

**HAVALİMANLARINDA ENERJİ TAŞIYICISI OLARAK HİDROJEN
TEDARİK ZİNCİRİ SENARYOLARI VE ANALİZLERİ**

Hurşit DEĞİRMENCİ

Yüksek Lisans Tezi

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Alper ULUDAĞ

(İkinci Danışman: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ)

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Haziran 2022

16/06/2022

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ęrencisi Hurşit DEğİRMENCİ, HAVALİMANLARINDA ENERJİ TAşIYICISI OLARAK HİDROJEN TEDARİK ZİNCİRİ SENARYOLARI VE ANALİZLERİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Daniřmanı

Dr. Öğr. Üyesi Alper ULUDAğ

ÖZET

HAVALİMANLARINDA ENERJİ TAŞIYICISI OLARAK HİDROJEN TEDARİK ZİNCİRİ SENARYOLARI VE ANALİZLERİ

Hurşit DEĞİRMENCİ

Uçak Gövde Motor Bakım Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Haziran 2022

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Alper ULUDAĞ

(İkinci Danışman: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ)

Günümüzde ulaşım sektörünün içinde önemli bir yer edinen havacılık endüstrisi birincil enerji kaynağı olarak sürdürülemez ve çevre zararı yüksek olan fosil temelli yakıtlar kullanmaktadır. Fosil temelli yakıtlar sürdürülebilir bir ekonomiyi sürdürülemez hale getirmektedir. Havacılık endüstrisi enerji ve çevre ile ilgili sorunlarını çözmek için sürdürülebilir havacılık yakıtlarına yönelmişlerdir. Bu yakıtların arasında en umut verici yakıt hidrojendir. Hidrojen çevre dostu, temiz ve farklı kaynaklardan elde edilen bir yakıttır. Ancak havacılık endüstrisinde hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak kullanımı birtakım zorluklar getirmektedir. Bu zorluklar da önemli bir yer edinen hidrojenin yakıt olarak günümüzde havacılık endüstrisinde kullanılan kerosen gibi bir tedarik zincirinin olmamasıdır. Tedarik zincirinin içinde hidrojenin üretimi, sıvılaştırılması, taşınması, depolanması ve dağıtımı alt bölümlerini bulunmaktadır. Bu çalışmada havalimanı hidrojen tedarik zinciri alt bölümleri için farklı senaryolar oluşturulmuştur. Oluşturulan hidrojen tedarik zinciri senaryoları çevre, maliyet, sürdürülebilirlik, fizibilite, emniyet açısından incelenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Hidrojen yakıtı, Havalimanı hidrojen tedarik zinciri, Hidrojen destekli havacılık, Sürdürülebilir havacılık yakıtı, Hidrojen enerji.

ABSTRACT

HYDROGEN SUPPLY CHAIN SCENARIOS AND ANALYSIS AS AN ENERGY CARRIER IN AIRPORTS

Hurşit DEĞİRMENÇİ

Department of Aircraft Airframe Powerplant Maintenance

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, June 2022

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Alper ULUDAĞ

(Co-Supervisor: Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ)

The aviation industry, which plays an important role in today's transportation industry, relies on unsustainable and environmentally harmful fossil-based fuels as its primary energy source. To solve their own energy and environmental problems, the aviation industry has turned to sustainable aviation fuels. Hydrogen, out of all of these fuels, it seems to be the most promising. Hydrogen is a nonpolluting, clean fuel that can be obtained from a variety of sources. The use of hydrogen as an energy carrier in the aviation industry, however, poses some challenges. The lack of a supply chain for hydrogen, which is used in the aviation industry today, is a significant factor in these difficulties. Within the supply chain, there are divisions for hydrogen production, liquefaction, transportation, storage, and distribution. Different scenarios for airport hydrogen supply chain subdivisions were formed in this study. The scenarios for hydrogen supply chains were evaluated in terms of the environment, cost, sustainability, feasibility, and safety.

Keywords: Hydrogen fuel, Airport Hydrogen supply chain, Hydrogen powered aviation, Sustainable aviation fuel, Hydrogen energy.

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında destek olan danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Alper ULUDAĞ'a,

Bilgisi ve tecrübesi ile çalışmayı sevdiren Prof. Dr. T. Hikmet KARAKOÇ'a,

Katkıları ve değerlendirmeleriyle destek olan Doç. Dr. Selçuk Ekici'ye,

Öğrenme sürecinde katkısı olan Arş. Gör. Emre AYDIN'a ve Arş. Gör. Murat AYAR'a,

Bu tezi yazmamda katkısı olan Arş. Gör. Burak TARHAN'a,

En içten teşekkürlerimi sunarım.

Hurşit DEĞİRMENCİ

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Hurşit DEĞİRMENCİ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
DANIŞMAN ONAYI	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLolar DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Temel Bilgiler	1
1.2. Problemin Tanımı	1
1.3. Çalışmanın Hedefi ve Amacı	2
1.4. Çalışmanın İçeriği	4
2. HİDROJENE GENEL BİR BAKIŞ	5
2.1. Hidrojenin Fiziksel Özellikleri.....	5
2.2. Hidrojenin Kimyasal Özellikleri.....	6
2.3. Hidrojenin Kullanım Alanları	7
3. HAVALİMANLARINA GENEL BİR BAKIŞ.....	15
3.1. Havalimanı Temelli Emisyon Kaynakları ve Havalimanlarında Sürdürülebilirlik.....	16
3.2. Uçak İniş Kalkış Döngüsü Emisyonları ve Uçak Motor Emisyonları.....	17
3.3. Havacılık Endüstrisinde Önemli Kurum ve Kuruluşların Havalimanı Çevresel Etki ve Sürdürülebilirlik Raporları.....	21

4. LİTERATÜR TARAMASI.....	29
4.1. Hidrojen Havacılık Tarihine Genel Bir Bakış.....	29
4.2. Hidrojen Yakıtlı Yardımcı Güç Ünitesi.....	33
4.3. Hidrojen Yakıtlı Yer Destek Ekipmanları.....	35
4.4. Hidrojenin Yakıt Olarak Havacılıkta ve Havalimanlarında Kullanımına Genel Bir Bakış	37
5. HİDROJEN TEDARİK ZİNCİRİ ALT BÖLÜMLERİ.....	51
5.1. Hidrojen Üretim Yöntemleri.....	51
5.2. Hidrojen Depolama.....	66
5.3. Hidrojen Sıvılaştırma	67
5.3.1. Linde işlemi	69
5.3.2. Claude işlemi.....	69
5.3.3. Collins işlemi	69
5.3.4. Helyum brayton çevrimi.....	69
5.3.5. Manyetik sıvılaştırma sistemleri	70
5.3.6. Katalizlenmiş orto-para hidrojen dönüşümü	70
5.4. Hidrojen Taşıma ve Dağıtım.....	71
6. HİDROJEN DESTEKLİ HAVALİMANI SENARYOLARI	74
6.1. Hidrojen Üretimi.....	74
6.1.1. Kömür gazlaştırma.....	75
6.1.2. Metan reformasyon	76
6.1.3. Biyokütle.....	76
6.1.4. Nükleer güç	77
6.1.5. Güneş enerjisi	77
6.1.6. Hidroelektrik enerji	77
6.1.7. Rüzgâr enerjisi.....	78
6.1.8. Gelgit enerjisi.....	78
6.1.9. Jeotermal enerji.....	79
6.1.10. Dalga enerjisi	79
6.2. Hidrojen Sıvılaştırma	80
6.3. Hidrojen Taşıma ve Dağıtım	82
6.4. Hidrojen Depolama.....	86

6.5. Havacılık Yönünden Hidrojen Yakıtının Emniyeti	88
6.5.1. Hidrojenin havacılık yakıtı olarak avantajları.....	91
6.5.2. Hidrojenin havacılık yakıtı olarak dezavantajları	91
6.6. Kabuller	91
6.7. Havalimanı Hidrojen Tedarik Zinciri Senaryoları.....	96
6.7.1. Havalimanı dışında üretim (O1) senaryoları.....	100
6.7.2. Havalimanı içi üretim (O2) senaryoları	105
6.8. Havalimanları İçin Yüzeysel Bir Araştırma.....	109
7. BULGULAR.....	111
8. SONUÇLAR.....	116
KAYNAKÇA.....	117
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Hidrojenin temel özellikleri	6
Tablo 2.2. Hidrojenin temel ve kimyasal özellikleri.....	7
Tablo 2.3. Dünyada hidrojen tüketimi	9
Tablo 2.4. Yakıtların özelliklerinin karşılaştırılması	11
Tablo 2.5. Yakıtların emniyet faktörü.....	12
Tablo 2.6. Sanayileşmiş ülkelerdeki ana kirlilik emisyonlarının karşılaştırılması	13
Tablo 3.1. Farklı kaynaklardan gelen havalimanı CO ₂ emisyonları (2016)	17
Tablo 3.2. A320, A321, B737 uçak tipleri için motor ağırlıklı ortalama emisyon (kg) değerleri.....	21
Tablo 3.3. A320, A321, B737 uçak tipleri için motor ağırlıklı ortalama emisyon (kg) değerleri.....	21
Tablo 3.4. 2019'da yolcu CO ₂ Sıralaması emisyonları-ilk 10 çıkış ülkesi.....	25
Tablo 4.1. Hava terminali hidrojen sıvılaştırma tesislerinin özellikleri (Korycinski, 1978)	39
Tablo 4.2. Havalimanı için LH ₂ altyapısından bahseden seçilmiş literatür taraması bulguları	50
Tablo 5.1. Seçilen hidrojen üretim yöntemlerinin genel karşılaştırmaları.....	56
Tablo 5.2. Hidrojen üretim yöntemleri	59
Tablo 5.3. Hidrojen üretim yöntemleri	60
Tablo 6.1. Hidrojen taşıma yöntemleri	86
Tablo 6.2. Kerosen ile hidrojen yakıt özellikleri.....	89
Tablo 6.3. Hidrojen ve kerosenin emniyet açısından değerlendirilmesi	89
Tablo 6.4. Sıvılaştırılmış hidrojene kıyasla Jet A-1 yakıtının seçilmiş özellikleri	90
Tablo 6.5. Bazı üretim yöntemlerinin sosyal etkisi.....	94

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Düşük ve sıfır karbonlu enerjinin ticari havacılıkta nerelerde kullanılabileceğine dair gösterge niteliğinde bir genel bakış.....	3
Şekil 2.1. Hidrojen molekülü.....	5
Şekil 2.2. Hidrojenin kullanım alanları	7
Şekil 2.3. Hidrojenin endüstriyel alanlarda kullanımı	8
Şekil 2.4. Farklı yakıtların spesifik enerjisi	10
Şekil 2.5. Geleneksel fosil temelli yakıtların CO ₂ emisyonları	13
Şekil 2.6. Hidrojenin avantajları ve dezavantajları.....	14
Şekil 3.1. Uçak emisyonları ve uçak destek emisyonları	16
Şekil 3.2. Bir uçak motorunda ideal ve gerçek yanma ürünleri	18
Şekil 3.3. ICAO emisyon standartları için referans LTO döngüsü	19
Şekil 3.4. LTO emisyon faktörlerinin uçak tipine göre dağılımı.....	20
Şekil 3.5. ICAO Üye devletlerinden gelen yanıtlara dayalı olarak, ICAO Küresel İklim Uyum Risk Haritası (ICAO, 2019), iklim değişikliğinin uluslararası havacılık üzerindeki etkilerini göstermektedir	23
Şekil 3.6. 2013,2018,2019 yıllarında operasyonlara ve uçak sınıfına göre CO ₂ emisyonları.....	24
Şekil 3.7. Yıllara göre galon başına yolcu-mil gösterimi	26
Şekil 3.8. ABD’de gelecekteki yerli ve uluslararası havacılık CO ₂ emisyonları azaltma senaryoları	28
Şekil 4.1. Hidrojen sistemi ile donatılmış B-57 uçağı.....	30
Şekil 4.2. Phantom Eye Demonstrator uçağı.....	33
Şekil 4.3. Katı oksit yakıt hücreli yardımcı güç ünitesi.....	34
Şekil 4.4. Yer destek ekipmanları-GSE.....	36
Şekil 4.5. Kömür dönüşümüyle hidrojen üretimi	37
Şekil 4.6. Konsept geliştirme hususları	38
Şekil 4.7. Zürih havalimanı için üç alternatif olasılık	40
Şekil 4.8. LH ₂ uçaklarında yapılması gereken minimum değişiklikler	41
Şekil 4.9. Hidrojen yakıt ikmali besleme zinciri şeması	43
Şekil 4.10. Havalimanı hidrojen ekosistemleri (hub): çok akıllı ağ.....	45
Şekil 4.11. Hidrojen tedarik zinciri	48

Şekil 4.12. LH ₂ besleme topolojisi	49
Şekil 5.1. Farklı enerji kaynaklarıyla hidrojen üretim yöntemleri	51
Şekil 5.2. Farklı hidrojen üretim yöntemlerinin toplam çevre etkisi.....	54
Şekil 5.3. Hidrojen üretim yöntemleri ve kaynakları	57
Şekil 5.4. Hidrojen üretim yöntemleri ve kaynakları	57
Şekil 5.5. Hidrojen üretim yöntemlerinin CO ₂ emisyonlarının karşılaştırılması	58
Şekil 5.6. Hidrojen üretim yöntemlerinin AP ve GWP değerleri.....	60
Şekil 5.7. Hidrojen üretim yöntemlerinin CO ₂ değerleri.....	61
Şekil 5.8. Hidrojen üretim yöntemleri	62
Şekil 5.9. Kg hidrojen üretimi başına GWP (kg CO ₂ -eq) ve AP (g SO ₂ -eq) değerleri	62
Şekil 5.10. Hidrojen üretim süreçlerinin CO ₂ değerleri	63
Şekil 5.11. Havacılık yakıtı üretiminin CO ₂ eşdeğeri emisyonları.....	64
Şekil 5.12. Jet yakıtına kıyasla göreceli CO ₂ emisyonları.....	65
Şekil 5.13. Seçilmiş hidrojen üretim yöntemleri	65
Şekil 5.14. Hidrojen depolama seçenekleri	66
Şekil 5.15. Temel hidrojen sıvılaştırma çeşitleri	68
Şekil 5.16. Hidrojen taşıma araç çeşitleri	71
Şekil 5.17. Taşınma modellemesi.....	72
Şekil 5.18. Seçilmiş hidrojen üretim yöntemleriyle hidrojen tedarik zinciri modeli	73
Şekil 6.1 Mevcut hidrojen gazı ürün kaynakları.....	75
Şekil 6.2. Hidrojen üretim yöntemlerinin maliyet karşılaştırması.....	92
Şekil 6.3. Hidrojen üretim yöntemlerinin emisyon karşılaştırması	92
Şekil 6.4. Hidrojen üretim enerji kaynaklarının kapladıkları alan	93
Şekil 6.5. Hidrojen üretim yöntemlerinin verimi	93
Şekil 6.6. Sıvılaştırma çeşitleri maliyeti.....	94
Şekil 6.7. Sıvılaştırma ya da basınçlandırma emisyon değerleri.....	94
Şekil 6.8. Hidrojen taşıma maliyetleri	95
Şekil 6.9. Bazı hidrojen taşıma yöntemlerinin emisyon değerleri.....	95
Şekil 6.10. Hidrojeni depolamamaliyetleri.....	96
Şekil 6.11. Havalimanı içi üretim için hidrojen tedarik zinciri senaryoları	98
Şekil 6.12. Havalimanı dışında üretim için hidrojen tedarik zinciri senaryoları	99

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

H ₂	: Hidrojen
LH ₂	: Sıvı hidrojen
CGH ₂	: Basınçlandırılmış gaz hidrojen
CO ₂	: Karbondioksit
H ₂ O	: Su
CO	: Karbonmonoksit
NO _x	: Nitritoksit
SO ₂	: Kükürtdioksit
LTO	: Uçak iniş-kalkış döğüsü
O1	: Havalimanı dışında üretim senaryoları
O2	: Havalimanı içinde üretim senaryoları
U1	: Kömür gazlaştırma
U2	: Metan buhar reformasyonu
U3	: Nükleer güç
U4	: Biyokütle
U5	: Güneş enerjisi
U6	: Hidroelektrik
U7	: Rüzgâr enerjisi
U8	: Gelgit enerjisi
U9	: Jeotermal enerji
U10	: Dalga enerjisi
S1	: Claude çevrimi
S2	: Linde çevrimi
S3	: Çok bileşenli soğutucu çevrimi
T1	: Boru hattı ile taşıma
T2	: Gemi ile taşıma
T3	: Tren ile taşıma
T4	: Kamyon ile taşıma
T5	: Kamyona aktarma noktası
D	: Sıvı depolama

D1	: Tuz mağarası
D2	: Basıncılı depolama
D3	: Sıvı depolama
S4	: Sıvılaştırma
ST1	: Toplam sıvı hidrojen-1
ST2	: Toplam sıvı hidrojen-2
G1	: Gaz fazında hidrojen
ST	: Toplam sıvı hidrojen
R1	: Dron ile taşıma
R2	: Kamyon ile taşıma
R3	: Boru hattı ile taşıma
R4	: Körük ile taşıma
K1	: Uçak
K2	: APU
K3	: GSE
EASA	: Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı (European Union Aviation Safety Agency)
IATA	: Uluslararası Hava Taşımacılığı Birliği (The International Air Transport Association)
ICAO	: Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (International Civil Aviation Organization)
FAA	: Federal Havacılık İdaresi (Federal Aviation Administration)
NASA	: Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration)
ATAG	: Hava Taşımacılığı Eylem Grubu (Air Transport Action Group)
ATM	: Hava Trafik Yönetimi (Air Traffic Management)
SHY	: Sürdürülebilir Havacılık Yakıtı (Sustainable Aviation Fuel)
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri (United States of America)
APU	: Yardımcı Güç Ünitesi (Auxiliary Power Unit)
GSE	: Yer Destek Ünitesi (Ground Support Unit)

1. GİRİŞ

Bu bölümde ulaşım sektöründen kaynaklanan sera gazı emisyonları hakkında genel bilgiler verilmekte ve ulaşım sektörünün içinde havacılık endüstrisinin bu emisyonlara katkısı hakkında günümüz ve gelecek için sera gazı etkileriyle ilgili temel bilgiler sunulurken, problemin tanımı, bu çalışmanın amacı ve hedefi, çalışmanın içeriği yer almaktadır.

1.1. Temel Bilgiler

Kyoto Protokolüne göre, küresel karbon oranı her yıl % 2 oranında artmaktadır [1]. Modern ulaşım yöntemleri (örneğin: araçlar, hava yolculuğu, kargo vb.) iklim değişikliğinin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır ve sera gazı emisyonlarının % 27'sini üretmektedir [2]. Havacılık ulaşım sektörünün karbondioksit (CO₂) emisyonlarının yaklaşık % 12'sini oluşturmaktadır [3, 4]. Hava trafiğinin atmosfer üzerindeki etkisi son yıllarda birçok araştırmaya konu olmuştur [5]. İnsanların uçaklarda geçirdikleri zamanla karşılaştırıldığında, hava yolculuğunun ekolojik etkisi son derece yüksektir. Bununla birlikte, genel olarak yüksek düzeyde çevresel kaygıya ve iklim değişikliğinin azaltılması gerektiğine dair yüksek toplumsal kabule rağmen, hava yolculuğu hızla büyümektedir [6]. 2030 yılına kadar hava yolculuğunun % 5 artması beklenmektedir [7].

1.2. Problemin Tanımı

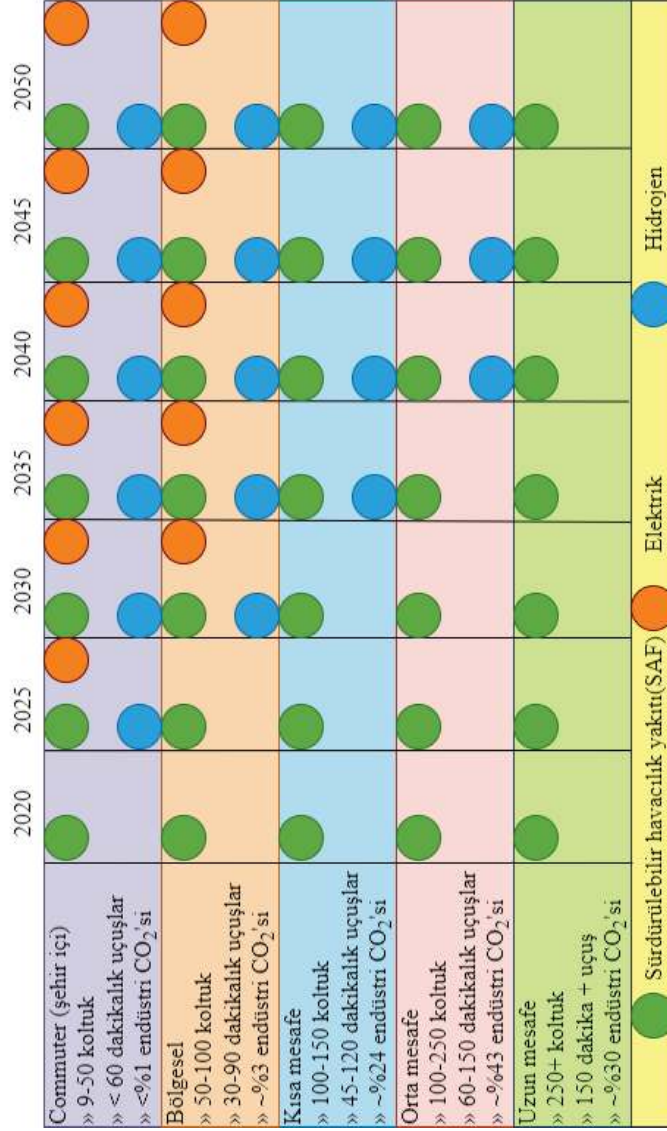
Günümüzde havacılık sektörü önemli miktarda enerji tüketir [8] ve bunun bir yan ürünü enerji üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarıdır [9]. Diğer birçok sektör gibi havalimanı sektörü de artan çevresel baskının etkileriyle karşı karşıyadır [10]. Fosil temelli bir yakıt olan kerosen, havacılık sektöründe kullanılmaktadır [11]. Havacılık sektöründe fosil temelli yakıtların kullanılması, bu yakıtların yenilenebilir enerji kaynakları olmaması ve çevreye zarar vermeleri sebebiyle sürdürülebilir bir ekonomiyi sürdürülemez hale getirmektedir. Bu durum havacılık sektörünü sürdürülebilir havacılık yakıtı olan yenilenebilir hidrojen yakıtını havacılık sektörüne entegrasyonuna yöneltmiştir. Ancak günümüzde hidrojenin, kerosen yakıtının sahip olduğu gibi bir tedarik zinciri mevcut değildir. Ayrıca hidrojenin havacılık sektörüne adaptasyonu kütleinden ve hacminden dolayı zorlu bir süreçtir.

1.3. Çalışmanın Hedefi ve Amacı

Havacılık endüstrisi ve havalimanları için, CO₂ emisyonlarını azaltmak ve enerji verimliliğini ve altyapı direncini artırmak gibi önlemler yoluyla iklim değişikliğine katkılarını azaltmaya yönelik girişimler de dahil olmak üzere, çevresel olarak daha sürdürülebilir hale gelmek için bir dizi strateji benimsenmiştir [12]. Bu girişimlerden birisi de sürdürülebilir havacılık yakıtı (SHY) kullanmaktır [13]. Havacılığın uzun vadeli sürdürülebilirliğini sağlamak ve çevreye verdiği zararı azaltmak için çevre dostu ve yenilenebilir kaynaklardan üretilen yakıtlara geçiş hayati hale gelmiştir. Bu sebeple birçok üretici firma, uluslararası havacılık kurum ve kuruluşları bu durumun önüne geçmek için çalışmalar yapmaktadır. Üreticiler arasında öncü olarak Boeing ve Airbus şirketleri bulunmaktadır. Uluslararası havacılık kuruluşları arasında ICAO (International Civil Aviation Organization), EASA (Avrupa Birliği Havacılık Emniyeti Ajansı), FAA (Federal Havacılık İdaresi), ATAG (Hava Taşımacılığı Eylem Grubu) gibi önde gelen kuruluşlar bulunmaktadır. Havacılık endüstrisinde hepsinin ortak olarak bulunduğu nokta sürdürülebilir temiz havacılıktır. Bu bağlamda raporlar yayınlamaktadırlar.

Air Transport Action Group (ATAG) 2021 yılından yayınlamış olduğu “Yüzyılın Ortasına Kadar Net Sıfır Havacılık Vizyonu” raporunda, hidrojenin gelecekte sürdürülebilir havacılıkta büyük bir rol oynayacağını özellikle SHY yakıtlarının üretiminde hayati bir bileşen olduğu belirtilmiştir. Hidrojenin (Şekil 1.1) tahrik gücü olarak yakıt hücrelerinde ve doğrudan yakılarak havacılıkta bir yakıt olarak sürdürülebilir havacılık için gelecekte önemli bir rol oynayacağı ve sıfır karbon emisyonu ile ümit verici bir yakıt olduğu belirtilmiştir [14].

Airbus şirketinin 2035 yılına kadar dünyanın ilk sıfır emisyonlu ticari uçağını geliştirme hedefi için hidrojen büyük bir önem taşımaktadır. Bu nedenle kriyojenik hidrojen depolama için çalışmalarını sürdürmektedir [15]. Airbus, VINCI airports ve Air Liquide gibi şirketler hidrojen kullanımını teşvik etmek ve geleceğin hidrojen uçaklarını barındıracak Avrupa havalimanı ağını inşa etmek için birlikte çalışmaya başlamışlardır. Lyon-Saint Exupéry (Fransa) havalimanı, 2023 yılı için Avrupa havalimanı ağı projesine ev sahipliği yapacaktır. Bu ortaklık, üç grubun hava yolculuğunun karbondan arındırılmasını desteklemek için kendi uzmanlıklarını birleştirme konusundaki ortak bir çalışmadır.



Şekil 1.1. Düşük ve sıfır karbonlu enerjinin ticari havacılıkta nerelerde kullanılabileceğine dair gösterge niteliğinde bir genel bakış [14]

Üç ortak, 2030 yılına kadar, Avrupa havalimanı ağını, hidrojenin yerde ve uçuşta kullanım için gerekli üretim, depolama ve tedarik tesisleriyle donatma olasılığını araştıracaktır [16].

ICAO, yayınlamış olduğu çevre raporunda çevre zararını düşürmek, iklim değişikliğini önlemek, hava kirliliğini azaltmak ve sürdürülebilirliği sağlamak için hidrojenin yakıt olarak havacılık endüstrisinde kullanılabileceğini belirtmiştir [17]. Ayrıca bu konuda yakın zamanda ‘Hidrojen, sıfır karbon uçuşları’ isimli etkinliği yapmıştır. Bu etkinliğe hidrojen havacılık endüstrisinde önde gelen kişileri etkinliğe

çağırıştır [18]. Boeing ise hidrojenin yakıt olarak kullanılmasıyla ilgili SUGAR ve ‘Kartal Gözü’ projesini yürütmektedir [19].

Bu çalışmanın amacı farklı senaryolar arasında havalimanı hidrojen tedarik zinciri altyapısı için çevresel etki, maliyet, sürdürülebilirlik, fizibilite, emniyet açısından en uygun hidrojen tedarik ağını oluşturmaktır.

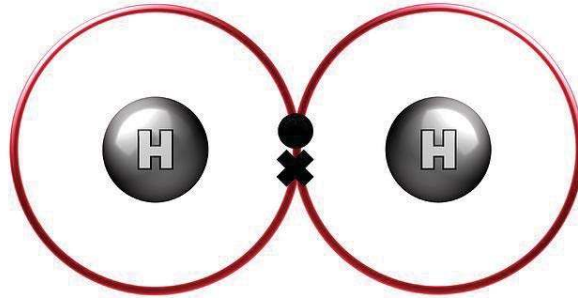
Bu çalışmanın hedefi havalimanlarında hidrojen yakıtının tedarik zinciri altyapısını oluşturan üretim, sıvılaştırma, depolama ve dağıtım aşamalarını çevresel etki, maliyet, sürdürülebilirlik, fizibilite, emniyet açısından irdelemektir. Bu bağlamda iki farklı tasarım oluşturulmuştur. İlk tasarımda hidrojen üretim yöntemlerinin sürdürülebilirliği ve çevresel etkisi dikkate alınmıştır. İkinci tasarımda, geniş bir perspektiften oluşturulan hidrojen havalimanı tedarik zinciri safhaları, çevresel etki, sürdürülebilirlik, fizibilite, emniyet ve maliyet açısından değerlendirilmiştir.

1.4. Çalışmanın İçeriği

Çalışmanın ikinci bölümünde hidrojenle ilgili temel kavramlar ve genel bilgiler tanımlanmıştır. Üçüncü bölümde havalimanlarının hava sahası ile ilgili emisyon kaynakları hakkında genel bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde havacılık endüstrisi ve havalimanları ile ilgili literatür taraması verilmiştir. Beşinci bölümde hidrojen tedarik zinciri alt bölümleri işlenmiştir. Altıncı bölümde hidrojen tedarik zinciri senaryoları oluşturulmuştur. Yedinci bölümde oluşturulmuş senaryolar için bulgular açıklanmıştır. Sekizinci bölümde senaryolarla ilgili elde edilen sonuçlar verilmiştir.

2. HİDROJENE GENEL BİR BAKIŞ

Hidrojen bilim insanı olan Henry Cavendish tarafından 1766 yılında keşfedilmiştir. Yedi yıl sonra suyun hidrojen ve oksijenden oluştuğunu kanıtlayan Antoine Lavoisier tarafından "su yapıcı" adı verilmiştir [20]. Mevcut kozmolojik teorilere göre, büyük patlamadan (Big Bang) sonraki tek element hidrojendir. Füzyon reaksiyonlarında diğer tüm elementler hidrojenden meydana gelmiştir [21]. Hidrojen atomu, atom numarası 1 olan periyodik tablodaki ilk elementtir. Sadece bir proton ve elektrondan oluşur. Hidrojen molekülü iki hidrojen atomundan oluşur ve gösterimi 'H₂' şeklindedir (Şekil 2.1). Tüm maddenin kütle olarak % 75'ini veya hacimce % 90'ını temsil eden evrendeki en hafif ve en bol elementtir. Dünya'da, çoğunlukla hemen hemen her elementle birlikte bileşiklerde bulunur [20].



Şekil 2.1. Hidrojen molekülü [22]

2.1. Hidrojenin Fiziksel Özellikleri

Basitçe hidrojen renksiz, kokusuz ve tatsızdır [23]. Hidrojenin yoğunluğu oda sıcaklığında havadan 14 kat daha düşüktür [24]. Hidrojen, helyumdan sonra en düşük kaynama noktasına ve erime noktasına sahip elementtir. Hidrojen, 20 K (−423 °F; −253 °C) kaynama noktasının altında sıvı ve 14 K (−434 °F; −259 °C) erime noktasının ve atmosfer basıncının altında bir katıdır. Açık bir şekilde bu sıcaklıklar oldukça düşüktür ve −100 °F (200 K; −73 °C) altındaki sıcaklıklar kriyojenik sıcaklıklar olarak

bilinmektedir ve bu sıcaklıklardaki sıvılar kriyojenik sıvılar olarak adlandırılmaktadır. Hidrojen zehirli değildir ancak havadaki oksijenin yerini alarak basit bir boğucu görevi görebilir [25]. Hidrojenin temel özellikleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Hidrojenin temel özellikleri [26]

Özellik:	Değer:	Birim:
Yoğunluk (gaz)	0,899	Kg. (Nm ³) ⁻¹
Yoğunluk (sıvı)	70,79	Kg. (m ³) ⁻¹
Ergime sıcaklığı	14,1	K
Kaynama sıcaklığı	21,15	K
Düşük ısıtma değeri	3,00	kWs. (Nm ³) ⁻¹ (hacimsel)
	33,33	kWs.kg ⁻¹ (Gravimetrik)
	2,79 (sıvılaştırılmış)	kWs.l ⁻¹
Brüt kalorifik değer	3,5	kWs.(Nm ³) ⁻¹

2.2. Hidrojenin Kimyasal Özellikleri

Normal sıcaklıklarda hidrojen, herhangi bir şekilde etkinleştirilmedikçe nispeten reaktif değildir. Hidrojen molekülünün aksine, hidrojen atomu kimyasal olarak çok reaktiftir ve bu nedenle doğada kimyasal olarak serbest bulunmaz. Aslında, hidrojen molekülünü hidrojen atomuna ayırtırmak için çok yüksek sıcaklıklar gereklidir [23]. Hidrojen çoğu elementle kimyasal olarak reaksiyona girebilmektedir. Oksijene bağlı olarak geniş bir konsantrasyon aralığında oldukça yanıcıdır [20]. Hidrojenin (oda sıcaklığında) havada konsantrasyonunun % 4 ila % 75'i ve oksijende hacimce % 95'ine kadar geniş bir yanıcılık aralığı vardır [27]. Hidrojenin temel ve kimyasal özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

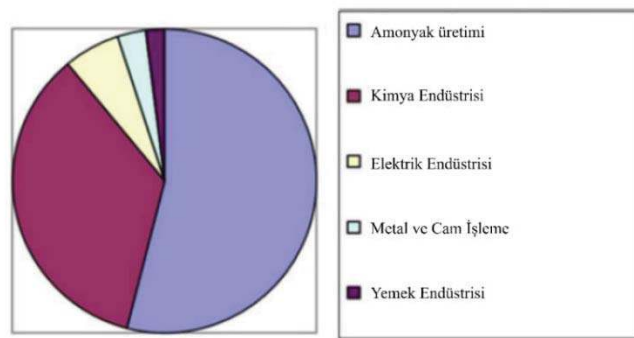
Tepkimeye giren olarak; petrol işleme, petrokimya üretimi, yağ ve yağ hidrojenasyonu, gübre üretimi, metalürjik uygulamalar, elektronik endüstrisinde hidrojen tüketilmektedir. O₂ ayırıcı olarak metalürjik süreçlerde O₂ tutucu görevini üstlenmektedir. Havacılık endüstrisinin öncülüğünde yakıt olarak kullanılmıştır. Soğutucu olarak jeneratörlerde kullanımı mevcuttur. Hidrojenin dünyada en çok tüketim alanı (Tablo 2.3) üredir. Gübre üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Tablo 2.2. Hidrojenin temel ve kimyasal özellikleri [24]

Hidrojen Atomu:	
Atom numarası	: 1
Atom ağırlığı	: 1,00782519 (on ¹² C scale)
Hidrojen Molekülü:	
Formül	: H ₂
Kimyasal Yapısı	: H-H
Moleküler ağırlığı	: 2,0159 u
Görünüm:	: Renksiz ve Kokusuz gaz (oda sıcaklığında)
Yoğunluk (gaz)	: 0,08988 g. l ⁻¹ (0 °C, 1 atm)
Bağıl buhar yoğunluğu (hava=1)	: 0,07
Yoğunluk (sıvı)	: 70,8 g. l ⁻¹ (-253 °C)
Erime noktası	: -259,35 °C
Kaynama noktası	: -252,88 °C (1 atm)
Sudaki çözünürlük	: 0,0214 cm ³ g ⁻¹ (0 °C, 1 atm)
1 kg hidrojenin enerji içeriği (su oluşturmak için oksijenle reaksiyona girdiğinde)	
Yüksek alevlenme değeri (HLV)	: 141900 kJ;33900 kcal;39,4 kW _s
Düşük alevlenme değeri (LHV)	: 120000 kJ;28600 kcal;32,9 kW _s

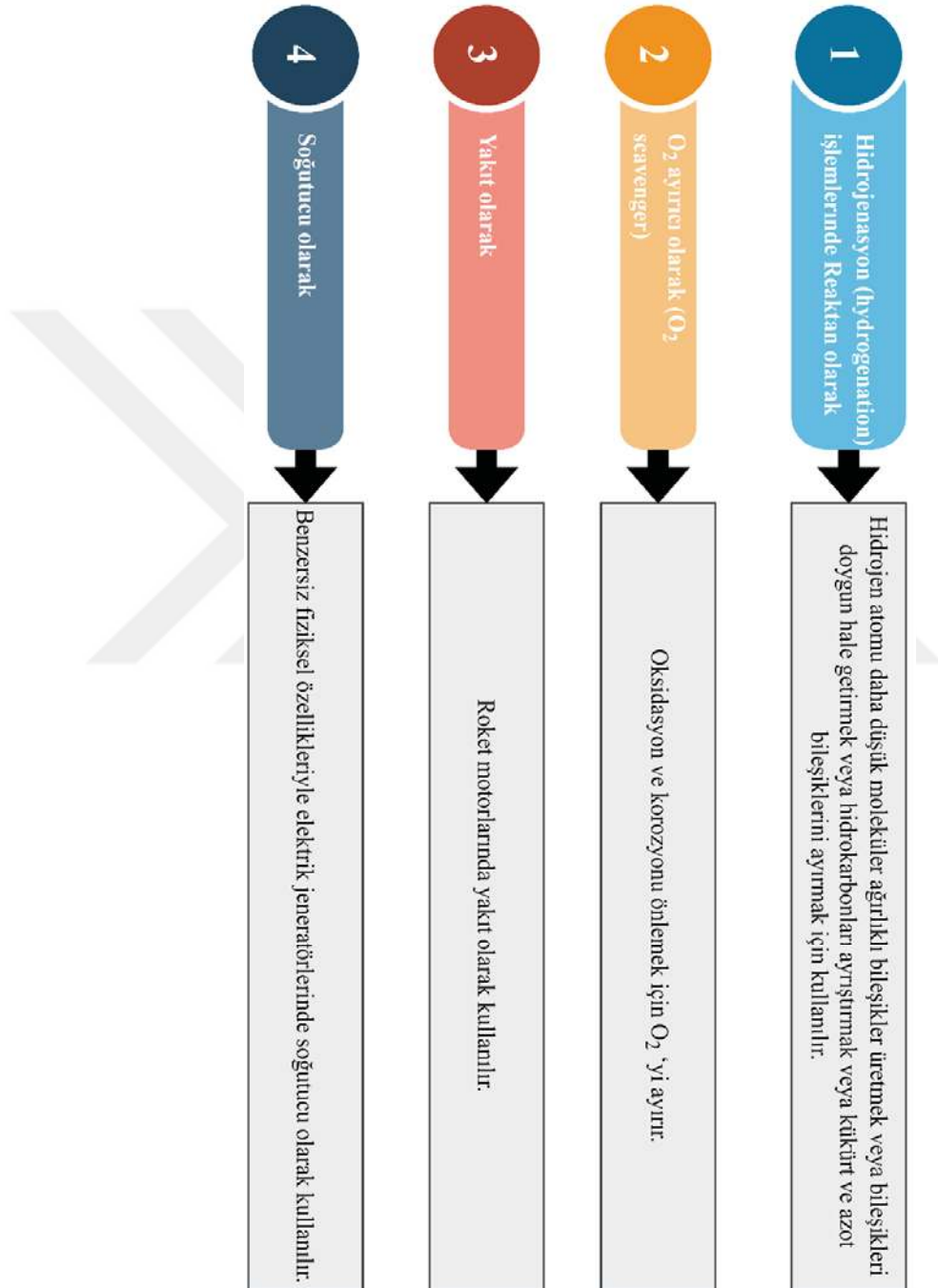
2.3. Hidrojenin Kullanım Alanları

Hidrojen hammadde olarak kimyasal ve petrokimyasal endüstride kullanılmaktadır. En çok kullanımı petrokimya alanından ve amonyak üretimindedir. Günümüzde hidrojenin enerji taşıyıcı olarak kullanılması hedeflenmektedir. Kullanım alanları Şekil 2.2’de gösterilmiştir [28].



Şekil 2.2. Hidrojenin kullanım alanları [29]

Şekil 2.2’de belirtilen alanlara göre hidrojenin kullanımının genel şeması Şekil 2.3’te gösterilmiştir. Soğutucu akışkan olarak, korozyon önleme ya da yakıt olarak kullanılabilir.



Şekil 2.3. Hidrojenin endüstriyel alanlarda kullanımı [30]

Hidrojenin kullanım alanları farklı gruplar şeklinde ayrılmıştır. Bunlar içinde hidrojen rektan (tepkimeye giren), O₂ ayırıcı, yakıt ve soğutucu olarak kullanılmaktadır.

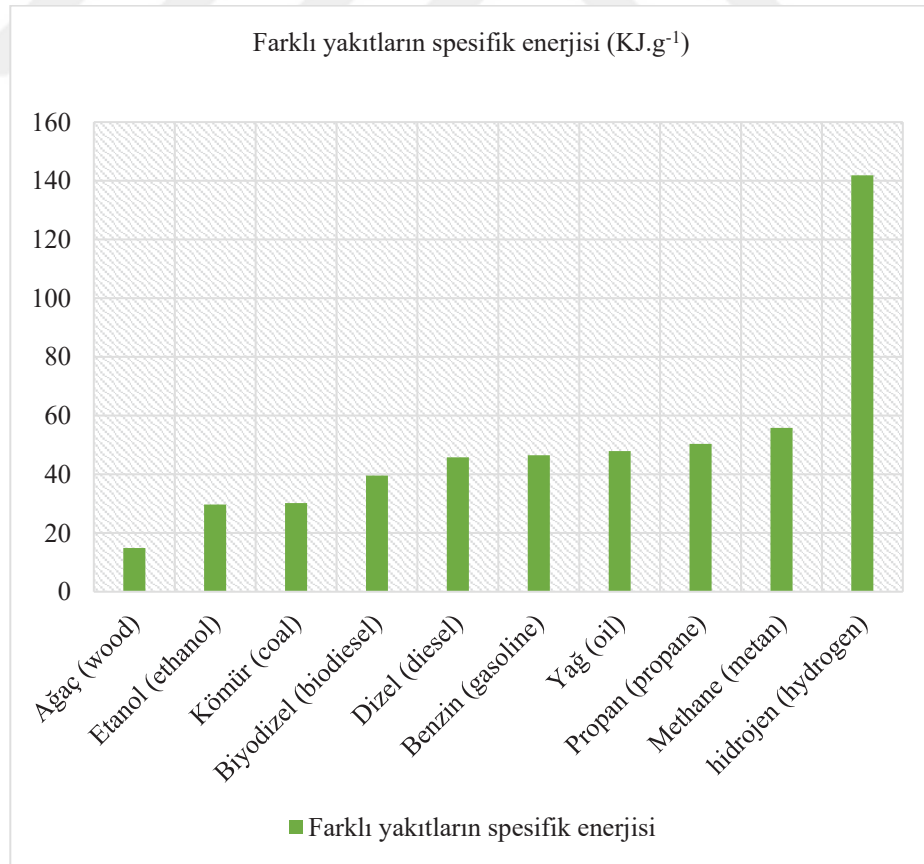
Tablo 2.3. *Dünyada hidrojen tüketimi [31]*

Kategori	Hidrojen tüketimi	
	Milyar (m ³)	Paylaşım (%)
Amonyum üretimi	273,7	61
Petrol rafineri	105,4	23
Metanol üretimi	40,5	9
Diğerleri	13,6	3
Ticari kullanıcılar	16,1	4
Toplam	449,3	100

Enerji herhangi bir ulusun gelişiminde önemli unsurdur. Enerji talebinin yükselmesi sebebiyle geleneksel enerji kaynaklarının azalması; enerji tasarrufunu, geleneksel olmayan enerji kaynaklarının yönetimini ve uygulamalarını zorunlu kılmaktadır [32]. Artan küresel nüfus, sanayileşme ve kentleşme ile birlikte, enerji talebi hızla artmaktadır [33]. Yeni enerji sistemlerinin keşfi, petrol krizi sırasında ortaya çıkmıştır. Atmosferdeki CO₂ seviyesi 1970 ve sonrası artmış, bu da şu anda iklim değişikliğine katkıda bulunmaktadır [34]. Sürdürülebilir kalkınma senaryoları, sürdürülebilir temiz enerji üretimi ile neredeyse eş anlamlıdır. Sürdürülebilir kalkınma kavramı, uzun vadeli bir perspektifte, doğa ile dengeyi bozmadan insan ihtiyaçlarının karşılanmasıdır [35]. Amerika'nın enerji ihtiyacının ve çevresel etkilerinin incelendiği bir çalışmada 2008 yılından itibaren 2050 yılına kadar süreçte Amerika'nın enerji ihtiyacının neredeyse iki katına çıkacağı öngörülmüştür [36]. Son analizler, kirlletici maddelerin, Amerikalıların % 50'sinin yaşadığı bölgelerde halk sağlığını ve çevreyi etkileyecek kadar yüksek olabileceğini göstermiştir. Hafif araçlar, önemli miktarda CO₂ ve uçucu organik bileşik (VOC) emisyonlarından ve Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) üretilen CO ve nitrojen oksit (NO_x) emisyonlarının çoğunun kaynağıdır. Günümüzde hidrojen öncelikle kimya endüstrisinde kullanılmaktadır, ancak yakın gelecekte önemli bir yakıt haline geleceği öngörülmektedir [37]. Hidrojen, bir yüzyıldan uzun süredir uygun, temiz yanan bir yakıt olarak önerilmiştir [38]. Yandığında çevreyi kirlletmeyen bir yakıttır [31]. 2050'ye kadar, öngörülen küresel enerji talebi iki veya üç katına çıkacak ve petrol ve gaz arzının bu gereksinimi karşılaması pek mümkün

görünmemektedir. Hidrojen ve yakıt hücreleri birçok ülkede sabit güç, ulaşım, sanayi ve konut sektörlerinde geleceğin sürdürülebilir enerji sistemleri için önemli bir alternatif enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir [39].

Hidrojen doğada bol bulunmasına rağmen her zaman diğer elementlerle bileşik halindedir ve su ve organik bileşikler içinde benzin, doğal gaz, metanol, propan gibi yakıtların çoğunu oluşturan hidrokarbonlarda bulunmaktadır. Hidrojenin kütle başına enerjisi yüksektir, saf hidrojen yakan bir motor neredeyse hiç kirliliğe sebep olmamaktadır. Amerika Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesinin (NASA), uzay mekiği ve diğer roketleri yörüngeye itmek için 1970'lerden beri sıvı hidrojen kullanmaktadır. Ayrıca NASA uzay programında uzay mekikleri için yakıt olarak ve astronotlar için ısı, elektrik ve içme suyu sağlayan yakıt hücrelerinde hidrojen kullanılmaktadır [40]. Hidrojenin stokiyometrik karışımının birim kütlesi başına yanma ile açığa çıkan enerji en yüksek olan yakıtlardan biridir (Şekil 2.4). Kütle temelli ısı değeri en yüksektir; ancak hacim temelli ısı değeri en düşüktür [41].



Şekil 2.4. Farklı yakıtların spesifik enerjisi [42]

Hidrojen, kütle başına 143 MJ.kg^{-1} enerji içeriğine sahiptir ve sıvı hidrokarbon temelli yakıtların 3 katı kadar daha büyük bir enerji içermektedir [43]. Diğer yandan gaz halinde çok düşük bir yoğunluğa sahiptir ve sıvılaştırılması için enerji harcanmaktadır [44]. Tüketiminde minimum çevresel zarara sebep olmakta ve yan ürün olarak su açığa çıkarmaktadır [45]. Ayrıca enerji bakımından zenginleştirilmiş karışımlar oluşturmak için diğer yakıtlara hidrojen eklenebilmektedir. Hidrojen geniş yanıcılık aralığında kullanılan yakıtlar yerine kullanılabilir [46]. Parlama noktası bir yakıtın bir tutuşma kaynağı mevcutken yüzeyinden bir alev oluşturmaya yetecek kadar buhar ürettiği sıcaklıktır [47]. Hidrojenin oldukça düşüktür. Geniş alevlenme değerine sahip olduğu için düşük alevlenme değeri ve yüksek alevlenme değeri arasında yanma sağlayabilmektedir [40]. Vuruntu motor içinde patlamadan sonra ikinci bir yakıt patlamasının oluşmasıdır ve oktanı yüksek olan yakıtlarda vuruntu azdır [44], [48] ve hidrojenin oktan numarası yüksektir. Hidrojenin difüzyon hızı karbonmonoksitten (CO) 4 kat daha fazladır. Bu şu anlama gelmektedir hidrojen ve oksijen karıştırıldığında CO'den 4 kat daha hızlı yayılmaktadır. Hidrojen oksijenle karıştırıldığında patlama süresi çok azdır ki diğer gazlara oranla patlama olasılığı çok düşüktür. Hidrojenin kömür gazından daha emniyetli olduğu deneysel olarak kanıtlanmıştır [49]. Yakıtların enerji kütlesi ve enerji hacmi sayısal verilerle Tablo 2.4'te gösterilmiştir.

Tablo 2.4. Yakıtların özelliklerinin karşılaştırılması [50]

Malzeme	Kilogram başına enerji (MJ.kg ⁻¹)	Litre başına enerji (MJ. l ⁻¹)
Hidrojen (sıvı)	143	10,1
Hidrojen (basıncılı, 700 bar)	143	5,6
Hidrojen (ortam basıncı)	143	0,0107
Metan (ortam basıncı)	55,6	0,0378
Doğal gaz (sıvı)	53,6	22,29
Doğal gaz (basıncılı, 250 bar)	53,6	9
Doğal gaz	53,6	0,0364
LPG propan	49,6	25,3
LPG bütan	49,1	27,7
Petrol	46,4	34,2
Biyodizel	42,2	33
Dizel	45,4	34,6

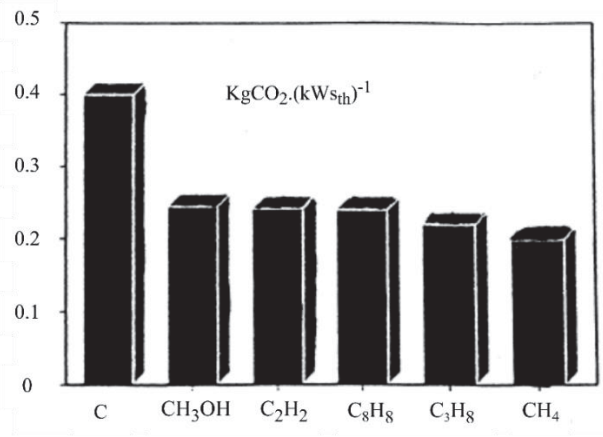
Hidrojenin yakıt olarak kullanılması için en az diğer yakıtlar kadar emniyetli olması gerekmektedir. Petrol, metan ve hidrojen arasında yapılan emniyet değerlendirmesi Tablo 2.5'te gösterilmektedir. Tablo 2.5'e göre hidrojenin emniyet açısından iyi bir yakıt olduğu gözlemlenmektedir.

Tablo 2.5. Yakıtların emniyet faktörü [51]

Özellikler (Characteristics)	Yakıtların emniyet puanı (Fuel ranking)		
	Petrol	Metan	Hidrojen
Yakıtın toksisitesi (Toxicity of fuel)	3	2	1
Yanma ürünlerinin toksisitesi (Toxicity of combustion products) (CO, SO _x , NO _x , HC, PM)	3	2	1
Yoğunluk (Density)	3	2	1
Difüzyon katsayısı (Diffusion coefficient)	3	2	1
Öz ısı (Specific heat)	3	2	1
Ateşleme sınırları (Ignition limits)	1	2	3
Ateşleme enerjisi (Ignition energy)	2	1	3
Ateşleme sıcaklığı (Ignition temperature)	3	2	1
Alev Sıcaklığı (Flame temperature)	3	1	2
Patlama Enerjisi (Explosion energy)	3	2	1
Alev yayma gücü (Flame emissivity)	3	2	1
Toplam (Totals)	30	20	16
Emniyet faktörü (Safety factor)	0.53	0.80	1.00

1 Emniyetli 2 Az emniyetli 3 Emniyetli değil

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından yayınlanan istatistiklere göre şu anda dünya çok büyük ölçeklerde (günde 89 milyon varilden fazla) fosil yakıt tüketmektedir [50]. Fosil yakıtların yakılmasının atmosferdeki artan CO₂ düzeylerinden (Şekil 2.5) sorumlu olduğu tespit edilmiştir [52]. Dünyadaki ortalama sıcaklığın artması, CO₂'in okyanuslarda çözünmesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, su sıcaklığının artmasıyla CO₂'in okyanus suyundaki çözünürlüğü azalmaktadır. Okyanusların ortalama sıcaklığı optimum bir sınıra yükseltildiğinde, atmosfer ve okyanus arasındaki CO₂ çözünürlük dengesi atmosfere doğru kaymaktadır. Bu da atmosferdeki sera gazının ek bir artışına yol açmaktadır [53].



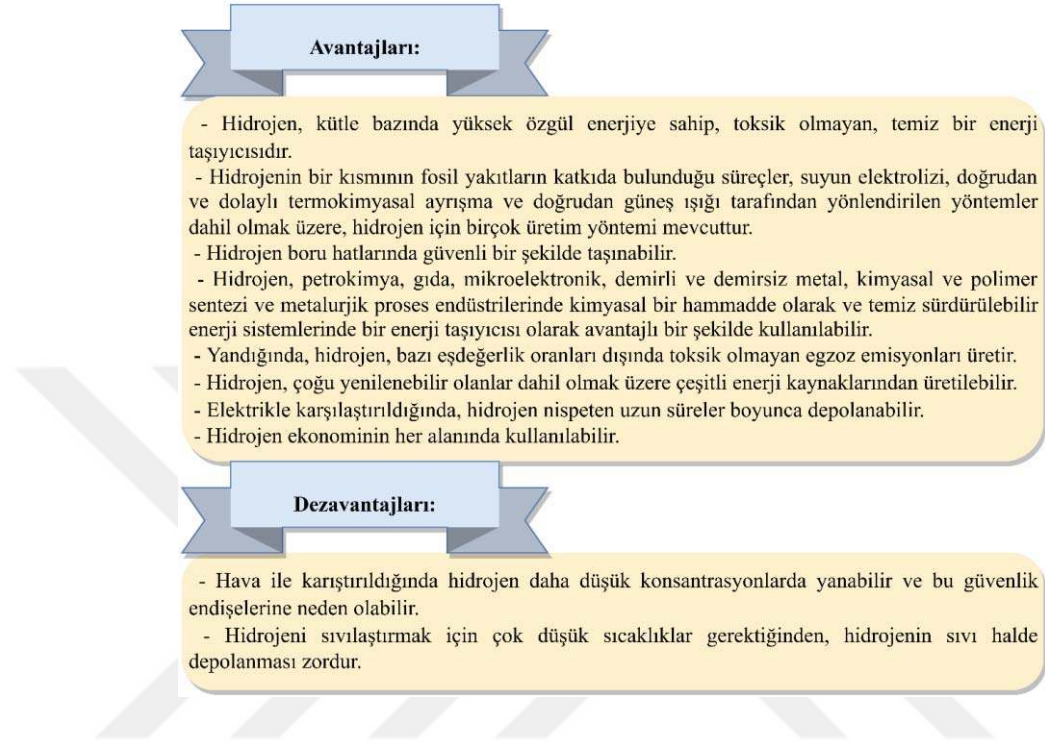
Şekil 2.5. Geleneksel fosil temelli yakıtların CO₂ emisyonları [54]

Enerji ihtiyacının artmasıyla beraber çevreye, yaşama ciddi zararlar veren SO_x, N_xO_y, partiküller, CO, CO₂ gibi emisyonlar artmıştır [55], [56], [57]. Fosil yakıt kullanımının sürekli artmasıyla ilişkili hava kirliliği üzerindeki etkiler hakkında bir fikir sağlamak için, daha sanayileşmiş ülkelerde CO₂ ve diğer bahsedilen kimyasal kirleticilerin üretimi Tablo 2.6’ de gösterilmiştir. CO₂ emisyonunun 1890-2009 arası artışı 0’dan 22x10¹² kg/yıl olmuştur [58].

Tablo 2.6. Sanayileşmiş ülkelerdeki ana kirlilik emisyonlarının karşılaştırılması [58]

Ülke	Yanma sonucu ortaya çıkan kirleticiler (10 ³ tonda)				
	SO ₂	N _x O _y	Partiküller	CO	CO ₂
ABD	23200	20300	8300	77400	4166000
Japonya	1314	1435	—	—	831000
Almanya	3200	3100	725	8650	666.000
Birleşik Krallık	4670	1812	442	8891	517000
Fransa	3460	1847	278	5200	404000
İtalya	3205	1506	433	5487	322000
İspanya	3756	792	1521	3780	198000
Hollanda	450	525	150	1450	130000
Belçika	856	317	267	839	107000

Hidrojen yakıt olarak bazı faydalar ve zorluklarla gelmektedir. Hidrojenin yakıt olarak kullanımının avantaj ve dezavantajları Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Hidrojenin avantajları ve dezavantajları [59]

Hidrojen, dünya çapında bilim adamları tarafından çevre dostu doğası nedeniyle ticari olarak kullanılabilir bir enerji kaynağı haline getirilmeye çalışılmaktadır [32]. Gelecekte, hidrojenin günümüzde fosil yakıtların kullanıldığı hemen hemen tüm uygulamalarda yakıt olarak kullanılması muhtemeldir. Özellikle ulaşım için hidrojen, azaltılmış kirlilik ve daha temiz çevre açısından faydalar sağlayacaktır [60]. Hidrojen, konvansiyonel yakıtların tükenmesine ve küresel çevre sorunlarına kalıcı bir çözüm olarak öngörülmektedir [61].

3. HAVALİMANLARINA GENEL BİR BAKIŞ

Havalimanı, çoğunlukla ticari hava taşımacılığı için genişletilmiş tesislere sahip bir hava taşımacılık alanıdır [62]. Havalimanlarında genellikle uçakları park etmek ve bakımını yapmak için tesisler ve bir kontrol kulesi bulunmaktadır. Bir havalimanı, bir uçağın kalkacağı ve ineceği bir pist veya bir helikopter pisti gibi operasyonel olarak aktif en az bir yüzey içeren havadan erişilebilen açık alan içeren iniş alanından oluşmakta ve genellikle kontrol kuleleri, hangarlar ve terminaller gibi binalar içermektedir. Daha büyük havalimanlarında apronlar, taksi yolları, hava trafik kontrol merkezleri, restoranlar ve dinlenme salonları gibi yolcu tesisleri ve acil servisler bulunabilmektedir [63–65].

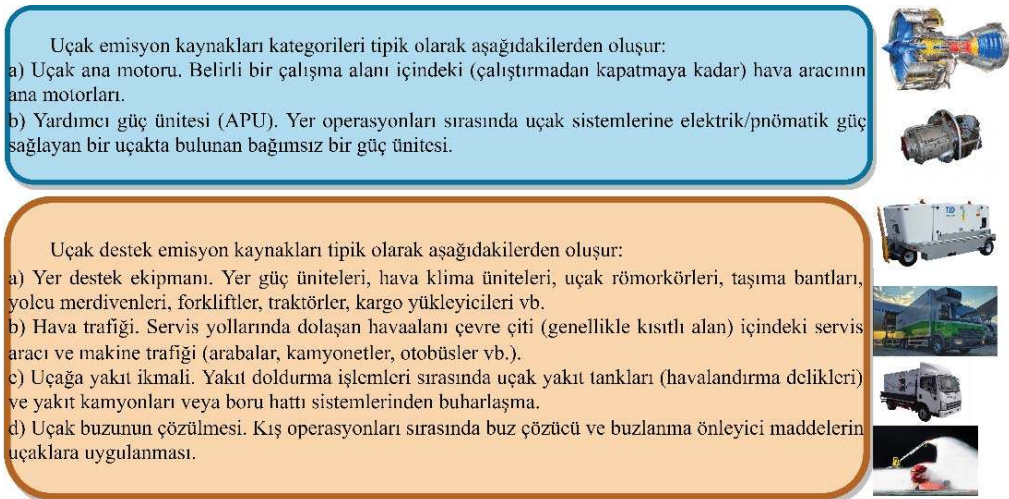
Modern ulaşım yöntemleri (örneğin: araçlar, hava yolculuğu, kargo vb.) iklim değişikliğinin büyük bir bölümünü oluşturmakta ve sera gazı emisyonlarının % 27'sini üretmektedir [2]. Havacılık endüstrisi, ulaşım sektörünün CO₂ emisyonlarının yaklaşık % 12'sini oluşturmaktadır [3, 4]. Hava trafiğinin atmosfer üzerindeki etkisi son yıllarda birçok araştırmaya konu olmuştur [5]. İnsanların uçaklarda geçirdikleri zamanla karşılaştırıldığında, hava yolculuğunun ekolojik etkisi son derece yüksektir. Bununla birlikte, genel olarak yüksek düzeyde çevresel kaygıya ve iklim değişikliğinin hafifletilmesi gerektiğine dair yüksek toplumsal kabule rağmen, hava yolculuğu hızla büyümektedir [6]. Hava trafiğinin yıllar içinde yoğun bir şekilde büyümesi ve bununla bağlantılı olarak insan sağlığına yönelik çevresel risk nedeniyle havalimanlarında hava kalitesindeki bozulma endişe verici olmaktadır [66]. Son zamanlarda, iniş ve kalkış döngüsündeki (İKD) uçak emisyonlarından kaynaklanan erken ölümlerin, her yıl küresel olarak yaklaşık 4000 erken ölüm olduğu ve parasal zararın 8,19 milyar Amerikan doları olduğu tahmin edilmektedir [67]. Küresel emisyonlar iklim değişikliği ile ilgilidir, çünkü uçaklar doğrudan üst troposfere ve alt stratosfere yakılan yakıt miktarıyla doğru orantılı olarak gazlar ve parçacıklar yaymaktadır; CO₂ ayrıca havalimanlarında çeşitli yollarla yayılır [68]. Havacılık kaynaklı CO₂ emisyonları, insanlardan kaynaklanan CO₂ emisyonlarının yalnızca % 2-3'ünden sorumlu olmasına rağmen, endüstri büyüme hızının üzerinde olduğu için her yıl artmaktadır [69]. Bu nedenle, daha sürdürülebilir havalimanları oluşturmak, sera gazı emisyonlarının miktarını önemli ölçüde azaltacaktır [70].

Kyoto protokolüne göre protokolde yer alan ülkelerin emisyonlarını düşürmesi için anlaşma yapılmıştır [1]. FAA, ICAO, EASA gibi kuruluşların emisyonları düşürmek ve

sürdürülebilirliği sağlamak için çalışmaları mevcuttur. Bu bölümde havalimanı uçuş sahası için emisyon kaynakları ve havacılık ile ilgili kurum ve kuruluşların çevre raporları incelenmiştir.

3.1. Havalimanı Temelli Emisyon Kaynakları ve Havalimanlarında Sürdürülebilirlik

Havalimanları görünür ve önemli yerel hava kirliliği kaynakları olabilir [71]. Genel görüş, uçak CO₂ emisyonlarının uçak tipi, havalimanı kapasitesi ve havalimanının coğrafi konumu ile yakından ilişkili olduğudur [72]. Hava taşıtlarının kalkış, iniş veya rölantide çalışması sırasında ortaya çıkan egzoz gazları, yer operasyon ekipmanı ve ilgili trafikten kaynaklanan artan otomobil emisyonları, havalimanlarından yayılan hava kirleticilerinin çoğunu oluşturmaktadır [73]. Ancak, münferit havalimanlarındaki belirli faaliyetlere bağlı olarak, tüm emisyon kaynakları türleri fiilen mevcut değildir (örneğin bazıları havalimanı dışındadır). Emisyon kaynaklarını daha iyi açıklamak için, emisyon kaynakları dört kategoride gruplandırılmıştır. Bunlar: uçak emisyonları, uçak destek emisyonları, altyapı veya istasyonlar ilgili kaynaklar ve araç trafik kaynakları olarak sıralanmaktadır. Havalimanı uçuş sahası emisyon kaynakları Şekil 3.1’de gösterilmiştir [74].



Şekil 3.1. Uçak emisyonları ve uçak destek emisyonları [74]

Şekil 3.1’de belirtilen emisyon kaynaklarının CO₂ değerleri Tablo 3.1’de gösterilmiştir. 2016 yılına ait verilere göre uçak iniş-kalkış döngüsünün bir

havalimanında en yüksek emisyon değerine sahip olduğu görülmektedir. İkinci sırada ise havalimanı içi araç trafiği en yüksek değere sahiptir.

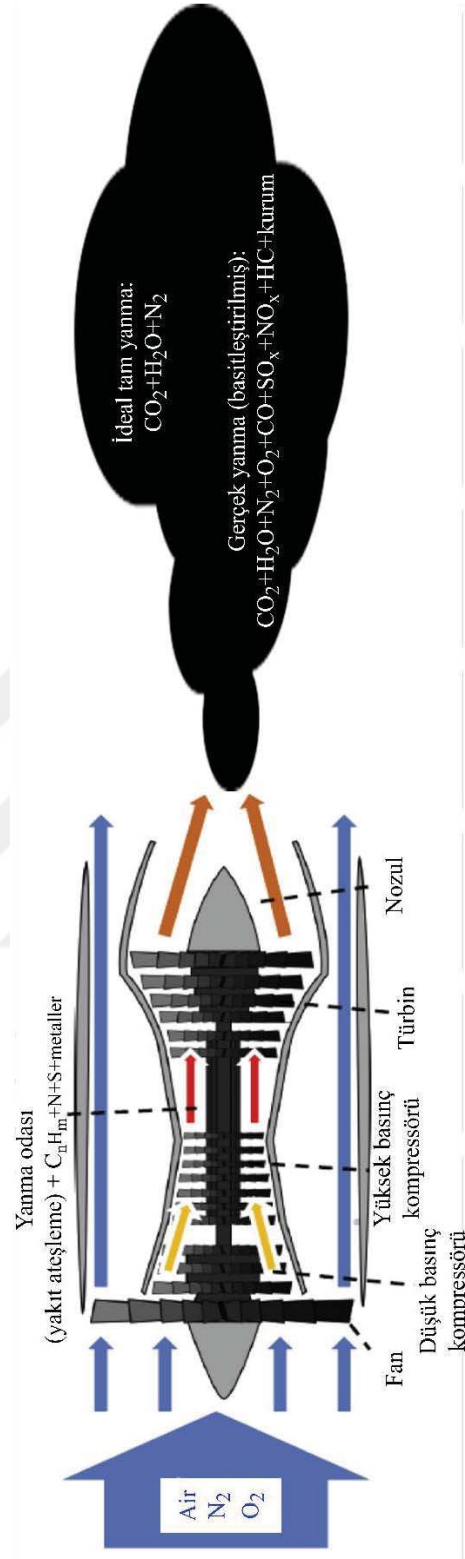
Tablo 3.1. Farklı kaynaklardan gelen havalimanı CO₂ emisyonları (2016) [75]

Kaynak	CO ₂ emisyonu (Ton)	Yüzdelik değeri (%)
1. Havalimanı içi araç trafiği	37,858	(35%)
2. Elektrik enerjisi	5620	(5%)
3. Metandan Enerji üretimi	1152	(1%)
4. Dizelden enerji üretimi	611	(1%)
5. (Uçak iniş kalkış döngüsü	61,590	(57%)
6. Uçak destek emisyonları	1195	(1%)
Toplam	108,027	(100%)

3.2. Uçak İniş Kalkış Döngüsü Emisyonları ve Uçak Motor Emisyonları

Genel olarak, uçak motoru CO₂, su buharı (H₂O), nitrojen oksitler (NO_x), (CO), yanmamış hidrokarbonlar (HC), kükürt oksitler (SO_x), partikül madde (PM) ve diğer bileşiklerden kaynaklı emisyonları üretmektedir. Uçak emisyonlarının yaklaşık % 70'i CO₂'dir; ardından % 30'dan biraz daha az H₂O gelirken, geri kalan kirletici emisyonların her biri % 1'den daha azını temsil etmektedir [76]. CO₂ ve H₂O, iklim değişikliğini tetikleyebilecek önemli miktarda sera etkisi emisyonu oluştururken, NO_x, CO, HC, SO_x ve partikül madde hava kalitesi ve ardından halk sağlığı ile ilişkilendirilmektedir [77]. Bir uçak motorda gerçekleşen ideal yanma ve gerçek yanma sonucu oluşan emisyonlar Şekil 3.2' de gösterilmiştir.

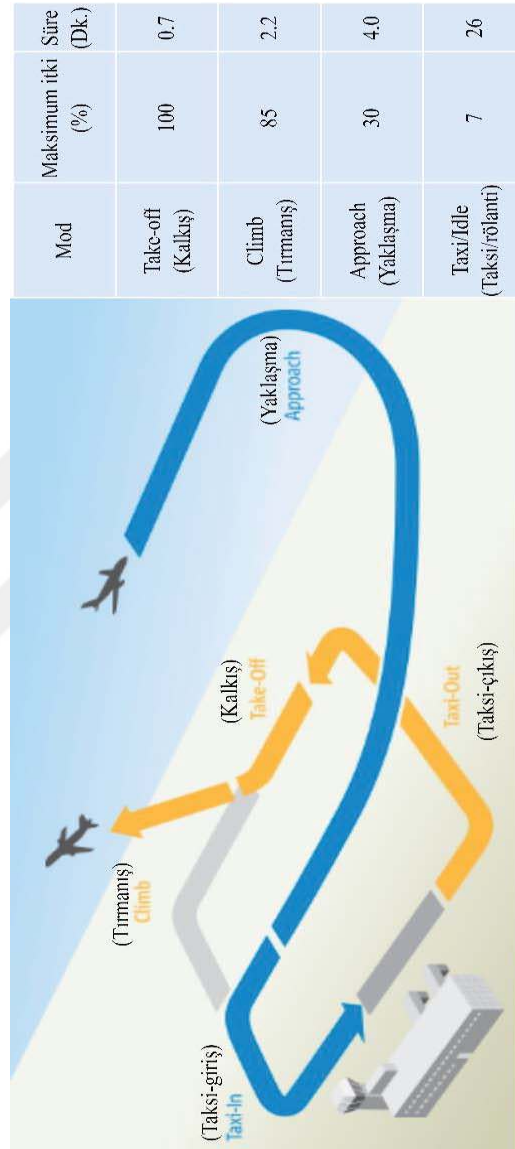
Havalimanları yerel düzeyde yayılan kirliliğin kaynağı olarak görülmektedir. Seyir sırasında yayılan kirlilik esas olarak küresel ısınmaya katkıda bulunmakta ve havayollarına atfedilmektedir. İniş-kalkış döngüsü sırasında salınan uçak emisyonlarının miktarı her zaman önemli olmuştur. ICAO Annex 16, Cilt 2'de belirtildiği gibi, yerel hava kirliliği, uçakların LTO döngüleri (iniş-kalkış) sırasında ürettiği gazların miktarı ile verilmektedir.



Şekil 3.2. Bir uçak motorunda ideal ve gerçek yanma ürünleri [78]

Döngü, ICAO tarafından tanımlandığı şekilde, yer seviyesinden 915 metre yüksekliğe kadar, havalimanı civarında gerçekleşen uçak faaliyetlerini ifade etmektedir

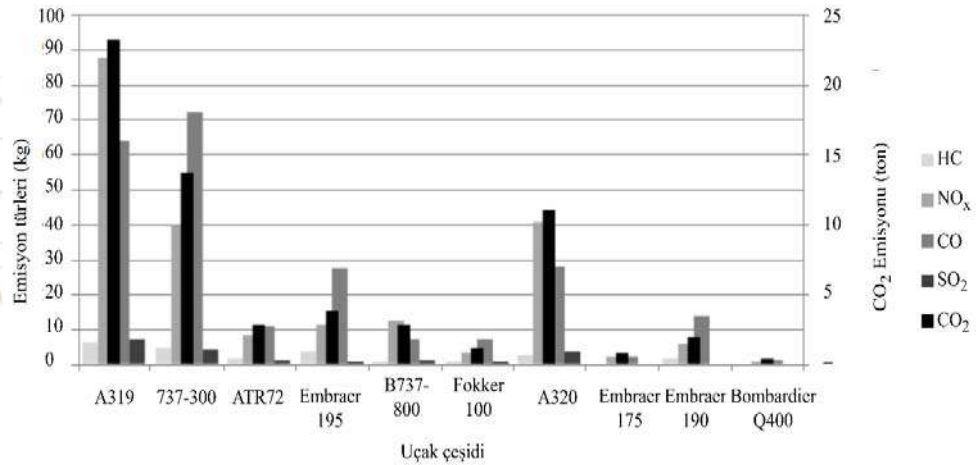
[79]. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, varış faaliyetleri, piste yaklaşma, iniş ve terminale taksi işlemlerini içermektedir. Kalkış için ise taksi, piste varış, taksi yolunda bekleme, kalkış, ilk tırmanış ve 915 metreye tırmanış ile döngü başlamaktadır [80].



Şekil 3.3. ICAO emisyon standartları için referans LTO döngüsü [79, 81]

Havacılık emisyonları insan sağlığını ve çevreyi olumsuz yönde etkilemektedir. Sonuçların gerekli doğruluk ve güven düzeyine ve destekleyici verilerin mevcudiyetine bağlı olarak, belirli bir havalimanındaki bir emisyon envanteri, üç farklı karmaşıklık düzeyinde değerlendirilmektedir. Bunlar ICAO DOC 9889 (2011) yayınına göre basit, gelişmiş ve karmaşık yaklaşımdır.

Uçak/motor kombinasyonlarına ilişkin 1 Şubat 2014 tarihinde Belgrat'taki Nikola Tesla havalimanında filonun Şekil 3.3'te belirtilen döngüye göre emisyon değerleri ele alınmıştır. Listelenen uçakların her biri için beş kirletici türü için emisyon faktörleriyle bağlantılı ek bilgiler ve ilgili yakıt akış oranları, EASA (2015) tarafından sağlanan ICAO motor emisyonları veri bankasından elde edilmiştir. Şekil 3.4'te işletilen filonun emisyon değerleri verilmektedir ve sırasıyla Belgrad Nikola Tesla havalimanındaki bir günlük operasyonlar sırasında yayılan emisyon türlerinin her biri için uçak tipine göre emisyon değerlerinin dağılımını ve her bir emisyon türü için toplam değerleri göstermektedir. Ayrıca Airbus A319 tipi uçaklardan kaynaklanan motor emisyonları, çoğunlukla havalimanı çevresindeki yerel hava kalitesini etkilemektedir [82]. Şekil 3.4 incelendiğinde küçük uçakların büyük uçaklara göre daha az emisyon yaydığı görülmektedir.



Şekil 3.4. LTO emisyon faktörlerinin uçak tipine göre dağılımı [82]

Tablo 3.2, LTO (iniş-kalkış döngüsü) döngüsünün kalkış aşaması sırasında Airbus A320, A321 ve Boeing B737 (7 farklı model) uçak tipleri tarafından yayılan emisyonları göstermektedir. Yaygın olarak kullanılan bu uçak modelleri arasında oldukça ilgili bir benzerlik olduğu açıktır. Tablo 3.3 aynı emisyon değerlerini varış aşaması için sunmaktadır. Yukarıda bahsedilen model benzerliğine ek olarak, varışlar sırasındaki emisyonların kalkışlara göre daha düşük olduğu Tablo 3.2 ve Tablo 3.3 karşılaştırıldığında açık bir şekilde gözlemlenmektedir.

Tablo 3.2. A320, A321, B737 uçak tipleri için motor ağırlıklı ortalama emisyon (kg) değerleri [83]

Uçak	HC	NO _x	PM ₁₀	SO ₂
Airbus A320	0,304	9,031	0,120	0,481
Airbus A321	0,691	13,569	0,141	0,563
Boeing 737–200	2,083	6,519	0,135	0,539
Boeing 737–300	0,538	6,337	0,115	0,461
Boeing 737–400	0,439	7,376	0,124	0,495
Boeing 737–500	0,450	7,326	0,123	0,493
Boeing 737–600	0,682	6,670	0,105	0,421
Boeing 737–700	0,626	8,350	0,116	0,464
Boeing 737–800	0,554	9,636	0,123	0,490

Tablo 3.3. A320, A321, B737 uçak tipleri için motor ağırlıklı ortalama emisyon (kg) değerleri [83]

Uçak	HC	NO _x	PM ₁₀	SO ₂
Airbus A320	0,167	1,861	0,051	0,202
Airbus A321	0,404	2,367	0,057	0,229
Boeing 737–200	0,898	1,396	0,056	0,224
Boeing 737–300	0,205	1,656	0,049	0,196
Boeing 737–400	0,168	1,852	0,052	0,208
Boeing 737–500	0,172	1,844	0,052	0,208
Boeing 737–600	0,254	1,719	0,045	0,179
Boeing 737–700	0,234	1,936	0,049	0,194
Boeing 737–800	0,207	2,128	0,051	0,203

3.3. Havacılık Endüstrisinde Önemli Kurum ve Kuruluşların Havalimanı Çevresel Etki ve Sürdürülebilirlik Raporları

Havacılık sektörü üzerindeki olası iklim etkileri ICAO’nun 2019 yılında yayınladığı “Havacılık ve Çevre” raporuna göre sekiz kategoride tanımlanmıştır:

1. Deniz seviyesinin yükselmesi.
2. Artan fırtına yoğunluğu.
3. Sıcaklık değişimi.
4. Değişen yağış.
5. Değişen buzlanma koşulları.
6. Rüzgâr yönünü değiştirmek.
7. Çölleşme.
8. Biyolojik çeşitlilikteki değişiklikler.

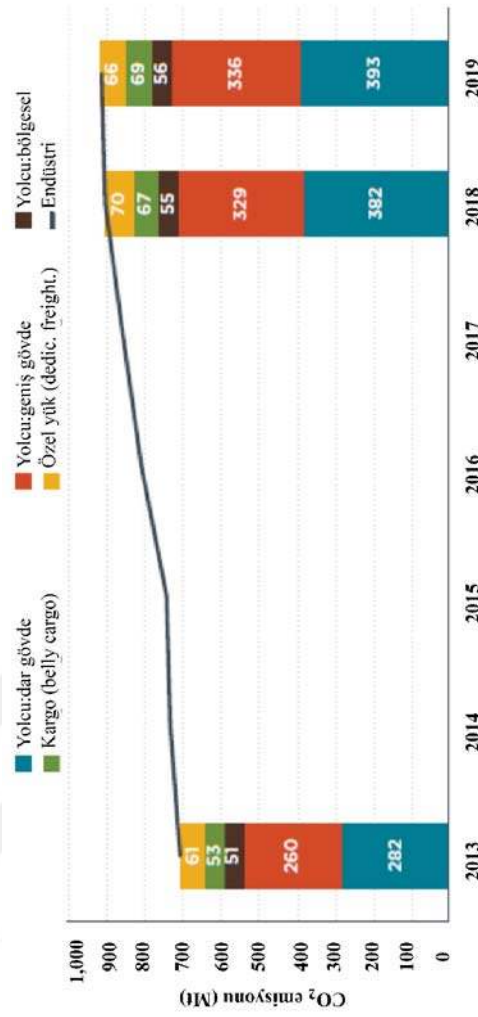
ICAO tarafından bir anket düzenlenmiş ve üyesi olduğu devletlere bu anketi göndererek bir dönüt almıştır. Anketin içeriği iklim değişikliklerine yönelik mevcut farkındalık düzeyi ve bu etkinin uluslararası havacılığın geleceğini nasıl etkileyeceğine yönelik bir çalışmadır. Kilit bulgulardan biri, ankete katılanların % 74'ünün havacılık sektörlerinin halihazırda bazı iklim değişikliği etkileri yaşadığını, % 17'sinin ise 2030 yılına kadar bir miktar etki beklediğini göstermiştir. Havacılık sistemi üzerindeki etkiler küresel olarak tanımlanmış ve “ICAO Küresel İklim Uyum Risk Haritası'nda” gösterilmiştir (Şekil 3.5). Anket, yanıt verenlerin % 30'unun iklim uyum önlemlerini halihazırda uyguladığını, % 25'inin ise önümüzdeki beş ila on yıl içinde bunu yapmayı planladığını göstermiştir. Anket, yanıt verenlerin % 6'sı planlanmış bir önlemi olmadığını belirtmektedir. Bir uyum stratejisi geliştirilmeden önce, iklim değişikliğine karşı kırılganlıkların belirlenmesi için bir iklim değişikliği risk değerlendirmesi gerekmektedir [84].

Temiz Hava Taşımacılığı Uluslararası Konseyinin raporunda, OAG Aviation Worldwide Limited şirketinden, ICAO'dan, bireysel havayolları ve Piano uçak emisyon modelleme yazılımından alınan operasyon verilerini kullanarak üç yıllık (2013, 2018, 2019) ticari havacılık için küresel, şeffaf ve coğrafi olarak tahsis edilmiş bir CO₂ envanterine yer vermiştir. Küresel Havacılık Karbon Değerlendirmesi (GACA) modeli, küresel yolcu ve kargo operasyonlarından kaynaklanan CO₂ emisyonlarını endüstri tarafından rapor edilen veriler kapsamında oluşturulmuştur (Şekil 3.6). Analiz edilen üç yılın tamamında, ticari havacılık CO₂ emisyonlarının yaklaşık % 85'inden yolcu uçuşlarının sorumlu olduğu gözlemlenmiştir. 2019'da bu, 785 milyon ton CO₂'ye ulaşmıştır. 2013 ve 2019 yılları arasında yolcu taşımacılığı ile ilgili CO₂ emisyonları % 33 arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.5. ICAO Üye devletlerinden gelen yanıtlara dayalı olarak, ICAO Küresel İklim Uyum Risk Haritası (ICAO, 2019), iklim değişikliğinin uluslararası havacılık üzerindeki etkilerini göstermektedir [84]

Aynı dönemde, uçuş kalkış sayısı % 22 arttığı ve gelir yolcu kilometresinin (RPKs) % 50 arttığı görülmüştür. Bu, yolcu hava trafiğinin geliştirilmiş yakıt verimliliğinden yaklaşık dört kat daha hızlı arttığı anlamına gelmektedir [85].



Şekil 3.6. 2013,2018,2019 yıllarında operasyonlara ve uçak sınıfına göre CO₂ emisyonları [85]

Yolcu havacılığıyla ilgili 2019'da karbon emisyonları için ilk beş çıkış ülkesi Amerika Birleşik Devletleri, Çin, Birleşik Krallık, Japonya ve Almanya'dır. Amerika Birleşik Devletleri ve bölgelerindeki havalimanlarından kalkan uçuşlar, 2019'da küresel yolcu taşımacılığıyla ilgili CO₂'nin % 23'üne katkı sağlamakta ve bunların üçte ikisi iç hat uçuşlarından gerçekleşmiştir. Toplu olarak, Avrupa Birliği'nin (AB) 28 üyesi, küresel yolcu taşımacılığı CO₂ emisyonunun toplamının % 19'una sebep olmaktadır. ABD'nin ardından ikinci sırada yer almıştır. Çin'in küresel yolcu taşımacılığı CO₂ emisyonunun toplamının % 13'ü eklendiğinde, bu en büyük üç pazar, 2019'da yayılan tüm yolcu CO₂'sinin yarısından fazlasına etki etmektedir. Tablo 3.4'te CO₂ emisyonlarında ilk 10 ülke gösterilmiştir [85].

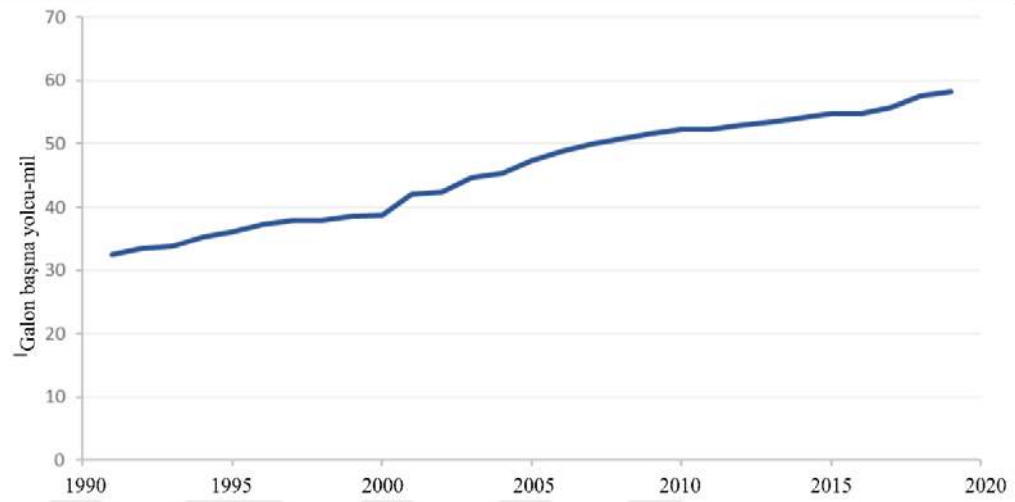
Tablo 3.4. 2019'da yolcu CO₂ Sıralaması emisyonları-ilk 10 çıkış ülkesi [85]

Sıralama	Kalkış ülkesi	CO ₂ (Mt)	Toplam CO ₂ 'nin % 'si	RPKs (Milyar)	RPKs'nın % 'si	CO ₂ yoğunluğu (g CO ₂ . RPK ⁻¹)
1	ABD	79	23	1,890	22	95
2	Çin	103	13	1,167	13	88
3	Birleşik Krallık	31.8	4.1	365	4.2	87
4	Japonya	25.9	3.3	274	3.1	95
5	Almanya	23.1	2.9	253	2.9	91
6	BAE	21.5	2.7	243	2.8	89
7	Hindistan	21.2	2.7	248	2.9	85
8	Fransa	20.6	2.6	237	2.7	87
9	İspanya	19.8	2.5	249	2.9	79
10	Avusturalya	19.5	2.5	217	2.5	90
Dünya'nın geri kalanı		319	41	3,567	41	89
Toplam		752	100	8,710	100	90

Havacılık endüstrisinde, çevresel sorumluluğun büyümenin kritik bir bileşeni olduğunu anlaşılmaktadır. Havacılık, 2020'den itibaren karbon nötr büyüme ve 2005 seviyelerine kıyasla 2050 yılına kadar net CO₂ emisyonlarında % 50'lik bir azalmayı içeren iddialı bir dizi küresel CO₂ emisyonu azaltma hedefini kabul eden dünyadaki ilk sektör olmuştur [86]. ABD'nin 2021 yılında yayınlanan "Amerika Birleşik Devletleri Havacılık İklim Eylem Planı" raporuna göre havacılık yakıtının maliyeti yüksek olduğundan, havacılık endüstrisi yakıt kullanımının verimliliğini arttırmak için yerleşik bir teşvike sahiptir. Şekil 3.7'de gösterdiği gibi, endüstri son otuz yılda yakıt kullanımı başına daha fazla insanı istikrarlı bir şekilde taşımıştır. Uçuş verimliliğindeki bu gelişmelere rağmen, toplam emisyonları azaltmak için şu anda çok az teşvik bulunmaktadır [87].

Ekonomi COVID-19 pandemisinden kurtulurken, hava yolu taşımacılığı talebinin pandemi öncesi seviyelere dönmesi ve ardından büyümeye devam etmesi beklenmektedir. Şekil 3.8, Federal Havacılık İdaresi (FAA) havacılık tahmininden hesaplanan bu büyümeye eşlik edecek CO₂ emisyonlarını ve emisyonların 2050'de net sıfır seviyesine nasıl düşürülebileceğini göstermektedir. Geleceğe yönelik emisyon

analizi, uçak teknolojisi, operasyonlar ve SHY gibi net sıfır emisyonu ulaşmak için çeşitli önlemlerin nasıl birleştirilebileceğini değerlendirmektedir.



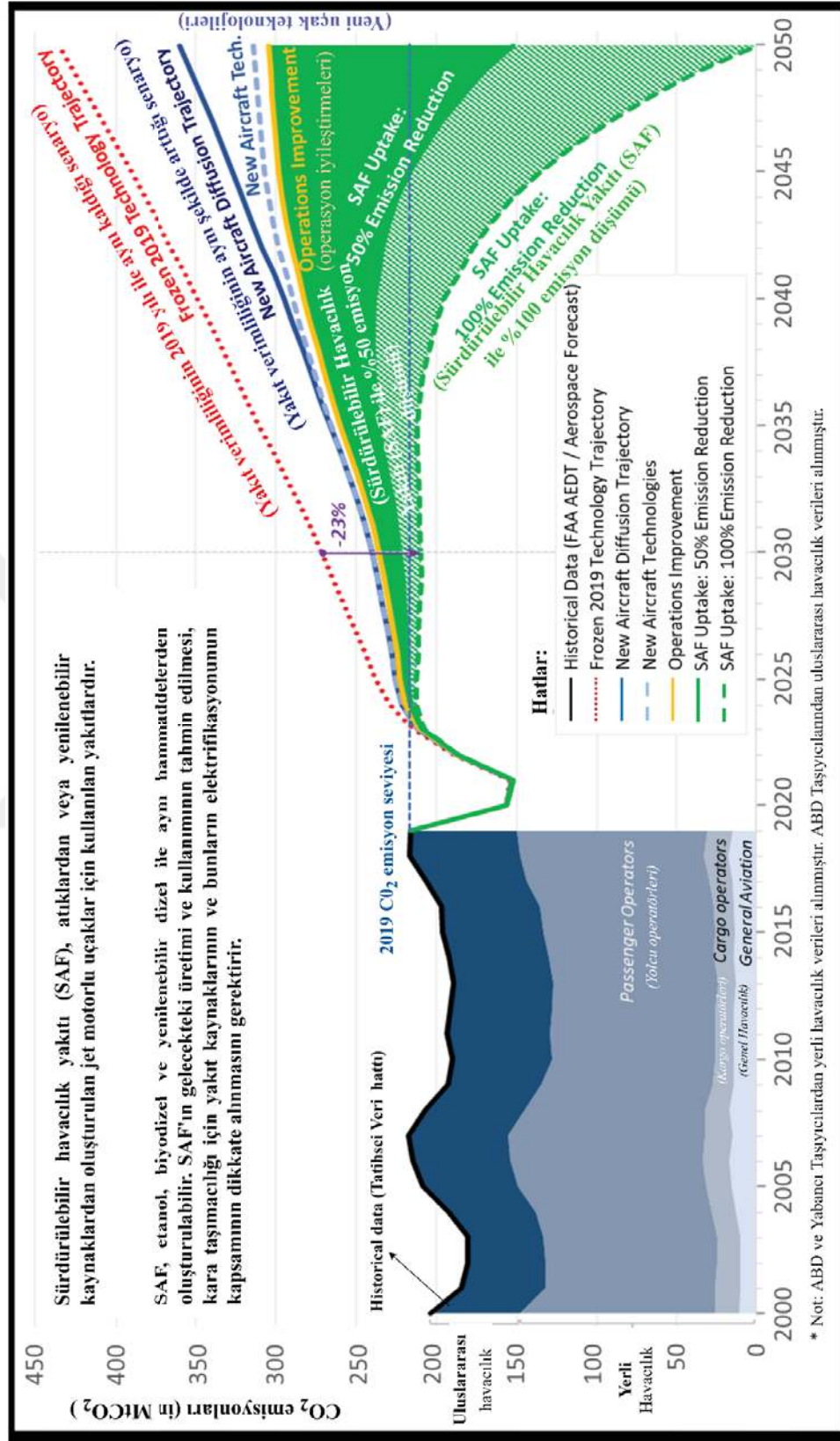
Şekil 3.7. Yıllara göre galon başına yolcu-mil gösterimi [88]

Yakıt verimliliğinin aynı şekilde arttığı senaryo, havayollarının gelişmiş yakıt verimliliğine sahip yeni uçak satın almaya devam etmesini açıklamaktadır. Bu, filoya yeni katılan Boeing 737 MAX ve Airbus A320 NEO uçakları ve önümüzdeki yıllarda filoya katılması beklenen Boeing 777X gibi uçaklar da dahil olmak üzere çok çeşitli yeni uçak tiplerini içermektedir. Bu iki yörünge arasındaki fark, beklenen filo yenilemesinin havacılık CO₂ emisyonlarının azaltılmasına katkısını göstermektedir. Yeni Uçak Teknolojileri senaryosuna göre uçak ve motor Orijinal Ekipman Üreticileri tarafından yeni uçak ve motorların geliştirilmesi ve piyasaya sürülmesi, havacılıkta talebi artmaya devam ettikçe gelecekteki CO₂ emisyonlarını azaltmak için kritik öneme sahip olacaktır. Yatırımlarla beraber yakıt verimi artacaktır.

Operasyonel İyileştirmeler senaryosuna göre havacılığa olan talep arttıkça, tıkanıklık ve hava trafik yönetimi (ATM) ile ilgili yakıt yakma verimsizliği de artmaktadır. Altyapı ve yörünge tabanlı ATM araçlarına sürekli yatırım yapılmazsa, uçuş başına fazla yakıt tüketimi artacağı öngörülmektedir. Yakıt tüketimini azaltmak için uçuşun tüm aşamalarında iyileştirme fırsatları bulunmaktadır. Bu, altyapıya devam eden yatırımlardan ve operasyonel konsept iyileştirmelerinin geliştirilmesinden yüzey, kalkış, seyir ve iniş operasyonları sırasında devam eden iyileştirmeleri içermektedir SHY ile

emisyön düşürme senaryosuna göre yenilenebilir ve atık hammaddelerden üretilen sürdürülebilir havacılık yakıtları, havacılığın net-sıfır hedefini karşılaması için kritik öneme sahiptir.

SHY, yenilenebilir veya atık malzemelerden oluşturulabilmekte ve bu eylem planı ve ABD politikasının amaçları doğrultusunda, SHY'nin yaşam döngüsü sera gazı emisyonlarını geleneksel jet yakıtına göre en az % 50 oranında azaltması beklenmektedir. Bu yakıtlardan kaynaklanan gerçek yaşam döngüsü emisyon düşümünün ne olacağı konusunda belirsizlik olduğundan, Şekil 3.8'de gösterilen aralık SHY kullanımından kaynaklanan emisyonlarda % 50 ile % 100 azalmayı göstermektedir. Günümüz ile 2030 arasındaki zaman, 2050 net sıfır hedefine ulaşmak için ABD için kritiktir. Şekil 3.8'de gösterilen plan boyunca, sektörü 2050 hedefine doğru bir yörüngeye oturtacak 2030 hedeflerine özel referanslar bulunmaktadır. ABD ilerlemeyi her yıl gözden geçirerek yeni yol haritaları oluşturmayı hedeflemektedir [87].



Şekil 3.8. ABD'de gelecekteki yerli ve uluslararası havacılık CO₂ emisyonları azaltma senaryoları [87]

4. LİTERATÜR TARAMASI

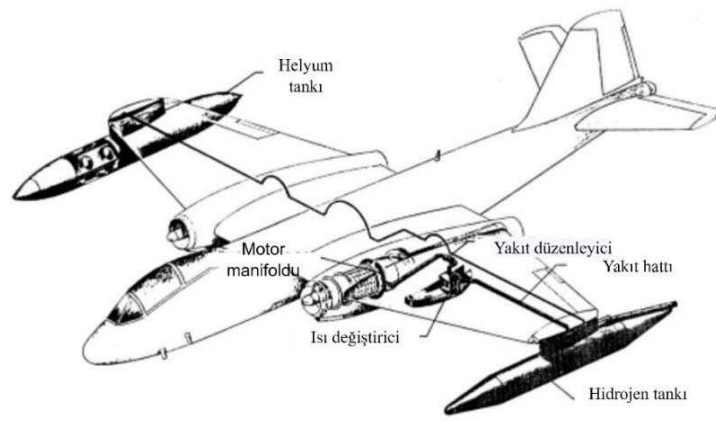
Bir havalimanı, esasen, uçakla taşınan yolcuların veya hava kargosunun yönlendirildiği, ilgili binalar veya terminallerle birlikte uçak operasyonları için bir veya daha fazla pistten oluşmaktadır [89]. Havalimanları, dünya hava taşımacılığı sisteminin ayrılmaz bir parçasıdır. Havalimanları havayollarının ve müşterilerin birleştiği yerlerdir [90, 91]. Havalimanlarının hava sahası kısmı ayrıca önemli miktarda enerji tüketmekte [8] ve bunun bir yan ürünü enerji üretiminden kaynaklanan CO₂ emisyonları oluşmaktadır [9]. Diğer birçok sektör gibi havalimanı sektörü de artan çevresel baskının etkileriyle karşı karşıya kalmaktadır [10]. Havalimanları için, CO₂ emisyonlarını azaltmak ve enerji verimliliğini ve altyapı direncini artırmak gibi önlemler yoluyla iklim değişikliğine katkılarını azaltmaya yönelik girişimler de dahil olmak üzere, çevresel olarak daha sürdürülebilir hale gelmek için bir dizi strateji benimsenmiştir [12]. Bu girişimlerden birisi de sürdürülebilir havacılık yakıtı kullanmaktır. Hidrojen sürdürülebilir havacılık yakıtları arasında, yenilenebilir ve kirlilik içermeyen özellikleri nedeniyle önemli bir potansiyel enerji taşıyıcısı haline gelmiştir [13]. Hidrojen, suyun temel bileşenlerinden biridir ve yeryüzünde en bol bulunan elementtir [92]. Hidrojenin fosil temelli yakıtlar yerine kullanılmasının bazı zorlukları bulunmaktadır, ancak avantajları dezavantajlarından daha fazladır. Hidrojen, diğer yakıtlara kıyasla birim kütle başına en yüksek enerjiye sahiptir. Enerji yoğunluğu kerosenden 2,5 kat daha fazladır [93]. Hidrojenin havacılık yakıtı olarak kullanılması, tüm karbon temelli emisyonlar, kurum ve kükürt oksitler dahil olmak üzere sera gazı emisyonlarının çoğunu ortadan kaldıracağı hedeflenmektedir [94]. Hidrojen, son derece düşük kirletici emisyonları olan ve dolayısıyla çevre üzerinde düşük etkisi olan temiz, güvenilir ve uygun fiyatlı enerji arzı sağlayabildiği için havacılık endüstrisi için uygun görülmektedir [95]. Bu bölümde hidrojen destekli havacılık ile ilgili yapılmış olan çalışmalar incelenmiştir.

4.1. Hidrojen Havacılık Tarihine Genel Bir Bakış

Hidrojen, 18. yüzyılda, 1783'teki Charlière Hidrojen Balonu gibi gaz balonlarının tasarımında yaygın olarak kullanılmıştır [96]. 19. yüzyılda Ferdinand von Zeppelin, benzinli tahrik sistemleriyle bağlantılı olarak zeplinlerin uçuşu için hidrojen kullanmıştır [97]. Hidrojenin havacılıkta kullanım tarihi, 1937'de, bir Heinkel HeS-2 deneysel turbojet motorunun hidrojenle çalıştırılarak test edilmesiyle başlamıştır [98]. O zamanlarda,

hidrojenin seçilmesinin nedeni, benzin yakıtlı yanma odasının uzun geliştirme çalışmaları gerektirmesidir, oysa gaz fazındaki hidrojen yanmasının, kısıtlı yanma odası hacmi koşullarına rağmen uygulanabilir olduğunun kanıtlanmasıdır ve dolayısıyla jet motoru ilkesinin uygulanabilirliğinin erken bir gösterimi için hemen kullanılabilir olmasıdır [99].

Yaklaşık 20 yıl sonra 1956'da Pratt and Whitney Aircraft şirketi, ABD Hava Kuvvetleri tarafından sıvı hidrojenin uçak motorları için yakıt olarak kullanılmasının fizibilitesini araştırmak üzere bir program yürütmek için görevlendirilmiştir. Çalışma, hidrojen operasyonu için modifiyeli J57 motorunun test edilmesini ve keşif için kullanılacak süpersonik hidrojen yakıtlı bir gösteri motorunun geliştirilmesini içermektedir [98]. Daha uzun menzil ve daha yüksek irtifadaki askeri ihtiyaçlar tarafından teşvik edilen hidrojen ile testler, 1950'lerin ortalarından itibaren NASA Lewis Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır [98], [100]. Hidrojen için yapılandırılan sol motor, kalkış ve ilk seyir için JP-4 yakıtı ile çalıştırılmıştır. Yüksek irtifalarda hidrojen yakıtına geçiş iki adımda gerçekleştirilmiştir: hidrojen hatlarının temizlenmesi ve tek başına hidrojene geçmeden önce iki dakika boyunca ikili yakıt çalışmasıdır. Programda 40'ın üzerinde geçiş yapılmıştır. Sağ kanat ucuna monte edilmiş tanktaki helyum, sol kanat ucuna monte edilmiş tanktaki sıvı hidrojeni basınçlandırmak için kullanılmıştır, böylece hidrojen ısı değiştiriciden geçmiştir. 1958'de faaliyetler durdurulmuştur çünkü askeri araştırmalar, tüm stratejik uçak üslerine hidrojen sağlama maliyetlerinin aşırı olacağını göstermiştir [99]. Zeplin balonları hariç, hidrojenle uçan ilk uçak, 1956'da motorlarından birinde helyumla basınçlı sıvı hidrojen kullanan ABD Hava Kuvvetleri'ne ait bir B-57 bombardıman (Şekil 4.1) uçağıdır [101].



Şekil 4.1. Hidrojen sistemi ile donatılmış B-57 uçağı [100]

Uzun yıllar boyunca NASA, mürettebatı ve kargoyu uzaya ulaştırmak için roket yakıtı olarak hidrojen gazını kullanmaktadır. Centaur, Apollo ve uzay mekiği araçlarıyla NASA, hidrojenin güvenli ve etkili kullanımı konusunda kapsamlı bir deneyim geliştirmiştir [102]. ABD'nin CL-400 uçağı, ABD Uzay Programı ve Uzay Mekiği Programı gibi, tümü tahrik için sıvı hidrojen kullanan başka projeleri daha olmuştur [97]. 1970'lerde General Electric (GE) şirketi, uçak tahrik sistemlerinde hidrojen kullanımına ilişkin tasarım çalışmalarına ve araştırma ve geliştirme programlarına katılmıştır [103]. Bu çabalar, esas olarak, dünyanın fosil yakıtların kullanılabilirliğinin kısıtlanabileceği olasılığının bilincine OPEC yakıt fiyatlarının dikte etmesi sonucunda ulaşılmıştır. Bu dönemde NASA Langley Araştırma Merkezi tarafından desteklenen çeşitli çalışmalar da gerçekleştirilmiştir [104]. Bu çalışmalar, sentetik kerosen (synjet), sıvı hidrojen ve sıvı metan kullanmak üzere tasarlanmış hem ses altı hem de ses üstü uçakların araştırmalarını içermektedir. Bu çalışmada kullanılan çeşitli motor tasarımları, AiResearch-Arizona Division şirketi tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada değerlendirilmiştir [105]. Enerji krizi nedeniyle başlatılan bir başka çalışma da, hidrojenin turbojet motor yakıtı olarak kullanılmasının teknik, ekonomik ve çevresel etkilerini incelemiştir [106]. NASA, Ulusal Havacılık Uçağı Programı (NASP) kapsamında % 20 oranında sıvı hidrojenle donmuş hidrojeni karıştırarak gerekli olan yakıt depolama hacmini ve uçak boyutunu azaltmaya çalışmıştır [107]. Sıvı hidrojenin geleneksel uçaklar için potansiyel kullanımları, hem Lockheed Corporation şirketi hem de Boeing üretici şirketi tarafından da incelenmiştir ve gerekli yakıtın daha düşük ağırlığının, düşük kanat yüklemesine, yüksek seyir yüksekliğine ve daha yüksek güç yüklemesine uygun olduğu sonucuna varmışlardır [105]. Hidrojen kullanan uçaklarla daha ileri testler, 1980'lerde, deneysel bir Tu155 uçağını ortaklaşa geliştiren Rus TRUD† şirketi tarafından yapılmıştır. Bu uçakta, üç motordan biri kerosen ve sıvı hidrojen (LH₂) ya da sıvı doğal gaz (LNG) ve kerosen yakan çift yakıtlı motora (NK88) dönüştürülmüştür [108]. Uçağın geliştirilmesi ve test edilmesi, motorların ve kriyojenik sistemlerin sonraki gelişmeleri ve geleneksel uçakların gerektirdiği aynı karmaşıklık düzeyi ve aynı güvenlik standartlarına sahip operasyon tekniklerinin geliştirilmesi için veri sağlamıştır.

Emekli Pan American pilotu Bill Conrad, dört kişilik Gruttnab Cheetah uçağını hidrojenle çalışacak şekilde dönüştürmüştür. Güç kaynağı, sıvı hidrojen yakıtlı bir içten yanmalı motor kullanmıştır. Haziran 1988'de Florida'da, ABD'deki Lauderdale Uluslararası Havalimanı'nda yalnızca hidrojen gücüyle kalkış, seyir ve iniş yapan ilk uçak

olmuştur [95]. Paris Air Show sırasında (1989), Avrupa Airbus şirketinin Alman ortağı Messerschmidt-Boelkko-Blöhm (MBB), Airbus A310 uçağının hidrojen yakıtlı ikizini geliştirmeye ilgi göstermiştir. İki yıl sonra, Hannover Air Show'da Sovyet Birlik ve Almanya, sıvı hidrojen yakıtlı bir yakıt üzerinde birlikte çalışmak için anlaşıklarını açıklamışlardır. Airbus veTupolev şirketi, tahmini 500 millik bir menzille hidrojenle çalışacak şekilde 200 yolcu kapasiteli, iki motorlu bir uçak tasarlamıştır. Çalışma, Tupolev Tasarım Bürosunu Deutsche Airbus ile bir araya getirmiştir [109], [110].Yine aynı tarihlerde, NASA ikiz küresel tankları içeren kendi tasarımını geliştirmiştir. Bu tasarım, yüzey-hacim oranını sınırlamıştır. Ayrıca, tasarım 0.85 mach hızda, 5.500 deniz mili için seyahat eden 400 yolcu kapasiteli bir uçak konfigürasyonuna izin vermektedir [111]. Ocak 1992'de sanayi ve araştırma kuruluşlarını içeren Euro-Québec Hidro-Hidrojen Pilot Projesi (EQHHPP) adlı 58 aylık bir program başlatılmıştır. Bu program, hidrojenin yanması sonucu oluşan NO_x emisyonlarını azaltmayı ve daha sonra motor tasarımı sağlamayı amaçlamıştır [112]. EQHHPP'nin üçüncü aşamasında, uçak motorları için düşük NO_x yakıcıların analitik modellemesi ve deneysel testleri yapılmıştır [113].

Airbus şirketi tarafından 2000 yılında Cryoplane projesi başlatılmıştır. Proje iki yıllık bir süreyi kapsakta ve endüstri, araştırma enstitüleri ve üniversitelerden 36 ortağı içermektedir. Hidrojen üretim yöntemlerinden çevresel uyumluluğa kadar bir dizi konuyu kapsayan, sivil ses altı uçaklar için sıvı hidrojen kullanımının bir sistem analizi yapılmıştır. Avrupa Komisyonu, havacılıkta yakıt olarak sıvı hidrojen kullanmanın teknik fizibilitesini, emniyetini, çevresel uyumluluğunu ve ekonomik uygulanabilirliğini değerlendirmek için ilgili tüm hususları kapsayacak şekilde havacılık Cryoplane projesini finanse etmiştir [114]. Proje, H_2 'nin tanıtımıyla ilgili temel ölçütleri değerlendirmiştir. H_2 'nin emniyet standartları değerlendirilmiş ve geleneksel jet yakıtlarının emniyet standartlarıyla karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte, H_2 ile elde edilebilecek genel emniyet seviyelerinin, geleneksel jet yakıtları ile aynı düzeyde olduğu belirlenmiştir [111].

Hidrojenle ilgili bir başka çalışmada Hy-Shot (Avustralya- 2001) projesidir. HyShot, 7,5 Mach hızın üzerinde süpersonik yanma elde etmek için tasarlanmıştır. Bir çift kama (double wedge) girişinden ve iki arka arkaya sabit alanlı yakıcıdan oluşmaktadır; biri hidrojen yakıtı ile beslenen ve diğeri yakıtsız bir şekildedir. 30 Ekim 2001'deki ilk fırlatma başarısızlığının ardından, Queensland Üniversitesi 30 Temmuz 2002'de başarılı bir ikinci fırlatma gerçekleştirmiştir [115]. Hidrojen yakıtlı scramjet uçuş

testlerinden biri, 27 Mart 2004'te başlatılan X-43A'dır [116]. X-43A, NASA'nın hipersonik uçuşlar için yeni hava tahrik sistemleri geliştirmeye yönelik Hyper-X programının bir parçasıdır [117]. Boeing şirketinin 14 Eylül 2013'te sıvı hidrojenle çalışan Phantom Eye Demonstrator (HALE-High Altitude Long Endurance Aircraft, Şekil 4.2) uçağı, yaklaşık dört buçuk saat boyunca 28.000 ft yüksekliğe ve 115 km/s hıza ulaşan beşinci uçuşunu başarıyla tamamlamıştır. Hidrojen, RL10 (Aerojet Rocketdyne-ABD), LE-5 (Mitsubishi-Japonya), HM7B (Snecma-Fransa), YF-73 (CALT-Çin), KVD-1 (Rusya), CE-20 (HAL- Hindistan) gibi dünya çapındaki roket motoru geliştiricilerinin çoğu tarafından yakıt olarak benimsenmiştir [118].



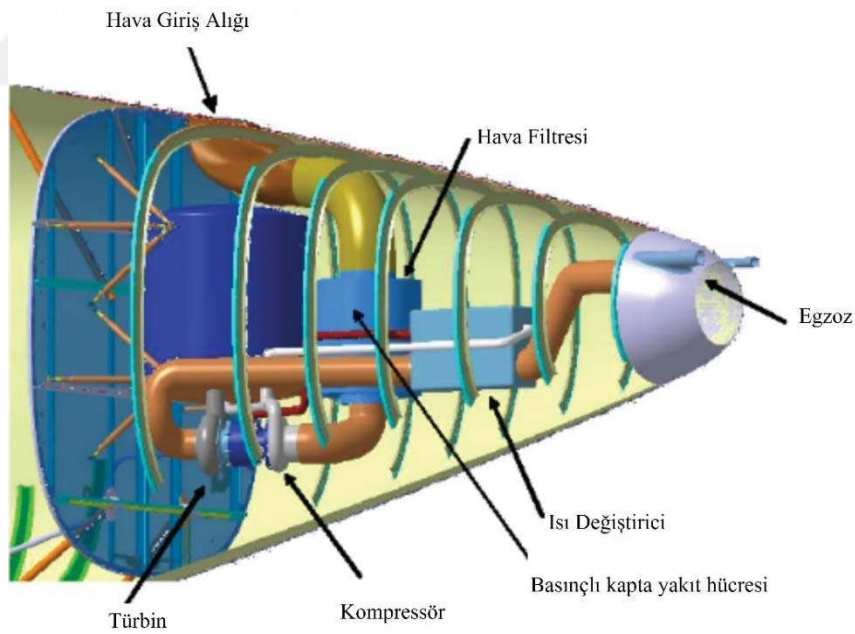
Şekil 4.2. *Phantom Eye Demonstrator uçağı [119]*

Dünya çapındaki birçok havalimanı, Berlin Havalimanı, Oslo Havalimanı, Paris Orly Havalimanı ve Narita Uluslararası Havalimanı gibi yakıt hücreli araçlara hidrojen sağlamak için hidrojen yakıt istasyonları kurmuşlardır [120], [121], [122], [123]. Bu bağlamda yardımcı güç üniteleri ve yer destek ekipmanları hidrojen yakıt hücresi kullanmaktadır. Berlin havalimanı hidrojen tesisi, güneş ve rüzgâr enerjisini kullanarak elektroliz yoluyla yerinde hidrojen üretmektedir [121].

4.2. Hidrojen Yakıtlı Yardımcı Güç Ünitesi

Uçağın yardımcı güç ünitesi (APU), ana motorlar çalışmadığında uçaktaki jet motorları ve çevresel sistemler gibi diğer bileşenlerin çalışması için elektrik ve basınçlı hava kaynağı olarak işlev gören küçük bir gaz türbinli motordur. APU, uçakta klima ve aydınlatma için gerekli gücü sağladığı için seyir sırasında dahili güce yedek,

hareketsizken ise ana güç kaynağı olarak kullanılır. Ayrıca ana uçak motorlarının çalıştırılmasını da destekler. APU, uçak pistten girişe hareket ederken veya park yerine park hareketi yaparken açılmaktadır [124]. Uçak emisyonlarının yaklaşık % 20'si, bir gaz türbinli motor olan APU'dan kaynaklanmaktadır [125]. Avrupa Havacılık Araştırmaları Danışma Konseyi (ACARE) tarafından belirlenen hedeflerden biri emisyonsuz taksi aşamasıdır. Böyle bir hedefe, taksi aşaması sırasında APU'yu çalıştırmak için temiz bir güç kaynağı uygulanarak ulaşılabilmektedir. Yakıt hücreleri, APU'ya (Şekil 4.3) güç sağlamak için uygun bir kaynak olarak tanımlanmıştır ve böylece uçak taksi aşamasında yakıt tüketimini azaltmaktadır [126]. Bir yakıt hücresi, bir yakıtın (genellikle hidrojen) ve bir oksitleyici maddenin (genellikle oksijen) kimyasal enerjisini bir çift redoks reaksiyonu yoluyla elektriğe dönüştüren bir elektrokimyasal hücredir [127, 128]. Yakıt hücreli APU, çevresel avantajlarının yanı sıra gürültü seviyelerinin azaltılmasına da yardımcı olabilir. Yakıt hücresi sistemleri, geleneksel APU'nun yerine kullanılabilir veya hibrit bir APU sistemi oluşturmak için APU birleştirilebilir [129].



Şekil 4.3. Katı oksit yakıt hücreli yardımcı güç ünitesi [130]

Airbus ve Boeing dahil olmak üzere ana uçak üreticileri, uçaktaki tüm tahrik dışı sistemlere güç sağlamak için hidrojen yakıt hücreleri tarafından üretilen elektrik gücünü kullanmayı amaçlayan projeler yürütülmektedir [7], [131]. Boeing, raporunda, APU'da

katı oksit yakıt hücrelerinin (SOFC) kullanılmasının, seyir sırasında yakıt tüketimini sırasıyla değişken devir için % 40 ve sabit haldeyken % 75 oranında azaltacağını belirtmiştir [132]. Cryoplane Avrupa projesinde ayrıca SOFC APU'nun uçak yer NO_x emisyonunun % 80 oranında azaltacağını ifade edilmiştir [133].

4.3. Hidrojen Yakıtlı Yer Destek Ekipmanları

Yer destek ekipmanı, tipik olarak bir havalimanında bulunan ve uçağa uçuşlar arasında hizmet vermek için kullanılan destek ekipmanına atıfta bulunan bir endüstri terimidir. Yer destek ekipmanı (GSE), hızlı erişim için kullanılmadığında genellikle terminalin yakınında bir rampa üzerinde tutulmaktadır. GSE'nin temel amacı, uçağın iniş sonrası ve tekrar kalkış öncesi emniyetli operasyonlarını desteklemektir. Yer Destek Ekipmanı genellikle çeşitli uçak hareketliliği, yer gücü operasyonları ve kargo ve yolcu yükleme operasyonlarını içermektedir [134]. Havalimanındaki GSE'ler: yolcu merdivenleri, bantlı yükleyiciler, içme suyu araçları ve lavabo araçları, çekiciler, römorklar, bagaj römorkları, bakım merdivenleri, özel işler için kullanılan araçlar (Şekil 4.4) olarak sıralanmaktadır [135].

Şekil 4.4'te verilen araçların her birinin farklı güç gereksinimleri vardır. Hava ünitesi, yaklaşık 450 kW güç tükettiği için tüm hava aracı destek cihazları arasında en fazla enerji tüketen cihaz olarak kabul edilmektedir. Bir sonraki en çok enerji tüketen araç ise uçak çekici araçtır. Diğer destek ekipmanları ise 10 kW ile 50 kW arasında enerji tüketmektedir [7].

Yakın gelecekte, havalimanı çevresindeki hava kalitesini iyileştirmeye olan ilginin artmasıyla birlikte, yakıt hücresi cihazları, farklı yer destek ekipmanlarına (GSE) ve havalimanlarında çalışan yolcu servis araçları ve yakıt ikmal kamyonları gibi diğer kara araçlarına güç sağlama potansiyelleri nedeniyle artan ilgi görmüştür [136]. Amerika'da Enerji Departmanı (DOE) 2.5 milyon dolar Havalimanlarında bagaj araçları için yakıt hücrelerinin yerleştirilmesi için kullanacağını açıklamıştır [137], [138]. Orta boy yakıt hücreli forkliftler, Toronto Pearson, Hamburg ve Münih havaalanları gibi büyük havaalanlarında test edilmiştir [139]. Danimarka havalimanında yakıt hücreleri kullanarak çalışan bagaj arabaları kullanılmaktadır. FedEx şirketi 2015 yılında, yaklaşık 15 ton kargo çekebilen ilk yakıt hücreli GSE kargo traktörlerini piyasaya sürmüştür [140].

Tokyo'da, Tokyo merkez ile Tokyo havalimanı arasındaki yolda sefer yapan otobüslerin bazıları bir hidrojen yakıt hücresi/pil hibrit sistemi kullanmaktadır [141].

Yolcu merdivenleri



Bantlı yükleyiciler



İçme suyu araçları ve lavabo araçları



Çekiciler



Römorklar



Bagaj römorkları



Bakım merdivenleri



özel işler için kullanılan araçlar

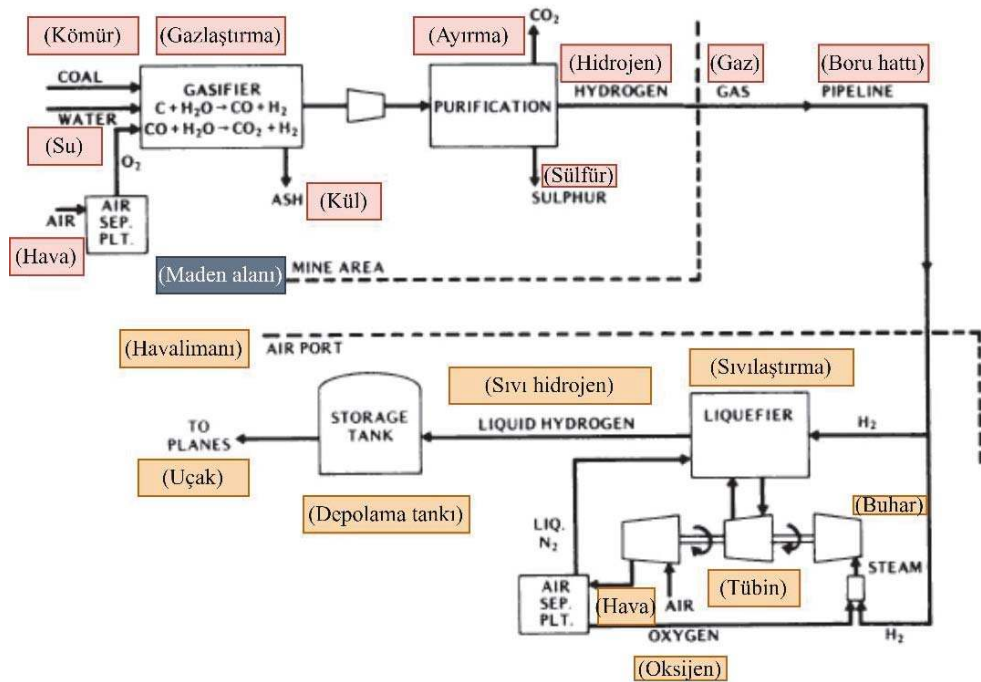


Şekil 4.4. Yer destek ekipmanları-GSE [135]

4.4. Hidrojenin Yakıt Olarak Havacılıkta ve Havalimanlarında Kullanımına Genel Bir Bakış

Genel olarak havacılık sektöründe hidrojen kullanımı uçaklarla ilgili olmuştur. Havalimanı üzerine yapılan çalışmalar daha azdır. Linde, NASA, Boeing, Lockheed ve diğer kuruluşlar tarafından 1970'lerden 1990'lara ait daha eski yayınlar ve 2000'li yıllarda Avrupa Cryoplane projesine ilişkin raporlar, havacılık için LH₂ altyapısına ilişkin görüş sağlamıştır.

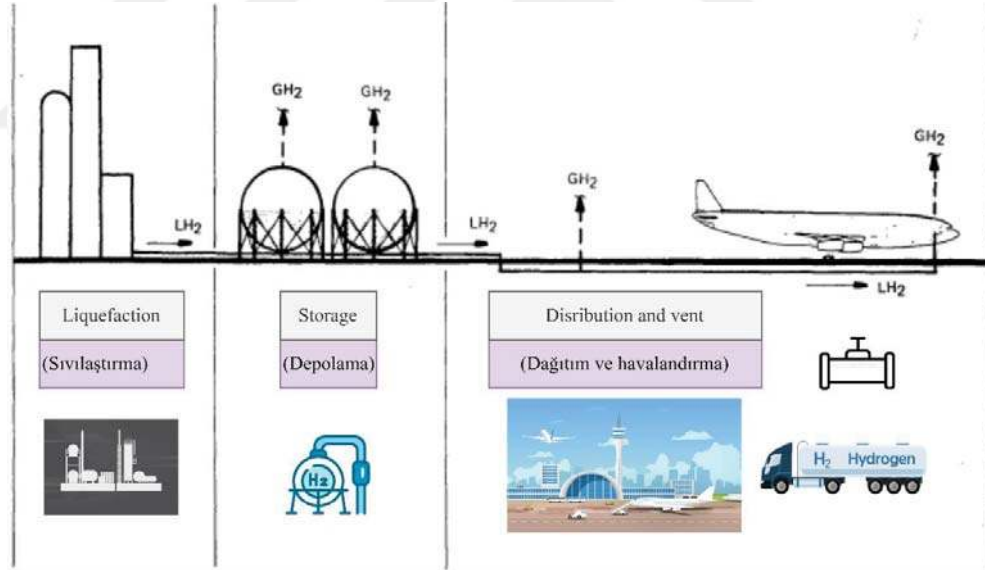
Johnson (1995) yapmış olduğu çalışmada kömürün dönüşümüyle (Şekil 4.5) elde edilen sıvı hidrojenin havalimanlarında kullanmak için analizini yapmış ve ekonomik açıdan değerlendirmiştir. Kullandığı üretim yöntemi gri hidrojen üretimidir. Maden alanında kömürden elde edilen gaz hidrojen havalimanına gönderilerek ve havalimanında bir tesiste sıvılaştırılarak depolanacak şekilde simüle edilmiştir. Sıvılaştırma için gerekli güç hidrojenin ve oksijenin tepkimesiyle türbinden elde edilmektedir. Yerli kömür rezervlerinin sıvı hidrojen havacılık yakıtına dönüştürülmesinin büyüyen enerji ihtiyacı sebebiyle önemli rahatlatma sağlayabileceğini ifade etmiştir. Havacılık endüstrisinde hidrojenin kullanılması için dikkatli bir şekilde hazırlanan genel sistem planlamasının önemini belirtmiştir [142].



Şekil 4.5. Kömür dönüşümüyle hidrojen üretimi [142]

Brewer (1978), yakıt ikmali sistemleri dahil olmak üzere havalimanlarındaki H_2 ile çalışan uçaklar ve LH_2 altyapı kurulumları için teknolojik fizibilite ve uçakların tasarımı hakkında kapsamlı görüşler geliştirmiştir. NASA'nın 1975 yılında yapmış olduğu projeyi referans almıştır. Kaynak olarak su ve kömür yani gri hidrojeni referans almıştır. Ekonomik analizler yapmıştır. Hem ses altı hem de ses üstü uçaklarda sıvı hidrojenin toplam enerji açısından çekici avantajlar sunduğunu ifade etmiştir. Hidrojen yakıtı kullanan uçaklara hizmet vermek için havalimanının dönüşümü, gereksiz sermaye harcaması olmadan ve havayolu işletme prosedürlerinde önemli bir değişiklik olmaksızın gerçekleştirilebileceğini belirtmiştir [96, 104, 143].

Boeing şirketi NASA ile ortaklaşa 1976 yılında sıvı hidrojen yakıtlı uzun mesafe hava taşımacılığını belirlemek için yapmış oldukları çalışmayı yayınlamıştır. Havalimanında LH_2 altyapı kurulumları (Şekil 3.6), uçak tasarımları gibi birçok konuda kapsamlı bir çalışma yapmışlardır [144].



Şekil 4.6. Konsept geliştirme hususları [144]

Korycinski (1978), NASA'nın projesinden iki havalimanı için yapılan hidrojen havalimanlarının analizlerini çalışmasında vermiştir. Chicago O'Hare Uluslararası Havalimanı'nda Boeing Airplane Company sıvı hidrojen kullanımını simüle ederken, Lockheed California Company San Francisco Uluslararası Havalimanı'nda sıvı hidrojen kullanımını simüle etmiştir. Mevcut geniş gövde trafiğine göre, O'Hare için LH_2 uçak

yakıt ihtiyacı günde 726 ton olarak hesaplanmıştır. Sıvı hidrojenin buharlaşma kayıpları nedeniyle sıvı hidrojen ihtiyacı günde 800 tona kadar çıkmaktadır. O'Hare hidrojen sıvılaştırma tesisini, her biri günde yaklaşık 268 ton (243 ton) kapasiteli üç modül oluşturmaktadır (Tablo 3.1). LH₂ yer yakıt sistemi giderleri, San Francisco'da kabaca 304 milyon dolar ve Chicago O'Hare'de 469 milyon dolar olarak hesaplanmıştır [145]. Korycinski diğerleri gibi temiz kaynaklardan üretilmeyen hidrojen üretimine dayalı havalimanı LH₂ altyapı sistemlerini incelemiştir.

Tablo 4.1. Hava terminali hidrojen sıvılaştırma tesislerinin özellikleri (Korycinski, 1978) [145]

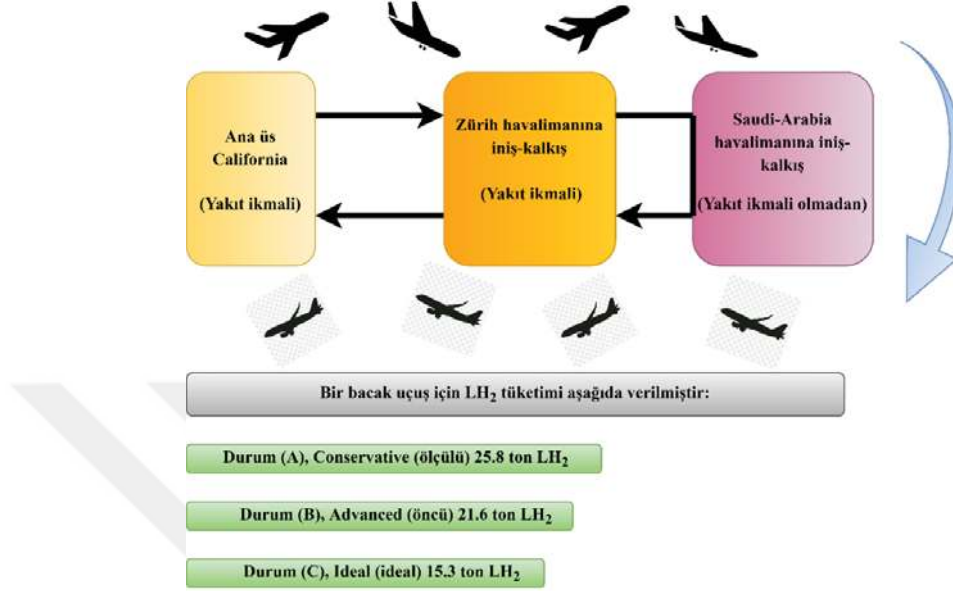
Havalimanı	En yüksek miktar		H ₂ Sıvılaştırma	
	ton/gün	(ton/gün)	ton/gün	(ton/gün)
San Francisco	846	768	250	227
O'Hare	800	726	268	243

Jones ve ark. (1983) sıvı hidrojeni depolama merkezinden yakıt ikmal standına taşımak için havalimanlarında kriyojenik boru hattı sistemlerini bilgisayar programı ile modellemiştir. Kriyojenik yalıtımla donatılmış bir boru hattı boyunca sıvı hidrojen basıncının ve sıcaklığının tahmini için bir model, sayısal bir simülasyon şeması ve bir duyarlılık analizi sunmuşlardır [146]. Ancak daha geniş bir altyapı için hidrojen tedarik zinciri kurmamışlardır.

Alder ve ark., 1980 ve 1984 yılları arasında Zürih Havalimanı'nda yakıt olarak sıvı hidrojen kullanan bir kargo jetinin ön araştırmasını yapmıştır. Günde 15 ila 30 ton sıvı hidrojen yakıt ikmal için bir fizibilite çalışması yapılmıştır. Kaliforniya, Avrupa ve Suudi Arabistan arasında bir rota oluşturulmuş ve Zürih Havalimanı Avrupa merkezi olarak seçilmiştir (Şekil 4.7). Üç alternatif olasılık değerlendirilmiştir [147]. Ancak analizleri, yalnızca günde 15-30 ton LH₂ ile çok küçük bir talep oluşturmakta ve küresel hidrojen altyapısını kullanan diğer çalışmaları ihmal etmişlerdir.

Alder ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmaya benzer diğer bir çalışma ise Contreras ve ark. (1997) tarafından yapılmıştır. Uçak ve altyapı perspektifleri dahil olmak üzere diğer daha kapsamlı analizler Chicago Havalimanı'ndaki H₂ altyapısına incelemiştir. Tank, boru hattı ve izolasyon malzemelerini iyileştirilmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Hidrojen kaçak gözleme sistemlerinin olması gerektirdiğini ifade

etmişlerdir. Hidrojenin fazla hacim gerektirdiğinden aerodinamik yapının geliştirilmeye ihtiyacı olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 4.7. Zürih havalimanı için üç alternatif olasılık [147]

NO_x emisyonlarının düşürülmesi gerektiğini vurgulamışlardır [95]. Benzer bir görüş Armstrong ve ark. (1997) tarafından savunulmuştur. Önümüzdeki 50 yıl içinde geniş ölçekli havacılık hidrojen yakıtının kullanılmayacağını ifade etmişler ve ekonomik açıdan ve NO_x emisyonları sebebiyle diğer yakıtlara mücadele etmesinin zor olduğunu ifade etmişlerdir [148].

Schmidtchen ve ark. (1997), LH₂ enerji sistemlerinin kurulumunu niteliksel olarak tanımlamış, ancak ana araştırma amacı havalimanlarında H₂ kullanımının emniyetini analiz etmektir. En önemli riskler belirlenmiş ve tasarım, işletme ve acil durum için koruyucu önlemler dikkate almışlardır. Riskler, diğer herhangi bir büyük endüstriyel tesisle ilişkili risklerden daha fazla değildir, bazıları daha da düşüktür. Havacılığın emniyetini etkilenmeyeceğini ifade etmişlerdir. Sonuç olarak, cryoplane ve altyapısının, güvenlik açısından uygun olduğuna gözlemlemişlerdir [149]. Aynı konu son dönemde Benson ve ark. (2020) tarafından da ele alınmıştır [150].

Sefain (2000) yapmış olduğu çalışmada LH₂ uçak tasarımı, motor emniyeti, havacılık standartları, havalimanı destek ekipmanları, ekonomik bakış açısı, emniyet gibi

birçok konuda LH₂ yakıt destekli havacılığı incelemiştir. Sıvı hidrojenin havacılık operasyonlarında kullanılmasıyla, bakım faaliyetlerinde hangar ekipmanlarının değişeceğine, uçuş operasyonları için gereken ekipmanların bir kısmının modifikasyon gerektirdiğine vurgu yapmıştır. Uçağın yerde kalacağı sürenin kerosen kullanan bir uçakla aynı olacağını belirtmiştir. Bir LH₂ uçağının toplam maliyeti makul değerler içinde olduğunu ve LH₂ yakıtlı uçakların bakımını ve desteklenmesi için yeni ekipman gereksinimi kapsamlı olmadığını belirtmiştir [151].

Cryoplane projesinde (2000-2002), H₂ ile güçlendirilmiş uçak tasarımlarına, filo değişim senaryolarına, hidrojen kaynağı ve boru hatlarıyla ya da kamyonlarla yakıt ikmaline detaylı bir bakış yapılmıştır. Genel olarak proje LH₂ uçaklarında yapılması gereken minimum değişiklikler (Şekil 4.8) üzerinedir. Projede, sıvı hidrojen yakıtı ile karşılaştırıldığında, kerosenin daha düşük bir maliyete sahip gözlemlenmiştir. Hidrojen ve kerosen yakıtının fiyatına bağlı olarak, DOC'un (doğrudan işletme maliyetleri) 2040 yılında yaklaşık olarak eşdeğer olacağını öngörmüşlerdir [114].



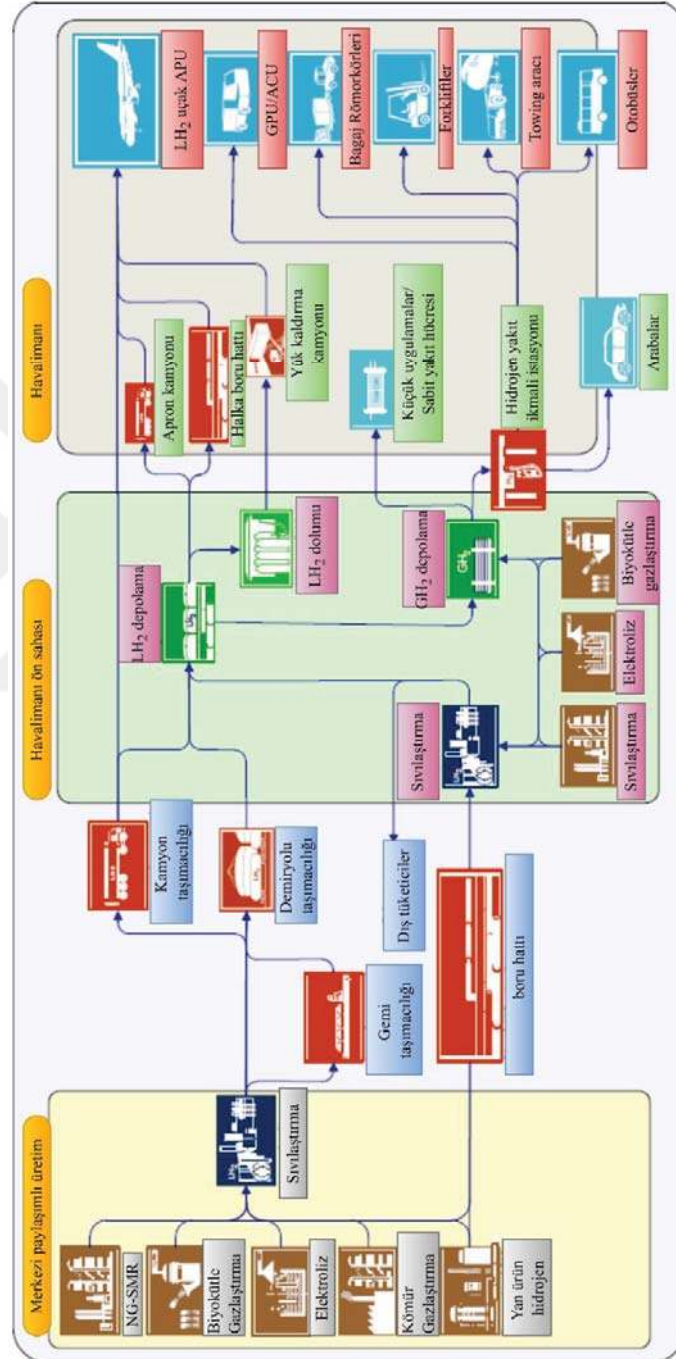
Şekil 4.8. LH₂ uçaklarında yapılması gereken minimum değişiklikler [114]

Cryoplane projesinden sonra ISO/PAS 15594:2004 olarak adlandırılan, bir havalimanı hidrojen yakıt ikmal tesisini işletmek için gerekli olan yakıt ikmal prosedürlerini, hidrojen buharlaşma yönetim prosedürlerini, hidrojen depolama gereksinimlerini ve yer destek ekipmanının özelliklerini belirten emniyet sertifikasyonu yayınlanmıştır [152]. Ancak daha sonra geri çekilmiştir. Yapılan Cryoplane projesi sonraki çalışmalar için öncü olmuştur. Sonraki yıllarda, tamamlayıcı nitelikteki daha fazla nitel araştırmalar, H₂ uçak tasarımı, H₂ yakıt ikmal ve havalimanı yakıt ikmal ilgilie çalışmalar yapılmıştır. Örneğin, Svensson (2005), motor ve yanma odası tasarımını,

minimum çevresel etki için seyir yüksekliği ile ayrıntılı olarak incelemiştir. Havalimanı etkileri ve hidrojen üretimi için mevcut ve öngörülen yöntemleri karşılaştırmıştır. Sonuç olarak, hidrojen havalimanı altyapısının İsveç Sivil Havacılık endüstrisinde kullanabileceğini ifade etmiştir [153, 154]. Diğer genel çalışmalar arasında Verstraete (2009), kavramsal uçak tasarımı, motor ve uçak tasarımının tek bir entegre sistem olarak birleştirilmesine olanak sağlayan bir motor performans değerlendirme rutini, her iki alt sistem arasındaki bağlantı sıvı hidrojen tankı olduğundan, tanklar için de detaylı bir tasarım yöntemi oluşturmuştur [155]. Benzer çalışmaları Rondinelli ve ark. (2014) yapmıştır. Hidrojenin yakıt olarak havacılık endüstrisinde kullanımlarını olumlu ve olumsuz yönlerini ele almışlardır. Sonuç olarak, daha düşük aerodinamik verimlilik ve daha yüksek yapısal kütle göz önüne alındığında bile, hidrojen yakıtlarıyla ilişkili dikkate değer ekonomik ve çevresel faydaları vurgulamışlardır. Kötüleşen hacimsel verimlilik ve üretim ve tedarik ile ilgili zorluklar yine de önemli olduğunu ve önemli teknolojik ve politik destek gerektireceğini belirtmişlerdir [156]. Bir diğer benzer çalışmayı ise Schutte ve ark. (2015) yapmıştır. Sıvı hidrojen, geleneksel jet yakıtlarına kıyasla daha büyük bir özgül enerji yoğunluğuna sahip olmasına rağmen, aynı zamanda dört kat daha küçük hacimsel enerji yoğunluğuna sahiptir. Bu, hidrojenle çalışan uçakların ve ilgili yakıt sistemlerinin verimli tasarımı için benzersiz bir zorluk teşkil ettiğini ifade etmişlerdir. Son olarak, sıvı hidrojenin bir havacılık yakıtı olarak geniş kullanımı, kriyojenik sıcaklıklarda verimli dağıtım ve depolanması için malzemelerin ve tankların daha fazla geliştirilmesini, motor soğutması için ısı değişim sistemlerinin geliştirilmesini ve yapısal bileşenler üzerindeki termal gerilimlerin verimli kontrolünü gerektirdiğini belirtmişlerdir [157].

Farklı bakış açısıyla havalimanlarında H₂ kullanımını ile ilgili çalışmalar yapılmıştır, ancak uçak tahriki dışındaki diğer uygulamaları içermektedir. Bunların çoğunluğu, nispeten daha az H₂ ihtiyacı olan GSE ve APU sistemleridir. Münih Havalimanı'ndaki bir gösteri projesinde, GSE için GH₂ ve LH₂ arzının fizibilitesi test edilmiştir [158–160]. Buna ek olarak, Testa ve ark. (2014), GSE'nin tahrik sistemlerini H₂'ye geçirerek havalimanlarındaki emisyonları azaltma potansiyelini araştırmıştır [161]. Stiller ve Schmidt (2010), APU sistemlerini beslemek için H₂ altyapı zincirini araştırmıştır. Havalimanında uçuş destek ekipmanları için hidrojen yakıt ikmali besleme zinciri şeması (Şekil 4.9) oluşturmuşlardır. Hidrojen üretimi ve sıvılaştırılması hem havalimanı dışında hem de havalimanı içinde gerçekleşen, farklı yöntemlerle sıvı

hidrojenin havalimanına taşındığı, havalimanında sıvı hidrojenin depolanarak kullanıcılara ulaştırıldığı bir besleme zinciri şeması üzerinden APU LH₂ yakıt ikmalini göstermişlerdir.[162].



Şekil 4.9. Hidrojen yakıt ikmal besleme zinciri şeması [162]

Stockford ve ark. (2019), yakıt hücresiyle çalışan bir Airbus A320 için elektrikli uçak taksi sistemlerini analiz etmiştir. Emisyon değerlerinde azaltmayı hedeflemişlerdir.

Uçağın taksi hareketinin hidrojen yakıt hücresi kullanılarak gerçekleştirilmesinin gelecek için maliyet analizini yapmıştır [163].

HYPOR Projeksi (2020), Occitanie bölgesi tarafından başlatılmıştır ve aralarında LAPLACE laboratuvarı da bulunan geniş bir ortaklar grubunu içermektedir. Bu projenin amacı, gelecekteki havalimanı hidrojen ekosistemleri (hub) geliştirmek ve kurmaktır. Proje tarafından hedeflenen her iki havalimanı: Toulouse-Blagnac (uluslararası bir platform) ve Tarbes-Lourdes-Pyrénées (bölgesel bir platform). Konsorsiyum, hidrojen etrafında bir araştırma faaliyeti geliştirirken, havalimanlarında ekonomik olarak uygun hidrojen ekosistemleri geliştirmeyi, ekolojik ayak izini azaltmayı hedeflemiştir. Kısaca hidrojen havalimanı modellemelerini (Şekil 4.10) incelenmektedir [164]. Bununla birlikte bir enerji analizine yer verilmemiştir, H₂ uçak tahrikine net bir odaklanma bulunamamıştır, daha çok diğer kullanımlar, örneğin kara taşımacılığı, genel elektrifikasyon, bina ısısı üzerinde daha fazla vurgu bulunmaktadır. Benzer çalışmaları Robles (2019) [165] ve Xiang (2021) [166] yapmıştır. Xiang (2021), yapmış olduğu çalışmada havalimanı elektrifikasyonu için güneş enerjisinden hidrojen üretimi sisteminin tekno-ekonomik analizini yapmıştır. Fotovoltaik, hidrojen enerji sistemi, elektrikli araçlar, hidrojen yakıt hücresi jeneratörü ve pil depolama sistemi dahil olmak üzere temel enerji kaynakları, çeşitli enerji tedarik seçenekleriyle bir doğru akım mikro şebekesi oluşturmak için entegre etmiştir [166]. Robles (2019), yapmış olduğu bu çalışmada havalimanı enerji ihtiyaçlarını karşılayan bir hidrojen altyapısı sunmuştur. Model geliştirmeyi dört kademeyi dikkate alarak yapmıştır. Bunlar: enerji kaynakları, hidrojen üretimi, ulaşım ve depolamadır [165]. Hidrojen kaynaklı havacılık üzerine yapılmış bir kısım çalışma hidrojen üretim yöntemlerinin iklim üzerine etkisine odaklanmaktadır. Bu alanda, Victor (1990), yüksek ve düşük talep senaryolarına göre üretim yöntemlerini karşılaştırmıştır. LH₂'nin güneş ve hidroelektrik üretimi araştırmıştır (her ikisi de sıfır CO₂ teknolojileridir), ancak hidroelektrik ve güneş kaynakları bakımından fakir alanlar için, LH₂'nin hidro/güneş üretim tesislerinden taşınması, yerel nükleer güç LH₂ üretimi ile karşılaştırıldığında uygun olmadığını belirtmiştir [167].

Janic (2010), çalışmasında hidrojen havalimanı için iki model geliştirmiştir. Birinci model, yakıt talebinin tahminini ve belirli bir havalimanında belirli koşullar altında bu talebi karşılamak için gereken yakıt üretim ve depolama kapasitesinin belirlenmesini

[illegible]

45

Sonuç olarak, kriyojenik uçak filosunun artışıyla yakıt verimliliğinin artacağını, CO₂ ve NO_x emisyonlarının dengeleneceğini, ancak H₂O emisyonlarının artacağını ifade etmiştir [168]. Janic (2008) bir diğer çalışmada geleneksel yakıttan hidrojene geçişin ekonomik ve teknolojik olarak riskli olduğunu ifade etmiştir [169].

Yılmaz ve ark. (2012), çalışmalarında hidrojen üretim yöntemlerinin emisyon değerlerine ve farklı senaryolara dayalı olarak havacılıkta LH₂ ikmali ve tahrikinden elde edilen belirlenmiş emisyon genel bir bakış sunmuşlardır [170]. Dincer ve Acar (2016), yapmış oldukları çalışmada hidrojenin yakıt olarak havacılıkta kullanımının, enerji tüketimi, çevresel etki ve emisyonla ilgili maliyet olmak üzere üç önemli noktada değerlendirmiştir. Ayrıca, daha ayrıntılı bir karşılaştırmalı değerlendirme için buhar metan reformasyonu ve rüzgâr, PV ve hidroelektrik temelli elektrolizden hidrojen üretiminin maliyetleri ve verimlilikleri karşılaştırmışlardır. Havacılık yakıtı değerlendirme sonuçları, hidroelektrik ve rüzgâr temelli elektrolizden elde edilen hidrojenin, çalışmada seçilen yakıtlar arasında umut verici temiz, verimli ve daha az maliyetli bir seçenek olduğunu göstermişlerdir [171]. Benzer bir çalışmayı Penke ve ark. (2021), yapmışlardır [172]. Havacılıkta hidrojen kullanımının farklı senaryolarının çevresel etkisini değerlendirmişlerdir.

Hidrojen yakıtı ile çalışan sadece son yıllarda yapılan çalışmalar [178], [179], [180] kullanım açısından temiz, yenilenebilir hidrojeni içermektedir. Ayrıca yapılan çalışmalar maliyet düşürme üzerinedir.

Stadler (2014), yapmış olduğu çalışmada, sadece yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak büyük ölçekli hidrojen üretebilen farklı süreçleri ve bunların gelişim durumlarını ele almıştır. Analizleri, hibrit bir bakır-klorür termokimyasal döngüsünün, yüksek verimlilik, uzun sistem ömrü ve teknolojik kısıtlamalar (özellikle yüksek sıcaklıkta termal depolama ile ilgili) arasındaki en iyi denge olduğu sonucuna varmıştır ve bu nedenle, bir ön tasarım için seçmiştir. Çalışmasında bir hidrojen tedarik zinciri kurmuştur. Hibrit bir güneş enerjisi konsantrasyon santrali tasarlamıştır. Kısaca termokimyasal elektrolize dayalı havacılık için LH₂ tedariki konusunda tekno-ekonomik bir çalışma yürütmüştür [173]. Stadler'in çalışmasının sonuçlarını Godula-jopek, Westenber (2016) [174] ve Janic (2014) [175] çalışmalarında kullanmıştır. Godula-jopek ve Westenber (2016), yapmış oldukları çalışmada hidrojenin yakıt olarak havacılıkta kullanılmasının teknik, teknolojik, ekonomik olarak incelemişlerdir [174]. Janic (2014),

çalışmasında yeşil hidrojen kullanmış ve sera gazı emisyon analizi yapmıştır. Geleneksel bir jet A ve kriyojenik LH₂ (Sıvı hidrojen) yakıtlı uçak filosu tarafından işletilen ticari hava taşımacılığında kaynaklanan GHG (sera gazı) emisyonlarının uzun vadeli gelişimini ele almıştır [175].

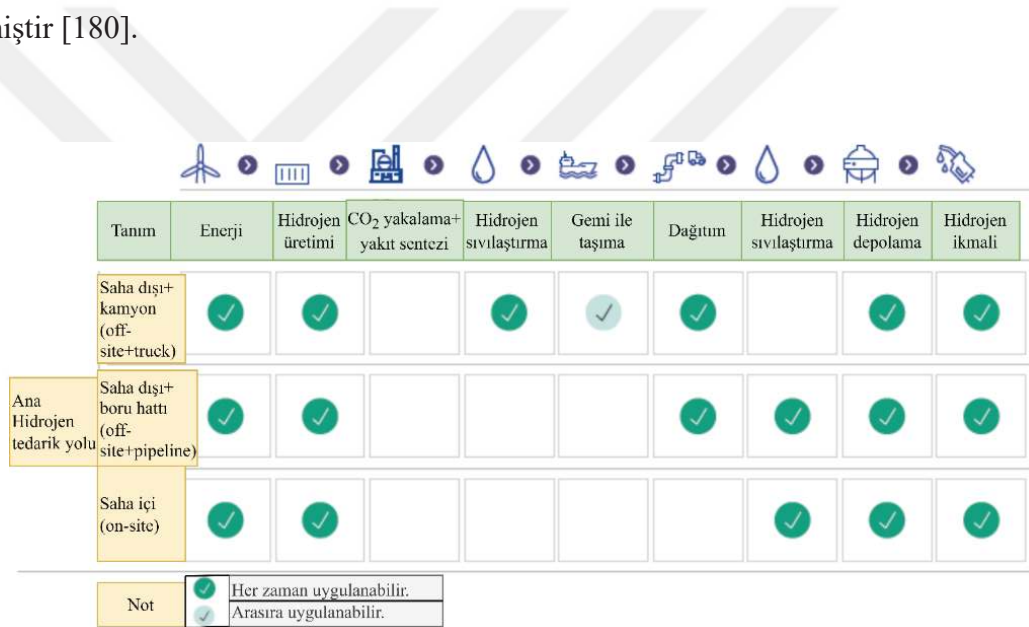
MAHEPA projesinde, Marksel ve ark. (2020), çalışmalarında, içten yanmalı hibrit motorların (ICE-hybrid) hızlı şarj edilmesi ve yakıt hücreli hidrojen hibrit uçakların yakıt ikmali için ihtiyaç duyulan havalimanı altyapısının teknik yönlerini değerlendirmeyi amaçlayan bir fizibilite çalışmasını kapsamlı şekilde sunmuşlardır. MAHEPA projesi kapsamındaki iki çalışma durumu, havalimanlarındaki nispeten yeni altyapısı ihtiyaçları için teknik gereksinimleri tahmin etmek için geliştirmişlerdir. İlk çalışma, ICE-hibrit uçakların çoklu şarj sorunlarına atıfta bulunurken, ikinci çalışma, yakıt hücreli hidrojen hibrit uçakların yakıt ikmali ile ilgilidir. ICE-hibrit sistemi için havalimanı alt yapısının gerekli olduğuna vurgu yapmışlardır. özetle çalışmada, daha küçük uçaklarla incelense de hibrit teknolojinin ve hidrojenin, büyük uçaklar için uygun olduğu ifade edilmiştir [176]. Benzer bir çalışma olan Flying-V projesi (Delft Teknoloji Üniversitesinde), LH₂ lojistik yönlerine ve LH₂ tedarik maliyetlerine kısa bir genel bakış sunmuştur, ancak herhangi bir ayrıntılı bilgi sağlamamıştır [177]. Hidrojen yakıtlı hibrit uçak üzerine durulmuştur.

Los Angeles Havalimanı için (LAX çalışması), Amy ve Kunycky (2019) yerinde (on-site) yeşil H₂ üretimi ve sıvılaştırma maliyetlerini değerlendirmiştir. Daha büyük LH₂ talepleri için ölçeklendirme faktörlerini dahil etmişlerdir [178]. Bununla birlikte, saha dışı H₂ üretim kapasitelerine ve taleplerine ara bağlantı ve ayrıca bir yol optimizasyonu araştırılmamıştır. Gelişen yeşil H₂ teknolojisine bağlı olarak CAPEX (sermaye harcamaları) maliyetinin düşeceğini ifade etmişlerdir. Çalışmalarında havalimanı altyapısından çok hidrojen yakıtının uçağa entegrasyonu için bir modelleme geliştirmişlerdir.

Fusaro ve ark. (2020), çalışmasında yüksek hızlı havacılığı mümkün kılmak amacıyla sıvı hidrojen üretmek için çevresel ve ekonomik olarak sürdürülebilir teknolojilerin uygun şekilde seçilmesinin önemini açıkça vurgulamıştır. Bir havalimanı için kurulacak hidrojen alt yapısını, çevresel etkisini ekonomik olarak değerlendirmiştir. Sonuç olarak, yeşil bir hidrojen çözümünün sosyo-ekonomik uygulanabilirliğini göstermiş ve yenilenebilir kaynaklardan gelen elektriğin şebekedeki payını artırmak için

daha da büyük santrallerin geliştirilmesini ifade etmişlerdir [179]. Tedarik analizinden ziyade daha çok maliyet ve çevresel etki üzerinde durmuşlardır.

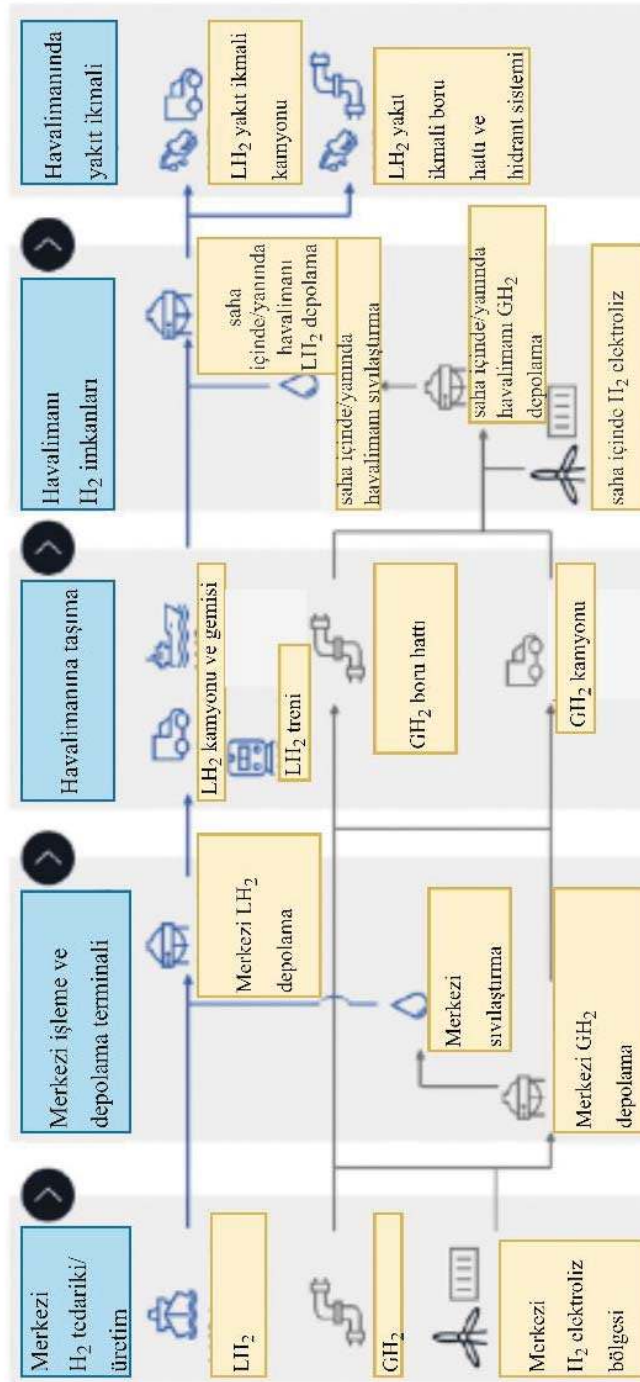
Clean Sky 2 JU ve FCH 2 JU tarafından yapılan yakın tarihli bir çalışma, tedarik topolojileri (Şekil 4.11) ve saha içi ve dışı H₂ tedariki de dahil olmak üzere ekonomik analizler içermektedir. Rapora göre yakıt hücreli küçük uçaklar, yakıt hücreli ve hidrojenin direk yakılmasıyla (hibrit) orta gövdeli ve son olarak hibrit geniş gövdeli uçakların yolcu başına düşecek maliyetleri karşılaştırılmıştır. Yakıt hücreli küçük uçaklarda maliyetin düşük olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, uygun maliyetli altyapı dağıtımı için bir yol haritası ve potansiyel H₂ alımına ilişkin senaryolara yer verilmiştir. LH₂ ile sentetik yakıtlar karşılaştırılmış ve gelecek için ekonomik olarak tahminler verilmiştir [180].



Şekil 4.11. Hidrojen tedarik zinciri [180]

Hoelzen ve ark. (2021), yapmış oldukları derleme çalışmasında yeşil hidrojen havalimanı altyapısıyla (Şekil 4.12) ilgili maliyet faktörlerine ilişkin analizler yapmışlardır. Kısa ve orta menzilli bir uçak, H₂ tahriki için modellenmiş ve modifiye etmişlerdir. Bunlara dayanarak hem uçak hem de altyapı ile ilgili doğrudan işletme maliyetlerini (DOC) karşılaştırmak için ayrıntılı bir maliyet analizi kullanmışlardır. Maliyetin önemli ölçüde tedarik altyapısına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. En iyi LH₂ maliyet durumunda toplam DOC biraz düşerken, ayrıca toplam DOC sadece LH₂

maliyetleri nedeniyle % 10 ila % 70 (kısa aralık) ve % 15 ila % 102 (orta aralık) arasında artabileceğini ifade etmişlerdir [181].



Şekil 4.12. LH₂ besleme topolojisi [181]

Türkiye’de hidrojen destekli havalimanı ile ilgili bir tez çalışması mevcut değildir [182]. Uluslararası literatüre bakıldığında hidrojen havalimanı altyapısı üzerine yapılmış literatürden seçilmiş olan önemli çalışmalar geniş literatür araştırmasından sonra Tablo 4.2’de verilmiştir. Hidrojen tedarik zinciri hidrojen üretimi, sıvılaştırma, ulaşım, depolama ve yakıt ikmali olarak ele alınmıştır.

Tablo 4.2. Havalimanı için LH_2 altyapısından bahseden seçilmiş literatür taraması bulguları [95, 96, 104, 114, 132, 142, 143, 145, 147, 149, 151, 153–155, 162, 168, 169, 173, 176, 178–181]

Yazarlar	Dikkate alınan yakıt tedarik zinciri bileşenleri					Yol analizi
	H_2 üretimi	Sıvılaştırma	Ulaşım	Depolama	Yakıt ikmali	
Johnson	X (Gri and nükleer)	X	X	X	X	-
Brewer ile diğerleri	-(Gri H_2 dışardan)	X	X	X	X	-
Alder	X (Nükleer)	X	-	X	X	-
Contreras ve ark.	X (Yeşil)	-	-	-	-	-
Schmidtchen ve ark.	-	X	X	X	X	-
Cryoplane	X (Gri and Yeşil)	X	-	-	X	-
Cranfield	X (Gri and Yeşil)	X	X	X	X	-
Stiller ve Schmidt	X (Gri and Yeşil)	X	X	X	X	X
Janic	X (Gri and Yeşil)	X	X	X	X	-
Stadler	X (Termokimyasal)	X	X	-	-	-
Marksel ve ark.	X (Gri and Yeşil)	X	X	X	X	-
Amy ve Kunycky	X (Yeşil)	X	X	X	X	-
Fusaro ve ark.	X (Yeşil)	X	-	-	-	-
Clean Sky JU ve FCH JU	X (Yeşil)	X	X	X	X	X
Hoelzen ve ark.	X (Yeşil)	X	X	X	X	X

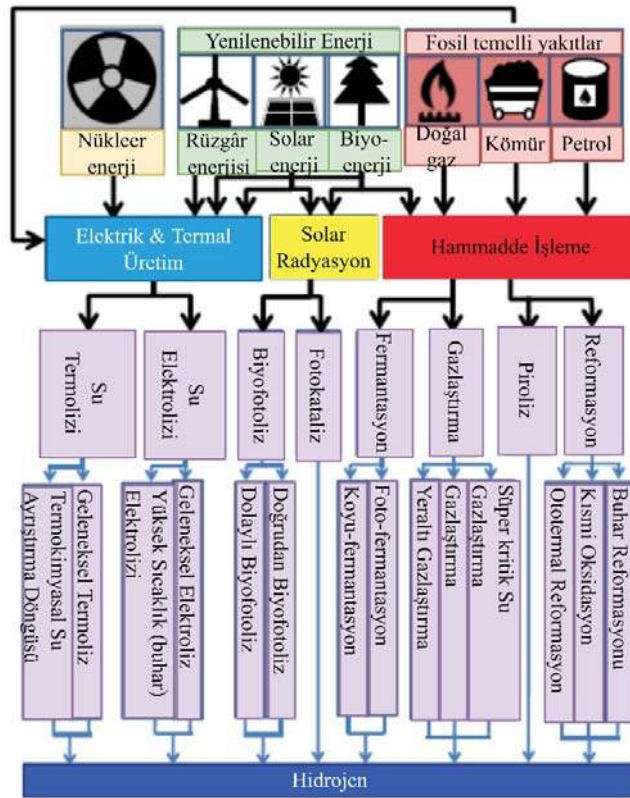
(X): Çalışılmıştır, (-): Çalışılmamıştır.

5. HİDROJEN TEDARİK ZİNCİRİ ALT BÖLÜMLERİ

Bu bölümde hidrojen tedarik zincirini oluşturan üretim, sıvılaştırma, taşıma, depolama ve dağıtım alt bölümleri incelenmiştir. Daha çok hidrojen üretim yöntemleri çevresel etki ve sürdürülebilirlik yönünden incelenmiş ve tedarik zincirini oluşturan diğer yapı elemanlarıyla bir tasarım oluşturulmuştur.

5.1. Hidrojen Üretim Yöntemleri

Günümüzde hidrojenin % 48'i doğal gazdan, % 30'u ağır yağlar ve naftadan, % 18'i kömürden ve sadece % 4'ü suyun elektrolizinden üretilmektedir [183]. Yapılmış çalışmalar içerisinde (Şekil 5.1), şu anda veya yakın gelecekte hidrojen üretmek için benimsenebilecek çok sayıda geleneksel veya yenilikçi teknolojiler, örneğin kimyasal veya biyolojik işlemler yoluyla fosil yakıtların veya biyokütlenin ayrıştırılması geleneksel fosil yakıtlardan veya düşük karbonlu enerjiden (rüzgâr, güneş, biyokütle ve nükleer enerji) üretilen elektrik veya ısıyı kullanarak suyu hidrojen ve oksijene ayırmak mümkündür [184].



Şekil 5.1. Farklı enerji kaynaklarıyla hidrojen üretim yöntemleri [184, 185]

Bununla birlikte, Acar ve Dincer (2014) yapmış olduğu “yenilenebilir ve yenilenemez kaynaklardan hidrojen üretim yöntemlerinin karşılaştırmalı değerlendirmesi” çalışma, CO₂ emisyonları ve asitlenme potansiyeli açısından, fosil yakıt temelli hidrojen üretim yöntemlerinin çevreye en zararlı yöntemler olduğunu, termokimyasal döngüleri kullanan hidrojen üretiminin ise çevreye en zararlı yöntemler olduğunu göstermiştir [186].

Çelik ve yıldız (2017) yaptıkları çalışmada hidrojen üretim yöntemlerinin yeşil kimya ilkelerine göre çevre zararını araştırmıştır. Her yöntem kimyasal 12 ilkeye göre değerlendirilmiş ve 4 farklı grupta incelemişlerdir. Kimyasal ilkeler sadece çevresel etkiye göre düzenlenmiştir. CO₂ yakalama ve sekestrasyonu çalışma kapsamına almamışlardır. Gruplar enerji kaynaklarına göre elektriksel, termal, hibrit ve biyolojik olarak sınıflandırmışlardır. Elektriksel yöntemler arasında suyun elektrolizi, termal yöntemler arasında biyokütlenin gazlaştırılması, hibrit yöntemler arasında foto elektrokimyasal yöntem, biyolojik yöntemler arasında ise biyo-fotoliz ve foto fermentasyon yöntemleri temiz hidrojen üretim yöntemleri olduğunu belirtmişlerdir [187].

Turner (2004) çalışmasında sürdürülebilir hidrojen üretimiyle ilgili bir genel bakış sunmuştur. Hidrojenin üretiminde en çok doğal gaz ve kömür kullanıldığını ancak bu kaynakların yenilenebilir olmadığını belirtmiştir. Solar, rüzgâr, nükleer ve jeotermal enerji hidrojen üretimi için sürdürülebilir enerji kaynakları olduğunu ve ayrıca biyokütle, suyun elektrolizi ve termal kimyasal çevrim de sürdürülebilir olduğunu ifade etmiştir. Yapılan çalışmada üretim yöntemleriyle ilgili önemli sonuçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Hidrojen üretiminde kaynak olarak kömür veya doğal gaz kullanıldığında emisyonlardan dolayı sera gazı etkisine sebep olurlar ve çevreye zarar vermektedirler. Ancak ekonomik açıdan bu kaynaklar en uygundur.
- Elektrolize bakıldığında çevreye zararı yoktur ancak ekonomik açıdan bakıldığında sıcaklık 2000 °C sıcaklığı geçtiği için elektrik tüketimi fazladır.
- Biyokütle kaynak olarak incelendiğinde hammadde gereksinimlerinden dolayı kullanımı sınırlı olabilir.
- Güneş ve rüzgâr enerjisi temiz enerji enerjidir. Ayrıca elektrik üretimi için suya ihtiyaç duymazlar. Su kaynaklarını tüketmezler.

Turner, çevreci, sürdürülebilir hidrojeni; ulaşımda, elektrik enerjisi depolamada kullanmak gerektiğini belirtmiştir [188].

Dawood ve ark. (2020) yapmış oldukları derleme çalışmasında hidrojen üretim yollarının ve teknolojilerinin karşılıklı bağıntı ve karşılıklı bağlamlarını incelemiştir. Hidrojen sıfır karbon emisyonu sağlayan bir enerji olmasına rağmen, üretim yöntemlerine göre bu ifade değiştiğini, hidrojen üretim yolu ve spesifik teknoloji seçimi, mevcut enerji ve hammadde türünün yanı sıra son kullanım saflığı için gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Mevcut literatürde hidrojen üretim yollarının çevreye zararı açısından bakıldığında kirletici, yarı temiz, temiz olarak; gri, mavi, yeşil renk kodlarıyla ifade edildiğini belirtmişlerdir. Gri hidrojen son kullanım noktasında sıfır karbon emisyonu üretmesine rağmen, gri hidrojen kirli (kirletici) olarak kabul edildiğini, öte yandan mavi hidrojenin, gri hidrojenin karbon yakalama teknolojisi ile oluşturulduğunu, yeşil hidrojen için ise yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen hidrojen olarak literatürde tanımlandığını belirtmişlerdir. Hidrojenin ne kadar kirletici veya temiz olduğundan üretim sürecinin girdi enerjisinin türüne atıfta bulunan mevcut renk kodlama modelinin, enerjinin ne kadar temiz olduğunu doğru olarak belirleyemeyeceğini ifade etmişlerdir. Literatürdeki modeli hatalı olarak kabul edip, hidrojen üretim yöntemleri için yüksek emisyonlardan düşük emisyonu doğru renk tayfı da dikkate alınarak yeni bir temiz hidrojen indeksi sunmuşlardır [189].

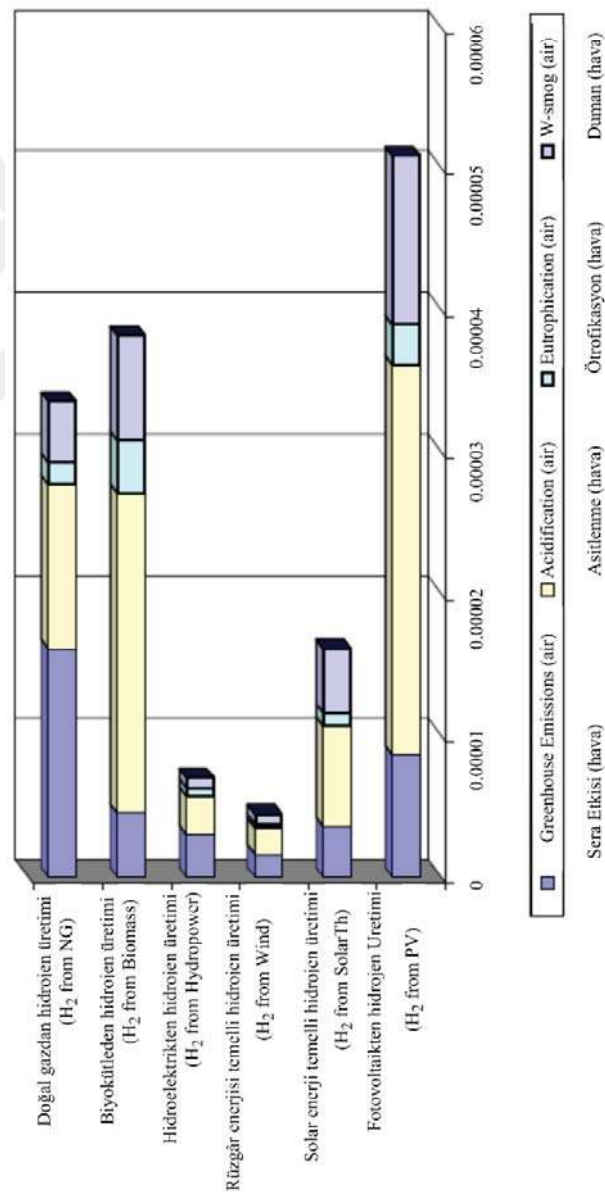
Koroneos ve ark. (2004) hidrojen üretim yöntemlerinin çevreye olan etkisi yönünden yaşam döngüsü değerlendirmesi yapmıştır.

Üretim yöntemleri ve kaynakları;

1. Doğal gaz ile buhar reformasyon yöntemi
2. Solar fotovoltaik
3. Solar termal enerji
4. Rüzgâr gücü
5. Hidroelektrik (Hydro power)
6. Biyokütle

Yaşam döngüsü ve değerlendirmesi yapılırken hedef tanımı ve kapsam, envanter analizi, etki değerlendirmesi ve bunların arasındaki bağıntı değerlendirilmişlerdir. Hedef tanımı ve kapsamı üretim süreç ve aktiviteyi tanımlamaktadır. Envanter analizi, enerjiyi,

su ve kullanılan malzemeyi ve çevreye salınan atıkları tanımlamaktadır. Hidrojen üretiminde fotovoltaik enerji kaynağı en kötü çevresel performansa sahip olduğu ve ayrıca daha az hidrojen ürettiğini gözlemlemişlerdir. Buhar reformasyon yöntemi çevreye CO₂ ve SO₂ salınımı yapmakta olduğunu ve küresel ısınmayı tetiklediğini ifade etmişlerdir. Rüzgâr gücü, su gücü ve solar termal enerji kaynaklarının en çevre dostu kaynaklar olduğunu göstermişlerdir. Şekil 5.2’de yapmış oldukları çalışmanın sonucu verilmiştir [190].



Şekil 5.2. Farklı hidrojen üretim yöntemlerinin toplam çevre etkisi [190]

Suleman ve Ark. (2015) yapmış oldukları çalışmada çeşitli hidrojen üretim yöntemlerinin çevresel etki analizlerini ve karşılaştırılmasını incelemişlerdir. Ele alınan yöntemler, yenilenebilir enerji kaynakları ve fosil yakıtlar gibi çeşitli enerji kaynaklarına göre kategorize etmişlerdir. Çevresel etkiyi incelemek için yaşam döngüsü ve değerlendirme metodolojisi uygulamışlardır. İnceledikleri yöntemler arasında: rüzgâr enerjisi kaynaklı elektroliz, fotovoltaiik kaynaklı elektroliz, diyafram hücreli, zar hücreli, cıva hücreli ve buhar metan reformasyonu (SRM) olarak sıralanmaktadır. Etki kategorileri için CML (Centrum Milieukunde Leiden) yöntemi kullanıldığında SRM için abiyotik tükenmenin 0,131 kg olduğunu ifade etmişlerdir. En yüksek etkinin SRM yöntemi olduğu gözlemlenmiştir. İkinci olarak, en yüksek abiyotik tükenme değeri 0,0078 kg ile cıva hücresi kullanılan elektroliz yöntemi olduğunu gözlemlemişlerdir. 0,00678 kg ile diyafram hücresi, 0,0061 kg ile zar hücresi, solar elektroliz 0,026 kg ve rüzgâr elektrolizi 0,00228 kg değerlere sahiptir. Küresel ısınmaya etkisi bakımından incelendiğinde, SRM yöntemi 12 kg CO₂ salınımıyla en yüksek etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. SRM yönteminden sonra cıva hücresi kullanılarak yapılan elektrolizde 1,05 kg CO₂, diyafram hücresinde 0,909 kg CO₂, zar hücresinde 0,887 kg CO₂, güneşe dayalı hidrojen 0,37 kg CO₂ ve rüzgâr temelli 0,325 kg CO₂ miktarları gözlemlemişlerdir. İnsan zehirlenme etkisine bakıldığında en yüksek değere SRM yöntemi, ikinci olarak, PV temelli hidrojen üretimi ve üçüncü olarak rüzgâr temelli hidrojen üretimi olduğunu gözlemlemişlerdir. Yenilenebilir enerji kaynaklı hidrojen üretiminin, fosil temelli hidrojen üretimine kıyasla çevre etkisinin daha az olduğunu göstermişlerdir [42].

Acar ve Dincer (2014) yapmış oldukları çalışmada Türkiye’de kullanılan yenilenebilir ve yenilenemez kaynaklı hidrojen üretim yöntemlerinin çevresel etki analizini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada ele aldıkları yöntemler, doğal gaz buhar reformasyonu, kömür gazlaştırma, rüzgâr ve güneş enerjileri yoluyla su elektrolizi, biyokütle gazlaştırma, nükleer temelli termokimyasal Cu-Cl ve S-I döngüleri ile su ayrıştırma ve yüksek sıcaklık elektrolizidir. Çevresel etki yönünden küresel ısınmayı (GWP) ve asitlenme potansiyelini (AP) incelemişlerdir. Nükleer temelli Cu-Cl döngüsü en düşük GWP’ye olduğunu ifade etmişlerdir. AP yönünden bakıldığında rüzgâr enerjili elektroliz en düşük emisyonu olduğunu ifade etmişlerdir. Nükleer temelli Cu-Cl ve S-I döngüsü ideale en yakın olan yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada Tablo 5.1

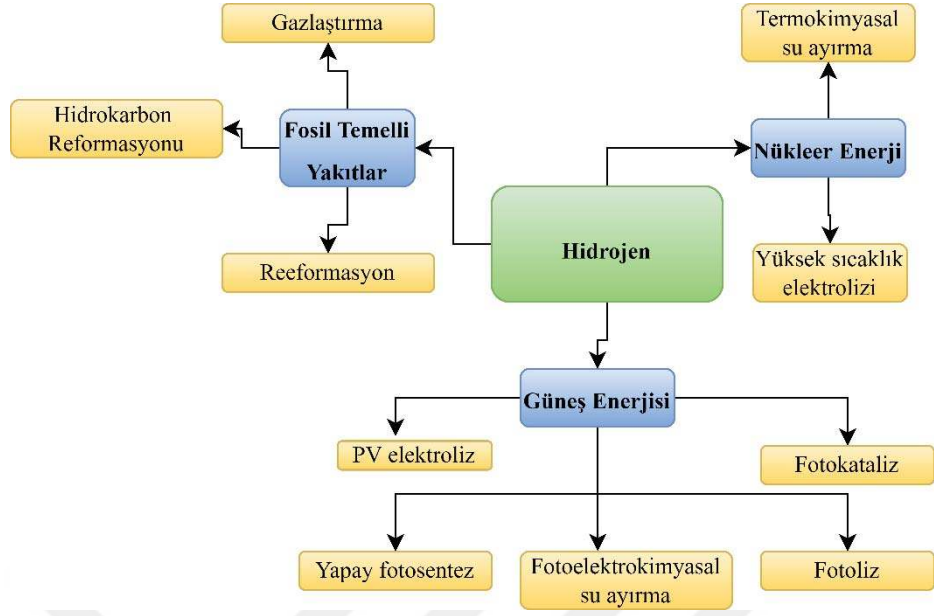
verildiği gibi AP ve GWP değerleri 0 ve 10 arasında, 0 değeri düşük performans, 10 değeri ise yüksek performansı göstermektedir [186].

Tablo 5.1. Seçilen hidrojen üretim yöntemlerinin genel karşılaştırmaları [186]

Kaynak	Hidrojen Üretim Yöntemleri	GWP	AP
Fosil yakıtlar	Doğal gaz buhar reformasyonu	2,94	5,27
	Kömür gazlaştırma (CCS-karbon yakalama)	0	0
Nükleer Enerji	Termokimyasal Cu-Cl döngüsü	9,64	8,96
	Termokimyasal S-I döngüsü	9,49	8,60
	Yüksek sıcaklık elektrolizi	8,82	8,42
	Güneş enerjisi temelli elektroliz	8,53	7,37
Yenilenebilir Enerji	Rüzgâr enerjisi temelli elektroliz	9,43	9,16
	Biyokütle gazlaştırma	8,24	0,54
İdeal 0 emisyon		10	10

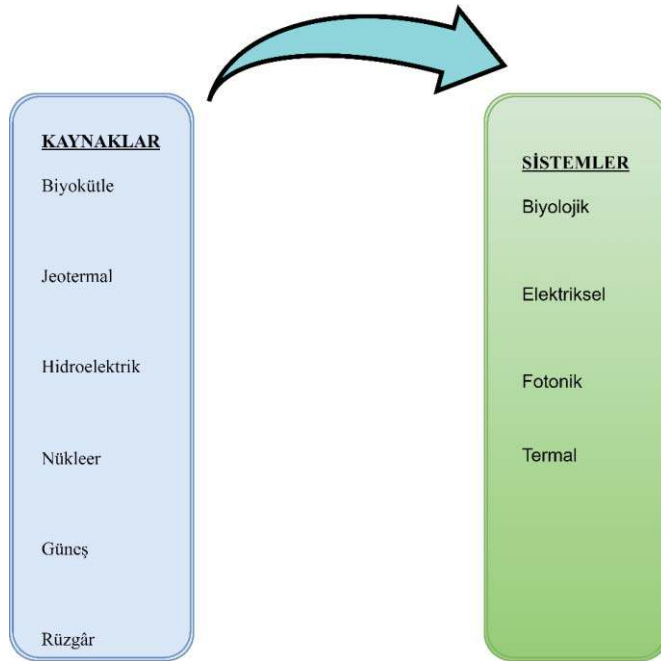
Acar ve Dincer (2015) yaptıkları çalışmada çeşitli hidrojen üretim yöntemlerinin çevresel etkilerini incelemişlerdir. Kaynak olarak su, fosil temelli hidrokarbonlar ve biyokütle ele almışlardır. Ayrıca çalışmalarında ele alınan birincil enerji kaynakları doğal gaz, kömür, biyokütle, rüzgâr ve güneş enerjisidir. Sonuç olarak güneş enerjisine dayalı hidrojen üretim seçeneklerinin (fotokataliz, fotoelektroliz ve fotoelektrokimyasal yöntemler) sıfıra yakın küresel ısınma potansiyeli ve hava kirliliği sağlarken, kömür gazlaştırma en yüksek etkiye sahip olduğunu göstermişlerdir. Hidrojen üretim yöntemleri ve kaynakları Şekil 5.3'te gösterilmiştir [191].

Acar ve Dincer (2019) yapmış oldukları derleme çalışmasında farklı hidrojen üretim yöntemlerinin ve sistemlerinin çevreye olan zararını araştırmışlardır. Hidrojen üretim kaynağı olarak biyokütle, jeotermal, hidroelektrik, nükleer, güneş ve rüzgâr enerjisi ve hidrojen üretim yöntemi olarak biyolojik, termal, fotonik ve elektriksel yöntemler seçmişlerdir (Şekil 5.4). Performansları 0 ve 10 numaraları arasında değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak çevresel performans açısından en yüksek performans güneş enerjisinde (8/10) ve en kötü olarak nükleer enerji (3/10) çıkmıştır.



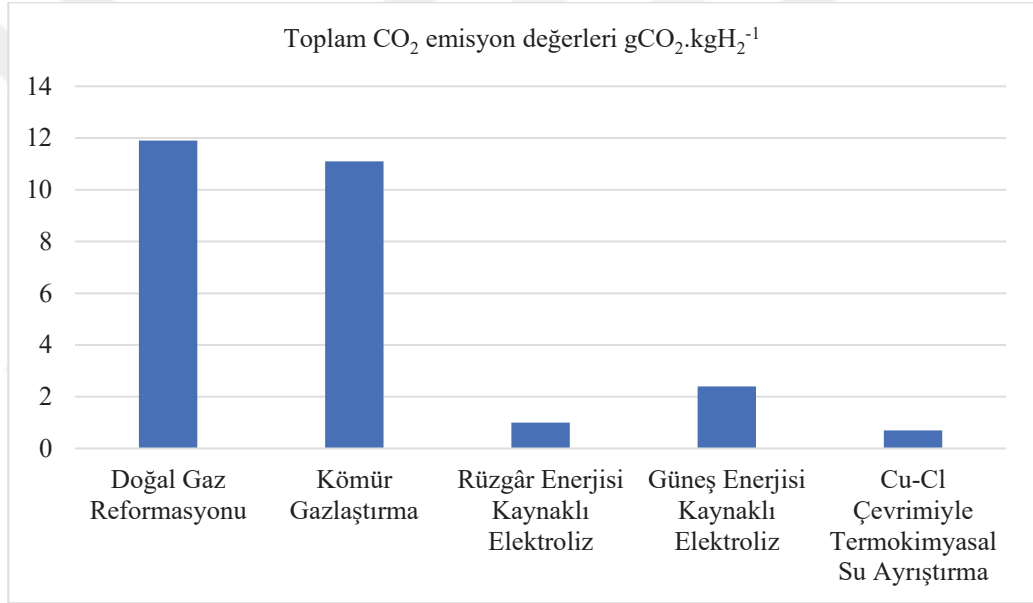
Şekil 5.3. Hidrojen üretim yöntemleri ve kaynakları [191]

Yöntemler arasında fotonik yöntemlerin en yüksek çevresel performansa (8/10) sahip olduğunu ve termal yöntemlerin en düşük çevresel performansa (5/10) sahip olduklarını göstermişlerdir [192].



Şekil 5.4. Hidrojen üretim yöntemleri ve kaynakları [192]

Cetinkaya ve ark. (2012) yapmış oldukları çalışmada beş farklı hidrojen üretim yönteminin yaşam döngüsü ve değerlendirilmesini yapmışlardır. Üretim yöntemleri olarak doğal gaz buhar reformasyonu, kömür gazlaştırma, rüzgâr enerjisi kaynaklı elektroliz, güneş enerjisi kaynaklı elektroliz ve Cu-Cl çevrimiyle termokimyasal su ayrıştırma incelemişlerdir. Yöntemlerin CO₂ emisyonlarını karşılaştırmışlardır. En az emisyon Cu-Cl çevrimiyle termokimyasal su ayrıştırma yöntemi olduğunu göstermişlerdir. Sırasıyla rüzgâr enerjisi kaynaklı elektroliz ve güneş enerjisi kaynaklı elektroliz yöntemlerinin olduğunu ifade etmiştir. Şekil 5.5’ de hidrojen üretim yöntemlerinin karşılaştırılmalı olarak CO₂ emisyon değerleri gösterilmiştir [193].



Şekil 5.5. Hidrojen üretim yöntemlerinin CO₂ emisyonlarının karşılaştırılması [193]

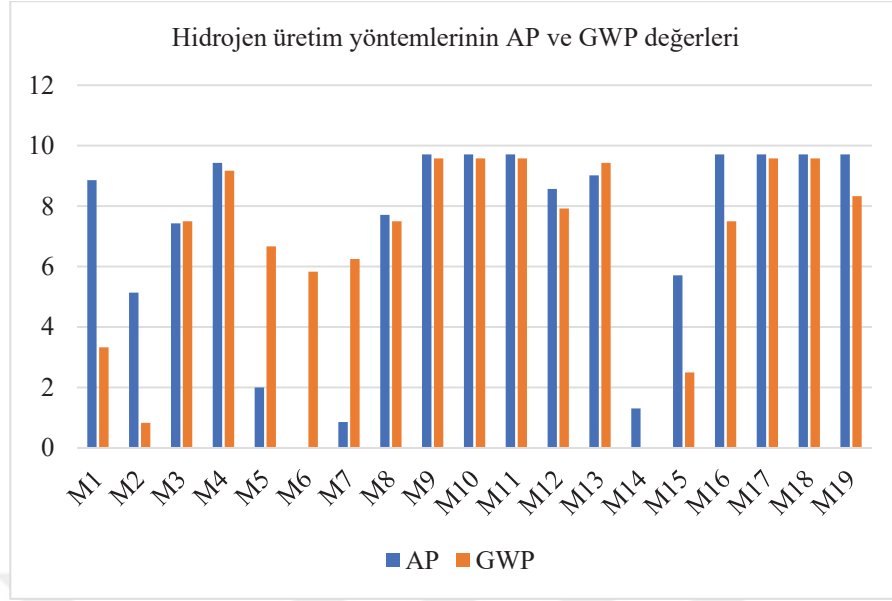
Dincer ve Acar (2014) yapmış oldukları çalışmada yenilenebilir enerji kaynağı kullanan ve yenilenebilir enerji kaynağı kullanmayan hidrojen üretim yöntemlerinin çevresel etki değerlendirmesini yapmışlardır. Metod olarak yaşam döngüsü ve etki değerlendirmesini kullanmışlardır. Birincil enerji kaynağı olarak elektriksel, termal, biyokimyasal, fotonik, elektro-termal, fotoelektrik, foto-elektrik, foto-biyokimyasal ele almışlardır. Yöntemler ile ilgili bilgiler Tablo 5. 2’de verilmiştir. Ayrıca Şekil 5.6’da verilen yöntemlerin çevresel etkisi küresel ısınma (GWP) ve asitlenme etkisi (AP) 0 ile 10 arasında performans değerlendirilmesi yapılarak (Sıfır emisyon 10 değerini ifade eder.) göstermişlerdir. GWP’de CO₂ ve AP’de ise SO₂ değerlerine bakmışlardır. Fosil

yakıt temelli hidrojen üretim yöntemlerinin (kömür gazlaştırma, fosil yakıt reformasyonu ve plazma ark ayrıştırması) çevreye en zararlı yöntemler olduğunu ifade etmişlerdir. Biyokütle gazlaştırma yönteminin göreceli olarak düşük GWP'ye sahip olmasına rağmen, AP oranı seçilen diğer yöntemlere kıyasla en yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Fotonik enerji ve hibrit termokimyasal döngüye dayalı hidrojen üretiminin CO₂ emisyonları ve asitlenme potansiyelleri açısından seçilen yöntemlerden çevreye en zararsız olanları olduğunu göstermişlerdir [194].

Tablo 5.2. Hidrojen üretim yöntemleri [194]

Yöntem:	
M1	Elektroliz (Electrolysis)
M2	Plazma ark ayrışması (Plasma arc decomposition)
M3	Termoliz (Thermolysis)
M4	Su ayırma (Water splitting)
M5	Biyokütle dönüşümü (Biomass conversion)
M6	Gazlaştırma (Gasification)
M7	Reformasyon (reforming)
M8	PV elektroliz (PV electrolysis)
M9	Fotokataliz (Photocatalysis)
M10	Fotoelektrokimyasal yöntem (Photoelectrochemical method)
M11	Karanlık fermantasyon (Dark fermentation)
M12	Yüksek sıcaklık elektrolizi (High temperature electrolysis)
M13	Hibrit Termokimyasal döngü (Hybrid thermochemical cycles)
M14	Kömür Gazlaştırma (Coal gasification)
M15	Fosil yakıt reformasyonu (Fossil fuel reforming)
M16	Biyofotoliz (Biophotolysis)
M17	Fotofermantasyon (Photofermentation)
M18	Yapay fotosentez (Artificial photosynthesis)
M19	Fotoelektroliz (Photoelectrolysis)

Kothari ve ark. (2006) farklı hidrojen üretim yöntemlerinin çevresel etkisini incelemiştir. Geleneksel üretim yöntemleri arasında; doğal gazın buhar reformasyonu, hidrokarbonların kısmi oksidasyonu, kömür gazlaştırma yöntemlerini incelemiştir (Şekil 5.7). Yenilenebilir enerji kaynakları arasında; doğrudan dönüşüm için güneş fotovoltaik gücü, rüzgâr gücü ve hidroelektrik incelemiştir.

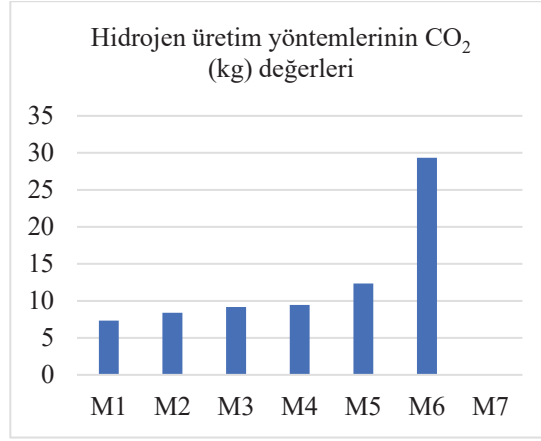


Şekil 5.6. Hidrojen üretim yöntemlerinin AP ve GWP değerleri [194]

Tablo 5.3'te yöntemler hakkında açıklayıcı bilgiler ve Şekil 5.7'de CO₂ değerleri gösterilmiştir. Buhar reformasyonunun CO₂ emisyonu, hidrokarbonların kısmi oksidasyonu ve kömür gazlaştırmasına kıyasla daha az olduğunu ifade etmişlerdir. Kömürden hidrojen üretimiyle ilişkili CO₂ emisyonları, doğal gazdan üretilen hidrojen emisyonlarından yaklaşık 3 kat daha fazla olduğunu göstermişlerdir. Rüzgâr, güneş ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanılırsa, CO₂ emisyonları sıfır olduğunu belirtmişlerdir [195].

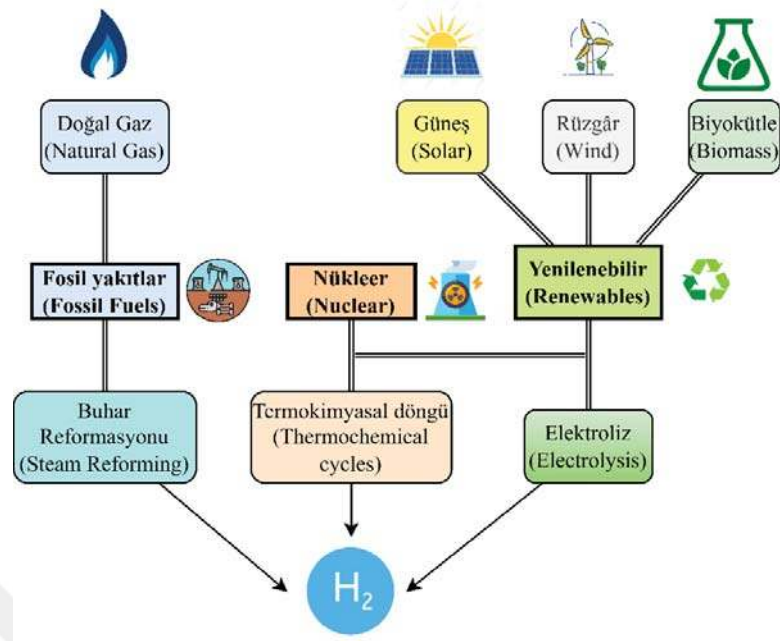
Tablo 5.3. Hidrojen üretim yöntemleri [195]

Yöntem	
M1	Metan (Methane) buhar reformasyonu
M2	Etan (Ethane) buhar reformasyonu
M3	Pentan (Pentane) buhar reformasyonu
M4	Napta (Naptha) buhar reformasyonu
M5	Hidrokarbonların kısmi oksidasyonu (Partial oxidation of hydrocarbons), (naptadan daha ağır) yöntemi kullanılarak.
M6	Kömür gazlaştırma (Coal Gasification)
M7	Elektroliz (PV, rüzgâr, hidroelektrik)

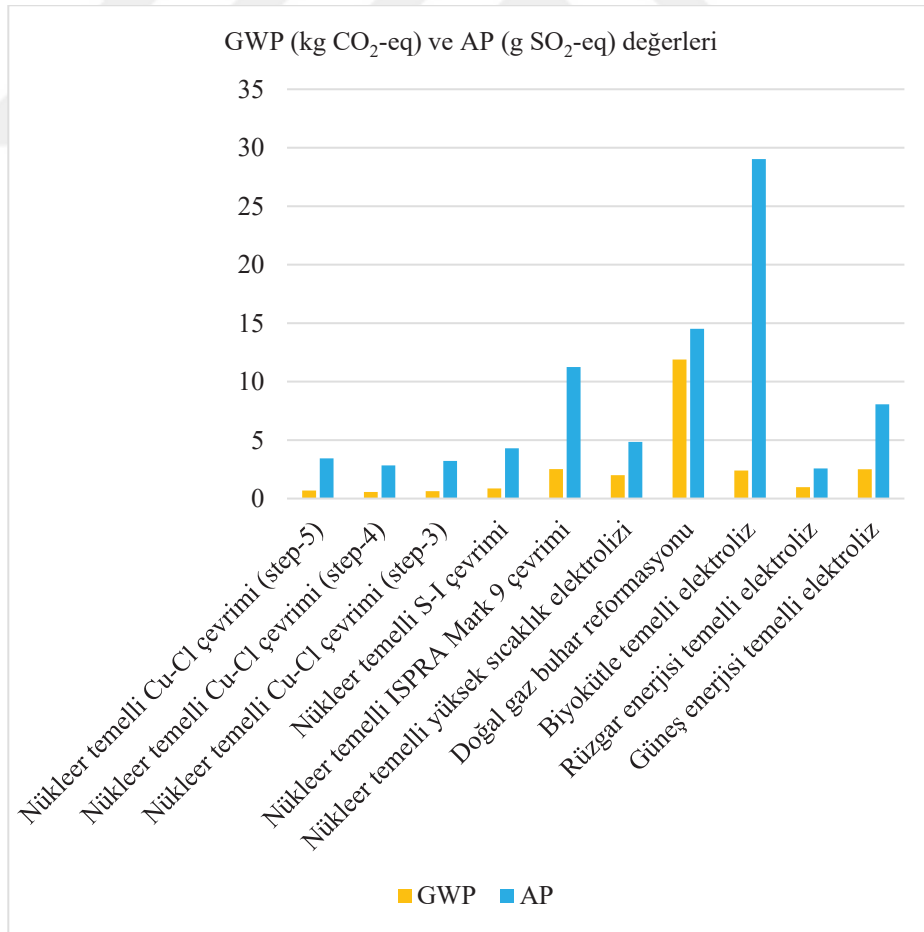


Şekil 5.7. Hidrojen üretim yöntemlerinin CO₂ değerleri [195]

Ozbilen ve ark. (2013) yapmış oldukları çalışmada çeşitli hidrojen üretim süreçlerinin farklı enerji kaynakları göz önünde bulundurularak yaşam döngüsü analizi (LCA) ile çevresel etkilerini değerlendirmişler ve karşılaştırmışlardır. LCA, mal ve hizmetlerle ilişkili süreçlerin çevresel etkilerini değerlendirmek ve atıklara ve kaynak tüketimine atfedilebilen etkileri azaltmak için fırsatları belirlemede kullanılan analitik bir araçtır. LCA üretimden atığa kadar bir ürün veya sürecin tüm aşamalarını dikkate almaktadır. LCA dört ana aşamadan oluşmaktadır. Bunlar amaç ve kapsam tanımı, yaşam döngüsü envanteri, yaşam döngüsü etki değerlendirmesi ve iyileştirme değerlendirmesidir. Çevresel etki kategorisinde küresel ısınma potansiyeli (GWP) ve asitleşme potansiyeli (AP) değerlendirmişlerdir. GWP insan emisyonlarının atmosferin termal radyasyon emilimi üzerindeki etkisi olarak tanımlanmaktadır ve ekosistem, insan sağlığını etkileyebilecek iklim değişikliğine yol açmaktadır. Küresel ısınma CO₂ miktarı ile ölçülmektedir. (AP), yüzey suları, yeraltı suları, toprak, ekosistemler, malzemeler ve biyolojik organizmalar üzerinde asitleştirici kirleticilerin birikmesi ile ilgili olup doğal çevreyi, antropojenik çevreyi, insan sağlığını ve doğal kaynakları etkilemektedir. AP'ye en çok katkıda bulunan SO₂'dir. İncelenene hidrojen üretim yöntemleri Şekil 5.8'de verilmiştir. Yöntemler arasında çevreye ortalamada en çok zarar veren fosil temelli buhar reformasyon yöntemi olduğunu göstermişlerdir. Nükleer temelli termokimyasal çevrimler ve yenilenebilir enerji temelli su elektrolizi yoluyla hidrojen üretim prosesleri, buhar reformasyonuna kıyasla çevre üzerinde çok daha az etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Her kilogram hidrojen üretimi başına GWP (kg CO₂-eq) ve AP (g SO₂-eq) değerleri Şekil 5.9'da verilmiştir [196].

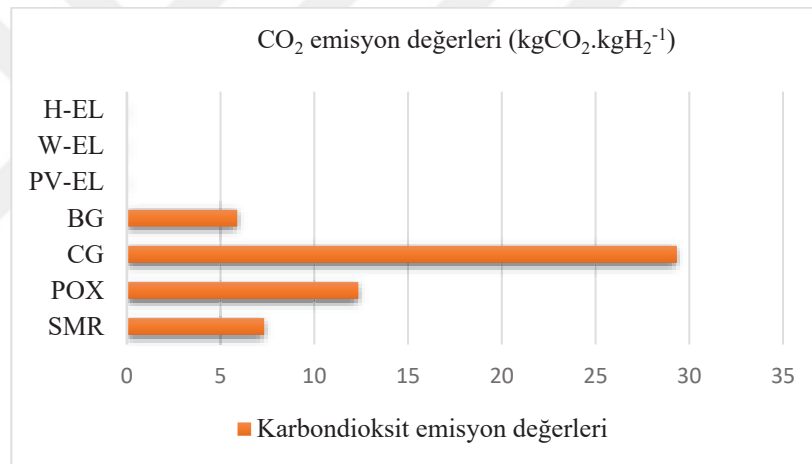


Şekil 5.8. Hidrojen üretim yöntemleri [196]



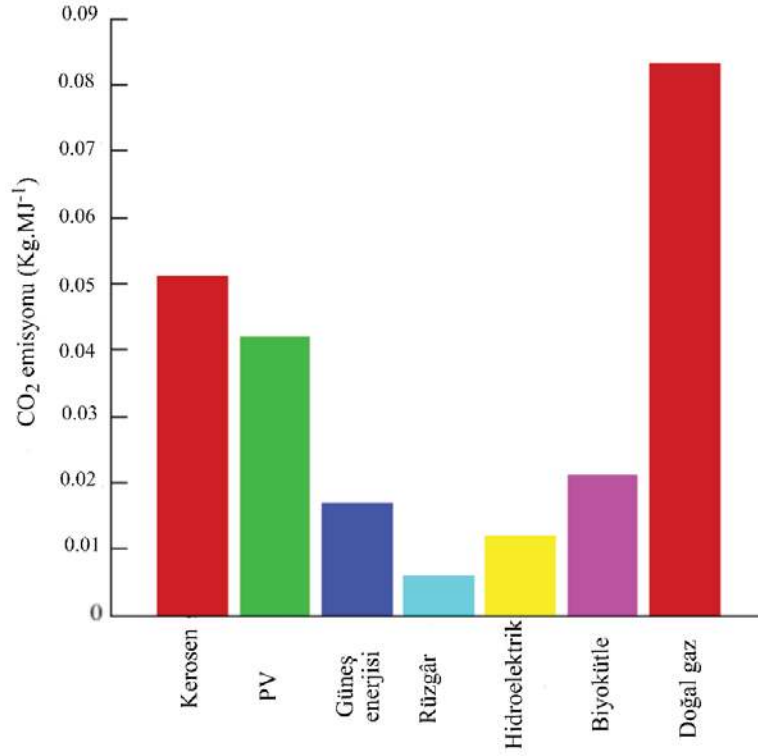
Şekil 5.9. Kg hidrojen üretimi başına GWP (kg CO₂-eq) ve AP (g SO₂-eq) değerleri [196]

Pilavachi ve ark. (2009) yapmış oldukları çalışmada yedi farklı hidrojen üretim süreçlerini değerlendirmişlerdir. Hidrojen üretim süreçleri arasında: metan buhar reformasyonu (steam methane reforming-SMR), hidrokarbonların kısmi oksidasyonu (partial oxidation of hydrocarbons-POX), kömür gazlaştırma (coal gasification-CG), biyokütle gazlaştırma (biomass gasification-BG), fotovoltaiik elektroliz (the combination of photovoltaics and electrolysis-PV-EL), rüzgâr enerjisi temelli elektroliz (the combination of wind power and electrolysis-W-EL) ve hidroelektrik enerjisi temelli elektroliz (the combination of hydropower and electrolysis-H-EL). CO₂ emisyonları Şekil 5.10’da verilmiştir. Fosil temelli süreçlerin CO₂ emisyonları yüksek, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan süreçlere ise düşük CO₂ emisyonuna sahip olduğunu göstermişlerdir [197].



Şekil 5.10. Hidrojen üretim süreçlerinin CO₂ değerleri [197]

Koroneos ve ark. (2004) çalışmasında kerosen ve hidrojenin doğal gazın buharla reformasyonundan, doğrudan dönüşüm için fotovoltaiik (PV) kullanan güneş enerjisinden, güneş termal enerjisinden, rüzgâr gücünden, hidroelektrikten, biyokütleden üretimin yaşam döngüsü ve değerlendirmesini yapmıştır. Buna göre SO₄ emisyonlarında en çok çevresel etkiye sahip olan kerosen, en az üçü ise rüzgâr, hidroelektrik ve güneş enerjisi olduğunu göstermişlerdir. PO₄ emisyonlarından en çok çevreye zarar veren biyokütle, en az üçü ise rüzgâr, solar ve hidroelektrik enerji olduğunu ifade etmişlerdir. CO₂ emisyonları Şekil 5.11’de verilmiştir [198].

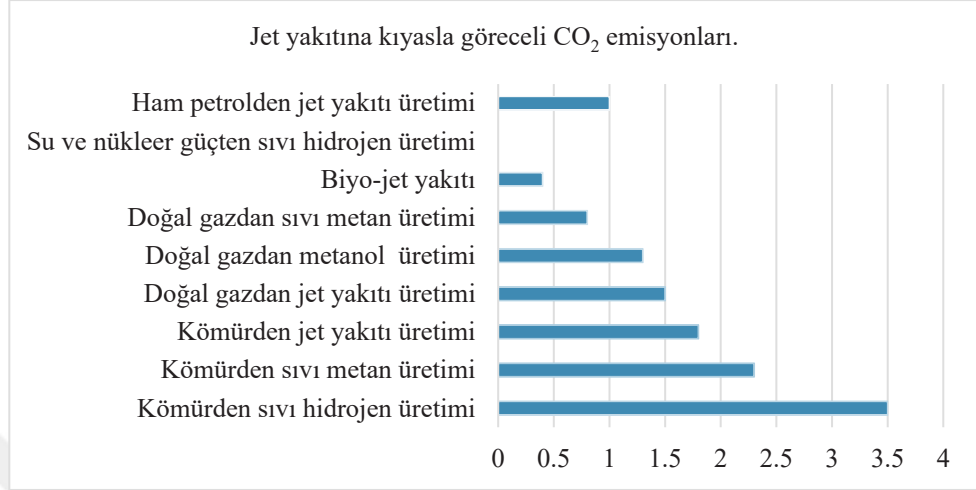


Şekil 5.11. Havacılık yakıtı üretiminin CO₂ eşdeğeri emisyonları [170]

Bicer ve Dincer (2017), konvansiyonel jet yakıtı ve hidrojen dahil çeşitli alternatif yakıtlarla çalışan bir uçağın tüm yaşam döngüsünü, envanter verilerine dayalı olarak SimaPro LCA yazılımında çevresel etki ve performans açısından değerlendirmişlerdir. Sıvı amonyak, metanol, etanol, doğal gaz, kerosen sıvı hidrojen ve bu yakıtların aralarından bazılarının üretim yöntemleri de ele alınarak bir değerlendirme yapmışlardır. GWP değerlerinde sıvı hidrojen, jeotermal enerjiden sıvı hidrojen, hidroelektrikten LH₂, rüzgâr enerjisinden LH₂ en düşük olduğunu ifade etmişlerdir. En yüksek GWP değerine ise etanol sahiptir. İnsan sağlığına zararına bakıldığında ise en az sıvı hidrojen ve jeotermal enerjiden üretilen sıvı hidrojen olduğunu ifade etmişlerdir. GWP zararının en fazla metanol olduğunu ifade etmişlerdir. Ozon tabakasına en az yine sıvı hidrojen üretim yöntemleri olduğunu belirtmişlerdir [199].

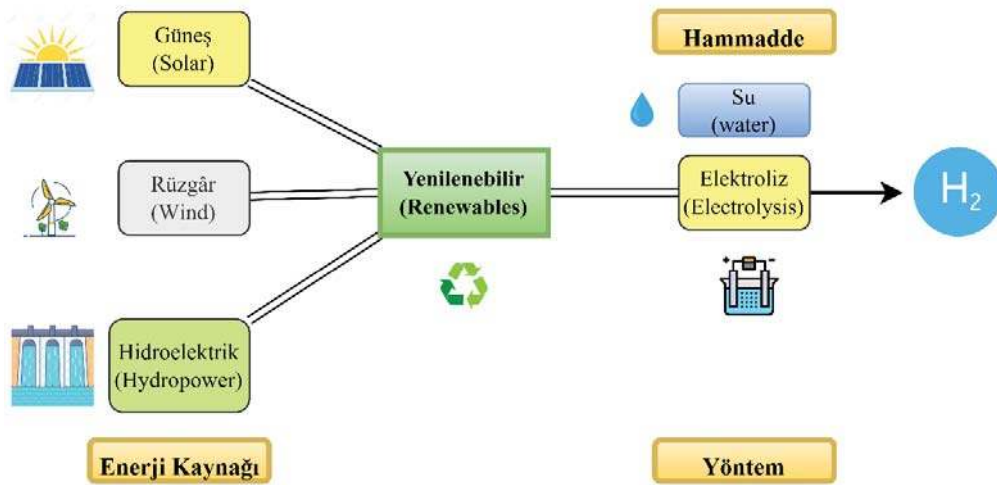
Daggett ve ark. (2006) yılında yapmış oldukları çalışmada havacılık endüstrisinde kullanılabilecek alternatif yakıtları araştırmışlardır. Yapılan çalışmada üretim kaynaklarına göre havacılık endüstrisinde kullanılabilecek yakıtların CO₂ emisyonlarını (Şekil 5.12) değerlendirmişlerdir. Buna göre su ve nükleer kaynaktan hidrojen üretiminin

emisy on değ erinin diğ er kaynaklara g ö re en az ç evre zararına neden olduğ unu g ö stermiş lerdir [200].



Şekil 5.12. Jet yakıtına kıyasla göreceli CO₂ emisyonları [200]

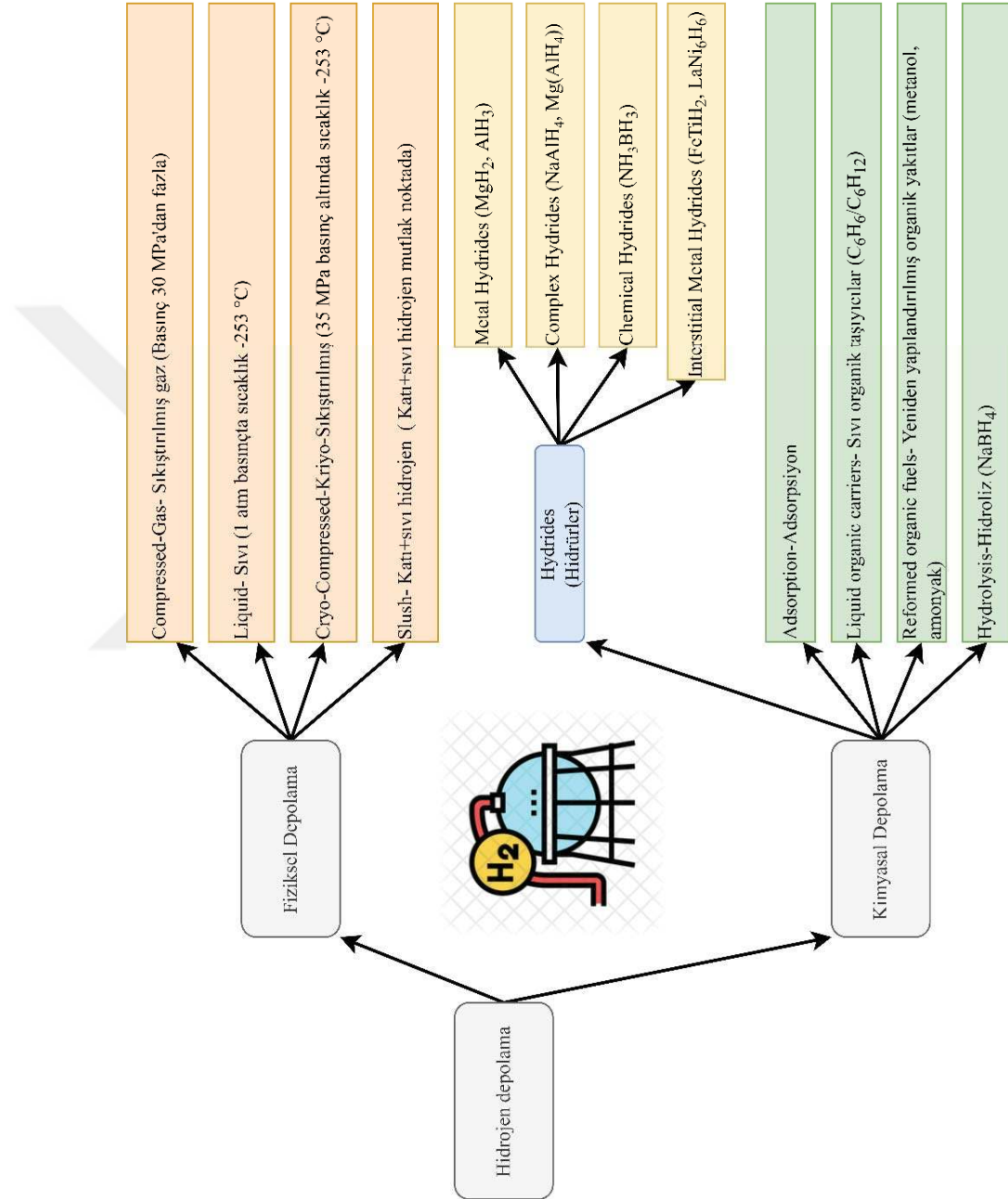
Üretim yöntemleri arasında sürdürülebilirlik ve ç evre etkisi ç erçevesinde, en uygun solar enerji, hidroelektrik ve rüzgâr enerjisi ile suyun elektrolizinin olduğ u gözlemlenmektedir (Şekil 5.13). Fosil temelli kaynaklardan hidrojen üretim sürdürülebilir ve ç evreci olmadığ ı açıktır. Hammadde kaynağ ı olarak su kullanılacaktır.



Şekil 5.13. Seçilmiş hidrojen üretim yöntemleri

5.2. Hidrojen Depolama

Hidrojenin fiziksel depolama ve kimyasal depolama seçenekleri mevcuttur [201]. Hidrojen depolama seçenekleri Şekil 5.14'te verilmiştir.



Şekil 5.14. Hidrojen depolama seçenekleri [202]

Hidrojen üretildikten sonra ihtiyaç duyulana kadar depolanmalıdır. Bununla birlikte, yüksek kütle tabanlı enerji yoğunluğunun aksine, atmosferik sıcaklık ve basınçta

hidrojen, herhangi bir geleneksel enerji taşıyıcısından daha düşük hacimsel enerji yoğunluğuna sahiptir. Bunun temel nedeni, hidrojenin sadece 1 proton, 1 elektron ve nötron içermeyen en hafif atom olmasıdır. Bu nedenle, gerekli olan yüksek basınç ve düşük sıcaklık nedeniyle depolama için sıkıştırılmalı veya sıvılaştırılmalıdır [203]. LH₂, kullanım sırasında yüksek saflıkta hidrojen gerektiğinde ekonomik olarak en rekabetçi olanıdır. Ek olarak, sıvı hidrojen birçok karbon nötr uygulamada amonyağa kıyasla oldukça rekabetçi kalır [204]. Büyük ölçekli hidrojen depolaması, yüksek yoğunlukta hidrojen depolaması gerektirir. Sıvı hidrojen ve amonyak, hidrojen depolama yoğunlukları ve kullanımları göz önüne alındığında umut verici depolama yöntemleri olarak kabul edilmektedir. Sıvı hidrojenin, denizcilik ve havacılık gibi yüksek gravimetrik enerji yoğunluğu gerektiren gelişmiş uygulamalar için geçerli olduğu tahmin edilmektedir [202].

Geçmiş çalışmalar incelendiğinde havacılık endüstrisinde hidrojenle ilgili yapılmış çalışmalarda sıvı hidrojen tercih edilmiştir. Bunun sebebi bir yakıtın kaynama noktası, onu sıvı olarak depolamak ve kullanmak için soğutulması gereken sıcaklığı tanımladığı için kritik bir parametredir. Sıvı yakıtlar, gaz yakıtlardan daha az depolama alanı kaplar ve genellikle taşınması daha kolaydır. Atmosferik koşullarda sıvı olması gerektiğinden kriyojenik olarak ya da basınçlı gaz depolanmaktadır [205].

Uluslararası Enerji Ajansı, modern sıvılaştırılmış hidrojen depolama tanklarının % 99 verimliliğe sahip olabileceğini ve yakıtın hazır olması gereken (havaalanlarında olduğu gibi) nispeten küçük ölçekli uygulamalar ve kısa süreler için uygun bir yöntem olduğunu tahmin etmektedir. Gaz fazındaki hidrojen hidrokarbonlu yakıtlara göre yaklaşık 7 kat daha fazla yer kapladığı için büyük ölçekli depolamalarda gaz fazı tercih edilmemektedir [206]. Yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı hidrojenin depolanması sıvı fazında alınmıştır.

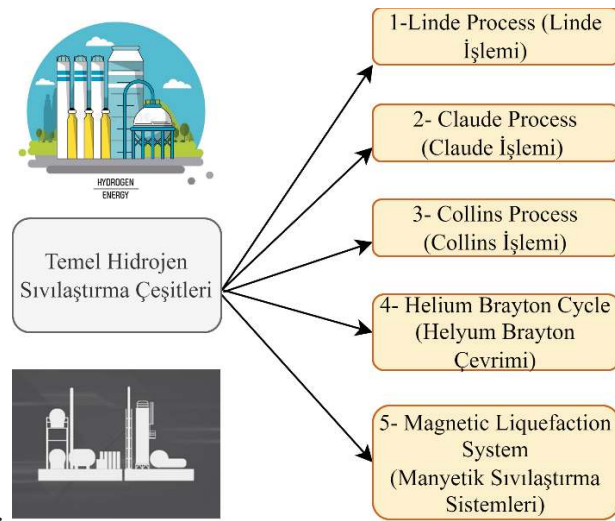
5.3. Hidrojen Sıvılaştırma

Hidrojen kalıcı (çok düşük sıcaklıklar dışında sıvılaştırılamayan bir gazdır) bir gaz olduğundan, sadece 1 atm'de sıkıştırılarak sıvılaştırılamaz. Hidrojeni sıvılaştırmak için, kritik sıcaklığına (-240 C) kadar soğutulması gerekmekte, hidrojen daha sonra vakum yalıtımlı kaplarda kaynama sıcaklığının altında (1 atm'de -253 C) depolanmaktadır.

Kriyojenik soğutma yoluyla, hidrojen hacmi 1/848 oranında azaltılarak önemli ölçüde verimli hidrojen depolaması sağlanmaktadır. Hidrojen sıvılaştırma, özellikle enerji tüketimini daha da azaltmak için çeşitli iyileştirmelerin sürmesine rağmen, yerleşik bir teknoloji olarak kabul edilmektedir [207].

Hidrojen ilk olarak 1898'de İskoçya'da Sir James Dewar tarafından 0.24 L/saat kapasiteli küçük bir sıvılaştırma cihazı kullanılarak sıvılaştırılmıştır [208]. Birkaç yıl sonra, hidrojeni sıvılaştırmak için ilk basit laboratuvar sistemi olarak ön-soğutmalı bir Linde-Hampson sistemi kullanılmıştır. 20. yüzyılda, Claude, ön-soğutmalı Claude ve helyum soğutmalı sistemler dahil olmak üzere daha verimli laboratuvar sistemleri icat edilmiş ve verimliliği artırma sırasına göre düzenlenmiştir [209]. Kimya ve havacılık endüstrilerinin 1957'de taleplerini karşılamak için ön-soğutmalı bir Claude sistemi kullanacak olan nispeten büyük bir hidrojen sıvılaştırma tesisi geliştirilmiştir. Bu sistemde, hidrojen başlangıçta sıvı nitrojen kullanılarak yaklaşık -193 C sıcaklığa kadar ön-soğutma işlemi yapılmaktadır, ardından sıvı hidrojen oluşana kadar soğutucu akışkan kullanılarak soğutma yapılmaktadır [208].

Hidrojen sıvılaştırma sırasında throttling ve Joule-Thomson etkileri önemli kavramlardır. throttling genellikle ideal olmayan bir durum yaratmak için basıncın artırılmasından veya sıcaklığın düşürülmesinden sonra büyük gaz sıvılaştırma döngülerinde kullanılmaktadır [210]. Şekil 5.15'te temel hidrojen sıvılaştırma çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Temel hidrojen sıvılaştırma çeşitleri [207–209]

5.3.1. Linde işlemi

Hampson-Linde (veya Joule-Thomson açılımı) süreci, en temel ve en basit sıvılaştırma süreci olarak kabul edilmektedir. Bu işlemde hidrojen gazı ortam koşullarında sıkıştırılır ve ardından ısı değişimi ile soğutulmaktadır [211]. Daha sonra, bu sıkıştırılmış ve soğutulmuş gaz için izentalpik Joule-Thomson genişmesi bir kısma valfi aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Sistem sıvılaştırma için Joule-Thomson etkisine dayandığından, genellikle yüksek bir hidrojen basıncı gerekmektedir [212].

5.3.2. Claude işlemi

Georges Claude tarafından 1902'de pistonlu bir genişleme makinesi kullanarak havayı sıvılaştırmak için geliştirilmiştir [207]. Bu işlem, genişleme motorunu ve Joule–Thomson genişleme etkisini birleştirmektedir. İzentalpik genişleme, sistemin basitliğine yol açmaktadır; bununla birlikte, düşük enerji verimliliğinden neden olmaktadır. Claude işlemine bir genişleme motorunun eklenmesi, izentalpik genişmeden önce daha düşük bir sıcaklık üretebilmektedir (Linde işlemi tarafından benimsendiği gibi) [213]. Ek olarak, genişleme motoru ana soğutma kaynağı haline geldiğinden, sıvı nitrojen kullanarak soğutma gerekli değildir. Ancak Timmerhaus ve Flynn, çalışmalarında ön soğutma için sıvı nitrojen ek olarak kullanıldığında % 50-70 daha yüksek ekserji veriminin sağlanabileceğini belirtmişlerdir [214] .

5.3.3. Collins işlemi

İlk olarak helyumu sıvılaştırmak için kullanılmıştır [215]. Collins işlemi, Claude işleminin değiştirilmiş bir çeşidi olarak görülmektedir [202].

5.3.4. Helyum brayton çevrimi

Birkaç olası yapı, basit helyum Brayton döngüsü, sıvı nitrojen kullanarak ön soğutmalı helyum Brayton döngüsü ve iki aşamalı helyum Brayton döngüsünü içermektedir. Brayton çevrimi genellikle enerji üretim tesislerinde jet motorları veya gaz türbinleri için kullanılmaktadır. Brayton soğutma sisteminde soğutucu olarak genellikle helyum ve hidrojen kullanılmaktadır. Helyum, öncelikle soğutucu olarak kullanılır-hidrojen sıcaklığından daha düşük bir sıcaklığa soğutulmaktadır [216].

5.3.5. Manyetik sıvılaştırma sistemleri

Manyetik soğutma, manyetik malzemeyi tekrar tekrar hem manyetize etmek hem de demanyetize etmek için bir manyetik alan kullanılmakta ve manyetokalorik bir etki ile sonuçlanmaktadır. Bu nedenle, bu manyetokalorik etki nedeniyle düşük sıcaklıkta bir ısı üretilmektedir [216]. Manyetokalorik etki, manyetik alandaki bir değişikliğin, çalışma malzemesi sıcaklığında tersinir bir değişiklik ile sonuçlandığı bir olgudur [217]. Manyetik soğutma esas olarak ters Carnot döngüsünü benimser ve dört sürekli adımdan oluşmaktadır: adyabatik manyetizasyon, izotermal manyetizasyon, adyabatik demanyetizasyon ve izotermal demanyetizasyondur [218].

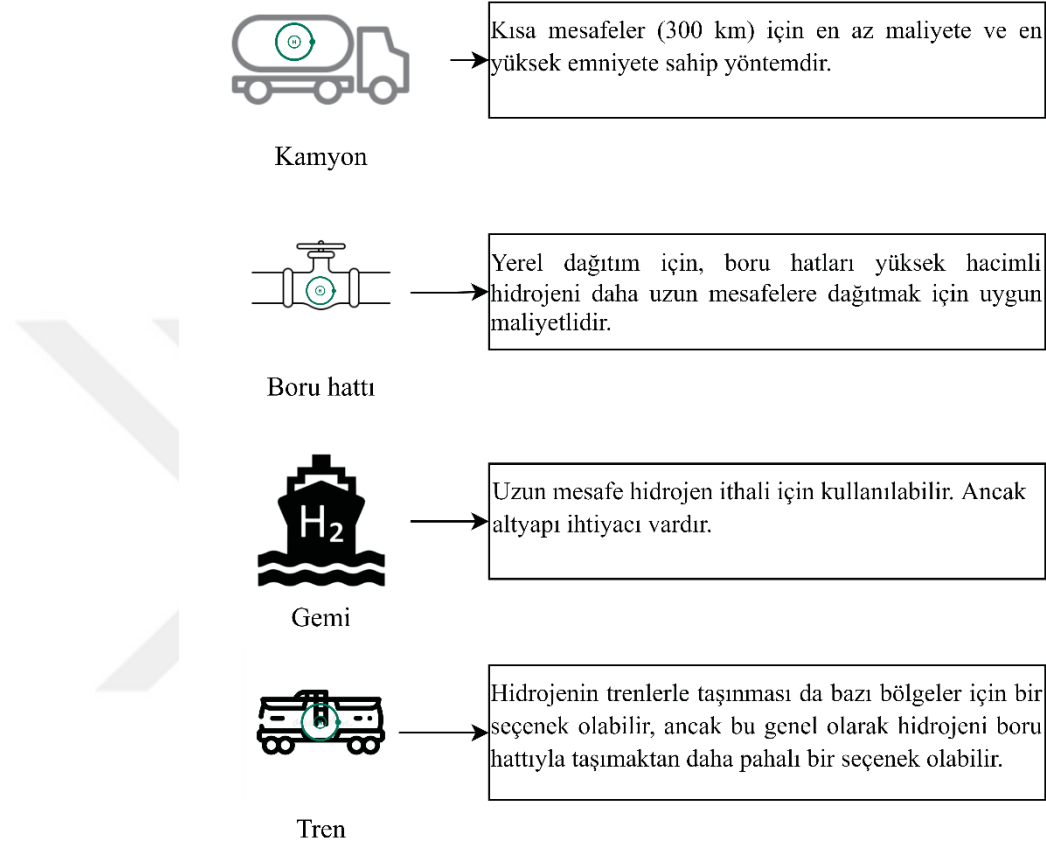
5.3.6. Katalizlenmiş orto-para hidrojen dönüşümü

Sıvı hidrojenin depolama sırasında gaz haline buharlaşması olayı genellikle kaynama olarak adlandırılır. Depolama sırasında hidrojenin buharlaşması iki farklı kayba neden olmaktadır: sıvılaştırma için enerji kaybı ve kap içinde basınç birikmesini önlemek için buharlaştırılmış gazın boşaltılmasından kaynaklanan hidrojen kaybı. Kaynama durumunu önlemek için iyi bir izolasyon gerekmektedir [219]. Hidrojen, kriyojenik bölgede hidrojeni sıvılaştırırken dikkate alınması gereken bir kuantum etkisi sergilemektedir. Bu, molekülü oluşturan iki atomun nükleer spininin nispi yönelimindeki bir farkla karakterize edilen iki farklı hidrojen türünün varlığında kendini göstermektedir. Spinler simetrik ise moleküler varyasyon orto hidrojen olarak adlandırılmakta ve asimetrik ise para hidrojen olarak adlandırılmaktadır [220].

Orto-hidrojenin para-hidrojene katalizlenmemiş dönüşümü çok yavaş olmakta ve bu dönüşüm depolama ve nakliye sırasında meydana geldiğinde, kaynama nedeniyle hidrojen kaybı meydana gelebilmektedir. Orto-para-hidrojene dönüşümünü en aza indirmek ve böylece depolama sırasında ısı salınımını en aza indirmek için, sıvılaştırma sırasında orto-para-hidrojene geçişi hızlandırmak için bir katalizör kullanılmaktadır. Bu nedenle, yüksek bir para-hidrojen konsantrasyonu elde edilmekte ve orto-para-hidrojen dönüşümünden kaynaklanan kaynama en aza indirilebilmektedir [221].

5.4. Hidrojen Taşıma ve Dağıtım

Hidrojen taşıma seçeneklerinden kamyon, tren, boru hattı ve gemi ile taşıma mevcuttur (Şekil 5.16) [206].

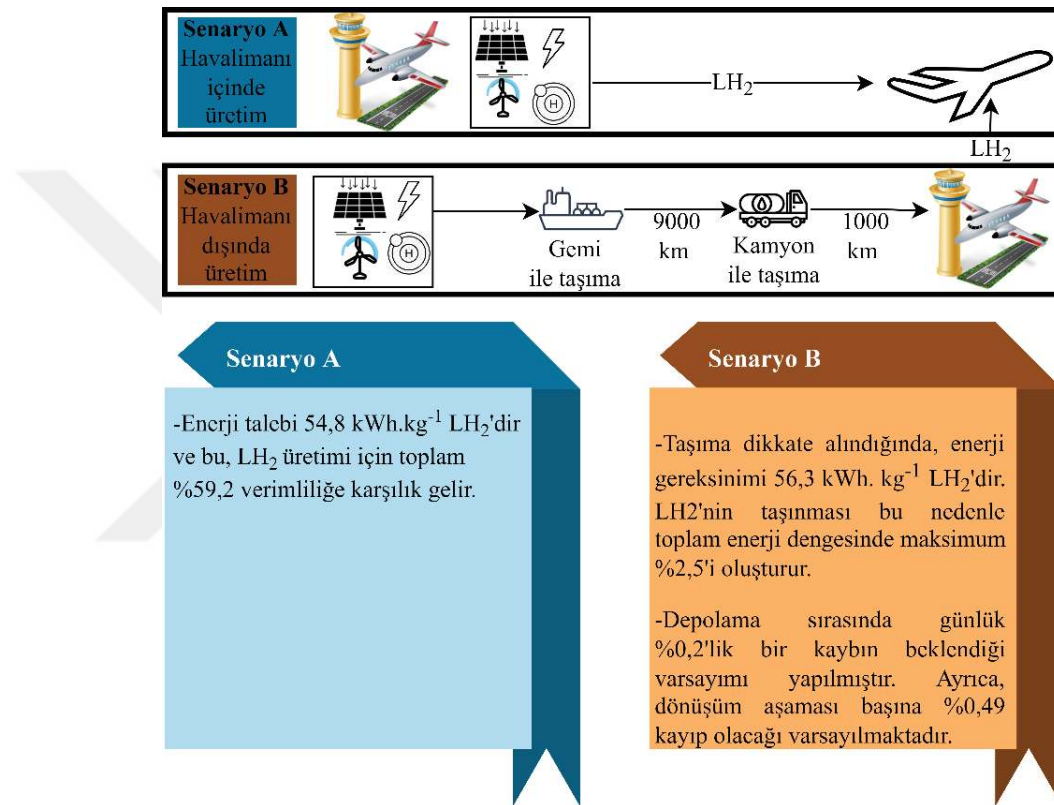


Şekil 5.16. Hidrojen taşıma araç çeşitleri [206]

Büyük ölçekli deniz taşımacılığı, toplam hacmi 10.000 m³'ten büyük olan büyük bir tanker kullanılarak gerçekleştirilebilir. Ayrıca kara taşımacılığı, taşıma yöntemleri ve tank boyutları açısından birçok seçeneğe sahiptir. Karayolu taşımacılığı, tipik olarak 2100-4200 kg taşıyabilen 30-60 m³ tank boyutuna sahip bir treyler kullanabilir; demiryolu taşımacılığı için 115 m³'lük (yaklaşık 8000 kg) daha büyük bir konteyner kullanılabilir. Termal genişleme göz önüne alındığında güvenlik nedenleriyle, tekneye yakıt ikmali sırasında doldurma miktarı, tekne hacminin yaklaşık % 85'i ile sınırlıdır [222].

Yapılmış olan analizler, en uzun mesafeli uçuşların yapıldığı havalimanlarının ağırlıklı olarak kıyılara yakın yerlerde veya güneş ışınımının yüksek olduğu bölgelerde

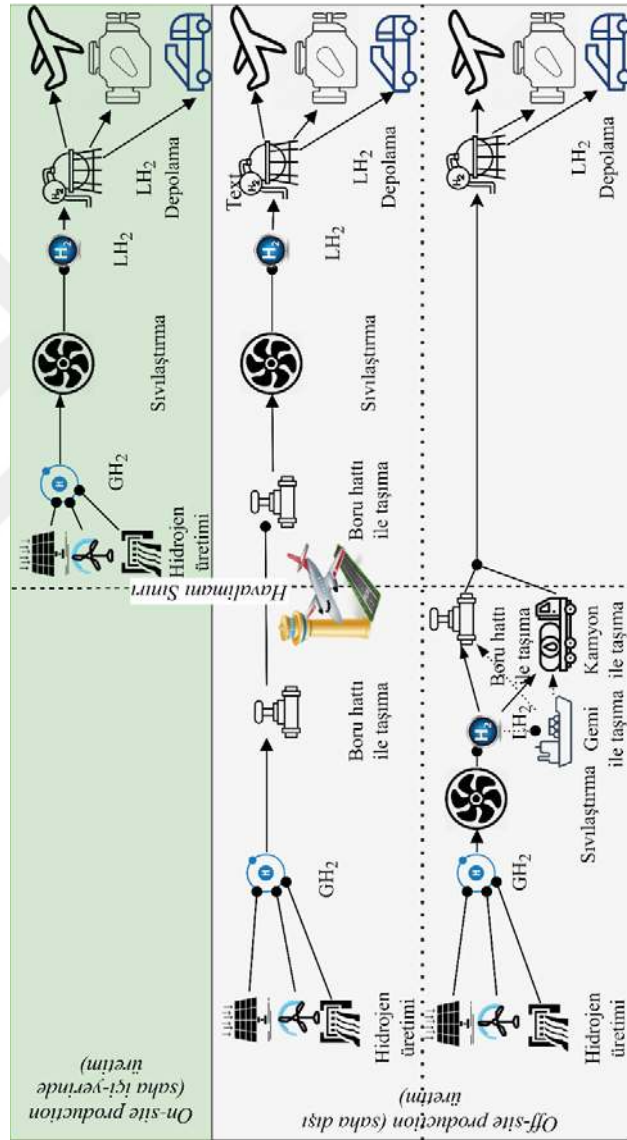
bulunduğunu ve bu nedenle rüzgâr veya güneş enerjisi ile yenilenebilir elektrik üretmeye uygun olduğunu göstermiştir. LH_2 'nin taşınmasının modellenmesinde, ilgili havalimanlarında doğrudan hidrojen üretimi ile daha uzun mesafelerdeki taşıma arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu nedenle iki senaryo (Şekil 5.17) temel senaryo olarak kabul edilmiştir. İki senaryo arasında gerçekçi bir değerlendirme bulunmaktadır [223, 224].



Şekil 5.17. Taşınma modellemesi [223, 224]

1970'lerde NASA, sivil havacılık kullanımı için havaalanlarına hidrojen sağlamanın farklı yollarını araştırmıştır. Gaz veya sıvı fazındaki hidrojen için kamyon, treyler ve boru hatları seçeneklerini analiz etmişlerdir. Çalışma, kısa mesafeler için (64 km'den az) en ekonomik taşıma yönteminin hidrojeni gaz halindeki boru hatlarıyla taşımak ve mümkün olduğunca havalimanına yakın (veya daha iyisi havalimanında) sıvılaştırmak olduğunu göstermiştir [225]. Hidrojen havalimanı çalışmalarında taşıma maliyeni düşürmek için yerinde (on-site) üretim kullanılmıştır [226]. Havalimanı içinde üretim olsa da hidrojenin uçaklara ulaştırılması gerekmektedir. Havalimanı içinde

kamyon maliyet açısından uygun olduğunda tercih edilmektedir. Düşük akış hızı sebebiyle boru hattı tercih edilmemektedir [227]. Düşük kaynama ile uzun mesafeli transfer için LH_2 yakıt ikmal kamyonları tasarlanmıştır. Havalimanı yakıt ikmal için tamamen optimize edilmiş yakıt ikmal kamyonu konsepti, 2030 yılına kadar ticari olarak piyasaya sunulacaktır [180]. Şekil 5.18’de seçilmiş hidrojen üretim yöntemleriyle hidrojen tedarik zinciri modeli verilmiştir.



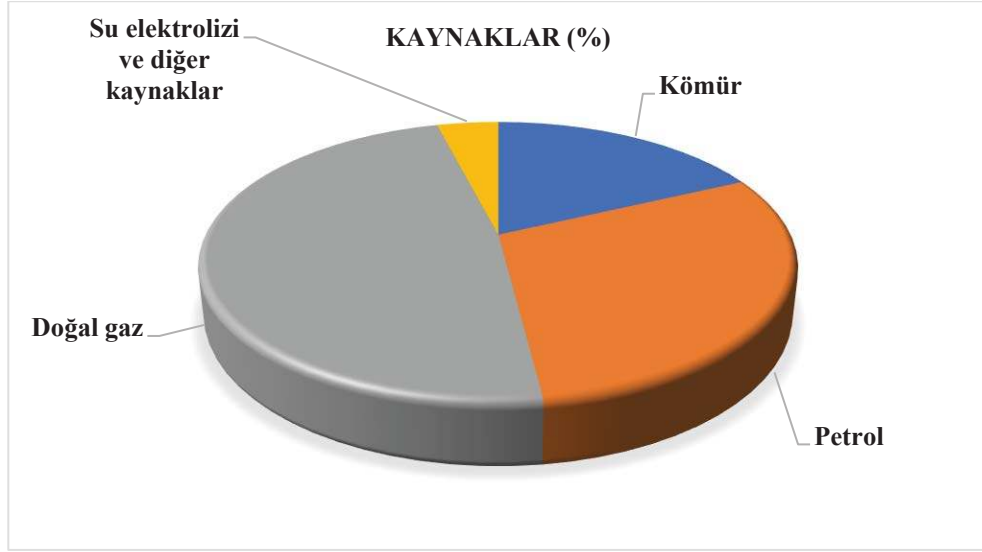
Şekil 5.18. Seçilmiş hidrojen üretim yöntemleriyle hidrojen tedarik zinciri modeli

6. HİDROJEN DESTEKLİ HAVALİMANI SENARYOLARI

Bu bölümde farklı senaryolar hidrojen havalimanı için çevre, sürdürülebilirlik, maliyet, emniyet ve fizibilite açısından değerlendirilmektedir. Herhangi bir çözüm gibi, LH₂ de zorluklarla birlikte gelmektedir. Bunlardan bazıları (üretim, taşıma ve kullanımda) emniyetin sağlanması, üretimde sürdürülebilirliğin sağlanması ve sıvı hidrojenin uygulanması ve depolanması amacıyla yeni altyapı için gereken maliyetleri içermektedir [228].

6.1. Hidrojen Üretimi

Hidrojen, elektroliz, foto-elektroliz, yüksek sıcaklıkta ayrıştırma ve foto-biyolojik su ayırma gibi işlemler suyun bölünmesiyle veya fosil bazlı yakıtların gazlaştırma ve reformasyonu gibi çeşitli işlemlerle üretilebilmektedir [229]. Elektroliz, suyu bölmek için en etkili tekniği oluşturan, yerleşik ve iyi bilinen bir yöntemdir [230]. Bununla birlikte, reaksiyon endotermiktir, bu nedenle gerekli enerji girdisi elektrikle sağlanmaktadır [231]. Su elektrolizi, redoks reaksiyonlarını başlatan ve sürdüren bir doğrudan elektrik akımının etkisi altında suyun ayrışması işlemidir. Günümüzde elektroliz, dünya hidrojen talebinin yaklaşık % 4'ünü (Şekil 6.1) karşılamaktadır. Elektrolizörler, elektrolitin doğasına göre beş farklı tipte sınıflandırılmaktadır: Polimer Elektrolit Membran (PEM) elektrolizör, alkalın elektrolizör (AEL), Oksijen iyonu iletimli Katı Oksit Elektrolizör (SOE(O)), Proton iyon iletimli Katı Oksit Elektrolizör (SOE(P)) ve hibrit sistemler [230]. AEL ve PEM elektrolizi, suyu ayırır ve hidrojen üretim tesisleri tarafından ticari amaçlarla yaygın olarak kullanılmaktadır [232]. Verim olarak % 40-60 aralığında çalışmaktadır. Kirliliği olmayan, yenilenebilir kendini kanıtlamış bir teknolojidir. Dezavantaj olarak düşük verim ve yüksek sermaye maliyetlerine sahiptir [233]. Güneş, rüzgâr, gelgit ve jeotermal enerji üretim teknolojileri, artan dönüşüm verimliliği için yüksek potansiyel gösterirken, yine de önemli sermaye maliyetlerine sahiptir. Hidroelektrik, hem saf hem de hibrit hidrojen üretim teknolojileriyle nispeten daha düşük maliyetle eşleşebilen en verimli kaynak-güç teknolojisi (>% 80) [234]. Hidrojen üretiminde elektrik sistemlerini kullanmak güvenilirlik, ekonomik performans ve teknik performans bakımından ideale yakın olarak görülmektedir [192].



Şekil 6.1 Mevcut hidrojen gazı ürün kaynakları [232]

6.1.1. Kömür gazlaştırma

Gazlaştırma, katı/sıvı karbon temelli yakıtları kısmi oksidasyon yoluyla yüksek ısı değerli gaz karışımına dönüştüren bir termal dönüşüm yöntemidir [235]. Bu işlemde kömür, yüksek sıcaklık ve basınçta oksijen ve buhar ile kısmi oksidasyon yoluyla gazlaştırılmaktadır. Çoğunlukla CO ve H₂ içeren bir karışım olan oluşturulan sentez gazı, su gazı kaydırma (water shift) reaksiyonu ile H₂ verimini artırmak için ayrıca buharla işlenebilmektedir [236]. Gaz daha sonra arındırılmakta ve bir karbon yakalama sistemi (CSS) ile üretilen karbon yer altına depolanmaktadır. Ancak depolama maliyetleri yüksektir [237]. Genel olarak, üretilen gazın kalitesi temel olarak çeşitli teknik parametrelere ve çalışma koşullarına bağlı olmakta ve hava, buhar, oksijen ve hava-buhar gibi benimsenen akışkanlığı sağlayan maddelere ve gazlaştırıcının minimum akışkanlığı gibi ve minimum akış hızı, yakıt boyutu gibi hidrodinamik özelliklerine göre değişmektedir [238]. Hammadde maliyetleri düşükken, sermaye maliyetleri yüksek olmaktadır [191]. Hidrojeni kömürden elde etmek yenilenemez bir enerji olduğu ve çevre dostu olmadığı için geçici bir çözüm olarak görülmektedir [236].

Son zamanlarda Çin'de kömür gazlaştırma ile ilgili birçok kaza meydana gelmiştir. Kazaların araştırılması, emniyet bariyerlerinin performansının ve buna katkıda bulunan risk faktörlerinin önemli bir rol oynadığını göstermektedir [239].

6.1.2. Metan reformasyon

Doğal gazın buharla reformasyonu, buhar ve bir katalizör varlığında metandan hidrojen gazı üreten endotermik bir reaksiyondur. Doğal gazdan dünyanın en büyük hidrojen üreticisi olan ABD, çoğunlukla SRM ile yılda dokuz milyon ton hidrojen üretmektedir [240]. Bunun sebebi diğer hidrokarbon temelli yakıtlara göre daha çevreci ve ekonomik olması ve 400°C'nin altında metan diğer hidrokarbon temelli yakıtlara göre daha fazla dönüşüm hızına sahip olmasıdır [241]. Prosesin veriminin büyük ölçüde reaksiyon sıcaklığı, buhar dönüştürücünün konfigürasyonu, katalizörlere ve zarın seçiciliği gibi çeşitli parametrelere ve değişkenlere bağlı olduğu belirtilmektedir. Adris ve ark. (1999), yeni bir reaktör geliştirmişlerdir, ayrıca buhar reformasyonu performansını radikal bir şekilde iyileştirmeye yönelik son girişimleri gözden geçirmişler ve işlem verimliliğinin iyileştirilmesi için son konfigürasyonları ve parametreleri analiz etmişlerdir. Üretilen gazdaki (sentez gazı) ana bileşenler, gaz motorlarında elektrik üretimi için yakıt olarak veya metanol ve etanol gibi petrokimyasal ürünlerin üretimi için birincil reaktan olarak kullanılabilen CO ve H₂'dir [242]. Verimi % 74-85 arasındadır. En büyük avantajı en gelişmiş teknoloji olmasıdır. Ancak CO₂ üretimi fazladır [233].

Metan reformasyonu ile hidrojen üretimi yüksek riskli bir süreçtir. Özellikle buhar bulutu patlamaları riski arttırmaktadır. Emniyet mesafesi 260 metre olarak belirlenmiştir [243].

6.1.3. Biyokütle

Biyokütle, tarım ve ahşaptan kaynaklanan tarımsal artıklar gibi güneş ışığı tarafından üretilen çok çeşitli malzemeleri içermektedir. Biyokütle, etanol, metanol ve biyodizel gibi sıvı yakıtların üretimi için kullanılabilir [236]. Biyo-metanol ve biyo-etanol gibi yenilenebilir sıvıların reformasyonu, hidrojen üretimi için başka bir seçenektir. Biyokütle malzemelerinden elde edilen sıvı, doğrudan sıvı yakıt olarak kullanılmaktadır veya doğal gaz reformasyonuna benzer şekilde hidrojen gazı üretmek için dönüştürülebilmektedir. En büyük avantajları ulaşımının kolay olmasıdır [240]. Dezavantaj olarak tamamen temiz bir enerji değildir, fazla alan kaplar, verimi düşüktür, büyük ölçekli ihtiyaçları karşılayamaz, hammadde bağımlılığı vardır ve bu yüzden maliyeti değişebilmektedir. Ayrıca Güneş ve su kaynakları ile karşılaştırıldığında, biyokütle verimsiz ve az araştırılmıştır [244].

6.1.4. Nükleer güç

Mevcut enerji kaynaklarını korurken daha temiz enerji elde etmek amacıyla hidrojen üretimi için ekonomik bir yol olarak nükleer enerji yaygın olarak tartışılmaktadır. Nükleer enerji, elektrik enerjisi üretimi uygulamasına ek olarak, sudan hidrojen üretimi için ikincil bir yol olarak da kullanılmaktadır [245]. Reaktör soğutucusu ve optimum çalışma sıcaklığı, reaktör gücü ve reaktör boyutunun seçilmesi için en önemli parametrelerden ikisidir. Bu faktörler, hangi reaktörün hidrojen üretimi için uygun olduğunu göstermektedir [246]. Nükleer enerjiden hidrojen üretimi ekonomik ve büyük ölçekli hidrojen tüketim üniteleri için yeterli olsa da, emniyet gereksinimleri ve bakım maliyetleri gibi çözülmesi gereken çeşitli sınırlamaları ve teknik sorunları beraberinde getirmektedir [240]. ABD'deki nükleer enerji endüstrisi iyi tanımlanmıştır ve 1985'ten bu yana yeni santral inşa edilmemiştir. Yeni bir proje için izin almak zor olduğundan ve son birkaç yıldır mevcut santrallerin güvenliği çok iyi olduğundan, mevcut nükleer santrallerin değeri çok yüksektir. Ayrıca madencilik veya çıkarma teknolojilerinde çığır açan gelişmeler olmadıkça, 50 yılı aşan uzun vadede, uranyum kaynaklarının mevcudiyeti sınırlayıcı bir faktör haline gelebileceği düşünülmektedir [247].

6.1.5. Güneş enerjisi

Bir fotovoltaiik (PV) su elektroliz sistemi, PV paneller, DC depolama, AC şebeke, akümülatör batarya seti, elektrolizör ve hidrojen depolama kutularından oluşmaktadır. Bu sistem, güneş enerjisi üretiminin aralıklı kararsızlığından kaynaklanan düşük güvenilirliği telafi edebilmekte ve belirli bir aralıkta kararlı ve güvenilir güç sağlayabilmektedir [248]. PV elektrolizi, en yaygın güneş enerjisi hidrojen üretim teknolojisidir. PV elektrolizi henüz ekonomik olarak uygun gözükmemektedir. Enerji dönüşümü (güneş-elektrik-hidrojen) konusu, PV elektrolize dayalı hidrojen üretiminin bir başka zorluk olarak görülmektedir [191]. Güneş ışınlarının yoğunluğu yer ve mevsimlere göre değişmektedir. Ayrıca bu enerji kaynağından sadece gündüz faydalanılabilmektedir [249].

6.1.6. Hidroelektrik enerji

Hidroelektrik, herhangi bir teknolojinin en yüksek kullanılabilirliğine, güvenilirliğine ve esnekliğine sahiptir [250]. Hidroelektrik santraller dakikalar içinde

enerji sağlayabilir, durdurulabilir veya çıkış oranları değiştirilebilmektedir. Bu nedenle su kaynaklarının yeterince bol olduğu yerlerde hidroelektrik hem taban hem de tepe yük gücü sağlayabilmektedir [251]. Sera gazı emisyonlarının azaltılması açısından, suyu pompalamak ve depolamak için yoğun olmayan elektriği kullanmak daha verimli görünebileceğinden, hidroelektrik kaynaklarından hidrojen üretimi genellikle düşünülmemektedir [252]. Dezavantajları; sermaye maliyeti yüksek olması, sel basmalarına sebep olması, doğal çevreyi tahrip etmesi, sismik hareketleri tetiklemesi, su yaşamını etkilemesi, enerji üretilecek su miktarına göre enerji piyasasını etkilemesi olarak sıralanmaktadır [253].

6.1.7. Rüzgâr enerjisi

Rüzgâr enerjisi temiz, geniş, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji sistemlerine geçişte önemli bir rol oynamaktadır. Oldukça gelişmiş teknoloji ve çok çeşitli boyut ve kapasitelerde bulunabilirlik ile rüzgâr, sıfır emisyonla sudan hidrojen üretmek için kullanılabilir. Bu sürecin zorluklarından biri rüzgâr türbinlerinin ve elektrolizörlerin maliyetinin yüksek olmasıdır. Türbin-elektrolizör-depolama sisteminin optimizasyonu, hidrojen üretmek için rüzgâr enerjisini kullanmanın diğer bir zorluğu olarak görülmektedir [37]. Türbinler, rüzgâr hızları çok yüksek olduğunda (>25 m/s) çalışmamalıdır, çünkü türbin hasarı meydana gelebilmekte ve rüzgâr hızları çok düşük olduğunda (<3 m/s) dönmeyebilmektedir [249].

Ghardaia'daki bir sahada rüzgâr enerjisi kullanılarak hidrojen üretimi üzerine bir fizibilite çalışması yürütülmüştür; bu çalışmanın sonuçları, rüzgâr türbini kulesinin yüksekliğini artırarak sistem çıktısını iyileştirmenin mümkün olduğunu göstermiştir [254].

6.1.8. Gelgit enerjisi

Basit bir deyişle, gelgitlerin ileri geri hareketi tarafından üretilen enerji olarak tanımlanmaktadır. Gelgit enerjisinin üretilmesinden sorumlu olan gelgit akışları, Dünya, Ay ve Güneş arasındaki merkezkaç ve yerçekimi kuvvetlerinden üretilmektedir. Böylece aralarındaki bu çekici kuvvetler, gelgit olan deniz sularının periyodik hareketine neden olmaktadır [255]. Gelgitlere esas olarak Ay'ın yerçekimi kuvveti neden olmaktadır, çünkü

Güneş'inkinden 2,2 kat daha yüksek bir kuvvet oluşturmaktadır, çünkü Ay'ın Dünya'dan uzaklığı Güneş'in Dünya'dan daha az olmasıdır. Gelgit aralığı, yüksek ve düşük gelgit arasındaki yükseklik farkı olarak tanımlanmakta ve elektrik üretmek için su seviyesi farkının en az 5 metre olması gerekmektedir. Gelgit aralıkları bir bahar gelgiti ve bir yeni gelgit olarak kategorize edilebilmektedir. Bahar gelgiti, okyanus suyunun en üst seviyeye yükseldiği zamandır ve neap gelgit, suyun en düşük seviyeden düştüğü zamandır. Gelgit enerjisi sınırsız ve sonsuz olduğu için yenilenebilir kabul edilmektedir. Çevre dostudur (GWP yönünden). Hem gündüz hem gece elde edilebilir. Gelgit enerjisi tahmin edilebilmektedir. Bu sebeple gelgit enerjisi güvenilirdir. Verimi % 80'dir. Rüzgâr enerjisine göre daha kompaktır. Ancak sermaye ve bakım maliyetleri yüksektir. Ayrıca kurulabileceği yer sınırlıdır. Sudaki yaşamı olumsuz etkilemektedir [256].

6.1.9. Jeotermal enerji

Jeotermal enerji, yerin derinliklerinde ısı olarak depolanan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Bu enerji kaynağı, dünyanın iç yapısal özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Jeotermal enerji kullanımına yönelik en büyük kısıtlamalardan biri, bu termal kaynaklara erişilebilirliktir. Ancak, sondajın mümkün olduğu dünyanın erişilebilir bölgelerinde, bu enerji türü endüstriyel olarak kullanılabilir. Jeotermal enerjiden yararlanmak için, bu termal enerjiyi daha derindeki katmandan yer yüzeyine aktarmak için bir ısı transfer taşıyıcısına ihtiyaç olmaktadır [257]. Gün içinde 24 saat güç sağlama kapasitesine bağlıdır. Enerji üretimi için çıkarma oranları, jeotermal sahaların ömrü olan yenileme hızlarından her zaman daha yüksek olacaktır. Kısa devre oluşmamasını sağlamak için yeniden enjeksiyon bölgesi dikkatlice seçilmesi gerekmektedir. Yeniden enjeksiyon, sismik aktivitenin şiddetini değil, sıklığını artırır [258]. Jeotermal enerji, sermaye maliyetleri yüksektir, güvenilirdir, çevreye zararlı yer altı gazlarını yüzeye çıkartabilmektedir. Rüzgâr ve güneş enerjisine göre daha tahmin edilebilir bir yöntem olarak görülmektedir [259].

6.1.10. Dalga enerjisi

Derin deniz dalgalarından elde edilen yenilenebilir bir kaynak olarak kabul edilen dalga enerjisi, kıyıya yakın konutlara güç sağlamak veya açık denizde elektroliz işlemi

yoluyla hidrojen enerjisi üreterek enerji depolama amaçları gibi küçük ölçekli uygulamalar için kullanılmaktadır. Genel olarak, dalga genliğindeki düzensizlikler, dalga periyodunu elektrik jeneratörü ile birleştirmenin zorluğu ve güç cihazlarının inşa edilmesi ve bakımının veya bağlanmasının zorluğu gibi dalga enerjisi üretimi ile ilgili çeşitli engeller mevcuttur. Bu nedenle, bu engeller, fosil yakıtlara kıyasla dalga gücünün çıkarılmasını oldukça pahalı hale getirmektedir [260].

6.2. Hidrojen Sıvılaştırma

Hidrojen, kirliliğe katkıda bulunmadığı veya sera gazı üretmediği için umut verici bir alternatif yakıt olarak görülmektedir. Bununla birlikte hidrojen, 5,6 MJ/L'lik düşük enerji yoğunluğu ile 700 bar'a sıkıştırıldığında gaz fazında kalır ve bu da büyük ölçekli depolamasını verimsiz hale getirmektedir. Bu nedenle, yüksek enerji yoğunluğunun (10,1 MJ/L) bir sonucu olarak sıvı hidrojen talebi artmış, bu da ona daha yüksek bir depolama kapasitesi sağlamaktadır [50].

Düşük kaynama sıcaklığı ve diğer özellikleri nedeniyle hidrojen, sıvılaştırılması çok zor bir gaz olarak görülmektedir. Ortam sıcaklığını ve basınçlı hidrojen gazını yoğunlaştırmak için enerjisi yaklaşık 4.300 kJ/kg çıkarıl makta ve sıcaklığı 20 °K'ye (-423 °F) düşürülmektedir. Ayrıca, sıvı hidrojen depolama tankında ani kaynama kaybını önlemek için orto hidrojenin para hidrojene dönüştürülmesi gerekmekte ve bu da ilave 500 kJ/kg gerektirmektedir [247]. Sıvı H₂, sıkıştırılmış H₂'nin yanı sıra pratik olarak benimsenmiş ve ticari olarak temin edilebilmektedir. Bununla birlikte, atmosferik koşullar altında sıvı H₂'nin enerji yoğunluğu, 35 MPa'da sıkıştırılmış H₂'nin yaklaşık üç katıdır. Sıvı hidrojenin zorlukları;

- Çok düşük sıcaklıklar gereklidir (-250°C).
- Sıvılaştırma için maliyet yüksektir.
- Sıvılaştırma H₂'nin getirdiği enerjinin yaklaşık % 45'ini tüketmektedir.
- Uzun süreli depolamada kayıplar olmaktadır.
- Ekstra izolasyon malzemesi kullanılmaktadır.
- Küçük molekül olduğu için kaçaklar olmaktadır.

Avantajları olarak; yüksek saflık sağlar, dehidrojenasyon ve hidrojen saflaştırma gerektirmemektedir [204]. Ayrıca, hidrojen sıvılaştırma, daha yüksek depolama

yoğunlukları sağlamaktadır. Bu nedenle, büyük ölçekli hidrojen depolama ve uzun mesafe taşımacılığını mümkün kılan uygun bir çözüm olarak görülmektedir [210].

Bir hidrojen sıvılaştırma tesisi inşa etmedeki birincil zorluk, yüksek enerji talebi ve işletme maliyeti olarak görülmektedir. Mevcut tesisler için hidrojenin özgül enerji tüketimi (SEC), Claude çevrimi için $10,8\text{--}12,7 \text{ kWh.kg}^{-1}$ ve Brayton çevrimi için $12,3\text{--}13,4 \text{ kWh.kg}^{-1}$ aralığındadır [261]. Claude çevrimi, Linde çevrimine kıyasla daha yüksek sıvılaştırma verimliliğine sahiptir [262]. Büyük miktarda hidrojen sıvılaştıran tesisler daha ekonomiktir [263].

Teorik ön soğutmalı Linde-Hampson sistemi, uzun zaman önce icat edilen ilk hayali sistemdir. Sistemin ekserji verimliliği en düşük seviyededir. Bundan sonra ikincisi teorik helyum soğutmalı sistemi gelmektedir, bunu teorik ön soğutmalı Claude sistemi takip etmektedir. Hepsinin verimi çok düşüktür. Bahsedilen teorik sistemler, büyük ölçekli üretimde hidrojeni sıvılaştırmak için hiçbir zaman kullanılmamış ve sadece küçük ölçekli laboratuvar sistemleridir. Sonradan Amerika’da büyük sıvılaştırma sistemleri kurulmuştur. LNG (sıvı doğal gaz) soğutmalı sıvılaştırma sistemi % 72 verimde çalışmaktadır ancak soğutma serbest bir LNG tarafından yapılmaktadır. Akustik ve manyetik soğutma küçük ölçekli sıvılaştırma tesisleri için uygun görülmektedir. Büyük ölçekli gerçekçi sıvılaştırma tesisi olarak çok bileşenli soğutucu (MR) çevrimi en ideal olarak görülmektedir. Günümüzde büyük ölçekli hidrojen sıvılaştırmak için kullanılan sistemler % 20-30 veriminde çalışmaktadır. MR çevrimi ise % 50 verimde çalışmaktadır [264].

Mevcut sıvılaştırma sistemlerinin sorunu, yüksek enerji tüketimleridir. Her büyük ölçekli hidrojen sıvılaştırma tesisi, çok az iyileştirme ile hala 50 yıl öncekiyle aynı olan önceden soğutulmuş Claude sistemine dayanmaktadır. Zorlukları çözme yöntemleri arasında, kompresörler, genişleticiler ve ısı eşanjörleri gibi ana sistem bileşenlerinin geliştirilmiş verimlilikleri ile tamamen yeni konfigürasyonlar ve verimli sistemler önermek yer almaktadır. Gelişme eğilimi, pek çok insanın yeni daha iyi sistemler önermeye çalışmasıdır, ancak bunlar hala ne daha verimli ne de gerçekçidir. Ayrıca kompresör ve genişletici üreticilerinin daha verimli makineler geliştirilmesi gerekmektedir [207].

Referans alınmış sistemlerin isimleri sembolik olarak belirtilmiştir. Günümüzde sistemler yukarıdaki gibi diğer sistemlerin geliştirilmesiyle ya da bir arada kullanılmasıyla oluşmaktadır.

Referans alınacak hidrojen sıvılaştırma sistemleri arasında basit bir kavramsal sistem, iki aşamalı bir kompresör Claude sistemi ve optimize edilmiş büyük ölçekli bir hidrojen sıvılaştırıcısını içermektedir. (Elektrik maliyeti 0.04\$/kWs). Çevirimin verimi % 31,5'tur [265]. Bu model kavramsalıdır.

Bu çalışmada referans alınacak sıvı nitrojen ön soğutmalı Joule–Thomson prosesi (Linde) günlük 27 ton hidrojen üretmektedir. Hidrojen dönüşüm sıcaklığının üzerinde olduğunda, genleşme üzerine sıcaklığı artmaktadır. Bu fenomene Joule Thomson etkisi denir. Sıkıştırma, soğutma, genişletme evrelerinde hidrojeni sıvılaştırmaktadır. Maliyetin yarısından çoğu elektrik enerjisi maliyetini kapsamaktadır [266].

Bu çalışmada referans alınacak hidrojen sıvılaştırma çok bileşenli soğutucu (MR) çevirimi olarak günlük 100 tondan fazla hidrojen sıvılaştıran H₂ veya neon ile karışımı kriyojenik çevrimi kullanan, ön soğutma olarak MR çevrimli, santrifüj kompresöre sahip olan bir hidrojen sıvılaştırma teknolojisi referans alınmıştır. Büyük ölçekli bir sıvılaştırma tesisi için yaklaşık maliyet % 67, küçük ölçekli için ise % 60 düşmektedir (Elektrik maliyeti 0.056\$/kWs)). Ekserji verimi % 45'tir.[267].

Mevcut en küçük ABD sıvılaştırma tesisi yaklaşık 6.000 kg/gün kapasiteye ve en büyük kapasite yaklaşık 70.000 kg/gün kapasiteye sahiptir [266]. 2009 yılında Dünya çapında, ticari olarak hidrojen sıvılaştırması yapan tüm tesislerin toplamda sıvılaştırma yapma miktarları 655 ton/gün 'dür [207]. Belirtilen veriler İstanbul Havalimanı için bulgular kısmında kullanılmıştır.

6.3. Hidrojen Taşıma ve Dağıtım

Taşıma işlemi hidrojenin gaz ve sıvı olmasına bağlı olarak boru hatlarıyla, kamyonlarla, gemi ya da trenlerle yapılabilmektedir [247]. Ayrıca havalimanı için dron ve körük (passenger board bridge) eklenmiştir.

Hidrojenin fiziksel özelliklerinden dolayı (düşük moleküler ağırlık ve düşük özgül yoğunluk), belirli bir hidrojen hacmini sıkıştırmak için gereken enerji, doğal gazdan çok

daha fazladır. Bununla birlikte, hidrojen, doğal gazdan çok daha düşük bir viskoziteye sahiptir ve bu nedenle belirli bir boru hattı basınç kaybı için daha büyük hacimde hidrojen taşınabilmektedir [247].

Wanga ve ark. (2008), Üç doğal gaz temelli hidrojen tedarik yolu analizi yapmıştır: küçük ölçekli buhar metan reformasyonu (SMR) yoluyla yerinde hidrojen üretimi, gaz fazındaki hidrojen boru hattı teslimatı ile SMR aracılığıyla merkezi büyük ölçekli hidrojen üretimi ve sıvı hidrojen kamyon teslimatı ile SMR aracılığıyla merkezi hidrojen üretimi senaryolarını incelemişlerdir. En az çevresel etkiyi sıvı hidrojen taşıyan kamyon senaryosunda olduğunu gözlemlemişlerdir [268]. Yang ve Ogden (2007), yapmış oldukları çalışmada sıkıştırılmış gaz kamyonu teslimatının küçük istasyonlar ve çok düşük talep için ideal olduğunu, sıvı teslimatının uzun mesafe teslimatı ve orta talep için ideal olduğunu ve boru hattı teslimatının büyük hidrojen talebi olan yoğun alanlar için ideal olduğunu göstermişlerdir [269].

Kamyon ile taşıma genel maliyeti azdır ve bu noktada taşıyacağı hidrojen miktarına odaklanmanın daha önemli olduğu görülmektedir [247]. Kamyon için teslimat aralığı 1260 km'nin altında olduğunda LH₂ enerji tüketimi her zaman en yüksek seviyededir. Diğer yandan, H₂ kütlesi 1192 kg'dan yüksekse, sürüş menzili 1880 km'den yüksek olduğunda LH₂ çözümü her zaman en uygunu olmaktadır. 2 LH₂ kamyonu 7 CGH₂ kamyonu ile aynı talebi sağlamaktadır. Günlük 500 kg hidrojen talebinde her zaman LH₂ daha ekonomiktir [270], [269]. GH₂ alt yapısı LH₂ alt yapısına göre her zaman maliyet açısından daha uygun görülmektedir. Hidrojenin CGH₂ kamyonu ile taşımak sınırlı kapasitesi olduğu için LH₂ kamyonu ile taşımaktan daha risklidir. LH₂ dağıtım altyapısı, yoğun nüfuslu bir alan gibi daha güvenli bir süreç gerektiğinde önerilir [271]. Bir LH₂ kamyonu ile CGH₂ kamyonun emisyon karşılaştırması yapıldığında taşıdığı her kilogram hidrojen başına düşen emisyon oranı (kgCO₂.kgH₂⁻¹) daha düşük olmaktadır [272]. Büyük ölçekli, uzun mesafeli H₂'yi boru hattı ile taşımak CGH₂ ve LH₂ kamyonlarıyla taşımaktan daha çevreci olmaktadır [273].

Reddi ve ark. (2016), yapmış oldukları çalışmada hidrojenin fiziksel durumuna göre gaz veya sıvı fazda taşınmasının maliyet hesaplamasını yapmıştır. Uzun mesafeli taşımalarda günlük hayatta kullanım gaz fazında boru hatlarıyla olduğunu belirtmişlerdir. Ancak boru hatlarının maliyetinin çok büyük kullanımlarda ancak ekonomik olacağını belirtmişlerdir. Maliyetin boru hattının çapına, uzunluğuna bağlı olduğunu

göstermişlerdir. Ayrıca toplam maliyetin % 50'sinin işçilik maliyeti olduğunu ifade etmişlerdir ve hidrojeni tüp treyler (kamyon) ile taşımının kısa mesafeler için az miktarlarda, arz talep dalgalanmalarını karşılamak için kullanıldığını ifade etmektedir. [274]. Sıvılaştırma enerjisi, sıvılaştırılmış hidrojenin toplam enerji içeriğinin yaklaşık 1/3'ünü temsil etmektedir. Sıvılaştırma işlemi, kg hidrojen maliyeti başına 1 dolardan fazla tutar. Manyetik veya akustik sıvılaştırma gibi teknolojiler, gerekli olan enerjiyi azaltabilir ancak araştırma gerektirmektedir [275]. Hidrojenin sıvılaştırılması, hacimsel kütlelerini ve enerji yoğunluğunu arttırmaktadır. Sıvı tankerin kapasitesi yaklaşık 4 metrik tondur ve kompozit boru römorkun kapasitesinin 5-6 katı ve çelik boru römorkun kapasitesinin 15-20 katıdır ancak en büyük zorluk kaynama nın olmasıdır [274].

Deniz yolu taşımacılığı deneyimlenmiş bir hidrojen taşıma yöntemi değildir. Sıvı ve gaz fazında hidrojeni taşımak mümkündür. Sermaye maliyeti diğer yöntemlere göre fazladır. Uzun mesafeler ve çok yüksek miktarda (10000 ton her gemi için) hidrojen taşımak için uygundur. Kısa mesafeler için uygun değildir. Kaynama durumu en yüksek bu taşıma yönteminde fazla olmaktadır. Sıvı fazında hidrojeni taşımının sermaye maliyeti gaz olarak taşımaktan fazladır [50]. 2020 yılı için hidrojeni gemi ile Sudi Arabistan'dan Japonya'ya taşımının maliyeti 15 \$/kg'dır. Ancak 2030 yılı için 1.7 \$/kg olması beklenmektedir [276].

Demir yolu ile hidrojen taşıma deneyim sağlanmış bir yöntem değildir. Maliyeti çok yüksektir. Sıvı olarak taşınmasında yüksek kaynama kaybının yaşanacağı öngörülmüştür. Uzun mesafeler ve yüksek arzın olduğu durumlar için uygun görülmektedir. Sermaye maliyeti diğer taşıma yöntemlerine göre fazladır. Hidrojeni sıvı olarak taşıma gaz olarak taşımadan sermaye maliyeti olarak fazladır [50]. DB Energie şirketi tarafından yapılan araştırma, hidrojenin demiryolu ile taşınmasına karşı teknik ve yasal olarak engel olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, hala uygun taşıma konteynerleri günümüzde bulunmamaktadır [277].

Teslim edilen-tüketilen enerji oranı, sıvı hidrojenli vagonlar için karayolu kanyonlarına göre daha uygundur, çünkü vagon tank kapasitesi (yaklaşık 9.000 kg'a kadar) çok daha büyüktür ve demiryolları karayolu kamyonlarından daha verimlidir. Bununla birlikte, demiryolu ile hidrojen dağıtımıyla ilgili birincil sorun, muhtemel hidrojen üretim tesislerini yakıt istasyonlarına bağlayan demiryollarının şu anda mevcut olmaması ve neredeyse tüm durumlarda yeni demiryolu hatlarının kurulmasının pratik ve

ekonomik olmayacağıdır. İkincil sorun, mevcut demiryolu lojistik prosedürlerinin kullanılması durumunda havalandırma ve buhar kaybını içermektedir [247]. Yapılan çalışmalarda, eğer hidrojen gaz fazında kompozit tüplerle taşınırsa maliyeti 100 km için 3 \$/kg civarında olacağı tahmin edilmektedir. 3000 km için 4 \$/kg üzerine çıkmaktadır. 1500 km üzerinde LH₂ treni, sıvı veya gaz fazındaki hidrojeni taşıyan boru hattı, kamyon veya bunların hibrit kullanılmasından yada GH₂ treninden maliyet olarak uygundur. Yaklaşık maliyeti 1500 km'de 3.5 \$/kg'dır [278].

Körük ile ilgili havacılık kuruluşlarının vermiş olduğu bilgiler körüğü kullanacak olan kişinin eğitimiyle ilgilidir [278]. NASA'nın 1976'da yapılam projesinde Boeing bir hidrojen-körük konsepti sunmuştur. Ancak bu konseptte körük (passanger air bridge-PAB) bir hidrojen deposuna sahip değildir [145]. Bu konseptte uçak ve körük büyük modifikasyonlara maruz kalmaktadır ve terminal binası da kullanımda eklenmiştir. Bu durum riski ve maliyeti arttırmaktadır. Yolcu hava ünitesi (PCA) körüğün alt kısmında yer almaktadır. Hidrojen kullanımında bu ünite sıvı hidrojen deposuyla yan yana kullanılması emniyet açısından uygun değildir. Uçağa elektrik sağlaması için yapılan araştırmalar mevcuttur.

Kısaca dron olarak adlandırılan İHA'lar, lojistik sektörünün gözdesi haline gelmiştir. Malların hızlı teslimatı, daha düşük işletme maliyeti ve çevre dostu teknoloji gibi temel faydaları dronları ön plana çıkarmaktadır. Paket teslimatı ve toplama konusunda dronlarla ilgili çok az araştırma mevcuttur. En büyük avantajları hızlı bir şekilde teslimattır. Dronlar zorlu arazileri nispeten kolaylıkla geçebilir ve çoğu durumda çok daha kısa bir rota almaktadır. Dronlar, bir paketi teslim etmek için su veya zayıf altyapıya sahip kırsal alanlar üzerinde kolayca uçabilmektedir. Dron ile 2 kilo bir paketi 9,7 kilometre mesafeye teslim etmek için maliyet 0,1 \$'dır. Amazon dron teslimatı için 1 \$ almaktadır [279]. Bir drone tarafından kullanılan her kWh için, elektrik üretim tesislerinde 0,3773 kg CO₂ salınmaktadır [280]. Bu taşımacılık yolunun en büyük dezavantajı yasal problemlerdir. İkinci olarak etik problemler gelmekte ve bu da daha çok özel hayatı içermektedir. Üçüncü olarak yaralanma, kaza gibi fiziksel emniyet problemleri yer almaktadır. Terör olayları gibi sosyal problemlerde dronların kullanımında kötü rol oynamaktadır [281].

Amazon, 2015 yılında dron taşımacılığı araştırma ve geliştirme için FAA onayı almıştır [279]. Ancak, 2018 Aralık ayında Gatwick havalimanı dron sebebiyle uçuşa

kapatılmıştır. Gatwick olayının 140.000 yolcuyu etkilediği ve 1.000 uçuşun yönlendirildiği veya iptal edildiği bildirilmiştir. Havalimanı ve havayolu şirketleri için maliyeti 75 milyon \$ civarındadır [282]. EASA havalimanlarında dron olay yönetimi isminde yönetmelik yayınlamıştır. Bu yönetmeliğe göre taşımacılık yapan dronlar yüksek risk gurubundadır [283]. Buradan da anlaşılacağı gibi bir dronun havalimanına girmesi çok zordur. Seçilmiş hidrojen taşıma yöntemleri Tablo 6.1’de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. Hidrojen taşıma yöntemleri

LH ₂ kamyon	Orta ve kısa mesafeler için uygundur. Yüksek miktarda yakıt sağlayabilir (ortalama 4000 kg kamyon başına). CGH ₂ ’ye göre daha çok miktarlarda hidrojen taşınır. CGH ₂ kamyonuna göre sermaye maliyeti fazladır. En çevreci yöntemlerden biridir. En büyük zorlukları hidrojenin sıvılaştırma enerjisinin fazla olması ve kaynama durumudur.
Boru hattı	Sıvı veya gaz fazında hidrojen taşınabilir. Sermaye maliyeti yüksektir. Maliyeti borunun çapına ve uzunluğuna bağlı olarak artar. En büyük sermaye maliyeti % 50 ile işçilik maliyetleridir. Uzun mesafeler ve yüksek miktarda (100t.s ⁻¹) hidrojen taşımak için uygundur. Düşük işletme maliyetine sahiptir. Maliyet coğrafik durumlara göre değişiklik gösterebilir. Ayrıca hidrojen için depolama görevi görür.
Gemi ile taşıma	Deneyimlenmiş bir ulaşım yöntemi değildir. Sıvı ve gaz fazında hidrojeni taşımak mümkündür. Sermaye maliyeti diğer yöntemlere göre fazladır. Uzun mesafeler ve çok yüksek miktarda (10000 ton her gemi için) hidrojen taşımak için uygundur. Kısa mesafeler için uygun değildir. Kaynama durumu en yüksek bu taşıma yönteminde bulunur. Sıvı fazında hidrojeni taşımanın sermaye maliyeti gaz olarak taşımaktan fazladır. Ancak 2030 yılı için maliyet olarak en düşük taşıma yöntemi olarak görülmektedir.
Tren ile taşıma	Deneyimlenmiş bir yöntem değildir. Bunun sebebi günümüzde hidrojen konteynerlerinin mevcut olmamasıdır. Uzun mesafe ve yüksek miktarlarda (vagon başı 9 ton) hidrojen taşımak için coğrafik koşullara bağlı olarak kullanılabilecek bir yöntem olarak görülmektedir.
Dron ile taşıma	Deneyimlenmiş bir yöntem değildir. Paket taşıma işlemlerinde kullanılmaktadır ve çevre dostudur. Ancak yüksek miktarlarda hidrojenin taşınması bu alandaki araştırma ve geliştirme çalışmalarına bağlıdır. Havalimanlarının hava sahasını kullanması büyük mali zararlara sebebiyet vermektedir.
Körük ile taşıma	Deneyimlenmiş bir yöntem değildir. İlk olarak NASA projesinde fikir olarak sunulmuştur. Günümüzde körük uçaklara taksi durumunda altına bağlı olan PCA ünitesiyle hava sağlamaktadır. Eğer hidrojen deposu olarak körüğün alt kısmı kullanılacak olursa kesinlikle emniyet açısından PCA ünitesi bu kısımdan çıkarılmalıdır. Yine emniyet açısından operatörüne verilen eğitimler yenilenmelidir.

6.4. Hidrojen Depolama

Günümüzde, hidrojen depolama seçenekleri, yüksek basınçlı gaz depoları veya kriyojenik olarak soğutulmuş (sıvılaştırılmış) sıvı hidrojen üzerine odaklanmıştır. Ayrıca ucuz olarak kabul edilen doğal gazın yer altına depolama seçeneği hidrojen içinde düşünülmüştür.

LH₂, 20,4 K ve atmosfer basıncında 70,9 kg.(m³)⁻¹ yoğunluğa sahiptir [284]. Hidrojenin bir kriyojenik sıvı olarak depolanması, sıkıştırılmış gazdan önemli ölçüde daha yüksek bir gravimetrik yoğunluk sunmaktadır. Ancak bu yoğunluk yine de suyun yoğunluğundan 14 kat daha azdır. Kriyojenik sıvı depoları, hidrojeni sıvı fazda tutmak için çok verimli bir yalıtım gerektirmekte [229] ve düşük kaynama sıcaklığı (-253°C) nedeniyle H₂ hızla buharlaşabilir. Bu nedenle LH₂ tankları, yalıtım malzemesiyle doldurulmuş bir vakum ceketi ile ayrılmış iki metal tanktan oluşmaktadır [285]. LH₂ tankı çok iyi yalıtılsa bile atmosferdeki ısı kayıpları LH₂'nin buharlaşması için yeterlidir. Kaynama durumu, LH₂ depolama yönteminin ana dezavantajlarından biridir. Atmosferik koşullarda H₂, % 75 orto ve % 25 para hidrojenen oluşur. Sıvılaştırma sırasında, kaynama oranını azaltmak için H₂ genellikle % 100 para-H₂'ye dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm bir katalizör aracılığıyla gerçekleştirilir ve ekzotermik bir işlemdir, dolayısıyla ısının uzaklaştırılmasını gerektirmektedir. Atmosferik koşullardan sıvılaştırma için teorik enerji, sırasıyla orto'dan para LH₂'ye dönüşüm olmadan ve dönüşümlü olarak 3,3 kWh.kgH₂⁻¹ ve 3,9 kWh.kgH₂⁻¹'dir. Uygulamada, sıvılaştırma için enerji gereksinimleri 10-13 kWh.kgH₂⁻¹'dir [286]. Bu enerji miktarı 120 MJ.kg⁻¹ (33,3 kWh.kg⁻¹) olan H₂ alt ısıtma değerinin (LHV) % 30-40'ına karşılık gelir. Bununla birlikte, LH₂'nin buharlaşması sırasında ısının bir kısmı geri kazanılabilir ve bu da toplam enerji tüketimini azaltmaktadır. Bu durumda malzeme seçimi düşük sıcaklık etkileri de dikkate alınarak yapılmalıdır [270]. Mevcut en iyi yalıtımla bile, taşıma amaçlı küçük tanklar için kaynama oranları günde % 1'den az değildir [229]. Çoğu sıvı hidrojen tankı küreseldir, bu da birim depolama hacmi başına ısı transfer yüzey alanını en aza indirmektedir [247]. Ancak yüksek enerji yoğunluğu sebebiyle birçok dezavantaja rağmen tercih edilmektedir.

Hidrojenin sıkıştırılmış gaz depolanması belki de en basit depolama çözümüdür. Sıkıştırma, 700 bar ve oda sıcaklığında H₂ yoğunluğunu 39,2 kg.(m³)⁻¹'e kadar yükseltebilmektedir [284]. H₂ basıncının artmasıyla sıkıştırmanın enerji talebi de artar. Teorik olarak, H₂'yi izotermal olarak 20 bardan 350 bara sıkıştırmak için 1.05 kWh.kgH₂⁻¹ talep edilirken, 700 bara kadar sıkıştırmak için 1,36 kWh.kgH₂⁻¹'ye ihtiyaç vardır [286]. Bu nedenle, sıkıştırma için gereken enerji lineer değildir. Pratikte 1,7–6,4 kWh.kgH₂⁻¹ kompresör tarafından emilir. Ayrıca ekipman (örneğin kompresörler, tanklar, borular ve valfler) sermaye maliyetleri daha yüksek basınçlarla artmaktadır [287]. Sıkıştırılmış gaz depolama ile ilgili temel sorun düşük enerji yoğunluğudur. Enerji yoğunluğu daha yüksek basınçlarla artırılabilirken, sermaye ve işletme maliyetleri, artan depolama kapasitesi ile

aynı olarak değerlendirilmektedir [247]. Uzun süreli depolama süreçlerinde, arz talep dengeleri değişme durumlarında hidrojeni sıvı fazında depolamak gaz fazında daha uygundur. Çünkü miktar olarak fazla olduğundan nispeten daha ekonomik görülmektedir.

Yer altı depolamada kaya, gazı geçirmeyi önlemek için temel örtü kaynağıdır ve gazın kaçmasını önlemek, çevresinde fay hattı, terk edilmiş sondaj ve diğer özellikleri belirlemek için jeolojik araştırma çok dikkatli bir şekilde yapılması gerekmektedir [247]. Ayrıca hidrojenin depolanmasında doğal gazdan daha fazla basınç ihtiyacı duyulur ve hidrojenin kaya oluşumlarıyla kimyasal etkileşimi bilinmemektedir. Diğer bir önemli zorluk ise, belirli coğrafi bölgelerde jeolojik depolamanın fizibilitesini potansiyel olarak sınırlayan, belirli bölgelerde uygun jeolojik oluşumların olmamasıdır [274].

Tuz aktif olmayan madde olduğundan ve hidrojenle reaksiyona girmediğinden tuz mağaraları hidrojeni depolamak için iyi bir seçenektir. Almanya'da doğal gaz depolamak için yaklaşık 170, Teksas, ABD'de 3 ve İngiltere'de 3 mağara kullanılmaktadır. Bu nedenle teknik bilgi zaten kazanılmıştır, ancak bu yöntem belirli bölgelerle sınırlıdır [288]. Tuz mağaraları 50,106 m³ civarında bir boyuta sahip olabilirken, sert kaya mağaraları bu boyutun onda biri kadardır. Mağara depolaması, gazla doldurulacak büyük açık, boş alanları içerir. Bu nedenle, fizibiliteyi belirlemek için daha karmaşık bir yapısal analiz gereklidir. Göz önünde bulundurulan bir yaklaşım, su tarafından çekilen gazı, boşluk basıncını koruyacak şekilde değiştirmektir. Tuz mağaralarında depolamanın dezavantajı, çalışma sıvısının doymuş tuzlu su olması ve birçok çevresel kısıtlama nedeniyle yüzey depolamasının karmaşık olmasıdır [289]. Jeolojik oluşumlarda saf hidrojenin depolanmasıyla ilgili depolama problemlerinin üstesinden gelmek için tercih edilebilir bir alternatif olabilmektedir. Ancak, hidrojen üretiminin olduğu bölgedeki tuz mağaralarının erişilememesi sınırlayıcı bir faktör olabilmektedir [290].

6.5. Havacılık Yönünden Hidrojen Yakıtının Emniyeti

Havalimanlarında, LH₂'nin emniyetli ve ekonomik kullanımı için teknolojiler, prosedürler ve politikalar uygulanmalıdır [291].

Hidrojen, evrende en bol bulunan elementtir ve sıvı formunda, kerosenden kilogram başına yaklaşık 2,5 kat daha fazla enerji içermektedir [292]. Yanarken hidrojen yan ürün olarak yalnızca su buharı üretmektedir. Yerel hava kalitesi ile ilgili olarak, hidrojen

yanması kerosen yakıtı göre % 90'a kadar daha az nitrojen oksit üretir ve partikül madde oluşumunu ortadan kaldırır. Çevresel ve enerji içeriği açısından bakıldığında, hidrojen bol miktarda potansiyele sahiptir [293]. Herhangi bir yakıt için avantajlı bir kriter, yüksek enerji yoğunluğu, sürdürülebilirlik, temiz ve yabancı kontrolünden bağımsızlık olarak sıralanmaktadır [292]. Hidrojen en yüksek gravimetrik enerji içeriğine sahiptir, ancak sıvının düşük yoğunluğu, çok düşük hacimsel enerji içeriği ile sonuçlanır [294]. Bu, uçak gövdesi tasarımcıları için bir zorluk teşkil etmekte ve geleneksel uçak gövdelerinin önemli ölçüde yeniden tasarlanmasını gerektirecektir [228]. Tablo 6.2'de hidrojen ve kerosenin özellikleri verilmiştir.

Tablo 6.2. Kerosen ile hidrojen yakıt özellikleri [295]

Yakıt:	Ağırlık: (Metrik ton)	Enerji içeriği (MJ)	Hacim (m ³)
LH ₂	1	120,000	14,1
Jet A-1	2,8	120,000	3,32

IATA hidrojeni sürdürülebilir bir yakıt olarak havacılığın geleceği için önemli olduğunu belirtmiştir. Tablo 6.3'te kerosen ve hidrojen tehlike (X) ve emniyet (+) açısından IATA tarafından değerlendirilmektedir.

Tablo 6.3. Hidrojen ve kerosenin emniyet açısından değerlendirilmesi [228]

Özellik	Hidrojen	Kerosen
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı	+	X
Yüzdürme	+	X
Yayılım	+	X
Dökülme zararları	+	X
Yanma zamanı	+	X
Alt yanma sınırı	+	X
Yanma aralığı	X	+
Sızıntı tespiti	X	+
Sızıntı önleme	X	+
Yangın tespit	X	+
Ateşleme için gereken minimum enerji	X	+

Hidrojenin kendiliğinden tutuşma sıcaklığı keroseninkinden oldukça yüksektir (550 °C'ye karşı 220 °C), ayrıca hidrojen havadan yaklaşık 14 kat daha hafiftir, bu nedenle, yer seviyesinde birikmek yerine döküldüğünde hızla yayılır ve buharlar yükselir ve dağılır [296]. Hidrojen atmosferde zaten bulunan bir gaz olduğundan, dökülme, fosil yakıt döküntüsüne kıyasla aynı şekilde çevresel bir tehlike oluşturmaz. Bununla birlikte,

hidrojenin minimum tutuşma enerjisi, diğer karbon bazlı yakıtlarından oldukça düşüktür, bu nedenle daha zayıf bir kıvılcım tutuşmaya neden olabilmektedir. Ayrıca, alev alma aralığı daha geniştir, yani bir yangın için gerekli havadaki konsantrasyonlar hidrojen için (% 4-76), kerosenden (% 1,4-7,6) daha geniştir [292]. Diğer yandan, alt yanıcılık sınırı hidrojen için kerosenden daha yüksektir (% 4'e karşı % 1,4). Bu, havadaki kerosen konsantrasyonunun % 1,4'ten fazla olması durumunda yangın çıkabileceği anlamına gelir, ancak bu sayı hidrojen için 3 kat daha fazladır. Hidrojen alevi görünmezdir ve gaz kokusuzdur, bu da sızıntıları tespit etmeyi veya görülemeyen bir hidrojen yangınıyla mücadele etmeyi zorlaştırır. H₂ çok küçük bir molekül olduğundan, tank uygun şekilde yalıtılmazsa çatlaklardan veya gözeneklerden sızma olasılığı vardır ve bu, daha önce belirtilen nedenlerden dolayı daha yüksek bir risk ile ilişkilidir ve uygun yalıtımın temel seviyede olduğunu göstermektedir. Hidrojen gazının kokusuz olması sızıntıları tespit etmeyi veya görülemeyen bir hidrojen yangınıyla mücadele etmeyi zorlandırmaktadır [228]. Tablo 6.4'te sıvı hidrojen ve jet-A1 yakıtının özellikleri ve etkileri verilmiştir.

Tablo 6.4. Sıvılaştırılmış hidrojene kıyasla Jet A-1 yakıtının seçilmiş özellikleri [295]

Özellikler	Jet-A1	Kriyojenik hidrojen, LH ₂	Etkileri
Kaynama noktası (°C)	167-266	-252	Donma, hidrojen kaynaması, malzeme gevrekliği
Alev Alabilirlik Limitleri (%)	0,6 ila 4,7	4 ila 75	Hidrojen yangını olasılığı yüksektir, ancak başlatmak için daha yüksek konsantrasyon gerekir.
Min. ateşleme enerjisi (MJ)	0,25	0,02	Zayıf kıvılcımlarla yüksek hidrojen yangını olasılığı.
Yanma hızı (cm/s)	18	265-325	Hidrojen yangını süresi jet A-1 yangını süresinden daha azdır.
Batmazlık (yüzdürme)		Havadan 14 kat daha hafif, 20 m/s'de yükselmektedir.	Gaz halindeki hidrojen hızla dağılır.
Kendiliğinden tutuşma	210	585	Saf ısı ile hidrojeni tutuşturmak daha zordur.
Sıcaklığı (°C). Yangın ısı radyasyon fraksiyonu.	% 30-40%	% 10-20	Hidrojen yangınları daha az ısı yaydıkları için daha az yıkıcı olabilir, ancak görünmez alev nedeniyle zorluklar yaratır.

6.5.1. Hidrojenin havacılık yakıtı olarak avantajları

Havalimanında, açık havada yere dökülmez. Yanma hızı yüksek ve düşük emisyonu sahip olduğu için hidrojen yangını, jet yakıt yangınından daha az hasar vermektedir. Toksik değildir. Hidrojen dökülmesi durumunda buharlaşmakta, ancak kerosen daha fazla alana nüfus etmektedir [297]. Suyu veya toprağı kirletmemektedir [291].

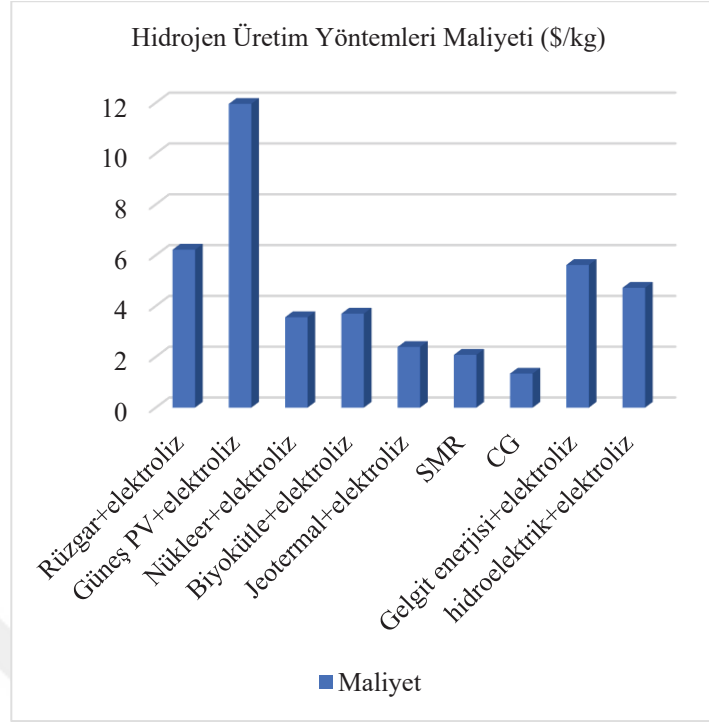
6.5.2. Hidrojenin havacılık yakıtı olarak dezavantajları

Bir hidrojen karışımını tutuşturmak için gereken enerji jet yakıtı karışımını tutuşturmadan daha az enerji gerektirmektedir. Bu nedenle elektriksel boşalmalarda hidrojen yakıt sızıntısı daha tehlikelidir. Hidrojen sızıntısını tespit etmesi zor olarak görülmektedir [297]. Hidrojenin sıvı fazı gaz fazına göre depolama tanklarındaki basınç sebebiyle daha güvenlidir ancak bu durum yorulmayı artırmaktadır [291]. Hidrojen hafif ve yoğunluğu az olduğu için havada yüzer halde bulunur. Bunun sonucu olarak açık ortamlarda atmosferde kolayca dağılmaktadır. Ancak kapalı bir ortamda sızıntı olursa hızlı bir şekilde patlayıcı bir ortam oluşturmaktadır [270].

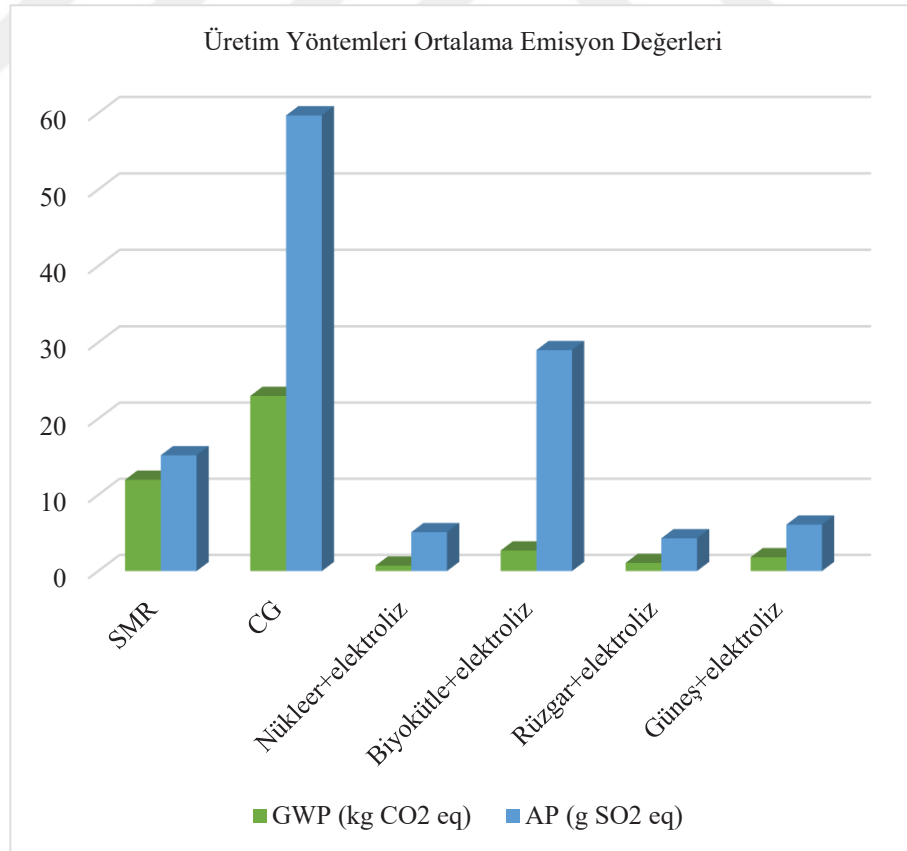
6.6. Kabuller

IATA Havalimanı Yakıt Depolama Kapasitesi Rehberi (IATA, 2008), havalimanlarının genellikle en az 3 günlük yakıt talebini depoda tutmaları gerektiğini önermektedir [298].

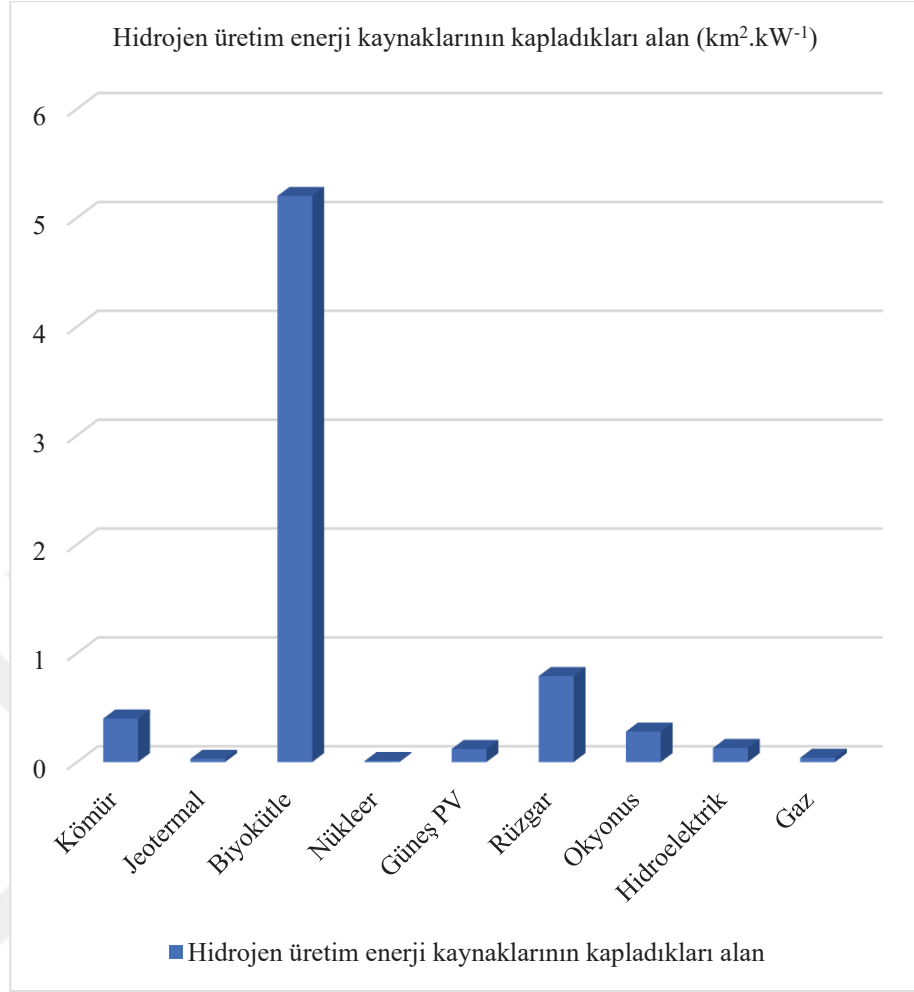
- 100 km mesafe saha içi hidrojen taşımada dikkate alınmıştır [273].
- Hidrojen yakıtının son kullanımı sıvı olarak alınmıştır [205].
- Hidrojen tedarik zincirini oluşturan alt bölümler için Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5, Şekil 6.6, Şekil 6.7, Şekil 6.8, Şekil 6.9 ve Şekil 6.10 dikkate alınmıştır.
- Hidrojen tedarik zincirini oluşturan alt bölümler için Tablo 6.5 dikkate alınmıştır.



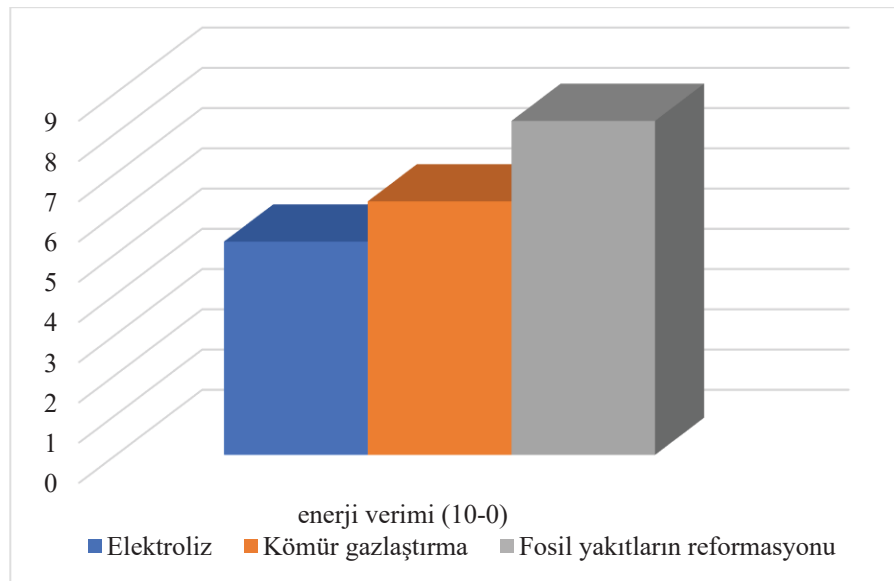
Şekil 6.2. Hidrojen üretim yöntemlerinin maliyet karşılaştırması [234], [232], [299]



Şekil 6.3. Hidrojen üretim yöntemlerinin emisyon karşılaştırması [232]



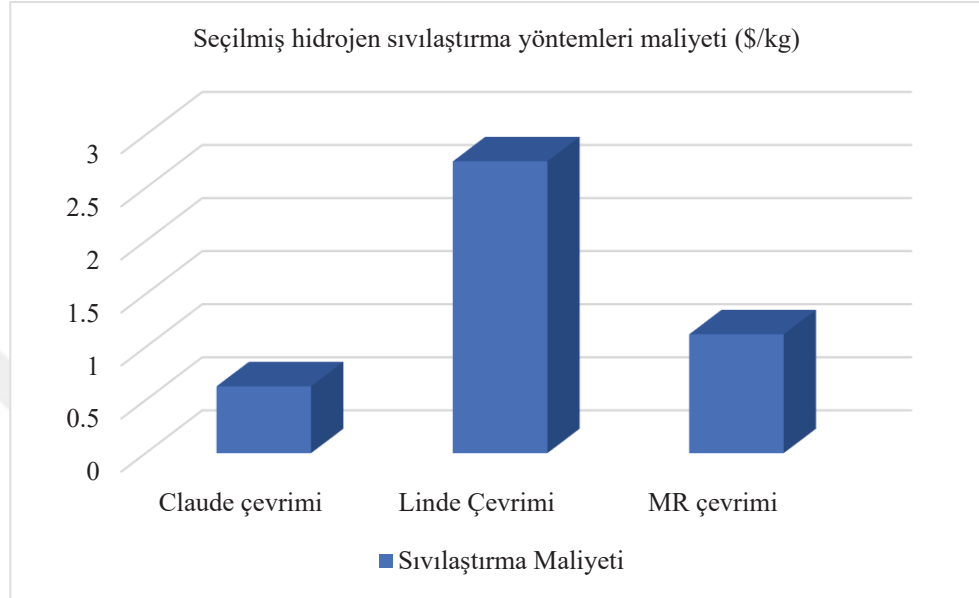
Şekil 6.4. Hidrojen üretim enerji kaynaklarının kapladıkları alan [300]



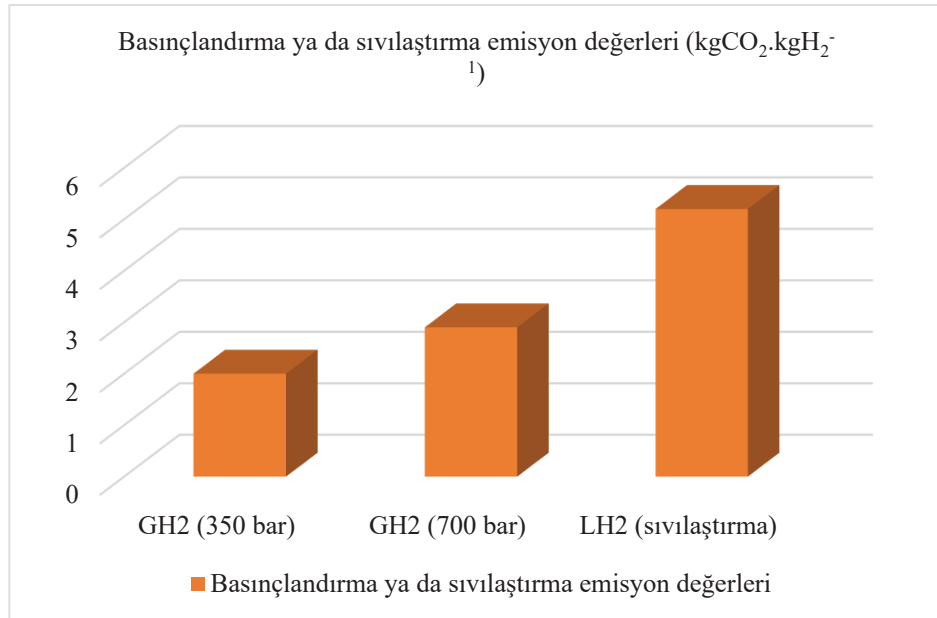
Şekil 6.5. Hidrojen üretim yöntemlerinin verimi [194]

Tablo 6.5. Bazı üretim yöntemlerinin sosyal etkisi [249]

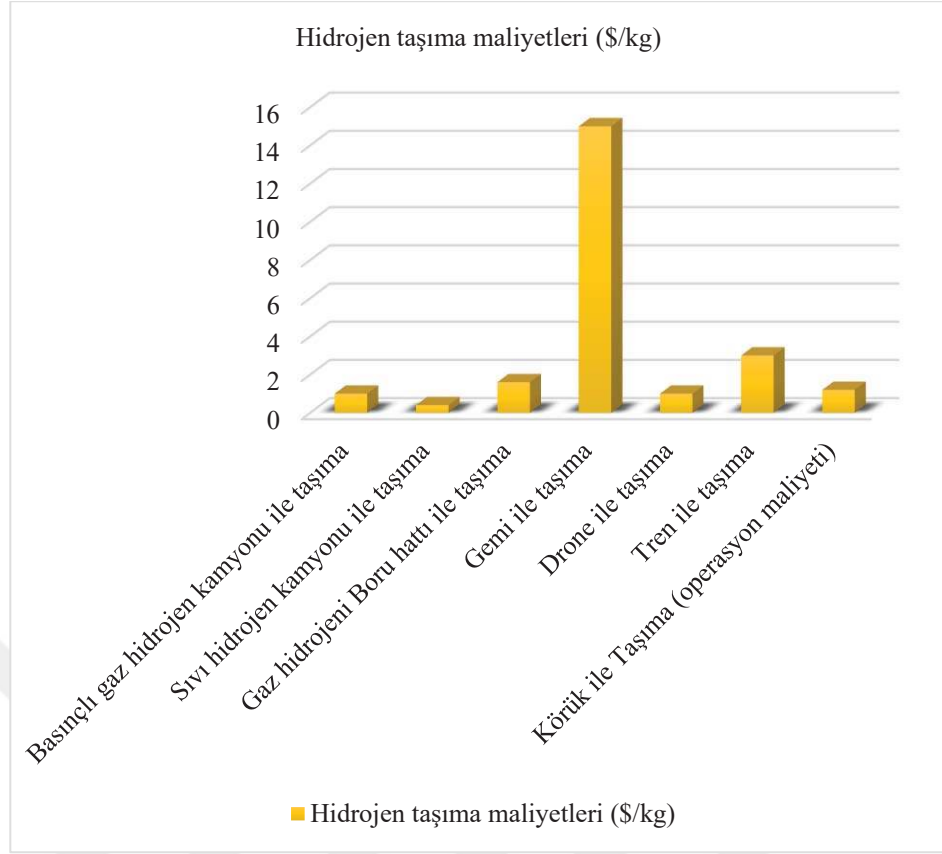
Teknoloji	Etki
PV	Toksin, görsel
Rüzgâr	Kuş çarpması, ses, görsel
Hidroelektrik	Yer değiştirme, tarımsal, nehir zararı
Jeotermal	Sismik aktivite, tarımsal, kirlenme, ses



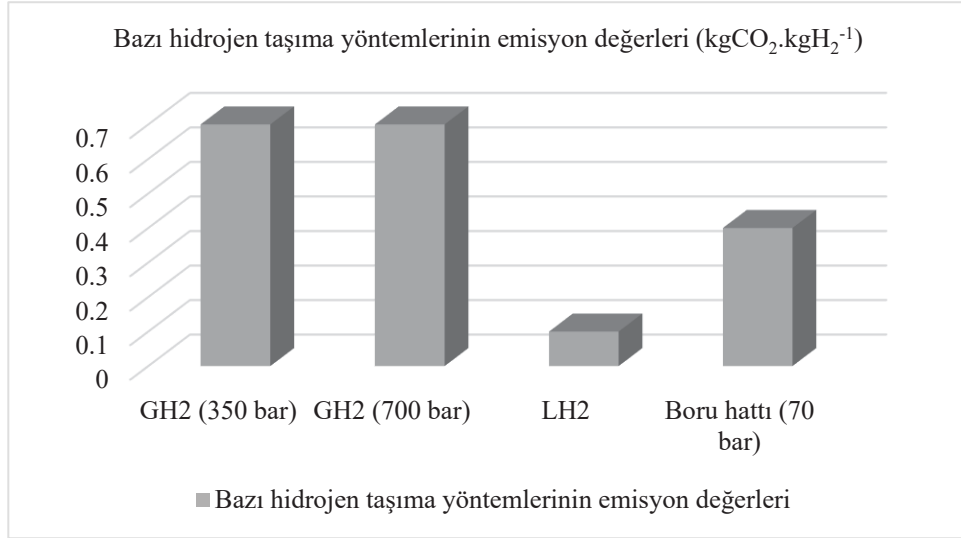
Şekil 6.6. Sıvılaştırma çeşitleri maliyeti [267], [266], [265]



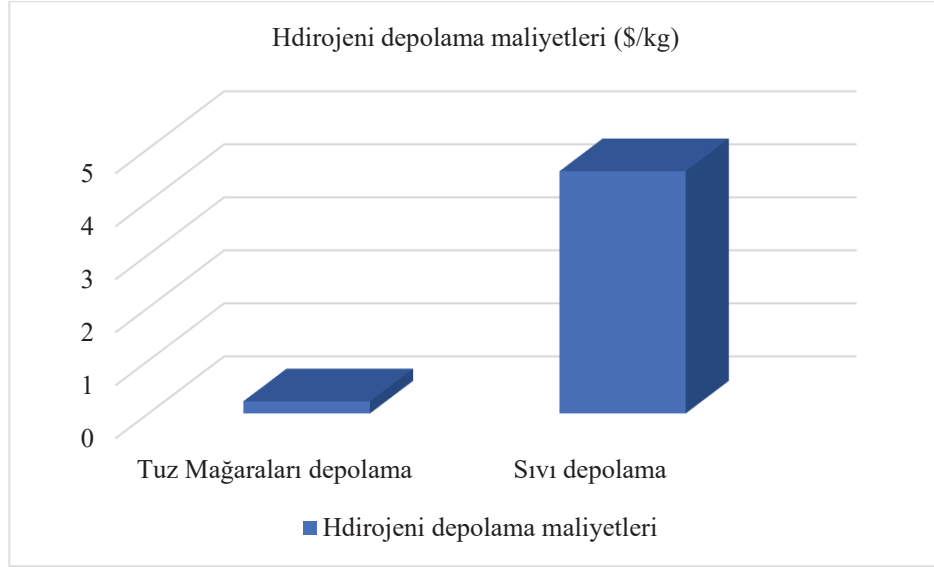
Şekil 6.7. Sıvılaştırma ya da basınçlandırma emisyon değerleri [301]



Şekil 6.8. Hidrojen taşıma maliyetleri [276], [302], [279], [226]



Şekil 6.9. Bazı hidrojen taşıma yöntemlerinin emisyon değerleri [301]



Şekil 6.10. Hidrojeni depolama maliyetleri [303]

6.7. Havalimanı Hidrojen Tedarik Zinciri Senaryoları

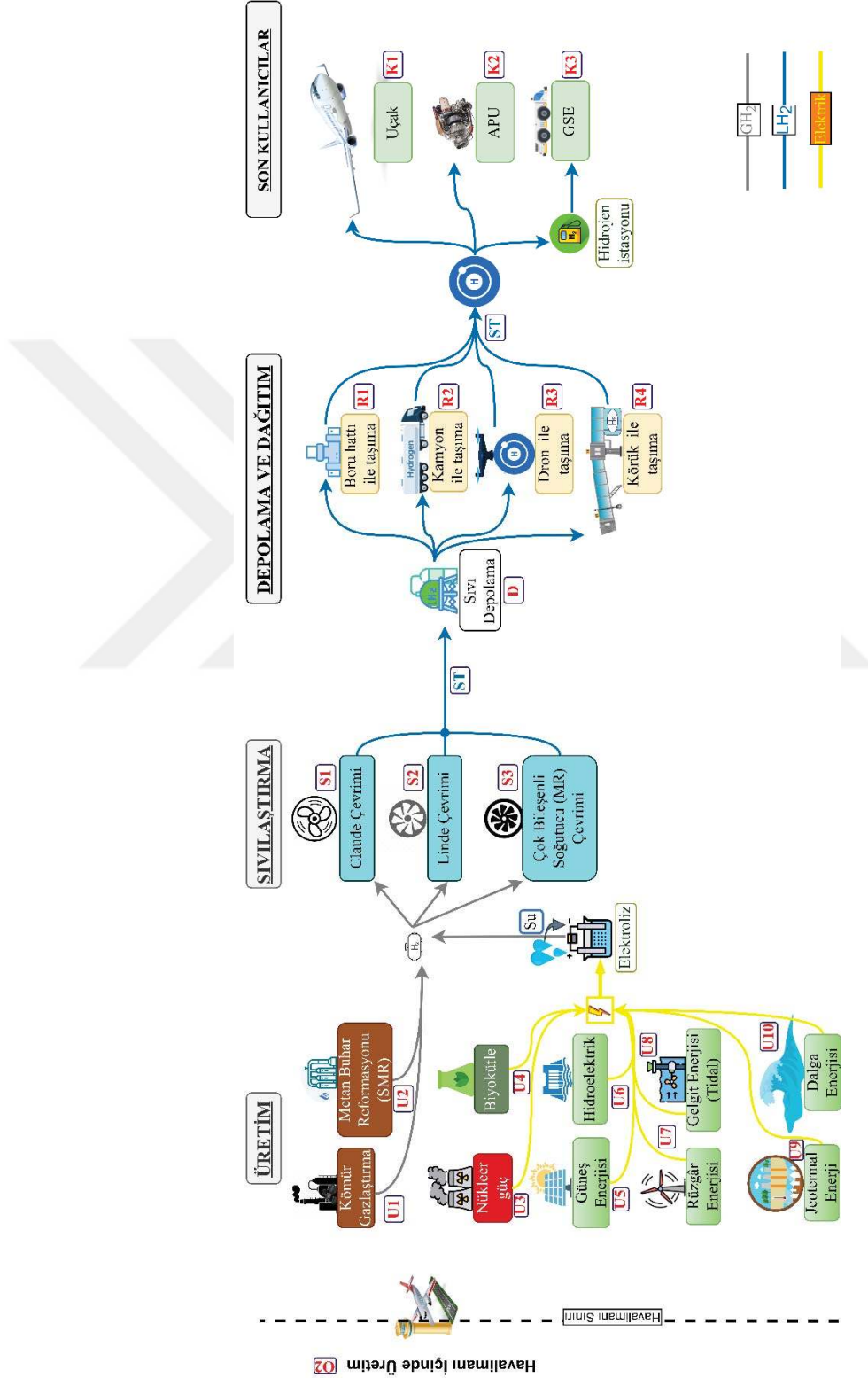
Havalimanı için kurulan hidrojen tedarik zinciri senaryoları Şekil 6.11’de havalimanı içi üretim için ve Şekil 6.12’de havalimanı dışı üretim için verilmiştir. Saha içi ve saha dışı tesis senaryoları işlenmiştir. Bu senaryolara göre her üretim, sıvılaştırma, taşıma, depolama ve dağıtım seçenekleri harfler ve numaralar verilerek isimlendirilmiştir.

- O1: havalimanı dışında üretim,
- O2: havalimanı içinde üretim,
- U1: kömür gazlaştırma,
- U2: metan buhar reformasyonu,
- U3: nükleer güç,
- U4: biyokütle,
- U5 güneş enerjisi,
- U6: hidroelektrik,
- U7 rüzgâr enerjisi,
- U8: gelgit enerjisi,
- U9: jeotermal enerji,
- U10: dalga enerjisi,
- S1: claudé çevrimi,

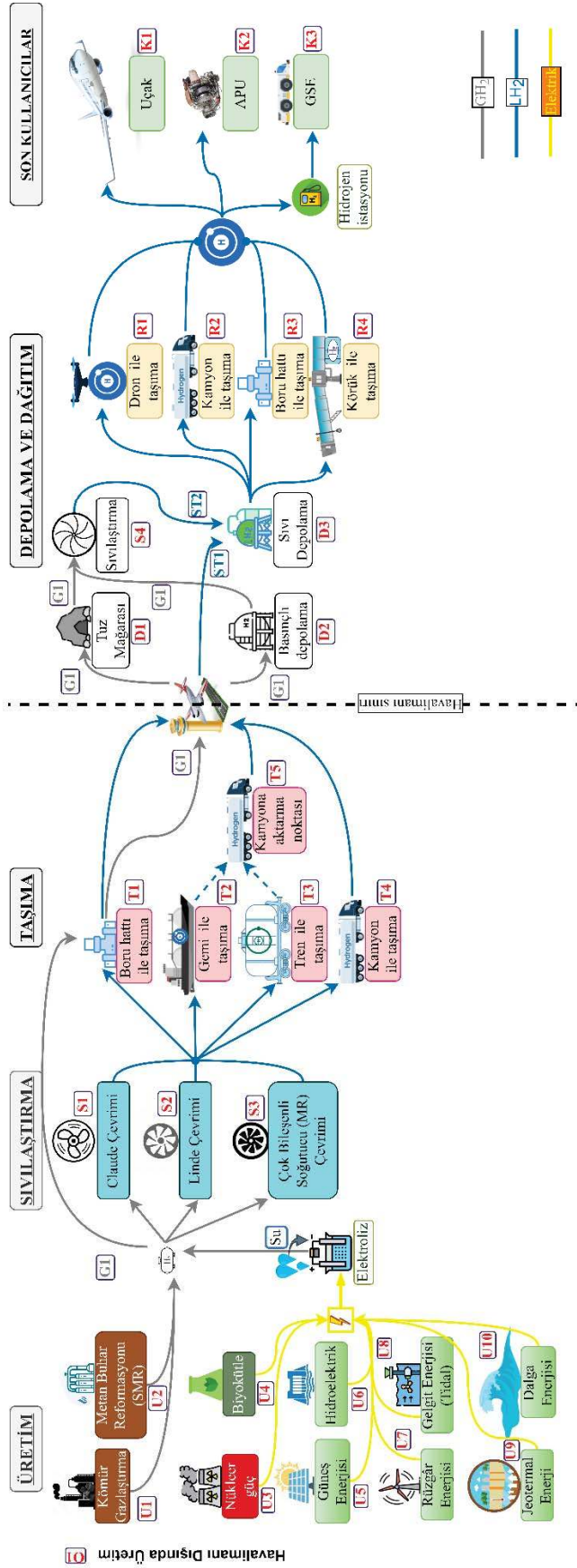
- S2: linde çevrimi,
- S3: çok bileşenli soğutucu çevrimi,
- T1: boru hattı ile taşıma,
- T2: gemi ile taşıma,
- T3: tren ile taşıma,
- T4: kamyon ile taşıma,
- T5: kamyona aktarma noktası,
- D: sıvı depolama, D1: tuz mağarası,
- D2: basınçlı depolama,
- D3: sıvı depolama,
- S4: sıvılaştırma,
- ST1: toplam sıvı hidrojen-1,
- ST2: toplam sıvı hidrojen-2,
- G1: gaz fazında hidrojen,
- ST: toplam sıvı hidrojen,
- R1: dron ile taşıma (havalimanı içinde üretim senaryolarında R3'tür),
- R2: kamyon ile taşıma,
- R3: boru hattı ile taşıma (havalimanı içinde üretim senaryolarında R1'dir),
- R4: körük ile taşıma,
- K1: uçak,
- K2: APU,
- K3: GSE

Üretim aşamasında yenilebilir enerji kaynakları, nükleer enerji elektrik üretmek için kullanılmış ve su, elektroliz teknolojisiyle H_2 ve O_2 elementlerine ayrıştırılmıştır. Ayrıca geleneksel hidrojen üretim teknolojileri buhar reformasyonu ve gazlaştırma bu senaryoların içine katılmıştır. Üretilen hidrojen ya sıvı fazında ya da gaz fazında havalimanına ulaşmaktadır. Sıvılaştırma için üç farklı çevrim seçilmiştir. Depolama için ise gaz fazı ya da sıvı fazında olmak koşuluyla üç farklı depolama çeşidi kullanılmıştır. Taşımada ve dağıtımda CGH_2 kamyonu geleneksel taşıma metodu eklenmemiştir. Bunun sebebi havalimanı gibi yüksek ve orta miktarda hidrojen talebi olan yerler için uygun olmamasıdır. Geleneksel yöntemlere ek olarak hidrojen gemi, tren gibi araştırma

aşamasında olan yöntemler eklenmiştir. Öneri niteliğinde bunlara ek olarak havalimanları için dron ve körük taşıma yöntemleri eklenmiştir.



Şekil 6.11. Havalimanı içi üretim için hidrojen tedarik zinciri senaryoları [304], [305]



Şekil 6.12. Havallimanı dışında üretim için hidrojen tedarik zinciri senaryoları [304], [305]

6.7.1. Havalimanı dışında üretim (O1) senaryoları

U1: Kömür gazlaştırma yönteminin maliyeti düşük, çevre zararı yüksektir (Şekil 6.2 ve Şekil 6.3) [236]. Verimi elektroliz yöntemine göre iyidir (Şekil 6.5). Hammadde olarak kömür kullandığı için sürdürülebilir değildir. Hammadde temini ve fiyat aralığı duruma göre değişiklik gösterebilir [191]. Emniyet açısından yüksek risklidir [239]. Kapladığı alan ortalamanın üzerindedir (Şekil 6.4). Belirtilen nedenlerden dolayı havalimanı hidrojen ihtiyacını tek bir kaynak olarak karşılaması zordur.

U2: Metan reformasyonu günümüzde hidrojen üretiminde en gelişmiş üretim yöntemidir. Verimi yüksektir [233]. Üretim maliyeti çok düşüktür (Şekil 6.2). Ancak çevre zararı yüksektir [233] ve insan için toksiktir (Şekil 6.3). Yüksek riskli bir süreçtir ve emniyet açısından riski yüksektir [243]. Kapladığı alan düşüktür (Şekil 6.4). Yenilenebilir olmadığı için bir havalimanı için tek bir enerji kaynağı olarak kullanılması güçtür.

U3: Nükleer güç, sermaye maliyetleri ve bakım maliyetleri fazladır. Büyük ölçekli hidrojen üretimi sağlayabilir. Emniyet sorunları vardır [240]. Ayrıca hammadde olarak uranyum kullandığı için sınırlı bir kaynağa sahiptir [247]. Çevre dostu ve düşük maliyetli hidrojen üretimine elverişlidir (Şekil 6.2 ve Şekil 6.3). Kapladığı alan düşüktür (Şekil 6.4). Sınırlı hammadde kaynağı kullandığı için tek kaynak olarak havalimanı için sürdürülebilir olmayabilir.

U4: Biyokütle yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Ulaşımı kolaydır [240]. Verimi düşüktür. Büyük ölçekli üretimler için uygun değildir. Hammaddeye bağlı olarak hidrojen üretimi gerçekleşir [244]. Çevre dostu değildir ve maliyet olarak ortalamadır (Şekil 6.2, 6.3). Kapladığı alan en fazla olan yöntemdir (Şekil 6.4). Bu sebeplerden dolayı havalimanında tek başına enerji kaynağı olarak kullanmak güçtür. Ancak arz talep dengesindeki değişikliklerini dengelemek için kullanılabilir.

U5: Güneş enerjisinin verimi bölge ve konuma göre değişmektedir ve yenilenebilir enerji kaynağıdır [249]. Enerji dönüşümü büyük zorludur [191]. Maliyeti en yüksek yöntemdir (Şekil 6.2). Çevre zararı düşüktür ancak İnsan için toksiktir (Şekil 6.3). Çevresine kötü bir görüntü sunmaktadır (Tablo 6.5). Maliyet, enerji dönüşümünün zorluğu veriminin değişmesi sebepleriyle tek bir kaynak olarak havalimanı için

sürdürülebilir değildir. Ayrıca havalimanı uçuş pistinin yakınlarına kurulması aletli iniş için elverişli olmayan pistlerde güneş ışığının yansıması görsel inişi etkileyebilir.

U6: Hidroelektrik yenilenebilir bir enerji kaynağıdır [304]. Sermaye maliyetleri yüksektir. Çevre zararı düşüktür (Şekil 6.3). Emniyeti yüksektir [250]. Arz talep dengesizliğini karşılamak için tepkileri hızlıdır [251]. Hidroelektrik santrallerden elektrik üretmek daha verimli olduğundan, hidrojen üretimi tercih edilmez. Sismik hareketleri tetikleyebilir, doğal çevreyi tahrip eder. Sınırlı bölgelerde kullanılabilir. Su miktarına göre enerji üretir [253]. Sınırlı bölge kullanımı ve su miktarına bağlı enerji üretimi sebepleriyle havalimanı yakıt ihtiyacını tek kaynak olarak karşılaması güçtür. Kapladığı alan düşüktür (Şekil 6.4). Üretim maliyeti hidrojen üretim yöntemleri arasında orta seviyededir (Şekil 6.2).

U7: Rüzgâr enerjisinin sermaye maliyeti fazladır. Yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Verimi bölge ve konuma göre değişebilir [37]. Belli rüzgâr hızı aralığında kullanılabilir. Hidrojen üretimini arttırmak için kule boyu arttırılmalıdır [250]. Bu sebeple havalimanı dışında bile olsa uçuşlar için tehlike arz edebilir. Fazla alan kaplar (Şekil 6.4). Çevre zararı düşüktür (Şekil 6.3). Çevresi için kötü bir görüntü sunar ve gürültü kaynağıdır (Tablo 6.5). Belli rüzgâr hızlarında çalıştığı için sürekli yakıt talebi olan havalimanları gibi tesisler için tek başına bir kaynak olarak kullanılması güçtür.

U8: Gelgit enerjisi yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Sermaye ve bakım maliyeti yüksektir. Gelgit enerjisinin kullanımı sınırlıdır. Ayrıca çevre dostudur (GWP) ancak bulunduğu alandaki su yaşamını etkiler. Gelgit enerjisinden ancak 5 metre dalga farkında enerji üretilebilir [256]. Arz talep dengesindeki bir değişiklik uçuşların durmasına sebep olabilir. Bu nedenle tek bir kaynak olarak havalimanının yakıt ihtiyacını karşılaması zordur ve kapladığı alan fazladır (Şekil 6.4'te rüzgâr enerjisiyle benzerdir).

U9: Jeotermal enerji 24 saat enerji sağlayabilir. Yeni bir sondaj yapılması sismik hareketlerin sayısını artırır. Sermaye maliyeti yüksektir [258]. Temiz enerji kaynağıdır ancak yan etki olarak yeraltındaki kirli gazlar yüzeye çıkabilir. En büyük dezavantajı sondaj yapılan yerler için uygun olmasıdır [257]. Bu sebeple her havalimanı için uygun olmayabilir. Kullandığı alan küçüktür (Şekil 6.4). Yenilenebilir enerji kaynakları arasında hidrojen üretim maliyeti en düşük olan yöntemdir (Şekil 6.2).

U10: Dalga enerjisi yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Sermaye maliyeti yüksektir. Dalga enerjisinde faydalandığı için kullanım alanı deniz veya okyanus ile sınırlıdır. Küçük ölçekli üretimler için uygundur. Bu nedenle tek bir kaynak olarak havalimanının yakıt ihtiyacını karşılaması zordur. Ayrıca çevresindeki su yaşamına zarar vermektedir [260] ve kapladığı alan fazladır (Şekil 6.4'te okyanus enerjisiyle aynı alanı kaplamaktadır).

S1: Claude çevrimi verimi günümüz sıvılaştırma yöntemleriyle aynıdır. Maliyeti seçilmiş sıvılaştırma yöntemleri arasında en düşüktür (Şekil 6.6) ve en yüksek miktarda sıvılaştırma sağlar [265]. Kavramsal bir çevrimdir. Gerçekte sadece orta ve düşük talepleri karşılar [264]. Spesifik enerji tüketimi veriminin düşük olmasının en büyük sebebidir [261]. Hidrojen sıvılaştırma işlemi, basınçlandırma işleminden daha fazla çevreye zarar verir (Şekil 6.7).

S2: Linde çevrimi verimi S1 çevrimine göre düşüktür. Maliyetin yarısından çoğu elektrik enerjisine gider ve hidrojen üretim maliyeti en fazla olan yöntemdir (Şekil 6.6). Düşük talepleri karşılayabilir. Kavramsal bir çevrimdir [266]. Gerçekte sadece orta ve düşük talepleri karşılar [264]. Hidrojen sıvılaştırma işlemi, basınçlandırma işleminden daha fazla çevreye zarar verir (Şekil 6.7).

S3: MR çevrimi verimi en yüksek olan çevrimdir. Maliyeti orta seviyededir (Şekil 6.6). Sıvılaştırma için orta ölçekli talepleri karşılayabilir. Spesifik enerji tüketimi düşüktür [267]. Kavramsal bir çevrimdir. Ancak büyük ölçekli üretim için en umut verici çevrimdir [264]. Hidrojeni sıvılaştırma işlemi, basınçlandırma işlemine göre daha fazla çevreye zarar vermektedir (Şekil 6.7).

G1-T1: Gaz fazında hidrojeni boru hattıyla taşıma günümüzde ticari olarak kullanılmaktadır [247]. Uzun mesafeler ve yüksek miktarda talepler için uygundur [269]. Depolama görevi görmektedir. İşletme maliyeti düşüktür [247]. Sermaye maliyeti fazladır [274]. Uzun mesafelerde daha çevrecidir [273]. Sensörler ve yalıtım malzemeleri ile kullanılması kaynama durumu için gereklidir [247]. Gaz fazında hidrojeni taşıdığı için hacimsel enerji yoğunluğu çok düşüktür [274]. Bu yüzden havalimanı için tek hidrojen ulaşım kaynağı olarak kullanmak zordur. T1'e göre sermaye maliyeti düşüktür [275]. Kısa mesafelerde LH₂ kamyonuna göre çevreye daha çok zarar verir (Şekil 6.9) ve taşıma maliyeti LH₂ kamyonundan daha fazladır (Şekil 6.8).

T1: Sıvı fazında hidrojeni boru hattıyla taşıma sermaye maliyeti G1-T1 taşıma yöntemine göre fazladır [275]. Bunun sebebi ekstra yalıtım gerektirmesidir. Uzun mesafe ve yüksek ölçekli hidrojen taşımaya elverişlidir. Kaynama durumu ve buz yanığı riski vardır [295]. Kesinlikle borular havalandırılmalıdır [247]. Borunun malzemesine bağlı olarak gevrekliğe sebep olabilir. Hacimsel enerji yoğunluğu fazladır [274] ancak kaynama durumu sebebiyle teslim edilen miktar değişeceği için [204] havalimanının yakıt ihtiyacını tek kaynak olarak karşılaması güçtür. Taşıma sıvı fazda olduğu için G1-T1'e göre daha çevrecidir (Şekil 6.9).

T2-T5: Gemi ve kamyonla taşıma yönteminin sermaye maliyeti çok yüksektir. T2 günümüzde deneyimlenmemiş bir yöntemdir. Kaynama durumu en fazla olan yöntemdir. Sermaye maliyeti çok yüksektir. Uzun mesafeler ve büyük talepler için uygundur [50]. Ayrıca T5 bu senaryoda taşıma kapasitesini sınırlamaktadır [247]. 2030 yılı için 1.7 \$/kg olması beklenmektedir [276]. Bu yöntem sadece denize ve okyanusa yakın olan havalimanları için kullanılabilir. Günümüzde maliyeti çok fazla olarak tahmin edilmektedir (Şekil 6.8).

T3-T5: Tren ve gemi ile taşıma yöntemi demir yolu alt yapısının olduğu bölgeler için geçerli olabilir. Deneyimlenmiş bir yöntem değildir. Sermaye maliyetleri çok yüksektir [50]. Demiryolu kara yoluna göre daha verimlidir [247]. Uzun mesafeler ve büyük talepler için uygundur [50]. Sıvı hidrojen taşıyan vagonlar 1500 km üstünde geleneksel yöntemlere göre maliyetleri düşüktür [302]. T2-T5 ve T3-T5 taşıma yöntemleri yukarıda belirtilen sınırlayıcı faktörlerden dolayı tek başına hidrojen taşıma kaynağı olarak kullanımı zordur. Ayrıca hidrojen aktarımı sırasında risk artmaktadır.

T4: Kamyon ile taşıma yöntemi düşük ve orta ölçekli hidrojen talebi için uygundur [50]. Kısa mesafelerde kullanılır. Hacimsel enerji yoğunluğu fazladır ancak taşıyacağı miktar sınırlıdır [274]. Çevre etkisi düşüktür [272]. Taşıma maliyeti düşüktür (Şekil 6.8) ancak sermaye maliyeti gaz hidrojen taşıyan bir kamyonu göre fazladır [271]. Ancak orta ve küçük havalimanları için veya büyük havalimanları için arz ve talep dengesindeki değişiklikleri karşılamak için kullanılabilir.

G1-D1-G1-S4-ST2: Her bölgede tuz mağarası depolama yöntemini kullanmaya imkân yoktur [290]. Hidrojen gaz fazında depolandığı için hacimsel enerjisi düşüktür [274]. Bu durumlar havalimanları için kullanımını sınırlar. Jeolojik ön araştırma

yapılması mecbur bir gerekliliktir [274]. Sismik hareketlerde tehlike arz eder [247]. Çevre zararı olarak hidrojenin basınçlandırarak kompresör göz önünde bulundurulabilir. Hidrojen sıvılaştırıldıktan sonra sıvı hidrojen deposuna gönderilir. Depolama maliyeti en düşük yöntemdir (Şekil 6.10).

G1-D2-G1-S4-ST2: Basınçlı gaz depolama sermaye maliyeti, sıvı depolama yöntemine göre düşüktür [271]. Kapladığı alan sıvı depolara göre oldukça fazladır ve hidrojen gaz fazında depolandığı için hacimsel enerjisi düşüktür [274]. Uzun süreli depolamalarda ekonomik bir tercih değildir. Küçük talepleri karşılar. En az üç günlük havalimanı yakıtını bulundurmak zorundadır [298]. Bu sebeplerden dolayı havalimanı için depolama seçeneği olarak görülmeyebilir.

ST1-ST2-D3: Sıvı depolama sermaye maliyeti, gaz depolama yöntemine göre fazladır [229]. Uzun depolamalarda daha ekonomiktir. Kaynama durumu sebebiyle yalıtımı iyi olmalıdır [229] ve küresel çift katmanlı tanklar kullanılır [247]. Hacimsel enerjisi gaz hidrojene göre fazla olsa bile aynı enerji içeriğinde kerosenin hacminin 4 katı yer kaplar [295]. En az üç günlük havalimanı yakıtını bulundurmak zorundadır [298]. Büyük havalimanları için dezavantaj olabilir.

R1: Dron ile taşıma yöntemi deneyimlenmiş değildir. Elektrik enerjisi kullandığı için maliyeti ve çevre zararı elektrik üretim kaynağına bağlı olarak nispeten düşük olacaktır [280]. En büyük engel olarak dronların havalimanı hava sahasına girişi yasaktır. Hem emniyet hem de güvenlik açısından risklidir. Taşımacılıkta kullanılan dronlar yüksek risk grubundadır [283]. Böyle bir taşıma yöntemi yasal izinlere ve dronların gelişimine bağlıdır [281]. Taşıma maliyeti elektrik kullandığı için azdır (Şekil 6.8).

R2: Sıvı hidrojen kamyonları düşük ve orta ölçekli hidrojen talebi için uygundur. 100 km ve 500 kg/gün bu yöntem ekonomiktir [270]. Gaz hidrojen tankerlerine göre daha emniyetlidir [271]. Çevre zararı düşüktür. Sermaye maliyeti Gaz hidrojen tankerlerine göre fazladır [272]. Küçük ve orta ölçekli havalimanları için uygundur [50]. Bunun sebebi aynı enerji içeriğinde kerosenin 4 katı hacim [295] kaplar ve havalimanı trafiğinde ani bir artışa sebep olabilir. 100 km için taşıma maliyeti en düşük yöntemdir (Şekil 6.8).

R3: Sıvı hidrojen boru hattı taşıma yöntemi uzun mesafeler ve yüksek miktarlar için uygundur [270]. İşletme maliyeti düşüktür. 100 km için sıvı hidrojen kamyonundan daha fazla çevreye zarar verir (Şekil 6.9). Emniyetli kullanım için sensörler, yalıtım, yangın

tespit gibi ekstra maliyet gerektirecek donanım ihtiyacı vardır. Aynı zamanda depolama işlevi görür [306]. Hacim yönünden bakıldığında iyi bir havalandırma gerektiren ve kerosen borularının 4 katı hacme [295] sahip olması gereken bir alt yapı sistemine ihtiyaç duyar.

R4: Körük ile taşıma yöntemi deneyimlenmiş değildir. Sıvı hidrojen deposu körüğün alt kısmına monte edilerek yeni bir yakıt tedariki sağlar. Emniyet açısından yolcu havalandırma ünitesi bu kısımdan kaldırılmalıdır ve yolcuların körükten uçağa giriş yaptığı düşünüldüğünde riski fazladır. Uçak körüğe yanaştığında yakıt ikmali sağlar. Sadece körük kullanan havalimanları için kullanılabilecek bir yöntemdir. Her uçak için de uygun değildir. En büyük maliyet kalemi sıvı depolama maliyeti olacaktır (Şekil 6.8).

K1: Uçak yüksek miktarlarda yakıta ihtiyaç duymaktadır. LTO çevirimi ile havalimanında çevreye en çok zarar veren kaynaktır[74].

K2: APU'nun çevre zararı yer takat ekipmanlarından daha fazladır. Genelde yer operasyonlarında kullanılır [124].

K3: GSE'ler fosil yakıt tüketimi yaptıkları için havalimanında çevreye zarar veren unsurlar arasındadır [134]. Hidrojen entegrasyonu yapılmış bir gruptur [140]. İstasyonlardan yakıt temini gerçekleştirilir.

6.7.2. Havalimanı içi üretim (O₂) senaryoları

U1: Kömür gazlaştırma yönteminin maliyeti düşük, çevre zararı en yüksektir(Şekil 6.2, Şekil 6.3) [236]. Verimi elektroliz yöntemine göre iyidir (Şekil 6.5). Hammadde olarak kömür kullandığı için sürdürülebilir değildir. Hammadde temini ve fiyat aralığı duruma göre değişiklik gösterebilir [191]. Emniyet açısından yüksek risklidir [239] bu sebeple havalimanı içinde kullanılması güçtür. Kapladığı alan ortalamanın üzerindedir (Şekil 6.4)

U2: Metan reformasyonu yönteminin günümüzde hidrojen üretiminde en gelişmiş üretim yöntemidir. Verimi yüksektir [233]. Üretim maliyeti çok düşüktür (Şekil 6.2). Ancak çevre zararı yüksektir [233] ve insan için toksiktir (Şekil 6.3). Yüksek riskli bir süreçtir ve emniyet açısından riski yüksektir [243]. Bu yüzden havalimanı içinde kullanımı güçtür. Kapladığı alan düşüktür (Şekil 6.4).

U3: Nükleer gücün sermaye maliyetleri ve bakım maliyetleri fazladır. Büyük ölçekli hidrojen üretimi sağlayabilir. Emniyet sorunları vardır [240]. Ayrıca hammadde olarak uranyum kullandığı için sınırlı bir kaynağa sahiptir [247]. Çevre dostu ve düşük maliyetli hidrojen üretimine elverişlidir (Şekil 6.2 ve Şekil 6.3). Kapladığı alan düşüktür (Şekil 6.4). Emniyet yönünden riskli olduğu için havalimanı içinde kullanımı güçtür.

U4: Biyokütle yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Ulaşımı kolaydır [240]. Verimi düşüktür. Büyük ölçekli üretimler için uygun değildir. Hammaddeye bağlı olarak hidrojen üretimi gerçekleşir [244]. Çevre dostu değildir ve maliyet olarak ortalamadadır (Şekil 6.2, 6.3). Kapladığı alan en fazla olan yöntemdir (Şekil 6.4). Bu sebeplerden dolayı havalimanında tek başına enerji kaynağı olarak kullanmak güçtür. Ancak arz talep dengesindeki değişikliklerini dengelemek için kullanılabilir.

U5: Güneş enerjisinin verimi bölge ve konuma göre değişmektedir ve yenilebilir enerji kaynağıdır [249]. Enerji dönüşümü büyük zorludur [191]. Maliyeti en yüksek yöntemdir (Şekil 6.2). Çevre zararı düşüktür ancak İnsan için toksiktir (Şekil 6.3). Çevresine kötü bir görüntü sunmaktadır (Tablo 6.5). Maliyet, enerji dönüşümünün zorluğu veriminin değişmesi sebepleriyle tek bir kaynak olarak havalimanı için sürdürülebilir değildir. Ayrıca havalimanı uçuş pistinin yakınlarına kurulması aletli iniş için elverişli olmayan pistlerde güneş ışığının yansıması manuel inişi etkileyebilir.

U6: Hidroelektrik yenilenebilir bir enerji kaynağıdır [304]. Sermaye maliyetleri yüksektir. Çevre zararı düşüktür (Şekil 6.3). Emniyeti yüksektir [250]. Arz talep dengesizliğini karşılamak için tepkileri hızlıdır [251]. Hidroelektrik santrallerden elektrik üretmek daha verimli olduğundan, hidrojen üretimi tercih edilmez [253]. Sismik hareketleri tetikleyebilir, doğal çevreyi tahrip eder. Sınırlı bölgelerde kullanılabilir. Su miktarına göre enerji üretir [253]. Sınırlı bölge kullanımı ve su miktarına bağlı enerji üretimi sebepleriyle havalimanı yakıt ihtiyacını tek kaynak olarak karşılaması güçtür. Kapladığı alan düşüktür (Şekil 6.4). Üretim maliyeti hidrojen üretim yöntemleri arasında orta seviyededir (Şekil 6.2). Havalimanının içinde baraj olması barajın boyuna bağlı olarak uçuş emniyetini olumsuz yönde etkileyebilir. Ancak bazı barajların üzerinde helikopter pistleri bulunmaktadır.

U7: Rüzgâr enerjisinin sermaye maliyeti fazladır. Yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Verimi bölge ve konuma göre değişebilir [37]. Belli rüzgâr hızı aralığında

kullanılabilir. Hidrojen üretimini arttırmak için kule boyu arttırılmalıdır [254]. Bu sebeple havalimanı dışında bile olsa uçuşlar için tehlike arz edebilir. Fazla alan kaplar (Şekil 6.4). Çevre zararı düşüktür (Şekil 6.3). Çevresi için kötü bir görüntü sunar ve gürültü kaynağıdır (Tablo 6.5). Belli rüzgâr hızlarında çalıştığı için sürekli yakıt talebi olan havalimanları gibi tesisler için tek başına bir kaynak olarak kullanılması güçtür. Ayrıca kule boyunun uzun olması ve pervanenin girdap oluşturması uçuş emniyetini olumsuz yönde etkileyebilir.

U8: Gelgit enerjisi yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Sermaye ve bakım maliyeti yüksektir. Gelgit enerjisinin kullanımı sınırlıdır. Ayrıca çevre dostudur (GWP) ancak bulunduğu alandaki su yaşamını etkiler. Gelgit enerjisinden ancak 5 metre dalga farkında enerji üretilebilir [256]. Arz talep dengesindeki bir değişiklik uçuşların durmasına sebep olabilir. Bu nedenle tek bir kaynak olarak havalimanının yakıt ihtiyacını karşılaması zordur ve kapladığı alan fazladır (Şekil 6.4'te rüzgâr enerjisiyle benzerdir). Havalimanı içine kurulumu beklenemez. Ada havalimanları için uygun olabilir.

U9: Jeotermal enerji 24 saat enerji sağlayabilir. Yeni bir sondaj yapılması sismik hareketlerin sayısını arttırır. Sermaye maliyeti yüksektir [258]. Temiz enerji kaynağıdır ancak yan etki olarak yeraltındaki kirli gazlar yüzeye çıkabilir. En büyük dezavantajı sondaj yapılan yerler için uygun olmasıdır [257]. Bu sebeple her havalimanı için uygun olmayabilir. Kullandığı alan küçüktür (Şekil 6.4). Yenilenebilir enerji kaynakları arasında hidrojen üretim maliyeti en düşük olan yöntemdir (Şekil 6.2).

U10: Dalga enerjisi yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Sermaye maliyeti yüksektir. Dalga enerjisinde faydalandığı için kullanım alanı deniz veya okyanus ile sınırlıdır. Küçük ölçekli üretimler için uygundur. Bu nedenle tek bir kaynak olarak havalimanının yakıt ihtiyacını karşılaması zordur. Ayrıca çevresindeki su yaşamına zarar vermektedir [260] ve kapladığı alan fazladır (Şekil 6.4'te okyanus enerjisiyle aynı). Havalimanı içine kurulumu beklenemez. Ada havalimanları için uygun olabilir.

S1: Claude çevrimi verimi günümüz sıvılaştırma yöntemleriyle aynıdır. Maliyeti seçilmiş sıvılaştırma yöntemleri arasında en düşüktür (Şekil 6.6) ve en yüksek miktarda sıvılaştırma sağlar [265]. Kavramsal bir çevrimdir. Gerçekte sadece orta ve düşük talepleri karşılar [264]. Spesifik enerji tüketimi veriminin düşük olmasının en büyük

sebebidir [261]. Hidrojen sıvılaştırma işlemi, basınçlandırma işleminden daha fazla çevreye zarar verir (Şekil 6.7).

S2: Linde çevrimi verimi S1 çevrimine göre düşüktür. Maliyetin yarısından çoğu elektrik enerjisine gider ve hidrojen üretim maliyeti en fazla olan yöntemdir (Şekil 6.6). Düşük talepleri karşılayabilir. Kavramsal bir çevrimdir [266]. Gerçekte sadece orta ve düşük talepleri karşılar [264]. Hidrojen sıvılaştırma işlemi, basınçlandırma işleminden daha fazla çevreye zarar verir (Şekil 6.7).

S3: MR çevrimi verimi en yüksek olan çevrimdir. Maliyeti orta seviyededir (Şekil 6.6). Sıvılaştırma için orta ölçekli talepleri karşılayabilir. Spesifik enerji tüketimi düşüktür [267]. Kavramsal bir çevrimdir. Ancak büyük ölçekli üretim için en umut verici çevrimdir [264]. Hidrojeni sıvılaştırma işlemi, basınçlandırma işlemine göre daha fazla çevreye zarar vermektedir (Şekil 6.7).

ST-D: Sıvı depolama sermaye maliyeti, gaz depolama yöntemine göre fazladır [229]. Uzun depolamalarda daha ekonomiktir. Kaynama durumu sebebiyle yalıtımı iyi olmalıdır [229] ve küresel çift katmanlı tanklar kullanılır [247]. Hacimsel enerjisi gaz hidrojene göre fazla olsa bile aynı enerji içeriğinde kerosenin hacminin 4 katı yer kaplar [295]. En az üç günlük havalimanı yakıtını bulundurmak zorundadır [298]. Büyük havalimanları için dezavantaj olabilir.

R1: Sıvı hidrojen boru hattı ile taşıma yöntemi uzun mesafeler ve yüksek miktarlar için uygundur [270]. İşletme maliyeti düşüktür. 100 km için sıvı hidrojen kamyonundan daha fazla çevreye zarar verir (Şekil 6.9). Emniyetli kullanım için sensörler, yalıtım, yangın tespit gibi ekstra maliyet gerektirecek donanım ihtiyacı vardır. Aynı zamanda depolama işlevi görür [306]. Hacim yönünden bakıldığında iyi bir havalandırma gerektiren ve kerosen borularının 4 katı hacme [295] sahip olması gereken bir alt yapı sistemine ihtiyaç duyar.

R2: Sıvı hidrojen kamyonu düşük ve orta ölçekli hidrojen talebi için uygundur. 100 km mesafede ve günlük 500 kg hidrojen taşımada bu yöntem ekonomiktir [270]. Gaz hidrojen tankerlerine göre daha emniyetlidir [271]. Çevre zararı düşüktür. Sermaye maliyeti Gaz hidrojen tankerlerine göre fazladır [272]. Küçük ve orta ölçekli havalimanları için uygundur [50]. Bunun sebebi aynı enerji içeriğinde kerosenin 4 katı

hacim [295] kaplar ve havalimanı trafiğinde ani bir artışa sebep olabilir. 100 km için taşıma maliyeti en düşük yöntemdir (Şekil 6.8).

R3: Dron ile taşıma yöntemi deneyimlenmiş değildir. Elektrik enerjisi kullandığı için maliyeti ve çevre zararı elektrik üretim kaynağına bağlı olarak nispeten düşük olacaktır [280]. En büyük engel olarak dronların havalimanı hava sahasına girişi yasaktır. Hem emniyet hem de güvenlik açısından risklidir. Taşımacılıkta kullanılan dronlar yüksek risk grubundadır [283]. Böyle bir taşıma yöntemi yasal izinlere ve dronların gelişimine bağlıdır [281]. Maliyeti taşımacılıkta ortalamadır (Şekil 6.8).

R4: Körük ile taşıma yöntemi deneyimlenmiş değildir. Sıvı hidrojen deposu körüğün alt kısmına monte edilerek yeni bir yakıt tedariki sağlar. Emniyet açısından yolcu havalandırma ünitesi bu kısımdan kaldırılmalıdır ve yolcuların körükten uçağa giriş yaptığı düşünüldüğünde riski fazladır. Uçak körüğe yanaştığında yakıt ikmali sağlar. Sadece körük kullanan havalimanları için kullanılabilir bir yöntemdir. Her uçak için de uygun değildir. En büyük maliyet kalemi sıvı depolama maliyeti olacaktır (Şekil 6.8).

K1: Uçak yüksek miktarlarda yakıtı ihtiyaç duymaktadır. LTO çevirimi ile havalimanında çevreye en çok zarar veren kaynaktır[74].

K2: APU'nun çevre zararı yer takat ekipmanlarından daha fazladır. Genelde yer operasyonlarında kullanılır [124].

K3: GSE'ler fosil yakıt tüketimi yaptıkları için havalimanında çevreye zarar veren unsurlar arasındadır [134]. Hidrojen entegrasyonu yapılmış bir gruptur [140]. İstasyonlardan yakıt temini gerçekleştirilir.

6.8. Havalimanları İçin Yüzeysel Bir Araştırma

İstanbul havalimanı uluslararası büyük bir havalimanıdır. Bu havalimanı için ortalama bir gün için gerekli olan hidrojen miktarı hesaplanmıştır. Ayrıca küçük bir havalimanı olan Hasan Polatkan Havalimanı için gerekli hidrojen yakıt miktarı hesaplanmıştır. Bu veri sonuçları günümüzde tamamen hidrojen destekli büyük bir havalimanı fizibilete çalışması için tezin bulgular kısmında tartışılmıştır.

Kabuller;

- Clean sky 2 ve ACI-ATI raporlarına göre 5 ton/gün sıvı hidrojenle yaklaşık 5 kısa menzilli uçuş yapan turboprop motorlu veya yaklaşık 1 orta menzilli dar gövdeli uçağın yakıt ihtiyacı karşılanmaktadır [180], [295].
- NASA raporuna göre 700 ton/gün sıvı hidrojenle maksimum 100 adet geniş gövdeli uçak uçuş yapmaktadır. Yani bir geniş gövdeli uçak için minimum 7 ton sıvı hidrojene ihtiyaç vardır [144].
- Uluslararası bir havalimanı için geniş gövdeli % 25, dar gövdeli % 60 ve bölgesel uçuş yapan uçakların oranı % 15 ortalama değerleri verilmiştir [161].

Uluslararası İstanbul Havalimanı için 2019 yılında günlük ortalama 1200'den fazla uçuş gerçekleşmektedir [307]. Bu da ortalamada 720 adet dar gövdeli, 180 adet bölgesel, 300 adet geniş gövdeli uçak seferi olduğunu göstermektedir. Sıvı hidrojen yakıt ihtiyacı olarak minimum 5880 ton/gün olarak belirlenmiştir.

Küçük bir havalimanı olan Hasan Polatkan Havalimanı için eğitim uçuşlarında günlük yaklaşık 143 ton AVGAS 100LL (43,7 MJ/kg) kullanılmaktadır. Hidrojen yakıtı (120 MJ/kg) olarak 52 ton/gün yakıt karşılık gelmektedir.

7. BULGULAR

Yapılan bu çalışmada havalimanları için hidrojen tedarik zinciri kurulmuştur. Hidrojen tedarik zincirini oluşturan alt bölümlerle ilgili önemli bulgular aşağıda verilmiştir.

U1 üretim yöntemi riskli bir süreç olduğu için havalimanı dışı için uygundur. Fosil kaynaklara bağlı olduğu için sürdürülebilir değildir.

U2 üretim yöntemi riskli bir süreç olduğu için havalimanı dışı için uygundur. Fosil kaynaklara bağlı olduğu için sürdürülebilir değildir.

U3 yöntemi emniyet açısından sadece havalimanı dışı için uygundur. Aslında büyük ölçekli üretime izin veren, çevre dostu ve maliyet açısından uygun bir enerji kaynağıdır. Ancak, uranyum kaynaklarına bağlı olduğu için sürdürülebilir değildir.

U4 enerji kaynağı küçük ölçekli bir kaynaktır. Kapladığı alan en fazla olan enerji kaynağıdır. Bu da havalimanı içinde kullanımını sınırlandırır. Yenilenebilir olmasına rağmen hem çevreye hem de insana çok zararlıdır. Hammaddeye bağlı olarak üretilmesi dezavantajdır. Havalimanı için sadece arz talep dengeleri değiştiğinde kullanılabilecek bir yöntem olarak gözükmemektedir.

U5 enerji kaynağı kullanılarak yüksek ölçekli olarak hidrojeni üretmek günümüzde en pahalı seçenektir. Yenilebilir bir enerji olması avantajdır. Verimi bölge ve konuma göre değişmektedir. Çevre zararı düşüktür ancak insan için zehirlidir. Havalimanı içi ve dışında kullanmak için emniyetlidir. Havalimanı otoparklarının üstüne veya binaya alt yapısı kurulabilir. Ancak küçük taleplere yanıt verebilir.

U6 yenilenebilir bir enerjisi kaynağıdır saha dışı için uygundur ve saha içi için bir barajın havalimanı içinde olması günümüzde zor bir seçenektir. En büyük avantajları enerji taleplerine hızlı bir şekilde yanıt vermesidir. Dezavantaj olarak su miktarına ve kapasiteye bağlı olarak enerji sağlamaktadırlar ve belli bölgelerler sınırlıdırlar (nehir kaynağının konumu). Hidroelektrik santrallerinden elektrik üretmek daha verimli olduğundan hidrojen üretimi tercih edilmez.

U7 Yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Saha dışı için uygundur. Hidrojen üretimi içi kulenin boyunun yüksek olması gerektiğinden havalimanı içinde girdap oluşumları uçuş emniyetini olumsuz etkileyebilir. Ayrıca uçakların kulelere çapma riski vardır.

Rüzgâr hızına bağlı olarak enerji ürettiği için sürekli yakıt ihtiyacı olan havalimanı gibi kullanıcılar için tek bir üretim seçeneği olarak uygun değildir.

U8 üretim kaynağı saha için uygun değildir. Saha dışı için uygulanabilir. Deniz ve okyanusa yakın havalimanları için ya da ada havalimanları için uygun bir seçenek olabilir. Kullanımı sınırlıdır. Gelgit enerjisi rüzgâr ve güneş enerjisine göre daha tahmin edilebilir olsa da bölge sınırlaması kullanımını olumsuz etkilemektedir.

U9 yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. 24 saat enerji sağlayabilir ancak bölgesel olarak sınırlıdır. Her havalimanı için uygun değildir. Sismik hareketlerin sayısını artırmaktadır.

U10 yenilenebilir enerji kaynağıdır. Küçük ölçekli üretimler için uygundur. Saha içi kullanım imkânı yoktur. Kullanımı sınırlıdır.

Üretim yöntemlerine bakıldığında enerji kaynaklarının sınırlı kullanımı yüksek miktarlarda yakıt ihtiyacı olan havalimanı gibi tüketicilere enerji sağlaması tek bir kaynaktan sağlamak zordur. Farklı enerji kaynaklarının hibrit bir şekilde kullanılması ve hem saha içi hem de saha dışı seçeneklerin değerlendirmesi havalimanı için hidrojen yakıtının kullanılmasına imkân sağlar.

Sıvılaştırma seçenekleri bu çalışmada verilen kavramsaldir. S1 çevrimi büyük ölçekli hidrojen sıvılaştırma sağlamaktadır. Diğerlerine göre maliyeti bir seçenektir. Ancak gerçekte kullanımı bu çevrimin kullanımını sınırlandırmaktadır. S2 çevrimi küçük ölçekli bir üretim sağlamaktadır. Maliyeti yüksektir. Ancak bu çevrimin gerçekte kullanımı sınırlıdır. S3 çevrimi orta ölçekli bir sıvılaştırma sağlamaktadır. Maliyeti ortalamadadır. Verimi en yüksek yöntemdir. Gerçekte kullanmak için en umut verici sıvılaştırma yöntemidir.

Hidrojen sıvılaştırmaya genel olarak bakıldığında araştırma ve geliştirme çalışmaları sınırlıdır. Mevcut hidrojen sıvılaştırma tesisleriyle büyük bir havalimanının ihtiyacını karşılamak zordur. Spesifik enerji tüketimi fazladır. Hidrojeni sıvılaştırmak, basınçlandırmaktan daha fazla enerji tüketir ve bunun sonucu olarak çevreye daha fazla zarar vermekte ve maliyeti arttırmaktadır. Bu sebeplerden dolayı hidrojeni hem gaz fazında hem de sıvı fazında taşımak havalimanı yakıt ihtiyacını karşılamak için kilit bir noktadır.

G1-T1 günümüzde kullanılan bir seçenektir. Bu uzun mesafeler ve yüksek talepler için uygundur. Bunun sebebi sermaye maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Dezavantajı gaz fazında hidrojeni taşıdığı için enerji hacmi oldukça düşüktür. T1 sermaye maliyeti olarak G1-T1 yöntemine göre fazladır ancak bu yöntemin enerji hacmi T1'den oldukça fazladır. Uzun mesafe ve yüksek ölçekli taşıma için uygundur. T1 ve G1-T1 ayrıca depolama da sağlar. T2-T5 günümüzde deneyimlenmiş bir yöntem değildir. Maliyeti oldukça fazladır ancak 2030 yılı için gelişmelere de bağlı olarak en ucuz taşıma yöntemi olarak görülmektedir. Bu koşul uzun mesafe ve büyük miktarlar için geçerlidir. T3-T5 sermaye maliyeti fazladır. Büyük miktarlar ve uzun mesafeler için uygundur. Deneyimlenmemiş bir yöntemdir ancak yakın gelecek için geleneksel yöntemlere göre sıvı fazında hidrojenin 1500 km üzeri mesafeler için en ekonomik yöntem olarak görülmektedir. Burada T2 ve T3 senaryolarında T5 kullanılması havalimanına taşınacak miktarı sınırlayabilir. Ayrıca hidrojenin bir araçtan diğerine aktarılması riski diğer taşıma yöntemlerine göre arttırmaktadır. T4 seçeneğinde hidrojen sıvı fazında taşındığı için enerji hacmi gaz fazına göre yüksektir. Kısa mesafelerde en çevreci yöntemdir. Uzun mesafelerde boru hattı daha çevreci bir seçenek olabilir.

Taşıma senaryolarında bu seçenekleri birinden ziyade birkaçını bir arada kullanmak havalimanı gibi yakıt ihtiyacı büyük ölçekli olan ve talebi değişen tesisler için daha uygundur. Günümüzde de havalimanı yakıt ihtiyaçları boru hatları ve yakıt tankerleriyle sağlanmaktadır.

G1-D1-G1-S4-ST2 depolama seçeneği olarak en ucuz seçenektir. Tuz mağaralarının her bölgede olmaması kullanımını sınırlar. Bu yöntem günümüzde metan için kullanılmaktadır. Teknik bilgi mevcuttur. Tuz hidrojenle tepkime vermez. Hidrojeni gaz fazında depolamak enerji hacmini düşürür. Gaz hidrojen sıvı hidrojene göre daha fazla hacim kaplamaktadır. Gaz olarak yer altına depolamak yer üstünde basınçlandırılmış gaz olarak depolamadan daha iyi bir seçenektir. Çünkü gaz fazından hidrojen daha fazla alan kaplamaktadır. G1-D2-S4-ST2 depolama seçeneği sıvı depolamaya göre sermaye maliyeti düşüktür. En büyük dezavantajı sıvı depolamaya göre fazla yer kaplamasıdır. Havalimanları için basınçlı gaz depolama arz talep dengesindeki değişimi dengelemek için kullanılabilir. ST1-D3 veya ST-D sermaye maliyeti gaz depolamadan fazladır ancak uzun süreli depolamalarda daha ekonomiktir. Hidrojenin kaynamasından dolayı kayıplar en büyük dezavantajıdır. Sıvı fazındaki hidrojen gaz

fazına göre yoğunluğu 7 kat daha düşüktür. En az üç günlük havalimanı yakıtını bulundurmak zorundadır. Ancak enerji hacmi açısından bakıldığında sıvı hidrojen kerosenin göre 4 katı hacim kaplar. Büyük ölçekli yakıt ihtiyacı olan havalimanları için bir dezavantaj olabilir.

R1 (saha dışı üretim senaryoları için R3) seçeneğinin sermaye maliyetleri fazladır. İşletme maliyeti düşüktür. Sıvı fazda taşıma gerçekleştiği için enerji hacmi gaz fazına göre fazladır. Ekstra olarak sensör ve yalıtım malzemesi maliyeti vardır. Uzun mesafelerde yüksek miktarlar için uygundur. Depolama işlevi görür. Gaz fazına göre daha az hacim kaplamasına rağmen kerosenin 4 katı hacim kaplar. R2 taşıdığı miktar sınırlıdır. Bu sebeple tek başına dağıtım seçeneği olarak kullanmak uygun değildir. Çevreye en az zararı (100 km için) veren seçenektir. 100 km için taşıma maliyeti en düşük yöntemdir. Aynı enerji hacminde sıvı hidrojen kerosenin 4 katı hacim kapladığı için havalimanı içinde trafik yoğunluğu artabilir. R3 (saha dışı üretim senaryoları için R1) dağıtım seçeneği havalimanlarında dron uçuşu uçuş emniyetini olumsuz etkilediği için uygulanabilir bir yöntem değildir. R4 dağıtım seçeneği deneyimlenmiş değildir. Sıvı hidrojen deposu körüğün alt kısmına monte edilerek yeni bir yakıt tedariki sağlar. Emniyet açısından yolcu havalandırma ünitesi bu kısımdan kaldırılmalıdır ve yolcuların körükten uçağa giriş yaptığı düşünüldüğünde riski fazladır. Uçak körüğe yanaştığında yakıt ikmali sağlar. Sadece körük kullanan havalimanları için kullanılabilecek bir yöntemdir. Her uçak için de uygun değildir. En büyük maliyet kalemi sıvı depolama maliyeti olacaktır.

Dağıtım seçeneklerine bakıldığında tren, gemi, dron ve körük deneyimlenmiş değildir. Ancak havalimanı gibi sürekli yakıt ihtiyacı olan ve arz talep dengesi değişen tesisler için sadece bir dağıtım seçeneğini kullanmak uygun değildir. Günümüzde de havalimanı yakıt tedarikinde farklı seçenekler bir arada kullanılmaktadır.

Mevcut en küçük ABD sıvılaştırma tesisi yaklaşık 6.000 kg/gün kapasiteye ve en büyük kapasite yaklaşık 70.000 kg/gün kapasiteye sahiptir [266]. 2009 yılında Dünya çapında, ticari olarak hidrojen sıvılaştırması yapan tüm tesislerin toplamda sıvılaştırma yapma miktarları 655 ton/gün 'dür [207]. İstanbul havalimanı için yapılan yüzeysel araştırmada günlük havalimanının ihtiyacı 5880 ton sıvı hidrojen olarak belirlenmiştir. Bu sadece uçaklar için tüketimdir. Günümüzde büyük havalimanlarının ihtiyacını sadece hidrojen yakıtıyla sağlamak çok zor bir durumdur. Ancak Hasan Polatkan gibi bir küçük

havalimanının yakıt ihtiyacı hidrojenle karşılanmaktadır. Ancak büyük bir havalimanı için tamamen uçakların ve havalimanlarının hidrojene geçmesi günümüzde mümkün olmadığı için havalimanı hibrit bir yakıt sistemini desteklemek zorundadır.

Sıvı hidrojenin enerji kütlesi kerosenin 2,8 katıdır. Ancak sıvı hidrojenin enerji hacmi aynı enerji içeriğinde kerosenin 4 katıdır [295]. Hidrojenin fiziksel özellikleri kullanımını kısıtlamaktadır. Yakın zaman içerisinde yapılabilecek en iyi çözüm hibrit sistemlerdir. Keroseni ve sıvı hidrojeni bir arada kullanmak havalimanlarının çevre zararını düşürebilir. Ayrıca hibrit altyapı sistemlerinin kurulumu havalimanları için tamamen hidrojene geçmeden teknik bir deneyim sağlar. Bu süreçte fosil yakıtlara bağımlılık azaltılarak hidrojen gibi sürdürülebilir havacılık yakıtlarına adaptasyon sağlanabilir. Bununla birlikte uçakların konfigürasyonunda da büyük değişiklikler yapılması gerekmektedir. Uçaklarında havalimanlarında olduğu gibi hibrit yakıt sistemini desteklemesi gerekmektedir.

8. SONUÇLAR

Günümüzde havalimanları ve havacılık endüstrisi çok enerji tüketmektedir. Enerji ihtiyaçlarının büyük çoğunluğu fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Fosil temelli yakıtlar çevre dostu değildir ve yenilenemezdir. Fosil temelli yakıtlara bağımlılığı azaltmak için sürdürülebilir havacılık yakıtı kullanmaktır. Hidrojen yenilenebilir enerji kaynaklarından üretildiği için ve karbondan arındırmayı sağladığı için önemli bir enerji taşıyıcısıdır. Bununla birlikte bazı zorlukları vardır. Havacılıkta kullanımı için hidrojenin, günümüz ticari fosil yakıtların sahip olduğu bir tedarik zinciri kurulumuna ihtiyacı vardır. Bu çalışma hidrojenin havalimanına tedariki için kurulabilecek altyapıları oluşturmuş ve geniş bir perspektiften sunmuştur. Tedarik zincirinde bulunan, üretim, sıvılaştırma, taşıma, depolama ve dağıtım gibi zincirin alt elemanlarını incelemiştir. Bu incelemede emniyet, çevre, maliyet, fizibilite, sürdürülebilirlik kriterleri dikkate alınmıştır.

Üretim aşamasında farklı enerji kaynaklarının kullanımı havalimanı gibi arz talep dengesinin değiştiği, sürekli yakıt ihtiyacının olduğu bir tesis için uygun olabileceği gösterilmiştir. Üretim yöntemlerinden U1, U2 ve U3 emniyet sebebiyle havalimanı içinde kullanılması uygun değildir.

Sıvılaştırma aşamasında mevcut sistemlerin veriminin düşük olması ve fazla enerji tüketmesi toplam zincirin aşması gereken en büyük problemdir. Kavramsal hidrojen sıvılaştırma tesislerinin gerçek hayatta uygulanabilir şekilde kurulmasına ihtiyaç vardır.

Taşıma ve dağıtım aşamasında fazla miktarlarda hidrojen taşıyan, maliyeti düşük, düşük sermaye ihtiyacı gerektiren seçeneklere ihtiyaç vardır. Taşıma seçeneklerinin bir arada kullanılması bir havalimanı için ideal olacaktır.

Günümüzde enerjiyi depolamak büyük bir zorluktur. Hidrojeni depolamak için maliyeti düşük yöntemler değerlendirilmelidir. Aynı enerji içeriğinde sıvı hidrojen Jet A-1'in 4 katı yer kaplamaktadır.

Yakın gelecekte hibrit sistemlerinin kullanılması fosil yakıtlara bağımlılığı düşürmek için havacılık sektörü ve havalimanları için iyi bir seçenek olarak görülmektedir. Sonuç olarak hidrojen, son derece düşük kirletici emisyonları olan ve dolayısıyla çevre üzerinde düşük etkisi olan temiz, güvenilir ve uygun fiyatlı enerji arzı sağlayabildiği için havacılık endüstrisi için uygun görülmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] United Nations (1998). *Kyoto Protocol to The United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- [2] Milner, M., Rice, S., and Rice, C. (2019). Support for environmentally-friendly airports influenced by political affiliation and social identity. *Technology in Society*, 59(2–3), 101185.
- [3] ICAO. *Environment Report 2010*.
- [4] Postorino, M. N., and Mantecchini, L. (2014). A transport carbon footprint methodology to assess airport carbon emissions. *Journal of Air Transport Management*, 37(1), 76–86.
- [5] Schürmann, G., Schäfer, K., Jahn, C., Hoffmann, H., Bauerfeind, M., Fleuti, E., and Rappenglück, B. (2007). The impact of NO_x, CO and VOC emissions on the air quality of Zurich airport. *Atmospheric Environment*, 41(1), 103–118.
- [6] Bruderer Enzler, H. (2017). Air travel for private purposes. An analysis of airport access, income and environmental concern in Switzerland. *Journal of Transport Geography*, 61(9–10), 1–8.
- [7] Baroutaji, A., Wilberforce, T., Ramadan, M., and Olabi, A. G. (2019). Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 106, 31–40.
- [8] Ziębik, A., and Hoinka, K. (2012). *Energy Systems of Complex Buildings*: Springer Science and Business Media.
- [9] Glenn Baxter, Panarat Srisaeng, Graham Wild (2018). Sustainable Airport Energy Management: The Case Of Kansai International Airport. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 8(3), 334–358.
- [10] Graham, A. (2014). Managing Airports: an international perspective. *Journal of Airport Management*.
- [11] Klug, H. G., and Faass, R. (2001). CRYOPLANE: hydrogen fuelled aircraft — status and challenges. *Air and Space Europe*, 3(3-4), 252–254.
- [12] Preston, K. (2015). Sustainability initiatives helping airports address climate change. (9(5)), 16–19.
- [13] Liu, W., Sun, L., Li, Z., Fujii, M., Geng, Y., Dong, L., and Fujita, T. (2020). Trends and future challenges in hydrogen production and storage research. *Environmental science and pollution research international*, 27(25), 31092–31104.
- [14] Air Transport Action Group (ATAG) (2021). *Waypoint 2050, Balancing growth in connectivity with a comprehensive global air transport response to the climate emergency: a vision of net-zero aviation by mid-century..*
- [15] Airbus (2022). *How to store liquid hydrogen for zero-emission flight*.

- [16] Airbus (2022). *Airbus, Air Liquide and VINCI Airports announce a partnership to promote the use of hydrogen and accelerate the decarbonization of the aviation sector.*
- [17] ICAO (2019). *Electric, Hybrid, and Hydrogen Aircraft – State of Play.*
- [18] ICAO (2022). *Hydrogen, getting to zero carbon flights.*
- [19] Boeing (2014). *Environment Report Built a Better Planet.*
- [20] Jordan. *Hydrogen Fundamentals.*
- [21] Blaum, K., and Schatz, H. (2006). Kernmassen und der Ursprung der Elemente.
- [22] *Hydrogen molecule* (2021).
- [23] Singh Chauhan, N. and Kumar Singh, V.. Fundamentals and Use of Hydrogen as a Fuel.
- [24] Abe, I. Physical and Chemical Properties of Hydrogen.
- [25] Lanz, W. Hydrogen Properties.
- [26] Geitmann, S. (2004). *Hydrogen and fuel cells. Technology for tomorrow. ; Wasserstoff and Brennstoffzellen. Die Technik von morgen.*
- [27] Zabetakis, M. G. (1967). *Safety with Cryogenic Fluids.* Boston, MA: Springer US.
- [28] Töpler, J., and Lehmann, J. (2016). *Hydrogen and Fuel Cell.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [29] Wawrzinek, K., and Keller, C. (2007). *Industrial hydrogen production and technology.*
- [30] Ramachandran, R. and K. Menon, K. , R. (1988). An Overview of Industrial Uses of Hydrogen, *Int. J. Hydrogen Enrvgy*, Vol. 23, No. 7, pp. 593-598.
- [31] Abbasi, T., and Abbasi, S. A. (2011). ‘Renewable’ hydrogen: Prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3034–3040.
- [32] Jain, I. P. (2009). Hydrogen the fuel for 21st century. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(17), 7368–7378.
- [33] Mahfuz, M. H., Kamyar, A., Afshar, O., Sarraf, M., Anisur, M. R., Kibria, M. A., et al. (2014). Exergetic analysis of a solar thermal power system with PCM storage. *Energy Conversion and Management*, 78, 486–492.
- [34] Ley, M. B., Jepsen, L. H., Lee, Y.-S., Cho, Y. W., Bellosta von Colbe, José M., Dornheim, M., et al. (2014). Complex hydrides for hydrogen storage – new perspectives. *Materials Today*, 17(3), 122–128.
- [35] Baykara, S. (2005). Hydrogen as fuel: a critical technology? *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(5), 545–553.
- [36] Turner, J., Sverdrup, G., Mann, M. K., Maness, P.-C., Kroposki, B., Ghirardi, M., et al. (2008). Renewable hydrogen production. *International Journal of Energy Research*, 32(5), 379–407.

- [37] Holladay, J. D., Hu, J., King, D. L., and Wang, Y. (2009). An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today*, 139(4), 244–260.
- [38] Gene D. Berry, Alan D. Pasternak, Glenn D. Rambach (1999). Hydrogen As a Future Transportation Fuel, *Published by Elsevier Science Ltd, Energy Vol. 2 I, No. 4, pp. 289-303.*
- [39] Sharma, S., and Ghoshal, S. K. (2015). Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43(12), 1151–1158.
- [40] Momirlan, M., and Veziroglu, T. (2005). The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(7), 795–802.
- [41] Karim, G. (2003). Hydrogen as a spark ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(5), 569–577.
- [42] Suleman, F., Dincer, I., and Agelin-Chaab, M. (2015). Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(21), 6976–6987.
- [43] Ahluwalia, R. K., and Peng, J. K. (2009). Automotive hydrogen storage system using cryo-adsorption on activated carbon. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(13), 5476–5487.
- [44] Verhelst, S., and Wallner, T. (2009). Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 35(6), 490–527.
- [45] Züttel A, Borgschulte A, Schlapbach L. (2008). *Hydrogen as a future energy carrier*: Darmstadt: Vch Verlagsgesellschaft MbH.
- [46] Juste, G. (2006). Hydrogen injection as additional fuel in gas turbine combustor. Evaluation of effects. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(14), 2112–2121.
- [47] Astbury, G. R. (2008). A review of the properties and hazards of some alternative fuels. *Process Safety and Environmental Protection*, 86(6), 397–414.
- [48] Anderson P, Sharkey J, Walsh R. (1972). *Calculation of the research octane number of motor gasolines from gas chromatographic data and a new approach to motor gasoline quality control*. J Inst Petrol.
- [49] Y. Suzukı (1981). On Hydrogen As Fuel Gas. *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 7, No. 3, pp. 227-230.
- [50] Mazloomi, K., and Gomes, C. (2012). Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3024–3033.
- [51] Vezirocjl, T. N. and Barbır, F. (1992). Hydrogen: The Wonder Fuel. *Int. J. Hydrogen Energy*, 17(0360-3199/92).
- [52] Watson, R. T., DL and Albritton, Dokken, D. J. (2001). *Climate change 2001: synthesis report*.

- [53] Zittel, A. (2004). Hydrogen storage methods. *Naturwissenschaften*, 91(4), 157–172, from <http://dx.doi.org/10.1007/s00114-004-0516-x>.
- [54] Das, L.M., Gulati R., Gupta, P.K. (2000). A comparative evaluation of the performance characteristics of a spark ignition engine using hydrogen and compressed natural gas as alternative. *International Journal of Hydrogen Energy*. (S03 6 0- 31 9 9(99)0 01 0 3- 2), from www.elsevier.com/locate/ijhydene.
- [55] Quadrelli, R., and Peterson, S. (2007). The energy–climate challenge: Recent trends in CO₂ emissions from fuel combustion. *Energy Policy*, 35(11), 5938–5952.
- [56] Barreto, L., Makihiro, A., and Riahi, K. (2003). The hydrogen economy in the 21st century: a sustainable development scenario. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(3), 267–284.
- [57] Haasler, J.B. (1995). *Natural gas as a fuel. Environmental damage or advantage: Fuel Energy*.
- [58] Nicoletti, G., Arcuri, N., Nicoletti, G., and Bruno, R. (2015). A technical and environmental comparison between hydrogen and some fossil fuels. *Energy Conversion and Management*, 89(3/4), 205–213.
- [59] Midilli, A., Ay, M., Dincer, I., and Rosen, M. A. (2005). On hydrogen and hydrogen energy strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 9(3), 255–271.
- [60] Barbir, F. (2009). Transition to renewable energy systems with hydrogen as an energy carrier☆. *Energy*, 34(3), 308–312.
- [61] Nejat Veziroglu, T. (2000). Quarter century of hydrogen movement 1974–2000. *International Journal of Hydrogen Energy*, 25(12), 1143–1150.
- [62] Wragg, D. W. (2008). *Historical dictionary of aviation: From earliest times to the present day / David Wragg*. Stroud: History.
- [63] Federal Aviation Administration (FAA) (1996). *Advisor Circular: Surface Movement Guidance and Control System*.
- [64] International Civil aviation Organization (2021). *Air Traffic Management*
- [65] IATA. *IATA Reference Manual for Audit Programs 11th edition* (Vol. 11)
- [66] Tian, Y., Huang, W., Ye, B., and Yang, M. (2019). A New Air Quality Prediction Framework for Airports Developed with a Hybrid Supervised Learning Method. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2019(3), 1–13.
- [67] Yim, S. H. L., Lee, G. L., Lee, I. H., Allroggen, F., Ashok, A., Caiazzo, F., et al. (2015). Global, regional and local health impacts of civil aviation emissions. *Environmental Research Letters*, 10(3), 34001.
- [68] The Air Transport Action Group (ATAG) (2014). *Climate Action*.
- [69] Lee, D. S., Fahey, D. W., Forster, P. M., Newton, P. J., Wit, R. C. N., Lim, L. L., et al. (2009). Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric environment (Oxford, England : 1994)*, 43(22), 3520–3537.

- [70] Janić, M. (1999). Aviation and externalities: the accomplishments and problems. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 4(3), 159–180.
- [71] Schlenker, W., and Walker, W. R. (2015). Airports, Air Pollution, and Contemporaneous Health. *The Review of Economic Studies*, 83(2), 768–809.
- [72] Hu, R., Zhu, J., Zhang, Y., Zhang, J., and Witlox, F. (2020). Spatial characteristics of aircraft CO₂ emissions at different airports: Some evidence from China. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 85(2), 102435.
- [73] Kim, J. J., Smorodinsky, S., Lipsett, M., Singer, B. C., Hodgson, A. T., and Ostro, B. (2004). Traffic-related air pollution near busy roads: the East Bay Children's Respiratory Health Study. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 170(5), 520–526.
- [74] Karanja-Fry, L. (2011). *Airport air quality manual* (1. ed.). Doc / International Civil Aviation Organization [Englische Ausgabe]: Vol. 9889. Montréal: International Civil Aviation Organization.
- [75] Postorino, M. N., Mantecchini, L., and Paganelli, F. (2019). Improving taxi-out operations at city airports to reduce CO₂ emissions. *Transport Policy*, 80(2), 167–176.
- [76] Noel, G. (2005). *Aviation and Emissions A Primer*.
- [77] International Civil Aviation Organization (2012). *ICAO Carbon Emissions Calculator Version 5*.
- [78] Masiol, M., and Harrison, R. M. (2014). Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review. *Atmospheric environment (Oxford, England : 1994)*, 95, 409–455.
- [79] International Civil Aviation Organization (2008). *ICAO Annex 16: Environmental Protection, Volume II -- Aircraft Engine Emissions*.
- [80] Yunos, S. N. M. M., Ghafir, M. F. A., and Wahab, A. A. Aircraft LTO emissions regulations and implementations at European airports, p. 20006.
- [81] European Aviation Safety Agency. *European Aviation Environmental Report 2016*: 2016.
- [82] Čokorilo, O. (2016). Environmental Issues for Aircraft Operations at Airports. *Transportation Research Procedia*, 14(4), 3713–3720.
- [83] Grampella, M., Martini, G., Scotti, D., Tassan, F., and Zambon, G. (2017). Determinants of airports' environmental effects. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 50, 327–344.
- [84] International Civil aviation Organization. *2019 Environmental Report: Aviation and Environment*.
- [85] Graver, B. *CO₂ emissions from commercial aviation: 2013, 2018, and 2019*.
- [86] Rodríguez-Díaz, A., Adenso-Díaz, B., and González-Torre, P. L. (2017). A review of the impact of noise restrictions at airports. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 50(1), 144–153.

- [87] Daniel Williams (FAA). *2021 United States Aviation Climate Action Plan*.
- [88] U.S. Department of Transportation – Bureau of Transportation Statistics, *Air Carrier Summary Data, Form 41 and 298C Schedule T2 for 1991-2019*.
- [89] Doganis, R. (2005). *The Airport Business*: Routledge.
- [90] Baxter, G., Srisaeng, P., and Wild, G. (2018). An Assessment of Airport Sustainability, Part 1—Waste Management at Copenhagen Airport. *Resources*, 7(1), 21.
- [91] P Dempsey, P. S. (2000). *Airport planning and development handbook: A global survey*. McGraw Hill Professional.
- [92] Y Wong, Y. M., Wu, T. Y., and Juan, J. C. (2014). A review of sustainable hydrogen production using seed sludge via dark fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 471–482.
- [93] Verstraete, D. (2013). Long range transport aircraft using hydrogen fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(34), 14824–14831.
- [94] Lee, D. S., Pitari, G., Grewe, V., Gierens, K., Penner, J. E., Petzold, A., et al. (2010). Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Atmospheric environment (Oxford, England : 1994)*, 44(37), 4678–4734.
- [95] Contreras, A. (1997). Hydrogen as aviation fuel: A comparison with hydrocarbon fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 22(10-11), 1053–1060.
- [96] Brewer, G. D. (1991). *Hydrogen Aircraft Technology*.
- [97] Kocer, K. (1994). *Consideration of liquid hydrogen for commercial aircraft*.
- [98] Dahl, G., and Suttrop, F. (2001). *Combustion chamber and emissions, review of proposed hydrogen combustors, Benefits and Drawbacks*.
- [99] Haglind, F., Hasselrot, A., and Singh, R. (2006). Potential of reducing the environmental impact of aviation by using hydrogen Part I: Background, prospects and challenges. *The Aeronautical Journal*, 110(1110), 533–540.
- [100] Singh, R., and CEng, F. (2001). *Civil Aero Gas Turbines: Technology and Strategy*.
- [101] Winter, C. (1990). Hydrogen in high-speed air transportation☆. *International Journal of Hydrogen Energy*, 15(8), 579–595.
- [102] NASA. *Space Applications of Hydrogen and Fuel Cells*.
- [103] Payzer, R. J., and Renninger, S. W. (1979). Hydrogen fueled high bypass turbofans in subsonic aircraft, 11.
- [104] Brewer, G. (1982). The prospects for liquid hydrogen fueled aircraft. *International Journal of Hydrogen Energy*, 7(1), 21–41, from [http://dx.doi.org/10.1016/0360-3199\(82\)90205-1](http://dx.doi.org/10.1016/0360-3199(82)90205-1).
- [105] Baerst, C. F., and Riple, J. C (1979). *Preliminary studies of a turbofan engine and fuel system for use with liquid hydrogen*.

- [106] Pratt, D. T., Allwine, K. J., and Malte, P. C. (1974). *Hydrogen as a turbojet engine fuel- Technological, economical and environmental impact*. International Symposium on Air Breathing Engines, 2 nd, Sheffield, England.
- [107] Smith, E. M. (1989). Slush hydrogen for aerospace applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 14(3), 201–213, from [http://dx.doi.org/10.1016/0360-3199\(89\)90054-2](http://dx.doi.org/10.1016/0360-3199(89)90054-2).
- [108] Sosounov, V., and Orlov, V. (1990). Experimental turbofan using liquid hydrogen and liquid natural gas as fuel. In *26th Joint Propulsion Conference*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [109] Leonorovitz, J. (1990). Soviets seek international interest in alternative-fuel-powered transport.
- [110] Pohl, H. (1997). Hydrogen in future civil aviation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 22(10-11), 1061–1069, from [http://dx.doi.org/10.1016/s0360-3199\(95\)00140-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0360-3199(95)00140-9).
- [111] Rondinelli, S., Gardi, A., Kapoor, R., and Sabatini, R. (2017). Benefits and challenges of liquid hydrogen fuels in commercial aviation. *International Journal of Sustainable Aviation*, 3(3), 200.
- [112] Shum, F., Moore, M., Cohen, J., Rosfjord, T., Eberius, H., Ziemann (1996). *Potential use of hydrogen in air propulsion, Final Report, submitted to Hydro-Québec (contract no. 16233-92-ERE-015-00) and European Union (contract no. 4541-91-11 EL ISP PC)*.
- [113] Ziemann, J. (1998). Low-NOx combustors for hydrogen fueled aero engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(4), 281–288.
- [114] Andreas Westenberger. A. *Liquid hydrogen fuelled aircraft – System Analysis, CRYOPLANE, Final Technical Report,*”
- [115] Smart, M. K., Hass, N. E., and Paull, A. (2006). Flight Data Analysis of the HyShot 2 Scramjet Flight Experiment. *AIAA Journal*, 44(10), 2366–2375, from <http://dx.doi.org/10.2514/1.20661>.
- [116] L. Moses, P., L. Rausch, V., T. Nguyen, L., and R. Hill, J. (2004). NASA hypersonic flight demonstrators—overview, status, and future plans. *Acta Astronautica*, 55(3-9), 619–630.
- [117] NASA (2022). *NASA's X-43A*.
- [118] Cecere, D., Giacomazzi, E., and Ingenito, A. (2014). A review on hydrogen industrial aerospace applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(20), 10731–10747, from <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.126>.
- [119] Mills, G. L., Buchholtz, B., and Olsen, A. Design, fabrication and testing of a liquid hydrogen fuel tank for a long duration aircraft.
- [120] Norway opens new hydrogen station at Oslo Airport (2015). *Fuel Cells Bulletin*, 2015(10), 9–10.
- [121] Green hydrogen facility opens at Berlin airport (2014). *Fuel Cells Bulletin*, 2014(5), 1.

- [122] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (2021). *Opening of New Hydrogen Station at Paris Orly Airport: A Step Towards Cleaner Transport*.
- [123] Idemitsu opens its first commercial hydrogen station at Narita airport (2016). *Fuel Cells Bulletin*, 2016(3), 8.
- [124] Eberle, G. F., and Steer, M. D. (1982). *Air Quality Procedures for Civilian Airports and Air Force Bases*.
- [125] Walker, J. F., and Civinskas, K. C. (2004). *Emerging Fuel Cell Technology Being Developed: Offers Many Benefits to Air Vehicles*.
- [126] Baharozu, E., Soykan, G., and Ozerdem, M. B. (2017). Future aircraft concept in terms of energy efficiency and environmental factors. *Energy*, 140, 1368–1377.
- [127] Saikia, K., Kakati, B. K., Boro, B., and Verma, A. (2018). Current Advances and Applications of Fuel Cell Technologies. In P. K. Sarangi, S. Nanda, and P. Mohanty (Eds.), *Recent Advancements in Biofuels and Bioenergy Utilization* (pp. 303–337). Singapore: Springer.
- [128] Schmidt-Rohr, K. (2018). How Batteries Store and Release Energy: Explaining Basic Electrochemistry. *Journal of Chemical Education*, 95(10), 1801–1810.
- [129] Fernandes, M. D., P. Andrade, S. T. de, Bistrizki, V. N., Fonseca, R. M., Zacarias, L. G., Gonçalves, H.N.C., et al. (2018). SOFC-APU systems for aircraft: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(33), 16311–16333.
- [130] Rajashekara, K., Grieve, J., and Daggett, D. (2006 - 2006). Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid APU System for Aerospace Applications. In *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting* (pp. 2185–2192). IEEE.
- [131] Spenser, J. (2022). *Fuel cells in the air..*
- [132] Boeing. *Commercial airplanes - fuel cell APU overview*
- [133] Dunn, J. (2007). *Fuel cell electric aircraft energy challenge new era of aviation*. EASA. *Drone Incident Management at Aerodromes - Part 1*.
- [134] Tronair (2022). *Ground Support Equipment Glossary*.
- [135] Tips (2022). *Tips Aircraft Ground Support Equipment..*
- [136] Staffell, I., Scamman, D., Abad, A. V., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., et al. (2018). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system.
- [137] Jim Petrecky, P. P. Ground Support Equipment Demonstration
- [138] Fuel Cell Technologies Office Newsletter (2012). *Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office*.
- [139] McConnell, V. P. (2010). Rapid refill, high uptime: running forklifts with fuel cells. *Fuel Cells Bulletin*, 2010(10), 12–19.

- [140] FedEx (2015). *FedEx Works with US DOE, PlugPower Inc. and CharlotteAmerica to Rollout World's First Zero Emissions, Hydrogen Fuel Cell Ground Support Equipment.*
- [141] Toyota (2010). *TMC, Hino to Provide Fuel-cell Bus for Tokyo Airport Routes.*
- [142] Johnson, J. E. (1995). The Economics of Liquid Hydrogen Supply for Air Transportation. In *Advances in Cryogenic Engineering* (pp. 12–22). Boston, MA: Springer US.
- [143] Brewer, G. D. (2017). *Hydrogen Aircraft Technology* (1st ed.): Routledge.
- [144] NASA, T. B. C. *An exploratory study to determine the integrated technological air transportation system ground requirements of liquid-hydrogen-fueled subsonic, long-haul ...NASA-2699.*
- [145] Korycinski, P. (1978). Air terminals and liquid hydrogen commercial air transports. *International Journal of Hydrogen Energy*, 3(2), 231–250.
- [146] Jones, L., Wuschke, C., and Fahidy, T. (1983). Model of a cryogenic liquid-hydrogen pipeline for an airport ground distribution system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 8(8), 623–630.
- [147] Alder, H. (1987). Hydrogen in air transportation. Feasibility study for Zurich airport, Switzerland. *International Journal of Hydrogen Energy*, 12(8), 571–585.
- [148] Armstrong, F. W., Allen, J. E., and Denning, R. M. (1997). Fuel-related issues concerning the future of aviation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 211(1), 1–11.
- [149] Schmidtchen, U., Behrend, E., Pohl, H.-W., and Rostek, N. (1997). Hydrogen aircraft and airport safety. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1(4), 239–269.
- [150] Benson, C. M., Holborn, P. G., Rolt, A. M., Ingram, J. M., and Alexander, E. Combined Hazard Analyses to Explore the Impact of Liquid Hydrogen Fuel on the Civil Aviation Industry.
- [151] Sefain, M. J. (2005). *Hydrogen aircraft concepts and ground support.*
- [152] *ISO/PAS 15594:2004. Airport hydrogen fuelling facility operations*
- [153] Fredrik, S. (2005). *Potential of reducing the environmental impact of civil subsonic aviation by using liquid hydrogen.*
- [154] Haglind F, Hasselrot A, Singh R. (2006). Potential of reducing the environmental impact of aviation by using hydrogen Part III: Optimum cruising altitude and airport implications. *The Aeronautical Journal*, 110(1110), 553–565.
- [155] Verstraete, D. (2009). *The potential of liquid hydrogen for long range aircraft propulsion.*
- [156] Rondinelli S., Sabatini R., and Gardi A. (2014). *Challenges and Benefits offered by Liquid Hydrogen Fuels in Commercial Aviation.*

- [157] Schutte, J. S., Payan, A. P., Briceno, S. I., and Mavris, D. N. (2010). Hydrogen-Powered Aircraft. In R. Blockley and W. Shyy (Eds.), *Encyclopedia of Aerospace Engineering* (pp. 1–13). Chichester, UK: John Wiley and Sons, Ltd.
- [158] *International Energy Agency, Hydrogen Implementing Agreement (IEAHIA), Case Study: Hydrogen project at Munich Airport* (2007).
- [159] Pehr, K. (2001). Liquid hydrogen for motor vehicles — the world's first public LH2 filling station. *International Journal of Hydrogen Energy*, 26(7), 777–782.
- [160] *Hydrogen Project at Munich Airport* (1999).
- [161] Testa, E., Giammusso, C., Bruno, M., and Maggiore, P. (2014). Analysis of environmental benefits resulting from use of hydrogen technology in handling operations at airports. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16(5), 875–890.
- [162] C. Stiller, P. S. (2010). Airport Liquid Hydrogen Infrastructure for Aircraft Auxiliary Power Units.
- [163] Stockford, J. A., Lawson, C., and Liu, Z. (2019). Benefit and performance impact analysis of using hydrogen fuel cell powered e-taxi system on A320 class airliner. *The Aeronautical Journal*, 123(1261), 378–397.
- [164] Andrieux, C., Roboam, X., Turpin, C., and Sareni, B. (2018). Energy Modelling of a Hydrogen hub (electricity, heat, transport vehicle) for future Airports.
- [165] J Ochoa Robles, J., Giraud Billoud, M., Azzaro-Pantel, C., and Aguilar-Lasserre, A. A. (2019). Optimal Design of a Sustainable Hydrogen Supply Chain Network: Application in an Airport Ecosystem. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(21), 17587–17597.
- [166] Xiang, Y., Cai, H., Liu, J., and Zhang, X. (2021). Techno-economic design of energy systems for airport electrification: A hydrogen-solar-storage integrated microgrid solution. *Applied Energy*, 283, 116374.
- [167] Victor, D. (1990). Liquid hydrogen aircraft and the greenhouse effect. *International Journal of Hydrogen Energy*, 15(5), 357–367.
- [168] Janic, M. (2010). Is liquid hydrogen a solution for mitigating air pollution by airports? *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(5), 2190–2202.
- [169] Janic, M. (2008). The potential of liquid hydrogen for the future ‘carbon-neutral’ air transport system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 13(7), 428–435.
- [170] Yılmaz, İ., İlbaş, M., Taştan, M., and Tarhan, C. (2012). Investigation of hydrogen usage in aviation industry. *Energy Conversion and Management*, 63, 63–69.
- [171] Dincer, I., and Acar, C. (2016). A review on potential use of hydrogen in aviation applications. *International Journal of Sustainable Aviation*, 2(1), 74.
- [172] Albrecht, S. (2021). *Progress in life cycle assessment 2019. Sustainable production, life cycle engineering and management*. Cham, Switzerland: Springer.

- [173] Stadler, P., Caliandro, P., Leonardi, C., and Van Herle, J. *Cost evaluation of large scale hydrogen production for the aviation industry.*
- [174] Godula-Jopek, A., and Westenberger, A. Hydrogen-fueled aeroplanes, 35, 67–85.
- [175] Janić, M. (2014). Greening commercial air transportation by using liquid hydrogen (LH₂) as a fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(29), 16426–16441.
- [176] Marksel, M., Prapotnik, A. B., Hanžič, K., Letnik, T., and Božičnik, S. (2020). Adaptation of Airport Infrastructure for Operation Of Ice-Hybrid And Fuel-Cell Aircraft
- [177] Merino-Martinez, R., Yin F., Francotte T., Zwaag S.V.D., Smeets E., Aalders J., et al. The Cryo-V: Silent and Climate-Neutral Medium Range Aircraft Final DSE Report.
- [178] Amy, C., and Kunycky, A. (2019). *Hydrogen as a Renewable Energy Carrier for Commercial Aircraft.*
- [179] Fusaro, R., Vercella, V., Ferretto, D., Viola, N., and Steelant, J. (2020). Economic and environmental sustainability of liquid hydrogen fuel for hypersonic transportation systems. *CEAS Space Journal*, 12(3), 441–462.
- [180] Clean Sky 2, FCH 2 JU (2020). *Hydrogen-powered aviation :a fact based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050:* Publications Office.
- [181] Hoelzen, J., Silberhorn, D., Zill, T., Bensmann, B., and Hanke-Rauschenbach, R. (2022). Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure – Review and research gaps. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(5), 3108–3130.
- [182] Yüksek Öğretim Kurumu (YÖK) (2022). *Tez Merkez*
- [183] Balat, M. (2008). Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(15), 4013–4029.
- [184] Di Xu, Li, W., Ren, X., Shen, W., and Dong, L. (2020). Technology selection for sustainable hydrogen production: A multi-criteria assessment framework under uncertainties based on the combined weights and interval best-worst projection method. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(59), 34396–34411
- [185] Scipioni, A., Manzardo, A., and Jingzheng, R. (2017). *Hydrogen economy: Supply chain, life cycle analysis and energy transition for sustainability.* London, San Diego: Academic Press an imprint of Elsevier.
- [186] Acar, C., and Dincer, I. (2014). Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(1), 1–12.
- [187] Çelik, D., and Yıldız, M. (2017). Investigation of hydrogen production methods in accordance with green chemistry principles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(36), 23395–23401.

- [188] Turner, J. A. (2004). Sustainable hydrogen production. *Science (New York, N.Y.)*, 305(5686), 972–974.
- [189] Dawood, F., Anda, M., and Shafiullah, G. M. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 3847–3869.
- [190] Koroneos, C. (2004). Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(14), 1443–1450.
- [191] Acar, C., and Dincer, I. (2015). Impact assessment and efficiency evaluation of hydrogen production methods. *International Journal of Energy Research*, 39(13), 1757–1768.
- [192] Acar, C., and Dincer, I. (2019). Review and evaluation of hydrogen production options for better environment. *Journal of Cleaner Production*, 218(39), 835–849.
- [193] Cetinkaya, E., Dincer, I., and Naterer, G. F. (2012). Life cycle assessment of various hydrogen production methods. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(3), 2071–2080.
- [194] Dincer, I., and Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 11094–11111.
- [195] Kothari, R., Buddhi, D., and Sawhney, R. L. (2008). Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 553–563.
- [196] Ozbilen, A., Dincer, I., and Rosen, M. A. (2013). Comparative environmental impact and efficiency assessment of selected hydrogen production methods. *Environmental Impact Assessment Review*, 42(9), 1–9.
- [197] Pilavachi, P. A., Chatzipanagi, A. I., and Spyropoulou, A. I. (2009). Evaluation of hydrogen production methods using the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(13), 5294–5303.
- [198] Koroneos, C., Dompros, A., Roumbas, G., and Moussiopoulos, N. (2005). Advantages of the use of hydrogen fuel as compared to kerosene. *Resources, Conservation and Recycling*, 44(2), 99–113.
- [199] Bicer, Y., and Dincer, I. (2017). Life cycle evaluation of hydrogen and other potential fuels for aircrafts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(16), 10722–10738.
- [200] Daggett, D., Hendricks, R., and Walther, R. *Alternative fuels and their potential impact on aviation*. In 25th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2006) (No. E-15568).
- [201] J.S. Wallace, C. W. (1983). Hydrogen as a fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 8(4), 255–268.
- [202] Aziz, M. (2021). Liquid Hydrogen: A Review on Liquefaction, Storage, Transportation, and Safety. *Energies*, 14(18), 5917.

- [203] Ghoniem, A. F. (2011). Needs, resources and climate change: Clean and efficient conversion technologies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(1), 15–51.
- [204] Agung Tri Wijayanta Takuya Oda Chandra Wahyu Purnomo (2019). Liquid hydrogen, methylcyclohexane, and ammonia as potential hydrogen storage: Comparison review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29), 15026–15044.
- [205] Lanz, A., Heffel, J., Messer, C., and College of the Desert. Energy Technology Training Center (2001). *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies* (No. FTA-CA-26-7022-01.1). United States. Department of Transportation. Federal Transit Administration.
- [206] IEA (2022). *The future of hydrogen, seizing today's opportunities*.
- [207] Krasae-in, S., Stang, J. H., and Neksa, P. (2010). Development of large-scale hydrogen liquefaction processes from 1898 to 2009. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(10), 4524–4533.
- [208] Dewar, J. (1898). Liquid Hydrogen. *Nature*, 58(1499), 270.
- [209] Barron RF. (1966). Cryogenic systems. *Oxford, United Kingdom*.
- [210] Aasadnia, M., and Mehrpooya, M. (2018). Large-scale liquid hydrogen production methods and approaches: A review. *Applied Energy*, 212(4), 57–83.
- [211] Godula-Jopek, A., Jehle, W., and Wellnitz, J. (2012). *Hydrogen Storage Technologies: New Materials, Transport, and Infrastructure*: John Wiley and Sons.
- [212] Chang, H.-M., Ryu, K. N., and Baik, J. H. (2018). Thermodynamic design of hydrogen liquefaction systems with helium or neon Brayton refrigerator. *Cryogenics*, 91, 68–76.
- [213] Nandi, T. K., and Sarangi, S. (1993). Performance and optimization of hydrogen liquefaction cycles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 18(2), 131–139.
- [214] Nandi, T. K., and Sarangi, S. (1993). Performance and optimization of hydrogen liquefaction cycles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 18(2), 131–139.
- [215] Staats, W. L. *Analysis of a supercritical hydrogen liquefaction cycle: Analysis of a supercritical hydrogen liquefaction cycle*, Massachusetts Institute of Technology.
- [216] Kumar, J., Nair, SR, Menon, R. S., Goyal, M., Ansari, N. A., and Chakravarty, A., et al. (Eds.). 2017. *Helium refrigeration system for hydrogen liquefaction applications. : Vol. 171*.
- [217] M. Ilyn, M. I. Bartashevich, A. V. Andreev, E. A. Tereshina, V. Zhukova, A. Zhukov, and J. Gonzalez (2011). Magnetocaloric effect in single crystal Nd₂Co₇. *Journal of Applied Physics*, 109(8), 83932.
- [218] Numazawa, T., Kamiya, K., Utaki, T., and Matsumoto, K. (2014). Magnetic refrigerator for hydrogen liquefaction. *Cryogenics*, 62(11), 185–192.

- [219] Andersson, J., and Grönkvist, S. (2019). Large-scale storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 11901–11919.
- [220] Baker, C. (1978). A study of the efficiency of hydrogen liquefaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 3(3), 321–334.
- [221] Institute of Slush Hydrogen (2022). *What're slush hydrogen and slush nitrogen?*.
- [222] Juangsa, F. B., and Aziz, M. (2019). Integrated system of thermochemical cycle of ammonia, nitrogen production, and power generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(33), 17525–17534.
- [223] *Progress in Life Cycle Assessment 2019* (2021): Springer, Cham.
- [224] Penke, C., Falter, C., and Batteiger, V. (2021). Pathways and Environmental Assessment for the Introduction of Renewable Hydrogen into the Aviation Sector. In *Progress in Life Cycle Assessment 2019* (pp. 41–52). Springer, Cham.
- [225] NASA (1976). *LH2 Airport Requirements Study*, CR2700.
- [226] W. A. Amos, “Costs of Storing and Transporting Hydrogen,”
- [227] Ball, M., and Wietschel, M. (2009). The future of hydrogen – opportunities and challenges☆. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(2), 615–627.
- [228] I IATA (2020). *Liquid hydrogen as a potential low-carbon fuel for aviation*.
- [229] Edwards, P. P., Kuznetsov, V. L., and David, W. I. F. (2007). Hydrogen energy. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 365(1853), 1043–1056.
- [230] Bamberger, C. E., and Richardson, D. M. (1976). Hydrogen production from water by thermochemical cycles. *Cryogenics*, 16(4), 197–208.
- [231] Rossmeisl, J., Logadottir, A., and Nørskov, J. K. (2005). Electrolysis of water on (oxidized) metal surfaces. *Chemical Physics*, 319(1-3), 178–184.
- [232] Ji, M., and Wang, J. (2021). Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(78), 38612–38635..
- [233] Nikolaidis, P., and Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67(Part N), 597–611.
- [234] El-Emam, R. S., and Özcan, H. (2019). Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale clean hydrogen production. *Journal of Cleaner Production*, 220(31), 593–609.
- [235] Chmielniak, T., and Sciazko, M. (2003). Co-gasification of biomass and coal for methanol synthesis. *Applied Energy*, 74(3-4), 393–403.
- [236] Armaroli, N., and Balzani, V. (2011). The hydrogen issue. *ChemSusChem*, 4(1), 21–36.

- [237] Dellantonio, A., Fitz, Frank Repmann, W.J., and Wenzel, W.W (2010). Disposal of Coal Combustion Residues in Terrestrial Systems: Contamination and Risk Management. *Journal of Environmental Quality*, 39(3), 761–775.
- [238] Kuo, P.-C., Wu, W., and Chen, W.-H. (2014). Gasification performances of raw and torrefied biomass in a downdraft fixed bed gasifier using thermodynamic analysis. *Fuel*, 117, 1231–1241.
- [239] Sun, F., Xu, W., Wang, G., and Sun, B. (2017). A technique to control major hazards of the coal gasification process developed from critical events and safety barriers. *Process Safety Progress*, 36(4), 382–391.
- [240] Wang, Y., and Zhang, S. (2017). Economic assessment of selected hydrogen production methods: A review. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 12(11), 1022–1029.
- [241] Schädel, B. T., Duisberg, M., and Deutschmann, O. (2009). Steam reforming of methane, ethane, propane, butane, and natural gas over a rhodium-based catalyst. *Catalysis Today*, 142(1-2), 42–51.
- [242] Adris, A. M., Pruden, B. B., Lim, C. J., and Grace, J. R. (1996). On the reported attempts to radically improve the performance of the steam methane reforming reactor, 74(2).
- [243] Jafari, M.J., Mohammadfam, I., and Zarei, E. (2014). Analysis and Simulation of Severe Accidents in a Steam Methane Reforming Plant. *International Journal of Occupational Hygiene*, 6(3), 120–130.
- [244] ECAV (2022). *Biomass Energy Advantages And Disadvantages (Pros and Cons)*.
- [245] Choi, J.-S., Shin, Y.-J., Lee, K.-Y., and Choi, J.-H. (2015). Two-dimensional simulation of hydrogen iodide decomposition reaction using fluent code for hydrogen production using nuclear technology. *Nuclear Engineering and Technology*, 47(4), 424–433.
- [246] Brown, L. C., Besenbruch, G. E., Lentsch, R. D., Schultz, K. R., Funk, J. F., Pickard, P. S., Et Al. *High Efficiency Generation Of Hydrogen Fuels Using Nuclear Power* (General Atomics, San Diego, CA (United States)).
- [247] an-Ping Chen (2010). *Hydrogen Delivey Infrastructure Option Analysis*: Office of Scientific and Technical Information (OSTI).
- [248] Wang, M., Wang, G., Sun, Z., Zhang, Y., and Xu, D. (2019). Review of renewable energy-based hydrogen production processes for sustainable energy innovation. *Global Energy Interconnection*, 2(5), 436–443.
- [249] Evans, A., Strezov, V., and Evans, T. J. (2009). Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 1082–1088.
- [250] Egré, D., and Milewski, J. C. (2002). The diversity of hydropower projects. *Energy Policy*, 30(14), 1225–1230.

- [251] Balat, M. (2006). Current Geothermal Energy Potential in Turkey and Use of Geothermal Energy. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 1(1), 55–65.
- [252] Lemus, R. G., and Martínez Duart, J. M. (2010). Updated hydrogen production costs and parities for conventional and renewable technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(9), 3929–3936.
- [253] Askari, M.B., Mirzaei, V., Mirhabibi, M., and Dehghani, P. (2015). *Hydroelectric Energy Advantages and Disadvantages* (Vol. 2).
- [254] Fang, Z. S., Lan, J. W., and Qing, Z. (2018). *Cost effectiveness analysis model for wind power produce hydrogen system and simulation*.
- [255] Yong, Z., and Xiaohui, S. (2010). Tidal energy: Technologies and recent developments. In *2010 IEEE International Energy Conference*. IEEE.
- [256] Shetty, C., and Priyam, A. (2022). A review on tidal energy technologies. *Materials Today: Proceedings*, 56(5), 2774–2779.
- [257] Ghazvini, M., Sadeghzadeh, M., Ahmadi, M. H., Moosavi, S., and Pourfayaz, F. (2019). Geothermal energy use in hydrogen production: A review. *International Journal of Energy Research*, 6(5), 340.
- [258] Rybach, L. (2003). Geothermal energy: sustainability and the environment. *Geothermics*, 32(4-6), 463–470.
- [259] TWI. *What are the Advantages of Using Geothermal?*.
- [260] Kazim, A. (2010). Strategy for a sustainable development in the UAE through hydrogen energy. *Renewable Energy*, 35(10), 2257–2269.
- [261] Ohlig, K., and Decker, L. The latest developments and outlook for hydrogen liquefaction technology, 1311–1317.
- [262] Bracha, M., Lorenz, G., Patzelt, A., and Wanner, M. (1994). Large-scale hydrogen liquefaction in Germany. *International Journal of Hydrogen Energy*, 19(1), 53–59.
- [263] Alekseev, A. (2016). Hydrogen Liquefaction. In *Hydrogen Science and Engineering : Materials, Processes, Systems and Technology* (pp. 733–762). John Wiley and Sons, Ltd.
- [264] Krasae-in, S. *Efficient Hydrogen Liquefaction Processes*, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Institutt for energi- og prosesssteknikk; Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Institutt for energi- og prosesssteknikk
- [265] Syed, M. (1998). An economic analysis of three hydrogen liquefaction systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(7), 565–576.
- [266] DOE. *Current Status of Hydrogen Liquefaction Costs*.

- [267] Cardella, U., Decker, L., and Klein, H. (2017). Roadmap to economically viable hydrogen liquefaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(19), 13329–13338.
- [268] Wang, G., Ogden, J. M., and Sperling, D. (2008). Comparing air quality impacts of hydrogen and gasoline. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 13(7), 436–448.
- [269] Yang, C., and Ogden, J. (2007). Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(2), 268–286.
- [270] Ustolin, F., Lamb, J. J., Burheim, O. S., and Pollet, B. G. Energy and Safety of Hydrogen Storage, 213, 133–153.
- [271] Lee, Y., Lee, U., and Kim, K. (2021). A comparative techno-economic and quantitative risk analysis of hydrogen delivery infrastructure options. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(27), 14857–14870.
- [272] Gu, Y., Chen, Q., Xue, J., Tang, Z., Sun, Y., and Wu, Q. (2020). Comparative techno-economic study of solar energy integrated hydrogen supply pathways for hydrogen refueling stations in China. *Energy Conversion and Management*, 223(11), 113240.
- [273] Demir, M. E., and Dincer, I. (2018). Cost assessment and evaluation of various hydrogen delivery scenarios. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(22), 10420–10430.
- [274] Reddi, K., Mintz, M., Elgowainy, A., and Sutherland, E. Challenges and Opportunities of Hydrogen Delivery via Pipeline, Tube-Trailer, LIQUID Tanker and Methanation-Natural Gas Grid, 109, 849–874.
- [275] U.S. DRIVE (2013). *Hydrogen Delivery Technical Team Roadmap*..
- [276] Hydrogen Council (2020). *Path to Hydrogen Competitiveness: A Cost Perspective*: Hydrogen Knowledge Centre.
- [277] Diermann, R. (2020). *Hydrogen can be transported by rail, German railway company says*..
- [278] ACI (2010). *Airside Safety HANDBOOK 4th edition 2010*
- [279] Chitta, S., Jain R.K. (2017). Last mile delivery using drones
- [280] Goodchild, A., and Toy, J. (2018). Delivery by drone: An evaluation of unmanned aerial vehicle technology in reducing CO₂ emissions in the delivery service industry. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61(4), 58–67.
- [281] Kellermann, R., Biehle, T., and Fischer, L. (2020). Drones for parcel and passenger transportation: A literature review. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 4(276), 100088.
- [282] ACI (2022). *Drones and airports: When things can go wrong*..
- [283] EASA. *Drone Incident Management at Aerodromes - Part 1*.

- [284] Linstrom, P. NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database 69.
- [285] Peschka, W. (2012). *Liquid Hydrogen: Fuel of the Future*: Springer Science and Business Media.
- [286] DOE. *Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs*.
- [287] Barthelemy, H., Weber, M., and Barbier, F. (2017). Hydrogen storage: Recent improvements and industrial perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(11), 7254–7262.
- [288] Moradi, R., and Groth, K. M. (2019). Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 12254–12269.
- [289] Weber, M., and Perrin, J. (2008). Hydrogen Transport and Distribution. In A. León (Ed.), *Green energy and technology. Hydrogen technology. Mobile and portable applications / Aline Leon, (ed.)* (pp. 129–149). Berlin, London: Springer.
- [290] Osman, A. I., Mehta, N., Elgarahy, A. M., Hefny, M., Al-Hinai, A., Al-Muhtaseb, A. 'a. H., and Rooney, D. W. (2022). Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(1), 153–188.
- [291] Rondinelli, S., Gardi, A., Kapoor, R., and Sabatini, R. (2017). Benefits and challenges of liquid hydrogen fuels in commercial aviation. *International Journal of Sustainable Aviation*, 3(3), 200.
- [292] Najjar, Y. S.H. (2013). Hydrogen safety: The road toward green technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(25), 10716–10728.
- [293] Agarwal, P., Sun, X., Gauthier, P. Q., and Sethi, V. Injector Design Space Exploration for an Ultra-Low NOx Hydrogen Micromix Combustion System.
- [294] Chevron. *Alternative Jet Fuels*.
- [295] A CI (2021). *Integration of Hydrogen Aircraft into the Air Transport System: An Airports Operations and Infrastructure Review*.
- [296] Kolodziejczk, B. and Ong, W. *Hydrogen power is safe and here to stay..*
- [297] Li, G. *The Hydrogen Fuel Pathway for Air Transportation*
- [298] IATA (2008). *IATA Guidance on Airport Fuel Storage Capacity - EDITION 1*.
- [299] Ewan, B., and Allen, R. (2005). A figure of merit assessment of the routes to hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(8), 809–819.
- [300] Afgan, N. H., and Carvalho, M. G. (2002). Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants. *Energy*, 27(8), 739–755.
- [301] Amgad Elgowainy, Krishna Reddi, Michael Wang (2013). *Life-cycle analysis of hydrogen on-board storage options*.
- [302] Sozinova, O. *H2A Delivery Analysis and H2A Delivery Components Model (Sunum)*

- [303] BloombergNEF. *Hydrogen Economy Outlook Key messages*.
- [304] IEA (2022). *Fuels and technologies*.
- [305] Student Energy. *Energy System Map*
- [306] Gondal, I. A. Hydrogen transportation by pipelines, 21, 301–322.
- [307] Cnnturk (2019). *İstanbul Havalimanı'nda hizmet verilen yolcu sayısı 40 milyonu geçti*.



ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO:

EĞİTİM BİLGİLERİ

2011-2017 Uçak Gövde Motor Bakım Bölümü- Lisans (3.40/4.00)

Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye

2019-Devam ediyor Uçak Gövde Motor Bakım ABD. – Yüksek Lisans

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye

İŞ TECRÜBESİ

2017-2021 İşçi

1. HBFM'lüğü

Savunma Sanayi

YAYINLAR

International Symposium on Sustainable Aviation-2021 (ISSA'21) sempozyumunda ‘‘Overview of Hydrogen-Powered Air Transportation’’ başlıklı bildiri sunumu (ISBN: 978-605-80140-7-7, <https://2021.issasci.org/wp-content/uploads/2022/03/ISSA21-Abstract-Book.pdf>)



**HAVALİMANLARINDA ENERJİ
TAŞIYICISI OLARAK HİDROJEN TEDARİK
ZİNCİRİ SENARYOLARI VE ANALİZLERİ**

Yüksek Lisans Tezi

Hurşit DEĞİRMENCİ

Eskişehir 2022