



T.C.
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİDROJEN YAKIT HÜCRELERİ ve OTOMOTİV SEKTÖRÜ için PEM
YAKIT HÜCRESİNİN UYGULANABİLİRLİĞİNE YÖNELİK ANALİZ**

Mehmet GÜRZ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HATAY

MAYIS-2017

T.C.
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİDROJEN YAKIT HÜCRELERİ ve OTOMOTİV SEKTÖRÜ için PEM
YAKIT HÜCRESİNİN UYGULANABİLİRLİĞİNE YÖNELİK ANALİZ**

Mehmet GÜRZ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HATAY

MAYIS-2017



KOD: 47

**T.C. İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

2017

T.C.
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİDROJEN YAKIT HÜCRELERİ ve OTOMOTİV SEKTÖRÜ için PEM
YAKIT HÜCRESİNİN UYGULANABİLİRLİĞİNE YÖNELİK ANALİZ**

Mehmet GÜRZ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Prof. Dr. Ertuğrul BALTACIOĞLU ve 2. Danışman **Doç. Dr. Yakup HAMEŞ**
danışmanlığında hazırlanan bu tez **17/05/2017** tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından
OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ertuğrul BALTACIOĞLU
Başkan

Doç. Dr. Yakup HAMEŞ
Üye

Doç. Dr. Burak DİKİCİ
Üye

Yard. Doç. Dr. Semir GÖKPINAR
Üye

Yard. Doç. Dr. Hüseyin Turan ARAT
Üye

Kod No: 47

Doç. Dr. Mustafa DEMİRCİ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

17.05.2017

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını ve tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu beyan ederim.

Mehmet GÜRZ

ÖZET

HİDROJEN YAKIT HÜCRELERİ ve OTOMOTİV SEKTÖRÜ için PEM YAKIT HÜCRESİNİN UYGULANABİLİRLİĞİNE YÖNELİK ANALİZ

Bu yüksek lisans çalışmasında temel olarak yakıt hücreli otomobillerin yapısı, teknolojik gelişim süreci, altyapı gereksinimleri, çevreye olan etkisi ile hidrojen ekonomisi incelenmiştir. Yakıt hücresi konusundaki çalışmalar/gelişmeler gözden geçirilerek otomotiv sektöründeki gelinen nokta ve geleceği birlikte ele alınmıştır. Otomotiv sektöründe kullanılmak üzere hidrojenin üretilmesi, dağıtılması ve depolanması ile ilgili mevcut durum ortaya konarak eğilimi etkileyen zorluklar ve konuyla ilgili yaklaşımlar değerlendirilmiştir. Verimliliği en üst düzeye çıkarmak ve toplam sistemin kütlesini ve maliyetini en düşük düzeye indirmek için hidrojen yakıt hücreli araçların enerji depolama sistemleri ve güç devrelerini yönetecek mevcut kontrol stratejileri incelenerek uygulanabilir bir kontrol stratejisi önerilmiştir.

2017, 96 sayfa

Anahtar kelimeler: Hidrojen, yakıt hücresi, PEM, yakıt hücreli araç, hidrojenin depolanması, kontrol stratejisi

ABSTRACT

HYDROGEN FUEL CELLS and ANALYSIS to IMPLEMENTABILITY of PEM FUEL CELL for AUTOMOTIVE SECTOR

In this MSc study, mainly the structure of fuel cell cars, technological development process, infrastructure requirements, environmental impact and hydrogen economy are examined. The studies/developments on the subject of fuel cell have been taken into consideration and the point reached in the automotive sector and the future have been handled together. The current situation with regard to the production, distribution, and storage of hydrogen for use in the automotive sector has been assessed the challenges and relevant approaches to the trend. A feasible control strategy has been proposed by reviewing current control strategies that govern energy storage systems and power circuits of hydrogen fuel cell vehicles in order to maximize efficiency and minimize mass and cost of the total system.

2017, 96 pages

Keywords: Hydrogen, fuel cell, PEM, fuel cell vehicle, hydrogen storage, control strategy

TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesinde, araştırılması ve yazımı sırasında sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesi ile çalışmayı yönlendiren ve her türlü yardımı esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Ertuğrul BALTACIOĞLU ve 2. danışman hocam Doç. Dr. Yakup HAMEŞ'e sonsuz saygı ve teőekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım sırasında sahip oldukları fiziksel imkánlardan yararlanmamı sağlayan İSTE Makine Fakóltesi ve Elektrik Elektronik Mühendisliği Fakóltesine, İSTE Makine Fakóltesinde görevli Yrd. Doç. Dr. Cuma KARAKUŐ, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezinde görevli Doç. Dr. Fatma Gül BOYACI SAN'a, Gebze Teknik Üniversitesi yakıt hücresi test, bipolar plaka geliştirme, hidrojen üretimi ve membran geliştirme laboratuvarlarında görevli yönetici ve araştırmacılara içten teőekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım İskenderun Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim elemanı Arş. Gör. Kemal KAYA'ya çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	IX
1. GİRİŞ	1
1.1. Hidrojen Nedir?.....	1
1.1.1. Hidrojeni Elde Etme Yöntemleri.....	4
1.1.2. Hidrojenin Depolanması.....	6
1.1.3. Hidrojenin Altyapı ve Dağıtımı.....	8
1.1.4. Hidrojen Konusundaki Kamuoyu Algısı.....	12
1.2. Enerji ve Çevre İlişkisi.....	12
1.3. Temiz Enerji Kaynakları	17
1.4. Otomotivin tarihi gelişimi	20
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	26
2.1. Ana Yakıt Olarak Hidrojen Kullanan İçten Yanmalı Motorlar (ICEs).....	32
2.1.1. Basıncılı Hidrojen Yakıtlı İçten Yanmalı Motor (H ₂ ICE).....	32
2.1.2. Sıvı Hidrojen Yakıtlı İçten Yanmalı Motor (L-H ₂ ICE).....	33
2.1.3. Direkt Enjeksiyonlu Hidrojen Yakıtlı İçten Yanmalı Motor (DI-H ₂ ICE).....	35
2.2. H ₂ ICE- Elektrikli Hibrit Araçlar	37
2.3. Hidrojeni Elektrik Kaynağı Olarak Kullanan Elektrikli Araçlar.....	38
2.4. Hidrojen Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (FCEVs)	39
2.3.1. Hidrojen Yakıt Hücresi Özellikleri.....	40
2.3.2. Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücreleri (PEMFCs).....	44
2.3.3. Hidrojen Yakıt Hücresi Temel ve Pratik Sınırlamaları	45
2.3.4. Yakıt Hücresi Teknolojisinin Sürdürülebilirliği ve Yenilenebilirliği.....	51
2.3.5. Hidrojenli Yakıt Hücreli Araçların Konfigürasyonları.....	51

2.3.6. Yakıt Hücreli Araçlar İçin Güç Sistemi Mimarileri	55
2.5. Elektrikli Araçların Genel Sınıflandırılması	56
2.6. Hibrit ve Elektrikli Araçlarda Enerji Yönetimi	59
2.6.1. Elektrikli Tahrik Alt Sistemi	60
Elektrik Tahrik Motoru	61
Yakıt Hücreli Enerji Kaynağı.....	61
Süperkapasitör	64
Batarya Enerji Kaynağı	66
DC-DC Konvertör	68
DC-AC İnvörtör.....	68
2.6.2. Enerji Kaynağı Alt Sistemi	68
3. ARAÇTA HİDROJEN DEPOLANMASI	71
4. HİDROJENİN EMNİYETİ.....	75
4.1. Düzenleme, Kod ve Standart Çalışmaları	68
5. MATERYAL ve YÖNTEM.....	80
6. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	82
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	84
KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİŞ	96

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Hidrojen gazının özellikleri (Mazloomi ve Gomes, 2012)	2
Çizelge 1.2. Yaygın kullanılan yakıtların hacimsel ve gravimetrik enerji yoğunlukları (Mazloomi ve Gomes, 2012)	2
Çizelge 1.3. Önemli hidrojen teknolojileri (Orhan ve ark., 2012)	3
Çizelge 1.4. Dünya genelinde bir yılda üretilen hidrojenin sektörlerel dağılımı	3
Çizelge 1.5. Her araç teknolojisi için tipik kaynaktan depoya, depodan tekerleğe ve kaynaktan tekerleğe verimlilikleri (Pollet ve ark., 2012)	5
Çizelge 1.6. Hidrojen istasyonu performans özeti (Katikaneni ve ark, 2014)	10
Çizelge 1.7. Sözleşme ve protokol kapsamında ülkelerin sınıflandırılması ve sorumlulukları (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2008)	17
Çizelge 1.8. Sera gazı emisyonları ve küresel ısınma potansiyeli (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2008)	17
Çizelge 1.9. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sınıflandırılması (Özdamar, 2000)	19
Çizelge 1.10. Yıllık dünya yenilenebilir enerji doğal potansiyeli (Özdamar, 2000)	19
Çizelge 1.11. Enerji üretim metotlarının maliyet ömür ilişkisi (Anonim, 2014)	20
Çizelge 1.12. 2000-2014 yılları arası dünya motorlu araç üretimi (x 1.000 Adet) (Otomotiv Sanayii derneği, 2014)	23
Çizelge 1.13. g/km'de CO ₂ emisyon (Mourad, 2014)	24
Çizelge 2.1. Yakıt hücreleri reaksiyonları (Lucia, 2014)	40
Çizelge 2.2. Yakıt hücresi teknolojilerinin karşılaştırılması (Kumar ve Jain, 2014: Kirubakaran ve ark., 2009; Mekhilef ve ark., 2012)	42
Çizelge 2.3. BEV, HEV ve FCEV'in özellikleri (Chan, 2002)	58
Çizelge 2.4. Farklı motor tiplerinin karşılaştırılması (Kuşdoğan, 2009)	61
Çizelge 2.5. Süperkapasitör ve Li-ion arasındaki performans karşılaştırması (Gidwani ve ark., 2014)	66
Çizelge 3.1. Enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması (Orhan ve ark., 2012)	74
Çizelge 3.2. Hidrojenin araçta depolanma şekline göre karşılaştırılması (Najjar, 2013)	74
Çizelge 4.1. Hidrojenin emniyetli kullanımı ile ilgili özellikleri (Najjar, 2013)	76
Çizelge 4.2. Gelişmekte olan araç teknolojileri ile ilişkili güvenlik riskleri sıralaması (Lopez-Arquillos ve ark., 2015)	77
Çizelge 6.1. Yakıt hücresi, batarya ve ısı motoru arasındaki fark ve benzerliklerin karşılaştırılması (Sharaf ve Orhan, 2014)	82

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Küresel hidrojen üretiminin hammadde olarak oranı (Hwang, 2013)	4
Şekil 1.2. Hidrojen üretim kaynakları (Kantürk ve Pişkin, 2007)	5
Şekil 1.3. Günümüz mevcut araçlarında yakıt sistemlerinin kapsadığı evreler (Hwang ve ark., 2013).....	6
Şekil 1.4. Çeşitli hidrojen depolama yöntemlerini gösteren akış şeması (Sharma ve Ghoshal, 2015 uyarlanmış).....	7
Şekil 1.5. Kaynaktan son kullanıcıya kadar hidrojen yolu (Salvi ve Subramanian, 2015)9	
Şekil 1.6. Sıvı hidrokarbon esaslı hidrojen yakıt ikmal istasyonunun sistem bileşenleri (Katikaneni ve ark, 2014)	10
Şekil 1.7. 2012 yılı küresel birincil enerji tüketim oranları (Türkiye Petrolleri, 2014) ..	14
Şekil 1.8. 2010 dünya petrol tüketim oranları (Key World Energy Statistics, 2012)	14
Şekil 1.9. Hawaii'de yıllara göre CO ₂ konsantrasyonu dağılımı (Anonymous, 2017)....	15
Şekil 1.10. Sera etkisi (Çelik ve ark., 2008).....	16
Şekil 1.11. 1861-2015 yılları arası ham petrol fiyatları (BP, 2016).....	18
Şekil 1.12. Dünya birincil enerji talebinde yakıtların payları (Enerji Raporu, 2012).....	20
Şekil 1.13. 2014 yılı itibari ile dünya motorlu araç üretimi (x 1.000 Adet) (Otomotiv Sanayii derneği, 2014).....	22
Şekil 1.14. Bölgeler itibariyle 2012 yılı petrol rezervleri (Türkiye Petrolleri, 2014)	24
Şekil 2.1. Basınçlı hidrojen yakıtlı içten yanmalı (H ₂ ICE) motor şematik resmi	33
Şekil 2.2. Sıvı hidrojen depolama ve enjeksiyon sisteminin şematik gösterimi	34
Şekil 2.3. Basınçlı hidrojene uygun bir enjektörün şematik gösterimi	35
Şekil 2.4. Doğrudan enjeksiyonlu hidrojen yakıtlı motor (Kim ve ark., 2005)	36
Şekil 2.5. H ₂ ICE'in hibrit elektrikli versiyonu	38
Şekil 2.6. Toyota Mirai yakıt hücresi sistemi (Anonymous, 2016c)	39
Şekil 2.7. Tüm işletme koşullarında yakıt hücresinin ömrünü etkileyen performans bozulma faktörleri (Pei ve ark., 2008).....	41
Şekil 2.8. Enerji dönüşüm sistemlerinin ekserji verimleri (Sharaf ve Orhan, 2014)	43
Şekil 2.9. PEMFC çalışma prensibi	45
Şekil 2.10. Yakıt hücresinin ideal ve gerçek voltaj – akım karakteristiği (Larminie ve Dicks, 2001)	47
Şekil 2.11. Tafel eğrisi	49
Şekil 2.12. Yakıt hücreli elektrikli otomobilin şematik gösterimi (FCEVs).....	53
Şekil 2.13. Yakıt hücreli-fişle şarjedilebilir hibrit aracın şematik resmi (FC-PHEVs) ..	54
Şekil 2.14. Tipik yakıt hücresi tabanlı elektrik sistemi.....	55
Şekil 2.15. Yüksek güçlü hibrit elektrikli taşıtın konfigürasyonu	56
Şekil 2.16. Hibrit araçlardaki enerji yönetim sisteminin diğer ünitelerle haberleşmesini gösteren diyagram (Chan, 2002)	60
Şekil 2.17. HEV ve PHEV'in mimarilerinin tahrik dizileri (Tie ve Tan, 2012).....	63
Şekil 2.18. Yakıt hücreli aracın temel bileşenleri (Anonymous, 2017b)	64
Şekil 2.19. Süperkapasitör şeması (Winter ve Brodd, 2004)	65
Şekil 2.20. Li-ion hücresin deşarj ve şarj işlemi sırasında çalışması (Anonymous, 2017c)	67

Şekil 2.21. Enerji kaynağı alt sistemi kontrol elektroniğı tasarımı	69
Şekil 3.1. Çeşitli koşullar altında hidrojenin hacimsel yoğunluğu (Ref Von Helmholt ve Eberle, 2007 tarafından uyarlanmıştır).....	71
Şekil 3.2. Hidrojen depolama teknolojileri ve hedefleri (Mori and Hirose, 2009).....	72
Şekil 3.3. Yakıt hücreli araçların dahili hidrojen depolama aşamaları (Salvi ve Subramanian, 2015).....	73



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

W_{el}	: Elektriksel iş
ΔG	: Gibbs serbest enerjisi
n	: Reaksiyona katılan elektron sayısı,
F	: Faraday sabiti (96,487 coulomb/g-mol elektron)
E	: hücrenin ideal potansiyeli
ΔE	: Potansiyel fark
ΔH	: entalpi değişimi
ΔS	: entropi değişimi
η_{fc}	: Yakıt hücresi verimi
T_o	: işlem sıcaklığı (K)
V	: Voltaj (V)
I	: Akım yoğunluğu (mA/cm ²)

KISALTMALAR

AFC	: Alkali yakıt hücresi (Alkaline Fuel Cell)
BEVs	: Batarya elektrikli araçlar (Battery Electric Vehicles)
BMİDÇS	: Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
CFC	: Kloroflorokarbon. Karbon, flüor, klor ve hidrojenen oluşan organik bileşik
CGH ₂	: Basınçlı hidrojen gazı (Compressed Gases Hydrogen)
CH ₄	: Metan
CO ₂	: Karbondioksit
CTFCA	: Kanada Hidrojen Güvenlik Programı
CuCl	: Bakır klorür
CVs	: Geleneksel araçlar (Conventional Vehicles)
DI-H ₂ ICE	: Direkt enjeksiyon hidrojen içten yanmalı motor (Direct injection hydrogen fueled ICE)
DMFC	: Doğrudan metanol yakıt hücresi (Direct Methanol Fuel Cell)
ECMS	: Eşdeğer tüketim azaltma stratejisi (Equivalent Consumption Minimization Strategy)
EDLC	: Elektrokimyasal çift tabakalı kapasitör (Electrochemical Double Layer Capacitor)
EVs	: Elektrikli Araçlar (Electric Vehicles)
FC-PHEVs	: Yakıt hücreli ve şarj edilebilir bataryalı elektrikli araçlar (Fuel cell plug-in hybrid vehicles)
FCVs	: Yakıt hücreli araçlar (Fuel Cell Vehicles)
FLCS	: Bulanık mantık kontrol stratejisi (Fuzzy Logic Control Strategy)
GREET	: Sera gazları, ulaşımda enerji kullanımı ve emisyon düzenlemesi (The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation)
GVs	: Benzinli araçlar (Gasoline Vehicles)
H ₂	: Hidrojen gazı
H ₂ ICE	: Yakıt olarak hidrojen kullanan içten yanmalı motor
HEV	: Hibrit elektrikli araç (Hybrid Electric Vehicle)

HFC	: Hidroflorür karbonlar
HFCVs	: Hidrojen yakıt hücreli araçları (Hydrogen Fuel Cell Vehicles)
ICEs	: İçten yanmalı motorlar (Internal Combustion Engines)
ICEVs	: İçten yanmalı motora sahip araçlar (Internal Combustion Engines Vehicles)
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotech. Commission)
LCA	: Ömür döngüsü değerlendirmesi (Life Cycle Assessment)
LDVs	: Hafif yük taşıtları (Light Duty Vehicle)
L-H ₂ ICE	: Sıvı hidrojen içten yanmalı motor (Liquid hydrogen-fueled internal combustion engine)
ISO	: Uluslararası standart organizasyonu (International Organization for Standardization)
MCFC	: Erimiş karbonat yakıt hücresi (Molten Carbonate Fuel Cell)
Mt	: Milyon ton (million tons)
Mtoe	: Milyon ton petrol eşdeğeri (million tons of oil equivalent)
NASA	: Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration)
NH ₃ BH ₃	: Amonyak Boran
N ₂ O	: Nitröz Oksit
NO _x	: Azot Oksit
OMCS	: Çalışma modu kontrol stratejisi (Operating Mode Control Strategy)
PAFC	: Fosforik asit yakıt hücresi (Phosphoric Acid Fuel Cell)
PEGSÜ	: Pazar Ekonomisine Geçiş Sürecindeki Ülkeler (Doğu Bloku Ülkeleri)
PEMFC	: Polimer elektrolit membran yakıt hücresi (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)
PFC	: Perfloro karbonlar
PFI-H ₂ ICE	: Port yakıt enjeksiyonlu içten yanmalı hidrojen motoru (Port fuel injection içten yanmalı motor)
PAFC	: Fosforik Asit Yakıt Hücresi (Phosphoric Acid Fuel Cell)
PV	: Güneş hücresi (Fotovoltaik)
PPSS	: Tepe güç kaynağı stratejisi (Peaking Power Source Strategy)
RCS	: Düzenleme, kod ve standartlar (the regulations, codes and standards)
SC	: Alt komite (Subcommittees)
SF ₆	: Sülfürhekza florid
SOC	: Batarya (şarj durumu) bilgisi (State of Charge)
SOFC	: Katı Oksit Yakıt Hücresi (Solid Oxide Fuel Cell)
TAG	: Teknik danışma grubu (Technical Advisory Group)
TC	: Teknik komite (Technical Committee)
WTW	: Kaynaktan Tekere Verim evreleri (Well to Wheel)

1. GİRİŞ

Pollet ve ark. (2012) tarafından bildirildiğine göre ulaşım ihtiyacımızda kullanılan dünya çapında 1 milyar civarında otomobil olduğu ve otomotiv endüstrisinin 10 milyon kişiyi istihdam ederek senelik 3 trilyon doları bulan ticari hacmi nedeniyle dünya çapında en önemli sektörlerdendir.

Ulaşım sektöründeki muhtemel büyümeye karşılık petrol tüketimindeki artış ile çevre sorunlarıyla beraber getireceği fiyat istikrarsızlığının da önüne geçebilecek çözüm çalışmaları artmıştır.

Hidrojen yakıtı farklı alternatiflerle beraber, otomotiv sektörüne yönelik sürdürülebilir ve temiz bir enerji sistemi oluşturulması amacıyla araştırılmaktadır. Yine hidrojen enerji sistemi ile ilgili olarak, yanmayı ortadan kaldırarak kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çeviren yakıt hücrelerini araştırma ve geliştirme çabaları artmıştır. Yakıt hücrelerinin otomotiv endüstrisinde kullanılmasıyla küresel enerji tüketiminde dikkate değer temiz emisyon salınımı elde edilerek yenilenebilir kaynaklardan da elde edilebilen hidrojen yakıtı, enerji taşıyıcısı olarak hayatımızda yer alacaktır.

Bu çalışmada, otomotiv endüstrisinden kaynaklı çevre kirliliğini azaltabilecek ve yıllarca bilinmesine karşılık gelişmesi zamanımıza dayanan yakıt hücrelerinin genel yapısı, tipleri, çalışma prensipleri ve otomotiv sektöründe kullanılmasına yönelik aşılması gereken engeller araştırıldı. Mevcut altyapı çalışmaları ve hidrojen depolanması faktörlerinin incelenmesiyle otomotiv sektöründeki gelişmeler incelenmiştir.

Hidrojenden enerji dönüşüm çalışmaları; yakıt hücresi, hidrojenin elde edilmesi, depolanması ve taşınması ile ilgili geniş bir çalışma alanını içermektedir.

1.1. Hidrojen Nedir?

Hidrojen 1500'lü yıllarda keşfedilmiş, 1700'lü yıllarda yanabilme özelliğinin farkına varılmış, evrenin en basit ve en çok bulunan elementi olup, renksiz, kokusuz, havadan 14.4 kez daha hafif ve tamamen zehirsiz bir gazdır.

Hidrojen doğada saf olarak bulunmayan birincil (su, fosil yakıtlar ve biyokütle gibi) ve yenilenebilir enerji (güneş, rüzgâr, jeotermal ve hidrolik gibi) kaynaklardan

elde edilerek enerji taşıyıcısı olarak kullanılabilir yakıt olduğunu bildirilmiştir (Tutar ve Eren, 2011; Öztürk ve Yüksel, 2016).

Çizelge 1.1. Hidrojenin gazının özellikleri (Mazloomi ve Gomes, 2012)

Özellik	Değer
İsim, sembol, numarası	Hidrojen, H, 1
Kategori	Ametal
Atom ağırlığı	1.008
Elektronlar, protonlar, nötronlar	1, 1, 0
Renk, koku	Renksiz, kokusuz
Zehirlilik	Yok, basit boğucu
Faz	Gaz
Yoğunluk	Gaz: 0.089 g l ⁻¹ , liquid: 0.07 g cm ³
İyonlaşma enerjisi	13.5989 eV
Sıvıdan gaza genişleme oranı	1:848 (atmosferik koşullar)
Erime ve kaynama noktası	-259.14 °C, -252.87 °C
Düşük ısı değeri (LHV)	118.8 MJ kg ⁻¹
Adyabatik alev sıcaklığı	2107 °C
Havadaki yanıcılık aralığı	%4-75
Laminer alev hızı	3.06 m s ⁻¹
Alevlenme noktası	-253 °C
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı	585 °C
Araştırma oktan sayısı (RON)	>130

Çizelge 1.2. Yaygın kullanılan yakıtların hacimsel ve gravimetrik enerji yoğunlukları (Mazloomi ve Gomes, 2012)

Madde	Kilogram başına enerji (MJ kg ⁻¹)	Litre başına enerji (MJ l ⁻¹)
Hidrojen (sıvı)	143	10.1
Hidrojen (sıkıştırılmış, 700 bar)	143	5.6
Hidrojen (ortam basıncı)	143	0.0107
Metan (ortam basıncı)	55.6	0.0378
Doğalgaz (sıvı)	53.6	22.2
Doğalgaz (sıkıştırılmış, 250 bar)	53.6	9
Doğalgaz	53.6	0.0364
LPG propan	49.6	25.3
LPG bütan	49.1	27.7
Benzin (petrol)	46.4	34.2
Biyodizel petrol	42.2	33
Dizel	45.4	34.6

Orhan ve ark. (2012)'a göre hidrojenin, gelecekte enerji taşıyıcısı olarak önemli bir rol oynaması umulmaktadır. Günümüzde fosil yakıtların kullanıldığı her uygulamada da yakıt olarak kullanılabilceği ve fosil yakıtların tersine, zararlı emisyonlarının olmayacağı bildirilmiştir.

Çizelge 1.3. Önemli hidrojen teknolojileri (Orhan ve ark., 2012)

Hidrojen					
Kaynaklar	Üretim	Depolama	Dağıtım	Kullanım	
Fosil yakıtlar	Elektroliz	Yeraltında gaz depolama	Boru hatları	İçten yanmalı motorlarda yanma ve türbinler	yanmalı
Nükleer	Termokimyasal süreçler	Yerüstünde gaz depolama	Kara ve / veya demiryolu taşıma araçları ile gaz ve sıvı konteyner	Hidrojen / oksijen yanması ile doğrudan buhar üretimi	
Yenilenebilir	Hibrit süreçler	Taşıt basınçlı depoları Sıvı hidrojen depolama Metal hidrür depolama Diğer yeni depolama yöntemleri		Hidrojen yanma Elektrokimyasal elektrik üretimi (Yakıt hücreleri)	katalitik

Hidrojen çoğunlukla petrol rafinerilerinde, amonyak ve diğer azotlu gübrelerin sentezi, rafine edilmesi ve kükürt giderilmesinde (hidrojenasyon reaksiyonları, hidrojen sülfürleşmesi) ve az miktarda nikel, tungsten, molibden, bakır, çinko, uranyum ve kurşun gibi metal rafine etme de kullanılırken dünya çapında yıllık 60 milyon metrik tonun üzerinde kullanılmaktadır (Singh ve ark., 2015).

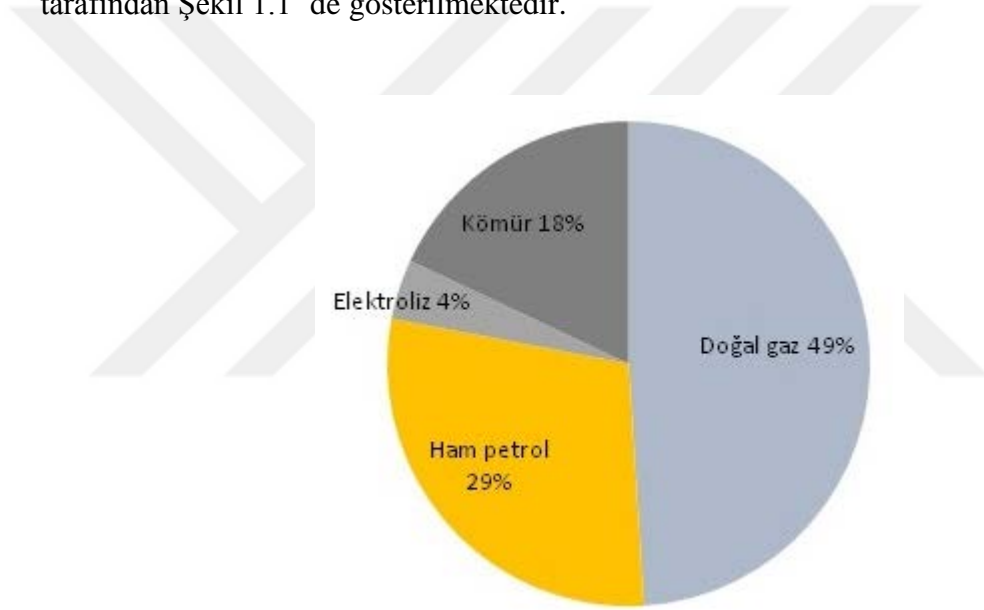
Çizelge 1.4. Dünya genelinde bir yılda üretilen hidrojenin sektörel dağılımı

Sektör	Yıllık kullanım miktarı (m ³)
Suni gübre sanayi	25.000
Bitkisel yağ (margarin) üretimi	16.000
Rafineler	1.200
Petrokimya endüstrisi	30.000
Hidrojen hayvansal yağ üretimi	200-300
Gaz veya sıvı hidrojen üretimi	6.000

Öztürk ve Yüksel (2016), hidrojen teknolojisinin, avantajlarına rağmen, fosil yakıt teknolojilerle karşılaştırıldığında yeni ve pahalı olduğunu ifade etmiştir. Buna rağmen hidrojen teknolojilerinin, üretim, depolama, iletim-dağıtım ve güvenlik aşamaları ile ilgili sorunlarının çözülmesi durumunda, fosil yakıt teknolojileri ile rekabet edebileceğini ifade etmiştir.

1.1.1. Hidrojeni Elde Etme Yöntemleri

Dünya hidrojen üretimi %49 doğal gazdan, %29 petrolden, %18 kömürden ve sadece %4 elektrolizden elde edildiği (Lucia, 2014; Pollet ve ark, 2012; Hwang, 2013) tarafından Şekil 1.1' de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Küresel hidrojen üretiminin hammadde olarak oranı (Hwang, 2013)

Şekil 1.2.' de görüldüğü gibi hidrojen üretimi için kimyasal, biyolojik, elektrolitik, fotolitik ve termokimyasal gibi çeşitli proses teknolojileri kullanılabilir. Sharma ve Ghoshal (2015) tarafından yaygın hidrojen üretim yöntemleri; buhar metan reformasyonu, kömür ve diğer hidrokarbonların gazlaştırılması, suyun elektrolizi, biyokütleden ve nükleer enerjiden hidrojen olarak bildirilmiştir.



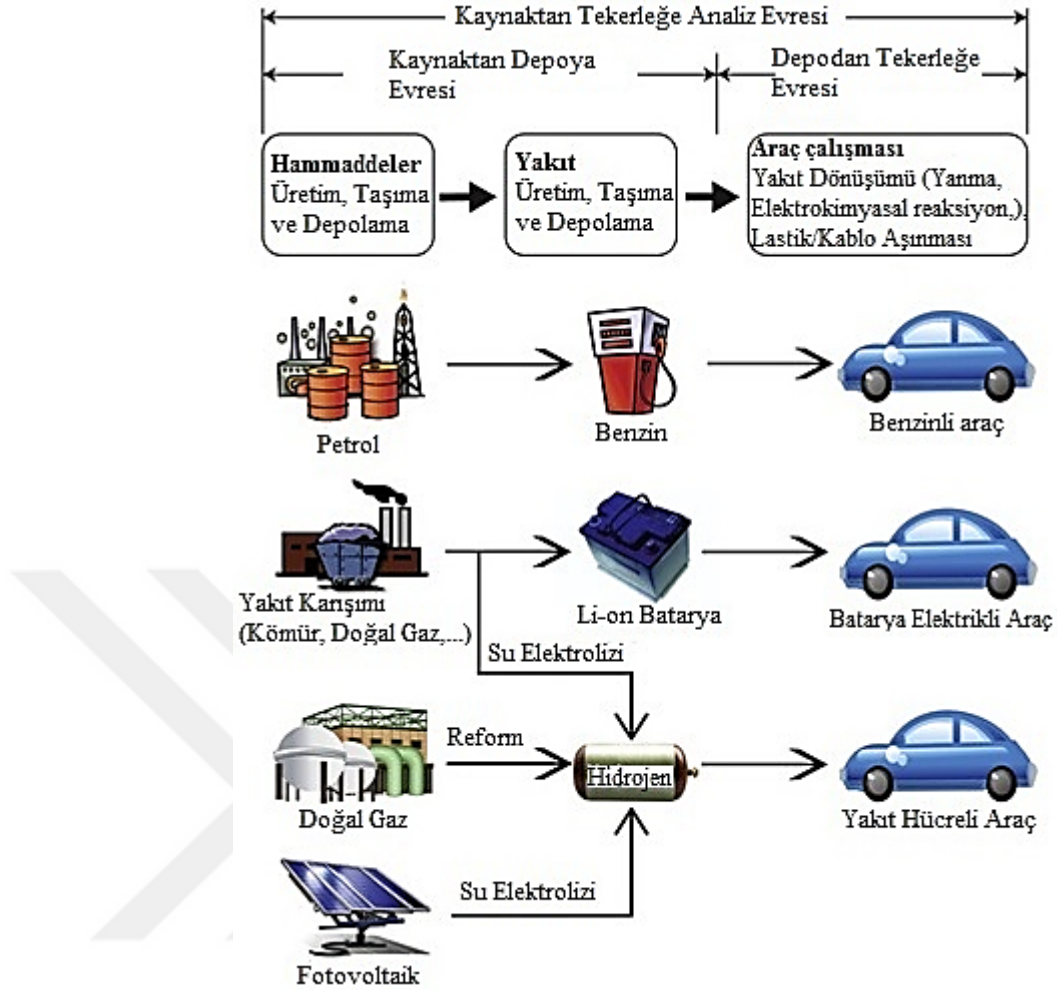
Şekil 1.2. Hidrojen üretim kaynakları (Kantürk ve Pişkin, 2007)

Mourad (2014), yakıt ve tahrik sistemlerini karşılaştırırken geniş kapsamlı, niceliksel, ömür döngüsü yaklaşımı analizlerinin gerektiğini ve bu analizlerin, üç genel aşamaya ayrıldığını belirtmiştir. Diğer bir deyişle, ham madde, yakıt ve araç operasyonu aşamalarıdır. 'kaynaktan depoya' (yakıt üretimine katılan tüm faaliyetler) ve 'depodan-tekerleğe' (aracın sürüş sırasında yakıt tüketimi) olarak iki aşama adlandırılır. Sonuç olarak, 'kaynaktan depoya' aşaması ve 'depodan-tekerleğe' aşaması birleştirilerek 'kaynaktan tekerleğe', yakıt hücreli araçlar (FCVs) için emisyon, enerji ve ömür döngüsü olur. Çizelge 1.5'de araç teknolojisi için tipik kaynaktan depoya, depodan tekerleğe ve kaynaktan tekerleğe verimlilikleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 1.5. Her araç teknolojisi için tipik kaynaktan depoya, depodan tekerleğe ve kaynaktan tekerleğe verimlilikleri (Pollet ve ark., 2012)

Araç tipi	Kaynaktan depoya	Depodan tekerleklere	Kaynaktan tekerleklere
BEV	%32-100	Şarj dinamosu %90	%21.3-66.5
H ₂ FCEV	%75-100	Yakıt hücresi %51.8	%31.2-41.6
Hibrit	%82.2		%24.8
Dizel	%88.6		%15.8
Benzin	%82.2		%12.4

Araç/yakıt sistemlerinin kapsadığı 'kaynaktan tekerleğe' evreler Şekil 1.3.' de gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Günümüz mevcut araçlarında yakıt sistemlerinin kapsadığı evreler (Hwang ve ark., 2013)

1.1.2. Hidrojenin Depolanması

(Larminie ve Dicks, 2001; Sandy Thomas, 2009) göre genel olarak hidrojenin depolama seçeneklerini: fiziksel depolama ve kimyasal yöntemlerle depolama olarak iki kategoride toplayabiliriz. Hidrojenin depolanma yöntemleri sıkıştırılmış gaz olarak hidrojenin depolanması, bir sıvı olarak hidrojenin depolanması, tersinir metal hidrid hidrojen depoları ve karbon nanofiberlerdir. Depolamada kullanılan kimyasal yöntemler metanol, alkali metal hidrürler, sodyum borohidrid ve amonyaktır. Bu yöntemlerin hiçbiri önemli sorunlar yaşamazlar.

Hidrojen sıkıştırılmış gaz veya sıvı olarak depolanabilmesine rağmen geliştirilen diğer yöntemler de vardır. Oettle (2010) tarafından hidrojen gazının çeşitli metal hidrür

türler ya da metanol gibi taşıyıcı içinde kimyasal olarak depolandığı belirtilmiştir. Benzin, hacimce hidrojenin 3 katı, hidrojen ise ağırlık olarak benzinin 3 katı enerji içerir. Bununla birlikte, hidrojenin düşük konsantrasyonu yapısal bir problemdir.



Şekil 1.4. Çeşitli hidrojen depolama yöntemlerini gösteren akış şeması (Sharma ve Ghoshal, 2015 uyarlanmış)

Dutta (2014) hidrojenin depolanmasında metaller de kullanılabilir. Bazı metal bileşikleri ve kompozitlerin, uygun adsorpsiyon / desorpsiyon kinetiği ile hidrojeni büyük miktarda depolaması mümkün olduğunu ifade etmiştir.

Gravimetrik ve hacimsel depolama, H_2 depolama aygıtları için yüksek olmalıdır. Hidrojen depolama malzemelerinin, dönüştürülebilir, mükemmel adsorpsiyon ve desorpsiyon kinetiği, düşük maliyetli ve hafif olması olumlu özellikleridir. ABD Enerji Bakanlığı 2015 hedefleri şunlardır: 1500 döngü ömrü, ağırlıkça % 5.5 ve 40 g H_2 / L bir kapasite Dutta (2014) tarafından bildirilmiştir.

Magnezyum, düşük maliyetli, hafif ve yüksek kapasitesi nedeniyle en cazip hidrojen depolama malzeme olarak kabul edilir. Magnezyum ağırlıkça % 7,6 hidrojen depolayabileceği bildirilmiştir (Schlapbach ve Züttel, 2001).

Dutta (2014) tarafından Mg-tabanlı filmler, yakıt hücreli otomobiller için hidrojen depolama malzemeleri olarak olumlu bir seçim olabilir. 20 nm Mg film, 7×10^4 Pa H_2 ve

298 K'de %5.5 gibi yüksek doymuş hidrojen içeriği ile üstün hidrojen emme özellikleri gösterdiği bildirilmiştir.

Araştırmalar amonyak boran (NH_3BH_3 , AB), potansiyel kimyasal hidrojen depolama olarak kullanılabileceğini gösteriyor. Hidrojenin araçta depolanması uygulamalarında, ağırlıkça %19,6 kadar yüksek hidrojen içeriği ile önemli bir potansiyele sahiptir. AB hidrolitik dehidrojenasyon sistemi, otomobil uygulama için uygunluğunu gösteren, AB ve H_2O başlangıç malzemelerinin ağırlıkça %7,8'i kadar hidrojen kapasite sunduğu Dutta (2014) tarafından bildirilmiştir.

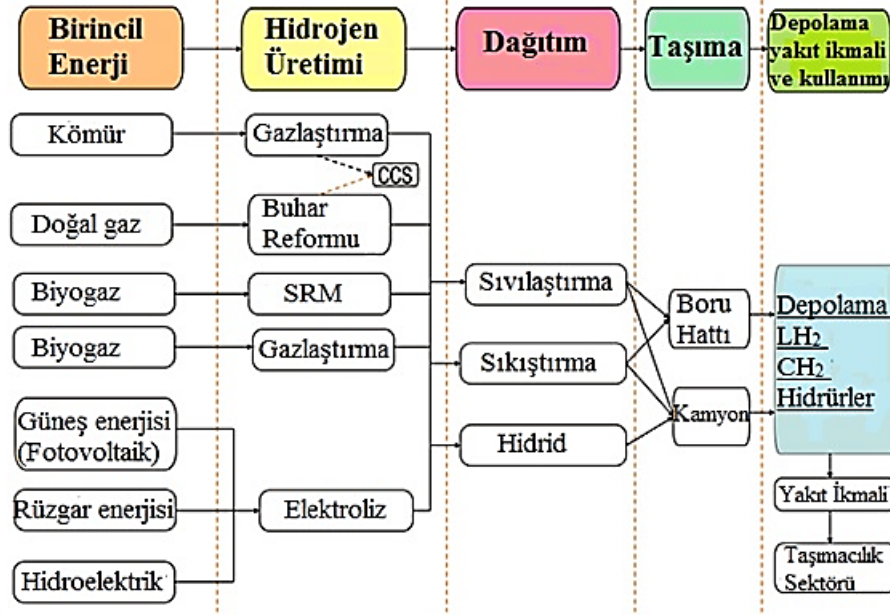
Bazı metal hidritler, hidrojen depolama malzemeleri olarak kullanılabilir. Kimyasal hidritleri, Ca_2H , LiH , NaBH_4 , MgH_2 , LiAlH_4 ve H_3NBH_3 , yakıt hücrelerine H_2 gazı verilmesi için depolama malzemeleri olarak yaygın olarak incelenmiştir. Sodyum borohidrid (NaBH_4), pratik kullanımındaki güvenliği, stabilite ve yüksek hidrojen depolama kapasitesi (ağırlıkça %10.8) ile depolama malzemesi olarak umut vaat etmektedir (Dutta, 2014).

Magnezyumun yüksek depolama kapasitesi esas alınarak hidrojen depolama malzemeleri olarak yaygın olarak kullanılır. Bu malzeme düşük maliyetli ve hafif olmasına rağmen, Mg'nin ağır ilerleyen kinetiği nedeniyle otomotivde depolama için tercih edilmez. Bununla birlikte, Mg esaslı filmler yakıt hücreli otomobilleri için hidrojen depolama malzemeleri olarak tercih edilebileceği bildirilmiştir (Jin ve ark., 2007). Ayrıca, Dutta (2014) göre aktif karbon üzerinde desteklenen Mg nikel katalizörleri, oda sıcaklığında ve yüksek basınçta önemli miktarlarda hidrojen depolayabileceği ifade edilmiştir.

1.1.3. Hidrojenin Altyapı ve Dağıtım

Tarihsel olarak, H_2 yakıt altyapısı teknik olarak olanaksız ve çok pahalı idi. Hidrojenin araçta maksimum menzil elde etmek için, ağırlık, hacim, verimlilik, depolama güvenliği ve maliyeti sorundur.

Gelecekte hidrojen bazlı yakıt hücreli araçlarının dahili yakıt depolanmalarını desteklemek için hidrojen üreten akaryakıt istasyonu altyapısının diğer yaklaşımlara göre avantajlarının olduğu (Katikaneni ve ark., 2014) tarafından bildirilmiştir.



Şekil 1.5. Kaynaktan son kullanıcıya kadar hidrojen yolu (Salvi ve Subramanian, 2015)

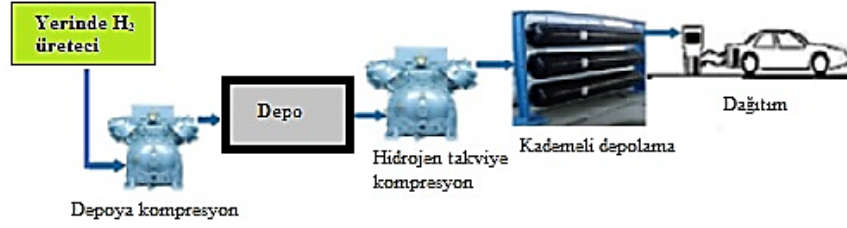
Araç üzerinde dâhili hidrojen depolama, FCEVs (yakıt hücreli elektrikli araçlar) için pazar başarıya ulaşmak için önemli bir faktördür. FCEVs'ın ICE (içten yanmalı motor) araçlar ile rekabet edebilmesi için, benzer bir sürüş menzili olmalıdır. Hidrojen hacimsel enerji yoğunluğu çok düşük olduğu için, dâhili yeterli hidrojen depolama, ağırlık, hacim, kinetik, güvenlik ve maliyet açısından bir sorun olmaya devam etmekte olduğu ifade edilmiştir (Pollet ve ark., 2012).

Hidrojen halen tüp römork veya silindirlerde gaz formunda, kriyojenik sıvı hidrojen tankerlerinde sıvı formda ve boru hattı sayesinde çok sınırlı bir ölçüde depolanır/taşınır. Sıvı hidrojen, -253 °C soğutulur, 60.000 litre kadar kapasiteli, süper yalıtılmış kriyojenik tankerlerle karayolu ile taşınmaktadır. Boru hatları, hidrojen gazını uzun mesafelerde büyük miktarlarda en etkili taşıma aracı maliyetini sunmaktadır. Şu anda dünyada hidrojen altyapısı sınırlıdır. Pollet ve ark. (2012) Avrupa'da 2030'da 40 milyon hidrojen yakıt hücreli araç yolda olursa, bu 19.000 hidrojen dolun istasyonlarına eşit olacak, cep telefonu ve genişbant altyapısına yapılan yatırımlarla € 6b- €24b (\$ 8b- \$ 33b) karşılaştırılabilir maliyet değerlendirmesi yapmıştır.

Yerinde hidrojen üretimi için hidrojen ikmal istasyonunun şeması Şekil 1.6.'da gösterilmektedir. İstasyon aşağıdaki ana bileşenlerden oluşur:

- Yerinde hidrojen üretici,

- Depolama kompresörü,
- Yüksek basıçlı depolama,
- Hidrojen kompresörü,
- Kademeli depolama,
- Dispenser.



Şekil 1.6. Sıvı hidrokarbon esaslı hidrojen yakıt ikmal istasyonunun sistem bileşenleri (Katikaneni ve ark, 2014)

Çizelge 1.6. Hidrojen istasyonu performans özeti (Katikaneni ve ark, 2014)

	Buhar reformu (STR)		Otomatik termal reform (ATR)	Kısmi oksidasyon (POX)
	Kaynağa yakın HDS	hyGear	Kaynağa yakın HDS	N-GHY
1. Ağır nafta				
Ağır nafta besleme				
kg/h	169	180	205	172
kg/d	4066	4318	4924	4140
Unit HHV, GJ/kg	0.04556	0.04556	0.04556	0.04556
HHV, GJ/h	7.7	8.2	9.3	7.9
HHV, GJ/d	185.3	196.7	224.3	188.6
Su girişi, m ³ /h	0.34	0.33	0.27	0.17
Güç girişi, kW				
H ₂ jeneratör	11	25	128	50
Yığın depolama için H ₂ sıkıştırma	70	70	70	87
Kademeli depolama için H ₂ sıkıştırma	20	20	20	20
Oksijen ünitesi	N/A	N/A	N/A	N/A
Çeşitli kullanım	5	5	5	5
Toplam giriş	106	120	223	289
Hidrojen üretimi				
kg/h	41.7	41.7	41.7	41.7
kg/d	1000	1000	1000	1000
HHV ünitesi, GJ/kg	0.139	0.139	0.139	0.139
HHV, GJ/h	5.8	5.8	5.8	5.8
HHV, GJ/d	139.1	139.1	139.1	139.1
Genel termal verimlilik	%66.85	%62.50	%51.07	%55.40

Çizelge 1.6. (Devam) Hidrojen istasyonu performans özeti (Katikaneni ve ark, 2014)

2. Gazyağı				
Gazyağı besleme				
kg/h	170	185	208	172
kg/d	4072	4447	4996	4135
HHV ünitesi, GJ/kg	0.04619	0.04619	0.04619	0.04619
HHV, GJ/h	7.8	8.6	9.6	8.0
HHV, GJ/d	188.1	205.4	230.8	191.0
Su girişi, Nm ³ /h	0.34	0.34	0.26	0.17
Güç girişi, kW				
H ₂ jeneratör	11	26	129	51
Yığın depolama için H ₂ sıkıştırma	70	70	70	87
Kademeli depolama için H ₂ sıkıştırma	20	20	20	20
Oksijen ünitesi	N/A	N/A	N/A	N/A
Çeşitli kullanım	5	5	5	5
Toplam giriş	106	121	223	289
Hidrojen üretimi				
kg/h	41.7	41.7	41.7	41.7
kg/d	1000	1000	1000	1000
HHV ünitesi, GJ/kg	0.1391	0.1391	0.1391	0.1391
HHV, GJ/h	5.8	5.8	5.8	5.8
HHV, GJ/d	139.1	139.1	139.1	139.1
Genel termal verimlilik	%65.96	%60.11	%49.86	%54.91
1. Dizel				
Dizel besleme				
kg/h	172	188	215	173
kg/d	4121	4500	5160	4151
HHV ünitesi, GJ/kg	0.04616	0.04616	0.04616	0.04616
HHV, GJ/h	7.9	8.7	9.9	8.0
HHV, GJ/d	190.2	207.7	238.1	191.6
Su girişi, Nm ³ /h	0.34	0.33	0.26	0.17
Güç girişi, kW				
H ₂ jeneratör	11	26	141	51
Yığın depolama için H ₂ sıkıştırma	70	70	70	87
Kademeli depolama için H ₂ sıkıştırma	20	20	20	20
Oksijen ünitesi	N/A	N/A	N/A	126
Çeşitli kullanım	5	5	5	5
Toplam giriş	106	121	236	289
Hidrojen üretimi				
kg/h	41.7	41.7	41.7	41.7
kg/d	1000	1000	1000	1000
HHV ünitesi, GJ/kg	0.1391	0.1391	0.1391	0.1391
HHV, GJ/h	5.8	5.8	5.8	5.8
HHV, GJ/d	139.1	139.1	139.1	139.1
Genel termal verimlilik	%65.29	%59.52	%48.13	%54.77

1.1.4. Hidrojen Konusundaki Kamuoyu Algısı

Yeni ürün kavramı, genel olarak daha önce bilinmeyen ve pazara sunulmamış ticari malı tarif etmektedir. Ticari işletmeler ve üniversiteler, yeni ürünü kendi Ar-Ge ve patent, lisans, vb. çalışmaları sonucunda elde etmektedir. Bu bağlamda hidrojen enerjisi yeni geliştirilen ürünler kategorisindedir.

Fosil kaynakların sınırlı olması; bunlardan kömürün kullanımı ise zararlı atıkların ortaya çıkarması, yenilenebilir enerji kaynaklarını öne çıkartmaktadır. Bu bağlamda hidrojen, dikkat çeken özelliklerinden dolayı öne çıkmaktadır.

Dünyada enerjiye giderek artan talep ve ilgili sektörlerin yeni gelişmelerin ve yeni ürünlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Böylelikle yeni pazarlar oluşmakta ve bu pazarın nasıl gelişeceği ve büyüyeceği araştırma ve pazarlama konusu ile beraber kamuoyu algısının önemi karşımıza çıkmıştır. Sharaf ve Orhan (2014), kamuoyunun, geleneksel yakıtta benzer ve farklı yönleriyle hidrojen konusunda ikna edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Özellikle hidrojen gazının yakıt olarak kullanımının arttırılması ve ilgili güvenlik konuları kamusal algı ve kabulü gerektirmektedir. Araştırmacılar otomotiv uygulamalarında hidrojen gazının yakıt olarak kullanışlı olduğunu ortaya koymaktadır. Egbue ve Long, (2012) bir grup bireyin (teknoloji meraklısı) EVs'lerin CVs'lerden performanslarının üstün olduklarını düşündüklerinde büyük ihtimalle ilk kabul edecekler olacağını iddia etmiştir.

1.2. Enerji ve Çevre İlişkisi

Öztürk ve Yüksel (2016), ülkelerin ekonomik ve sosyal gelişmişlik karşılaştırmasında kişi başına düşen enerji tüketiminin önemli parametreler arasında olduğunu iddia etmişlerdir. Özellikle sanayileşme sonrası nüfus artışıyla beraber şehirleşmenin getirdiği ticaret imkânlarıyla, toplumlarda oluşan ekonomik büyüme, enerji ihtiyacının da büyümesine sebep olmaktadır.

Bu bağlamda ekonomik büyüme ve sosyal kalkınmanın istikrarı için tedarik imkânı geniş, ekonomik ve çevre dostu enerjilere ihtiyacın artmakta olduğu Uzun ve ark. (2013) tarafından belirtilmiştir.

Selici ve ark., (2005) çevreyi, insanların ve diğer canlıların yaşamları boyunca ilişkilerini sürdürdükleri ve karşılıklı etkileşim içinde buldukları fiziki, biyolojik, sosyal, ekonomik ve kültürel ortam olarak tanımlarken yakıt ve yakıtın enerjiye dönüşümü için kullanılan sistemleri, enerji üretimi ve kullanımı esnasında oluşan küresel ve lokal çevresel problemlerin en önemli etkenleri olduğunu belirtmiştir.

Günümüze kadar enerji ihtiyacı fosil yakıtların yanması ile temin edilmiş iken hava kirliliği ve sera gazı emisyonlarının da artmasına sebep olmuştur. Birincil enerji kaynakları olarak da adlandırılan petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtlar belli bir rezerve sahip olması sebebiyle artan talep karşısında sürdürülemez olduğu (Enerji raporu 2012; Öztürk ve Yüksel 2016) tarafından ortaya konmuştur.

Cipriani ve ark., (2014) tarafından bu enerji talebini karşılamada iklim değişikliğinin orta vadede riskinin azaltılması ve böylece, kirliliğin düşük düzeyde tutulabilmesinin, 21 yüzyılın en önemli teknoloji sorunu olduğunu, bu duruma ideal çözümün ise, ihmal edilebilir çevresel etkilere sahip (hem yerel hem de küresel) bir enerji taşıyıcısı kullanılması gerektiğini iddia etmişlerdir.

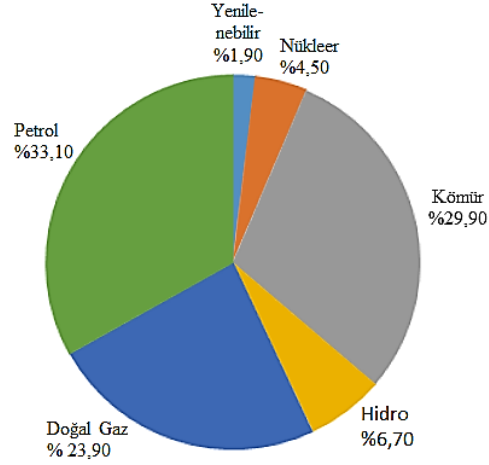
Hidrojen bu tür şartları tam olarak yerine getirebilen bir enerji taşıyıcısı olarak;

- Hava ile yanma reaksiyon ürünü olarak yalnızca enerji ve saf su üretir;
- Fosil yakıtlardan üretilebilir, yenilenebilir kaynaklardan üretimi umut vaat eder;
- Enerji, son kullanıcı istekleri doğrultusunda, taşıma ve depolama için yeni teknolojilerin gelişmesi ile oldukça kolay dağıtılabilir;
- Farklı uygulamalarda, etkisi, son derece azaltılmış spesifik ısı üretimi, merkezi veya dağıtılmış enerji üretimi gibi farklı uygulamalarda kullanılabilirler (Cipriani ve ark., 2014).

Karayolu taşımacılığı da, küresel petrol talebindeki artışın yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır (World Energy Outlook 2012).

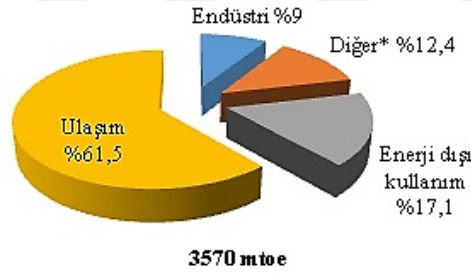
Ulaşım ile ilgili sera gazı emisyonlarının üçte ikisinden fazlası karayolu taşımacılığından kaynaklandığı ifade edilmiştir (Egbue ve Long, 2012; Pollet ve ark., 2012). Bu nedenle otomotiv sektörü ve bilim çalışanları Ar-Ge projelerini alternatif temiz yakıt üzerine yoğunlaştırmıştır.

Petrol özellikle ulaştırma sektörünün temel enerji kaynağı olarak, dünya birincil enerji tüketimi içinde en büyük paya sahiptir. Şekil 1.7.' de 2012 yılı sonu itibariyle birincil enerji kaynakları tüketim oranları verilmiştir.



Şekil 1.7. 2012 yılı küresel birincil enerji tüketim oranları (Türkiye Petrolleri, 2014)

Türkiye Petrolleri (2014) tarafından dünya petrol tüketiminin %61,5'i ulaşım sektöründe kullanıldığı Şekil 1.8.' de gösterilmiş ve bu tüketim 30 326 Mt CO₂'in %36,1'ini ürettiği verilmiştir (Key World Energy Statistics, 2012).



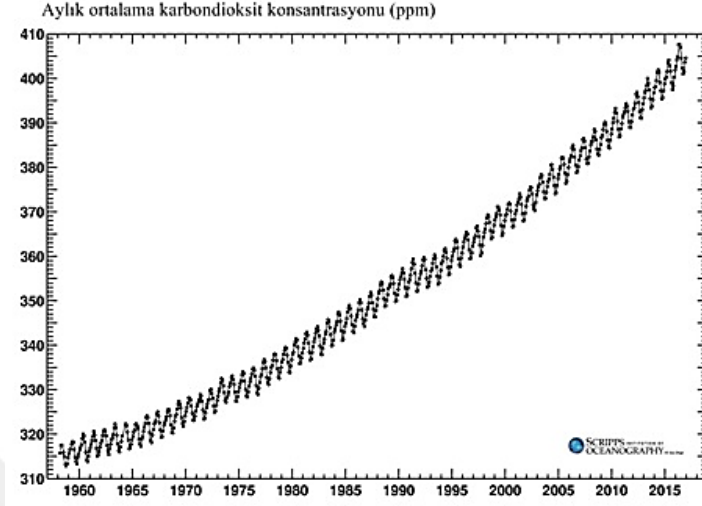
Şekil 1.8. 2010 dünya petrol tüketim oranları (Key World Energy Statistics, 2012)

* Tarım, ticari ve kamu hizmetleri, konut ve diğerlerini kapsar.

Pollet ve ark. (2012)'a göre enerji güvenliği-yabancı kaynağa bağımlılık konusunda petrol ve geleneksel petrol rezervlerinin %80'inden fazlası giderek artan siyasi istikrarsız bölgelerde yoğunlaştığını, bu nedenle ulaşım için fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Pollet ve ark. (2012) tarafından nüfus artışı, (31/10/11) tarihinde 7 milyar olan dünyada nüfusunun, önümüzdeki 40 yıllık süre içinde 9 milyar olabileceği tahmin edilmiştir. Bu tabii ki, iklim değişikliği, gıda güvenliği ve enerji güvenliği konusunda önemli bir etkiye sahip olacaktır. Buna rağmen ulaşım sektörünün giderek artan talep ve

sağlanan emisyon düşüşlerinin de katkısıyla sıvı hidrokarbonlara olan bağımlılığın aşılanmasının zor olacağı ifade edilmiştir.



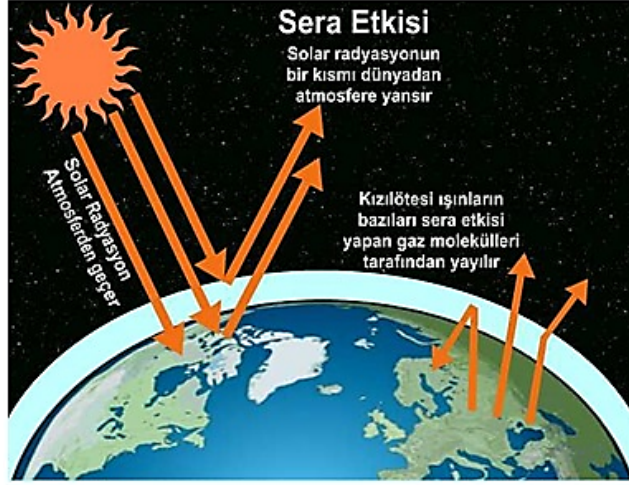
Şekil 1.9. Hawaii'de yıllara göre CO₂ konsantrasyonu dağılımı (Anonymous, 2017)

Küresel ısınma, “sanayi devriminden beri, özellikle fosil yakıtların yakılması, ormansızlaşma, tarımsal etkinlikler ve sanayi süreçleri gibi çeşitli insan etkinlikleri ile atmosfere salınan sera gazlarının atmosferdeki birikimlerindeki hızlı artışa bağlı olarak, şehirleşmenin de katkısıyla doğal sera etkisinin kuvvetlenmesi sonucunda, yeryüzünde ve atmosferin alt katmanlarında saptanan sıcaklık artışı” şeklinde tanımlanmıştır (Üstünve ark., 2009; Türkeş, 2012).

Türkeş (2012)'e göre insan kaynaklı iklim değişikliğine ve küresel ısınmaya yol açan sera gazları; çoğunlukla fosil yakıtların yakılması (enerji ve çevrim), sanayi (enerji ilişkili; kimyasal süreçler ve çimento üretimi, vb. enerji dışı), ulaştırma, arazi kullanımı değişikliği, atık yönetimi ve tarımsal (enerji ilişkili; anız yakma, çeltik üretimi, hayvancılık ve gübreleme vb. enerji dışı) etkinliklerden kaynaklanır.

Çelik ve ark. (2008)'a göre güneşten gelen uzun dalga boyu radyasyonun büyük bir bölümü yer yüzeyince soğurulur, bir kısmı dünyadan atmosfere yansır. Yeryüzü tarafından soğurulan güneş ışınları ısıya dönüştürülür. Bu ısı, yeryüzündeki atomların titreşimine ve kızılötesi ışımaya yapmalarına neden olur. Kızılötesi ışınlar, oksijen veya azot gazı tarafından soğurulmaz. Ancak havada bulunan CO₂ ve CFC (kloroflorokarbon) gazları, kızılötesi ışınların bir kısmını soğurarak, atmosferden

dışarı çıkmalarını engeller. Bu soğurma olayı, atmosferin ısınmasına yol açar. Bu etkiye, sera etkisi adı verilir.



Şekil 1.10. Sera etkisi (Çelik ve ark.,2008)

Atmosferde tehlikeli bir boyuta varan insan kaynaklı sera gazı emisyonlarının, iklim sistemi üzerindeki olumsuz etkisini bertaraf etmek ve başta karbondioksit (CO_2) olmak üzere sera gazı emisyonlarını 1990 yılı seviyesinde tutmak maksadıyla hazırlanan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS), 1992 yılında Rio'da yapılan Çevre ve Kalkınma Konferansında kabul edilmiş ve 21 Mart 1994 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Sözleşmenin temel ilkeleri;

- İklim sisteminin eşitlik temelinde, ortak fakat farklı sorumluluk ilkesine uygun olarak korunması,
- İklim değişikliğinden etkilenecek olan gelişme yolundaki ülkelerin ihtiyaç ve özel şartlarının dikkate alınması,
- İklim değişikliğinin önlenmesi için alınacak tedbirlerin etkin ve en az maliyetle yapılması,
- Sürdürülebilir kalkınmanın desteklenmesi ve alınacak politika ve tedbirlerin ulusal kalkınma programlarına entegre edilmesidir.

İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi kapsamında ülkeler; EK-I, EK-II ve EK-I dışı olarak sınıflandırılmış ve sorumlulukları belirlenmiştir.

Çizelge 1.7. Sözleşme ve protokol kapsamında ülkelerin sınıflandırılması ve sorumlulukları (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2008)

	Listeler	Ülkeler	Sorumluluklar
İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi	Ek-1	OECD + AB + PEGSÜ (36 ülke)	Emisyon azaltımı
	Ek-2	OECD + AB-15 (25 ülke) Türkiye (hariç)	Ek-I Dışı ülkelere teknoloji transferi ve mali destek sağlamak
	Ek-1 Dışı	Diğer ülkeler (Çin, Hindistan, Pakistan, Meksika, Brezilya)	Yükümlülükleri yok
Kyoto Protokolü	Ek-B	Ek-1 Ülkeleri (27 ülke)	2008-2012 arası dönem için 1990 yılı seviyesine göre sera gazı emisyonlarında %5 azaltım

Birleşmiş milletler iklim değişikliği çerçeve sözleşmesi kapsamında 6 adet, ozon tabakasını incelten maddeler kapsamında ise 1 adet sera gazı emisyonu tanımlamıştır. Sera gazı emisyonu denildiği zaman genellikle CO₂ gazı gündeme gelmektedir. Ancak, Çizelge1.8’ de verildiği gibi diğer sera gazları miktar olarak CO₂’e göre daha az olmasına rağmen küresel ısınma potansiyeli 20-23900 kat daha fazladır.

Çizelge 1.8. Sera gazı emisyonları ve küresel ısınma potansiyeli (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2008)

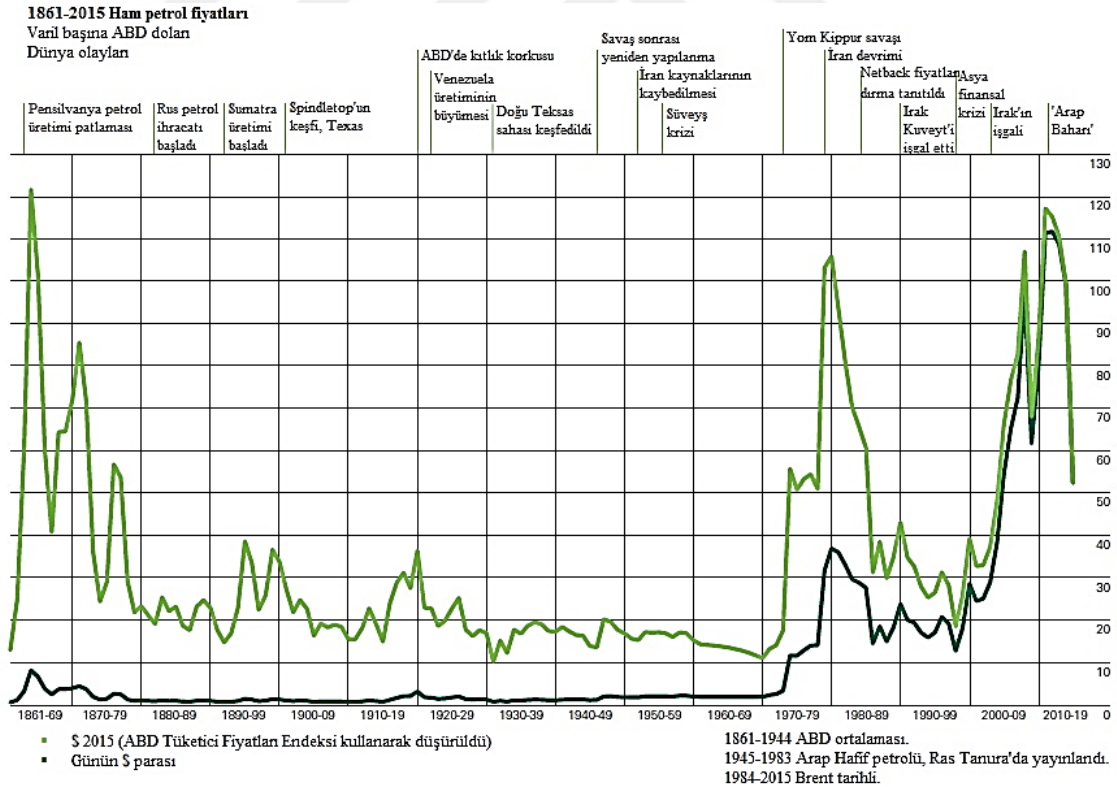
	Sera Gazları		Küresel ısınma potansiyeli
İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi	CO ₂	Karbondioksit	1
	CH ₄	Metan	20
	N ₂ O	Nitrözoksit	300
	HCF’ler	Hidroflorokarbonlar	1100-1900
	PFC’ler	Perflorokarbonlar	560-11700
	SF ₆	Kükürtheysaflorür	23900
CFC’ler	CFC’ler	Kloroflorokarbonlar	6500-8700

1.3. Temiz Enerji Kaynakları

Enerji faaliyetlerinde enerji kaynaklarının aranması, çıkarılması, enerjinin üretilmesi, taşınması, iletimi, tüketilmesi, (bazı kaynaklarda araştırılması, çıkarılması ve hazırlanması da dâhil) gibi tüm aşamalarda çevre olumsuz yönde etkilendiği belirtilmiştir (Enerji Raporu, 2012).

Fosil kökenli yakıtlar son iki yüzyıl içerisinde, üretim teknolojilerinin oldukça gelişmiş ve ucuz olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmış ancak 1973 petrol krizi enerji kaynakları konusunda ilk kez bir güvensizlik ortamı oluşturmuştur. Bu güvensizlik ortamı, bütün dünyada yenilenebilir kaynaklara karşı yoğun bir ilgiye yol açmış, 80'li yılların ortalarında petrol fiyatları düşmesine rağmen petrole dayalı enerji kullanımını riskli olarak kabul edilmiştir. Son yıllarda büyük değişiklerin yaşandığı petrol ve doğal gaz fiyatları (Şekil 1.11.), enerji güvenliği ve enerjinin çeşitlendirilmesinin enerji politikalarının önemli unsuru haline geldiğini bir kez daha dikkat çekilmiştir (Seydioğulları, 2013).

Bu sebeplerden ötürü yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji çeşitliliği içerisinde değerlendirilmesi gerektiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Uysal (2011)' e göre yenilenebilir enerji, doğanın evrimi içinde, bir sonraki gün aynen mevcut olabilen hidrolik, jeotermal, güneş, biokütle ve rüzgâr gibi enerji kaynaklarını (Çizelge 1.9) ifade etmektedir.



Şekil 1.11. 1861-2015 yılları arası ham petrol fiyatları (BP, 2016)

Çizelge 1.9. Yenilenebilir enerji kaynaklarının sınıflandırılması (Özdamar, 2000)

Ana kaynak	Birincil Enerji Kaynakları	Doğal Enerji Dönüşümü	Teknik Enerji Dönüşümü	Kullanım Enerjisi
Güneş	Su	Buharlaşma, Yağış	Su Güç Tesisleri (Hidroelektrik Santralleri)	Elektrik Enerjisi
	Rüzgâr	Atmosferdeki Hava Hareketi	Rüzgar Enerjisi Tesisleri	Elektrik ve Mekanik Enerji
	Güneş Işınları	Dalga Hareketi	Dalga Enerjisi Tesisleri	Elektrik ve Mekanik Enerji
		Yer ve Atmosferin Isınması	Isınması	Isı Pompaları
	Biyomas	Güneş Işınları	Kollektörler Solar Hücreler (Güneş Pilleri-Fotovoltaikler)	Isı Enerjisi Elektrik Enerjisi
		Biyomas Üretimi	Isı Güç Tesisleri	Isı ve Elektrik Enerjisi
Dünya	Yer Merkezi Isısı	Jeotermal Enerji	Jeotermal Güç Tesisleri	Isı ve Elektrik Enerjisi
Ay	Ay Çekimi Gücü	Gel-Git Olayı	Gel-Git Güç Santralleri	Elektrik Enerjisi

Özdamar (2000) Çizelge 1.10' da yıllık dünya yenilenebilir enerji doğal potansiyelinin büyüklüğünü ifade etmiştir.

Çizelge 1.10. Yıllık dünya yenilenebilir enerji doğal potansiyeli (Özdamar, 2000)

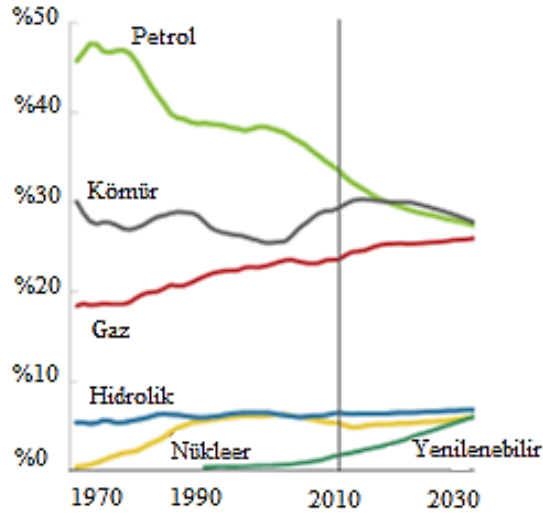
Güneş Kaynaklı Enerji Türü	Güneş Enerjisi	Rüzgar Enerjisi	Deniz Kaynaklı Enerjiler	Hidrolik Enerji	Biyomas Enerjisi
Dünya Potansiyeli (Milyar kWh)	1.524.240 000	30.844.000	7.621.000	46.000	1.524.000

Öztürk ve Yüksel (2016) yenilenebilir temelli enerji sistemlerinin işletme ve bakım maliyeti geleneksel sistemlere göre daha düşük olmasına rağmen sermaye maliyetleri genellikle daha yüksektir. Enerji sektörlerindeki üretim maliyetlerini karşılaştıran, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi tarafından hazırlanmış Çizelge 1.11.' de sunulmuştur.

Çizelge 1.11. Enerji üretim metotlarının maliyet ömür ilişkisi (Anonymous, 2014)

Enerji Türü	Dışa Bağımlı / Yerel	Kalan Ömür (yıl)	Yatırım Maliyeti (\$/kWh)	Üretim Maliyeti (cent/kWh)
Petrol	Dış	40-45	1500-2000	6.0
Kömür	Yerel/Dış	200-250	1400-1600	2.5-3.0
Doğal Gaz	Dış	60-65	600-700	3.0
Nükleer	Dış	-	3000-4000	7.5
Hidrolik	Yerel	-	750-1200	0.5-2.0
* Rüzgar	Yerel	-	1000-1200	3.5-4.5
Güneş	Yerel	-	Yüksek	10.0-20.0
Jeotermal	Yerel	-	1500-2000	3.0-4.0

Enerji Raporu (2012) tarafından petrol arzının diğer kaynaklara göre daha yavaş artması yıllar içerisinde bu enerji kaynağının toplam arz içerisindeki payının düşmesine neden olacağı belirtilmiştir. Bu düşmeye karşın Şekil 1.12.' de gösterildiği gibi yenilenebilir enerji arzının hızlı yükselişi beklenmektedir.



Şekil 1.12. Dünya birincil enerji talebinde yakıtların payları (Enerji Raporu, 2012)

1.4. Otomotivin tarihi gelişimi

İlk araç buhar gücüyle çalışan, üç tekerlekli ve esas itibariyle silahları çekmede kullanılmak üzere 1769 yılında Fransız Yüzbaşı Nicholas Joseph Cugnot tarafından üretildiği görülmektedir. Ancak, saattaki hızı 3-4 km olan bu araç çok yavaştı. Daha sonra, 1801 yılında İngiliz Richard Trevithick, 1805 yılında Amerikan Oliver Evans,

1829 yılında Sir Goldswort Guyney isimli bir İngiliz saatte 25 km hız yapabilecek buharla çalışan aracı yaparak çalışmaların daha da geliştirilmesine ve sürdürülmesine katkı da bulunmuştur (İktisadi Sektörler ve Genel Müdürlüğü, 2002).

İlk elektrikli araç Profesör Stratingh tarafından 1835 yılında Hollanda'da yapılmıştır. Thomas Davenport tarafından 1834-1836 yılları arasında ABD'de elektrikli araç geliştirildiği ve uygulandığı bildirilmiştir. Bu araç üç tekerlekli olmakla beraber şarj edilmeyen bataryalarla tahrik edilmiştir. Kurşun-asit bataryaların geliştirilmeye ve kullanılmaya başlanması 1859 yılından sonra olmuştur. İngiltere'de Prof. William Ayrton ve John Perry 1882 yılında elektrik tahrikli 3 adet tekerlekli araç yapmıştır. Bu araçlarda 10 adet kurşun-asit batarya kullanılmıştır. Aracın azami hızı ise 14 km/saat olup menzili 16-20 km arasında gerçekleştiği bildirilmiştir (Ünlü ve ark., 2003).

İlk içten yanmalı motoru Etienne Lenoir, 1860 yılında Paris'te keşfetmiş ve bu tarihten dört yıl sonrada Köln'deki Gasmotorenfabrik Deutz AG fabrikasında içten yanmalı sabit motorların üretimine başlanmıştır. Bu fabrikanın kurucularından olan Otto, 1876 yılında ilk olarak dört silindirli içten yanmalı benzinli motorun üretimini gerçekleştirmiştir (İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü, 2002).

İlk içten yanmalı motora sahip, modern otomobil üretimi ise 1886 yılında Karl Benz ve Gottlieb Daimler tarafından Avrupa'da gerçekleştirilmiş, 1893 yılında da Amerika'da içten yanmalı motorlu otomobil üretimi başlamış ve kullanımı gittikçe artmıştır ve yayılmıştır (İktisadi Sektörler ve Genel Müdürlüğü, 2002).

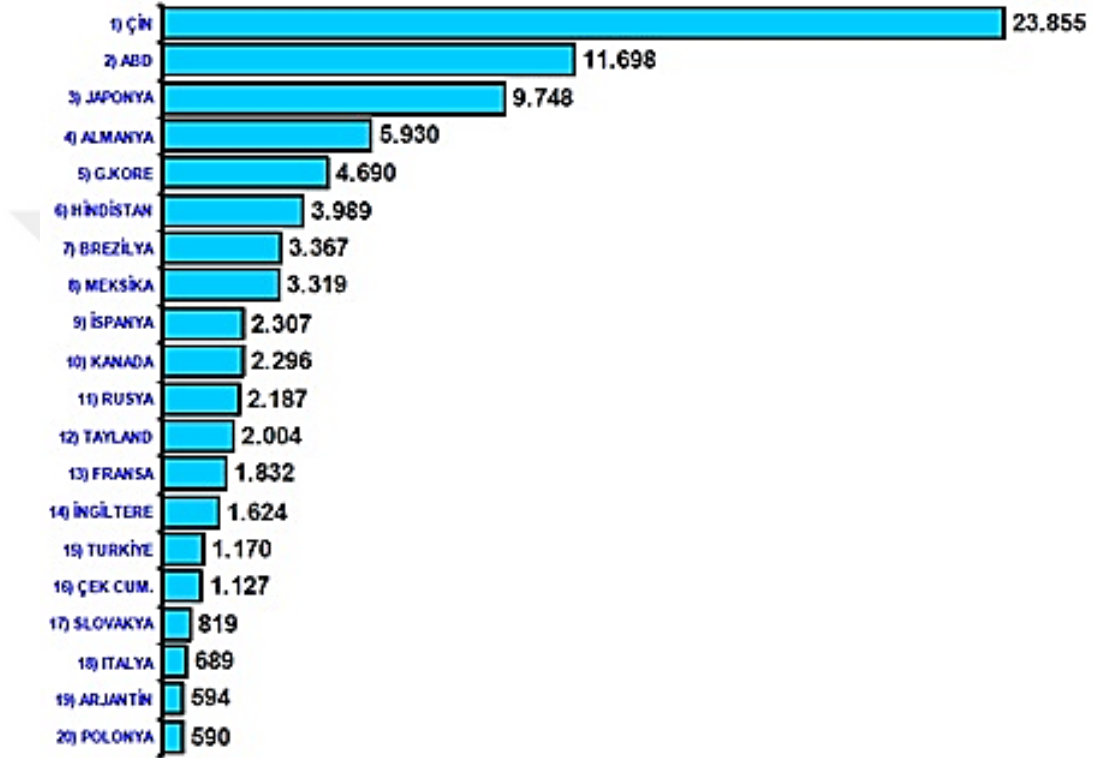
1897 yılında İngiltere'de "Londra Elektrikli Taksi Şirketi" tarafından 15 tane taksi kullanıma alınmıştır. Menzil ve performansı artırma düşüncesiyle 1900 yılında French Electroautomobile ve 1903 yılında Krieger elektrikli-benzinli araçlarını denemiştir araçta elektrik motoru ve benzinli motor ilk defa birlikte hibrit konfigürasyonu şeklinde kullanıldığını ifade etmiştir (Ünlü ve ark, 2003).

İçten yanmalı motor fosil yakıt depolama ve seri üretiminden dolayı fiyat avantajı ile birlikte otomotiv sektöründe 1920-1990 yılları arasında baskın teknoloji olmuştur. 1990'dan günümüze ise çevre duyarlılığı ve alternatif enerji kaynaklarına yönelik teşvikler elektrikli araçları tekrar üretimini ve kullanımını hayatımıza getirmiştir.

Pollet ve ark. (2012) günlük yaşamda ulaşım ihtiyaçlarının karşılanması için kullanımda dünya çapında yaklaşık 1 milyar otomobil olduğunu ve otomotiv endüstrisinin, yaklaşık 10 milyon kişiyi istihdam ve yılda 3 trilyon dolara ulaşan aşan

bir değer zinciri ürettiğinden en büyük küresel ekonomik güçlerden biri olduğunu ifade etmişlerdir.

Otomotiv Sanayii derneği (2014) verilerine göre dünya çapında motorlu araç üretimi yıllık bazda 90 milyon adete ulaşmıştır. Şekil 1.13.' de ülke bazında ulaşılan motorlu araç üretim miktarı verilmiştir.



Şekil 1.13. 2014 yılı itibariyle dünya motorlu araç üretimi (x 1.000 Adet) (Otomotiv Sanayii derneği, 2014)

Sharaf ve Orhan (2014)'a göre yanma bazlı otomotiv teknolojileri, iklim değişikliği, ozon tabakasının incilmesi ve asidik yağmurlar gibi çevresel sorunlara yol açması endişe vermektedir. Aynı zamanda bu teknolojiler, kullandığı fosil yakıt kaynaklarını giderek azaltmaktadır. Diğer taraftan, gürültü ve titreşimler üreten (örneğin, pistonlar ve dişliler) birçok dinamik bileşenlere sahiptir. İçten yanmalı motorlarının bu dinamik yapısı uygulamalarını sınırlar. Çizelge 1.12' de yıllara göre motorlu araç üretim artışı verilmiştir.

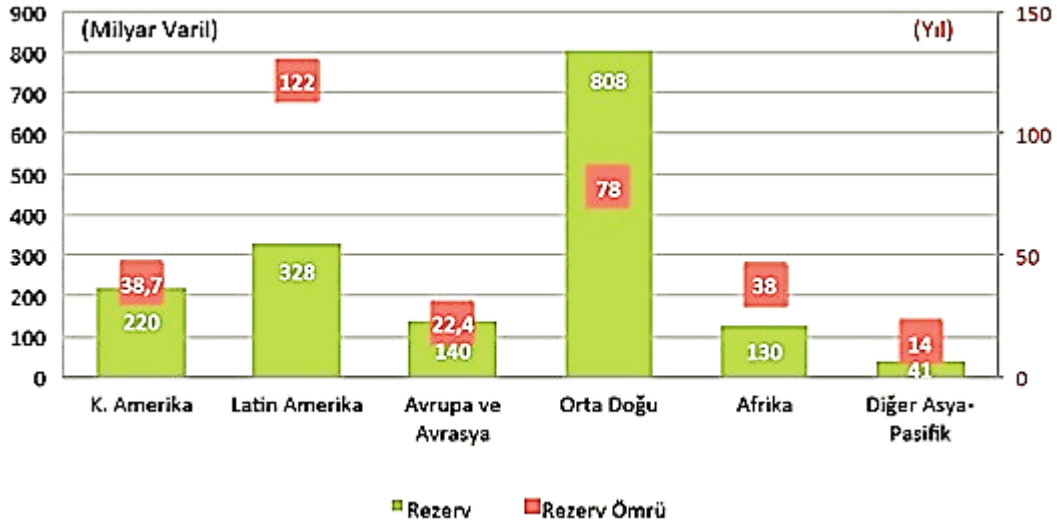
Çizelge 1.12. 2000-2014 yılları arası dünya motorlu araç üretimi (x 1.000 Adet)
(Otomotiv Sanayii derneği, 2014)

Yıllar	Dünya
2000	58.243
2001	56.503
2002	59.345
2003	61.480
2004	65.381
2005	67.547
2006	70.486
2007	74.494
2008	71.422
2009	63.242
2010	79.516
2011	81.967
2012	86.469
2013	88.310
2014	90.189

Türkiye Petrolleri (2014) tarafından petrol üretim çerçevesinde ömür tabiri, ispatlanmış rezervlerin, konvansiyonel teknolojilerle üretilme (R/Ü) oranıdır. Fakat yeni rezervlerin keşfi, geliştirilen üretim teknolojileri (örneğin, ikincil ve üçüncül üretim yöntemleri vb.), kömürden ve gazdan sıvı yakıt elde edilmesi gibi yöntemler ömür oranının artabileceği dikkate almak gerektiği bildirilmiştir. Şekil 1.2.' de de gösterildiği gibi dünya petrol rezerv miktarında 2011 yılına oranla %0,9'luk bir artış gerçekleşmiş, bununla birlikte artan petrol üretimi ile 2011 yılında 53,8 yıl olan petrol rezerv ömrü, 2012 yılında 52,9 yıla düştüğü ifade edilmiştir.

Çoğu araştırmaların araç emisyonundan kaynaklanan sera gazı emisyonunu azaltmak için üç hedefe odaklandığı bildirilmiştir (Egbue ve Long, 2012). Birinci yöntem araç ağırlığı ve büyüklüğünün azaltılmasıdır. Bu yöntem, daha küçük araç yelpazesinin genişletilmesi ile günümüzün tüm sıradan üreticilerinin bile açık eğilimidir. Küçülme, küçük ve hafif araçları sürmek, daha az yakıt ve enerji gerektirmesi sonucu emisyonları azaltır. İkinci yöntem hibrit elektrikli araçtır. Hibrit araç avantajları, hızlanma fazı ve yüksek yük koşulu sırasında araca yardımcı olan bir elektrik bataryası ve içten yanmalı bir motorun bir arada operasyonudur. Üçüncü yöntem, tamamen elektrikli bir enerji kaynağının kullanılmasıdır. Batarya elektrikli araçlar ve yakıt hücreli elektrikli araçlar bu anlamda düşünülmektedir. Yani, dış kaynaktan doğrudan şarj edilebilen elektrik bataryaları ve elektrik üretimi ile elektrik

motoru tarafından üretilen gücü tekerleklere veren araçlardır. Mourad (2014), elektrikli araçların, menzil ve batarya şarjından kaynaklanan iki büyük sorunu çözülebilirse çevreye sıfır emisyon veren optimum çözüm olarak kabul edilebileceğini ifade etmiştir.



Şekil 1.14. Bölgeler itibariyle 2012 yılı petrol rezervleri (Türkiye Petrolleri, 2014)

Mourad (2014) tarafından CVs'in kaynaktan tekerleklere CO₂ emisyonu FCVs'ın CO₂ emisyonundan daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Depodan tekerleklere aşamasında, FCVs sıfır emisyon yayarken buna karşılık dizel araç 182,6 g/km yayar. FCV ve dizel araç arasında kaynaktan tekerleğe aşamasında önemli bir farklılık gösterdiği toplam CO₂ emisyonu, aşağıdaki Çizelge 1.13' de gösterilmiştir.

Çizelge 1.13. g/km'de CO₂ emisyon (Mourad, 2014)

	Yakıt hücreli araç	Dizel araç
Kaynaktan depoya	127.7	182.6
Depodan tekerlere	0	172.7
Kaynaktan tekerlere	127.7	355.3

Sandy Thomas, (2009) göre hidrojenle çalışan yakıt hücreli elektrikli araç ve batarya elektrikli araç 2100 yılına kadar ulaştırma sektörünün kontrol edebildiği tüm kentsel hava kirliliğini ortadan kaldıracak neredeyse tek seçenektir.

Hidrojen ağırlıklı olarak fosil yakıtların reformu yoluyla türetilmesinden dolayı (Lucia, 2014; Pollet ve ark., 2012; Hwang ve ark., 2013), hidrojen bazlı FCVs'de, sera gazı emisyonları ve enerji tüketimi büyük çoğunluğu hidrojen yakıt hücreleri ulaşmadan önce meydana gelecektir. Hwang ve ark. (2013) bu nedenle, FCV uygulamasında hidrojen tedarik sisteminin ömür döngüsü performansının dikkatli düşünülmesi gerektiğini vurgulamıştır.

Katikaneni ve ark. (2014), yenilenebilir ve fosil yakıt kaynaklarından hidrojen üretmek için önemli araştırmalar devam ederken gelecekte hidrojen bazlı yakıt hücreli araçların hidrojen talebini arttıracaklarını belirtmişlerdir.

Hidrojen, fosil enerji kaynaklarının (kömür, petrol, doğal gaz) hızla tükenmesi nedeniyle çevreye zarar vermeyen "geleceğin enerjisi" olarak anılmaktadır. Kolayca ve güvenli olarak her yere taşınabilen, taşınmasında çok az enerji kaybı olan, her yerde (sanayide, evlerde ve taşıtlarda) kullanılabilen, tükenmez, temiz, kolaylıkla ısı, elektrik ve mekanik enerjiye dönüşebilen, karbon içermeyen, ekonomik ve hafif olan hidrojenin; güneş ömrü olarak tahmin edilen gelecek 5 milyar yılın da yakıtı olacağı değerlendirilmektedir. Hidrojen, doğal yakıt olmayıp, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak su, fosil yakıtlar ve biyokütle gibi değişik hammaddelerden üretilebilen sentetik bir yakıttır. Diğer yakıtlara göre pahalı olmasına rağmen uzun dönemde teknolojik ilerlemelerle enerji kullanımında önemli rol oynayacağı kabul edilmekte olduğu Tutar ve ark. (2011) tarafından bildirilmiştir.

Hidrojen diğer yakıtlara karşın bazı avantajlara sahip olmasından dolayı geleceğin enerji taşıyıcısı olarak kabul edilmektedir. Bu avantajlardan bazıları, hidrojen gaz formunda (yüksek basınçla), sıvı formda (hava ve uzay ulaşımında) veya metal hidrit formunda (araçlar ve diğer küçük ölçekli) depolanabilmesidir. Hidrojen boru hatları veya tankerler ile uzak mesafelere taşınabilmesidir. Hidrojen üretilirken, taşınırken, depolanırken veya son kullanımda çevreye zararlı herhangi bir etkisinin olmamasıdır. Hidrojenin yanması veya yakıt hücresinde tüketilmesi sonucu son ürün olarak sadece su üretilmesidir. Ancak, yanma yüksek sıcaklıkta olursa havadaki azot ve oksijenden NO_x oluşur. Bu sorun diğer yakıtlarda da benzer şekilde vardır ve kontrol edilebilir. Hidrojen enerjisi, farklı enerji formlarına, diğer yakıtlara karşılık daha yüksek verimle dönüştürülebilir (Kantürk ve Pişkin, 2007).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Sandy Thomas (2009) batarya veya yakıt hücreleri ile çalışan tamamen elektrikli araçlar, etanol, dizel yakıt, doğal gaz ve benzin ile beslenen şarjlı hibritler, elektrikli hibrit araçlar da dâhil olmak üzere çeşitli alternatif ulaşım seçeneklerini oluşturmanın toplumsal faydalarını karşılaştırmış ve son on yılda geliştirilmiş bir kapsamlı bilgisayar modeli simüle ederek sonuçlarını rapor etmiştir.

Model, hibritler ve plug-in hibritleri gibi kısmen elektrikli araçların, özellikle selülozik etanol gibi biyoyakıtların büyük miktarda petrolün yerine ikame etmesi durumunda, sera gazı kirliliğini ve petrol tüketimini önemli ölçüde azaltacağını göstermiştir.

Mazloomi ve Gomes (2012) yakın gelecekte hidrojenin önemli bir enerji taşıyıcı ve yakıt kaynağı olarak benimsenmesi açısından fikir vermiş ve hidrojen kullanılarak hem dezavantajları hem de avantajları olduğunu göstermiştir. Ayrıca dağıtılan düzeyde üretim tartışılmıştır. Makale, ayrıca dağıtım aşamaları, depolama, üretimde risk seviyelerini sunmuş ve güvenlik sorunlarını çözmek için olası teknikler önermiştir. Orta ölçekli konteynerlere küçük depolama, büyük ölçekli konteynerlere aynı kapasitede depolamaya kıyasla çok daha ekonomik olduğunu göstermiştir. Çalışma, hidrojeni tüketici düzeyinde umut verici bir geleceğe sahip son derece uygun enerji kaynağı ve enerji taşıyıcısı olduğu sonucuna varmıştır.

Orhan ve ark. (2012) hidrojen dâhil nükleer ve yenilenebilir enerjiler, gelecekte üretim yöntemleri, mevcut enerji kaynakları ve kullanımının kısa bir özetini sunmuştur.

Nükleer enerji, küresel iklim değişikliğine çok sınırlı etkileri ile enerji arzının önemli bir katkıda bulunma potansiyeline sahip olduğunu ifade etmiştir. Termokimyasal su parçalanması yoluyla hidrojen üretimi nükleer termal enerjinin doğrudan kullanımı için potansiyel bir süreç olduğunu belirtmiştir. Nükleer hidrojen ve güç sistemleri, jeotermal ve hidroelektrik enerjileri mevcut olmadığı, güneş parlamadığı, rüzgâr esmediğinde, enerji sağlayarak küresel enerji talebinin büyük bir ölçüde karşılayarak yenilenebilir enerji kaynaklarını tamamlayabileceğini ifade etmiştir. Bu bağlamda, Cu-Cl termokimyasal döngü ile hidrojen üretimi için bazı uygun entegre sistem seçenekleri oluşturan nükleer ve yenilenebilir enerji sistemlerini gözden geçirmiştir.

Çalışmasında, nükleer bağımsız ve nükleer destekli yenilenebilir hidrojen üretimini içeren birkaç muhtemel uygulamalar önerilmiş ve tartışılmıştır. Bu uygulamalardan bazıları hidrojen depolama ve gerektiğinde onun yakıt hücreleri tarafından elektriğe dönüştürülmesinide içermiştir.

Egbue ve Long (2012) sürdürülebilirlik sorunları, EVs satın almak için tüketici kararlarını etkiler, potansiyel sosyo-teknik engelleri tanımlar ve belirler. Bu çalışmada, daha iyi donanımlı EVs ve CVs arasındaki birçok farklılığı sıralamış ve yüksek teknoloji meraklılarının algı ve tercihlerine değerli bilgiler sağlamıştır. Bu grup bireylerin, muhtemelen CVs ile karşılaştırıldığında sadece performans üstünlüğü algısı bile EVs'in ilk benimseyenleri olacaklarını iddia etmiştir.

Pollet ve ark. (2012) elektrokimyasal ve piyasa bakış açısından hibrit, batarya ve yakıt hücresel elektrikli araçların mevcut durumunu vurgulamıştır. Tüketicilere bu teknolojilerin etkisini ve otomotiv sektöründe her teknolojiyi kullanmanın da avantaj ve dezavantajlarını tartışmıştır.

Sandy Thomas (2012) Argonne National Laboratory GREET modeliyle ayrıntılı bir "kaynaktan tekerleklere" analizine dayalı: önemli ölçüde sera gazı emisyonlarını ve petrol bağımlılığını azaltmak için, genel olarak geleneksel araçlarda kullanılan benzin ve dizel yakıtının frenlenmesi gerektiği sonucuna varmıştır. Hidrojenle çalışan yakıt hücresel elektrikli araçların petrol azaltma potansiyeli ile sera gazlarını karşılaştırır, petrol tüketimi ve sera gazı emisyonlarını azaltan EVs maksimum potansiyeli değerlendirilir. ABD'deki tüm hafif yük taşıtları, EV ve PHEV ile yer değiştirmiş olsa bile sera gazı en fazla %25 oranında ve aynı zamanda petrol tüketimi de %67 oranında azaltılabilecektir. Ama ABD'de doğal gazdan yapılan hidrojen ile çalışan tüm LDVs yakıt hücresel elektrikli araçlar ile değiştirilirse, o zaman sera gazı hemen hemen %44 oranında ve petrol tüketimi yaklaşık %100 oranında azalacağını ifade etmiştir.

Tie ve Tan (2012) HEV, PHEV ve BEV arasındaki mevcut kontrol stratejileri gözden geçirmiştir. Güç elektroniğinin otomobil uygulamasında enerji transferi ve kontrolünde önemli bir rol oynadığını tartışmış. Düşükten yükseğe kadar tüm kontrol yöntemleri arasında her kontrol tekniğinin avantajları ve dezavantajları sunmuş. En uygun araç performansı kullanılan sadece düşük seviye bileşen kontrolüne değil aynı zamanda yüksek seviye kontrol algoritmasına da bağlı olduğunu ifade etmiştir. Bir aracın, enerji kaynakları mevcudiyeti, çevre ve iklim faktörlerinin tasarım sürecinde

ihmal edilmemesi ve çalışma alanının da tasarım açısından dikkate alınması gerektiğini belirtmiştir.

Abd El Monem ve ark. (2013) özellikle araç sistemlerinde farklı dinamik çalışmalarda kullanılabilecek bir PEMFC modelini anlatmıştır. Sıcaklığın yakıt hücresi performansı üzerinde büyük, yakıt basıncı ve yakıt akış hızının ise daha düşük derece ile performansı etkileyebildiği, farklı işletim parametreleri çalışılmıştır. Bu çalışma da, optimizasyon ve kontrol geliştirme için temel olarak kabul edilen, farklı işletim koşulları altında, PEMFC için dinamik davranış tahmini sağlamıştır.

Hwang ve ark. (2013) sera gazı (SG) emisyonları ve yakıt hücreli araç (FCV) enerji tüketimi ömür döngüsü WTW (kaynaktan tekerleklere olarak kabul edilir) değerlendirmesi yürütülmüştür. MATLAB / Simulink simülasyon aracı, FCV enerji verimliliği ve yakıt ekonomisi belirlemek için kullanıldığı, FCV gerçek zamanlı davranışlarını incelemek için kullanmıştır. GREET (Sera Gazları, Ulaşımında Enerji Kullanımı ve Emisyon Düzenlemesi) modeli, hidrojen yakıtı sera gazı emisyonları ve enerji tüketimi yakıt döngüsünü analiz etmek için kullanmıştır. FCV uygulaması için hidrojen üretiminin üç potansiyel yöntemi, sırasıyla, fotovoltaik (PV) elektrik kullanarak su elektrolizi, şebeke elektriği kullanarak su elektrolizi ve doğal gazın buharla reformasyonu olmak üzere incelemiştir.

Hwang (2013) FCVs sera gazı emisyonu ve enerji tüketimi olan ömür döngüsü analizi mevcut çalışmada yapılmıştır. Karbon tutma olmadan ve kömür gazlaştırma ile şebeke ve güneş enerjisi kullanarak su elektroliz, doğal gaz ve buhar mısır etanol reformasyon de dâhil olmak üzere yenilenebilir ve yenilenemeyen enerji kaynakları kullanarak birkaç potansiyel hidrojen seçenekleri ele alınmıştır. Çeşitli hidrojen üretimi seçenekleri için FCVs WTW verimliliği, geleneksel CVs ve BEVs ile karşılaştırılır. Mevcut LCA araştırmaları temel bulguları saptanmıştır.

Wang ve ark. (2013) ömür döngü analizi, Çin'in mevcut (2009) ve tahmini (2020'ye kadar) EVs, FCVs ve ICEVs durumlarını değerlendirmek için yapmıştır. Geri dönüşümlü malzeme kullanımının enerji tasarrufu ve emisyon azaltma üzerinde olumlu etkisi olduğunu saptamıştır.

Dutta (2014) hidrojenin depolama ve üretim yöntemlerini açıklığa kavuşturmuştur. Ayrıca, istasyonda H₂ doldurulması ve otomobil de kullanılmasına ilişkin güvenlik konusuna da değinmiştir. Çalışmasında, güvenlik programı ve

farkındalık oluşturma çabalarının, yakıt olarak hidrojen kabulünü artırmada verimli olabileceğini göstermiştir.

Katikaneni ve ark. (2014) farklı dönüşüm teknolojileri kullanarak ulaşım yakıtı hidrojen üretiminin tekno-ekonomik değerlendirmesine odaklanmıştır. Ayrıca, daha yüksek kapasite ve hacim ile hidrojen istasyonlarının ayrıntılı ekonomisini tartışmıştır. Son olarak, ticari ölçekte araçta depolanan hidrojeni üretmek için ayrıntılı bir yol haritası sunmuştur.

Lucia (2014) oksitleme-indirgeme kimyasal reaksiyonu, iyon ve elektronları üretimi: anotta üretilen elektron harici elektrik akımının temsil etmesinin anlaşılmasından sonra verimin ve özellikle yakıt hücrelerinin kayıplarının analiz edilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Yakıt hücreleri termodinamik yaklaşımını yapmış ve kayıplar için analiz geliştirmiştir.

Termodinamik ve termokimyasal ilişkiden oluşan kayıplar:

1. Elektrotlarda kimyasal reaksiyonlar tarafından meydana getirilen; elektrotlardaki karışık potansiyel,
2. Elektrotlardaki kinetik nedeniyle; aktivasyon kayıpları
3. Elektrolit ve elektrot içinde rezistif kayıpları tarafından oluşturulan; omik kayıp,
4. Elektrot katmanlarında difüzyon reaksiyonu ve gaz difüzyon tabakasında difüzyonsuz reaksiyon nedeniyle kütle transferi kayıplarını değerlendirmiştir.

Pei ve Chen (2014) araçlarda yakıt hücrelerinin çalışma ömrünü etkileyen başlıca faktörleri incelemiştir. Yakıt hücresi dinamiği döngüsü, su yönetimi ve gaz açıklığından kaynaklanan problemlerin yanı sıra yakıt hücresi ömrünün bozulma nedenlerini analiz etmiş ve yakıt hücresi işletimi sırasında oluşan olumsuzlukları hafifletme için bazı tedbirleri sunmuştur.

Yakıt hücresi temelleri; türleri; avantaj ve zorlukları; tarihi; rakip teknolojilerinin güncel olarak gözden geçirmiştir.

Taşınabilir, sabit ve ulaşım uygulamaları, pazarları; güncel araştırma-geliştirme durumu; gelecek hedefleri; tasarım seviyeleri; termodinamik ve elektrokimyasal prensipler; sistem değerlendirme faktörleri; umut ve görünümü değerlendirmiştir.

Sharaf ve Orhan (2014) hidrojen yakıt hücreleri ile ilgili umut ve tahminleri, sistem değerlendirme faktörleri, termodinamik ve elektrokimyasal ilkeleri, tasarım düzeyleri, gelecekteki hedefleri ve araştırma-geliştirmelerindeki mevcut durumu, sabit,

taşınabilir ve ulaşım uygulamaları ile pazarları, avantaj ve zorlukları, türleri, rekabet ettiği teknolojileri, geçmişi ve yapılarını kısa ve öz incelemiştir.

Takabatake ve ark. (2014) metal oksit, platin, PEMFCs dayanıklı elektrokatalizörler geliştirmek amacıyla altı metal oksit (MoO_3 , SnO_2 , Nb_2O_5 , Ta_2O_5 , TiO_2 ve WO_3) destekler üzerine biriktirmiştir. Her iki elektrokimyasal aktivite ve çözünmeye karşı kararlılık açısından, burada çalışılan en umut verici platin destek SnO_2 bulmuştur. Oldukça stabil olmasına rağmen, elektrokimyasal etkinlik açısından diğer oksit destekli elektrokatalizörler iyileştirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Pt/SnO_2 'deki Pt çözünme oranları, geleneksel Pt/C elektrokatalistleri ile karşılaştırılabilir olduğunu göstermiştir. Bu sonuçların, SnO_2 'nin alternatif bir elektrokatalizör desteği olarak umut vaat ettiğini ifade etmiştir.

Mourad (2014) yakıt hücreli araçların karbondioksit emisyonu üzerine etkileri, temel avantaj ve değerlendirmelerin tanıtılması amacıyla simülasyon çalışması sunmuş, geleneksel ve yakıt hücresi mevcut teknolojisi kullanarak kaynaktan-tekerleğe enerji bazında gelişmiş tahrik teknolojilerini karşılaştırmıştır. Sonuçlar, çevre kalitesini artırmaya ve sera gazı (SG) emisyonlarının azaltılması için iyi bir girişim sağlamış, özellikle hidrojen tüketen yakıt hücreleri ve yakıt hücrelerinin kullanımını göstermiştir.

Kumar ve Jain (2014) Elektrikli tahrik sisteminin (EPS) kapsamlı bir analizi ile birlikte araç teknolojisi elektrifikasyonunun (EVT') karşılaştırmalı bir özeti ve EVT'nin güç akışı denetimi ve yönetim algoritmaları hakkında kısa bir tartışma sunmuştur. Ayrıca, araç teknolojisinin elektrifikasyonu için EPS'nin yol haritasındaki teknolojik ilerlemeleri ve gelecekteki zorluklarını vurgulamıştır.

EVT'nin sürdürülebilir gelişimi büyük ölçüde elektrikli tahrik sistemi ve bileşenlerine bağlıdır. EPS'nin kapsamlı incelemesi, enerji kaynağı ve depolama sistemi (ESS), güç elektroniği dönüştürücüsü (PEC), elektrik motoru (EM) ve elektronik denetleyiciler gibi teknolojik ilerlemeler nedeniyle EPS'de yüzde değişiklikler olduğunu gösterir, EVT'yi konvansiyonel ICE tabanlı araç teknolojisine karşı rekabet edebilecek hale getirir. EPS'nin ardışık ilerlemesi için, teknik atılımlar cihaz seviyesinden sistem seviyesine, bu sayede geliştirilmiş performansı, daha yüksek verimlilik ve güvenilirlik elde edilebilir. Bu bileşenlerin uygun entegrasyonu ve paketlenmesi çözülmesi gereken zorlu bir görevdir, böylece daha iyi soğutma sistemi ve güvenilir çalışma ile ağırlık, hacim ve maliyette önemli düşüş beklenebilir. EVT başarılı bir şekilde nüfuz etmesi,

temel olarak EPS'nin önemli teknolojik ilerlemesine ve bileşenlerinin dinamik performans, yakıt ekonomisi, aracın maliyeti ve dayanıklılığına bağlıdır.

Cipriani ve ark. (2014) otomotiv uygulamaları alanında daha yaygın çalıştırma görünümünde hidrojene bir özel referans ile enerji taşıyıcı kavramı özetlenmektedir. Özellikle, hidrojen üretimi birincil kaynaklardan (fosil yakıtlar), yenilenebilir enerjiler ve su elektrolizi üretiminde uygulanan son teknolojiler gerçek durum göz önüne alınarak analiz edilmiştir.

Fiziksel ve kimyasal depolama arasındaki farklar, karbon nanoyapılar dahil en yenilikçi teknolojilere özel bir bakış sunmuştur. Depolama ve ulaşım temel sorunları üzerine inceleme yaparken, geleceğin teknolojiler için altyapı maliyetlerine verilen seçenekleri göstermiştir. Otomotivdeki hidrojen güvenlik sorunları tartışılmış. Hidrojen üretimi ile ilgili maliyetlere genel bir bakış sağlanmıştır.

Thounthong ve ark. , (2014) çalışmasında, enerji yönetim stratejisinde kaynakların içsel enerjik özelliklerini (enerji ve güç yoğunlukları, genel işletme dinamikleri) dikkate alarak FC, batarya ve süperkapasitöre odaklanmıştır. Dolayısıyla, kontrol ilkesi FC ve batarya güçlerinin hızlı geçişinden nasıl uzaklaşılacağı ve daha sonra FC ve batarya streslerinin nasıl azaltılacağını göstermektedir. Sonuç olarak, hibrid güç kaynağı kullanım ömrü artacaktır.

Laboratuvarda, küçük ölçekli bir test tezgâhı PEMFC (500W, 50 A) ve süperkapasitör (292 F, 30 V) ve kurşun asitli batarya modülünden (68 Ah, 24 V) oluşan depolama aygıtlarını kullanarak gerçekleştirilen deneysel sonuçların, motor devirleri sırasında önerilen enerji yönetiminin mükemmel performanslarını doğruladığını ifade etmiştir. Motorun start/stop veya diğer önemli yük adımlarında, depolama elemanlarının anlık yük geçiş periyodu sırasında gerekli olan enerji dengesini sağladığını ve ayrıca rejeneratif frenlemeden gelen aşırı enerjinin depolandığını belirtmiştir.

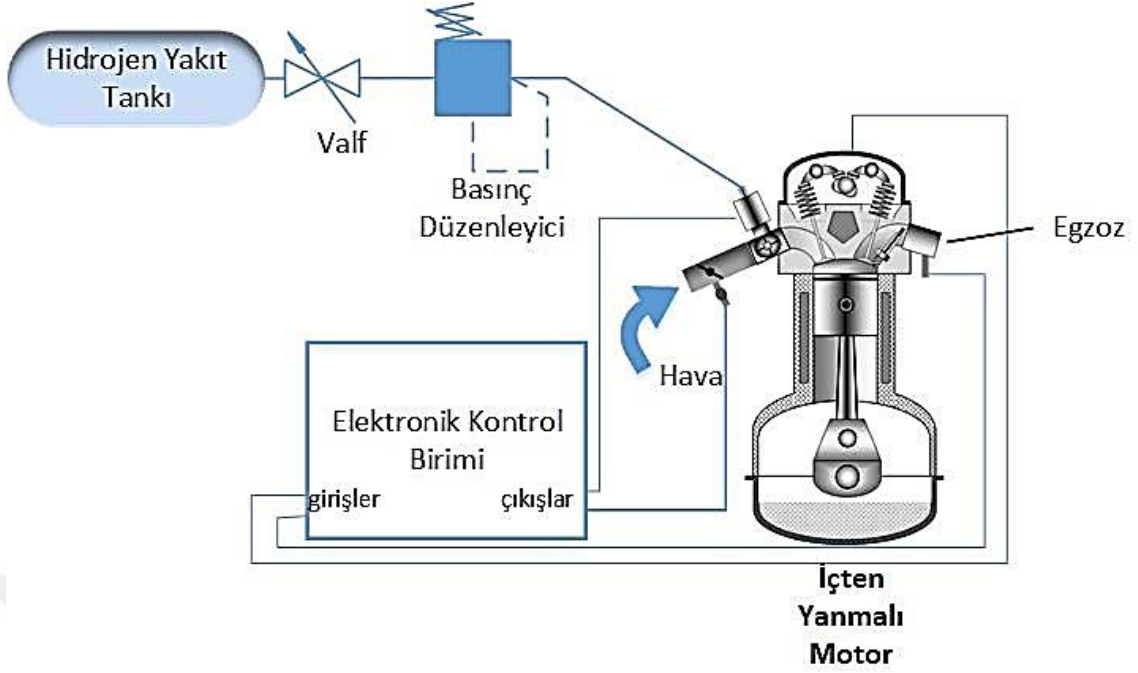
Öztürk ve Yüksel (2016) yenilenebilir temelli enerji sistemlerinin işletme ve bakım maliyetinin geleneksel sistemlere göre daha düşük olmasına rağmen, sermaye maliyetlerinin daha yüksek olduğunu bildirmiştir. Bu nedenle, çeşitli güncel modeller, uygun enerji üretim ve tüketim politikalarını belirlerken, enerji kaynaklarının artışı ve güç kaynağı yapılarının çevre için düşük veya riskli olmayan enerji yapısıyla oluşturulması gerektiğini vurgulamıştır.

2.1. Ana Yakıt Olarak Hidrojen Kullanan İçten Yanmalı Motorlar (ICEs)

Yanıcı gaz olarak hidrojenin, yanma sonrasında çevreye zararsız bir emisyonu sahip olduğu için içten yanmalı araçlarda kullanılma potansiyeline sahiptir. H₂ICE'lerin çalışma prensibi, hidrojenin yanıcı niteliğine dayanır. Doğrudan hidrojeni kullanan ICE araçlarının verimliliği, eşdeğeri benzinli ICE'den daha düşüktür. Aynı zamanda port-yakıt enjeksiyonlu ICE (PFI-H₂ICE) olarak da bilinen, aspire edilerek ön karışımli hidrojen kullanan ICE'nin güç verimliliği, benzin veya dizel ile birlikte hidrojen verilen motora göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir (White ve ark, 2006). Hidrojen motorlarının güç verimliliğini arttırmak için çok sayıda araştırma yapılmaktadır (Fayaz ve ark, 2012; Baltacıoğlu ve ark, 2016; Arat ve ark., 2016a; Arat ve ark., 2016b, Szwaja ve Grab-Rogalinski, 2009; White ve ark., 2006, Sun ve Liu, 2011; Escher, 1975; Verhelst ve Wallner, 2009). Berckmüller (2003) bu çabaların hidrojen yakıtlı ICE'lerin geleceği için oldukça yararlı olduğunu ifade etmiştir. Geliştirilmiş motor konsepti olarak birkaç örnek ele alınacaktır.

2.1.1. Basınçlı Hidrojen Yakıtlı İçten Yanmalı Motor (H₂ICE)

Basınçlı H₂ICE tekniği (Şekil 2.1.) konvansiyonel ICE'lerin maksimum motor güç yoğunluğunu arttırmak için emme havası / hidrojen basıncını arttıran basit bir hidrojen gazı sıkıştırma odası eklenerek elde edilir. White ve ark. (2006), bu modelde, hidrojenin hacimsel verimliliğini benzinli motor emsallerine yaklaştırmak için hidrojen basıncının yükseltildiğini ifade etmiştir. Tek silindirli motor ile çeşitli basınçlarda H₂ICEs testleri gerçekleştirildiği belirtilmiştir (Nagalingam ve ark, 1983; Furuham ve Fukuma, 1986; Lynch, 1983). Bu konuda: (Natkin ve ark., 2003), Ford (Jaura,2004) ve BMW (Berckmüller, 2003) ile önemli ilerleme sağlanmıştır. Bu yapının bir örneği konvansiyonel ve hibrit araçlarda motor olarak tasarlanmış süperşarjlı 4 silindirli 2.0-L Ford Zetec motor ve 4 silindirli 2.3-L Ford Duratec motoru verilmiştir (Natkin ve ark., 2003; Jaura,2004).

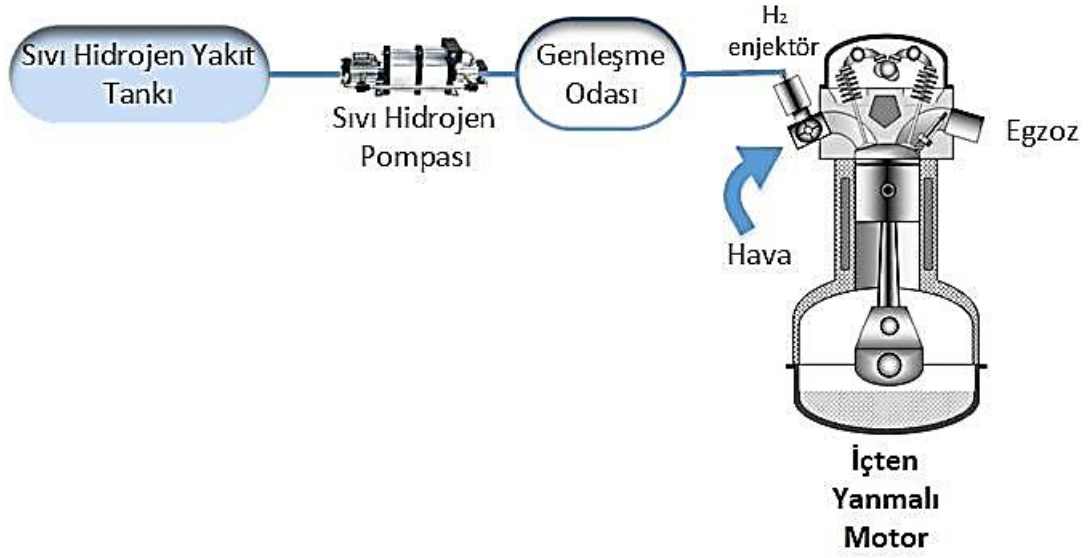


Şekil 2.1. Basınçlı hidrojen yakıtlı içten yanmalı (H_2ICE) motor şematik resmi

Natkin ve ark. (2003) tarafından Ford tarafından üretilen hidrojen test motorlarında, test değerlerinin, NO_x emisyonlarını azaltarak güç yoğunluğunu arttırdığı bildirilmektedir. NO_x üretimi şarj sıcaklığına duyarlıdır ve yanma odasında basınç artışına neden olur. Bu sorunun üstesinden gelmek için intercooling (ara soğutucusu) kullanılır: Ford'un deneysel hidrojen motorları, aşırı basınçlı havanın soğumasını en üst düzeye çıkarmak için çift intercooler kullanıldığını vurgulamıştır. Boretti (2007), basınçlı H_2ICE 'ler için çok modlu çalışma stratejilerinin benimsendiğini belirtmiştir. Gelecekte ICE tasarımının gelişimine ve çok modlu işletim stratejilerine bağlı olarak verimlilik artışı ile yüksek güç yoğunluğuna karşın zararlı emisyonların azaltılmasının beklendiğini ifade etmiştir.

2.1.2. Sıvı Hidrojen İçten Yanmalı Yakıtlı Motor ($L-H_2ICE$)

Hidrojen, konvansiyonel kıvılcım ateşlemeli motorlarda kapsamlı bir motor değişikliği yapmadan yakıt olarak kullanılabilir olduğundan, $L-H_2ICE$ 'lerin tasarımı ve geliştirilmesine neden olmaktadır. Bu tasarımın temelini oluşturan yakıt deposu ve hidrojen enjeksiyon sisteminin şematik gösterimi Şekil 2.2.'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Sıvı hidrojen depolama ve enjeksiyon sisteminin şematik gösterimi

Peschka (1998) göre hidrojen geleneksel bir içten yanmalı motorun performansını arttıran ve egzoz emisyonlarını azaltan özelliğe sahiptir. Hidrojen çok hafif olduğundan gaz olarak depolanması zordur. Hidrojen, kriyojenik bir silindir yardımıyla gaz formundan sıvı hale dönüştürülerek depolanabilir. Sıvı form da depolama da, hidrojenin yüksek yalıtım gerektirmesi dezavantajdır. Bununla birlikte, gaz formunda depolama için büyük bir depoya ihtiyaç duyulmaktadır. Sistemdeki pompanın görevi, bu sıvı hidrojeni, bir ısı eşanjörü aracılığıyla soğuk gaz haline dönüştüren genişleme haznesine göndermektir. Kriyojenik hidrojenin yoğunlaşma ve soğutma özellikleri, ön karıştırma işlemi, yakıt enjeksiyonu ve son olarak yanma işlemine katkıda bulunduğunu iddia etmiştir. Fayaz ve ark. (2012) tarafından soğuk hidrojenin kullanılması NO_x oluşumunu ve ön ateşlemeyi de azalttığı belirtilmiştir.

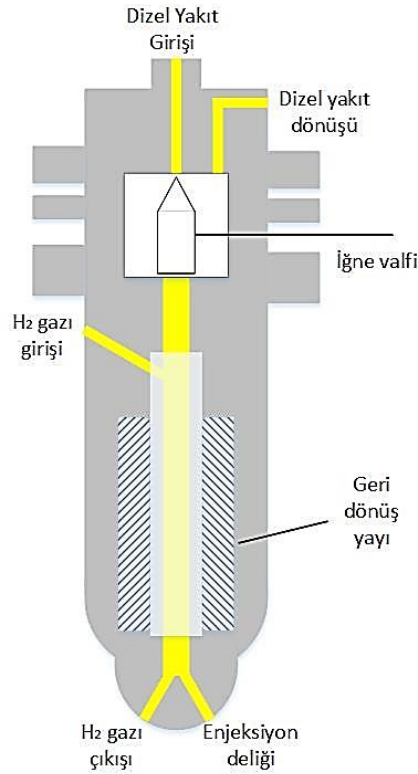
Hidrojen bu araçlarda sıvı olarak depolandığı için yüksek enerjili hidrojen yoğunluğu elde edilir. Aynı zamanda soğuk hidrojenin soğutma etkisinden yararlanır ve PFI benzinli ICE'lerde meydana gelen yüksek sıcaklığı da önler.

Almanya Federal Cumhuriyeti'ndeki sıvı hidrojen yakıtlı otomotiv araçlarıyla ilgili araştırmalar 1979 yılında başlamıştır. DFVLR (daha sonra DLR olarak yeniden adlandırıldı) ilk Avrupa sıvı hidrojen otomobil aracı projesini, motorun çalıştırılmasını ve yakıt belirleme sistemini geliştirdi ve sıvı hidrojen depolama alanında ilerledi. LH₂ yakıtlı araçlar için hidrojen karışımının oluşumu ve DLR (Alman Uzay Sistemleri

Enstitüsü) ile BMW arasındaki işbirliği, Los Alamos Ulusal Laboratuvarı ve iki büyük Alman otomobil üreticisine ait araştırma ve geliştirme çalışmalarının yürütüldüğü belirtilmiştir. Bayerische Motoren Werke AG (BMW) ile Forschung für Luft-und Raumfahrt DLR arasındaki işbirliğinde BMW 745i modeli 120 L hacmi ile L-H₂ICE'e dönüştürüldü. Bu çalışmada, aynı hacimde ve benzer koşullar altında daha önce elde edilen 9 dakika yeniden doldurma süresi 3 dakikaya düşürüldüğü Peschka (1986) tarafından ifade edilmiştir

2.1.3. Direkt Enjeksiyonlu Hidrojen Yakıtlı İçten Yanmalı Motor (DI-H₂ICE)

Ganesan (2003)'a göre bir sıkıştırma ateşlemeli (CI) motorda yanma odasına doğrudan hidrojen enjekte edildiğinde, güç çıkışı, ön karışımli modda çalıştırılan aynı motorun yaklaşık iki katıdır. Yüksek basınçlı hidrojen gazı doğrudan enjektör vasıtasıyla silindire enjekte edilebildiği Naber ve Siebers (1998) tarafından belirtilmiştir. Uygun bir enjektörün şematik gösterimi Şekil 2.3.'te verilmiştir.

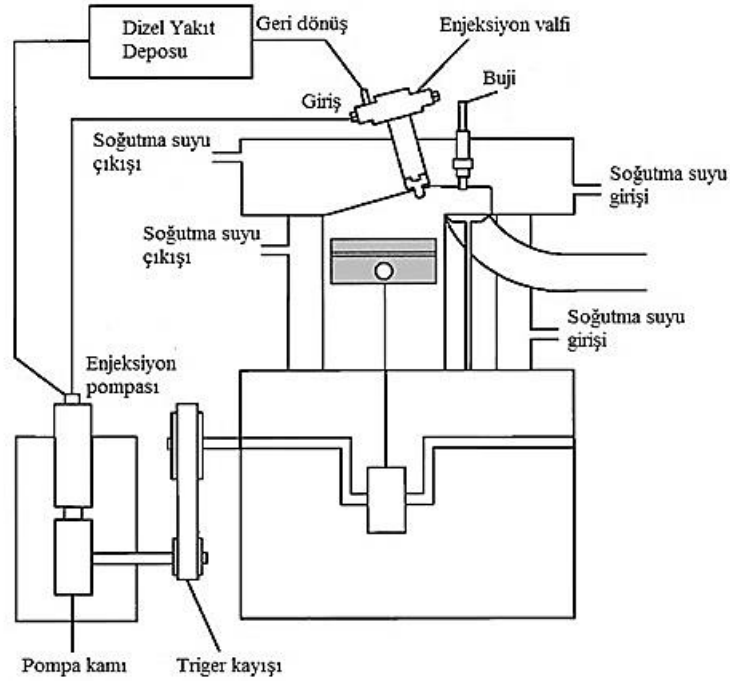


Şekil 2.3. Basınçlı hidrojene uygun bir enjektörün şematik gösterimi

Gomes Antunes ve ark. (2009) bu modelde doğrudan enjeksiyonlu içten yanmalı motorlar kullanılmış olsa da, basınçlı hidrojenin yanma odasında nasıl yayılacağını kontrol eden enjeksiyon memesinin tasarımı, motorun etkin bir şekilde çalışması için önemli olduğu vurgulanmıştır.

Hidrojenin özellikleriyle bağlantılı olarak doğrudan enjeksiyonlu bir motorda kullanımını ile ilgili bazı zorluklar bulunmaktadır. Bu zorluklar, hidrojenin kendiliğinden yüksek tutuşma sıcaklığı ve yüksek basınç artış hızına karşın, yüksek alev hızı, kısa söndürme mesafesi, yüksek ısı değeri ve yüksek yayılma gücü gibi avantajlı özelliklere sahiptir. Bununla beraber, yüksek basınçlı, yüksek akışlı bir hidrojen enjektörü tasarımı motor devrini yükseltir, ayrıca sıkıştırma strokunun oluşturacağı silindir basıncını azaltacağından dolayı motor tam performansta çalışır.

(White ve ark., 2006, Lee ve ark., 2002) göre DI-H₂ICE 'in potansiyelinden tam olarak yararlanmak için, yüksek basınç ve debi ile hidrojen enjektörünün, motorun yüksek devirlerde çalışması ve sıkıştırma stroku sonrasında enjeksiyon için silindir içi basıncın üstesinden gelinmesi gereklidir. Burada, DI yakıtla yüksek tepe gücü ve PFI yakıtı ile düşük-orta yüklerde yüksek termal verimliliklerden yararlanmak için çift enjektörlü strateji kullanılır.



Şekil 2.4. Doğrudan enjeksiyonlu hidrojen yakıtlı motor (Kim ve ark., 2005)

Lee ve ark. (2002), çift enjeksiyonlu hidrojen yakıtlı motorun, hem dış karışımli hidrojen motorunun daha yüksek verimliliği hem de doğrudan silindire enjeksiyonlu motordan gelen yüksek güç avantajına sahip olduğu belirtilmiştir.

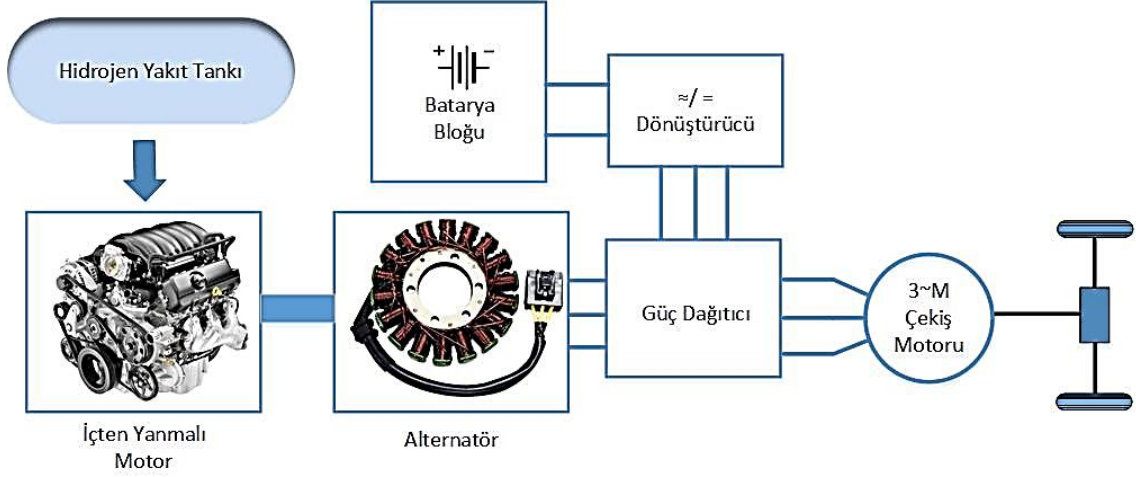
Kim ve ark. (2005) göre doğrudan enjeksiyona sahip hidrojen yakıtlı motorlar, geri tepmelerin oluşmasını önlemek için yüksek güçlü hidrojen sistemi olarak kullanılır. Silindir kapağının doğrudan enjeksiyonlu yüksek basınçlı hidrojen enjeksiyon valfi vardır. Supap, hidrolik olarak çalıştırılan bir yapıya sahiptir.

2.2. H₂ICE- Elektrikli Hibrit Araçlar

H₂ICE elektrikli hibrit güç aktarma organı aslında elektrikli araç mantığına dayanıyor. Güç aktarma organı için gereken elektrik, hidrojeni kullanan bir içten yanmalı motor tarafından üretilir. Bu sistem, H₂ICE'in hibrit elektrikli bir versiyonudur. Emisyonları düşürürken sistemin verimliliğini arttırdığı için sistem H₂ICE'den farklıdır.

Bitsche ve Gutmann (2004), ICE'nin bir elektrik motoruyla hibrit olduğu bu güç kaynağında, elektrik motorunun seri veya paralel bağlanabildiğini ifade etmiştir. Diğer bir deyişle, yalnızca ICE tarafından üretilen elektriği kullanarak tekerleklere güç sağlayabilir veya ICE ile ortak olarak tekerleklere güç sağlayabilir (Şekil 2.5.). Her iki yapı da kendi başlarına avantajlı değildir, ancak avantaj-dezavantajı orantılı olarak değişir. (White ve ark., 2006) Yeni üretilen HEV'ler hidrokarbon yakıtlı olup seri hibrit konfigürasyona sahip olmakla birlikte hem seri hem de paralel konfigürasyonların özelliklerini birleştirmektedir. Bu gelişmiş hibrit yapıda, bir batarya veya bir süperkapasitör sisteme eklenir. Üretilen elektrik ya batarya ya da süperkapasitörü şarj etmek ya da araca güç sağlayan elektrik motorunu çalıştırmak için kullanılır.

Jaura ve ark. (2004) bildirdiğine göre Ford H₂RV tarafından gösterilen modelde süper şarjlı (4 silindirli 2.3L) H₂ICE bir HEV kullanılmıştır. Bu modelde, 4500 rpm'de 110 HP'lik bir tepe gücü üretilmiştir. Buna ek olarak, 33 HP elektrik motoru mevcut güç desteği olarak kullanılmıştır. Hızlanma 11 saniyede 0-60 mil olmuştur. Yakıt ekonomisi, 45 mil/kg H₂ (benzin eşdeğeri 45 mpg) ve sürüş mesafesi 125 mil'dir.



Şekil 2.5. H₂ICE'in hibrit elektrikli versiyonu

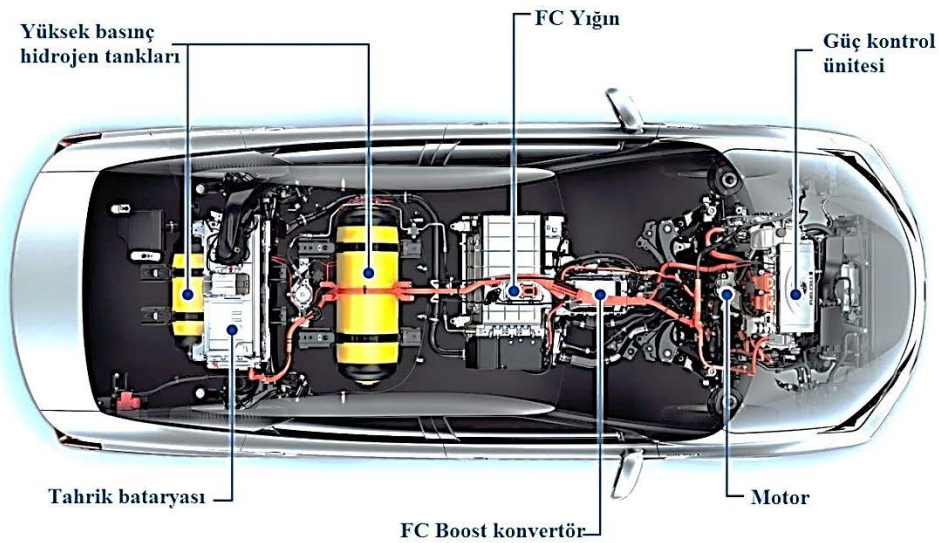
H₂ICE hibridizasyonu ile gelişmiş verimlilik ve düşük emisyon potansiyeli oldukça umut verici görünmektedir (White ve ark., 2006). Buna karşın, hibrit elektrikli H₂ICE'in temeli, hidrojen altyapısı ve ilgili hidrojen teknolojileri (hidrojen depolama, hidrojen yakıt dağıtım sistemi ve hidrojen emniyeti) geçiş olarak gören H₂ICE'in bir parçasıdır. Bu hibrit tesisler benzin-hidrojen veya dizel-hidrojen gibi iki yakıtın kullanılmasına izin verecek olduğundan, bağımsız hidrojen istasyonu ihtiyacını ortadan kaldıracığı iddia edilmiştir (Bitsche ve Gutmann, 2004; He ve ark., 2006). Hidrojen taşıma ve depolama altyapısının kurulması bağlamında ulaşılabilecek kolaylık ve ekonomiklik, hidrojen araçlarının ve daha da önemlisi yakıt hücreli araçların dönüşümünü teşvik edeceği vurgulanmıştır (Verhelst S ve Wallner T., 2009).

2.3. Hidrojeni Elektrik Kaynağı Olarak Kullanan Elektrikli Araçlar

Yakıt hücreleri, elektrikli motorlarla tahrik edilen araçlar için elektrik güç kaynağı olarak umut vaat eden bir teknolojidir. Yanma olmadan elektrik üretiminin yanında emisyon olarak su üreten bir cihazdır. Yakıt hücresinde hidrojen kullanıldığında içten yanmalı motorlardan 2,5 kat daha verimli olabilir (Hoffmann ve Dorgan, 2012). Burada kullanılan yakıt hücresi konsepti kesinlikle klasik batarya konsepti ile karıştırılmamalıdır. Yakıt hücresi bir enerji dönüştürücüsü iken, geleneksel batarya bir enerji kaynağıdır. Bu nedenle yakıt hücresi daima kendini ikmal eden harici bir kaynağa ihtiyaç duyar.

2.4. Hidrojen Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar (FCEVs)

İlk yakıt hücresi çalışmaları Sir William Grove tarafından 1839' da yapıldı (Larminie ve Dicks, 2001; Kendall ve Pollet, 2012). Yakıt hücresinin elektrikli araçlara uygulanabilme kabiliyeti, yeterli gücü üretme kapasitesine bağlıdır. Bununla birlikte, 1939'da, 5 kW sabit bir yakıt hücresi İngiliz mühendis Francis Thomas Bacon tarafından geliştirildi. 1955 yılında General Electric 'te (GE) bir kimyager olan W. Thomas Grubb, elektrolit olarak bir sülfonatlı polistiren iyon değişim membranı kullanarak özgün yakıt hücresi tasarımında değişiklik yaptı. 1958 yılında başka bir GE kimyageri Leonard Niedrach; gerekli hidrojen oksidasyonu ve oksijen indirgeme reaksiyonları için katalizör görevini gören membrana platin biriktirme yöntemi geliştirdi. GE, NASA ve McDonnell Uçak ile bu teknolojiyi geliştirirken, 1960'larda İkiizler ve Apollo uzay programlarında NASA tarafından Proton değişimli membranlı yakıt hücresi (PEMFCs) ve alkalın yakıt hücreleri (AFC'ler) kullanıldı (Sharaf ve Orhan, 2014). Böylece, bir yakıt hücresinin ilk ticari kullanımı gerçekleştirildi. Günümüzde neredeyse tüm otomotiv üreticileri hidrojen otomobil konsept ve prototiplerine sahipken sadece Honda Clarity FCEV (105 kW ve 460 mil menzil), Hyundai Tucson FCEV (100 kW ve 365 mil menzil) ve Toyota Mirai FCEV (114 kW ve 312 mil menzil) ticari araçları mevcuttur (Anonymous, 2016c).



Şekil 2.6. Toyota Mirai yakıt hücresi sistemi (Anonymous, 2016c)

2.3.1. Hidrojen Yakıt Hücresi Özellikleri

Yakıt hücreleri kimyasal elektrik enerjisine dönüştüren elektrokimyasal cihazlardır (Sharaf ve Orhan, 2014; Mourad, 2014; Lucia, 2014). Bunlar, katot, elektrokimyasal indirgeme sırasında anot oksidasyona olanak sağladığı iki elektrot arasında (Lucia, 2014; Kreuer ve Nguyen, 2007), bir elektrolit ortam ile gerçekleştirilir. Oksitleme-indirgeme kimyasal reaksiyon iyon ve elektronları üretir: anotta üretilen elektron harici elektrik akımı temsil eder. Yakıt hücresi, sınırlı bir çevresel etkiye sahip gerçek bir güç üretim teknolojisini temsil edebilir (Lucia, 2014).

Çizelge 2.1. Yakıt hücreleri reaksiyonları (Lucia, 2014)

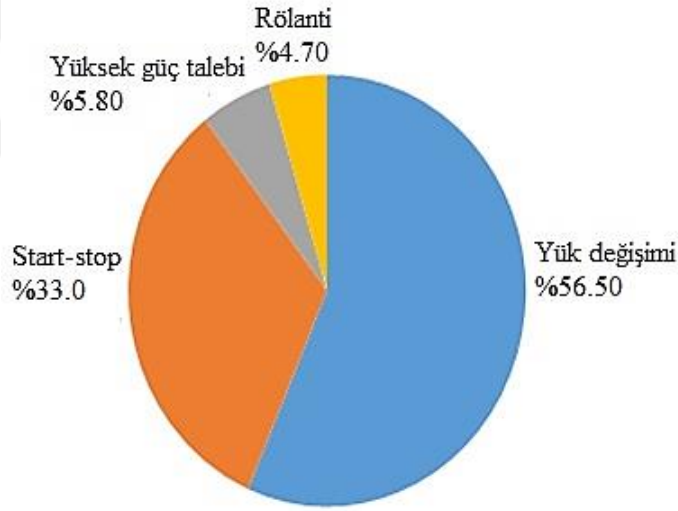
Yakıt hücre türü	Anod reaksiyonu	Katod reaksiyonu
Polimer elektrolit ve fosforik asit	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
Alkalin	$H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$
Erimiş karbonat	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ $CO + CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e^-$	$O_2 + CO_2 + 4e^- \rightarrow 2CO_3^{2-}$
Katı oksit	$H_2 + O_2 \rightarrow H_2O + 2e^-$ $CO + O_2 \rightarrow CO_2 + 2e^-$ $CH_4 + 4O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$	$O_2 + 4e^- \rightarrow 2O_2^-$

Raza ve ark. (2016), yakıt hücresi teknolojisini, diğer enerji üreten teknolojiler tarafından neredeyse imkânsız olan avantajlar kombinasyonunu barındırdığını örneğin bu teknolojiye kullanılan yakıt doğal olarak bol bulunur ve yenilenebilir/sürdürülebilir olduğu iddia edilmiştir.

Yüksek enerji verimliliğine ve çevre dostu yakıtlara sahip olan yakıt hücresi, çevresel ve ekonomik sorunlara doğru çözümler üretebilen bir teknolojidir (Neef, 2009). Yakıt hücresi teknolojisinin sessiz, statik yapısına ek olarak, sabit, taşınabilir ve ulaşım enerjisini üreten çeşitli uygulamaları da vardır (Sharaf ve Orhan, 2014; Dyer, 2002). Dünyada, yakıt hücresi ile ilgili çalışmalar İsveç, İngiltere, Japonya ve ABD gibi farklı ülkelerde devam etmektedir.

Hidrojen gazı, doğal gaz ve biyogaz gibi yakıtlarla çalışan yakıt hücreleri, ABD'de 500-800 °C çalışma sıcaklığına bağlı olarak hidrokarbon yakıtlarını entegre etmek üzere ele alınmıştır (Raza ve ark., 2016; Ahmed ve Krumpelt, 2001). Düşük

akımda çalışan yakıt hücreleri, katalizör ve yakıt hücresi geriliminin bozulmasına neden olabilir (Debe, 2006). Yakıt hücresinden istenen bir voltaj elde etmek için, birçok yakıt hücresini (katot, anot, elektrolit) içeren bir yakıt hücresi grubu oluşturulur. Uygulamada, yakıt hücreleri değişken yük koşullarında çalıştırılmaya uygun olmalıdır (Rabbani ve Rokni, 2013). Buna göre, tüm çalışma koşullarında, bir yakıt hücresinin ömrünü etkileyen performans bozulma faktörleri, yüzde 56,50 yük değişimine, yüzde 33,00 start-stop, yüzde 5,80 yüksek güç talebine ve yüzde 4,70 rölanti oranına bağlıdır (Pei ve ark., 2008). Start-stop ve yük değişimi faktörleri bozulmanın büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır. Sonuç olarak, yakıt hücresinin ömrü, start-stop frekansı, yük değişimi faktörleri ve bu faktörlerin süresiyle ilişkilidir (Bauer ve ark., 2015; Pei ve ark., 2008). Buna göre, tüm çalışma koşullarında, yakıt hücresinin ömrünü etkileyen performans bozulma faktörleri (Pei ve ark., 2008) tarafından Şekil 2.7.' de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Tüm işletme koşullarında yakıt hücresinin ömrünü etkileyen performans bozulma faktörleri (Pei ve ark., 2008)

Yakıt hücresi, hidrojen den elektrik üretim teknolojisi, diğer teknolojilere göre daha temiz ve verimli bir enerjiye sahip olduğu Dutta (2014) tarafından ifade edilmiştir. Dahası, yakıt hücresi teknolojisinde kullanılan yakıt, doğadaki bolluğu nedeniyle yenilenebilir ve sürdürülebilir olduğu Sørensen (2012) tarafından ifade edilmiştir.

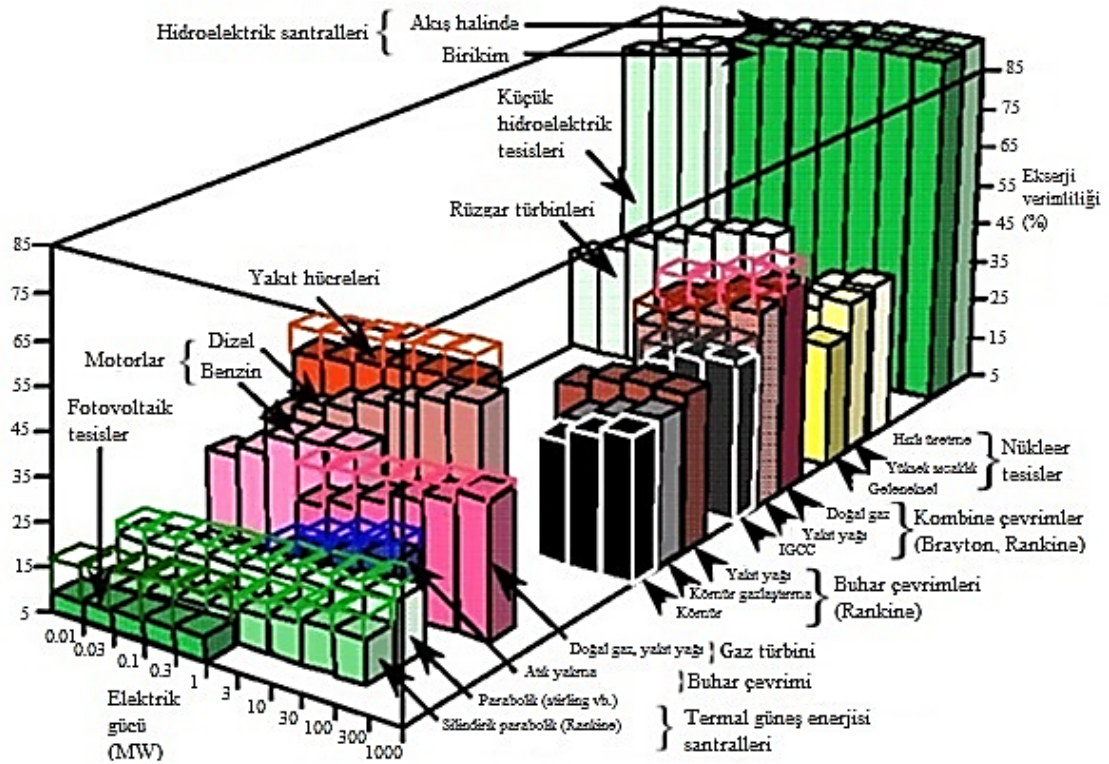
Çeşitli yakıt hücrelerinin enerji ve ekserji analizi üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır (Bejan ve ark., 1996; Oosterkamp ve ark.,1993, Dinçer, 2002; Dunbar, 1991; Barbir ve Gomez, 1996). Bu çalışmalar, hidrojen ve yakıt hücresi sistemlerinin oldukça verimli olduğunu ve yakıt hücresinin, enerji dönüşüm sistemleri arasında en yüksek yakıt verimliliğine sahip cihazlardan biri olduğu Sharaf ve Orhan (2014) tarafından bildirilmiştir. Bir PEM yakıt hücresinin verimliliğine ek olarak, farklı yüklerde ekonomik analizle ulaşımın durumu da analiz edilmiştir (Kazim, 2002, Johnson ve ark., 2001, Cowanden ve ark., 2001; Rosen ve Scott, 1988).

Çizelge 2.2. Yakıt hücresi teknolojilerinin karşılaştırılması (Kumar ve Jain, 2014: Kirubakaran ve ark., 2009: Mekhilef ve ark., 2012)

Özellik	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Elektrolit	Perfloro sülfonik asit	Phosphoric acid	Fosforik asit	Erimiş karbonat	Katı oksit
Tasarım ve yapısı	Basit	Basit	Daha basit	Karmaşık	Karmaşık
Sıcaklık aralığı	50–100 °C	80–100 °C	150–200 °C	600–700 1C	700–1000 °C
Başlatma süresi	Daha düşük	Düşük	Düşük	Yüksek	Daha yüksek
Yığın boyutu (kW)	<1–100	10–100	100–400	300kW-3MW 300–300MWc	1–2MW
Hassasiyet	Fazla	Az	Az	Daha az	Daha az
Verimlilik (%)	40–60	50–60	40–50	45–60	
Hücre ömrü	2–10 µV/h	0–6 µV/h	2–4 µV/h	5 µV/h	0–8 µV/h
Avantajları	Düşük çalışma sıcaklığı	Hızlı bir kimyasal reaksiyon	Safsızlığa daha az duyarlı	Yüksek verimlilik	Yüksek verimlilik
	Hızlı başlangıç	Düşük maliyetli	Düşük maliyetli	Yakıt esneklik	Katı elektrolit
	Bakım gerektirmez	Daha az bakım	Basit yapısı	Katalizör çeşitliliği	CHP için uygun Yakıt esneklik
Dezavantajları	Pahalı katalizör	Duyarlı Yakıt	Pahalı katalizör	Yüksek sıcaklık	Yüksek sıcaklık
	Duyarlı Yakıt	Elektrolit yönetimi	Uzun başlangıç zamanı	Uzun başlangıç zamanı	Uzun başlangıç zamanı
			Düşük akım yoğunluğu	Düşük akım yoğunluğu	Karmaşık yapısı
Uygulama	Taşınabilir güç	Askeri	DG	Elektrikli yardımcı programı	Yardımcı güç
	Araç uygulaması	Uzay	Askeri	DG	Elektrikli yardımcı programı
	DG				DG

Yakıt hücreleri, sürdürülebilir ürün geliştirme, temiz enerji ve güvenlik açısından yenilenebilir bir enerji kaynağı, doğadaki bolluğu nedeniyle de sürdürülebilirdir (Sørensen, 2012; Raza ve ark., 2016).

Yakıt hücreleri, verimli ve temiz bir enerji dönüşümü gerçekleştirmektedir. Buna ek olarak, yakıt hücreleri, sürdürülebilir kalkınma ve enerji güvenliği için yenilenebilir kaynaklardan ve modern enerji taşıyıcılar ile (yani, hidrojen) uyumludur. Sonuç olarak, geleceğin enerji dönüşüm cihazları olarak kabul edilmektedir (Sharaf ve Orhan, 2014). Şekil. 2.8'de günümüz ana enerji dönüşüm cihazları arasındaki karşılaştırmaları göstermektedir. Yakıt hücreleri yanı sıra hidroelektrik santralleri, nükleer santraller, rüzgar türbinleri, kombine rankin-brayton çevrimi, rankin döngüleri, gaz türbinleri, dizel motorlar, gaz motorları, atık yakma, termal güneş enerjisi santralleri, fotovoltaik paneller tipik ekserji verimliliği bulunmaktadır. Buradan da anlaşılacağı üzere, yakıt hücresi, enerji dönüşüm cihazları içinde ekserji verimlilikleri en yüksek değerlere sahip olanlardandır.



Şekil 2.8. Başlıca enerji dönüşüm cihazlarının ekserji verimleri (Sharaf ve Orhan, 2014)

Ayrıca, tekno ekonomik açıdan, yakıt hücreleri, rakip teknolojilere göre taşınabilir güç sektöründe de gravimetrik ve hacimsel enerji yoğunlukları avantajına sahip olduğu; sabit güç sektöründe yüksek verimlilik ve kapasite faktörleri, taşımacılık sektöründe de yüksek verimlilik ve yakıt esnekliği sunduğu Sharaf ve Orhan (2014) tarafından vurgulanmıştır.

2.3.2. Polimer Elektrolit Membran Yakıt Hücreleri (PEMFCs)

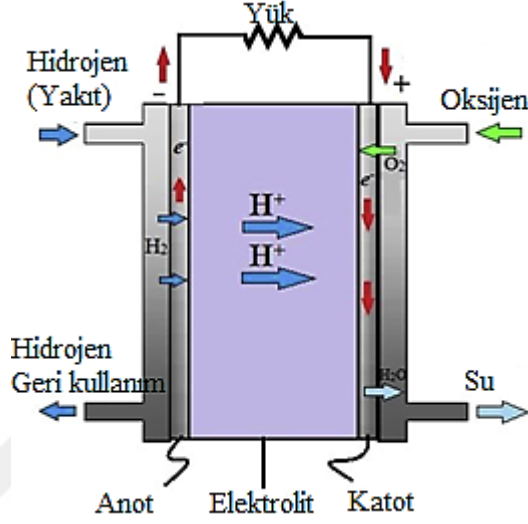
Proton değişimli membranlı yakıt hücreleri veya polimer elektrolit membran (PEMFC) yakıt hücreleri (PEMFC) yakıt hücresinin bir türüdür. Yakıt hücreleri, elektrolitleri ve yakıtlarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır (Raza ve ark., 2016; Sørensen, 2012, Andujar ve Segura, 2009; Kirubakaran, 2009; Mekhilef, 2012)

- Proton değişim membranlı veya polimer elektrolit membranlı yakıt hücresi (PEMFCs)
- Alkali yakıt hücresi (AFC)
- Fosforik Asit Yakıt Hücresi (PAFC)
- Erimiş karbonat yakıt hücresi (MCFC)
- Katı Oksit Yakıt Hücresi (SOFC)
- Doğrudan metanol yakıt hücresi (DMFC)

Temel yakıt hücresi çalışma prensibi Şekil 2.9.' da gösterilmektedir. Bir elektrik akımı üretmek için reaksiyonların hidrojen ve oksijen arasında nasıl meydana geldiğini bilmek istiyorsak, her bir elektrotta meydana gelen reaksiyonları incelenebilir. Aşağıdaki kimyasal reaksiyonlar bir yakıt hücresinde meydana gelir.

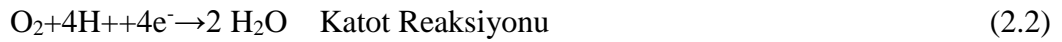
PEMFC'ler yakıt hücresi türleri arasında, yüksek güç yoğunluğu, basit yapısı, daha fazla hassasiyet karakteristiği, daha düşük başlatma süresi, küçük boyut ve bakım gerektirmediğinden, hidrojen kullanan taşıt uygulamaları için en uygun olanıdır (Mekhilef ve ark., 2012, Kumar ve Jain, 2014; Salvi ve Subramanian, 2015). PEMFC'ler taşıtların yanı sıra sabit ve taşınabilir yakıt hücresi uygulamaları için kullanılabilir edilir. PEMFC'nin yapısı temel olarak anot ve katot terminaleri arasında yerleştirilen bir elektroliti içerir (Kirubakaran, 2009; Mekhilef ve ark., 2012). Tipik bir yakıt hücresinde; katot (pozitif terminal) oksijen içeren hava ile beslenirken (Fuel Cell Handbook, 2004), anot (negatif terminal) sürekli olarak gazlı yakıtlarla beslenir.

Reaksiyon esnasında, hidrojen molekülleri platin gibi bir katalizör varlığında proton ve elektron olarak ayrılır (Raza ve ark., 2016). Protonlar elektroliti geçtiklerinde, elektronlar bir elektrik akımı üretirler. Ortaya çıkan elektrokimyasal reaksiyon sonucunda, elektrotlar arasında elektrik akımı oluşur (Kirubakaran, 2009).



Şekil 2.9. PEMFC çalışma prensibi

Elektrik akımı üretmek için reaksiyonların hidrojen ve oksijen arasında nasıl meydana geldiğini bilmek istenirse, her elektrotta meydana gelen reaksiyonların incelenmesi gerekir (Raza ve ark., 2016). Yakıt hücresinin temel fonksiyonu aşağıdaki kimyasal reaksiyonlara dayanmaktadır (Rayment ve Sherwin, 2003; Ehsani ve ark., 2005):



2.3.3. Hidrojen Yakıt Hücresi Temel ve Pratik Sınırlamaları

Yakıt hücresi performansında kayıp oluşturan bazı fiziksel prosesler (taşıma ve kimyasal reaksiyon) ve pratik sınırlamalar vardır. Bunlar;

- (1) aşınmış parçaların yüzeye geçmesi,
- (2) gaz elektrolit ara yüzeyinde reaktantların taşınması,

- (3) elektrolit içinden elektrot yüzeyine reaktantların taşınması,
- (4) ön elektrokimyasal homojen ve heterojen reaksiyonlar,
- (5) elektrot üzerindeki elektro-aktif parçaların aşınması,
- (6) elektrot yüzeyden uzakta ürünlerin taşınması,
- (7) elektrolit içindeki reaktantların çözülmesi,
- (8) elektrolitten ürünlerin gelişimi,
- (9) elektrolit/gazdan gaz ürünlerin taşınması kayıplarıyla bağlantılıdır.

Bu kimyasal ve fiziksel proseslerle bağlantılı kayıplar polarizasyon olarak adlandırılır. Standart şartlarda, teorik olarak elde edilmesi gereken voltaj 1.229 V' tur.

Sabit sıcaklık ve basınçta bir yakıt hücresi çalışmasından elde edilebilecek maksimum elektriksel iş (W_{el}), elektrokimyasal reaksiyonun gibbs serbest enerjisi (ΔG) değişimi ile verilir:

$$W_{el} = \Delta G = -nF\Delta E \quad (2.4)$$

n reaksiyona katılan elektron sayısı, F faraday sabiti (96,487 coulomb/g-mol elektron) ve E hücrenin ideal potansiyelidir. Gibbs serbest enerji değişimi de aşağıdaki durum fonksiyonu olarak ifade edilir:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.5)$$

Burada ΔH entalpi değişimi ve ΔS entropi değişimidir. 1 atm sabit basınçta her mol hidrojen başına yakıt hücresi prosesindeki serbest enerji değişimi reaksiyon sıcaklığından ve reaksiyondaki entalpi ve entropi değişikliğinden hesaplanır. Eğer sıcaklık 25°C alınırsa;

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

$$\Delta G = -285,800 \text{ J} - (298 \text{ K})(-163.2 \text{ J/K})$$

$$\Delta G = -237,200 \text{ J}$$

Termik makinaların, Carnot çevriminde verim $\eta_{fc} = 1 - T/T_o$ iken yani işlem sıcaklığı (T_o), arttıkça verim artmaktadır. Ancak sıcaklık, malzeme dayanım limitleri ile sınırlıdır. Yakıt hücrelerinde bu sınırlama alevli yanma süreci, hareketli veya dönen parçalar olmadığından enerji verimini düşmeyecektir. Yakıt hücresinin genel verimi $\eta_{fc} = \Delta G/\Delta H$ şeklinde, Gibbs serbest enerjisinin yakıt ısıl değerine oranı şeklindedir.

Standart sıcaklık ve basınçta H_2 /Hava yakıt hücresi reaksiyonu için maksimum hücre voltajı (ΔE) şu denklemle hesaplanır:

$$H_2/\text{Hava yakıt hücresi için 1 atm basınç ve 25°C (298K) deki hücre voltajı};$$

$$\Delta E = \Delta G / n F \quad (2.6)$$

$$\Delta E = -(-237,200 \text{ J} / 2 * 96,487 \text{ J/V})$$

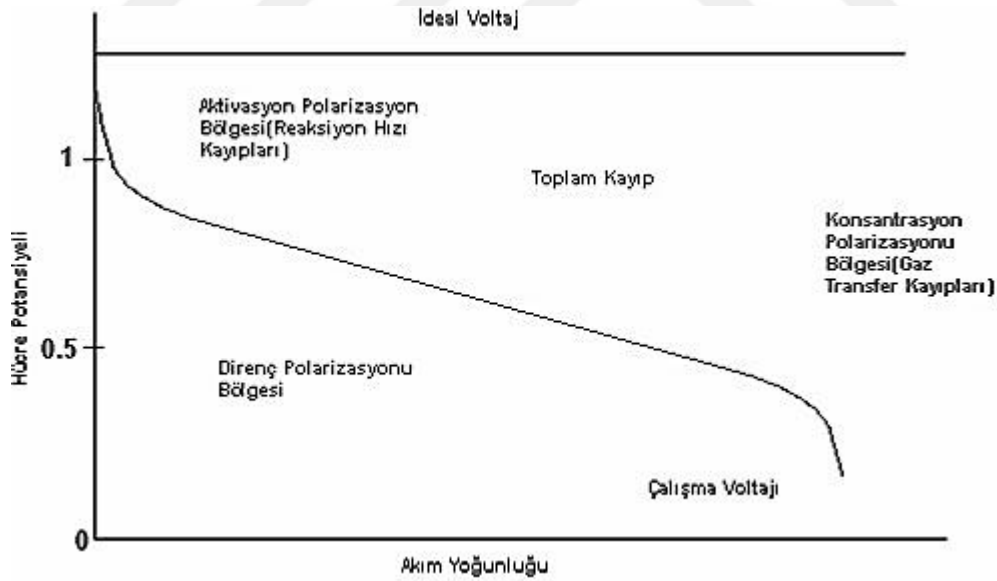
$$\Delta E = 1.23 \text{ V}$$

Şekil 2.10'da gösterildiği gibi kayıplar nedeniyle voltaj devamlı düşmektedir. Bu kayıplar (Larminie ve Dicks, 2001);

- Aktivasyon polarizasyonu,
- Direnç polarizasyonu,
- Konsantrasyon polarizasyonudur.

Gerilim (voltaj) ile akım yoğunluğu arasındaki eğriye, polarizasyon (kutuplaşma) eğrisi denilmektedir. Hücre voltajı ve akım yoğunluğunun grafiğinde (I-V eğrisi) göz önüne alınması gereken noktalar şunlardır:

- Açık devre voltajı teorik voltajdan küçüktür.
- İlk voltajda hızlı bir düşüş meydana gelmektedir.
- Sonra voltaj doğrusal ve daha yavaş düşmeye devam etmektedir.
- Voltajın hızlı düştüğü anda yüksek akım yoğunluğunun olduğu gözlenmektedir.



Şekil 2.10. Yakıt hücresinin ideal ve gerçek voltaj – akım karakteristiği (Larminie ve Dicks, 2001)

Güç, akım yoğunluğu ile voltajın ürünüdür. Polarizasyon eğrisi sonuçlarından yola çıkarak, güç yoğunluğu ile akım yoğunluğu arasında çizilen bir eğri ile yakıt

hücresinin ulaşabileceği maksimum güç yoğunluğu hesaplanmaktadır (Larminie ve Dicks, 2001)

$$W=V.I \quad (2.7)$$

V = Voltaj (V)

I = Akım yoğunluğu (mA/cm²)

W = Güç yoğunluğu (mW/cm²)

Aktivasyon kayıpları; yakıt hücresine dışarıdan yük verildiğinde yükten geçen akım yoğunluğu yakıt hücresinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyon ile orantılıdır. Hücrede oluşan akım, aktif alan ile ilgilidir. Bununla beraber, yakıt hücrelerinde voltaj-akım yoğunluğunun açıklanmasında tersinmez voltaj kayıplarının da anlaşılması gerekmektedir.

Aktivasyon polarizasyonu doğrudan elektrokimyasal reaksiyonların hızlarıyla orantılıdır. Elektrokimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için moleküllerin aşması gereken aktivasyon enerjisi seviyesi vardır. Aktivasyon polarizasyonu, tafel denkleminde hesaplanabilir.

Düşük akım yoğunluğu bölgesinde aktivasyon polarizasyonunu belirleme de elektrottaki katalizör önemli bir etkidir. Yüksek akım yoğunluğu bölgesinde direnç polarizasyonunu polimer elektrolit membranın proton iletimi etkilemektedir. Tafel eğrisi (Şekil 2.11.) hücrede polarizasyonlar olmama durumundaki (ölçülebilecek maksimum) akımın (i_0) hesaplanmasında kullanılır.

Şekil 2.11.' de aktivasyon polarizasyonunun ($\sigma_{akt.}$), \log_i 'ye karşı grafiği Tafel eğrisini vermektedir. Bu eğrinin eğimi (b); tafel eğimi olarak adlandırılır.

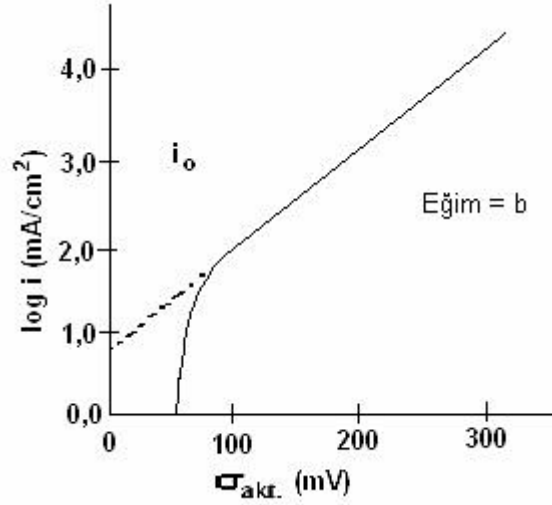
Elektrokatalizör geliştirme çalışmaları elektrokimyasal reaksiyonlar için mümkün olduğunca küçük tafel eğimini elde etmek üzerinedir. Çünkü hücreden elde edilebilecek maksimum akım, tafel eğiminin azalması ile elde edilecektir.

Aşırı voltaj değerlerinin hesaplandığı Tafel Denklemi (2.8) denkleminde gösterilmektedir (Larminie ve Dicks, 2001).

$$\Delta V_{act}= A \log (i/i_0) \quad (2.8)$$

Doğal logaritmik formundaki Tafel denklemi ise;

$$\Delta V_{act}= A \ln (i/i_0) \quad (2.9)$$



Şekil 2.11. Tafel eğrisi

Denklemden kullanılan A sabiti yavaş gerçekleşen bir elektrokimyasal reaksiyonda yüksek olurken; i_0 sabiti hızlı gerçekleşen bir elektrokimyasal reaksiyonda yüksektir. i_0 ; elektrottaki anot ve katot reaksiyon hızlarının bir ölçüsüdür. Aşırı gerilimin sıfırdan harekete başladığı yerde dikkate alınmakta ve Tafel denkleminde sadece $i > i_0$ olduğu zaman hesaplanabilmektedir.

Mol başına $2e^-$ transfer edilen polimer elektrolit membran yakıt hücreleri için A sabiti;

$$A = \frac{RT}{2\alpha F} \quad (2.10)$$

α = Şarj transfer katsayısı

F = Faraday sabiti (96.485 C)

R = Gaz sabiti (J/mol.K)

T = Sıcaklık (K)

α sabiti elektrik enerjisiyle orantılı olup elektrokimyasal reaksiyon hızı ile değişmektedir. Bu sabitin alabileceği değerler, reaksiyona ve elektrot malzemesine göre 0-1.0 arasında değerdir.

Tafel denkleminin logaritmik formdan, eksponansiyel forma düzenlenmiş hali voltajı akıma çevirmede kullanılır. Denklem, Tafel denkleminin alternatif olarak kullanılan 'Butler-Vollmer' denklemdir. Butler-Vollmer:

$$i = i_0 \exp(2\alpha F \Delta V_{act} / RT) \quad (2.11)$$

Denklemi olarak verilir. Elektrot üzerinde aşırı voltaj aktivasyonu dışında kayıpsız bir yakıt hücresi için voltaj (2.12) denklemiyle hesaplanmaktadır.

$$V = E - A \ln (i/i_0) \quad (2.12)$$

Bu denklemdeki E, bütün yakıt hücreleri için kullanılan tersinir açık devre voltajıdır. Değişim akım yoğunluğu olan i_0 değeri, aktivasyon kayıplarının azaltılması için önemli bir faktördür. Yakıt hücresinin performansını artırmak için i_0 'ı artırmak gerekmektedir. Hoogers (2003)'e göre bunu gerçekleştirmek için aşağıdaki seçenekler değerlendirilmelidir:

- Çok etkili katalizörler kullanmak,
- Sıcaklığı yükseltmek,
- Reaktan konsantrasyonu artırmak,
- Elektrotların pürüzlülüğünü artırmak,
- Basıncı artırmak.

Yakıt geçişi ve dahili akımlar: yakıt hücrelerinin elektrolit malzemesinin iyon geçirmesi istenirken elektronik iletkenlik istenmemektedir. Polimer elektrolit membran yakıt hücreleri Nafion membranları, çok iyi iyonik iletkenlik fakat bir miktar elektron geçişine engel olamamaktadır. Bununla birlikte anottan bir miktar yakıt da katoda geçmektedir. Katot tarafına geçen yakıt, oksijenle tepkimeye girerek kısa devre oluşturarak hücre performansını düşürmektedir. Düşük sıcaklık yakıt hücrelerindeki yakıt geçişi, açık devre voltajında önemli düşümlere neden olmaktadır (Hoogers, 2003)

Ohmik kayıplar; elektrotların üzerinde yüksek dirençli bir tabakanın oluşumu, akımın geçmesine karşı bir direnç oluşturur ve devre voltajını düşürür. Voltaj düşüş değeri akımla orantılıdır.

Yakıt hücrelerinde, bağlantı noktaları ve çift kutuplu plakalar ohmik kayıpların gerçekleşebileceği bölgeler olsa da direncin ana sebebi elektrolittir. Voltaj kaybının akım yoğunluğu ile bağlantılı denkleminde 1cm^2 'lik hücreye karşılık gelen direnci R olarak simgelersek ohmik kayıplardan kaynaklanan voltaj düşüş miktarı;

$$\Delta V_{\text{ohm}} = I \times R \text{ (ohm kanunu)} \quad (2.13)$$

$$I = \text{Akım yoğunluğu (mA/cm}^2\text{)}$$

$$R = \text{Direnç (ohm.cm}^2\text{)}$$

Hücrenin iç direncini düşürmek için;

- Yüksek iletkenlik özelliğine sahip elektrotlar kullanılmalı

• Hücre bağlantıları ve çift kutuplu plakalar için uygun malzemeler kullanılmalı
Elektroliti olabildiğince inceltmek gereklidir. Fakat elektrolitin, elektrot tabakasını destekleyebilmesi için yeterli kalınlıkta veya elektrolit akışının dağılması için yeterli genişlikte olmalıdır.

Kütle taşınımı ve konsantrasyon kayıpları; yüksek akım yoğunluklarında, elektrot yüzeyinde yakıt ve oksijen konsantrasyonunun değişmesiyle meydana gelmektedir. Reaksiyon katalitik yüzeyde çok hızlı gerçekleştiğinden, gözenekli elektrot yapısından dolayı yeterli kütle taşınmamaktadır. Bu nedenle reaksiyona gerekli yakıt veya oksijenin azlığı, istenen voltajın üretilmemesine neden olmaktadır (Hoogers, 2003).

2.3.4. Yakıt Hücresi Teknolojisinin Sürdürülebilirliği ve Yenilenebilirliği

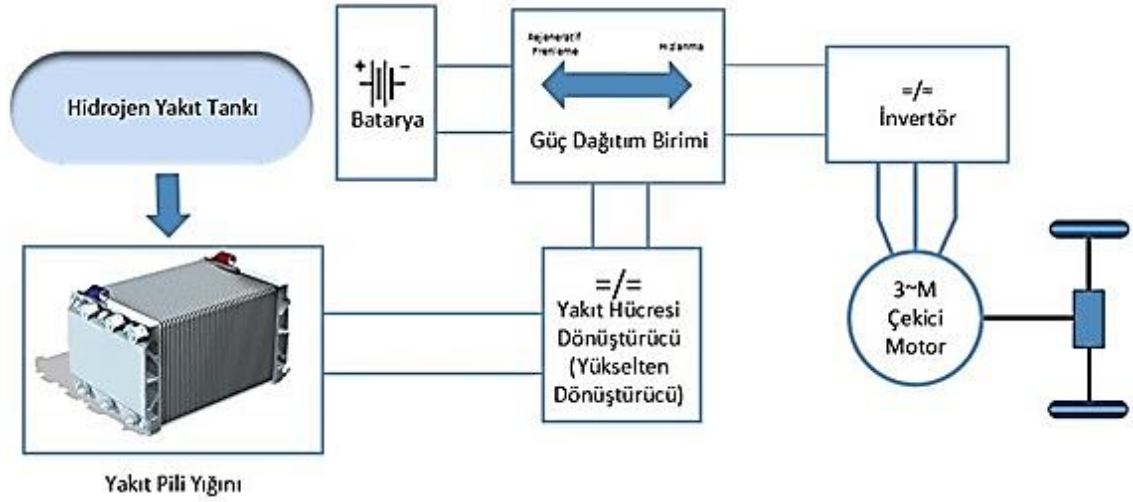
Hidrojen, dünyadaki temiz enerji taşıyıcısı olarak tercih edilir, çünkü hidrojen, kütle olarak petrole göre daha yüksek enerjiye sahiptir. İdeal bir enerji taşıyıcısı, hidrojen, sırasıyla 54.4 MJ / kg, 46.4MJ / kg, 45.6MJ / kg'lık enerji içeriğine sahip olan sıvılaştırılmış doğal gaz, otomotiv benzini ve dizeli ile enerji içeriğine göre karşılaştırıldığında 120,0 MJ / kg ile iki katlarından fazla enerjiye sahiptir (Ni ve ark., 2006). Bu nedenle, hidrojen, ulaşımda enerji üretimi, taşınabilir elektronik, sabit enerji uygulamaları ve hidrojen yakıtlı hücre aracında bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir.

2.3.5. Hidrojenli Yakıt Hücreli Araçların Konfigürasyonları

Hidrojen yakıt hücreli araç, taşıt hareketlendirmek için elektrik motoru kullanır. Elektrik motorunun kaynağı olan elektrik, yakıt hücresinde hidrojen ve oksijen kombinasyonu kullanılarak üretilir ve dışarıya su bırakır. Yakıt hücreli araçlar, uzun menzilli emisyonuz sürüş için anahtar teknoloji olabilir (Oettle, 2010). PEMFC araçları, ICE (içten yanmalı motor) araçlara kıyasla daha yüksek enerji verimliliği ve sıfır emisyon potansiyeline sahiptir. Böylece, PEMFC araçlarının uzun vadede ICE'den daha etkili olduğu görülmektedir (Salvi ve Subramanian, 2015). Hidrojen yakıt hücreli araçları (HFCVs) sıfır CO₂ emisyon ile ulaşım sistemleri açısından umut vaat etmektedir (Liu ve Christopher, 2015). Şu anda, yüksek verimli ve düşük emisyon

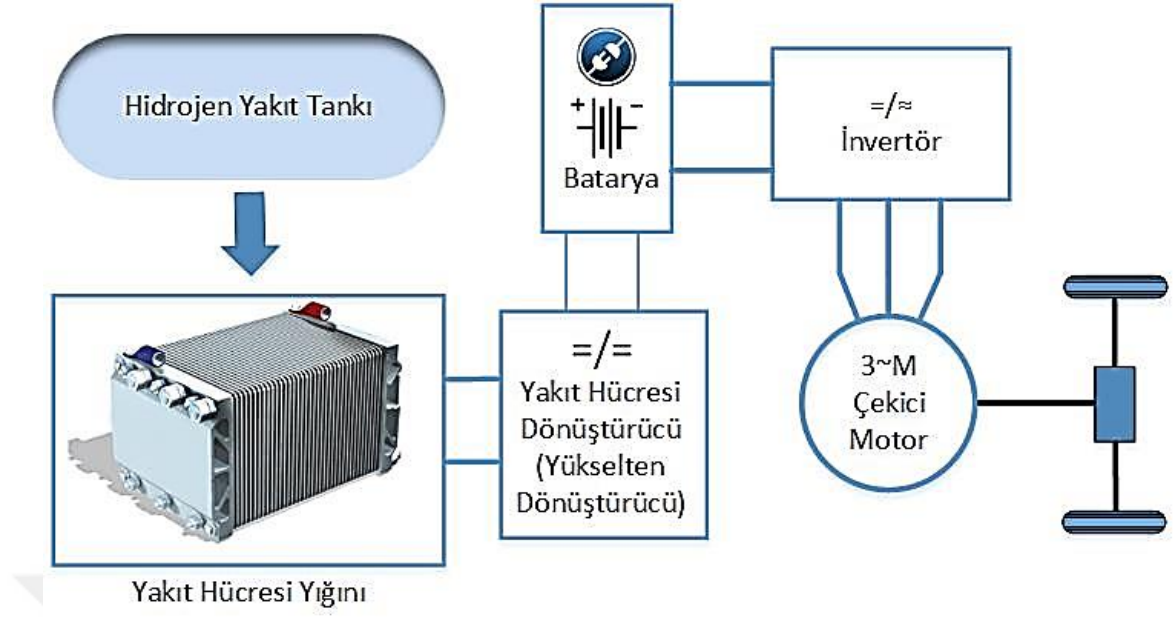
sahip HFCVs geliştirilmektedir. Mourad (2014)'a göre CO₂ ve sera gazı emisyonları üzerindeki potansiyel etkileri belirlenerek daha verimli sonuçlar elde edilebilecektir.

Son yıllardaki araştırmalar, araç motorlarında ve ulaşımda hidrojenin kullanılması, içten yanmalı motorların performansını artırırken emisyon ve fosil yakıtlara bağımlılığı azalttığı Le Anh ve ark. (2013) tarafından bildirilmiştir. Günümüzde, sera gazları ve karbon dioksit gibi, iklim değişikliğine ve kentsel hava kirliliğine neden olan zararlı gazları serbest bırakmayan, hidrojen yakıt hücreli araçlar, içten yanmalı motorlu araçlar (ICEV) yerine, teknoloji ve çevre dostu, daha gelişmiş olan HFCV'ler tercih edilmeye başlandığı Walker ve ark. (2015) tarafından ifade edilmiştir. HFCVs, batarya elektrikli araçlar (BEVs) ve içten yanmalı motorlarla (ICE) yüksek enerji verimliliği ile birlikte çok daha düşük emisyonlarla ve uzun batarya şarj süresi olmadan daha uzun sürüş mesafesi ile rekabet edebilir. Yakıt içerisindeki serbest enerjiyi yanma olmadan doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmek bir avantajdır. Bununla birlikte, sadece yakıt hücreleri tarafından desteklenen araçlar da ağır ve hacimli bir güç ünitesi, uzun devreye alma süresi ve yavaş güç tepkisi hem de keskin ivmelenme ile son derece büyük güç çıkışı, düşük hızlı sürüşte son derece düşük güç çıkışı gibi bazı dezavantajlar içerir. Yakıt hücresi sisteminin pik güç kaynağıyla hibritleşmesi, yakıt hücrelerinin tek başına çalışan araçların dezavantajlarının üstesinden gelmek için etkili bir teknoloji olacağı Ehsani ve ark. (2005) tarafından ifade edilmiştir. Yakıt hücresi sisteminin hibridizasyonu, yakıt hücreli elektrikli araçlar (FCEVs) ve plug-in uzatılmış menzil yakıt hücreli elektrikli PHEV veya yakıt hücresi tabanlıdır (FC-PHEV). FCEV'lerin yakıt hücresi uygulamaları ile FC-PHEV arasındaki fark, yakıt hücresinin ve bataryanın gücünü etkileyen boyuttur. Aslında, yakıt hücresi gerçek sürüş için gerekli enerjinin sadece küçük bir bölümünü sağlar ve onları şarj ederken bataryaları tahrik için gereken enerjiyi dağıtmaktadır (Oettle, 2010; Fernandez ve ark., 2016). Araç menzilin arttırmak için bataryaların ağırlık-enerji depolama problemi olan ağırlık ve boyutta doğrusal bir artış vardır (Veziroglu ve Macario, 2011). Yakıt hücreli elektrikli araçlar batarya elektrikli araçlar gibi elektrik motoruna güç sağlamak için elektrik kullanır, ancak diğer elektrikli araçların aksine, FCEV'lerin, hidrojenle beslenen yakıt hücresini kullanarak birincil elektriği ürettikleri Fernandez ve ark. (2016) tarafından ifade edilmiştir. Araç, yakıt hücresini jeneratör olarak (Şekil 2.12.) kullanmaktadır.



Şekil 2.12. Yakıt hücreli elektrikli otomobilin şematik gösterimi (FCEVs)

Bir yakıt hücresi elektrikli araç, birincil güç kaynağı olarak yakıt hücresi sistemi, batarya, elektrikli motor sürücüsü (motor ve kontrol cihazı), araç kontrolörü ve yakıt hücresi sistemi ile batarya arasındaki elektronik arayüz içerir. Gaz pedalı veya fren pedalı ve diğer işletim sinyallerinden alınan güç veya tork komutuna göre; araç kontrolörü ve batarya, aktarma organları ve yakıt hücresi sistemi arasındaki enerji akışı, motor gücü veya tork çıkışını kontrol eder. Araç keskin bir hızlanma olduğunda, hem yakıt hücresi sistemi hem de batarya elektrik motor sürücüsüne tahrik gücü sağlar. Frenleme durumunda, jeneratör olarak çalışan elektrik motoru, frenleme enerjisinin bir bölümünü elektrik enerjisine dönüştürür ve bataryaya depolar. Bu toplanan elektrik bataryada depolanır. Batarya yük gücü, yakıt hücresi sisteminin nominal gücünden düşük olduğunda, yakıt hücresinden de enerji geri yükleyebilir. Böylece, uygun bir tasarım ve kontrol stratejisi ile bataryanın asla dışardan şarj edilmesi gerekmez. (Ehsani ve ark, 2005; Fernandez ve ark., 2016). Yüksek yakıt tasarrufunu korurken BEV menzili artırmak için yaklaşımı, yakıt hücreli elektrikli araçlardan (FCEVs) farklı bir yakıt hücresi ile PHEV'de ICE'yi değiştirmektir. Böylece, yakıt hücresi tabanlı PHEV (FC-PHEV) yapısı (Şekil 2.13.) gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Yakıt hücreli-fişle şarj edilebilir hibrit aracın şematik resmi (FC-PHEVs)

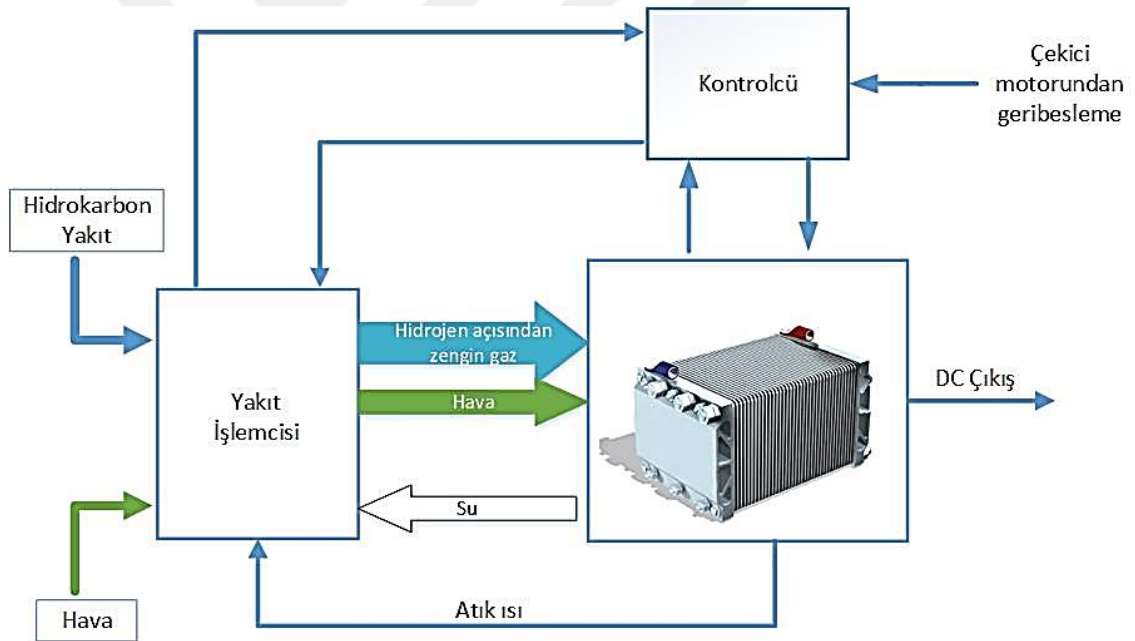
Fren enerjisinin bir bölümü elektrik enerjisine dönüştürmede kullanılır. Yakıt hücresine dayalı PHEV (FC-PHEV) 'de, yakıt hücresinin artan verimliliği, ICE tabanlı PHEV ile karşılaştırıldığında daha yüksek yakıt ekonomisi ile sonuçlanmaktadır. Dahası, FC-PHEV'in evde şarj kabiliyetine sahip olduğundan, sürüş batarya ile karşılanabilir, dolayısıyla birçok dolun istasyonları gerekmeyebilir (Brooker, 1995). Bu sistemlerin her ikisinin de denetleyicisi, yakıt hücresi sistemi, batarya ve elektrik motoru arasındaki güç akışını denetler. Denetim sonunda kontrol stratejisi aşağıdakileri sağlamalıdır (Ehsani ve ark, 2005, García ve ark, 2013);

- Elektrikli motorun güç çıkışı her zaman güç talebini karşılamaktadır.
- Bataryadaki enerji seviyesi, her zaman optimum bölgede tutulur.
- Batarya tarafından üretilen güç ve akım, şarj ve deşarj sınır değerleri arasında tutulur.
- Yakıt hücresi sistemi, optimum çalışma bölgesi içinde çalışır.
- Yakıt hücresinin dinamik tepkisi, yakıt hücresi fiziksel sınırlaması eğiminde sınırlıdır.
- Batarya yerine süperkapasitör durumunda, dinamik sınırlama olmadığı düşünülmektedir, çünkü çok hızlı bir dinamik tepki sunar.

2.3.6. Yakıt Hücresi Araçlar İçin Güç Sistemi Mimarileri

Bir yakıt hücresi DC voltaj ürettiğinden, elektrikli makinedeki DC / DC veya DC / AC dönüştürücülerle birlikte kullanılabilir (Emadi ve ark., 2006). Dahili yakıt işlemcisine sahip yakıt hücresi tabanlı elektrik sistemi Şekil 2.14'de gösterilmiştir.

Gerekli primer güç dönüşümü, aracın çekiş motoru için üç fazlı değişken AC çıkışıdır (Kalhammer ve ark., 1999; Lesster, 2000). Enerji depolama sistemi kullanımı yoksa yakıt hücresinin de kritik güç oranını maksimum değere yükseltmek gerekir. 12 V, 42 V, 140 V ve 300 V arasında ikincil dönüştürücüler de gereklidir. Klima, yakıt pompası, yağ pompası, hidrolik direksiyon, yardımcı uygulamalar ve diğer yükler bu voltajlardan beslenir. Bu cihazların gücü yaklaşık 1.5 kW'tır (Lesster, 2000). Yakıt hücresi tabanlı otomotiv güç elektronik sistemleri yaklaşık 10-15 yıl ömre sahiptir.

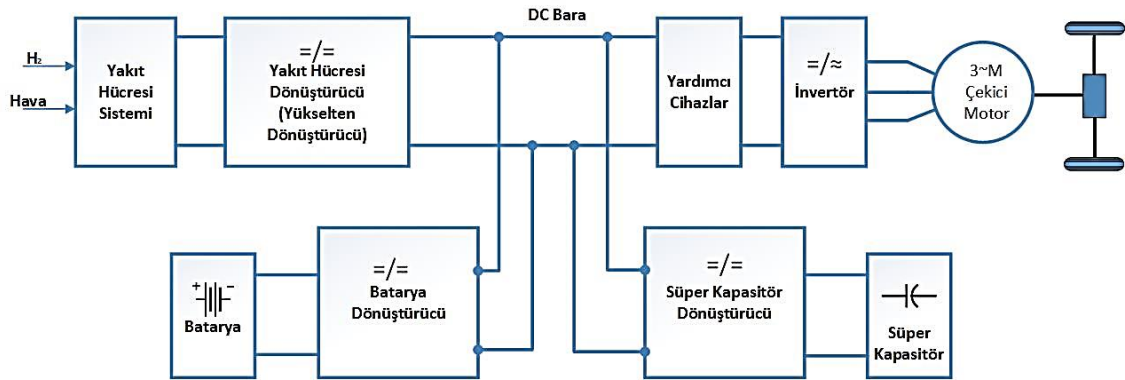


Şekil 2.14. Tipik yakıt hücresi tabanlı elektrik sistemi

Yakıt hücresi yığını ile DC / AC invertör kademesi arasında ek bir güç elektroniği, DC / DC yükseltici dönüştürücü de gereklidir (Lesster, 2000). Olası bir diğer düzenleme, DC bağlantı voltajı, gerekli inverter çalışma voltajının, yani yaklaşık 400 V'un altındaysa, 60 Hz'lik bir çıkış transformatörü ve daha yüksek akımlı çıkış frekans çeviricisinin kullanılmasını gerektirir. Genel olarak, DC-Link gerilimleri 400-V

aralığında, yaklaşık 100 kW'a kadar güç seviyeleri için, güç dönüştürme bileşenleri maliyet açısından olumludur (Emadi ve ark., 2006).

Yakıt hücresi çıkış gücü, pompalar, üfleyci motorları, motor tahrikleri vb. işletme yüklerinin yakıt hücresi sistemi dengesine güç sağlamak için de kullanılır. Bu konfigürasyon ayrıca, transit otobüsler gibi ağır araçlar için de kullanılabilir (Emadi ve ark., 2006). Yüksek güçlü bir hibrit elektrikli taşıt için örnek topoloji Şekil 2.15'de gösterilmektedir. Bu topolojide, hibrid araç, yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitör ile güçlendirilir; bu enerji kaynaklarından her birinin çekiş standardı DC bus'a bağlayan bir DC / DC dönüştürücüsü vardır. Ayrıca, hibrid araç, elektrikli çekiş motor tahriklerinden, çekiş tahriklerinden bağımsız (örneğin başta klima olmak üzere) bir yardımcı servis modülü, fren direnci ve bir enerji yönetim sistemi'den oluşur (García ve ark., 2013). Yakıt hücresi, hibrit elektrikli taşıtın birincil enerji kaynağıdır. FC tarafından sağlanan düşük DC voltajı, çekiş standardı DC bus'a yükselten boost tipi tek yönlü DC / DC dönüştürücüye bağlanır (Bauman ve Kazerani, 2008).



Şekil 2.15. Yüksek güçlü hibrit elektrikli taşıtın konfigürasyonu

2.5. Elektrikli Araçların Genel Sınıflandırılması

Elektrikli araçlar, motor sürücüsü, denetleyici ve batarya takımıyla çalışan elektrik motoruyla tahrik edilir. Elektrikli motorların içten yanmalı motorlara kıyasla çok sayıda faydaları vardır;

- Elektrik motorları, tekerleklere güç sağlamak için bataryaların kimyasal enerjisinin %85'ine kadarını dönüştürür,

- EV'ler sıfır kirletici bırakır. Elektrik enerjisi üreten elektrik santrali fosil yakıtlar kullanıyor olabilir ve emisyon üretebilir, emisyon kaynakları, emisyonun daha etkin kontrol edilebildiği yerlere, sokaklardan merkezi bir yere çekilmiş olur,

- Elektrik enerjisi gerçekten sıfır emisyon hidro, güneş ve rüzgar gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilir,

- Elektrik motorları daha yumuşak ve daha sessiz çalışma sağlar, daha az bakım gerektirir,

- Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi elde etme imkânı fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır.

Bununla birlikte, elektrikli araçlar, dahili enerji depolama (bataryalar) ile ilgili aşağıdaki dezavantajlara sahiptirler (Anonymous, 2017):

- EV'ler daha kısa sürüş aralığına sahiptir: normal olarak tam şarjla 100 ila 200 km ile sınırlıdır, ancak birkaç model 300 ila 400 km arasında yol alabilir,

- Yeniden şarj süresi: batarya paketlerinin tam şarj olması dört ila sekiz saat gerektirir. Kapasitesinin %80'i hızlı şarj ile yaklaşık 30 dakika sürer,

- Birden çok üniteyi içeren batarya takımının, çok pahalı olması ve daha sonra değiştirilmesi gerekir,

- Batarya paketleri araçta büyük alan kaplarlar hem de çok ağırlık oluştururlar (Mohd ve ark., 2013).

EVs'in konfigürasyonu, ICEV ile karşılaştırıldığında oldukça esnektir. Bu esneklik, EVs'e özgü faktörlere bağlıdır (Chan ve Chau, 2001; Szumanowski, 2000). Birincisi, EVs'deki enerji akışı sert ve mekanik bağlantılar yerine esnek elektrik kabloları ile gerçekleşir. İkinci olarak, farklı EVs tahrik düzenekleri sistem konfigürasyonunda önemli farklar içerir. Üçüncüsü, farklı EVs enerji kaynakları (bataryalar ve FC'ler gibi) farklı özelliklere ve farklı yakıt ikmal sistemlerine sahiptir (Chan, 2002).

EV tahrik düzenekleri, batarya elektrikli araçlar (BEV), hibrit elektrikli araçlar (HEV'ler) ve yakıt hücreli elektrikli araçları (FCEV'ler) temelinde konfigürasyonlarda yapılır. EVs, kapsamlı ve karmaşık yönler içeren disiplinler arası konudur. Elektrikli üç tür aracın temel özellikleri Çizelge 2.3.'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. BEV, HEV ve FCEV'in özellikleri (Chan, 2002)

EV türleri	Batarya EV	Hibrit EV	Yakıt hücreli EV
Tahrik	Elektrik motoru sürücüler	Elektrik motoru sürücüler İçten yanmalı motorlar	Elektrik motoru sürücüler
Enerji sistemi	Batarya Ultrakapasitör	Batarya Ultrakapasitör ICE jeneratör ünitesi	Yakıt hücreleri
Enerji kaynağı & Altyapı	Elektrik şebekesi şarj tesisleri	Benzin istasyonları Elektrik şebekesi şarj tesisleri (İsteğe bağlı)	Hidrojen Metanol veya benzin Etanol
Özellikler	Sıfır emisyon Ham petrol bağımsızlığı 100-200 km kısa mesafe Yüksek başlangıç maliyeti Ticari olarak uygun	Çok düşük emisyon Uzun sürüş mesafesi Ham petrol bağımsızlığı Karmaşık Ticari olarak uygun	Sıfır emisyon veya ultra düşük emisyon Yüksek enerji verimliliği Ham petrol bağımsızlığı Memnun sürüş aralığı Yüksek maliyetli şimdi geliştirilmekte
Önemli konular	Batarya ve batarya yönetimi Yüksek performanslı tahrik Şarj tesisleri	Birden çok enerji kaynağı yönetme Sürüş döngüsüne bağlı Batarya boyutlandırma ve yönetimi	Yakıt hücresi maliyeti Yakıt işleme Yakıt doldurma sistemi

Hibrit elektrikli araçlar Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) bünyesinde bulunan 69 nolu Elektrikli Karayolu Araçları Teknik Komitesinin tanımına göre hibrit karayolu aracı belirlenen bir fiili görev esnasında tahrik enerjisini iki ya da daha fazla çeşit enerji deposu, kaynağı ya da dönüştürücüsünden sağlayan araçtır ve bu iki depo ya da dönüştürücülerden en az biri araç üstünde olmalıdır. Özetle en az bir enerji kaynağı, deposu ya da dönüştürücüsü elektrikli olan araçlar hibrit elektrikli araç olarak tanımlanmaktadır (Husain, 2003).

Hibrit elektrikli araç teknolojisindeki ana fikir, içten yanmalı motoru, tasarlandığı en verimli noktalarda çalıştırmak, çalıştıramıyorsa durdurma şeklinde uygulanır. Ayrıca konvansiyonel araçlarda ısı olarak ortaya çıkan frenleme enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürerek bataryalara depolanabilmesi verimliliğe olumlu katkı sağlamaktadır. Bu durum diğer, batarya ve ultrakapasitör hibriti, batarya ve ultra yüksek hızlı volan hibriti ve FC-batarya hibriti içinde geçerlidir. Ancak mevcut durumda batarya ömürleri sektör beklentilerini karşılayacak seviyeye gelmemiş, sistem karmaşıklığı ve enerji dönüşümleri esnasında kayıplar bulunmaktadır (Husain, 2003).

Hibrit elektrikli araçta CHG deposu, hızlı yakıt ikmali yeteneği ile hafif, düşük maliyetli ve olgun bir teknoloji olmanın avantajlarını sunar ancak büyük boyut ve

güvenlik kaygılarından etkilenir. Sıvı hidrojen, hem yüksek spesifik enerji hem de hızlı yakıt ikmali yeteneği sunar, ancak pahalı üretim ve dağıtım maliyetlerinin yanı sıra yüksek uçuculuk dezavantajlarına sahiptir. Metal hidritler, kompakt boyut ve doğal emniyet avantajlarını sağlayabilmelerine rağmen, magnezyum hidrid (287 °C) gibi aşırı yüksek çözünme sıcaklığına veya nispeten düşük Vanadyum hidrid (700 Wh / kg) gibi özgül enerjidir (Chan, 2002).

Bu nedenle hibrit elektrikli araçlarda her bir alt sistem veriminin maksimizasyonu sağlanmalıdır (Husain, 2003).

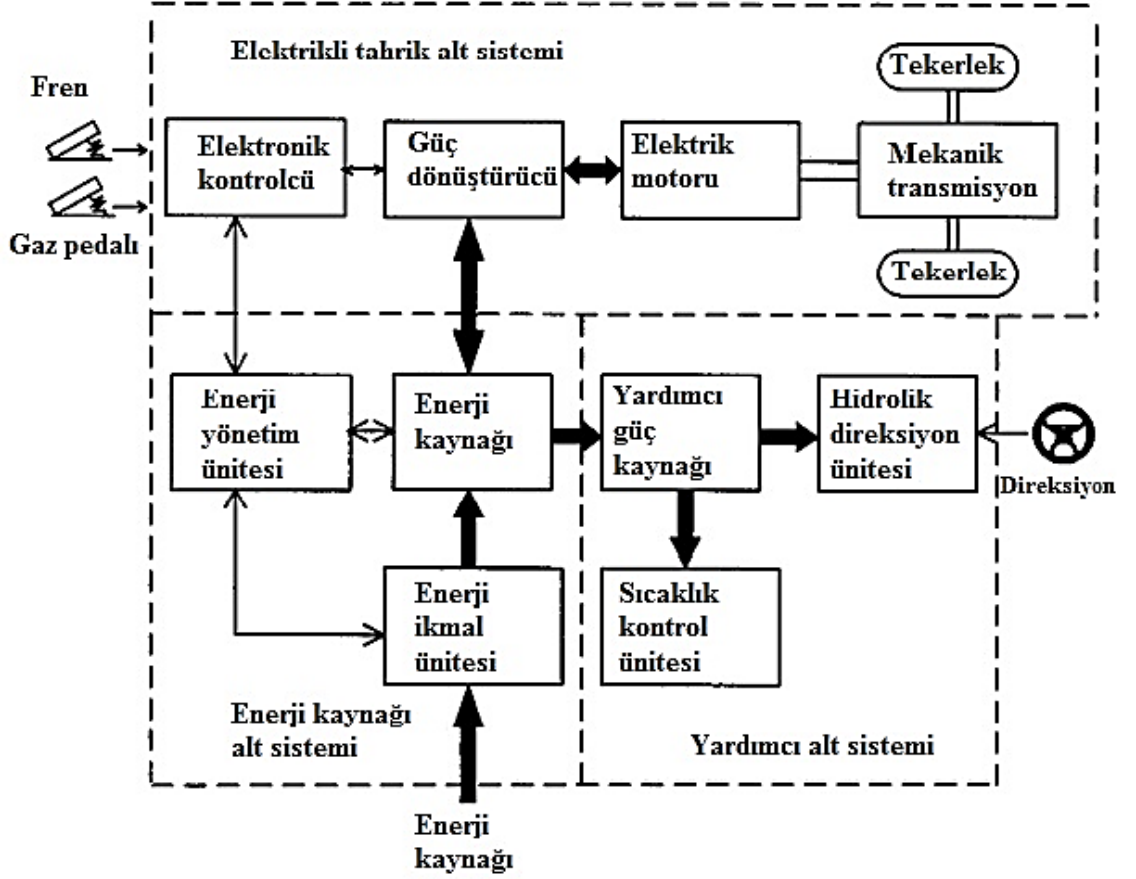
2.6. Hibrit ve Elektrikli Araçlarda Enerji Yönetimi

Hibrit ve elektrikli araçlar, farklı çalışma koşullarında enerji kaynağından hızla değişen miktarlarda voltaj talep etmektedir. Bu değişikliğin yönetilmesi ve oluşan enerji talebini, gerekli yere sevk edilebilmesi için bir Enerji Yönetim Sistemine ihtiyaç duyulmaktadır.

Günümüz içten yanmalı motor kullanan araçlarda elektronik kontrol ünitesi (ECU) kullanılmaktadır. Bu ünite, batarya SOC (şarj durumu) bilgisi, araç hızı, gaz pedalı konumu, fren pedalı gibi aldığı bilgilere göre elektrik motoruna ve içten yanmalı motora gerekli moment sinyal bilgilerini yollayan bir sistemdir.

Elektrikli ve hibrit araçlarda enerji yönetim sistemi geliştirilirken;

- 1- Batarya yönetim sistemi ile iki yönlü haberleşme,
 - 2- Araç kullanım ve enerji tüketim kayıtlarını tutma,
 - 3- Harcanan güç ve araç hızlanmasının gerçek zamanlı takibi,
 - 4- Güç talebini gerçek zamanlı izleyebilme,
 - 5- ICE start-stop kararını verebilme, çalışırken optimum verimle çalıştırabilme, ilave güç gerektiğinde elektrik motoru ile sağlama, motordan çekilen güç azaldığında artan enerji ile bataryaları şarj edebilme,
 - 6- Kullanıcıyı, araç ile ilgili gerçek zamanlı bilgilendirme ve uyarabilme,
 - 7- Kullanım rejimine bataryaların şarj dengesini muhafaza edebilme ve sürücüyü uyarabilme, akıllı zekâ algoritmaları ile bataryaların kontrolünü sağlayabilmedir.
- Enerji Yönetim sisteminin hibrit araçlardaki diğer ünitelerle haberleşmesi Şekil 2.16.'da verilmiştir.



Şekil 2.16. Hibrit araçlardaki enerji yönetim sisteminin diğer ünitelerle haberleşmesini gösteren diyagram (Chan, 2002)

EV bileşimi, üç ana alt sistemden (elektrikli tahrik, enerji kaynağı ve yardımcı) oluşur. Elektrikli tahrik alt sistemi, elektronik kumanda, güç dönüştürücü (invertör), elektrik motorunu içerir. Enerji kaynağı alt sistemi enerji kaynağı, enerji yönetim birimi ve enerji dolum ünitesini içerir. Yardımcı alt sistem, hidrolik direksiyon ünitesi, sıcaklık kontrol ünitesi ve yardımcı güç kaynağını içerir (Chan, 2002).

2.6.1. Elektrikli Tahrik Alt Sistemi

Bir elektrikli aracın tork, hız (akım) kontrolünde sistemi oluşturan birimlerin analizi ve istenilen değerlerde olması için sistemin geri beslemeli çalışması gerekmektedir. Basit bir ifade ile elektrikli araçların güç devresi elektronik kumanda, güç dönüştürücü (invertör) ve elektrik motorununun meydana getirdiği ana yapıdan oluşmaktadır.

Elektrik Tahrik Motoru

Motor, elektrik enerjisinin kinetik enerjiye dönüştürülmesinde kullanılır. Makineye beslenen giriş gücüne bağlı olarak AC veya DC motor olabilir. Elektrikli araçlar için kullanılan yaygın motorlar arasında indüksiyon motorları, daimi mıknatıslı fırçasız motorlar ve anahtarlı relüktans motorları sayılabilir. Anahtarlamalı relüktans motorları, basit ve sağlam yapıya, basit kontrole ve yüksek hıza sahiptir. Bununla birlikte, bu motor tipi gürültüdür ve sabit mıknatıslı motorlara kıyasla daha düşük bir verimliliğe sahiptir. İndüksiyon motorları, basit yapı ve düşük bakım ve maliyet ile zor ortamlarda çalışma kabiliyeti nedeniyle güvenilirdir ancak bu motor tipi daimi mıknatıslı motorlara kıyasla daha düşük bir verimliliğe sahiptir. Daimi mıknatıslı fırçasız DC motorlar ısıyı çevresine verimli bir şekilde dağıtmakta ve imalat hatalarına veya aşırı ısınmaya maruz kalmamaktadır. Bu nedenle, bu motor tipi daha yüksek bir verimliliğe sahiptir ve çoğunlukla elektrikli araçlarda kullanılır (Lungoci ve ark., 2012). Bununla birlikte, daimi mıknatıslı fırçasız DC motorlar pahalıdır ve mekanik mukavemeti büyük momentleri teşvik etmemektedir (Grilo, 2012). Kullanılan diğer bir motor türü de doğru akımlı fırçasız motor, ancak bu motor tipi, çıkış enerjisinin fazını değiştirmesi için elektrik dönüştürücüsüne ihtiyaç duyar (Liu ve ark., 2010; Sulaiman ve ark., 2015).

Çizelge 2.4. Farklı motor tiplerinin karşılaştırılması (Kuşdoğan, 2009)

	Asenkron Motor	Daimi Mıknatıslı Motor	Anahtarlamalı Relüktans Motor	DC Motor	Senkron Motor
Motor boyut kütle	0	+	0	-	0
Yüksek Hız	+	+	+	-	-
Dayanıklılık/Bakım	+	0	+	-	-
Verim	0	+	0	-	0
Kontrol edici boyut kütle	0	0	0	+	0
Kontrol edilebilirlik	+	+	-	+	0
Güç aletleri sayısı	0	0	+	+	0
Dayanıklılık	0	0	0	0	0
Toplam	+++	++++	++	-	-

Yakıt Hücreli Enerji Kaynağı

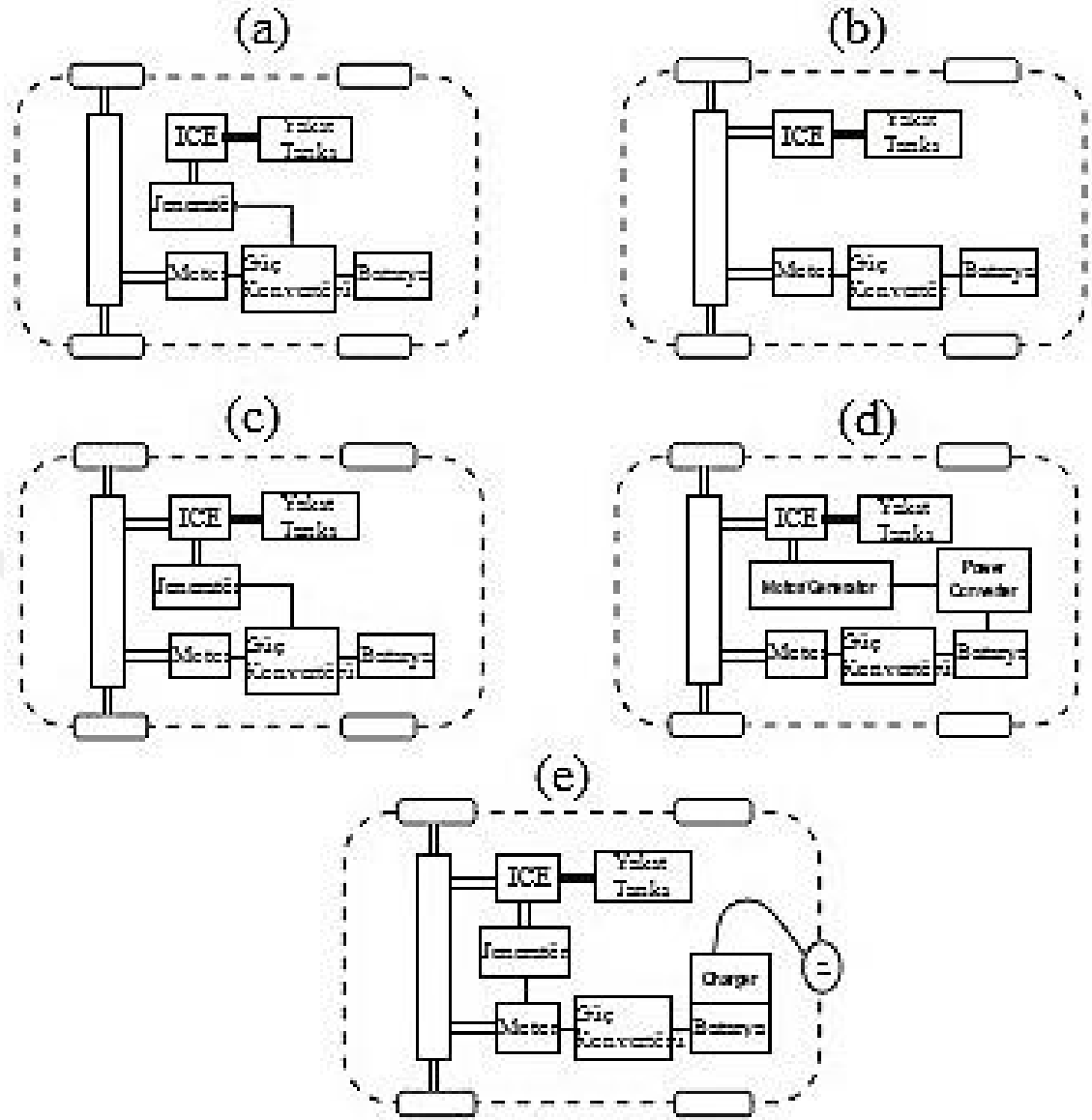
Ortalama bir yakıt hücresi güç yoğunluğu 200Wh/l'tir. Yani, batarya güç yoğunluklarının 10 katıdır. Bu imkânı elektrikli araçlarda güç kaynağı olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Çevreci, yüksek verimli enerji kaynağı olarak umut

vermesiyle birlikte yakıt hücresi güç sistemi kurulumunun yüksek maliyeti, yaygın kullanımını sınırlayan temel sebeplerden biri olduğu (Kulaksız ve Akaya, 2004) tarafından ifade edilmiştir.

Batarya beslemeli elektrikli araçlarda gerekli olan saatlerce batarya şarj süresi yerine, yakıt hücreli araçlar konvansiyonel araçlara gibi birkaç dakikada yakıt istasyonunda depolanabilmektedir. Yakıt hücreli araçların tek depo ile gidebileceği menzil kullandığı yakıt tipine bağlıdır. Metanol hidrojen taşıyıcı olarak kullanıldığında menzili konvansiyonel araçlarla başabaştır. Eğer hidrojen yakıt olarak kullanılırsa, hidrojenin enerji yoğunluğu daha olduğundan menzil daha kısa olur. Yakıt hücreli araçların bu menzili alabilmesi, yüksek dirençli hafif malzemeli depoya hidrojeni yüksek basınçta sıkıştırması ile mümkün olabilir. Soylu ve ark., (2004), 400 km'lik bir menzil için gerekli hidrojen, 500 atmosferde karbon fiber kaplı 132-152 lt ve 82 kg ağırlığındaki alüminyum depo ile sağlandığını bildirmiştir.

Yakıt hücreleri, içten yanmalı motorlar ve bataryalar aynı genel amaca yönelik çalışırlar yani hepsi de enerjiyi bir formdan başka bir forma dönüştürürler. İçten yanmalı motorlar, yakıtın havadaki oksijenle yakılarak kimyasal enerjinin tahliyesi sonucunda yüksek sıcaklıktaki patlamalar yüzünden gürültülü çalışırlar. Klasik olarak içten yanmalı motorlar, bir güç üretim tesisinde yakıtın kimyasal enerjisinin ısı enerjisine dönüştürülerek mekanik bir enerji üretimi ve elektriksel bir gücün eldesinde kullanılırlar.

2010 yılı üretim raporlarına ilişkin olarak yakıt hücreleri piyasası %40 oranında büyümüş, Bunların %95'i portatif yakıt hücresini, %97'si PEMFC yakıt hücreleri teknolojisini kullanmıştır. Bu önemli hedef yakıt hücresi teknolojisinin çok yönlü kullanımı ile bağlantılı olarak açıklanabilir; aslında, bataryalardan içten yanmalı motorlara kadar yerden ısıtmadan cep telefonu şarj cihazlarına ve otomobillere bir dizi güç kaynağını değiştirebilir. Dahası, yakıt hücreleri hidrojen kaynağı olarak herhangi bir yakıtı da kullanabilir. Bu teknoloji için, mevcut doğal gaz altyapısına doğrudan atık hidrojenin işlenmesi ve biyo-metanın kullanılması büyük olanaklar sunabilir. Özellikle taşınabilir sektör, mikro-portatif yakıt hücrelerinin büyümesiyle birlikte en büyük pazarlardan olup, tedarik edilen küresel gücün sadece %2.6' sını temsil etmektedir (Lucia, 2014).

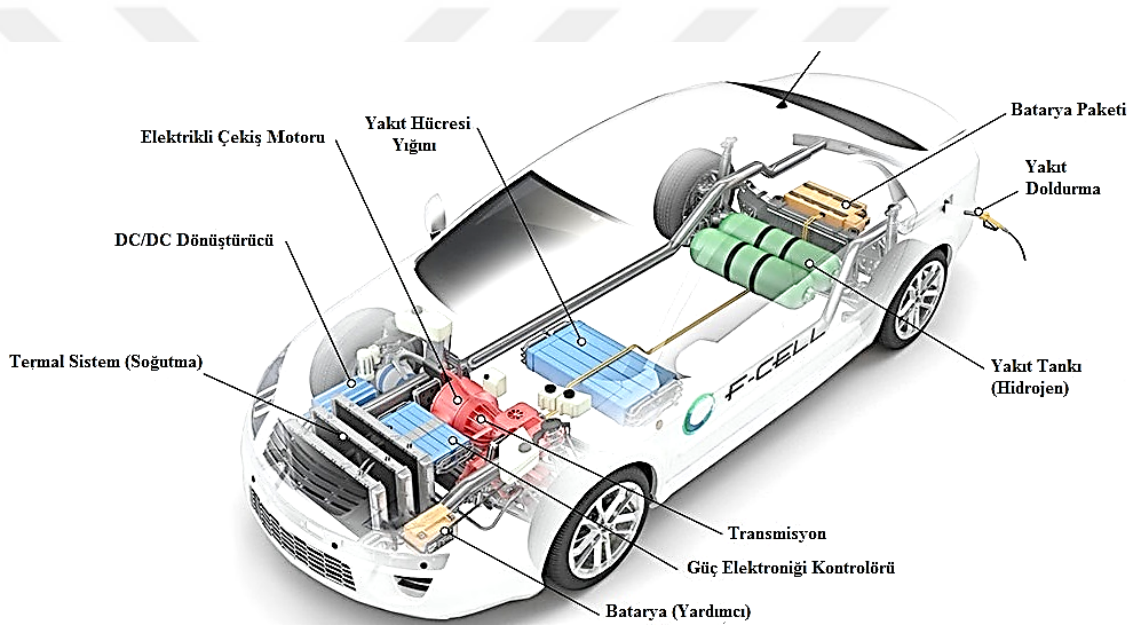


Şekil 2.17. HEV ve PHEV'in mimarilerinin tahrik dizileri (Tie ve Tan, 2012)

Yakıt hücreleri ve bataryalar elektrokimyasal aygıtlar olup kimyasal enerjiyi direkt olarak elektrik enerjisine dönüştürürler. Bu yüzden verimleri daha yüksektir. İçten yanmalı motorlarda ise ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümü söz konusudur ve bu dönüşüm Carnot çevrimiyle sınırlı olduğundan verimleri daha düşüktür.

Dünya üzerinde pek çok kişi tüm elektrikli taşıtların bataryalarla çalıştığı gibi yanlış bir varsayıma sahiptir. Oysaki gerçekte elektrikli bir taşıt ya bataryalarla ya da yakıt hücreleri ile çalışmaktadır. Batarya ve yakıt hücrelerinin ortak yönleri ise; her ikisi de kimyasal enerjiyi, hareketli parçalarının olmayışı sebebi ile yüksek bir verimde

elektrik enerjisine dönüştürmesi ve minimum bakım masrafı gerektirmeleridir. Elektrikli taşıtlarda depolama elemanı olarak şarj edilebilir bataryalar kullanılmaktadır. Yakıt hücresi ile çalışan elektrikli taşıtlarda ise yakıt, araç yakıt tankında harici olarak depolanırken gerekli olan hava ise atmosferden temin edilir. Bu tür uygulamalarda elektrokimyasal aygıtın batarya mı yoksa yakıt hücresi mi olacağına seçimi uygulamanın özelliklerine bağlı olarak seçilmelidir. Geniş ölçekli uygulamalarda yakıt hücreleri bataryalara göre daha avantajlıdır. Örneğin; küçük hacimli boyutları sayesinde daha az yer kaplamaları, daha hafif olmaları, hızlı bir biçimde yakıt beslemesi yapabilmeleri ve uzun ömürlü olmaları bu tür uygulamalarda yakıt hücrelerini bataryalara göre daha avantajlı kılmaktadır.



Şekil 2.18. Yakıt hücreli aracın temel bileşenleri (Anonymous, 2017b)

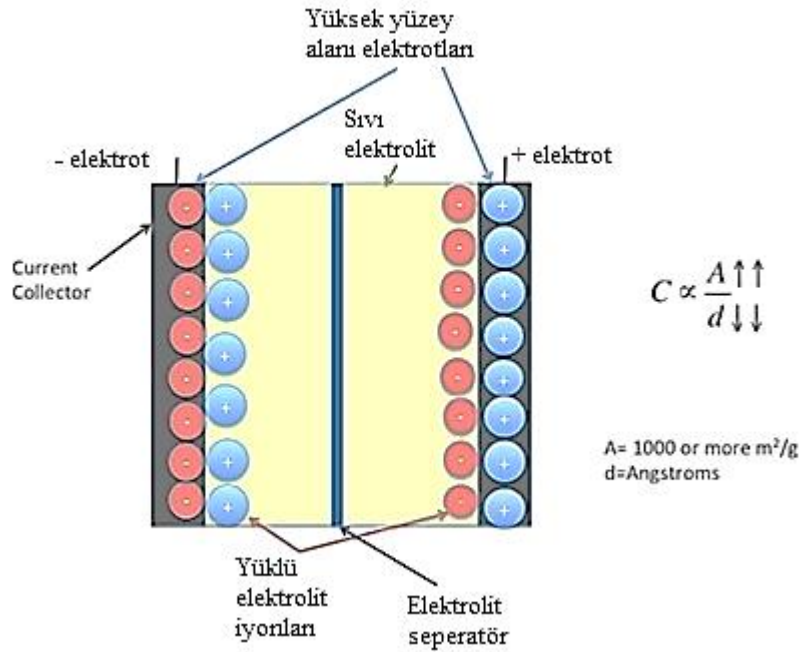
Süperkapasitör

EV'lerin sık sık start-stop operasyonu nedeniyle, bataryanın deşarj profili oldukça değişkendir. Bataryanın ihtiyaç duyduğu ortalama güç nispeten düşükken ivme veya yokuş için gereken kısa süreli tepe gücü çok daha yüksektir (Chan, 2002).

Ana enerji kaynağı kullanılırken, hızlanma ve tepe gücü için yardımcı enerji kaynağı ürünü optimize edilmiştir. Bu yardımcı kaynak, yük geçişlerinde, bataryadan çok daha hızlı tepki veren ve frenlemesi sırasında şebeke geri besleme ile şarj edilebilen

ultrakapasitördür (Burke, A., 2000). Elektrokimyasal çift tabakalı kapasitör (EDLC) olarak da bilinen süperkapasitörler veya ultrakapasitörler, yüksek enerji yoğunluğuna sahip kapasitörlerdir.

Kapasitörlerde yükler pozitif ve negatif plakalar üzerinde depolanırken, süperkapasitörlerde yükler elektrot ve elektrolit arasındaki boşluklarda depolanır. Delikli yapıdaki karbon bazlı elektrotlar, çok yüksek yüzey alanı (>2000 m²/g) ve çok ince dielektrik malzemesi de elektrotlar arası mesafenin küçülmesini sağlar. Bu özellikler sayesinde, çok küçük boyutlarda oldukça büyük kapasitelere ulaşabilmektedir. Süperkapasitörler, seri ve paralel bağlanarak mili amper akımlardan veya mili watt güçlerden, yüzlerce amper akım ya da yüzlerce watt güçlere kadar endüstrinin birçok alanında kullanılabilir. Şekil 2.19'da süperkapasitör şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.19. Süperkapasitör şeması (Winter ve Brodd, 2004)

Bataryalara göre enerji yoğunlukları daha düşüktür. Ancak deşarj süreleri ve hızlı çevrim ömrü (faydalı şarj yeteneği korunarak mümkün olan şarj ve deşarj çevrimi sayısı) daha fazladır. Süperkapasitörler, ivmelenme ve yokuş çıkma gibi ani güç gereksinmelerinde bataryalara yardımcı enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Ultrakapasitör, son derece düşük spesifik enerjisinden dolayı EVs'ler için tek enerji

kaynağı olarak kullanılması mümkün gözükmemektedir değildir. Bununla birlikte, EVs'ler için batarya ve ultrakapasitör birlikte kullanılır ve hibrit enerji sistemi olarak adlandırılır. Dolayısıyla, EVs enerji kaynağı, spesifik enerji ve spesifik güç gereksinimi ayrı ayrı sağlamış olur. Spesifik güce daha az önem verilmek üzere tasarlanan batarya, spesifik enerji ve döngü ömrü için optimize edilme fırsatı bulur. Ultrakapasitörün yük düzeltme etkisinden dolayı, bataryadan gelen yüksek akım deşarjı en aza indirgenir, böylece hücrenin dayanıklılığı ve ömrü önemli ölçüde arttırılmış olur.

Çizelge 2.5. Süperkapasitör ve Li-ion arasındaki performans karşılaştırması (Gidwani ve ark.,2014)

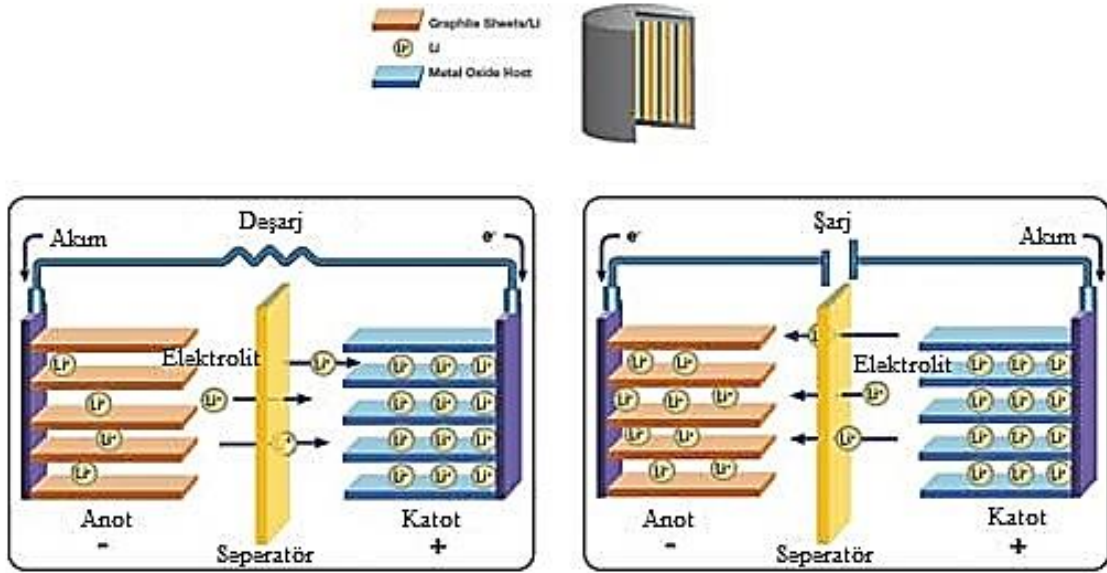
Fonksiyon	Süperkapasitör	Lityum-iyon (Genel)
Şarj süresi	1-10 saniye	10-60 dakika
Çevrim ömrü	1 milyon veya 30000 saat	500 ve daha yüksek
Hücre voltajı	2.3 ile 2.75 V	3.6 V nominal
Özgül enerji (Wh/kg)	5 (tipik)	120-240
Özgül güç (W/kg)	10.000'e kadar	1000-3000
kWh başına maliyet	20\$ (tipik)	0.50\$-1.000\$ (büyük sistem)
Servis ömrü (endüstriyel)	10-15 yıl	5 ile 10 yıl
Şarj sıcaklığı	-40 ile 65 °C (-40 ile 149 °F)	0 ile 45 °C(32 ile 113 °F)
Deşarj sıcaklığı	-40 ile 65 °C (-40 ile 149 °F)	-20 ile 60 °C (-4 ile 140 °F)

Bununla birlikte ultrakapasitör, batarya ile karşılaştırıldığında, EVs'lerin rejeneratif frenlemesi esnasında çok çok düşük sıcaklıkta, daha hızlı ve daha verimli bir enerji geri kazanımı sağlayabilir. Böylece, yük dengeleme ve verimli enerji geri kazanımının kombine etkisi ile araç menzili önemli miktarda arttırılabilir. Yakıt hücresi, ultrakapasitör, elektrikli motoru ve güç dönüştürücüsünün koordine edilmesi için sistem entegrasyonu ve optimizasyonunun yapılması gerekir.

Batarya Enerji Kaynağı

Bataryalar kimyasal enerjiyi elektrik enerjisi olarak depolayan cihazlardır. Batarya da bir hücre, pozitif ve negatif elektrotlardan ve elektrotları birbirinden ayıran ayırıcıdan oluşur. Elektrik enerji depolama kapasitesi bakımından Lityum-iyon bataryalar üç kat, NiMH bataryalar iki kat, kurşun-asit bataryalardan daha yüksektir. Yüksek sıcaklık bataryalarının (sodyum nikel klorür, lityum-demir sülfür, sodyum-sülfür) elektrik enerji depolama kabiliyetleri yüksek olmasına karşın, karmaşıklığı ve yüksek çalışma sıcaklığı (300-450 °C) sebebiyle kullanılması zordur. Lityum iyon bataryalar, elektrikli araçlar

ticari olarak üretilebilir hale getirmiştir. Yüksek hücre voltajı (3,6 V) ile kullanım kolaylığı, ömürleri, enerji yoğunluğu (100-125 Wh/kg) ve hacimsel yoğunluğu ile birlikte çeşitli tasarım problemlerinin aşılmasına katkı sağlamıştır. Şekil 2.20’ de Li-ion hücrenin deşarj ve şarj çalışması verilmiştir.



Şekil 2.20. Li-ion hücrenin deşarj ve şarj işlemi sırasında çalışması (Anonymous, 2017c)

Bataryalar, EVs için ana enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Otomotiv sektöründe özellikle batarya elektrikli ve hibrid elektrikli araçların önündeki en büyük engellerden biri elektriğin depolanmasıdır. Bataryaların ömürleri, şarj süreleri ve geri dönüştürülmelerinin beklentileri karşılaması için çalışmalar sürdürülmektedir. Batarya gelişme kriterleri şu şekilde özetlenebilir (Chan, 2002).

- 1) yüksek özgül güç (kWh / kg) ve güç yoğunluğu (kW / L),
- 2) yüksek spesifik enerji (kWh / kg) ve enerji yoğunluğu (kWh / L),
- 3) hızlı şarj ve ağır boşaltma özellikleri,
- 4) güvenlik ve maliyet etkinliği,
- 5) uzun döngü ve hizmet ömrü,
- 6) kendi kendine deşarj oranı ve yüksek şarj verimliliği,
- 7) çevreye duyarlı ve geri dönüşümlü,
- 8) bakım gerektirmez.

DC-DC Konvertör

Belli bir seviyedeki DC gerilimi istenilen seviyede DC gerilime dönüştürür. Bu konvertörlerin yükselten (boost), düşüren (buck) ve hem yükselten hem düşüren (buck-boost) olmak üzere farklı yapılarda çeşitleri vardır. Sistemde kullanılan bataryanın belli bir gerilim seviyesinde şarj edilmesinin gerekliliği DC-DC konvertör kullanımını zorunlu hale getirmiştir.

DC-AC İnvertör

DC kaynaklardan gelen DC gerilimi, AC elektrik motorlarını çalıştırmak için; DC gerilimi AC gerilime çevirir. Bu AC gerilim seviyesi invertörün girişindeki DC gerilimin seviyesine bağlıdır.

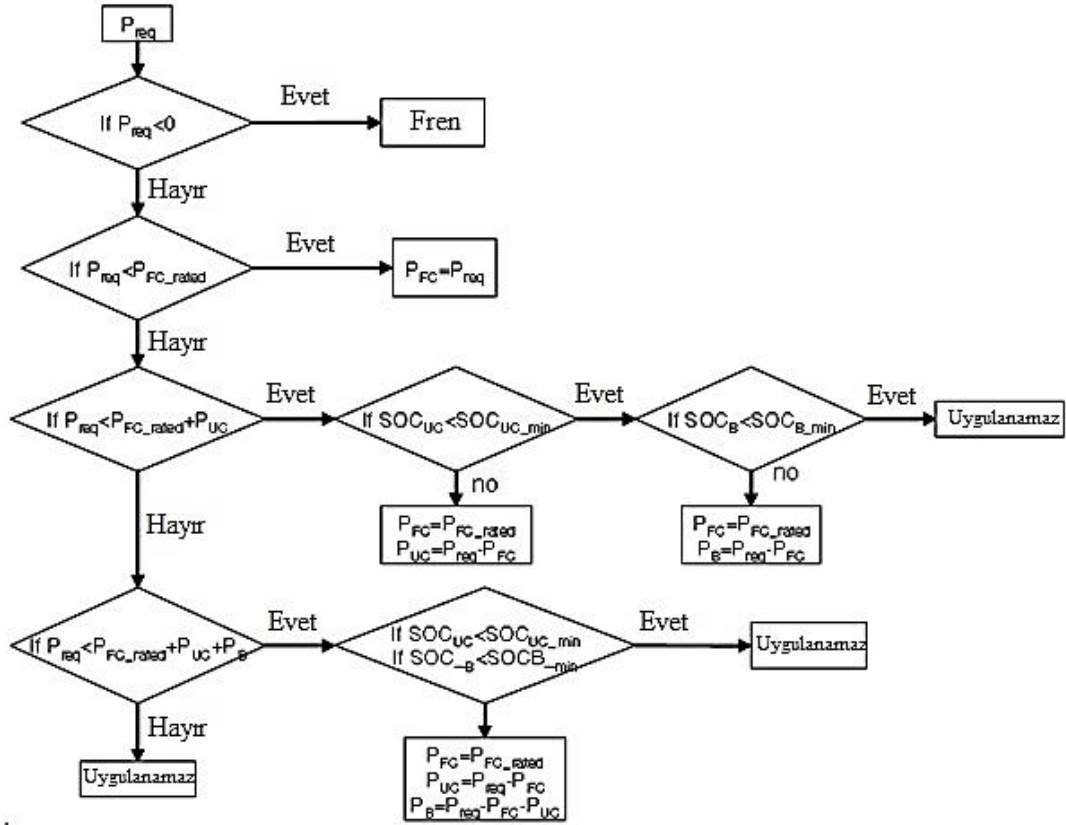
İnvertörler yapısında bulunan anahtarlama elemanlarını kontrol devresinden gelen sinyallerle kontrol ederek DC gerilimi AC gerilime dönüştürürler. Bu kontrol devresinde giriş sinyali olarak 3 fazlı motorun akım bilgisi, invertörün DC giriş gerilim bilgisi ve motorun güç değerlerinin bir PI tabanlı kontrolcüden geçerek, çıkışta invertörlerin anahtarlarını tetiklemek için kullanılan PWM sinyali üretilir. Bu PWM sinyali motorun akım ve güç değerlerine göre üretildiği için, motorun tork kontrolünü sağlar.

2.6.2. Enerji Kaynağı Alt Sistemi

Enerji depolama sistemi olarak yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitör kullanan elektrikli araçlar, hem enerji verimliliği hem de yakıt tasarrufu olarak geleneksel araçlardan çok farklı yere sahiptir. Bir araçta birden fazla enerji kaynaklarının kullanımı bir kontrol stratejisi kullanmayı gerektirir. Yakıt hücresi aracın sürüş menzili, batarya elektrikli araca karşı avantaj sağlarken, güç paylaşımı ve şarj stratejisi bataryaların daha fazla enerji yoğunluğu, süperkapasitörlerin de daha yüksek güç yoğunluğu avantajlarına dayanır (Thounthong ve ark., 2014).

Aracın istediği güç, sırasıyla yakıt hücresi, süperkapasitör, batarya gibi güç kontrol elektronikleri tarafından sağlanır. Çekiş için yakıt hücresinin direkt kullanımı

enerji bakımından daha verimli olduğundan yakıt hücreleri birincil kaynak olarak kullanılır. Doğası gereği, yakıt hücresinin ömrünün uzun olması için sabit güç altında çalışması gerekir ve bu şekilde daha da verimli olur. Bununla birlikte, aracın talep ettiği çekiş gücü sürekli değişir. Bu ikisinin farkını dengelemek ve ayrıca rejeneratif enerjiyi kullanmak için, batarya, bir FC-batarya hibrid elektrikli aracın (FCHEV) enerji depolama aygıtı olarak kullanılır (Peng, 2007). Yanı sıra, süperkapasitör ile batarya karşılaştırıldığında kolay şarj ve deşarj durumlarında süperkapasitör, yüksek güç talebi durumlarında batarya enerjisi kullanılır (Wang, ve Li, 2010). Enerji kaynakları diğer bir deyişle depolama sistemleri arasındaki kontrol elektroniği tasarımı Şekil 2.21.' de gösterilmiştir.



Şekil 2.21. Enerji kaynağı alt sistemi kontrol elektroniği tasarımı (Paladini ve ark., 2007)

Güç talebi yakıt hücresi gücünden düşük olduğunda, yakıt hücresi birincil güç kaynağı olarak çalışır.

Eğer güç talebi yakıt hücresinin gücünden daha yüksek olursa nominal güç yakıt hücresinden sağlanır ve geri kalanı süperkapasitörden tedarik edilir.

Eğer güç talebi yakıt hücresinin ve süperkapasitörün toplam gücünü aşarsa, batarya devreye girer (Paladini ve ark., 2007)

Bu işlemler yapılırken, batarya ve süperkapasitör şarj durumu aralığında çalışacak şekilde ayarlanmalıdır. Batarya ve süperkapasitör düzgün şekilde şarj edilmemişse, kontrol elektroniklerinde istenmeyen koşullar oluşabilir.

Eğer güç talebi yakıt hücresi gücünden düşükse ve araç fren yapıyorsa, ikincil enerji depolama sistemi yakıt hücresinin kalan enerjisiyle doldurulabilir.

Araç zayıf yavaşlamada şarj ederken, süperkapasitörü kuvvetli yavaşlamada şarj eder. Bu yüzden kontrol elektronikleri tasarlanmıştır (Paladini ve ark., 2007). Yakıt hücresi sistemindeki kontrol elektronikleri güç devresi tasarımları, sistemin verimliliğini arttırmayı ve diğer ihtiyaçları karşılamayı hedefler. Kontrolörler, sistem tarafından üretilen enerjinin optimizasyonunu sağlarlar ve aynı zamanda yakıt hücresi ve enerji depolama sistemleri arasındaki gücü kontrol etmekle yükümlüdürler.

Hidrojen yakıt hücreli araçlarında kullanılan başlıca kontrol stratejileri şunlardır;

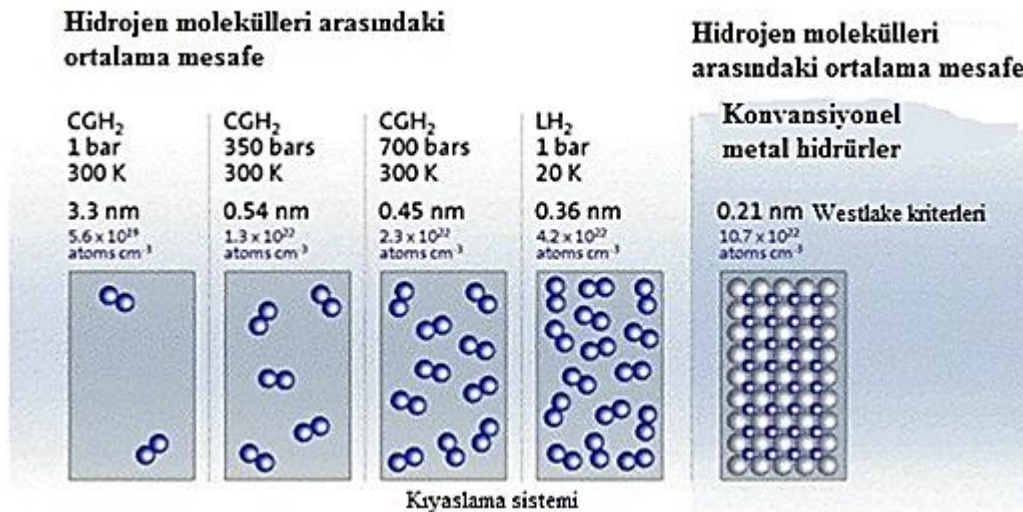
- Tepe güç kaynağı stratejisi (Peaking Power Source Strategy-PPSS)
- Çalışma modu kontrol stratejisi (Operating Mode Control Strategy-OMCS)
- Bulanık mantık kontrol stratejisi (Fuzzy Logic Control Strategy-FLCS)
- Eşdeğer tüketim azaltma stratejisi (Equivalent Consumption Minimization Strategy-ECMS)

Yakıt hücresine sahip bir araç konfigürasyonunda yakıt hücresi, tepe güç kaynağı (PPS), pedallar, çekiş motoru, araç kumandası, motor kontrolörü, elektronik arabirim, tekerlekler ve aralarındaki iletim sinyalleri bulunur. OMCS, aracın talep ettiği gücü sağlamak için yakıt hücresi ile batarya arasında güç değişimlerini kontrol eder. FLCS, DC/DC dönüştürücünün gücünü, yakıt hücresinin enerjisine göre düşük, orta veya yüksek seviyede tutmak için kullanılabilir. ECMS, yakıt hücresine ek olarak bataryalar ve süperkapasitörler gibi enerji depolama kaynaklarını kullanıldığında araç performansındaki değişiklikleri kontrol etmeye yarar.

3. ARAÇTA HİDROJEN DEPOLANMASI

Hidrojen depolama veya taşımak mevcut teknoloji ile oldukça zordur. Hidrojen ağırlığına göre iyi bir enerji yoğunluğuna ama hidrokarbonlar ile karşılaştırıldığında hacmine göre düşük enerji yoğunluğuna sahiptir. Araç yakıt sisteminin herhangi bir türü için, sürüş menzili en azından bir 500 km (300 mil) olması tercih edilir (Dutta, 2014).

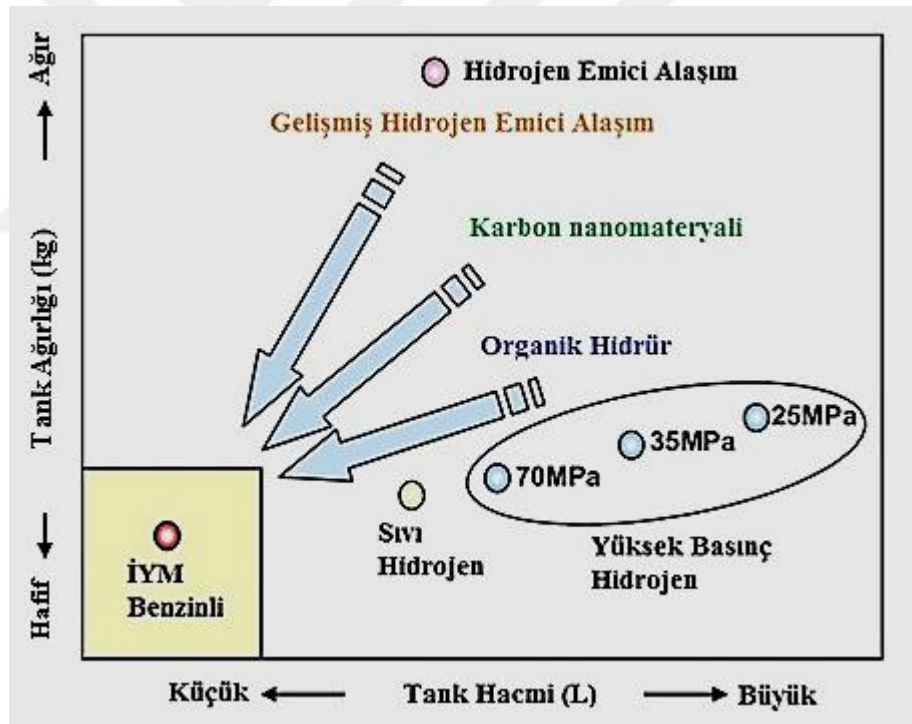
Hidrojen araç verimliliği üstün olmasına rağmen, teknoloji değişimi için uygulama engelleri oldukça fazladır. Hidrojen, kilogram başına en yüksek özgül enerjiden birine sahip olmasına rağmen yoğunluğu çok düşük ve en düşük enerji yoğunluklarından birine sahip olmasından dolayı hidrojen depolama konusunda bazı zorluklar ortaya çıkmaktadır. Bu küçük bir alan içine büyük hidrojen kütlesi almak için çok yüksek basınçların kullanılması anlamına gelir. Bu aynı zamanda, hidrojen araçlarının yakıtı depolama performansı ile birlikte, kullanılan çeşitli enerji depolama teknolojilerinin özellikleriyle de çok ilgilidir. Başka bir sorun da, diğer gaz enerji taşıyıcılarının aksine, sıvılaştırılması çok zordur. LPG veya bütanın yapılabileceği şekilde basitçe sıkıştırılmaz. Yaklaşık 22 K'ye soğutulması gerekir ve hatta 71 kg/m³ olarak sıvı halde yoğunluğu oldukça düşüktür (Larminie ve Lowry, 2012). Tankların hacimsel depolama yoğunluğunun düşüklüğü Şekil 3.1.' de görüldüğü gibi sorun teşkil etmektedir.



Şekil 3.1. Çeşitli koşullar altında hidrojenin hacimsel yoğunluğu (Ref Von Helmholt ve Eberle, 2007 tarafından uyarlanmıştır)

Basıncı hidrojen (CGH₂), hidrojenin gaz fazında basınçlı tutulmasıdır. Hidrojen tanklarında 350 bar ve 700 bar 'lık yakıt gazı olarak kullanılan CGH₂, hidrojen araçlarında mobil depolama (Hua ve ark., 2011) olarak kullanılmaktadır. Günümüzde, sıkıştırılmış hidrojenin tüm sınırlılıklarına rağmen, diğer seçeneklere göre otomotiv uygulamaları için en iyi performans ve en yüksek gelişmeye sahiptir (Von Helholt ve Eberle, 2007).

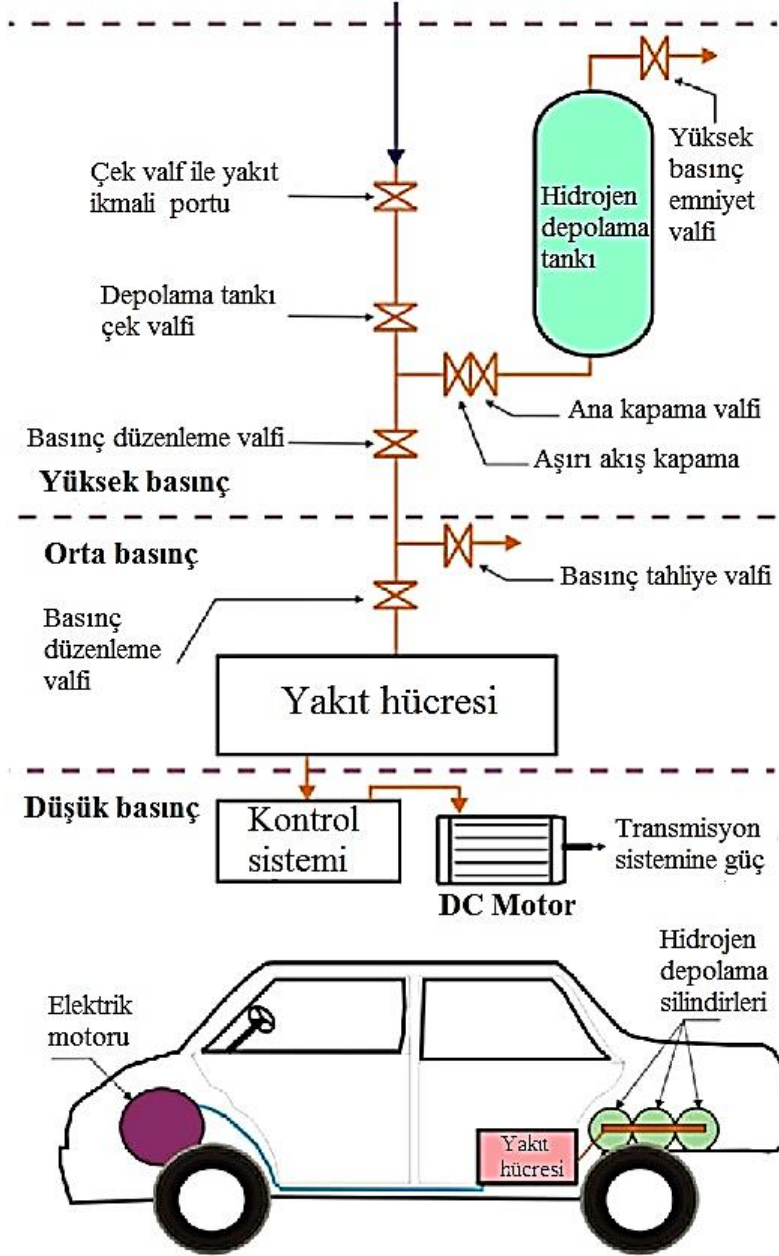
Cipriani ve ark. (2014) göre otomotiv uygulamasında depolama, ağırlık ve hacimleri mümkün olduğunca düşük olarak muhafaza edilmesi başlıca sorundur. hidrojenin (Berry ve ark., 1996; Sakintuna ve ark., 2007) tarafından yakıt olarak araçta depolanması, hidrojen ekonomisini geliştirirken en büyük zorluğu olduğu ifade edilmiştir. H₂ fiziksel olarak bir kriyojenik sıvı veya sıkıştırılmış gaz olarak depolanır. Hidrojen depolama teknolojileri ve hedefleri Şekil 3.2.' de verilmiştir.



Şekil 3.2. Hidrojen depolama teknolojileri ve hedefleri (Mori and Hirose, 2009)

Araştırmacılar, BMW Group gibi yüksek maliyet, ağırlık ve depolama kapasitesi nedeniyle sıvı hidrojen depolama sistemlerinin geliştirilmesine odaklanmışlardır. Bu bağlamda, hidrojen depolama sistemleri, yüksek basınç, orta basınç ve düşük basınçlı olarak üç bölümde, farklı aşamalara ve kontrol önlemlerine sahip yakıt hücreli araçlar

düşünülmektedir (Salvi ve Subramanian, 2015) ve şematik olarak Şekil 3.3.' de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Yakıt hücreli araçların dahili hidrojen depolama aşamaları (Salvi ve Subramanian, 2015)

Şu anda, otomotiv sektöründe, gelecek için kritik darboğaz teknolojilerinden biri, hidrojenin araçta depolanmasıdır. Hâlâ, 500 km daha fazla menzil ve tüm performans

parametrelerini yerine getiren, teknik şartlara uyabilir, hiçbir yaklaşım yoktur (Orhan ve ark., 2012).

Çizelge 3.1. Enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması (Orhan ve ark., 2012)

Özellikleri	Batarya	Ultrakapasitör	Yakıt hücresi	Volan
Mekanizma	Kimyasal	Elektrostatik	Kimyasal	Mekanik
Teknoloji	Kanıtlanmış	Umut verici	Umut verici	Kanıtlanmış
Enerji yoğunluğu	Yüksek	Düşük	Çok yüksek	Düşük
Güç yoğunluğu	Düşük	Çok yüksek	İlımlı	Yüksek
Şarj süresi	Saat	Saniye	-	Dakika
Deşarj süresi	Saat	Saniye	-	Dakika
Ömür	3-5 yıl	>10 yıl	10k-20k saat	>20 yıl
Verimlilik (%)	75-85	85-95	40-60	80-90
Çevre sorunları	Ortadan kaldırma	Daha Az	Çok az	Çok az

34 MPa'da 5 kg CH₂'nin depolanması, konvansiyonel araçların tankından önemli derecede yüksek, 212 L hacme ihtiyaç duyacaktır. Konvansiyonel yakıtla hidrojen tankının hacim ve ağırlık karşılaştırılması Çizege 3.2.' de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Hidrojenin araçta hidrojen depolama şekline göre karşılaştırılması (Najjar, 2013)

Yakıt	Toplam enerji (MJ)	Yakıt ağırlığı (kg)	Tank ağırlığı (kg)	Toplam yakıt sistemi ağırlığı (kg)	Hacim (gal.)
5 gal. benzin	662	14	6.4	20.4	5
Sıvı hidrojen (20 K)	662	4.7	18.6	23.3	47
FeTi metal hidritinde depolanan ağırlıkça % 1.2 H ₂	662	4.7	549.3	554	50
Basıncılı hidrojen (207-690 bar)	662	4.7	63.6-86.3	68.3-91	108-60

4. HİDROJENİN EMNİYETİ

Hidrojen yanıcı, patlayıcı ve havadan daha hafif bir gaz olduğundan, depolanması, taşınması ve emniyet sistemi doğrudan birbiriyle ilişkilidir. Bununla birlikte, hidrojen benzinden daha az tehlikeye sahiptir ve en hızlı gaz olduğundan çok hızlı bir şekilde yayılır. Buna ek olarak, hidrojenin minimum ateşleme enerjisi 0,02 mJ olduğu için, ateşe daha duyarlıdır. Tüm bu hidrojen özelliklerine rağmen, yine de çeşitli güvenlik tedbirleri alınması gerekir (Salvi ve Subramanian, 2015).

Hidrojen ve benzin yangınlarını karşılaştırmak için, Miami Üniversitesi'nde Mike ve Matt Swain tarafından bir deney gerçekleştirildi. Bu deneyde, 175.000 BTU enerji ile yüksek basınç hidrojen tankları içeren otomobil ile yaklaşık 70.000 BTU enerji ile geleneksel bir benzin deposu içeren otomobil vardı (Swain, 2001). Ateşlemeden bir dakika sonra hidrojen ateşi hemen hemen sönerken, tutuşmadan 20 saniye sonra otomobil içindeki yanıcı gazların patlaması iki dakikada içerisindekileri havaya fırlatmıştı (Swain, 2001). Tüm bu hidrojen özelliklerine rağmen, yine de çeşitli güvenlik tedbirleri alınması gerekiyor.

Hidrojene dayalı bir aracın ciddi bir kaza yaratacak miktarlarda hidrojen sızdırması için sızdırmazlık elemanı, sensör sistemi, akış valfi, akış algılama bilgisayar programları arızaları meydana gelmelidir (Swain, 2001). Das (1991) göre, istenmeyen hidrojen sızıntısının tehlikeli etkilerini önlemek için hidrojen tedarik hatlarının üst tarafları kapatılmalıdır. Ayrıca, hidrojeni sızdırmayı önlemek için contalar dikkatli bir şekilde kontrol edilmelidir. Bununla birlikte, tüm teçhizat, sistem kurulmadan önce temizlenmelidir. Buna ek olarak, acil yakıt kapatma sistemi yakıt giriş noktasının hemen önüne konmalıdır (Salvi ve Subramanian, 2015). Bu güvenlik önlemlerinin tümü çevre dostu hidrojen yakıt hücreli araçlarda olası kazaların önlenmesi için etkili olacaktır.

6 Mayıs 1937'de NJ Lakehurst'taki lüks zeplin Hindenburg'un patlaması, üzerine gerçekler şunlardır;

Hindenburg kaldırma gücünü sağlayan hidrojen depoları ateşin ana kaynağı değildir. Zeplinin yüzeyi koyu demir oksit ve yansıtıcı alüminyum boya kombinasyonu ile ki bu son derece yanıcı ve tutuşturulduklarında çok yüksek enerjili bir oranda yanan bileşenlerle kaplı idi. Bir fırtına sırasında yerleştirme sırasında zeplinin yüzeyi, bulutlardan elektrik boşalmasıyla ateşlendi. Bu reaksiyon yıllarca kimyasal olarak

ispatlandı. Hidrojen, hızlı, güvenli bir şekilde yolcuların üst tarafında yandı. Sızan hidrojen, zeplinin tutuşmasından sonra, zeplinin çok üstünde yandı ve 60 saniye içinde tamamen tükendi. Felakette 35 ölümün 33'ü atlama veya düşmeden oldu. İki ölüme neden olan yanma ve muhtemelen zeplinin yanan yüzeyine ya da kaplamayla ateşlenen dizel yakıt deposuna yakınlıktan olabilir. Ateşleme ile bir dakikada hidrojen yanarken, mazot ateşleme sonrası on (10) saat boyunca yanabilir. Hindenburg, helyum gazı ile de doldurulmuş olsa yanacaktı. Çünkü aynı şekilde kaplamanın tutuşması gerçekleşecek ve yine felakete neden olacak dizel depolarını alevlendirecekti. Felaketin asıl nedeni pilot hatasıydı. Zeplin felaketinin önlenmesinin tek yolu, pilotun başka bir yere daha iyi koşullarda inmeyi başarabilmesi idi. California'ya gidecek kadar yeterli miktarda yakıt olduğundan gayet mümkündü.

Çizelge 4.1. Hidrojenin emniyetli kullanımı ile ilgili özellikleri (Najjar, 2013)

	H ₂	CH ₄	Benzin
Difüzyon	Havadaki H ₂ hızlı dağılım oranı En büyük güvenlik varlığıdır		
Havada yükselme	H ₂ daha hızlı yükselir (Hava şartlarından 14 kat daha hafif / hızlı yukarı doğru hareket eder/ Ateşleme tehlikeleri düşer [5])		P _{gas} = 5.82 kg/m ³
Alev alma aralığı	%4-75	%4.3-15	%1.4-7.6
Ateşleme enerjisi (@Φ = 1)	0.02 mJ	0.28 mJ	0.24 mJ
Patlama seviyesi	H ₂ sınırlandırıldığında geniş konsantrasyon aralığında patlamaz		
Alev hızı	H ₂ alevlerini tutmak zordur. Patlama sınırlaması daha zor. Patlamalarda hız 30 kat daha hızlıdır.	0.38 m/s	0.42 m/s
Alev sıcaklığı (@Φ = 1)		1917 °C	2307 °C
O ₂ endeksini sınırlama.	Hacim olarak O ₂ karışımı <%5 alev yayılımı olmaz		
Sıvılaştırılmış H ₂	1 Donma yanıkları veya hipotermi 2 Hava delikleri ve valfler (Havadaki nemden oluşan buz birikimi). 3 Depolama tankları havanın yanıcı karışımlara girmesini ve bu yanıcı karışımları üretmesini önlemek için basınç altında tutulmalıdır. 4 Elektrik akımı taşıma kapasitesi küçük - yük oluşumu sıvılaştırılmış H ₂ akışında bir endişe değildir		

Hidrojen güvenliği çerçevesinde, ekipmanlar ve yapımları için kod ve standartları, emniyet sensörleri yoluyla hidrojen sistemleri ve hidrojenin güvenli bir şekilde kullanılması, taşınması ve güvenli bir şekilde çalıştırılmasına odaklanılır.

Çizelge 4.2. Gelişmekte olan araç teknolojileri ile ilişkili güvenlik riskleri sıralaması (Lopez-Arquillos ve ark., 2015)

No	Güvenlik riski	Risk skoru	Araç teknolojisi
1	Onarım prosedürleri sırasında beklenmedik hasar görmüş komponentlerden kaynaklanan elektrik çarpması.	0.672	Batarya elektrik
2	Alet ve ekipmanlar ile vurulmak	0.582	Genel tamiratlar
3	Yüksek voltaj kabloları neden olduğu elektrik çarpması	0.579	Batarya elektrik
4	Sessiz motorlarla hareket eden arabalar çarpıyor	0.571	Batarya elektrik
5	Yakıt hücresinde elektrik çarpması	0.524	Hidrojen yakıt hücresi
6	Yangın söndürme suyuyla oluşan elektrik çarpması	0.499	Batarya elektrik
7	Hidrojen devresini topraklama, statik elektrik	0.497	Hidrojen yakıt hücresi
8	Sıvı hidrojen tankları, hidrojen atmosferlerinin buharlaştırılması.	0.495	Hidrojen yakıt hücresi
9	Batarya terminalleri, kısa devre riski	0.486	Hibrit
10	Batarya terminalleri, ıslak ortamlarda elektrik arkı riski	0.476	Hibrit
11	Patlayıcı ortamlar	0.378	Hidrojen yakıt hücresi
12	Kalp hücresi için elektromanyetik risk	0.373	Batarya elektrik
13	Yüksek gerilim servis anahtarının sökülmesinden kaynaklanan elektrik çarpması	0.354	Batarya elektrik
14	Zararlı maddelere maruz kalma	0.291	Genel tamiratlar
15	Yüksek yoğunluklu kapasitör yüklerken elektrik çarpması	0.288	Batarya elektrik
16	Kimyasal maddelere maruz kalma	0.259	Hibrit
17	Malzemelerin sıcaklığı	0.245	Hibrit
18	Batarya sıcaklığı	0.234	Hibrit
19	Sıvı hidrojen tankları, dondurma, kriyojenik yanmalar, hipotermi	0.233	Hidrojen yakıt hücresi
20	Zamanlayıcılar şarj veya A / C başlatmak için H / T sistemini devreye sokan elektrik çarpması	0.233	Batarya elektrik
21	Hidrojen deposunda gaz veya sıvı sızıntısı	0.206	Hidrojen yakıt hücresi
22	Gürültü	0.145	Genel tamiratlar
23	Yükleme sırasında yardımcı bataryanın sökülmesinden kaynaklanan elektrik çarpması	0.122	Batarya elektrik
24	Hava yastıkları, A /T bağlantısının kesilmesinden sonra devreye girme riski	0.119	Batarya elektrik
25	Deri iltihabı	0.116	Genel tamiratlar
26	Batarya terminalleri, yüksek nemli ortamlarda ark flaş tehlikesi	0.100	Hidrojen yakıt hücresi
27	Batarya ağırlığı	0.070	Hibrit
28	Hasarlı çekişli pillerden kaynaklanan elektrik çarpması	0.059	Batarya elektrik
29	Batarya buharı	0.059	Hibrit
30	Aşırı sertleşme	0.058	Genel tamiratlar
31	Hidrojen yangınları (alevler şeffaftır)	0.028	Hidrojen yakıt hücresi
32	Makine diyagnostik konnektörünün neden olduğu elektrik çarpması (SAE J1962)	0.026	Batarya elektrik
33	Elektrolit projeksiyonları	0.023	Hibrit
34	Elektrik çarpması, onarım sürecinin başlaması	0.019	Batarya elektrik
35	Yüksekten düşme	0.018	Genel tamiratlar
36	Yüksek konsantrasyonlarda hidrojen ve oksijen yer değiştirmesi, oksijensizlikten boğulma	0.012	Hidrojen yakıt hücresi
37	Sıvı hidrojen tankları, valflerdeki hava yoğunlaşması	0.008	Hidrojen yakıt hücresi

Çizelge 4.2. (devam) Gelişmekte olan araç teknolojileri ile ilişkili güvenlik riskleri sıralaması

38	Sıçrama	0.007	Genel tamiratlar
39	Hava partikülleri	0.006	Genel tamiratlar
40	Hasarlı çekişli bataryalar, kimyasallara maruz kalma	0.005	Genel tamiratlar
41	Kesme	0.002	Genel tamiratlar
42	Yanma	0.002	Genel tamiratlar
43	Elektrik şoku	0.002	Genel tamiratlar
44	Patlama, yangın, zehirli duman	0.002	Hibrit
45	Hasar görmüş çekişli bataryalar, yüksek sıcaklıklarda sıçrayan	0.002	Batarya elektrik
46	Aynı seviyedeki düşüş	0.001	Genel tamiratlar
47	Termal stres	0.001	Genel tamiratlar
48	Radyasyon	0.001	Genel tamiratlar

4.1. Düzenleme, Kod ve Standart Çalışmaları

Uzun yıllardır büyük miktarlarda hidrojen, kimyasal hammadde ve endüstriyel gaz olarak güvenli bir şekilde kullanılmakta ve endüstriyel alanlarda depolanması, dağıtımı ve kullanımı ile ilgili standartlar, kodlar ve düzenlemeler iyi bilinmektedir.

Sanayileşmiş ülkelerin çoğu hidrojen kullanımına yönelik düzenleme, kod ve standartları (RCS), kabul etmiş olmasına rağmen, bu ülkelerin birçoğu uluslararası ticaret ve ticareti kolaylaştırmak için uluslararası standartların geliştirilmesini de desteklemektedir. Hidrojen enerjisi için, Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu (ISO) ve Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) teşkilatları temel teşkil etmektedir. Bu kuruluşların her birinin hidrojen uygulamaları için uluslararası standartları geliştirmeye yönelik, kendine özgü teknik komite (TC) ve alt komiteleri (SC) vardır. ISO için temel TC, TC197 (hidrojen teknolojileri), TC22/SC21 (elektrikli araçlar / hidrojen araçlar), TC58 (gaz tüpleri) ve TC220 (kriyojenik kaplar) vardır. ISO TC197 altındaki temel faaliyetler, hidrojen gazı yakıt istasyonlarını, hidrojen jeneratörü ve dedektörlerini, hidrojen yakıt kalitesi ile ilgili teknik şartname ve standartlarını içermektedir. Katılımcı ülkelerde, TC197 faaliyetleri, konu uzmanlarından oluşan bir Teknik Danışma Grubu (TAG) tarafından koordine edilmektedir (Gupta, 2009).

ABD Enerji Bakanlığı (DOE) tarafından desteklenen yurtiçi ve uluslararası hidrojen RCS, hazırlanma veya inceleme altındaki taslak standartlar da dahil olmak üzere ilgili ISO ve IEC TC'nin güncel faaliyetleri hakkında bilgi www.fuelcellstandards.com adresinde bulunabilir. Standart ve kodlar sadece üretim, depolama ve kullanım ile ilgili prosedür değil toplumda teknolojiye karşı güvende oluşturmaktadır.

ISO/TC197	Standart
ISO 13984:1999	Sıvı hidrojen - Kara taşıtı yakıt sistemi arabirimi
ISO 13985:2006	Sıvı hidrojen - Kara taşıtı yakıt tankerleri
ISO/AWI 14687	Hidrojen yakıt - Ürün özellikleri
ISO 14687:1999 / Kor 1:2001	Teknik düzeltme
ISO 14687:1999 / Kor 2:2008	Teknik düzeltme
ISO / TS 14687-2:2006	Hidrojen yakıt - Ürün özellikleri - Bölüm 1: karayolu taşıtları için proton değişim membran (PEM) yakıt hücresi uygulamaları
ISO / DIS 14687-3:2014	Hidrojen yakıt - Ürün özellikleri - Bölüm 3: sabit cihazlar için Proton değişim membranlı (PEM) yakıt hücresi uygulamaları
ISO / PAS 15594:2004	Havaalanı hidrojen yakıt tesisi işlemleri
ISO / TS 15869:2009	Gaz hidrojen ve hidrojen karışımları - Kara taşıtı yakıt tankerleri
ISO / TR 15916:2015	Hidrojen sistemlerinin güvenliği için temel hususlar
ISO 16110-1:2007	Yakıt işleme teknolojileri kullanarak hidrojen jeneratörü - Bölüm 1: Güvenlik
ISO 16110-2:2010	Yakıt işleme teknolojileri kullanarak hidrojen jeneratörü - Bölüm 2: Performans için test yöntemleri
ISO 16111:2008	Tersinir metal hidrit emilen hidrojen - Taşınabilir gaz depolama aygıtları
ISO/CD 16111	Taşınabilir gaz depolama aygıtları - Hidrojen geri dönüşümlü metal hidrür emilen
ISO/AWI 17268	Gaz hidrojen arazi aracı ikmal bağlantısı cihazlar
ISO 17268:2012	Gaz hidrojen kara aracı yakıt ikmal bağlantı cihazları
ISO/PRF TS 19880-1	Gaz hidrojen -- Akaryakıt istasyonları -- Bölüm 1: Genel gereksinimler
ISO/CD 19880-2	Gaz hidrojen -- Akaryakıt istasyonları - Bölüm 2: Dispenserler
ISO/DIS 19880-3	Gaz hidrojen -- Akaryakıt istasyonları -- Bölüm 3: Vanalar
ISO/AWI 19880-4	Gaz hidrojen - Akaryakıt istasyonları - Bölüm 4: Kompresörler
ISO/AWI 19880-5	Gaz hidrojen - Akaryakıt istasyonları - Bölüm 5: Hortumlar
ISO/AWI 19880-6	Gaz hidrojen - Akaryakıt istasyonları - Bölüm 6: Bağlantı Parçaları
ISO/CD 19880-8	Gaz hidrojen - Akaryakıt istasyonları - Bölüm 8: Hidrojen kalite kontrolü
ISO/CD 19881	Gaz Hidrojen - kara taşıtı Yakıt Tankları
ISO/CD 19882	Gaz hidrojen - kara araç yakıt tankları - Isıl olarak harekete geçirilen basınç tahliye cihazları
ISO/CD TS 19883	Hidrojen ayırma ve saflaştırma için basınç salınımlı adsorpsiyon sistemlerinin güvenliği
ISO/CD 19884	Gaz hidrojen - sabit depolama için boru ve silindirler
ISO/AWI 22734	Su elektroliz işlemi kullanarak hidrojen jeneratörü
ISO 22734-1:2008	Su elektroliz işlemi kullanarak hidrojen jeneratörü - Bölüm 1: Endüstriyel ve ticari uygulamalar
ISO 22734-2:2011	Su elektroliz işlemi kullanarak hidrojen jeneratörü - Bölüm 2: Konut uygulamaları
ISO 26142:2010	Hidrojen algılama aparatı - Sabit uygulamaları

5. MATERYAL ve YÖNTEM

Ulaşım anlamında elektrik motorlu ve içten yanmalı motorun gelişimi ve evreleri incelenmiştir. Hidrojenin içten yanmalı araçlarda kullanılma yöntemleri ve potansiyeli incelenmiştir. Gaz ve sıvı depolanarak katalitik yakılması ile elde edilen güç ve emisyon etkisi değerlendirilmiştir.

Yakıtın enerjiye dönüşümü için kullanılan sistemler, enerji üretimi ve kullanımı esnasında oluşan küresel ve lokal çevresel problemleri ulaşımda ağırlıklı kullanılan fosil yakıtlar bağlamında incelenerek alternatif yakıt gerekliliği değerlendirilmiştir.

Hidrojenin gaz olarak fiziksel ve kimyasal özellikleri gözden geçirilip elde edilme yöntemleri incelenmiştir. Kimyasal, biyolojik, elektrolitik, fotolitik ve termokimyasal gibi çeşitli proses teknolojileri kullanılarak buhar metan reformasyonu, kömür ve diğer hidrokarbonların gazlaştırılması, suyun elektrolizi, biyokütleden ve nükleer enerjiden hidrojen yöntemleriyle elde edildiği saptanmıştır. Mevcut elde etme yöntemlerinden özellikle yenilenebilir kaynaklardan üretiminin katkısı değerlendirilmiştir.

Hidrojen yakıt hücreli araçların ICE araçlar ile rekabet için, benzer bir sürüş menzili olması gerektiği gözlemlenmiştir. Hidrojen hacimsel enerji yoğunluğu çok düşük olduğu için, otomotiv sektöründe araçta yeterli hidrojen depolanmasının, ağırlık, hacim, kinetik, güvenlik ve maliyet açısından zorlukları incelenmiştir. Araçta depolamanın teknolojik ve uygulamadaki son durumu değerlendirilmiştir.

Hidrojeni elektrik enerjisine dönüştürerek enerji kaynağı olarak kullanmamızı sağlayan yakıt hücrelerinin yapısı, çeşitleri ile otomotiv endüstrisi için gerekli ekonomik ve güç şartları değerlendirilmiştir.

İçten yanmalı motorlu araçlar (ICEV) yerine, teknoloji ve çevre dostu; sera gazları ve karbon dioksit gibi, iklim değişikliğine ve kentsel hava kirliliğine neden olan zararlı gazları bırakmayan HFCV'lerin sürdürülebilirliği ve konfigürasyonları incelenmiştir.

Yakıt hücreli ve hibrit araç teknolojisinde kullanılan tahrik sistemi ile enerji kaynağı sistemleri üzerinde verimliliği arttıran kontrol stratejileri incelenmiştir.

Hidrojen emniyeti konusunda alınması gerekli tedbirler ve güvenilirliği konusu incelenerek uluslararası kod çalışmaları sunulmuştur.

Yukarıda ifade edilen açıklamalar doğrultusunda tez boyunca takip edilen metodoloji şu şekilde özetlenebilir:

Çalışma kapsamında günümüz güncel konularından “hidrojen yakıt hücreleri“ ve özelinde “otomotiv sektörü için uygulanabilirliği” üzerine odaklanılmıştır. Konu üzerine yapılan çalışmalar niceliksel kaynak verilerine dayalı olarak irdelenmiştir. Tez içerisinde; konu ile ilgilenen kişilerin ihtiyaçlarına ve amaçlarına cevap verebilmek amacı ile sürükleyici ve yönlendiren bir akış tercih edilmiş, çalışmanın hazırlanmasında elde edilen verilerin bir araya getirilmesi ve yorumlanmasında objektiflik, tutarlılık, kaynağın doğruluğu ve çalışmanın gerekliliği gibi temel bilimsel özellikler dikkate alınmıştır.

Tezin ilk bölümde; konu ile ilintili kavramlar tanımlanmış, bunların birbiri ile ilişkisi ortaya konulmuştur. Bu bölümün sonunda konunun otomotiv sektöründeki uygulamaları kronolojik bir sıra ile betimlenmiştir. İkinci bölümde hidrojen kullanan içten yanmalı motorların tanımlanması, sınıflandırılması, bunların mevcut elektrikli sistemler ile avantaj/dezavantajlarının karşılaştırılması için içsel bir tartışma kurgulanmıştır. Tezin üçüncü ve dördüncü bölümleri hidrojenin güvenli ve emniyetli kullanımı için okuyucuya teknik bilgiler aktarmayı hedeflemektedir. Bu bölümde daha çok tartışma yerine düz ve açık bir anlatım tekniği tercih edilmiştir. Tez çalışmasının son bölümünde ise bu konu üzerine yapılan bilimsel bilgileri aktarma çabamızın ve gerekliliğinin üzerine durulmuş, tez boyunca yapılan tartışmalarının ana noktaları özetlenerek araştırmanın genel anlamda nasıl katkıda bulunacağı dile getirilmiştir.

Bu derlemenin hazırlanmasında doğrudan veya dolaylı bütün kaynaklar gözden geçirilmiş konu ile ilintili başlıca kitaplar, bilimsel dergiler, konferans sunumları, tezler, patentler, standartlar ve internet kaynakları dikkate alınarak genel bir araştırma yapmak yerine tez başlığında belirlenen sınırlar çerçevesinde özel ve derinlemesine bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Bu kaynaklara erişim işi kütüphane katalogları, Ulusal veri tabanları (TÜBİTAK, ULAKBİM gibi), Ulusal tez merkezi (YÖK) ve Üniversitemizin abone olduğu veri tabanlarının (ELSEVIER, SPRINGER, SAGE, TAYLOR&FRANCIS gibi) online olarak tarama operatörleri (Google Scholar gibi) kullanılarak sağlanmıştır. Kullanılan anahtar kelimeler başlıca “hidrojen, yakıt hücresi, PEM, yakıt hücreli araç, hidrojenin depolanması, kontrol stratejisi” dir. Bu kelimeler hedeflenen bilgiye ulaşmak için yalın halleri ile çeşitli kombinasyonlar ile istenmeyen bilgileri elemek için bazı durumlarda tam ibare (exact phrase) şeklinde yazılarak gerçekleştirilmiştir.

6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Küresel, petrol tüketiminin yarısından fazlası ulaştırma sektöründen kaynaklanmaktadır ve bu pay karayolu taşımacılığına olan talebin hızlı bir şekilde büyümesiyle artmaktadır.

Önümüzdeki 50 yıl içinde, küresel nüfus 6 milyardan 10 milyara, araç sayısı ise 700 milyondan 2.5 milyara çıkacak. Tüm bu araçlar içten yanmalı motorlarla (ICE) tahrik edilirse, petrol arzının nasıl sağlanacağı, emisyonların yayılmalarını nasıl engelleneceği sorularının cevapları, insanları 21. yüzyılda sürdürülebilir karayolu ulaşımını geliştirmeye zorlayacağını (Chan, 1993; Chan, 2002) tarafından belirtilmiştir.

Fosil kökenli yakıtların azalması ve çevresel beklentilerin artması ile önümüzdeki 10 yıl otomobil kavramında ve sanayisinde yeni tanımlar ile birlikte yeni oyuncular yerlerini alacaktır.

Dutta, (2014) geleneksel yakıtların neden olduğu kirlilik seviyesini azaltmak için yenilenebilir ve çevreyi kirletmeyen enerji kaynaklarının geliştirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Böyle bir enerji kaynağı olarak hidrojenin (H₂) farkına varılarak fosil yakıtların yerini alabilecek, potansiyel karbon bazlı olmayan bir enerji kaynağı olduğunu ifade etmiştir. Hidrojen temiz ve yeşil kaynaklardan elde edilebilecek alternatif yakıt olarak kabul edilmektedir.

Çizelge 6.1. Yakıt hücresi, batarya ve ısı motoru arasında fark ve benzerliklerin karşılaştırılması (Sharaf ve Orhan, 2014)

Karşılaştırma	Yakıt hücresi	Batarya	Isı motoru
Fonksiyon	Enerji dönüşümü	Enerji depolama ve dönüşümü	Enerji dönüşüm
Teknoloji	Elektrokimyasal reaksiyonlar	Elektrokimyasal reaksiyonlar	Yanma
Normal yakıt	Genellikle saf hidrojen	Depolanan kimyasallar	Benzin, dizel
Faydalı çıkış	DC elektrik	DC elektrik	Mekanik güç
Ana avantajları	Yüksek verim Zararlı emisyonları azaltmak	Yüksek verim Yüksek olgunluk	Yüksek Olgunluk Düşük maliyetli
Ana dezavantajları	Yüksek maliyet	Düşük işletme döngüleri	Belirgin zararlı emisyonları
	Düşük dayanıklılık	Düşük dayanıklılık	Düşük verimlilik

BEV, özellikle daha küçük batarya boyutuna ihtiyaç duyan kısa menzilli düşük hızlı küçük EV halk ulaşımı için uygundur. HEV tüketici taleplerini karşılayabilir ancak

maliyet aşılması gereken önemli bir sorundur. FCEV, gelecekte genel kullanılan araçlar olabilecek için uzun vadeli bir potansiyele sahiptir. Ancak, maliyet ve yakıt ikmali sistemi en büyük endişeleridir (Chan, 2002). Bununla beraber tahrik motorunu elektrik kaynağı olarak besleyen yakıt hücresi kullanımı batarya kullanımının yanında, araçların daha çabuk yakıt ikmali sağlamasını ve tekrar yakıt ikmali aralığını (menzili) arttırır. Yakıt hücreleri, içten yanmalı motorlara göre daha az bakım gerektirir ve daha sessizdirler. Aynı zamanda içten yanmalı motorlara göre daha az hareketli parçası bulunduğu için işletim ömrü daha uzundur. Yüksek güç yoğunluğu, hızlı ve çabuk start/stop, değişik güç taleplerine uyumlu olması PEM'lerin otomotiv endüstrisinde kullanılabilmesini uygun kılmaktadır. PEM yakıt hücresini otomotiv endüstrisi için en önemli özelliği, düşük sıcaklıkta çalışan yakıt hücrelerinde kullanılan katı bir elektrolite (PEM) sahip tek yakıt hücresi tipi olmasıdır. PEM Yakıt hücresi işletim prosedürü su elektrolizinin tersidir.

Hidrojen yakıt hücreli araçlar, geleneksel içten yanmalı motorlu araçların yerine ikame etmesi hem yakıt tüketimini hem de hava kirlilik oranını düşürmektedir. Bu avantajlara ek olarak, daha düşük güç yoğunluğu ve güç yanıtında gecikmeler ile ilgili dezavantajlara rağmen hidrojen yakıt hücreli araçların avantajlarını elde etmek ve dezavantajları azaltmak için kontrol stratejileri geliştirmek gereklidir.

Bu kontrol stratejilerini belirlerken denetleyicilerin tasarlanması gerekir. Bununla birlikte, yakıt hücresi sistemindeki elektronik güç devreleri tasarımları, sistemin verimliliğini arttırmayı ve diğer ihtiyaçları karşılamayı hedeflemektedir. Kontrolcüler, sistem tarafından üretilen enerjinin optimizasyonunu sağlar ve yakıt hücresi ile enerji depolama sistemleri arasındaki gücün kontrol aşamasından sorumludur.

Otomotiv üreticileri artık dünya çapında üretim yapmaktalar ve gelecekte üretecekleri araçların altyapı çalışmalarında teknoloji temelli Ar-Ge sürecine önem vermektedirler. Otomotiv endüstrisinde Ar-Ge faaliyetlerinin en önemli konularından biri ise alternatif yakıt kullanımınıdır. Bu kapsamda hidrojeni yakıt olarak kullanan sıfır emisyonlu, yeşil yakıtlar dikkat çekmektedir. Ayrıca hibrit (melez) birden fazla güç kaynağına sahip araçlar geliştirilmektedir. Bu çalışmaların en genel amacı petrolden bağımsız bir enerji kaynağına sahip olmak, emisyon sorununun çözülmesi ve azalan petrol rezervlerine alternatif oluşturmaktır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Lucia (2014) ilerlemenin her zaman enerji gerektirdiği ve bugüne kadar, enerji ihtiyacının fosil yakıtların yanması ile temin edilirken hava kirliliği ve sera gazları emisyonunun arttığını ifade etmiştir.

Lucena (2011) göre sıfır egzoz emisyonuyla elektrikli araçlar, ICEV'e atfedilen ciddi hava kirliliği sorunlarının azaltılmasına yardımcı olacaktır. Elektrikli araçlar (EV), ICEV üzerinde; sıfır emisyon ve yüksek verimlilik dışında birçok avantaja sahiptir. EV'in gürültüsüz ve pürüzsüz çalışması ve enerji kaynağı olarak fosil yakıtlardan bağımsız olması buna örnek olarak gösterilebilir. Mohd ve ark. (2013) tarafından elektrikli araçlar olarak ifade edilen, tam elektrikli, hibrid elektrikli ve yakıt hücresel araçlar gelecek yıllar boyunca geleneksel ICEV'lerin alternatifleri olacağı belirtilmiştir.

Hidrojen ve otomobilleri birleştiren bu çalışma, ICE tabanlı araçlarda hidrojenin yakılması yoluyla hidrojen bazlı temiz enerji araştırması yaklaşımları ya da yakıt hücresel araçlarda elektrikle dönüştürülmesi yoluyla hidrojen bazlı temiz enerji araştırmaları yaklaşımları arasındaki rekabeti göstermektedir. Her iki önerinin de kesiştiği bir hibrit araç teklifi vardır. Bu bağlamda, bu çalışma, hidrojen kullanan araçların farklı yöntemlerle sınıflandırılmasını sunmaktadır. Ayrıca, otomotiv endüstrisinde hidrojen yakıtlı hücresel elektrikli araçların gelecekteki avantajları, batarya ile çalışan araçlar, hibrit elektrikli araçlar ve geleneksel araçlar ile karşılaştırma yaparak tartışılmıştır. Otomotiv endüstrisinde kullanılmak üzere hidrojenin üretimi, dağıtımı, ekonomisi ve depolanması ile ilişkili mevcut durum öne sürülmüş ve yaklaşımları etkileyen güçlükler değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın bulgularına dayanarak mevcut FCEV'ler, FC tahrik düzenekleri ve hidrojen modifiye ICE araçlarından daha üstün görünmektedir. ICE araçlarına kıyasla çok daha gelişmiş bir avantaja sahip oldukları için, FCEV üretimi teşvik edilmelidir. Bu avantajlardan bazıları düşük çalışma gürültüsü, daha yüksek enerji dönüşüm verimliliği, hızlı yük değişikliklerine karşı güçlü uyum, uygun dinamik özellikler, geniş bir çalışma yelpazesinde yüksek performans, daha uzun menzil, sıfır emisyon ve çevre koruması olarak listelenebilir. FCEV'lerin avantajlarından dolayı hidrojen altyapısıyla ilgili dezavantajlar ortadan kaldırılmalıdır. Gelecekte, FCEV'lerdeki bu beklenen iyileştirmeler, otomotiv üreticilerine stratejik avantaj ve yenilik sağlayacaktır.

Petrol rezervlerinin azalması ve tüketime yetersiz kalacağından dolayı ulaşımda kullanılan araçlar için yeni enerji kaynakları bulunması gerektiği açıktır. Elektrik enerjisinin taşıt tahrik sistemlerinde kullanılmasına yönelik çalışmalar giderek artmaktadır. Farklı taşıt tahrik sistemlerinin yapıları bulunmakla birlikte, doğrudan tekerlek tahrikli sistemlerin gelecekte yaygın olarak kullanılacağı tahmin edilmektedir. Her bir tekerlek motorunun birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmesi ile herhangi bir motorda oluşacak arızaların, aracın hareketini engellemesinin önüne geçilerek taşıt tahrik sisteminin güvenilirliği artacaktır. Ayrıca tahrik sistemleri gibi aracın performansını ve sürüş güvenliğini iyileştiren donanımların araca kolayca uygulanması ile sürüş konforu da artmaktadır.

Ulaştırma sektöründe, yenilenebilir enerji yönünde artan hidrojen yakıt hücreli araçlarda yakıt tasarrufu için oluşturulan kontrol stratejilerinin avantaj ve dezavantajlarını belirleyip bu stratejilerden en etkili olanları önerilmelidir. Kontrol mekanizmaları genellikle yakıt hücresi, batarya ve süperkapasitörleri içerir. Araçta enerji yönetimi sağlamak için çeşitli kontrolörler geliştirilmeli ve uygulanmalıdır. Bu kontrolörlerin kullandığı en yaygın kontrol stratejileri Tepe güç kaynağı stratejisi (PPSS), çalışma modu kontrol stratejisi (OMCS), bulanık mantık kontrol stratejisi (FLCS) ve eşdeğer tüketim azaltma stratejisi (ECMS)'dir. Tüm bu kontrol stratejileri benzer sonuçlar verir. PPSS, yakıt hücresinin optimum çalışma bölgesindeki çalışmasını sürdürerek, sistemin çıkış gücüne göre hızla talep edilen güç talebine yanıt vermesine ve yakıt tasarrufu yapmasına olanak tanır. FLCS'de mantık kuralları ve üyelik işlevleri, yeni sürüş döngüsü dikkate alınarak tasarlanmalıdır. FLCS'deki kontrol şeması daha karmaşık olduğu için, hesaplama zamanı diğer kontrol stratejilerinden daha yüksektir. Ayrıca FLCS, ECMS tarafından elde edilenden 9 kat daha yüksek bir hesaplama süresine sahiptir. OMCS, yakıt hücresi ve batarya arasındaki güç değişimlerini aracın istediği gücü sağlamak için kontrol eder. Bataryanın gücü, araç tarafından talep edilen güç ile yakıt hücresi gücü arasındaki farktır. ECMS, batarya ve süperkapasitörler gibi enerji depolama sistemleri tarafından sağlanan elektrik enerjisini yakıt hücresinden gelen hidrojen olarak, gerekirse eşdeğer yakıt tüketimi kavramıyla kullanabilir. ECMS, en çok tercih edilen kontrol stratejilerinden birisidir. Bunun sebebi; güç aktarma organlarının, hidrojen tüketimi ve eşdeğer hidrojen kütlesi tüketimini minimum seviyede tutmasıdır. PPSS, ECMS ve OMCS, sadece birkaç değişiklik yapılabildiği için

hidrojen yakıt hücreli araçlarda uygulanacak en basit kontrol stratejileridir. FLCs ise daha karmaşıktır ve yakıt hücreli araçlara uygulandığında önemli değişiklikler gerektirir.

Sonuç olarak, kontrol stratejileri karşılaştırıldığında bunların arasında ECMS, hidrojen kütlesi tüketimi, verimlilik, uyarlanabilirlik ve hesaplama süresi arasında iyi bir denge sağladığı için en uygun kontrol stratejisi olarak düşünülebilir. Bu kontrol stratejisi, eşdeğer hidrojen tüketimini en aza indirgeyerek hidrojen hacmini azaltır. Ayrıca, araçlara uygulanmasının sadeliği sayesinde, bu kontrol stratejisi birçok farklı araçta kullanılabilir. Sistemin verimliliğini artırmak ve sistem tarafından üretilen enerjinin optimizasyonunu sağlamak amacıyla oluşturulacak kontrol stratejilerinden ECMS, gelecekteki hidrojen ekonomisine de büyük katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Abd El Monem, A.A., Azmy, A.M. ve Mahmoud, S.A., 2014. Effect of process parameters on the dynamic behavior of polymer electrolyte membrane fuel cells for electric vehicle applications. **Ain Shams Engineering Journal**, 5: 75–84.
- Ahmed, S. ve Krumpelt, M., 2001. Hydrogen from hydrocarbon fuels for fuel cells. **Int J Hydrogen Energy**, 26 (4): 291–01.
- Andujar, J.M. ve Segura, F., 2009. Fuel cells: History and updating, A walk along two centuries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 13 2309–2322.
- Anh, T.L., Duc, K.N., Thu, H.T.T. ve Van, T.C., 2013. Improving Performance and Reducing Pollution Emissions of a Carburetor Gasoline Engine by Adding HHO Gas into the Intake Manifold, **SAE INTERNATIONAL**, TSAE-13AP-0104.
- Anonim, 2014. <http://web.gyte.edu.tr/enerji/ruzgarenerji/d4.html>. Erişim tarihi: 08.10.2014
- Anonymous, 2016a. <http://scrippsco2.ucsd.edu/>. Erişim tarihi: 12.12.2016
- Anonymous, 2016b. <http://www.hydrogencarsnow.com/>. Erişim tarihi: 23.11.2016
- Anonymous, 2016c. http://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/fuelcell_vehicle/ Erişim tarihi: 13.11.2016
- Anonymous, 2016d. http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_tc_browse.htm?cmmid=54560 Erişim Tarihi: 06.05.2016
- Anonymous, 2017a. <http://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml/> Erişim tarihi: 10 March 2017
- Anonymous, 2017b. <http://www.afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work> Erişim Tarihi: 03.03.2017
- Anonymous, 2017c. <http://www.rdmag.com/article/2014/04/trace-degradation-analysis-lithium-ion-battery-components> Erişim tarihi: 18.04.2017
- Arat, H.T., Baltacıoğlu, M.K., Aydın, K. ve Özcanlı M., 2016. Experimental investigation of using 30HCNG fuel mixture on a non-modified diesel engine operated with various diesel replacement rates. **Int J Hydrogen Energy**, 41 (4): 3199-3207.
- Arat, H.T., Baltacıoğlu, M.K., Özcanlı, M. ve Aydın, K., 2016. Effect of using Hydroxy-CNG fuel mixtures in a non-modified diesel engine by substitution of diesel fuel. **Int J Hydrogen Energy**, 41 (19): 8354-63.
- Baltacıoğlu, M.K., Arat, H.T., Özcanlı, M. ve Aydın K., 2016. Experimental comparison of pure hydrogen and HHO (hydroxy) enriched biodiesel (B10) fuel in a commercial diesel engine. **Int J Hydrogen Energy**, 41 (19): 8347-53.
- Barbir F. ve Gomez, T., 1996. Efficiency and economics of proton exchange membrane (PEM) fuel cells, **Int J Hydrogen Energy**, 21 (10):891-901.
- Bauer, C., Hofer, J., Althaus, H.J., Duce, A.D. ve Simons, A., 2015. The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life cycle assessment based on a novel scenario analysis framework. **Applied Energy**, 157: 871-83.

- Bauman, J. ve Kazerani, M.A., 2008. Comparative study of fuel cell-battery, fuel cell-ultracapacitor, and fuel cell-battery-ultracapacitor vehicles. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, (57): 760–769.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G., Moran M. 1996. Thermal design and optimization. **John Wiley & Sons, LTD.**
- Berckmüller, M., Rottengruber, H., Eder, A., Brehm, N., Elsässer, G., Müller-Alander, G., et al., 2003. Potentials of a charged SI-hydrogen engine. **SAE paper**, 2003-01-3210.
- Berry, G.D., Pasternak, A.D., Rambach, G.D., Ray Smith, J. ve Schock, R.N., 1996. Hydrogen as a future transportation fuel. **Energy**, 21 (4): 289–03.
- Bitsche, O. ve Gutmann, G., 2004. Review Systems for hybrid cars, **Journal of Power Sources**, 127: 8-15.
- Boretti, A.A., Brear, M.J., Watson, H.C., 2007. Experimental and numerical study of a hydrogen fuelled I.C. engine fitted with the hydrogen assisted jet ignition system, **16th Australasian Fluid Mechanics Conference**, Dec 2-7, pp.1142-47, Crown Plaza, Gold Coast (Australia).
- BP, 2016. BP Statistical Review of World Energy June 2016, 65th edition.
- Brooker, P., 1995. Fuel cells as electric vehicle range extenders, **Florida Solar Energy Center**, FSEC Report Number: FSEC-CR-14, 2015.
- Burke, A., 2000. “Ultracapacitors: Why, how and where is the technology”, **J. Power Sources**, 91:1, 37–50.
- Chan, C.C., 1993. An overview of electric vehicle technology, **Proc. IEEE**, 81: 1202–13.
- Chan, C. C. 2002. The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles, **Proceedings of the IEEE**, 90: 2.
- Cipriani, G., Dio, V.D., Genduso, F., Cascia, D.L., Liga, R., Miceli, R. ve Galluzzo, G.R., 2014. Perspective on hydrogen energy carrier and its automotive applications. **international journal of hydrogen energy**, 39: 8482-8494.
- Cowanden, R., Nahon, M. ve Rosen, M., 2001a. Modeling and analysis of a solid polymer fuel cell system for transportation applications. **Int J Hydrogen Energy**, 26 (6): 615-623.
- Cowanden, R., Nahon, M. ve Rosen, M., 2001b. Exergy analysis of a fuel cell power system for transportation applications. **Exergy Int J**, 1 (2): 112-121.
- Çelik, S., Bacanlı, H. ve Görgeç, H., 2008. Küresel İklim Değişikliği ve İnsan Sağlığına Etkileri. **Telekomünikasyon Şube Müdürlüğü.**
- Das, L.M., 1991. Safety aspects of a hydrogen-fuelled engine system development. **Int J Hydrogen Energy**, 16 (9): 619-4.
- Debe, M.K., Schmoedel, A.K., Vernstrom, G.D. ve Atanasoski, R., 2006. High voltage stability of nanostructured thin film catalysts for PEM fuel cells. **J Power Sources**, 161 (2): 1002-11.
- Dincer, I., 2002. Technical, environmental and exergetic aspects of hydrogen energy systems. **Int J Hydrogen Energy**, 27 (3): 265-285.
- Dunbar, W., Lior, N. ve Gaggioli, R., 1991. Combining fuel cells with fuel-fired power plants for improved exergy efficiency. **Energy**, 16 (10): 1259-1274.
- Dutta, S., 2014. A review on production, storage of hydrogen and its utilization as an energy resource. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, 20: 1148–1156.

- Dyer, C.K., 2002. Fuel cells for portable applications. **J Power Sources**, 106 (1-2): 31–4.
- EG&G Technical Services, 2004. **Fuel Cell Handbook**, 7th ed, Morgantown, p.1–352.
- Egbue, O. ve Long, S., 2012. Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions. **Energy Policy**, 48: 717–729.
- Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S.E. ve Emadi, A., 2005. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design. **CRC Press LLC**, Florida.
- Emadi, A., Williamson, S.S. and Khaligh, A., 2006. Power electronics intensive solutions for advanced electric, hybrid electric and fuel cell vehicular power systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 21 (3): 567-77.
- Enerji Raporu 2012, 2012. **World Energy Council Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi**, Ankara.
- Escher, W.J.D., 1975. The hydrogen-fueled internal combustion engine. A technical survey of contemporary U.S. projects. Technical Report, **Escher Technology Associates, Inc.**, Report for the US Energy and Development Administration, Report No. TEC74/005.
- Fayaz, H., Saidur, R., Razali, N., Anuar, F.S., Saleman, A.R. ve Islam, M.R., 2012. An overview of hydrogen as a vehicle fuel. **Renew Sustain Energy Rev**, 16 (8): 5511–28.
- Fernandez, R.A., Cilleruelo, F.B. ve Martinez, I.V., 2016. A new approach to battery powered electric vehicles: A hydrogen fuel-cell-based range extender system. **Int J Hydrogen Energy**, 41 (8): 4808–19.
- Furuhama, S. ve Fukuma T., 1986. High output power hydrogen engine with high pressure fuel injection, hot surface ignition and turbocharging. **Int J Hydrogen Energy**, 11: 399–407.
- Ganesan, V., 2003. Internal combustion engines. **New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited**.
- García, P., Torreglosa, J.P., Fernández, L.M. ve Jurado, F., 2013. Control strategies for high-power electric vehicles powered by hydrogen fuelcell, battery and supercapacitor. **Expert Systems with Applications**, (40) 4791–4804.
- Gidwani, M., Bhagwani ve A., Rohra, N., 2014. Supercapacitors: the near Future of Batteries, *International Journal of Engineering Inventions*, 4 (5): 22-27.
- Gomes Antunes, J.M., Mikalsen, R. ve Roskilly, A.P., 2009. An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine, **Int J Hydrogen Energy**, 34 (15): 6516–22.
- Grilo, N., Sousa, D.M., Roque, A., 2012. AC motors for application in a commercial electric vehicle: designing aspects. **In: Proceedings of the 16th IEEE mediterranean electrotechnical conference (MELECON)**, 277–80.
- Gupta, R.B., 2009. Hydrogen Fuel Production Transport and Storage. **CRC Press Taylor & Francis Group**, Section III; 14-479.
- He, X., Maxwell, T. ve Parten, M.E., 2006. Development of a hybrid electric vehicle with a hydrogen-fueled IC engine. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, 55 (6): 1693-03.
- Hoffmann, P. ve Dorgan B., 2012. Tomorrow's Energy: Hydrogen, Fuel Cells, and the Prospects for a Cleaner Planet, **MIT Press**.
- Hoogers, G., 2003. Fuel Cell Components and Their Impact on Performance, Fuel cell technology handbook, **CRC Press**, Section I (4): 75-102.

- Hua, T.Q., Ahluwalia, R.K., Peng, J.K., Kromer, M., Lasher, S., McKenney, K., et al., 2011. Technical assessment of compressed hydrogen storage tank systems for automotive applications. **Int J Hydrogen Energy**, 36 (4): 3037–49.
- Husain, I., 2003. Electric and hybrid vehicles: design fundamentals.: **CRC Press**.
- Hwang, J.J., 2013. Sustainability study of hydrogen pathways for fuel cell vehicle applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 19: 220–229.
- Hwang, J.J., Kuo, J.K., Wu, W., Chang, W. R., Lin, C.H. ve Wang, S.E., 2013. Life cycle performance assessment of fuel cell/battery electric vehicles. **International journal of hydrogen energy**, 38: 3433-3446.
- İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü, 2002. Türkiye 'de Otomotiv Sanayii Gelişme Perspektifi. **DPT**, 2660:1.
- Jaura, A.K., Ortmann, W., Stuntz, R., Natkin, B. ve Grabowski, T., 2004. Ford's H₂RV: an industry first HEV propelled with an H₂ fueled engine-a fuel efficient and clean solution for sustainable mobility. **SAE paper**; 2004-01-0058.
- Jin, S.A., Shim, J.H., Ahn, J.P, Cho, Y.W. ve Yi, K.W., 2007. Improvement in hydrogen sorption kinetics of MgH₂with Nb hydride catalyst. **ActaMaterialia**, 55 (15): 5073–79.
- Johnson, R., Morgan, C., Witmer, D. ve Johnson, T., 2001. Performance of a proton exchange membrane fuel cell stack. **Int J Hydrogen Energy**, 26 (8): 879-887.
- Kalhammer, F.R., Prokopius, P.R., Roan, V.P. ve Voecks, G.E., 1999. Fuel cells for future electric vehicles, Proc. 14th Annu, **IEEE Battery Conf. Applicat. Advances**, 5-10.
- Kantürk, A. ve Pişkin, S., 2007. Alternatif enerji taşıyıcısı: hidrojen ve yıldız teknik üniversitesinde gerçekleştirilen çalışmalar. **IV. Yenilenebilir enerji kaynakları sempozyumu**, 35: 82-89. Gaziantep.
- Katikaneni, S.P., Al-Muhaish, F., Harale, A. ve Pham, T.V., 2014. On-site hydrogen production from transportation fuels: An overview and techno-economic assessment. **International journal of hydrogen energy**, 39: 4331-4350.
- Kazim, A., 2002. A novel approach on the determination of the minimal operating efficiency of a PEM fuel cell. **Renew Energy**, 26 (3): 479–488.
- Kendall, K. ve Pollet, B.G., 2012. Hydrogen and Fuel Cells in Transport, Comprehensive Renewable Energy by Editor-in-Chief: Ali Sayigh. **Elsevier**, chapter 4 (12): 301-13.
- Key World Energy Statistics, 2012. **International Energy Agency**, sayfa 33.
- Kim, Y.Y., Lee, J.T., Choi, G.H., 2005. An investigation on the causes of cycle variation in direct injection hydrogen fueled engines. **Int J Hydrogen Energy**, 30 (1): 69-76.
- Kirubakaran, A., Jain, S. ve Nema, R.K., 2009. A review on fuel cell technologies and power electronic interface. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 13: 2430–2440.
- Kulaksız, A.A., Akaya, R., 2004. Yakıt hücresi sistemlerinde güç elektroniği uygulamaları, **II.Ulusal Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi Bildiri Kitabı**, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.
- Kumar, L., Jain, S., 2014. Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 29: 924–940.
- Kuşdoğan, Ş. 2009. Elektrikli otomobillerde enerji depolama sistemlerindeki gelişmeler. **Mühendis ve Makine**, 50 (596): 2-11.

- Larminie, J. ve Dicks, A., 2001. Fuel cell systems explained. **2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd.**
- Larminie, J. ve Lowry, J., 2012. Electric Vehicle Technology Explained. **2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd.**
- Lee, J.T., Kim, Y.Y. ve Caton, J.A., 2002. The development of a dual injection hydrogen fueled engine with high power and high efficiency. **ASME 2002 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference**, Sept 8-11, pp. 323-33, New Orleans, Louisiana (USA).
- Lesster, L.E., 2000. Fuel cell power electronics: managing a variable-voltage dc source in a fixed-voltage ac world. **Fuel Cells Bulletin**, 3 (25): 5-9.
- Liu, V.T., Hong, J.W., Tseng, K.C., 2010. Power converter design for a fuelcell electric vehicle. **In: Proceedings of the 5th IEEE conference on industrial electronics and applications**, 510–5.
- Liu, W. ve Christopher, D.M., 2015. Dispersion of hydrogen leaking from a hydrogen fuel cell vehicle. **Int J Hydrogen Energy**, 40 (46): 16673–2.
- Lucena, S.E., 2011. A Survey on Electric and Hybrid Electric Vehicle Technology. Electric Vehicles - The Benefits and Barriers. **Rijeka, Croatia : InTech**, 13-30.
- Lucia, U., 2014. Overview on fuel cells. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 30164–169.
- Lungoci, C.M., Georgescu, M., Calin, M.D., 2012. Electrical motor types for vehicle propulsion. **In: Proceedings of the 13th international conference on optimization of electrical and electronic equipment (OPTIM)**, 635–40.
- Lynch FE., 1983. Parallel induction: a simple fuel control method for hydrogen engines. **Int J Hydrogen Energy**, 8: 721–730.
- Mazloomi, K. and Gomes, C., 2012. Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 16: 3024– 3033
- Mekhilef S., Saidur, R. ve Safari A., 2012. Comparative study of different fuel cell Technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 16: 981–989.
- Mohd, S., Zulkifli, S.A., Rangkuti R.G.A., Ovinis, M. and Saad, N., 2013. Electric Vehicle Energy Management System using National Instruments' CompactRIO and LabVIEW, Proc. of the IEEE, **International Conference on Smart Instrumentation**, Measurement and Applications (ICSIMA), Kuala Lumpur, Malaysia.
- Mori, D. and Hirose, K., 2009. Recent challenges of hydrogen storage technologies for fuel cell vehicles. **International journal of hydrogen energy**, 34: 4569-4574.
- Mourad, M.A., 2014. A proposed fuel cell vehicle for reducing CO₂ emissions and its contribution to reducing greenhouse gas emissions. **International Journal of Engineering & Technology**, 3 (2): 252-261.
- Naber, JD, Siebers DL., 1998. Hydrogen combustion under diesel engine conditions. **Int J Hydrogen Energy**, 23 (5): 363-71.
- Nagalingam B., Dübel, M. ve Schmillen K., 1983. Performance of the supercharged spark ignition hydrogen engine. SAE paper, 831688.
- Najjar, Y.S.H., 2013. Hydrogen safety: The road toward green Technology. **International Journal of Hydrogen Energy**, 38: 10716- 10728.

- Natkin R.J., Tang X., Boyer B., Oltmans B., Denlinger A. ve Heffel J.W., 2003. Hydrogen IC engine boosting performance and NO_x study. **SAE paper**; 2003-01-0631.
- Neef, H.J., 2009. International overview of hydrogen and fuel cell research. **Energy**, 34 (3): 327-3.
- Ni, M., Leung, M.K.H., Sumathy, K. ve Leung, D.Y.C., 2006. Potential of renewable hydrogen production for energy supply in Hong Kong. **Int J Hydrogen Energy**, 31 (10): 1401-12.
- Oettle, G., 2010. Fuel cells for automotive application. **Essay**, Munich, GRIN Verlag
- Oosterkamp, P.F., Goorse, A.A. ve Blomen, L.J., 1993. Review of an energy and exergy analysis of a fuel cell system. **J Power Sources**, 41: 239-252.
- Orhan, M.F., Dincer, İ., Rosen, M.A. ve Kanoğlu, M., 2012. Integrated hydrogen production options based on renewable and nuclear energy sources. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 16: 6059–6082.
- Önal, E. ve Yarbay, R.Z., 2010. Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Kaynakları Potansiyeli ve Geleceği. **İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**, 18: 77-96.
- Özdamar, A., 2000. Dünya ve Türkiye’de rüzgar enerjisinden yararlanılması üzerine bir araştırma. **Pamukkale üniversitesi mühendislik fakültesi, mühendislik bilimleri dergisi**, 6 (2-3): 133-145.
- Öztürk, M. ve Yüksel, Y. E., 2016. Energy structure of Turkey for sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 53: 1259–1272.
- Paladini, V., Donato, T., Risi, A. ve Laforgia D. 2007. Super-capacitors fuel-cell hybrid electric vehicle optimization and control strategy development, **Energy Conversion and Management**, 48: 3001–3008.
- Pei, P. ve Chen, H., 2014. Main factors affecting the lifetime of Proton Exchange Membrane fuel cells in vehicle applications: A review. **Applied Energy**, 125: 60–75.
- Pei, P., Chang, Q. ve Tang, T., 2008. A quick evaluating method for automotive fuel cell lifetime, **Int J Hydrogen Energy**, 33 (14): 3829-6.
- Peschka, W., 1986. Liquid hydrogen fueled automotive vehicles in Germany-status and development. **Int J Hydrogen Energy**, 11 (11): 721-28.
- Peschka, W., 1998. Hydrogen: The future cryofuel in internal combustion engines. **Int J Hydrogen Energy**, 23 (1): 27-43.
- Peng, F.Z., 2007. Application of Z-Source Inverter for Traction Drive of Fuel Cell—Battery Hybrid Electric Vehicles, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 22:3.
- Pollet, B.G., Staffell, I. ve Shang, J.L., 2012. Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemistry to market prospects. **Electrochimica Acta**, 84: 235– 249.
- Rabbani, A. ve Rokni, M., 2013. Effect of nitrogen crossover on purging strategy in PEM fuel cell systems. **Appl Energy**, 111: 1061–0.
- Rayment, C. ve Sherwin, S., 2003. Introduction to fuel cell technology, **Univ Notre Dame**; p.156.
- Raza, R., Akram, N., Javed, M.S., Rafique, A., Ullah, K., Ali, A., Saleem, M. ve Ahmed, R., 2016. Fuel cell technology for sustainable development in

- Pakistan – An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 53: 450–461.
- Rosen, M.A. ve Scott, D.S., 1988. A thermodynamic investigation of the potential for cogeneration for fuel cells. **Int J Hydrogen Energy**, 13 (12): 775-782.
- Sakintuna, B., Lamari-Darkrim, F. ve Hirscher, M., 2007. Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review. **Int J Hydrogen Energy**, 32 (9): 1121–40.
- Salvi, B.L. ve Subramanian, K.A., 2015. Sustainable development of road transportation sector using hydrogen energy system, **Renew Sustain Energy Rev**, 51: 1132-55.
- Sandy Thomas, C.E., 2009. Transportation options in a carbon-constrained world: Hybrids, plug-in hybrids, biofuels, fuel cell electric vehicles, and battery electric vehicles. **Int J Hydrogen Energy**, 34 (23): 9279–96.
- Schlapbach, L. ve Züttel, A., 2001. Hydrogen-storage materials for mobile applications. **Nature**, 414 (6861): 353-8.
- Selici, T., Utlu, Z. ve İtlen, N., 2005. Enerji Kullanımının Çevresel Etkileri ve Sürdürülebilir Gelişme Açısından Değerlendirilmesi. **III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Bildirileri**, Mersin.
- Seydioğulları, H.S., 2013. Sürdürülebilir Kalkınma için Yenilenebilir Enerji. TMMOB Şehir Plancıları Odası, **Planlama**, 23 (1): 19-25.
- Sharaf O.Z. ve Orhan M.F., 2014. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. **Renew Sustain Energy Rev**, 32: 810-53.
- Sharma, S. ve Ghoshal, S.K., 2015. Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 43: 1151–1158.
- Singh, S., Jain, S., PS V., Tiwari, A.K., Nouni, M.R., Pandey, J.K. ve Goel, S., 2015. Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 51: 623–633.
- Sørensen, B., 2012. Hydrogen and fuel cells: emerging technologies and applications. **2nd ed. Elsevier Publishing**.
- Soylu, Ş., Karabektaş, M., Ermiş, K., 2004. Otomobiller İçin Alternatif Enerji Kaynaklarının İncelenmesi, **II. Ulusal Ege Enerji Sempozyumu Ve Sergisi Bildiri Kitabı**, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya
- Sulaiman, N., Hannan, M.A., Mohamed, A., Majlan, E.H., Wan Daud, W.R., 2015. A review on energy management system for fuel cell hybrid electric vehicle: Issues and challenges, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 52: 802–814.
- Sun, D. ve Liu, F., 2011. Research on the Performance and Emission of a Port Fuel Injection Hydrogen Internal Combustion Engine. **IEEE-International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring**, 963-6.
- Swain, M.R., 2001. Fuel Leak Simulation, Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review. **NREL/CP-570-30535**: p.679.
- Szumanowski, A., 2000. Fundamentals of Hybrid Electric Vehicle Drives. Warsaw, Poland: **Warsaw-Radom Press**.
- Szwaja, S. ve Grab-Rogalinski, K., 2009. Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine. **Int J Hydrogen Energy**, 34 (10): 4413–21.
- T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2008. 'İklim Değişikliği ve Yapılan Çalışmalar'.

- Takabatake, Y., Noda, Z., Lyth, S.M., Hayashi, A. ve Sasaki, K., 2014 . Cycle durability of metal oxide supports for PEFC electrocatalysts, **International journal of hydrogen energy**, 39: 5074–5082.
- Thomas, C.E.S., 2012. How green are electric vehicles?. **International journal of hydrogen energy**, 37: 6053–6062.
- Thounthong, P. , Sikkabut, S., Mungporn, P., Nahid-Mobarakeh, B., Pierfederici, S. ve Davat, B., 2014. Nonlinear Control Algorithm of Supercapacitor/ Li-Ion Battery Energy Storage Devices for Fuel Cell Vehicle Applications, **Mecatronics**, Tokyo, Japan.
- Tie, S.F. ve Tan C. W., 2012. A Review of Power and Energy Management Strategies in Electric Vehicles. **4th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS2012)**
- Tutar,F. ve Eren,M.V., 2011. Geleceğin enerjisi hidrojen ekonomisi ve Türkiye. **International Journal of Economic and Administrative Studies**, 6: 1307-9832.
- Türkeş, M., 2012. Türkiye’de Gözlenen ve Öngörülen İklim Değişikliği, Kuraklık ve Çölleşme. **Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi**, 4 (2): 1-32.
- Türkiye Petrolleri, 2014. 2013 yılı ham petrol ve doğal gaz sektör raporu.
- Uysal, F., 2011. Türkiye’de yenilenebilir enerji alternatiflerinin seçimi için graf teori ve matris yaklaşım. **Ekonometri ve İstatistik**, Sayı:13 (12. Uluslararası Ekonometri, Yöneyim Araştırması, İstatistik Sempozyumu Özel Sayısı): 23–40.
- Uzun, A., Emsen, Ö.S., Yalçıkaya, Ö. ve Hüseyini, İ., 2013. Toplam Elektrik Üretimi ve Ekonomik Büyüme İlişkisi: Türkiye Örneği (1980-2010). **Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi**, 17 (3): 327-344.
- Ünlü, N., Karahan, Ş., Tür, O., Uçarol, H., Özsu, E., Yazar, A., Turhan, L., Akgün, F., Tırıs, M. 2003. Elektrikli Araçlar, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, **Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü**, Gebze, 16-18.
- Üstün, A.K., Apaydın,M., Filik, Ü.B. ve Kurban, M.,2009. Kyoto Protokolü Kapsamında Türkiye’nin Yenilenebilir Enerji Politikalarına Genel Bir Bakış. **V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu**, Diyarbakır.
- Verhelst, S. ve Wallner, T., 2009. Hydrogen-fueled internal combustion engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, 35 (6): 490–527.
- Veziroglu, A. ve Macario, R., 2011. Fuel cell vehicles: State of the art with economic and environmental concerns. **Int J Hydrogen Energy**, 36 (1): 25–43.
- Von Helmolt, R. ve Eberle, U., 2007. Fuel cell vehicles: Status 2007. **J Power Sources**, 165 (2): 833–43.
- Walker, S.B., Fowler, M., Ahmadi, L., 2015. Comparative life cycle assessment of power-to-gas generation of hydrogen with a dynamic emissions factor for fuel cell vehicles. **J Energy Storage**, 4: 62-73.
- Wang, L. ve Li, H., 2010. Maximum Fuel Economy-Oriented Power Management Design for a Fuel Cell Vehicle Using Battery and Ultracapacitor, **IEEE Transactions on Industry Applications**, 46: 3.
- Wang, D., Zamel, N., Jiao, K., Zhou, Y., Yu, S., Du, Q., Yin, Y., 2013. Life cycle analysis of internal combustion engine, electric and fuel cell vehicles for China. **Energy**, 59: 402–412.

- White, C.M., Steeper R.R. ve Lutz A.E., 2006. The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review. **Int J Hydrogen Energy**; 31 (10): 1292–1305.
- Winter, M. ve Brodd, R. J., 2004. What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors?, **Chem. Rev.**104 (10): 4245-4269.



ÖZGEÇMİŞ

1974 yılında Hassa'da doğdu. İlkokul ve Ortaokulu Hassa'da, lise eğitimini Adana Motor Teknik Lisesinde tamamladı. Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Motor Öğretmenliği Bölümü'nü 1991 yılında girdi ve 1995 yılında mezun oldu. Aynı yıl Milli Eğitim Bakanlığında Öğretmen olarak işe başladı. 1999 Kasım ayında yedek subay öğretmen olarak askerliğini tamamladı. Halen Milli Eğitim Bakanlığında Teknik Öğretmen olarak görev yapmaktadır.

