

Yeşil Havacılık için Hidrojen: Yakıt Olarak Kullanımı ve Depolama Çözümleri

Yusuf KILIÇ¹  Mesut UYANER^{2*} 

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Konya, Türkiye

Makale Bilgisi

Geliş Tarihi: 03.05.2025

Kabul Tarihi: 07.06.2025

Yayın Tarihi: 30.06.2025

Keywords:

Hydrogen in aviation,
Cryogenic tank,
Fuel cell aircraft.

ÖZET

Bu araştırma, hidrojenin havacılık sektöründe yaygınlaştırılmasına yönelik literatüre önemli katkılar sağlamayı ve sektörde çevre dostu alternatiflerin kullanımını artırmayı amaçlamaktadır. Bu derleme, havacılık sektöründe karbon salınımını azaltmayı ve çevre dostu, sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelmeye odaklanmıştır. Çalışmada, hidrojenin alternatif yakıt olarak kullanılması fikri üzerinde durulmuş ve yapılan araştırmalar sonucu hidrojen gazının, havacılık sektöründe kullanılan geleneksel Jet A-1 yakıtının yerine potansiyel bir alternatif olarak önerilmektedir. Bu doğrultuda, hidrojenin çeşitli depolama yöntemleri incelenmiş ve özellikle daha güvenli ve maliyet açısından uygun olan kriyojenik tanklar üzerine yoğunlaşmıştır. Araştırma, hidrojenle çalışan motorlar ve yakıt hücresi uçaklarla yapılan çalışmalar üzerinden hidrojenin havacılık sektöründeki kullanım potansiyelini incelemektedir. Bu yöntemle, hidrojenin performansı, verimliliği ve güvenliği değerlendirilecek, havacılıkta dönüşüm süreci için gerekli adımlar atılacaktır. Proje, hidrojenin havacılıkta kullanımını artırarak çevreye duyarlı bir dönüşüm sağlamayı hedeflerken, bunun yanı sıra havacılık sektörünün karbon emisyonlarını sıfıra indirmek için inovatif çözümler sunmaktadır. Hidrojenin sıfır emisyonlu bir yakıt olması, havacılık sektöründe çevre dostu alternatiflerin kullanılmasının yaygınlaşmasını sağlayacak bir katkı sunmaktadır. Ayrıca, hidrojenle çalışan uçakların tasarımı ve bu uçaklarda kullanılacak sıvı hidrojen tanklarının özellikleri üzerine yapılan çalışmalar, gelecekteki uçak tasarımlarının çevresel etkilerini azaltma potansiyeli taşımaktadır. Bu çabalar, havacılık endüstrisinin geleceğinde temiz enerjiye geçişi hızlandıracak ve karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltacaktır.

Hydrogen for Green Aviation: Fuel Usage and Storage Solutions

Article Info

Received: 03.05.2025

Accepted: 07.06.2025

Published: 30.06.2025

Keywords:

Havacılıkta hidrojen,
Kriyojenik tank,
Yakıt hücresi hava araçları.

ABSTRACT

This research aims to make a significant contribution to the literature on the use of hydrogen in aviation and to encourage the adoption of environmentally friendly alternatives. This review focuses on reducing carbon emissions in the aviation sector and advancing the shift toward environmentally friendly, sustainable energy sources. It explores the potential of hydrogen as an alternative fuel, with findings suggesting that hydrogen gas could serve as a viable replacement for the traditional Jet A-1 fuel used in aviation. In this context, various hydrogen storage methods are examined, with a particular emphasis on cryogenic tanks, which are considered both safer and more cost-effective. The study investigates the use of hydrogen-powered engines and fuel cell aircraft, assessing the performance, efficiency, and safety of hydrogen in aviation. This approach will contribute to defining the necessary steps for the sector's transformation. While aiming to increase the use of hydrogen in aviation for a more sustainable future, the project also presents innovative solutions to reduce carbon emissions in the aviation sector to zero. As a zero-emission fuel, hydrogen offers significant potential for promoting the widespread adoption of eco-friendly alternatives in aviation. Additionally, research into the design of hydrogen-powered aircraft and the specifications of the liquid hydrogen tanks used in these aircraft provides valuable insights into reducing the environmental impact of future aircraft designs. These efforts will accelerate the transition of the aviation industry to clean energy and contribute to a substantial reduction in carbon emissions.

Bu makaleye atıfta bulunmak için:

Kılıç, Y., & Uyaner, M. (2025). Yeşil havacılık için hidrojen: Yakıt olarak kullanımı ve depolama çözümleri. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 4(1), 1-18. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2025.1.1>

*Corresponding Author: Mesut Uyaner, muyaner@erbakan.edu.tr



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

GİRİŞ

Bu araştırma, havacılık sektöründe çevresel etkileri azaltma potansiyeline sahip sıvı hidrojen yakıtının kullanımını incelemektedir. Özellikle büyük uzun menzilli taşımacılık uçaklarında sıvı hidrojen yakıtı kullanımı ile ilgili yapılan parametrik çalışmaların sonuçları değerlendirilmiştir. Araştırma, sıvı hidrojenin üretimi, depolanması, uçaklarda kullanım şekilleri ve bu süreçlerin teknik ve çevresel etkileri üzerine odaklanmaktadır. Hidrojenin havacılıkta kullanımı, çevreye zararlı karbon emisyonlarının sıfırlanmasına katkıda bulunması bakımından önemli bir adım olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, hidrojenli uçakların tasarımına dair yeni yaklaşımlar ve sıvı hidrojen tanklarının özellikleri de detaylı bir şekilde ele alınmaktadır. Araştırma, sıvı hidrojen yakıtının kullanımının aerodinamik verimlilik, uçuş performansı ve uçak tasarımı üzerindeki etkilerini de kapsamaktadır.

Araştırma Problemi

Günümüzde uçaklar, fosil yakıtların kullanımından kaynaklanan yüksek karbon emisyonları nedeniyle çevreye önemli bir zarar vermektedir. Artan hava trafiği ve fosil yakıt bağımlılığı, küresel ısınma, iklim değişikliği ve çevre kirliliği gibi sorunları daha da derinleştirmektedir. Uçaklarda kullanılan mevcut yakıtların iklim üzerinde oluşturduğu bu olumsuz etkiler, dünya genelinde daha temiz ve sürdürülebilir alternatif yakıtların geliştirilmesine olan ihtiyacı gündeme getirmiştir. Bu noktada, hidrojen gazının alternatif bir yakıt olarak havacılık sektöründe kullanılması önemli bir çözüm önerisi olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak, hidrojenin uçaklarda yakıt olarak kullanılması, birçok teknik zorlukla birlikte gelmektedir. Özellikle sıvı hidrojenin depolanması, taşınması, verimli bir şekilde kullanılması ve mevcut uçak sistemlerine entegre edilmesi, önemli mühendislik sorunları yaratmaktadır. Ayrıca, sıvı hidrojen tanklarının tasarımı, uçak aerodinamiği üzerinde yaratacağı etkiler ve bu değişikliklerin enerji verimliliği üzerindeki sonuçları araştırılmalıdır. Bu bağlamda, hidrojenli uçakların tasarımında karşılaşılan bu zorluklara yönelik çözüm önerilerinin geliştirilmesi, araştırmanın odaklandığı problemdir.

Araştırmanın Önemi

Havacılık sektörü, küresel ısınma ve çevre kirliliği gibi sorunlar ile doğrudan ilişkilidir ve bu sektörün fosil yakıt tüketimi önemli bir çevresel yük oluşturur. Mevcut uçaklarda kullanılan geleneksel fosil yakıtların yol açtığı karbon salınımı, dünya çapında hava ulaşımının geleceği için büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Bu nedenle, alternatif enerji kaynaklarının havacılık sektörüne entegre edilmesi, sürdürülebilir bir hava taşımacılığı için kritik öneme sahiptir. Sıvı hidrojen, havacılıkta kullanılabilecek en temiz alternatif yakıtlardan biridir, çünkü kullanımı sırasında yalnızca su buharı açığa çıkmaktadır. Bu, çevresel açıdan büyük bir avantaj sunmakta ve karbon emisyonlarının sıfıra indirilmesine yardımcı olmaktadır. Araştırma, hidrojenin havacılıkta uygulanabilirliğini artıracak ve bu alandaki mühendislik çözümlerine katkı sağlayacaktır. Aynı zamanda, sıvı hidrojenin depolama ve taşıma yöntemleri üzerine yapılan iyileştirmeler, daha verimli ve güvenli sistemlerin tasarlanmasına olanak tanıyacaktır. Bu çalışma, hidrojenli uçakların ekonomik ve çevresel faydalarını karşılaştıran önemli veriler sunarak, sektördeki politikaların şekillenmesine yardımcı olabilir. Sıvı hidrojenin kullanımı, fosil yakıt bağımlılığını azaltarak, dünya çapında hava ulaşımının çevre dostu bir şekilde geleceğe taşınmasını sağlayacaktır. Bu araştırma, hidrojenin havacılık sektörü için potansiyel bir yakıt kaynağı olarak daha geniş bir şekilde kabul görmesini sağlayarak, gelecekteki havacılık endüstrisinin şekillenmesinde önemli bir rol oynayacaktır.

Uçaklarda hidrojenin kullanımı, havacılık endüstrisindeki gelişmelerle birlikte başlamıştır. İlk hidrojen yakıtlı uçuş 1852 yılında gerçekleştirilmiştir. Fransız mucit Henri Giffard, hidrojenle çalışan bir zeplin geliştirdi ve 17 Eylül 1852 tarihinde ilk kez bu zeplinle bir uçuş gerçekleştirdi. Ancak

hidrojenin uçaklarda kullanımı, bazı zorluklar ve riskler de içermektedir (Contreras vd., 1997).

Hidrojenin uçaklarda yakıt olarak kullanılması ile ilgili çalışmalar 1956 yılında başlamıştır. Amerika Birleşik Devletleri uçak sistemindeki motorlarından birinde helyum yardımıyla basınçlı hidrojen yakıtı kullanan B 57 Canberra uçağını uçurmayı başarmıştır (Arat & Sürer, 2017).

B57'den sonra Sovyetler, 1988'de tek motoru hidrojenle çalışan erken üretim bir Tu-154'ün deneysel dönüşümünü test etti. Test sonucu olarak sıvı hidrojenle çalışan motor, 7000 m'ye kadar yüksekliklerde test edildi ve 900 km / h hıza ulaştı. Ne yazık ki, sıvı hidrojen (LH₂) programı yalnızca beş uçuşla sınırlı kaldı ve iptal edildi. Bu durumun başlıca nedenleri, yüksek maliyetler ve hidrojen altyapısının yetersizliği idi (Reiman, 2009).

Uçaklarda kullanılan reaktif motorlar, gazyağı benzeri jet yakıtı olan kerosenin yanmasından elde edilen enerjiyle, motordan geçen havanın hızını artırarak itme kuvveti üretir. Bu motorlar, temel olarak Brayton çevrimine dayanan bir termodinamik süreçle çalışır. Jet motorlarında, yüksek parlama noktasına sahip, kolay tutuşmayan ve taşınması daha güvenli yakıtlar tercih edilir. Gaz türbinli motorlarda genellikle saf kerosen (Jet A-1) kullanılırken, bazı durumlarda %30–%70 oranında kerosen ve motorin karışımı olan Jet B tipi yakıt da kullanılabilir. Öte yandan, pistonlu motorlarda ise daha düşük yanıcılık özelliğine sahip olan ve AVGAS olarak adlandırılan yakıt tercih edilir (Aras, 2012).

Ticari havacılık sektörünün karbonsuzlaştırılmasına yönelik belki de en umut verici çözüm hidrojen yakıtının kullanılmasıdır. Bir yakıt kaynağı olarak hidrojen, geleneksel gazyağı bazlı jet yakıtından yaklaşık 2,8 kat daha yüksek bir gravimetrik enerji yoğunluğuna sahip olma avantajına sahiptir; ancak hacimsel enerji yoğunluğu, Jet A'ya kıyasla yaklaşık dört kat daha düşüktür. Tasarım açısından bu, hidrojen bazlı bir uçağın daha düşük bir yakıt ağırlığı gereksinimine sahip olacağı, ancak yakıtı kanatta depolamak yerine büyük, basınçlı kriyojenik yakıt tanklarının kullanılmasını gerektireceği anlamına gelir. Bu, hidrojenle çalışan herhangi bir hava taşıtının tasarımındaki temel zorluktur. Hidrojenle çalışan bir uçak, hidrojenin bir gaz türbininde doğrudan yakılmasıyla ya da bir dizi hidrojen yakıt hücresi kullanan elektrikli bir aktarma organı kullanılarak çalıştırılabilir (Kiely, 2024).

Hidrojen uçaklarının kalkış ağırlığı jet yakıtlı uçaklarınkinden neredeyse %20 daha düşüktür. Bu büyük ağırlık düşüşünün önemli bir nedeni, sıvı hidrojenin jet yakıtından neredeyse üç kat daha yüksek bir Alt Isıl Değere (LHV) sahip olması ve bunun sonucunda yakıt ağırlığının %64,7 oranında azalmasıdır. Ancak, yakıt ağırlığındaki bu azalmaya rağmen, kriyojenik depolama tanklarının ağırlığı (gövde ağırlığındaki %10'luk artışla birlikte) uçağın boş ağırlığını yaklaşık %16 oranında artırmaktadır (Bobadilla, 2023).

Hidrojen yakıt hücreleri, yalnızca su salarak ve sera gazı yaymadan enerji ürettikleri için ulaşımda umut verici bir yakıt alternatifi olarak görülmektedir. Hidrojen, yüksek verimliliğe sahip ve çevre dostu bir yakıttır. Yakıldığında sera gazı, ozon tabakasını incelten maddeler veya asit yağmuruna neden olabilecek kirleticiler açığa çıkmaz. Yenilenebilir enerji kaynakları (güneş, rüzgar vb.) kullanılarak üretilen hidrojen, uzun ömürlü ve sürdürülebilir bir enerji sistemi oluşturma potansiyeline sahiptir (Yusaf vd., 2024).

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, hava kirliliğine yol açan farklı kaynaklar bulunmaktadır. Bu kaynaklar, endüstriyel faaliyetlerin yoğunluğu ve trafikteki motorlu taşıtların sayısı ile doğrudan ilişkilidir. Endüstri, motorlu araçlar ve ısınma amacıyla kullanılan yakıtlardan salınan hava kirletici emisyonlar, atmosferde gaz, sıvı ve partiküller şeklinde yüzlerce farklı bileşiği barındırır. Bu bileşiklerin arasında en önemli kirleticiler, karbon monoksit (CO), karbondioksit (CO₂), partikül madde (PM), azot oksitleri (NO_x), kükürt oksitleri (SO₂) ve uçucu organik bileşikler (HC) olan hidrokarbonlardır. Yapılan araştırmalar, NO_x ve hidrokarbonların yeryüzünde ozon oluşumuna katkı sağladığını ortaya koymuştur (Aydın & İlkılıç, 2017).

Fosil yakıtların hızla tükenmesi ve çevreye verdikleri zararlar, araştırmacıları alternatif ve sürdürülebilir enerji kaynakları üzerinde çalışmalar yapmaya yönlendirmiştir. Yurt dışında yapılan pek çok çalışma, hidrojen enerjisinin ticari uygulamalara dönüştürülmesine olanak sağlamış, bu sayede başta taşıma sektöründe olmak üzere birçok alanda hidrojen enerjisinin kullanımı yaygınlaşmıştır (Karakaya, 2021).

Hidrojen, temiz enerjinin geleceği için büyük bir potansiyele sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretilen ve sıfır emisyonlu bir enerji taşıyıcısı olarak işlev gören hidrojen, çevre dostu bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan karbon emisyonlarını azaltma arayışında hidrojen, enerjinin taşınması ve depolanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bir enerji taşıyıcısı olarak hidrojen, enerjinin bir kaynaktan diğerine aktarılmasını ve dönüştürülmesini kolaylaştırır. Örneğin, güneş ve rüzgar gibi sürdürülebilir kaynaklardan elde edilen enerji, hidrojen üretmek için kullanılabilir ve böylece enerji arzındaki dalgalanmalar dengelenebilir (Çetinkaya, 2024).

Tank tasarımı ne uzay ne de otomotiv operasyonlarında belirli bir tank tipinin bulunmaması nedeniyle kritik öneme sahiptir. Uzay rampaları için tanklar çok daha kısa ömürlü ve sınırlı sayıda çevrim için tasarlanmıştır. Yakıt hızla tüketildiğinden, ayrıca itici yakıtın yalnızca nispeten kısa bir süre için depolanmasını ve muhafaza edilmesini gerektirirler. Bu da saatte %1–2 mertebesinde bir kaynama oranını kabul edilebilir kılmaktadır. Kaynama oranı, kriyojenik yakıtın zamanla buharlaşarak kaybedilen miktarının, toplam yakıt miktarına oranıdır. Bununla birlikte, uçaklar için kabul edilebilir kaynama oranları saatte ağırlıkça %0,1 veya daha azdır. Kriyojenik bir sıvı hidrojen (LH_2) tankının hem yalıtımı hem de tank duvar malzemeleri için çeşitli zorlu gereksinimler vardır. Küçük H_2 moleküllerinin tank yapısına nüfuz etmesi, birçok malzemeyi gevrekletireceği için muhtemelen bunlardan en kritik olanıdır (Mital vd., 2006).

Yalıtım malzemesinin veya daha doğrusu yalıtım sisteminin seçimi, kriyojenik depolama sisteminin performansı için önemli bir faktördür (Winnefeld vd., 2018).

NASA tarafından yapılan bir çalışmada, alüminyum alaşımı 2219'un, araştırılan malzemeler arasında kriyojenik tank uygulamaları için en uygun adaylardan biri olduğu belirtilmiştir. Ancak, bu alanda alternatif malzemelerin değerlendirilmesine yönelik AR-GE çalışmaları hâlen devam etmektedir (Brewer, 2017).

Sıvı hidrojen tanklarının kısa dolum süreleri önemli bir avantaj sağlamaktadır. 20 K sıcaklık ve 100 kPa basınç altında sıvı hidrojenin yoğunluğu $70,8 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Teorik olarak %100 kütsel doluluk oranına ulaşılması mümkün olsa da, mevcut teknolojilerle bu oran en fazla %25 seviyelerine ulaşabilmektedir (T. & G., 2006).

Sıvı hidrojen (LH_2), havacılığın uzun vadede karbonsuzlaştırılması için onu uygulanabilir ve hatta daha umut verici bir çözüm haline getiren çeşitli benzersiz avantajlara sahiptir (Yang, 2022).

Yakıtta hidrojen kullanımı egzoz gazlarındaki kirletici emisyonunu önemli ölçüde azaltır. Bu durum özellikle karbon monoksit için geçerlidir ve burada önemli bir azalma gözlemlenmiştir. Alevin kararlılığı hem hidrojenin hacim fraksiyonuna hem de eşdeğerlik oranına bağlıdır. Ayrıca, hidrojen seyreltmesinin diğer yakıtlara kıyasla azot oksit (NO_x) üretimini azalttığı tespit edilmiştir. Zorluklara rağmen, hidrojeni uçaklarda yakıt olarak depolamanın optimize edilmiş bir yolunu bulmak, havacılık endüstrisindeki karbon emisyonlarını azaltmak ve daha sürdürülebilir bir geleceğe doğru ilerlemek için çok önemlidir (Manigandan vd., 2023).

Metal hidritler, hidrojene bağlı metal içeren bir malzeme sınıfıdır. Bu malzemelerde hidrojen, metal atomlarıyla kimyasal bağlar oluşturarak depolanır. Metal hidritler kullanılarak hidrojen depolamanın olası bir çözüm olarak görüldüğü birçok uygulama vardır. Bu genel uygulamalardan

bazıları taşınabilir güç, sabit güç ve yakıt hücresi uygulamalarıdır. Her biri depolama malzemesi olarak kendi avantaj ve dezavantajlarına sahip çok sayıda farklı metal hidrit malzeme vardır. Bu farklı malzeme türleri arasında interstisyel, substitüsyonel ve kompleks türler bulunmaktadır (S. A. Thomas, 2024).

Metal hidrürler, H_2 'yi diğer gaz bileşiklerinden ayırmak veya H_2 'yi saflaştırmak için membran olarak kullanılabilir. Bu, örneğin hidrojen gazına karşı geçirgen olan ancak diğer gazlara karşı (makul bir süre içinde) geçirgen olmayan Paladyum-Gümüş (PdAg) alaşımlı membranlar kullanılarak gerçekleştirilebilir. Metal hidritler sadece hidrojeni değil aynı zamanda döteryum (D) ve trityumu (T) da absorbe eder (Ilıksu, 2012).

Sıvı hidrojen (LH_2), eşit ısı içerige sahip bir hidrokarbon yakıtın dört katı hacme sahip olduğundan ve dahası, ilave bir fit yalıtım duvarı kalınlığına sahip hafif ve yüksek yalıtımlı tanklarda muhafaza edilmesi gerektiğinden, hidrokarbon yakıtlarda normal uygulamada olduğu gibi, yakıtın kanat yapısının içine yerleştirilmiş tanklarda muhafaza edilmesi mümkün değildir (Caunter, 1982).

Hidrojen geliştirme süreci, bugüne kadar şu başlıca faktörler nedeniyle kısıtlanmıştır: diğer yakıt kaynaklarına kıyasla ekonomik dezavantajlar; çelik, çimento ve taşımacılık gibi geleneksel olmayan sektörlerde hidrojen yakıtına uygun ekipmanların uyarlanmasıyla zorluklar; üretimden başlayarak iletim, son kullanım ve depolama süreçlerini kapsayan sınırlı hidrojen altyapısı; sıvı hidrojenin -253 santigrat dereceye kadar soğutulması ve işlenmesindeki teknik zorluklar; ve son olarak, özellikle uluslararası düzeyde standartlar ve düzenlemelerdeki farklılıklardır (Webster, 2023).

Sıvı hidrojenle çalışan otomobiller tasarlanmıştır, ancak bu sistemler kriyojenik bir sıvının işlenmesinden kaynaklanan kaçınılmaz gibi görünen sorunlara yol açmaktadır. Örneğin, sıvı hidrojen pahalıdır, hidrojenin buharlaşması nedeniyle önemli miktarda yakıt kaybına neden olur ve ciddi mühendislik sorunları yaratır. Ayrıca, sıvılaştırma süreci, hidrojenin enerji içeriğinin %60'ına kadar önemli bir enerji girdisi gerektirir. Güncel araştırmalar, sıvı hidrojenin bu sınırlamalarını ele almaya odaklanmaktadır. Özellikle bir çalışma alanı, hidrojen kaybını azaltmak için depolama tanklarının verimli yalıtımına yöneliktir. Genelde sıvı hidrojen, vakum ceketli, çok katmanlı yalıtımlı tanklarda depolanır (N. C. Thomas, 1988).

Kriyojenik hidrojen depolama, hidrojen gazının son derece düşük sıcaklıklarda tutulmasını içerir, bu da oldukça yoğun bir biçimde depolanmasını sağlar. Bu teknik, yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle özellikle uzay itiş gücü için kullanışlıdır. Ancak hidrojenin bir tankta depolanması söz konusu olduğunda zorluklar ortaya çıkmaktadır. Kriyojenik hidrojen depolama için kullanılan tanklar tipik olarak alüminyum gibi pahalı malzemelerden yapılır çünkü ucuz malzemeler aşırı düşük sıcaklıklara dayanamaz. Tankların boyutları $1,5 m^3$ ile $75,0 m^3$ arasında değişebilir ve genellikle hacimlidir (Yanxing vd., 2019).

Tank, kriyojenik yalıtım için sert, kapalı hücreli plastik köpüklerle kaplanmıştır ve bu köpük, köpük yalıtımda bir çatlak oluşması durumunda kriyopompalamayı (kriyojenik ortamda malzeme çatlaklarından soğuk gazların veya sıvıların hızlı şekilde içeri çekilmesi ve malzemede hasar oluşturması) önlemek amacıyla bir ikincil buhar kalkanı ile çevrilmiştir. Tank, uçak gövdesine, bor takviyeli fiberglas tüplerden oluşan kafes benzeri bir bağlantı yapısı ile yapısal olarak bağlanmıştır. Bu tür kafes elemanı tasarımı, minimum ağırlık ve minimum ısı transferi ile maksimum sertlik sağlamasının yanı sıra, çatlama karşı dayanıklılık ve tokluk özellikleri nedeniyle tercih edilmiştir (Morris & Brewer, 1975).

Yakıt hücresi, hidrojen gibi bir yakıtın kimyasal enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal bir cihazdır. Bu dönüşüm, yanma yerine elektrokimyasal bir reaksiyon yoluyla gerçekleşir. Hidrojen ve oksijenin tepkimesiyle %80'e varan toplam verimle çalışan yakıt pilleri, elektrokimyasal makineler veya sürekli piller olarak da adlandırılmaktadır (Alahmad vd., 2023).

Küresel hidrojen talebi ve üretimi her yıl düzenli olarak artmaktadır. Hidrojenin sektörel kullanım çeşitliliğindeki artış, hidrojen talebindeki ve hidrojen üretimindeki artışın en önemli nedenidir. Hidrojen, birçok amaç için kullanılabilir. Şu anda, hidrojen sayesinde enerjiyi farklı şekillerde üretebilen, depolayabilen, taşıyabilen ve kullanabilen teknolojiler bulunmaktadır. Yenilenebilir ve nükleer enerji kaynaklarına ek olarak, hidrojen, doğalgaz, kömür ve petrol gibi yakıtlarla da üretilir (Özcan, 2008).

Hidrojenin enerji alanındaki potansiyelini değerlendirebilmek için en kritik unsur, üretiminde kullanılan kaynaklardır. Günümüzde dünya genelinde üretilen hidrojenin büyük bir bölümü hâlâ doğalgaz reformasyonu, kömür pirolizi ve biyokütle gibi fosil tabanlı yöntemlerle elde edilmektedir. Bu durum, hidrojenin çevre dostu bir enerji kaynağı olarak değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Teorik olarak, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elde edilen elektrik kullanılarak suyun elektroliziyle hidrojen üretmek mümkündür; ancak mevcut teknolojiler bu yöntemi henüz yeterince verimli kılmamaktadır. Bu nedenle, hidrojenin enerji sektöründe daha etkin rol oynayabilmesi için üretim tekniklerinin çevreci, güvenli ve ekonomik hale getirilmesi büyük önem taşımaktadır. Hidrojen, önemli bir enerji potansiyeline sahip olmakla birlikte, mevcut dezavantajlarının azaltılması ve özellikle depolama ile üretim süreçlerinde teknolojik yeniliklerin geliştirilmesi gereklidir (Kademli, 2017).

YÖNTEM

Bu çalışma, karbon salınımını azaltma amacıyla hidrojen gazının uçak yakıtı olarak kullanımını ve depolama yöntemlerini incelemektedir. Hidrojen, düşük yoğunluğu ve sıfır emisyonlu yakıt özellikleri ile çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Uçaklarda hidrojen yakıtı kullanımı hem uçak tasarımını hem de motor yapılarını önemli ölçüde değiştirmeyi gerektirir. Özellikle sıvı hidrojen (LH_2), çok düşük sıcaklıklarda depolanması gerektiği için yüksek yalıtımlı tanklar kullanılarak taşınabilir. Ancak, bu depolama ihtiyacı, hidrojenin uçaklarda verimli bir şekilde kullanılabilmesi için tasarım değişikliklerini zorunlu kılmaktadır.

Çalışmada hidrojen gazının üretim yöntemleri, depolama teknolojileri ve uçaklarda hidrojen yakıtı kullanımının getirdiği mühendislik zorlukları ele alınacaktır. Ayrıca, hidrojen yakıtının avantajları ve dezavantajları karşılaştırılarak, bu teknolojiye yönelik mevcut araştırmalar değerlendirilecektir. Hidrojenin üretim yöntemleri arasında elektroliz gibi çevre dostu seçeneklerin yanı sıra, doğal gaz bazlı gri hidrojen üretimi gibi daha yaygın ancak çevresel etkileri yüksek yöntemler de bulunmaktadır. Depolama açısından ise kriyojenik tanklar, sıvı hidrojenin güvenli şekilde taşınmasını mümkün kılan en uygun depolama ekipmanları arasında yer almaktadır. Bu tanklarda kullanılan malzemeler, düşük sıcaklıklarda çatlamaya karşı direnç sağlayan yüksek tokluk özelliklerine sahiptir.

Bu bağlamda, hidrojen gazının havacılıkta kullanılabilirliğini artırmak ve depolama sistemleri üzerinde iyileştirmeler yapmak için yapılması gereken araştırmalar, havacılık sektöründe sürdürülebilirlik ve enerji verimliliği hedeflerine ulaşılmasında kritik öneme sahiptir.

Hidrojenin Temel Özellikleri

Hidrojen (kimyasal sembolü H) tüm elementler arasında en hafif olanıdır (atom ağırlığı 1.00794 a.m.u) ve atom numarası $Z=1$ 'dir. Adı Yunanca “su” anlamına gelen “hydor” ve “ortaya çıkarmak” anlamına gelen “geinomai” kelimelerinin birleşiminden gelir, yani suyu ortaya çıkaran elementtir. Yer kabuğunda en bol bulunan dokuzuncu elementtir (1400 mg/kg) ve Dünya denizlerinde oksijenden sonra en bol bulunan ikinci elementtir (1.08×10^5 mg/l). Ayrıca, evrende en bol bulunan elementtir ve güneş sistemimizin ağırlık olarak %91'ini oluşturur. Normal sıcaklık ve basınç koşulları altında renksiz, kokusuz, tatsız, zehirsiz ve yanıcı bir gazdır. Henry Cavendish tarafından 1766 yılında İngiltere'de keşfedilmiş ve Lavoisier tarafından adlandırılmıştır (TZIMAS vd., 2003).

Tablo 1

Hidrojen Gazının Temel Özellikleri

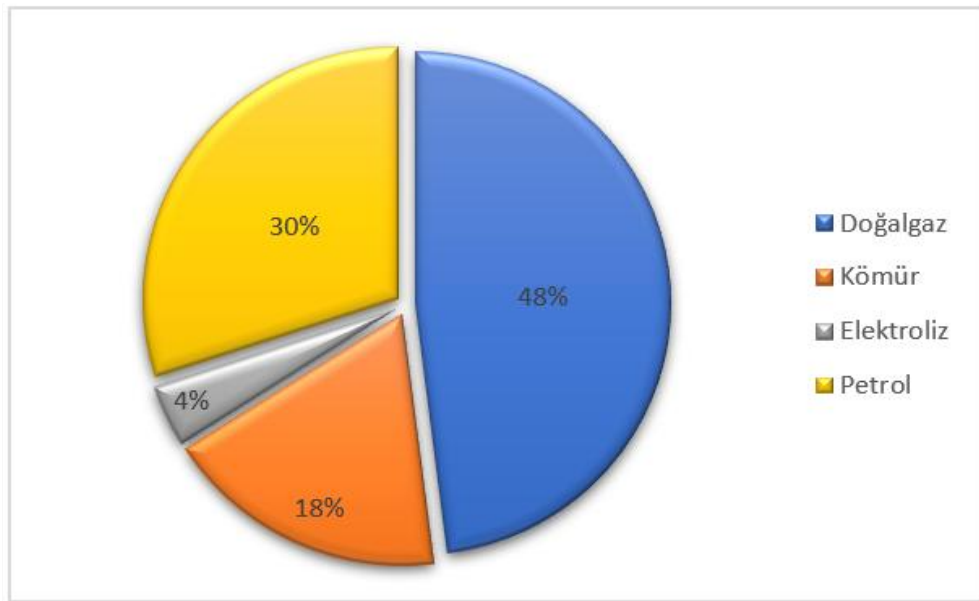
Özellik	Değer	Birim
Molekül Ağırlığı	2,016	g/mol
Yoğunluğu	0,0838	kg/m ³
Üst Isıl Değer (Kütlesel)	141,9	MJ/kg
Üst Isıl Değer (Hacimsel)	11,89	MJ/m ³
Alt Isıl Değer (Kütlesel)	119,9	MJ/kg
Alt Isıl Değer (Hacimsel)	10,05	MJ/m ³
Kaynama Sıcaklığı	20,3	K
Sıvı Yoğunluğu	70,8	Kg/m ³
Kritik Noktadaki Basınç	12,84	Bar
Kritik Noktadaki Sıcaklık	32,94	K
Kritik Noktadaki Yoğunluk	31,40	kg/m ³
Özgül Isısı	14,89	KJ/kg.K
Difüzyon Katsayısı	0,61	cm ² /s
Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı	858	K
Havada Tutuşma Limitleri	4-75	% hacimsel
Havada Alev Sıcaklığı	2318	K
Havada Sitokiometrik Karışım	29,53	% hacimsel

Hidrojen Gazının Üretim Yöntemleri

Bu bölümde, hidrojenin enerji kaynakları ile ilişkisi ve hidrojen üretim yöntemleri açıklanacaktır. Hidrojen, sera gazı emisyonuna sebep olmaması ve geleneksel fosil yakıtlara göre daha yüksek alt ve üst ısıl değerlere sahip olması nedeniyle yakıt olarak tercih edilmektedir. Günümüzde doğal gaza hidrojen ilavesi ile ilgili çalışmalar yoğunlaşmıştır (Ökten vd., 2024).

Şekil 1

Hidrojen gazı üretim kaynakları (Arat & Sürer, 2017)



Hidrojen, temiz enerji kaynaklarına yönelik alternatif bir çözüm olarak dikkat çekmektedir.

Bunun sebebi, hidrojenin yanma sürecinde yalnızca su ve enerji salmasıdır. Hidrojen gazının üretimi, çeşitli yöntemlerle yapılabilir. Bu yöntemler, hidrojenin elde edildiği kaynağa, üretim sürecine ve kullanılan enerji kaynağına göre farklılık göstermektedir (Mutlubaş & Özdemir, 2023).

Teknolojinin gelişimiyle birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarının yerini hızla yenilenebilir enerji kaynakları almaktadır. Fosil yakıtlara karşı en önemli sürdürülebilir alternatif enerji kaynağı ise hidrojenidir. Hidrojenin kimyasal enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü direkt hidrojenli Proton Değişim Membranlı (PEM) yakıt hücreleri, umut verici bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Yakıt hücreleri, sıfır emisyonlu ve verimli enerji üretimi sağladığı için enerji üretimi açısından tercih edilen bir seçenek olarak kabul edilmektedir (İlbeyoğlu vd., 2023).

Doğal gaz, elektrik üretimi, sanayi ve bireysel kullanım da dahil farklı alanlarda kullanımıyla bugün Avrupa'nın birincil enerji kaynaklarından biridir. Doğal gaz bir fosil yakıt olduğundan, bir sera gazı olan CO₂ emisyonundan ciddi ölçüde sorumlu olduğu bilinmektedir (Tür & Büyükkaya, 2024).

Elektroliz, yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak yapıldığında çevre dostu bir hidrojen üretim yöntemidir (Özdemir & Mutlubaş, 2019).

Elektroliz, su moleküllerini ayrıştırarak hidrojen üretimini sağlayan yaygın bir elektrokimyasal süreçtir. Bu dönüşüm hızlı ve basit olup, işlem sonrası saf H₂ elde edilir. Ayrıca, bu süreçte kükürt, karbon veya azot gibi yan ürünler oluşmadığı için, gazlaştırma süreçlerine kıyasla arıtma maliyetlerinde önemli ölçüde tasarruf sağlar. Su ve biyokütle elektrolizi arasındaki temel fark, anotta gerçekleşen reaksiyonlardaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Besleme maddesi, sudan oksijen gazı üretmek yerine oksitlenir (Al & Ateş, 2022).

Doğal gaz bazlı hidrojen üretimi, gri hidrojen adı verilen yöntemle gerçekleşmektedir. Bu yöntemde hidrojen, doğal gazın buhar metan reformu (SMR) ile işlenmesi sonucunda elde edilir. Avantajlarından biri, mevcut doğal gaz altyapısının kullanılabilmesi ve büyük miktarlarda hidrojen üretiminin mümkün olmasıdır. Ancak bu yöntemin de büyük bir dezavantajı vardır; SMR işlemi sırasında atmosfere önemli miktarda karbondioksit (CO₂) salınmakta ve bu durum çevre üzerinde olumsuz bir etki yaratmaktadır (Bektaş & Arpa, 2024).

Hidrojen üretiminde, rekabetçi bir enerji piyasasında hedeflenen ticari maliyet, enerji içeriği açısından benzine denk bir fiyat olan 0,30 USD/kg H₂'dir (yaklaşık 2,5 USD/GJ). Hidrojen üreten teknolojiler, en iyi ihtimalle yalnızca 2-3 kat daha yüksek üretim maliyetlerine sahiptir. Reformlama temelli dağıtık hidrojen üretimi, genellikle elektrolizle rekabetçidir, çünkü reformlama maliyeti 16-29 USD/GJ arasında değişirken, elektroliz maliyeti yatırım ve enerji maliyetlerine bağlı olarak 20-40 USD/GJ arasındadır (T. & G., 2006).

Hidrojen Gazının Maliyet Karşılaştırması

Hidrojen gazı, oldukça düşük yoğunluğa sahip bir yakıttır. Çevre dostu bir seçenek olarak kabul edilebilir çünkü saf olarak yandığında sadece su buharı oluşur (Mattus & Kallstrand, 2010).

Tablo 2021 verilerine dayanmaktadır ve çeşitli faktörlerden dolayı maliyetleri artmış olabilir, günümüz koşullarına ait tam bir kaynak bulunmadığı için bu tablodan referans alınmıştır (Mattus & Kallstrand, 2010).

Tablo 2

Hidrojen gaz maliyet karşılaştırması (Mattus & Kallstrand, 2010).

Yakıt Türü	Yoğunluk (kg/m ³)	Özgül Enerji (MJ/kg)	Karbon Emisyonu (kg CO ₂ /L)	Maliyet
Hidrojen Gazı	0.08988	141.8	0	0.75- 4.98* (\$/kg)
Jet A-1	804	43.15	2.91	3.1 (\$/gal)
Avgas 100LL	720	44.7	2.76	5.5 (\$/gal)

Hidrojen Gazının Avantaj ve Dezavantaj Kıyaslaması

Hidrojen yakıt pillerinin avantajları söz konusu olduğunda, sıfır emisyonlu elektrik üretme ve temiz araç sistemleri sağlama yetenekleri üzerinde durulmaktadır. Hidrojen yakıt hücreleri sadece su buharı yaydığı için hava kalitesini korur ve iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynar. Ayrıca, yakıt hücreleri yüksek verimlilikleriyle bilinmekte ve hidrojenin depolanması ve taşınması çeşitli yöntemlerle sağlanabilmekte, bu da enerji depolama sorunlarına katkıda bulunmaktadır. Ancak hidrojen yakıt hücrelerinin yaygınlaşmasını engelleyen bazı zorluklar bulunmaktadır. Hidrojen üretimi için yeşil yöntemlerin geliştirilmesi ve enerji yoğunluğu sorunlarının çözülmesi gibi konular, bu teknolojinin tam potansiyeline ulaşmasının önündeki engellerdir. Bu nedenle, hidrojen yakıt hücreleri teknolojisi, avantaj ve dezavantajları dikkate alınarak daha fazla araştırma ve geliştirme gerektirmektedir (Bektaş & Arpa, 2024).

Herhangi bir gaz karışımından karbondioksit soğutma ve yoğunlaşma ile ayrıştırılabilir. Kriyojenik ayrıştırma sıvı karbondioksitin direk üretimine imkân verir ve aynı zamanda uzun mesafe taşınımı içinde uygundur. Dezavantajları ise soğutmayı sağlamada gerekli olan enerjinin miktarı önerilen bu proses için yüksek olması ve su gibi bazı bileşenlerin proses esnasında alınarak gaz akınının blokları soğutmasının önlenmesinin gerekli olmasıdır (Öztürk vd., 2010).

Hidrojen Gazının Depolama Sistemleri

Hidrojen Depolama Malzemeleri alanındaki araştırmalar 2000 yılından 2010 yılına kadar artan oranlarda büyümüştür. Daha sonra büyüme azalan oranlarda da olsa devam etmiş ve 2015 yılında bir platoya ulaşılmıştır. Tek tek ülke üretimlerine bakıldığında, 2010 yılından sonra Avrupa Birliği ülkeleri, ABD ve Japonya gibi üretimleri sabit kalan ya da hafifçe azalan ülkeler ile Çin ve Güney Kore gibi üretimleri 2015 yılına kadar artmaya devam eden ülkeler arasında bir ayrım görülmektedir. En çok yayın yapan ülkeler Çin, AB ve ABD olurken, onları Japonya takip etti. Çin, tüm dönem boyunca lider konumunu korumuş ve toplam araştırma çıktısı içinde hidrojen depolama malzemeleri yayınlarının payı daha yüksek olmuştur. Malzeme sınıfları arasında Metal Organik Çerçeveler en çok araştırılan malzemeler olmuş, bunu Basit Hidrürler izlemiştir. Üç tipik davranış tespit edilmiştir: 1) MOF'lar ve Borohidritler gibi esas olarak 2004'ten sonra araştırılan yeni malzemeler; 2) Basit Hidritler gibi artan sayıda makale ile tüm dönem boyunca mevcut olan klasik malzemeler ve 3) AB5 alaşımları ve Karbon Nanotüpler gibi dönem sonuna kadar durgun veya azalan araştırmalara sahip malzemelerdir (Chanchetti vd., 2020).

Birleşik Devletler hükümeti NASA, Lockheed Martin ve diğerlerini 1970'lerdeki petrol krizi sırasında LH₂ ticari uçakların tasarımındaki zorluklarla ilgili ilk derinlemesine araştırmayı yapmakla görevlendirdi. Bu çalışmada 5500 mil menzile sahip 400 yolcu kapasiteli bir uçak temel alınmıştır. Al-2219'dan imal edilen iki LH₂ yakıt tankı uçağın gövdesinde öne ve arkaya yerleştirilmiştir. Bu tanklar minimum -251.4 °C (39.15 °R) sıcaklıkta ve maksimum 1.45 bar (21 psi) basınçta çalışır (Brewer, 2017).

Havacılık motorları için en büyük zorluklardan biri H_2 depolamadır. Tank geliştirilirken özel dikkat gösterilmelidir. Güvenli depolama için 4 iç katmana ve 10 dış katmana sahip olmalı ve bir soğutma kutusuna sahip olmalıdır. Dış kaplar metal veya karbon kompozitten yapılabilir (Yusaf vd., 2024).

Yapılan çalışmalarda gereksinimlerden birini veya daha fazlasını karşılayan birkaç malzeme bulunmasına rağmen, hiçbirinin üç özelliği karşıladığı kanıtlanamamıştır. Bu temel teknik kriterlere ek olarak, uygun depolama ortamlarının maliyet, ağırlık, kullanım ömrü ve güvenlik gereksinimlerini de karşılaması gerekmektedir (Altınsoy vd., 2024).

“Kriyojenik Tank” terimi, sıvı oksijen ve sıvı hidrojen gibi süper soğuk yakıtların depolanmasını ifade eder. Kriyojenik tank, malzemeyi çok düşük sıcaklıklarda depolamak için kullanılan bir tanktır. Kaplar yalıtılmış ve çift duvarlı olmalıdır. İç ve dış kap arasındaki boşluk, vakumda tutulan birkaç inç yalıtım malzemesi içerir. Vakum ve yalıtım malzemesi, içerideki sıvı oksijen, sıvı nitrojen veya sıvı argonun buharlaşmasını azaltmaya yardımcı olur. Kriyojenik sıvılar genellikle $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ veya daha düşük sıcaklıklarda sıvılaştırılan gazlardır. Yaygın gazlar arasında oksijen, argon, nitrojen, hidrojen ve helyum bulunur. Kriyojenik tanklar ayrıca sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), karbondioksit ve azot oksit gibi sıvılaştırılmış gazları biraz daha yüksek sıcaklıklarda depolamak için de kullanılır (Zohuri, 2019).

Hidrojen depolama tekniklerinin birbirlerine göre üstünlükleri ve zayıf yönleri olmasına rağmen en önemli belirleyici kriter ise hidrojen enerjinin elde edilme maliyetidir (Karakaya, 2021).

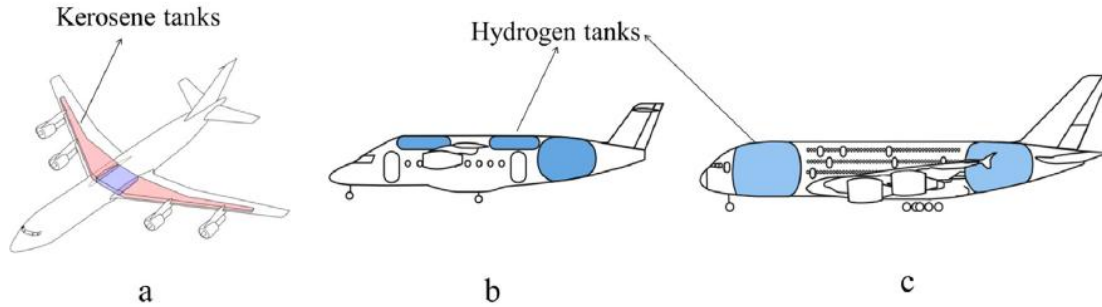
Ön soğutmalı hidrojen kullanımı özellikle yüksek debili ve düşük başlangıç basınçlarına sahip tanklarda yapılan dolum işlemlerinde daha gerekli olduğu görülmüştür. Yüksek debili dolumlarda izin verilen sıcaklığa ulaşmak daha hızlı olduğundan depolanan hidrojen miktarı oldukça düşmektedir (MERCAN, 2023).

Hidrojen yakıt sistemleri, uzay görevleri için geliştirilmiş olsa da, uçaklar için görev süresi, sistem ömrü, çalışma döngüleri ve güvenlik unsurları açısından gereksinimler tamamen farklıdır ve bu nedenle tamamen farklı tasarım sorunlarının çözülmesi gerekmektedir. Hidrojen, küçük modifikasyonlarla normal bir aero gaz türbininde yakıt olarak kullanılabilir. Türbomakine bileşenleri değişmeden kalırken, yanma odası ve yakıt kontrol sistemi yeniden tasarlanmalı ve yakıtı buharlaştırmak için bir ısı eşanjörü eklenmelidir. Hidrojen, sıvı formda, 20.2 ila 22.3 K sıcaklıkta ve 1.2 ila 2.0 bar basınçta depolanmalıdır (Aurelius, 2013).

Genel olarak, hidrojenin jet yakıtı olarak kullanılması hem uçak hem de motor tasarımının değiştirilmesini gerektirir. Hidrojenle çalışan uçaklarda kullanılan sıvı hidrojen (LH_2), çok düşük sıcaklıklarda tutulmalı ve bu nedenle yalnızca yüksek yalıtımlı tanklarda depolanabilir; kanatlarda depolanamaz çünkü kanatlar, LH_2 'yi barındırmak için yeterli alana sahip değildir ve uygun şekilde yalıtım yapılamaz. Hidrojen yakıt tanklarının büyük hacim gereksinimleriyle birlikte, uçak tasarımının daha büyük bir hacim ve daha ağır bir gövde ile değiştirilmesi gerekmektedir. Bu, LH_2 yakıt tanklarının yerleştirilebileceği en iyi konumdur (Ahmad Baroutaji vd., 2019).

Şekil 2

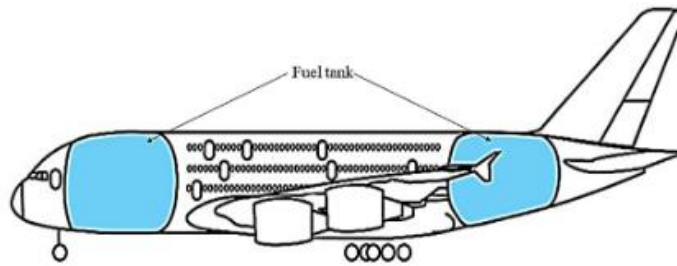
Yakıt tankı konumları (a) geleneksel ve (b) orta menzilli hidrojenle çalışan uçaklar (c) uzun menzilli hidrojenle çalışan uçaklar (Ahmad Baroutaji vd., 2019)



Kısa ve orta menzilli uçaklar için hidrojen tankları, yolcu kabininin üzerine yerleştirilebilirken, uzun menzilli uçaklar için hidrojen iki büyük entegral tankta depolanır; bunlardan biri kokpitin hemen arkasında, diğeri ise yolcu kabininin arka kısmında yer alır (Şekil 3). Hidrojen tanklarının yapılandırılması, hidrojenle çalışan uçakların enerji verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu tür tankların daha ağır olmasından dolayı, kısa ve orta menzilli uçaklarda kullanılan üst tank tasarımı, enerji kullanımını %6-19 artırabilir. Öte yandan, uzun menzilli uçaklar için uygun olan entegral tasarım, enerji verimliliğini %12 oranında artırabilir. Sonuç olarak, hidrojen yakıtı uzun menzilli uçaklara daha uygun düşmektedir. Hidrojen tankları, hidrojenle çalışan uçakların gövdesinde depolandığından, bu tankların oluşturduğu yükleri taşıyabilmek için daha ağır ve daha büyük bir gövde gerekmektedir. Hidrojenle çalışan uçaklardaki gövde kütlesi, geleneksel uçaklara göre neredeyse %6 daha ağırdır (Yusaf vd., 2024).

Şekil 3

Büyük uzun menzilli taşımacılık uçakları için gövde tankları (Verstraete, 2013)



Büyük uzun menzilli taşımacılık uçakları için çeşitli parametrik çalışmalar yapılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır: Yakıt, gövdeye yerleştirilen tanklarda depolandığından, hidrojenli uçaklar için kanat boyutu yakıt depolama kapasitesi ile kısıtlanmaz. Sonuç olarak, hidrojenli uçaklar çok daha küçük kanat alanları kullanabilir. İncelenen uçak için kanat alanında %31'lik bir azalma bulunmuştur. Blok yakıt ağırlığındaki büyük azalma nedeniyle, büyük uzun menzilli taşımacılık uçakları için kalkış boş ağırlığında yaklaşık %30'luk bir azalma elde edilmiştir. Sıvı hidrojen tanklarının ağır ve hacimli olmasına rağmen, uçakların işletme boş ağırlığı her iki yakıt için de yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Hidrojenle çalışan uçağın daha küçük kanatları ve daha büyük gövdesi, aerodinamik verimliliğin azalmasına yol açar. Ancak, blok yakıt ağırlığındaki azalma bu kaybı telafi ederek, uçuş için enerji kullanımını yaklaşık %11 oranında azaltmaktadır (Verstraete, 2013).

BULGULAR

Bu çalışmada hidrojenin uçaklarda yakıt olarak kullanımına yönelik avantajlar, dezavantajlar ve depolama yöntemleri incelenmiş; elde edilen bulgular aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

Hidrojenin Çevresel Avantajları

Hidrojenin yakıt olarak kullanılması, fosil yakıtlara kıyasla karbon emisyonlarını tamamen ortadan kaldırmaktadır. Yanma sonucu yalnızca su buharı açığa çıkmakta ve sera gazı emisyonu oluşmamaktadır. Bu, hidrojenin havacılık sektöründe çevre dostu bir alternatif olarak kullanıma potansiyelini artırmaktadır.

Enerji Verimliliği

Hidrojen, gravimetrik enerji yoğunluğu açısından Jet A-1 yakıtından 2,8 kat daha yüksek bir performans sergilemektedir. Ancak, düşük hacimsel enerji yoğunluğu nedeniyle, yakıtın depolanması ve taşınması için özel tasarımlar gerekmektedir.

Depolama Zorlukları

Hidrojenin kriyojenik sıvı olarak depolanması, uçaklarda büyük tankların kullanımını zorunlu kılmaktadır. Sıvı hidrojen tanklarının tasarımı, ısı kaybını önlemek için gelişmiş yalıtım sistemleri ve malzeme teknolojileri gereklidir. Bu bağlamda, alüminyum alaşımları ve çok katmanlı yalıtım malzemeleri gibi çözümler araştırılmıştır.

Maliyet ve Altyapı Sorunları

Hidrojenin üretimi, taşınması ve depolanması için gerekli olan altyapının yetersizliği, ticari kullanımı sınırlayan temel bir zorluk olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, hidrojenin sıvılaştırılması ve kriyojenik tanklarda saklanması önemli enerji ve maliyet gerektirmektedir.

Havacılıkta Kullanım Potansiyeli

Hidrojenin gaz türbinlerinde doğrudan yakılması veya yakıt hücreleri ile enerji üretilmesi, havacılıkta uygulanabilir iki ana yöntem olarak belirlenmiştir. Hidrojenle çalışan uçakların toplam kalkış ağırlığının %20 daha düşük olabileceği ve bu durumun operasyonel maliyetleri azaltabileceği görülmüştür.

Emniyet Önlemleri

Hidrojenin yanıcı bir gaz olması nedeniyle, depolama ve kullanım sırasında sıkı emniyet önlemleri alınması gerekmektedir. Özellikle kriyojenik tankların yapısal tasarımında sızıntı ve buharlaşma risklerini minimize etmek için teknolojik yeniliklere ihtiyaç duyulmaktadır.

Teknolojik Gelişmeler ve Literatüre Katkı

Literatürde yer alan veriler, hidrojenin ticari uçaklarda kullanımının uzun vadede mümkün olduğunu göstermektedir. Ancak, teknolojik gelişmeler ve maliyetlerin düşürülmesi için daha fazla araştırma ve yatırım gerekmektedir.

Bu bulgular, hidrojenin çevresel avantajlarının havacılık sektöründe geniş bir kullanım potansiyeli sunduğunu, ancak depolama ve altyapı konusundaki zorlukların aşılması gerektiğini göstermektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalar, bu zorlukların çözülmesine odaklanmalı ve hidrojenin havacılık sektöründe etkin bir şekilde kullanılabilmesi için gerekli adımları belirlemelidir.

TARTIŞMA

Bu çalışma, hidrojenin havacılık sektöründe alternatif bir yakıt olarak kullanılabilirliğini kapsamlı bir şekilde ele almıştır. Havacılıkta mevcut fosil yakıtların çevresel etkileri, artan karbon emisyonları, iklim değişikliği ve küresel ısınma gibi küresel sorunların çözümü için alternatif enerji kaynaklarının araştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, hidrojen gazının karbon salınımı olmaması, yenilenebilir kaynaklardan üretilmesi ve yüksek enerji yoğunluğu ile geleceğin havacılık yakıtı olarak dikkat çektiği görülmüştür. Hidrojenin uçaklarda kullanımı, yalnızca çevresel faydalar sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda enerji bağımsızlığına katkıda bulunarak ekonomik krizlerin etkilerini hafifletme potansiyeli taşımaktadır.

Bu projede, hidrojenin üretim yöntemleri, tarihçesi, depolama teknikleri ve havacılık için teknik uygunluğu ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Hidrojenin kriyojenik bir ortamda sıvı olarak depolanmasını mümkün kılan teknolojiler üzerine odaklanılmış ve sıvı hidrojen tanklarının tasarımı hakkında bilgiler sunulmuştur.

Tartışmalar, hidrojenin kullanımında karşılaşılan temel zorlukları ve bu zorluklara yönelik çözüm önerilerini içermektedir. Özellikle üretim, depolama ve taşınabilirlik maliyetlerinin yüksek oluşu, altyapı eksiklikleri ve güvenlik kaygıları, hidrojenin ticari havacılıkta geniş çaplı kullanılabilmesinin önündeki temel engeller olarak tespit edilmiştir. Ancak bu problemler, yeni nesil teknolojilerin geliştirilmesi, uluslararası iş birlikleri ve yenilenebilir enerji kaynaklarının daha verimli kullanımı ile aşılabılır görünmektedir.

SONUÇ

Çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda, hidrojenin mevcut yakıtlarla kıyaslandığında yüksek enerji verimliliği sunduğu ve uzun vadede fosil yakıtlara bağımlılığı azaltarak çevresel ve ekonomik faydalar sağlayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Hidrojenin su ve biyokütleden üretilmesi, enerji arz güvenliğini artırmakta ve sürdürülebilir bir gelecek için umut vadetmektedir.

Bu bağlamda, çalışmanın literatüre katkılarının havacılık sektöründe temiz enerjiye geçişi hızlandıracak bir rehber işlevi göreceği öngörülmektedir. Gelecekte, hidrojenin havacılıkta daha yaygın hale gelmesiyle birlikte, fosil yakıtların çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin büyük ölçüde azalması beklenmektedir. Ayrıca, petrol ve doğalgaz krizlerinin yol açtığı ekonomik zararın da ortadan kaldırılacağı tahmin edilmektedir.

Bu bağlamda, hidrojenin havacılık yakıtı olarak uygulanabilirliğini artıracak daha fazla araştırmaya ve inovasyona ihtiyaç duyulmaktadır.

ÖNERİLER

Hidrojenin havacılık sektöründe yaygın bir enerji kaynağı olarak kullanılması için öncelikle üretim teknolojilerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kaynaklarının hidrojen üretiminde daha etkin bir şekilde kullanılması için yenilikçi teknolojilere yatırım yapılmalıdır. Özellikle elektroliz ve biyokütleden hidrojen üretim süreçlerinin verimliliğini artırmaya yönelik araştırmaların desteklenmesi önem taşımaktadır. Hidrojenin depolanması, taşınması ve dolumu için gerekli altyapının oluşturulması ve geliştirilmesi bir diğer önemli adımdır. Havalimanlarında sıvı hidrojen dolum tesislerinin kurulması ve lojistik süreçlerin optimize edilmesi gereklidir. Bunun yanı sıra, hidrojen üretim ve depolama maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla devlet teşvikleri ve özel sektör yatırımları artırılmalıdır. Üretim süreçlerinde daha ucuz ve sürdürülebilir malzemelerin kullanılmasına yönelik araştırmalar da teşvik edilmelidir. Hidrojenin taşınması ve depolanması sırasında güvenlik risklerinin azaltılması için kapsamlı standartlar ve protokoller geliştirilmelidir. Bu konuda uluslararası

düzeide güvenlii düzenlemeleri oluşturulması ve bunların titizlikle uygulanması büyük önem taşımaktadır. Aynı zamanda, sektörde çalışan mühendisler, teknisyenler ve yöneticiler için hidrojen teknolojileri konusunda eğitim programları düzenlenmeli, kamuoyunun temiz enerji kaynaklarına yönelik farkındalığını artıracak bilgilendirici kampanyalar yapılmalıdır.

Hidrojen teknolojilerinin gelişimi için ülkeler arasında iş birliği teşvik edilmelidir. Uluslararası fonlar ve ortak araştırma projeleri, teknik ve ekonomik zorlukların aşılmasında önemli bir rol oynayacaktır. Hidrojenle çalışan uçak prototiplerinin geliştirilmesi ve test edilmesi için demonstrasyon projeleri oluşturulmalıdır. Bu tür projeler, teknolojinin uygulanabilirliğini kanıtlayarak sektördeki yaygınlaşmasını hızlandıracaktır. Hidrojenin havacılıkta kullanımını teşvik etmek için uygun yasal düzenlemeler ve politikalar oluşturulmalı, fosil yakıtlardan uzaklaşmayı destekleyen karbon vergisi gibi uygulamalar hayata geçirilmelidir. Ayrıca, havacılık, malzeme bilimi, enerji mühendisliği ve çevre bilimleri gibi farklı disiplinlerin bir araya gelerek çalıştığı çok disiplinli araştırmalar, hidrojen teknolojilerinde inovasyonu hızlandırabilir.

Son olarak, hidrojenin havacılıkta yaygın bir yakıt olarak kullanılması için uzun vadeli bir stratejik plan oluşturulmalıdır. Bu plan, teknolojik gelişmelerin yanı sıra çevresel ve ekonomik hedefleri de içermelidir. Bu önerilerin uygulanması, hidrojenin havacılık sektöründe güvenli, ekonomik ve çevre dostu bir yakıt olarak benimsenmesini hızlandıracak ve sürdürülebilir bir havacılık geleceği için önemli bir adım olacaktır.

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 (%50) – Yazar 2 (%50)

Veri Toplama (CRediT 2) Yazar 1 (%100)

Araştırma - Veri Analizi - Doğrulama (CRediT 3-4-6-11) Yazar 1 (%50) – Yazar 2 (%50)

Makalenin Yazımı (CRediT 12-13) Yazar 1 (%50) – Yazar 2 (%50)

Metnin Tashihi ve Geliştirilmesi (CRediT 14) Yazar 1 (%50) – Yazar 2 (%50)

Finansman

Bu çalışma için herhangi bir finansal destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması

Çıkar çatışması yoktur.

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG)

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: 9 Sanayi, Yenilikçi ve Altyapı

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: 12 Sorumlu Üretim ve Tüketim

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: 13 İklim Eylemi

REFERANSLAR

- Ahmad Baroutaji, Abdul Ghani Olabid, Tabbi Wilberforceb, & Ramadanc, M. (2019). Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 106, 31-40.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.022>
- Al, K., & Ateş, E. B. (2022). Sürdürülebilir hidrojen üretim teknolojileri: biyokütle temelli yaklaşımlar. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, 5(1)
<https://doi.org/10.55930/jonas.1101384>
- Alahmad, H., Bilen, E., & Taskesen, E. (2023). *Yakıt Pillerinin Tarihsel Gelişimi, Çalışma Prensipleri ve Çeşitleri İncelenmesi*.
- Altınsoy, Y., Bilgisi, K., Yıldırım, A., Üniversitesi, B., Sistemleri, E., Bölümü, M., & Ankara, E. (2024). *Hidrojen Depolama ve Taşıma* (ss. 429-441).
- Aras, M. (2012). *Model bir jet motorun yapımı ve farklı sıvı yakıtlarla test edilmesi* [TEZ, Sakarya Üniversitesi]. <https://9lib.net/tr/download/870035175623491585>
- Arat, H. T., & Sürer, M. G. (2017). State of art of hydrogen usage as a fuel on aviation. *European Mechanical Science*, 2(1), 20-30. <https://doi.org/10.26701/ems.364286>
- Aurelius, M. (2013). Advanced Aircraft Design. İçinde *Advanced Aircraft Design* (ss. 157-195). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118568101.ch6>
- Aydın, H., & İlkılıç, C. (2017). Air pollution, pollutant emissions and harmful effects. *Journal of Engineering and Technology*, 1(1), Article 1.
- Bektaş, M. A., & Arpa, O. (2024). Hydrogen Fuel Cells: The Key to Clean Future. *Uluslararası Muhendislik Arastırma ve Geliştirme Dergisi*. <https://doi.org/10.29137/umagd.1438229>
- Bobadilla, D. A. S. (2023). *Comparative Energy Efficiency Analysis for Hydrogen and Jet Fuel in Next-Generation Long-Haul Aircraft—ProQuest Dissertations & Theses Global—ProQuest* [TEZ].
<https://www.proquest.com/pqdtglobal/docview/3030940819/CB28D09A8D444041PQ/6?accountid=159111&sourcetype=Dissertations%20&%20Theses>
- Brewer, G. D. (2017). *Hydrogen Aircraft Technology* (1991. bs). Routledge.
<https://doi.org/10.1201/9780203751480>
- Caunter, C. F. (1982). *Hydrogen: A transport aircraft fuel as applied to the Ontario scene—ProQuest Dissertations & Theses Global—ProQuest*.
<https://www.proquest.com/pqdtglobal/docview/303252359/356541D785524A4APQ/15?accountid=159111&sourcetype=Dissertations%20&%20Theses>
- Chanchetti, L. F., Leiva, D. R., Lopes De Faria, L. I., & Ishikawa, T. T. (2020). A scientometric review of research in hydrogen storage materials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(8), 5356-5366. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.093>
- Contreras, A., Yiğit, S., Özay, K., & Veziroğlu, T. N. (1997). Hydrogen as aviation fuel: A comparison with hydrocarbon fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 22(10), 1053-1060. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(97\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(97)00008-6)
- Çetinkaya, S. A. (2024). *Isıl olarak birleştirilmiş yakıt pili ve metal hidrit hidrojen depolama tankı sisteminin matematiksel modellenmesi* [Dokuz Eylül Üniversitesi].
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=LY6e5xGA7WWUpEdrBmEPLo1Yf2>

CxBoHg1875olKyuf9o26jHSNbdEfNu4S2353Ch

- İlbeyoğlu, S., Gürbüz, H., & Bayat, M. (2023). Hidrojen PEM Yakıt Hücresinin Performansını Etkileyen Faktörler ve Genel Bir Değerlendirme. İçinde *International Conference on Pioneer and Innovative Studies* (C. 1). <https://doi.org/10.59287/icpis.804>
- Ilıksu, M. (2012). *Magnezyum esaslı hidrojen depolama malzemeleri* [TEZ, İstanbul Teknik Üniversitesi]. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Kademli, M. (2017). Hidrojen Teknolojisi, Potansiyeli ve Geleceği. *Mesleki Bilimler Dergisi (MBD)*, 6(2).
- Karakaya, Ç. (2021). *Hidrojen depolama tanklarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve bilgisayar yardımı ile modellenmesi* [Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi]. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=zD1B0cW7zVr3VcnZjitVXjFXs7Re6J5G6Ym9JdWRMgWP772tvuSljFxQQpw_vT4I
- Kiely, M. (2024). *The Conceptual Design, Analysis, and Optimization of a Hydrogen Combustion and a Hydrogen Fuel-Cell Powered Aircraft* [Ph.D., Washington University in St. Louis]. <https://www.proquest.com/pqdtglobal/docview/3043629281/abstract/CB28D09A8D444041PQ/2>
- Manigandan, S., Praveenkumar, T. R., Ir Ryu, J., Nath Verma, T., & Pugazhendhi, A. (2023). Role of hydrogen on aviation sector: A review on hydrogen storage, fuel flexibility, flame stability, and emissions reduction on gas turbines engines. *Fuel*, 352, 129064. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129064>
- Mattus, Richard, & Kallstrand, Ake. (2010). Fossil Energy and Ventilation Air Methane | 12 | Methane and Climate C. İçinde *Methane and Climate Change* (2010. bs). Taylor&Francis. <https://a625279e9eb529a222495bd4bf55d78da4104053.vetisonline.com/chapters/edit/10.4324/9781849775090-12/fossil-energy-ventilation-air-methane-richard-mattus-%C3%A5ke-k%C3%A4llstrand?context=ubx&refId=e7ba6f65-7511-4d9f-a3e4-1a2527e2cf36>
- Mercan, M. (2023). *Basıncılı Hidrojen Silindirinin Dohum Sürecinde Başlangıç Basıncı ve Giriş Sıcaklığının Son Sıcaklığa ve Depolanan Hidrojen Kütlesine Etkisinin İncelenmesi* [Gazi Üniversitesi]. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=a0OMTmEd_3mfOBxT8SiBTHCZn5GhdphnOtFWB_cz6i1rC3tP7pF-3rjcdbc4COem
- Mital, S. K., Gyekenyesi, J. Z., Arnold, S. M., Sullivan, R., Manderscheid, J. M., & Murthy, P. (2006). *Review of Current State of the Art and Key Design Issues with Potential Solutions for Liquid Hydrogen Cryogenic Storage Tank Structures for Aircraft Applications*.
- Morris, R. E., & Brewer, G. D. (1975). *Tank and Fuel Systems Considerations for Hydrogen Fueled Aircraft on JSTOR*. 16.
- Mutlubaş, H., & Özdemir, Z. Ö. (2023). Hidrojenin Kullanım Alanları ve Hidrojen Ekonomisi. *Yekarum*, 8(1).
- Ökten, M., Variyenli, H., & Karyeyen, S. (2024). Birleşik Tip Gaz Yakıcı Cihazlarda Metan-Hidrojen Karışımının Performans Analizi. *Journal of Polytechnic*. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1559852>
- Özcan, B. (2008). Sürdürülebilir kalkınma ve hidrojen enerjisi. *Humanities Sciences*, 3(2). <https://doi.org/10.12739/10.12739>

- Özdemir, Z. Ö., & Mutlubas, H. (2019). *Enerji taşıyıcısı olarak hidrojen ve hidrojen üretim yöntemleri*. 19.
- Öztürk, M., Özek, N., & Yüksel, Y. E. (2010). Doğalgazdan hidrojen üretilmesi ve salınan karbondioksitin tutulması. *IJTS* 2(2) 1–13.
- Reiman, A. (2009). *AMC's Hydrogen Future: Sustainable Air Mobility*.
- T., R., & G., S. (2006). *Hydrogen production and storage: R & D priorities and gaps*. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20712341>
- Thomas, N. C. (1988). The role of hydrogen as a future fuel on JSTOR. 1988, 16.
- Thomas, S. A. (2024). *Heat Transfer Techniques in Large-Scale Hydrogen Storage Using Metal Hydride Materials—ProQuest Dissertations & Theses Global—ProQuest*. <https://www.proquest.com/pqdtglobal/docview/3051297360/356541D785524A4APQ/6?accountid=159111&sourcetype=Dissertations%20%20Theses>
- Tür, V., & Büyükkaya, E. (2024). Hidrojen takviyeli doğalgaz kullanımının yoğunmalı kazanlara etkilerinin incelenmesi. *Uluslararası Yakıtlar Yanma ve Yangın Dergisi*, 12(1). <https://doi.org/10.52702/fce.1440186>
- Tzimas, E., Filiou, C., Peteves, s., & Veyret, J.-B. (2003). *Hydrogen Storage: State-Of-The-Art And Future Perspective*.
- Verstraete, D. (2013). Long range transport aircraft using hydrogen fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(34), 14824-14831. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.09.021>
- Webster, J. (2023). *Can Hydrogen Fuel Reduce Aviation's Climate Impact? On JSTOR*. https://8132462625711418be6483c2d0db774bf632dd5b.vetisonline.com/stable/resrep48669?searchText=HYDROGEN+GAS+AS+FUEL+IN+AIRCRAFT&searchUri=%2Faction%2FdoBasicSearch%3FQuery%3DHYDROGEN%2BGAS%2BAS%2BFUEL%2BIN%2BAIRCRAFT%26so%3Drel&ab_segments=0%2Fbasic_search_gsv2%2Fcontrol&refreqid=fastly-default%3Ade88045cb725dc7fa00856c1fb03036e&seq=4
- Winnefeld, C., Kadyk, T., Bensmann, B., Krewer, U., & Hanke-Rauschenbach, R. (2018). Modelling and Designing Cryogenic Hydrogen Tanks for Future Aircraft Applications. *Energies*, 11, 105. <https://doi.org/10.3390/en11010105>
- Yang, B. (2022). *An Approach to Evaluate Fleet Level Co2Impact of Introducing Liquid Hydrogen Aircraft to a Worldwide Network—ProQuest Dissertations & Theses Global—ProQuest*. <https://www.proquest.com/pqdtglobal/docview/2838331840/CB28D09A8D444041PQ/9?accountid=159111&sourcetype=Dissertations%20%20Theses>
- Yanxing, Z., Maoqiong, G., Yuan, Z., Xueqiang, D., & Jun, S. (2019). Thermodynamics analysis of hydrogen storage based on compressed gaseous hydrogen, liquid hydrogen and cryo-compressed hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(31), 16833-16840. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.207>
- Yusaf, T., Faisal Mahamude, A. S., Kadirgama, K., Ramasamy, D., Farhana, K., A. Dhahad, H., & Abu Talib, A. R. (2024). Sustainable hydrogen energy in aviation – A narrative review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 1026-1045. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.02.086>
- Zohuri, B. (2019). *Cryogenics and Liquid Hydrogen Storage: Challenges and Solutions for a Cleaner Future* (ss. 121-139). https://doi.org/10.1007/978-3-319-93461-7_4