

**YENİ NESİL HAVA ARAÇLARI İÇİN İNİŞ KALKIŞ ALANI TASARIM
KRİTERLERİ**

Kürşat Alp YİĞİT

Yüksek Lisans Tezi

Sivil Havacılık Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

(İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Alper DALKIRAN)

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ocak 2023

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Kürşat Alp YİĞİT'in "YENİ NESİL HAVA ARAÇLARI İÇİN İNİŞ KALKIŞ ALANI TASARIM KRİTERLERİ" başlıklı tezi 16/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvanı Adı Soyadı

İmza

Üye

: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

Üye

: Doç. Dr. Selçuk EKİCİ

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Elif KORUYUCU

Prof.Dr. Murat TANIŞLI
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

16/01/2023

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Kürşat Alp YİğİT, “YENİ NESİL HAVA ARAÇLARI İÇİN İNİş KALKIş ALANI TASARIM KRİTERLERİ” başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ



ÖZET
YENİ NESİL HAVA ARAÇLARI İÇİN İNİŞ KALKIŞ ALANI TASARIM
KRİTERLERİ

Kürşat Alp YİĞİT

Sivil Havacılık Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ocak 2023

Danışman: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

(İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Alper DALKIRAN)

İnsansız hava aracı (İHA) pilotsuz ve havada yolcu taşıyabilecek uçaklar olarak tanımlanmaktadır. İHA teknolojisinin iletişim ve ağ teknolojilerindeki ilerlemesi ticari ve askeri uygulamalarda kullanımını arttırmıştır. 1950’li yıllardan itibaren üzerinde çalışmalar yapılan kentsel hava hareketliliği (KHH-UAM-Urban Air Mobility) kavramı batarya teknolojisi, sensör teknolojisi, mikro işlemciler, elektrik tahrik sistemindeki gelişmeler ve otomasyon alanındaki yeni teknolojilerin hayata geçmesi ile tekrar canlanmaya başlamıştır. KHH’nin tanıtılması ve toplum tarafından kabul görmesi şehir içi tıkanıklığın aşılmasına, seyahat süresinin azaltılmasına ve uzak bölgelere ulaşmayı kolaylaştıracaktır. Elektrikli dikey kalkış ve iniş (eVTOL) yapan hava araçların sera gazı emisyonlarını azaltacak ve şehir içi tıkanıklığı sorununu ortadan kaldıracak olması bu araçların gelecek için umut verici olduğu düşüncesini ortaya çıkarmaktadır. eVTOL hava araçların kalkış ve varış operasyonlarını destekleyen şehir içi ve şehirler arası hava hareketliliğini sağlayan yeni havaalanı vertiport olarak tanımlanmaktadır. Vertiport tasarım kriterleri bu yeni çağda eVTOL’lerin kullanacağı altyapıyı güvenli bir şekilde inşa etmeye başlamak için gereken temeli sağlayacaktır. Bu kapsamda eVTOL hava araçlarının iniş ve kalkış yapacağı havaalanı yapısı olan vertiport tasarım kriterleri detaylı şekilde araştırılmış ve incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: İnsansız hava aracı, eVTOL, Kentsel hava hareketliliği, Vertiport

ABSTRACT
TAKE-OFF AND LANDING AREA DESIGN CRITERIA FOR NEW GENERATION
AIRCRAFT

Kürşat Alp YİĞİT

Department of Civil Aviation

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, January 2023

Supervisor: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ

(Co-Supervisor: Asst. Prof. Dr. Alper DALKIRAN)

Unmanned aerial vehicle (UAV) is defined as an aircraft without a pilot and capable of carrying passengers in the air. The advancement of UAV technology in communication and network technologies has increased its use in commercial and military applications. The concept of urban air mobility (KHH-UAM-Urban Air Mobility), which has been studied since the 1950s, has begun to revive with the implementation of new technologies in the field of battery technology, sensor technology, microprocessors, electrical propulsion system and automation. The introduction of KHH and its acceptance by the society will help overcome urban congestion, reduce travel time and facilitate access to remote areas. The fact that electric vertical take-off and landing (eVTOL) aircraft will reduce greenhouse gas emissions and eliminate the problem of urban congestion reveals the idea that these vehicles are promising for the future. This new airport, which supports the departure and arrival operations of eVTOL vehicles and provides urban and intercity air mobility, is defined as a vertiport. The Vertiport design criteria will provide the foundation to begin safely building the infrastructure that eVTOLs will use in this new era. In this context, the vertiport design criteria, which is the airport structure where eVTOL aircraft will land and take off, have been researched and examined in detail.

Keywords: UAV, eVTOL, Urban air mobility, Vertiport

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ'a ve değerli bilgilerini bizlerle paylaşan sayın Dr. Öğr. Üyesi Alper DALKIRAN hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmaların süresince hiçbir desteğini esirgemedi yanımda olan ve tecrübelerini benimle paylaşan aileme, bu tezin her aşamasında desteğini hissettiğim değerli dostlarıma teşekkür ederim.

Kürşat Alp YİĞİT



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

16/01/2023

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.

Kürşat Alp YİĞİT

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
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.....	XII
ŞEKİLLER DİZİNİ	XIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XV
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam.....	3
1.2. Önem	3
1.3. Kısıtlılıklar.....	4
2. YENİ NESİL HAVA ARAÇLARININ KULLANIM TİPLERİNE, KULLANIM ALANLARINA VE İTKİ SİSTEMLERİNE GÖRE SINIFLANDIRILMASI.....	5
2.1. Kullanım Tiplerine Göre Yeni Nesil Hava Araçları	5
2.1.1. Yatay kalkış ve iniş insansız hava araçları.....	6
2.1.2. Dikey kalkış ve iniş insansız hava araçları.....	7
2.1.3. Hibrit insansız hava araçları	8
2.2. Kullanım Alanlarına Göre Yeni Nesil Hava Araçları	8
2.2.1. Altyapı	9
2.2.2. Sigortacılık	9
2.2.3. Medya ve eğlence	10
2.2.4. Telekomünikasyon.....	11
2.2.5. Arama ve kurtarma görevleri	12
2.2.6. Tarım	13
2.2.7. Güvenlik	13

2.2.8. Askeri görevler.....	14
2.2.9. Madencilik.....	15
2.2.10. Deniz ve su altı görevleri.....	15
2.2.11. Uzay görevi.....	16
2.2.12. Ulaşım	16
2.2.13. Tıbbi lojistik.....	17
2.2.14. Çeşitli uygulamalar	18
2.3. İtke Sistemlerine Göre Yeni Nesil Hava Araçları.....	20
2.3.1. Batarya kullanan yeni nesil hava araçları.....	19
2.3.2. Yakıt hücresi kullanan yeni nesil hava araçları	20
2.3.2.1. <i>Polimer elektrolit membranlı yakıt hücresi</i>	23
2.3.2.2. <i>Katı oksit yakıt hücresi</i>	25
2.3.2.3. <i>Doğrudan metanol yakıt hücresi</i>	26
2.3.3. Hibrit tahrik sistemini kullanan yeni nesil hava araçları	26
2.3.3.1. <i>Yakıt hücresi ve batarya uygulaması</i>	27
2.3.3.2. <i>Süper kapasitörlü hibrit tahrik uygulaması</i>	27
2.3.3.3. <i>Güneş bataryası ile hibrit tahrik uygulaması</i>	28
3. KENTSEL HAVA HAREKETLİLİĞİ.....	30
3.1. Elektrikli Dikey Kalkış ve İniş	34
3.2. Kentsel Ortamda eVTOL Mimarisi	35
3.2.1. Multikopter mimarisi.....	36
3.2.2. Yükselme ve seyir mimarisi	37
3.2.3. Tilt rotor mimarisi.....	37
3.2.4. Kanallı fan mimarisi.....	37
3.3. eVTOL’ler İle İlgili Zorluklar ve Engeller	38
3.3.1. Sürdürülebilir bir enerji kaynağı.....	39
3.3.2. Düşük irtifa bağlantısı için mobil ağlar	39
3.3.3. Kentsel hava trafik yönetimi	41
3.3.4. Kritik güvenlik ve sertifikalar	42
3.3.5. Rekabetçi hizmete dayalı fiyatlandırma.....	43
3.3.6. Sosyal kabul	44
4. VERTİPORT VE TASARIM KRİTERLERİ.....	46

4.1. Vertiport ve Tasarımı	46
4.2. İniş Alanı Tanımları.....	48
4.2.1. İniş ve kalkış alanı (TLOF).....	50
4.2.2. Son yaklaşma ve kalkış alanı (FATO)	51
4.2.3. Emniyet alanı (Safety Area).....	51
4.2.4. Kontrol boyutu (D)	52
4.2.5. Arıza durumu.....	52
4.2.6. Görerek uçuş kuralı	52
4.3. İniş Alanı İhtiyaçları.....	54
4.3.1. Şarj ve elektrik altyapısı	54
4.3.2. Yer güvenlik unsurları.....	54
4.3.2.1. Yangınla mücadele hususları	54
4.3.2.2. Güvenlik.....	55
4.3.2.3. Akımın aşağı sapması	56
4.3.2.4. Türbülans	56
4.3.2.5. Hava durumu bilgileri.....	57
4.3.2.6. Kış operasyonları.....	57
4.3.3. İşaretleme, aydınlatma ve görsel yardımcılar	57
4.3.3.1. Tanımlama sembolü	58
4.3.3.2. İniş ve kalkış alanı boyut/ağırlık sınırlama kutusu	59
4.3.3.3. Uçuş yolu hizalama opsiyonel işaretleme ve ışıklandırma	60
4.3.3.4. Işıklandırma	61
4.4. İniş Alanı Planlaması	64
4.4.1. İniş alanı tasarımı	67
4.4.2. İniş alanı kapasitesi	67
4.4.3. Apron kapasitesi	68
4.5. Havaalanındaki Vertiportlar	69
4.5.1. TLOF'un havaalanındaki konumu	69
4.5.2. FATO'nun havaalanındaki konumu.....	69
4.6. Vertiport Tasarım Konfigürasyonları	70
4.6.1. Tek topoloji	71
4.6.2. Uydu topolojisi	71

4.6.3. Doğrusal topoloji	71
4.6.4. İskele topolojisi	72
5. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER	73
5.1. Öneriler	75
KAYNAKÇA	76
ÖZGEÇMİŞ	



TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. İHA'ların sınıflandırılması	6
Tablo 4.1. İniş ve kalkış alanı boyutları	49
Table 4.2. ABD ve dünyanın geri kalanındaki diğer ülkelerin havaalanı planlaması	65
Tablo 4.3. VFR operasyonları için vertiport FATO merkezi ile pist merkez hattı arası tavsiye edilen minimum mesafe	70



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Sabit kanatlı İHA türleri	7
Şekil 2.2. Hibrit İHA'lar, VD200 uçan kanat, Google X-wing.....	8
Şekil 2.3. Kuleler arasında ilk pilot hattı taşıyan İHA.....	9
Şekil 2.4. İHA'nın ulaşılması zor ve insanlar için tehlikeli olabilecek yerlerde kullanımı	10
Şekil 2.5. Medya ve eğlence alanında İHA kullanımı	11
Şekil 2.6. Facebook-finishes-aquila-solar İHA	12
Şekil 2.7. Tarım alanında kullanılan İHA'lar	13
Şekil 2.8. İHA'ların askeri uygulamaları	14
Şekil 2.9. Madencilik alanında kullanılan İHA	15
Şekil 2.10. Deniz ve su altı görevlerinde kullanılan İHA'lar	16
Şekil 2.11. Uzay görevleri için sabit kanatlı İHA'lar; Northrop Grumman'ın sabit kanatlı Venüs gezgini, NASA'nın uçan kanadı Mars gezgini	16
Şekil 2.12. Kalp krizi geçiren bir hastada İHA kullanımı	18
Şekil 2.13. İnternet sağlama, İHA güneş paneli temizleme, diğer İHA'lar için pist durumu	18
Şekil 2.14. Bir İHA'da hibrit tahrik, bir yakıt hücresi-batarya-süper kapasitör güç kaynağı	28
Şekil 2.15. Güneş enerjisiyle çalışan İHA'lar	29
Şekil 3.1. 1951 Vertiport tasarımı, günümüzden vertiport tasarımı	30
Şekil 3.2. eVTOL örnekleri; Joby S2, Lilium Jet.....	35
Şekil 3.3. En yaygın eVTOL mimari örnekleri	36
Şekil 4.1. Lilium vertiport modeli; A-ped; B-kapı; C-terminal; D-taksi yolu.....	48
Şekil 4.2. TLOF, FATO ve SA ilişkisi ve boyutları.....	49
Şekil 4.3. Kontrol boyutu	49
Şekil 4.4. VFR vertiport yaklaşma/kalkış yüzeyleri.....	53
Şekil 4.5. Vertiport uyarı işareti	56
Şekil 4.6. Standart vertiport işaretlemesi.....	58
Şekil 4.7. Vertiport tanımlama sembolü.....	59
Şekil 4.8. TLOF boyut/ağırlık sınırlama kutusu.....	60
Şekil 4.9. Uçuş yolu hizalama işaretleme ve ışıklandırma	61

Şekil 4.10. TLOF/FATO çevre ışıklandırması	62
Şekil 4.11. Yükseltilmiş vertiport yapılandırma örneği	63
Şekil 4.12. Havaalanı içi vertiport örneği.....	70
Şekil 4.13. Vertiport topoloji türleri	72



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AAM	: Advanced Air Mobility (Gelişmiş Hava Hareketliliği)
ALP	: Airport Layout Plan (Havaalanı Yerleşim Planı)
ATC	: Air Traffic Control (Hava Trafik Kontrol)
ATM	: Air Traffic Management (Hava Trafik Yönetimi)
D	: Controlling dimension (Kontrol Boyutu)
DMFC	: Direct Methanol Fuel Cell (Doğrudan Metanol Yakıt Hücresi)
EASA	: European Aviation Safety Agency (Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı)
eVTOL	: Electric Vertical Take-Off And Landing Aircraft (Dikey İniş Kalkış Yapan Elektrikli Hava Aracı)
FAA	: Federal Aviation Administration (Amerika Birleşik Devletleri Federal Havacılık İdaresi)
FATO	: Final Approach And Takeoff Area (Son Yaklaşma ve Kalkış Alanı)
FC	: Fuel Cell (Yakıt hücresi)
GPS	: Global Positioning Systems (Küresel Konumlandırma Sistemi)
HTOL	: Horizontal Takeoff And Landing (Yatay Kalkış ve İniş)
ICAO	: International Civil Aviation Organization (Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü)
KHH	: Kentsel Hava Hareketliliği
LAANC	: Low-Altitude Authorization And Notification Service (Düşük İrtifa Yetkilendirme Ve Bildirim)
LTA	: Lighter Than Air (Havadan Daha Hafif)
MRO	: Maintenance, Repair and Overhaul (Bakım, Onarım ve Revizyon)
NASA	: National Aeronautics and Space Administration (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)
NATA	: National Air Transportation Association (Ulusal Hava Taşımacılığı Birliği)
NEPA	: National Environmental Policy Act (Ulusal Çevre Politikası Yasası)
PEM	: Proton Exchange Membrane (Proton Değişim Zarı)
PEMFC	: Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Hücresi)

PV	: Photovoltaic (Fotovoltaik)
SA	: Safety Area (Güvenlik Alanı)
SOFC	: Solid Oxide Fuel Cell (Katı Oksit Yakıt Hücresi)
TLOF	: Touchdown and Lift-Off Area (İniş ve Kalkış Alanı)
UAM	: Urban Air Mobility (Kentsel Hava Hareketliliği)
UAS	: Unmanned Aerial Systems (İnsansız Hava Sistemleri)
UAV	: Unmanned Aerial Vehicle (İnsansız Hava Aracı)
UTM	: Unmanned Aircraft Systems Traffic Management (İnsansız Uçak Sistemleri Trafik Yönetimi)
VFR	: Visual Flight Rule (Görsel Uçuş Kuralı)
VTOL	: Vertical Take-Off And Landing (Dikey Kalkış ve İniş)

1. GİRİŞ

İnsansız hava aracı (UAV-Unmanned Aerial Vehicle), insansız hava sistemi (UAS-Unmanned Aircraft System) veya drone tanımı, pilotsuz ve havada yolcu taşıyabilecek uçaklar olarak yapılmaktadır (Gupta, Ghonge ve Jawandhiya, 2013). Bu uçaklar yüksek çözünürlüklü kameralar, termal kameralar, lazer tarayıcılar ve navigasyon için konum sensörleri gibi faydalı yük taşıyan donanımlara sahiptirler. İHA'ların fotoğrafçılık, hobi ve ticari amaçlarla kullanımı dünya çapında artmakla birlikte askeri ve bilimsel faydaları da tercih edilme nedenleri arasında ön planda yer almaktadır. (International Civil Aviation Organization, 2011).

İHA sadece havada uçan bir uçak olarak düşünülmemelidir. İHA uçağın kendisi, uçaktaki faydalı yük ve yer kontrol istasyonu olmak üzere üç ana unsurdan oluşmaktadır (Narayanan ve Ibe, 2015). Son zamanlarda İHA'lar ile ilgili donanım, yazılım ve ağılarda önemli yenilikler gözlemlenmektedir. İHA'ların yapısında daha hafif olan kompozit malzemelerin kullanılması ve küresel konumlandırma sisteminin (GPS-Global Positioning Systems) entegrasyonu İHA'ların daha verimli uçuşlar gerçekleştirmesini sağlamaktadır. Lityum batarya teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak da İHA'lar daha uzun mesafelere uçabilme imkân ve kabiliyetine sahip olmuştur (Raffaello, 2014).

Bilişim teknolojilerinde 1980'li yıllarda başlayan hızlı gelişmeler, şirketlerin faaliyetlerini yeniden düzenlemelerini zorunlu hale getirmiş ve modern ekonomide köklü değişiklikleri beraberinde getirmiştir. Günümüzde İHA teknolojisi, altyapıdan tarıma kadar birçok sektörü büyük ölçüde etkileyerek bilgi teknolojilerindeki önemli gelişmelere benzer etkiler yaratmaktadır (Mazur, Wisniewski ve McMillan, 2016). Bilgi teknolojilerindeki bu gelişmelere paralel olarak İHA'ların ekonominin her alanındaki etkileri çok kısa bir süre içerisinde görülmeye başlanacağı değerlendirilmektedir.

Teknolojik imkânların artması, yasal düzenlemeler ve yatırım desteğindeki gelişmeler İHA'ların birçok yeni alanda kullanılmasını sağlamıştır. Bu alanlarda İHA teknolojisi yeni iş ve operasyon modellerinin oluşmasına neden olmuştur. Bazı sektörlerde düşük maliyet ve yüksek kalite, bazı sektörlerde ise teslimat süresi ve yük kapasitesi İHA'ların kullanılmasında belirleyici olmuştur. İHA'ların uçuş mesafelerini hızlı bir şekilde katedebilmeleri bu hava araçlarının mobil ve yüksek veri kalitesi gerektiren sektörlerde kullanımlarını oldukça cazip hale getirmiştir. Altyapıdan tarıma kadar büyük sermayeli projelerin günlük faaliyetlerinde İHA'ların kullanması bu

sektörlere önemli faydalar sağlamaktadır. İHA'ların sigortacılık ve madencilik sektörlerindeki hızlı ilerleme potansiyeline benzer şekilde ulaşım sektöründeki mevcut teslimat süresinde büyük ölçüde kısılacağı öngörülmektedir.

1950'li yıllardan itibaren üzerinde çalışmalar yapılan KHH kavramı (Malano, 2021) batarya teknolojisi, sensör teknolojisi, mikro işlemciler, elektrik tahrik sistemindeki gelişmeler ve otomasyon alanındaki yeni teknolojilerin hayata geçmesi ile tekrar canlanmaya başlamıştır. KHH sahip olduğu avantajlar nedeniyle mevcut ulaştırma sistemini zenginleştirme potansiyeline sahiptir. Altran, (2020) eVTOL hava araçlarının 2030 yılına kadar 322 milyar ABD doları bir piyasa değerine ulaşmasının beklendiğini tahmin etmektedir. Hader vd., (2020) ise KHH seyahatlerinden elde edilen yıllık gelirin 2050 yılına kadar 90 milyar ABD dolarına ulaşacağını, Morgan Stanley ise KHH tarafından desteklenen toplam küresel pazarın 2040 yılına kadar 1,5 trilyon ABD dolarına ulaşacağını tahmin etmektedir (Morgan Stanley Research, 2018).

eVTOL hava aracı trafiğinin hacmi arttıkça şehir gökyüzünü güvende tutmak için gerçek zamanlıya yakın iletişim imkânı sunan 5G iletişimin kullanılmasının eVTOL hava araçları için önemli olacağı değerlendirilmektedir. 5G iletişimin aşırı yoğun hava koşullarında uçaktan uçağa ve uçaktan yere iletişim içinde faydalı olacağı düşünülmektedir. Gerek 5G iletişim ağları teknolojisindeki gelişmeler gerekse elektrik itki teknolojilerindeki ilerlemeler KHH kullanılarak trafik sorunun çözülebileceği düşüncesini desteklemektedir. Bunun sonucu olarakta küresel iklim değişikliği ile mücadelede eVTOL hava araçlarının diğer hava araçlarından daha başarılı olacağı öngörülmektedir (Baur vd., 2018; Pradeep, 2019).

KHH kavramının tekrar ön plana çıkmasıyla kentsel bölgelerde faaliyete geçecek eVTOL hava araçlarının üretimi giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Günümüzde Volocopter, Lilium Havacılık ve Airbus gibi büyük şirketler eVTOL araçlara önemli yatırımlar yapmaktadır. Bu yatırımlara bağlı olarakta eVTOL hava araçlarının iniş ve kalkışını gerçekleştireceği vertiport alanlarının inşası üzerinde düşünülmesi gereken önemli bir konu haline gelmektedir (Peisen vd., 1994). Bu sorunun çözümü kapsamında ilk somut adım olarak 2019 yılında dünyanın ilk vertiport terminali inşaatı Skyports tarafından Singapur'daki bir sergi için inşa edilmiştir ([http-1](http://1)).

Amerika Birleşik Devletleri Federal Havacılık İdaresi (FAA-Federal Aviation Administration) ve Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı (EASA-European Aviation Safety Agency) tarafından KHH kapsamında yapılan çalışmalar yasal düzenlemeler ile

standart hale getirilmeye çalışılmaktadır. Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA-National Aeronautics and Space Administration) şehir içi hava hareketliliği alanında önemli araştırmalar gerçekleştirmektedir.

Bu süreçte vertiportların kurulacağı şehrin ulaşım altyapısı ve diğer kritik ulaşım noktaları göz önünde bulundurulması gereken önemli hususlardır. Vertiport alanları ve eVTOL hava araçlarının uçuş hatları tespit edilerek şehir içi ulaşılabilirlik probleminin çözülmesine yardım edilmesi ve kentsel planlama devamlılığının sağlanması ancak kapsamlı bir program ile gerçekleştirilmesi söz konusu olacaktır.

Bu noktadan hareketle, yeni nesil hava araçları için iniş ve kalkış alanı tasarım kriterlerinin belirlenmesi konulu tez çalışmasında şehirlerdeki hava hareketliliğine yeni bir yaklaşım getirilmesi hedeflenmiştir. Yapılan tez çalışmasında KHH'nin değerlendirilmesi yapılarak en uygun vertiport tasarım kriterlerinin belirlenmesine yönelik kapsamlı bir literatür çalışması yapılmıştır.

1.1. Amaç ve Kapsam

Tez çalışmasındaki amaç, KHH'nin uygulanmasıyla kentsel bölgelerdeki en büyük sorunların başında gelen ulaşım probleminin çözümünün büyük ölçüde sağlanacağı düşüncesidir. KHH'nin planlanmasında sosyoekonomik, teknik/teknolojik araştırmalar ve vertiportlar için tasarım kriterlerinin belirlenmesi öncelikli konulardır. Bu yaklaşımla tezde ulaşmak istenilen hedef, KHH kapsamında kullanılacak olan eVTOL hava araçlarının araştırılması ve bu eVTOL hava araçları için gerekli olan vertiport tasarım kriterlerinin belirlenmesi olmuştur.

KHH'nin planlanması faaliyeti birçok bileşenin birlikte değerlendirildiği ve bu bileşenlerin değerlendirilmesinin disiplinli bir çalışmayı gerektirdiği uzun bir süreçtir. Bu süreçte yapılan araştırmalar ileri derecede bir uzmanlık gerektiren faaliyetlerden oluşmaktadır. Bu sebepten dolayı yüksek lisans tezinin kapsamı, KHH'de kullanılması planlanan ve birçok şirket tarafından ciddi yatırımlar yapılan eVTOL hava araçları ve bu eVTOL hava araçları tarafından kullanılması için tasarlanan vertiportların tasarım kriterlerinin belirlenmesiyle sınırlandırılmıştır.

1.2. Önem

KHH hızlı ve esnek yeni bir ulaşım şekli olarak mevcut ulaşım ağını zenginleştirme potansiyeline sahip gelişmekte olan bir ulaşım türüdür. eVTOL hava araçlarının kullanımı ise sera gazı emisyonlarını azaltacak ve şehir içi tıkanıklık

sorununu ortadan kaldıracak olması bu araçların gelecek için umut verici olduğu düşüncesini ortaya çıkarmaktadır. Aynı zamanda kentsel ulaşım için tasarlanan eVTOL hava araçları, ulaşım sonucu oluşan sera gazı emisyon miktarının azaltılması ve bunun sonucu olarakta küresel iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynayacaktır. Ayrıca eVTOL hava araçlarının elektrikli olarak tasarlanması ve buna bağlı olarakta gürültü seviyesinin düşük olması nedeniyle kara ulaşımından kaynaklanan gürültü seviyesinde önemli azalmalar görülecektir (Baur vd., 2018, Chibuogu; National Air Transportation Association, 2019; Shin vd., 2018).

KHH'nin sabit güzergâhlar olmaksızın gerçekleştirilebilmesi, şehir arazisinin kullanımına yapılacak müdahalelerin asgari seviyede tutulmasını ve hâlihazırda kullanılan ulaşım sistemiyle basit bir entegrasyonun sağlanmasını gerçekleştirecektir (Antcliff, Moore ve Goodrich, 2016). Sonuç olarak eVTOL hava araçlarının yolcu alıp bırakacağı vertiport yapısının kent içerisinde uygun yerlere yerleştirilmeleri önemli bir zorunluluktur. Yüksek lisans tezinde bu vertiportlar ile ilgili tasarım kriterleri kapsamlı bir çalışmayla ortaya konmuştur.

1.3. Kısıtlılıklar

Tez çalışması esnasında karşılaşılan problemleri konuların en başında, bu tez konusuyla ilişkili yapılan çalışmaların ve araştırma konularının yetersiz seviyede olmasıdır. Yapılan araştırmalarda, kentsel hava ulaşımıyla ilgili birçok araştırmanın, yoğun olarak kullanılması düşünülen hava araçlarının teknik özellikleri üzerine olduğu tespit edilmiştir. Literatür araştırmasında eVTOL hava araçlarının kullanacağı vertiport tasarımları ile ilgili yapılmış çalışmaların sınırlı düzeyde kaldığı görülmüştür.

Diğer önemli bir kısıtlama ise vertiportlara alan tahsis etme faaliyetlerinde yapılacak düzenlemelerle ilgili standartların tam olarak belirlenmemesidir. eVTOL hava araçlarına ait vertiportlar ile ilgili son tasarım rehberi FAA tarafından 21 Eylül 2022 tarihinde yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. eVTOL hava araçları ve teknolojisinde yaşanacak gelişmeler uygulanacak standartların değişkenlikler göstermesine sebep olacaktır.

eVTOL hava araçlarının kullanımı ile kentsel hava ulaşımının toplumun büyük kısmı tarafından kabul görüp görmeyeceği konusundaki belirsizlik devam ettirmektedir. Yapılan literatür araştırmasında bu konuyla ilgili kabul edilebilir ve uygulanabilir çalışmaların tatmin edici seviyede olmadığı tespit edilmiştir.

2. YENİ NESİL HAVA ARAÇLARININ KULLANIM TİPLERİNE, KULLANIM ALANLARINA VE İTKİ SİSTEMLERİNE GÖRE SINIFLANDIRILMASI

İHA teknolojisinin endüstriyel süreçlerde, iletişim ve ağ teknolojilerindeki ilerlemesi bu araçların sivil, ticari ve sosyal uygulamalarda kullanımlarını arttırmıştır. Bu talep dünya çapında planları değiştiren bir endüstri yaratmıştır. Dünya çapında İHA'ların tercih edilmesindeki başlıca sebepler finansal olarak kolay ulaşılabilir ve işletilebilir olması ve elde edilen sonuçların kesinliği olarak özetlenebilir.

İHA ilk olarak yaklaşık 40 yıl önce tanıtıldı ve o zamandan günümüze hem ticari hem de özel kullanım uygulamaları önemli ölçüde artmıştır. Son on yılda ticari ve kamusal farklı uygulama alanlarında İHA kullanım ihtiyacı ön plana çıkmıştır. Günümüzde bu talep ağırlıklı olarak askeri alanlarda olmakla birlikte (Townsend vd., 2020) eğlence ve kamusal alanlarda kullanımının katlanarak artması beklenmektedir.

İHA'ların döner kanatlı tip ve sabit kanatlı tip olarak adlandırılan iki ana tipi mevcuttur. Döner kanatlı tip birden fazla rotor kullanarak hareket eden bir gövdeden oluşur iken sabit kanatlı tip ise gövdenin her iki tarafında sabit bir kanadı olan genel bir uçak görünümüne sahiptir. Döner kanatlı İHA'lar dikey olarak kalkış ve iniş yapabildikleri için daha popüler olma eğiliminde iken bu tür İHA'ların bir fırlatıcı veya piste ihtiyaç duymamaları kendilerine önemli bir avantaj sağlamaktadır. Bu tür İHA'ların havada asılı kalmaları ve çok çevik olmaları daha hassas manevra kabiliyeti uygulamalarını sağlamaktadır. Döner kanat tiplerin küçük yük kapasiteleri, artan güç gereksinimleri, çalışma süresinin kısalığı ve maliyetinin yüksekliği ise dezavantajları olarak sayılabilir.

2.1. Kullanım Tiplerine Göre Yeni Nesil Hava Araçları

İHA'lar yatay kalkış ve iniş (HTOL-Horizontal Take-off And Landing), dikey kalkış ve iniş (VTOL-Vertical Take-Off And Landing) ve hibrit insansız hava araçları olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmıştır. İHA'ların sınıflandırılması Tablo 2.1'de sunulmuştur (Darvishpoor vd., 2020).

2.1.1. Yatay kalkış ve iniş insansız hava araçları

Genel olarak HTOL yapan İHA kalkış için bir piste ihtiyaç duyar iken, gerekli minimum kalkış hızına ulaşmak için yatay bir rotada hareket etmesi gerekir (Hassanalian ve Abdelkefi, 2017). Bu gereklilik motorlar ve rotorlar kullanılarak veya mancınıkla fırlatılan İHA gibi bir ilk harici itme kuvveti kullanılarak karşılanmaktadır.

Ayrıca bu tip insansız hava araçları için iniş manevrası genellikle yatay olarak yapılmaktadır.

Tablo 2.1: İHA'ların sınıflandırılması (Darvishpoor vd., 2020)

Dikey kalkış ve iniş İHA	Yatay kalkış ve iniş İHA	Hibrit İHA
Monorotorlar İHA	Sabit kanatlı İHA	Eğimli İHA
Multirotorlar İHA	Dönüşen kanatlı İHA	Eğimsiz İHA
Coanda etkili İHA	Magnus etkili İHA	
Havadan daha hafif İHA	İnsansız yamaç paraşütü İHA	
İnsansız helikopterler İHA		
Kanat rotorlar İHA		
Sikloopter İHA		

Sabit kanatlı İHA kalkış için kanatlarını kullanan klasik bir İHA uygulamasının sınıflandırılmış tipidir. Bu tip İHA'lar icra ettikleri göreve bağlı olarak bazen bir çift kanattan daha fazla farklı kanat tasarımlarına da sahip olabilirler (Hassanalian ve Abdelkefi, 2017; Stempeck, Hassanalian ve Abdelkefi, 2018). Sabit kanatlı İHA'ların konfigürasyonları kuyruk, yerleştirme, biçim ve sayı açısından farklılıklar göstermekle birlikte uçuş mekanizması uçuş kanat yüzeylerinin kullanılarak üretilen kaldırmaya dayanmaktadır. Bu farklılıklar kullanılarak İHA'ların manevra kabiliyetinin, yük taşıma kapasitesinin ve performans özelliklerinin artırılması amaçlanmaktadır.

Sabit kanatlı İHA'lar kanat, yatay kuyruk, dikey kuyruk ve gövdeden oluşur iken motor ise gerekli kaldırmayı sağlamaktadır. Sabit kanatlı İHA'lar basit bir yapıya sahip olup gerekli tahriki ise yakıt motorlarını, akülü elektrik motorlarını ve güneş enerjisini kullanarak sağlarlar (Guido vd., 2019; Hassanalian, Radmanesh ve Sedaghat, 2014). Bu hava araçlarının geniş bir irtifa ve mesafe aralığında uçabilme yetenekleri olmasına rağmen havada asılı uçuşu gerçekleştiremezler ve havalanma/konma faaliyeti içinde bir pistin olması gerekir. Mevcut bu eksikliklerine rağmen en yaygın kullanılan İHA sabit kanatlı İHA olarak bilinmektedirler. Şekil 2.1'de en yaygın olarak kullanılan sabit kanatlı İHA türleri verilmiştir (http-2, http-3).

Farklı İHA'lar ile kıyaslandığında sabit kanatlı İHA'ların en gelişmiş tasarıma sahip olduğu ve üretiminin en kolay olduğu görülmektedir. İHA'ların en çok kullanılan uygulama alanları altyapı, telekomünikasyon, tarım, kurtarma, keşif, teslimat, görüntüleme, savunma ve tıbbi lojistik faaliyetleri olarak bilinmektedir. İHA'ların bu

geniş kullanım alanı birçok şirket ve araştırmacının sabit kanatlı İHA'nın geliştirilmesi için çaba harcamasını sağlamaktadır.

Sabit kanatlı İHA'lar düşük kullanım maliyeti, artırılmış uçuş dayanıklılığı ve tehlikeli görevlerde kullanılabilme gibi birçok avantaja sahiptir (Panagiotou ve Yakinthos, 2019). Büyük sabit kanatlı İHA'lar yüksek irtifa ve yüksek hızlarda çok iyi performans gösterir iken küçük kanatlı sahip İHA'lar düşük hızları ve irtifaları nedeniyle bazı zorluklar ile karşılaşabilirler. Bu İHA'lar rüzgâr hızına ve yönüne karşı çok hassas oldukları için yüksek düzeyde türbülansın olduğu yerlerde düşük irtifalarda uçabilirler.



Şekil 2.1. Sabit kanatlı İHA türleri (<http-2>, <http-3>)

2.1.2. Dikey kalkış ve iniş insansız hava araçları

Genel olarak VTOL İHA'lar kalkış ve iniş için bir piste ihtiyaç duymazlar. Bu tip İHA'lar dikey kalkış, iniş ve havada asılı uçuş için tahrik sistemlerini kullanırlar. VTOL İHA'lar helikopter modunu kullanarak dikey olarak iniş ve kalkış yapabilir iken uçak modunda da yüksek hızla ileri uçuş gerçekleştirebilirler. Bu tip İHA'lar sabit kanatlı uçakların hız ve yakıt verimliliğini döner kanatlı uçakların ise havada asılı kalma ve esnekliği ile birleştiren mükemmel uçaklar olarak bilinirler.

Bu tip İHA'lar gövde profiline göre değişen irtifalarda uçabilirler ancak bu uçuşlar genellikle alçak irtifalarda gerçekleştirilir. İHA'lar yüksek manevra kabiliyetleri sayesinde karmaşık bir kentsel yapı ortamında bina hasar analizi ve kurtarma operasyonlarını icra eder iken, havada asılı kalma kabiliyeti ile de olay alanının tespiti ve görüntü aktarımı için önemli bir potansiyele sahiptirler. Küçük boyutları bu İHA'ların bilimsel araştırma uygulamalarında kullanılma potansiyelini büyük oranda arttırmaktadır (Watts, Ambrosia ve Hinkley, 2012).

VTOL İHA'ların iniş ve kalkış için bir piste ihtiyaç duymaması ve havada süzülerek uzun süre uçabilmesi araştırmacıların ve ticari firmaların yakın ilgisini

çekmelerine neden olmaktadır (Jo ve Kwon, 2017). Dikey iniş kalkış yapabilmeleri ve hem çok rotorlu hem de sabit kanatlı İHA avantajlarına sahip olmaları bu İHA'lara olan talebi gün geçtikçe arttırmaktadır (Yu vd., 2016). Dünyadaki birçok ülke VTOL İHA'ların avantajlarını geliştirmek amacıyla bu İHA'lar üzerinde daha fazla araştırma yapmak için birçok fona yatırım yapmaktadır (Zhao, Zhou ve Zhu, 2018).

2.1.3. Hibrit insansız hava araçları

Hibrit İHA'lar VTOL yapan İHA'lar ile HTOL yapan hava araçların birleşimidir. Bu tip İHA kategorisi daha fazla verimlilik ve performansı ile aynı anda her iki grup hava aracının avantajlarına sahiptir. Son yıllarda hibrit insansız hava araçları araştırmacıların ve şirketlerin dikkatini önemli ölçüde çekmektedir. Hibrit İHA'ların gelişimi hala emekleme aşamasında olmasına rağmen bu tip İHA'ların tasarım felsefesi dinamik modelleme, kontrol, rehberlik, navigasyon ve sağlamlık için önemli bir alan oluşturmaktadır.

Hibrit İHA'ların büyük bir grubu eğimli gövde, eğimli kanat ve eğimli rotor uçakları dâhil olmak üzere yatay kalkış ve iniş ile dikey kalkış ve iniş konfigürasyonları arasında geçiş yapmak için devirme mekanizmalarını kullanırken başka bir yaklaşım ise çift sistemli ve döner kanatlı uçaklar gibi devrilmeyen çözümler kullanmaktır. Hibrit İHA'ların uçuşu iniş/kalkış, geçiş aşaması ve seyir aşaması olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Şekil 2.2'de hibrit İHA örnekleri verilmiştir (NavalDrones, 2020), Google X-wing (<http-4>).



Şekil 2.2. Hibrit İHA'lar, VD200 uçan kanat (NavalDrones, 2020), Google X-wing (<http-4>)

2.2. Kullanım Alanlarına Göre Yeni Nesil Hava Araçları

1980'li yıllarda başlayan bilgi teknolojisindeki çok hızlı gelişmeler şirketlerin faaliyetlerini yeniden düzenlemelerini zorunlu kılarak modern ekonomide köklü değişiklikleri beraberinde getirmiştir. Günümüzde bilgi teknolojilerindeki bu hızlı

gelişmeler altyapıdan tarıma kadar tüm sektörleri büyük ölçüde etkiler iken İHA teknolojisinde de benzer etkiler yaratmaya devam etmektedir (Mazur, Wisniewski ve McMillan, 2016). Sektör temsilcileri İHA'ların kısa süre içerisinde ekonominin her alanında etkilerinin görülmeye başlayacağını değerlendirilmektedir.

İHA'ların uçuş mesafelerini hızlı ve kısa bir süre içinde gerçekleştirmeleri mobil ve yüksek veri kalitesi gerektiren sektörlerde kullanımlarını oldukça cazip hale getirmiştir. Altyapı ve tarım gibi büyük sermayeli projelerde İHA'ların günlük aktivitelerde kullanılması önemli faydalar sağlamaktadır. İHA'ların kullanılmasında bazı sektörlerde düşük maliyet ve yüksek kalite, bazı sektörlerde ise teslimat süresi ve yük kapasitesi belirleyici olmuştur.

2.2.1. Altyapı

İHA'ların son zamanlarda çeşitli altyapı birimlerinde büyük ölçüde kullanılması bu kullanımın zamanla kalıcı hale gelerek daha da gelişeceği sonucunu ortaya çıkartmaktadır. İHA'lar tehlikeli işleri başarılı bir şekilde gerçekleştirmekle beraber farklı verileri kolay bir şekilde, hassas ve düşük maliyetle yerine getirmektedir. Şekil 2.3'de kuleler arasında ilk pilot hattı taşıyan İHA gösterilmiştir (http-5). Sivil altyapı işlerinde genellikle küçük boyutlu İHA'lar kullanılmakta olup bu İHA'ların kullanımı kolaydır ve altyapı ile ilgili faaliyetlerde kullanım esnekliğine sahiptirler.



Şekil 2.3. Kuleler arasında ilk pilot hattı taşıyan İHA (http-5)

İnşaat sürecinde gerçek zamanlı farkındalık ve doğruluk sağlamak çok zordur. İHA'ların bu zorlu süreçte gerçek verileri sağlamada başarılı olacağı kabul görmektedir. İHA'lar inşaat öncesi süreçte saha verilerini sağlıklı bir şekilde elde ederek tasarımın daha hızlı ve kaliteli olmasında önemli rol oynarlar. İHA'lar yapım aşamasında da

inşaat sahalarını hızlı bir şekilde gözlemleyerek ilerlemeye yönelik raporlar için kesin verileri toplayabilirler.

Günümüzde bakım işlerinin büyük çoğunluğu manuel olarak yapılmakta ve kişisel denetimlerle sağlanmaktadır. Yaşanan bu süreç ise yavaş, maliyetli ve düşük kalitede sonuçların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. İHA'nın bakım alanında kullanılması ile bu sürecin hızlanması, maliyetlerin düşmesi ve kalitede düzeyinde büyük bir ilerleme sağlanmıştır.

2.2.2. Sigortacılık

Günümüzde sigortacılık sektörünü etkileyen iki olumsuz eğilim doğal afetlerden oluşan hasarlardaki artış ve dolandırıcılıktaki artış olayıdır. Sigortacılık sektöründe doğal afetlerden kaynaklanan sigorta talepleri son zamanlarda artış eğilimindedir. Bu yüzden doğal afetlere maruz kalan bölgelerin İHA'lar ile izlenerek gelişen durumların izleme merkezlerine aktarılması hızlı tepki vermek adına hayati öneme haizdir.

Sigorta işlemlerinde risk değerlendirmesi yapar iken İHA'ları kullanmak oluşabilecek birçok sorunun çözümünde faydası olacaktır. İHA'lardan sağlanan veriler sayesinde doğru risk yönetimi yapılarak sigortalama süreçleri desteklenebilir. Sigorta Bilgi Enstitüsü'nden elde edilen bilgilerde mülk ve kaza dolandırıcılığının yıllık maliyeti 32 milyar ABD doları olmaktadır (<http-6>).



Şekil 2.4. İHA'nın ulaşılması zor ve insanlar için tehlikeli olabilecek yerlerde kullanımı (<http-7>)

İHA'lar sigorta şirketleri tarafından hasarı tespit etme ve hasarı değerlendirmede müşterilerine daha hızlı ve daha ucuz bir imkân sağlamaktadır. İHA'lar ulaşım yolu, mahsuller ve diğer etkenlerin durumu hakkında bilgi toplayarak hem hasar değerlendirme sürecini iyileştirebilir hem de hayat kurtarmak için de gerekli bilgileri

sağlayabilirler. Aviva tarafından Ocak 2016 tarihinde İngiltere’de meydana gelen bir sel hasarının değerlendirilmesi için İHA’ların kullanması bu duruma örnek olarak gösterilebilir. İHA’ların bu olayda kullanım maksadı şirket çalışanlarını karadan yönlendirmek olmasına rağmen İHA sel hasarlarıyla ilgili detaylı bir değerlendirme sunmuştur. Şekil 2.4’te ulaşılması zor ve insanlar için tehlikeli olabilecek yerlerde İHA kullanımı gösterilmiştir (<http-7>).

2.2.3. Medya ve eğlence

Gelişen teknolojiye paralel olarak İHA destekli çözümleri kullanan sektörlerden bir diğeri medya ve eğlence sektörüdür. İHA’nın medya ve eğlence sektöründe yaygın olarak kullanıldığı alan ise hava fotoğrafçılığı alanıdır. Skyfall, The Wolf of Wall Street ve Harry Potter gibi filmlerin çekimlerinde İHA kullanılmış ve çok iyi sonuçlar elde edilmiştir. İHA yaban hayatı belgesellerinde sık bir şekilde kullanılmaktadır. National Geographic, Afrika kıtasındaki aslan faaliyetlerini İHA kullanarak filme almaktadır. Şekil 2.5’de İHA’ların medya ve eğlence alanında kullanımı verilmiştir (<http-8>).



Şekil 2.5. Medya ve eğlence alanında İHA kullanımı (<http-8>)

Bisiklet yarışları gibi büyük spor organizasyonlarında yarışmacıları kayda almak için motosikletler kullanılarak akışlar helikopter kullanılarak tv istasyonunun kontrol istasyonuna gönderilmektedir. Helikopteri kullanmak maliyetli arttırdığı için İHA aktarma altyapısıyla donatılabilir ve video akışlarını iletmek için ise konumunu optimize edebilir. İHA kullanılarak reklam ve sinema filmlerinin çekiminin yapılması günümüzde sıkça kullanılan bir yöntemdir.

2.2.4. Telekomünikasyon

İHA'lar telekomünikasyon sektöründe şirketlerin karşılaştıkları en zor görevlerin bazılarında aktif olarak görev yapabilirler. İHA'lar bakım sistemini optimizasyon ve maliyet gibi sorunlardan arındırarak bu sektöre yardımcı olmaktadır. İHA'lar aynı zamanda telekomünikasyon sinyallerinin yayımında kullanılarak altyapı hizmetlerine katkı sağlamaktadırlar. İHA'lar video, ölçüm, resim ve okuma bilgilerini alarak anten denetiminin yapılmasına yardımcı olurlar.

Çalışan kişiler yerine İHA'ların kullanılmasının birçok avantajı vardır. Yüksek kulelere tırmanmada işçilerin kullanılması özellikle kötü hava şartlarında yaralanma ve can kaybı riski oluşturmaktadır. İHA'ları kullanmanın başka bir avantajı ise az maliyetli ve daha hızlı olmalarıdır. Bir İHA'yı kuleye tırmanmada kullanmak bir çalışanın gerekli ekipmanı kurarak kuleye tırmanmasından daha hızlı olmaktadır. Utrecht'te bir stadyum için anten direkleri testi alışılmış tekniklerle bir haftada yapılabilir iken, T-Mobile İHA'ları kullanarak bu işlemin 15 dakikada gerçekleştirilebileceği ispatlamıştır (<http-9>).



Şekil 2.6. Facebook-finishes-aquila-solar İHA (<http-10>)

Facebook şirketi dünya çapında internet hizmetlerine düşük ücret karşılığında erişim sunma girişiminin bir parçası olarak güneş enerjisi ile çalışan ticari uçaklardan çok daha yüksek bir irtifada uçacak olmasından dolayı hava olaylarından etkilenmeyecek ve 3 ile 6 ay arasında uçuş gerçekleştirebilecek olan Aquila İHA'larını kullanmayı planlamaktadır. Facebook bu faaliyetin sadece projesi için gerekli fiziksel altyapı hizmetini geliştirmeyi diğer faaliyetleri ise telekomünikasyonla ilgili şirketlere vermeyi amaçlamaktadır. Şekil 2.6'da Facebook-finishes-aquila-solar İHA'sı gösterilmiştir (<http-10>).

2.2.5. Arama ve kurtarma görevleri

Herhangi bir arama ve kurtarma görevi için hızlı müdahalenin esas olması İHA'ları bu tür görevlerde insanlı hava araçlarından daha cazip hale getirmektedir. İHA'lar arama ve kurtarma operasyonlarında çevreyi araştırmak ve kanıt toplamak için kullanılmaktadır. Arama ve kurtarma görevlerinde görevi gerçekleştirmek için sınırlı zaman, potansiyel insan hayatı kaybı ve afet sahneleri, ormanlar ve düşmanca operasyonel ortamlar gibi kısıtlamalar vardır. İHA'lar fırtına, sel, kuraklık, deprem, volkanik patlamalar, yangınlar, kazalar gibi çeşitli doğal ve insan kaynaklı afetlerde ve acil durumlarda potansiyel olarak kullanılmaktadır.

İHA'nın acil müdahale ile ilgili olarak doğal afet zamanlarında da faydalı olduğu kanıtlanmıştır. İHA kullanım alanları meydana gelen hasarların sonradan değerlendirilmesinden, kurbanların bulunmasına ve yardım sağlanmasına kadar uzanabilmektedir. İHA'lar orman yangınlarının ilerlemesini izleyerek orman yangınları ile mücadele ederek ve afete eğilimli bölgelerdeki hava değişikliklerini mobil izleme yoluyla etkin bir şekilde takip ederek afet önlemede yardımcı olmaktadır.

2.2.6. Tarım

İHA'lar tarım sektöründe sulama, ilaçlama, toprak analizi, ekim ve mahsul izleme faaliyetlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir (Ahirwar vd., 2019). İHA teknolojisi düşük maliyet ve mahsulün izlenerek gerekli önlemlerin alınması konusundaki başarısından dolayı tarım sektöründeki üreticileri cezbetmektedir. İHA'lar hasat için doğru zamanı seçmekten toprağı analiz etmeye ve tohum ekmeye kadar bir mahsulün yaşam döngüsünün her aşamasında kullanılmaktadır.



Şekil 2.7. Tarım alanında kullanılan İHA'lar (<http-11>; Lantos, 2018)

İHA'lar ayrıca mahsul ilaçlama faaliyetlerini de başarı ile yürütmektedir. Şekil 2.7'de tarım alanında ilaçlama faaliyetinde kullanılan İHA'lar gösterilmiştir (<http-11>;

Lantos, 2018). İHA'nın kullanım kolaylığına ve düşük maliyete sahip olması nedeniyle ürün büyümesi ve verimlilik açısından tarım sektörüne önemli hizmetler sunmaya devam edeceği öngörülmektedir. İHA kullanımı tarımın önemli ölçüde verilerle desteklenen bir sektör olmasını sağlayarak mahsullerde önemli artış sağlamaktadır.

2.2.7. Güvenlik

İHA'lar hızları, boyutları ve manevra kabiliyetleri ile mevcut teknolojiye göre görüntüleme görevlerinin daha hızlı ve daha etkin bir şekilde gerçekleştirilmesine yardımcı olmaktadır. İHA'lar ulaşılması zor ve geniş çaplı bölgelere hızlı bir şekilde ulaşarak operatörlerin geleneksel yöntemlerle yaptığı izleme görevlerini daha etkin şekilde yapmalarına imkân sağlarlar. İHA'lar canlı akış sağlayarak, güvenli mesafelerden nesneleri takip ederek ve geniş bir alanı tarayarak müdahale ekibinin bir bölgeye yapılacağı giriş için o bölgenin güvenli olup olmadığının uzaktan keşfini ve kaza değerlendirmesini yapabilirler.

2.2.8. Askeri görevler

Askeri görevlerde kullanılan İHA'lar, mühimmat bırakma, füze fırlatma, iletişim kesintisi casusluğu ve tıbbi faaliyetlerde kullanılmaktadır. Şekil 2.8'de İHA'ların askeri uygulama alanları gösterilmiştir (http-17; http-18). Askeri görevler için en uygun konfigürasyon sabit kanatlı İHA'lardır. Son zamanlarda çok rotorlu İHA'lar özellikle dört rotorlular görüntüleme uygulamalarının yanı sıra operasyonel ve muharebe görevlerinde kullanılmıştır. İHA'ların dört rotorlu bazı versiyonları ise hafif ve ağır silahlarla silahlandırılarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.8. İHA'ların askeri uygulamaları (http-17; http-18)

2.2.9. Madencilik

İHA'lar tehlikeli işlerin insan gücüyle yoğun bir şekilde yapıldığı madencilik sektöründe de insanların yaptığı faaliyetleri yapabilmektedir. İHA'ların daha az maliyetli ve çok yönlü kullanımı bu tercihi uygulamaya koymayı hızlandırmıştır. İHA'lar aynı zamanda kullanım kolaylığı nedeniyle maden çıkarma araçlarından daha az kirliliğe sebep olurlar.

İHA'lar maden ortamının uygun şekilde izlenmesi, araştırılması ve haritalandırılmasında faydalı olmaktadır. Şekil 2.9'da İHA'ların madencilik alanında kullanımı gösterilmiştir (Xiang, Xia ve Zhang, 2019). İHA'lar açık maden ocaklarının bulunduğu sahayı hızlı bir şekilde haritalandırarak maden taşıma yollarını optimize edebilir ve kontrol bilgilerini güvenli bir şekilde sağlayabilirler. İHA'lar tüm maden çıkarma sürecinin otomatikleştirilmesine destek olarak maden çıkarma maliyetinin düşürülmesine yardımcı olurlar.



Şekil 2.9. Madencilik alanında kullanılan İHA (Xiang, Xia ve Zhang, 2019)

2.2.10. Deniz ve su altı görevleri

Bazı İHA'lar su ve su altında görev yapmak için tasarlanmıştır. Yatay kalkış ve iniş için yer olmaması nedeniyle bu İHA'ların çoğu dikey kalkış ve iniş konfigürasyonlarına dayalı olarak tasarlanmasına rağmen aynı zamanda yatay kalkış ve iniş konfigürasyonlarının bazı versiyonlarına da sahiptirler. Bu tip İHA'lar teknelerden, denizaltılardan, karadan veya kumsallardan fırlatılabilir. Amfibi İHA'lar hem havada hem de su yüzeyinde operasyon gerçekleştirebilmektedir. Şekil 2.10'da deniz ve su altı görevlerinde kullanılan İHA'lar gösterilmiştir (http-21).



Şekil 2.10. Deniz ve su altı görevlerinde kullanılan İHA'lar (<http-21>)

2.2.11. Uzay görevi

İHA'nın en yeni uygulamalarından birisi de uzay görevlerinde kullanılmasının düşünülmektedir. Araştırmacılar tarafından uzay araştırmaları için çeşitli İHA tasarımları önerilmiştir. Örneğin NASA Titan keşfi için quadrotor konfigürasyonunu 2026 yılında fırlatmayı planlayarak Titan'ın yörüngesini ve yaşam belirtilerini arayan eş eksenli bir İHA geliştirme çabalarına devam etmektedir. Ayrıca Mars keşifleri için testleri geçen ve Mars'ta havadan ağır araçların uygulanabilirliğini ve potansiyelini göstermek için 2020 yılı Temmuz ayında piyasaya sürülen karşı dönen bıçaklara sahip bir koaksiyel mono rotor geliştirmiştir. Şekil 2.11'de uzay görevleri için kullanılması tasarlanan sabit kanatlı İHA'lar gösterilmiştir (Furlong, 2020; Levine, 2015).



Şekil 2.11. Uzay görevleri için sabit kanatlı İHA'lar; Northrop Grumman'ın sabit kanatlı Venüs gezgini (Furlong, 2020), NASA'nın uçan kanadı Mars gezgini (Levine, 2015)

2.2.12. Ulaşım

Teknolojik gelişmelere bağlı olarak İHA'nın taşımacılık sektöründe de çok iyi bir potansiyeli olduğu görülmektedir. İHA'lar başta e-ticarete paket teslimi, ilaç taşımacılığı, yedek parça teslimatı ve gün içi gıda teslimatı olmak üzere bu sektörde geniş bir alanda kullanılmaya devam etmektedir. Taşımacılık sektöründe kullanılan

İHA'nın insan gücüne dayanan diğer taşımacılık yöntemleriyle kıyaslandığında hız, erişilebilirlik ve düşük maliyet avantajları ile daha fazla kullanılacağı tartışılmaz bir gerçektir.

İHA çok fazla insan faaliyetine gerek kalmadan daha önceden belirlenen bir noktaya hızlı bir teslimat gerçekleştirebilir. İHA hızlı teslimat süresi ve düşük maliyete sahip olmasından dolayı birçok kurumsal şirket teslimatlarını bu araçları kullanarak gerçekleştirebilmenin en ekonomik yolunu araştırmaktadır. İHA'nın teslimat işlerinde karşılaştığı en büyük engel sınırlı uçuş dayanıklılığı ve yük kapasitesidir. Her iki faktörde maliyetleri doğrudan etkilemektedir. Elektrikle çalışan İHA'larda batarya sayısının artırılması uçuş dayanıklılığını da arttırmadığından maksimum uçuş dayanıklılığına ulaşmak için optimum sayıda batarya kullanılması gerekir (Dorling vd., 2016).

2.2.13. Tıbbi lojistik

İHA'nın literatürde medikal amaçlı kullanım alanları olay yerine otomatik eksternal defibrilatör ulaşımının kolaylaştırılması, ilaç/doku, kan ürünleri ulaşımı, travma kiti vb. medikal malzeme ulaşımı, teletıp ve arama-kurtama operasyonlarına katkı olarak sıralanabilir. Tıbbi malzemelerin İHA vasıtası ile uzak kırsal alanlara ulaştırılmasında bu bölgelerdeki yüksek ihtiyaç ve düşük risk ön plana çıkmaktadır. İHA trafik gecikmelerinden etkilenmediği için ideal depolama koşullarında tıbbi numuneleri sağlık çalışanlarına daha hızlı ulaştırabilmektedir.

İHA trafikten kaynaklanan gecikmeleri engelleyerek tıbbi örnekleri ilgili personele hızlı bir şekilde ulaştırarak tıbbi örneklerin istenenilen koşullarında muhafazasını sağlamıştır. İHA'nın bir diğer potansiyel tıbbi uygulama alanı ise kalp krizi belirtileri görülen bir hasta için uçan defibrilatör olarak kullanılmasıdır.

İnsansız ambulans hava aracı yapılan acil çağrının yerini belirlemek için GPS'i kullanmaktadır. İHA çağrı yapılan yere ulaşınca bu görevi yapmak için eğitilmiş sağlık personeli, İHA üzerindeki kamera vasıtasıyla kalp krizi geçiren kişiye yardım edebilecek şahısları izleyerek onlara ne yapacakları konusunda bilgiler aktarmaktadır. Olay bölgesinde bulunan bir kişi sağlık konusunda eğitilmiş personelin talimatıyla İHA üzerindeki bulunan paneli açarak hastaya müdahalede kullanılacak olan defibrilatörü çıkartabilir (Momont, 2019). Sağlık konusunda eğitim almış kişi uzaktaki kontrol merkezinden İHA'nın kamerası vasıtasıyla gelişmeleri izleyerek gerekli talimatları

verebilir. Kalp krizi geçiren hastada İHA kullanımı Şekil 2.12.'de gösterilmiştir (Momont, 2019).



Şekil 2.12. Kalp krizi geçiren bir hastada İHA kullanımı (Momont, 2019)

2.2.14. Çeşitli uygulamalar

İHA'lar alışılmadık görevlerde de kullanılabilmektedir. Örneğin Google stratosferik balonlarla internet bağlantısını genişletmek için çalışmalar yapmaktadır. Plan kırsal alanlara bağlantıyı genişletmek, kapsama boşluklarını doldurmak ve bir felaket durumunda ağ esnekliğini artırmak için interneti yerden değil gökyüzünden genişletmek şeklindedir (http-12). Google ayrıca günümüzde erişilebilir veya uygun maliyetli olmayan rüzgâr kaynaklarından enerjiyi verimli bir şekilde kullanarak elektrik üreten uçurtmalar kullanarak enerji toplama üzerinde de çalışmaktadır.

Malou Tech İHA'ları başka bir İHA tarafından taşınan bir ağ ile yakalayan İHA karşıtı stratejisi tanıtımını gerçekleştirmiştir. İHA ayrıca yüksek binaların, kulelerin, güneş panellerinin, enerji kulelerinin ve rüzgâr türbinlerinin temizliğinde ve diğer bir İHA için pist olarakta kullanılmaktadır (Volt, 2020; Atherton, 2014). Şekil 2.13'de İHA'ların çeşitli uygulamaları gösterilmiştir (http-12; Volt, 2020; Atherton, 2014).



Şekil 2.13. İnternet sağlama (http-12), İHA güneş paneli temizleme (Volt, 2020), diğer İHA'lar için pist durumu (Atherton, 2014)

2.3. İtki Sistemlerine Göre Yeni Nesil Hava Araçları

İHA pilotlu hava araçlarından daha kısa sürede, daha düşük maliyetle ve daha yüksek güvenlikle uzaktan veri elde etme konusunda üstün bir seçenek sunan gelişmekte olan bir teknolojidir. İHA'lardaki elektrik sistemleri sera gazı emisyonu olmayan, gürültü ve titreşimi düşük, daha yüksek verim ve daha iyi güvenilirlik sağlamaları nedeniyle konvansiyonel içten yanmalı motorlara göre çok daha fazla ilgi görmektedir. İHA itki sistemleri bataryalar, yakıt hücreleri, içten yanmalı motorlar ve güneş enerjisi sistemleri olarak sınıflandırılabilir. Bu sistemler arasında ileri bir güç üretim teknolojisi olan yakıt hücreleri uçuş süresini uzatmak amacıyla daha yüksek enerji yoğunluğu sundukları için elektrik sistemlerinde alternatif güç kaynakları olarak görülmektedir. Aynı enerji kapasitesi için yakıt hücrelerinin ağırlığı lityum iyon bataryalardan 3,5 kat daha düşüktür bu durum ise daha çok tercih edilen spesifik enerji ile sonuçlanmaktadır (Pan, An ve Wen, 2019).

İHA'larda elektrikli ya da içten yanmalı motorlar kullanılmaktadır. Elektrikli motorlara enerji bataryalar tarafından sağlanır iken günümüz batarya teknolojileri İHA'ların ihtiyacı olan gereklilikleri yeterince karşılayamamaktadır. Bu gereklilikler arasında en önemli olanları İHA'ların havada kalma süresi ve İHA'ların menzildir. Yakıt hücreleri uçuş süresini uzatmak için daha yüksek enerji yoğunluğu sundukları için elektrik sistemlerinde alternatif güç kaynakları olarak görülmektedir.

2.3.1. Batarya kullanan yeni nesil hava araçları

Elektrik gücü esas olarak bataryalar tarafından karşılandığı için düşük enerji yoğunluğu ve uzun şarj süreleri İHA'nın yeterli uçuş süresine sahip olmasını engellemektedir (Gong ve Verstraete, 2017). Küçük İHA'ların çoğu özellikle dört rotorlu yapıya sahip olanlar batarya ile çalışmaktadır. Buna ilave olarak bataryalar yavaş güç dinamiklerine sahip olmaları nedeniyle bir İHA'nın hızlı güç yanıtı gerektiren bazı manevraları yapmasına izin vermeyebilir. Bu bağlamda batarya sınırlamalarını dengelemek için bir süper kapasitör iyi bir seçenek olarak değerlendirilmektedir (Gong vd., 2018).

İHA'ların tasarım aşamasında aerodinamik optimizasyon ile uçuş dayanıklılığının artırılabilirliğini belirtmekte fayda bulunmaktadır (Panagiotou, Fotiadis-Karras ve Yakinthos, 2018). Bu itki sisteminde bataryalar İHA'ların ana bileşeni olarak kabul edilerek (Khofiyah vd.,2018) bataryaların kullanımları tahrik sisteminin basitliğini ve esnekliğini arttırmaktadır. Lityum bataryalar düşük ağırlıkları ve nispeten yüksek özgül

enerjileri nedeniyle küçük İHA'lar için tercih sebebi olmaktadır. Şu an kullanılmakta olan bataryalar arasında lityum iyon bataryalar daha yüksek özgül güçleri, daha uzun çevrim ömürleri ve daha düşük kendi kendine deşarj olma özellikleri nedeniyle çeşitli uygulamalarda başarıyla kullanılmaktadır (Goriparti vd., 2014). İHA'lar Li-Po bataryalar ile maksimum 90 dakika uçabilme kabiliyetine sahiptirler (Verstraete, Lehmkuehler ve Wong, 2012). Li-Po bataryalar 250 Wh/kg'a kadar özgül enerjiye sahip olmalarına rağmen (Kim ve Kwon, 2012) sıkıştırılmış hidrojen tanklı bir yakıt hücresi sistemi olması durumunda ise bu rakam 1000 Wh/kg'a kadar ulaşabilmektedir (Verstraete, Lehmkuehler ve Wong, 2012). Buna ilave olarak sıkıştırılmış hidrojen tanklı bir yakıt hücresinde yakıt ikmali işlemi neredeyse anında yapılır iken bataryalar ile yapılan bu işlem uzun zaman almaktadır. Batarya ile çalışan İHA'ların başlıca avantajları neredeyse her yerde şarj edilebilme imkânına sahip olması, herhangi bir sınırlama olmaksızın taşınabilme imkânı ve yalnızca batarya takımının değiştirilmesi yoluyla kolayca yeniden şarj edilebilmesi olarak sıralanabilir. Bataryaların dezavantajları ise küçük miktarlarda yeniden şarj döngülerine sahip olmaları ve nispeten düşük enerji yoğunluklarını içermeleri sayılabilir.

2.3.2. Yakıt hücresi kullanan yeni nesil hava araçları

Yakıt hücresi (FC-Fuel Cell) teknolojisindeki son gelişmeler tatmin edici bir yakıt ekonomisi ile İHA'ların uçuş sürelerini uzatmak için büyük bir potansiyel göstermektedir. Saf yakıt hücresi tahrik sisteminin güç performansı sınırlaması nedeniyle İHA'lardaki yakıt hücrelerinin bataryalar, süper kapasitörler, güneş bataryaları ve geleneksel içten yanmalı motorlar gibi diğer güç kaynaklarıyla entegre edilen hibrit tahrik sistemini kullanımı önerilmektedir.

Güç kaynaklarının güç yoğunluğu ve enerji yoğunluğu sırasıyla itme kuvvetini ve uçuş dayanıklılığını belirlediğinden itki sistemleri İHA'lar için hayati öneme sahip bir özelliktir (Boukoberine, Zhou ve Benbouzid, 2019; LEI vd., 2019; Harmon, Frank ve Joshi, 2005). Tipik olarak İHA'lar geleneksel içten yanmalı motorlar ve elektrik motorlar tarafından çalıştırılmaktadır (Abbasi ve Jiang, 2009; Saeed vd., 2018). Geleneksel içten yanmalı motorlarla çalışan İHA'lar hem yüksek güç yoğunluğuna hem de yüksek enerji yoğunluğuna ulaşabilmelerine rağmen içten yanmalı motorlar motor titreşimi, düşük verimlilik, aşırı ağırlık ve motor gürültüsü ile ilişkilendirilebilir (Saeed vd., 2018; Hung ve Gonzalez, 2012). İçten yanmalı motorlar aynı zamanda fosil yakıtın

eksik yanmasından dolayı sera gazı emisyonlarına ve toksik emisyonlara katkıda bulunarak çevre üzerinde olumsuz bir etki oluşturmaktadır (E vd., 2019; Shu vd., 2019).

Çevre ve insan sağlığı için son derece zararlı olan bu emisyonları azaltmak için büyük umut vaat eden hibrit elektrik motor ve saf elektrikli tahrik sistemleri kullanılabilir (Harmon, Frank ve Joshi, 2005; Santin, Traverso ve Massardo, 2008). Elektrik motorları ile çalışan İHA'lar saf içten yanmalı motor tabanlı İHA'lar ile karşılaştırıldığında daha hafif, daha güvenilir ve daha verimli oldukları görülmektedir (Bradley vd., 2006; Bradley vd., 2007). Buna ilave olarak elektrik motorlarında gelen dinamik yüke yanıt verme içten yanmalı motorlardan daha hızlıdır (LEI vd., 2019). Çalışma performansı hidrokarbon ve diğer zararlı emisyonlarla ilgili çevresel kaygılar açısından elektrikli tahrik sistemlerinin küçük ticari İHA'lar için kullanımda hâkim eğilim olacağı görülmektedir (Tyan vd., 2017).

Son yıllarda uçaklarda ve İHA'larda elektrikli tahrik sistemleri için ana güç kaynağı olarak yakıt hücrelerinin kullanılması artan bir popülerite haline gelmiştir (Verstraete, 2013; Kim, 2014; Mohd Tahir, Kuntjoro ve Ward, 2013). Geleneksel içten yanmalı motorlardan farklı olarak yakıt hücreleri elektrokimyasal reaksiyonlar yoluyla doğrudan elektrik enerjisi üretme imkân ve kabiliyetine sahiptir (Verstraete, 2013; Pratt vd., 2013). Hidrojen veya metanol yakıtın yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması ve bu yakıtların yakıt hücrelerinde kullanımı İHA tahrik sistemlerinin ağırlığında önemli ölçüde bir azalmaya sebep olmaktadır (González-Espasandín vd., 2019; Ward ve Jenal, 2010). Örneğin bir hidrojen yakıt hücresinin kütlesi depolanan aynı enerji açısından lityum bazlı bataryaların kütlesinden üç ile beş kat daha düşük olmaktadır (Pan, An ve Wen, 2019). Tüm bunlara ilave olarak yakıt hücreleri özel yakıt ikmal tarzı bataryaların sahip olduğu uzun şarj olma süresini önleyebilmektedir (Boukoberine, Zhou ve Benbouzid, 2019; Troncoso, Lapeña-Rey ve Valero, 2014).

İHA'lara güç sağlamak için en çok kullanılan yakıt hücresi türleri polimer elektrolit membranlı yakıt hücresi (PEMFC-Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell) (Hatti, Meharrar ve Tioursi, 2011; Barroso vd., 2015), katı oksit yakıt hücresi (SOFC-Solid Oxide Fuel Cell) (Gong ve Verstraete, 2017) ve doğrudan metanol yakıt hücresidir (DMFC-Direct Methanol Fuel Cell) (González-Espasandín vd., 2019; González-Espasandín, Leo ve Navarro-Arévalo, 2014).

Bu üç yakıt hücresi arasında PEMFC İHA'ların tahrik sistemlerinde en yaygın kullanılan yakıt hücresi olarak bilinmektedir (Pan, An ve Wen, 2019). PEMFC ve

SOFC DMFC'den daha yüksek çalışma verimliliğine sahiptir (Seo ve Lee, 2010). Bununla birlikte DMFC'in yakıtı sıvı fazda olduğundan enerji depolama sistemi PEMFC ve SOFC'den daha fazla yakıtı aynı hacimde depolayabilme imkân ve kabiliyetine sahiptir (Barthelemy, Weber ve Barbier, 2017).

İHA'lardaki mevcut yakıt hücreleri birçok avantaja sahip olmasına rağmen her üç yakıt hücresinin ortak dezavantajları nispeten düşük güç yoğunluğu, düşük/yüksek güç çıkış modunda çalışma verimlerinin tatmin edici seviyede olmaması ve yük tepkilerinin beklenen hızda olmamasıdır (Gong ve Verstraete, 2017; Dudek vd., 2013; Thounthong ve Davat, 2010). Aynı zamanda bir İHA'nın elektrikli tahrik sistemi sadece bir yakıt hücresi ile donatılmış olmasına rağmen buna karşılık gelen manevra kabiliyeti ve uçuş dayanıklılığı son derece sınırlı olmaktadır (Donateo vd., 2017).

İHA teknolojisi için mevcut zorluklar arasında en önemlisi sınırlı uçuş süresidir. Bu noktada İHA'nın geliştirilerek uçuş sürelerinin artırılması için sayısız yenilikler yapılmıştır. Bu yeniliklerden bir tanesi lityum iyon polimer bataryaların geleneksel kullanımına alternatif olarak hidrojen yakıt hücrelerinin kullanılmasıdır. Bir güç kaynağı olarak hidrojen yakıt hücrelerinin kullanılması İHA teknolojisinin geleceği için büyük yenilikler getirmektedir.

Hidrojen yakıt hücreleri İHA'lara güç sağlayan enerjiyi üretmek ve bir reaksiyon oluşturmak için havaya büyük ölçüde bağımlıdır. Aynı ağırlığa sahip normal Li-Po bataryalar ile karşılaştırıldığında hidrojen yakıt hücreleri daha fazla enerji üretir bu da İHA'lar için daha uzun uçuş süresine sahip olma anlamına gelmektedir (http-20). Hidrojen yakıt hücreleri ticari İHA'lardaki bataryaların menzilin 2-4 kat daha artırılmasını sağlamaktadır. İHA'ların artan uçuş dayanıklılığı bu araçların üretkenliğini artırarak tek bir uçuşla çok daha fazla başarı elde edilmesi sağlamaktadır.

Bir hidrojen yakıt hücresinin yüksek enerji yoğunluğu onu İHA'lar için daha verimli ve daha hafif bir güç kaynağı haline getirilmesini sağlamaktadır. Hidrojen silindirlerinin hızlı yakıt ikmali yetenekleri operasyonlardaki duruş süresini de en aza indirmektedir. Hidrojen silindirleri belirli uçuş sürelerine ve İHA kapasitelerine uyacak şekilde boyutlandırılabilir. Tüm bunlara ilave olarak yakıt hücreleri ve silindirler daha fazla esneklik sunan çoklu montaj olanaklarına sahiptirler.

Hidrojen standart sıcaklık ve basınçta yalnızca 0.089 kg/m³ yoğunluğa sahiptir (Gong ve Verstraete, 2017). Hidrojenin bu özelliğinden dolayı İHA'nın belirli bir görev için yeterli yakıt taşımamasını sağlamak için yakıt tankların hacimli olması gerekmektedir

(Sulaiman vd., 2018). Bu durum ise bir İHA'nın boyutu ve ağırlığı ile ilgili önemli bir kısıtlamadır. Buna ilave olarak güvenlik nedenleriyle saf hidrojenin aşırı yüksek basınç ve düşük sıcaklık altında depolama imkânı mevcut değildir (Kendall ve Pollet, 2012).

Günümüzde İHA'larda hidrojeni depolamak için kullanılan başlıca üç teknik sıkıştırılmış hidrojen gazı, sıvı hidrojen ve kimyasal hidrojen üretimi olarak adlandırılır (Gong ve Verstraete, 2017). Hidrojenin depolaması üzerine literatürde çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Swider-Lyons vd., (2011) Ion Tiger İHA tarafından gerçekleştirilen 24 saatlik bir uçuşta en iyi hidrojen depolama yöntemini seçmek için nitel ve nicel kriterleri dikkate alan karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirmiştir. EnergyOr (<http://19>), Naval Research Laboratory (Stroman vd, 2014; Gundlach ve Foch, 2014), Boeing RD Europe (Troncoso, Lapeña-Rey ve Valero, 2014, s. 1841–1855; Troncoso, Lapeña-Rey ve Valero, 2014, s. 11267–11278; Troncoso, Lapeña-Rey ve Gonzalez, 2016, s. 476–487) ve Florida Solar Energy Center (Garceau vd., 2015) gibi araştırma ekipleri tarafından geliştirilen pratik ve uçuş testi yapılmış prototiplere dayanılarak yapılan incelemede sıvı hidrojenin altyapısından kaynaklanan kısıtlamalar nedeniyle uygun bir çözüm kaynağı olmadığı sonucuna varılmıştır (Gong ve Verstraete, 2017).

Kimyasal hidrojen üretimi ile ilgili olarak hidrojeni çekmek için ekstra ekipmana ihtiyaç duyulması hidrojeni çekme işleminin ağır ve karmaşık bir güç kaynağı sistemi olmasına yol açmaktadır. Bununla birlikte hidrojen ekstraksiyonu zaman alıcı bir işlem olmasından dolayı İHA'nın yük değişikliklerine yanıt verme süresini etkilemektedir. Kim ve Kwon, (2012) iki saatlik gerçek uçuş testi altında küçük bir İHA'ya güç sağlayan hidrojen jeneratörlü bir yakıt sisteminin performans analizini gerçekleştirerek baca ve reaktör sıcaklıkları, hidrojen üretim hızı ve yakıt hücresi çıkış gücü değişen güç talebi altında değerlendirilmiştir. Yapılan bu çalışma sonucunda yakıt hücresinin başarılı bir uçuşa güç sağlama yeteneğinin olduğu doğrulanmıştır. Bununla birlikte bu çalışmada hidrojenin neden olduğu başlatma süresi, katalizör dayanıklılığı ve yan tıkanma gibi bazı konularda incelenmiştir.

2.3.2.1. Polimer elektrolit membranlı yakıt hücresi

Yakıt hücreleri tahrik sistemleri temiz ve yenilenebilir hidrojen veya metanol yakıtı kullandıklarından dolayıda geleneksel içten yanmalı motorlara alternatif umut vaat eden bir sistem olarak değerlendirilmektedir (Boukoberine, Zhou ve Benbouzid,

2019; Romeo vd., 2013; Renau vd., 2015). Yakıt hücreleri küçük boyutları, yüksek enerji yoğunlukları, yüksek enerji dönüşüm verimlilikleri ve düşük bakım maliyetleri ile elektrikli araçlardaki ve İHA'lardaki tahrik sistemleri için güç kaynakları olarak çok popüler olarak kullanılmaktadır (Boukoberine, Zhou ve Benbouzid, 2019; Das, Tan ve Yatim, 2017; Wang vd., 2019).

Bir PEMFC anot, katot ve proton değişim zarı olmak üzere üç bölümden oluşur. Proton değişim zarı (PEM-Proton Exchange Membrane) protonları etkili bir şekilde aktarabilmek için Nafion'dan imal edilmiştir (Pan, An ve Wen, 2019). Anot ve katot sırasıyla proton değişim zarının iki tarafında bulunurlar. Mevcut son teknoloji yakıt hücreleri arasında İHA uygulamalarında en çok tercih edilen yakıt hücresi PEMFC'dir (Boukoberine, Zhou ve Benbouzid, 2019; Gong ve Verstraete, 2017).

PEMFC teknolojisi yüksek güç yoğunluğu, daha az ısınma süresi sağlayan düşük çalışma sıcaklığı, yük değişimine karşı düşük tepki süresi, uzun ömürlülük ve hafiflik gibi tipik özelliklere sahiptir (Gong ve Verstraete, 2017; Lapeña-Rey vd., 2017). PEMFC mekanik ve kimyasal uyumluluk açısından çok güvenilir olarak kullanılmakla birlikte güvenilir çalışma sıcaklığı aralığı olan 30°C-110 °C arasında benzersiz bir avantaja sahiptir (Gang ve Kwon, 2018).

PEMFC yakıt olarak hidrojen kullandığı için PEMFC'deki elektrokimyasal reaksiyonların yan ürünü yalnızca çevre dostu olan sudur. Sıkıştırılmış hidrojen gazının enerji yoğunluğu lityum bazlı bataryalardan çok daha yüksektir ve 1000 Wh/kg'a kadar ulaşabilmektedir (Boukoberine, Zhou ve Benbouzid, 2019; Barthelemy, Weber ve Barbier, 2017).

PEMFC'nin en büyük dezavantajı polimer elektrolit membran ve soy metal katalizörünün yüksek maliyetleridir. Bu durum ise endüstriyel ve akademik araştırmaların alternatif membran malzemeler ve katalizörler arayışında motivasyon kaynağı olmaktadır (Bose ve Zhu, 2019). Diğer taraftan İHA'nın boyut, ağırlık ve uçuş koşulu kısıtlamaları nedeniyle hidrojenin depolaması dikkat çeken bir konu olarak görülmektedir (Barthelemy, Weber ve Barbier, 2017). Ayrıca İHA'nın uçuşu esnasında PEMFC için hava aracı depolama bölgesinden sürekli bir hidrojen kaynağı ihtiyacı oluşmaktadır.

Normal atmosferik hava basıncında gaz halindeki hidrojenin düşük yoğunluğu ile sıkıştırılmış hidrojen yakıtını depolamak için büyük bir depo gereklidir (Barthelemy, Weber ve Barbier, 2017). Sıkıştırılmış hidrojen yakıtın basıncını arttırmak depolama

hacminin azaltılmış olmasına rağmen kalınlaştırılmış basınçlı kap nedeniyle hidrojen depolama sisteminin ağırlığı artırılmış olmaktadır (Barthelemy, Weber ve Barbier, 2017). Bu sıkıntıyı ortadan kaldırmak yani depolanan kap hacmini azaltmak için hidrojenin sıvı fazında veya katı kimyasal hidritlerde depolanabilmesi gerekmektedir (Stroman vd., 2014).

2.3.2.2. Katı oksit yakıt hücresi

SOFC seramik gözenekli katot, seramik gözenekli anot ve katı oksit elektrolit olmak üzere üç parçadan oluşmaktadır (Fernandes vd., 2018; Abdalla vd., 2018). Katı oksit elektrolitin işlevi polimer elektrolit membranlıya benzer olmasına rağmen katı oksit elektrolitte negatif oksijen iyonları katottan anoda aktarılırlar (Abdalla vd., 2018). Bunun sonucu olarak SOFC’de farklı üç faz sınırlarına dayalı elektrokimyasal reaksiyonlar gerçekleştirilmekte, elektrokimyasal oksidasyon ise anotta meydana gelmektedir.

SOFC yüksek çalışma sıcaklığına sahip olan bir yakıt hücresi tipidir. SOFC’nin elektrolit malzemesi katı oksit olmasından dolayı bu yakıt hücresi 600°C ile 1.000 °C arasındaki yüksek bir çalışma sıcaklığı aralığında çalışmaya maruz kalmaktadır (Giacoppo vd., 2017; Ji vd., 2019, s. 50-64). Bu durum ise PEMFC için gerekli olan pahalı bir katalizör kullanmak yerine yüksek bir enerji dönüşüm verimliliği ile sonuçlanır. SOFC hidrojene ek olarak metan, propan, biyoyakıtlar, doğal gaz ve hatta benzin ile de yakıtlandırılabilir (Fernandes vd., 2018; Genç ve Sarikoç, 2017). Ayrıca SOFC’nin yüksek çalışma sıcaklığına sahip olması bu yakıt hücrelerinin türbinsiz jet motoruyla entegre kullanımını da teşvik etmektedir (Santin, Traverso ve Massardo, 2008; Ji vd., 2019, s. 50-64; Ji vd., 2019).

SOFC tabanlı kullanılan türbinsiz jet motorlarında ise SOFC’nin egzozu basınçlı havayı ve önceden karıştırılmış hidrokarbon yakıtları ısıtmak için kullanılmaktadır. Bunlara ilave olarak SOFC’nin egzozu aynı zamanda jet motorlarında yakılarak yakıt verimliliği önemli ölçüde arttırmaktadır (Ji vd., 2019; Ji vd., 2019, s. 702–711). SOFC’nin bir diğer avantajı ise jet motorlu hibrit tahrik sistem özgül enerji yoğunluğunun 800 Wh/kg'a kadar ulaşabilmesidir (Ji vd., 2019; Ji vd., 2019, s. 190–201).

SOFC’nin en önemli dezavantajı ise SOFC’nin ısınması ve çalışmaya başlaması için uzun zamana ihtiyaç duyulmasıdır (Fernandes vd., 2018). İHA'lardaki SOFC

sistemleri için mekanik ve elektrokimyasal uyumluluk büyük zorluklar çıkarmaktadır. Mevcut katı oksit yakıt batarya teknolojisi malzemesinden kaynaklanan maliyetleri azaltarak sistem kararlılığını garanti etmek için SOFC'nin çalışma sıcaklığını 600°C-1000°C arasında sınırlama getirmek durumundadır (Ji vd., 2019, s. 50-64; Giacoppo vd., 2017).

2.3.2.3. Doğrudan metanol yakıt hücresi

DMFC uzun menzilli ve uzun süreli uygulamalar elde etmek ve geleneksel koşullar altında sıvı metanolün sahip olduğu yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle İHA'lar için olası bir güç kaynağı olarak önerilmektedir (Gong ve Verstraete, 2017). DMFC'nin iç konfigürasyonu PEMFC'ye benzer şekilde bir anot, bir katot ve suya doymuş bir PEM'den oluşmaktadır (Zago vd., 2016).

DMFC'in metanol yakıtın geleneksel koşullar altında sıvı halde muhafaza edilmesini sağlayabilmesi büyük bir avantajı olarak görülür (Pan, An ve Wen, 2019). DMFC'nin sıvı metanolünün PEMFC veya SOFC'de kullanılan sıkıştırılmış hidrojenden çok daha yüksek bir enerji yoğunluğuna sahip olduğu belirlenmiştir (Boukoberine, Zhou ve Benbouzid, 2019; Kang vd., 2014). Bunlara ilave olarak metanol yakıtı aynı zamanda geniş bir sıcaklık aralığında ve çeşitli çevre koşullarında çok iyi kararlılık göstermektedir (Seo ve Lee, 2010).

Metanol yakıtın bir kısmının membrandan doğrudan anot tarafından katot tarafına geçtiği durumlarda DMFC işlemi için endişe verici bir sorun ortaya çıkmaktadır (Zago vd., 2016; Heinzl ve Barragán, 1999). Bunun sonucu olarak metanolün eksik işlenmesi gerçekleşir ki bu ise işletme verimliliğinde bir azalmaya neden olur. Metanol geçişi eğer karma potansiyelin azalmasına yol açar ise bu durum DMFC sisteminin çalışma verimliliğinin daha da düşmesine neden olur (Seo ve Lee, 2010).

2.3.3. Hibrit tahrik sistemini kullanan yeni nesil hava araçları

Hibrit tahrik sistemler bir güç kaynağının avantajlı yönleri olan başka bir güç kaynağı ile birleştirerek eksikliklerinin azaltılmasına imkân sağlar. Bu durum ise kullanıcının veya tasarımcının hangi dezavantajların tolere edilebileceğine karar vermesini sağlar. Dayanıklılığı artırmak ve iyi performans elde etmek için İHA'lar genellikle bir hibrit tahrik güç kaynağı mimari sistemini kullanırlar.

Bir hibrit tahrik güç mimarisi yakıt hücresi, batarya, güneş bataryaları ve süper kapasitör gibi çeşitli güç kaynaklarının birleşimi şeklinde uygulanmaktadır. Optimal bir

enerji yönetim sistemine sahip güç kaynağı olan hibridizasyon mimarisinin seçimi gelişmiş İHA'ların verimli çalışmasını sağlamak için çok önemli bir faktördür. Hibrit tahrik, eVTOL hava aracının günümüz teknolojisi ile şehirler arası görev için diğer eVTOL hava araçları ile kıyaslandığında daha uygun bir yaklaşım olduğu değerlendirilmektedir.

2.3.3.1. Yakıt hücresi ve batarya uygulaması

Yakıt hücrelerindeki performans ve teknolojik ilerlemelere rağmen İHA'lar için benzersiz bir güç kaynağı olarak kullanıldığında bazı sınırlamalar bulunmaktadır. Gerçekten de bir yakıt hücresi pompalar, valfler ve kompresörler kullanılarak yakıt ve hava ile beslenmesi gerektiğinden büyük bir zaman sabiti ile karakterize edilmektedir. Yavaş tepki esas olarak pompanın mekanik özelliklerinden, akış gecikmesinden, termodinamik özelliklerinden ve kapasitans etkisinden kaynaklanmaktadır (Ou vd., 2015). Bu nedenle mevcut talepte yüksek varyasyon olması durumunda kullanım ömrünü, güvenilirliğini ve verimliliğini etkileyebilecek yakıt yetersizliği sorunu ortaya çıkmaktadır (Yuan vd., 2018). Sonuç olarak bir hibrit tahrik güç kaynağı sistemini oluşturmak için bir yakıt hücresini batarya ile birleştirmek İHA tahrik sisteminin her iki kaynağın avantajlarından faydalanmasını ve dezavantajlarını dengelemesini sağlayan iyi bir seçenek olarak görünmektedir (Cooley vd., 2014; Donato vd., 2017; Belmonte vd., 2018).

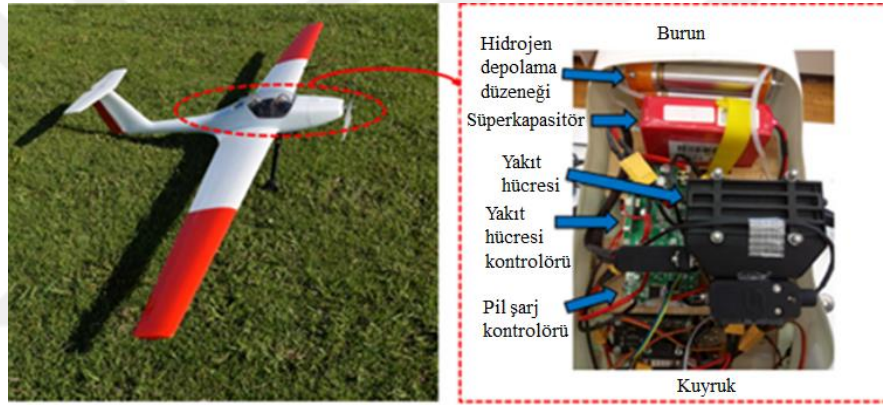
Batarya bir yakıt hücresinden daha yüksek güç yoğunluğuna, daha hızlı tepki vermeye ve daha yüksek verimliliğe sahip olduğundan İHA'nın kalkış ve tırmanma gibi manevraları esnasında ihtiyacı olan tepe gücünü sağlamak için seçilmelidir. Yakıt hücresi ise daha sonraki aşmalar olan seyir veya iniş dönemlerinde ana tedarik kaynağı olarak kullanılmaktadır. Verstraete vd., (2012) döngü içi donanım simülasyonları aracılığı ile 200 W yakıt hücresi ve bir batarya ile çalışan hibrit tahrik bir İHA sisteminin performansını incelemiştir. Yapılan bu çalışmada her kaynağın farklı testler altındaki davranışı vurgulanmış ve analizi yapılarak dayanıklılık ve hidrojen kullanımını da ele alınarak incelenmiştir.

2.3.3.2. Süper kapasitörlü hibrit tahrik uygulaması

Sınırlı bir kullanım ömrü ile yavaş şarj/deşarjdan sıkıntı çeken bataryaları değiştirmek veya tamamlamak için bir dizi uygulamada daha hızlı enerji depolama sistemlerine ihtiyaç duyulduğu için süper kapasitörler son zamanlarda dikkat

çekmektedir (Aneke ve Wang, 2016). Süper kapasitörler aşırı şarj toleransı, düşük bakım maliyeti ve makul bir maliyetle geniş bir sıcaklık aralığında çalışma imkan ve kabiliyetine sahiptir (Ruan vd., 2017).

Bu durumda bir İHA hibrit tahrik güç kaynağına ek bir güç olarak bir süper kapasitörün entegre edilmesi İHA'nın güç yoğunluğunu güçlendirerek hızlı güç yanıtı vermesini sağlarken aynı zamanda besleme mimarileri açısından da ek bir serbestlik derecesi sağlamaktadır. Şekil 2.14'te bir hibrit tahrik yakıt hücresinin mimari örneği gösterilmiştir (Boukoberine, Zhou ve Benbouzid, 2019; Gong vd., 2018;). İHA'nın sabit durumuna güç sağlamak ve dolayısıyla ömrünü uzatmak için hibrit tahrik mimarisinde yakıt hücresi mutlaka seçilmelidir (Li vd., 2018).



Şekil 2.14. Bir İHA'da hibrit tahrik, bir yakıt hücresi-batarya-süper kapasitör güç kaynağı (Boukoberine, Zhou ve Benbouzid, 2019; Gong vd., 2018)

Gong vd., (2018) yakıt hücresi, batarya ve süper kapasitör içeren hibrit tahrik bir İHA sisteminin döngü içi donanım tabanlı bir değerlendirmesini ve analizini gerçekleştirmiştir. Yapılan bu işlemde süper kapasitörün işlevini bulmak için sistem bir uçuş profili altında bir yakıt hücresi/batarya sistemi ile karşılaştırılması sağlanmış ve süper kapasitör kapasitesinin yakıt hücresi ve süper kapasitör davranışları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bilgiler süper kapasitörün yük yumuşatma ve dinamik yanıtta iyi performans sergilediğini göstermiştir.

2.3.3.3. Güneş bataryası ile hibrit tahrik uygulaması

İHA'lar gibi hareketli taşıyıcılarda fotovoltaik (PV-Photovoltaic) üretim sisteminin uygulanması büyük ilgi görmektedir. Bu durumda kanatlarında PV dizileri ile donatılmış bir İHA gece veya güneş bulunması durumunda enerji depolamak için bir

batarya takılması şartıyla süresiz olarak uçabilmektedir (Shiau vd., 2009). Güneş enerjili İHA'lar tipik olarak Şekil 2.15'te gösterildiği gibi yüksek irtifa uzun dayanıklılık uygulamaları için tasarlanarak yaygın olarakta kullanılmaktadır.

Yüksek irtifa uzun dayanıklılık İHA'ları çok yüksek irtifalarda kullanılarak bir günden fazla olan kalıcı görevleri yerine getirmek amacıyla tasarlanmıştır. Morton, D'Sa ve Papanikolopoulos (2015) gövde verimliliğini optimize etmek için güneş enerjisiyle çalışan bir İHA tasarım yöntemini önermiştir. Geliştirilen prototip İHA üzerinde yapılan deneysel testler sonucu alınan güneş enerjisi miktarının İHA'nın güneş sisteminin ilave faydalı yükünü taşıyarak dayanıklılığını arttırmaya yeterli olduğunu göstermiştir (Morton, D'Sa ve Papanikolopoulos, 2015).

Harvey vd., (2012) yaptıkları çalışmada PV kullanımının İHA ağırlığını azaltmanın yanı sıra %59'a varan yakıt tasarrufu sağlayabileceğini kanıtlamışlardır. Bunun sonucu olarakta güneş enerjisinden yararlanmanın İHA dayanıklılığının iyileştirilmesine önemli bir katkı sağladığı tespiti yapılmıştır. Şekil 2.15'te görülebileceği gibi güneş enerjisiyle çalışan İHA'ların alınan ışık enerjisi miktarını en üst düzeye çıkarmak için bu İHA'ların büyük kanatlara sahip olacak şekilde tasarlanması gerekmektedir (Zhang, 2018, http-20).



Şekil 2.15. Güneş enerjisiyle çalışan İHA'lar (Zhang, 2018, http-20)

3. KENTSEL HAVA HAREKETLİLİĞİ

1950’li yıllardan itibaren üzerinde çalışmalar yapılan KHH kavramı (Malano, 2021) batarya teknolojisi, sensör teknolojisi, mikro işlemciler, elektrik tahrik sistemindeki gelişmeler ve otomasyon alanındaki yeni teknolojilerin hayata geçmesi ile tekrar canlanmaya başlamıştır. Şekil 3.1’de 1951 yılındaki ve günümüzdeki vertiport tasarımları gösterilmiştir (Brook ve Dodge., 2014; Hulme vd., 2019).



Şekil 3.1. 1951 Vertiport tasarımı (Brook ve Dodge., 2014), günümüzden vertiport tasarımı (Hulme vd., 2019)

Anand vd., (2021) göre KHH’nin tanıtılması ve toplum tarafından kabul görmesi şehir içi tıkanıklığın aşılmasını, seyahat süresinin azaltılmasını, sera gazlarının emisyonlarının azaltılmasını ve uzak bölgelere ulaşmayı kolaylaştıracaktır. Duvall vd., (2019) göre ise ilaçların teslimatının zamanında yapılması ve diğer malların nakliyesinin hızlı ve güvenilir şekilde taşınabilmesi sağlanabilecektir. KHH için otoparkların, mevcut helikopter pistlerinin, yol kavşaklarının yakınındaki kullanılmayan arazilerin ve çatıların kullanılabilecek olması tasarruf için diğer fırsatlar olarak değerlendirilmektedir (Holden ve Goel, 2016).

Kentsel hava ulaşımı sahip olduğu avantajlar nedeniyle mevcut ulaştırma sistemini zenginleştirme potansiyeline sahiptir. Altran (2020) eVTOL hava araçlarının 2030 yılına kadar 322 milyar ABD doları bir piyasa değerine ulaşmasının beklendiğini, Hader vd., (2020) KHH seyahatlerinden elde edilen yıllık gelirin 2050 yılına kadar 90 milyar ABD dolarına ulaşacağını, Morgan Stanley ise KHH tarafından desteklenen toplam küresel pazarın 2040 yılına kadar 1,5 trilyon ABD dolarına ulaşacağını tahmin etmektedir (Morgan Stanley Research, 2018).

NASA adına Booz Allen Hamilton tarafından yürütülen bir piyasa araştırmasına göre 2018 Eylül ayı itibariyle 70’den fazla küresel üretici, operatör, tedarikçi ve

hükümet tarafından KHH teknolojisine yapılan yatırım miktarı 1 milyar ABD dolarından fazla olmuştur (Booz Allen Hamilton, 2018). Lilium, (2020), EHang, (2020) ve Xu, (2020) gibi girişimcilere ilave olarak Boeing, Hyundai, Toyota ve Uber (Ploetner vd., 2020) gibi büyük şirketlerde KHH'nin potansiyelini fark ederek bu teknolojiye yatırım yapmaktadır.

Dünya nüfusunun yarıdan fazlasının şehirlerde yaşıyor olması şehirlerin fazla nüfusu ve ekonomik büyümesi hava kirliliğinden büyük ölçüde sorumlu olan artan bir trafik yüküne yol açmaktadır. ABD'deki ulaşım sektörünün sera gazı emisyonu oluşumuna katkısı %29 iken Avrupa'daki bu oran %30'lara kadar ulaşmaktadır. Hızla artan trafiğin çevre üzerindeki olumsuz etkisine ek olarak insanların yaşam kalitesi üzerinde de tıkanıklık şeklinde özel bir etki mevcuttur. Araştırmalar tıkanıklığın etkisinin hızla arttığını ve bunun sadece yaşam kaybına neden olmakla kalmadığını aynı zamanda ciddi maddi kayıplara neden olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Örneğin ABD'de 2017 yılındaki trafik sıkışıklığının çalışma saati ve yakıt israfı karşılığının 179 milyar ABD doları olduğu tespit edilmiştir (Schrunk, Eisele ve Lomax, 1970). Yaşanan bu ekonomik kaybın 2025 yılına kadar %32 oranında artması beklenmektedir. Ekonomi ve İşletme Araştırmaları Merkezi tarafından yapılan bir araştırmada ise Almanya, İngiltere, Fransa ve ABD'deki trafik sıkışıklığının 2013 ile 2025 yılları arasındaki ekonomik kaybın değerinin 4,4 trilyon ABD doları olacağı tahmin edilmektedir (CEBR, 2014). Bu trafik tıkanıklığı aile ile daha az zaman geçirmeye, iş yerlerine daha fazla zaman ayırmaya, akaryakıtı daha fazla tüketmeye ve sonuç olarak fiziksel sağlığı olumsuz etkileyen stres seviyesinde önemli bir artışa neden olmaktadır (Hoehner vd., 2012).

Bununla birlikte bu büyük trafik yükünü taşımak için birçok yola ihtiyaç duyulduğundan birçok şehirde kamu arazilerinin %50'si yollar için işgal edilmekte bu ise önemli bir yaşam alanının kaybedilmesine yol açmaktadır (EIT, 2020). Dünyadaki nüfusun 2050 yılında 10 milyar olacağı ve insanların %70'inin şehirlerde yaşayacağı düşünüldüğünde bu sorunların daha da büyüceği ön görülmektedir (Ritchie ve Roser, 2018).

Gelecek on yıllarda şehirlerdeki trafik sıkışıklığı yaygın bir biçimde artmaya devam ederek hem çevresel açıdan hem de insanların ruh sağlığı açısından kentsel yaşam kalitesini önemli ölçüde etkileyeceği düşünülmektedir. Günümüzde şehirlerde uygulanan artan yol vergileri, park ücretleri, akaryakıt ücretleri vb önlemler insanların arabalarını kullanmasını caydırmayı amaçlasa da insanlar ancak nadir bir şekilde

alternatif ulaşım araçlarını kullanmaktadır. KHH modern şehirlerin karşılaştığı hem trafik sıkışıklığını hem de çevresel sorunları ele alarak ekonomik, hızlı ve sürdürülebilir seyahatle gelecekte çözüm için bir seçenek olarak daha fazla tercih edilebilir görülmektedir.

eVTOL olarak bilinen KHH araçlarını geliştirmek için faaliyet gösteren şirketlerin tamamı KHH'nin gelecekte kara yolu araçları ile yolculuk ihtiyacını azaltarak seyahatle ilişkili olan karbon emisyonunun ve hava kirliliğinin azaltılması gibi çok önemli faydalarının olabileceğini düşünmektedir. KHH'de kullanılan hava araçlarının 250km/s'in üzerindeki hızlarda düz bir hat boyunca uçuşla ulaşımında geçen süreyi azaltarak insanların yaşam kalitesine katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. KHH'nin ayrıca şehir merkezlerindeki karayolu altyapısının kaldırılmasını veya azaltılmasını sağlayarak gürültünün azaltılmasını ve yeşil alana erişimin artırılmasına yardımcı olacağı öngörülmektedir.

Günümüzde şehirlerde KHH'nin uygulanmasında önemli sınırlamalar bulunmaktadır. Teknik açıdan ele alındığında mevcut batarya teknolojisinin uçağın uçuş süresi ve menzil gibi çalışma yeteneklerini önemli ölçüde sınırlaması nedeniyle batarya şarjı için önemli bir altyapı ihtiyacı söz konusu olacaktır. Benzer şekilde KHH'de kullanılacak olan eVTOL hava aracı kentsel alanlarda yer kaplayan ve vertiport olarak adlandırılan özel iniş ve kalkış alanlarına ihtiyaç duymaktadır. Vertiportların mevcut şehir altyapısındaki park yerlerine, ofislere ve çatılara yerleştirilebilmesi bu tür altyapıların şehir merkezlerinde uygulama zorluğunu önemli ölçüde azaltacaktır.

Operasyonel açıdan uçağın elverişlilik düzenlemeleri ve halkın kabulü ana zorluk olarak görülmektedir. Havacılık otoriteleri tarafından mevcut havacılık yasalarının kapsamlı bir şekilde test edilmesi ve değiştirilmesi yoluyla güvenli bir hava aracı sağlamak için düzenlemeler ve sertifikalar verilebilir iken, halkın kabulünü ele almak daha zor bir süreç olacaktır. Otonom uçak geliştirmeye yönelik güçlü hedeflerin olmasına rağmen, Kasım 2020'de yapılan bir ankette katılımcıların yalnızca %21'inin bir eVTOL hava aracı ile seyahat ederken kendilerini güvende hissedeceklerini söylediği saptanmıştır. Tahminler mevcut engellerin aşıldığı göz önüne alındığında özel noktadan özel noktaya hizmet olan hava taksi faaliyetinin ancak 2040 veya 2050 yılı civarında başlayabileceğini öngörülmektedir.

Günümüzde dünyanın birçok şehrinde toplu ulaşım sistemi hızla artan nüfusa uyum sağlayabilmek için birçok zorlukla karşı karşıya kalmaktadır. Bu zorlukların

üstesinden gelmek adına KHH'nin tanıtılması ulaşımında iyileşmeye yönelik umut verici bir adım atılmasını sağlayabilir (Schweiger, Knabe ve Korn, 2021). Teknolojideki ilerlemeler sıkışık metropoller için bir KHH ulaşım sisteminin oluşturulmasına katkı sağlamaktadır.

KHH'nin en önemli unsuru ise eVTOL hava araçlarının kalkış ve iniş için kullanacağı altyapı birimi olan vertiportlardır (Taylor, Saldanli ve Park, 2020). Vertiport eVTOL hava araçlarının iniş ve kalkış, yolcu indirme ve bindirme, uçuş öncesi ve sonrası kontrollerin yapıldığı, uçağın aküsünün şarjı ve bakımının yapıldığı operasyonlarla eVTOL hava araçlarına yönelik bir havaalanı türü olarak tanımlanmaktadır.

Vertiport tasarımlarında kalkış ve iniş alanları, park kapıları, taksi yolları ve yolcu konaklama alanları gibi yüzey özelliklerinin alan gereksinimleri göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca çevredeki yüksek binalar, engeller, gürültü kısıtlamaları, komşu geleneksel kontrollü hava sahası, rüzgârlar, imar durumu vb. hususlar dâhil olmak üzere vertiporta iniş ve kalkış yollarını etkileyebilecek hava sahası kısıtlamaları da dikkate alınmalıdır (Zelinski, 2020).

Son yıllarda geleneksek olarak kullanılan ulaşımdan önemli ölçüde daha kısa sürede seyahat ile alternatif bir ulaşım şekli olarak şehirlere hava yolculuğunun tanıtılması artan bir ilgi oluşturmıştır. Bu ulaşım şeklinin kamuya açık hale gelmesi ise şehir içi alanlarda son derece kısıtlı bir alanda yüksek hacimli operasyonların gerçekleştirilmesini gerektirecektir (Bradford, 2021).

KHH hızlı ve esnek yeni bir ulaşım şekli olarak mevcut ulaşım ağını zenginleştirme potansiyeline sahip gelişmekte olan bir ulaşım türüdür. Şehir içi hava taşımacılığı son on yıldır (Beresnevicius, 2019) birinci sınıf iş seyahatleri için helikopter uçuşları ile gerçekleştirilir iken (Voom, 2019), bu uçuş şeklinin benzeri ise KHH içinde geçerli olacaktır. 2000'li yılların başından itibaren elektrikli hava araçları fikri yeniden gündeme gelmeye başlamıştır (Moore, 2003; Lewe vd., 2002). UBER ve benzeri şirketlerin eVTOL hava araçlarını geliştirmeye başladığı yıllarda kentsel hava hareketliliğinin bir toplu taşıma sistemi olarak kullanılabileceği fikri ilk kez gerçekleştirilebilir bir düşünce olarak görülmeye başlanmıştır.

KHH başlangıçta altyapıdan kaynaklanan sorunlar nedeniyle engellerle karşı karşıya kalmıştır (Lineberger vd., 2019; Vascik ve Hansman, 2017; Johnston, Riedel ve Sahdev, 2020). eVTOL hava araçları ile ilgili teknolojik sorunların yanı sıra hava

trafiğinin yönetimi (Federal Aviation Administration, 2020; Balakrishnan vd., 2018; Kopardekar, 2004; Geister ve Korn, 2017; Duvall vd., 2019), gürültü (Sparrow vd., 2019; Vascik ve Hansman, 2017; International Transport Forum and OECD, 2021; Ackerman ve Gregory, 2020), güvenlik ve sertifikalandırma gibi üstesinden gelinmesi gereken çeşitli engeller mevcuttur (Phiesel ve Moormann, 2017; Holmes vd., 2017; Grandl vd., 2018; Duwe ve Sprenger, 2019).

Altyapı ile ilgili hususların merkezinde ise vertiport yer almaktadır. İlk vertiport 2019 yılında Singapur'daki bir sergi için Skyports ve Volocopter şirketleri tarafından inşa edilmiş ([http-25](http://25)), 2021 yılının sonunda da Birleşik Krallık'ta Urban Air Port şirketi tarafından başka bir sergi planlanmıştır (Fleming, 2021). Dinamik bir vertiport konfigürasyonu için erken bir yaklaşım patenti Petersen tarafından alınmıştır (Petersen, Alexander ve Swaintek, 2020).

3.1. Elektrikli Dikey Kalkış ve İniş

eVTOL hava araçları helikopterler gibi dikey kalkış ve iniş yapan ve uçaklar gibi ileri uçabilen hafif ticari hava araçlarının bir kombinasyonudur. eVTOL hava araçları helikopterlerden farklı olarak tahrik için yakıt yerine batarya kullanarak helikopterlerden daha fazla manevra kabiliyetine ve daha az karmaşık bir yapıya sahip olarak helikopterlerden daha verimlidirler. eVTOL hava araçları ticari hava taşıtlarından daha alçak irtifada uçmak üzere pilotlu veya otonom olacak şekilde tasarlanmıştır.

Günümüzde dünya çapında geliştirilmekte olan 100'den fazla eVTOL hava aracı projesi mevcut olup her proje sahibi firma hızla gelişen bu sektörde söz sahibi olmak istemektedir (Reed, 2019). Bununla birlikte, bir eVTOL hava aracını geliştirmeden teste ve ticari üretime taşımak yatırım açısından ağır bir çaba olarak değerlendirilmektedir. eVTOL hava araçlarının hava hareketliliği için kullanım alanları arasında paket ve kargo teslimatı, hava taksileri ve havaalanı servisleriyle kentsel yayılmanın üzerinde insanları taşımanın yanı sıra şehirler arası yolcu hizmetleri ve hava ambulansları, arama-kurtarma ve yangın söndürme gibi özel uygulamalar da yer almaktadır.

Günümüze kadar yapılan eVTOL hava aracı yatırımlarının çoğu bu hava aracının neye benzeyeceği, hava aracının nasıl çalıştırılacağı ve hava aracının nasıl bir performans sergileyeceğinin yanı sıra bu hava aracını ticari uçak havacılığından daha güvenli, daha emniyetli hale getirme ve harika bir müşterinin nasıl yaratılacağı gibi tasarım ile ilgili konulara odaklanılmıştır. Yapılan araştırmalar eVTOL hava araçları ile

ilgili en önemli tasarım kriterlerinin faydalı yük, güvenlik, gürültü ve maliyetten oluştuğu sonucunu ortaya çıkartmıştır.

Hava araçlarının menzili, tek kişi ile dokuz kişi ilave bagaj arasında değişmektedir. Lilium ve Joby Aviation gibi önde gelen şirketler beş yolcu alan eVTOL hava araçlarına odaklanır iken Volocopter ve Ehang gibi şirketler ise daha kompakt bir çözümü tercih etmektedir. EASA ve FAA ise eVTOL hava araçları için maksimum kalkış ağırlığının 3.175 kg olarak ayarlanmasını tavsiye etmektedir (European Aviation Safety Agency, 2019).

eVTOL hava araçlarının nüfuslu alanların üzerinde uçabilmesi için en az genel havacılıkta kullanılan uçaklar kadar güvenli olması gerekmektedir. Bununla birlikte şehir semalarında faaliyet gösteren eVTOL hava araçlarının sayısında beklenen hızlı artış nedeniyle havacılıkta güvenlik kurallarını düzenleyicilerin genel havacılık için geçerli olan kurallardan daha katı güvenlik standartları uygulamaları gerekecektir.

Kentsel ortamlarda kullanılması düşünülen eVTOL hava araçlarını çalıştırmak için hem frekans seviyesinde hem de desibel seviyesindeki ses kirliliği ciddi bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Uber eVTOL hava araçları mevcut hafif helikopterlerden 15 desibel daha az gürültülü olması gerektiğini belirten bir dizi gereksinime sahiptir. Bu durum ise tipik bir helikopter için 85 desibele karşı 500 fitte yaklaşık 70 desibel olmaktadır (Uber, 2018). Buna karşılık 25 metre yükseklikte ticari bir jetin gürültüsü 150 desibel iken sakin bir kırsal alanda bu değer 30 desibel olarak ölçülmüştür (http-22).



Şekil 3.2. eVTOL örnekleri; Joby S2 (<http-23>), Lilium Jet (<http-24>)

Hizmet olarak mobilite devriminin bir parçası olarak eVTOL hava araçları hizmet sağlayıcılar tarafından yönetilecek ve muhtemel olarak özel müşterilere satılmayacaktır.

Hizmet sağlayıcılar isteğe bağlı bir iş hizmetinin parçası olacak eVTOL hava aracı filoları satın alacaktır. Bu model, araç başına ürün maliyetlerini en aza indirmeyi ve ticari eVTOL girişimlerinin başarısını arttırmaya yardımcı olacak olan yolcu mil başına maliyetin düşürülmesine olanak tanıyacaktır. Şekil 3.2’de Joby ve Lilium Jet şirketleri tarafından kullanılması tasarlanan eVTOL hava araçları gösterilmiştir (http-23; http-24).

3.2. Kentsel Ortamda eVTOL Mimarisi

eVTOL hava araçlarının kentsel bir ortamda kullanılabilmesi için farklı koşulların karşılanması gerekir. Bu koşullar içerisinde en önemli olanı ise güvenlidir. Diğer önemli unsur ise çevreye olan etkisinin yani gürültü kirliliğinin mümkün olduğunca düşük seviyede tutulması gerekir (Finger vd., 2018). eVTOL hava araçları ile yolcu taşımacılığı hala yeni bir araştırma alanı olarak güncelliğini korumaktadır (Thippavong vd., 2018; Whittle, 2017). eVTOL hava araçlarının tasarımını oluşturan ana bileşenler yük, hız, menzil, gürültü, güvenlik ve maliyet olarak sıralanabilir. Bu ana bileşenler eVTOL hava aracının seyir ve havada asılı kalma verimliliğini ve gürültü emisyonlarının tanımlanmasını sağlar. Kavramsal tasarımın bir parçası olarak eVTOL hava aracının güvenliğine ve gürültüsüne özellikle dikkat edilmesi gerekir (Nathen vd., 2021). eVTOL hava aracı mimarisinin en yaygın dört tipi Şekil 3.3’de gösterilmiştir (Nathen vd., 2021).



Şekil 3.3. En yaygın eVTOL mimari örnekleri (Nathen vd., 2021)

3.2.1. Multikopter mimarisi

Multikopter mimarisi eVTOL hava araçlarının ilk mimari kategorisi olarak ortaya çıkmıştır. Bu mimari nispeten basit olması ve düşük disk yüklemesi nedeniyle dikey

kalkış ve inişin yanı sıra havada asılı kalma faaliyetinde verimli olmaktadır. Ancak bu yapının kanatları olmadığı ve genellikle seyir verimliliğindeki eksikliğinden dolayı kentsel bir ortamda kullanılması sınırlandırılmıştır (Nathen vd., 2021). Pradeep ve Wei (2019) multikopter mimarisi ile ilgili olarak kapsamlı çalışmalar yapmıştır. Bu mimari yapıya ilk örnek olarak Volocopter verilebilir (Reuter ve Griemens, 2021).

3.2.2. Yükselme ve seyir mimarisi

eVTOL hava araçlarının ikinci mimarisi ise yükselme ve seyir mimarisidir (Nathen vd., 2021). Bu yapı multikopter ile uçağın bir bileşimini temsil etmektedir. Bu durum bir uçağın uçuş karakteristikleri ile dikey kalkış iniş kabiliyetinin birleştirilmesi ile gerçekleşmektedir. Bu yapıda ilgili hava aracının menzilin en üst düzeye çıkartmak için pervane başına kanat sayısı azaltılmış ve seyir uçuşu sırasında sürtünmeyi en aza indirmek için ise daha kısa kırışlar kullanılmıştır. Pervanelerin küçük boyutu artan kanat ucu hızlarından dolayı gürültü emisyonları açısından büyük bir sıkıntı teşkil etmektedir. Bu yapıya örnek olarak Cora Kitty Hawk verilebilir (Bacchini ve Cestino, 2019).

3.2.3. Tilt rotor mimarisi

eVTOL hava araçlarının üçüncü mimarisi kanatların ve pervanelerin her ikisinin ya da sadece pervanelerin eğilebildiği tilt rotordur (Nathen vd., 2021). Bu yapıda eVTOL hava aracı havada asılı halden ileriye doğru uçuşa geçtiğinde pervane eksenini 90° döndürülür. Bu yapı bir eVTOL hava aracının kaldırma ve seyir mimarisi ile mümkün olandan daha optimal bir pervanenin tasarlanmasını mümkün kılmaktadır. Bu mimaride daha fazla teknik karmaşıklık, daha büyük bir boyut ve eğim mekanizması olduğu için bu hava aracının ağırlığı diğer hava araçlarından fazla olmaktadır.

Havada asılı kalma faaliyeti için pervanelerin büyük ve düşük kanat ucu hızına sahip olması, düşük hızlı tork üretmek için ise bir dişli kutusuna ihtiyaç vardır ya da motorun daha büyük ve ağır olması gereklidir. Hendricks vd., (2019) tilt rotorlu hava araçlarının tasarımları ile ilgili olarak değerli çalışmalarda bulunmuştur. Bu tür bir eğim rotor yapısına örnek olarak Joby S2 verilebilir (Moore, 2014; Stoll vd., 2014).

3.2.4. Kanallı fan mimarisi

Yukarıda izah edilen üç eVTOL hava aracı mimarisi pervane tabanlı bir tahrik sistemine dayanmaktadır (Nathen vd., 2021). eVTOL hava araçlarının dördüncü mimari kategorisi ise kanallı fan mimarisi olarak bilinmektedir. Kanallı fan mimarisinin pervaneli mimariye sahip eVTOL hava araçlarına göre en büyük avantajı kanalın

gürültüyü önemli ölçüde azaltacak şekilde hareket etmesidir. Bu olay kanalın mevcudiyeti ve içlerine monte edilen akustik astarlarla sağlanmaktadır. Bu durum özellikle uçağın yükü arttığında fark edilmektedir. Pervaneli bir eVTOL hava aracının yükü arttırıldığında gürültü seviyesini sabit tutmanın tek yolu pervanelerin boyutlarının arttırılmasıdır. Bu yapıda yük kanallı bir fan üzerinde kaldırıldığında disk yükü arttırılarak gürültüdeki artışı sınırlandırmak için kanal ve akustik işlem uygulanmaktadır. Kanallı fanların bir diğer avantajı ise kanat ucu kayıplarının azaltılması ve bir stator sırasının varlığı ile çıkış girdabının kaldırılmasıdır.

Kanallı fan mimarisinin ana dezavantajı ise daha yüksek disk yükü nedeniyle havada asılı kalmak için gereken gücün pervaneli eVTOL hava araçlarına göre daha yüksek olmasıdır. Kanallı fan mimarisi için iki eVTOL hava aracı tipi tanımlanır. Birincisinde aerodinamik etkileşimleri en aza indirmek için kanallı fan gövdeden uzağa yerleştirilir iken ikincisinde ise fan gövdeye ve kanatlara yakın bağlı olduğu için sıkı bir aerodinamik bağlantı oluşturulur. Bu tip kanalı fan yapıları örnek olarak Lilium Jet verilebilir.

3.3. eVTOL'ler İle İlgili Zorluklar ve Engeller

KHH'deki sıçramayı yapabilmek adına üzerinden gelinmesi gereken bazı engeller vardır. Bu engeller teknik ve teknik olmayan olmak üzere iki grupta toplanabilir (Anand vd., 2021). Teknik zorluklar arasında bir KHH için gerekli olan hava trafik kontrolü, ilgili hava araçlarına güç sağlamak için gerekli olan batarya teknolojileri ve 5G ağının görüldüğü gibi hızlı ve güvenilir bir iletişim ağı olarak geliştirilmesi yer almaktadır (Holden ve Goel, 2016). Diğer taraftan teknolojik olmayan zorluklar ise düzenleyici ve sertifikasyon konuları, mevcut ulaşım modlarıyla rekabet, sosyal kabul ve gerekli altyapıyı içermektedir (Anand vd., 2021).

Bu zorluklar arasında üzerinde en az çalışılan fakat en büyüğü olan KHH ağı için gerekli olan altyapı gelmektedir (Lineberger vd., 2019). KHH için kullanılacak hava araçlarındaki teknolojik ilerleme çok iyi seviyeye gelmesine rağmen altyapı gereksinimlerinin incelenmesi ve araştırılması çoğunlukla ikinci planda kalmıştır (Feldhoff ve Soares Roque, 2020). Bu sebepten dolayı insan ve yük taşımacılığını desteklemek için gerekli olan altyapı henüz oluşturulamamıştır (Brown vd., 2020). Duvall vd., (2019) altyapı için planlama, inşa etme ve alan edinmenin zaman sürecinin uzun sürmesi nedeniyle altyapının acilen geliştirilmesi ve altyapı planlamasına derhal başlaması gerektiğini belirtmiştir.

3.3.1. Sürdürülebilir bir enerji kaynağı

Batarya ile çalışan eVTOL hava araçları için özellikle lityum iyon batarya paketleri, daha uzun uçuş süresi sunan ancak daha ağır, daha gürültülü ve havayı kirleten hibrit seçeneklere göre tercih edilen bir güç kaynağı olarak ortaya çıkmaktadır. Son zamanlardaki dönüşümlerden birisi yakın zamanda 4EX adıyla tamamen elektrikli bir eVTOL hava aracına geçiş yapan ve bunu 2020 yılında tüketici elektroniği fuarında sergileyen helikopter üreticisi Bell Textron olmuştur (Bell Nexus, 2020).

Katı hal teknolojisinin yeni nesil batarya depolama endüstrisini önümüzdeki on yılın ortasına kadar ortadan kaldırması beklenmektedir (Bloch vd., 2020). Lityum iyon bataryalara göre iki kat performans artışı sağlama potansiyeline sahip olan katı elektrolitleri kullanan katı hal bataryalarına yönelik önemli yatırımlar yapılmaktadır. Katı hal bataryaların yanıcı olmamaları bu bataryaları daha güvenli hale getirmektedir. Lityum iyon bataryalar ise maliyetli ve sıcaklık kontrollerini kullanmak için mobilite uygulamaları gerektiren yanıcı sıvı elektrolitlere sahiptirler.

Hidrojen yakıt hücrelerinin enerji yoğunluğu lityum iyon bataryalardan daha yüksek olduğundan hidrojenin yakın zamanda eVTOL hava araçları için geçerli tek alternatif yakıt kaynağı olacağı değerlendirilmektedir. Bu durum hidrojenle çalışan eVTOL hava araçlarının batarya ile çalışan rakiplerinden daha hızlı seyahat edebileceği ve daha fazla ağırlık taşıyabileceği anlamına gelmektedir. Sektörde öncü bazı şirketler hidrojenle çalışan eVTOL hava araçlarını geliştirmektedir. Bu şirketlerden biriside hidrojenle çalışan acil müdahale ve nakliye dağıtım pazarlarında faaliyet gösteren Alaka'i Technology'nin Skai eVTOL'üdür (AOPA, 2019).

3.3.2. Düşük irtifa bağlantısı için mobil ağlar

eVTOL hava araçları için 5G iletişiminin kullanıma sunulmasının çok önemli bir hizmet olacağı değerlendirilmektedir. eVTOL hava aracı trafiğinin hacmi arttıkça gerçek zamana yakın iletişimin şehir gökyüzünü güvende tutmak için gerekli olacağı düşünülmektedir. 5G iletişimin kullanımı özellikle aşırı yoğun hava koşullarında durumsal farkındalık, uçaktan uçağa ve uçaktan yere iletişim için önem arz etmektedir. 5G'nin aynı derecede önemli olan düşük gecikme süresi ve yüksek bant genişliği uçak içi yolcu uygulamaları ve akıllı şehir hizmet olarak mobilite uygulamaları için bir zorunluluk haline gelecek olmasıdır.

3'üncü Nesil Ortaklık Projesi'nin uçakların özelliklerini değiştirmeye yönelik çabalarının gösterdiği havadan yere iletişim, 5G için birincil odak noktası olacağı

düşünülmektedir. Uygulamalar arasında hava ve trafik verilerinin uçaklar ve yer kontrolü arasında paylaşılması, daha doğru bulut oluşumu ve türbülans tahminleri sağlanması, önleyici bakım için uçakların gerçek zamanlı izlenmesi ve yolcu Wi-Fi ve eğlence hizmetleri yer almaktadır.

Diğer bir çözüm ise havadan yere hizmet dâhil olmak üzere 5G iletişim hizmeti için lisanssız spektrum kullanacak küçük uydu takımyıldızlarından sağlanan hizmettir. Küçük uydular daha geniş 5G şemsiyesinin bir parçası olarak karasal antenlerin yeterince kapsamadığı uzak bölgeler de dâhil olmak üzere dünyanın her yerindeki uçakları izleyebilme imkanına sahiptir. Bununla birlikte küçük uyduların yüksek gecikme ve düşük hız ile ilgili geleneksel uyduların zorluklarının üstesinden gelip gelemeyeceği açık olarak belli değildir. Şu anda doğrudan havadan yere iletişim uydulara kıyasla daha düşük gecikme süresi ve bit başına maliyeti nedeniyle uydu hizmetinden üstün olması havadan yere çok daha büyük bir uygulama kümesi sağlama potansiyeline sahip olduğu anlamına gelmektedir.

Karasal uygulamalar erken 5G'nin kullanıma sunulmasının odak noktası olsa da birkaç telekomünikasyon şirketi güvenli iletişim ve veri alışverişini sağlayarak havacılıkta 5G'yi kullanmak için çalışmaktadır. Bunlardan birisi de kısa süre önce Uber ile bir ortaklık ilan eden AT&T'dir. Bu ilişki AT&T'nin düşük irtifa otonom kargo uçağı ve pilotlu uçaklar için LTE ve 5G bağlantısını değerlendirmesini ve etkinleştirmesini içermektedir (Reichert, 2019).

Volocopter şirketi ise kısa süre önce iki kişiyi 110 km/s hızla 35 km mesafeye taşıyacak bir kentsel hava taksisi olan VoloCity adlı yeni 5G özellikli eVTOL hava aracı planlarını duyurdu. 5G özelliği performansı ve güvenliği artırmak için uçağın köşeleri görmesine, engellerden kaçınmasını ve uçuş verilerini hızlı bir şekilde indirmesine olanak tanımaktadır (World Economic Forum, 2019). Volocopter şirketi bu yeteneklerini Dubai ve Singapur'daki denemelerde sergilemiştir.

İspanya'nın Benidorm kentinde Vodafone Gelişmiş Havacılık ve Uzay Teknolojileri Merkezi ve Valencia Politeknik Üniversitesi'nden oluşan bir konsorsiyum yakın zamanda pilotun görüş alanının ötesinde bir kentsel alanda 5G tarafından kontrol edilen ilk İHA'yı test ederek büyük bir başarı kazanmıştır (Cool Radio, 2020). Yapılan gösteri kısıtlı alanlarda uçuşların hava trafik kontrolünü ve gerçek zamanlı uçuş çatışmalarının çözümünü içermektedir. Yapılan tüm bu erken gayretler eVTOL hava

araçları için 5G ve bunların diğer akıllı şehir hizmet olarak mobilite ve altyapı bağlantısı ile ilgili çalışmalar olarak görülmektedir.

3.3.3. Kentsel hava trafik yönetimi

Otonom araçların aksine eVTOL hava araçlarının hava trafik yönetimi (ATM-Air Traffic Management) özellikle EASA ve FAA tarafından düzenlenmektedir. Bu kurumlar yoğun nüfuslu kentsel ortamlarda düşük irtifalarda hem yolcu hem de kargo taşıyan yüksek yoğunluklu İHA ve eVTOL hava araçları için hava trafiğini yönetebilen yenilikçi hava trafik kontrol (ATC-Air Traffic Control) sistemi için standartlar geliştirmektedir.

Avrupa Birliği'nin havacılık otoritesi olan EASA hâlen kentsel hava trafiği yönetimi için U-Space adını verdiği tavsiyeleri oluşturma sürecindedir (European Aviation Safety Agency, 2019). ABD'nin kentsel hava trafiği yönetimi sistemine ise insansız uçak sistemleri trafik yönetimi (UTM-Unmanned Aircraft Systems Traffic Management) adı verilerek bu sistem NASA ve FAA tarafından yönetilmektedir ([http-13](http://13)). EASA 22 Nisan 2021'de Avrupa komisyonu tarafından kabul edilen dünyanın ilk UTM düzenleyici paketini hazırlamıştır. Bu düzenleyici paketin 2023 yılının başlarında uygulanabilir hale gelerek UAS operasyonlarının kentsel ortamda güvenli şekilde entegre olmasını sağlaması beklenmektedir. Hazırlanan paket eVTOL hava araçları için geçerli olmasa da kuralların ne getireceği konusunda rehberlik sağlayacağı düşünülmektedir (PYMNTS, 2020).

FAA ülke çapındaki düzenlemeler için hızlı hareket etmekten kaçınmasına rağmen ticari ve eğlence amaçlı operatörlerin kontrollü hava sahasına erişmesi için düşük irtifa yetkilendirme ve bildirim (LAANC-Low-Altitude Authorization And Notification Service) hizmeti gibi yinelemeli yapılar getirerek bu sorunu farklı şekilde ele almaktadır. FAA NASA'dan aldığı akademik bilgiyi operasyonel amaçlara dönüştürmek için bir araştırma geçiş ekibi kurarak kullanım senaryosu geliştirme, veri alışverişi ve bilgi mimarisi ve iletişim ve navigasyon ile algılama konularına odaklanmaktadır. Araştırma ve testlerin amacı alçak irtifa hava sahasında güvenli görsel ve görüş hattının ötesinde İHA uçuşları sağlamak için hava sahası operasyon gereksinimlerini belirlemeye yönelik planlanmaktadır ([http-13](http://13)).

UTM, hava trafik yönetimi sistemine entegre edildiğinde İHA'lar ve eVTOL hava araçları uçuş yetkileri sağlamak için hava sahasına erişim insan müdahalesi olmadan yönetilecek ve mevcut uçak hava sahası ile herhangi bir çakışma olmamasını sağlamak

için araç irtifası sürekli olarak izlenecektir. Bu durum ticarileştirilecek ilk nesil eVTOL hava araçları olması beklenen kargo eVTOL hava araçlarının yetkilendirilmesi için temel bir gereklilik olacaktır.

3.3.4. Kritik güvenlik ve sertifikalar

eVTOL hava araçlarının toplum tarafından yaygın olarak benimsenmesini nihai olarak belirleyecek olan en önemli faktör insan güvenliğidir. Bütün şartlar eşit olduğunda bir yolcu için akla şu soru gelecektir, işe gitmek için bir hava taksisine binmenin algılanan riskinin tampondan tampona trafiğe katlanmanın stresinden daha fazla olup olmadığıdır. İnsanlar hava taksiye güvenmezler ise araba kullanmanın stresine katlanmak zorunda kalacaktır. Hem EASA hem de FAA eVTOL hava araçları için üretim süreçlerinin sertifikasyonu, ekipman testi, bakım ve eğitimini içeren sağlam güvenlik standartları oluşturmuştur. Sonuç olarak eVTOL hava araçları, ticari hava yolculuğunun en güvenli ulaşım biçimlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Havayolu uçakları için arıza sınıflandırması 10^{-9} standardı olarak adlandırılan her bir milyar saatlik uçuş süresi için bir felaket olayı tanımlamasıdır. EASA ve FAA eVTOL hava araçları içinde benzer bir arıza sınıflandırma standardı oluşturmayı planlamaktadır.

FAA, 03 Şubat 2020'de teslimat İHA'ları için onları özel bir uçak sınıfı olarak sınıflandıran yeni güvenlik standartları önermiştir (PYMNTS, 2020). Dünyanın dört bir yanındaki havacılık güvenliği kurumları hem araçların hem de onları çalıştıran yazılımın güvenliğini sağlamak için eVTOL hava araçları için düzenlemeler hazırlar iken İHA standartları uygulanıncaya kadar bu düzenlemeleri uygulamamaları beklenmemektedir.

Daha yüksek risk algısını ele almak için eVTOL hava aracı tasarımları birden fazla motor, kontrolör ve batarya içeren dağıtılmış tahrik ve istenmeyen arızaları önlemek için yedekli bir batarya yönetim sistemi mimarisini içermektedir (Kim, Perry ve Ansell, 2018). eVTOL hava araçlarının çalışması onaylandığında daha iyi navigasyon sensörlerine, daha gelişmiş bağlantıya ve onları en az günümüzün ticari uçakları kadar güvenli hale getirecek kısmi özerkliğe sahip olacaklardır. EASA ve FAA'nın eVTOL hava araçları için kapsamlı bir dizi yeni sertifika standardı geliştirmesi zaman alacak olmasına rağmen bu konuda ilerleme kaydettikleri görülmektedir (EVTOL, 2019).

3.3.5. Rekabetçi hizmete dayalı fiyatlandırma

Bir yerden bir başka bir yere bir yolculuğun fiyatını belirlemenin iki yolu vardır. Birincisi hava taksisine binmek de dâhil olmak üzere birden fazla ulaşım biçimini içeren uçtan uca seyahatin fiyatı ikincisi ise bir eVTOL hava aracında seyahatin zaman içinde maliyetine odaklanmaktır. Bunun sonucu olarak fiyat diğer hizmet olarak mobilite seçenekleriyle rekabet edebilir hale gelecektir.

Tüm bu işleri gerçekleştirebilmek için öncelikle büyük resmi göz önünde bulundurarak eVTOL hava aracı endüstrisinin hava taksilerin hizmet olarak mobilite akıllı şehir modelinde diğer toplu taşıma biçimleriyle nasıl entegre olacağının düşünülmesi gereklidir. Birçok yolcu için işe gitmek bir yapay zekâ asistanının toplam işe gidip gelme süresini en aza indirmek için özelleştirdiği iki veya daha fazla ulaşım türünü içerebilir. Örneğin bir hava taksisine yetişmek için otonom bir otobüsle bir vertiport'a gitmek ardından da bir yolculuğun son mil ayağı için bir araç çağırma hizmeti olacaktır. Her bir ulaşım biçiminin maliyeti hepsinde ortalama fiyattan daha az kritiktir. Ayrıca tüm seyahat türlerini kapsayan tek bir bilet almanın rahatlığını da göz önünde bulundurmak gerekir. Yolculuğun mil başına maliyetine dâhil edilmeyen zamandan tasarruf etmenin ve rahatlığı arttırmanın bir değeri de mutlaka olacaktır.

Bir eVTOL hava aracı ile yolculuğunun belirli fiyat noktasına gelince bir hava taksi yolculuğunun bir yolcuda pratik bir alternatif haline gelmesi için uzun bir yol vardır. Eğer seçim hava taksisi ile işe gitmek arasında ise hava taksisinin fiyat noktasının bugün küçük bir sedan araç için mil başına yaklaşık 0,50 ABD doları olan bir araba kullanma maliyetine yaklaşması gerekir (AAA, 2017). Uber ilk nesil hava taksilerinde koltuk fiyatını yolcu mili başına 5,73 dolar olarak tahmin ederek fiyatın en sonunda 0,50 doların altına düşeceğine inanmakta iken (Dickey, 2018), NASA ise bu taşımacılığın maliyetinin biraz daha yüksek olacağını bildirmektedir. Yakın zamanda 5 koltuklu pilotlu bir eVTOL hava aracının yolcu mili başına yaklaşık maliyeti 6,25 dolar olacağı hesaplanmaktadır. Bununla birlikte 2018 NASA raporuna göre uzun vadede yüksek operasyonel verimlilik, özerklik ve teknolojik iyileştirmeler maliyeti yaklaşık %60 oranında azaltacağı değerlendirilmektedir (National Aeronautics and Space Administration, 2018).

Rekabetçi fiyatlandırmaya giden en olası ve basit yol, tasarım ve tedarik zincirlerinde maliyetlerin kaldırılmasına öncelik veren bir iş modelinin olmasıdır. Maliyetleri düşürmeye yönelik operasyonel uygulamalar hava aracını hizmet dışı

bırakan denetim ihtiyacını azaltacak olan öngörücü bakımı içermektedir. Ayrıca insanlara otomatik pilot yazılımıyla güçlendirildiği ve nihayetinde otonom eVTOL hava araçları ile değiştirildiği ortak bir pilot uygulama modelinin tanıtılması genel işletme maliyetini azaltacaktır.

Endüstri, bileşenlerin ve sistemlerin tasarımına, doğrulanmasına ve sertifikasyonuna yardımcı olmak için dijital ikizleri kullanma yoluyla yeniliği de hızlandırarak pazara sunma süresini kısaltabilir. Örneğin 2016 yılında Siemens daha iyi performans ve güvenilirlik ile daha düşük maliyetli bir güç aktarma organı tasarlamak için Extra 330LE akrobasi elektrikli uçağının elektrikli tahrik ünitesinin dijital bir ikiz modelini oluşturmuştur. Yakın zamanlarda ise Siemens mühendisleri daha da iyi bir güç aktarma organı tasarlamak için uçağın ve ana sistemlerinin bütünsel bir modelini geliştirmiştir (http-14). Batarya analitiği yazılımında lider sağlayıcı olan Twaice benzer bir uygulama ile şirketlerin batarya sistemlerini daha verimli ve sürdürülebilir bir şekilde geliştirmelerine ve kullanmalarına yardımcı olur iken onları daha güvenilir ve daha dayanıklı hale getirmek için dijital ikizlere dayalı bir batarya analizi yazılımı kullanmıştır.

3.3.6. Sosyal kabul

Başlangıçta insanları bir hava taksisine bindirmek hiç de kolay olmayacaktır. Bunu başarmak için atılması gereken ilk adım eVTOL hava araçlarının teknik yeteneklerinin ve düzenleyici gözetimin sağlamlığının güvence altına alınması gerekir. İnsanları bir hava taksisine bindirmek için diğer kritik konular ise gürültü, görsel kirlilik ve mahremiyet konusundaki endişeleri gidermek olmalıdır. Günün herhangi bir saatinde kalabalık alanların üzerinde uçabilecek çok sayıda eVTOL hava aracı göz önüne alındığında, hava taksi hizmeti sağlayıcıların sürdürülebilir bir iş kurmayı planlamaları için bu sorunları detaylı bir şekilde ele almaları ve çözmeleri gereklidir.

Her şeyden önce düzenleyiciler eVTOL ekosistem üyelerinin hava aracını güvenle tasarlayabilmeleri, geliştirebilmeleri, üretebilmeleri ve çalıştırabilmeleri için sağlam sertifikasyon, test ve düzenleyici standartlar oluşturmalarıdır. Diğer durum ise eVTOL şirketlerinin bu tür alışılmadık bir seyahat şekli hakkında insanlarda doğal olarak bir şüphe olacağından genel halkı uçağın güvenliği hakkında bilgilendirmek için bu standartları kullanmaları gerekecektir.

Almanya Stuttgart sakinleri üzerinde yakın zamanda yapılan bir araştırma eVTOL hava aracı ve altında yatan teknolojiler hakkındaki bilgi seviyesinin bir kişinin güvenlik

algısının bir göstergesi olduğunu bulmuştur. İnsanlar ne kadar bilgili olursa insanların bir eVTOL hava aracında uçuş olasılıkları o kadar yüksek olacaktır. Genel halk zaman içinde teknoloji konusunda daha bilinçli hale geldikçe eVTOL hava aracının güvenli olduğuna inancın artması beklenmektedir (http-15).

Halkın kentsel ortamda dikey kalkış ve iniş hava hareketliliği faaliyetini anlamasını desteklemenin yenilikçi bir yolu ise müşterilerin güvenli bir şekilde uçar iken bir uçuş deneyimi yaşamalarına ve teknolojiler hakkında bilgi edinmelerine olanak tanıyan sanal gerçeklik simülasyonları olacaktır. Potansiyel yolcu alışık olmadığı bu uçuş deneyimi hakkında ne kadar çok şey bilir ise bir eVTOL hava aracına binmek için o kadar rahat olacaktır.

Ancak hedef kitlede hava taksi veya uçan ambulans kullanmaya meyilli olmayacak bir kesim olmaya devam edecektir. ABD'deki genel nüfusun yaklaşık %40'ı bir dereceye kadar uçuş korkusuna sahip iken %2,5'i bir kişinin tamamen uçmaktan kaçınmasına veya uçarken önemli bir sıkıntı yaşamasına neden olan klinik fobi olarak sınıflandırılan korkuya sahiptir (http-16; Statista, 2015; Clark ve Rock, 2016). Klinik vakalarda bile uçuş korkusunu azaltmak için çalışmalar yapılmaktadır.

Bununla ilgili bir örnek Oxford sanal gerçeklik tarafından yürütülen ve sanal gerçeklik tabanlı terapiyi aldıktan sonra yükseklik korkusu çeken bireylerin fobilerinde ortalama %68 oranında azalma gösteren ve önemli bir iyileşme gösterildiğini bulan bir çalışma bulunmaktadır (The Guardian, 2018). Aynı terapinin uçuş fobisini yönetmek için de uygulanabilir olduğu değerlendirilmektedir.

4. VERTİPORT VE TASARIM KRİTERLERİ

Vertiport tasarım kriterleri elektrik ile çalışan dikey olarak kalkış ve iniş yapan KHH uçaklarının operasyonlarını destekleyecek tesislerin geliştirilmesine başlamak için havalimanı sahipleri, havalimanı operatörleri ve altyapı geliştiricilerine önemli bilgiler sağlamaya yönelik ilk adım olarak hizmet edecektir. Bu vertiport tasarım kriterleri bu yeni çağda altyapıyı güvenli bir şekilde inşa etmeye başlamak için gereken temeli sağlayacaktır.

Vertiport tasarım kriterleri sağlanarak gerçekleştirilecek bu dikey kalkış ve iniş operasyonları yolcuları veya kargoları kırsal, kentsel ve banliyö bölgelerinde daha düşük irtifalarda taşıma imkânına sahip olacaktır. Tasarım kriterleri güvenli kalkış ve inişlere izin vermek için tasarımcıların ve inşaat firmalarının takip etmesi gereken güvenlik açısından kritik geometri ve tasarım öğeleri, aydınlatma, işaretler ve görsel yardımcılar, şarj ve elektrik altyapısı, havalimanı içi vertiportlar ve yükseltilmiş vertiportlar gibi kritik bilgileri içermektedir.

4.1. Vertiport ve Tasarımı

KHH gelişmiş hava hareketliliğinin (AAM-Advanced Air Mobility) bir alt kategorisi olup kentsel bir ortamda insanlı ve insansız hava araçları için güvenli ve verimli bir ulaşım sistemi sağlayan yenilikçi bir kavram olarak kabul edilmektedir (Thippavong, 2018; Bradford, 2020). Kohlman ve Patterson, (2018) buna ek olarak KHH kavramının şehirler üzerinde alçak irtifalarda insan ve kargo taşımak için uçan hava araçlarının kullanılabileceği bir ulaşım türü olduğunu aktarmaktadır. Ulusal Hava Taşımacılığı Birliği (NATA-National Air Transportation Association) (National Air Transportation Association, 2019) ise KHH kavramının dikey iniş kalkış yapan elektrikli hava araçlarının kullanımı yoluyla kentsel çekirdek alanları konut banliyöleri ve kırsal alanlar ile birleştiren isteğe bağlı bir hava ulaşım sistemi olduğunu belirtmektedir.

NASA (Bradford, 2020) bir KHH havaalanının KHH kalkış ve varış operasyonu gereksinimlerini karşılayan bir havaalanı olduğunu aktararak bu havaalanlarına vertiport adını vermiştir. Vertiport terimi dikey (vertical) kelimesi ve havalimanı (airport) kelimelerinin birleşiminden oluşarak tiltrotor uçakların ve rotorlu uçakların kalkış ve inişini destekleyen şehir içi ve şehirler arası hava hareketliliğini sağlayan yeni bir altyapı elemanı olarak tanımlanır (Lippoldt, Preis ve Bogenberger, 2020). Taylor,

Saldanli ve Park, (2020) vertiportu dikey iniş ve kalkış yapan uçaklar için bir havalimanı türü olduğunu genelleyerek kalkış ve inişe ek olarak bir vertiportun araç yükleme, yolcu bindirme ve uçağa binme, uçuş öncesi ve sonrası denetimler ve uçak bakımı operasyonlarını kapsadığını belirtmektedir.

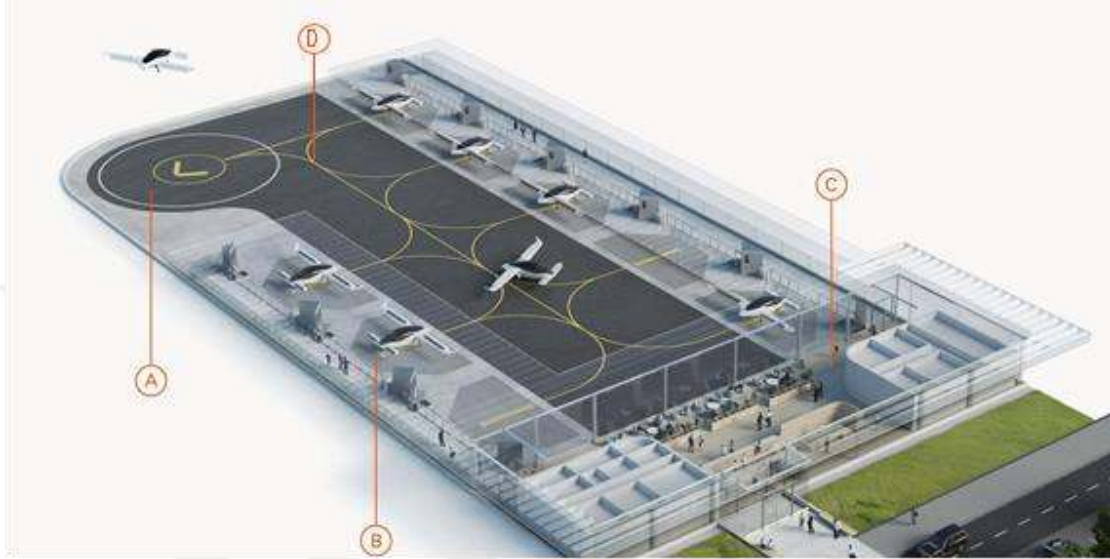
Vertiportlar için bina çatıları, deniz kıyısı boyunca uzanan araziler, otoyollar üzerindeki boşluklar ve mevcut havalimanlarındaki kullanılmayan araziler dâhil olmak üzere dikkate alınabilecek çeşitli konumlar mevcuttur (Kim, Schonfeld ve Rakas, 1995; Ashford, Mumayiz ve Wright, 2011). Vertiportlar geleneksel heliportlarla karşılaştırıldığında vertiportların ticari havaalanlarına benzer bir yolcu taşıma kapasitesine sahip olmaları nedeniyle heliportlardan daha büyüktürler (Lippoldt, Preis ve Bogenberger, 2020). Bununla birlikte eVTOL hava araçlarının dikey kalkış ve iniş kabiliyeti vertiportların benzer verime sahip ticari havalimanlarından daha derli toplu bir şekilde tasarlanmasına olanak tanımaktadır (Allen ve Simpson, 1970).

Lineberger vd., (2019) bir vertiportun kullanım amacına bağlı olarak farklı altyapı bileşenlerini içermesi gerektirdiğini belirterek bu altyapı bileşenlerini üç sınıfa ayırmıştır. Altyapı bileşenlerinin birincisi KHH altyapısı için merkezi konumlar olarak hizmet vermek üzere kentsel alanların çevresine büyük vertiportların yerleştirilmesidir. Bu vertiportlar eVTOL hava araçlarının bakım, onarım ve revizyonu (MRO-Maintenance, Repair And Overhaul) için altyapı ve bunların çalışması için şehir çapında merkezi bir kontrol sistemi sağlamaktadır. Bu kapsamda çalışan bir KHH ağı için her şehirde bu özellikleri karşılayan en az bir vertiport olması gerekir.

Altyapı bileşenlerinin ikincisinde diğer vertiportlar şehrin merkezinde yer alarak hem kargo hem de yolcular için biniş ve iniş, kalkış ve iniş faaliyetinde ana alanlar olarak hizmet ederler. Aynı anda birden fazla eVTOL hava aracını barındıracak alana sahiptirler ve genellikle hızlı şarj ve/veya yakıt ikmali sistemleriyle donatılarak temel güvenlik kontrol noktalarına ve küçük MRO işlemlerini gerçekleştirme kapasitelerine sahiptirler. Altyapı bileşenlerinin üçüncüsü ise sadece bir veya iki iniş alanından oluşan en küçük vertiportlardır. Bu bileşendeki vertiportlar sadece yolcuları ve yükleri almak ve indirmek için kullanılarak daha büyük vertiportlar arasında bağlantı noktaları olarak hizmet ederler.

Bir vertiport, tasarım sürecinin temel yapı taşları olan çeşitli temel bileşenlerden veya tanımlanmış alanlardan oluşur. Tanımlanan her alanın kullanımı, sınırlamaları ve nitelik açısından tanımlanan bir amacı ve bununla ilişkili gerekli yardımcı alanları

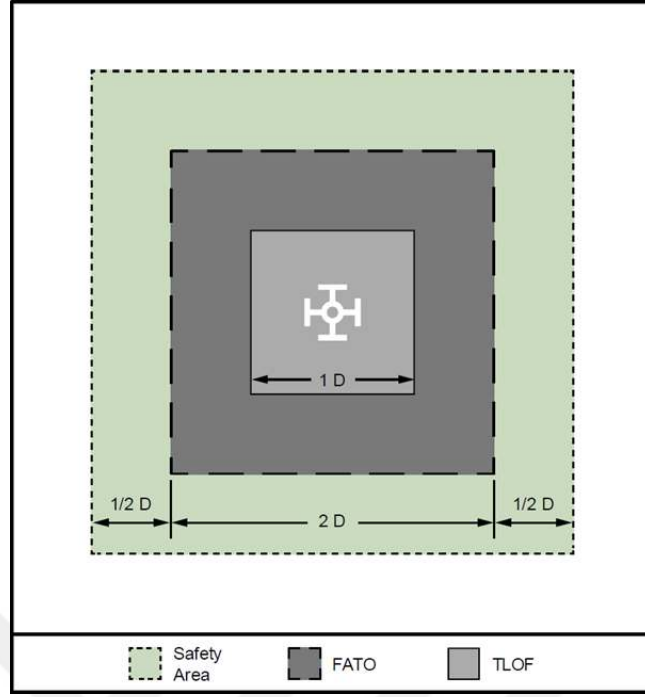
vardır. Vertiport elektrik, hidrojen ve hibrit dikey iniş ve kalkış yapan eVTOL hava araçların iniş ve kalkışları için kullanılan veya kullanılması amaçlanan bir arazi veya yapı alanı, ilgili binaları ve tesisleri içerir. Lilium vertiport modeli Şekil 4.1’de sunulmuştur (Lilium, 2021).



Şekil 4.1. Lilium vertiport modeli; A - ped; B - kapı; C - terminal; D - taksi yolu (Lilium, 2021)

4.2. İniş Alanı Tanımları

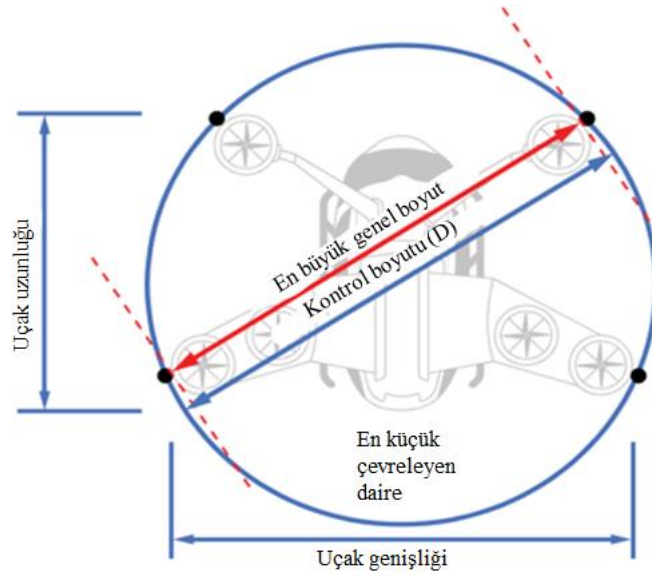
İniş ve kalkış alanı tasarımı ve geometrisi, iniş ve kalkış alanı (TLOF-Touchdown and Lift-Off Area), son yaklaşma ve kalkış alanı (FATO-Final Approach And Takeoff Area) ve güvenlik alanı (SA-Safety Area) olmak üzere üç temel yapıdan oluşur. TLOF, FATO, SA arasındaki ilişki Şekil 4.2’de, bu yapıların alan boyutları ise Tablo 4.1’de sunulmuştur (Federal Aviation Administration, 2022). Her bir vertiport tesisi için tanımlanan tasarım, dikey iniş ve kalkış yapan hava aracının kontrol boyutu (D-Controlling dimension) ile ilişkilendirilmektedir. Kontrol boyutu, uçak kalkış veya iniş konumunda iken varsa rotorlar/pervaneler döner iken yatay bir düzlemde dikey iniş kalkış yapan hava aracı projeksiyonunu çevreleyen en küçük dairenin çapı olarak tanımlanır ve bu mesafe 1D uzunluğuna eşittir. Kontrol boyutu ile ilgili görsel Şekil 4.3’te sunulmuştur (Federal Aviation Administration, 2022).



Şekil 4.2. TLOF, FATO ve SA ilişkisi ve boyutları (Federal Aviation Administration, 2022)

Tablo 4.1. İniş ve kalkış alanı boyutları (Federal Aviation Administration, 2022)

Eleman	Boyut
İniş ve Kalkış Alanı (TLOF)	1D
Son Yaklaşma ve Kalkış Alanı (FATO)	2D
Emniyet Alanı	3D (FATO'nun kenarına $\frac{1}{2}$ D eklendi)



Şekil 4.3. Kontrol boyutu (Federal Aviation Administration, 2022)

4.2.1. İniş ve kalkış alanı (TLOF)

TLOF, hava aracının üzerinde bir iniş veya havalanmayı gerçekleştirdiği genellikle FATO içerisinde ortalanmış bir yük taşıma alanı olarak tanımlanmaktadır. Bu yapı genellikle zemin seviyesinde yükseltilmiş yapılarda veya çatı seviyesinde bulunur. TLOF'nin düz bir arazide veya düz bir yapıda olması ve yaklaşma, kalkış ve geçiş yüzeylerine girişinde engellerin olmaması gerekir. TLOF'nin dikey iniş ve kalkış hava araçları için statik ve dinamik yük taşıyacak yapıda olması gerekir. Kaplama alanının tasarımı dikey iniş ve kalkış yapan hava aracının veya herhangi bir yer destek aracının ağırlığını destekleyecek yapıda olması gerekir. TLOF dikey iniş ve kalkış yapan hava aracının maksimum kalkış ağırlığının %150'sine dayalı dinamik yükleri de desteklemelidir. Tasarım amacı ile dinamik yükü tekerlekli bir iniş takımı için tüm iniş takımı üzerine ve kızaklı bir iniş takımı için tek temas noktasında uygulanan maksimum kalkış ağırlığının %150'si olarak kabul edilmelidir.

TLOF, FATO içinde merkezlenerek minimum genişliği ve minimum uzunluğu 1D boyutundadır. TLOF dairesel, kare veya dikdörtgen şeklinde olarak dairesel bir TLOF için minimum çap 1D uzunluğundadır. Bir vertiport tasarımında TLOF, FATO ve SA ile aynı şekle sahip olmalıdır. TLOF'nin yapısı FATO ve güvenlik alanı çevreleri arasındaki mesafeyi TLOF'nin şeklinden bağımsız olarak eşit uzaklıkta tasarlanmalıdır.

TLOF genellikle kaplamalı veya agregalı çim yüzey sahiptir. Mümkün olduğunda ise çimento beton kaplama kullanılır. Asfalt yüzeylerin ısı stresine duyarlı olması ve park halindeki bir VTOL uçağın ağırlığı altında tekerlek izi oluşturabilecek olmasından dolayı bu yüzeylerin kullanımı önerilmez. TLOF dikey iniş kalkış yapan hava araçları için kaymaya dayanıklı bir yüzey ve insanlar için kaygan olmayan bir zemin sağlamak için pürüzlü bir kaplamaya sahiptirler. TLOF ile FATO'nun kaplamalı ve kaplamasız bölümleri arasındaki yükseklikler eşittir. TLOF'nin yüzeyi dikey iniş ve kalkış yapan hava aracının operasyonlarından kaynaklanan rotor aşağı veya dışa doğru akımdan kaynaklanan aşınmayı veya hasarı önlemek için sağlamlaştırılmıştır. Yükseltilmiş TLOF'ler için kullanılacak yüzey beton veya metal olmalıdır. Yükseltilmiş TLOF'ler için kullanılacak yüzey iletken ise kısa devre veya yıldırım çarpması durumlarında elektriği iletme tehdidini ortadan kaldırmak için bu yüzeylerin mümkün olduğu ölçüde yalıtılması ve/veya topraklanması gerekir.

4.2.2. Son yaklaşma ve kalkış alanı (FATO)

FATO, üzerinde hava aracının yaklaşmasının son aşamasını tamamladığı, havada asılı kalma veya iniş yaptığı ve uçağın kalkışa başladığı tanımlanmış yük taşıma alanı olarak tanımlanmaktadır. FATO günümüzdeki uygulamalarda zemin seviyesinde yükseltilmiş yapılarda veya çatı seviyesindeki yapılarda bulunmaktadır. FATO dikey iniş kalkış yapan hava aracının ve herhangi bir yer destek aracın ağırlığını desteklemek için kullanılmaktadır. FATO üzerine uygulanan dinamik yükleri VTOL uçağın maksimum kalkış ağırlığının %150'sinden fazla olacak şekilde varsaymak gerekir. Buna ilave olarak rotor/pervane aşağı akım yükünde yük taşıma kapasitesinde dikkate alınması gereken önemli bir unsur olduğu unutulmamalıdır.

FATO kendi güvenlik alanı içinde merkezlenmiş olup minimum genişliği ve minimum uzunluğu 2D boyutundadır. Dairesel bir FATO için de minimum çap 2D boyutundadır. FATO, TLOF ve güvenlik alanı ile aynı geometrik şekle sahiptir. TLOF, FATO ve güvenlik alanı çevreleri arasındaki mesafenin TLOF'nin şeklinden bağımsız olarak eşit uzaklıkta olacak şekilde tasarlanması gerekmektedir.

FATO kaplamalı veya agregalı çim yüzeye sahip olmakla birlikte eğer mümkün ise çimento beton kaplama kullanılmalıdır. Asfalt yüzey park halindeki bir dikey iniş kalkış yapan hava aracının ağırlığı altında sürtünme oluşturacağından daha az arzu edilir. FATO dikey iniş ve kalkış yapan hava araçları için kaymaya dayanıklı bir yüzey ve insanlar için kaygan olmayan bir zemin sağlamak için pürüzlü bir kaplamaya sahiptir. FATO'nun kaplamalı ve kaplamasız bölümleri arasındaki yükseklikler eşit olup dikey iniş kalkış yapan hava aracının operasyonlarından rotor/pervane aşağı akım veya dışa akımdan kaynaklanan hasarın aşınmasını önlemek için yüzey sağlamlaştırılmıştır.

Yükseltilmiş FATO'nun tercih edilen yüzeyi genellikle beton olmakla birlikte eğer yüzey metal ise kısa devre veya yıldırım düşmesi durumunda elektriği iletme tehdidini ortadan kaldıracak ölçüde yalıtılmalı veya topraklanmalıdır. FATO yüzeyi rotor/pervane aşağı akım veya dışarı akımın neden olduğu gevşek taşları ve diğer uçuşan kalıntıları önleme imkânına sahiptir. FATO'nun TLOF'ye bitişik kenarı TLOF ile aynı yükseklikte olmalıdır.

4.2.3. Emniyet alanı (Safety Area)

Emniyet alanı kazara FATO'dan ayrılan uçakların hasar görme riskini azaltmayı amaçlayan FATO'yu çevreleyen bir alan olarak tanımlanır. Bu bölge genel olarak

zemin seviyesinde yükseltilmiş yapılarda ve çatı seviyesinde bulunmakla birlikte su üzerinde veya açık hava sahasında uzanabilme imkânına sahiptir. Emniyet alanının minimum genişliği ve minimum uzunluğu FATO kenarından $\frac{1}{2}$ D uzaklıkta olup TLOF ve FATO ile aynı geometrik yapıya sahiptir. TLOF, FATO ve güvenlik alanı çevreleri arasındaki mesafenin TLOF'nin şeklinden bağımsız ve eşit uzaklıkta olacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Zemin seviyesindeki uygulamalar ise yüzey aşağı veya dışarı akımın neden olduğu gevşek taşları ve diğer uçuşan kalıntıları önleme imkân ve kabiliyetine sahiptir.

4.2.4. Kontrol boyutu (D)

Kontrol boyutu dikey iniş kalkış yapan hava aracının en dıştaki iki zıt noktası arasındaki (kanat ucundan kanat ucuna, rotor ucundan rotor ucuna, rotor ucundan kanat ucuna, gövdeden rotor ucuna) en uzun mesafe olarak tanımlanarak maksimum dış sapmalarına kadar uzatılmış tüm ayarlanabilir bileşenleri içeren düz bir yatay düzlemde ölçülerek elde edilmiştir.

4.2.5. Arıza durumu

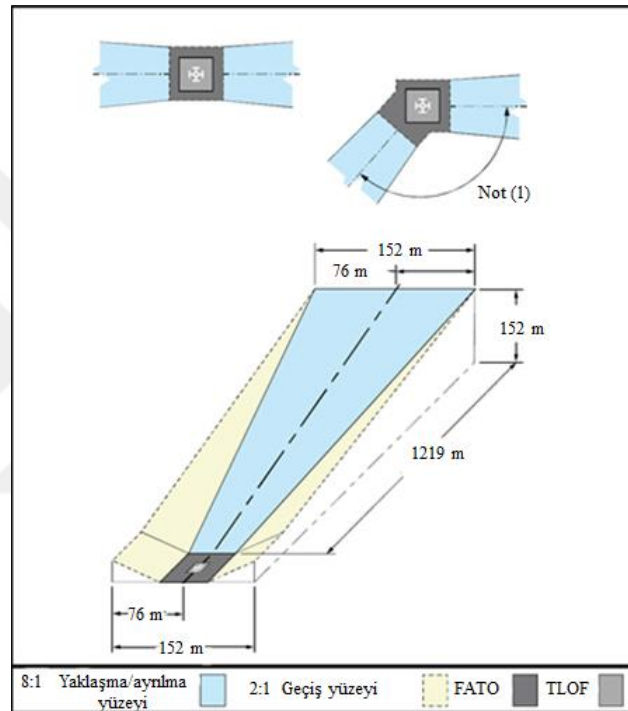
Arıza durumu genel olarak bir veya daha fazla arızanın neden olduğu veya katkıda bulunduğu belirli bir uçuş aşamasında hava aracının kaldırma veya itme üretme kabiliyetini etkileyen ve bunun için etkisi olan bir sonuç ile tamamlanan herhangi bir olası olayın meydana gelmesi olarak tanımlanmaktadır.

4.2.6. Görerek uçuş kuralı

Heliportlar için seyredilebilir hava sahasının güvenli, etkin kullanımı ve korunmasında tanımlanan hayali yüzeyler vertiportlar içinde uygulanmakla birlikte birincil yüzeyi, yaklaşma ve geçiş yüzeylerini içermektedir. Görerek uçuş kuralları uçulabilir hava sahasını etkileyen nesneler için standartlar ve bildirim gerekliliklerini belirlemekte kullanılmaktadır. Bu bildirim gereklilikleri inşaatın veya değişikliğin havacılık işletim prosedürleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesini, önerilen inşaatın hava seyrüseferi üzerindeki potansiyel tehlikeli etkisinin belirlenmesini, güvenli hava seyrüseferini geliştirmek için hafifletici önlemlerin belirlenmesini ve yeni nesneler için havacılık haritasını kapsamaktadır.

Bu hayali yüzeylerde birincil yüzey, boyut ve şekil olarak FATO ile örtüşmektedir. Birincil yüzey oluşturulan vertiportun yüksekliğindeki yatay bir düzlemdir. Yaklaşma yüzeyi vertiport birincil yüzeyinin her bir ucunda birincil yüzeyle

aynı genişlikte başlayarak dışa ve yukarıya doğru 1,219 m genişlik ve 152 m yatay bir mesafe boyunca uzanmaktadır. Yaklaşma yüzeyinin eğim oranı sırasıyla yatay birimler ve dikey birimler için 8:1 olarak belirlenmektedir. Geçiş yüzeyleri ise merkez çizgisinden yatay olarak ölçülen 76 m için sırasıyla 2:1 oranı eğimde olup yatay birimler ve dikey birimlerde birincil yüzeyin yan sınırlarından ve yaklaşma yüzeylerinden dışa ve yukarı doğru uzanmaktadır. Şekil 4.4'te VFR vertiport yaklaşma/kalkış yüzeyleri gösterilmiştir (Federal Aviation Administration, 2022).



Şekil 4.4. VFR vertiport yaklaşma/kalkış yüzeyleri (Federal Aviation Administration, 2022)

Not 1: Tercih edilen yaklaşma/ayrılma yüzeyi, baskın rüzgâr yönüne bağlıdır. Ters yönde karşılıklı bir yaklaşma/kalkış yüzeyinin mümkün olmadığı durumlarda, iki yüzey arasında minimum 135 derecelik bir açı kullanılmalıdır.

Yaklaşma/kalkış yolu dikey iniş ve kalkış yapan hava aracının bir vertiporta iner iken veya bir vertiporttan ayrılır iken izlediği uçuş rotası olarak kabul edilmektedir. Tercih edilen yaklaşma/kalkış yolları, rüzgâr yönündeki operasyonlardan kaçınmak ve yan rüzgâr operasyonlarını minimumda tutmak için mümkün olduğunca baskın rüzgâr yönü ile hizalanmakta ve manyetik istikamette mümkün olduğunca karşılıklı olarak birden fazla yaklaşma/kalkış yolu sağlanmaktadır. Tüm yaklaşma ve ayrılma yüzeyleri engelsiz olup yaklaşma/kalkış yolları için yatay ve dikeyde 8:1 birim oranını sağlaması gerekmektedir.

4.3. İniş Alanı İhtiyaçları

4.3.1. Şarj ve elektrik altyapısı

Gelişmiş hava hareketliliği aktivitesinin en erken operasyonlarında VTOL uçaklar tarafından elektrik tahrikinin kullanıldığı görülmektedir. Bu uçakların elektrik ihtiyaçları tasarım ve üreticiye göre farklılıklar göstermektedir. KHH'de batarya ile çalışan teknolojiler ele alınarak havacılıkta kullanılan tahrik sistemlerinin elektrifikasyonu sektöre özgü birkaç standartla gelişen bir alan oluşturmuştur. Hafif hizmet araç şarjı (350kw'a kadar) için mevcut şarj standartları şu anda sertifika başvurusunda bulunan çok sayıda hafif elektrikli uçakla uyumlu olmaktadır. Bununla birlikte daha yüksek kapasiteli bataryaların ve yeni sistemlerin operasyonel özelliklerini karşılamak için üreticiler ve operatörler sabit şarjlı ekipman ile birlikte mobil şarj sistemleri sabit batarya depolama, kablo veya yerleşik batarya soğutma, batarya takas veya diğer kavramlar da dâhil olmak üzere alternatif şarj yöntemlerini uygulamaktadır.

Şarj sınıfları veya bağlantı standartları uçak görev döngüsüne, şarj hızına, batarya kimyasına, şarj sistemine ve batarya soğutma sistemine göre değişiklik gösterebilmektedir. Batarya şarjı güvenli ve emniyetli bir şekilde yapılarak sahada depolanan herhangi bir uçak bataryasının TLOF, FATO ve emniyet alanında güvenli bir şekilde saklanması için gerekli tedbirlerin alınması gerekir.

4.3.2. Yer güvenlik unsurları

4.3.2.1. Yangınla mücadele hususları

Bir uçakta batarya sistemi yangınına söndürme prosedürleri bir dikey iniş ve kalkış yapan hava aracından diğerine farklılık gösterebilmektedir. FAA tarafından küçük lityum batarya hücreleriyle yapılan araştırmada su ve diğer su bazlı yangın söndürme maddelerinin lityum batarya yangınlarının söndürülmesinde ve gaz veya kuru toz söndürme maddelerine göre termal kaçakları önlemede daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Söndürme maddesinin soğutma etkisi yangının yayılmasını önlemede kilit faktör olmasına karşın bu yöntemin küçük batarya takımları için etkili olduğu bulunmuş olsa da büyük batarya takımları ile benzer sonuçların elde edilip edilemeyeceği konusunda henüz kesin bilgiler bulunmamaktadır.

Dikey iniş ve kalkış yapan hava araçları için yangınla mücadelede hangi tekniklerin uygulanacağı henüz bilinmemekle birlikte bu durumun modelden modele farklılıklar gösterebileceği düşünülmektedir. Vertiportlarda VTOL hava araçları için yeterli yangın korumasının sağlanması vertiportu kullanacak belirli uçaklarla ilgili

tehlikelerin tam olarak anlaşılmasını gerekli kılmaktadır. Bu durum aynı zamanda eVTOL hava aracını şarj etmek için gereken altyapı için de geçerli olmaktadır.

Vertiportların ayrıca geçerli yerel yangın, çevre ve imar düzenlemelerine uyması gerekmekte olup vertiport operatörleri eVTOL hava aracı yangınlarını kontrol etmek ve söndürmek için gerekli araçlara ihtiyaç duyacaktır. Yerel ilk müdahale ekipleri de dâhil olmak üzere itfaiye personeli lityum batarya yangınları, elektrik yangınları, zehirli gaz emisyonları ve yüksek voltajlı elektrik arkı gibi elektrikli uçaklarla ilgili özel ihtiyaçları yönetmek için eğitilmeli ve gerekli ekipmanlarla donatılması gerekmektedir.

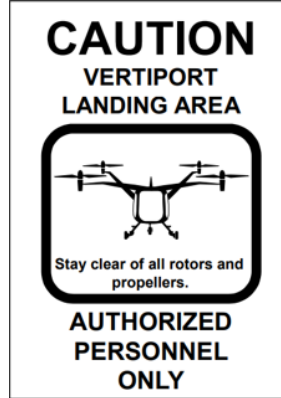
Yangınla mücadele ekipmanı TLOF ve FATO'ya bitişik bir bölgede ancak bu alanların dışında olmalıdır. Yangın güvenlik ekipmanı FATO'nun içinde veya dışında herhangi bir yerden dikkat çekecek şekilde açıkça işaretlenmelidir. Yükseltilmiş sahalar için yangın ekipmanı FATO seviyesinin altına yerleştirilebilir ancak her koşulda tamamen erişilebilir olarak TLOF ve FATO herkes tarafından açıkça işaretlenmelidir.

4.3.2.2. Güvenlik

Güvenli havalimanı ortamlarında bulunan vertiportlar için dikey iniş ve kalkış yapan hava aracı yolcularının kalkış noktasında taraması yapılmadığı sürece yolcuların havaalanının güvenli alanlarına girmeden önce bir tarama alanı ve/veya tarama yapılması gerekmektedir. Gerekirse havaalanları dikey iniş ve kalkış yapan hava aracının yolcu tarama ve kargo ihtiyaçlarını karşılamak için terminal alanında birden fazla dikey iniş ve kalkış yapan hava aracı park yeri ve konumu oluşturulması gerekir. Vertiport erişimini kontrol etmek ve operasyon alanlarını insanlardan, hayvanlardan, ekipmandan, enkazdan ve araçlardan uzak tutmak güvenlik için çok önemlidir.

Güvenlik bariyerleri ve erişim kontrol önlemleri yer seviyesindeki vertiportlar için güvenlik alanının dışında ve yaklaşma/kalkış yüzeyinin 8:1 yüksekliğinin altında bir çit veya duvar şeklinde dikey iniş ve kalkış yapan hava aracı operasyonel alanlarının etrafına bir güvenlik bariyeri kurulmalıdır. Gerekirse yaklaşma/kalkış yollarının yakınında güvenlik alanının dış çevresinin oldukça dışına yaklaşma/kalkış ve geçiş yüzeylerinin yüksekliğinin altına bariyer kurulmalıdır. Emniyet bariyerleri yanlışlıkla veya kasıtlı olarak bir operasyon alanına giren kişilere olumlu bir caydırıcılık sağlayacak kadar yüksek ancak tüm uçak operasyonları için tehlikeli olmayacak kadar düşük bir yükseklikte olmalıdır. Tüm vertiport erişim noktalarında Şekil 4.5'te

gösterilen şekle benzer bir vertiport uyarı işareti görülmelidir (Federal Aviation Administration, 2022).



Şekil 4.5. Vertiport uyarı işareti (Federal Aviation Administration, 2022)

4.3.2.3. Akımın aşağı sapması

Dikey iniş ve kalkış yapan hava aracının aşağı ve dışa doğru etkileri halen araştırılmaya devam etmektedir. Ancak yer geometrisinin, çevreleyen altyapının, rotor aerodinamiği performansının ve araç uçuş dinamikleri üzerindeki devridaim akışının etkileri vertiport yerleşiminde yine de dikkate alınması gerekir.

Dikey iniş ve kalkış yapan hava aracının aşağı ve dışarı akışı insanlar veya mülk sahipleri için güvenlik sorunları yaratacak ise veya dikey iniş ve kalkış yapan hava aracının aerodinamik performansı aşağı ve dışa doğru akışı çevreleyen zemin veya altyapı ile nasıl etkileşime girdiğinden etkilenecek ise TLOF, FATO ve güvenlik alanları uygun şekilde ayarlanmalı veya alternatif önlemler alınmalıdır.

4.3.2.4. Türbülans

Binaların, ağaçların, arazi düzensizliklerinin ve başka yerlerde etrafında ve üzerinde akan hava dikey iniş ve kalkış yapan hava aracı operasyonlarını etkileyebilecek yer seviyesindeki ve çatıdaki vertiportlarda türbülans oluşturabilir. Mümkün olduğunca FATO ve yaklaşma/kalkış yolları yakınında hava türbülansını en aza indirmek için TLOF'nin binalardan, ağaçlardan ve araziden uzağa yerleştirilmesi gerekir. Türbülansı azaltan tasarım önlemlerinin gerekli olup olmadığını belirlemek için FATO yüzeyinin yakınında ve yüzeyinde türbülans ve hava akışı özellikleri değerlendirilmelidir. Yükseltilmiş yapılarda hava boşluğu veya diğer türbülansı azaltan

tasarım önlemleri alınmadığında belirli rüzgâr koşullarında operasyonel sınırlamalar gerekli olmaktadır.

4.3.2.5. Hava durumu bilgileri

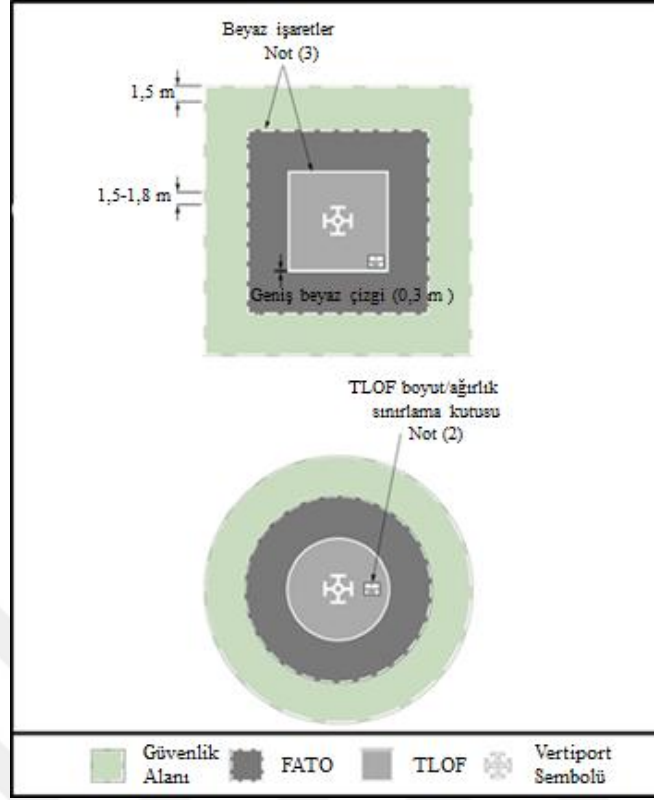
Otomatik bir hava gözlem sistemi vertiport sahasındaki hava koşullarını ölçer ve otomatik olarak yayımlanmaktadır. Bir otomatik ve bir hava gözlem sistemi kurar iken TLOF'nin en az 30,5 m ve en fazla 213 m uzağa ve aletlerinin dikey iniş ve kalkış yapan hava aracı işlemlerinden kaynaklanan rotor yıkamasından etkilenmeyecek şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir.

4.3.2.6. Kış operasyonları

Bir dikey iniş ve kalkış yapan hava aracının rotor yıkaması tarafından dağılan dönen kar pilotun amaçlanan iniş noktasını ve/veya kaçınılması gereken belirsiz nesneleri gözden kaybetmesine neden olabilir. Vertiportlar kar temizleme için kullanılacak yöntem ve ekipmanı barındıracak, bir engel tehlikesi oluşturmayacak ve karın yeterince kaldırılmasına izin verecek şekilde tasarlanmalıdır. Kış aylarında vertiportlar için güneşten daha fazla ısıyı emmek ve kalan buz ve karı eritmek için isteğe bağlı bir koyu TLOF yüzeyi kullanılabilir.

4.3.3. İşaretleme, aydınlatma ve görsel yardımcılar

Boya veya önceden şekillendirilmiş malzemeler bu alanların sınırları dâhilinde TLOF ve FATO'yu tanımlar. İşaretleri ve çizgileri 55-152 mm genişliğinde zıt renkte bir çizgiyle çerçevelemek dikkat çekiciliği artırmak için bir seçenek olarak kullanılabilir. TLOF çevre işareti 305 mm genişliğinde beyaz bir çizgiden oluşmaktadır. TLOF boyut ve ağırlık sınırlama kutusu sert yüzeyli iniş ve kalkış alanında ve çim yüzeyli iniş ve kalkış alanında isteğe bağlı olarak bulunur. FATO çevresi 1,5 m uzunluğunda ve uçtan uca 1,5 m ile 1,8 m aralıklı olarak 305 mm genişliğinde kesikli beyaz çizgilerle işaretlenmiştir. Düz ve kesikli beyaz çizgiler 305 mm genişliğindedir. Kesikli çizgiler 1,5-1,8 m boşluklarla 1,5 m uzunluğundadır. Şekil 4.6'da Standart vertiport işaretleme gösterilmiştir (Federal Aviation Administration, 2022).



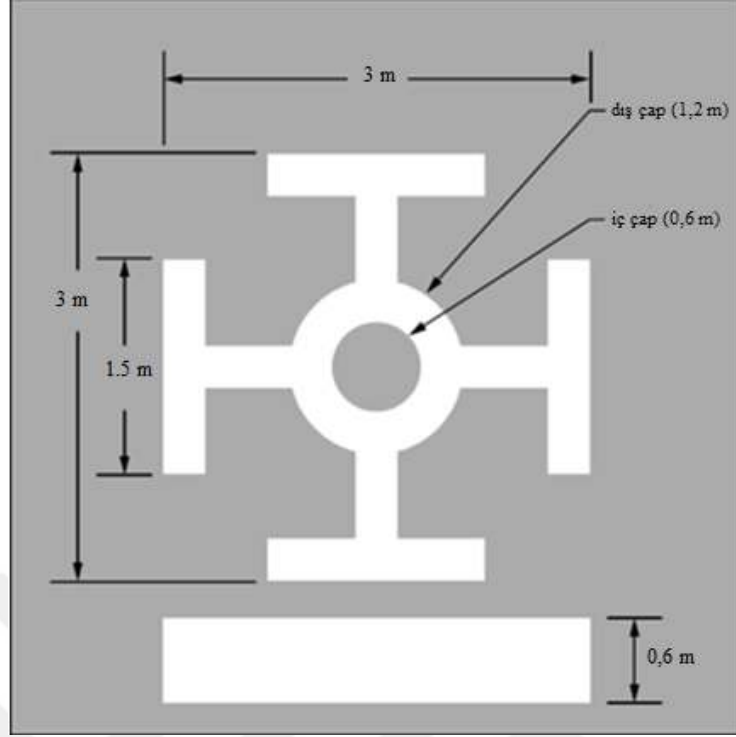
Şekil 4.6. Standart vertiport işaretlemesi (Federal Aviation Administration, 2022)

Note 2: Kesintisiz ve kesikli beyaz çizgiler 305 mm genişliğindedir. Kesik çizgiler 1,5 m uzunluğunda ve 1,5-1,8 m boşluklar içerir.

Note 3: TLOF boyut/ağırlık sınırlama kutusuyla ilgili ayrıntılar Şekil 4.8’de görülebilir.

4.3.3.1. Tanımlama sembolü

Vertiport tanımlama işareti veya sembolü konumu bir vertiport olarak tanımlayarak, TLOF’yi işaretler ve pilota görsel ipuçları sağlar. Vertiport tesislerini tanımlama sembolü olarak kırık tekerlek sembolü kullanılmakta olup bu sembol TLOF’nin merkezine yerleştirilmiştir. Tercih edilen yaklaşma/kalkış yönünü ayırt etmek için gerektiğinde kırık tekerlek sembolünün 0,6 m altına kırık tekerlek ile aynı renkte 0,6 m genişliğinde bir çubuk boyanabilir. Şekil 4.7’de vertiport tanımlama sembolü görsel olarak verilmiştir (Federal Aviation Administration, 2022).

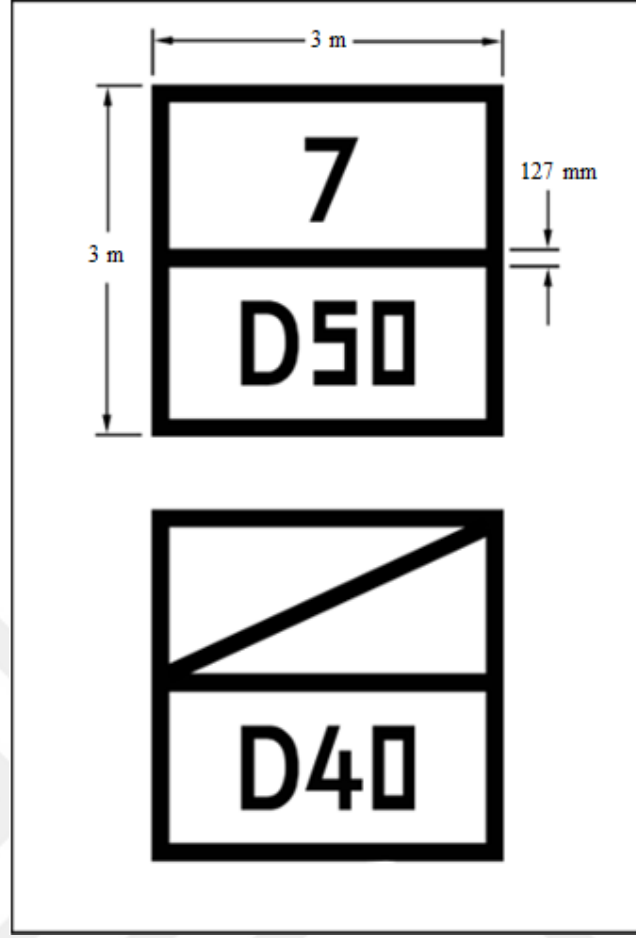


Şekil 4.7. Vertiport tanımlama sembolü (Federal Aviation Administration, 2022)

4.3.3.2. İniş ve kalkış alanı boyut/ağırlık sınırlama kutusu

TLOF boyut/ağırlık sınırlama kutusu vertiportu kullanan dikey iniş ve kalkış yapan hava aracının kontrol boyutunu ve maksimum kalkış ağırlığını göstermektedir. Vertiportun barındırmak için tasarlandığı eVTOL hava aracının kontrol boyutu ve ağırlığı tercih edilen yaklaşım yönünden bakıldığında dikdörtgen bir kalkış ve iniş alanının sağ alt köşesinde veya sembolün sağ tarafındaki bir kutuda olup rakamlar beyaz zemin üzerine siyah olarak işaretlenmiştir.

TLOF boyut/ağırlık sınırlama kutusundaki en üst sayı kalkış ve iniş alanının barındıracağı tasarım için VTOL uçaklarının pound cinsinden maksimum kalkış ağırlığı olup kutunun üst yarısında ortalananmıştır. TLOF boyut/ağırlık sınırlama kutusunda altta bulunan sayı ise eVTOL hava aracının kontrol boyutu olup kutunun alt yarısında ortalananarak önünde D harfi bulunur. Ağırlık sınırı olmayan mevcut bir TLOF sol alt köşeden TLOF boyut/ağırlık sınırlama kutusunun üst bölümünden sağ üst köşeye uzanan çapraz bir çizgi ile işaretlenir. Şekil 4.8’te TLOF boyut/ağırlık sınırlama kutusu verilmiştir (Federal Aviation Administration, 2022).



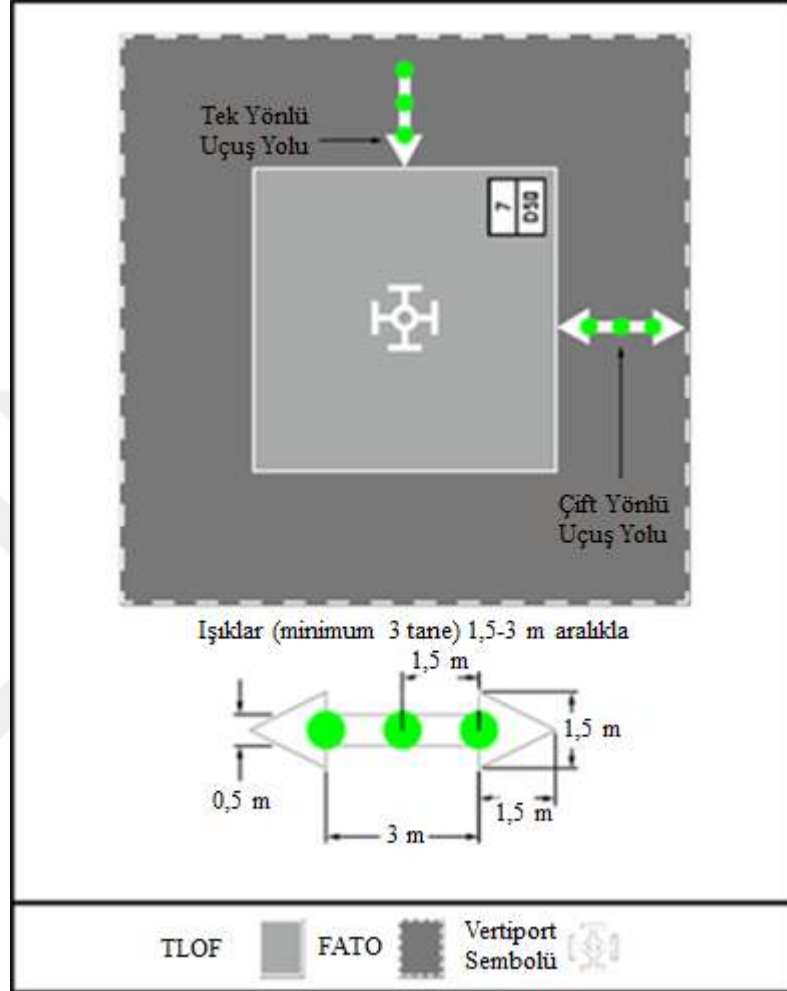
Şekil 4.8. TLOF boyut/ağırlık sınırlama kutusu (Federal Aviation Administration, 2022)

4.3.3.3. Uçuş yolu hizalama opsiyonel işaretleme ve ışıklandırma

Uçuş yolu hizalama işaretlemesi ve ışıklandırması isteğe bağlı olup mevcut yaklaşma ve kalkış uçuş yolu yönlerini belirtmek istenildiğinde ve uygulanabilir olduğunda işaretleri ve ışıkları içermektedir. Her bir okun şaftı 0,5 m genişliğinde ve en az 3 m uzunluğunda olup ok başları 1,5 m genişliğinde ve 1,5 m yüksekliğindedir. Okun rengi yüzeyin arka plan rengine karşı iyi bir kontrast sağlaması gerekir. Pilotun görüşünü arttırmak için gerekirse okların etrafında zıt bir kenarlık oluşturmalıdır.

TLOF'in merkezine doğru işaret eden bir ok bir yaklaşma yönünü gösterir iken TLOF'in merkezinden uzağa bakan bir ok ise bir kalkış yönünü gösterir. Kaplama içi uçuş yolu hizalama aydınlatması tavsiye edilir ve tek bir yaklaşma yönü veya tek bir kalkış yolu ile sınırlı bir uçuş yoluna sahip bir vertiport için ok işaretlemesi tek yönlüdür. Yalnızca çift yönlü yaklaşma/kalkış uçuş yolu bulunan bir vertiport için ok

işareti çift yönlü olarak belirlenir. Şekil 4.9’da Uçuş yolu hizalama işaretleme ve ışıklandırma gösterilmiştir (Federal Aviation Administration, 2022).



Şekil 4.9. Uçuş yolu hizalama işaretleme ve ışıklandırma (Federal Aviation Administration, 2022)

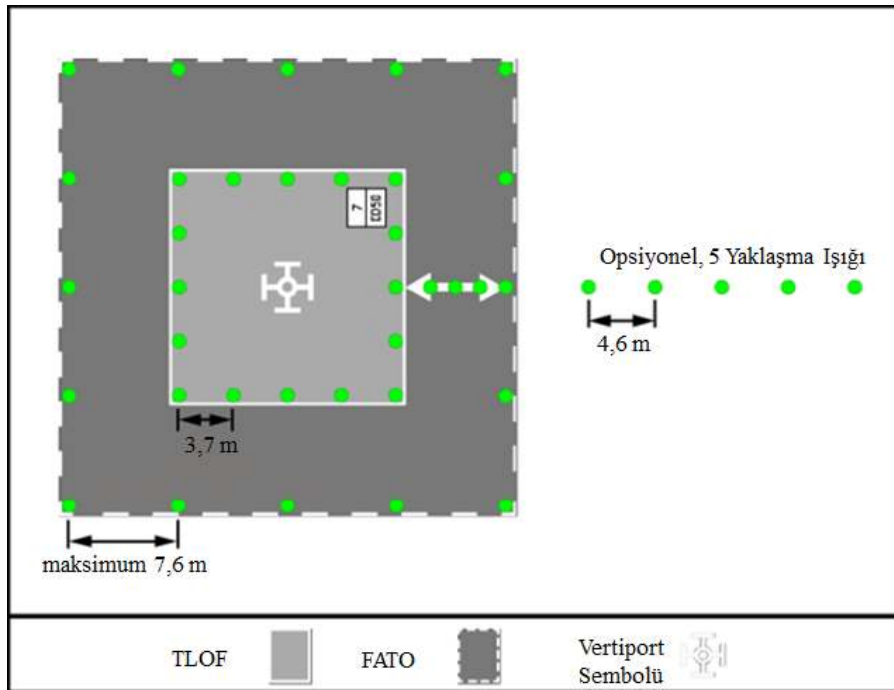
4.3.3.4. Işıklandırma

Gece operasyonlarını destekleyen vertiportlar için ışıklandırma önemli bir unsur olarak vertiportlar için gereklidir. Işıklandırma pilotun hem vertiportun yerini belirlemesini hem de operasyon alanının çevresini belirlemesini sağlamalıdır. Kaldırım içi ışıklandırma yükseltilmiş ışıklandırmaya tercih edilir iken TLOF çevre ışıkları yeşil renklidir. Kare bir TLOF’nin her köşesinde bir ışık ve her bir tarafta en az beş ışık olacak şekilde köşeler arasında eşit aralıklarla yerleştirilmiş ışıklar mevcuttur. Işıklar arasındaki mesafe en fazla 7,6 m olmalı ve yaklaşımın merkez hattı boyunca bir ışık bulunmalıdır.

Dairesel bir TLOF eşit aralıklarla yerleştirilmiş en az sekiz adet olmak üzere çift sayıda ışığa sahip olup TLOF ışıkları çevre çizgisinin 0,3 m içinde veya dışında bulunmaktadır. Gece operasyonları için uçuş yolu hizalama ok aydınlatması önerilir ve 1,5 ile 3 m aralıklı en az üç adet ışık içerir. Bu ışıklar TLOF, FATO, güvenlik alanı, gerekirse FATO veya güvenlik alanının yakın çevresindeki herhangi bir uygun yüzey boyunca uzanabilir.

FATO çevre ışıkları isteğe bağlıdır ve yeşil renktedir. Her köşede bir ışık ve her bir tarafta en az beş adet ışık olacak şekilde köşeler arasında eşit aralıklarla yerleştirilmiş ışıklar mevcuttur. Işıklar arasındaki mesafe en fazla 7,6 m ve yaklaşımın merkez hattı boyunca bir adet ışık olmalıdır. Dairesel bir FATO eşit aralıklarla yerleştirilmiş en az sekiz adet olmak üzere çift sayıda ışığa sahiptir ve FATO ışıkları çevre çizgisinin 0,3 m içinde veya dışında bulunurlar.

Yaklaşma ışıkları isteğe bağlı olup kurulduklarında tercih edilen yaklaşma/kalkış yolunun merkez hattında yer alan beş adet yeşil çok yönlü ışıktan oluşan bir hat içerirler. İlk ışık TLOF'den 9,1 m ile 18,3 m arasındaki bir uzaklıktadır ve kalan ışıklar yaklaşma yolunun merkez hattı üzerinde hizalanarak 4,6 m aralıklarla yerleştirilmiştir. Şekil 4.10'da TLOF/FATO çevre ışıklandırması gösterilmiştir (Federal Aviation Administration, 2022).



Şekil 4.10. TLOF/FATO çevre ışıklandırması (Federal Aviation Administration, 2022)

4.4. İniş Alanı Planlaması

Vertiportlar klasik ticari havaalanlarının verimi ile geleneksel heliportların bir kombinasyonu olarak tanımlanabilir. Bu nedenle böyle bir ticari havaalanının planlanmasında çok önemli hususlar bulunmaktadır. Neufville vd., (2013) bir havayolunun filosunun toplam uçak sayısı ve işletilen belirli uçak türleri ile tanımlandığını açıklamaktadır. Her uçak tipi genellikle menzil ve boyuta göre tanımlanan farklı teknik ve performans özelliklerine sahiptir. Menzil bir uçağın yolcu ve/veya kargo ile seyahat edebileceği mesafeyi, boyut ise kargo veya oturma kapasitesi olarak tanımlanmaktadır.

Uçuş planlaması ve filo planlaması bir havayolunun kârlı uçuş operasyonları gerçekleştirebilmesi için ele alması gereken temel konular olarak bilinmektedir. Bu tür bir planlama genellikle planlanan uçuşlardan bir yıldan fazla bir süre önce başlayarak günde ve güzergâhta kaç uçuş gerçekleştirilmesi gerektiği, uçağın kalkış ve iniş saatlerinin ne olduğu, her kalkış ve iniş için ne tür bir uçak kullanılması gerektiği ve mevcut uçakların havayolu ağı üzerinden nasıl yönlendirilmesi gerektiği konularını içeren bir süreci takip eder. Bu yüzden bir vertiport tasarımı için kendisi ile ilgili olan havaalanındaki operasyonları bilmek önem arz etmektedir.

Neufville vd., (2013) uçuş operasyonlarındaki belirsizliğin ve oynaklığın çoğunun havaalanındaki faaliyetlerden kaynaklandığını, bu faaliyetlerin yolcuların ve bagajların taşınmasını ve ayrıca uçağın geçtiği süreçleride kapsadığını belirtmektedir. Uçakların boyutlarına göre uyarlanması gereken mevcut kapılar kısıtlamalara neden olur ve sonuç olarak eğer bir kapı çok küçük ise belirli büyüklükteki uçaklar tarafından kullanılamaz. Benzer durum hava koşullarından da etkilenen taksi yolları kadar kalkış ve iniş alanları için de geçerli olmaktadır.

Diğer bir durum ise gelen ve giden her bir uçağa eşlik eden geri dönüş süreleridir. Bu süreler yolcuların hava aracına biniş ve inişlerini, bagajların hava aracına yüklenmesini ve boşaltılmasını ve hava aracının bir sonraki uçuşa hazırlanması faaliyetlerini içermektedir. Yapılan bu hazırlıklar temizliğin yapılması, güvenlik kontrollerinin etkin şekilde yapılması ve hava aracının yakıt ikmali veya şarj edilmesi faaliyetlerini de içermektedir. Yaşanan bu karmaşıklık ve çok sayıda değişkenin olması nedeniyle bu süreçleri takip etmek için arabellekler planlanır. Planlamaların çok fazla olmamasını sağlamak gecikmelerle birlikte planlanandan daha hızlı tamamlanan süreçler de sorunların oluşmasına yol açacağı için çok önemlidir.

Havaalanı planlaması, tasarımı ve yönetiminde ülkeden ülkeye birçok açıdan önemli farklılıklar olduğu için bu süreçte uluslararası koşulların dikkate alınması gereklidir. Hava taşımacılığı dikkate değer ölçüde benzer uluslararası standartlara sahip küresel bir iş olmasından dolayı genel olarak ana uçak üreticisi konumunda olan Airbus ve Boeing gibi birkaç üreticinin uçaklarına güvenilmektedir. Uluslararası gereksinimlerin çoğu FAA ve Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu (ICAO-International Civil Aviation Organization) tarafından belirlenmektedir. FAA'nın baskın bir rolünün olması ve ABD'nin havacılıktaki en büyük tek pazar olması, standartların oluşturulması için en çok para harcayan ve en çok araştırma yapan ülke olmasından kaynaklanmaktadır. Neufville ve arkadaşlarına göre ise bu durum aynı zamanda daha sonra ICAO tarafından benimsenen FAA tarafından belirlenen standartlarla sonuçlanmaktadır.

Ancak havaalanı planlaması, tasarımı ve yönetiminin kara tarafı özellikleri açısından büyük uluslararası farklılıklar söz konusudur. Bu iki büyük pazar arasındaki diğer bir fark ise Avrupa'da havayollarının havalimanı altyapısının tasarımı üzerinde çok az etkisinin olmasıdır. Tablo 4.2'de. ABD ile dünyanın geri kalan ülkeleri arasındaki havaalanı planlaması ve tasarımındaki bazı farklılıklar gösterilmektedir (Neufville vd., 2013).

Table 4.2: ABD ve dünyanın geri kalanındaki diğer ülkelerin havaalanı planlaması (Neufville vd., 2013)

Uygulama Alanı	Ortak Uygulama	
Tesis inşaatı	USA Uçak yer operasyonlarını kolaylaştırmak için cömert havaalanı döşemesi	Dünyanın geri kalanı Taksi yolları ve uçak apronları için sınırlı miktarda asfaltlama
	Özel araçlara, otomobil erişimine, otoparka vurgu	Toplu taşıma, demiryolu erişimi vurgusu
Planlama	Fikir verici	Direktif
Operasyonlar	Havayolları genellikle istedikleri gibi özgürce program yapar. Ayrımcı fiyatlandırma yok; tüm kullanıcıların erişimi var.	Havaalanları iniş ve kalkış slotları tahsis ediyor.
	Havalimanı işletmecisinin personeli az; çoğu hizmet sözleşmeli	Yoğun saat fiyatlandırması, küçük uçaklar genellikle hariç tutulur. Havaalanı işletmecisi büyük bir işverendir; havaalanı çoğu hizmeti sunuyor.

Havaalanı ve havacılık endüstrisinin oldukça belirsiz olması planlamacıların, tasarımcıların ve yöneticilerin birçok farklı olasılığı göz önünde bulundurma gerekliliğinden dolayı havaalanlarını geliştirmek için geleneksel master planlamadan

farklı olarak dinamik stratejik planlama yaklaşımı ön plana çıkmaktadır. Dinamik stratejik planlama süreci planlamacıları yalnızca tek bir tahmin yerine olası gelecek operasyon senaryoları yelpazesini tahmin etmeye yönlendirmektedir. Havaalanı profesyonelleri, gelecekteki gerçekliğin şu anda en olası görünenden farklı olabileceğini varsaydıklarından dolayı bu durum bir gereklilik haline gelmiştir.

Ancak daha önce de belirtildiği gibi master planlama genellikle güncel değildir. Neufville vd., (2013)'nin ana mesajlarından birisi de havalimanları planlanırken tahminlerin çoğu zaman yanlış olacağı üzerinedir. İyi bir planlamanın gerçeklikle ilgilenmesi gerektiği gibi havaalanı sistemleri için temel gerçek gelecek tahminlerinin oldukça güvenilir olmasıdır. Sadece 5 ile 10 yıl sonrası için %20 veya daha fazla tahmin hataları normal olup daha uzun vadeli tahminler için hatalar genellikle daha kötü olarak değerlendirilmektedir.

Bu sorunları önlemek için havalimanı planlamasında dinamik stratejik planlama kavramı önerilmektedir. Planlanan havalimanının hem dâhili olarak hem de rekabet açısından olası güçlü ve zayıf yönlerinden başlayan yeni pazarlar, birleşmeler ve teknolojiler açısından havalimanı için fırsat ve tehditleri analiz ederek takip edilmelidir. Tüm olasılıkları karşılayacak tesislerin şimdi inşa edilmesi pratik olmadığı için esnek bir yaklaşımı sürdürmek esas olacaktır. Örneğin tesisler bir yandan beklenen en yüksek trafik hacimlerini kaldıracak kadar büyük olamaz iken diğer yandan da trafik hacimleri sabit kalır ise veya çok az azalırsa gereksiz harcamalar kaçınılacak kadar küçük olur.

Ayrıca ana bileşenler, gelecekteki trafik hacimleri ve olası senaryolar için bir tahmin yürütülmelidir. Tahmine dayalı olarak olası birkaç trafik seviyesi ve türü için uygun tesis gereksinimleri belirlenmelidir. Tesis gereksinimlerinin bilinmesi sonrasında karşılaştırmalı bir analiz yapmak için çeşitli alternatiflerin geliştirilmesi gerekli olacaktır. Analizin temeli gelecekteki olası koşulları uygun kılan ilk aşama geliştirme olarak seçilecektir.

Bir havalimanını planlarken sadece hava trafiği veya finans gibi havalimanını doğrudan etkileyen bileşenleri dikkate almak yeterli değildir. Planlamada havalimanının çevre üzerindeki etkisi de dikkate alınarak mümkün olduğunca bu etkiyi en iyi şekilde önlemek veya azaltmak için çözümler bulunulmalıdır. Neufville vd., (2013) uçaklardan kaynaklanan gürültü kirliliği, hava ve su kalitesi, iklim değişikliği ve yaban hayatı üzerindeki etkileri içeren sorunlara çözümlerin bulunmasını üzerinde durmuştur.

4.4.1. İniş alanı tasarımı

Bir havaalanının geometrik tasarımı için esneklik, operasyonel verimlilik ve gelecekteki büyüme potansiyeli dikkate alınması gereken en önemli kriterlerdir. Tasarımın ise uluslararası ve ulusal sivil havacılık örgütleri tarafından sağlanan ve maksimum güvenlik seviyesini teşvik etmeyi amaçlayan kapsamlı bir dizi tasarım standardı ve önerilen uygulamalarla uyumlu olması gerekir. Günümüzde bu tasarım standartlarını en etkili şekilde uygulayan kuruluşlar FAA ve ICAO olarak bilinmektedir.

Geometrik tasarım havaalanı operasyonlarının her yönünü etkilediği için havaalanı planlamasında merkezi bir rol oynar. Havacılık operasyonları için güvenliğin yüksek önemi nedeniyle daha önce de belirtildiği gibi verilen tasarım standartlarına kesinlikle uyulmalıdır. Neufville vd., (2013) kapsamlı kılavuz ilkelere rağmen havaalanı planlayıcılarının kritik tasarım seçimlerini yapar iken çok fazla yargıda bulunmaları gerektiğini belirtmektedir. Bu yargıların birincisi yeni bir havalimanı için ne kadar arazi satın alınmalı veya rezerve edilmelidir? İkincisi pistlerin, taksi yollarının ve apronların genel geometrik düzeni ne olmalıdır? Üçüncüsü havaalanı hangi boyutta uçaklar için tasarlanmalıdır? Sonuncusu ise hava tarafı tesislerinin yapımı nasıl aşamalı hale getirilmelidir?

Taksi yollarının yapımı kapsamlı ve karmaşık olabildiği için inşa edilmesi ve bakımı yüksek maliyet gerektirmektedir. İlk önce kalkış ve iniş alanları ve kapıların belirlenmesi gerçekleştirilir daha sonrada taksi yolları istenilen bileşenleri birbirine bağlayacak şekilde tasarlanması yapılmalıdır. Yapılan bu işlemler işletme maliyetlerinin artmasına neden olduğu için maliyetli bir yaklaşım olarak ortaya çıkmaktadır. Yapılan araştırmalarda ortalama olarak bir dakikalık taksi süresinin havayoluna doğrudan maliyetinin bir yılda yaklaşık olarak 10 milyon ABD doları ve bunun ise yaklaşık 100 milyon ABD dolarlı sermaye yatırımına eşit olduğu hesaplanmıştır.

4.4.2. İniş alanı kapasitesi

Havaalanı kapasitesi konusu modern havaalanı planlaması ve tasarımında temel bir konu olarak bilinmektedir. Havaalanının kapasitesi ve özellikle pist sistemlerinin kapasitesi tipik olarak bir havaalanının nihai kapasitesini belirlemede önemli rol oynar. Pist vertiportlar için pedler ile ilişkilendirilir. Bir pist sisteminin kapasitesinin başlıca ölçüsü o pistin maksimum verimi ve maksimum kapasitesidir. Bu kapasite hava trafik yönetim sisteminin getirdiği tüm ayırma gerekliliklerine bağlı kalarak sürekli talep durumunda bir saat içinde pist sisteminde gerçekleştirilebilecek ortalama iniş ve kalkış

sayısını gösterir. Kabul edilebilir gecikme seviyeleri dikkate alınarak saatlik hareketlerin sayısını tahmin etmek için pratik saatlik kapasite uygulanır. Tipik olarak maksimum verimin %80 ile %90 arasında olduğu kabul edilir.

Ayrıca bir apronda herhangi bir anda konuşlandırılacak uçak sayısı olarak tanımlanan statik kapasitesi ile apronda hizmet verebilecek birim zaman başına uçak sayısını gösteren dinamik kapasite arasında ayırım yapmak önemlidir. Dinamik kapasite stant engelleme süresine veya geri dönüş süresine bağlıdır. Bir havaalanı sisteminin ana sıkıntısı pist olup burası trafiğin üç boyutlu hava sahasından tek bir piste ve son yaklaşma hava sahasına indirildiği yerdir.

Neufville vd., (2013) bir pist sisteminin kapasitesini etkileyen en önemli iki faktörü pistlerin sayısı ve geometrik düzenini ile her ATM sistemi aletli uçuş kuralları (IFR-Instrument Flight Rules) kapsamında faaliyet gösteren uçaklar arasında bir dizi gerekli minimum ayrımlar olarak belirlemiştir. Olası verimi etkileyen diğer faktörler ise azami irtifa ve yağış, rüzgâr yönü ve kuvveti, uçak geliş ve gidişlerinin karışımı ve sıralaması olarak görünmektedir.

4.4.3. Apron kapasitesi

Apronların kapasitesi yer kısıtlaması olan havalimanlarının genel kapasitesi üzerinde zaman zaman kısıtlayıcı bir faktör olmaktadır. Apron uçaklar için ayrılmış park yerleri ve uçağın park yerlerine ulaşmak için kullandığı koridorlar olan taksi şeritlerinden oluşarak vertiportlarda kapılar ile ilişkilendirilirler. Neufville vd., (2013) apron kapasitesini tanımlamanın iki yolu olduğunu açıklamaktadır. Bunlardan birincisi mevcut stant sayısı olarak sınıflandırılan statik kapasitedir ki bu sayı herhangi bir anda apronu aynı anda işgal edebilecek maksimum uçak miktarını gösterir. İkincisi ise stantlarda barındırılacak saatlik uçak sayısı olarak tanımlanan dinamik kapasite olup bu yaklaşım pistin verim kavramıyla daha tutarlılık göstermektedir. Dinamik kapasite hesaplanır iken bir uçağın giriş saatinden kalkış saatine kadar park yerinde geçirdiği süre dikkate alınmalıdır.

Olası kapasitenin yeterli bir şekilde belirlenmesi için olası gecikmelerin de dikkate alınması gerekir. Olası gecikmelerin değerlendirilmesi için tüm olası pist konfigürasyonları ve bunların çalışabilecekleri hava koşullarının tanımlanması, bu konfigürasyonların her biri için saat başına maksimum verimin hesaplanması, pist sistemi üzerinde tipik günlük talep profillerinin oluşturulması (saatlik geliş ve gidiş sayısı, uçak tiplerinin karışımı, profillerdeki mevsimsel değişiklikler), talep profillerinin

ve kullanılan pist konfigürasyonlarının tüm uygulanabilir kombinasyonları ile ilişkili gecikmelerin tahmini ile ilgili adımlarının yapılması gerekir.

4.5. Havaalanındaki Vertiportlar

Gelişmiş hava hareketliliği operasyonlarını desteklemek için belirli orijinal ekipman üreticiler ve operatörler havaalanlarında vertiportlar geliştirmek ve mevcut havaalanındaki helikopter iniş tesislerini değiştirmekle ilgilenmektedir. Tüm federal yükümlü havalimanı sponsorları havalimanının güvenliğini, verimliliğini ve faydasını sağlamak ve tüm havacılık kullanıcılarına makul ve haksız yere ayrımcı olmayan erişim sağlamakla yükümlüdür. VTOL hava araçları uçak trafiğine ve operasyonlarına müdahale etmeden havaalanlarında çalışabilirler. Operasyonlar istenilen amacı gerçekleştirmek için mevcut havalimanı altyapısında veya tahsis edilmiş vertiport tesislerinde gerçekleştirilebilir.

Uçak ve eVTOL trafiğinin hacmi operasyonları etkilediğinde ayrı vertiport tesislerine ve yaklaşma/kalkış prosedürlerine ihtiyaç duyulabilir. eVTOL hava araçları ve sabit kanatlı uçaklar arasında yolcu trafiğini birbirine bağlayan havalimanları genel olarak ilgili terminaller arasında geçerli güvenlik önlemleri uygulanarak uçağa binmek için erişim sağlamalıdır. Herhangi bir yeni vertiport altyapısı veya sabit donanım havaalanı yerleşim planında (ALP-Airport Layout Plan) gösterilerek geliştirme ve çalıştırmadan önce FAA incelemesine sunulmalıdır. FAA onayına tabi projeler için Ulusal Çevre Politikası Yasası (NEPA-National Environmental Policy Act) kapsamında uygun düzeyde bir çevresel inceleme gereklidir.

4.5.1. TLOF'un havaalanındaki konumu

Geçerli güvenlik önlemlerinin alındığı havalimanı terminaline veya eVTOL kullanıcısının çıkış veya varış noktasına erişimini sağlamak için TLOF'nin yerleştirilmesi gerekir. Gerekirse TLOF'yi sabit kanatlı uçak hareket alanları olan pistler, taksi yolları ve bir havalimanının yükleme rampaları ve uçak park yeri hariç taksi yapmak, kalkış ve iniş yapmak için kullanılan diğer alanların uzağına ancak bunlara erişimi olacak şekilde yerleştirilmesi gereklidir.

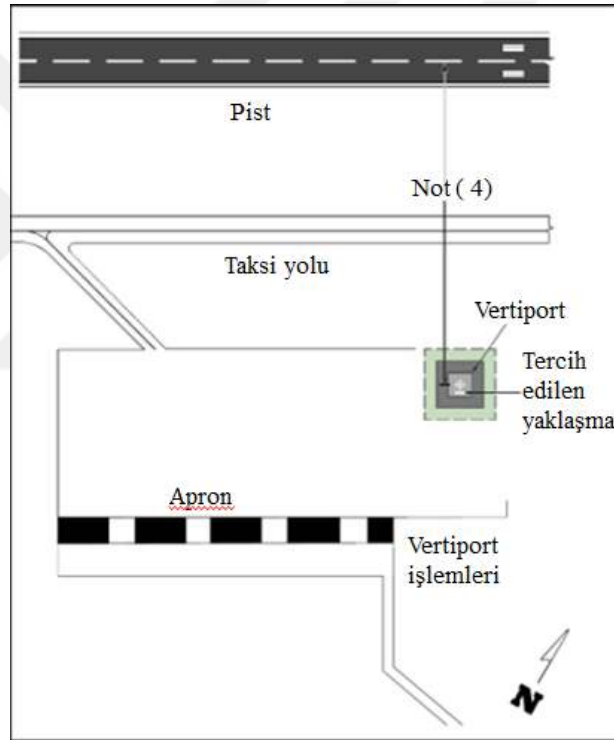
4.5.2. FATO'nun havaalanındaki konumu

Eş zamanlı ve aynı yönlü görsel uçuş kuralı operasyonları için bir piste yaklaşmanın merkez hattı ile bir vertiportun FATO'suna yaklaşmanın merkez hattı arasındaki mesafe standartları Tablo 4.3'te gösterilmiştir (Federal Aviation

Administration, 2022). Şekil 4.12’de bir havaalanındaki vertiport konumunun bir örneğini gösterilmektedir (Federal Aviation Administration, 2022). FATO tüm nesnesiz alanların, emniyet alanlarının, pist koruma bölgelerinin ve emniyet açısından kritik seyrüsefer yardım alanlarının dışına yerleştirilmelidir.

Tablo 4.3. VFR operasyonları için vertiport FATO merkezi ile pist merkez hattı arası tavsiye edilen minimum mesafe (Federal Aviation Administration, 2022)

Referans VTOL Uçak Maksimum Kalkış Ağırlığı	Uçak Boyutu	Vertiport FATO Merkezinden Pist Merkez Hattına Olan Mesafe
5,670 kg veya daha az	Küçük Uçak (5,670 kg veya daha az)	91 m
5,670 kg veya daha az	Büyük Uçak (5,670 kg-136,079 kg)	152 m
5,670 kg veya daha az	Ağır Uçak (136,079 kg)	213 m



Şekil 4.12. Havaalanı içi vertiport örneği (Federal Aviation Administration, 2022)

Not 4: Tablo 4.3’te gösterilmiştir.

4.6. Vertiport Tasarım Konfigürasyonları

FAA, EASA ve ICAO bir vertiportun temel unsurları için spesifikasyonlar sağlamaktadır. Bu spesifikasyonlar ilgili güvenlik alanları ile birlikte kalkış ve iniş alanları, taksi yollarının boyutları, araçlar için durma alanları ve uyulması gereken yaklaşma ve kalkış şeritlerini içermektedir. Kapılara göre pedlerin bileşenlerinin

düzenine bağlı olarak dört ortak topoloji türetilmiştir. Şekil 4.13'te vertiport topoloji türleri gösterilmiştir (Lippoldt, Preis ve Bogenberger, 2020).

4.6.1. Tek topoloji

Tek topoloji yalnızca ek kapıları olmayan bir pedden oluşur. Uçağa binme ve iniş doğrudan bu pedden gerçekleştirilir. Bu topolojide tüm vertiport işlemleri tek bir ped üzerinde gerçekleştirilmektedir. eVTOL kullanıcıları Uber ve VoloCity, araçlarında tek topoloji uygulamasının küçük alanlar için en iyi sonuçları verdiğini değerlendirmesine rağmen Lilium Jet için tek topoloji ihmal edilebilir düzeyde kalmaktadır. Bir saatte yaklaşık 100 yolcuya kadar istenen bir verim için tek topolojinin en iyi seçim olduğu tespit edilmiştir (Preis, 2021).

4.6.2. Uydu topolojisi

Uydu topolojisi bir pedin kapılarla çevrili olması dışında tek topolojiye benzer yapıya sahiptir. Bir veya daha fazla TLOF pedi etrafında dairesel olarak dağıtılan kapılarla ilişkilidir. Birden fazla TLOF pedi mevcutsa bunların bağımsız yaklaşma ve ayrılma prosedürleri olabilir. Ayrıca yaklaşma ve ayrılma yönüne bağlı olarak uçuş yolunun altındaki bazı kapılar kullanılmayabilir (Vascik ve Hansman, 2019).

Yerleşim açısından uydu topoloji sınıfı bir TLOF pedi ve yaklaşık sekiz adede kadar kapısı olan vertiportlar için en kompakt düzenlemedir. Bu yüzden çatılar gibi az yer kaplayan uygulamalar için çok uygundur. Kapılar direklerin bitişiğinde yer aldığı için bir taksi yolu ile erişilmesine gerek yoktur. Hava aracına biniş ve inişler kapılardan gerçekleştirilir. TLOF pedinin kapılara yakın olması nedeniyle havada taksi yapmaya kıyasla gerekli kaplama alanını azaltmak ve rotorun aşağıya doğru akışını en aza indirmek için yerde taksi yapmaya uygundur.

4.6.3. Doğrusal topoloji

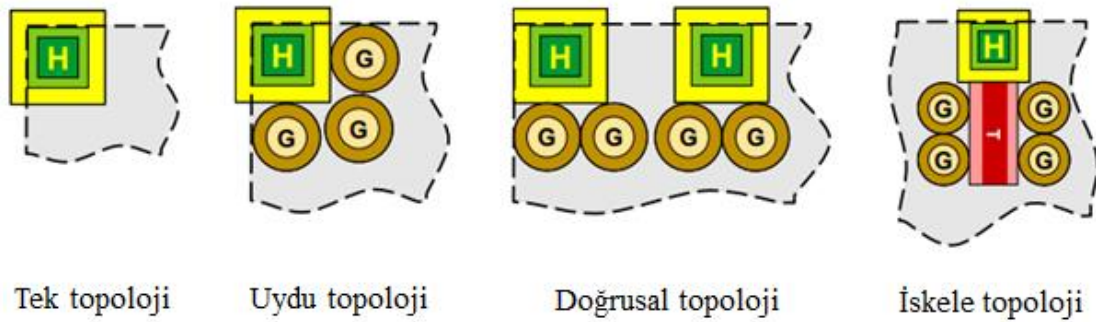
Doğrusal topolojide pedler bir çizgi boyunca yan yana konumlandırılır. Alanın şekline göre belirlenen iki sıranın zıt yönlerde bakan geliş ve gidiş koridorları ile iki sıraya kadar mümkün bir yapıya sahiptir. Kapılar pedlerin hemen bitişiğinde yer aldığı için bir taksi yolu ile erişilmesine gerek yoktur. Hava aracına biniş ve inişler kapılardan gerçekleştirilir. Doğrusal topoloji en çok araç geri dönüş sürelerinin kısa olduğu ve karayolu veya demiryolu geçiş hakkı gibi ince ancak uzun bir kullanma alanının olduğu yerlerde kullanışlıdır. Doğrusal topoloji çok sayıda TLOF pedine sahip olması

nedeniyle yüksek verim sağlayabilir ancak bağımsız yaklaşımlar ve ayrılmalar mümkün olmadığından bu verim azalmaktadır.

4.6.4. İskele topolojisi

Diğer topolojilerden farklı olarak iskele topolojisinde kapıların doğrudan pedlerin yanına yerleştirilmesine ihtiyaç yoktur. Kapılar bir taksi yolu aracılığı ile pedlere bağlanır. Bu nedenle bir taksi yolunu kaç pedin paylaştığı ve kapıların taksi yolunda nasıl düzenleneceği ayırt edilmelidir. Hava aracına binış ve inişler ise kapılardan gerçekleştirilir.

İskele topolojisi çok sayıda TLOF pedi ve kapısı olan daha büyük tesisler için en verimli olan topoloji türüdür (Vascik ve Hansman, 2019). Bu nedenle yüzey tesisleri veya büyük kaplama alanına sahip çatılardaki tesisler için daha uygundur. İskele topolojisi kısmen veya tamamen bağımsız işlemler için yeterli TLOF ped aralığını kolayca destekler. Ayrıca kapı setlerini birden fazla TLOF pedine bağlayarak operasyonel sağlamlık kazanımları sağlar. Aynı zamanda iskele topolojisi uydu topoloji düzeninden daha fazla kapıyı ve daha fazla uçağı fiziksel olarak barındırabileceğinden dolayı daha uzun araç dönüş sürelerine sahip olmayı bekleyen veya birden fazla uçağı sahada sahnelemek isteyen tesisler için faydalı olabileceği değerlendirilmektedir.



Şekil 4.13. Vertiport topoloji türleri (Lippoldt, Preis ve Bogenberger, 2020)

5. SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Tez çalışması ile dünyadaki megakentlerde yaşanan karayolu sıkışıklığı sorununun çözülebilmesi için gerekli olan KHH incelenerek kullanılması planlanan eVTOL hava araçlarının yaşanan bu trafik tıkanıklığının giderilmesinde oynayacağı rol ele alınmıştır. KHH’de kullanılması planlanan eVTOL hava araçlarının kalkış ve iniş yapacağı havaalanı modeli olan vertiportların tasarım kriterlerinin kapsamlı bir şekilde araştırılması amaçlanmıştır.

Yeni nesil hava araçlarının kullanım tiplerine, kullanım alanlarına ve itki sistemlerine göre sınıflandırılması tezin birinci aşamasını, KHH’nin değerlendirilmesi tezin ikinci aşamasını, vertiport ve tasarım kriterleri ise tezin üçüncü aşamasını oluşturmuştur.

Tez kapsamında İHA teknolojisinin sahip olduğu teknik imkân ve kabiliyetlerin günümüzde birçok alanda önemli katkılar sağlamaya devam ettiği tespit edilmiştir. İHA teknolojisi sahip olduğu avantajlar nedeniyle birçok sektörde cazip kullanım alanları oluşturmuştur. Teknoloji alanındaki hızlı gelişmeler ve sektöre yapılan yatırım İHA’ların birçok yeni alanda kullanımının önünü açacağı öngörülmektedir.

İHA’lardan yüksek manevra kabiliyeti ve uzun uçuş dayanıklılığını eş zamanlı olarak elde etmek için İHA’lardaki elektrikli tahrik sistemlerindeki mevcut yakıt hücrelerinin bataryalar, süper kapasitörler veya güneş bataryaları gibi diğer güç kaynakları ile birleştirmesi gerekmektedir. Yakıt hücrelerinin diğer güç kaynaklarıyla entegrasyonu, İHA tahrik sistemlerinin dinamik yük tepkisini, güç performansını ve enerji depolama kapasitesini önemli ölçüde iyileştirebilme imkânına sunacağı değerlendirilmektedir.

Elektrikli hava taşımacılığı toplu taşımayı, havaalanlarını ve zaman açısından kritik mobilite hizmetlerini iyileştirebilir. Kapasiteyi etkileyecek olan sahadaki geri dönüşüm sürelerini azaltarak eVTOL hava araçlarını hızlı ve verimli bir şekilde şarj etmek için ideal olarak yenilenebilir kaynaklardan yeterli enerji sağlanması gerekli olacaktır. KHH uzun pist gerekliliğini ortadan kaldıran vertiport ve bu yeni altyapının tasarlanmasında önemli bir rol oynayan eVTOL fikrine dayanmaktadır. Yeni bir hava taşımacılığı olarak ortaya çıkan KHH’nin ayırt edici özelliklere sahip yepyeni bir havacılık faaliyet alanı oluşturma konusunda önemli adımlar atmaya devam edeceği öngörülmektedir.

KHH uygulamasıyla seyahat süresinin azaltılarak önemli ölçüde zaman tasarrufu sağlanabileceğini, hava sahasının kullanılmasıyla da karayolu, demiryolu, köprü ve tünellere olan bağımlılığın azaltılması nedeniyle de mali tasarruf sağlanabileceği sonucu ortaya çıkmaktadır. KHH modern şehirlerin karşı karşıya olduğu trafik sıkışıklığı ve çevre sorunlarını çözerek ekonomik, hızlı ve sürdürülebilir seyahat için gelecekte daha fazla tercih edilebilir bir çözüm seçeneği olma eğilimindedir. eVTOL olarak bilinen KHH araçları henüz geliştirilme aşamasında olmasına rağmen teknoloji alanındaki hızlı ilerlemeler yüzden fazla havacılık şirketini bu araçları geliştirme konusunda cesaretlendirmiştir.

Yeni bir altyapı elemanı olan vertiport tasarımlarında kalkış ve iniş alanlarının, park kapılarının, taksi yollarının ve yolcu konaklama alanlarının vertiport yüzey özelliklerinin alan gereksinimleri göz önüne alınarak planlamaların yapılması gerekir. Bununla birlikte vertiporta iniş ve kalkış yollarını etkileyebilecek vertiport çevresindeki yüksek binalar, engeller, mevcut kontrollü hava sahası, rüzgâr durumu ve imar durumu gibi hava sahası kısıtlamalarında dikkate alınmalıdır.

KHH ile yolcu taşımacılığını başlatmak için acele etmek, istenmeyen güvenlik sorunlarının oluşmasına ve halkın muhalefetine artmasına sebep olabilir. Bunun sonucu olarak şehirlerdeki KHH gelişiminin durması ve hatta KHH faaliyeti kullanımının yasaklanması söz konusu olabilir. Geçmişe bakıldığında geleneksel havacılığın özellikle havalimanların 50 yıldan daha uzun bir süredir uçak gürültüsü nedeniyle havalimanı yakınında yaşayan insanların muhalefetine uğradığı görülebilir. Bununla birlikte ticari havalimanlarının çoğu şu anda banliyölerde bulunurken vertiportların çoğunlukla daha yoğun nüfuslu bölgelerde inşa edilmesi planlanmaktadır.

Ticari havalimanları tarafından banliyö ortamlarında halkın bu kaygılarını gidermek için sorunların çözümüne yönelik çeşitli mekanizmalar geliştirilmesine rağmen aynı mekanizmaların şehir ortamlarındaki vertiportlar için tam olarak geçerli olmayacağı düşünülmektedir. Dünyanın dört bir yanındaki havacılık kuruluşlarının bu kadar çok paydaşın olduğu alanda gerekli çözümleri hayata geçirmekte daha fazla zorluk yaşayacağı ve bu sorunları aşabilmek için bugün olduğundan daha geniş kitlelere ulaşmaları gerekeceği düşünülmektedir.

KHH kapsamında eVTOL hava araçlarının yakın mesafeli iç hat uçuşlarında kullanılmaya başlaması ticari havalimanlarının iç hat uçuşlarında ve gerçekleştirilen yer hizmetleri operasyonlarında ciddi kayıplara yol açacağı değerlendirilmektedir. Bunun

sonucu olarak ticari havaalanlarında daha az trafik sıkışıklığı meydana gelecek ve havaalanlarının şehrin iç kısımlarına olan genişleme talebinde azalma gerçekleşecektir.

Günümüzde KHH'nin önündeki en önemli sorunlardan biriside KHH'nin uluslararası düzeyde kabul görececek düzenlemelerin ve çalışmaların henüz olgunlaşmamış olmasıdır. Buna ilave olarak eVTOL faaliyetlerini kapsayan detaylı bir standartlar henüz tam anlamıyla oluşturulamamıştır. KHH ihtiyaçlarını giderecek tarzda eVTOL hava araçları ile sivil hava yolu uçaklarının hava sahasını eş zamanlı kullanımına imkân verecek birleştirici hava trafik uygulaması uygulanabilir düzeyde olması gerekmektedir.

5.1. Öneriler

İHA'ları kısa sürede, düşük maliyetle ve yüksek güvenlikle uzaktan veri elde etme konusunda üstün bir seçenek sunan umut verici bir teknoloji olmasına rağmen performansının giderek zorlaşan görevlerin yerine getirilmesi gereksinimini karşılamak için tahrik sistemlerinin önemli ölçüde iyileştirilmeye ihtiyacı vardır. Havada kalma ve menzili arttıracak teknolojik tasarımların planlanması gerekir.

KHH'nin önümüzdeki yıllarda kullanımının artması ile gökyüzündeki hava trafiği sıkışıklığının yoğunlaşması beklenmektedir. Bu sorunu çözebilmek içinde uçuşa yasaklı bölgeler, şehirlerdeki arazilerin kullanılma projeleri ve şehrin ulaştırma planlarının detaylı şekilde incelenerek e-VTOL hava araçların uçuş güzergâhları detaylı şekilde düzenlenmelidir.

eVTOL hava araçlarının daha uzun uçuşlar için geçerli bir ticari ulaşım seçeneği olması için eVTOL hava araçlarında kullanılacak olan elektrik güç kaynağının mevcut lityum iyon bataryalardan daha güvenli, daha uzun ömürlü, daha küçük, daha hafif ve daha hızlı şarj olması için gerekli çalışmaların ivedi olarak yapılması gereklidir.

Bir vertiportun tasarımını planlar iken sadece hava trafiği faaliyetine ve finansman açısından vertiport tasarımını doğrudan etkileyen bileşenleri dikkate almak yeterli olmayabilir. Vertiportların tasarım planı yapılır iken çevre üzerindeki etkisi dikkate alınarak mümkün olduğunca bu etkiyi en verimli şekilde sağlamak için ise gerekli çözümlerin hazırlanması gereklidir. Vertiportlar için şarj altyapısı tasarımı da birden fazla uçağa ve özel sisteme uyum sağlamayı düşünerek planlanmalıdır.

KAYNAKÇA

- AAA. (2017). AAA reveals true cost of vehicle ownership Colorado. Available at: <https://www.colorado.aaa.com/news/aaa-reveals-true-cost-vehicle-ownership>. (Erişim tarihi: 06.12.2022)
- Abbasi, A. and Jiang, Z. (2009). Multidisciplinary modeling and simulation of a fuel cell/gas turbine hybrid power system. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. doi:10.1109/pes.2009.5275756
- Abdalla, A. M., Hossain, S., Azad, A. T., Petra, P. M. I., Begum, F., Eriksson, S. G., Azad, A. K. (2018). Nanomaterials for solid oxide fuel cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 353–368. doi:10.1016/j.rser.2017.09.046
- Ackerman, K. A. and Gregory, I. M. (2020). Trajectory Generation for Noise-Constrained Autonomous Flight Operations. *AIAA Scitech 2020 Forum* içinde. doi:10.2514/6.2020-0978
- Ahirwar, S., Swarnkar, R., Bhukya, S., Namwade, G. (2019). Application of drone in agriculture. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(1), 2500-2505.
- Altran. (2020). EN-Route to Urban Air Mobility: On the fast track to viable and safe on-demand air services.
- Anand, A., Kaur, H., Justin, C. Y., Zaidi, T., Mavris, D. N. (2021). A scenario-based evaluation of Global Urban Air Mobility Demand, *AIAA SciTech Forum* içinde. Available at: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2021-1516> (Erişim tarihi: 06.12.2022)
- Aneke, M. and Wang, M. (2016). Energy storage technologies and real life applications -A state of the art review. *Applied Energy*, 179, 350–377. doi:10.1016/j.apenergy.2016.06.097
- Antcliff, K. R., Moore, M. D. and Goodrich, K. H. (2016). Silicon Valley as an Early Adopter for On-Demand Civil VTOL Operations. *16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference* içinde. doi:10.2514/6.2016-3466
- AOPA. (2019). Next up: Evtols. Available at: <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2019/october/pilot/next-up-evtols> adresinden erişildi. (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Ashford, N.J., Mumayiz, S. and Wright, P.H. (2011). Airport engineering: Planning, design, and development of 21st century airports Airport . *Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.* doi:10.1002/9780470950074.
- Atherton, K.D. (2014). Watch A Drone Take off from Another Drone, , p. 1. Available from, <https://www.popsci.com/article/technology/watch-drone-take-another-drone/> adresinden erişildi. (Erişim tarihi: 07.12.2022). Retrieved online on.
- Bacchini, A. and Cestino, E. (2019). Electric VTOL Configurations Comparison. *Aerospace*, 6(3), 26. doi:10.3390/aerospace6030026

- Balakrishnan, K., Polastre, J., Mooberry, J., Golding, R., Sachs, P. (2018). The Airbus Unmanned Traffic Management Blueprint, *AirbusUTM*. Available at: <https://www.airbusutm.com/uam-resources-airbus-blueprint> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Barroso, J., Renau, J., Lozano, A., Miralles, J., Martín, J., Sánchez, F., Barreras, F. (2015). Experimental determination of the heat transfer coefficient for the optimal design of the cooling system of a PEM fuel cell placed inside the fuselage of an UAV. *Applied Thermal Engineering*, 89, 1–10. doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.06.003
- Barthelemy, H., Weber, M. and Barbier, F. (2017). Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(11), 7254–7262. doi:10.1016/j.ijhydene.2016.03.178
- Baur, S., Schickram, S., Homulenko, A., Martinez, N., Dyskin, A. (2018). Urban Air Mobility The Rise of A New Mode of Transportation. *Roland Berger Focus*.
- Bell Nexus. (2020). Available at: <https://evtol.news/bell-nexus-4ex> adresinden erişildi. (Erişim tarihi: 06.12.2022)
- Belmonte, N., Staulo, S., Fiorot, S., Luetto, C., Rizzi, P., Baricco, M. (2018). Fuel cell powered octocopter for inspection of mobile cranes: Design, cost analysis and environmental impacts. *Applied Energy*, 215, 556–565. doi:10.1016/j.apenergy.2018.02.072
- Beresnevicius, R. (2019). Defining urban travel in 1950s: The story of New York Airways, *AeroTime Hub*. Available at: <https://www.aerotime.aero/articles/22811-new-york-airways-story> (Erişim tarihi: 06.12.2022)
- Bloch C., Newcomb J., Shiledar S., Tyson M. (2020). Breakthrough Batteries Powering the Era of Clean Electrification. Available at: https://rmi.org/wp-content/uploads/2019/10/rmi_breakthrough_batteries.pdf. (Erişim tarihi: 06.12.2022)
- Booz Allen Hamilton, (2018). “UAM Market Study - Technical Out Brief,” Available at: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20190000517.pdf> adresinden erişildi. (Erişim tarihi: 06.12.2022).
- Bose, A. B. and Zhu, X. (2019). Design of stable and durable polymer electrolyte membrane fuel cells by embedding hydrophobic cage-structured material in cell components. *Fuel*, 235, 954–961. doi:10.1016/j.fuel.2018.08.051
- Boukoberine, M. N., Zhou, Z. and Benbouzid, M. (2019). A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects. *Applied Energy*, 255, 113823. doi:10.1016/j.apenergy.2019.113823
- Boukoberine, M. N., Zhou, Z. and Benbouzid, M. (2019). Power Supply Architectures for Drones - A Review. *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. doi:10.1109/iecon.2019.8927702
- Bradford, S. (2020). “Concept of Operations: Urban Air Mobility (UAM),” Washington
- Bradley, T. H., Moffitt, B. A., Thomas, R. W., Mavris, D. N., Parekh, D. E. (2006). Test Results for a Fuel Cell-Powered Demonstration Aircraft. *SAE Technical Paper Series*. doi:10.4271/2006-01-3092

- Bradley, T., Moffitt, B., Parekh, D., Mavris, D. (2007). Flight Test Results for a Fuel Cell Unmanned Aerial Vehicle. *45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. doi:10.2514/6.2007-32
- Brook, R. and Dodge, M. (2014). Helicopter dreaming: the unrealised plans for city centre heliports in the post-war period.
- Brown C., Das D., Ahmed M., J. Anderson (2020). *Assets.kpmg*. Available at: <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/ie/pdf/2020/10/ie-aviation-2030-disruption-beyond-covid-19.pdf> adresinden erişildi. (Erişim tarihi: 06.12.2022)
- CEBR, (2014). 50% Rise in Gridlock Costs by 2030, <https://cebr.com/reports/the-future-economic-and-environmental-costs-of-gridlock/> adresinden erişildi. (Erişim tarihi: 06.12.2022)
- Chibuogu Nneji, V., Stimpson, A., Cummings, M., Goodrich, K. H. (2017). Exploring Concepts of Operations for On-Demand Passenger Air Transportation. *AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (AVIATION 2017)* içinde . Denver: National Aeronautics and Space Administration (NASA). <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20170006498> (Erişim tarihi: 01.01.2022)
- Clark, G. I. and Rock, A. J. (2016). Processes Contributing to the Maintenance of Flying Phobia: A Narrative Review. *Frontiers in Psychology*, 7. doi:10.3389/fpsyg.2016.00754
- Cool Radio. (2020). Benidorm hosts the world's first 5G urban drone flight Available at: <https://coolradiospain.com/news/benidorm-hosts-the-world-s-first-5g-urban-drone-flight-346> adresinden erişildi. (Erişim tarihi: 01.01.2022)
- Cooley, J. J., Lindahl, P., Zimmerman, C. L., Cornachione, M., Jordan, G., Shaw, S. R., Leeb, S. B. (2014). Multiconverter System Design for Fuel Cell Buffering and Diagnostics Under UAV Load Profiles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(6), 3232–3244. doi:10.1109/tpel.2013.2274600
- D’Andrea, R. (2014). Guest Editorial Can Drones Deliver? *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 11(3), 647–648. doi:10.1109/tase.2014.2326952
- Dajani, J. S., Stortstrom, R. G. and Warner, D. B. (1977). The Potential for Helicopter Passenger Service in Major Urban Areas (No. NASA-CR-145224).
- Darvishpoor, S., Roshanian, J., Raissi, A., Hassanalain, M. (2020). Configurations, flight mechanisms, and applications of unmanned aerial systems: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 121, 100694. doi:10.1016/j.paerosci.2020.10069
- Das, H. S., Tan, C. W. and Yatim, A. H. M. (2017). Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 268–291. doi:10.1016/j.rser.2017.03.056
- Dickey, M.R. (2018). Here’s how much Uber’s flying taxi service will cost, TechCrunch. Available at: <https://techcrunch.com/2018/05/08/heres-how-much-ubers-flying-taxi-service-will-cost/#:~:text=Initially%2C%20uberAIR%20will%20cost%20%245.73> adresinden erişildi. (Erişim tarihi: 08.12.2022)
- Donateo, T., Ficarella, A., Spedicato, L., Arista, A., Ferraro, M. (2017). A new approach to calculating endurance in electric flight and comparing fuel cells and batteries. *Applied Energy*, 187, 807–819. doi:10.1016/j.apenergy.2016.11.100

- Dorling, K., Heinrichs, J., Messier, G. G., Magierowski, S. (2017). Vehicle Routing Problems for Drone Delivery. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47(1), 70–85. doi:10.1109/tsmc.2016.2582745
- Drone Volt. (2020). Hercules 10 Spray Drone - Solar Panels Cleaning, p. 1. Available from, <https://www.youtube.com/watch?v=VbkWzLwy-Lg> adresinden erişildi. (Erişim tarihi: 08.12.2022). Retrieved online on.
- Dudek M., Tomczyk P., Wygonik P., Korkosz M., Bogusz P., Lis, B.(2013). Hybrid fuel cell–battery system as a main power unit for small unmanned aerial vehicles (UAV), *Int. J. Electrochem. Sci.* 8 (2013) 8442–8463.
- Duvall, T., Green, A., Langstaff, M., Miele, K.(2019). Air-mobility solutions: What they'll need to take off, *McKinsey & Company*. Available at: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Capital%20Projects%20and%20Infrastructure/Our%20Insights/Air%20mobility%20solutions%20The%20infrastructure%20challenges%20ahead/Air-mobility-solutions.pdf> adresinden ulaşıldı. (Erişim tarihi: 08.12.2022)
- Duwe, D. and Sprenger, A. (2019). Acceptance, Preferences and Willingness to Pay Analysis for Flying Cars and Passenger Drones. *In Proceedings of the 6th International Conference on Innovation in Science and Technology*.
- E, J., Liu, G., Zhang, Z., Han, D., Chen, J., Wei, K., Yin, Z. (2019). Effect analysis on cold starting performance enhancement of a diesel engine fueled with biodiesel fuel based on an improved thermodynamic model. *Applied Energy*, 243, 321–335. doi:10.1016/j.apenergy.2019.03.204
- EASA SC-VTOL-01. (2019). Comment Response Document - European Union Aviation Available at: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/SC-VTOL-01%20CRD.pdf> (Erişim tarihi: 08.12.2022)
- Ehang. (2020). Ehang Holdings Limited Investor presentation Available at: <https://ir.ehang.com/static-files/37eb84a2-d237-4a92-885f-e8fb3716f2bf> adresinden erişildi. (Erişim tarihi: 08.12.2022)
- EIT. (2020). A European initiative to create liveable urban spaces, <https://www.eiturbanmobility.eu/> (Erişim tarihi: 08.12.2022)
- European Aviation Safety Agency (EASA). (2019). Regulators and industry unite in need to address societal concerns on drones Available at: <https://www.easa.europa.eu/newsroom-and-events/press-releases/regulators-and-industry-unite-need-address-societal-concerns> (Erişim tarihi: 08.12.2022)
- EVTOL. (2019). EASA takes the first shot at eVTOL regulations. Did they miss the mark? available from: <https://evtol.com/opinions/easa-first-shot-evtol-regulations/> (Erişim tarihi: 08.12.2022)
- Federal Aviation Administration (FAA). (2022). .Engineering brief no. 105, Vertiport Design | Available at: https://www.faa.gov/airports/engineering/engineering_briefs/engineering_brief_105_vertiport_design (Erişim tarihi: 08.12.2022)
- Feldhoff, E. and Soares Roque, G. (2021). Determining infrastructure requirements for an air taxi service at Cologne Bonn Airport. *CEAS Aeronautical Journal*, 12(4), 821-833.

- Fernandes, M. D., de P. Andrade, S. T., Bistrizki, V. N., Fonseca, R. M., Zacarias, L. G., Gonçalves, H. N. C., Matencio, T. (2018). SOFC-APU systems for aircraft: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/j.ijhydene.2018.07.004
- Finger D. F., Götten F., Braun C., Bil C. (2018). Initial Sizing for a Family of Hybrid Electric VTOL *General Aviation Aircraft*, doi: 10.25967/480102.
- Fleming, S. (2021). “The UK is building the world’s first airport: for flying cars,” *World Economic Forum*, içinde URL <https://www.weforum.org/agenda/2021/02/uk-first-airport-electric-flying-cars/> (Erişim tarihi: 01.01.2022)
- Furlong, W. (2020). Venus Atmospheric Maneuverable Platform (VAMP), Northropgrumman, p. 1. Available from, <https://www.northropgrumman.com/vamp/> (Erişim tarihi: 08.12.2022).
- Gang, B. G. and Kwon, S. (2018). Design of an energy management technique for high endurance unmanned aerial vehicles powered by fuel and solar cell systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(20), 9787–9796. doi:10.1016/j.ijhydene.2018.04.049
- Garceau, N. M., Kim, S. Y., Lim, C. M., Cho, M. J., Kim, K. Y., Baik, J. H. (2015). Performance test of a 6 L liquid hydrogen fuel tank for unmanned aerial vehicles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 101, 012130. doi:10.1088/1757-899x/101/1/012130
- Geister, G. and Korn, B. (2017). “Concept for Urban Airspace Integration DLR U-Space Blueprint: Integrating UAS into the future aviation system,”
- Genç, G. and Sarikoç, S. (2017). Energy and exergy analysis of a solid-oxide fuel cell power generation system for an aerial vehicle (ISSA- 2015–139). *International Journal of Green Energy*, 15(3), 151–160. doi:10.1080/15435075.2017.1324789
- Giacoppo, G., Barbera, O., Briguglio, N., Cipiti, F., Ferraro, M., Brunaccini, G., Antonucci, V. (2017). Thermal study of a SOFC system integration in a fuselage of a hybrid electric mini UAV. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(46), 28022–28033. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.09.063
- Gong, A. and Verstraete, D. (2017). Fuel cell propulsion in small fixed-wing unmanned aerial vehicles: Current status and research needs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(33), 21311–21333. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.06.148
- Gong, A., MacNeill, R., Verstraete, D., Palmer, J. L. (2018). Analysis of a Fuel-Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid Propulsion System for a UAV using a Hardware-in-the-Loop Flight Simulator. *AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium*. doi:10.2514/6.2018-5017
- Gong, A., Palmer, J. L. and Verstraete, D. (2018). Flight test of a fuel-cell/battery/supercapacitor triple hybrid uav propulsion system. In: *31st congress of the international council of the aeronautical sciences (ICAS 2018)*. p. 11.
- González-Espasandín, Ó., Leo, T. J. and Navarro-Arévalo, E. (2014). Fuel Cells: A Real Option for Unmanned Aerial Vehicles Propulsion. *The Scientific World Journal*, 2014, 1–12. doi:10.1155/2014/497642
- González-Espasandín, Ó., Leo, T. J., Raso, M. A., Navarro, E. (2019). Direct methanol fuel cell (DMFC) and H₂ proton exchange membrane fuel (PEMFC/H₂) cell

- performance under atmospheric flight conditions of Unmanned Aerial Vehicles. *Renewable Energy*, 130, 762–773. doi:10.1016/j.renene.2018.06.105
- Goriparti, S., Miele, E., De Angelis, F., Di Fabrizio, E., Proietti Zaccaria, R., Capiglia, C. (2014). Review on recent progress of nanostructured anode materials for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 257, 421–443. doi:10.1016/j.jpowsour.2013.11.103
- Grandl, G., Ostgathe, M., Cachay, J., Doppler, S., Salib, J., Ross, H. (2018). “The Future of Vertical Mobility: Sizing the market for passenger, inspection, and goods services until 2035,”
- Guido, N., Mohammadi, S., Hassanalian, M., Bakhtiyarov, S. (2019). Surface Temperature Effects of Solar Panels of Fixed Wing Unmanned Aerial Vehicles on Flight Performance. *AIAA Aviation 2019 Forum*. doi:10.2514/6.2019-3689
- Gundlach, J. and Foch, R.J. (2014). ‘Unmanned Aircraft Systems Innovation at the Naval Research Laboratory’. doi:10.2514/4.102592.
- Gupta, S. G., Ghonge, D. and Jawandhiya, P. M. (2013). Review of unmanned aircraft system (UAS). *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)* Volume, 2.
- H. Ritchie and M. Roser, (2018). “Urbanization,” Our World in Data, [Online]. Available: <https://ourworldindata.org/urbanization#how-many-people-willlive-in-urban-areas-in-the-future> (Erişim tarihi: 08.12.2022)
- Hader M., Baur S., Kopera S., Schönberg T., Hasenberg, J.-P.(2020). “Urban Air Mobility: USD 90 billion of potential: How to capture a share of the passenger drone market,” München, 2020. <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/The-high-flying-industry-Urban-Air-Mobility-takes-off.html> (Erişim tarihi: 08.12.2022)
- Harmon, F. G., Frank, A. A. and Joshi, S. S. (2005). The control of a parallel hybrid-electric propulsion system for a small unmanned aerial vehicle using a CMAC neural network. *Neural Networks*, 18(5-6), 772–780. doi:10.1016/j.neunet.2005.06.030
- Harvey, J. R., Jarvis, R. A., Verstraete, D., Bagg, R. L., Honnery, D., Palmer, J. L. (2012). Development of a hybrid-electric power-system model for a small surveillance aircraft. In *28th international congress of the aeronautical sciences*.
- Hassanalian, M. and Abdelkefi, A. (2016). Design, manufacturing, and flight testing of a fixed wing micro air vehicle with Zimmerman planform. *Meccanica*, 52(6), 1265–1282. doi:10.1007/s11012-016-0475-2
- Hassanalian, M. and Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 91, 99–131. doi:10.1016/j.paerosci.2017.04.003
- Hassanalian, M., Radmanesh, M. and Sedaghat, A. (2014). Increasing flight endurance of MAVs using multiple quantum well solar cells. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 15(2), 212-217.
- Hatti, M., Meharrar, A. and Tioursi, M. (2011). Power management strategy in the alternative energy photovoltaic/PEM Fuel Cell hybrid system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 5104–5110. doi:10.1016/j.rser.2011.07.046

- Heinzel, A. and Barragán, V. M. (1999). A review of the state-of-the-art of the methanol crossover in direct methanol fuel cells. *Journal of Power Sources*, 84(1), 70–74. doi:10.1016/s0378-7753(99)00302-x
- Hendricks, E. S., Falck, R. D., Gray, J. S., Aretskin-Hariton, E., Ingraham, D., Chapman, J. W., Bergeson, J. D. (2019). Multidisciplinary Optimization of a Turboelectric Tiltwing Urban Air Mobility Aircraft. *AIAA Aviation 2019 Forum*. doi:10.2514/6.2019-3551
- Hoehner, C. M., Barlow, C. E., Allen, P., Schootman, M. (2012). Commuting Distance, Cardiorespiratory Fitness, and Metabolic Risk. *American Journal of Preventive Medicine*, 42(6), 571–578. doi:10.1016/j.amepre.2012.02.020
- Holden, J. and Goel, N. (2016). “Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation,” *Uber Elevate*
- Holmes, B. J., Parker, R. A., Stanley, D., McHugh, P., Garrow, L. A., Masson, P. M., Olcott, J. (2017). “NASA Strategic Framework for On-Demand Air Mobility: A Report for NASA Headquarters Aeronautics Research Mission Directorate,” https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/bah_uam_executive_briefing_181005_tagged.pdf (Erişim tarihi: 08.12.2022)
- Hulme, K., Anastasopoulos, P. C., Still, S., Fountas, G., Sonduru Pantangi, S., Ahmed, S. S., Eker, U. (2019). The Flying Car-Emergent Modeling & Simulation (M&S) Policies and Standards concerns.
- Hung, J. Y. and Gonzalez, L. F. (2012). On parallel hybrid-electric propulsion system for unmanned aerial vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 51, 1–17. doi:10.1016/j.paerosci.2011.12.001
- International Civil Aviation Organization (ICAO). (2011). Unmanned Aircraft Systems (Uas), Cir. 328, An/190.
- International Transport Forum and OECD. (2021). “Ready for Take-Off? Integrating Drones into the Transport System,” <https://www.itf-oecd.org/integrating-drones-transport-system> adresinden erişildi. (Erişim tarihi: 08.12.2022)
- Ji, Z., Qin, J., Cheng, K., Guo, F., Zhang, S., Dong, P. (2019). Comparative performance analysis of solid oxide fuel cell turbine-less jet engines for electric propulsion airplanes: Application of alternative fuel. *Aerospace Science and Technology*. doi:10.1016/j.ast.2019.07.019
- Ji, Z., Qin, J., Cheng, K., Guo, F., Zhang, S., Dong, P. (2019). Thermodynamics analysis of a turbojet engine integrated with a fuel cell and steam injection for high-speed flight. *Energy* 185 (2019) 190–201, 2019/10/15. doi:10.1016/j.energy.2019.07.016
- Ji, Z., Qin, J., Cheng, K., Liu, H., Zhang, S., Dong, P. (2019). Thermodynamic analysis of a solid oxide fuel cell jet hybrid engine for long-endurance unmanned air vehicles. *Energy Conversion and Management*, 183, 50–64. doi:10.1016/j.enconman.2018.12.076
- Ji, Z., Qin, J., Cheng, K., Liu, H., Zhang, S., Dong, P. (2019). Performance evaluation of a turbojet engine integrated with interstage turbine burner and solid oxide fuel cell. *Energy*, 168, 702–711. doi:10.1016/j.energy.2018.11.088
- Jo, D. and Kwon, Y. (2017). Analysis of VTOL UAV propellant technology. *Journal of Computer and Communications*, 5(7), 76-82.

- Johnston, T., Riedel, R. and Sahdev, S. (2020). “To take off, flying vehicles first need places to land: The buzz about vehicles flying above hides the infrastructure challenge below.” <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/to-take-off-flying-vehicles-first-need-places-to-land> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Kang, K., Park, S., Cho, S.-O., Choi, K., Ju, H. (2014). Development of Lightweight 200-W Direct Methanol Fuel Cell System for Unmanned Aerial Vehicle Applications and Flight Demonstration. *Fuel Cells*, 14(5), 694–700. doi:10.1002/fuce.201300244
- Kendall, K. and Pollet, B. G. (2012). Hydrogen and Fuel Cells in Transport. *Comprehensive Renewable Energy*, 301–313. doi:10.1016/b978-0-08-087872-0.00419-4
- Khofiyah, N. A., Maret, S., Sutopo, W., Nugroho, B. D. A. (2018). Goldsmith’s Commercialization Model for Feasibility Study of Technology Lithium Battery Pack Drone. *5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*. doi:10.1109/icevt.2018.8628439
- Kim, H. D., Perry, A. T. and Ansell, P. J. (2018). A review of distributed electric propulsion concepts for air vehicle technology. *In 2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS)* (pp. 1-21). IEEE.
- Kim, T. (2014). NaBH₄ (sodium borohydride) hydrogen generator with a volume-exchange fuel tank for small unmanned aerial vehicles powered by a PEM (proton exchange membrane) fuel cell. *Energy*, 69, 721–727. doi:10.1016/j.energy.2014.03.066
- Kim, T. and Kwon, S. (2012). Design and development of a fuel cell-powered small unmanned aircraft. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(1), 615–622. doi:10.1016/j.ijhydene.2011.09.051
- Kim, Y. M., Schonfeld, P. and Rakas, J. (1995). Vertiport Capacity-Analysis Methods. MARYLAND UNIV COLLEGE PARK DEPT OF CIVIL ENGINEERING.
- Kohlman, L. W. and Patterson, M. D. (2018). System-Level Urban Air Mobility Transportation Modeling and Determination of Energy-Related Constraints. *Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. doi:10.2514/6.2018-3677
- Kopardekar, P.H. (2014) Unmanned Aerial System (UAS) traffic management (UTM): Enabling low-altitude airspace and UAS operations - NASA technical reports server (NTRS), NASA. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20140013436> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Lantos, J. (2018). The Environment Has a New Best Friend, *TheDronesWorld*, , p. 1. Available from, <https://thedronesworld.net/environment-s-new-best-friend-drones/> (Erişim tarihi: 08.12.2022). Retrieved online on.
- Lapeña-Rey, N., Blanco, J. A., Ferreyra, E., Lemus, J. L., Pereira, S., Serrot, E. (2017). A fuel cell powered unmanned aerial vehicle for low altitude surveillance missions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(10), 6926–6940. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.01.137

- LEI, T., YANG, Z., LIN, Z., ZHANG, X. (2019). The state of art on energy management strategy for hybrid-powered unmanned aerial vehicle. *Chinese Journal of Aeronautics*. doi:10.1016/j.cja.2019.03.013
- Levine, J. (2015). Could This Become the First Mars Airplane? NASA, p. 1. Available from, https://www.nasa.gov/centers/armstrong/features/mars_airplane.html (Erişim tarihi: 08.12.2022). Retrieved online on.
- Lewe, J.-H., Ahn, B., DeLaurentis, D., Mavris, D., Schrage, D. (2002). An Integrated Decision-Making Method to Identify Design Requirements Through Agent-based Simulation for Personal Air Vehicle System. *AIAA's Aircraft Technology, Integration, and Operations (ATIO) 2002 Technical Forum*. doi:10.2514/6.2002-5876
- Li, H., Ravey, A., N'Diaye, A., Djerdir, A. (2018). A novel equivalent consumption minimization strategy for hybrid electric vehicle powered by fuel cell, battery and supercapacitor. *Journal of Power Sources*, 395, 262–270. doi:10.1016/j.jpowsour.2018.05.078
- Lilium. (2020). Designing a Scalable Vertiport. <https://lilium.com/newsroom-detail/designing-a-scalable-vertiport> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Lineberger R., Hussain, A., Metcalfe, M., Rutgers, V. (2019). Infrastructure barriers to the elevated future of mobility - Are cities ready with the infrastructure needed for urban air transportation? <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/future-of-mobility/infrastructure-barriers-to-urban-air-mobility-with-VTOL.html>
- Lippoldt, K., Preis, L. and Bogenberger, K. (2020). “Vertiport Locating and Sizing Method using Mobility Data and Heliport Design Guidelines”
- Malano, E. (2021) The future of Drone Technology, cloudemployee.co.uk. Available at: <https://cloudemployee.co.uk/blog/tech-news/the-future-of-drone-technology> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Mazur, M., Wisniewski, A. and McMillan, J. (2016). PwC global report on the commercial applications of drone technology. PricewaterhouseCoopers, tech. Rep.
- Mikhailova, S. (2015). “Using Ex-military Drones to Plant Trees,”, http://www.huffingtonpost.com/pro-journo/using-ex-military-drones_b_8414532.html adresinden erişildi. (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Mohd Tahir, N. I., Kuntjoro, W. and Ward, T. A. (2013). Aircraft Performance of Kenyalang Fuel Cell UAV. *Applied Mechanics and Materials*, 393, 338–343. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.393.338
- Momont, A. (2019). “Ambulance Drone.” Available: <https://www.tudelft.nl/en/ide/research/research-labs/applied-labs/ambulance-drone> adresinden erişildi. (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Moore, M. (2003). 21st Century Personal Air Vehicle Research. *AIAA International Air and Space Symposium and Exposition: The Next 100 Years*. doi:10.2514/6.2003-2646
- Moore, M. (2014). The joby S2 VTOL concept: Exploring the new degrees of design freedom of distributed electric propulsion. 60. 22-24.

- Morgan Stanley Research. (2018). “Flying Cars: Investment Implications of Autonomous Urban Air Mobility,”. <https://www.morganstanley.com/ideas/autonomous-aircraft>. (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Morton, S., D’Sa, R. and Papanikolopoulos, N. (2015). Solar powered UAV: Design and experiments. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. doi:10.1109/iros.2015.7353711
- Narayanan, R.G.L. and Ibe, Oliver C. (2015). Joint Network for Disaster Relief and Search and Rescue Network Operations. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-022-5.50006-6>
- Nathen, P., Strohmayr, A., Miller, R., Grimshaw, S., Taylor, J. (2021). Architectural performance assessment of an electric vertical take-off and landing (e-VTOL) aircraft based on a ducted vectored thrust concept.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2018). ‘Executive briefing: Urban air mobility (UAM) market study’, available from: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20190001472> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- National Air Transportation Association (NATA). (2019). Urban Air Mobility: Considerations for Vertiport Operation. https://www.nata.aero/assets/Site_18/files/GIA/NATA%20UAM%20White%20Paper%20-%20FINAL%20cb.pdf (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- NavalDrones. (2020). Naval Drones VD200 Available from <http://www.navaldrones.com/VD200.html> adresinden erişildi. (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Neufville, Richard de., Odoni Amedeo R., Belobaba, Peter P., Reynolds, Tom G. (2013). Airport Systems: Planning, Design, and Management. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071770583> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Ou, K., Wang, Y.-X., Li, Z.-Z., Shen, Y.-D., Xuan, D.-J. (2015). Feedforward fuzzy-PID control for air flow regulation of PEM fuel cell system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(35), 11686–11695. doi:10.1016/j.ijhydene.2015.04.080
- Ou, K., Yuan, W.-W., Choi, M., Yang, S., Jung, S., Kim, Y.-B. (2018). Optimized power management based on adaptive-PMP algorithm for a stationary PEM fuel cell/battery hybrid system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(32), 15433–15444. doi:10.1016/j.ijhydene.2018.06.072
- Pan, Z. F., An, L. and Wen, C. Y. (2019). Recent advances in fuel cells based propulsion systems for unmanned aerial vehicles. *Applied Energy*, 240, 473–485. doi:10.1016/j.apenergy.2019.02.079
- Panagiotou, P. and Yakinthos, K. (2019). Aerodynamic efficiency and performance enhancement of fixed-wing UAVs. *Aerospace Science and Technology*, 105575. doi:10.1016/j.ast.2019.105575
- Panagiotou, P., Fotiadis-Karras, S. and Yakinthos, K. (2018). Conceptual design of a Blended Wing Body MALE UAV. *Aerospace Science and Technology*, 73, 32–47. doi:10.1016/j.ast.2017.11.032

- Peisen, D.J., Sampson, W.T., LaBelle, L.J., Sawyer, B.M., Ludders, J.R., Berardo, S.V., Dymont, R.J., Ferguson, S.W., Winick, R.M., Bragdon, C.R. (1994). Analysis of Vertiport Studies Funded by the Airport Improvement Program (AIP).
- Petersen, J. D., Alexander, R. J. and Swaintek, S. S. (2020). "Dynamic Vertiport Configuration," US20200226937A1, [Online], Available: <https://patents.google.com/patent/US20200226937A1/en> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Phiesel, D. and Moormann, D. (2018). Bewertung des Bodenrisikos beim Betrieb von kleinen unbemannten Fluggeräten-Ein einfacher und quantitativer Ansatz.
- Ploetner, K. O., Al Haddad, C., Antoniou, C., Frank, F., Fu, M., Kabel, S., Llorca, C., Moeckel, R., Moreno, A. T., Pukhova, A., Rothfeld, R., Shamiyeh, M., Straubinger, A., Wagner, H., Zhang, Q. (2020). Long-term application potential of urban air mobility complementing public transport: an upper Bavaria example. *CEAS Aeronautical Journal*, 11(4), 991–1007. <https://doi.org/10.1007/s13272-020-00468-5>
- Pradeep, P. (2019). Arrival Management for eVTOL Aircraft in on-demand Urban Air Mobility. <https://dr.lib.iastate.edu/handle/20.500.12876/31259> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Pradeep, P. and Wei, P. (2019). Energy-Efficient Arrival with RTA Constraint for Multirotor eVTOL in Urban Air Mobility. *Journal of Aerospace Information Systems*, 16(7), 263–277. doi:10.2514/1.i010710
- Pratt, J. W., Klebanoff, L. E., Munoz-Ramos, K., Akhil, A. A., Curgus, D. B., Schenkman, B. L. (2013). Proton exchange membrane fuel cells for electrical power generation on-board commercial airplanes. *Applied Energy*, 101, 776–796. doi:10.1016/j.apenergy.2012.08.003
- Preis, L. (2021). Quick Sizing, Throughput Estimating and Layout Planning for VTOL Aerodromes – A Methodology for Vertiport Design. *AIAA AVIATION 2021 FORUM* içinde. doi:10.2514/6.2021-2372.
- PYMNTS. (2020). FAA To Propose Safety Standards For Delivery Drones, www.pymnts.com. Available at: <https://www.pymnts.com/news/regulation/2020/faa-to-propose-safety> (Erişim tarihi: 07.12.2022).
- Reed, D. (2019) Too big to fail: Projected flying cars market is so big that a few of the 135 makers will succeed, Forbes. Forbes Magazine. Available at: <https://www.forbes.com/sites/danielreed/2019/01/22/to-big-to-fail-projected-flying-cars-market-is-so-big-that-a-few-of-the-135-makers-will-succeed/>(Erişim tarihi: 07.12.2022).
- Reichert, C. (2019). Uber and AT&T partner on 5G air taxis, CNET. CNET. Available at: <https://www.cnet.com/tech/mobile/at-t-and-uber-partner-on-5g-air-taxis/> (Erişim tarihi: 07.12.2022).
- Renau, J., Lozano, A., Barroso, J., Miralles, J., Martín, J., Sánchez, F., Barreras, F. (2015). Use of fuel cell stacks to achieve high altitudes in light unmanned aerial vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(42), 14573–14583. doi:10.1016/j.ijhydene.2015.02.071

- Reuter, F. and Griemens, R. (2021) “The roadmap to scalable urban air mobility: White paper 2.0,” <https://www.volocopter.com/wp-content/uploads/Volocopter-WhitePaper-2-0.pdf> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Rizzi, P. and Rizzi, C. (2022). The Impact of New Technologies on the Evolution of a Greener Aviation Industry and the Emerging of a New Urban Air Mobility (UAM). In *The Impact of COVID-19 on World Aviation Industry: Challenges and Opportunities*, 105-158.
- Romeo, G., Borello, F., Correa, G., Cestino, E. (2013). ENFICA-FC: Design of transport aircraft powered by fuel cell & flight test of zero emission 2-seater aircraft powered by fuel cells fueled by hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(1), 469–479. doi:10.1016/j.ijhydene.2012.09.064
- Ruan, J., Walker, P. D., Zhang, N., Wu, J. (2017). An investigation of hybrid energy storage system in multi-speed electric vehicle. *Energy*, 140, 291–306. doi:10.1016/j.energy.2017.08.119
- Saeed, A. S., Younes, A. B., Cai, C., Cai, G. (2018). A survey of hybrid Unmanned Aerial Vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 98, 91–105. doi:10.1016/j.paerosci.2018.03.007
- Santin, M., Traverso, A. and Massardo, A. (2008). Technological aspects of gas turbine and fuel cell hybrid systems for aircraft: a review. *The Aeronautical Journal*, 112(1134), 459–467. doi:10.1017/s0001924000002426
- Schrank, D., Eisele, B. and Lomax, T. (1970) Urban Mobility Report 2019: Semantic Scholar, undefined. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Urban-Mobility-Report-2019-Schrank-Eisele/479b7151ef4df53c39c249284609f35d0039ad02> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Schweiger, K., Knabe, F. and Korn, B. (2021). ‘An exemplary definition of a vertidrome’s airside concept of operations’, *Aerospace Science and Technology*, 125, p. 107144. doi:10.1016/j.ast.2021.107144.
- Seo, S. H. and Lee, C. S. (2010). A study on the overall efficiency of direct methanol fuel cell by methanol crossover current. *Applied Energy*, 87(8), 2597–2604. doi:10.1016/j.apenergy.2010.01.018
- Shiau, Jaw-Kuen., Ma, Der-Ming., Yang, Pin-Ying., Wang, Geng-Feng., Gong. Jhij Hua. (2009). Design of a Solar Power Management System for an Experimental UAV. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 45(4), 1350–1360. doi:10.1109/taes.2009.5310303
- Shin, J., Clarke, J.-P., Allison, E., Thacker, M., Dietrich, A. M. (2018). Urban Air Mobility—Are Flying Cars Ready For Take-Off? *Hearing Before The committee On Science, Space, and Technology House of Representatives One Hundred Fifteenth Congress* (C. 115–71). Washington: U.S. Government Publishing Office Washington.
- Shu, J., Fu, J., Zhao, D., Liu, J., Ma, Y., Deng, B., Zhang, Y. (2019). Numerical investigation on the effects of valve timing on in-cylinder flow, combustion and emission performance of a diesel ignition natural gas engine through computational fluid dynamics. *Energy Conversion and Management*, 198, 111786. doi:10.1016/j.enconman.2019.111786

- Sparrow, V., Gjestland, T., Guski, R., Richard, I., Basner, M., Hansell, A., de Kluizenaar, Y., Clark, C., Janssen, S., Mestre, V., Loubeau, A., Bristow, A., Thanos, S., Vigeant, M., Cointin, R. (2019). "Aviation Noise Impacts White Paper: State of the Science 2019: Aviation Noise Impacts," <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Noise/EnvReport2019%20-%20White%20Paper%20on%20Noise.pdf> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Statista. (2015). Fear of flying 2015 Statistic, Available at: <https://www.statista.com/statistics/488064/worry-about-flying-in-britain/> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Stempeck, A., Hassanalian, M. and Abdelkefi, A. (2018). Aerodynamic performance of albatross-inspired wing shape for marine unmanned air vehicles. *Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. doi:10.2514/6.2018-3899
- Stoll, A. M., Stilson, E. V., Bevirt, J., Pei, P. P. (2014). Conceptual Design of the Joby S2 Electric VTOL PAV. *14th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. doi:10.2514/6.2014-2407
- Stroman, R. O., Schuette, M. W., Swider-Lyons, K., Rodgers, J. A., Edwards, D. J. (2014). Liquid hydrogen fuel system design and demonstration in a small long endurance air vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(21), 11279–11290. doi:10.1016/j.ijhydene.2014.05.065
- Sulaiman, N., Hannan, M. A., Mohamed, A., Ker, P. J., Majlan, E. H., Wan Daud, W. R. (2018). Optimization of energy management system for fuel-cell hybrid electric vehicles: Issues and recommendations. *Applied Energy*, 228, 2061–2079. doi:10.1016/j.apenergy.2018.07.087
- Swider-Lyons, K., Stroman, R., Page, G., Schuette, M., Mackrell, J., Rodgers, J. (2011). Hydrogen Fuel Cell Propulsion for Long Endurance Small UAVs. *AIAA Centennial of Naval Aviation Forum "100 Years of Achievement and Progress."* doi:10.2514/6.2011-6975
- Taylor, M., Saldanli, A. and Park, A. (2020). Design of a Vertiport Design Tool. *Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*. doi:10.1109/icns50378.2020.9222989
- The Guardian. (2018). 'Automated virtual reality therapy helps people overcome phobia of heights', available from: <https://www.theguardian.com/science/2018/jul/11/automated-virtual-reality-therapy-helps-people-overcome-phobia-of-heights> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Thipphavong, D. P., Apaza, R., Barmore, B., Battiste, V., Burian, B., Dao, Q., Verma, S. A. (2018). Urban Air Mobility Airspace Integration Concepts and Considerations. *Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. doi:10.2514/6.2018-3676
- Thounthong, P. and Davat, B. (2010). Study of a multiphase interleaved step-up converter for fuel cell high power applications. *Energy Conversion and Management*, 51(4), 826–832. doi:10.1016/j.enconman.2009.11.018
- Townsend, A., Jiya, I. N., Martinson, C., Bessarabov, D., Gouws, R. (2020). A comprehensive review of energy sources for unmanned aerial vehicles, their

- shortfalls and opportunities for improvements. *Heliyon*, 6(11), e05285. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e05285
- Troncoso, E., Lapeña-Rey, N. and Gonzalez, M. (2016). Design tool for offgrid hydrogen refuelling systems for aerospace applications. *Applied Energy*, 163, 476–487. doi:10.1016/j.apenergy.2015.05.026
- Troncoso, E., Lapeña-Rey, N. and Valero, O. (2014). Off-grid test results of a solar-powered hydrogen refuelling station for fuel cell powered Unmanned Aerial Vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(21), 11267–11278. doi:10.1016/j.ijhydene.2014.04.192
- Troncoso, E., Lapeña-Rey, N. and Valero, O. (2014). Solar-powered hydrogen refuelling station for unmanned aerial vehicles: Design and initial AC test results. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(4), 1841–1855. doi:10.1016/j.ijhydene.2013.11.064
- Tyan, M., Nguyen, N. V., Kim, S., Lee, J.-W. (2017). Comprehensive preliminary sizing/resizing method for a fixed wing – VTOL electric UAV. *Aerospace Science and Technology*, 71, 30–41. doi:10.1016/j.ast.2017.09.008
- Uber Elevate. (2018). Uber defines Uber Elevate mission, vehicle requirements, available from: <https://www.militaryaerospace.com/commercial-aerospace/article/14229629/uber-defines-uber-elevate-mission-vehicle-requirements> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Vascik, P. D. and Hansman, R. J. (2017). Constraint Identification in On-Demand Mobility for Aviation through an Exploratory Case Study of Los Angeles. *17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. doi:10.2514/6.2017-3083
- Vascik, P. D. and Hansman, R. J. (2017). Evaluation of Key Operational Constraints Affecting On-Demand Mobility for Aviation in the Los Angeles Basin: Ground Infrastructure, Air Traffic Control and Noise. *17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. doi:10.2514/6.2017-3084
- Vascik, P. D. and Hansman, R. J. (2019). Development of Vertiport Capacity Envelopes and Analysis of Their Sensitivity to Topological and Operational Factors. *AIAA Scitech 2019 Forum*. doi:10.2514/6.2019-0526
- Verstraete, D. (2013). Long range transport aircraft using hydrogen fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(34), 14824–14831. doi:10.1016/j.ijhydene.2013.09.021
- Verstraete, D., Harvey, J. R. and Palmer, J. L. (2012). Hardware-in-the-loop simulation of fuel-cell-based hybrid-electrical UAV propulsion. In *Proceedings of the 28th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences* (Vol. 4, pp. 2662-2674).
- Verstraete, D., Lehmkuehler, K. and Wong, K. C. (2012). Design of a Fuel Cell Powered Blended Wing Body UAV. Volume 1: *Advances in Aerospace Technology*. doi:10.1115/imece2012-88871
- Voom. (2022). “San Francisco Bay Area: On-Demand Helicopter Ride-Sharing,”, accessed on: 5.12.2019. URL <https://www.voom.flights/>. (Erişim tarihi: 07.12.2022)

- Wang, Y., Li, X., Wang, L., Sun, Z. (2019). Multiple-grained velocity prediction and energy management strategy for hybrid propulsion systems. *Journal of Energy Storage*, 26, 100950. doi:10.1016/j.est.2019.100950
- Ward, T. A. and Jenal, N. (2010). Design and Initial Flight Tests of a Hydrogen Fuel Cell Powered Unmanned Air Vehicle (UAV). doi:10.1149/1.3429016
- Watts, A. C., Ambrosia, V. G. and Hinkley, E. A. (2012). Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use. *Remote Sensing*, 4(6), 1671–1692. doi:10.3390/rs4061671
- Whittle, R. (2017). “Air Mobility Bonanza Beckons Electric VTOL Developers,”
- World Economic Forum. (2019). ‘This Air Taxi Uses 5G to ‘See’ Around Corners’ available from: <https://www.weforum.org/agenda/2019/11/multicopter-helicopter-airtaxi-5g-technology-pioneers/> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Xiang, T.-Z., Xia, G.-S. and Zhang, L. (2019). Mini-Unmanned Aerial Vehicle-Based Remote Sensing: Techniques, applications, and prospects. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 7(3), 29–63. doi:10.1109/mgrs.2019.2918840
- Xu, E. (2020). The future of transportation: White paper on urban air mobility systems. *EHang, Guangzhou*, 31-36.
- Yu, S., Heo, J., Jeong, S., Kwon, Y. (2016). Technical analysis of VTOL UAV. *Journal of Computer and Communications*, 4(15), 92-97. doi:10.4236/jcc.2016.415008.
- Zago, M., Bisello, A., Baricci, A., Rabissi, C., Brightman, E., Hinds, G., Casalegno, A. (2016). On the actual cathode mixed potential in direct methanol fuel cells. *Journal of Power Sources*, 325, 714–722. doi:10.1016/j.jpowsour.2016.06.093
- Zelinski, S. (2020). Operational Analysis of Vertiport Surface Topology. 2020 *AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. doi:10.1109/dasc50938.2020.9256794.
- Zhang, A. (2018). An overview of the global solar-powered UAV market 2017-2021, WeTalkUAV.com. Available at: <https://www.wetalkuav.com/global-solar-powered-uav-market> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- Zhao, X., Zhou, Z. and Zhu, X. (2018). Design of a Lift-propulsion VTOL UAV system. 2018 *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. doi:10.1109/icma.2018.8484448
- http-1:**<https://archive.autofutures.tv/2019/10/21/the-worlds-first-vertiport-singapore/> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- http-2:**https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_unmanned_aerial_vehicles_of_China (Erişim tarihi: 08.12.2022).
- http-3:**https://wikivisually.com/wiki/IAI_Searcher. (Erişim tarihi: 03.12.2022).
- http-4:** <https://x.company/projects/wing/>. (Erişim tarihi: 03.12.2022).
- http-5:**http://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Daduhe_Bridge_Xingkang. (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- http-6:**<http://www.iii.org/issue-update/insurance-fraud>(Erişim tarihi: 07.12.2022)
- http-7:**<http://www.ft.com/intl/cms/s/0/0df6980c-b628-11e5-8358-9a82b43f6b2f.html#axzz46Z3worgw> (Erişim tarihi: 07.12.2022)

- http-8:**<https://www.theverge.com/2013/8/9/4604876/national-geographic-living-with-lions-serengeti-robot-drone-photography> (Erişim tarihi: 26.12.2022)
- http-9:**<http://www.aerialtronics.com/t-mobile-used-drone/> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- http-10:**<https://www.theguardian.com/technology/2015/jul/31/facebook-finishes-aquila-solar-powered-internet-drone-with-span-of-a-boeing-737> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- http-11:**<https://www.yamahamotorsports.com/motorsports/pages/precision-agriculture-rmax> (Erişim tarihi: 03.12.2022).
- http-12:**<https://x.company/projects/loon/>.(Erişim tarihi: 07.12.2022) Retrieved online on.
- http-13:**https://www.faa.gov/uas/research_development/traffic_management/, 2020 (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- http-14:**<https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/17821/Siemens-Electric-Aircraft-Propulsion-UnitInside-the-Digital-Twin-Design-Strategy.aspx> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- http-15:**<https://transportup.com/headlinesbreaking-news/volocopter-launches-first-urban-flight-in-stuttgart-germany/> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- http-16:**https://www.washingtonpost.com/health/lots-of-americans-have-a-fear-of-flying-there-are-way-to-overcome-the-anxiety-disorder/2019/10/11/d4746d84-d338-11e9-86ac-0f250cc91758_story.html (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- http-17:**<https://www.army.mil/article/137604>, (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- http-18:**<https://msconference.wordpress.com/category/maritime-applications-of-unmanned-and-autonomous-vehicles/> (Erişim tarihi: 03.12.2022).
- http-19:**<http://energyor.com/news/post:30> (Erişim tarihi: 03.12.2022).
- http-20:**<http://www.nasa.gov/centers/dryden/multimedia/imagegallery/Helios/ED01-0209-3.html> (Erişim tarihi: 03.12.2022).
- http-21:**<https://www.wevolver.com/article/the-watershed-moment-for-underwater-drones> (Erişim tarihi: 03.12.2022).
- http-22:**<https://www.iacacoustics.com/blog-full/comparative-examples-of-noise-levels> (Erişim tarihi: 03.12.2022).
- http-23:**<https://newatlas.com/joby-s2-tilt-rotor-vtol-multirotor-aircraft-concept/40662/> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- http-24:**<https://lilium.com> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- http-25:**<https://www.volocopter.com/newsroom/worlds-first-full-scale-air-taxi-voloport-unveiled-in-singapore/> (Erişim tarihi: 07.12.2022)
- http-26:**<https://www.planning.org/pas/quicknotes/91/urban-air-mobility/> (Erişim tarihi: 06.12.2022)

ÖZGEÇMİŞ

ORCID ID : 0000-0002-3389-1407

Adı Soyadı : Kürşat Alp YİĞİT

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2021- Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sivil Havacılık Anabilim Dalı
- 1995-2000, Anadolu Üniversitesi, Sivil Havacılık YO, Uçak Motor Bakım Lisans

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- 2021, ISUDEF, Application of Drones in the Field of Health and Future Perspectives, International Symposium on Unmanned Systems and The Defence Industry 26-28 October 2021