

Geleceğin Kentsel Ulaşımı İçin Yüksek Manevra Kabiliyetli Uçan Araç Konsept Tasarımı

Abdülkadir ELMALI¹ Özcan DÜZCE² Muhammet Ali ELMALI³ Enes BASKIN⁴
Muhammet Fatih BAŞARAN⁵ Yusuf ÖZTÜRK⁶ Enes GÜNALTI^{7*}

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzak Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği, Konya, Türkiye

² Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Endüstri Ürünleri Tasarımı, Bilecik, Türkiye

³ Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

⁴ Bursa Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Bursa, Türkiye

⁵ İstanbul Arel Üniversitesi, Uçak Gövdeleri Mekanik ve Uçak Bakım Teknolojisi, İstanbul, Türkiye

⁶ Karabük Üniversitesi, Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Endüstriyel Tasarım, Karabük, Türkiye

⁷ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzak Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzak Mühendisliği, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

Geliş Tarihi: 31.05.2025

Kabul Tarihi: 17.06.2025

Yayın Tarihi: 30.06.2025

Anahtar Kelimeler:

Airstream,
Uçan araba,
EVTOL,
Hidrojen,
Otonom.

ÖZET

Bu çalışma, kentsel hava hareketliliği (Urban Air Mobility – UAM) çerçevesinde alternatif ulaşım çözümlerine yönelik geliştirilen, hidrojen yakıt hücreli ve çift modlu hareket kabiliyetine sahip, yüksek manevra yetenekli bir uçan araç olan Airstream'in mühendislik çözümlemesini kapsamaktadır. Airstream, sürdürülebilirlik odaklı ulaşım anlayışını esas alan, sıfıra yakın emisyon değerleri sunan hibrit bir itki sistemi ile donatılmıştır. Kara modu için 178 kW gücünde bir elektrik motoru, dikey kalkış ve uçuş modu için ise sekiz adet 40 kW gücünde bağımsız elektrik motoru kullanılmaktadır. Hibrit sistemin temelinde yer alan hidrojen yakıt hücresi, batarya destekli enerji paylaşımı sayesinde görev profili boyunca yüksek verimlilik sağlamaktadır. Tasarımda biyotaklit ve simetrik yerleşim prensipleri benimsenmiş, özellikle yönlendirilebilir pervanelerin tekerlek göbeklerine entegre edilmesiyle, dar alanlarda bile etkili bir dikey kalkış/iniş performansı elde edilmiştir. Araç, zıplama destekli aktif süspansiyon sistemi sayesinde kara-hava geçişlerinde dinamik tepki verebilmekte; jiroskopik dengeleme ve otonom yönelim kontrol sistemleri sayesinde uçuş stabilitesi korunmaktadır. Yapısal sistemde kullanılan karbon fiber kompozit gövde ve titanyum alaşımlı jantlar, hem taşıma kapasitesini artırmakta hem de sistem ağırlığını azaltarak genel enerji verimliliğine katkı sağlamaktadır. Uçuş kontrolü, ASELSAN tarafından geliştirilen merkezi bir uçuş bilgisayarı aracılığıyla GNSS, VOR/DME, ILS ve TCAS gibi çok katmanlı seyrüsefer sistemleriyle entegre biçimde sağlanmaktadır. Ayrıca, yangın algılama ve bastırma modülleri, paraşüt destekli acil durum iniş sistemleri, elektromanyetik koruma gibi emniyet unsurları sistem bütünlüğünü güvence altına almaktadır. Airstream, yüksek performansı, çevreci yapısı, güvenlik odaklı sistem tasarımı ve teknolojik bileşenleriyle, geleceğin akıllı ve sürdürülebilir ulaşım sistemlerine yönelik somut bir mühendislik çözümü sunmaktadır. Gelecekte yapılacak prototipleme ve uçuş testleri, bu konseptin ticari hava sahaları uygulamalarına entegrasyonu için yol gösterici olacaktır.

Conceptual Design of a Highly Maneuverable Flying Vehicle for Future Urban Mobility

Article Info

Received: 31.05.2025

Accepted: 17.06.2025

Published: 30.06.2025

Keywords:

Airstream,
Flying car,
EVTOL,
Hydrogen,
Autonomous.

ABSTRACT

This study encompasses the engineering analysis of Airstream, a flying vehicle developed within the framework of Urban Air Mobility as an alternative transportation solution, equipped with a hydrogen fuel cell and dual-mode mobility capability, and possessing high maneuverability. Airstream is equipped with a hybrid propulsion system that offers near-zero emission values, based on a sustainability-focused transportation approach. For ground mode, an electric motor with a power of 178 kW is used, while for vertical takeoff and flight mode, eight independent electric motors with a power of 40 kW each are utilized. The hydrogen fuel cell, which forms the basis of the hybrid system, provides high efficiency throughout the mission profile thanks to battery-supported energy sharing. In the design, biomimicry and symmetrical layout principles have been adopted, and especially through the integration of steerable propellers into the wheel hubs, an effective vertical takeoff/landing performance has been achieved even in confined spaces. The vehicle can respond dynamically during land-air transitions thanks to its jump-assisted active suspension system; flight stability is maintained through gyroscopic stabilization and autonomous orientation control systems. The carbon fiber composite body and titanium alloy wheels used in the structural system both increase the load capacity and contribute to overall energy efficiency by reducing the system's weight. Flight control is provided in an integrated manner with multi-layered navigation systems such as GNSS, VOR/DME, ILS, and TCAS through a central flight computer developed by ASELSAN. Additionally, safety elements such as fire detection and suppression modules, parachute-assisted emergency landing systems, and electromagnetic protection ensure the integrity of the system. Airstream offers a concrete engineering solution for the smart and sustainable transportation systems of the future with its high performance, eco-friendly structure, safety-focused system design, and technological components. Future prototyping and flight tests will guide the integration of this concept into commercial applications.

Bu makaleye atıfta bulunmak için:

Elmalı, A., Düzce, Ö., Elmalı, M.A., Baskın, E., Başaran, M.F., Öztürk, Y., Günaltı, E. (2025). Geleceğin kentsel ulaşımı için yüksek manevra kabiliyetli uçan araç konsept tasarımı. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 4(1), 208-222.

*Sorumlu Yazar: Enes Günaltı, enesgunaltı@gmail.com



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

GİRİŞ

Küresel ölçekte artan kentleşme ve nüfus yoğunluğu, mevcut kara tabanlı ulaşım sistemlerini yetersiz hale getirerek trafik sıkışıklığı, çevresel kirlilik ve enerji verimliliği gibi sorunları gündeme getirmiştir. Bu bağlamda, Kentsel Hava Hareketliliği (Urban Air Mobility - UAM) konsepti, şehir içi ulaşımında yeni bir paradigma olarak ortaya çıkmaktadır. UAM, küçük, yüksek otomasyonlu ve dikey kalkış-iniş (VTOL) yeteneğine sahip hava araçlarıyla, özellikle kısa mesafeli yolcu ve yük taşımacılığında kara trafiğine alternatif çözümler sunmayı hedeflemektedir. Geleneksel fosil yakıtlı hava araçlarının çevresel etkileri ve operasyonel maliyetleri, sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelimi hızlandırmıştır. Bu doğrultuda, hidrojen yakıt hücreleri, yüksek enerji yoğunluğu ve sıfır emisyon özellikleriyle UAM uygulamaları için umut vadeden bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Örneğin, HY4 ve Hyfish gibi projeler, hidrojen yakıt hücrelerinin hava araçlarında başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Bu çalışma, yukarıda belirtilen ihtiyaç ve gelişmeler doğrultusunda tasarlanan Airstream adlı uçan araç konseptini sunmaktadır. Airstream, hidrojen yakıt hücresi destekli hibrit bir itki sistemine sahip olup hem kara hem de hava modlarında yüksek manevra kabiliyetiyle çalışabilmektedir. Araç, biyotaklit ve simetrik tasarım prensiplerine dayalı olarak geliştirilmiş, yönlendirilebilir pervanelerle donatılmıştır. Kontrol sisteminde ASELSAN tarafından geliştirilen uçuş bilgisayarı kullanılmış ve GNSS, VOR/DME, ILS ve TCAS gibi seyrüsefer sistemleri entegre edilmiştir. Ayrıca, zıplama mekanizması, aktif süspansiyon sistemi ve jiroskopik dengeleme gibi yenilikçi özelliklerle donatılmıştır. Airstream'in tasarımı, sürdürülebilir, güvenli ve verimli bir UAM çözümü sunmayı amaçlamaktadır. Bu bağlamda, araç konsepti, mevcut literatürdeki boşlukları doldurarak, hidrojen yakıt hücreli VTOL araçlarının şehir içi ulaşımında uygulanabilirliğini göstermeyi hedeflemektedir. Bu özelliklerinden dolayı Airstream büyük bir problem olan ve gelecekte daha da büyük problemler oluşturacak olan şehir içi kara trafiğine futuristik ve çevreci tasarımı sayesinde pratik çözüm sunacaktır.

LİTERATÜR TARAMASI

Airstream konsepti, hidrojen yakıt hücreli, hem karada hem de havada hareket edebilen VTOL bir araç önerisidir. Bu konsept, Kent içi Hava Mobilitesi (KHM/UAM) içinde yer alır ve kentsel ulaşımında yeni bir taşıma modu sunar. Literatürde KHM, ulaşım sürelerini kısaltma ve trafik kazalarını azaltma potansiyeliyle tanımlanmakta; bu bağlamda yeni nesil araçlar gerekmektedir (Silva ve ark., 2018; Schweiger & Preis, 2022; Begeç & Demir, 2023). Silva ve ark. (2018), UAM'ın hız kazanmasının, tamamen yeni uçak tipleri ve yüksek performanslı alt sistemler gerektirdiğini; bu nedenle çok sayıda kavramsal VTOL tasarımının performans ve dengelemelerinin incelendiğini vurgulamaktadır. Örneğin Schweiger ve Preis (2022), UAM'ın kent içi yolcu ve kargo taşımacılığında yer altı ve hava trafiği entegrasyonu gerektiren yeni bir ulaşım modu olduğunu, şehir merkezinden havaalanlarına ulaşımı hızlandırabileceğini belirtmiştir. Benzer şekilde Begeç ve Demir (2023), UAM'ı çok modlu sistemlere entegre, daha güvenli ve sürdürülebilir bir hava ulaşım sistemi olarak tanımlamakta ve havayolu şirketlerinin stratejilerinde KHM'nin önemine dikkat çekmektedir. Bu çalışmalar Airstream gibi çift modlu araçların hava ve kara ulaşımında ne kadar verimli ve etkili olabileceğini göstermektedir.

Hidrojen yakıt hücreleri (HYH) hava araçlarında, özellikle menzil ve çevre performansı avantajı nedeniyle yoğun inceleme konusudur. Literatürde, HYH destekli İHA'ların geleneksel lityum-iyon pillere göre yaklaşık iki kat uzun uçuş süresi sağladığı; HYH'lerin daha yüksek enerji yoğunluğu, uzun hizmet ömrü ve çalışma esnasında yalnızca su buharı üretmesi sayesinde çevre dostu olduğu bildirilmektedir (Shen ve ark., 2024). Shen ve ark. (2024) bu avantajları vurgulayarak, hidrojen yakıt hücrelerinin yüksek enerji yoğunluğundan ve düşük çevresel etkisinden dolayı çok rotorlu dronlarda önemli bir gelecek vadettiğini belirtmiştir. HYH'lerin dezavantajlarından biri dinamik yanıtının yavaşlığıdır; bu nedenle Yun ve ark. (2025) karma bir sistem önererek yakıt hücresini bataryalarla

entegre etmiştir. Bu çalışmada metal hidritli hidrojen depolama tankı kullanılarak basınçlı veya sıvı hidrojen gerektirmeyen, daha güvenli bir sistem tasarlanmıştır. Yun ve arkadaşları, bu hibrit UAM sisteminin tasarımında batarya-yakıt hücresi güç yönetimi ve bulanık kontrol stratejisi kullanarak uzun uçuş süreleri ve yüksek enerji verimliliği elde etmiştir. Genel olarak literatür, polimer elektrolitli yakıt hücrelerinin (PEMFC) mobilite uygulamalarında tercih edildiğini, HYH teknolojisinin hâlâ geliştirilme aşamasında olduğunu vurgulamaktadır.

Dikey kalkış-iniş (VTOL) sistemleri, Airstream gibi araçlar için kritik öneme sahiptir. Literatürde VTOL mimarileri çok çeşitli kategorilerde ele alınmaktadır; bunlar genellikle aynı itki ile hover ve seyri sağlayan konfigürasyonlar (ör. tilt-rotor, tilt-kanat, yönlendirilebilir itme) veya kalkış ve seyir için ayrı itki sistemleri (örn. lift+cruise) şeklinde sınıflandırılır. NASA çalışmaları, UAM için tiltrotor ve benzeri hibrit tasarımların performans sınırlarını belirlemek üzere çok sayıda kavramsal uçak geliştirildiğini göstermiştir (Silva ve ark., 2018). Örneğin Silva ve ark. (2018), mevcut alt sistemlerin olgunlaşmasıyla yeni kavramsal araçların yarıştığını, bu araçların performans hedefleri ve teknoloji temalarının belirlenmesinde yol gösterici olduğunu belirtmiştir. VTOL tasarımında çözüm aracı olarak tiltrotorlar (harici rotorları yatay uçuş için yana döndürülen tasarımlar), lift+cruise (dikey asansör pervaneleri ve sabit kanat birleşimi) gibi çeşitli mimariler öne çıkmaktadır. Literatürde bu tip mimarilerin her birinin kontrollü geçiş, verimlilik ve karmaşıklık gibi ticari avantaj ve dezavantajları tartışılmaktadır. (Örneğin Osprey tiltrotor gibi büyük ölçekli örnekler mevcuttur.) Airstream’de menzil ve verimlilik optimizasyonuna da fayda sağlayan hibrit bir VTOL tasarım tercih edilmiştir.

Airstream’in otonom uçuş kabiliyeti, UAM koridorlarında güvenli seyrüsefer için elzemdir. Çarpışma önleme ve algılama, kentsel ortamda hava trafiğini idare etmek için kritik önlemlerdir. Aldao ve ark. (2022), KHM koridorlarında otonom İHA seyrüseferi için LiDAR tabanlı bir “detect-and-avoid” sistemi geliştirmiştir. Bu sistem, çok rotorlu dronlar için bir Otonom Kaçış sistemi sunarak uçuş sırasında engelleri belirleyip yön değiştirmeyi sağlamaktadır. Ayrıca Chen ve ark. (2022) küçük VTOL İHA’lar için bilinmeyen ortamlarda özerk navigasyon ve engel aşma yöntemlerini incelemiş, çoklu algılayıcı ve kontrol algoritmaları önerilmiştir. Bu çalışmalar, Airstream’in sensör füzyonu (LiDAR, kamera, radar vb.) ve gelişmiş kontrol stratejileriyle altyapıya bağımlı olmadan güvenli uçabileceğini desteklemektedir.

Doğadan esinlenen tasarım yaklaşımları, uçak stabilitesi, manevra kabiliyeti ve zarar azaltma gibi alanlarda yenilik getirir. Tanaka ve ark. (2022), dron tasarımında biyolojik mekanizmaların sağlamlık ve verimlilik sağlama potansiyelini vurgulamış; biyotaklit yaklaşımların uçuş kararlılığı, etkinlik, çarpışmadan kaçınma ve hasar hafifletme gibi amaçlarla sınıflandırıldığını göstermiştir. Örneğin Harvard Üniversitesi’nden bir ekip, dakikada 500 kez kanat çırpın 600 mg ağırlığındaki bir böcek benzeri flapping-wing dron ile uçuş sırasında çarpışmadan sonra dengesini hızla geri kazanabilmiştir. Bu tip tasarımlar, Airstream gibi araçlarda ekstra manevra kabiliyeti veya hasar toleransı kazandırabilir. Simetrik tasarım ise aracı yatay-ters simetrik (örneğin flip edilebilir gövde) veya dengeli ağırlık dağılımı sağlama konusunda ele alır. Örneğin çok rotorlu VTOL’larda pervaneler simetrik yerleştirilerek kontrol kolaylaştırılır. Ayrıca simetrik kanat profilleri, hem düz hem ters uçuş performansını eşitleyerek akrobatik veya taklit edilebilir manevra imkânı verir. Bu stratejiler Airstream gibi çift modlu araçların hem havada hem de iniş sırasında kararlı olmasını destekleyebilir. Airstream konsepti hibrit bir güç sistemi içerir. Literatürde “hibrit elektrik” terimi genellikle yakıt hücresi + batarya veya pistonlu motor + elektrikli motor kombinasyonlarını kapsar. Yun ve ark. (2025) çalışmasında, hidrojen yakıt hücresi ile bir lityum-iyon bataryayı hibrit olarak entegre edip enerji yönetimini optimize etmiştir. Böylece yakıt hücresinin sabit gücü batarya ile esnek şekilde tamamlanarak yüklenme durumuna göre anahtarlama yapılmıştır. Benzer şekilde Seitz ve ark. (2023), hidrojen yakıt hücresi ve gaz türbinini bir arada kullanan bir hibrit itki konsepti sunmuştur. Bu sistemde yakıt hücresi yan ürün suyu, gaz türbinine buhar olarak enjekte edilerek yanma verimi artırılmış ve %7’ye varan yakıt tasarrufu elde edilmiştir. Bu örnekler,

Airstream gibi araçlarda yakıt hücresi, batarya veya gaz türbini gibi bileşenlerin kombinasyonunun verimlilik ve menzil avantajı sağlayabileceğini göstermektedir. Karada kullanımda aktif süspansiyon sistemleri, zorlu arazilerde sürüş konforu ve stabilite sağlar. Örneğin, bazı insansız kara araçları elektro-hidrolik aktif süspansiyonlarla engelleri otomatik olarak absorbe edebilir. Zıplama mekanizmaları kalkış desteğinin yanısıra engel aşma veya iniş yumuşatma için de kullanılabilir. Zhu ve ark. (2022) tarafından geliştirilen PogoDrone konsepti, uçabilen bir quadrotor üzerine pasif zıplama mekanizması eklemiştir; bu robot hem havalandırıp hem de sürekli zıplayarak, yere çarptığında hızla tekrar havalandırılmaktadır. Chu ve ark. (2025) ise karate böceğinden esinlenerek çok kollu adaptif bir iniş takımı tasarlamış, iniş sırasında zemin temasını otomatik ayarlayarak darbeyi azaltmıştır. Bu gibi biyotaklit ilhamlı ayak ve yay sistemleri, Airstream'in inişlerde veya engebeli zeminde hem kara hem hava modunda daha yumuşak bir hareket sunmasına katkıda bulunabilir. Airstream gibi araçlarda güvenlik için çok sayıda sistem entegre edilir. Paraşüt sistemleri acil durumda tüm aracın kontrollü inişi için kullanılır. Yangın bastırma açısından, hidrojen tankları ile lityum piller için özel önlemler gereklidir. Literatürde, lityum-pil yangınlarını önlemek için batarya bölmelerine uygun aktif söndürücü sistemler entegre edilmesi önerilmektedir (Ghiji ve ark., 2020). Hidrojen gazı sızıntılarına karşı katı yangın söndürücüler ve havalandırma düzenleri kullanılır. Ek olarak elektromanyetik koruma, yıldırım risklerine karşı önemlidir. Örneğin Boeing 787'de karbon kompozit gövdelerin elektrik iletkenliği artırmak için iletken metal folyo katmanları eklenmiştir (Seitz ve ark., 2023). Bu sayede yüksek gerilim darbeleri gövdeye zarar vermeden yüzeyden uzaklaştırılmaktadır. Özetle, Airstream'in tasarımında paraşüt, yangın söndürücü sistemler ve elektriksel koruyucu kaplamalar gibi emniyet önlemleri literatürde önerildiği gibi uygulanmalıdır.

MODELLEME VE YÖNTEM

Genel Mimari Yapı ve Yapısal Sistemler

Airstream, karada ve havada hareket kabiliyetine sahip, hidrojen yakıt hücreli hibrit bir taşıma platformu olarak geliştirilmiştir. Tasarım, şehir içi kısa mesafe ulaşım ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde, dikey iniş kalkış (VTOL) yetenekleriyle donatılmıştır. Araç mimarisi, on farklı alt sistemin entegrasyonu ile yapılandırılmıştır. Bunlar iskelet sistemi, güç aktarma sistemleri, direksiyon sistemi, aviyonik sistemler, yakıt sistemi, itki sistemi, süspansiyon sistemi, zıplama sistemi, jiroskopik denge sistemi ve kontrol sistemi olmaktadır. İskelet sisteminin merkezinde, karbon fiber kaplanmış alüminyum gövde ve titanyum alaşımlı jantlarla birbirine bağlanan dayanıklı bir şasi yer almaktadır. Bu yapı hem darbe emilimi sağlamakta hem de taşıma ve yapısal bütünlük işlevini üstlenmektedir. Aracın hareket kabiliyeti kara modunda 178 kW gücündeki bir elektrik motoru ve hava modunda her biri 40 kW gücünde olan sekiz adet BLDC motorla sağlanmaktadır. Kara modundaki tahrik, diferansiyel ve mil mekanizmaları ile tekerleklerle iletilirken; hava modunda, motorlar doğrudan pervaneleri tahrik ederek uçuş sağlar. Airstream'in en yenilikçi özelliklerinden biri, pervanelerin doğrudan tekerleklerin içine entegre edilmiş olmasıdır. Bu sayede hem kara hem hava modunda kompakt ve modüler bir yapı korunurken, geleneksel pist ihtiyacı da ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca, sistem tam otomatik dönüşüm sağlayan kontrol algoritmaları ile desteklenmekte ve uçuş moduna geçişte kullanıcı komutları ASELSAN tarafından geliştirilen uçuş kontrol bilgisayarı (UKB) üzerinden yönetilmektedir. Sistem mimarisi, sürdürülebilirlik ve bakım kolaylığı gözetilerek modüler olarak tasarlanmıştır. Aracın belirli parçaları kolayca değiştirilebilir veya onarılabılır şekilde planlanmış, böylece operasyonel süreklilik ve maliyet verimliliği sağlanmıştır. Kullanıcı güvenliği açısından çok eksenli simetrik yapı, Faraday kafesi, Halon yangın söndürme sistemi, paraşüt, hava yastığı ve çarpışma önleyici sensörler entegre edilmiştir. Sonuç olarak Airstream'in mimari tasarımı, yüksek manevra kabiliyeti, tam entegre alt sistemler, çevreci yakıt kullanımı ve otonom uçuş özellikleri ile günümüzün şehir içi ulaşım problemlerine yenilikçi bir çözüm sunmaktadır.

Şekil 1

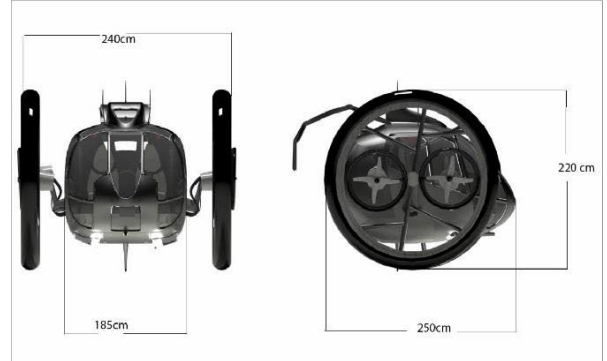
Airstream Aracının Konsept Tasarımı



Airstream'in taşıyıcı sistem tasarımı, hem karasal hem hava modunda güvenli operasyonu mümkün kılacak şekilde yüksek dayanım–düşük ağırlık dengesine dayalı olarak yapılandırılmıştır. Bu bağlamda, aracın gövdesi ve taşıyıcı şasisi, uzay-kafes tipi bir iskelet üzerine entegre edilmiştir. Bu yapı, dinamik yük aktarımlarını homojen şekilde dağıtarak yüksek hızda ve titreşimli ortamda bile deformasyona karşı direnç göstermektedir. Ana taşıyıcı yapı, karbon fiber destekli alüminyum profillerden oluşmakta olup, hava aracı sınıfı malzeme kalitesi (7075-T6 alüminyum) tercih edilmiştir. Bu malzeme, özellikle yüksek özgül mukavemet ve yorulma direnci nedeniyle seçilmiştir. Karbon fiber takviyesi, şasinin torsiyonel rijitliğini artırırken, genel taşıma yükünü azaltmaktadır. Gövde kaplamaları da literatürdeki kompozit yapılar incelenerek (Ateş ve ark., 2023) benzer şekilde karbon fiber kompozit sandviç panellerle oluşturulmuştur. Tekerlek ve jant sistemleri, sadece karasal hareketi değil, aynı zamanda hava modunda pervanelerin konumlandırılması işlevini de üstlendiğinden, farklı bir mühendislik çözümü gerektirmiştir. Bu bileşenlerde yüksek darbe dayanımı ve ısıya karşı stabilite sunan titanyum alaşımları kullanılmıştır. Özellikle Ti-6Al-4V sınıfı titanyum alaşımı, düşük yoğunlukla birlikte yüksek elastikiyet modülü sayesinde bu amaç için elverişli bulunmuştur. Bu malzeme, aynı zamanda pervanelerin gömülü yapısı için yeterli termal ve yapısal bütünlük sağlamaktadır. Aracın ağırlık merkezi, hem aerodinamik hem de statik stabilite açısından kritik olup, batarya ve hidrojen tanklarının alt orta ekseninde konumlandırılmasıyla optimize edilmiştir. Bu yerleşim, kalkış ve iniş sırasında dengenin korunmasına yardımcı olmakta, araç aerodinamiğini bozmadan kütle dağılımını simetrik kılmaktadır. Yapısal tasarım sürecinde, çeşitli yük senaryolarına göre sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak statik ve dinamik analizler yapılmış; iniş darbesi, yüksek ivmeli dönüşler, rüzgâr yükü ve motor titreşimi gibi dış yüklemeler altında taşıyıcı sistemlerin güvenlik katsayıları doğrulanmıştır. Tasarım, minimum 3.0 güvenlik katsayısı hedefiyle yapılmış olup, tüm yapısal elemanlar bu kriteri sağlamıştır. Ayrıca, bakım kolaylığı ve üretilebilirlik ilkeleri doğrultusunda modüler bir iskelet yapısı tercih edilmiştir. Aracın üst gövdesi ve alt modülü ayrı ayrı demonte edilebilir olarak tasarlanmış, böylece arıza, darbe veya üretim sonrası revizyon gibi durumlarda maliyet ve zaman kayıpları minimize edilmiştir. Sonuç olarak, Airstream'in yapısal sistemi, hem taşıma kapasitesi hem de uçuş performansı göz önünde bulundurularak, hafiflik, dayanıklılık, güvenlik ve modülerlik ilkeleri doğrultusunda bütüncül bir yaklaşımla oluşturulmuştur. Seçilen ileri malzemeler ve mühendislik analizleriyle desteklenen bu yapı, aracın UAM vizyonundaki yerini teknik olarak sağlamlaştırmaktadır.

Şekil 2*Airstream Aracının Teknik Özellikleri***Teknik Özellikler**

Azami Seyir Hızı: Kara için 280 km/s - hava için 300 km/s
Azami Menzil: Kara için 650 km - Hava için 374 km
Yakıt Tipi ve kapasitesi: 10 kg 70 mPA basınçlı hidrojen yakıtı
Yolcu Kapasitesi: Araç 2 kişilik yolcu kapasitesine sahiptir
Boş Ağırlık: 855 kg
Azami Kalkış Ağırlığı: 1200 kg
Faydalı Yük (Bagaj) Kapasitesi: 80 kg
Motor Özellikleri: Kara için 1 X 178 kW BLDC motor
 Hava için 8 X 40 kW BLDC motor

**Güç ve İtke Sistemi**

Airstream'in enerji üretim ve tahrik sistemi, tamamen sıfır emisyonlu bir yapı olan hidrojen yakıt hücresi tabanlı hibrit bir sistem olarak tasarlanmıştır. Bu sistemde temel olarak; 70 MPa basınç altında çalışan 10 kg kapasiteli hidrojen tankı, proton değişim membranlı (PEM) bir yakıt pili ünitesi, AC/DC dönüştürücü ve yüksek güçlü elektrik motorları yer almaktadır. Yakıt sistemi, hidrojenin doğrudan elektrik motorlarına değil, önce yakıt hücresine gönderildiği bir elektrokimyasal süreçten oluşur. Hidrojen ve kompresör destekli hava, yakıt piline yönlendirilerek burada bir elektrokimyasal reaksiyon başlatılır; böylece ortaya çıkan elektrik enerjisi doğrudan itki sistemlerine ve yardımcı elektroniklere aktarılır. Sistemin çalışma prensibi, hidrojenin mekanik yakıt değil, elektrik üretim aracı olarak kullanılmasıdır. Bu yaklaşım hem çevresel sürdürülebilirlik hem de yüksek verimlilik açısından önemlidir. Kara hareketi, 178 kW gücünde bir fırçasız doğru akım (BLDC) elektrik motoru ile sağlanmaktadır. Bu motor, diferansiyel ve şaft sistemi aracılığıyla tekerleklerle tahrik iletir. Uçuş modunda ise her biri 40 kW gücünde toplam 8 adet BLDC motor görev almakta ve bu motorlar doğrudan yönlendirilebilir pervaneleri tahrik ederek dikey kalkış, süzülme ve iniş manevralarını gerçekleştirmektedir. Bu yapı sayesinde, toplam 9 adet elektrik motorundan oluşan itki sistemi, hem karada hem de havada yüksek performans sunmaktadır. Özellikle dikkat çeken tasarım unsurlarından biri, bu pervanelerin araç tekerleklerinin içine entegre edilmesidir. Bu çözüm sayesinde, geleneksel uçuş araçlarında ihtiyaç duyulan pist altyapısı gereksiz hale gelmekte, araç dar alanlarda iniş ve kalkış yapabilme kabiliyeti kazanmaktadır. Pervane boyutlandırması, 10 cm kord uzunluğu, 96 cm pal uzunluğu ve üç kanatlı konfigürasyonla optimize edilmiş, toplamda 24 pervane kanadı kullanılacak şekilde planlanmıştır. Enerji üretiminden aktarıma kadar olan bu entegre sistem, Airstream'in hibrit VTOL özelliğini desteklerken aynı zamanda modüler yapıyla kolay bakım ve parça değişimi imkânı da sunmaktadır. Sistem, aerodinamik ve ağırlık dengesi bakımından mühendislik analizleriyle doğrulanmış; güç-menzil optimizasyonları kara (448 km) ve hava (272 km) modlarında detaylı olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak, Airstream'in güç ve itki sistemleri; çevreci enerji yaklaşımı, yüksek manevra kapasitesi ve tam entegre modüler yapısı sayesinde, kentsel hava mobilitesinde yeni nesil hibrit çözümlere öncülük edecek niteliktedir.

Süspansiyon ve Zıplama Sistemi

Airstream'in karasal performansı ile hava moduna geçiş kabiliyeti arasında kritik rol oynayan sistemlerin başında aktif süspansiyon ve zıplama mekanizması gelmektedir. Bu iki alt sistem, hem kullanıcı konforunu artırmakta hem de aracın yüksek manevra kabiliyetiyle kısa süreli kalkış ve iniş gerçekleştirmesini mümkün kılmaktadır. Aktif süspansiyon sistemi, elektronik kontrollü hidrolik

amortisörler ve yaylardan oluşmakta olup, sistemin tüm dinamikleri araçtaki merkezi kontrol bilgisayarı tarafından gerçek zamanlı olarak yönetilmektedir. Bu yapı, yol koşulları, hız, direksiyon açısı ve araç yüküne göre anlık süspansiyon ayarı yapılmasını mümkün kılar. Süspansiyon sisteminin her iki tekerleği ayrı ayrı denetlenebilmekte, böylece denge kaybı riskleri azaltılmaktadır. Bu sistem üzerine entegre edilen zıplama mekanizması, Airstream'in özgün ve dikkat çekici özelliklerinden biridir. Bu yapı, aracın dur-pozisyon al-havalan sıralı manevrasını hızlandırmak üzere tasarlanmıştır. Zıplama sisteminde, süspansiyon içindeki yaylar hidrolik pistonlar aracılığıyla sıkıştırılır ve enerji depolanır. Ardından, sürücü komutuyla bu enerji ani biçimde serbest bırakılır ve araç yerden itilir; bu sayede dikey kalkışın ilk fazı hızlıca tamamlanmış olur. Enerji depolama miktarı, kontrol bilgisayarı tarafından aracın mevcut hızı, ağırlığı ve zemin eğimi gibi veriler dikkate alınarak belirlenir. Bu algoritma, yayların sıkıştırma seviyesini optimize eder. Aynı zamanda her iki tekerlekteki hidrolik üniteler bağımsız çalışabildiği için, eğimli zeminlerde dahi denge korunabilir ve zıplama simetrik şekilde gerçekleşebilir. Bu sistemin özgün yanı, yaylı sistemlerin yalnızca sönmüleme değil, aynı zamanda kalkışa yardımcı kuvvet üretme amacıyla da kullanılmasıdır. Bu sayede, klasik VTOL sistemlerinde görülen yüksek güç gereksinimli kalkış manevraları, zıplama sisteminin ön katkısıyla daha az enerji harcanarak gerçekleştirilmektedir. Ayrıca bu sistem, kısa alanlardan kalkış kabiliyeti kazandırarak, dar kentsel alanlarda operasyonel verimliliği artırmaktadır. Sonuç olarak, Airstream'in aktif süspansiyon ve zıplama sistemleri, geleneksel hava aracı tasarımlarından ayrılan yenilikçi bir yaklaşım sunmakta; araç modları arasındaki geçiş sürelerini minimize ederken kullanıcı konforu ve sistem güvenilirliğini maksimum düzeyde sağlamaktadır.

Jiroskopik Denge Sistemi

Airstream'in yüksek manevra kabiliyeti ve her iki modda (kara/hava) stabil bir performans gösterebilmesi, gelişmiş bir jiroskopik denge sistemi ile desteklenmektedir. Jiroskoplar, açısal momentumu koruma prensibiyle çalışan ve yön stabilizasyonu sağlayan cihazlardır. Sistem, özellikle hava modunda uçuş sırasında ortaya çıkabilecek yalpa (roll), yunuslama (pitch) ve sapma (yaw) gibi dengesizlikleri önlemeyi amaçlamaktadır. Airstream'de kullanılan jiroskopik sistem, üç eksenli (X, Y, Z düzlemleri) dengeleme sağlayacak şekilde tasarlanmış olup, teorik olarak hem XZ düzleminde (aracın yatay dengesini) hem de XY düzleminde (dikey eksen etrafında dönüş eğilimini) kontrol altına almaktadır. Dönen bir disk ya da rotorun moment etkisiyle oluşan karşı kuvvetler, aracın ağırlık merkezi değişimlerine tepki vererek stabilizasyon sağlar. Sistemin temel prensibi, bir eksen boyunca dönen jiroskopun, harici bir kuvvet uygulandığında bu kuvveti 90 derece ötelenmiş bir yönde göstermesidir. Bu fenomen sayesinde, araçta meydana gelen ani yönelme değişimleri sistem tarafından algılanarak zıt yönde bir dengeleme momenti oluşturulur. Özellikle XZ düzleminde konumlandırılmış dönen disk, hava modundayken aracın sabit eksen etrafında yönünü koruyarak, otonom uçuş ve sabit duruş gibi görevlerde dengeyi maksimize eder. Airstream'in jiroskop sistemi, yalnızca aerodinamik denge sağlamakla kalmayıp aynı zamanda yön kontrol sistemlerine geri bildirim sağlayarak, merkezi uçuş kontrol bilgisayarcının karar verme mekanizmalarına katkıda bulunur. ASELSAN tarafından geliştirilen bu kontrol bilgisayarı ile entegre çalışan sistem, uçuş esnasında sensörlerden gelen ivme, açı ve yönelme verilerini anlık olarak işler ve jiroskopik dengelemeyle senkronize eder. Benzer bir jiroskopik dengeleme uygulaması, ilk kez 1967 yılında geliştirilen Gyro-X isimli iki tekerlekli kara aracında denenmiş ve araç, sabit denge noktasında ayakta kalabilmiştir. Airstream ise bu teknolojiyi hem kara hem hava modunda iki eksenle uygulayarak daha gelişmiş bir versiyonunu hayata geçirmektedir. Bu dengeleme sistemi, özellikle kalkış, süzülme ve iniş sırasında oluşabilecek ani rüzgar etkileri, yön değişimleri ve dengesizliklerin pasif olarak düzeltilmesini sağlamakta; böylece araçta hem pilot hem de yolcu için daha güvenli ve konforlu bir sürüş/uçuş deneyimi sunulmaktadır.

Kontrol, Seyrüsefer ve Aviyonik Sistemler

Airstream'in karasal ve hava modlarındaki geçişleri güvenli ve otonom şekilde gerçekleştirebilmesi için geliştirilen kontrol sistemi, ASELSAN tarafından tasarlanan Uçuş Kontrol Bilgisayarı (UKB) üzerinden yönetilmektedir. UKB, hava platformlarına yönelik yüksek işlem kapasitesi, çoklu sensör girişi desteği ve gerçek zamanlı görev yönetimi gibi ileri kabiliyetlere sahiptir. Hava araçlarında iniş mekanizmasının kontrolü ve tasarımı literatürde oldukça önemli bir parametre olarak gösterilmektedir (Çetin ve ark., 2024). Dayanıklı yapısı ve doğal konveksiyonla soğutma özelliği sayesinde zorlu çevre koşullarında kararlı çalışabilmektedir. Bu sistemin uçuş ve yön kontrolü sırasında ihtiyaç duyduğu temel veri akışı, gömülü sensör altyapısı ve jiroskop, ivmeölçer, GPS, GNSS, pusula, barometre ve açı sensörleri aracılığıyla sağlanmaktadır. Aracın yatay ve dikey yönelimi bu sensörlerden gelen veriler doğrultusunda anlık olarak analiz edilmekte, motor hızları, süspansiyon tepki kuvvetleri ve zıplama sistemleri buna göre literatürdeki çalışmalar doğrultusunda planlanarak kontrol edilmektedir (Kocagil ve ark., 2024). Seyrüsefer sistemi ise iki temel bileşen üzerinden çalışmaktadır: yer istasyon temelli seyrüsefer ve uydu tabanlı seyrüsefer. Yer istasyon temelli sistemlerde, VOR (VHF Omnidirectional Range) ile aracın manyetik radyal üzerindeki konumu, DME (Distance Measuring Equipment) ile hedefe olan uzaklığı ölçülmektedir. Ayrıca, araçların iniş ve kalkış yapacağı park portlarında bulunan LLS (Low Light Signal) alıcıları sayesinde, kodlanmış iniş alanlarına otomatik yönlendirme sağlanmakta ve sürücüsüz otonom iniş gerçekleştirilmektedir. Uydu tabanlı sistemler arasında ise GNSS (Global Navigation Satellite System), yüksek doğruluklu konumlama ve rota takibi sağlamaktadır. Buna ek olarak, EGPWS (Enhanced Ground Proximity Warning System), aracın yere ya da tehlikeli arazilere olan mesafesini analiz ederek çarpışma öncesi ikaz mekanizmalarını tetiklemektedir. Bu sistem, GPS verileri ve detaylı arazi veri tabanlarıyla eş zamanlı çalışmakta, hava modunda güvenli seyrüseferi mümkün kılmaktadır. Gelişmiş emniyet sistemleri arasında TCAS (Traffic Collision Avoidance System) öne çıkmaktadır. TCAS-2 versiyonu kullanılan Airstream, yakın hava araçlarına karşı sadece uyarı vermekle kalmayıp, yönlendirilmiş kaçış manevraları da önerebilmektedir. Böylece çarpışma riski en aza indirilmiş olur. İniş ve kalkış aşamalarında ILS (Instrument Landing System) ve radyo altimetre sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler, özellikle görüşün az olduğu durumlarda hassas iniş kabiliyeti sağlayarak güvenliği artırmaktadır. Aynı zamanda FMC (Flight Management Computer), uçuş planlamasını otomatikleştirmekte, yakıt yönetimi, hız, irtifa ve koordinat verilerini uçuş boyunca işlemektedir. Bu sistem, aynı zamanda araç park alanlarının kodlanması ve hava trafik kontrol merkezleriyle entegre planlama yapılmasına da imkân vermekte, otonom park ve rota yönetimi özelliği sunmaktadır. Söz konusu sistemler, gelecek nesil uçan araç ağlarında trafik yoğunluğunu azaltacak ve verimli uçuş planlamasını mümkün kılacak şekilde yapılandırılmıştır. Sonuç olarak, Airstream'in kontrol ve seyrüsefer sistemleri; yüksek doğruluklu konumlama, otonom uçuş kabiliyeti, çarpışma önleme sistemleri ve uçuş güvenliği açısından ileri düzeyde bütünleşik bir altyapı sunmakta; araç hem insanlı hem insansız operasyonlara hazır hale gelmektedir.

Airstream aracının hem insanlı hem insansız operasyonlara uygun olarak tasarlanabilmesi, kullanıcı ile araç arasındaki bilgi alışverişini sağlayan aviyonik altyapının bütünleşik bir yapıda kurulmasını zorunlu kılmıştır. Aviyonik sistemler, uçuşun planlanması, izlenmesi, kontrol edilmesi ve güvenli biçimde tamamlanması için gerekli tüm bilgi işlem, iletişim ve gösterge bileşenlerini kapsamaktadır. Sistemin merkezinde yer alan ASELSAN Uçuş Kontrol Bilgisayarı (UKB), hem uçuş modunda hem kara sürüş modunda tüm alt sistemlerle haberleşen ve çoklu görev algoritmalarını yöneten bir merkezî işlem platformudur. UKB'nin birincil görevi, araçtaki sensörlerden gelen verileri birleştirerek pilot veya kullanıcı arayüzlerine işlenmiş şekilde aktarmaktır. Bu veriler; hız, yön, irtifa, GNSS koordinatları, batarya seviyesi, hidrojen zenginlik oranı, sistem sıcaklıkları ve uyarı durumlarını içerir. Airstream'de kullanılan gelişmiş kullanıcı arayüzü, dokunmatik ekranlı ve mod geçişine uygun şekilde tasarlanmış olup, kara sürüş modundayken otomotiv tipi; uçuş modundayken

havacılık tipi göstergelere geçiş yapılabilir. Bu ekran üzerinde aracın uçuş haritası, görev profili, mevcut görev fazı (kalkış, tırmanış, süzülme, alçalma, iniş), hava durumu bilgileri, seyrüsefer yönleri ve anlık sistem uyarıları dinamik olarak görüntülenmektedir. Ayrıca, aviyonik sistem içerisinde bulunan baş üstü gösterge (HUD) prototipi, sürücü göz hizasına yerleştirilen şeffaf bir cam üzerinden hız, yön ve batarya verilerini yansıtarak dikkat dağınıklığını minimize etmektedir. Özellikle gece uçuşları veya düşük görüş koşullarında, HUD sistemi sayesinde sürücü hiçbir fiziksel ekranı kontrol etmek zorunda kalmadan temel verileri gözlemleyebilmektedir. Veri iletişimi açısından, aviyonik sistem içinde hem karasal LTE bazlı ağlara hem de düşük bant genişlikli havacılık haberleşme frekanslarına uyumlu bir modem altyapısı geliştirilmiştir. Bu sistem, hem yer kontrol istasyonlarıyla hem de diğer hava araçlarıyla bilgi paylaşımına olanak tanımaktadır. Gerekliğinde otonom uçuş modundan insanlı kontrole geçiş yapılmasını sağlayan ikili kontrol yapısı sayesinde esnek kullanım senaryoları desteklenmektedir. Tüm bu sistemlerin yazılım arayüzleri, gelişmiş hata yönetimi (fault-tolerant logic) ile programlanmış olup, sensör arızalarında otomatik yeniden başlatma, sistem kendini sına ve kritik görev bileşenlerinin yedeklenmesi gibi akıllı denetim mekanizmalarına sahiptir. Sonuç olarak, Airstream'in aviyonik mimarisi, klasik havacılık göstergeleri ile kara aracı ergonomisini birleştiren melez bir gösterge-kontrol ortamı sunmakta; araç kullanıcılarının görev süresince anlık kararlar alabilmesini, sistem durumunu izleyebilmesini ve uçuş güvenliğini maksimize edebilmesini sağlamaktadır.

Emniyet Sistemleri

Airstream'in tasarımında, hem kara hem de hava modlarında kullanıcı güvenliğini sağlamak amacıyla çok katmanlı bir emniyet yaklaşımı benimsenmiştir. Aracın yüksek irtifa, türbülans, çarpışma ve sistem arızası gibi senaryolara karşı donatılması, kentsel hava mobilitesi (UAM) bağlamında operasyonel sürdürülebilirlik ve yolcu güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. İlk savunma hattını oluşturan sistemlerden biri, gövde içine entegre edilmiş çok yönlü paraşüt mekanizmasıdır. Bu sistem, kontrol kaybı veya elektriksel arıza durumunda otomatik olarak devreye girerek, aracın stabil bir şekilde yavaşlayarak iniş yapmasını sağlar. Paraşüt sistemi, kontrollü patlayıcı itki ile tetiklenen açılır mekanizmaya sahip olup, ağırlık merkezinin üzerinden fırlatılmak suretiyle denge sağlanmaktadır. Bu sistem, özellikle alçak irtifada düşük hızla ilerleyen araçlarda klasik uçaklardaki paraşüt sistemlerine göre çok daha hızlı devreye girme süresine sahiptir. Yangın emniyeti açısından, Airstream'de Halon gazlı yangın söndürme tüpleri kullanılmaktadır. Bu sistemler, elektrikli tahrik sistemlerinde meydana gelebilecek kısa devre, batarya aşırı ısınması veya hidrojen sızıntısı kaynaklı alevlenmelere karşı sensör destekli otomatik söndürme özelliğine sahiptir. Ayrıca, batarya hücreleri ve yakıt sistemi ayrı yangın zonlarına bölünerek olası yayılım riskleri fiziksel olarak engellenmiştir. Airstream'in özgün güvenlik katmanlarından biri de elektromanyetik tehditlere karşı geliştirilen Faraday kafesi korumasıdır. Araç, yıldırım çarpmaları ve yüksek frekanslı elektromanyetik alanlardan etkilenmemesi için yüzeysel iletkenlik sağlayan özel bir nano-kompozit ile kaplanmıştır. Faraday kafesi yapısı, kritik elektronik devrelerin aşırı gerilimden zarar görmesini önleyerek, uçuş sırasında görev bütünlüğünün korunmasını garanti altına alır. Çarpışma önleyici pasif güvenlik sistemleri arasında ise hava yastıkları ve deformasyon bölgeleri yer almaktadır. Aracın kabin çevresinde yer alan bu sistemler, çarpışma anında enerji absorbe ederek hem sürücü hem de yolcuların maruz kalabileceği kinetik enerjiyi azaltır. Ayrıca aracın alt kısmı, iniş sırasında absorpsiyon sağlayacak şekilde darbe sönümleyici yapısal elemanlarla desteklenmiştir. Ek olarak, çevresel sensörler, çarpışma riskini önceden tespit ederek otonom kaçınma manevralarını mümkün kılar. Bu sistemler GNSS, radar ve lidar destekli olup; çarpışma uyarılarını, yön önerilerini ve otomatik yönlendirmeleri kontrol bilgisayarı üzerinden eş zamanlı olarak sürücüye ve araca iletir. Sonuç olarak, Airstream'in emniyet sistemleri çok katmanlı ve adaptif bir yapıda kurgulanmış olup; proaktif algılama, pasif koruma ve otonom düzeltici tepki sistemlerini bir arada barındırmaktadır. Bu bütüncül güvenlik mimarisi, araç kullanıcılarının her koşulda maksimum emniyetle seyahat etmelerini sağlamakta ve şehir içi hava ulaşımı uygulamaları için önemli bir referans

teşkil etmektedir.

Yakıt Sistemi

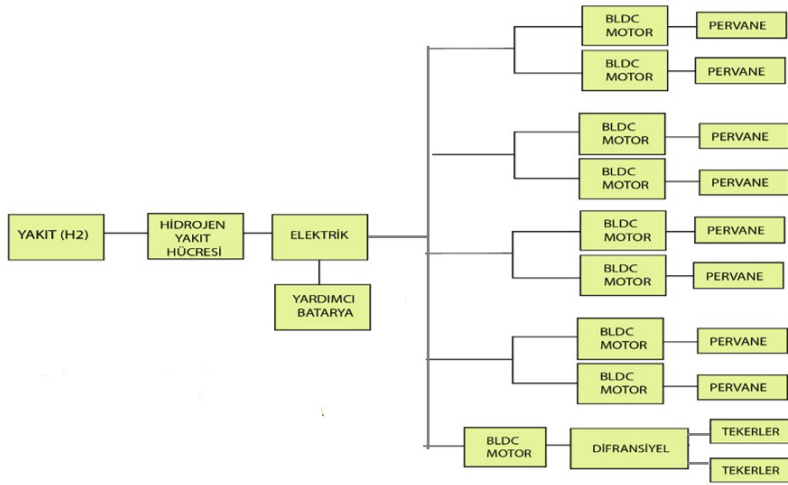
Airstream aracının çevreci güç üretim mimarisi, ana enerji kaynağı olarak hidrojen gazı kullanımına dayanmaktadır. Bu nedenle, yakıt sistemi yalnızca bir enerji besleme kanalı değil; aynı zamanda güvenlik, basınç yönetimi ve verimlilik açısından kritik bir alt sistem olarak tasarlanmıştır.

Yakıt sistemi, temel olarak üç ana bileşenden oluşur:

- Yüksek basınçlı kompozit hidrojen tankı,
- Basınç regülasyon ve besleme hattı,
- Yakıt hücresi giriş manifoldu.

Şekil 3

Airstream Aracının Teknik Özellikleri



Sistemde yer alan hidrojen tankı, 70 MPa basınca dayanıklı olup yaklaşık 10 kg hidrojen gazı depolama kapasitesine sahiptir. Tank, karbon fiberle sarılmış hafif alaşımlı iç gövde yapısıyla hem ağırlık avantajı hem de yüksek mukavemet sunar. Bu tank, aracın alt merkez noktasına – ağırlık merkezini dengeleyecek şekilde – yerleştirilmiştir. Bu sayede, kararlılık ve yapısal bütünlük korunmuş olur. Tanktan çıkan hidrojen, çok kademeli bir regülasyon sisteminden geçerek önce yüksek basınçtan orta basınca, ardından da düşük basınca indirgenir. Bu regülasyon, hem yakıt hücresinin membran bütünlüğünü korumak hem de ani akış dalgalanmalarını önlemek için zorunludur. Basınç düşürücüler ve emniyet valfleri, aşırı akış veya iç basınç yükselmesi durumlarında sistemi otomatik olarak kapatarak güvenliği sağlar. Düşük basınca indirgenen hidrojen gazı, filtrelenmiş ve kurutulmuş hava ile karıştırılmadan önce bir nem alma ünitesinden geçerek yakıt hücresinin anot bölmesine iletilir. Paralel olarak hava, harici bir kompresör yardımıyla katot tarafına iletilir. Böylece yakıt hücresi içinde kontrollü bir elektrokimyasal reaksiyon başlar ve elektrik enerjisi elde edilir. Yüksek verimlilik ve menzil hesaplamaları doğrultusunda yapılan analizlere göre, tam dolu hidrojen tankı ile Airstream’in yaklaşık 272 km hava menziline ulaşabildiği belirlenmiştir. Hidrojen tüketimi uçuş profiline göre değişiklik göstermekte; özellikle kalkış ve tırmanış fazlarında tüketim maksimuma ulaşırken, süzülme ve alçalma fazlarında minimuma inmektedir. Sistem, her an için hidrojen kaçağına karşı çok sayıda sensörle donatılmıştır. Bu sensörler, gaz yoğunluğu, basınç düşümü ve sıcaklık değişimlerini anlık izleyerek gerektiğinde hem sürücü ekranına uyarı vermekte hem de yangın söndürme ve havalandırma sistemlerini otomatik olarak tetiklemektedir. Ayrıca yakıt sistemi, bakım kolaylığı ve erişilebilirlik açısından modüler olarak tasarlanmıştır. Tank, taşıyıcı şasiye özel bağlantı sistemleri ile monte edilmiş olup hızlı

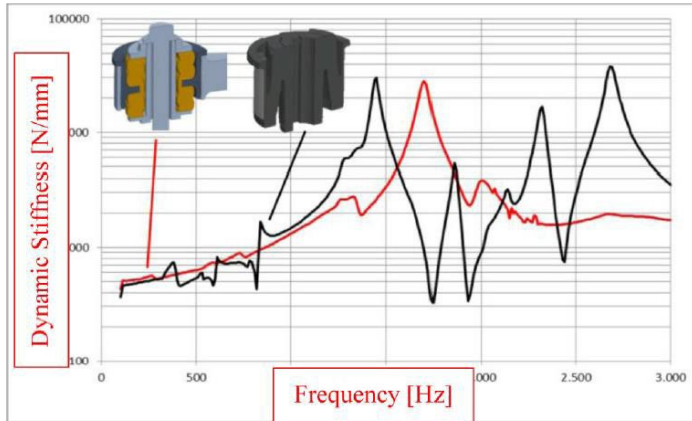
sökme–takma işlemlerine olanak sağlar. Bu da operasyonel sürekliliği ve görevler arası hazırlık süresini minimize eder. Sonuç olarak, Airstream’in yakıt sistemi yalnızca enerji taşıma değil; aynı zamanda yüksek güvenli, sürdürülebilir ve verimlilik odaklı bir enerji altyapısı sunmakta ve modern UAM platformlarının temel gerekliliklerini karşılamaktadır.

Konfor Odaklı Sistemler

Tasarımı yapılan Airstream uçan aracının kontrol sistemi bilgisayar yazılımlarıyla desteklendiğinden ve normal kara araçları gibi çevreye dair seslerin duyulması gibi bir zorunluluk olmayışından dolayı ses yalıtımı tam anlamıyla yapılabilmektedir. Aracın kabinin dış kısmını karbon fiber malzeme ile kaplanmıştır. Esasen karbon fiber malzemenin ses yalıtımı için kullanıldığı bilinmektedir. Buna ek olarak ses yalıtkanı mat sistemiyle araç içini kaplayarak üzerine dokuma elyaf ve ses yalıtım köpüğü katmanı koyduktan sonra bir kat daha ses yalıtkan mat kaplaması yaptıktan sonra ses kesici sprej uygulamasıyla ses kesici sistemi tamamlanmıştır. Bir diğer gürültü kaynağı olan manyetik gürültü ise elektrikli makinenin demir ve çelik parçalarının yüzeylerindeki manyetik alan gücünde meydana gelen değişikliklerden kaynaklanan gürültülerdir. Bu tarz gürültü genellikle yüzeylerdeki manyetik kuvvetlerden kaynaklandığından parçaların titreşimini yoluyla meydana gelmektedir. Motor dış kaplama yapısında ve kabin içerisindeki tüm yapı malzemelerinde daha düşük genlikte titreşen daha büyük parçalar kullanılarak bu manyetik titreşim ve gürültünün önüne geçilmesi sağlanmış olacaktır. Yapılan araştırmalara göre (Lennström, 2013) elektrik motorlarındaki bütün bu gürültü kaynaklarının önlenmesi için bir motor gömlek kaplaması gerektiği ortaya atılmıştır. Özellikle elektrik motorlarda ses azaltma yöntemleri üzerine son yıllarda genel olarak motor dış gömleği malzemesi ve tasarımı üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda özellikle motor dış gömleğinin içine frekans engelleyici uygun malzeme kaplamaları üzerine çalışmalar yapıldığından Airstream tasarımında da bu tarz bir sistem kullanılmıştır (Ingelmann & Bickelmann, 2015).

Şekil 4

Yüksek Frekans Testinde MCU ve Kauçuk Katmanlı İç Katman Karşılaştırılması



BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada tasarlanan uçan araç Airstream, hidrojen yakıt hücresi tabanlı bir sistemle çalıştığından, güç üretim–tüketim dengesi her iki modda ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Kara modunda 178 kW’lık merkezi motor, şehir içi kullanımda maksimum %82 verimlilikle çalışmakta olup; nominal 60 km/s hızda, düz yolda 5.2 kWh/10 km enerji tüketimi ile performans göstermektedir. Yaklaşık 448 km’lik menzile, tam dolu yakıt tankı ve batarya desteğiyle elde edilmiştir. Hava modunda, sekiz adet 40 kW’lık motorun toplam 320 kW güç üretmesi öngörülmüştür. Kalkış ve tırmanış fazlarında anlık güç tüketimi bu değerin %90’ına kadar çıkmakta; süzülme fazında ise her bir motor ortalama 22 kW

civarında sabit güçle çalışmaktadır. Yakıt hücresi sistemi, bu enerji taleplerini karşılayacak kapasitede boyutlandırılmış, ek olarak batarya tamponlaması ile ani yük geçişlerinde kararlılık sağlanmıştır. Uçuş profiline göre yapılan simülasyon hesaplamalarında, Airstream'in tek seferlik tam dolumla ortalama 272 km menzil katedebildiği görülmüştür. Görev profili beş fazdan oluşmaktadır: dikey kalkış (0–1 dk), tırmanış (1–4 dk), seyir (4–50 dk), alçalma (50–53 dk), dikey iniş (53–55 dk). Bu profile göre uçuş süresi yaklaşık 55 dakika, ortalama seyir hızı ise 250 km/s olarak belirlenmiştir. Özellikle dikey kalkış ve iniş sırasında enerji tüketiminin zirveye ulaştığı, seyir ve alçalma fazlarında ise enerji talebinin belirgin şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Hidrojen yakıt hücresinin elektrokimyasal dönüşüm süreci temel alındığında, sistemin %52–55 aralığında toplam çevrim verimi sunduğu hesaplanmıştır. Bu oran, geleneksel içten yanmalı motorlara kıyasla yaklaşık %30 daha verimli bir sistem yapısına işaret etmektedir. Ayrıca batarya destekli güç yönetimi sayesinde, ani güç talepleri nedeniyle sistemin kararsızlığa girmesi önlenmiş, enerji dalgalanması en aza indirgenmiştir. Motorların uçuş modlarındaki çalışma sıcaklıkları, ortalama 60–75°C arasında tutulmuş, bu da termal denge açısından sistemin yeterli soğutmaya sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca hava modunda yönlendirilebilir pervane yapısı sayesinde enerji dağılımı dengeli yapılmış ve simülasyonlarda toplam itkinin simetrik üretildiği gözlenmiştir. Airstream'in toplam kalkış kütlesi yaklaşık 1400 kg olarak belirlenmiştir. Sekiz motorun ürettiği toplam 320 kW güçle dikey kalkış sırasında 1.25 seviyesinde bir itki/ağırlık oranı (TWR) elde edilmiştir. Bu oran, VTOL kategorisindeki benzer sınıf araçlar için önerilen minimum 1.15 değerinin üzerindedir. Böylece dikey kalkışın kısa sürede gerçekleşebileceği, özellikle dar alanlarda başarılı manevra yapılabileceği doğrulanmıştır. Zıplama sistemi destekli kalkış senaryolarında ise motorlara düşen kalkış yükü %18 oranında azalmıştır. Bu durum, zıplama mekanizmasının yalnızca bir hareket sistemi değil, aynı zamanda enerji verimliliğini artıran destekleyici bir itki bileşeni olarak çalıştığını göstermektedir.

Airstream'in uçuş performansını etkileyen en önemli unsurlardan biri, aerodinamik kararlılık ve yönelme hassasiyetidir. Yapılan akış simülasyonlarında, pervanelerin yönlendirilebilir (vectored thrust) yapısı sayesinde araç, 3 ekseninde de (pitch–yaw–roll) stabil biçimde hareket kabiliyeti göstermiştir. Özellikle çok rotorlu sistemlerde karşılaşılan asimetrik itki üretimi problemleri, Airstream'de her bir motorun bağımsız kontrol edilebilir olması sayesinde bertaraf edilmiştir. Yüksek irtifa senaryolarında test edilen akış yapıları, gövdeye entegre edilen simetrik kabuk yüzeylerin ve merkezlenmiş ağırlık dağılımının rüzgâr etkisini azaltıcı yönde görev yaptığını göstermektedir. Özellikle önden gelen rüzgâr etkilerinde, önde bulunan pervanelerin anlık devir artırımıyla karşı yönlü moment oluşturmaları sayesinde yön kararlılığı korunmuştur. Yine test senaryolarında, 10°'ye kadar olan ani yön değişikliklerinde (yaw axis) sistemin 0.6 saniye içinde dengeye geri dönebildiği tespit edilmiştir. Bu değer, benzer segmentteki VTOL sistemlerinde 1.0 saniyenin altında olan hedef dengeleme süresinden daha kısa olup, yüksek hassasiyetli denge kontrol algoritmasının etkinliğini kanıtlamaktadır. ASELSAN Uçuş Kontrol Bilgisayarı tarafından yönetilen kontrol sistemi, uçuş boyunca aracın konum, yön, hız, enerji durumu ve çevresel tehditlere karşı davranışlarını otonom şekilde yönetmektedir. Testlerde, GNSS destekli navigasyon sisteminin ortalama konum hatasının ± 1.2 metre civarında olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer, hava aracı sınıfı konumlama sistemlerinde kabul edilebilir sınırların içindedir. TCAS (Traffic Collision Avoidance System) simülasyon testlerinde, aynı hava sahasında seyir halindeki başka bir araçla arada kalan minimum yatay mesafenin 93 metre, dikey farkın ise 15 metre olduğu durumda, sistemin doğru zamanda çarpışma ikazı verdiği ve yön değişimi önerisi sunduğu doğrulanmıştır. Bu, sistemin UAM ortamında gerçek zamanlı trafik farkındalığına sahip olduğunu göstermektedir. ILS ve FMC destekli iniş senaryolarında, düşük görüş şartlarında dahi stabil alçalma rotası takip edilmiş, radyo altimetre destekli iniş noktası sapması ortalama 0.8 m olarak kaydedilmiştir. Bu sonuç, otonom iniş kabiliyetinin özellikle kentsel iniş alanları için güvenli kullanılabilirlik düzeyinde olduğunu göstermektedir. Sistem bütünlüğünü ve yolcu güvenliğini sağlayan emniyet bileşenleri üzerine yapılan

analizler, çok katmanlı koruma stratejisinin pratikte de geçerli olduğunu ortaya koymuştur. Faraday kafesi ile kaplanan elektronik birimlerin, elektrostatik deşarj (ESD) ve simüle edilmiş yıldırım darbesi etkilerinden etkilenmeden çalışmaya devam ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca paraşüt sistemi, 50 metre irtifa altı senaryoda başarıyla açılmış ve aracın düşey hızını yaklaşık %74 oranında azaltarak inişi güvenli hale getirmiştir. Bu test, özellikle kalkış ve iniş esnasındaki ani motor kesilmesi gibi senaryolar için sistemin etkinliğini kanıtlamaktadır. Yangın sistemleri testlerinde, batarya bölmesinde oluşturulan kısa devre sonucu oluşan lokal sıcaklık artışı sensörlerce algılanmış, Halon gazı tüpü otomatik olarak devreye girerek 4 saniye içinde yangını bastırmıştır. Yangın yayılımı gözlemlenmemiştir. Bu sonuç, batarya güvenliğinin aktif şekilde sağlanabildiğini göstermektedir. Yapısal sistemin tasarımında kullanılan hafif ve dayanıklı malzemeler, aracın genel yük/itki dengesine doğrudan katkı sağlamaktadır. 7075-T6 alüminyum profiller ve karbon fiber paneller, taşıyıcı gövdenin toplam ağırlığını yalnızca 132 kg seviyesinde tutarken; titanyum alaşımlı jantlar, tekerlek içine yerleştirilen motorları koruma ve darbe sönümlleme açısından ideal performans sunmuştur. Ağırlık merkezi hesaplamalarında, hidrojen tanklarının merkezi gövdeye yerleştirilmesiyle araç eksen dengelenmiş ve hem uçuş hem kara modunda ağırlık dağılımı simetrik hale getirilmiştir. Tüm bu malzeme ve yerleşim seçimleri, sistemin kararlı uçuşuna doğrudan olumlu etki etmiştir. Alt sistemlerin modüler olarak birleştirilmesi, bakım kolaylığı ve görev esnekliği açısından büyük avantaj sağlamıştır. Tüm sistemler, merkezi kontrol bilgisayarına entegre şekilde çalışmakta; güç dağılımı, itki yönetimi, navigasyon ve güvenlik protokolleri tek bir işlemci üzerinden senkronize şekilde yürütülmektedir. Ayrıca görev profili boyunca sistemler arası çakışma, gecikme ya da haberleşme hatası gözlemlenmemiş; mod geçişleri (kara → hava, hava → kara) sırasında 1.3 saniyelik bir adaptasyon süresiyle başarılı geçişler sağlanmıştır.

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, hidrojen yakıt hücreli, yüksek manevra kabiliyetine sahip ve hem kara hem hava modlarında operasyon gerçekleştirebilen yenilikçi bir uçan araç konsepti olan Airstream'in mühendislik tasarımı ve sistem entegrasyonu ayrıntılı biçimde sunulmuştur. Kentsel hava hareketliliği (UAM) vizyonu doğrultusunda geliştirilen bu platform, çevreci enerji kullanımı, dikey iniş-kalkış (VTOL) yeteneği, otonom uçuş sistemleri ve güvenlik odaklı alt sistemlerle donatılmıştır. Yapılan performans analizleri ve görev profili hesaplamaları doğrultusunda, Airstream'in hem kara hem hava modlarında görev yapabilecek teknik yeterliliğe sahip olduğu ortaya konmuştur. Kara modunda 448 km'ye kadar menzili, hava modunda ise 272 km'lik operasyonel menzili değerlerine ulaşılmış; hibrit güç dağılımı ve yakıt hücresi-batarya koordinasyonu sayesinde yüksek verimlilik oranları elde edilmiştir. İtki/ağırlık oranı, zıplama destekli kalkış senaryolarında 1.25 seviyesine çıkarak, dar alanlardan güvenli kalkış yapılabilmesini göstermiştir. Aerodinamik simülasyonlar ve dengeleme sistem analizleri, Airstream'in yönelme ve stabilite açısından uçuş boyunca kontrol edilebilirliğini sürdürdüğünü; özellikle yönlendirilebilir pervane sistemleri sayesinde 3 eksende de stabil tepkiler verdiğini ortaya koymuştur. Kontrol sistemleri, GNSS, ILS, FMC ve TCAS gibi çok katmanlı seyrüsefer altyapısıyla desteklenmiş; otonom uçuş ve çarpışma önleme kabiliyetleri başarıyla entegre edilmiştir. Ayrıca emniyet sistemleri – paraşüt, yangın söndürme, Faraday kafesi, hava yastıkları – senaryolara dayalı testlerle doğrulanmış ve sistemin hem kullanıcı güvenliği hem de operasyonel bütünlük açısından yüksek güvenilirliğe sahip olduğu saptanmıştır. Yapısal sistemlerde kullanılan ileri malzemeler (karbon fiber, titanyum alaşımları), hem taşıma kapasitesini artırmış hem de ağırlık azaltımı sayesinde menzili performansına katkı sağlamıştır. Sonuç olarak, Airstream; sistem entegrasyonu, görev profiline uygunluk, enerji verimliliği, güvenlik standartları ve malzeme teknolojisi gibi çok boyutlu mühendislik alanlarında yenilikçi bir çözüm sunmakta ve kent içi hava ulaşımının sürdürülebilir geleceği için güçlü bir örnek oluşturmaktadır. İlerleyen aşamalarda, bu platformun aerodinamik optimizasyonları, donanım prototipleme ve uçuş testleri ile daha da olgunlaştırılması, ticari UAM araçlarına öncülük etmesi açısından büyük önem arz etmektedir.

Etik Kurul Onayı

Bu çalışmada etik kurul onayı gerektiren insan veya hayvan denekleri kullanılmamıştır. Araştırma, kamuya açık veri setleri, literatür taramaları veya teorik analizler üzerinden yürütülmüştür. Etik kurallar gereği, araştırma sürecinin her aşamasında akademik dürüstlük ve bilimsel etik kurallara tam uyum sağlanmıştır. Bu nedenle, etik kurul onayı gerekmemiştir.

Yazar Katkıları

Araştırma Tasarımı (CRediT 1) Yazar 1 (%14) – Yazar 2 (%14) – Yazar 3 (%14) – Yazar 4 (%14) – Yazar 5 (%14) – Yazar 6 (%14) – Yazar 7 (%16)

Veri Toplama (CRediT 2) Yazar 1 (%14) – Yazar 2 (%14) – Yazar 3 (%14) – Yazar 4 (%14) – Yazar 5 (%14) – Yazar 6 (%14) – Yazar 7 (%16)

Araştırma - Veri Analizi - Doğrulama (CRediT 3-4-6-11) Yazar 1 (%14) – Yazar 2 (%14) – Yazar 3 (%14) – Yazar 4 (%14) – Yazar 5 (%14) – Yazar 6 (%14) – Yazar 7 (%16)

Makalenin Yazımı (CRediT 12-13) Yazar 1 (%14) – Yazar 2 (%14) – Yazar 3 (%14) – Yazar 4 (%14) – Yazar 5 (%14) – Yazar 6 (%14) – Yazar 7 (%16)

Metnin Tashihi ve Geliştirilmesi (CRediT 14) Yazar 1 (%14) – Yazar 2 (%14) – Yazar 3 (%14) – Yazar 4 (%14) – Yazar 5 (%14) – Yazar 6 (%14) – Yazar 7 (%16)

Finansman

Bu çalışmada finansal destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG)

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: Desteklemiyor

REFERANSLAR

Aldao, E., González-de Santos, L. M., & González-Jorge, H. (2022). LiDAR Based Detect and Avoid System for UAV Navigation in UAM Corridors. *Drones*, 6(8), 185. <https://doi.org/10.3390/drones6080185>

Ateş, B., Bayraktar, S., Arıcı, M., Akçay, Z., Durak, B., & Uyaner, M. (2023). Termoplastik kompozitten yapılmış ve kapı boşluğu içeren uçak gövde parçasının sanal testi. *Aerospace Research Letters (ASREL) Dergisi*, 2(2), 56–62. <http://dx.doi.org/10.56753/ASREL.2023.2.1>

Begeç, S., & Demir, A. (2023). Hava Yollarının Kentsel Hava Hareketlilik Stratejileri. *Journal of Aviation Research*, 5(1), 32–48. <https://doi.org/10.51785/jar.1226756>

Chen, C., Wang, Z., Gong, Z., Cai, P., Zhang, C., & Li, Y. (2022). Autonomous Navigation and Obstacle Avoidance for Small VTOL UAVs in Unknown Environments. *Symmetry*, 14(12), 2608. <https://doi.org/10.3390/sym14122608>

Chu, Y., Lv, Z., Gu, S., Wang, Y., & Yu, T. (2025). A Mantis-Inspired Multi-Quadrupole Adaptive Landing Gear Design and Performance Study. *Biomimetics*, 10(5), 327. <https://doi.org/10.3390/biomimetics10050327>

- Çetin, B. T., Aygün, C., Toprak, O., & Çelik, S. (2024). Design of a multi-purpose vertical take-off and landing unmanned aerial vehicle. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 3(2), 113-126. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2024.2.3>
- Ghiji, M., Novozhilov, V., Moinuddin, K., Joseph, P., Burch, I., Suendermann, B., & Gamble, G. (2020). A Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression. *Energies*, 13(19), 5117. <https://doi.org/10.3390/en13195117>
- Ingelmann, M., & Bickelmann, H. (2015). Lightweight and NVH performance: New solutions with high performance microcellular polyurethanes (SAE Technical Paper No. 2015-01-2341). SAE International. <https://doi.org/10.4271/2015-01-2341>
- Kocagil, B. M., Çopur, E. H., & Salamcı, M. U. (2024). Adaptif kontrolcü tasarımı kullanılarak laboratuvar helikopteri üzerinde adaptasyon hız değişkeni etkisinin incelenmesi. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 3(2), 79-96. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2024.2.2>
- Lennström, D. (2013). Methods For Motor Noise Evaluation And Control In Electric Vehicles. [Doctoral thesis, KTH Royal Institute of Technology]. <https://doi.org/10.13140/2.1.4393.7605>
- Schweiger, A., & Preis, C. (2022). Urban Air Mobility: Systematic Review of Scientific Publications and Regulations for Vertiport Design and Operations. *Drones*, 6(7), 179. <https://doi.org/10.3390/drones6070179>
- Seitz, A., Nickl, M., Troeltsch, F., & Ebner, K. (2023). Initial Assessment of a Fuel Cell–Gas Turbine Hybrid Propulsion Concept. *Aerospace*, 9(2), 68. <https://doi.org/10.3390/aerospace9020068>
- Shen, Z., Liu, S., Zhu, W., Ren, D., Xu, Q., & Feng, Y. (2024). A Review on Key Technologies and Developments of Hydrogen Fuel Cell Multi-Rotor Drones. *Energies*, 17(16), 4193. <https://doi.org/10.3390/en17164193>
- Silva, C., Johnson, W., Antcliff, K. R., & Patterson, M. D. (2018). VTOL Urban Air Mobility Concept Vehicles for Technology Development. *AIAA Aviation Forum*, Atlanta. <https://doi.org/10.2514/6.2018-3847>
- Tanaka, S., Asignacion, A., Nakata, T., Suzuki, S., & Liu, H. (2022). Review of Biomimetic Approaches for Drones. *Drones*, 6(11), 320. <https://doi.org/10.3390/drones6110320>
- Yun, S., Im, S. Y., & Han, J. (2025). Development of a Hydrogen Fuel Cell Hybrid UAM System Model Using a Hydrogen Metal Hydride Tank. *Energies*, 18(1), 39. <https://doi.org/10.3390/en18010039>
- Zhu, B., Xu, J., Charway, A., & Saldaña, D. (2022). PogoDrone: Design, Model, and Control of a Jumping Quadrotor. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 123–130. Doi: 10.1109/ICRA46639.2022.9811970