata.org/2018/11/26/passenger-numbers-hit-82bn-2037-iata-report> (Erişim tarihi: 15.12.2023)
- http-2:** <https://www.icao.int/annual-report-2019/Pages/the-world-of-air-transport-in-2019.aspx> (Erişim tarihi: 18.12.2023)

- http-3:** <https://www.boeing.com/commercial/market/commercial-market-outlook/index.page> (Erişim tarihi: 18.12.2023)
- http-4:** <https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/market/global-market-forecast> (Erişim tarihi: 18.12.2023)
- http-5:** <https://atag.org/industry-topics/supporting-economic-social-development> (Erişim tarihi: 15.12.2023)
- http-6:** <https://www.iata.org/en/pressroom/pressroom-archive/2021-releases/2021-08-03-01/> (Erişim tarihi 18.12.2023)
- http-7:** <https://wwwnc.cdc.gov/travel/page/masks#> (Erişim tarihi: 15.12.2023)
- http-8:** <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/global-outlook-for-air-transport---june-2023/> (Erişim tarihi: 15.12.2023)
- http-9:** <https://www.statista.com/statistics/183496/number-of-airports-in-the-united-states-since-1990/> (Erişim tarihi: 10.12.2023)
- http-10:** <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-ghg-sector> (Erişim tarihi: 10.12.2023)
- http-11:** <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050> (Erişim tarihi: 15.12.2023)
- http-12:** <https://www.airbridgescargo.com/en/page/37/boeing-747-8f> (Erişim tarihi: 15.12.2023)
- http-13:** <https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104505/f-16-fighting-falcon/https%3A%2F%2Fwww.af.mil%2FAbout-Us%2FFact-Sheets%2FDisplay%2FArticle%2F104505%2Ff-16-fighting-falcon%2F> (Erişim tarihi: 01.12.2023)
- http-14:** <https://www.homelandsecurity-technology.com/projects/s-92-sar-helicopter/> (Erişim tarihi: 01.12.2023)
- http-15:** <https://airtractor.com/aircraft/at-802f/> (Erişim tarihi: 01.12.2023)
- http-16:** <https://science.nasa.gov/mission/sofia/> (Erişim tarihi: 01.12.2023)
- http-17:** <https://aerialfirefighter.vikingair.com/aircraft/cl-415-aircraft> (Erişim tarihi: 03.12.2023)
- http-18:** <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hybrid-and-electric-flight> (Erişim tarihi: 18.12.2023)
- http-19:** <https://www.diamondaircraft.com/en/> (Erişim tarihi 03.12.2023)
- http-20:** <http://www.hypstair.eu/> (Erişim tarihi: 03.12.2023)

- http-21:** <https://www.ifb.uni-stuttgart.de/forschung/flugzeugentwurf/flugzeugprojekte/e-genius-00001/> (Erişim tarihi: 14.12.2023)
- http-22:** <https://www.pipistrel-aircraft.com/products/panthera/> (Erişim tarihi: 14.12.2023)
- http-23:** <https://www.hybridairvehicles.com/our-aircraft/airlander-10/> (Erişim tarihi: 14.12.2023)
- http-24:** <https://zunum.aero/> (Erişim tarihi: 14.12.2023)
- http-25:** <https://www1.grc.nasa.gov/aeronautics/eap/airplane-concepts/n3x/> (Erişim tarihi 14.12.2023)
- http-26:** <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hybrid-and-electric-flight/e-fan-x> (Erişim tarihi 14.12.2023)
- http-27:** <https://www.ampaire.com/vehicles/electric-eel-aircraft> (Erişim tarihi: 14.12.2023)
- http-28:** <https://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node98.html> (Erişim tarihi: 15.12.2023)
- http-29:** <https://sozluk.gov.tr/?kelime=optimum> (Erişim tarihi: 15.12.2023)
- http-30:** <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/aircraft-battery-market-50723530.html> (Erişim tarihi: 15.12.2023)

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0009-0005-8018-507X

Ad Soyad: Alihuseyn MAHARRAMOV

Yabancı Dil: İngiliz, Rus

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2016-2021, Ulusal Havacılık Akademisi, Uçak Bakımı Mühendisliği (Aviyonik)
- 2023, Doküman Yönetimi Uzmanı, Kalite ve Uyumluluk Departmanı, Silk Way West Airlines