



İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE VE ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ

**Elektroliz Yöntemi İle Hidrojen Üretimi Ve Motorlarda
Kullanımı**

Yüksek Lisans Tezi

Hamdi Öztürk

Ocak 2024



İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ÇEVRE VE ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ

**Elektroliz Yöntemi İle Hidrojen Üretimi Ve Motorlarda
Kullanımı**

Yüksek Lisans Tezi

Hamdi Öztürk

Danışman

Doç. Dr. Yasin Karagöz

Ocak 2024

TEZ JÜRİSİ ONAYI

Hamdi Öztürk tarafından hazırlanan 'Elektroliz Yöntemi ile Hidrojen Üretimi ve Motorlarda Kullanımı.' başlıklı bu Yüksek Lisans Tezi, Çevre ve Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmış ve jürimiz tarafından kabul edilmiştir.

JÜRİ ÜYELERİ

İMZA

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Yasin Karagöz

.....

İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Üyeler:

Prof. Dr. Erkan Şahinkaya

.....

İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Prof. Dr. Şaban Pusat

.....

Yıldız Teknik Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 31/ Ocak / 2024

BEYANLAR

Yazım ve Kaynak Gösterme Kılavuzu Beyanı

Danışmanlığımda yazılan bu tezin APA yazım ve kaynak gösterme kılavuzunda belirtilen kurallara uygun olarak yapılandırıldığı ve bu kılavuzun metin içi kaynak gösterme standartlarının bu tezde tutarlı olarak uygulandığı tarafımdan incelenerek teyit edilmiştir.

İmza

Doç. Dr. Yasin KARAGÖZ

Etik İlkelere Sadakat Beyanı

Hazırladığım bu tezin tamamen kendi çalışmam olduğunu, akademik ve etik kuralları gözeterek çalıştığımı ve her alıntıya kaynak gösterdiğimi beyan ederim.

İmza

Hamdi ÖZTÜRK

ÖZET

ELEKTROLİZ YÖNTEMİ İLE HİDROJEN ÜRETİMİ VE MOTORLARDA KULLANIMI

HAMDİ ÖZTÜRK

Yüksek Lisans Tezi, Çevre ve Enerji Sistemleri Mühendisliği

Danışman: Doç. Dr. Yasin KARAGÖZ

Ocak 2024.

Bu çalışma günümüzde önemi gittikçe artan enerji verimliliği ve yenilebilir enerji kaynaklarının kullanımı konusunda deneysel bir çalışma yapmak amacıyla oluşturulmuştur.

Günümüzde artan çevre kirliliği ve karbon salınımına çözüm arayışları yeni alternatif enerji kaynaklarına yönlendirmektedir. Gelişen enerji krizleri ise farklı enerji kaynaklarının hem verimli kullanılmasını hem de bağımlılığı minimize ederek kullanabilmeyi gerektirmektedir.

Kullanım alanları artan fosil yakıtlara alternatif olarak H₂ gazının kullanımı her geçen gün daha da ileri seviyelere taşınmaktadır. Hem ikincil enerji kaynağı olan hidrojen gazı hem de enerji depolama sistemleri olarak oldukça önemlidir.

Hidrojen gazının elde edilmesi için gerekli olan enerjiyi yenilebilir enerji kaynaklarından temin edildiğinde hem çevreci hem de sürdürülebilir enerji yönetimi konusunda çok umut vaat etmektedir. Bu üretim proseslerinden biri de alkalın elektroliz işlemi ile hidrojen gazının elde edilmesidir.

Elde edilen hidrojen gazı hem içten yanmalı motorlarda hem de yakıt hücrelerinde kullanılabilir. Bu kullanım kolaylığı taşıma ve depolama probleminin çözümü ile daha verimli hale geleceği beklene bir durumdur.

Bu çalışmada uygun maliyet ve yöntemle hidrojen gazının üretilmesi ve aynı anda içten yanmalı motorlarda kullanımı ile ilgili deneysel bir çalışma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar emisyon oranlarının düştüğü ve verimlilik açısından uygun maliyetle katkı sunduğu yönündedir.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen Gazı, İçten Yanmalı Motor, Alkalın Elektroliz İçten Yanmalı Motorlarda Hidrojen Gazı Takviyesi

SUMMARY

HYDROGEN PRODUCTION BY ELECTROLYSIS AND ITS USE IN ENGINES

HAMDİ ÖZTÜRK

Master's Thesis, Department of Environmental and Energy Systems Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Yasin KARAGÖZ

January 2024.

This study was created to conduct an experimental study on energy efficiency and use of renewable energy sources, which are becoming increasingly important today.

Today, the search for solutions to increasing environmental pollution and carbon emissions leads to new alternative energy sources. Developing energy crises require both efficient use of different energy sources and minimizing dependency.

The use of H₂ gas as an alternative to fossil fuels, whose usage areas are increasing, is being carried to more advanced levels day by day. Hydrogen gas is very important both as a secondary energy source and as energy storage systems.

When the energy required to obtain hydrogen, gas is obtained from renewable energy sources, it is very promising in terms of both environmentally friendly and sustainable energy management. One of these production processes is the production of hydrogen gas by alkaline electrolysis.

The hydrogen gas obtained can be used both in internal combustion engines and fuel cells. This ease of use is expected to become more efficient with the solution of transportation and storage problems.

In this study, an experimental study has been carried out on the production of hydrogen gas with an appropriate cost and method and its simultaneous use in internal combustion engines. The results obtained are that the emission rates decrease and contribute to efficiency at an affordable cost.

Keywords: Hydrogen Gas, Internal Combustion Engine, Alkaline Electrolysis Hydrogen Gas Supplementation in Internal Combustion Engines

İÇİNDEKİLER

İçindekiler

ÖZET	i
SUMMARY	ii
İÇİNDEKİLER	iii
1. GİRİŞ	1
1.2. HİDROJEN ENERJİSİ	1
1.3. HİDROJENİN KİMYASAL ÖZELLİKLERİ	3
2. YENİLENEBİLİR HİDROJEN ÜRETİMİ	6
3. HİDROJEN ENERJİSİ KULLANIM ALANLARI	11
4. HİDROJEN ENERJİSİ KULLANIM ALANLARI	13
4.1. YAKIT OLARAK KULLANIMI	13
4.2. GÜBRE OLARAK	15
4.3. METALÜRJİ	15
4.4. KİMYASAL HAMMADDE OLARAK	15
4.5. GENEL-HİBRİT KULLANIMA UYGUN ÖRNEKLERİ	15
5. HİDROJEN ENERJİSİ DEPOLAMA VE TAŞIMA	17
5.1. FİZİKSEL DEPOLAMA	18
5.1.1. SIVILAŞTIRMA	18
5.1.2. SIKIŞTIRMA	19
5.2. KİMYASAL DEPOLAMA	20
5.2.1. METAL HİDRÜRLER	20
6. HİDROJEN EKONOMİSİ	21
7. ALKALİ ELEKTROLİZ	25
7.1. GENEL	25
7.2. ELEKTROLİZ HÜCRESİ	28
7.3. ELEKTROT İNCELEMESİ	30
7.4. DİZİLİM İNCELEMESİ	33
8. H ₂ GAZININ MOTORLARDA KULLANIMI	34
8.1. MOTORLAR	34
8.2. H ₂ GAZININ İÇTEN YANMALI MOTORLARDA KULLANIMININ TARİHSEL GELİŞİMİ	34
8.3. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA H ₂ KULLANIMI	35
9. ELEKTROLİZ YÖNTEMİ İLE H ₂ GAZI ÜRETİMİ	43
9.1. ARAŞTIRMA İÇİN GEREKLİ MALZEMELER	43
9.2. ARAŞTIRMANIN UYGULAMA AŞAMASI	43
9.3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI	45

10. H₂ İÇTEN YANMALI MOTORLARDA KULLANIMI	46
10.1. MATERYAL VE ÖZELLİKLERİ.....	46
10.2. BULGULAR VE TARTIŞMA	50
11. SONUÇLAR.....	59
KAYNAKÇA	60
ÖZGEÇMİŞ.....	65

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.2050 yılında ana faaliyet sektörlerinin tahmini enerji talebi. ABD Enerji Enformasyon Dairesi, Uluslararası Enerji Görünümü 2023 (IEO2023)	1
Şekil 2. Sektörler (a) ve ana GHG gazları (b) bazında antropojenik CO ₂ emisyonları. (Dincer, Zamfirescu, 2017).....	2
Şekil 3. Enerji taşıyıcısı olarak H ₂	3
Şekil 4. H ₂ gazının basınç-sıcaklık diyagramı (Züttel 2004, p. 160)	4
Şekil 5. Hidrojen gazı üretim kaynakları (Dincer, Zamfirescu, 2017).....	6
Şekil 6. Hidrojen gazı üretim metotları (Dincer, Zamfirescu, 2017)	7
Şekil 7. Hidrojen gazı üretim uygulamaları (Sørensen ve Spazzafumo, 2018)	8
Şekil 8. Yenilebilir elektrokimyasal üretim yöntemine göre hidrojen gazı üretim sistemleri (Dinçer, Zamfirescu, 2017).....	10
Şekil 9. Hidrojenin kullanım alanları (Dincer, Zamfirescu, 2017)	12
Şekil 10. Yakıt hücreleri (Dincer, Zamfirescu, 2017).....	14
Şekil 11. Hidrojen gazının kullanım alanları (Dincer, Zamfirescu, 2017)	14
Şekil 12. Güneş RFC güç sistemi (Sørensen, Spazzafumo, 2018).....	15
Şekil 13. (a) Ultracell XX25 hidrojen yakıt hücresi (2008–11). Orta (b) ve sağ (c): NEC doğrudan metanol kartuşlu prototip yakıt hücreleri (2003 ve 2004 tasarımı). (Sørensen, Spazzafumo, 2018) ...	16
Şekil 14. Li-iyon pili şarj etmek için PowerTrek PEMFC. (Sørensen, Spazzafumo, 2018)	16
Şekil 15. Hidrojen gazı depolama yöntemleri (Burton ve diğerleri, 2021)	17
Şekil 16. Hidrojen ekonomisi	21
Şekil 17. Firmalara ait yakıt hücresi ile çalışan araç üretim miktarları. (IEA- International Energy Agency)	23
Şekil 18. Alkali elektrolizörün temel çalışma parametreleri (Burton ve diğerleri, 2021)	31
Şekil 19. Monopolar düzenek ve bipolar düzenekler (Dincer, Zamfirescu, 2016).....	33
Şekil 20. Genel olarak kullanılan yakıt çeşitlerinde C/H oranları (Dincer, Zamfirescu, 2016)	35
Şekil 21.Yüksek basınçlı H ₂ enjektörü (Kawamura ve diğerleri, 2009)	38
Şekil 22. Deney düzeneği.....	43
Şekil 23. Elektroliz cihazının detayı.....	44
Şekil 24. Elektroliz cihazının bağlantısı	45
Şekil 25. Erin marka dizel motor.....	47
Şekil 26. Motorun fabrika ölçüm değerleri (https://www.erinmotor.com/tr-TR/urun-detay/1-endustriyel-dizel-motor)	47
Şekil 27. Araştırma düzeneğinin hazırlanması.....	48
Şekil 28. Araştırma düzeneği	49
Şekil 29. Araştırma düzeneği	50

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. H ₂ gazının termofiziksel özellikleri (Dincer, Zamfirescu, 2017)	3
Tablo 2. Hidrojen gazı dönüşümleri (Stacy Davis ve Robert Boundy 2022)	5
Tablo 3. Hidrojen gazı ısı değerleri (Stacy Davis ve Robert Boundy 2022)	5
Tablo 4. Kaynağa göre küresel hidrojen üretimi (Burton ve diğerleri, 2021)	8
Tablo 5. Dünyada Hidrojenin Mevcut Üretim Yolları Ve Uygulama Alanları (IRENA 2018)	11
Tablo 6. Sektörlere Göre Önem Arz Eden Karbonsuzlaşma Çözümleri	11
Tablo 7. Depolama yöntemlerinin karşılaştırılması (Dincer, Zamfirescu, 2016)	19
Tablo 8. Elektroliz sınıflandırma durumu (Dincer, Zamfirescu, 2016)	25
Tablo 9. Elektrolizlerin teknik olarak karşılaştırılması (Burton ve diğerleri, 2021)	25
Tablo 10. Erin Motor marka endüstriyel dizel motor özellikleri	46
Tablo 11. Takviyesiz güç, yakıt sarfı ve emisyon değerleri	51
Tablo 12. H ₂ takviyeli güç, yakıt sarfı ve emisyon değerleri	51
Tablo 13. Değişen güce göre devir değişim grafiği	52
Tablo 14. Güç-yakıt değişim grafiği	52
Tablo 15. CO ₂ emisyon oranlarındaki değişim miktarı	53
Tablo 16. HC emisyon ölçümü	54
Tablo 17. O ₂ gazının değişim grafiği	56
Tablo 18. NO _x ölçümü	56
Tablo 19. CO gazı emisyon değerleri	57

1. GİRİŞ

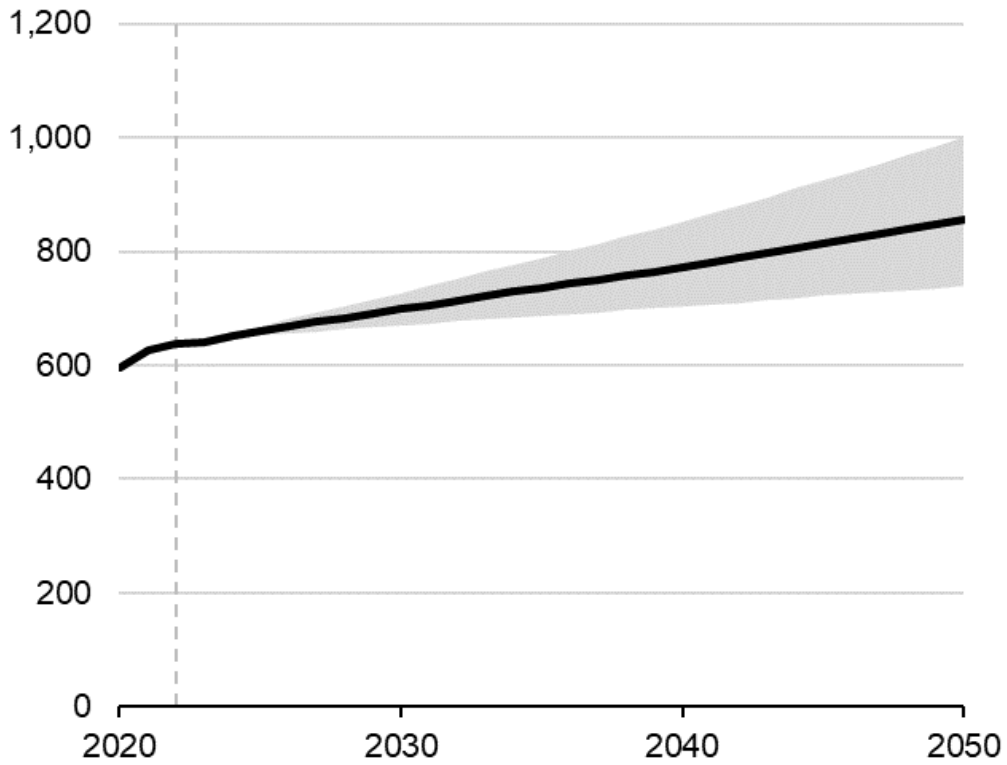
1.2. HİDROJEN ENERJİSİ

Günümüzde ülkelerin medeniyet ve refah seviyesini en belirgin göstergesi enerji ihtiyaçlarının karşılanması olarak kabul edebiliriz. Kullandığımız bütün aletlerden ulaşım, barınma ihtiyaçlarından ticarete kadar hayatımızın temelinde enerji gereksinimi yatmaktadır.

İnsan medeniyeti geliştikçe bu enerji gereksinimleri daha da artmaktadır. Şekil 1’de görüldüğü üzere 2050 yılında enerji talebi daha da artacaktır. Artan talebin karşılanmasında çevreye verilen zararlar göz önüne alındığında yenilebilir enerji kaynaklarının insan yaşamının devamlılığı için zorunluluk olduğunu ortaya çıkarmaktadır.

ENERJİ KULLANIMI-DÜNYA

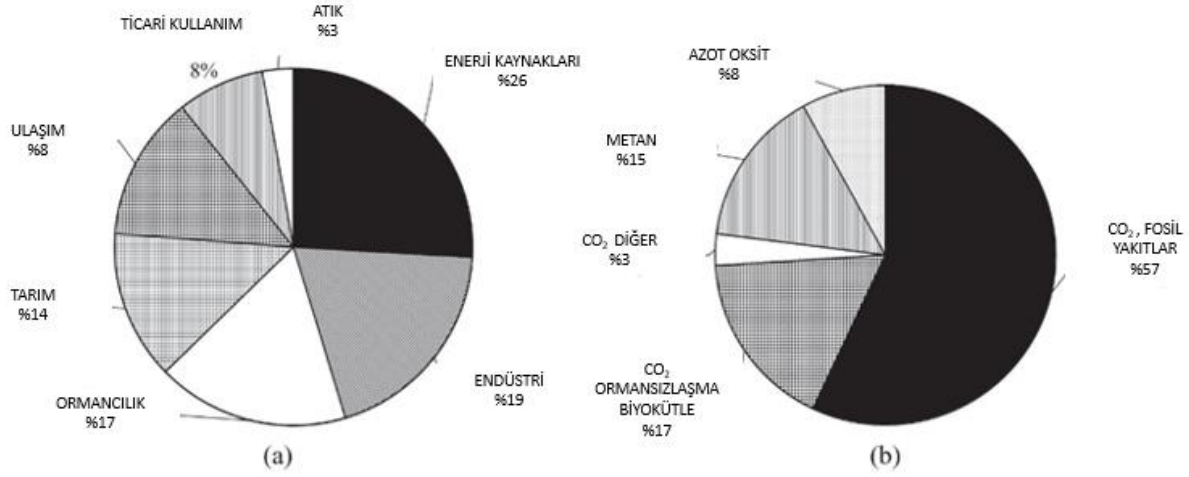
Exajolue (1.055×10^{18} J)



Şekil 1.2050 yılında ana faaliyet sektörlerinin tahmini enerji talebi. ABD Enerji Enformasyon Dairesi, Uluslararası Enerji Görünümü 2023 (IEO2023)

Fosil yakıtlardan üretilen enerjinin ortaya çıkardığı CO₂ emisyonlarının çevreye verdiği zarar enerji ihtiyacı arttığı sürece daha da artacağı tahmin edilmektedir. Her ne kadar karbon emisyonlarını düşürmek için küresel çapta çalışmalar yürütülse de CO₂ emisyonuna karşı etkin çabalar yetersiz kalmaktadır. Buna neden olarak devamlı gelişmekte olan teknoloji ve buna

bağlı olarak bağlı bulunduğu sektörel gelişimlerin ihtiyacı için artan bir enerji ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Şekil 2’de görüldüğü üzere sektörlere ait enerji kullanımı ve enerji kullanımından kaynaklı karbon salınımını almaktadır.

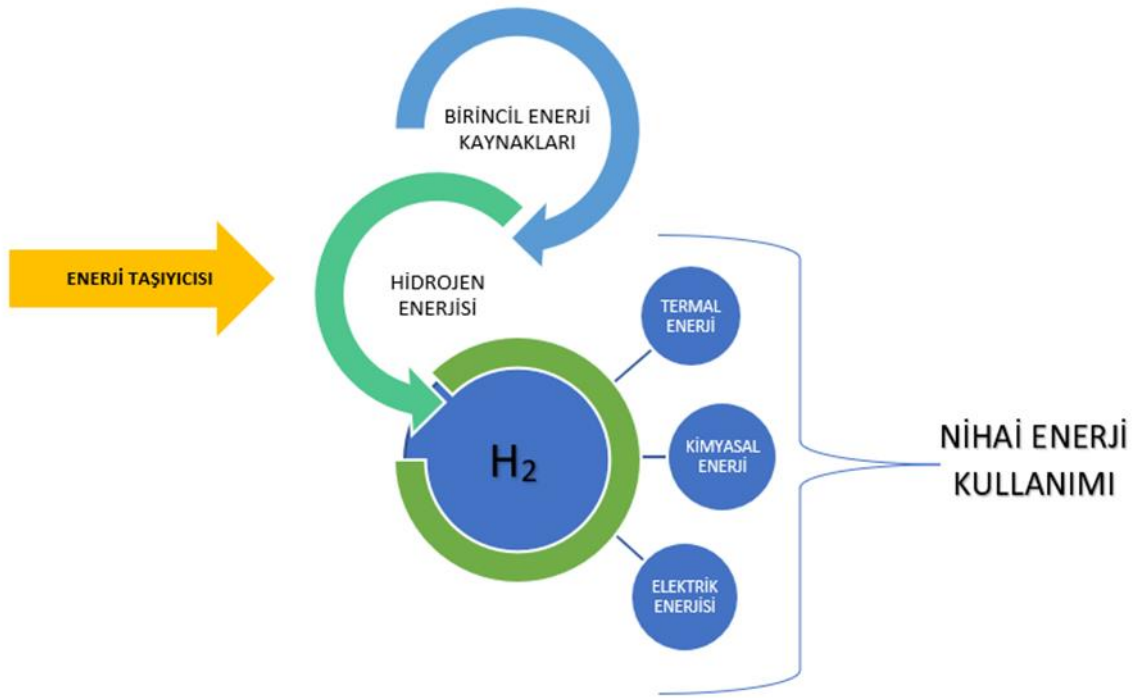


Şekil 2. Sektörler (a) ve ana GHG gazları (b) bazında antropojenik CO₂ emisyonları. (Dincer, Zamfirescu, 2017)

Artan enerji ihtiyacına bağlı olarak artış gösteren CO₂ emisyonlarına çözüm alternatiflerinden olan hidrojen gazı; enerjinin üretimi, depolanması ve taşınması içinde de önemlidir. Her ne kadar fosil yakıtların üretimi, depolanması ve taşınması ekonomik ve gelişmiş olsa da çevresel etkilere bakıldığında faydası kadar zararı olduğu da gözden kaçmamaktadır.

H₂ gazının daha çok enerji kaynağı olarak değil de enerji taşıyıcısı olarak adlandırmak ve değerlendirmek gerekir. Şekil 3.de görüldüğü üzere birincil kaynaktan elde edilen enerjinin depolanması ve taşınması için kullanılabilecek bir ara üründür.

Aynı zamanda kullanımı açısından diğer kaynaklardan elde edilen enerjiyi; termal enerji, kimyasal enerji ve elektrik enerjisine dönüştürebildiği için diğer enerji taşıyıcılarına göre muazzam avantaj sağlamaktadır.



Şekil 3. Enerji taşıyıcısı olarak H₂

Birincil enerji kaynağından üretildiğinden üretim esnasında oluşan kayıplar nedeniyle yıllarca ekonomiklik konusunda geri kalmıştır.

Bunlara rağmen yüksek ısı kapasitesinden dolayı kapalı çevrim içinde kullanımı nedeniyle sentetik yakıt olarak da gelecek vaat etmektedir. Bunun ana nedeni ise günümüzde içten yanmalı bir motor için değerlendirecek olursak 100km’de ortalama 2,4 kg (3 lt) benzin tükettiği varsayılırsa bunu hidrojen kullanarak 100 km’de 0,8 kg kadar bir değerle karşılayabilecek, ayrıca gelişmiş yakıt pilleri teknolojisi verimlilik seviyesi artıracaktır (Züttel 2004, p. 170).

Hidrojen ayrıca amonyak, metanol, polimerler gibi endüstriyel hammaddelerin üretiminde ve ayrıca yakıtta kükürt giderme, demir üretimi ve hava veya baca gazından yakalanan CO₂ gazının faydalı kimyasallara dönüştürülmesi dahil olmak üzere diğer arıtma işlemlerinde önemli bir reaktandır (Yip ve diğerleri, 2019).

1.3. HİDROJENİN KİMYASAL ÖZELLİKLERİ

Doğada en çok bulunan madde olan hidrojen elementi haz halinde bulunmaktadır. Termofiziksel özellikleri Tablo 1’de görüldüğü gibi sıvı hale de kullanılabilmesi için 1 atm basınçta 20.3K kadar soğutulması gerekmektedir.

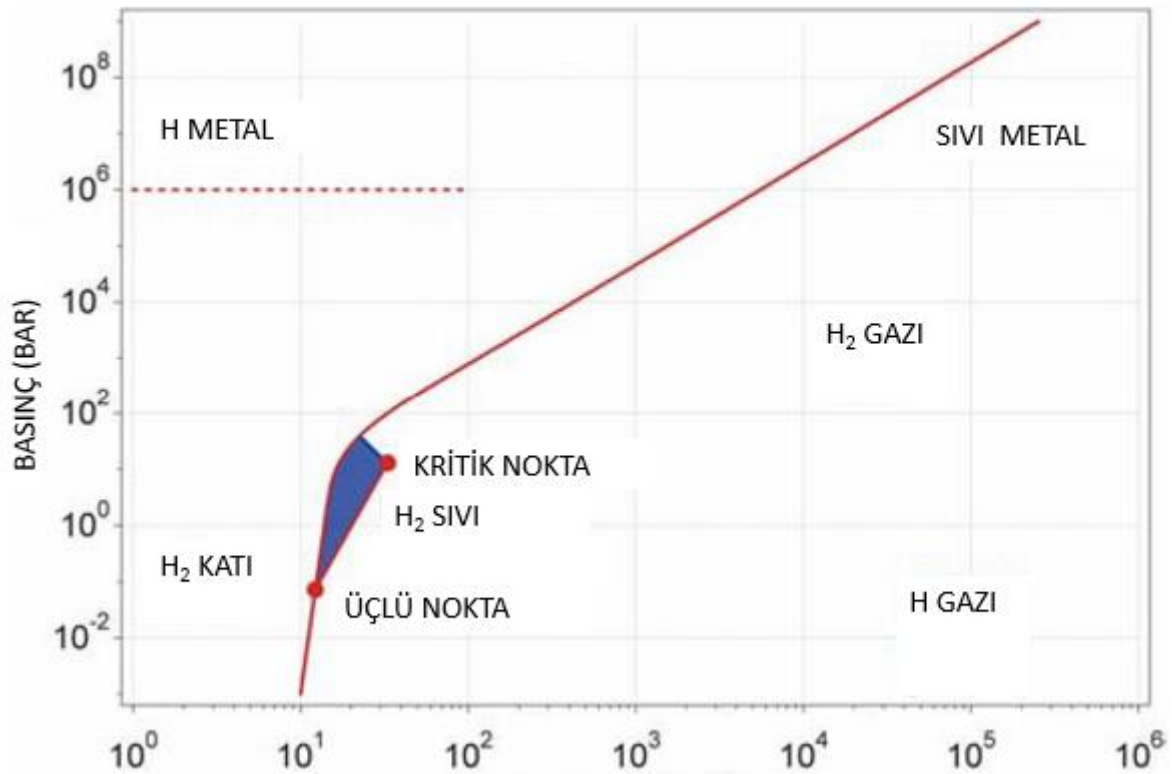
Tablo 1. H₂ gazının termofiziksel özellikleri (Dincer, Zamfirescu, 2017)

YOĞUNLUK	0.1 kg/m ³ at 1 atm/298 K (gaz)
	1.34 kg/m ³ at 1 atm/20.3 K (Buhar)

	70.79 kg/m ³ at 1 atm ve 20.3 K
	11.69 kg/m ³ at 350 atm/298 K (gaz)
İÇERİĞİ	298.15K sıcaklıkta 75% orto/25% para formundadır
LHV/HHV	119.9/141.8 MJ/kg
EKSENERJİ	118.05 MJ/kg (kimyasal)
KENDİ KENDİNE TUTUŞMA SICAKLIĞI	850 K
YANICILIK	4–18% ve 59–75% hava ile karıştırıldığında
KRİTİK NOKTA	32. 97 K, 12.9 bar
NORMAL KAYNAMA NOKTASI	20.3 K (1 atm)
	99.8% parahidrojen+0.02% ortohidrojen
ERİME NOKTASI	14.01 K (1 atm)
SIVILAŞMA	14.1 MJ/kg teorik
DİFÜZYON	0.61 cm/s havada
İLETKENLİK	0.177 W/mK
PATLAMA	13-65%'i 2 km/s hava ile karıştır, 1,47 MPa'da şok dalgasının bastırılması
ALEVLENME	2.75 m/s

Hidrojen, diğer elementlere karşı çok ikircikli iyonik bileşiklerde anyon ve katyon olarak yer aldıkları gibi metal gibi davranıp oda sıcaklığından alaşımlar oluşturabilmektedir. Genel olarak diğer elementler ile örneğin karbon elementi, kovalent bağ oluşturmaktadırlar (Züttel 2004).

Aşağıdaki Şekil.4'te görüldüğü üzere, sıvı hidrojen sadece katı çizgi ile 21.2K'deki üçlü noktadan ve 32K'deki kritik noktadan gelen çizgi arasında bulunur.



Şekil 4. H₂ gazının basınç-sıcaklık diyagramı (Züttel 2004, p. 160)

Dalga fonksiyonuna göre parahidrojen ve ortohidrojen olmak üzere 2 farklı hidrojen molekülü vardır. Bu moleküllerin farkı spinlerinin aynı veya paralel yönde dönüyor olmasından kaynaklıdır. Oda sıcaklığından hidrojen gazlarının 75% orto formunda kalını ise para formunda yer almaktadır. Hidrojen gazı sıvılaştırıldığında ise 99,8% oranında para formuna spontane olarak geçiş yapmaktadır (Züttel 2004). Tablo 2’de hidrojen gazının değişik formlardaki arasındaki oranlar yer almaktadır ve Tablo 3’de ise 1 kg hidrojen gazından elde edilebilecek alt ve üst ısı değerleri yer almaktadır.

Tablo 2. Hidrojen gazı dönüşümleri (Stacy Davis ve Robert Boundy 2022)

H ₂	Ağırlık	Gaz	Sıvı
	Kg	Nm ³	L
1 kg	1	11,126	14,128
1 Nm ³ Gaz Formda	0,08988	1	1,2699
1 L Sıvı Formda	0,07078	0,77881	1

Tablo 3. Hidrojen gazı ısı değerleri (Stacy Davis ve Robert Boundy 2022)

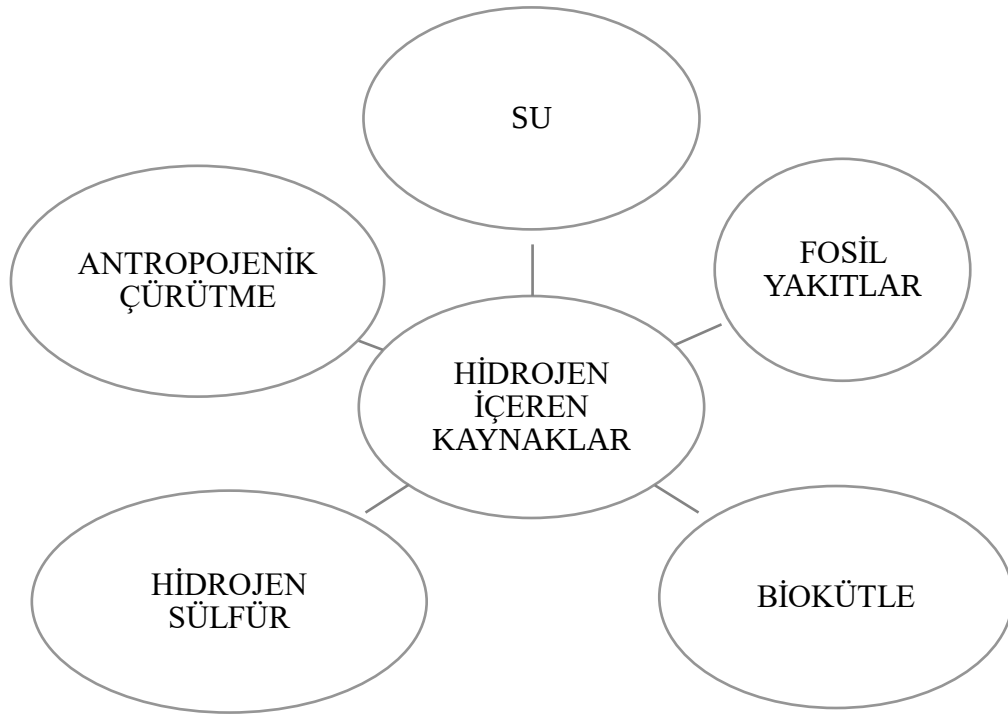
1 kg H ₂ =	
Üst Isı Değer	Alt Isı Değer
134,200 Btu	113,400 Btu
39.3 kWh	33.2 kWh
141,600 kJ	119,600 kJ
33,800 kcal	28,560 kcal

2. YENİLENEBİLİR HİDROJEN ÜRETİMİ

Doğada saf olarak hidrojen gazı elde etmek zordur. Bu nedenle üretilmesi gerekmektedir. Hidrojen gazı kolayca tepkimeye girebildiği için ayrıştırılıp saflaştırılması ve bundan sonra nihai ürün olarak kullanılması gerekmektedir.

Gelen anlamda enerji içeren madde cihaza akmak yerine cihaz içinde depolanıyorsa “birincil pil” denilmektedir. Var olan durumdan dışarıdan etkilerle başka bir duruma geçiş için (örneğin, suyun hidrojen ve oksijene elektrolizi) tahrikli hücre olarak adlandırılır. Tahrik edilen bir hücre için enerji girişinin farklı enerji kaynakları (elektrik, kimyasal, ısı) olabilir. Bunun haricinde aynı cihaz her iki yönde de dönüşüm sağlıyorsa buna yenilenebilir veya geri dönüşümlü bir yakıt hücresi ya da ikincil pil denilebilir (Sørensen, Spazzafumo, 2018). Hidrojen gazı, üretim yöntemleri ve üretim kaynakları bakımından değişik kategorilere ayrılmaktadır. Her kaynağın değişik üretim yöntemleri olmakla birlikte hibrit üretim yöntemlerinin uygulaması yaygındır.

Hidrojen gazı elde edilebilmesi için doğada kolayca bulunabilinen birtakım kaynaklara sahip olmak gerekir. Bu kaynakların verimlilik açısından yüksek değerlere sahip olması, üretimin daha ekonomik ve sürdürülebilir olmasını sağlamaktadır.

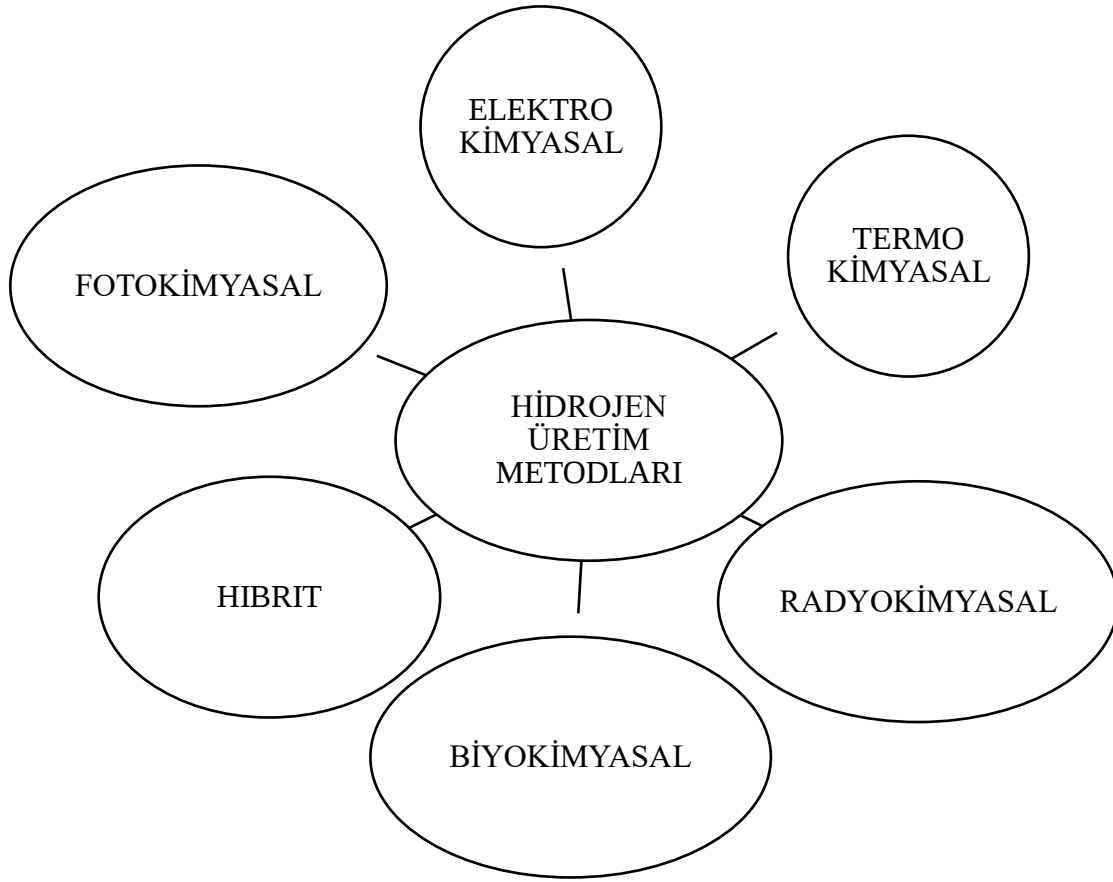


Şekil 5. Hidrojen gazı üretim kaynakları (Dincer, Zamfirescu, 2017)

Bu kaynaklar Şekil 5’te görüldüğü üzere;

- Su
- Fosil yakıtlar
- Antropojenik çürütme

- Hidrojen sülfür
- Biokütle olarak doğada bulunan kaynaklardır. (Dincer, Zamfirescu, 2017)

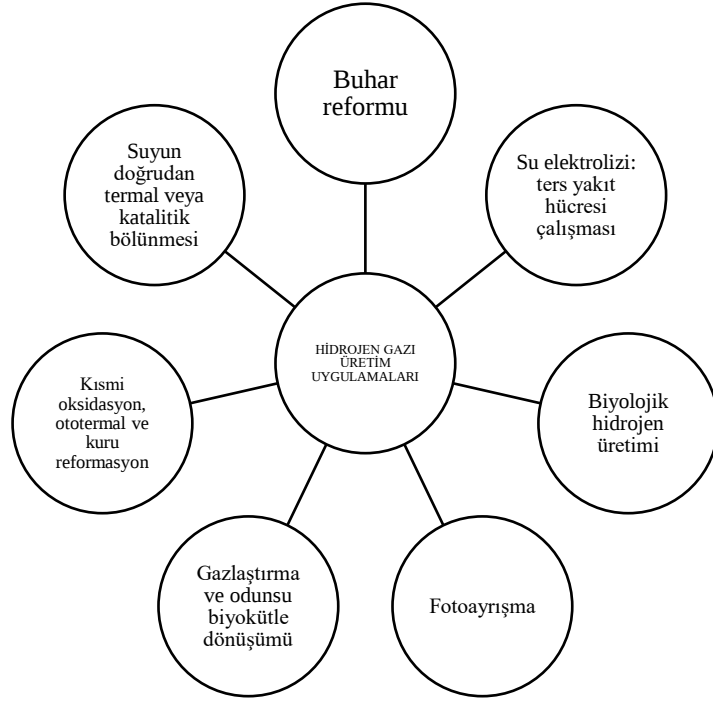


Şekil 6. Hidrojen gazı üretim metotları (Dincer, Zamfirescu, 2017)

Şekil 5’te yer alan kaynaklardan yine Şekil 6’da yer alan yöntemler kullanılarak hidrojen gazı elde edilebilmektedir.

Bu yöntemler Şekil 6’da görüldüğü gibi;

1. Elektrokimyasal
2. Fotokimyasal
3. Termokimyasal
4. Radyokimyasal
5. Biyokimyasal
6. Hibrit olmak üzere genel olarak altı farklı yöntem kullanılmaktadır.



Şekil 7. Hidrojen gazı üretim uygulamaları (Sørensen ve Spazzafumo, 2018)

Yine Tablo 4’de görüldüğü üzere günümüzde üretilen hidrojen gazının kaynak dağılımı; maliyet ve kaynak kullanımının kolaylığına dayanmaktadır. Bununla birlikte günümüz enerji sistemleri alt yapılarının da uygun olması maliyet anlamında daha düşük seviyelerde kalmasına neden olmakla birlikte üretim kapasitesi daha yüksektir.

Tablo 4. Kaynağa göre küresel hidrojen üretimi (Burton ve diğerleri, 2021)

KAYNAK	ÜRETİM MİLYAR M ³ /YIL	YÜZDE %
DOĞAL GAZ	240	48%
FOSİL YAKIT	150	30%
KÖMÜR	90	18%
ELEKTROLİZ	20	4%

Kullanım alanlarına oranla üretim ölçeğine göre de;

1. Merkezi hidrojen üretimi,
2. Dağıtılmış hidrojen üretimi,
3. Araçta yakıt reformu,
 - a. Metanol üretimi,
 - b. Metanol-hidrojen dönüşümü (Sørensen ve Spazzafumo, 2018) olarak sınıflandırılmaktadır.

Hidrojen gazı üretiminde kaynak ve üretim ölçeğine göre değerlendirildiği zaman en ekonomik ve kullanabilir olan yöntemler ile çevreye duyarlılık arasında ters orantı söz konusudur. Hem kaynakların kolay ulaşılabilir olması hem de verimlilik oranlarının yüksek olması bu üretim metotlarında daha çevreci bir üretim modeli konularında daha ileri seviyelere ulaştığı gözlemlenmektedir. Karbon yakalama ve depolama ile çevreye zararları minimum seviyeye kadar çekilmiştir.

Günümüzde en yaygın hidrojen gazı üretimi fosil yakıtlardan sağlanmakla birlikte endotermik reaksiyonlardır bu yüzden enerji tüketirler. Ortalama 8.9 kWh/kg hidrojen üretim oranı mevcuttur ve bunun üretimi esnasında doğrudan yakıldığından ortaya çıkan kadar karbon emisyonu üretir (Züttel 2004).

Fosil kaynaklardan üretilen hidrojen gazı tonu üretimine oranla 2,5/5 ton kadar CO₂ üretildiğinden dolayı çevresel anlamda hidrojeni çevreci olarak kabul edilmez. (Burton ve diğerleri, 2021) (Yip ve diğerleri, 2019).

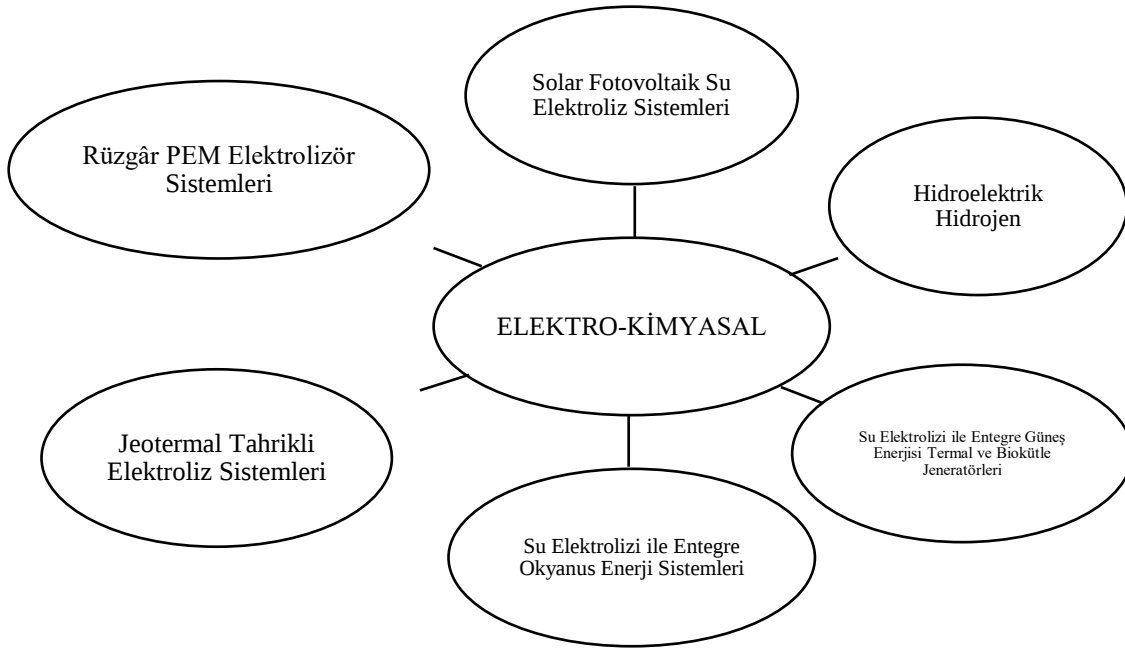
Ancak gelişen üretim metotlarına rağmen, yenilebilir enerji kaynaklarından elde edilen hidrojen gaz üretiminin verimi daha düşük olmaktadır.

Kısaca buhar yönteminde, ana yakıtın H₂ ve CO gazına termokimyasal olarak sentezlenmesi ile oluşmaktadır. Buhar yöntemi kısmi oksidasyon olmasından kaynaklı olarak yalnız CO₂ ve H₂O üreten reaksiyonlardan farklıdır (Dincer, Zamfirescu, 2017).

Biokütle gibi sistem girdilerinden hidrojen gazı elde edilirken ilave elektrik enerjisi gerekebilir. Bunun yanı sıra güneş enerjisi ile yüksek ısı ihtiyacı enerji ihtiyacını karşılayabilmektedir. Diğer bir üretim yöntemi olan elektrokimyasal üretimde ise daha çevreci ve yenilebilir enerji kaynaklarından üretiminin sağlanması amaçlanmaktadır. Mini-grid sistemler üzerinden hem küçük hem de büyük ölçekte enerji depolama imkânı tanımaktadır.

Elektro kimyasal ayırma işlemi Şekil 8’de görüldüğü üzere;

- Hidroelektrik Hidrojen
- Rüzgâr PEM Elektrolizör Sistemleri
- Jeotermal Tahrikli Elektroliz Sistemleri
- Su Elektrolizi ile Entegre Okyanus Enerji Sistemleri
- Su Elektrolizi ile Entegre Güneş Enerjisi Termal ve Biokütle Jeneratörleri
- Solar Fotovoltaik Su Elektroliz Sistemleri olarak ayırmak mümkündür.



Şekil 8. Yenilebilir elektrokimyasal üretim yöntemine göre hidrojen gazı üretim sistemleri
(Dinçer, Zamfirescu, 2017)

Bunların yanı sıra literatürde birçok metal hibrid yöntemler yer almaktadır. Bu yöntemler hem sudan hidrojen gazı elde etmek hem de hidrojen gazının depolanması ve taşınması amacıyla kullanılmaktadır. Bu yöntemler termoliz, fotokimyasal veya hibrid yöntemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunlara örnek olarak alüminyum ve silisyum sudan hidrojen üretiminde ön plana çıkmaktadır (Dinçer, Zamfirescu, 2017).

Bunlara dışarıdan enerji kaynağı gereklidir. Bu maksatla da güneş enerjisi gibi kaynaklardan fotokataliz ve fotovoltaik modüller ile daha az enerji ile daha verimli sistemler oluşturulmaya çalışılmaktadır. Ki bu sistemler geleneksel yöntemlere göre hidrojen üretim oranını artırmaktadır. (Dinçer, Zamfirescu, 2017) Diğer taraftan dışarıdan enerji kaynağı ile yapılan elektroliz işlemi güneş ve rüzgâr gibi kaynaklardan beslenirse yenilebilir olarak kabul edilir (Yip ve diğerleri, 2019).

Hidrojen gazına dönüştürülmede ekstra adım olmaksızın yakıt hücresinden kullanımı doğalgaz gibi reformasyon ile 800°C sıcaklığa gereke kalmadan kullanımı ve benzinden daha düşük içeriğe sahip olmasına rağmen ilgi çekicidir. Bu çevrim 64% lük bir termal verimliğe sahiptir. Bu sistemin yakıt hücresi olarak kullanımına rağmen yüksek basınçlı alkali tesislerinde elektrik kaynağından hidrojen gazı üretimi 80% seviyesindedir (Sørensen ve Spazzafumo, 2018).

Diğer bir üretim metodu ise güneş fırınlarından hidrojen gazı elde etmedir. Bu yöntemde sodyum elementi ile suyun tepkimesinden oluşan sodyum hidroksitin tekrar güneş fırından

metalik sodyuma indirgenmesi ile oluşturulmaktadır. Sisteme ilaveten su eklenmelidir. Bu sistem aynı şekilde lityum ve çinko ile de başarılı bir şekilde yapılabilir (Züttel, 2004).

3. HİDROJEN ENERJİSİ KULLANIM ALANLARI

Elde edilen hidrojen gazının kullanım alanları kullanım amaçlarına göre değişkenlik göstermektedir. Hem elde edilme yöntemine hem de alt yapının uygunluğuna bağlı olarak kullanım alanları geliştire bilinir. Günümüzde artarak devam eden karbon emisyonlarını azaltma amaçlı üretim politikaları sonucunda hidrojen gazının kullanım alanlarının daha çok artması kaçınılmaz olacaktır. Bu kullanımın önünde her ne kadar ekonomik öncelik yer alsa da karbon emisyonlarının azaltılması hedefleri açısından yavaş yavaş enerji sektörünün olmazsa olmazı konumuna gelmektedir. Günümüzde fosil yakıtlar kadar ön planda yer almasa da hidrojen gazı, gelişen yakıt pilleri teknolojisi ile birlikte gelecek vaat etmektedir.

Genel olarak kullanım olarak ya enerji depolama ya da enerji kaynağı olarak kullanılması esaslı üzerine kurulu bir kullanım yelpazesine sahiptir (Sørensen ve Spazzafumo, 2018).

Kullanım alanları hidrojen gazının dağıtım ve depolama zorluğu ile birlikte düşük yoğunluğuna bağlı olarak da değişkenlik göstermektedir (Verhelst 2014).

Tablo 5. Dünyada Hidrojenin Mevcut Üretim Yolları Ve Uygulama Alanları (IRENA 2018)

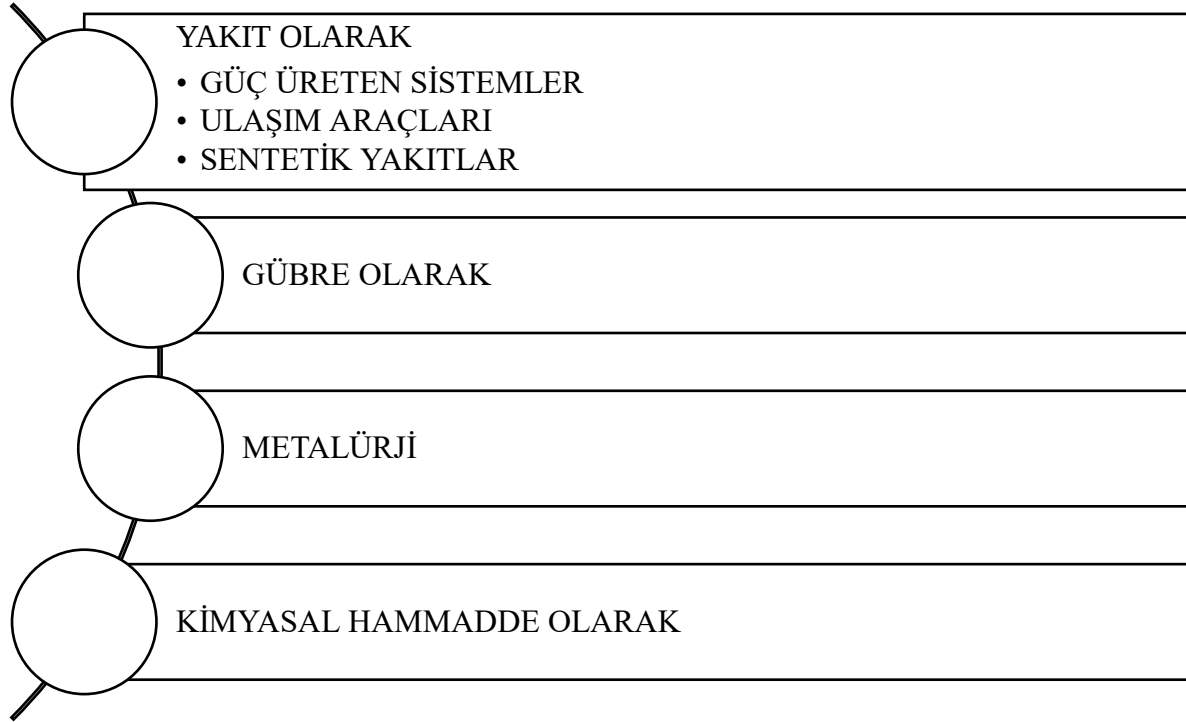
SANAYİ SEKTÖRÜ	ÖNEM ARZ EDEN UYGULAMALAR	KÜRESEL H ₂ TALEBİNİN YÜZDESİ
KİMYASAL	- AMONYAK - POLİMERLER - REÇİNELER	65%
RAFİNERİ	- HYDROCRACKING - HYDROTREATING	25%
DEMİR-ÇELİK	- ANNEALING - BLANKETING GAS - FORMING GAS	
GENEL SANAYİ	- YARI İLETKEN - İTİCİ YAKIT - CAM ÜRETİMİ - YAĞLARIN HİDROJENERASYONU - JENERATÖRLERİN SOĞUTULMASI	10%

Tablo 6. Sektörlere Göre Önem Arz Eden Karbonsuzlaşma Çözümleri

SEKTÖRLER	ÖNEM ARZ EDEN ÇÖZÜMLER
KARAYOLU YÜK TAŞIMACILIĞI	DOĞRUDAN ELEKTRİFİKASYON, YEŞİL HİDROJEN, BİYİYAKITLAR

HAVACILIK	YEŞİL HİDROJENDEN ELDE EDİLEN SENTETİK YAKITLAR, BİYOPYAKITLAR, ELEKTRİFİKASYON
DENİZ YOLU TAŞIMACILIĞI	YEŞİL HİDROJENDEN ELDE EDİLEN SENTETİK YAKITLAR, BİYOPYAKITLAR, ELEKTRİFİKASYON
DEMİR-ÇELİK SANAYİ	YEŞİL HİDROJEN, KARBON YAKALAMA VE DEPOLAMA, BİYOKÜTLE, DÖNGÜSEL EKONOMİ
KİMYASALLAR VE PETROKİMYA	BİYOKÜTLE, YEŞİL HİDROJEN, DÖNGÜSEL EKONOMİ
ALÜMİNYUM	ELEKTRİFİKASYON, YEŞİL HİDROJEN
ÇİMENTO VE KİREÇ SANAYİ	KARBON YAKALAMA VE DEPOLAMA, DÖNGÜSEL EKONOMİ, YENİLEBİLİR ENERJİ VE ATIK
DOĞAL GAZ SİSTEM DÖNÜŞÜMLERİ	YEŞİL HİDROJENDEN ELDE EDİLEN SENTETİK YAKITLAR, YEŞİL HİDROJEN, BİYOGAZ

Genel olarak kullanım alanlarını Şekil 9’da görüldüğü gibi ana sektörlerle ayırmak mümkündür.



Şekil 9. Hidrojenin kullanım alanları (Dincer, Zamfirescu, 2017)

4. HİDROJEN ENERJİSİ KULLANIM ALANLARI

4.1. YAKIT OLARAK KULLANIMI

Hidrojen gazı yakıt olarak farklı şekilde kullanılabilme imkanına sahiptir. İçten yanmalı bir motorda yakıt olarak kullanılabilirdiği gibi sentetik yakıtlara katkı olarak da kullanılabilir. EV araçlarda ise yakıt hücrelerinde kullanılmaktadır. Elektrikli araçlarda yeterince güç üretecek kapasitede yakıt hücresi olmalı ve bunu besleyecek kadar hidrojen deposu ile istenen menzile kadar gidilebilmelidir (Sørensen, Spazzafumo, 2018).

Elektrikli araçların hibrid modelleri ise yakıt hücrelerinden doğrudan güç aktarım organlarına güç iletmek şart değildir. Bu neden ile de bataryaları destekleyen yakıt hücre sistemleri yer almakta araç park halindeyken aracın şarj edilmesine izin vermektedir. Bu tür sistemlere plug-in hibrit denilmektedir (Sørensen, Spazzafumo, 2018).

Otomotiv sektöründe kullanılan yakıt hücrelerinin yakıttan elektriğe verimliliği 30%-60% arasında iken fosil yakıtlardan elde edilen hidrojen gazı verimlilik 45%-80% aralığında ve elektrikten üretilen ise 60%-90% bandında olmakla birlikte diğer faktörlerde eklenince elde edilen verimlilik 35%-40% seviyesindedir (Sørensen, Spazzafumo, 2018).

Hidrojen ve amonyakla birlikte ateşleme, yakın vadede mevcut gaz ve kömürle çalışan enerji santrallerinin emisyonlarını azaltmanın bir yolu olabilir (IEA - International Energy Agency).

Hidrojen gazının içten yanmalı motorlarda ve yakıt hücrelerinde cezbedici olmasının nedeni kolayca mekanik, termal ve elektrik enerjisine dönüşebilmesidir. Şu an bile içten yanmalı motorlarda düşük maliyetli modifikasyonlarla kullanılmaktadır. Ayrıca düşük vizkozitesinden dolayı sürtünmenin azalmasına neden olur, evsel ve endüstriyel ısıtma uygulamalarında kullanılmak üzere iyi bir yakıttır (Burton ve diğerleri, 2021).

Havacılık sektöründe; hidrojen ve oksijenin yanması, yakıtın ağırlığı başına en yüksek miktarda enerjiyi açığa çıkardığından etkili bir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Daha düşük patlama enerjisine sahip olması ısı değerinin fosil yakıtlara oranla yüksek olması bu yakıtı daha güvenli yapmaktadır (Burton ve diğerleri, 2021).

En etkin kullanım alanı ise yakıt pillerinde kullanımıdır. Yakıt hücrelerinde farklı amaçlar için kaynak olarak kullanılmaktadır.

Hidrojen Gazı Kullanılan Sistemler	Hidrojen Gazı Kullanılmayan Sistemler
☐ PEM (Proton Değişim Membranlı Yakıt Hücresi) ☐ AFC (Alkalin Yakıt Hücresi) ☐ PAFC (Fosforik Asitli Yakıt Hücresi) ☐ MCFC (Erimiş Karbonatlı Yakıt Hücresi) ☐ SOFC+ (Katı Oksit Yakıt Hücresi-Proton Geçmeli) ☐ SOFC- (Katı Oksit Yakıt Hücresi-Oksijen İyon Geçmeli)	☐ DAFC (Direkt Amonyum Yakıt Hücresi) ☐ DMFC (Direkt Metanol Yakıt Hücresi)

Şekil 10. Yakıt hücreleri (Dincer, Zamfirescu, 2017)

Enerji Üretimi	Araç İtici Sistemlerinde	Multi-Jenaratör Sistemlerde	Diğer Uygulamalar
- Sabit - Mobil - Otomotiv - Yedek Sistemler - Yardımcı Sistemler - Portatif Sistemler - Dağıtım Şebekeleri	- Otomobil - Özel Araçlar - Otobüs, Tren vs.	- Bölgesel Enerji ve Isıtma - Uzaktan Isıtma - Endüstriyel Isıtma, Güç ve Oksijen	- Su üretimi - Saf Oksijen Uygulamaları

Şekil 11. Hidrojen gazının kullanım alanları (Dincer, Zamfirescu, 2017)

4.2. GÜBRE OLARAK

Anaerobik koşullar altında hidrojen gazı üretiminde elde edilen ürünler gübre olarak da kullanılmaktadır.

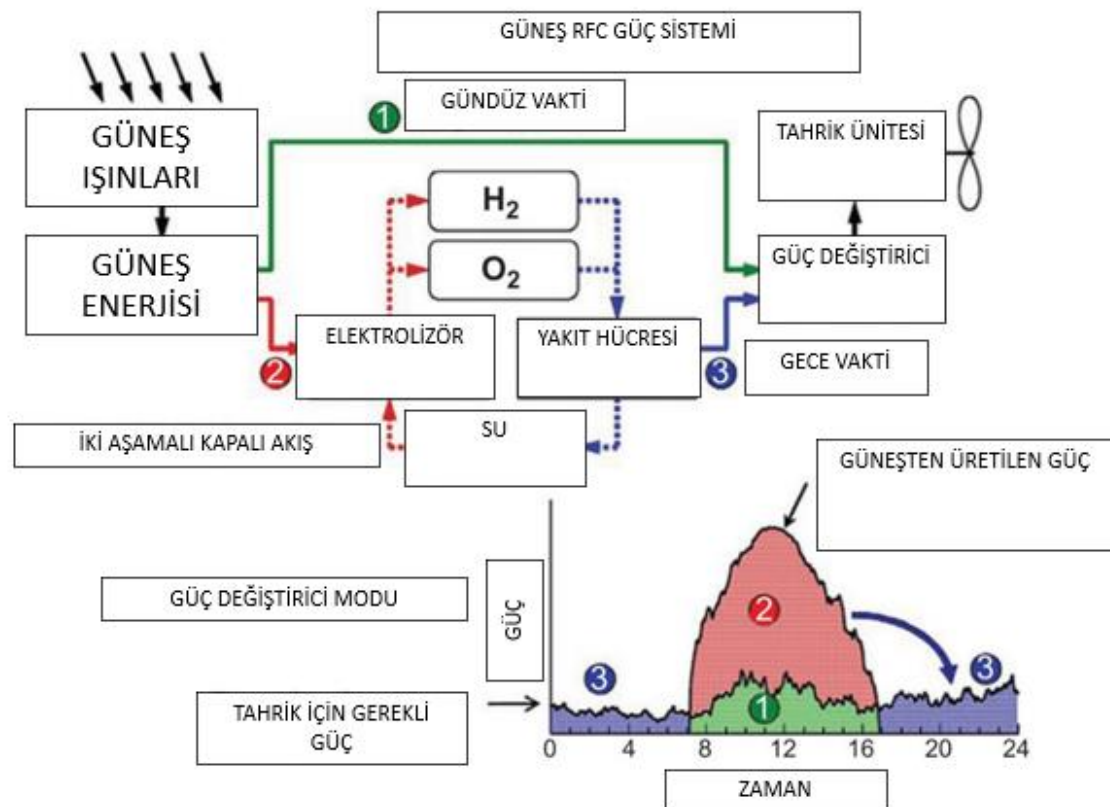
4.3. METALÜRJİ

Metal üretim sanayiinde kullanımı da oldukça yaygındır. Cam üretiminde ve tavlama, sinterleme ve fırın lehimleme gibi oksijen giderici metalürjik proseslerde kullanılmaktadır (Dincer, Zamfirescu, 2016).

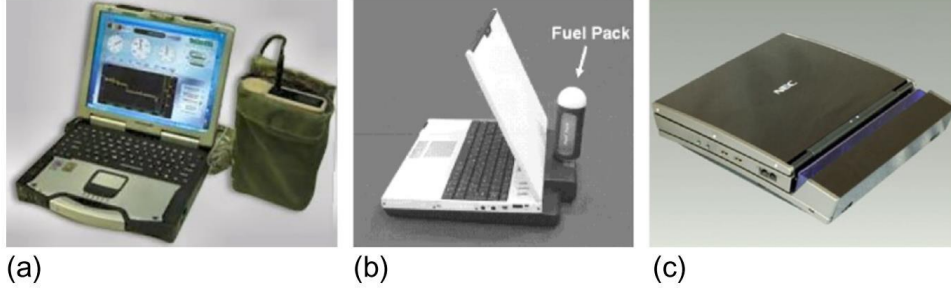
4.4. KİMYASAL HAMMADDE OLARAK

Kimyasal hammadde olarak da kullanım piyasası mevcuttur. Petrol artıma ve işleme, amonyak üretimi için reaktan, metanol üretimi reaktan, yarı iletken işleme işleminde ve nükleer reaktörlerinde kullanımı mevcuttur (Dincer, Zamfirescu, 2016).

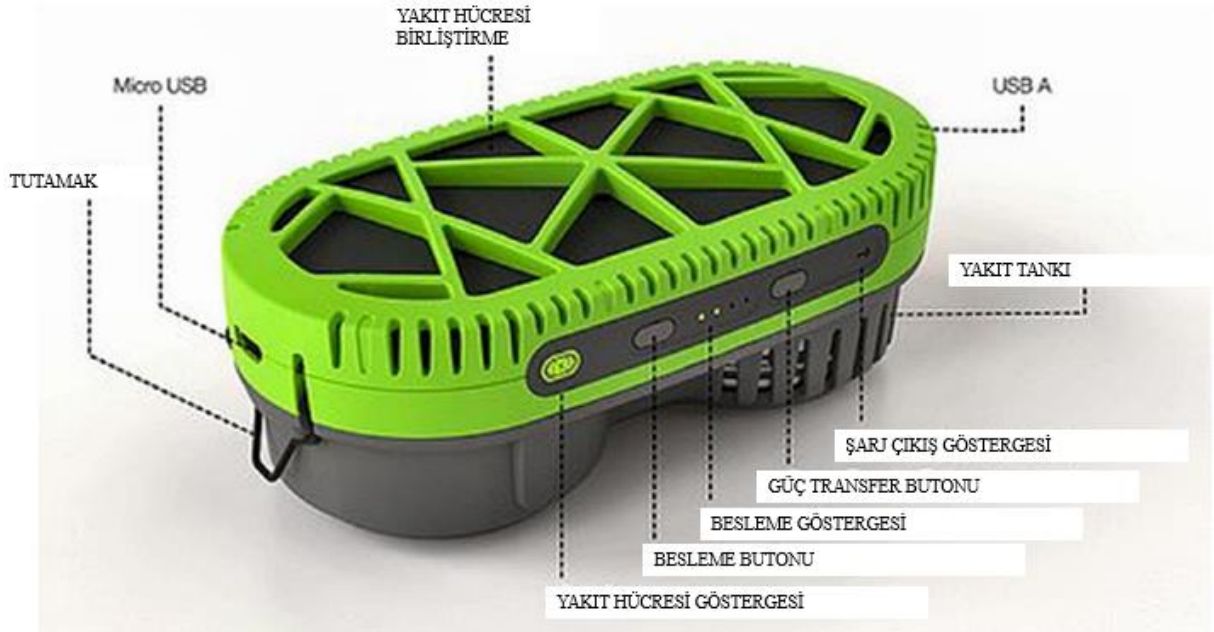
4.5. GENEL-HİBRİT KULLANIMA UYGUN ÖRNEKLERİ



Şekil 12. Güneş RFC güç sistemi (Sørensen, Spazzafumo, 2018)



Şekil 13. (a) Ultracell XX25 hidrojen yakıt hücresi (2008–11). Orta (b) ve sağ (c): NEC doğrudan metanol kartuşlu prototip yakıt hücreleri (2003 ve 2004 tasarımı). (Sørensen, Spazzafumo, 2018)



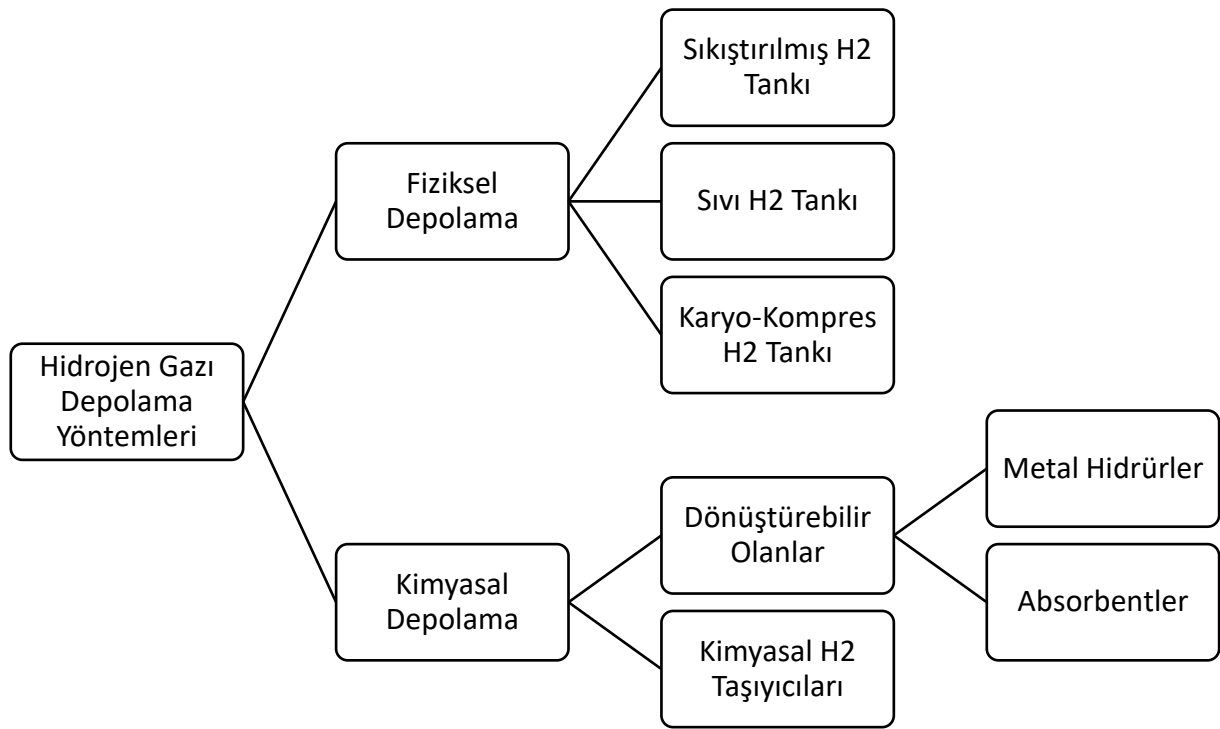
Şekil 14. Li-iyon pili şarj etmek için PowerTrek PEMFC. (Sørensen, Spazzafumo, 2018)

5. HİDROJEN ENERJİSİ DEPOLAMA VE TAŞIMA

Çeşitli kaynaklardan elde edilen hidrojen gazı kullanım safhasına göre sıkıştırılmış gaz, kriyojenik sıvı veya metal hidrit olarak depolanmaktadır.

Fiziksel depolama da 324 g hidrojen gazı ısıtma değerleri bakımından 1 kg benzine denk gelirken bunu hacimsel olarak ölçeklendirildiğinde ise standart sıcaklık (298.15K) ve 400 bar basınç altında aynı ısıtma değere sahip benzine göre 12,5 veya 9,6 kat daha fazla litre olarak hacme tekabül etmektedir. Kriyojenik sıvı haldeki yani 20.3K sıcaklıkta, 324 g hidrojenin hacmi 4,6 litreye tekabül etmektedir (Dincer, Zamfirescu, 2016).

Günümüzde 5 kg hidrojeni 125 litreye 700 barda sıkıştırma konusunda ticari olarak ilerleme kaydedilmiş (Dincer, Zamfirescu, 2016) olmasına rağmen halen depolanması konusunda genel anlamda yüksek verimlilik seviyesine çıkılamamıştır.



Şekil 15. Hidrojen gazı depolama yöntemleri (Burton ve diğerleri, 2021)

Günümüzde genele olarak depolama yöntemleri kıyaslandığından Şekil 16'daki gibi sınıflandırmak mümkündür. Bu bağlamda fiziksel ve kimyasal olarak depolanmayı ayırmak mümkündür (Lototsky ve diğerleri, 2017, p. 18).

Hidrojenin diğer bir enerji depolama yararı ise piller ile mukayese edildiğinde pillerin aksine deşarj problemi yoktur. Pillerde deşarj kapasitenin düşmesine neden olurken hidrojen için aynı

şey geçerli değildir. Ayrıca sızıntı sorunun olmaması diğer bir güvenilir enerji anlamında depolama için önem arz etmektedir (Burton ve diğerleri, 2021).

Depolama sistemlerinin kullanım yerine göre belirlenmesi bu bağlamda optimize edilip karar verilmesi gerekmektedir. Örnek olarak yakıt hücrelerinde verimli, esnek ve güvenilir olarak metal hidrür kullanımı ön plana çıkmaktadır.

Şekil 16'da yer alan yöntemlere ek olarak hidrojenin üre şeklinde depolanması da söz konusudur. Üre biyokütle veya yenilebilir enerji kaynaklarında sentezlenebilirken, bu şekilde üretim tesislerinde depolama imkânı sunmaktadır. Ancak depolama standartları diğer depolama standartlarında olmalıdır (Dincer, Zamfirescu, 2016).

Depolama sistemlerinde genel olarak; depolama standartları, depolama kullanılan malzeme ve bunların optimizasyonu, verimlilik ve güvenlik için gerekli sistemler ile bunların kullanımı ve taşınması konuları üzerinde detaylı çalışmalar yapılması gereklidir.

Depolamanın belirlenmesinde diğer bir kriter ise hidrojen gazı taşımacılığıdır. Sıvı, gaz veya hidrür şeklinde hangi taşıma şekline göre hareket edilecekse bu da depolama kriterlerini değiştirmektedir. Boru hatlarından taşımak doğal gazı göre 208 kat daha düşük olmasına enerji kaybının bu taşıma esnasında 4% olması viskozitesinin düşük olmasının iletim gücü açısından doğal gazdan daha yüksek olması ve arz-talep durumuna göre planlanması gerekmektedir. (Züttel 2004)

5.1. FİZİKSEL DEPOLAMA

5.1.1. SIVILAŞTIRMA

Hidrojenin sıvılaştırılması için kriyojenik sıcaklığa kadar soğutulması demektir. Bu da genellikle 20K sıcaklığa kadar soğutulması anlamına gelmektedir. Sıvılaştırma işlemleri endüstriyel tesislerde yapılmalı ki gerekli enerji ihtiyacı normal soğutma sistemlerinin 3 katından daha fazladır. Sıvılaştırma işlemi sıvı nitrojen veya sıvı helyum genleşme döngüsü gerektirir. Tipik olarak 0.6 MPa gibi bir basınç altında gerçekleştirilir (Sørensen and Spazzafumo, 2018).

Sıvılaştırılmış hidrojen elde etmek için kullanılan belli başlı yöntemler;

- a.** Ön soğutmalı Linde Hampson işlemi
- b.** Claude işlemi
- c.** Helyum-hidrojen döngüsü.

Hali hazırda sıvılaştırma işleminden süreyi baz alındığında sürenin uzun olması katalizör kullanımını gerektirmektedir. Bu bağlamda genel olarak demir oksit katalizör olarak kullanılmaktadır. Ayrıca düşük sıcaklık için kullanılması gereken bazı pahalı malzemeler ekonomiklik konusunda sorunlar çıkarmaktadır. Bunun yanı sıra iki aşamalı Brayton çevrimi ile hidrojenin sıvılaştırılması sağlanabilmektedir (Dincer, Zamfirescu, 2016).

Sıvılaştırılmış hidrojen gazı için en önemli dezavantajlardan biri orto ve para H₂ gazı dönüşümleri ki vakum benzeri düşük basınç altında tutulmalıdır (Sørensen ve Spazzafumo, 2018).

Sıvılaştırma konusunda alternatif olarak hidrojenin amonyak veya metanole dönüştürülerek de depolama yoğunluğu önemli ölçüde artırılabilir. Enerji yoğunluğunu artırmak ve güvenilir bir yakıt olmasını sağlamak için sentetik dizele dönüştürülür (Dincer, Zamfirescu, 2016).

5.1.2. SIKIŞTIRMA

Sıkıştırma işlemi sıvılaştırmaya göre dışarıdan daha az enerji gereken bir sistem olmakla birlikte daha fazla sıvılaştırmaya göre daha fazla depolama alanı gerektirmektedir. Sıkıştırılmış hidrojen gazı için düşük enerji ile hızlı şarj döngüsü kurabildiğinden ve kontrol altından tutmak daha kolay olduğundan ekonomiktir ve günümüzde 35-70MPa arasından depolama yapılabilmektedir (Burton ve diğerleri, 2021).

Belli bir basınca kadar sıkıştırılmış olan hidrojen gazı doğal gaz depolanmasına göre kıyasla 2 kattan fazla hacim gerektirmektedir. Uçucu olmasından mütevellit sızıntılar gazın çok hızlı boşalmasına yani patlamasına neden olacaktır. Ayrıca depolama için kullanılan silindirlerde çatlak ve mukavemet kayıplarına neden olduğundan dolayı depolama sistemleri üzerinde daha fazla çalışma yapılması gereklidir (Burton ve diğerleri, 2021).

Genel olarak depolama yöntemlerini kıyaslamak gerekirse karşımıza Tablo 7'deki gibi bir durum ortaya çıkmaktadır.

Tablo 7. Depolama yöntemlerinin karşılaştırılması (Dincer, Zamfirescu, 2016)

DEPOLAMA YÖNTEMİ	ENERJİ YOĞUNLUĞU (MJ/kg.H ₂)	wt%- H ₂ /TANK	wt%-H ₂ /kg- system	g-H ₂ /TANK	g-H ₂ /L- system
SIKİŞTİRİLMİŞ H ₂ (35 MPA)	10,2	6	4-5	20	15
SIVI H ₂	28-45	20	15	63	52
DÜŞÜK SICAKLIKTA HİDRİT (T<100°)	10-12	2	1,8	105	70
YÜKSEK SICAKLIKTA HİDRİT (T>300°)	20-25	7	5,5	90	55

5.2.KİMYASAL DEPOLAMA

5.2.1. METAL HİDRÜRLER

Katı bir metal yapı tarafından moleküler hidrojenin emilmesi ile oluşturulan sistemlere metal hidrür denilmektedir. Bugüne kadar metal hidrürü konusundan birçok yöntem denenmiştir. Bu yöntemlerin kullanımı sonucu depolanan gazın geri kullanımı esnasında yine bir miktar sisteme enerji girişine gerek vardır. Hidrojen yükleme işlemi esnasında da soğutma işlemi için ilave enerjiye gerek vardır (Dincer, Zamfirescu, 2016).

En reaktif olan elementler skandiyum, iridyum, aktinitler, lantanitler, titanyum ve vanadyum elementi yer almaktadır. Bu gruplarda yer alan elementler elektropozitif olmalarından kaynaklı olarak geçiş metali olarak görev yaparlar. Ayrıca hafif metal grubu ile yapılan bileşiklerde hafif olması taşınması konusunda da ilave fayda sağlamaktadır. Bunların yanında Li,Al,Na ve Zn gibi metallerde de su yoluyla etkili şekilde depolanabilir (Züttel 2004).

Günümüzde metal hidritler için optimizasyon daha çok ısı dağılımı ve tasarım parametrelerinin iyileştirmesi kapsamına evrilmiştir. Bu konuda umut verici çalışmalar metal hidrürlerinin yeniden doldurabilmesi veya kolayca değiştirilebilmesi üzerine yoğunlaştığı kadar kolay taşınabilir ve güvenilir olması üzerine de ağırlıklı olarak çalışmalar devam etmektedir (Lototskyy ve diğerleri, 2017).

Buna rağmen bazı metal hidrürlerin oda sıcaklığından ve atmosfer basıncı altında hidrojeni absorbe ettiği ve katalizör gibi etkenlerle daha da verimli hale getirebileceği gözlemlenmiştir (Züttel 2004).

Metal hidrürler için ana faktör ısı transferi olmaktadır. Metal hidrürün ısıl iletkenliği depolama tankı içi belirleyici etken oluşturmaktadır. Bu da kullanım alanına bağlı olarak daha küçük reaktörlerde kullanıma neden olmaktadır. Bu ısı transferi ısı dağıtılması veya soğutma tüpleri gibi ilaveler ile çözülebilir (Afzal ve diğerleri, 2017).

Metal hidrürler hidrojeni katı halde depolar bu da depolamanın daha güvenli olmasını sağlar. Bu güvenlik ve yüksek verimli hacimler bu alan gelişmelere ön ayak olmaktadır. Bunların yanında metal hidrürlerin maliyetlerinin düşürülmesi ile absorpsiyon ve deabsorpsiyon yeteneklerinin iyileştirilmesi çalışmalar devam etmektedir (Burton ve diğerleri, 2021).

Metal hidrürlerde karşılaşılan sorunlar sınırlayıcı yapısal dezavantajlar; kinetik sınırlamalar, kapasitenin düşmesi, hacimsel değişiklikler gibi yapısal olarak sorunlar çözülmeye çalışılmaktadır (Cheng ve diğerleri, 2018).

Hidrojen molekülleri sadece metal yüzeylere değil karbon alümina, zeolitve silika gibi çeşitli yüzeylere absorbe edilebilir (Sørensen ve Spazzafumo, 2018).

Kimyasal absorban için de hidrojen moleküllerini ayrışması ve protonların metal kafese bağlanması gerekmektedir. Metal hidrürler gibi kullanımı esnasından sisteme enerji girişi

olması gerekliliği vardır. Günümüzde NH_4BH_4 enerji yoğunluğu en yüksek olan hidrojen deposu olarak görünmektedir (Dincer, Zamfirescu, 2016).

Alkali ortamdaki hidrürler yakıt pilleri için potansiyeli olan kaynaklardır. Bu anlamda suda çözünen kompleks hidrürler kimyasal olarak hidrürlerin farklı bir kullanım yolunu oluşturmaktadır (Züttel 2004).

6. HİDROJEN EKONOMİSİ

Hidrojen ekonomisi için bazı teknik zorluklar vardır bunlar üretim maliyetlerinin halen yüksek olması, üretiminde kullanılan birincil enerji kaynakların büyük bir bölümünün halen CO_2 emisyonu yüksek yakıtlardan karşılanıyor olması ve yenilebilir enerji kaynaklarından bu konuda yeterli verime ulaşamamış olması, depolama şartlarının muadili enerji depolama sistemlerine göre daha zor olması, depolanan veya üretilen H_2 gazının ticareti ve dağıtımı konusunda yaşanan gelişmemişlik, üretilen hidrojen enerjisinin kullanım alanlarının birincil enerji kaynaklarının kullanım alanları kadar gelişmemiş olması ve hidrojen teknolojisi ile ilgili AR-GE yatırımlarının yeterli olamaması nedenler arasında sayılmaktadır.

Hidrojenin sadece su ve hidrokarbon yapılarda olması üretilmesi anlamı taşıdığından ve sanayi devriminden beridir neredeyse ucuz yollu enerjiye alıştığımızdan dolayı hidrojen gazının kullanımı konusunda büyük ekonomik problemlerle karşılaşmaktadır. Hidrojen üretimi için yapılması gereken yatırım yaklaşık olarak sanayileşmiş bir ülkede yaşayan bir vatandaşın yıllık gelirin 20%'sine tekabül etmektedir. (Züttel 2004)



Şekil 16. Hidrojen ekonomisi

Hidrojen yakıt olarak çok yönlüdür çünkü termal, mekanik ve elektrik dönüşümün yanında fosil yakıtlarla birlikte kullanımına kadar geniş bir yelpazeye sahipken fosil yakıtlar genel anlamda yanma reaksiyonları ile ön planda yer almaktadır. Yukarıda sayılan dönüşümler hidrojeni diğer yakıtlardan 39% daha verimli yapmaktadır. İlaveten tasarruf ve insan sağlığına zararı olmaması diğer fosil yakıtlara göre hidrojen gazını ön plana çıkarmaktadır (Dincer, Zamfirescu, 2016).

Hidrojen gazı konutlarda ve sanayide yakıt hücreleri ile enerji desteği sağladığı kadar ısı üretmek amacıyla da kullanılabilir. Mikro grid sistemler vasıtası ile yenilebilir enerji kaynaklarından elde edilen yeşil enerji ile ekonomik olarak ön plana çıkmaktadır. Bu konuda Kanada'da konutlarda kullanımı söz konusudur.

Gelişen teknoloji ile doğru orantılı olarak enerji ihtiyacı yeni ihtiyaçlar doğurmakta ve buna bağlı çözümler de üretilmektedir.

Bunların yanında karbon salınımına 8% etki eden çelik üretiminde H₂ ile çalışan fırınlar kullanımı halen istenilen seviyede ekonomik olmasa da ilerleyen teknoloji ile hem üretim ekonomisine büyük katkı sağlayacak hem de karbon salınımını azaltacağı düşünülmektedir. Temel olarak verimliliğinin yüksek olmasına rağmen maliyetler konusunda halen geliştirilmesi gereken hususlar mevcuttur (Macro Trend 2020).

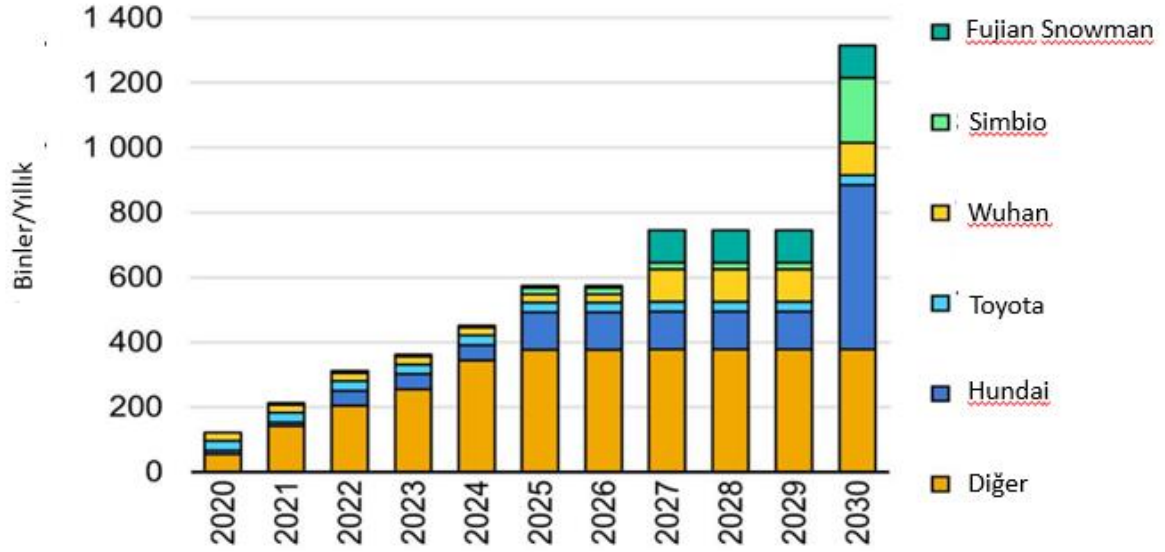
Fotovoltaik panellerin elektroliz işlemlerinde kullanılması ile yapılan hidrojen üretimi bu konuda heyecan uyandırmıştır. Her ne kadar hidrojen-güneş sistemlerinin verimi hidrojen-fosil yakıtlardan düşük olsa da proton değişimli membran elektrolizi ile verimlilik 31% seviyelerine kadar çıkarılmıştır (Burton ve diğerleri, 2021).

Türkiye için ise 4.6 Mtep seviyesinde yeşil hidrojen potansiyeli olduğu değerlendirilmektedir. Bu da 2018 yılı baz alınırse enerji tüketimini 5%'ine denk gelmektedir. Bunun elektroliz olarak üretim maliyeti ise 45,4 milyar USD\$ bir yatırım gerektireceği hesaplanmıştır (Türkiye'nin Ulusal Hidrojen Stratejisi için Öncelik Alanları).

Net sıfır emisyon senaryosuna göre 2050 yılı itibarı ile güneş enerjisinden üretilen H₂ gazı Orta Doğu coğrafyası için doğal gazla yarışır hale gelecektir. Şu an 3 USD/kgH₂ olan üretim maliyeti tahmini 1 USD/kgH₂ kadar düşeceği tahmin edilmektedir (IEA - International Energy Agency).

Gelişen yakıt hücreleri teknolojisine göre ise EV için temel enerji ihtiyacını karşılayacak potansiyeli olduğu görülmektedir. Üretici firmalar yakıt hücresi ile veya hibrit olarak çalışan EV sistemleri üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

Aynı şekilde bazı üretici firmaların yakıt hücreleri ile üretecekleri EV ait Şekil 18. görüldüğü gibidir.



Şekil 17. Firmalara ait yakıt hücresi ile çalışan araç üretim miktarları. (IEA- International Energy Agency)

2020 yılında üretilen küresel H₂ gazının yalnızca 21%'i fosil yakıtlar harici birincil enerji kaynaklarından elde edilmiştir. Üretilen 90 Mt H₂ gazının 72 Mt sadece amonyak ve petrol rafinesinde kullanılırken 18 Mt kadarı diğer gazlarla karıştırılıp metanol üretimi ve çelik üretiminde kullanılmıştır (IEA- International Energy Agency).

Enerji ihtiyacının yanı sıra hidrojen üretimi için su ihtiyacı da göz önüne alınmalıdır. Su ihtiyacı üretim kaynağına göre değişkenlik göstermektedir, doğalgazdan üretimde 13-18 kgH₂O/kgH₂ olurken kömürden üretim için bu 85 kgH₂O/kgH₂ kadar çıkmaktadır. Ayrıca suyun denizden çekilmesi durumunda ters ozmoz için m³ başına 3-4 kWh kadar ilave elektrik gerektirmekte ve ekipmanlara vereceği zararlar maliyetleri artırmaktadır (IEA- International Energy Agency).

Suyun elektrolizinden elde edilen H₂ gazının temeldeki maliyeti elektrik giderleri, sermaye giderleri, dünmüşüm verimliliği ve kaynaklara bağımlı olarak işletme süreleridir. Şehir şebekesinden elde edilen elektrik ile üretim maliyetleri yenilebilir enerjiye göre daha da maliyetli olmaktadır. Günümüzde nükleer enerjiden üretilen enerjini depolanması için H₂ gazının kullanılması daha da ön plana çıkmaktadır (IEA- International Energy Agency).

Ekonomik anlamda son kullanıcının bu kaynağı kullanabilmesi bu kaynağın devamlılık arz etmesine bağlıdır. Bu da yenilebilir enerji kaynağına bağlı olmasından dolayı değişkenlik göstereceği, yenilebilir enerji kaynaklarının daha da geliştirilmesi ve hibrit sistemleri kaçınılmaz hale getirecektir (IEA- International Energy Agency).

2020 yılında yine H₂ gazından elde edilen sentetik ürünler CO₂ yakalanarak hem daha çevreci olup hem de bu konuda yeni gelişmelere kapı aralamışken bunun maliyeti günümüzde fazla olsa da gelecekte doğaya salınan CO₂ gazı ile H₂ gazı kombinasyonları enerji kaynağı olarak kullanılabilecektir (IEA- International Energy Agency).

Halen kullanımı etkileyen temel husus H_2 gazının taşımacılığı belirlemektedir. Bunun için iyi bir planlama, verimli çalışmalar ve maliyetin düşürülmesi gerekmektedir. Bu konuda analizler depolama ve taşıma problemlerinin genel olarak değerlendirmesine bağlıdır.

7. ALKALİ ELEKROLİZ

7.1.GENEL

Günümüzde önemi gittikçe artan H₂ gazı için üretim yöntemlerini sıralanacaksa gelişen teknoloji ve azalan maliyetler ile birlikte su elektrolizi ile H₂ elde etmek ön plana çıkmaktadır. Su elektrolizi ile ilgili patentler son yıllarda büyük artış göstererek gelecekte daha da ön plana çıkacağı değerlendirilmektedir.

Genel olarak su ayırma yöntemleri;

- Yüksek sıcaklıkta buhar elektrolizi
- Elektroliz
- Radyaliz
- Termokimyasal su ayırma
- Hibrit termokimyasal su ayırma olarak sınıflandırabiliriz. Bu sistemlerde girdi olarak kaynağı fosil veya yenilebilir herhangi bir enerji kaynağından yardım ile suyun H₂ gazına ayrılması sürecidir (Dincer, Zamfirescu, 2016).

Elektrolizleri de sınıflandırmak gerekirse kendi aralarında;

- Alkali
- Asidik
- Katı oksit olarak aşağıdaki şekilde de görüldüğü üzere ayırmak mümkündür.

Tablo 8. Elektroliz sınıflandırma durumu (Dincer, Zamfirescu, 2016).

TEKNOLOJİ		GELİŞME DURUMU	T(°C)	P (bar)	SEC(kWh/kg H ₂)
ALKALİ (AEL)	BÜYÜK ÇAPLI	TİCARİ	70-90	1-25	48-60
	YÜKSEK BASINÇLI	TİCARİ	70-90	690'A KADAR	56-60
	GELİŞMİŞ	ÇALIŞMA	80-140	120'E KADAR	42-48
PEM		TİCARİ	80-150	400'E KADAR	40-60
SOEC		PROTOTİP	900-1000	30'A KADAR	28-39

Tablo 9. Elektrolizlerin teknik olarak karşılaştırılması (Burton ve diğerleri, 2021)

PARAMETRELER		ALKALİ ELEKTRİZÖR	PROTON MEMBRANLI ELEKTRİZÖR	KATI OKSİT ELEKTRİZÖR
Sıcaklık	°C	40-90	20-100	650-1000

Basınç	BAR	<30	<200	<20
Hücre alanı	m ²	<4	<0.13	<0.6
Akım yoğunluğu	A/cm ²	0.2-0.4	0.6-2.0	0.3-2.0
Voltaj	V	1.8-2.4	0.6-2.0	0.3-2.0
Üretim	Nm ³ /H ₂	<1400	<400	<10
Saflık	%	>99.5	>99.99	>99.90
Sistem enerji ihtiyacı	KWh/Nm ³	4.5-6.6	4.2-6.6	3.7-3.9
Sistem enerji verimi	%	51-60	60-68	100

İlk elektroliz kullanımı olarak denizcilik sektöründe askeri amaçla kullanıma geçmiştir. Sudan oksijen üretmek için nükleer su elektrolizörleri kullanılmıştır. 1970'lerden sonra ise enerji darboğazına çözüm için amonyak üretiminde kullanılmıştır. Daha sonra ki yıllarda gelişen teknoloji ilse umut verici bir hale gelmiştir (Dincer, Zamfirescu, 2016).

Su elektrolizinin tersinir hücre potansiyelinin hücre potansiyel oranına Faraidik verimi denilmektedir.

$$\eta_{Faradaic} = \frac{E_{tersinir}}{E_{toplama}}$$

ile formülüz edilir (Dincer, Zamfirescu, 2016). Elektroliz işleminin hidrojen çıktısının elektrik girdisine oranı düşünüldüğünde 80% oranındadır ancak ısı verimliliği de hesaba katıldığından bu verim ortalama 25-40% seviyelerindedir. Ancak elde edilen H₂ gazı 99% oranında saf haldedir (Keçebaş ve diğerleri., 2019).

Diğer bir çalışmada ise elektrolizin verimliliği en verimli hali ile 61,5% kadar ulaşabilmiştir. Bu çalışma verimi alkali elektroliz cihazları için 55-120 bin saatlik bir çalışma için geçerlidir (Burton ve diğerleri, 2021).

Alkali ortamlarda suyun H₂ ve O₂ gazı olarak ayrılması için gereken teorik tersinir potansiyel değer 1.23V'tur.

$$E_r = E_0 - \frac{RT}{2F} \ln \frac{P}{P_0}$$

formülünden yararlanılarak teorik tersinir potansiyeli bulmak mümkündür. (Keçebaş ve diğerleri., 2019). Bu değer standart sıcaklık ve basınç altında yapılan işlem için geçerlidir. Bu volt kullanılan membran elektrolit ve devredeki direnç kayıplarına göre artış göstermektedir (Adam Rearden, Stephen Mandale, Katherine Glover, Robert Phillips ve Charles W. Dunnill. 2020).

Suyun ayrılması işleminin gerçekleşmesi için 25°C ve 1 bar basınç altında;

$$\Delta H_d^\circ(H_2O(L)) = +285.840 \frac{kJ}{mol} \text{ ve } \Delta S_d^\circ(H_2O(L)) = +163.15 \frac{kJ}{mol}$$

Gerekli Gibbs serbest enerji

$$\Delta G_d^\circ(H_2O(L)) = \Delta H_d^\circ(H_2O(L)) - T * \Delta S_d^\circ(H_2O(L)) = 237.220 \frac{kJ}{mol}$$

gereklidir. Buradan yola çıkarak denge gerilimi sıcaklık ve basıncın haricinde

$$E_{\Delta G} = \frac{\Delta G}{2F} = \frac{\Delta H - T * \Delta S}{2F}$$

ile ifade etmek mümkündür (Jang ve diğerleri, 2021).

H₂ üreten tesislerde akım yoğunluğu 100-400 mA/cm² iken daha yüksek akımlarda artan sıcaklık ile birlikte yüksek bir aşındırıcı etki yaratarak kullanım ömürleri kısalmış olur (Keçebaş ve diğerleri, 2019).

2020 yılı itibari ile de kurulu elektroliz düzeneklerinin 61% kadar alkali elektroliz olurken ikinci sırada 31% ile PEM'ler kalan ise SOEC'dir. Günümüzde Alkali sistemler daha uygun maliyetli olmasıyla birlikte daha uzun ömürlü olmaktadır (IEA - International Energy Agency).

Hem AEL den hem de SOEC üretilen enerji maliyetini değerlendirmek gerekirse AEL için 1000-1200 €/kW ve SOEC den ise bu oran 2000 €/kW civarlarında olmasından dolayı halen en büyük engel büyük çaptaki üretimde maliyet olmaktadır. Bu da bu da fosil yakıtlardan metanol üretiminden neredeyse 15 kat daha fazla olmaktadır (Lonis ve diğerleri, 2021).

Bu sistemin içerisinde düzenli kafes yapıda bulunan elektrot uygulanan voltaj sonrasında yüzeyinde yük birikmesine neden olmakla birlikte her iki tabakada da zıt yüklü bir iyon tabakası oluşturur. Bu tabakalanma da suyun ayrışmasına ve tabakalanmasına neden olmaktadır (Sørensen ve Spazzafumo, 2018).

Alkali elektrolizin dezavantajı ise düşük akım yoğunluğu ve kabarcık oluşu olarak değerlendirilebilir. Bu konuda elektrolize hızlı bir dönü hareketi verilerek (Cheng ve diğerleri, 2002) veya manyetik alan oluşturularak üst üste bindirilerek elektrotları depolarizasyonu sayesinde (Kozal ve diğerleri, 2011) bu dezavantaj aşılmaya çalışılmış ancak pratik değildir (Sørensen ve Spazzafumo, 2018).

Süper yer çekimi alanı oluşturularak yapılan çalışmalarda kabarcıkların daha küçükken elektrot yüzeyinden kopması ve bu kabarcıkların normalden daha hızlı olarak oluşması gözlemlenmiştir. Ve farklı hızlarda döndürerek ayarlanabilir olduğu

$$G = \frac{w^2 L}{g} = \frac{N^2 \pi L}{900g}$$

formülü ile belirlenebilir. G değerinin artırılması ile voltajın azaltılması daha ekonomik H₂ üretiminin sağlanmasına vesile olunmuş ohmik dirençte azalma gözlemlenmiştir (Wang ve diğerleri, 2009).

Bu çalışmalarda indüklenmiş bir manyetik alanda oluşan ve yeşil lazerle elektroliz ile hidrojen üretiminin artmasının ana sebebi hidrojen bağları ve kovalent bağlar üzerinde oluşan artan gerilimden kaynaklanmaktadır. Manyetik alanın kullanımı Alkali elektrolizler için korozyona

karşı da olumlu etki yaratmaktadır ve bu işletme maliyetlerinde azalmaya neden olmaktadır. Bu çalışmaların hesaba katmadığı nadir toprak elementlerinden üretilen mıknatısların maliyetleri ile sistemin kabul edilebilir maliyetinin daha da artacağıdır (Burton ve diğerleri, 2021).

Elektroliz işlemini petrolden daha pahalı yapan bir neden ise açığa çıkan ısının Carnot çevrimi sınırlamaları nedeniyle üçte birinin işe dönüşmesinden kaynaklı düşük verimdir (Züttel, 2004).

Genel olarak değerlendirmek gerekirse oluşan H_2 gazı kabarcıklarının birikmesi, sistemdeki ısı kayıpları, aşırı güç tüketimi ve kullanılan değerli materyaller halen sistemin önündeki verimi düşürücü etkenlerdir (Burton ve diğerleri, 2021).

7.2.ELEKTROLİZ HÜCRESİ

Alkalın elektroliz hücresinde genellikle

- a. Elektrot (bunlar paslanmaz, platin vb materyallerden oluşur),
- b. Gazları birbirinden ayırmak için ayırıcı membran,
- c. Sızdırmazlığı sağlamak için contalar,
- d. Düzeneğin dış kabı ve bunlar için gerekli somun vida vs,
- e. Besleme tüpü,
- f. Tek yön çıkış borularından oluşmaktadır (Adam Rearden, Stephen Mandale, Katherine Glover, Robert Phillips ve Charles W. Dunnill. 2020).

Elektroliz hücresinde yukarıda bahsedilen bileşenler incelendiğinde genel olarak üzerinde çalışma yürütülen inovasyona trendleri kısaca;

- a. Hücre için,
 1. Sıcaklık kontrolü
 2. Basınç kontrolü
 3. Hücre yapısı
- b. Elektrolit materyali için,
 1. Soy metaller
 2. Metaller
 3. Seramikler
 4. Karbon
- c. Ayırıştırıcı için,
 1. Polimer
 2. İnorganik
- d. Elektrolit dizilimi için,
 1. Bipolar dizilim
 2. Monopolar dizilim
 3. Membranlı kullanım
 4. Membranlı bipolar dizilim
- e. Fotoelektrik için,
 1. PV kaynaklı
 2. Fotoelektrot ve fotoabsorbe

3. Elektrokatalizör (European Patent Office (EPO) ve the International Renewable Energy Agency)

Bu düzeneklerden elde edilen H_2 gazının kullanım yerine bağlı olarak yanmalı motor, yakıt hücresi, doğal gaz sistemleri veya depolama sistemlerine transfer düzenekleri de vardır. Günümüzde kullanılan alkali elektroliz sistemleri genel olarak belirleyici membran ve kullanılan elektrot çeşitlerine bağlıdır. Bu düzeneğe ilaveten kullanılacak KOH (30% konsantrasyon) gibi elektrolit sıvısı da sistemin hızlandırılması ve verimliliği için gereklidir.

KOH yerine NaCl veya NaOH da çözelti olarak kullanılabilir. Elektrolit çözeltilerinin asli görevi omik direnci düşürmek performansı artırmak için kullanılmaktadır. Aşındırıcı özelliğine reaksiyon esnasında tüketilmez ama yenilemek gereklidir. (Coşkun Avcı ve Toklu 2022). Aslında KOH $120^\circ C$ üzerindeki sıcaklıklarda kaynamaya başlar burada daha yüksek basınç altında üretime devam edilebilir (Kim ve diğerleri, 2022). Ancak KOH yüksek sıcaklıkta aşındırıcı özelliğinin artması ve basıncın yükselmesi ile oluşan verim düşüklüğü hesaba katıldığında multi-metalik özellik kazandırılmış elektrot ile yüksek sıcaklıkta aşınma problemine çözüm olabilir (Borisov ve diğerleri, 2021).

Elektrolit sıvısından kalsiyum ve magnezyum gibi metallerden kaçınılmalıdır çünkü kireç oluşumuna ve membranın tıkanmasına neden olmaktadır. Bu durum deniz sularında sıklıkla karşılaşılmaktadır. Deniz suyu gibi tuzlu su kullanılması durumunda ilaveten katotta klor gazının çıkmasına neden olacaktır. Katodun pH artmasına neden olacağına daha fazla tersinir voltaja ihtiyaç duyulacaktır. Ancak deniz suyunun kullanımı için öncelikle arıtılması saflaştırılması maliyetlerine katlanması durumunda kullanımı ilgi görmektedir. Klor salınımının düşürülmesi için de iridyum dioksit ile kaplanmış mangan anotlar etkilidir. Aynı zamanda molibden bazlı katalizörler de bu konuda fayda sağlamaktadır (Dincer, Zamfirescu, 2016).

En büyük problemlerden biride üretilen H_2 'nin açığa çıkan O_2 ile tepkimeye girmesidir. Bunun engellenmesi için özel işlem, katalizör veya ayırma cihazları kullanmak gerekir (Dincer, Zamfirescu, 2016).

Elektroliz hücresi için illa ki su şart değildir. Hibrit sistemler de kullanılabildiği gibi su olmadan da gelişen reaksiyonlar da vardır. Geleneksel su elektrolizi ile kıyaslandığında hibrit sistemler daha karmaşıktır çünkü ara ve aktif bölgelerde devamlı substratlar değişkenlik gösterebilmektedir (Du ve diğerleri, 2021).

Hibrit sistemlerin daha çok amacı hem yüksek saflıkta H_2 gazı üretmek hem de oksijen evrimi reaksiyonuna harcanan enerjinin endüstriyel uygulamalarda sebep olduğu ihtiyacı minimuma çekmektir (Ying ve diğerleri, 2022).

Yine su harici elektrolit için hidrazin kullanımının ön plana çıkmaktadır. Gelişen tepkime için su elektrolizine göre daha düşük enerji ile giderilebilmektedir. Kullanılan reaktif kurban elektrot, sistemin temel maliyetli parametresidir. $28mV$ 'luk bir voltajında $10mAcm^{-2}$ akım yoğunluğu ile kendi kendine çalışan bir elektroliz umut verici olarak kayıtlara geçmiştir.

Hidrazin bu anlamda H_2 gazı için depolama potansiyeli olarak da değerlendirilebilir (Du ve diğerleri, 2021).

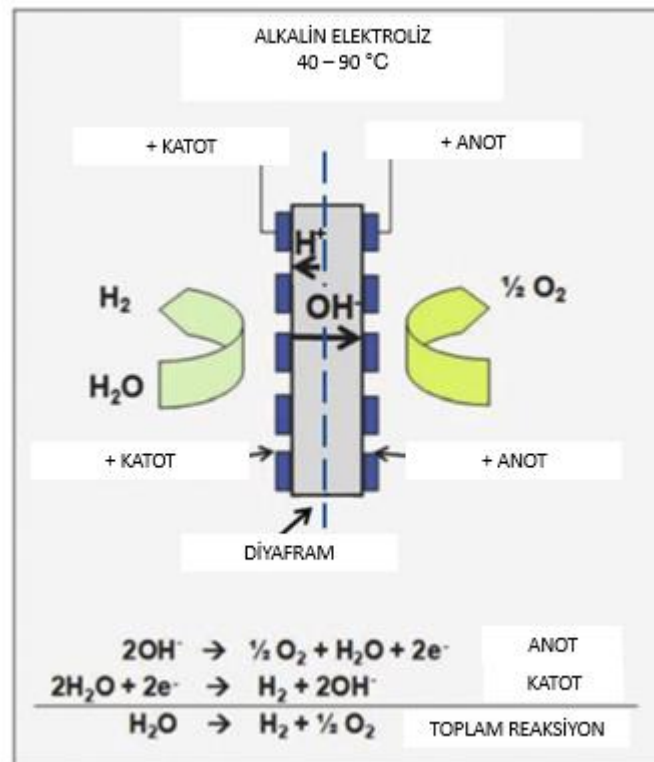
Bunların yanında H_2S gibi yan ürünler de hibrit su elektrizör sistemine entegre edilebilirler. Na_2S oluşturmak için H_2S nin kullanılması su oksidasyonu için gereken voltajdan daha düşük bir enerji girişi ile gerçekleşebilmektedir. Metaller ile tepkimeye girerse bu S^{2-} iyonlarının metale yapışması ile zehirleyici bir durum ortaya çıkarmaktadır (Du ve diğerleri, 2021).

Karadeniz gibi denizlerde bol bulunan H_2S ve amonyak içeren atık sudan kloralkali prosesler ile yan ürün olarak H_2 üretimi mümkündür. Hidrojen sülfür önemli bir yan ürün olmasının yanında doğal haz kuyularında ve gaz hidrat çökeltilerinde bol bulunan bir kaynaktır. Aynı özelliğe sahip kükürtlü sularda (SOX) sahiptir (Dincer, Zamfirescu, 2016).

Karbon oksidasyon reaksiyonu (COR) tepkimeleri ile anotta $C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H^+ + 4e^-$ ve katotta $4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$ toplamada ise $C + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2H_2$ reaksiyonu gerçekleşir. Bu sayede güç gereksinimi büyük miktarda düşürebilir. (Ying ve diğerleri, 2022).

7.3. ELEKTROT İNCELEMESİ

Bir elektroliz hücresinde doğru akım kaynağına bağlandığında, negatif kutba bağlı olan katot bölümünde $2H_2O + 2e^- \rightarrow 3H_2(g) + 2OH^-$ indirgeme reaksiyonu gerçekleşirken pozitif kutba bağlı olan anot bölümünde ise $2OH^- \rightarrow H_2O + 0.5O_2 + 2e^-$ oksidasyon reaksiyonu gerçekleşmektedir. Buradan yola çıkarak anotta O_2 gelişirken katotta ise H_2 gazı gelişmektedir. (Dincer, Zamfirescu, 2016).



Şekil 18. Alkali elektrolizörün temel çalışma parametreleri (Burton ve diğerleri, 2021)

Bu tepkimenin gerçekleşebilmesi için sisteme minimum 1.23V gerekli olduğunu daha önce de bahsedilmişti. Bu değerin üretebildiği H₂ gazı miktarının artırılması için elektrotların katalizör görevi gördüğü ve elektrot seçiminin sıcaklık ve basınç parametrelerine bağımlı olarak üretim kapasitesini belirlemektedir.

Sisteme verilen 1.23V oda sıcaklığı ve atmosfer basıncı için geçerli iken değişen sıcaklıklarda daha düşük potansiyel farkla da üretim verimi devam edebilir, basıncın düşük etkisine rağmen sıcaklığın etkisi ile üretim kapasitesi daha düşük enerji girdisi ile çözülebilmektedir (Jang ve diğerleri, 2021)

Düşük basınç düşük sıcaklıklarda elde edilen hidrojenin saflık seviyesi yüksek olmakla birlikte 20 bardan sonra anlamlı bir değişime neden olmamaktadır. (Jang ve diğerleri, 2021) yüksek basınç altından metal hidrür oranı artacağından elektrot direnci daha çok artacaktır ki bu da verimin düşmesine neden olacaktır. Basınç kabarcıkların büyüme hızını etkilediğinden daha ağır kabarcıklar elektrotlarda daha uzun süre kalacaklardır. Bu da elektrot yüzeyinde yeni reaksiyonların gelişmesini engellemektedir (ROY ve diğerleri, 2006)

Elektrotlardan beklentiler yüksek akımları sürdürebilmeleri, homojen elektrik alanı verebilmeleri ve kararlı yapıda olmalıdırlar (Đurović ve diğerleri, 2021).

Bu beklentiler verimlilik ile doğru orantılıdır, fazla oluşan kabarcıklar “kabarcık voltaj kaybı” olarak değerlendirilen hücre voltajının artmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı omik yapı ile kabarcık kaybı arasında optimizasyon yapılmalıdır (ROY ve diğerleri, 2006).

Kullanılacak elektrotlar; nikel, kobalt, vanadyum, metal karbürler, demir ve alaşımları ile platin gibi metallerden oluşur. Demire molibden ilavesi mikro çatlak oluşumunu artırarak yüzey alanında artışa neden olarak muhtemelen aktivitenin de artmasına neden olmaktadır. Benzer şekilde Fe-Mo-Ni umut verici alaşımlardandır (Đurović ve diğerleri, 2021, p. 5). Bunlara ilaveten katalizör görevi gören kaplamalar ve eklentiler ile verimlilik artırılmaya çalışılır (Keçebaş ve diğerleri, p. 299).

Elektrodun atomik yapısı kadar fiziksel özellikleri de etkilidir. Yüzey alanı büyüyen elektrodun taşıma direncini artırdığı göz önüne alınırsa üretime ters orantılı olarak etki etmektedir. Ancak daha fazla yüzey alanı daha fazla üretim kapasitesi olduğundan üretime olumlu etki edeceği ve bu bağlamda daha fazla enerji ile kapasitenin artacağı gözlemlenmiştir (Adam Rearden, Stephen Mandale, Katherine Glover, Robert Phillips ve Charles W. Dunnill. 2020). elektrotlardaki üretim hataları kaplama hataları H₂ gazı üretimini olumsuz olarak etkileyebilir (Okonkwo ve diğerleri, 2022).

Amorf yapıya sahip elektrotlar yüksek korozyon direncine sahip olacağından mekanik olarak stabil ve ideal elektrokimyasal özelliklere sahip olacağı değerlendirilmektedir (Đurović ve diğerleri, 2021).

Elektrot tasarımıyla katalizör seçimi yüksek sıcaklık altında üretim verimini 80% rakamlarına çıkaracağı değerlendirilmektedir. Ancak KOH kullanımında korozyon etkileri azaltmak için 100°C altında kalmaya mecbur bırakır (Sørensen ve Spazzafumo).

Pahalı katalizörler de kullanılmadan nikel kaplı çelik gibi materyaller ile uygun maliyetli ama etkili katalizörler de kullanılabilir. Bu sayede daha uygun maliyetli tesisler inşa edilebilir (Dincer, Zamfirescu, 2016).

Elektrodlar arası boşluklar azaldıkça belirli bir voltajın üretim hızını artırdığı gözlemlenmiştir. Ancak bu iki zıt elektrodun arasında akım dalgalanmayacak kadar olmalıdır. Bu sayede omik kayıplar azaltılmış olur. Bu tür sandviç benzeri tasarımlar elektron geçişlerine izin verirler. (Adam Rearden, Stephen Mandale, Katherine Glover, Robert Phillips ve Charles W. Dunnill. 2020), (Dincer, Zamfirescu, 2016).

Elektrolit içerisinde açığa çıkan H₂ kabarcıklarının manyetik alan içerisinde Lorentz kuvveti oluşturularak yüzeye daha seri çıkmasını sağlamak için uygulanmıştır. Kabarcıkların varlığından kaynaklı omik dirençler azalmıştır. (Dincer, Zamfirescu, 2016) diğer bir çalışmada kabarcıkları yukarı doğru koparılmasında manyetik alanın etki ettiği görülmüştür (Matsushima H ve diğerleri, 2013).

Su elektrolizi verimliliğini artırmak için molibden bazlı okso-katalizör ile paralel olarak çalışan katalizör düzenekleri ile H₂ üretiminde artış elde etmişlerdir (Karunadasa ve diğerleri 2010). Bunun yanı sıra Vakum plazma püskürtme yöntemi ile elektrot üretimi yüksek performanslı elektrotların yapılabileceğini göstermiştir (Schiller ve diğerleri, 1995).

Gaz kabarcıklarının boyutlarının küçülmesi ve yapışmasının önlenmesi için santrifüj alanı etkileri test edildiğinden akım yoğunluğu artırıldı bu da verimliliğe olumlu olarak etki etmiştir. (Nikolic ve diğerleri, 2010) Ki böyle bir sistemin tasarım aşamasında kurulmasının zorluğu ve buna zorunlu akış alanı oluşturma dahil olacağından daha fazla güç tüketimine neden olacaktır (Burton ve diğerleri, 2021)

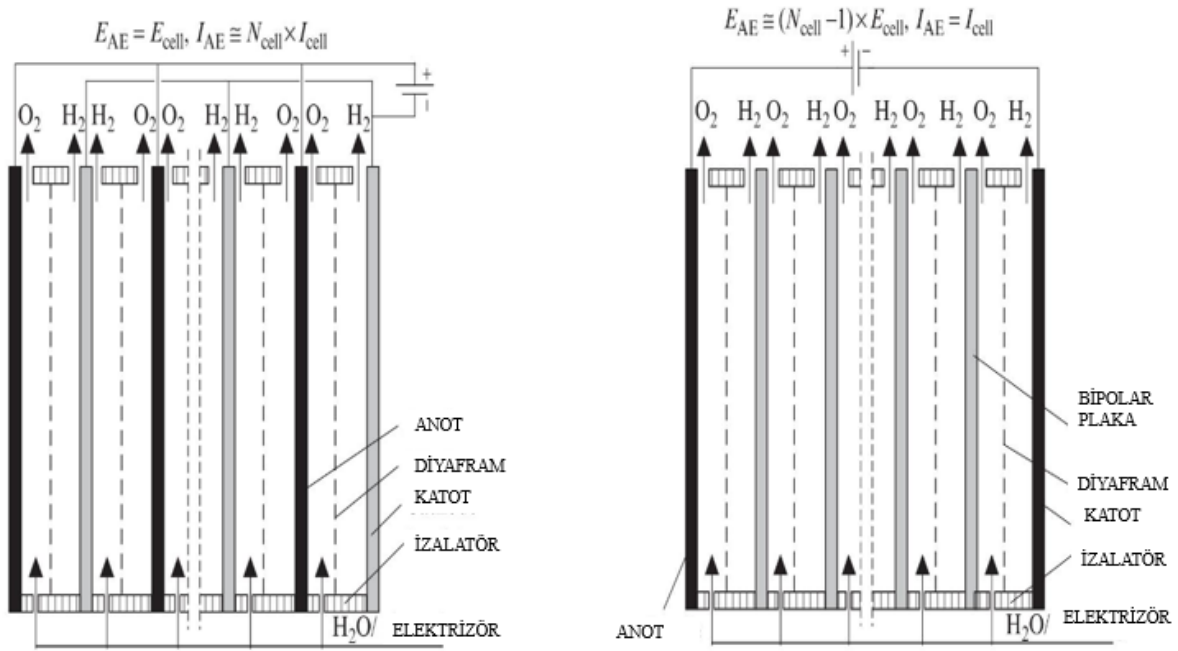
Ultrasonik alan çalışmaları ile H₂ verimliliğinin artırabileceği kullanılan elektrolit sıvısına ve katalizörlere göre değişkenlik gösterdiği ve verimlilik olarak ultrasonik kullanılmayan sistemlere oranla 8% ile 20% arasında kademeli artış gözlemlenmiştir (Hung ve diğerleri, 2012). Diğer bir çalışmada ise 10-25% kadar bir güç tasarrufu sağlanacağı gözlenmiştir (Li, Wang, ve Chen 2009). Ayrıca ultrasonik dalga ile elektrodun aktive edilmesi elektrot kirlenmesini önleyerek elektrot yüzey şartlarını iyileştirir (Lin ve Hourng 2014).

Ultrasonik alan uygulamalarının da sistemin genel verimliliğini 20% kadar artırdığı gözlenmiş ancak bu durumun güç girişinden bağımsız olduğu değerlendirilmektedir. Ancak bazı çalışmalarda titreşimlerin hücrenin genel verimliliğini azalttığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmalarda H₂ gazının kavitasyona bağlı buharlaşmanın ana maddelerinden biri olduğu da tespit edilmiştir. Suyu moleküler açıdan bakıldığında manyetik alan, fotoelektrik, ultrasonik ve elektrik alanın etkisi; suyun içerisindeki orto-para oranı artırıldıkça dönen molekül sayısı artar bu da daha düşük hidrojen bağ seviyesine neden olur (Burton ve diğerleri, 2021).

Ek olarak su buharı formundaki suyun elektrolizi için hidrojen ve oksijen atomları arasındaki mesafe fazla olacağından dolayı aralarındaki elektromanyetik çekimin azalmasının sonucu olarak molekülleri bölmek daha kolay olacaktır (Burton ve diğerleri, 2021).

7.4. DİZİLİM İNCELEMESİ

Dizilimler monopolar veya dipolardır. Bu dizilimler aralarına konulan membranlara göre verimlerinde değişiklikler gösterebilmektedir.



Şekil 19. Monopolar düzenek ve bipolar düzenekler (Dincer, Zamfirescu, 2016)

Elektrot diziliminin en önemli kısmı membran-separatör yerleşimi olduğu kadar oluşan H_2 gazının kabarcıklarının elektrot yüzeyinden hızlıca uzaklaştırılması olarak değerlendirilebilir. Söz konusu kabarcıklar sistemin direnci artırmakla birlikte iyi bir analizi yapıp önlem alınmazsa sistemde verim düşüklüğüne de sebep olmaktadır. H_2 gazının ve O_2 gazının kabarcık sorunu çözmek için kabarcıkların hareketleri iyi bilinmelidir (Coşkun Avcı ve Toklu 2022). Bu kabarcıklar elektrot üzerinde kaldıkları süre boyunca aktif alanı meşgul ederler ve bu da gerilimin artırılmasına neden olur diğer bir olumsuz etkisi ise elektrolitin iletkenliğini azaltmasıdır (Jang ve diğerleri, 2021).

Elektroların arasındaki boşluklar, H_2 kabarcıklarının oluşumu ve yükselmesi için etken bir durumdur. Boşluk ne kadar büyük olursa H_2 gazı da hızlı tahliye olmaktadır. Üretim hızını etkileyen bir faktördür (Coşkun Avcı ve Toklu 2022).

8. H₂ GAZININ MOTORLARDA KULLANIMI

8.1.MOTORLAR

Karışım şekline göre içten yanmalı motorları başlıca karbüratörlü yakıt sistemi ve yakıt enjeksiyonlu sistem olarak ayırmak mümkündür. Yakıt enjeksiyonlu sistemleri kendi arasından tek noktada, çok noktada ve direkt enjeksiyon diye ayırmak gerekir. Genel olarak ayırımı hava-yakıt karışım biçimi ile yeri oluşturmaktadır. Yakıt enjeksiyonlu sistemlerde asıl amaç yakıtın hava içerisine mümkün olduğunca en küçük partikül şeklinde ve homojen olarak dağılımının sağlanmasıdır. Homojen olarak dağılması vuruntuyu önlediği gibi daha verimli yanma oluşturmaktadır. Tek nokta enjeksiyon sistemi (SPI) çok yaygın kullanılırsa da karbüratörlü sistemlerden daha verimli olmakla birlikte, emme manifolduna tek noktadan yakıtın püskürtüldüğü sistemlerdir. Yakıt bir her bir silindir için ayrı birer enjektör tarafından püskürtüldüğü çoklu püskürtme noktalarına çok nokta enjeksiyon sistemi (MPI), bazı kaynaklarda port yakıt enjeksiyonu da (PFI) denilmektedir. Tek nokta enjeksiyon sisteme göre daha verimli olmakla birlikte emiş sistemi atmosferik veya turbo şarjlı olabilmektedir. Direkt enjeksiyon sistemi ise elektronik kontrol ünitesi vasıtasıyla çalışan ve buradan gelen bilgilere göre hava-yakıt oranını ayarlayan ve buna bağlı yüksek performans sağlayan bir sistemdir. Ortak raylı sistemler, yakıt basıncını yükseltilecek enjektörlerin daha hassas püskürtmesini sağlayan ve yaygın olarak kullanılan modellerdir. Ortak raylı sistemler sayesinde emisyonlar azalmakla birlikte sorunsuz bir yanma oluşmaktadır. H₂ gazı motorlarda içten yanmalı motorlarda kullanım ve yakıt hücresi olarak kullanım olmak üzere ana iki tahrikli kullanımı mevcut olup bu bölümde içten yanmalı motorda yakıt takviyesi olarak kullanımı değerlendirilecektir.

Yakıt hücreli sistem vasıtasıyla beslenen tahrikli sistemlerde depodan tekerleğe kadar verim oranı 31% ile 36% aralığında kalmakla birlikte birçok otomobil firması tarafından ticari ürün olarak kullanılmaktadır. Gümünüzde 480 km menzile sahip yakıt hücreli kamyon tanıtımı bile yapıldı (Yip ve diğerleri, 2019).

Buna karşılık olarak içten yanmalı motorlarda yakıt kirliliklerine karşı tolerans, yakıtlar arası geçiş esnekliği, ilave malzeme kullanımının azaltılması ön plana çıkmaktadır. Bunlara ilaveten günümüzde içten yanmalı motor üretim sistemlerinin gelişmiş olması ve tedarik ve üretim süreçlerinin yaygın olması H₂ gazının içten yanmalı motorlarda kullanımı konusunda iç açıcı duruma getirmektedir (Yip ve diğerleri, 2019).

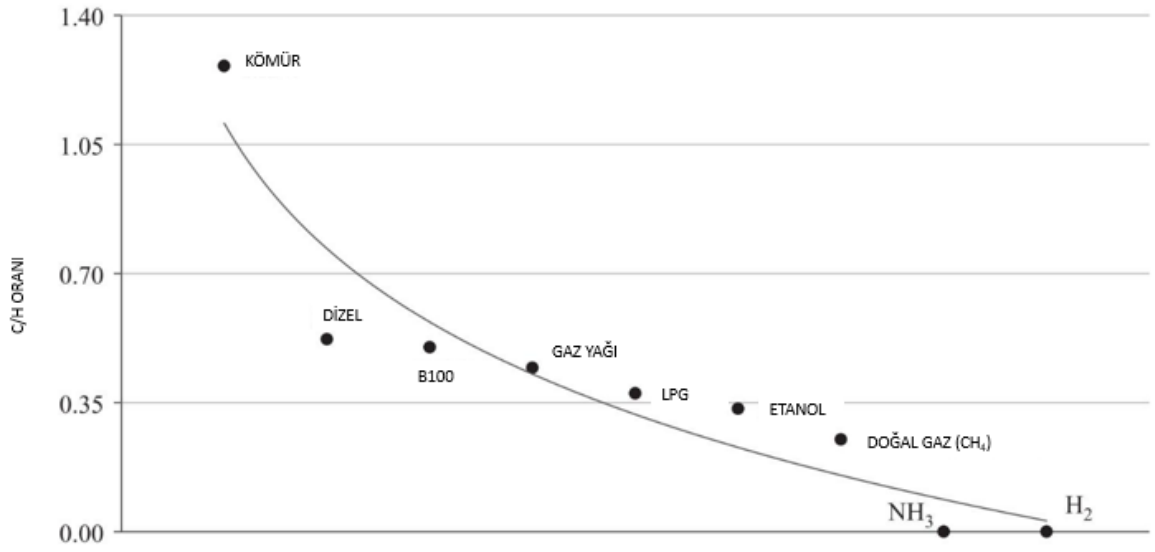
8.2. H₂ GAZININ İÇTEN YANMALI MOTORLARDA KULLANIMININ TARİHSEL GELİŞİMİ

Tarihte ilk olarak 1820 yılında İngiltere’de H₂ gazı yakıt olarak denendi. 1854 yılında İtalya’da serbest pistonlu H₂ gazı ile çalışan motor geliştirildi. 1930’larda ise H₂ ile çalışan içten yanmalı motorların çevreye zarar vermedikleri tespit edilmiştir. (AKANSU 2004)

8.3. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA H₂ KULLANIMI

İçten yanmalı motorlarda yakıt zenginleştirme olarak kullanılan H₂ hem çevreci bir kaynak olmasından ötürü çevreye zararlı emisyonlar salmamakla birlikte NO_x emisyonu giderilmesi mümkün olan bir son üründür.

İçten yanmalı motorlarda kullanım için C/H oranına bakıldığında zaman çevreye etki anlamında en çevreci yakıt Şekil 21. görüldüğü üzere H₂ olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak bu olumlu özelliğini sadece uygun yanma stratejileri kullanıldığında gözlemlemek mümkündür. Uygun stratejiler seçilmezse kullanılan ana yakıttan kaynaklı olarak NO_x salınımı gibi çevreci olmayan problemler ortaya çıkmaktadır.



Şekil 20. Genel olarak kullanılan yakıt çeşitlerinde C/H oranları (Dincer, Zamfirescu, 2016)

İçten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtlar özellikler bakımından kıyasladığında aşağıdaki gibi bir durum ortaya çıkmaktadır.

Tablo 10. Yakıtların termofiziksel özellikleri (Dincer, Zamfirescu, 2016)

ÖZELLİKLER	BENZİN	DİZEL	CNG	LNG	BİYODİZEL	H ₂	AMONYAK
HAMMADDE	HAM PETROL		DOĞAL GAZ BİYOGAZ		YAĞLAR	DOĞAL GAZ ELEKTROLİZ	DOĞAL GAZ
BİLEŞİK	C ₃ H ₈	C ₁₂ H ₂₃	CH ₄	CH ₄	(C ₁₂ -C ₂₂)	H ₂	NH ₃
FİZİKSEL HAL	SIVI	SIVI	SIKIŞTIRILMIŞ GAZ	KRİYOKENİK SIVI	SIVI	SIKIŞTIRILMIŞ GAZ VEYA SIVI	SIVI

YÜKSEK ISIL DEĞER (MJ/kg)	46.7	45.5	42.5	50	40.1	5.7	22.5
DEPOLAMA YOĞUNLUĞU (kg/m³)	736	850	188	450	880	10	603
DEPOLAMA BASINCI (bar)	1	1	20-25	8	1	200-500	10
SETAN SAYISI	-	40-55	-	-	48-65	-	-
OKTAN SAYISI	84-93	-	120+	120+	-	130+	110-130
PARLAMA SICAKLIĞI (°C)	-43	74	-184	-188	100-170	-	-
KENDİLİĞİNDE N TUTUŞMA ISISI (°C)	257	255	540	540	150	565-585	651
ATEŞLEME LİMİTİ	-	0.6-5.5	5-15	5-15	-	4-75	

H₂ gazı sıkıştırıldığında kendiliğinden tutuşma mümkün olmadığından yanma odasında bazı ateşleme sistemlerinin olması, kızdırma bujileri veya yakıtın önceden sızdırılması vasıtasıyla kullanılabilmesi mümkündür. Dizel motorlarla aynı fren gücü (efektif güç) üretmesine rağmen daha yüksek termal verimlilik üretmektedir. Termal verimlilik ise H₂ yüksek alevlenme hızından kaynaklanmaktadır (Yadav ve diğerleri, 2014).

İçten yanmalı motorlarda H₂ kullanımını belirleyen ana parametreler,

- Püskürtme sistemleri
- Püskürtme meme geometrisi
- Tek veya çift ateşleme
- Yanma odası geometrisidir (Verhelst 2014).
-

Yukarıdakilerin yanı sıra motor devri, motor yükü valf zamanlaması, ateşleme zamanlaması gibi motorla ilgili parametrelere de bağlıdır (Gao ve diğerleri, 2022b).

İçten yanmalı motorlarda H₂ gazının diğer yakıtlar ile karıştırılarak kullanılır. Fosil yakıtlar içerisinde kullanılan H₂ gazının NO_x gibi gazların açığa çıkması, vuruntu, düşük hacimsel verimlilik, sıkıştırma kayıpları, yüksek maliyet gibi olumsuz yanlarının olmasına rağmen ve bu olumsuzlukların giderilmesi için araştırmaları ve optimize çalışmaları devam etmektedir.

H₂ gazı 5% hacimli metan ile karıştırıldığında enerji içeriği 11% artmaktadır. Benzin ile kıyaslandığından H₂ ile ikili karışımların motorlarda kullanımı ile 3% lük bir artış gözlemlenmiştir. Dizel ve biyodizel karışımlarında olumsuz bir etkisi olmayıp emisyonlarda düşüklüğü egzoz sıcaklığında artışa neden olmuştur. Alkol yakıtlarda 3%-4% oralarında yakıt tasarrufu sağladığı emisyonlarda da düşüğe neden olduğu gözlemlenmiştir (Verhelst ve Wallner, 2009).

H₂ gazının tutuşma sıcaklığının diğer yakıtlardan düşük olması nedeniyle kalıntı sıcaklıklardan etkilenecek erken tutuşmasından kaynaklı vuruntu, ön ateşleme ve geri tepme oluşabilmektedir. Bu da muhtemel mekanik arızalara neden olmaktadır. Bunun önüne geçen bir yöntem de platin olmayan soğuk dereceli buji kullanımı ile sağlamaktadır (Yip ve diğerleri, 2019).

Ancak kriyojenik şartlar altında yeterince düşük sıcaklıktaki H₂ için durumu farklı değerlendirmek gerekmektedir. Düşük sıcaklıklarda enjektör buzlanması gerçekleşeceğinden harici karışımlar üzerinde çalışmak gerekmektedir (Verhelst ve Wallner 2009).

H₂ gazı için kullanılan enjektörler hidrojen yakıtlı motorların ticarileşmesinin önündeki en önemli engeldir. Şu an CNG veya düşük basınçlı benzinli nozullar kullanılmaktadır. Bu enjektörlerin zayıf yağlama nedeniyle ömürleri kısadır (Wang ve diğerleri, 2022).

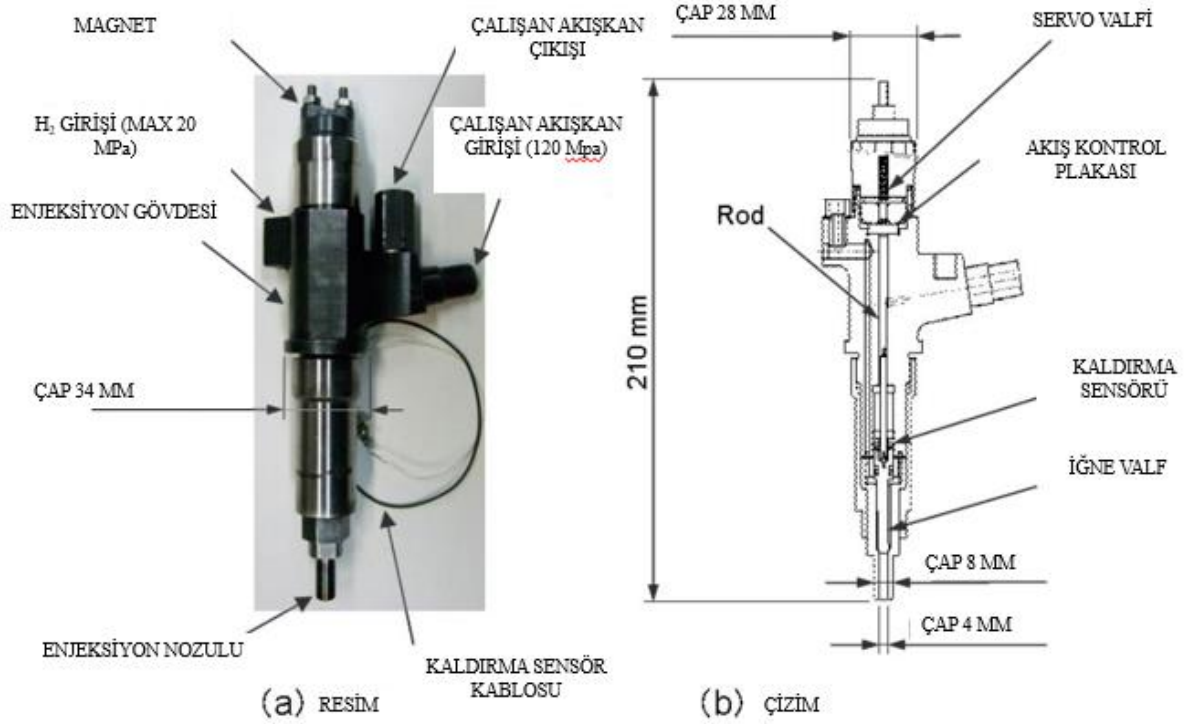
Genel olarak içten yanmalı motorlarda enjeksiyon stratejileri olarak port yakıt enjeksiyonu ve doğrudan enjeksiyon olmak üzere iki farklı strateji kullanılmaktadır. Bunlar bağlı olarak port yakıt enjeksiyonu ile birlikte dizel yakıtın kılavuzluğunu yaptığı ateşlemesi, homojene sıkıştırılmış ateşleme ve kıvılcım ateşleme stratejileri kullanılırken doğrudan enjeksiyonda ise dizel yakıtın kılavuzluğunu yaptığı ateşlemesi, kıvılcım ateşleme ve ısıtma buji stratejileri kullanılmaktadır (Yip ve diğerleri, 2019).

Port enjeksiyonlu sistemlerde H₂ gazının enjeksiyonu en ekonomik ve güvenilir yolu olmasına rağmen hava ile karıştırıldığından dolayı motorun çalışma hacmi içerisinde büyük hacim kaplar buna da hava yer değiştirme etkisi denilmektedir. Bu hava yer değiştirme etkisinden dolayı da daha düşük güç yoğunluğuna neden olmaktadır. Doğrudan enjeksiyon ile de bu sorunlar daha da iyileştirilmiş olarak karşımıza çıkmaktadır (Wang ve diğerleri, 2022).

Şekil 35’de görüldüğü üzere dizayn edilen çalışmada, çok noktalı enjeksiyon sistemlerinde amaç, çıkış gücünün maksimum ve NO_x salınımının minimum olacağı optimizasyonlar olarak değerlendirilmektedir. Bu optimizasyon için ateşleme ve enjeksiyon zamanlamasının optimize edilmesi egzoz dönüşümünün optimizasyonu önemli rol oynamaktadır (Kawamura ve diğerleri, 2009).

Enjeksiyon zamanlaması için kriter olarak emme valfi kapanmadan önce silindire H₂-hava yakının gitmesinin sağlanmasıyla oluşan zamanlamadır. Zamanlanmış enjeksiyon yanmamış yakıt miktarını azaltmaya yarar ve geri tepmeyi sınırlandırır (Verhelst ve Wallner 2009).

Raylı tip yüksek basınçlı enjektör ile yapılan optimizasyon sonucunda 6 silindirli içten yanmalı bir motorda 147 kW’lık elde edilen güç ile NO_x oranı yaklaşık %30 oranında azaltılarak termik verim artırılmıştır. Bu değerler enjektörün stabilitesine bağlıdır (Kawamura ve diğerleri, 2009).



Şekil 21. Yüksek basınçlı H₂ enjektörü (Kawamura ve diğerleri, 2009)

Diğer bir çalışmada ise motor fren verimliliğinin, H₂ gazı enjeksiyon için sıkıştırırken yaşanan kayıplar, eksik yanmış gazlardan kaynaklı kayıplar, gerçek yanma kayıplarında, silindir yüzeylerine iletilen ısıdan, sürtünmeden ve gaz değişim kayıplarının toplamının ideal motor veriminden çıkarılması ile elde edilebileceğini belirlemiştir. 2000 RPM’de kayıpların analizinden çıkan sonuca göre 13,5 bar basınç altında motor fren verimliliği maksimum değere ulaşır. 4 delikli nozul ile de 5 delikli nozula göre daha verimlilik sağlamanın yanında NO_x düşüşe neden olmuştur (Matthias ve diğerleri, 2012).

H₂ gazının sıkıştırılması işlemi ister aracın içinde ster dışında olsun gereksinim duyduğu enerji ihtiyacı H₂ ısıtma değerinin 7%’inden fazlasına denk gelmektedir. Bu da sıvı şekilde depolanması konusunu ön plana çıkarmaktadır. Ancak tesislerde yapılan sıvılaştırma işleminin enerji içeriğinin 30% nu kullanması durumunun tekrar değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir (Verhelst ve Wallner 2009).

Valf zamanlamasının uygun olmaması durumunda emme aşamasında H₂ gazının geri akması durumu ortaya çıkmakla birlikte egzoz strokunun sonunda ise 100K kadar yükselen sıcaklık sorunu ortaya çıkmaktadır. Bu durumda H₂-hava karışımı geri akıtılan egzoz gazıyla tutuşturulması kolay bir yöntemdir (He ve diğerleri 2022).

Uygun olmayan sıkıştırma oranları sıcaklığın artışına dorudan neden olarak H₂-hava karışımının erkenden yanmasına neden olmakla birlikte bu da geri tepme olasılığını artırmıştır. Bu bağlamda sıkıştırma oranının iyi seçilmesi gerekmektedir (Gao ve diğerleri, 2022).

Uygun sıkıştırma oranları H_2 gazı için 7,5:1 ile 14,5:1 arasında değişmektedir. Bu oranlar istenen sonuçlara göre optimize de edilebilir (Verhelst ve Wallner, 2009).

Yanmamış hidrojen kalıntıları ki bu kalıntılar silindir yüzeyindeki çatlaklar da olabilir, sürecin devamında çok fazla ısı açığa çıkararak oluşan geri tepmelere katkıda bulunmaktadır. Yüzey sıcaklıkları ayrıca erken tutuşmaya neden olmaktadır. Bunların sonucunda düşük yağlama etkileri birlikte parçalar üzerinde ciddi aşınmalara neden olmaktadır (Gao ve diğerleri, 2022).

Emme valfinin açık olduğu esnada ön ateşleme gerçekleşirse buna geri tepme denirken emme valfi aksine kapalı olduğu zamanda gerçekleşen ön ateşlemeye ise vuruntu denilmektedir (Verhelst ve Wallner, 2009).

Geri tepmeleri engellemenin bir yolu da doğrudan su enjeksiyonu ile suyun gizli ısısından faydalanarak ön ateşleme ısısının alınmasıyla düşürülmüştür. 1,83% katkılı hava-su karışımı enjeksiyon ile silindir iç sıcaklığı yaklaşık olarak $100^{\circ}C$ kadar düşürülmüştür. Ancak su kullanımının neden olacağı korozyon ve yağlarda seyreltilme olayından dolayı ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir (Gao ve diğerleri, 2022).

H_2 gazının kullanımı sonucunda açığa çıkacak olan su molekülleri yağın seyreltilmesine neden olduğundan kullanılacak yağın bu durum göz önüne alınarak seçilmesi gerekmektedir. Külsüz bir yağ kullanılması tortu oluşmasını önlemek için yeterli olacaktır. İlave karter havalandırma sistemi ile de bu sorunun çözümüne gidilebilir (Verhelst ve Wallner, 2009).

H_2 gazı ile desteklenmiş motorlarda maksimum verim 70% ve dizel ile çalıştığında ise 80% yaklaştığı, optimum enjeksiyon zamanlaması 120g/h akış hızı ile olmakla birlikte 20 krank açısı ile BTDC de tespit edilmiştir. Ayrıca fren verimliliği 11,6% artış göstermiştir. Bunun yanında azalan O_2 oranından dolayı termal verimde azalma gözlemlenmiştir. Artan egzoz sıcaklığı NO_x emisyonunda artışa neden olmaktadır (Yadav ve diğerleri, 2014).

İçten yanmalı motorlarda yapılan çalışmada doğal gaz ile birlikte kullanılan H_2 gazı ile çalıştırılan bir motorda NO_x içeriğinin H_2 ile birlikte arttığı katalitik konvertörler ve çıkış torkunun maksimuma çekilmesi ile bu durumun minimum değerlere çekildiği tespit edilmiştir. NO_x azaltmanın diğer bir yolu ise egzoz gazı devridaim (EGR) sistemi veya zayıf H_2 ile hava karışımıdır ancak bu çalışmalarda HC emisyonlarının da arttığı gözlemlenmiştir. (AKANSU, 2004)

EGR sistemi NO_x emisyonun düşürmek için inert gazların ısılarını emerek silindir duvarlarındaki ısı kaybını azaltır. Bu da daha az NO_x salınımına neden olur. Bu konuda değişik EGR oranlarıyla yapılan çalışmalar umut vericidir. Bununla birlikte yüksek NO_x seviyeleri tam ve verimli yanmanın göstergesidir (Mehra ve diğerleri, 2017).

Diğer bir NO_x azaltma yöntemi ise homojen şarj sıkıştırılmalı ateşleme olarak geçen ve yüksek sıkıştırma oranı ile sağlanmaktadır ancak bu yöntemde vuruntu ve geri tepme nedeniyle sınırlı bir aralıkta kalmaktadır. Bu yöntem motorda yeni tasarım gerektirdiği gibi sınırlı bir çalışma aralığından dolayı etkili değildir (Lee ve diğerleri, 2013).

Çok noktada püskürtme ile benzinli bir motorda H_2 gazı ile çalışmasına çevirmenin en kolay yöntemi olmakla birlikte daha fazla serbestlik derecesi sunar. Ayrıca motorun küçültülmesi NO_x emisyonlarında azalmaya neden olduğu gözlemlenmesine rağmen daha çok güç aktarım sistemlerindeki gelişmelerin yüksek verimlilik ve düşük emisyonlar oluşturacağı değerlendirilmektedir (Verhelst, 2014).

Ancak HC emisyonlarının artması genel olarak yağlama yağların yanmasından ortaya çıktığı düşünülmektedir (Verhelst ve Wallner, 2009).

Ortak raylı sistemlerde 20 MPa 'ya kadar yakıtın miktarını ve zamanlamasının en ideal yöntemi olmakla birlikte elde edilen sonuçlar yakma koşullarının çalışma koşullarına uygun olacak şekilde uygulanması ile NO_x emisyonlarında azalma gözlemlenmiştir (Naganuma ve diğerleri, 2009).

Elektrolizden üretilen oksijen hava-yakıt karışımını destekleyici olarak da kullanılabilir. H_2 - O_2 kombinasyonu kullanılabilir ancak hızlıca tepkimeye girmeleri ve güvenlik koşulları iyi değerlendirilmelidir (Wang ve diğerleri, 2022).

Günümüzde fosil yakıtlara ilave olarak kullanılan alkol; motorlarda düşük NO_x emisyonu ve dumansız yanma sağlamasından dolayı H_2 gazı ilavesi ile etanol motorlarının performansının artırılmasından yardımcı olacaktır. Ancak ilerleyen kullanımda HC ve CO emisyonlarında artış gözlemlenmiştir. Bunun yanında biyogaz, dimetil eter metan ve diğer gazlar da motorlarda ek yakıt olarak kullanıldı (Wang ve diğerleri, 2022).

Ayrıca plazma teknolojisi yanma reaksiyon hızını artırarak yanma verimliliğini büyük ölçüde artırdığı gözlemlenmiştir. Bu yöntemde ya plazma dışarıda üretilerek sonradan yanıcı silindire alınır ya da plazma jeneratörü kullanarak doğrudan içeri de bulunur. Kullanılan plazma teknolojisinin kimyasal, termal ve aerodinamik olmak üzere üç farklı etkisi vardır. Kullanım alanları daha çok yüksek irtifa gibi zor koşullar altında yanmayı sürdürmek için kullanılabilir (Li ve diğerleri, 2021).

Diğer bir çalışmada CNG gazı ile takviye edilen H_2 gazı laminar yanma hızının sayesinde genel performansta büyük bir gelişme sağlarken verimlilik konusunda da yüksek değerler ortaya koymuştur. Hava- H_2 gazının tutuşması gereken enerji diğer yakıt kombinasyonlarından daha düşük seviyelerde gerçekleşmektedir. Bu deneyde kullanılan CNG daha az karbon içerdiğinden diğer fosil yakıtlara oranla daha temizdir. Bu konuda HYTHANE Amerika'da patenti alınmış ve 15% H_2 gazı ile kalanı doğal gazdan oluşan patent bile vardır (Mehra ve diğerleri, 2017).

Laminar yanma için ise karşılıklı alevler, küresel alevler ve düz alev yaklaşımları umut verici bir seviyedelerdir. Yanma hızı arttıkça ısı salınım hızı ve yanma basıncının arttığı gözlemlenmiştir (Mehra ve diğerleri, 2017). Ancak laminar yanma hızının ölçümü kararsızlık nedeniyle çok zordur (Verhelst ve Wallner, 2009).

Metan ve doğal gaz düşük alev hızına sahip olmasından kaynaklı olarak yüksek devirlerde verimlilik artışı için yanma niteliklerinin geliştirilmesi ve yüksek alev hızına erişebilmesi için H_2 ile güçlendirilmesi gerekir (Mehra ve diğerleri, 2017).

Yüksek alev hızı için türbülanslı yanma odalarına ihtiyaç duyulabilir. Bu da motordaki verimliliği olumlu yönde arttırmaktadır. Ancak aşırı basınçtan kaçınmak gereklidir (Verhelst ve Wallner, 2009).

Yapılan araştırmalarda enjeksiyon zamanlamasının ve süresinin optimize edilmesi ile üretilen stratejilerde 4% daha fazla verimlilik elde etmişlerdir. Port enjeksiyonlu sistemden doğrudan enjeksiyon sisteme geçişte hidrojen için teorik olarak 38% oranında güç artışı vardır (Verhelst ve Wallner, 2009).

H₂ gazının motorun yapısına doğrudan da etkisi vardır. H₂ gazı reaksiyonu sunucunda malzemenin gevrekleşmesi uzun dönemde kırılabilirliği artıracak, süneklikte azalma sağlayacak ve kırıklar için neden olacağı değerlendirilmektedir. Bu depolama sistemi içinde geçerli olacaktır (Verhelst ve Wallner, 2009).

Yine yapılan çalışmalarda şarj stratejilerinin H₂ yakılmasında verimliliği artırdığı gözlemlenmiştir. Verimlilik açısından turbo şarjlı bir motorda daha çok tercih edilmektedir (Verhelst ve Wallner, 2009).

İçten yanmalı motorlarda H₂ kullanımı için deneyden ziyade hesaplamalı yaklaşımların avantajları kullanılmalı ve bu sayede daha uygun yollar ile mühendislik maliyetlerinin düşürüleceği öngörülmektedir (Salam ve diğerleri, 2020).

Bunların yanı sıra hidrojen karışımli yakıtlara nano yakıtlar da eklenerek birçok avantaj elde edileceği gibi bu durum nano yakıt tipine bağlıdır. Hidrojen ile karıştırılarak kullanılan başlıca nano yakıt tipleri, TiO₂Al₃ ve ZnO gibi nano yakıtlardır. Bu nano yakıtların korozyonu önledikleri ve yüksek ısı iletkenliğine sahip olduğu rapor edilmiştir (Hatami ve diğerleri, 2020).

Yenilebilir kaynaklardan elde edilen H₂ gazının kullanımı hibrit sistemler sayesinde gelecekte hem çevresel hem de ekonomik olarak fosil kaynaklara alternatif potansiyeli vardır. Elektrikli araçlarda gözlemlenen şarj problemleri, pil değiştirme ve bertaraf etme sorunları H₂ kullanımında gözlenemez. Bu bağlamda yenilebilir enerji kaynaklarından elde edilen yakıtlar ile daha çevreci bir sistem oluşturmak mümkündür (Duarte Souza Alvarenga Santos ve diğerleri, 2021).

H₂ gazından daha yüksek olan enerji yoğunluğu olan amonyak ile H₂ gazı aynı zamanda içten yanmalı motorlarda birlikte indüklenebilir. Bunun benzinli bir motor ile mukayesesinin yapılabilmesi için 10% H₂ olması gerekmektedir. Bu durumda yanmamış NH₃ için ilave tedbir gerekecektir (Chiong ve diğerleri, 2021).

Amonyakın daha farklı bir şekilde hem taşıma hemde depolama sistemi olarak H₂ gazı için kullanımında ise sadece motorda değil depolanması ve taşınması konusunda da fayda sağlamaktadır. H₂ gazının taşınması, depolanması ve kullanılmasının her safhasında amonyakın kullanılabileceği görülmektedir. Ancak amonyakın yanma isteksizliği bu teknolojinin önündeki en büyük engellerden biridir (Cardoso ve diğerleri, 2021).

Sentez gaz olarak geçen Syngas da içeriğinde H₂ gazı ve diğ er gazları bulunduran bir t evdir. Doğalgaz, kömür, biyokütle gibi kaynakların gazlaştırması ile elde edilir. Sentez gaz birçok alanda kullanılmaktadır (Paykani ve diğ erleri, 2022).

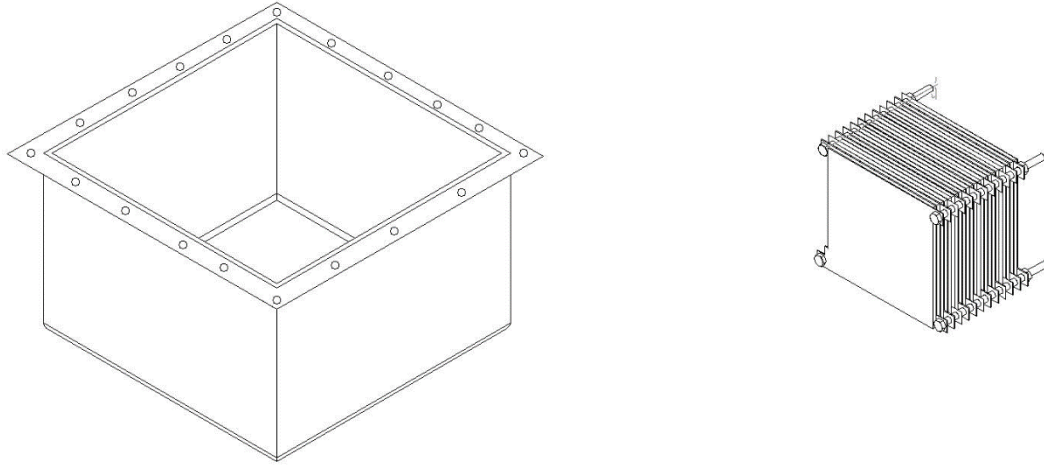
Genel olarak değ erlendirildiğinde NO_x emisyonlarının düşürülmesi, silindir içerisine giren H₂-yakıt-hava karışımının dinamiğinin belirlenmesi, dayanıklılık çalışmalar, ısıl problemlerin giderilmesi, gibi üzerinde hala geliştirilmesi gereken hususlar mevcuttur.

9. ELEKTROLİZ YÖNTEMİ İLE H₂ GAZI ÜRETİMİ

9.1.ARAŞTIRMA İÇİN GEREKLİ MALZEMELER

Daha önceki veriler ışığında deney düzeneği aşağıdaki ürünlerden hazırlanmıştır.

- 125cm*125cm genişliğinde 2mm kalınlığında 316 paslanmaz levha
- M5*100 polimid trapez mil
- 3 adet PG7 kablo rekoru
- 2 m elektrik kablosu
- 2 adet 12V akü ve 1 adet 6V akü
- 20cm*20cm*20cm ölçülerinde 6mm kalınlığında DKP imal edilmiş deney için kap ve kapağı
- 5 mm kalınlığında 25cm*25cm kumlama conta
- 20 adet M6*30 sac vida, somun ve pul
- 4*6mm ölçüsünde 2 m poliüretan pnömatik hortum
- 1 adet soğutucu ve nem alıcı ünite için Bubbler şişe
- Ölçüm için 1 adet rotometre
- 1,5 kg KOH
- 5 lt su

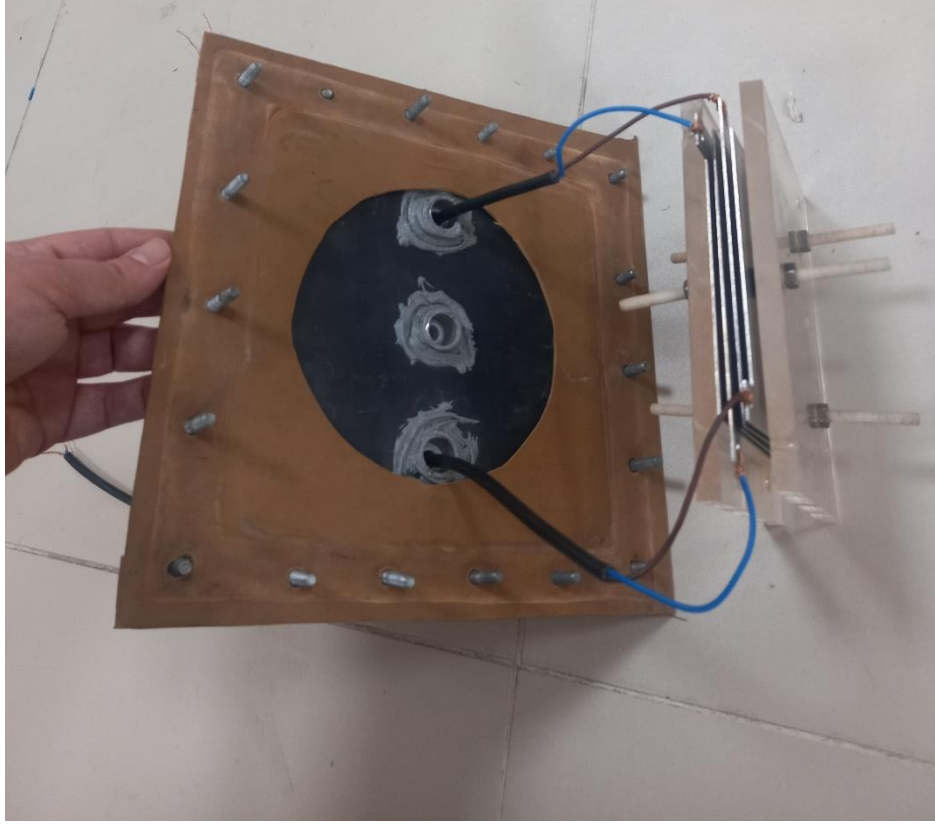


Şekil 22. Deney düzeneği

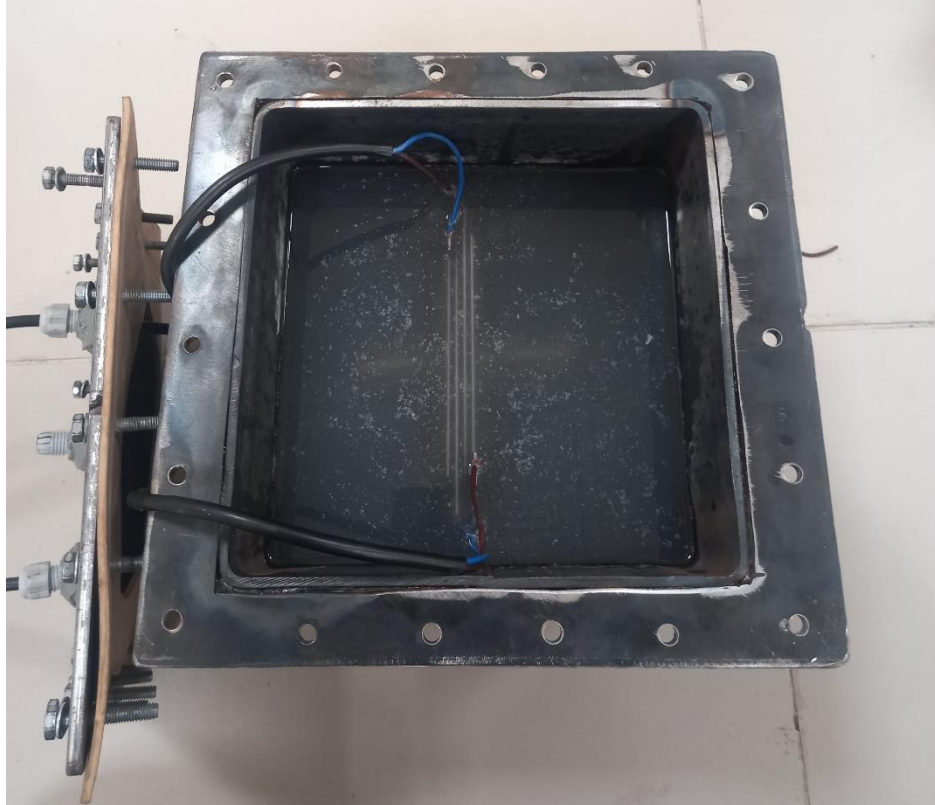
9.2. ARAŞTIRMANIN UYGULAMA AŞAMASI

Araştırma başlamadan önce hazırlanan DKP kutunun sızdırmazlık testleri 2 bar için yapılmış ve başarılı olmuştur. Araştırmanın başında 5L çeşme suyuna kütlece 30% olacak şekilde 1,5 kg kadar KOH çözeltisi hazırlandı. Müteakiben 4 adet 316 paslanmaz plaka, hücreler birbirlerine paralel olacak şekilde polyamid miller üzerinde sabitlenir. Sabitlendikten sonra voltmetre yardımı ile kısa devre olup olmadığı kontrol edilir. Rekor yardımı ile kapaktan gelen kablo ile kutup başları birbirine paralel olacak şekilde bağlanır. Sızdırmazlığı sağlamak için kutunun

kapağı ve kutu arasına kumlama conta yerleştirilir. Hazırlanan 30% KOH çözeltisi kutunun içine dökülür. Müteakiben kapak vida yardımı ile sıkılır.



Şekil 23. Elektroliz cihazının detayı



Şekil 24. Elektroliz cihazının bağlantısı

6V akü bu sisteme bağlanır ve geçen gazın ölçümü yapılır. Yapılan ölçüme göre sonuç olarak 0,265 L/dk kadar gaz üretildiği gözlenmiştir. Buna göre verimlilik

$$0,265 \frac{l}{dk} * 0,089 \frac{g}{l} * \frac{1kg}{1000g} * \frac{1dk}{60sn} = 3,93 * 10^{(-7)kg} / sn$$

$$\eta_{etkin} = \frac{m_{H_2} \cdot LHV}{P_e}$$

26,2% verim olarak karşımıza çıkmaktadır.

Burada gözlemle elde edilen sonuçlar elektroliz hücresi başına düşen voltajı karşılamasına rağmen akımın düşük olmasından kaynaklı olarak verim olarak düşük çıkmıştır.

Müteakip deneyde plakalar seri ve akü değiştirilerek güç kaynağı paralel bağlanır. 12V aküler paralel bağlanarak daha yüksek akım elde edilir. Aynı düzenek farklı güç kaynağı ve farklı dizilmiş hücrede denendiğinde sonuç olarak üretim hızının 0,5 L/dk olduğu

$$0,5 \frac{l}{dk} * 0,089 \frac{g}{l} * \frac{1kg}{1000g} * \frac{1dk}{60sn} = 7,42 * 10^{(-7)kg} / sn$$

$$\eta_{etkin} = \frac{m_{H_2} \cdot LHV}{P_e}$$

buradan 19,5% verim olarak tespit edilmiştir.

9.3. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

İki farklı çalışma arasındaki farkın sebebi ise paralel ve seri hücrelerde polarizasyon için gerekli voltaj sağlanırken birim alana denk gelen akım açısından değerlendirildiğinde seri bağlı hücrede daha düşük akım geldiğinden verim olarak daha düşük bir verim ortaya çıkmaktadır. Seri bağlı hücrede her ne kadar güç kaynağı iki katına çıkarılsa da birim yüzey alanına düşen akım üretim miktarında düşük verime neden olmaktadır.

Buradan sonuç olarak; paralel bağlantılarda levhanın yüzey alanları seri bağlantıya göre yarı yarıya düştüğü için sisteme verilen güce verim artmaktadır. Ancak plakaların bütün yüzeylerinin kullanımı arandığında daha yüksek kapasiteli güç ve plakaların seri bağlı olması gerektiği gözlemlenmiştir. Plakaların dizilimine göre verim değişkenlik göstermektedir.

10. H₂ İÇTEN YANMALI MOTORLARDA KULLANIMI

10.1. MATERYAL VE ÖZELLİKLERİ

Araştırmada, özellikleri Tablo 12’de yer alan Erin motor firmasına ait endüstriyel dizel motor kullanılmıştır.

Tablo 10. Erin Motor marka endüstriyel dizel motor özellikleri

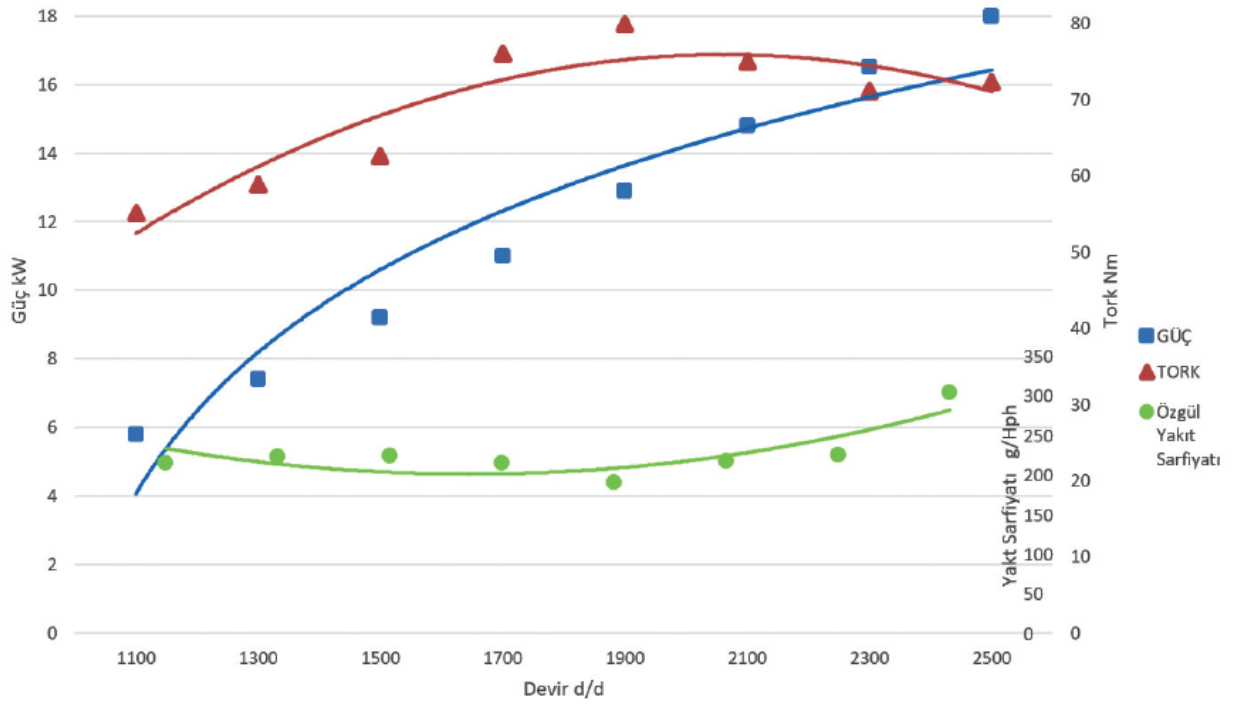
Silindir Sayısı	1
Çap x Strok	108 mm x 127 mm
Toplam Motor Hacmi	1,16 L
Silindir Başına Supap Sayısı	4 adet
Sıkıştırma Oranı	14,6 : 1
DIN Maksimum Güç	18 kW/ 2.400 d/d (25 bg / 2.400 d/d)
Maksimum Tork	80 Nm / 1.800 d/d
Maksimum Yüksüz Devir	2.900 d/d
Minimum Yüksüz Devir (Rolanti Devri)	600 d/d
Özgül Yakıt Tüketimi	187 g/Bg-saat
Marş Motoru	12 V – 2.0 kW
Alternatör	14 V -50
Hava Filtresi	Yağlı Tip
Hava Filtresi	Bosch 1.050Bar Yüksek Basınçlı Mekanik Pompa
Yağ Kapasitesi	5 Litre

Düşük devirde yüksek torkla çalışabilme özelliğine sahip 4 geçişli radyatörü bulunmaktadır. Ayrıca +50°C de çalışabilmektedir.

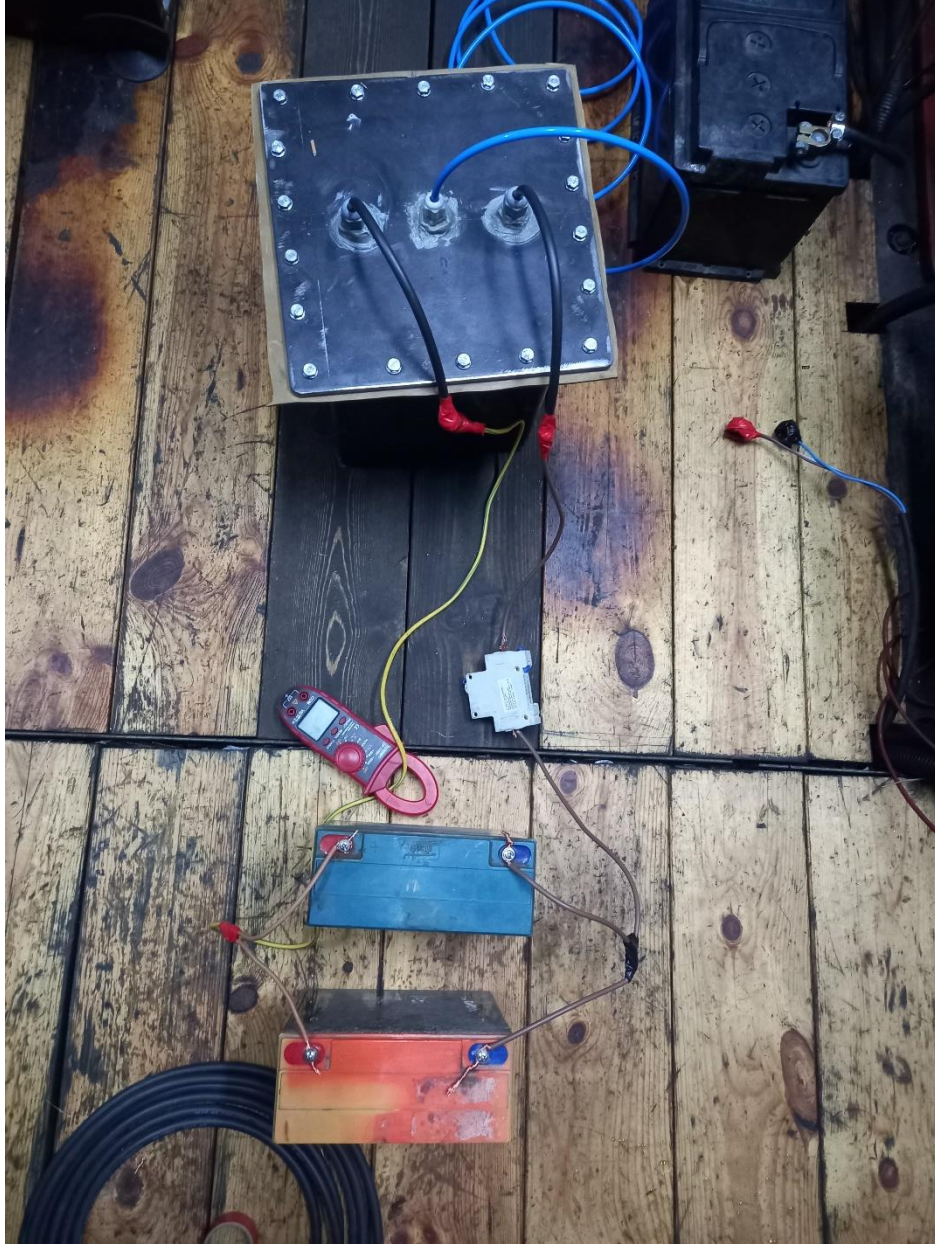
Motorun farklı güçlerde çalışmasını kontrol etmek için değişik aralık ve sürelerde rölantide ve değişik yüklerde çalıştırılmıştır. Motor olarak da büyük motor seçilmiştir.



Şekil 25. Erin marka dizel motor



Şekil 26. Motorun fabrika ölçüm değerleri (<https://www.erinmotor.com/tr-TR/urun-detay/1-endustriyel-dizel-motor>)



Şekil 27. Araştırma düzeneğinin hazırlanması

Daha önce üretim ile ilgili yapılan çalışmada üretilen gaz miktarı 0,5 l/dk üretim hızı ile 2dk bir gaz üretiminde oluşacak basıncı sabit hacimli kaplar için $P = \frac{n.R.T}{V}$ formülünden hem hidrojen hem de oksijen gazının ayrı hesaplanabilir.

$$n_{O_2} = \frac{1/3 L}{22.414 \frac{mol}{L}} = 0,0148 mol$$

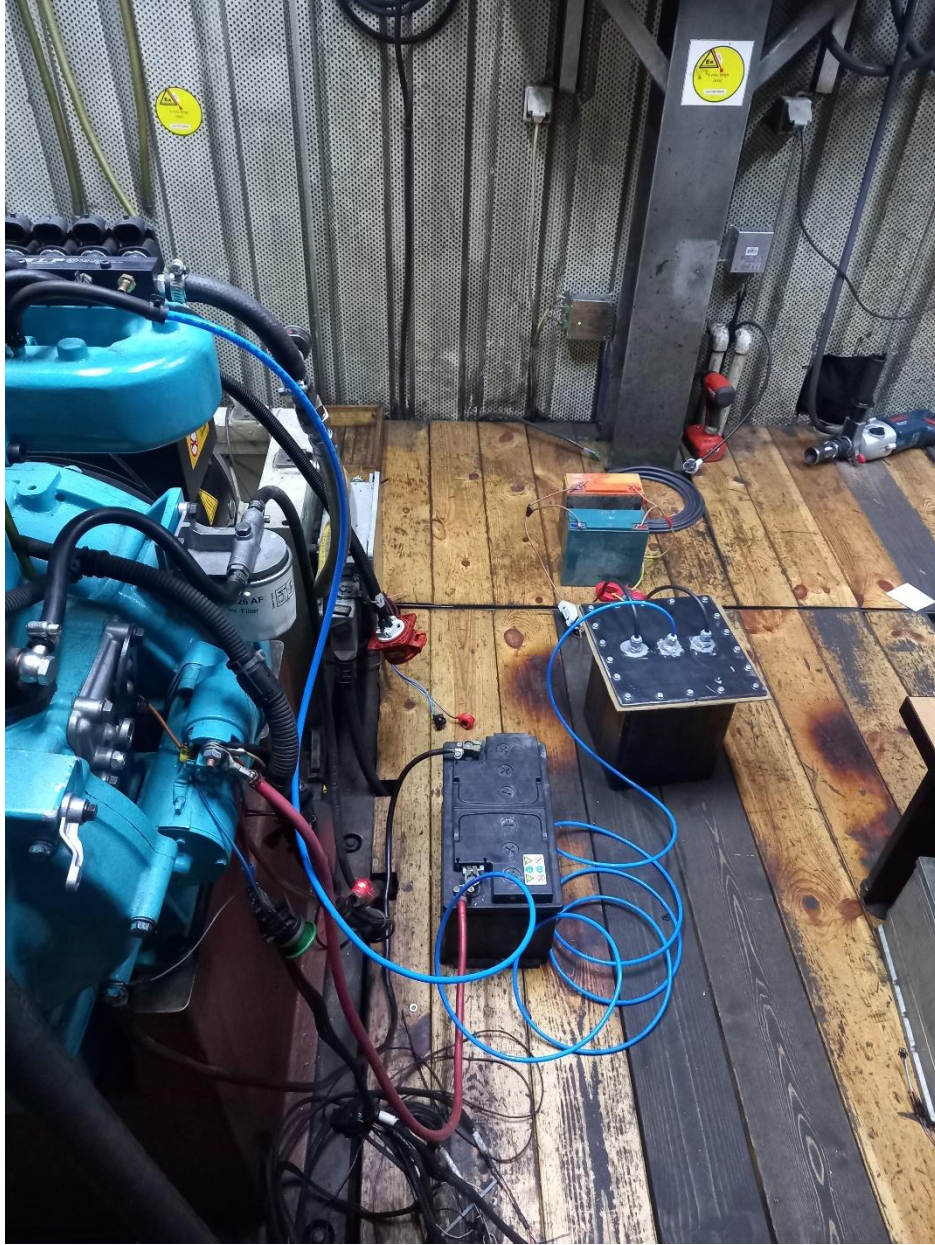
$$n_{H_2} = \frac{2/3 L}{22.414 \frac{mol}{L}} = 0,0297 mol$$

$$P = \frac{(0.0148 \text{ mol} + 0.0297 \text{ mol}) \cdot 0.0821 \text{ L} \cdot \frac{\text{atm}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot (70 + 273,15) \text{ K}}{0.4 \text{ L}} = 3 \text{ atm}$$



Şekil 28. Araştırma düzeneği

Buradan da toplam basınç kabın 70° dereceye kadar ısınması ile 3 atm kadar bir basınç oluşturmaktadır. Sürekli durumda ve aküden çekilen gücün ortalamasına göre değerlendirildiğinde motora gönderilen gaz basıncı 3 atm kadar olmaktadır.



Şekil 29. Araştırma düzeneği

10.2. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan testler sonucunda yüksüz durumu dahil toplam 5 farklı yükleme durumuna göre kıyaslama yapılmıştır. Yapılan test sonuçları hem yakıt takviyesiz hem de takviyeli olarak ayrı ayrı ölçülmüştür. Üretilen gazın sisteme dahil edilmemiş hali Tablo 13'deki gibidir. Tablo 14'te ise takviyeli sonuçlar yer almaktadır.

Tablo 11. Takviyesiz güç, yakıt sarfı ve emisyon değerleri.

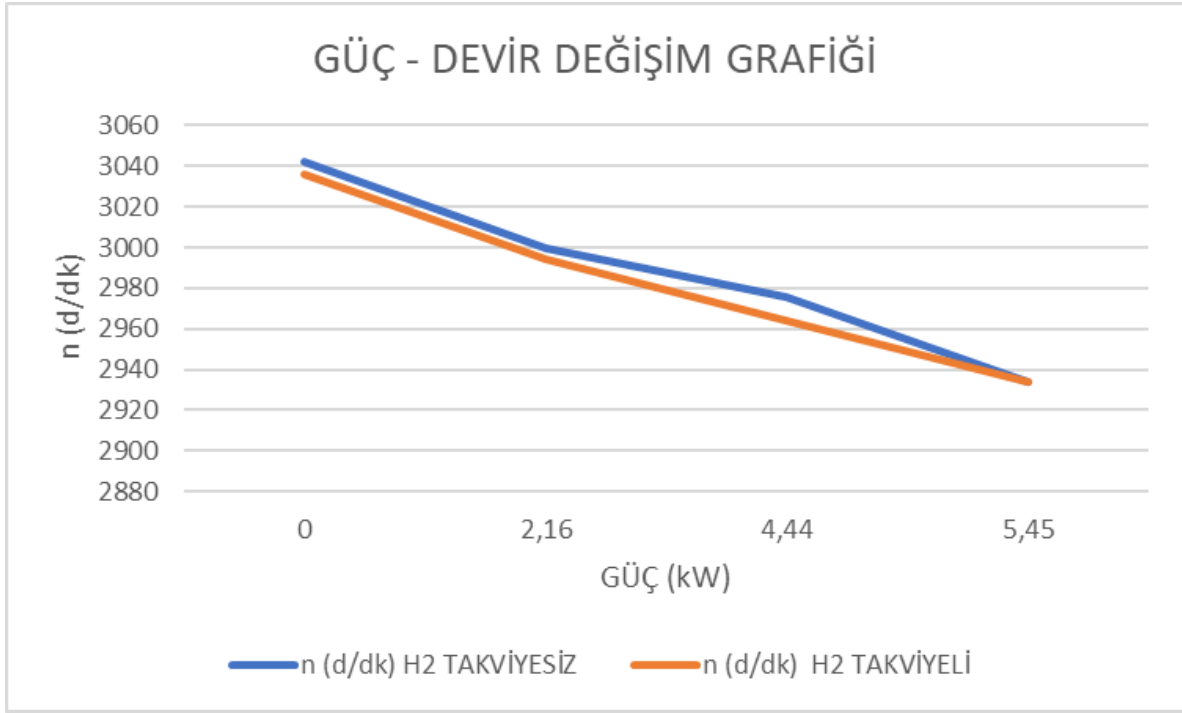
GÜÇ (kW)	n (d/dk)	O₂ (%vol)	CO₂ (%vol)	NO_x (ppmvol)	HC (ppmvol)	CO (%vol)	YAKIT SARFIYATI (l/dk)
0,00	3066	17,77	2,09	216	18	0,11	0,90
2,17	3042	15,80	3,46	600	16	0,07	1,54
4,48	3000	13,08	5,32	1065	18	0,04	2,16
5,41	2976	11,83	6,24	1235	10	0,04	2,40
6,48	2934	10,20	7,47	1340	10	0,06	2,77

Tablo 12. H₂ takviyeli güç, yakıt sarfı ve emisyon değerleri

GÜÇ (kW)	n (d/dk)	O₂ (%vol)	CO₂ (%vol)	NO_x (ppmvol)	HC (ppmvol)	CO (%vol)	YAKIT SARFI (l/dk)	H₂ TAKVİYESİ (%vol)
0,00	3066	17,88	1,98	183	11	0,113	0,96	34,25
2,16	3036	15,85	3,34	566	10	0,067	1,20	29,41
4,44	2994	13,07	5,36	1063	13	0,033	2,13	19,01
5,45	2964	11,78	6,26	1189	14	0,037	2,40	17,24
6,48	2934	10,30	7,45	1280	11	0,045	2,62	16,03

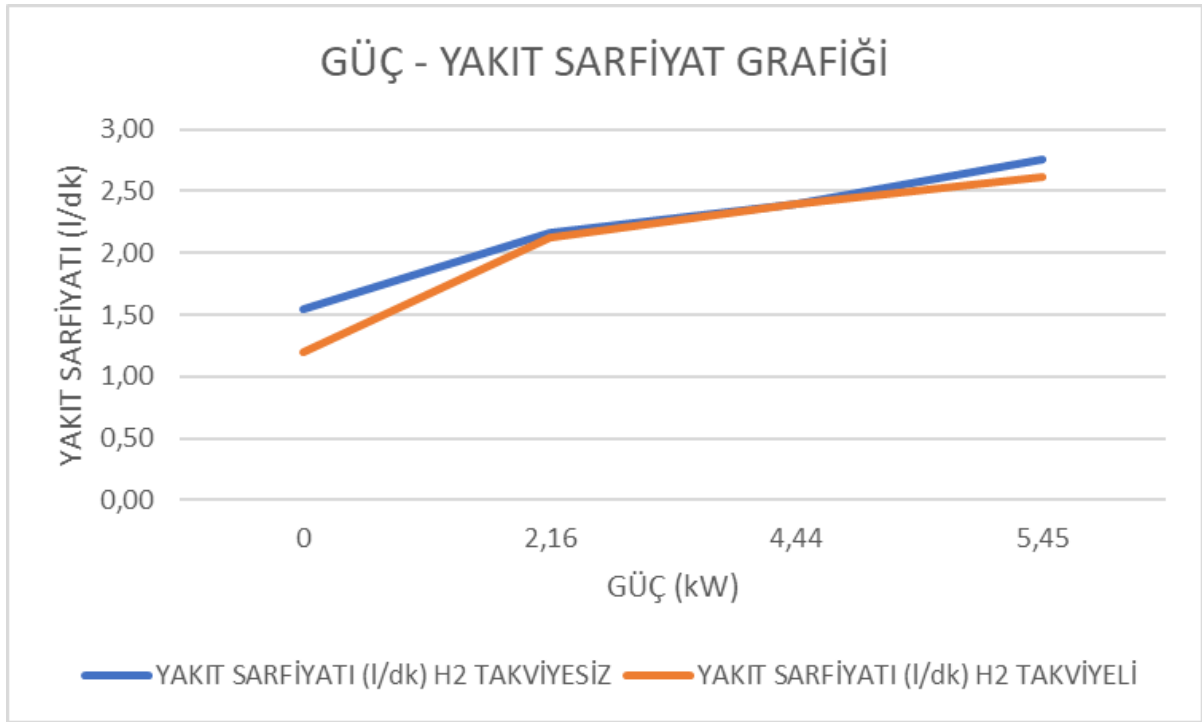
Bu tablolardan yola çıkılırsa, harici bir kaynaktan beslenen HHO jeneratörü ile üretilen gazın etkileri şöyledir.

Tablo 13. Değişen güce göre devir değişim grafiği



Yapılan testler sonucunda Tablo 14’te görüldüğü üzere yakıt takviyeli olarak kullandığımız gazlarla birlikte yüklenen yüke rağmen devir sayılarında önemli bir değişiklik olmamıştır. Sisteme dahil edilen 0.5 l/dk debisindeki gaz karışımının devir üzerinde değişimi aynı güç oranına göre detaylı etkileri Tablo 14’te yer almaktadır. Buradan yola çıkılırsa belli bir devirden sonra gazın yetersiz kalmasından dolayı değişime etkisi olan değer baştaki haline geri dönmektedir. Yine Tablo 15’i inceleyecek olursak yakıt sarfiyatında da devir değişimine benzer oranlı bir sonuç karşımıza çıkmaktadır.

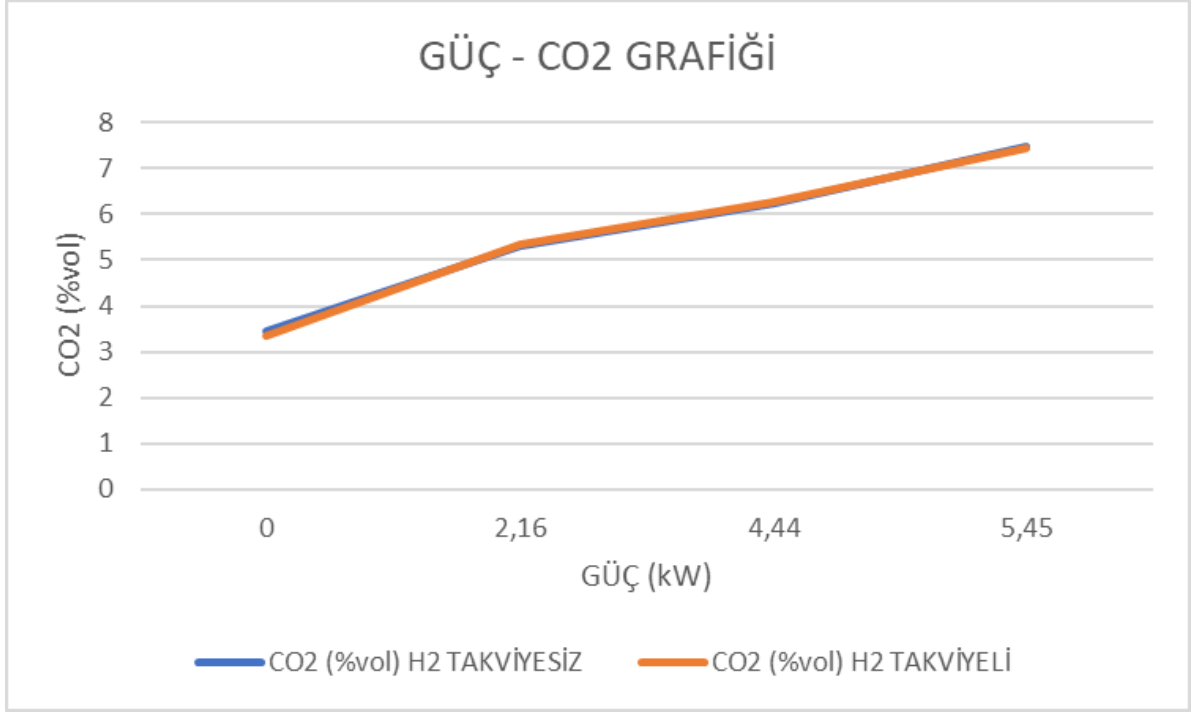
Tablo 14. Güç-yakıt değişim grafiği



Burada aynı yükte elde edilen sarf değerlerine göre Tablo 15’de görüldüğü üzere yakıt sarfına katkısı düşük olsa da devir değişimine oranla daha gözle görülür derece daha efektif olarak yer almaktadır. Ancak yüksek yükte ise motora verilen gazın yetersiz kalmasından dolayı yakıt sarfıyatı konusunda değişiklik baştaki koşullara geri dönmektedir. Bu da yüksek yüklemde üretim kapasitesinin artırılması gerektiriyor ancak deneyde 22V-30A değerinde aküden faydalandığın için belli bir yüklemekten sonra etkisiz kaldığı gözlemlenmiştir.

Emisyon sonuçlarına bakılırsa Tablo 16’da görüldüğü üzere CO₂ emisyon oranlarında net bir değişim gözlenmemiştir.

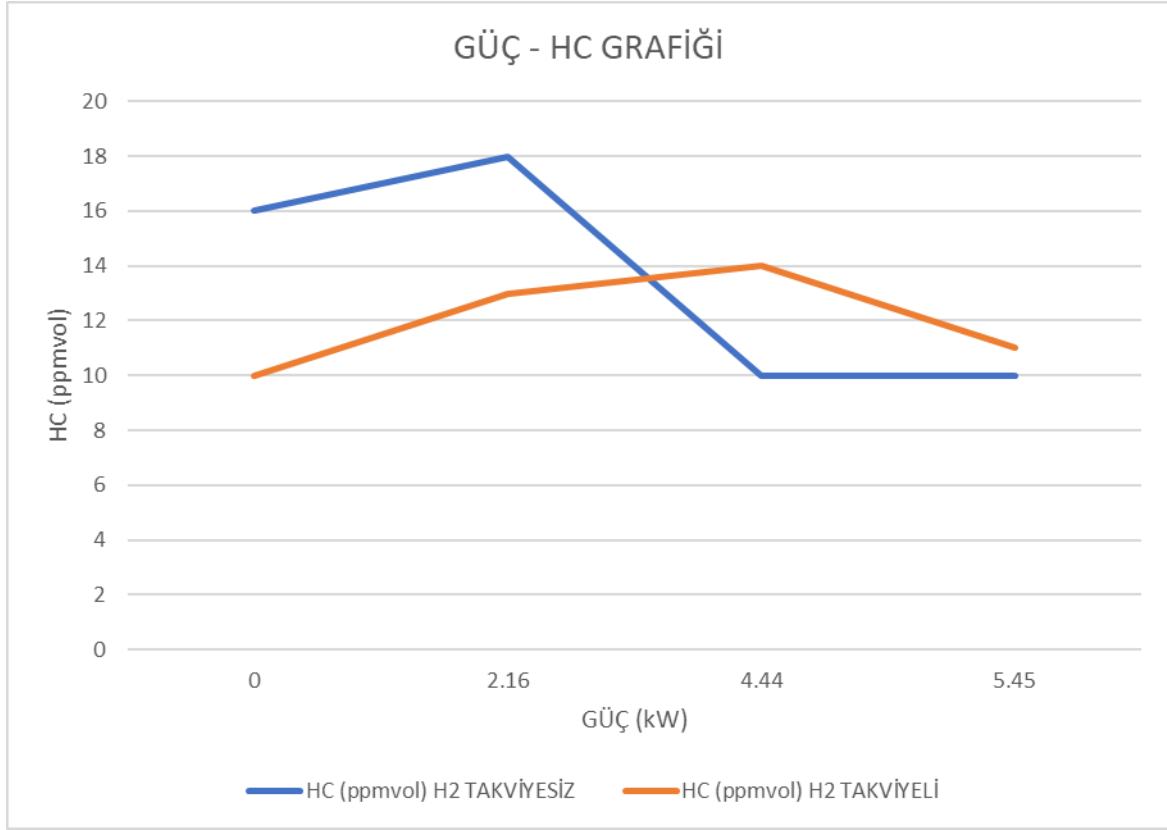
Tablo 15. CO₂ emisyon oranlarındaki değişim miktarı



Yine Tablo 16 incelendiğinde 0,5 l/dk takviye gazın çok düşük değerlerde CO₂ emisyon oranlarına etki ettiği gözlenmiştir. Bu değer belirli bir güçte pozitif değer taşırken üretim miktarı farklı güçlerde negatif görünmektedir.

Diğer bir emisyon değeri ölçülen gaz ise HC gazıdır. Yapılan emisyon ölçümüne gaz takviyesinden önce ve sonraki hali Tablo 17’de mevcuttur. Elde edilen bulgularda belirli bir devire kadar HC gazının emisyonunu düşürdüğü gözlenmektedir. Ancak üretim hızının artırılması ile bu değer daha fazla yükte daha da belirgin olacağı değerlendirilmektedir.

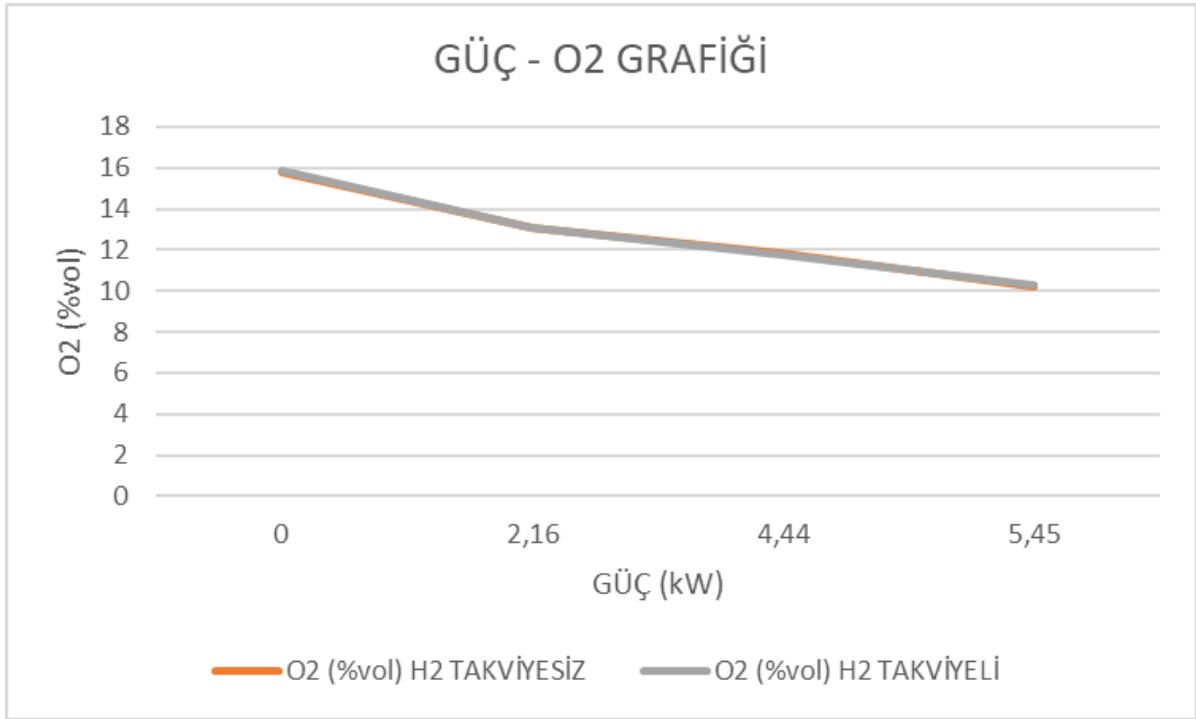
Tablo 16. HC emisyon ölçümü



Yine Tablo 17’de HC emisyonunun değişim oranı yer almaktadır. Yine üretilen gazın miktarına bağlı olarak değişim belirli bir güce kadar devam etse de belirli bir noktadan sonra yetersiz gaz nedeniyle değişim pozitif eğilime dönmektedir.

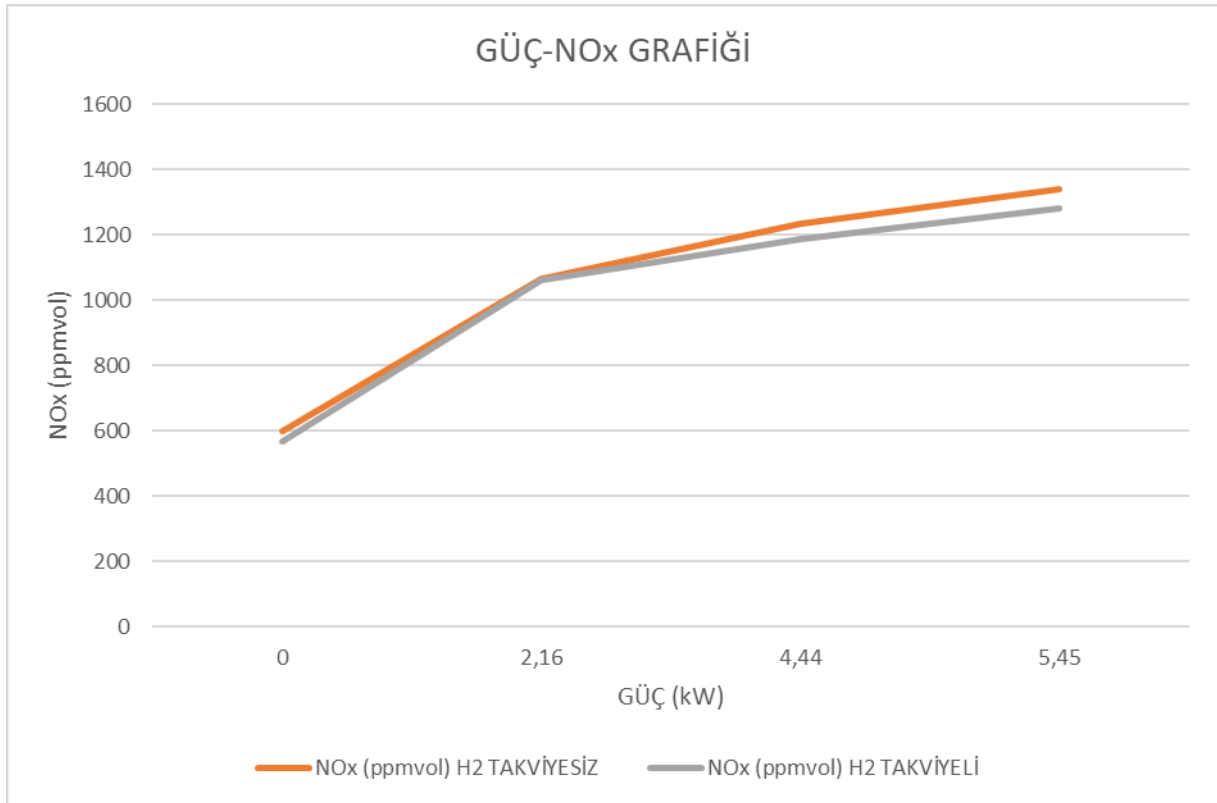
Diğer bir emisyon değeri ölçümü yapılan gaz ise O_2 gazıdır. Elde edilen bulgularda O_2 gazı ile ilgili belirli bir değişiklik olmamakla birlikte sonuçlar Tablo 18’de görüldüğü gibidir.

Tablo 17. O₂ gazının değişim grafiği



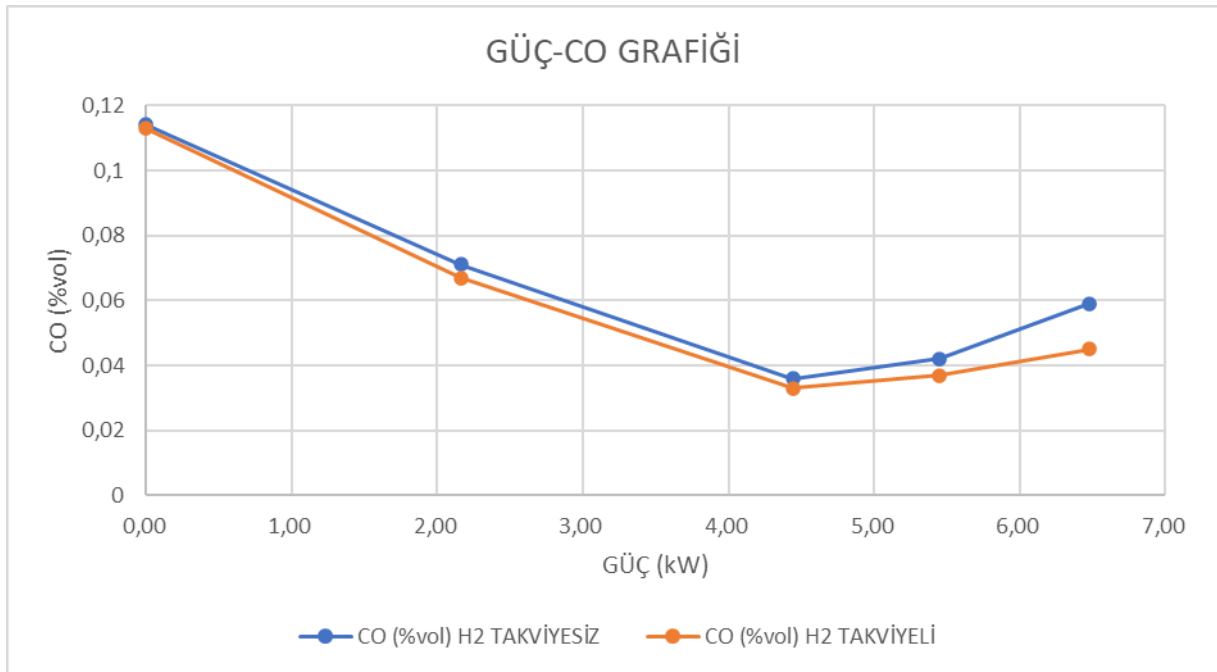
Emisyon gazı ölçülen diğer bir gaz ise NO_x gazıdır. Tablo 19’da görüldüğü üzere ölçüm sonucunda NO_x için azalma söz konudur.

Tablo 18. NO_x ölçümü



En son olarak emisyon oranı incelenecek gaz olarak CO gazı yer almaktadır. Tablo 20’de yer aldığı üzere kullanılan yakıt takviyesi ile CO salınımında düşüşü neden olmuştur.

Tablo 19. CO gazı emisyon değerleri



Genel olarak değerlendirmek gerekirse değişik oranlarda olsa da bile emisyon oranlarında üretim miktarına bağlı olarak azalmalara neden olduğu değerlendirilmektedir. Daha yüksek miktartlı H₂ üretimde bu değişimlerin daha belirgin olacağı değerlendirilmektedir. Yapılan deneyler sonucunda H₂ gazı karışımının harici kaynaktan beslenerek yakıtta takviye olarak kullanımı ile ilgili yapılan deneyden elde edilen bulgular aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

1. Depolama maliyetini düşürmek için anlık üretimin kullanılması için hazırlanan düzenek kullanıma elverişli olması için üzerinde daha detaylı çalışma yapılmalıdır.

2. Bu araştırmada kullanılan tasarıma ilaveten uzun süreli kullanım için besleme ünitesi gerekmektedir ve arta kalan kalıntıların devamlı olarak temizlenmesi gerekmektedir. Bunun için ilave kurulum ve malzemeye gerek duyulmaktadır.

3. Suyun polarizasyonunu artırmak için kullanılan KOH oluşturduğu bazik ortamdan kaynaklı olarak kullanılan ekipmanda hızlıca korozyon oluşmakta ve bu her defasında değiştirme ihtiyacı hissettirmektedir. Hem elektrik iletimine hem de kısa devrelere neden olmaktadır.

4. Üretilen gazın üretim hızının stabil olabilmesi için sabit güç kaynağının kullanılması ve istenilen güce bağlı olarak üretim miktarının seçilmesi gerekmektedir.

5. Üretilen gaz karışımının geri alev almaması için ilave emniyet tedbirine baş vurulmalıdır.

6. Üretim miktarlarının ölçümü için daha hassas ölçüm yapan cihazlar ve buna bağlı sistemler kurulmalıdır.

7. Üretim kapasitesinin artırılması daha çok enerji ihtiyacı gerektirdiğinden dolayı verimlilik çalışmaları bu konuda daha uzun yol kat etmelidir.

8. DeneySEL şartlarda üretilen H₂ gaz karışımının belirli motor yüklerinden sonra etkisinin istenilen düzeyde devam etmesi için ihtiyaca göre enjektör kullanımı daha ideal olacaktır.

9. Yükün artması için üretim kapasitenin artacağından buna göre de güç kaynağının olması gerekmektedir. Bu güç kaynağından kontrollü olarak güç çekilebilmesi için arada kalite sürücü kullanılması gerekmektedir.

10. Üretilen gazın sistemde kullanımı belirli bir üretim oranına göre emisyon değerlerini ve yakıt verimliliğine etki etmektedir. Ancak bu etki kurulum, üretim ve depolama durumunu da değerlendirmeye alındığında maliyetli olacağı açıktır.

11. Verimlilik açısından değerlendirildiğinde alkan elektrolizörün maliyet açısından düşük olmasına rağmen verim konusunda diğer yöntemlere göre geri de kalmaktadır. Bakım ve devamlılık konusunda artan maliyetler diğer H₂ gazı üretimine göre zamanla artacağından bu da ilave maliyet getirecektir.

12. Alkan elektroliz ile üretilen miktarın hemen kullanımı konusundan ziyade üretimi müteakip depolanması maksadıyla kullanıma daha uygun olacağı değerlendirilmektedir.

13. Deney sonuçlarından da görüldüğü üzere birçok gazın emisyon değerlerinde olumlu katkı sunduğu görülmektedir. Bundan dolayı da daha verimli şekilde H₂ kullanımı çevresel anlamda daha faydalı olacağı değerlendirilmektedir.

14. Gelişen teknoloji ile üretim depolama ve kullanım maliyetleri düştükçe daha da verimli ve kullanımının kolaylaşacağı bir ikincil enerji kaynağı olacağı değerlendirilmektedir.

11. SONUÇLAR

Sonuç olarak sisteme enjekte edilen H_2 takviyesinin O_2 değişimi konusunda kayda değer bir değişimi gözlenmemiştir. Benzer güç değerleri aralığında CO_2 emisyon değerlerinin 2,7% azaldığı tespit edilmiştir. Artan güç oranına göre bu azalma oranı 1,6% seviyelerine düşmüştür. NO_x gazının emisyon değerlerinde ise 4.4 KW güce kadar 7% oranında azalma gözlemlenirken daha yüksek güç oranına göre ortalama 5,9% oranında azalma gözlemlenmiştir. HC gazının emisyon oranlarında ise 4.4 KW kadar 35% azalma gözlemlenirken bu oran daha yüksek güç gereksinimlerinde 11% kadar değişim göstermektedir. CO gazının emisyon değerlerinde ise 6,7% oranında azalma gözlemlenirken artan güce göre bu azalma oranı 10% ulaşmıştır. Yakıt sarfiyatında ise 5.6% oranında sarfi düşürdüğü ancak yüksek güç ihtiyacı ile bu oran 4.45% değerine ulaşmaktadır. Elde edilen H_2 gazının yenilenebilir kaynaklardan elde edilmesi bu değerleri daha da çevreye duyarlı olarak yapacaktır.

KAYNAKÇA

- Akansu, S. (2004). Internal combustion engines fueled by natural gas?hydrogen mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29(14), 1527-1539. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.01.018>
- Bessarabov, D., & Millet, P. (2018). Selected Properties of Hydrogen. *İçinde PEM Water Electrolysis* (ss. 101-120). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102830-8.00005-9>
- Bidin, N., Azni, S. R., Abu Bakar, M. A., Johari, A. R., Abdul Munap, D. H. F., Salebi, M. F., Abd. Razak, S. N., Sahidan, N. S., & Sulaiman, S. N. A. (2017). The effect of sunlight in hydrogen production from water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(1), 133-142. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.203>
- Bidin, N., Razak, S. N. A., Azni, S. R., Nguroho, W., Mohsin, A. K., Abdullah, M., Krishnan, G., & Bakhtiar, H. (2014). Effect of green laser irradiation on hydrogen production. *Laser Physics Letters*, 11(6), 066001. <https://doi.org/10.1088/1612-2011/11/6/066001>
- Borisov, G., Bachvarov, V., Penchev, H., Rashkov, R., & Slavcheva, E. (2021). Multi-metallic electrodeposited catalysts applicable for oxygen evolution reaction in AEM water electrolysis. *Materials Letters*, 286, 129248. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.129248>
- Burton, N. A., Padilla, R. V., Rose, A., & Habibullah, H. (2021). Increasing the efficiency of hydrogen production from solar powered water electrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110255. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110255>
- Coskun Avci, A., & Toklu, E. (2022). A new analysis of two phase flow on hydrogen production from water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(11), 6986-6995. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.180>
- Coutanceau, C., Baranton, S., & Audichon, T. (2018). Hydrogen Production From Water Electrolysis. *İçinde Hydrogen Electrochemical Production* (ss. 17-62). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811250-2.00003-0>
- Dincer, I., & Zamfirescu, C. (2016a). Hydrogen and Its Production. *İçinde Sustainable Hydrogen Production* (ss. 65-97). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801563-6.00002-9>
- Dincer, I., & Zamfirescu, C. (2016b). Hydrogen Production by Electrical Energy. *İçinde Sustainable Hydrogen Production* (ss. 99-161). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801563-6.00003-0>
- Dincer, I., & Zamfirescu, C. (2016c). Hydrogen Production by Thermal Energy. *İçinde Sustainable Hydrogen Production* (ss. 163-308). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801563-6.00004-2>

- Dincer, I., & Zamfirescu, C. (2016d). Novel Systems and Applications of Hydrogen Production. *Içinde Sustainable Hydrogen Production* (ss. 441-470). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801563-6.00008-X>
- Du, L., Sun, Y., & You, B. (2021). Hybrid water electrolysis: Replacing oxygen evolution reaction for energy-efficient hydrogen production and beyond. *Materials Reports: Energy*, 1(1), 100004. <https://doi.org/10.1016/j.matre.2020.12.001>
- Đukić, A., & Firak, M. (2011). Hydrogen production using alkaline electrolyzer and photovoltaic (PV) module. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(13), 7799-7806. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.01.180>
- Đurovič, M., Hnát, J., & Bouzek, K. (2021). Electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction in alkaline and neutral media. A comparative review. *Journal of Power Sources*, 493, 229708. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229708>
- Heo, J. N., Shin, J., Yoon, T., Son, N., & Kang, M. (2021). Effective alkaline water electrolysis on $\text{nwMnO}_2\text{-nsNi(OH)}_2$ composite electrode via lattice oxygen participant adsorbate evolving mechanism. *Applied Surface Science*, 567, 150281. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150281>
- Hornby, S. (2021). Hydrogen-Based DRI EAF Steelmaking—Fact or Fiction? *AISTech 2021 Proceedings of the Iron and Steel Technology Conference*, 249-261. <https://doi.org/10.33313/382/124-20513-048>
- Hung, C.-Y., Li, S.-D., Wang, C.-C., & Chen, C.-Y. (2012). Influences of a bipolar membrane and an ultrasonic field on alkaline water electrolysis. *Journal of Membrane Science*, 389, 197-204. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.10.050>
- Jang, D., Cho, H.-S., & Kang, S. (2021). Numerical modeling and analysis of the effect of pressure on the performance of an alkaline water electrolysis system. *Applied Energy*, 287, 116554. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116554>
- Kawamura, A., Yanai, T., Sato, Y., Naganuma, K., Yamane, K., & Takagi, Y. (2009). Summary and Progress of the Hydrogen ICE Truck Development Project. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 2(1), 110-117. <https://doi.org/10.4271/2009-01-1922>
- Keçebaş, A., Kayfeci, M., & Bayat, M. (2019). Electrochemical hydrogen generation. *Içinde Solar Hydrogen Production* (ss. 299-317). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00009-6>
- Kim, S., Han, J. H., Yuk, J., Kim, S., Song, Y., So, S., Lee, K. T., & Kim, T.-H. (2022). Highly selective porous separator with thin skin layer for alkaline water electrolysis. *Journal of Power Sources*, 524, 231059. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231059>
- Koza, J. A., Mühlhoff, S., Uhlemann, M., Eckert, K., Gebert, A., & Schultz, L. (2009). Desorption of hydrogen from an electrode surface under influence of an external magnetic field

– In-situ microscopic observations. *Electrochemistry Communications*, 11(2), 425-429. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2008.12.010>

Koza, J. A., Mühlenhoff, S., Żabiński, P., Nikrityuk, P. A., Eckert, K., Uhlemann, M., Gebert, A., Weier, T., Schultz, L., & Odenbach, S. (2011). Hydrogen evolution under the influence of a magnetic field. *Electrochimica Acta*, 56(6), 2665-2675. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.12.031>

Lao, L., Ramshaw, C., & Yeung, H. (2011). Process intensification: Water electrolysis in a centrifugal acceleration field. *Journal of Applied Electrochemistry*, 41(6), 645-656. <https://doi.org/10.1007/s10800-011-0275-2>

Li, Y., Yang, G., Yu, S., Mo, J., Li, K., Xie, Z., Ding, L., Wang, W., & Zhang, F.-Y. (2021). High-speed characterization of two-phase flow and bubble dynamics in titanium felt porous media for hydrogen production. *Electrochimica Acta*, 370, 137751. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.137751>

Lin, M.-Y., & Hourng, L.-W. (2014). Ultrasonic wave field effects on hydrogen production by water electrolysis. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 37(8), 1080-1089. <https://doi.org/10.1080/02533839.2014.912787>

Lonis, F., Tola, V., & Cau, G. (2021). Assessment of integrated energy systems for the production and use of renewable methanol by water electrolysis and CO₂ hydrogenation. *Fuel*, 285, 119160. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119160>

Matthias, N. S., Wallner, T., & Scarcelli, R. (2012). A Hydrogen Direct Injection Engine Concept that Exceeds U.S. DOE Light-Duty Efficiency Targets. *SAE International Journal of Engines*, 5(3), 838-849. <https://doi.org/10.4271/2012-01-0653>

Naganuma, K., Honda, T., Yamane, K., Takagi, Y., Kawamura, A., Yanai, T., & Sato, Y. (2009). Efficiency and Emissions-Optimized Operating Strategy of a High-pressure Direct Injection Hydrogen Engine for Heavy-duty Trucks. *SAE International Journal of Engines*, 2(2), 132-140. <https://doi.org/10.4271/2009-01-2683>

Okonkwo, P. C., Bhowmik, H., Mansir, I. B., Al Sarj Al Marhoon, M. A. A., & Al Sfarini, N. F. A. (2022). Effect of electrode spacing on hydrogen production using a home-made alkaline electrolyzer. *Materials Letters*, 306, 130841. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130841>

Pal, A., & Agarwal, A. K. (2015). Comparative study of laser ignition and conventional electrical spark ignition systems in a hydrogen fuelled engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(5), 2386-2395. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.030>

Roy, A., Watson, S., & Infield, D. (2006). Comparison of electrical energy efficiency of atmospheric and high-pressure electrolyzers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(14), 1964-1979. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.01.018>

- Schiller, G., Henne, R., & Borck, V. (1995). Vacuum plasma spraying of high-performance electrodes for alkaline water electrolysis. *Journal of Thermal Spray Technology*, 4(2), 185-194. <https://doi.org/10.1007/BF02646111>
- Sørensen, B., & Spazzafumo, G. (2018a). Fuel cell systems. *İçinde Hydrogen and Fuel Cells* (ss. 221-272). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100708-2.00004-7>
- Sørensen, B., & Spazzafumo, G. (2018b). Fuel cells. *İçinde Hydrogen and Fuel Cells* (ss. 107-220). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100708-2.00003-5>
- Sørensen, B., & Spazzafumo, G. (2018c). Hydrogen. *İçinde Hydrogen and Fuel Cells* (ss. 5-105). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100708-2.00002-3>
- Vanblarigan, P. (1998). A hydrogen fuelled internal combustion engine designed for single speed/power operation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(7), 603-609. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(97\)00100-6](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(97)00100-6)
- Verhelst, S. (2014). Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(2), 1071-1085. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.102>
- Wan, L., Xu, Z., Wang, P., Lin, Y., & Wang, B. (2021). H₂SO₄-doped polybenzimidazole membranes for hydrogen production with acid-alkaline amphoteric water electrolysis. *Journal of Membrane Science*, 618, 118642. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118642>
- Wang, M., Wang, Z., & Guo, Z. (2009). Understanding of the intensified effect of super gravity on hydrogen evolution reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(13), 5311-5317. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.043>
- Wang, M., Wang, Z., & Guo, Z. (2010). Water electrolysis enhanced by super gravity field for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(8), 3198-3205. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.128>
- Yadav, V. S., Soni, S. L., & Sharma, D. (2014). Engine performance of optimized hydrogen-fueled direct injection engine. *Energy*, 65, 116-122. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.12.007>
- Ying, Z., Geng, Z., Zheng, X., Dou, B., & Cui, G. (2022). Improving water electrolysis assisted by anodic biochar oxidation for clean hydrogen production. *Energy*, 238, 121793. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121793>
- Yip, H. L., Srna, A., Yuen, A. C. Y., Kook, S., Taylor, R. A., Yeoh, G. H., Medwell, P. R., & Chan, Q. N. (2019). A Review of Hydrogen Direct Injection for Internal Combustion Engines: Towards Carbon-Free Combustion. *Applied Sciences*, 9(22), 4842. <https://doi.org/10.3390/app9224842>
- Züttel, A. (2004). Hydrogen storage methods. *Naturwissenschaften*, 91(4), 157-172. <https://doi.org/10.1007/s00114-004-0516-x>

Davis, Stacy, ve Robert Boundy. “Transportation Energy Data Book: Edition 40”, t.y., 444.

<https://www.erinmotor.com/tr-TR/urun-detay/1-endustriyel-dizel-motor> son erişim 14.01.2024

<https://www.eia.gov/outlooks/ieo/> son erişim 14.01.2024

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Hamdi ÖZTÜRK

Uyruğu: T.C.

Doğum Tarihi ve Yeri: 16 Şubat 1986

Elektronik Posta: hmdztrk@hotmail.com

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Lisans	KHO, Sistem Mühendisliği	2008

YABANCI DİLLER

İleri düzeyde İngilizce