

T.C.
SAHA İSTANBUL & TÜBİTAK TÜSSİDE SAHA AKADEMİ MBA
YÖNETİCİ GELİŞTİRME PROGRAMI

ASKERİ ARAÇLARDA HİDROJEN TEKNOLOJİLERİ



Muhammed Can ŞAHİN

Danışman
Dr. Uğur TARÇIN
İstanbul-2026

ÖNSÖZ

Bu araştırmada, savunma sanayii ve askeri ulaşım sistemlerinde hidrojen teknolojilerinin kullanılma potansiyeli incelenmiştir. Çalışma kapsamında hidrojenin üretimi, depolanması, yakıt hücreleriyle kullanımı ve askeri araçlara sağlayabileceği teknik ve operasyonel katkılar değerlendirilmiştir. Ayrıca hidrojenin insansız hava araçları, kara araçları, deniz sistemleri ve sahra güç sistemleri açısından sağlayabileceği avantajlar ele alınmıştır.

Çalışmanın hazırlanmasında hidrojen enerjisi, yakıt hücreleri, depolama teknolojileri ve enerji güvenliği konularındaki akademik kaynaklardan yararlanılmıştır. NATO'nun enerji güvenliği ve hidrojen yakıt hücreleriyle ilgili güncel çalışmaları da savunma sanayii bağlamında ayrıca dikkate alınmıştır.



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	1
İÇİNDEKİLER.....	3
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	3
KISALTMALAR.....	3
ÖZET.....	4
Giriş.....	5
1. Hidrojen Enerjisi.....	6
1.1. Enerji Taşıyıcısı Olarak Hidrojen.....	7
2. Hidrojen Enerjisi Kaynakları.....	8
2.1. Hidrojen Üretiminin Çevresel ve Ekonomik Değerlendirmesi.....	10
3. Hidrojenin Depolanması.....	14
3.1. Hidrojenin Depolanmasının Çevresel ve Ekonomik Değerlendirmesi.....	15
4. Hidrojen Enerjisinin Uygulamaları.....	17
4.1. Hidrojen Enerjisinin Askeri Uygulamaları.....	18
İnsansız Hava Araçları (İHA/SİHA) ve Havacılık.....	19
Kara Araçları ve Taktik Mobilite.....	19
Deniz Sistemleri ve Sualtı Platformları.....	20
4.2. NATO Çalışmaları ve Enerji Güvenliği Açısından Değerlendirme.....	20
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	20
6. KAYNAKLAR.....	23
GENİŞLETİLMİŞ ÖZET.....	28

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Hidrojenin üretimi ve yanmasının karbon emisyonu üzerindeki etkisi [6]

Şekil 2. Üretim süreçleri, hammaddeler ve enerji kaynakları [7]

Şekil 3. Farklı hidrojen üretim yöntemleri için küresel ısınma potansiyeli [8]

Şekil 4. Enerji sistemlerinin çevresel özellikleri [9]

Şekil 5. Hidrojen üretim teknolojilerinin maliyetleri [15]

Şekil 6. Hidrojen depolama yöntemleri [29]

Şekil 7. Hidrojen depolama yöntemlerinin maliyeti [17]

Şekil 8. Hidrojenin kullanım alanları [21]

Şekil 9. Yakıt pilinin yapısı [22]

KISALTMALAR

AIP: Havadan Bağımsız Tahrik

CHP: Birleşik Isı ve Güç Sistemi

FCEV: Yakıt Hücreli Elektrikli Araç

H2-ICE: Hidrojen İçten Yanmalı Motor

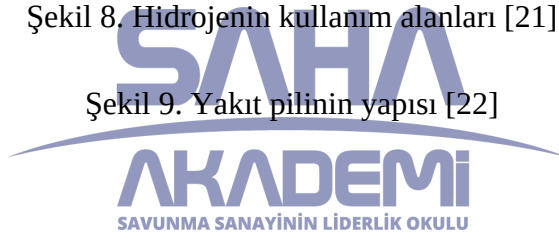
HFC: Hidrojen Yakıt Hücresi

IR: Kızılötesi

İDA: İnsansız Deniz Aracı

İHA: İnsansız Hava Aracı

LOHC: Sıvı Organik Hidrojen Taşıyıcılar



SiHA: Silahlı İnsansız Hava Aracı

Askeri Araçlarda Hidrojen Teknolojileri

Hydrogen Technologies in Military Vehicles

MUHAMMED CAN ŞAHİN

TCİ

m_can_sahin@outlook.com

ÖZET

Modern savunma stratejilerinde enerji güvenliği, lojistik süreklilik ve operasyonel gizlilik önemli konular arasında yer almaktadır. Bu çalışmanın amacı, hidrojen teknolojilerinin özellikle askeri ulaşım sistemlerinde ve savunma sanayiinde kullanılabilirliğini incelemektir. Çalışmada hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak özellikleri, üretim yöntemleri, depolama seçenekleri ve yakıt hücreleriyle birlikte askeri araçlarda sağlayabileceği avantajlar ele alınmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda hidrojenin düşük emisyon, sessiz çalışma, düşük ısı izi ve uzun görev süresi gibi nedenlerle insansız sistemler, kara araçları, sahra güç sistemleri ve deniz platformları için önemli bir seçenek olabileceği görülmüştür. Bununla birlikte hidrojenin yaygın kullanımı için üretim maliyeti, güvenli depolama, altyapı ve bakım gibi sorunların çözülmesi gerekmektedir. Çalışmada ayrıca NATO'nun enerji güvenliği ve hidrojen yakıt hücresi uygulamalarına ilişkin güncel çalışmaları da değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen teknolojileri, yakıt hücreleri, askeri araçlar, enerji güvenliği, savunma sanayii.

ABSTRACT

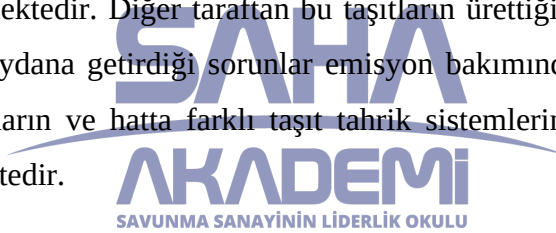
Energy security, logistics continuity, and operational stealth are important issues in modern defense strategies. The aim of this study is to examine the usability of hydrogen technologies, especially in military transportation systems and the defense industry. In this study, the properties of hydrogen as an energy carrier, production methods, storage options, and the possible advantages of hydrogen fuel cells for military vehicles are discussed. As a result of the review, it was found that hydrogen may be an important option

for unmanned systems, land vehicles, field power systems, and naval platforms due to its low emissions, quiet operation, low thermal signature, and potential for longer mission duration. However, production cost, safe storage, infrastructure, and maintenance issues need to be solved for the wider use of hydrogen. In addition, current NATO studies on energy security and hydrogen fuel cell applications are also evaluated within the scope of the study.

Keywords: *Hydrogen technologies, fuel cells, military vehicles, energy security, defense industry.*

Giriş

Dünya genelinde meydana gelen nüfus artışıyla birlikte artan enerji gereksinimine karşın halihazırda kullanılan fosil kökenli enerji kaynaklarının hızla tükenmekte olması alternatif kaynak arayışını son yıllarda hızlandırmıştır. Benzin ve motorin gibi petrol kökenli yakıtların sınırlı rezervlere sahip olması, içten yanmalı motorlarda alternatif yakıtların kullanımını gerektirmektedir. Diğer taraftan bu taşıtların ürettiği egzoz gazlarının çevre kirliliği açısından meydana getirdiği sorunlar emisyon bakımından da üstün niteliklere sahip alternatif yakıtların ve hatta farklı taşıt tahrik sistemlerinin kullanımını giderek zorunlu hale getirmektedir.



Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'nın 2022 yılı enerji dönüşümü raporunda da fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının artırılması ve yeşil hidrojen gibi yeni enerji taşıyıcılarının geliştirilmesi enerji dönüşümünün önemli başlıkları arasında gösterilmektedir [1].

Dünya genelinde orduların fosil yakıtlara bağımlılığı, lojistik hatların güvenliğini riske atmaktadır. Petrol kökenli yakıtların sınırlı rezervleri ve operasyonel maliyetleri, askeri sahada alternatif enerji arayışını zorunlu kılmıştır. Askeri araçların yaydığı egzoz gazları ve yüksek ısı izi, tespit edilebilirliği artırarak güvenlik açığı oluşturmaktadır.

Bu bağlamda hidrojen, düşük emisyon ve düşük iz avantajları nedeniyle askeri ulaşım sistemlerinde değerlendirilebilecek önemli enerji seçeneklerinden biridir.

Çalışmanın kuramsal bölümlerinde hidrojen enerjisine ilişkin genel çerçeve, konuya ilişkin derleme niteliğindeki kaynaklardan [7], [29] yararlanılarak oluşturulmuş; askeri

uygulamalar ve Türkiye'ye yönelik deęerlendirmeler ise yazarın kendi çözümlemesine dayandırılmıştır. Hidrojen çok yönlü bir enerji taşıyıcısıdır. Birden fazla hammaddeden üretilebilir ve çok farklı alanlarda kullanılabilir. Bu durum ulaşım sektöründe hidrojenin kullanımını öne çıkarmaktadır. Bu nedenle hidrojen enerjisi ve kullanım alanları incelenerek ulaşım da hidrojen enerjisinin kullanılabilirliği her geçen gün daha ciddi bir şekilde deęerlendirilmektedir.

1. Hidrojen Enerjisi

Hidrojen, normal koşullarda renksiz, kokusuz, tatsız ve zehirsiz bir gazdır. Tipik olarak iki atomlu bir molekül olarak bulunur, yani her molekülün iki hidrojen atomu vardır; saf hidrojenin genellikle “H₂” olarak ifade edilmesinin nedeni budur. Hidrojen, evrendeki en bol bulunan elementtir ve evrenin ağırlıkça yüzde 90'ını oluşturur. Bununla birlikte, dięer elementlerle kolayca birleştii için saf haliyle yaygın olarak bulunmaz. Ayrıca standart basınçta litre başına 0,08988 gram yoğunluęa sahip olan en hafif elementtir.

Hidrojenin yakıt olarak kullanımını etkileyen birkaç önemli kimyasal özellięi vardır [2]:

- Gezegende yaşam için kesinlikle gerekli olan suyu oluşturmak için oksijenle birleşir.
- Ağırlık başına yüksek enerji içeriğine sahiptir (benzinin yaklaşık 3 katı), ancak standart sıcaklık ve basınçta hacim başına enerji yoğunluęu oldukça düşüktür. Hacimsel enerji yoğunluęu, hidrojeni artan basınç altında veya sıvı olarak çok düşük sıcaklıklarda depolayarak artırılabilir. Hidrojen ayrıca metal hidritlere adsorbe edilebilir.
- Hidrojen oldukça yanıcıdır; tutuşturmak ve yanmasını sağlamak için sadece az miktarda enerji gerekir. Ayrıca geniş bir yanıcılık aralıęına sahiptir, yani hacimce havanın yüzde 4 ila 74'ünü oluşturduğunda yanabilir.
- Hidrojen soluk mavi, neredeyse görünmez bir alevle yanar ve hidrojen yangınlarının görülmesini zorlaştırır.
- Hidrojenin yanması karbondioksit (CO₂), partikül veya kükürt emisyonları üretmez. Bazı koşullar altında azot oksit (NOX) emisyonları üretebilir.

- Hidrojen, etanolün reforme edilmesi ve suyun elektrolizi gibi yenilenebilir kaynaklardan üretilebilir.

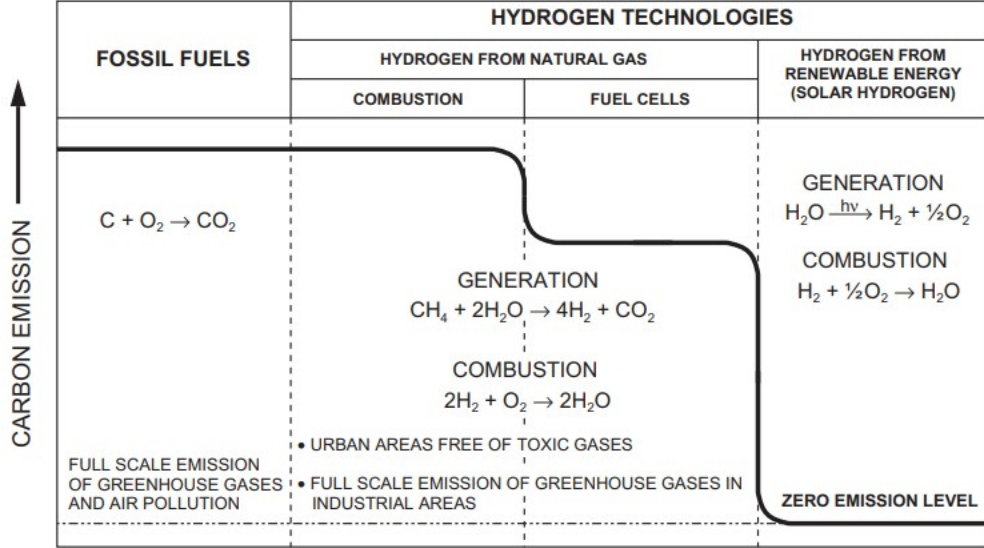
1.1. Enerji Taşıyıcısı Olarak Hidrojen

Hidrojenin enerji taşıyıcısı niteliği literatürde başlıca Sharma vd. [29] tarafından derlenen çerçevede ele alınmakta olup, aşağıdaki değerlendirme bu çerçeveye dayanmaktadır. Hidrojen, birincil bir enerji kaynağı değildir; su, biyokütle ve fosil yakıtlar gibi kaynaklardan üretilen bir enerji taşıyıcısıdır [5]. Bileşik hâlde bulunan en bol ve en hafif element olması, serbest hâlde ise bulunmaması bu niteliğin doğrudan sonucudur. Taşıyıcılığın neden gerekli olduğu, yenilenebilir kaynakların yapısından anlaşılmaktadır: bu kaynaklar çevre kirliliğine yol açmamakla birlikte büyük bölümü zamana, hava durumuna veya konuma bağlı çalışmakta, bu da arz ile talep arasında bir boşluk doğurmaktadır. Hidrojen, depolanabilmesi ve taşınabilmesi sayesinde bu boşluğu doldurabilmekte ve mevcut enerji altyapısının yerini alabilecek bir seçenek olarak önerilmektedir [3]. Sürekli kullanımla tükenmemesi, kirlletici madde içermemesi ve sağlık sorununa yol açmaması nedeniyle sürdürülebilir bir taşıyıcı olarak nitelendirilmektedir [4]. Fiziksel üstünlüğü ise kütsel enerji içeriğinde ortaya çıkmakta; gravimetrik enerji yoğunluğu geleneksel yakıtların iki ilâ üç katına ulaşırken hacimsel enerji yoğunluğu düşük kalmaktadır [5]. Sudan kolaylıkla üretilebilmesi ve ölçeklenebilir olması, hidrojenle çalışan endüstriyel tesislerden jet uçaklarına kadar farklı uygulamalarda kullanımına imkân vermektedir. Bu özellikler askerî kullanım açısından iki yönlü bir sonuç doğurmaktadır: birim kütle başına yüksek enerji içeriği menzile ve görev süresi bakımından avantaj sağlarken, düşük hacimsel yoğunluk platform üzerinde ayrılacak hacmi kritik bir tasarım kısıtı hâline getirmektedir.

Hidrojen geleceğin enerji çözümü olarak öngörülmektedir. Bir enerji kaynağı olarak, enerji gereksinimlerini karşılama ve CO₂ emisyonlarını düşürme potansiyeline sahiptir. Fosil yakıtlar havada yandığında sera gazı yayar, hidrojen ise yan ürün olarak su ile temiz bir enerji üretir. Hidrojen ve fosil yakıt teknolojilerinin karşılaştırması Şekil 1'de gösterilmektedir. Konvansiyonel yöntemlerle üretilen hidrojenin kullanılması, yakıt hücrelerinde kullanıldığında karbon emisyonunu yaklaşık %20 oranında azaltabilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak hidrojen üretilerek karbon

emisyonda önemli bir azalma, yani sıfır emisyon seviyesi elde edilebilir [6]. Bu nedenle, ilişkili olduğu teknolojiler temiz ise, hidrojen temiz bir enerji taşıyıcısı olabilir.

Şekil 1. Hidrojenin üretimi ve yanmasının karbon emisyonu üzerindeki etkisi [6]



Kaynak: [6] nolu kaynaktaki verilerden yararlanılarak yazar tarafından düzenlenmiştir.

2. Hidrojen Enerjisi Kaynakları

Hidrojen üretim süreçlerinin sınıflandırılmasında Sherif vd. [7] tarafından ortaya konan çerçeve esas alınmıştır. Üretim yönteminin seçimi iki değişkene bağlıdır: kullanılan hammadde ve sürece verilen enerjinin kaynağı. Bu iki değişken, üretilen hidrojenin karbon ayak izini nihai olarak belirlemektedir. Söz konusu belirleyicilik, hidrojenin doğada serbest hâlde bulunmamasından kaynaklanmaktadır; element başlıca su ve doğal gaz içinde, daha düşük derişimlerde ise biyokütle, fosil yakıtlar ve hidrojen içeren diğer bileşiklerde yer almaktadır. Dolayısıyla hidrojen üretimi, yoğun enerji gerektiren ayrıştırma süreçlerine dayanmaktadır.

Süreçler, kendilerine verilen enerjinin biçimine göre ayrışmaktadır. Fotokimyasal süreçlerde enerji girdisi, ışık fotonlarının doğrudan soğurulmasıyla sağlanmaktadır. Termokimyasal süreçlerde enerji, yüksek sıcaklıkta ısı olarak verilmekte; bu ısı güneş ve biyokütle gibi yenilenebilir kaynaklardan ya da fosil yakıt gibi konvansiyonel kaynaklardan elde edilebilmektedir. Elektrokimyasal süreçlerde ise girdi elektriktir ve elektrik yine her iki kaynak grubundan üretilebilmektedir. Bu üç kategorinin

birleşimlerinden oluşan melez süreçler de bulunmaktadır. Hammadde çeşitliliğinin fazlalığı, süreç ile enerji kaynağı arasındaki eşleşmeleri daha da çoğaltmakta ve tablonun karmaşıklaşmasına yol açmaktadır. Üretimin karbon ayak izi, hidrojenin sürdürülebilir bir yakıt sayılıp sayılamayacağını belirleyen temel ölçüttür. İlgili hammaddeler ve enerji kaynaklarıyla birlikte üretim süreçlerine ilişkin örnekler Şekil 2'de verilmektedir [7].

Şekil 2. Üretim süreçleri, hammaddeler ve enerji kaynakları [7]

	Processes	Raw Materials	Source of Energy
Electrochemical	Electrolysis	<ul style="list-style-type: none"> • Water 	<ul style="list-style-type: none"> • Electricity from renewable energy sources (e.g., wind, geothermal, solar, hydro) • Electricity from nonrenewables (e.g., fossil fuels, nuclear)
Thermochemical	Reforming	<ul style="list-style-type: none"> • Natural gas • Hydrocarbons • + Water 	<ul style="list-style-type: none"> • Combustion of natural gas/syngas • Concentrating solar thermal
	Gasification	<ul style="list-style-type: none"> • Coal • Carbonaceous materials • Biomass • + Water 	<ul style="list-style-type: none"> • Combustion of coal/biomass/ carbonaceous materials/syngas • Concentrating solar thermal
	Decomposition	<ul style="list-style-type: none"> • Natural gas • Fossil fuel hydrocarbons • Biomethane • Biohydrocarbons 	<ul style="list-style-type: none"> • Natural gas combustion • Concentrating solar thermal
	Thermolysis	<ul style="list-style-type: none"> • Water 	<ul style="list-style-type: none"> • Concentrating solar thermal
	Thermochemical cycles	<ul style="list-style-type: none"> • Water 	<ul style="list-style-type: none"> • Concentrating solar thermal • Nuclear heat
Photochemical	Photosynthesis	<ul style="list-style-type: none"> • Water 	<ul style="list-style-type: none"> • Solar radiation, artificial light
	Photobiological	<ul style="list-style-type: none"> • Microbial (e.g., algae) • + Water 	<ul style="list-style-type: none"> • Solar radiation

Kaynak:7] numaralı kaynaktaki verilerden yararlanılarak yazar tarafından düzenlenmiştir.

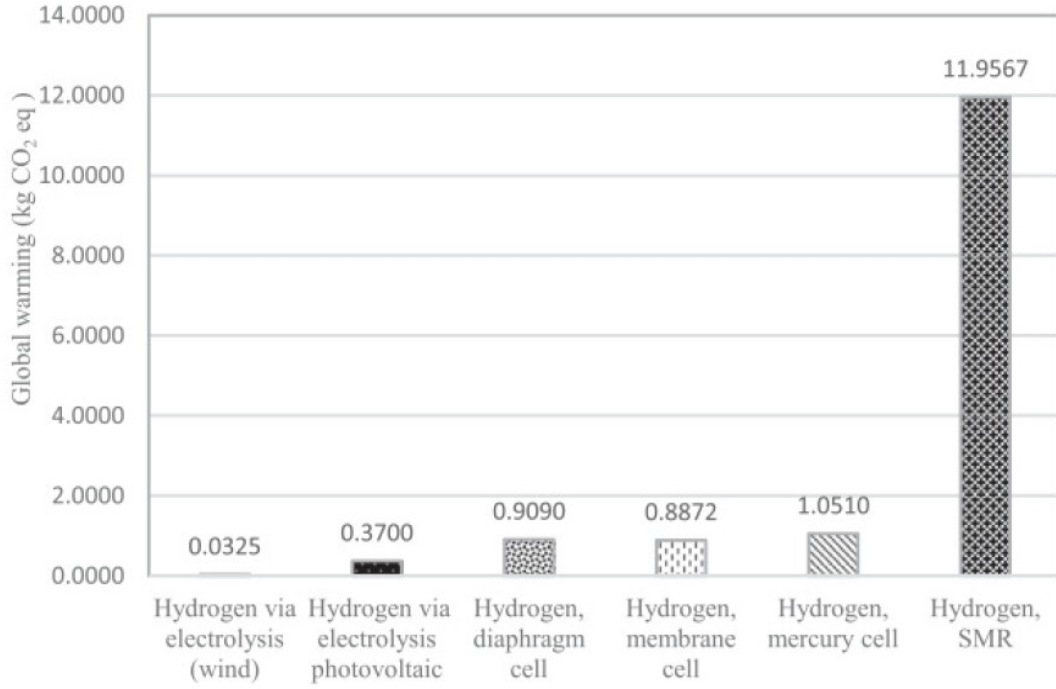
Aynı kaynaktaki [7] vurgulandığı üzere, karbon ayak izi bir yaşam döngüsü değerlendirmesi aracılığıyla belirlenmektedir. Bu değerlendirme; hammaddelerin çıkarılması ve işlenmesinden imalat, nakliye, dağıtım, geri dönüşüm ve nihai bertarafa kadar uzanan zincirde kullanılan enerji ile malzemeleri ve çevreye salınan atıkları tanımlayıp nicelendirmektedir. Hammadde bakımından belirleyici özellik, başlangıç malzemesinin çevreye emisyon verilmeden yeniden oluşturulabilmesidir; enerji kaynağı bakımından ise yenilenebilir olup olmamasıdır. Teorik olarak sınıra yaklaşan bir ayak izinin en çok anılan örneği, güneş, rüzgâr, hidroelektrik ya da başka bir yenilenebilir elektrik kaynağıyla çalıştırılan su elektrolizidir. Suyu hem hammadde hem yenilenebilir enerji kaynağı olarak

kullanan güneş termokimyasal çevrimleri de aynı gruba girmekte; bu çevrimler nükleer proses ısıyla da yürütülebilmektedir. Düşük ayak izli termokimyasal süreçlere bir diğer örnek, biyokütlenin yanmasından ya da yoğunlaştırılmış güneş enerjisinden elde edilen ısıyla biyokütlenin gazlaştırılmasıdır. Katı karbonlu hammaddelerin – kömür, kok kömürü, biyokütle, bitüm ve karbon içeren atıklar – gelecekte taşıyacağı önem nedeniyle gazlaştırma teknolojileri hızla gelişmektedir. Ayak izi yüksek süreçlerin başında ise doğal gazın, fosil yakıt yanmasından elde edilen ısıyla yeniden biçimlendirilmesi gelmektedir; ekonomik uygulanabilirliği nedeniyle endüstriyel ölçekte hâlen en yaygın yöntem budur. Kömürün hammadde, kömür yanmasının ise proses ısısı kaynağı olduğu durumlarda ortaya çıkan yüksek ayak izi, karbondioksit yakalama teknolojileriyle azaltılabilmektedir. Askerî uygulamalar bakımından bu sınıflandırmanın pratik karşılığı, üretim yönteminin yalnızca karbon ayak izini değil sahada yerinde üretim imkânını da belirlemesidir; elektrokimyasal süreçler taşınabilir sistemlere uyarlanabilirken termokimyasal süreçler sabit tesis gerektirmektedir.

2.1. Hidrojen Üretiminin Çevresel ve Ekonomik Değerlendirmesi

Üretim yönteminin çevresel sonucu, kullanılan enerji kaynağına göre keskin biçimde değişmektedir. Fosil yakıtlardan elde edilen hidrojen, bu yakıtların doğrudan yanması yoluyla küresel ısınmaya katkı vermektedir. Buna karşılık güneş hidrojen enerji sistemleri ve elektroliz gibi alternatif kaynaklara dayanan üretim, geri dönüştürülebilir olması nedeniyle kalıcı, temiz ve kirlilik içermeyen bir enerji sunmaktadır.

Şekil 3. Farklı hidrojen üretim yöntemleri için küresel ısınma potansiyeli [8]



Kaynak: [8] numaralı kaynaktaki verilerden yararlanılarak yazar tarafından düzenlenmiştir.

Şekil 3 ve Tablo 1 birlikte incelendiğinde, fosil yakıtlara dayanan buhar reforming yönteminin küresel ısınma potansiyeli bakımından açık ara önde olduğu görülmektedir [8]. Bu sonucun kaynağı yöntemin hammaddesidir; metan kullanımı doğrudan sera gazı salımına yol açmaktadır. Diğer yöntemlerdeki daha düşük değerler ise hammaddeden ya da kullanım sürecinden değil, büyük ölçüde ön kullanım aşamalarından – gerekli bileşenlerin imalatı ve dağıtımından – kaynaklanmaktadır. Nitekim fotovoltaik panel ve rüzgâr türbinlerinin üretim süreci, elektroliz yoluyla hidrojen eldesinin potansiyelini bir miktar yükseltmekte; buna rağmen değer oldukça düşük kalmaktadır. Hidrojen cıva hücresi teknik olarak elverişli bir yol sayılabilmekle birlikte, cıvanın yüksek toksisitesi ve çevreye sızması hâlindeki etkileri bu yöntemi istenmeyen kılmaktadır.

Tablo 1. Hidrojen üretim yöntemlerinin küresel ısınma potansiyeli (kg CO₂-eşd./kg H₂) [8]

Üretim yöntemi	Küresel ısınma potansiyeli
Buhar metan reforming	En yüksek değer
Hidrojen cıva hücresi	1,0510
Hidrojen diyafram hücresi	0,9090
Zar (membran) hücresi	0,8872
Elektroliz	0,0325

Energy System	Pollutants (kg/GJ)						Vapour Generation			Environmental Damage Ratio ^c	Environmental Compatibility Factor
	CO ₂	CO	SO ₂	NO _x	HC	PM ^a	Energy System	Global Warming	(%) ^b		
Fossil fuel	72.40	0.80	0.38	0.34	0.20	0.09	8.9	3900	0.782	18.24	0.055
Coal/Synthetic fossil fuel	100	0.65	0.50	0.32	0.12	0.14	9.3	3900	0.782	22.62	0.044
Solar-hydrogen Energy	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	6.0	0.0	0.001	1.0	1.00

^a Particulate matter. ^b With respect to annual vapor generation due to solar heating (5×10^{17} kg/y). ^c (Damage due to fuel)/(Damage due to solar hydrogen).

Şekil 4. Enerji sistemlerinin çevresel özellikleri [9]

SAVUNMA SANAYİNİN LİDERLİK OKULU

Kaynak: [9] numaralı kaynaktaki verilerden yararlanılarak yazar tarafından düzenlenmiştir.

Hidrojen enerji sistemlerinin ekonomisi; üretim, depolama, taşıma ve kullanım maliyetleri üzerinden değerlendirilmektedir [10], [11]. Bu kalemler içinde üretim baskın konumdadır ve doğrudan birincil enerji kaynaklarının fiyatına bağlıdır. Yenilenebilir enerjiye dayanan yeni üretim teknolojileri, fosil yakıt temelli yöntemlere kıyasla hâlen maliyetli kalmaktadır. Fosil kökenli olmayan kaynaklarda maliyeti belirleyen asıl kalem elektriktir; bu kaynaklar içinde en yaygın yöntem olan elektrolizde maliyet, elektrolizörün bedeline ve kullanım yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Buna karşılık elektroliz, karbondioksit oluşturmaması nedeniyle diğer yollarla maliyet bakımından rekabet edebilmekte ve temiz enerji sağlamaktadır. Fosil yakıtı dayalı üretimde ise maliyet doğrudan yakıt fiyatlarıyla belirlenmektedir. Sharma vd. [29] tarafından derlenen verilere göre termokimyasal yöntemlerin önündeki başlıca engeller basınç salınımlı absorpsiyon, saflaştırma yöntemleri ve katalizör bedelidir; bu etkenler üretim maliyetini yükseltirken

biyokütle maliyetini düşürmekte ve verimi artırmaktadır [12]. Su elektrolizi küçük ölçekli üretim için ekonomik açıdan uygunken, büyük ölçekte yüksek elektrik tüketimi nedeniyle elektrolizör maliyeti yaklaşık yüzde beş oranında artmaktadır. Farklı yöntemlere ilişkin maliyet aralıkları Tablo 2'de özetlenmiştir. Çok sayıda üretim teknolojisinin maliyeti ayrıca Şekil 5'te gösterilmektedir. Savunma uygulamaları açısından burada belirleyici olan birim maliyetin kendisinden çok, maliyetin enerji fiyatlarına ve tedarik zincirine bağımlılık derecesidir; kriz dönemlerinde fiyat avantajı taşıyan fosil kökenli üretim, tedarik kesintisine karşı en kırılgan seçenek hâline gelebilmektedir.

Tablo 2. Hidrojen üretim yöntemlerine ilişkin maliyet tahminleri

Yöntem	Maliyet	Kaynak
Karanlık ve foto fermentasyon	2,5–2,8 USD/kg H ₂	[13]
Alkalın elektrolizör	4,78–5,84 USD/kg H ₂	[14]
Proton değişim membranı	6,08–7,43 USD/kg H ₂	[14]
Sentez gazı yoluyla kısmi metan oksidasyonu	1,33 EUR/kg H ₂	[14]

Şekil 5. Hidrojen üretim teknolojilerinin maliyetleri [15]

Source	Technology	Production Cost (\$/kg)
Methane	Steam reforming	0.75
Coal	Gasification without CO ₂ sequestration	0.92
Nuclear	Electrolysis	2.6–3.0
	Water splitting	1.4–2.3
Biomass	Centralized biomass gasification	1.2–2.4
Solar	Photo catalytic water splitting	5.0

Kaynak: [15] numaralı kaynaktaki verilerden yararlanılarak yazar tarafından düzenlenmiştir.

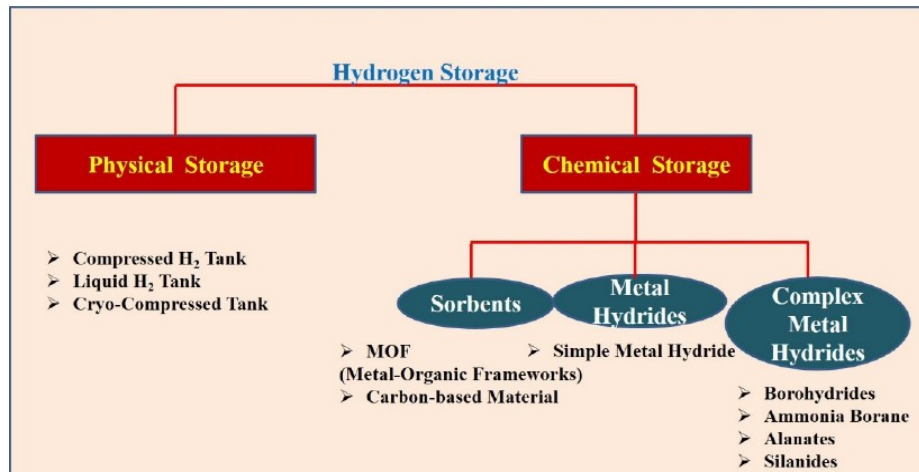
Küresel ısınma potansiyeli, sera gazı salımının ve bunun insan sağlığı üzerindeki etkilerinin anlaşılmasında temel göstergelerden biridir. Hâlen kurulu fosil yakıt sistemlerinin başlıca ikameleri sentetik fosil yakıtlar ile güneş hidrojen sistemleridir; ancak bu iki seçenek çevresel açıdan karşılaştırılabilir değildir. Sentetik fosil yakıtlar

üretim bakımından uygun olsalar da fosil yakıtlardan daha fazla kirlilik üretmektedir. Güneş hidrojen sistemleri ise çevre dostu, temiz ve tükenmeyen bir seçenek sunmaktadır. Şekil 4'te özetlendiği üzere buhar oluşumu, kirlilik ve çevresel bozulma gibi etkenler güneş enerjisi sistemlerinde diğerlerine kıyasla çok düşüktür. Karbondioksit, karbonmonoksit, kükürtdioksit, azot oksitler ve hidrokarbon salımı fosil yakıt sistemlerinde çok yüksekken güneş hidrojen sisteminde neredeyse sıfıra inmektedir. Kirletici yoğunluğunun yüksekliği, fosil yakıt sistemlerini asit yağmuru ve ozon incelmesi gibi iklim sorunlarının kaynağı hâline getirmektedir. Bu yöntemlerin zamanla ticari olarak olgunlaşması ve çevresel etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde kalması durumunda, hidrojen üretim maliyetinin fosil yakıta dayalı geleneksel yöntemlerle karşılaştırılabilir ya da onlardan düşük olması beklenmektedir.

3. Hidrojenin Depolanması

Hidrojenin bir enerji kaynağı değil enerji taşıyıcısı olduğu, yani enerjiyi yararlı biçimde iletip depolayabildiği ortaya konmuştur [16]. Buna karşılık elementin hafifliği ve sızıntıya elverişliliği, saklanmasını özel dikkat gerektiren bir konu hâline getirmektedir. Depolama, fiziksel ya da kimyasal formlarda çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir; yöntemlerin tamamı Şekil 6'da özetlenmektedir.

Şekil 6. Hidrojen depolama yöntemleri [29]



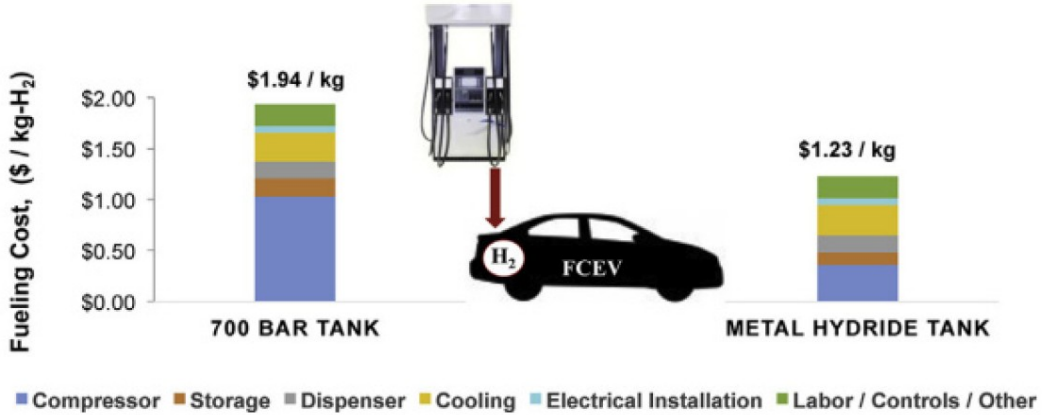
Kaynak: [29] numaralı kaynaktaki verilerden yararlanılarak yazar tarafından düzenlenmiştir.

3.1. Hidrojenin Depolanmasının Çevresel ve Ekonomik Değerlendirmesi

Depolama yöntemlerine ilişkin aşağıdaki değerlendirme, Sharma vd. [29] ile Frank vd. [17] tarafından sunulan verilere dayanmaktadır. Depolama, hidrojenin bir enerji taşıyıcısı olarak yaygınlaşmasının önündeki temel engellerden biridir. Hâlen kullanılan başlıca yöntemler metal hidrit depolama, yer altı gaz depolaması, sıkıştırılmış gaz depolaması ve sıvı hidrojen depolamasıdır. Sıfır emisyonlu araçlara duyulan ilginin artması, son dönemde yeni depolama yöntemlerinin geliştirilmesini hızlandırmıştır. Depolama, yakıtın çevre dostu biçimde muhafazasını sağlamakta ve olumsuz bir çevresel etki üretmemektedir.

Farklı depolama yöntemlerine ait maliyetler Şekil 7'de verilmektedir [17]. Metal hidrit tankında yakıt doldurma maliyeti kilogram hidrojen başına 1,23 dolar iken, 700 bar basınçlı tanklarda aynı maliyet 1,94 dolara çıkmaktadır. Buna göre mevcut teknolojiler içinde metal hidrit depolama ile yakıt hücreli elektrikli araç kombinasyonu, şimdilik en umut verici seçenek olarak öne çıkmaktadır. Askerî platformlar bakımından bu karşılaştırma yalnızca maliyet üzerinden okunamaz; metal hidrit sistemlerin düşük basınçta çalışması balistik darbe riski altında güvenlik avantajı sağlarken, ağırlık dezavantajı kara ve hava platformlarında taşıma kapasitesini doğrudan sınırlandırmaktadır.

Şekil 7. Hidrojen depolama yöntemlerinin maliyeti [17]



Kaynak: [17] numaralı kaynaktaki verilerden yararlanılarak yazar tarafından düzenlenmiştir.

Maliyet arařtırmaları, sıkıřtırılmıř gaz depolamasının pahalı olduėunu ve bu tankların dūřuk basınç gibi özel bakım gereksinimleri doėurduėunu gōstermektedir. Tařıma ve depolamaya iliřkin maliyet tahminleri Tablo 3'te derlenmiřtir [18], [19], [20]. Sōz konusu deėerler karřılařtırıldıėında, yeni alıřmalarda maliyetin dūřme eėiliminde olduėu sōylenebilmektedir. Hidrojenin bōyōk ōlekte tařınması ve depolanması geliřmeye aık bir alan olduėundan maliyet alıřmaları sōrmekte; depolama hızını artırabilecek yeni katalizōrler arařtırılmaktadır. Ekonomik deėerlendirmede iki uygulama tūrünün ayrı ele alınması gerekmektedir: tařımacılık uygulamaları ve sabit uygulamalar. Sabit uygulamalar; yōksek sıcaklık ve basınta alıřabilmeleri, geniř alan kaplayabilmeleri ve daha yavař kinetiėe izin vermeleri nedeniyle depolama malzemesine daha az kısıt getirmektedir. Yakın gelecekte hidrojen ekonomisinin en gōrōnūr uygulaması olacak tařımacılık sektōründe ise gereksinimler ok daha zorludur: yōksek gravimetrik ve hacimsel hidrojen yoėunluėu, hızlı kinetik, hidrojen alımı ile salımında oklu dōnėu tersinirliėi, dūřuk alıřma sıcaklıėı ve basıncı ile kabul edilebilir bir birim depolama maliyeti. Bu kořulların tamamını karřılayabilen bir depolama sistemi hālen bulunmamaktadır. Sabit kullanımda da zorluklar sōrmekte; sıkıřtırılmıř gaz ve sıvı hidrojen seenekleri sayılan kořulların oėunu karřılayamamaktadır. Bu nedenle katı hāl depolama malzemelerinde saėlanacak ilerlemenin hidrojen ekonomisi üzerinde belirleyici bir etkisi olacaktır. Bu iki uygulama tūrünün ayrımı askerī kullanımda da geerlidir: sahra gō üniteleri ve üs ii enerji depolaması sabit uygulamaların esnek kořullarından yararlanabilirken, insansız hava araları ve taktik kara araları tařımacılık uygulamalarının en sıkı kısıtlarına tabidir.

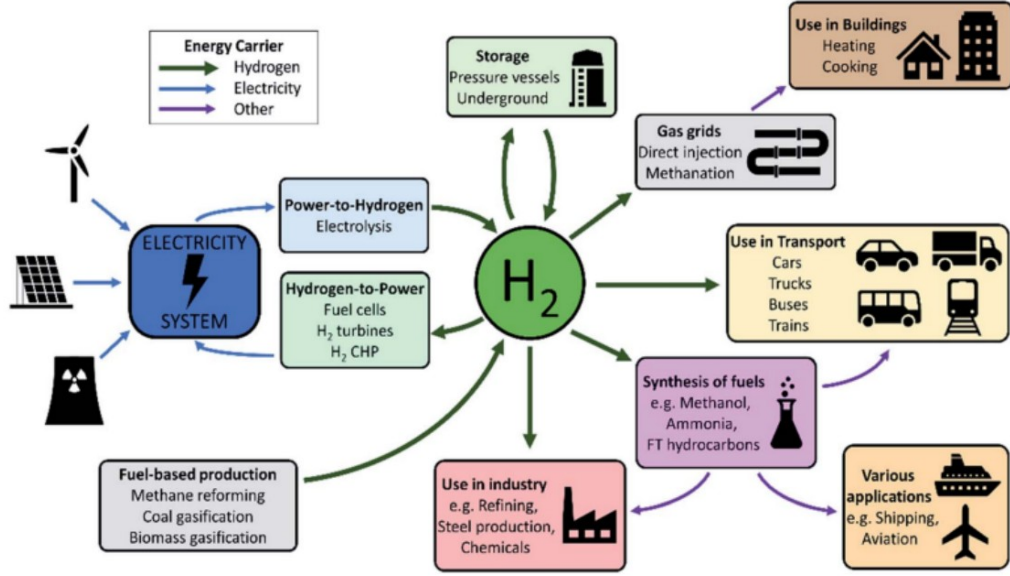
Tablo 3. Hidrojen tařıma ve depolamaya iliřkin maliyet tahminleri

Kalem	Maliyet	Kaynak
Sıvı organik hidrojen tařıyıcısı (LOHC) ile depolama	50 EUR/kg H ₂	[18]
LOHC ile hidrojen tedariki	8–10 EUR/kg	[18]
Daėıtım maliyeti	5 EUR/kg H ₂ ; 6,40–8,10 EUR/kg H ₂	[19]
Nakliye maliyeti	5–10 USD/kg	[20]

4. Hidrojen Enerjisinin Uygulamaları

Bir enerji taşıyıcısı olarak hidrojen kullanımı, büyük ölçüde tekniklerin erişilebilirliğine ve bunun elektrik ve ısıya dönüştürülmesine bağlıdır. Şekil 8, hidrojenin çeşitli alanlarda kullanımını göstermektedir [21].

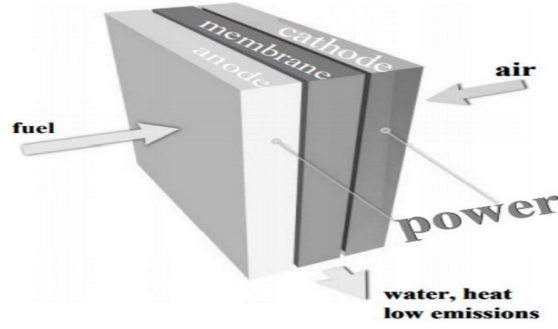
Şekil 8. Hidrojenin kullanım alanları [21]



Kaynak: [21] numaralı kaynaktaki verilerden yararlanılarak yazar tarafından düzenlenmiştir.

Yakıt hücrelerinin çalışma ilkesine ilişkin aşağıdaki açıklama, konuya ilişkin derleme kaynaklardan [22], [24], [29] yararlanılarak özetlenmiştir. Hidrojenin dünya genelinde enerji taşıyıcısı olarak benimsenme hızı, elektriğe dönüştürülebilmesine bağlıdır; yakıt hücreleri bu dönüşümü sağlayan ve fosil yakıt temelli sistemlerin yerini alması beklenen teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Hidrojen yakıt hücreleri çalışırken esas olarak elektrik, ısı ve su açığa çıkarmakta; bu yönüyle içten yanmalı motorlardan ayrılmakta ve zararlı egzoz salımının azaltılmasında önemli bir seçenek sayılmaktadır [26]. Cihaz, havadaki oksijenin hidrojenle tepkimeye girmesiyle elektrik üreten ve bataryaya benzeyen bir yapıdadır. İkisi arasındaki temel fark enerjinin nerede bulunduğu: batarya enerjiyi kendi içinde depolarken, yakıt hücresi dışarıdan hidrojen ve oksijen beslendiği süreçte elektrik üretmeyi sürdürmektedir [24]. Yakıt pilinin şeması Şekil 9'da gösterilmektedir [22].

Şekil 9. Yakıt pilinin yapısı [22]



Kaynak: [22] numaralı kaynaktaki verilerden yararlanılarak yazar tarafından düzenlenmiştir.

Yakıt pili, bir elektrolitle ayrılmış anot ve katottan oluşmaktadır. Anoda hidrojen, katoda oksijen beslenmekte ve tepkimeler bu elektrotlarda gerçekleşmektedir. Elektrolit üzerinden taşınan iyonlar ile harici devrede akan fazla elektronlar birlikte elektrik akımını oluşturmaktadır. Verimlilik bakımından hidrojen yakıt hücreleri, benzinli motorlara kıyasla daha yüksek değerlere ulaşabilmekte; bu nedenle ulaşım ve güç üretimi uygulamalarında önemli bir alternatif sayılmaktadır [23]. Birleşik ısı ve güç sistemlerinde kullanıldıklarında verim yüzde 85'e kadar çıkmaktadır [23]. Söz konusu özellikler, yakıt hücrelerinin araçlarda, taşınabilir güç sistemlerinde ve sabit güç üretiminde kullanılmasına imkân vermektedir. Ulaşım alanındaki kullanım otomobillerle sınırlı değildir; yakıt hücreli otobüs uygulamaları teknolojinin toplu taşıma ölçeğinde de işletilebildiğini ortaya koymaktadır [25]. Askerî kullanım açısından yakıt hücresinin batarya karşısındaki asıl üstünlüğü verimlilik değeri değil, enerji kapasitesinin güç ünitesinden bağımsız olarak yakıt miktarıyla ölçeklenebilmesidir; bu özellik, görev süresinin platform tasarımı değiştirilmeden artırılmasına imkân vermektedir.

4.1. Hidrojen Enerjisinin Askeri Uygulamaları

Hidrojen teknolojileri, muharebe sahasında yalnızca bir yakıt alternatifi olarak değil, bazı görevlerde operasyonel avantaj sağlayabilecek bir enerji çözümü olarak değerlendirilmektedir. Bu bölümde, hidrojenin hava, kara ve deniz sistemlerindeki spesifik uygulamaları ve sağladığı taktik avantajlar detaylandırılmıştır.

İnsansız Hava Araçları (İHA/SİHA) ve Havacılık

Askeri havacılıkta hidrojen kullanımı, özellikle orta irtifa ve uzun havada kalış süresi gerektiren insansız sistemler açısından dikkat çeken bir araştırma alanıdır.

Menzil ve Dayanıklılık: Hidrojen yakıt hücreleri, özellikle küçük ve orta ölçekli insansız hava araçlarında görev süresini artırma potansiyeline sahiptir. Bataryalı sistemlerde görev süresi çoğu zaman enerji depolama kapasitesiyle sınırlı kalırken, hidrojen yakıt hücreleri daha uzun süreli keşif ve gözetleme görevleri için uygun bir seçenek olarak değerlendirilmektedir. ABD Donanma Araştırma Laboratuvarı tarafından geliştirilen Ion Tiger adlı yakıt hücreli İHA'nın 48 saatten fazla uçuş gerçekleştirmesi, bu alandaki dikkat çekici örneklerden biridir [30].

Düşük Akustik ve Termal İz: Yakıt hücreli sistemlerin içten yanmalı motorlara göre daha sessiz çalışması ve daha düşük ısı izi oluşturabilmesi, askeri görevlerde tespit edilme riskinin azaltılmasına katkı sağlayabilir. NATO da hidrojen yakıt hücrelerinin düşük ses ve düşük ısı izi gibi avantajlar sağlayabileceğini belirtmektedir [28].

Kara Araçları ve Taktik Mobilite



Ağır zırhlı araçlardan lojistik kamyonlara kadar kara unsurlarında hidrojen, iki ana formatta kullanılmaktadır: Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (FCEV) ve Hidrojen İçten Yanmalı Motorlar (H2-ICE).

Sessiz Sürüş ve İz Yönetimi: Kara araçlarında hidrojen yakıt hücrelerinin kullanılması, motor gürültüsünün ve ısı izinin azaltılması bakımından avantaj sağlayabilir. Bu durum özellikle keşif, gözetleme ve bekleme görevlerinde önemlidir. Araçların motor çalıştırmadan elektronik sistemlerini besleyebilmesi, “sessiz nöbet” kabiliyeti açısından da değerlendirilebilir [28].

Lojistik Hafifleme: Hidrojenin sahada üretilmesi, teorik olarak yakıt ikmal hatlarına olan bağımlılığı azaltabilir. Ancak bunun uygulanabilmesi için mobil elektroliz sistemleri, güvenli depolama altyapısı ve düzenli bakım kapasitesi gerekir. Bu nedenle hidrojen, kısa vadede tamamen dizel yakıtın yerine geçecek bir çözümden çok, belirli

görevlerde lojistik esnekliği artırabilecek tamamlayıcı bir teknoloji olarak görülmelidir [27].

Deniz Sistemleri ve Sualtı Platformları

Hidrojenin deniz kuvvetlerindeki en kritik uygulaması "Havadan Bağımsız Tahrik" (AIP) sistemleridir.

Denizaltı Teknolojisi: Hidrojen yakıt hücreleri, denizaltılarda havadan bağımsız tahrik sistemleri kapsamında kullanılabilir. Özellikle yakıt hücreli AIP sistemleri, denizaltıların daha uzun süre su altında kalmasına ve tespit edilme riskinin azalmasına katkı sağlayabilir. HDW Class 214 denizaltılarında kullanılan yakıt hücreli AIP sistemlerinin sualtı dayanımını artırdığı ve tespit riskini düşürdüğü belirtilmektedir [31].

İnsansız Deniz Araçları (İDA): Uzun süreli deniz devriyesi atan otonom araçlarda, hidrojen yakıt pillerinin güneş panelleriyle birlikte kullanılması görev süresinin uzatılmasına katkı sağlayabilir.

4.2. NATO Çalışmaları ve Enerji Güvenliği Açısından Değerlendirme

NATO'nun son yıllarda yaptığı çalışmalar, hidrojenin askeri sistemlerde sadece çevreci bir yakıt olarak değil, sahadaki enerji ihtiyacını daha sessiz ve esnek şekilde karşılayabilecek bir teknoloji olarak da değerlendirildiğini göstermektedir. NATO Enerji Güvenliği Mükemmeliyet Merkezi tarafından 2023 yazında Fransa'daki Gergy askeri sahasında yapılan denemelerde, 400 W ve 1000 W gücündeki hidrojen yakıt hücreleri askeri ortamda test edilmiştir [27]. Bu denemelerde hidrojen yakıt hücrelerinin özellikle taşınabilir güç ihtiyacı, düşük emisyon ve sessiz çalışma gibi konularda fayda sağlayabileceği belirtilmiştir. NATO'nun iklim değişikliği ve güvenlik çalışmalarında da hidrojen yakıt hücrelerinin düşük ses ve düşük ısı izi gibi ek avantajlar sunabileceği ifade edilmektedir [28]. Bu nedenle hidrojen teknolojileri, askeri araçlar ve sahra güç sistemleri açısından yalnızca emisyon azaltımı için değil, aynı zamanda gizlilik, enerji sürekliliği ve lojistik dayanıklılık bakımından da dikkate alınması gereken bir seçenektir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada hidrojen teknolojilerinin enerji taşıyıcısı olarak genel özellikleri, üretim ve depolama yöntemleri ile askeri araçlarda kullanılma potansiyeli incelenmiştir. Elde edilen

bilgiler, hidrojenin özellikle fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması, emisyonların düşürülmesi ve sahadaki enerji ihtiyacının daha esnek şekilde karşılanması açısından önemli bir seçenek olduğunu göstermektedir. IRENA'nın enerji dönüşümü yaklaşımında da yenilenebilir enerji, elektrifikasyon ve yeşil hidrojen gibi başlıkların öne çıkması, bu konunun yalnızca sivil enerji sektörü için değil, savunma alanı için de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir [1].

Hidrojenin askeri sistemler açısından en önemli yönlerinden biri, yakıt hücreleriyle birlikte kullanıldığında sessiz çalışma ve düşük ısı izi gibi avantajlar sağlayabilmesidir. Bu özellikler özellikle insansız hava araçları, kara araçları, sahra güç sistemleri ve denizaltı platformları için önemlidir. Örneğin yakıt hücreli İHA uygulamalarında daha uzun görev süresi hedeflenebilmekte, denizaltılarda ise havadan bağımsız tahrik sistemleri sayesinde su altında kalış süresi artırılabilir [30], [31]. NATO'nun hidrojen yakıt hücrelerine yönelik saha çalışmaları da bu teknolojinin askeri ortamda denenmeye başlandığını ve enerji güvenliği açısından önemsendiğini göstermektedir [27], [28].

Bununla birlikte hidrojenin askeri araçlarda yaygın şekilde kullanılabilmesi için bazı sorunların çözülmesi gerekmektedir. Hidrojenin üretimi, taşınması ve depolanması hâlâ maliyetli ve dikkat isteyen süreçlerdir. Özellikle yüksek basınçlı tanklar, sıvı hidrojen sistemleri ve metal hidrit depolama çözümleri güvenlik, ağırlık, hacim ve maliyet açısından farklı sınırlılıklara sahiptir [17]. Bu nedenle hidrojenin kısa vadede bütün askeri araçlarda doğrudan dizel yakıtın yerine geçmesi beklenmemelidir. Daha gerçekçi yaklaşım, hidrojenin belirli görevlerde batarya, dizel veya yenilenebilir enerji sistemleriyle birlikte hibrit olarak kullanılmasıdır.

Türkiye açısından bakıldığında hidrojen teknolojileri, savunma sanayii için uzun vadeli bir Ar-Ge alanı olarak değerlendirilebilir. İnsansız sistemler, mobil güç üniteleri, askeri üslerde enerji depolama, liman ve hava üslerinde hidrojen ikmal altyapısı gibi alanlarda yapılacak çalışmalar, hem enerji güvenliği hem de teknolojik bağımsızlık açısından fayda sağlayabilir. Özellikle yerli yakıt hücresi, güvenli depolama tankı, mobil elektrolizör ve saha tipi dolum sistemleri üzerinde çalışılması, ileride savunma sanayiinde dışa bağımlılığı azaltabilecek bir adım olabilir.

Sonu olarak hidrojen teknolojileri, askeri aralar iin tek bařına btn sorunları zen bir teknoloji deėildir; ancak doėru alanlarda kullanıldığında operasyonel esneklik, dřk iz, daha uzun grev sresi ve enerji gvenliėi bakımından nemli katkılar saėlayabilir. Bu nedenle hidrojenin savunma sanayiinde kademeli olarak, nce hibrit ve sınırlı grev uygulamalarında denenmesi daha uygun grnmektedir. Uzun vadede ise yerli retim, gvenli depolama ve NATO’nun enerji gvenliėi yaklařımlarıyla uyumlu Ar-Ge alıřmaları glendirilirse hidrojen, Trkiye’nin savunma sanayii vizyonunda daha nemli bir yer edinebilir.



6. KAYNAKLAR

- [1] International Renewable Energy Agency (IRENA), World energy transitions outlook 2022: 1.5°C pathway. Abu Dhabi: IRENA, 2022.
- [2] ABS, “Hydrogen as Marine Fuel,” *Sustain. Whitepaper*, no. June, 2021, [Online]. Available: <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2021/06/ABS-hydrogen-as-marine-fuel.pdf>. Accessed 15 October 2021
- [3] I. Dincer and M. A. Rosen, “Sustainability aspects of hydrogen and fuel cell systems,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 15, no. 2, pp. 137–146, 2011, doi: 10.1016/j.esd.2011.03.006.
- [4] G. Cipriani *et al.*, “Perspective on hydrogen energy carrier and its automotive applications,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 16, pp. 8482–8494, 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.03.174.
- [5] L. Schlapbach and A. Züttel, “for Mobile Applications,” *Nature*, vol. 414, no. November, pp. 353–358, 2001, doi: 10.1038/35104634.
- [6] J. Nowotny and T. N. Veziroglu, “Impact of hydrogen on the environment,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 20, pp. 13218–13224, 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.07.071.
- [7] S. A. Sherif *et al.*, *Handbook of Hydrogen Energy EDITED BY*. 2014.
- [8] F. Suleman, I. Dincer, and M. Agelin-Chaab, “Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 21, pp. 6976–6987, 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.03.123.
- [9] S. Z. Baykara, “Hydrogen: A brief overview on its sources, production and environmental impact,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 23, pp. 10605–10614, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.022.
- [10] R. Kothari, D. Buddhi, and R. L. Sawhney, “Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 2, pp. 553–563, 2008, doi: 10.1016/j.rser.2006.07.012.
- [11] A. Ajanovic, “On the economics of hydrogen from renewable energy sources as

- an alternative fuel in transport sector in Austria,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 16, pp. 4223–4234, 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.06.041.
- [12] H. R. Sara, B. Enrico, V. Mauro, D. C. Andrea, and N. Vincenzo, “Techno-economic Analysis of Hydrogen Production Using Biomass Gasification -A Small Scale Power Plant Study,” *Energy Procedia*, vol. 101, no. September, pp. 806–813, 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.11.102.
- [13] P. Nikolaidis and A. Poullikkas, “A comparative overview of hydrogen production processes,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 597–611, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.044.
- [14] A. I. Osman *et al.*, *Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review*, vol. 20, no. 1. Springer International Publishing, 2022. doi: 10.1007/s10311-021-01322-8.
- [15] M. A. Rosen and S. Koohi-Fayegh, “The prospects for hydrogen as an energy carrier: an overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems,” *Energy, Ecol. Environ.*, vol. 1, no. 1, pp. 10–29, 2016, doi: 10.1007/s40974-016-0005-z.
- [16] L. Jörissen, *Prospects of hydrogen as a future energy carrier*, vol. 45. 2012. doi: 10.1007/978-1-4471-2369-9_12.
- [17] E. D. Frank, A. Elgowainy, Y. S. Khalid, J. K. Peng, and K. Reddi, “Refueling-station costs for metal hydride storage tanks on board hydrogen fuel cell vehicles,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 57, pp. 29849–29861, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.09.206.
- [18] M. Reuß, T. Grube, M. Robinius, P. Preuster, P. Wasserscheid, and D. Stolten, “Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model,” *Appl. Energy*, vol. 200, pp. 290–302, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.050.
- [19] M. Raab, S. Maier, and R. U. Dietrich, “Comparative techno-economic assessment of a large-scale hydrogen transport via liquid transport media,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 21, pp. 11956–11968, 2021, doi:

10.1016/j.ijhydene.2020.12.213.

- [20] U. Cardella, L. Decker, J. Sundberg, and H. Klein, “Process optimization for large-scale hydrogen liquefaction,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 17, pp. 12339–12354, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.03.167.



- [21] C. J. Quarton *et al.*, “The curious case of the conflicting roles of hydrogen in global energy scenarios,” *Sustain. Energy Fuels*, vol. 4, no. 1, pp. 80–95, 2019, doi: 10.1039/c9se00833k.
- [22] P. P. Edwards, V. L. Kuznetsov, and W. I. F. David, “Hydrogen energy,” *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 365, no. 1853, pp. 1043–1056, 2007, doi: 10.1098/rsta.2006.1965.
- [23] A. Ajanovic and R. Haas, “Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 16, pp. 10049–10058, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.122.
- [24] M. Winter and R. J. Brodd, “What are batteries, fuel cells, and supercapacitors?,” *Chem. Rev.*, vol. 104, no. 10, pp. 4245–4269, 2004, doi: 10.1021/cr020730k.
- [25] T. Hua *et al.*, “Status of hydrogen fuel cell electric buses worldwide,” *J. Power Sources*, vol. 269, pp. 975–993, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.06.055.
- [26] M. A. Abdelkareem, K. Elsaid, T. Wilberforce, M. Kamil, E. T. Sayed, and A. Olabi, “Environmental aspects of fuel cells: A review,” *Sci. Total Environ.*, vol. 752, p. 141803, 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141803.
- [27] NATO Energy Security Centre of Excellence, “Executive Summary of the field experiment conducted by NATO ENSEC COE in the summer of 2023, utilizing Hydrogen Fuel Cell technology within the military environment,” 2024.
- [28] NATO, “Environment, climate change and security,” 2024.
- [29] S. Sharma, S. Agarwal, and A. Jain, “Significance of Hydrogen as Economic and Environmentally Friendly Fuel,” *Energies*, vol. 14, no. 21, p. 7389, 2021, doi: 10.3390/en14217389.
- [30] U.S. Naval Research Laboratory, “NRL Shatters Endurance Record for Small Electric UAV,” 2013.
- [31] thyssenkrupp Marine Systems, “HDW Class 214,”

GENİŞLETİLMİŞ ÖZET

Bu çalışmada, hidrojen teknolojilerinin askeri araçlarda ve savunma sanayii alanında kullanılma potansiyeli ele alınmıştır. Günümüzde enerji güvenliği, sadece sivil sektörler için değil, askeri operasyonlar için de önemli bir konu haline gelmiştir. Orduların fosil yakıtlara olan bağımlılığı, özellikle uzun süreli operasyonlarda lojistik açıdan bazı zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Yakıt ikmal hatlarının korunması, sahadaki araçların sürekli çalışır durumda tutulması ve enerji ihtiyacının güvenli şekilde karşılanması savunma sistemleri açısından kritik başlıklardır. Bu nedenle hidrojen, alternatif bir enerji taşıyıcısı olarak dikkat çekmektedir.

Çalışmanın ilk bölümlerinde hidrojenin temel özellikleri, enerji taşıyıcısı olarak yapısı, üretim yöntemleri ve çevresel etkileri değerlendirilmiştir. Hidrojen doğada serbest halde yaygın olarak bulunmadığı için farklı kaynaklardan üretilmesi gerekmektedir. Bu üretim yöntemleri arasında doğal gaz reformasyonu, biyokütle gazlaştırma, elektroliz ve yenilenebilir enerjiye dayalı üretim seçenekleri bulunmaktadır. Fosil yakıtlara dayalı üretim yöntemleri daha düşük maliyetli olsa da çevresel etkileri bakımından bazı dezavantajlara sahiptir. Buna karşılık yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretilen hidrojen, karbon salımının azaltılması açısından daha uygun bir seçenek olarak görülmektedir. Ancak bu yöntemin yaygınlaşabilmesi için maliyetlerin düşmesi ve üretim altyapısının gelişmesi gerekmektedir.

Çalışmada hidrojenin depolanması konusu da ayrı bir başlık altında incelenmiştir. Hidrojenin düşük yoğunluklu ve sızıntıya açık bir gaz olması, depolama sürecini zorlaştırmaktadır. Sıkıştırılmış gaz halinde depolama, sıvı hidrojen depolama, metal hidritler ve sıvı organik hidrojen taşıyıcıları gibi farklı yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerin her birinin maliyet, güvenlik, ağırlık ve hacim açısından farklı avantaj ve sınırlılıkları vardır. Askeri araçlarda kullanılacak hidrojen sistemlerinde bu sınırlılıkların daha dikkatli değerlendirilmesi gerekmektedir. Çünkü askeri sistemlerde yalnızca verimlilik değil, aynı zamanda dayanıklılık, güvenlik ve sahada uygulanabilirlik de önemlidir.

Hidrojenin askeri uygulamalardaki en önemli kullanım alanlarından biri yakıt hücreleridir. Yakıt hücreleri, hidrojen ve oksijenin elektrokimyasal tepkimesiyle elektrik üretir. Bu sistemler çalışırken temel olarak su, ısı ve elektrik ortaya çıkar. Bu nedenle içten yanmalı motorlara göre daha sessiz çalışmaları ve daha düşük emisyon oluşturmaları önemli bir avantajdır. Özellikle insansız hava araçları, kara araçları, sahra güç sistemleri ve deniz platformlarında hidrojen yakıt hücrelerinin kullanılabileceği görülmektedir. İnsansız hava araçlarında hidrojen yakıt hücreleri daha uzun görev süresi sağlayabilir. Kara araçlarında ise sessiz çalışma ve düşük ısı izi, keşif ve gözetleme görevlerinde avantaj oluşturabilir. Denizaltı sistemlerinde kullanılan havadan bağımsız tahrik çözümleri de hidrojenin askeri alandaki önemli uygulamalarından biridir.

Çalışmada ayrıca NATO'nun enerji güvenliği ve hidrojen yakıt hücresi uygulamalarına ilişkin güncel çalışmaları da değerlendirilmiştir. NATO'nun bu alandaki çalışmaları, hidrojenin yalnızca çevreci bir yakıt alternatifi olmadığını, aynı zamanda askeri operasyonlarda enerji sürekliliği ve lojistik dayanıklılık açısından da değerlendirilebileceğini göstermektedir. Sahada taşınabilir güç ihtiyacının karşılanması, düşük ses ve düşük ısı izi gibi özellikler hidrojen teknolojilerini savunma alanında daha dikkat çekici hale getirmektedir.

Sonuç olarak hidrojen teknolojileri, askeri araçlar için tek başına bütün sorunları çözen bir sistem değildir. Üretim maliyeti, güvenli depolama, altyapı eksikliği ve bakım ihtiyacı gibi sorunlar hâlâ devam etmektedir. Ancak hidrojen, doğru alanlarda ve özellikle hibrit sistemlerle birlikte kullanıldığında savunma sanayii için önemli bir potansiyel taşımaktadır. Türkiye açısından bakıldığında yerli yakıt hücreleri, güvenli depolama sistemleri, mobil elektrolizörler ve askeri üslerde hidrojen altyapısı üzerine yapılacak çalışmalar uzun vadede teknolojik bağımsızlığa katkı sağlayabilir. Bu nedenle hidrojen teknolojilerinin savunma sanayiinde kademeli olarak denenmesi ve Ar-Ge çalışmalarının bu yönde geliştirilmesi önemli görülmektedir.