



HAVACILIKTA YENİ ROTA: HİBRİD ELEKTRİKLİ UÇAKLAR



İşbu eserde yer alan veriler/bilgiler, yalnızca bilgi amaçlı olup, bu eserde bulunan veriler/bilgiler tavsiye, reklam ya da iş geliştirme amacına yönelik değildir. STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş. işbu eserde sunulan verilerin/ bilgilerin içeriği, güncelliği ya da doğruluğu konusunda herhangi bir taahhüde girmemekte, kullanıcı veya üçüncü kişilerin bu eserde yer alan verilere/bilgilere dayanarak gerçekleştirecekleri eylemlerden ötürü sorumluluk kabul etmemektedir. Bu eserde yer alan bilgilerin her türlü hakkı STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş.'ye aittir. Yazılı izin olmaksızın işbu eserde yer alan bilgi, yazı, ifadenin bir kısmı veya tamamı, herhangi bir ortamda hiçbir şekilde yayımlanamaz, çoğaltılamaz, işlenemez.



1. GİRİŞ

2023, COVID-19 pandemisinde ağır darbe alan küresel havacılık sektöründe toparlanmanın belirginleştiği bir yıl oldu. Uluslararası Sivil Havacılık Örgütüne (International Civil Aviation Organization -ICAO) göre, küresel salgından hemen önce, ortalama bir günde 12 milyon insan yaklaşık 100.000 ticari uçuş gerçekleştirilmekteydi. 2023'teki canlanmayla birlikte havacılık sektörü gelirlerinin 2023 yılında 2022'ye göre yüzde 9,7 artışla, neredeyse 2019'daki pandemi öncesi seviyeye gelerek 803 milyar dolara ulaşması beklenmektedir^[1].

Havacılığın normale dönmesinin doğurduğu artan hava hareketliliği ise doğal olarak gezegen üzerindeki olumsuz etkilerinin de yeniden artışa geçmesine yol açmıştır. Zira hava trafiği, dünya çapındaki karbon emisyonlarının yaklaşık yüzde 2'sine katkıda bulunmaktadır. Hava yolculuğu, yenilenemeyen fosil yakıtlara bağlı olduğu için küresel iklim değişikliğinin başrol oyuncularından biridir. Dolayısıyla havacılık endüstrisi temel bir zorlukla karşı karşıya bulunmaktadır. Bir yandan sektörde ekonomik büyümeyi ve seyahatin kişisel ve sosyal faydalarını desteklemek için hava yolculuğundaki büyüme sürdürülürken, diğer yandan emisyonların azaltılması için zorlu inovasyonlara ihtiyaç vardır. Havacılıkta bu zorluğun üstesinden gelmenin yolu ise uçaklarda ve uçakların çalıştırılma biçiminde temel değişikliklerin, güvenliği de gözeten hayata geçirilmesidir.

Havacılığın düzenleyici kurumları iklim değişikliği endişelerini gidermek için bir süredir çeşitli tedbirleri

hayata geçirmektedir. Örneğin 2022'nin Ekim ayında ICAO, 2050 yılına kadar ticari uçuşlardan kaynaklanan net sıfır karbon emisyonu hedefini benimsemiştir. ABD'de aynı hedefe yönelik olarak bir "Havacılık İklim Eylem Planı" zaten daha önce ortaya çıkmıştır. Airbus, Boeing, CFM International, Embraer, GE Aerospace, Pratt & Whitney, Rolls-Royce ve Safran Aircraft Engines gibi dünyanın önde gelen uçak ve büyük jet motoru üreticileri de dahil olmak üzere küçük ve büyük şirketler, hava yolculuğu emisyonlarını azaltma planlarını açıklamıştır.

Havacılık endüstrisinin iklim değişikliği ile mücadele çerçevesinde başvurduğu yaygın taktikler arasında, üretim sırasında absorbe ederek yaşam döngüsü karbon emisyonlarını azaltabilen, biyokütleden elde edilen yakıt gibi sürdürülebilir yakıtların tanıtılması yer almaktadır. Diğer araştırma çabaları arasında uçaklara amonyak, hidrojen veya elektrikle güç sağlamaya dayalı yöntemler bulunmaktadır. ABD'nin Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) ve endüstri ortakları, havacılık şirketlerini elektrikle çalışan tahrik sistemleri geliştirmeye yönlendirmektedir. Yürütülen büyük boyutlu çabaların başarıya ulaşması durumunda hibrid uçaklar havacılık endüstrisinin yakın geleceğini değiştirmeye adaydır. Analizimizde hibrid uçakların iklim değişikliğine katkıları, hibrid uçakların günümüzdeki mevcut durumu ve teknolojisi, önde gelen havacılık şirketlerinin hibrid uçak projeleri, hibrid uçak pazarı ve hibrid uçakların geleceği konuları değerlendirilecektir.

2. HİBRİD UÇAKLARIN İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNE KATKILARI

Avrupa Birliğinin (AB) 2050 yılına kadar iklim nötr olma hedefine ulaşabilmesi için havacılığı sürdürülebilir kılmak kritik önem taşımaktadır. Havacılığın, yılda 500 milyar avrodan fazla gelir elde ederek ve 9,3 milyon kişilik işi destekleyerek Avrupa ekonomisine önemli ölçüde katkı sağlamasına rağmen aynı zamanda ele alınması gereken olumsuz bir çevresel etkisi de bulunmaktadır. Uçuşlar, Avrupa'da sera gazı emisyonlarının yaklaşık yüzde 3'ünden sorumludur. AB'nin 2050 yılına kadar net sıfır sera gazı emisyonu hedefine ulaşmak için daha sürdürülebilir uçaklara ihtiyacı bulunmaktadır^[2].

2.1 Hibridizasyonun Yakıt Tüketimine Etkisi

Bir uçağın hibridleştirilmesi, tahrik sisteminin genel verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Kalkış ve tırmanış sırasında ek güç sağlamak için elektrik motorlarının kullanılması, tipik olarak en yoğun yakıt gerektiren bu uçuş aşamalarında genel yakıt tüketimini azaltmaktadır. Konvansiyonel uçaklarla karşılaştırıldığında, hibrid elektrikli uçakların kullanılması, konvansiyonel bir motorun hareket hâlinde olduğu süreyi kısaltarak yakıt tüketimini azaltır.

Hibrid elektrikli uçakların diğer yönleri de gelişmektedir. İyileştirilmiş elektrik motoru verimliliği, genel tahrik sistemi verimliliğini artırır. Biyoyakıtlar veya hidrojen yakıt hücreleri gibi alternatif yakıt kaynakları, hibrid uçakların çevresel etkisini daha da azaltır ve sürdürülebilirliklerini artırır. Verimli güç yönetim sistemleri, enerji kaynaklarını dengeleyerek yakıt verimliliğini ve performansını optimize eder^[4].

2.2 Hibrid Elektrikli Uçaklar Hava Yolculuğunu Nasıl Çevreci Hâle Getirebilir?

Hava trafiğinin 2030 yılına kadar her yıl yüzde 5 artması beklenirken, bilim insanları uçakları nasıl daha sürdürülebilir hâle getirebileceklerini araştırmaktadır. Ancak mevcut pillerin elektrikli uçakları çok ağır hâle getirmesi olasılığı nedeniyle, hibrid modeller daha yeşil hava yolculuğu için 15 yıl içinde kullanıma alınabilir.

Hibrid elektrikli uçakların geliştirilmesinin çözümün bir parçası olabileceği, yürütülen pek çok çalışmada kabul edilmektedir. Hibrid otomobillere benzer şekilde, teknoloji tipik olarak yakıt ile bir elektrik pili veya hidrojen yakıt hücresi olmak üzere iki güç kaynağını birleştirir.

Fransa'daki Toulouse Üniversitesinin LAPLACE laboratuvarında kıdemli bir bilim insanı ve müdür yardımcısı olan Dr. Xavier Roboam, "Kaynakları hibridleştirerek, uçakların yakıt tüketimini ve dolayısıyla çevresel etkiyi azaltabilirsiniz" diyerek, bu girişimin sıfır emisyonlu, tamamen elektrikli uçaklar olan son adımdan önceki adım olduğuna işaret etmektedir^[2].

Hibrid uçakların gelişiminin sürdürülebilirliğe katkısını açık bir şekilde gösteren çok sayıda araştırma vardır. Başka bir deyişle, hibrid elektrikli uçak konsepti havacılığın hava kirliliği sorununu azaltabilir. Örneğin, 2021

yılında yapılan bir çalışmada önerilen tasarımın azot oksit emisyonlarını yüzde 95 oranında azaltabileceği gösterilmiştir^[5].

Seyir irtifasında, uçaklar atmosfere sabit bir nitrojen oksit akışı yaymaktadır. Azot oksitler (NOx), önemli bir hava kirliliği kaynağıdır ve astım, solunum yolu hastalığı ve kardiyovasküler bozukluklarla ilişkilendirilmiştir. Önceki araştırmalar, küresel havacılık nedeniyle bu kimyasalların üretilmesinin her yıl 16.000 erken ölümle sonuçlandığını göstermiştir. Söz konusu çalışma kapsamında Massachusetts Institute of Technology (MIT) mühendisleri, havacılığın NOx emisyonlarının yüzde 95'ini ortadan kaldıracaklarını ve böylece ilişkili erken ölümlerin sayısını yüzde 92 oranında azaltacağını tahmin ettikleri bir uçak motoru konsepti geliştirmiştir.

Konsept, kara taşımacılığı araçlarında kullanılan emisyon kontrol sistemlerinden esinlenmiştir. Günümüzde birçok ağır hizmet dizel kamyonu, motorlar tarafından üretilen NOx'i azaltmak için yanma sonrası emisyon kontrol sistemlerine sahiptir. MIT araştırmacıları havacılık için elektrikli bir bükülme ile benzer bir tasarım önermektedir. Günümüz uçakları, her kanadın altına monte edilmiş jet motorları tarafından hareket ettirilmektedir. Her motor, türbinden çıkan egzoz arkadan akarken uçağı havada hareket ettirmek için bir pervaneye güç veren bir gaz türbinine sahiptir. Bu konfigürasyon nedeniyle, motorlar tarafından üretilen itme kuvvetine müdahale edeceği için emisyon kontrol cihazlarının kullanılması mümkün olmamıştır.

MIT mühendislerinin yeni hibrid elektrik veya "turbo elektrik" tasarımında, bir uçağın güç kaynağı hâlâ geleneksel bir gaz türbini olacak, ancak uçağın kargo ambarrına entegre edilecektir. Pervanelere veya fanlara doğrudan güç vermek yerine, gaz türbini, elektrik üretmek için ambarda bulunan bir jeneratörü çalıştıracak ve bu da daha sonra uçağın kanadına monte edilmiş, elektrikle çalışan pervanelerine veya fanlarına elektrikle güç sağlayacaktır. Gaz türbini tarafından üretilen emisyonlar, egzozu atmosfere atmadan önce temizleyecek olan, dizel araçlardakilere büyük ölçüde benzer bir emisyon kontrol sistemince beslenecektir. MIT Havacılık ve Uzay Bilimleri Profesörü Steven Barrett söz konusu sistemi, "Bu hâlâ muazzam bir mühendislik sorunu olabilir, ancak temel fizik sınırlamaları yok. Net sıfır havacılık hedefine ulaşmak istiyorsanız, bu işin hava kirliliği kısmını çözmeyen potansiyel bir yoldur ki bu da önemli ve teknolojik olarak oldukça uygulanabilir bir yoldur" diyerek tarif etmektedir^[5].

Son yıllarda yapılan araştırmalar, muhtemelen daha küçük uçakların elektrikleendirilebileceğini göstermekle birlikte, elektrifikasyonun büyük uçaklarda gerçekleştirilmesi için pil teknolojisinde oldukça büyük atılımlara ihtiyaç vardır. Barrett bu nedenle yarı elektrikli uçakları mümkün kılmak için, elektrikli uçaklardan elektrikli tahrik kısmının ve uzun süredir var olan ve süper güvenilir ve çok verimli olan gaz türbinlerinin alınarak, bunların otomotiv ve yerde kurulu güç üretiminde kullanılan emisyon kontrol teknolojisi ile birleştirilebileceğini savunmaktadır. MIT araştırmacıları Boeing 737 veya Airbus A320 benzeri bir uçakta bahsettikleri hibrid elektrik sistemi uygulansaydı,

ekstra ağırlığın uçağı uçurmak için yaklaşık yüzde 0,6 daha fazla yakıt gerektireceğini hesaplamaktadır. Barrett'a göre bu mevcut tasarım, "havacılığın hava kirliliği sorununu etkili bir şekilde ortadan kaldıracaktır^[5]."

AB27 ve Avrupa Serbest Ticaret Birliği havalimanlarından kalkan tüm uçuşlardan kaynaklanan CO₂ emisyonları 2005'ten 2019'a yüzde 34 artmıştır. Havacılık, CO₂ emisyonları ve CO₂ dışı etkileri nedeniyle küresel ısınma üzerindeki antropojenik etkilerin yüzde 3'ünden fazlasını oluşturmaktadır. Tüm bu veriler 2050 yılına kadar net sıfır emisyon hedeflerine doğru ilerlemek için radikal teknolojik adımların ve sürekli araştırma çabalarının gerektiğini göstermektedir. Çoğu uçak fosil yakıtlarla uçmaya devam ettiği için sürdürülebilir havacılık yakıtları önemli bir araştırma alanıdır. Bununla birlikte, motor verimliliğini artıran ve daha elektrikli ve nihayetinde tüm elektrikli uçaklara doğru ilerleyen devrim niteliğindeki tasarımlar, uzun vadede yola çıkmak için gerekli olacaktır^[3].

3. HİBRİD UÇAKLARIN MEVCUT DURUMU VE TEKNOLOJİSİ

3.1 Hibrid Elektrikli Uçak Nedir?

Hibrid bir elektrikli uçak, tahrik sağlamak için geleneksel fosil yakıtla çalışan motorların ve elektrik motorlarının bir kombinasyonunu kullanmaktadır. Hibrid elektrikli uçaklar tipik olarak kalkış ve iniş için elektrik motorları kullanırken, geleneksel motorlar havadayken güç vermektedir. Hibrid elektrikli uçak teknolojisi, geliştiriminin hâlâ ilk aşamalarında. Bununla birlikte, özellikle işletmeler ve tüketiciler elektrikli araçların başarılarını gördükçe, hava yolculuğunun çevresel etkisini azaltma potansiyeline ilgi gün geçtikçe artmaktadır^[4].

Araştırmacılar daha verimli elektrik motorları geliştirmekte, elektrikli ve geleneksel tahrik sistemlerinin entegrasyonunu optimize etmekte ve sürtünmeyi azaltabilecek ve verimliliği artıracak aerodinamik tasarımlar oluşturmaktadır. Havacılık ve uzay alanında malzeme araştırmaları ve yapı mühendisliği devam etmekte olup, yüksek sıcaklıklara ve basınçlara dayanabilecek malzemeler oluşturulmaktadır. Sertifikasyon, düzenleme ve altyapı tarafında da düzenleyici kurumların hibrid elektrikli uçaklar için yeni altyapı, standartlar ve sertifikasyon süreçleri araştırma ve geliştirme çabaları sürmektedir^[4].

3.2 Hibrid Uçakların Menzilleri ve Şarj Süreleri

Eylül 2022'de Air Canada, İsveçli üretici Heart Aerospace'den 30 adet hibrid elektrikli uçak (Heart ES-30) için satın alma siparişi vermiştir. Bu uçakların şarj olmasının 30 ila 50 dakika sürmesi beklenmektedir. 2015 yılının başlarında yapılan bir testte, Cambridge Üniversitesinden mühendisler, "paralel hibrid elektrikli tahrik sistemine" sahip bir uçağı test etmiş ve tasarımlarının uçuş sırasında pillerini de şarj edebileceğini öne sürmüştür.

Şarj süresi gibi, hibrid elektrikli uçakların menzili de uçağın boyutu ve ağırlığı, enerji depolama sisteminin türü, kapasitesi ve belirli çalışma koşulları dahil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır. Heart ES-30'un 30-50 dakikalık

şarj süresinin, sürdürülebilir havacılık yakıtıyla çalışan yerleşik bir türbin jeneratörü ile 250 millik bir menzil sağlama tahmin edilmektedir. Heart, tam şarjla hibrid elektrikli uçakların türbin jeneratörü olmadan 30 yolcu ve bagajlarını 125 mil taşıyabileceğini belirtmektedir.

Lilium, City Airbus, Boeing Aurora eVTOL ve Bye Aerospace Sun Flyer 2, değişen aralıklara sahip diğer projelere örnektir. Ticari ve bölgesel uçak kategorisindeki uçaklar, yaklaşık 10 kişilik oturma kapasitesi ile 1.000 km'ye (621 mil) yakın daha uzun bir uçuş menzili talep etmektedir^[4].

3.3 Hibrid Uçakların Çalışma Prensibi

Hibrid elektrikli uçaklar, pillere veya diğer enerji depolama sistemlerine dayanarak tahrik sağlamak için hem geleneksel fosil yakıtla çalışan motorları hem de elektrik motorlarını kullanmaktadır. Hibrid elektrikli uçaklar için birincil yakıt kaynağı tasarıma göre değişmekte, ancak çoğu sürdürülebilir havacılık yakıtı kullanmaktadır.

Bununla birlikte, elektrik motorları genellikle pillerle çalışmaktadır. Yakıt hücreleri gibi diğer enerji depolama sistemleri kullanılabilir, ancak piller çeşitli kaynaklardan şarj edilebilir ve bu nedenle birçok seçenek mevcuttur. Bunlar, güneş veya rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını ve şebekeden gelen geleneksel elektriği içermektedir^[4].

Bir enerji depolama sistemi, elektrik enerjisini depolar ve elektrik motorlarına iletir. Enerji depolama sistemi piller, yakıt hücreleri veya her ikisinin bir kombinasyonu olabilir.

Elektronik, enerji depolama sistemi, elektrik motorları ve geleneksel motorlar arasındaki elektrik enerjisi akışını yönetmek ve kontrol etmek için kullanılır. Kontrol sistemleri, hibrid elektrikli uçakların çalışmasını yönetir ve geleneksel motorların ve elektrik motorlarının birlikte verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar. Kalkış ve tırmanış sırasında, elektrik motorları uçağı ek güç sağlayarak geleneksel motorların tam güçte çalışması ihtiyacını azaltır. Uçak seyir irtifasına ulaştığında, geleneksel motorlar devreye girer ve elektrik motorları ya kapatılır ya da gerekirse motorlara yardımcı olmak için kullanılır. İniş sırasında, ek güç sağlamak ve gürültü kirliliğini azaltmak için elektrik motorları tekrar kullanılır.

Piller, hibrid elektrikli uçakların potansiyellerine ulaşmasını sağlayan en önemli teknolojilerden biridir. Daha hafif ve daha güçlü pillerin geliştirilmesi, hibrid elektrikli uçakların benimsenmesine yardımcı olacaktır. Pil teknolojisindeki gelişmeler, hibrid elektrikli uçakların menzillerini artırabilir ve yakıt ikmali yapmadan daha uzun uçuşlara izin verebilir. Bu noktada malzeme ve tasarım da hayli önem taşımaktadır. Karbon fiber kompozitler gibi hafif, yüksek mukavemetli malzemeler, dağıtılmış elektrikli tahrik ve eğimli kanat veya eğimli rotor konfigürasyonları gibi yeni uçak tasarımları daha fazla verimlilik için uçağın ağırlığını azaltabilir^[4].

3.3.1 Pillerin Enerji Yoğunluğuna Etkileri

Enerji yoğunluğu, hibrid elektrikli uçakların pil sisteminde ne kadar enerji depolanabileceğini ve bir pili enerji

kaynağı olarak kullanırken uçağın tek bir şarjla ne kadar uzağa gidebileceğini belirlemektedir. Çoğu hibrid elektrikli uçak, elektrik motorlarına güç sağlamak için pillere güvenir, bu nedenle bu pillerin enerji yoğunluğu, uçağın menziline ve performansını doğrudan etkilemektedir.

Bir pilin enerji yoğunluğu, birim hacim veya kütle başına depolanabilen enerji miktarını ifade etmektedir. Daha yüksek hacimsel enerji yoğunluğuna sahip piller, daha küçük veya daha hafif bir pakette daha fazla enerji depolayabilir, bu da uçağın menziline artırır ve ağırlığını azaltarak daha verimli bir kalkış sağlar. Sonuç olarak, daha yüksek enerji yoğunluklu pillerdeki yenilikler, hibrid elektrikli uçakların uygulanabilirliğini önemli ölçüde artırabilmektedir. Lityum iyon pillerde iyileştirmeler olmasına rağmen, enerji yoğunluğu hibrid elektrikli uçakların menzili ve performansı için sınırlayıcı bir faktör olarak kabul edilmektedir. Şu anda, en gelişmiş pillerin bile enerji yoğunluğu, jet yakıtı gibi geleneksel havacılık yakıtlarından nispeten daha düşüktür^[4].

Havacılık endüstrisi önemli bir geçişin ilk aşamalarında bulunmaktadır. Elektrifikasyon, jet motorunun ortaya çıkışından bu yana uçak tahrik sistemlerindeki ilk temel değişiklik olma potansiyelini taşımaktadır^[1].

Günümüz şartlarında, bir pilin aynı miktarda enerji sağlamak için karşılaştırılabilir miktarda yakıttan çok daha büyük ve daha ağır olması gerekir. Bu, daha uzun menzilli uçuşların ve daha büyük uçakların elektrifikasyonunu sağlamak için hafif pil teknolojisi gerektiren havacılık için bir zorluktur. Elektrik motorlarına güç sağlamak için gereken piller, bir pilin tipik olarak aynı miktarda enerji sağlayabilen bir jet yakıtı hacminden yaklaşık 30 kat daha ağır olduğu durumlarda, kendi başlarına uygulanabilir alternatifler olamayacak kadar ağırdır. Küçük elektrikli uçaklar başarılı bir şekilde kısa test uçuşları gerçekleştirmiştir, ancak bugün geleneksel uçaklarda olduğu gibi, insanlarla dolu büyük bir uçağın binlerce kilometre yol katetmesi için gereken piller, uçağı havalandırmayacak kadar ağır hâle getirecektir. Ancak, hibrid yakıt ve elektrikli modeller daha yeşil hava yolculuğu için ileriye dönük bir yol gösterebilir ve 15 yıl içinde devreye alınabilir^[2].

4. YÜRÜTÜLEN HİBRİD UÇAK PROJELERİ

4.1 Akademik Hibrid Elektrikli Uçak Projeleri

Pil-ağırlık dengesizliği pek çok araştırmada uçuş için yeterli güç üretebilecek pil denklemini çözmeye odaklanan çeşitli araştırmalarda ele alınmaktadır. Bu problemi hedef alan projelerden biri olan ve AB tarafından finanse edilen HASTECS projesi de bir uçağın ağırlığının nasıl azaltılabileceğini araştırmak üzere hayata geçirilmiştir.

HASTECS projesinin amaçlarından biri, 2035 yılına kadar kilogram başına 10 kilowatt'a ulaşmak için Tesla elektrikli otomobilde olduğu gibi bugün kullanılan elektrik motorlarının güç-ağırlık oranını iki katına çıkaracak bir elektrik motoru tasarlamaktır. Ayrıca proje ekibi, güç dönüştürücülerin güç-ağırlık oranını aynı dönemde

kilogram başına 25 kilowatt'a çıkarmak istemektedir. Bu iki hedefe ulaşmak, hibrid bir uçağın 2025'te tahmin edilenden yaklaşık 1.600 kilogram daha hafif olmasını ve yüzde 10'a kadar daha az yakıt yakmasını sağlayacaktır.

Yaklaşık dört yıllık bir çalışmanın ardından HASTECS ekibi, elektrik motorları konusunda hedeflerine ulaşmıştır. Örneğin, elektromanyetik malzemeler kullanarak yapılarını optimize edebilmeyi başarmışlardır; ayrıca Litz telleri adı verilen özel teller kullanmak da performanslarını artırmaya yardımcı olmuştur. Motorlar boyutları küçüldüğünde daha fazla ısındığından, ekip üyeleri ayrıca dahili bir soğutma sistemi kullanarak onları soğutmanın daha verimli bir yolunu bulmuştur^[2].

Daha sürdürülebilir havacılığa olan ihtiyacı karşılayan sektör, uçak tasarımlarında ve güç yönetiminde devrim yaratmanın yollarını araştırmaktadır. Bu bağlamda HASTECS projesi, verimli hibrid elektrik tahrikli radikal uçak konfigürasyonlarının geliştirilmesi sorununun üstesinden gelmeye adaydır. Akademik araştırmacılar tarafından oluşan bir konsorsiyum ile bu girişim, çevresel kısıtlamaları göz önünde bulundurarak elektrikli ve termal bileşenleri entegre ederek karmaşık hibrid güç zincirini optimize etmeyi amaçlamaktadır. Proje, elektrikli makinelerin özgül gücünün iki katına çıkarılması ve konvertör güçlerinin artırılmasıyla ağırlıkta 1,8 tonluk bir azalma öngörmekte, bu da kısa mesafeli uçuşlarda yakıt tüketiminde yüzde 3,5 oranında önemli bir azalma anlamına gelmektedir. Yardımcı kaynaklardaki ve sistem boyutlarındaki gelişmelerle tamamlandığında, bölgesel uçuşlarda toplam enerji tüketimi yüzde 20'nin üzerinde azaltılabilecektir^[6].

AB tarafından finanse edilen HECARRUS projesi de sifıra yakın emisyon sağlayan hibrid elektrikli tahrike dayalı, 19 yolcu kapasiteli bir banliyö uçağının tam tasarım döngüsüyle ciddi bir teknolojik ilerleme örneği olmuştur. Uçaktaki çeşitli bileşenlerin hibrid elektrikli tahrik kullanılarak birleştirilmesi zorlu bir iş ve HECARRUS, tasarım araçlarını ve simülasyonlarını kullanarak olağanüstü sonuçlarla bu zorlu işin üstesinden gelmiştir. HECARRUS, gaz türbini, elektrik gücü ve termal yönetim sistemlerinin yanı sıra uçağın kendisini tüm görev profili boyunca kapsayan ana konfigürasyon bileşenlerinin tasarımını, entegrasyonunu ve optimizasyonunu içermektedir. Potansiyel faydaların analizlerine göre, önerilen HECARRUS konfigürasyonu, 19 yolcu kapasiteli banliyö uçağının CO₂, nitrojen oksit ve gürültü emisyonlarını sırasıyla yüzde 34,3, yüzde 30,5 ve yüzde 20 oranında azaltabilmektedir. Üretilen bilgi birikimi ve HECARRUS bünyesinde eğitilen araştırmacılarla birlikte proje, havacılık sektörünün 2050 yılına kadar sifıra yakın emisyonlar için tekrar rayına oturmasına yardımcı olacak gibi görünmektedir^[3].

Hibrid uçak tasarımı için farklı konseptleri araştıran diğer bir proje ise yine AB'nin FutPrInt50 EU projesidir. FutPrInt50 EU, 2035-2040 yılına kadar 50 koltuğa kadar sınıfta yer alan ticari hibrid elektrikli uçağın hizmete girişini hızlandıracak teknolojileri ve konfigürasyonları belirleyip geliştirmeyi hedeflemektedir. FutPrInt50 EU, üniversiteler, KO-Bİ'ler, OEM'ler (orijinal ürün üreticisi) ve çeşitli kuruluşlardan oluşan uluslararası bir konsorsiyumu bir araya getirmiştir.



FutPrInt50 EU, karbon nötr havacılığa doğru yolculukta temel zorluklar olan enerji depolama, enerji hasadı ve termal yönetim konularına özel olarak odaklanmaktadır^[7].

FutPrInt50 EU araştırmacıları, havacılığın derinlemesine dekarbonizasyonuna odaklanarak, bu sınıftaki hibrid elektrikli uçaklar için umut verici modelleme ve simülasyon araçları, yenilikçi uçak elektrifikasyon teknolojileri ve teknoloji ve düzenleme için ortak bir yol haritası geliştirmeyi amaçlamaktadır. Proje süresi boyunca, bu pazar segmentinde gelecekteki bir simülasyon için temel teknolojilerin belirlenmesine yönelik bir uçak seviyesi analizi de gerçekleştirilecektir^[8].

FutPrInt50 EU, daha düşük CO₂ havacılık ayak izinin yanı sıra pervane gürültüsü emisyonlarını da en aza indirmeyi hedeflemektedir. Mevcut bölgesel uçaklardan yakıt ve gürültü açısından daha verimli olan yeni tip hibrid elektrikli 50 koltuklu uçaklar, demiryolu veya karayolu taşımacılığında daha düşük altyapı maliyetleriyle küçük şehirler arasında noktadan noktaya yeni bağlantıların açılmasına katkıda bulunabilecektir.

Projeden beklenen etkiler ise oldukça geniştir^[9]:

- **Emisyonuz havacılığa doğru yeni paradigma değişimi:** FutPrInt50 EU, hibrid elektrikli tahrik, güç üretim sistemi ve bunların uçak düzeyinde entegrasyonunun derinlemesine, sistematik bir bilimsel analizini ve modellemesini sağlayacaktır. Bu, önemli kolaylaştırıcı teknolojileri vurgulayacak ve Flightpath 2050 hedeflerine ulaşılmasına katkıda bulunmak amacıyla doldurulması gereken mevcut teknoloji boşluklarını ortaya çıkaracaktır.
- **Havacılığın orta ve uzun vadeli rekabet gücünün güçlendirilmesi:** FutPrInt50 EU ile ilgili araştırma, katılımcı üniversitelerin, araştırma enstitülerinin ve

havacılık şirketlerinin, çok disiplinli tasarım araçları ve sistem bileşenleri açısından bilgilerini ve rekabet güçlerini radikal bir şekilde geliştirilmiş entegre uçak sistemi tasarımını destekleyerek geliştirmelerine ve artırmalarına olanak tanıyacaktır.

- **Avrupa havacılık araştırma topluluğunun son derece iddialı bir konuya katılımı:** Gelecekteki elektrikli uçakların gelişimini hızlandırmak amacıyla, açık üst seviye uçak gereksinimleri, görev özellikleri, başarı rakamları ve uçak konfigürasyon tanımları oluşturulacak ve çapraz değerlendirme için çözümler ve sistem entegrasyonu kavramları, Açık Vaka Çalışması şeklinde havacılık araştırma topluluğuyla paylaşılacaktır. Güçlü tasarım metodolojisi ile FutPrInt50 EU, kapsamlı bir tekno ekonomik çevresel risk analizine olanak tanıyacaktır. Bu, yol haritalarının ve doğrudan Ar-Ge eylemlerinin gelecekteki kullanımını ve düzenlenmesini destekleyecektir.
- **Yol haritalarının oluşturulması ve temel kolaylaştırıcı teknolojilerin önceliklendirilmesi:** FutPrInt50 EU, hem önemli etkinleştirme teknolojileri hem de ilgili düzenleyici çerçeve için hibrid elektrikli bölgesel bir uçak için bir yol haritası tasarlayacaktır. Dahası, FutPrInt50 EU ortakları, hibrid elektrikli tahrik ve güç üretim sistemlerinin bu görev için optimize edilmiş bir uçak gövdesine entegrasyonuna yönelik çığır açıcı teknolojilerin doğrulanması için gereken test altyapılarını işbirliği içinde tanımlayacaktır. Bu, hâlihazırda mevcut olan altyapıyla eşleştirilecek ve gelecekteki uyumlaştırılmış ve birlikte çalışabilir araştırma altyapıları için kısa bir yol haritası elde edilmesini sağlayacaktır. Gelecekteki teknolojik keşifler, stratejik araştırma altyapıları ve düzenleyici politikalar tüm Avrupalı paydaşlarla paylaşılacaktır.

- **Yeni nesil göstercilerin temelleri:** FutPrnt50 EU, mevcut en son teknolojinin, temel sistem etkinleştiricilerinin, ilgili simülasyon modellerinin ve kalan teknoloji boşluklarının kapsamlı bir bütünsel değerlendirmesine dayanarak, Flightpath tarafından belirlenen iddialı hedeflere ulaşmak için gerekli olan entegre geliştirme platformlarını ve gelecekteki Avrupalı göstercileri önerecektir.
- **BM'nin sürdürülebilir kalkınma hedefi 7'ye katkı:** BM'nin yedinci sürdürülebilir kalkınma hedefi, herkes için uygun fiyatlı, güvenilir, sürdürülebilir ve modern enerjiye erişimin sağlanmasını ifade etmektedir. Gelecekteki hava trafiği büyümesinin çevresel etkilerini azaltmak için radikal biçimde yeni teknolojilerin geliştirilmesi ve doğrulanması gerekmektedir. FutPrnt50 EU, yerleşik enerji üretimi için kullanılan ana taşıyıcı için sürdürülebilir yakıtların entegrasyonunun teknik ve ekonomik etkisini ele alacaktır.
- **Yenilik ve rekabet gücünün daha da artırılması:** FutPrnt50 EU, geniş bir bilgi tabanını paylaşarak ve farklı araştırma geçmişlerine sahip mevcut ana akım fikirlere yapıcı bir şekilde meydan okuyarak güçlü bir uluslararası işbirliği kurmuştur. Bu uluslararası işbirliği aynı zamanda dünya çapında mevcut araştırma alt-yapılarının verimli bir şekilde kullanılmasına da olanak tanımaktadır. Geleceğin önde gelen profesyonellerinin Flightpath 2050'nin zorluklarına hazırlanmasına yardımcı olmak için proje ortakları ayrıca FutPrnt50 EU akademisini kuracaktır.

4.2 Hibrid Uçak Projeleri İle Öne Çıkan Kurumlar

4.2.1 NASA Elektrikli Güç Aktarma Organları Uçuş Gösterimi

ABD'de NASA ve endüstri ortakları elektrikle çalışan tahrik sistemleri geliştirmeleri için havacılığın devlerini teşvik etmektedir. Bu çerçevede GE Aerospace ve Boeing'in Aurora Flight Sciences, 150 ila 180 koltuklu tek koridorlu bir uçağa güç sağlayabilen bir hibrid elektrikli tahrik konseptini geliştirmek için birlikte çalışmaktadır. 2021'den bu yana devam etmekte olan Elektrikli Güç Aktarma Organları Uçuş Gösterimi (Electrified Powertrain Flight Demonstration EPFD) adı verilen projenin ana hedefi bir Saab 340 uçağının hibrid tahrik sistemine dönüştürülmesidir. GE Aerospace'in CT7 motorlarından ikisi, megawatt sınıfı paralel hibrid elektrik sistemini göstermek için elektrikli tahrik üniteleriyle birleştirilecektir. Projenin amacı, megawatt güç seviyelerine sahip hibrid tahrik sistemlerinin 30-70 yolcu taşıyan kısa mesafeli turboprop uçaklara ve 180 yolcuya kadar kapasiteli bölgesel tek koridorlu ticari uçaklara geçişini hızlandırmaktır. EPFD ayrıca yeni nesil hibrid elektrikli uçaklar için yeni standartların geliştirilmesini de sağlayacaktır^[1].

EPFD kapsamında magniX ve ortakları AeroTEC ve Air Tindi ile yapılan bir başka NASA çalışması, iki Pratt & Whitney PT6A motor ve iki magniX magni650 elektrikli tahrik ünitesiyle çalışan bir uçak konseptini geliştirecektir.

Bu proje daha kısa mesafeli, 19 ila 50 koltuklu pazarı hedeflemektedir.

EPFD projesi kapsamında ekipler, yakın gelecekte en az iki gösterimi tamamlamayı ve ticari filoya elektrik sistemlerini tanıtmayı hedeflemektedir. GE Aerospace mühendisleri 2022'de gerçekleştirilen irtifa entegrasyon testinin sonuçlarını ve diğer dahili GE Aerospace programlarından gelen bilgileri değerlendirmekte ve bunları pilotlu bir uçak için bir tahrik sistemi oluşturmak amacıyla kullanmaktadır.

Bir Boeing iştiraki olan Aurora Flight Sciences da, GE Aerospace hibrid elektrik sistemini, 36 yolcu taşımak üzere tasarlanmış çift motorlu bir turboprop olan Saab 340 uçağına entegre etmektedir. Bu entegrasyon çalışması, uçağın yeni tahrik sistemi için değiştirilmesini ve eklenen motor jeneratörüne uyacak şekilde bir motor bölümü üretilmesini içermektedir. Ayrıca, tahrik sistemini uçuş güvertesinden kontrol etmek ve her şeyin birlikte güvenli bir şekilde çalıştığından emin olmak için bir arayüz tasarımları gerekmektedir. Her şey yolunda giderse, ekip 2020'lerin ortalarında hibrid tahrikli Saab 340'ı test etmeyi planlamaktadır.

Bu teknolojinin uçuş sırasında gösterilmesi, GE Aerospace ekiplerinin irtifadaki bir uçaktan yüksek voltajda elektrik enerjisi iletme, diğer uçak sistemleriyle elektromanyetik paraziti inceleme, sistem güvenliği, uçak seviyesinde arıza yönetimi ve koruma, kütle ve ağırlık merkezi yönetimi ve termal yönetim ile ilgili sorunları ele almasına olanak tanıyacaktır^[1].

NASA'nın EPFD programı ticari havacılık için hibrid elektrikli uçuşun fizibilitesini kanıtlamaya yardımcı olma noktasında önemli bir çabayı temsil etmektedir^[10].

4.2.2 GE Aerospace

GE Aerospace, EPFD projesi için uçak test yatağı için yeni tasarımını 2023'ün Temmuz ayında dünyanın en büyük hava gösterisi olan Wisconsin'deki Oshkosh hava gösterisinde tanıtmıştır. EPFD projesinde test edilecek modifiye edilmiş Saab 340 uçağında GE Aerospace'in CT7 motorları kullanılacaktır. Böylece yer ve uçuş testleri için entegre, megawatt sınıfı bir hibrid elektrikli tahrik sistemi geliştirilmektedir. Uçak, bir elektrik motoru/jeneratörü, güç dönüşümü, enerji yönetimi ve diğer teknolojileri göstermek için geleneksel CT7 gaz türbinlerine paralel olarak hibrid elektrik sistemini kurmak için *Aurora Flight Sciences*'in yardımıyla değiştirilecektir^[10].

GE Aerospace 2013 yılında, uçaklar için yeni elektrik enerjisi üretim sistemleri geliştirmek üzere Dayton Üniversitesi ile Elektrik Enerjisi Entegre Sistemler Merkezini (Electrical Power Integrated Systems Center -EPISCenter) açtığında ilk önemli adımlarından birini atmış ve o tarihten bu yana çok önemli bileşenler olan motor tahrikli pervane testleri ve simüle edilmiş güç aktarımları yoluyla büyük adımlar atmıştır. GE Aerospace yeni bir test hücresi ve ek ekipman eklemek için EPISCenter'a 20 milyon dolarlık bir yatırım yaptığını duyurmuştur.

NASA Elektrikli Uçak Test Yatağı tesisi olan NEAT'de yapılan test, 45.000 feet'in üzerindeki irtifaları simüle

etmiştir. NEAT şu anda yüksek elektrik ve yüksek irtifa koşullarını simüle edebilen ve aynı zamanda bir elektrikli güç aktarma organına sığacak kadar büyük olan tek tesis. Türünün tek örneği olan bu tesis sayesinde GE Aerospace ve NASA, güç aktarımının fizibilitesini doğru bir şekilde test edebilmiştir^[10].

4.2.3 Boeing

Boeing, tamamen elektrikli, otonom, yolcu taşıyan uçaklar üretmek için bu alanlarda uzmanlaşmış bir şirket olan Wisk Aero'ya 2022 yılı başlarında 450 milyon dolar yatırım yapmıştır^[11].

Boeing hâlihazırda, uçaklar için hibrid bir elektrikli tahrik sisteminin geliştirilmesi, bir test uçağının modifiye edilmesi ve uçak motoru üreticisi GE Aerospace tarafından geliştirilen megawatt sınıfı hibrid elektrikli uçak tahrik sisteminin uçuş testini desteklemesi üzerinde çalışmaktadır^[4].

4.2.4 Airbus

2010 yılında Airbus, dünyanın ilk tamamen elektrikli, dört motorlu akrobasi uçağı CriCri'yi geliştirerek elektrifikasyon yolculuğuna başlamıştır. O zamandan bu yana şirket, tamamen elektrikli, çift pervaneli uçağı E-Fan ve Elektrikli Dikey Kalkış ve İniş (eVTOL) demonstratör projeleri Vahana ve CityAirbus NextGen sayesinde uçuşun elektrifikasyonunda önemli ilerleme kaydetmiştir. E-Fan'ın halefi olan E-Fan X, seri hibrid elektrikli tahrik hakkında paha biçilmez bilgiler sağlamıştır^[12].

Airbus ayrıca, Rolls-Royce ve Siemens ile ortaklaşa geliştirilen hibrid bir elektrikli uçak gösterimi olan E-Fan X'i geliştirmiş, ancak proje pandemi sırasında iptal edilmiştir^[4].

Kasım 2022'de Airbus ve Renault Grubu, her iki şirketin elektrifikasyon yol haritalarını hızlandırmak için bir araştırma ve geliştirme anlaşması imzalamıştır. Haziran 2023'te de Airbus ve STMicroelectronics, havacılık endüstrisinin ZEROe yol haritası veya CityAirbus NextGen gibi hibrid ve tam elektrikli uçaklara geçişinin önemli bir kolaylaştırıcısı olan yeni nesil yarı iletkenler üzerindeki araştırmaları ilerletmek için bir anlaşma imzalamıştır^[12].

4.2.5 Rolls-Royce

Rolls-Royce, Gelişmiş Hava Hareketliliğine öncülük etmek için yeni teknolojiyle hibrid elektrikli uçuşu ilerleten şirketlerden biridir. Şirket, hibrid elektrik uygulamaları için tasarlanmış yeni bir küçük motor içeren turbojeneratör teknolojisinin gelişimini resmen duyurmuştur. Rolls Royce'un turbojeneratör teknolojisi, elektrikli uçuşun destekleyebileceği rotaların genişletilmesi anlamına gelmektedir. Böylece daha fazla yolcunun düşük ila net sıfır emisyonlu uçaklarda daha fazla seyahat edebilmesini sağlayacaktır. Sistem, ölçeklenebilir güç tekliflerine sahip yerleşik bir güç kaynağı olacak, Rolls-Royce elektrikli tahrik portföyünü tamamlayacak ve sürdürülebilir havacılık yakıtlarında ve daha sonra hidrojen yakma yoluyla kullanıma sunulduğunda uzatılmış menzil sağlayacaktır.

Mevcut pil teknolojisi, tamamen elektrikli tahrik, eVTOL ve sabit kanatlı banliyö uçaklarının şehirler içinde

ve arasında kısa uçuşlar ve Norveç ve İskoç Adaları gibi yerlerde adadan adaya uçuşlarının sağlanacağı anlamına gelmektedir.

Almanya, Norveç ve Macaristan'da bulunan Rolls-Royce uzmanları, turbojeneratör tasarımını geliştirmekte, sistem entegrasyonu üzerinde çalışmakta ve uçuş sırasında akıllı güç dağıtımını sağlamaya odaklanmaktadır. Turbojeneratör, kalkıştan sonra pilleri şarj edecek veya pervanelere doğrudan güç vererek uçağın uçuş sırasında güç kaynakları arasında geçiş yapmasını sağlayacaktır. Bu teknolojinin araştırma ve geliştirme çalışmaları kısmen Alman Ekonomi ve İklim Eylemi Bakanlığı tarafından finanse edilmektedir.

Rolls-Royce, tamamen elektrikli ve hibrid elektrikli güç ve tahrik sistemleri bu teknolojilerini zaman içinde daha büyük platformlara ölçeklendirmeyi hedeflemektedir. Rolls-Royce, elektrik sistemleri için bakım hizmetleri sunmak üzere mevcut ağını da geliştirmeye hazırlanmaktadır. Ayrıca Rolls-Royce Power Systems, elektrikli uçakların hızlı şarj edilmesini desteklemek ve vertiportlara güvenilir, uygun maliyetli, iklim dostu ve sürdürülebilir güç sağlamak için mtu mikro şebeke çözümleri sunmaktadır^[13].

4.2.6 Heart Aerospace

İsveçli üretici Heart Aerospace 2021'de ES-19 modelinin eksiksiz elektrikli tahrik sisteminin yer tabanlı bir prototipi ile testler gerçekleştirmiştir. ES-19'un yerini alan 30 yolcu kapasiteli bir elektrikli uçak olan Heart ES-30 ise henüz kapsamlı bir şekilde test edilmemiştir, ancak ES-30 için tam uçuş simülatörüne sahip tam ölçekli bir entegre test tesisi inşa edilmiştir. Konsept kanıtı bir uçağın 2024'te piyasaya sürülmesi ve uçuş testlerinin 2026'da başlaması planlanmaktadır. Heart, ES-30'un yanı sıra diğer hibrid elektrikli uçaklar üzerinde de çalışmalarını sürdürmektedir^[4].

Air Canada ve United Airlines, ES-30'un ilk müşterileri arasında yer almıştır. Air Canada, 30'a kadar ES-30 için imza atarken, United Airlines 100 uçağa kadar olan tahhüdünü teyit etmiştir. Heart, ilk uçağını 2028'de teslim etmeyi hedeflemektedir. Uçak gövdesinin hibrid elektrik teknolojisi, ES-30'da ek menzile izin vermek ve yakıt rezervi gereksinimlerini karşılamak için uçuş sırasında kullanılabilir. Önerilen uçak, yalnızca elektrik gücüyle 200 kilometre (125 mil) veya hibrid elektrik teknolojisini kullanarak 400 kilometre uçabilecektir. ES-30'un boyutu ve menzili, uçağın mevcut havayolu rota ağlarında kullanılabilirliği anlamına gelmektedir. Örneğin ek menzil, uçak için New York ile Boston veya Washington D.C. arasında aktarmasız uçuşları mümkün kılacaktır. Air Canada CEO'su Michael Rousseau ES-30'ların "on yılın sonuna kadar küçük pazarlara uçmak için mevcut uçakların yerini almak için iyi bir konumda" olduğunu belirtmiştir. Air Canada ve United Airlines'a ek olarak, Heart'ın Braathens Regional Airlines, Icelandair, SAS ve Yeni Zelanda'nın Sounds Air şirketinin yanı sıra İsveçli Rockton'dan 96 ES-30 için niyet mektupları bulunmaktadır^[14]. Air Canada aynı zamanda Heart Aerospace'e 5 milyon dolar yatırım yapmıştır. Aynı zamanda, İsveçli havacılık şirketi Saab da Heart Aerospace'den 5 milyon dolar tutarında hisse satın almıştır^[15].

4.2.7 Diğer Hibrid Uçak Geliştiricileri

Birçok şirket, hibrid elektrikli uçaklar veya ilgili teknolojiler geliştirmek, yeni tahrik sistemleri oluşturmak, mevcut uçakları güçlendirmek ve tamamen elektrikli uçaklar geliştirmek için çalışmaktadır. Örneğin Sikorsky Aircraft, hibrid eVTOL uçak gösteri aracı geliştirmektedir. Sikorsky Otonomi Araştırma Uçağı (SARA), yeniden yapılandırılmış bir S-76B'dir. 2023'ün başlarında, ZeroAvia, Dornier 228 test platformundaki uçağını, kabinde iki yakıt hücresi ve bir lityum iyon bataryadan oluşan prototip bir hidrojen-elektrik aktarma organıyla değiştirilen bir turboprop'a uçurmuştur^[4].

Eviation, bölgesel havayolları için dokuz yolcu alacak tamamen elektrikli Alice'i geliştirmektedir. Cape Air, Eviation'ın on yılın ortasına kadar onaylamayı hedeflediği Alice için taahhütte bulunmuştur. Surf Air Mobility ve Southern Airways Express ise, 2024 veya 2025'te yenilenmiş hibrid elektrikli Cessna Caravan'ları piyasaya süren ilk şirketler olmayı hedeflemektedir^[14].

Büyük bir hibrid elektrikli yolcu uçağı geliştirmek, önemli teknolojik ilerlemeler ve düzenleyici onayı gerektirecektir. Yine de bazı şirketlerin görüş alanında bu daha büyük uçaklar bulunmaktadır. Örneğin, Wright Electric, 2030'da fırlatılması planlanan 800 mil menzile sahip 186 koltuklu bir ticari jet ile 2026'da havalanabilecek, Wright Spirit adında 100 koltuklu elektrikli bir uçak geliştirmektedir. BAe 146 bölgesel jet, orijinal olarak BAE Systems tarafından üretilmiştir^[4].

5. HİBRİD UÇAKLARIN GELECEĞİ

Hibrid elektrikli uçaklarla ilgili dünyanın çeşitli merkezlerinde yürütülen çalışmalar sürdürülebilir havacılığın geleceği açısından umut vericidir. Yukarıda bahsedilen NASA, GE Aerospace ve Boeing'in işbirliği içinde yürüttüğü "Elektrikli Güç Aktarma Organları Uçuş Gösterimi (Electrified Powertrain Flight Demonstration EPFD)" programı, hibrid elektrikli tahrik için tasarım zorluklarını ele almaya paralel olarak, tüm sistemi çalıştırmanın ve sürdürmenin yolları üzerinde de çalışmaktadır.

Ticari bir uçağa operasyonel irtifalarda entegre edilmiş hibrid elektrikli güç aktarma organının uçuş testi, ekibe gelecekteki ticari operasyonlar için ekipman ve prosedürler geliştirmek için pratik fırsatlar sağlayacaktır. Bu çalışma kokpit ekranlarını ve zemin bakımını içermektedir.

Test sırasında pilotlar ve yer personeli, pil durumu gibi uğraşmaları gereken yeni verilere sahip olacaktır. Kontrol mühendisleri, hibrid tahrik için uygun uçuş güvertesi kontrol ve geribildirim yazılımı geliştirmektedirler. Diğer bir zorluk, geleneksel bir uçakta gözlemlenen her şeyden çok daha yüksek seviyelerde elektromanyetik girişim (EMI) ile uğraşmaktır. Ayrıca ekipler, modifiye edilmiş uçağı uçuşa hazırlarken, hangi yer destek ekipmanının gerekli olduğu, yerdeki ve uçuş sırasında yeni elektrik sistemlerinin güvenliğini sağlamak için başka hangi işlemlerin gerekli olduğu gibi ayrıntılar üzerinde



çalışmaktadır. Tüm bu bilgiler, havacılık dünyasının elektrifikasyondan nasıl yararlanabileceğini ve 2030'lar da potansiyel ticari girişe nasıl hazırlanabileceğini tanımlamaya yardımcı olacaktır^[1].

Riski azaltmak için ekip, entegrasyon ve uçuş testleri için kontrollü bir ilerleme yaklaşımı kullanmaktadır. İlk olarak, Saab 340, temel test verilerini oluşturmak için değişiklik yapılmadan uçurulacak ve programın, değişiklikler yapıldıktan sonra uçak performansındaki ve teknik özelliklerdeki değişiklikleri ölçmesine olanak tanınacaktır. Daha sonra, motor bölümlerinden biri hibrid elektrikli bileşenleri içerecek şekilde değiştirilecektir. Bu, ekibin yalnızca türbin motoru gücünü kullanırken bir dizi ağırlık, irtifa ve hava hızı üzerinden uçak performansını ve yol tutuş özelliklerini değerlendirmesine olanak tanıyacaktır. Elektrikli bileşenler daha sonra metodik olarak aşamalı şekilde devreye sokulacaktır: İlk uçuş, uçağın bir tarafında hibrid elektrikli bir tahrik sistemine ve diğer tarafında geleneksel bir motora sahip olacaktır. Sonunda, uçak, uçağın her iki tarafında hibrid elektrikli tahrik sistemleriyle çalışacak şekilde değiştirilecektir. Bu son konfigürasyon çift yönlü güç aktarımı yapabilecektir. Bu, elektrikli bir motorda üretilebildiği ve güç kabloları ve uçağın kontrol sistemleri aracılığıyla diğer motora aktarılabilirdiği hibrid elektrikli güç aktarma organları için benzersiz bir avantajdır. Aynı zamanda elektrifikasyonun sağlayabileceği esnekliğin bir örneğidir ve tasarımcılara yakıt tüketimini optimize etmek ve güvenliği artırmak için güçlü seçenekler sunmaktadır^[1].

Tamamen elektrikli büyük bir ticari uçak şu anda pilin performansı ile sınırlı olduğundan, NASA'nın EPFD programı uçağın toplam itici gücünün yalnızca bir kısmını değiştirmek için elektrik gücü kullanan sistemlere odaklanmaktadır. Bununla birlikte, elektrikli tahrik için piller ve diğer yapıtaşları hâlâ daha iyiye gitmekte ve araştırmacılar, daha yüksek düzeylerde (bir kat veya daha fazla) elektrik gücüne sahip bir gelecek görmektedir. Bu, hava trafiği emisyonlarından ve karbon kullanımından daha büyük bir kesinti gerektirecektir.

Şimdilik, EPFD uçuş gösterileri NASA ve endüstri ekiplerine bugüne kadarki ilerlemeden yararlanmak için büyük bir fırsat verecektir. Bunlar, megawatt sınıfı ölçekte elektrikli tahrikin sertifikalandırılması için uygun bir yol oluşturmaya yönelik büyük bir adım olacaktır. Bugüne kadar gelecekteki elektrikli tahrik düzenlemeleri için şaşırtıcı bir dizi tasarım yayınlanmıştır ve gösterici üzerinde yapılan çalışma, birçoğunun önünü açmayı amaçlamaktadır.

Havacılık endüstrisinin 2050 yılına kadar net sıfır karbon emisyonu konusundaki iddialı hedefine ulaşması için hem devrim niteliğinde yeni teknolojilere hem de yeni enerji kaynaklarına ihtiyaç vardır. Net sıfıra ulaşmak için tek bir çözüm yoktur, ancak hibrid elektrik teknolojilerinin esnekliği ve uyumluluğu, önemli bir rol oynayabilecekleri anlamına gelmektedir. Hibrid elektrikli sistemler, sürdürülebilir havacılık yakıtı ve hatta hidrojen gibi alternatif jet yakıtlarıyla da uyumludur.

Amerikan havacılık endüstrisindeki üç devin (NASA, GE Aerospace ve Boeing) hibrid elektrikli uçakları

ilerletmek için ortak çabaları ve taahhütleri, uçuşun geleceğinin giderek daha elektrikli olacağını işaretlerini taşımaktadır^[1].

Birçok uzman, hibrid ve elektrikli uçakların sonunda gerçek olacağına inanmaktadır. Havayolu liderleri, ölçeklenebilir teknolojilere doğru önemli bir ilk adım olarak kısa, kentsel banliyö rotaları için ilk olarak erken hibrid veya yalnızca elektrikli uçakları kullanmayı planlamaktadır^[4].

Havacılık ve uzay mühendisi Yrd. Doç. Dr. Gökçin Çınar, elektrikli uçakların geleceği hakkında *The Conversation*'a, hibrid tahrik sistemleri kullanarak daha büyük jetlerde pillerin yakıt yakma açısından faydaları olduğunu belirtmiştir. Çınar, daha küçük bölgesel uçaklar için 2030-2035 yıllarının hedeflendiğine ve kalkış ve tırmanış sırasında pilleri güç desteği olarak kullanmanın umut verici bir seçenek olduğuna dikkat çekmektedir. Çınar da hibridizasyonu, daha büyük jetler için orta vadeli bir seçenek, ancak bölgesel uçaklar için kısa vadeli bir çözüm olarak görmektedir^[4].

6. HİBRİD UÇAKLARIN AVANTAJ VE KAZANIMLARI

Hibrid elektrikli uçakların hava yolculukları üzerinde en önemli faydalarından biri, emisyonları azaltma ve hava yolculuğunun çevresel etkisini iyileştirme potansiyelleridir. Dünya çapında iklim değişikliği ve hava kirliliği konusunda artan endişeler ve yeşil teknolojiye ilgi hiç olmadığı kadar yoğundur. İklim değişikliğine önemli bir katkıda bulunan hava yolculuğunun etkisinden endişe duyan insanlar ve şirketler için hibrid elektrikli uçaklar büyük bir teknolojik değişimi temsil etmektedir.

Hibrid elektrikli uçaklar ayrıca yakıt tüketimini ve bakım maliyetlerini azaltarak havayollarının işletme maliyetlerini düşürebilir. Bu durum hava yolculuğunu daha uygun fiyatlı ve daha fazla insan için erişilebilir hâle getirebilir. Ayrıca, gelişmiş elektrik motorları ve enerji depolama sistemleri ile hibrid elektrikli uçaklar, daha az gecikme ve iptalle daha hızlı ve daha güvenilir hava yolculuğu sağlayabilecektir. Kısa menzilli, uygun fiyatlı seyahat ve eVTOL teknolojisinin eklenmesiyle, hibrid elektrikli uçaklar şu anda geleneksel uçaklar tarafından erişilemeyen yeni rotalar ve destinasyonlar açabilme potansiyeline sahiptir. Bu, daha fazla topluluğu birbirine bağlamaya ve yetersiz hizmet alan bölgelerde ekonomik kalkınmayı teşvik etmeye yardımcı olabilir.

Son olarak, hibrid elektrikli uçaklar, özellikle pil destekli kalkış ve inişlerde, havalimanlarında ve çevresinde gürültü kirliliğini azaltabilecektir ve geleneksel uçaklardan daha sessizdirler^[6].

Hibrid elektrikli uçaklar, karbon emisyonlarını en aza indirirken önemli bir menzilin elde edildiği nispeten uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır. Hibrid bir elektrikli uçakta, pil paketleri elektrik motoruna güç sağlar ve bir yanmalı motor jeneratörü yakıt yakarak güç sağlar. İtici gücün egzoz havasından geldiği geleneksel gaz türbinli motorların aksine, hibrid motor jeneratörü elektrik

motoruna ve aküye enerji besler. Sonuç olarak, motor fanı veya pervaneyi çalıştırır.

Hibrid bir elektrik verimliliği zincirinde, motora uygun akımı sağlamak için bir jeneratör çekirdeği, bir elektrik motoru ve bir invertör vardır.

Yarı iletkenlere geçişin geliştirilmesi, invertörlerin genel verimliliğini önemli ölçüde artırmıştır. Daha spesifik olarak, silikon-karbür bazlı bir yarı iletken, geleneksel silikon bazlı bir yarı iletkenle kıyasla kırılma elektrik alan kuvvetini 10 kat artırmaktadır. Silikon-karbür tabanlı bir invertörün ortaya çıkan operasyonel verimliliği yüzde 98'dir. Küçük sistem kayıpları varsayıldığında, tipik bir hibrid elektrik sisteminin zincir verimliliği yaklaşık yüzde 94 olarak ortaya çıkmaktadır. Bu, yararlı işe dönüştürülebilir toplam kullanılabilir enerjinin yüzdesidir (bir fan veya pervane çalıştırmak için)^[16].

Bir başka kazanç ise güvenli kullanımdır. Gaz türbini motorlarıyla donatılmış geleneksel uçaklar, güvenli operasyonlar için yerleşik birden fazla yedeklilik seviyesine sahiptir. Çift motorlu uçaklar, gücünün yarısı (bir motor) kaybolduğunda bile güvenli operasyonlara devam edebilmelidir. Modern turbofan motorların boyutlandırılmasının nedenlerinden biri de budur.

Bununla birlikte, hibrid bir elektrikli uçakta, jeneratörün problem çıkarması durumunda pil yedek güç sağlar. Akü paketleri ve invertörler, normal olmayan çalışma prosedürlerinde yedeklilik sağlamak için çoğaltılabilir. Burada yedek pilin acil durum modunda aerodinamik kuvvetlerle (indüklenen sürtünme gibi) mücadele etmek için yeterli güce sahip olduğundan emin olmak önem taşımaktadır. Ayrıca, üç veya dört itici jeneratör kurulabilir. Bir jeneratörün kaybıyla, uçak geleneksel yakıt motorlu uçaklarda olduğu gibi gücün yarısını kaybetmez.

Pille çalışan elektrikli uçakların barındırdığı en önemli zorluk ise kısa menzildir. İki lokasyon arasındaki yolcu ve kargo talebini karşılamak için önemli bir uçuş menzili elde etmek binlerce kilogram pil gerektirmektedir. Yakıt kullanan gaz türbinli motorlar, bir elektrik motorundan en az 30 kat daha fazla güç sağlamaktadır. Benzer şekilde, bir litre jet yakıtı, bir litre lityum iyon pil takımından 20 kat daha fazla enerji depolamaktadır. Ayrıca, yakıt uçuş sırasında yanmakta ve bu da çok daha düşük bir iniş ağırlığı sağlamaktadır. Öte yandan, pil ağırlığı uçuş boyunca sabit kalmaktadır^[16].

7. HİBRİD ELEKTRİKLİ UÇAK PAZARININ DURUMU

Hibrid uçak pazarının büyüklüğünün 2023'teki 1,2 milyar dolardan 2030'a kadar yüzde 41,6'lık bir büyüme oranı ile 13,2 milyar dolara büyüyeceği tahmin edilmektedir. Hibrid uçak endüstrisi, kısa menzilli bağlantıya yönelik artan talep, teknolojik yakınsama ve alternatif ulaşım modlarına yönelik artan talep gibi faktörler tarafından yönlendirilmektedir^[17].

Hibrid elektrikli uçak pazarında büyüme eğilimini besleyen önemli itici güçler şöyle özetlenebilir^[18]:

- **Düşük Karbon Emisyonlarına Vurgu:** Havacılık endüstrisi, özellikle gelişmiş ekonomilerde karbon ayak

izini azaltmaya giderek daha fazla odaklanmaktadır. Elektrikli bileşen teknolojisindeki gelişmeler, nakliye uçaklarının çevresel etkisini azaltmaya yardımcı olabilecek hibrid elektrikli ve elektrikli uçakların benimsenmesini kolaylaştırmaktadır.

- **Çevre Koruma Endişeleri:** Çevrenin korunmasına yönelik artan taleple birlikte, hibrid havacılık sektörü, çevresel zorlukları ele almak ve emisyonları azaltmak için teknolojik yenilikleri teşvik ederek daha sürdürülebilir bir modele geçiş yapmaktadır.
- **Artan Hava Trafiği:** Hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde iç hat hava yolculuğundaki önemli büyüme, hava trafiğindeki artışa katkıda bulunmaktadır. Artan kişisel gelir ve harcanabilir gelir, daha fazla insanı hava yoluyla seyahat etmeye itmektedir.

Büyümenin önündeki başlıca engeller ise şunlardır^[18]:

- **Yüksek Bakım Maliyetleri:** eVTOL uçaklarının piyasaya ilk kez sürülmesi, hafif elektrikli uçak üretimi için yenilikçi malzemelerin tedarikini içeren yüksek üretim ve bakım maliyetleri nedeniyle engellenmektedir.
- **Pil Geliştirmenin Sınırlandırılması:** Elektrikli uçaklar için pil teknolojisi, özellikle yüksek güçlü hücre deşarjı ve hızlı şarj yetenekleri gerektiren eVTOL uçakları için ekonomik fizibilite açısından hâlâ erken aşamalarında.

Hibrid elektrikli uçak pazarının büyümesinde bölgesel öncü rolünde ise Avrupa ve Kuzey Amerika yer almaktadır. Airbus SE, Rolls Royce, Siemens AG, Boeing ve Easy Jet gibi büyük üreticilerin önemli bir varlığına sahip olan Avrupa'nın pazardaki en güçlü büyümeyi sergilemesi bekleniyor. Olumlu hükümet politikaları ve kurumsal jetlere erişim, bölgenin hibrid elektrikli uçaklara olan talebini artırmaktadır.

Kuzey Amerika ise önemli bir büyümeye tanıklık etmektedir. Özellikle Amerika Birleşik Devletleri'nin, havacılık sera gazı emisyonlarını azaltmaya yönelik düzenlemeler ve piyasa katılımcılarının artan Ar-Ge harcamaları nedeniyle Kuzey Amerika'daki en büyük elektrikli uçak pazarı olacağı tahmin edilmektedir^[18].

8. SONUÇ

Havacılık endüstrisinin 2050 yılına kadar net sıfır karbon emisyonu konusundaki iddialı hedefine ulaşması için hem devrim niteliğinde yeni teknolojilere hem de yeni enerji kaynaklarına ihtiyaç vardır. Net sıfıra ulaşmak için tek bir çözüm yoktur, ancak hibrid elektrik teknolojilerinin esnekliği ve uyumluluğu, önemli bir rol oynayabilecekleri anlamına gelmektedir. Hibrid elektrikli sistemler, sürdürülebilir havacılık yakıtı ve hatta hidrojen gibi alternatif jet yakıtlarıyla da uyumludur.

Küresel iklim değişikliği ile mücadele ve net sıfır karbon emisyonu hedefi doğrultusunda hibrid elektrikli uçakların küresel karbon emisyonlarına ciddi oranda katkı yapan havacılık endüstrisinde oyun değiştirici teknolojiler arasında yer alacağı öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] Jankovskychristine, Amy; Rogers, Andrewsbill; (2023), "Fly The Hybrid Skies", *IEEE Spectrum*, (30 Kasım 2023), <https://spectrum.ieee.org/fly-the-hybrid-skies>. (Erişim Tarihi: 24 Ocak 2024)
- [2] Ceurstemont, Sandrine; (2020), "How hybrid electric and fuel aircraft could green air travel", *Horizon*, (2 Kasım 2020), <https://projects.research-and-innovation.ec.europa.eu/en/horizon-magazine/how-hybrid-electric-and-fuel-aircraft-could-green-air-travel>. (Erişim Tarihi: 24 Ocak 2024)
- [3] *European Commission*, (2019), "A pioneering optimised hybrid-electric commuter plane concept", <https://cordis.europa.eu/article/id/443646-a-pioneering-optimised-hybrid-electric-commuter-plane-concept>. (Erişim Tarihi: 24 Ocak 2024)
- [4] *Amprius*, (2023), "The Future of Hybrid Electric Aircraft", (23 Mayıs 2023), <https://amprius.com/hybrid-electric-aircraft/>. (Erişim Tarihi: 24 Ocak 2024)
- [5] Chu, Jennifer; (2021), "Concept for a hybrid-electric plane may reduce aviation's air pollution problem", *MIT*, (14 Ocak 2021), <https://news.mit.edu/2021/hybrid-electric-plane-pollution-0114>. (Erişim Tarihi: 24 Ocak 2024)
- [6] *European Commission*, (2016), "Hybrid Aircraft; academic research on Thermal and Electrical Components and Systems", <https://cordis.europa.eu/project/id/715483>. (Erişim Tarihi: 24 Ocak 2024)
- [7] *Futprint50*, <https://futprint50.eu/>. (Erişim Tarihi: 24 Ocak 2024)
- [8] *Futprint50*, "Project Overview", <https://futprint50.eu/about/project-overview>. (Erişim Tarihi: 24 Ocak 2024)
- [9] *Futprint50*, "Expected Impact", <https://futprint50.eu/about/expected-impact>. (Erişim Tarihi: 24 Ocak 2024)
- [10] Morris, Caroline; (2023), "A Fresh Look: GE Aerospace Debuts New Design for Its Hybrid Electric Aircraft Test Bed", *General Electric*, (25 Temmuz 2023), <https://www.ge.com/news/reports/a-fresh-look-ge-aerospace-debuts-new-design-for-its-hybrid-electric-aircraft-test-bed>. (Erişim Tarihi: 24 Ocak 2024)
- [11] Stiffler, Lisa; (2022), "Boeing puts \$450M into company building electric, autonomous, passenger-carrying planes", *Geekwire*, (25 Ocak 2022), [boeing-puts-450m-into-company-building-electric-autonomous-passenger-carrying-planes/](https://www.geekwire.com/2022/boeing-puts-450m-into-company-building-electric-autonomous-passenger-carrying-planes/). (Erişim Tarihi: 24 Ocak 2024)
- [12] *Airbus*, "Hybrid and electric flight", <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hybrid-and-electric-flight>. (Erişim Tarihi: 24 Ocak 2024)
- [13] *Rolls-Royce*, (2022), "Rolls-Royce advances hybrid-electric flight with new technology to lead the way in Advanced Air Mobility", (22 Haziran 2022), <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2022/22-06-2022-rr-advances-hybrid-electric-flight-with-new-technology.aspx>. (Erişim Tarihi: 24 Ocak 2024)
- [14] Russell, Edward; (2022), "Air Canada, United Airlines Among First to Order New Hybrid-Electric Plane", *Airline Weekly*, (15 Eylül 2022), <https://airlineweekly.skift.com/2022/09/air-canada-united-among-first-to-order-new-hybrid-electric-plane/>. (Erişim Tarihi: 24 Ocak 2024)
- [15] Jarratt, Emma; (2022), "Air Canada buys 30 hybrid-electric passenger airplanes, acquires stake in electric plane maker, targets 2028 service launch", *Electric Autonomy Canada*, (15 Eylül 2022), <https://electricautonomy.ca/2022/09/15/air-canada-hybrid-electric-passenger-airplanes/>. (Erişim Tarihi: 24 Ocak 2024)
- [16] Memon, Omar; (2022), "What Are The Propulsive Gains Of A Hybrid Electric Aircraft?", *Simple Flying*, (9 Aralık 2022), <https://simpleflying.com/hybrid-electric-aircraft-propulsive-gains-guide/>. (Erişim Tarihi: 24 Ocak 2024)
- [17] *MarketsandMarkets*, (2023), "Hybrid Aircraft Market by Aircraft Type, Power Source, Lift Technology, Mode of Operation, Range, System and Region -Global Forecast to 2030", (Ağustos 2023), https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/hybrid-electric-aircraft-market-184129847.html?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAtaOtBhCwARIsAN_x-3JBae49O-8W6hQjPv9EJwAe8-ko2xHORYus3aujEjyHfgtUez-nKhXUaAID-gEALw_wcB. (Erişim Tarihi: 24 Ocak 2024)
- [18] Vyas, Saurabh; (2023), "Hybrid Electric Aircraft Market Future Trends, Demands, Opportunities and Forecast 2030", *LinkedIn*, (16 Kasım 2023), <https://www.linkedin.com/pulse/hybrid-electric-aircraft-market-future-trends-demands-saurabh-vyas-fng9c/>. (Erişim Tarihi: 24 Ocak 2024)



thinktech
STM Teknolojik Düşünce Merkezi
<http://thinktech.stm.com.tr>

