

T.C.
SİNOP ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİSİPLİNLERARASI NÜKLEER ENERJİ VE ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TAŞITLARDA YAKIT PİLİ UYGULAMALARI

YAZAR

Ahmet Erman ÇİNKİLİÇ

ORCID NUMARASI
0000-0001-5709-4333

DANIŞMAN

DR. ÖĞR. ÜYESİ MUSTAFA KEMAL BALKİ

SİNOP – 2020

ETİK BEYANI

Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahmet Erman ÇİNKILIÇ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR.....	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Tez Çalışmasının Amacı	2
2. HİDROJENİN ÖZELLİKLERİ	4
2.1. Hidrojenin Depolanması	5
2.1.1. Hidrojeni Sıkıştırılmış Gaz Olarak Depolama.....	5
2.1.2. Sıvı Hidrojen Olarak Depolama	6
2.1.3. Jel Hidrojen Depolama	6
2.1.4. Metal Hidrür Olarak Hidrojen Depolama.....	6
2.1.5. Alanatlarda Hidrojen Depolama	9
2.1.6. Karbon Nanotüplerde Hidrojen Depolama.....	10
2.1.7. Cam Mikro Küreler ile Hidrojen Depolama.....	11
2.1.8. Taşıtlarda NaBH ₄ Kullanarak Hidrojen Depolama.....	12
3. HİDROJEN ÜRETİM YÖNTEMLERİ	14
3.1. Termokimyasal Yöntemle Hidrojen Üretimi	15
3.1.1. Metan Buhar Reformasyonu.....	15
3.1.2. Kısmi Oksidasyon ve Ototermal Reformasyon	16
3.1.3. Katalitik Olmayan Kısmi Oksidasyon Alternatifi	17
3.1.4. Kömürün Gazlaştırılması.....	18
3.1.5. Biyokütle Dönüşümü ve Gazlaştırılması.....	19
3.2. Nükleer Enerji ve Alternatif Enerji Kaynaklarından Hidrojen Üretimi	19
3.2.1. Elektroliz ile Hidrojen Üretimi.....	20
4. YAKIT PİLLERİ	21
4.1. Yakıt Pillerinin Anavantajları ve Dezavantajları	22
4.2. Yakıt Pillerinin Çeşitleri.....	23
4.2.1. Alkali Yakıt Pilleri (Alkaline Fuel Cells, AFC).....	25
4.2.2. Fosforik Asit Yakıt Pilleri (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC).....	27
4.2.3. Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC).....	28
4.2.4. Katı Oksit Yakıt Pilleri (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC)	29
4.2.5. Doğrudan Metanol Kullanan Yakıt Pilleri (Direct Methanol Fuel Cells, DMFC).....	30
4.2.6. Proton Değişim Zarlı Yakıt Pilleri (Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC)	32

5. ELEKTRİKLİ TAŞITLAR	39
5.1. Hibrit Elektrikli Taşıtlar	39
5.2. Yakıt Pili Kullanan Elektrikli Taşıtlar	42
6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	55
7. SONUÇLAR	62
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	66



SEMBOLLER VE KISALTMALAR LİSTESİ

SEMBOLLER

μm	Mikrometre
A	Amper
Al	Alüminyum
Al_2O_3	Alüminyum oksit
Ar	Argon
B	Bor
C_2H_6	Etan
CH_3OH	Metanol
CH_4	Metan
cm^2	Santimetrekare
CO	Karbonmonoksit
CO_2	Karbondioksit
Cu	Bakır
CuO	Bakır oksit
Fe	Demir
Fe-Ti	Ferrotitanyum
g	Gram
H	Hidrojen
H^+	Hidrojen iyonu
H_2	Hidrojen
H_2S	Hidrojen sülfür
H_3PO_4	Fosforik asit
K	Kelvin
kg	Kilogram
kJ	Kilojoule
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt saat
LaNi_5	Lantan pentanikel
LH_2	Sıvı hidrojen
Li	Lityum
m^3	Metreküp
Mg	Magnezyum
MJ	Megajoule
MW	Megawatt

N ₂	Azot
Na ₂ LiAlH ₆	Sodyum alanat
NaBH ₄	Sodyum bor hidrür
NaBO ₂	Sodyum metaborat
Ni	Nikel
nm	Nanometre
O	Oksijen
O ₂	Oksijen
OH ⁻	Hidroksit iyonu
Pt	Platin
s	Saniye
Ti	Titanyum
V	Vanadyum
V	Volt
V ₂ O ₅	Vanadyum oksit
Wh/kg	Spesifik enerji
Wh/l	Güç yoğunluğu

KISALTMALAR

AC	Alternatif akım
AFC	Alkali yakıt pili
DC	Doğru akım
DMFC	Doğrudan metanol yakıt pili
ECU	Elektronik kontrol ünitesi
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
MCFC	Erimiş karbonat yakıt pili
MEA	Membran elektrot birimi
PAFC	Fosforik asit yakıt pili
PEMFC	Proton değişim zarlı yakıt pili
SOFC	Katı oksit yakıt pili

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

ŞEKİLLER

Şekil 2.1. Hidrojende depolanma şekilleri ve elde edilebilen hacimsel ve gravimetrik yoğunluk değerleri	8
Şekil 2.2. Magnezyumda basınç kompozisyon eşsıcaklık diyagramı ve öğütmenin diyagrama etkisi	9
Şekil 2.3. Magnezyum, magnezyum-vanadyum ve magnezyum-grafit sisteminde hidrojen emilim hızları	10
Şekil 2.4. Karbon nanotüpler	11
Şekil 2.5. Cam mikro küreler	12
Şekil 2.6. Hidrojen doldurulmuş mikro cam küre	12
Şekil 2.7. Taşıtlarda kullanılan NaBH_4 ile depolama yöntemi	13
Şekil 3.1. Hidrojenin tüketim alanları	14
Şekil 3.2. Metan buhar reformasyonu	16
Şekil 3.3. Metan gazının buhar reformasyonu ile hidrojen üretimi	16
Şekil 3.4. Katalitik olmayan kısmi oksidasyonla ağır petrol kalıntılarından hidrojen üretim yöntemi	17
Şekil 4.1. Sir William Robert Grove'un ürettiği yakıt pili	22
Şekil 4.2. Yakıt hücresi çeşitleri	23
Şekil 4.3. Alkali yakıt pili	25
Şekil 4.4. Apollo uzay mekiğinde kullanılan 1,5 kW gücündeki yakıt pili	26
Şekil 4.5. Apollo uzay mekiğinde kullanılan 12 kW gücündeki yakıt pili	26
Şekil 4.6. Fosforik asit yakıt pilinin çalışma prensibi	27
Şekil 4.7. Erimiş karbonat yakıt pilinin çalışma prensibi	28
Şekil 4.8. Katı oksit yakıt pilinin çalışma prensibi ve iç yapısı	29
Şekil 4.9. Katı oksit yakıt pilinin borusal dizaynı	30
Şekil 4.10. Doğrudan metanol kullanan yakıt pilinin çalışma prensibi	31
Şekil 4.11. Proton değişim zarlı yakıt pilinin çalışma prensibi	33
Şekil 4.12. Proton değişim zarlı yakıt pili parçaları	34
Şekil 4.13. Proton değişim zarı	35
Şekil 4.14. Membran elektrot biriminin elektron mikroskobu altındaki görüntüsü	36
Şekil 4.15. Nafion'un kimyasal ve atomik yapısı	36
Şekil 4.16. Proton değişim zarlı yakıt pilinde kullanılan akış alanı tasarımları	37
Şekil 4.17. Proton değişim zarlı yakıt pili hücresi parçaları	38
Şekil 5.1. Seri hibrit elektrikli araç dizaynı	40
Şekil 5.2. Paralel hibrit elektrikli araç dizaynı	41

	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.3. Seri-paralel hibrit elektrikli araç dizaynı	41
Şekil 5.4. Kompleks hibrit elektrikli araç dizaynı	42
Şekil 5.5. Yakıt pilli elektrikli araç dizaynı	43
Şekil 5.6. Yakıt pilli elektrikli araç dizaynı	44
Şekil 5.7. General Motors firmasının yakıt pilli ilk aracı	44
Şekil 5.8. Proton değişim zarlı yakıt pili kullanan Ford P2000 dizaynı	45
Şekil 5.9. Mitsubishi FCV yakıt pili uygulaması	45
Şekil 5.10. Toyota Mirai yakıt pili	46
Şekil 5.11. Hidrojen tankı	46
Şekil 5.12. Yakıt pillerinde kullanılan batarya	47
Şekil 5.13. Yakıt pilli otomobillerde kullanılan motorlar	47
Şekil 5.14. Yakıt pilli otomobillerde kullanılan motorlar	48
Şekil 5.15. AC/DC çevirici	48
Şekil 5.16. Kontrol ünitesi	49
Şekil 5.17. Hidrojen devridaim pompası	49
Şekil 5.18. Yakıt pilinin ihtiyaç duyduğu oksijeni sağlamak için basınçlı hava gönderen kompresör	50
Şekil 5.19. Honda markasının yıllara göre menzil değişimi	51
Şekil 5.20. Honda markasının yıllara göre güç değişimi	51
Şekil 5.21. Honda ve Toyota markasının yıllara göre menzil değişimi karşılaştırması	51
Şekil 5.22. Honda ve Toyota markasının yıllara göre güç değişimi karşılaştırması	52
Şekil 5.23. Bataryadan elektrik motoruna doğru besleme hattı	52
Şekil 5.24. Transfer hattı	53
Şekil 5.25. Transfer hattı	53
Şekil 5.26. Rejeneratif hat	54
Şekil 6.1. Yakıt pili verim karşılaştırma grafiği	57
Şekil 6.2. Yakıt pili çalışma sıcaklığı karşılaştırması	58
Şekil 6.3. Yakıt pili güç yoğunluğu karşılaştırması	59
Şekil 6.4. Spesifik enerji karşılaştırması	60
Şekil 6.5. Güç yoğunluğu karşılaştırması	60
Şekil 6.6. Proton değişim zarlı yakıt pili maliyet değişimi	61

TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. Hidrojenin genel özellikleri	4
Tablo 2.2. NaAlH ₄ 'ün hidrojen geri bırakım reaksiyonları	10
Tablo 3.1. Metan buhar reformasyonu ve katalitik olmayan kısmi oksidasyonda açığa çıkan gaz oranları	18
Tablo 4.1. Yakıt pilleri ve özellikleri	24
Tablo 4.2. Alkali yakıt pili reaksiyonları	26
Tablo 4.3. Fosforik asit yakıt pili reaksiyonları	28
Tablo 4.4. Erimiş karbonat yakıt pili reaksiyonları	29
Tablo 4.5. Katı oksit yakıt pili reaksiyonları	30
Tablo 4.6. Doğrudan metanol kullanan yakıt pili reaksiyonları	31
Tablo 4.7. Doğrudan metanol kullanan yakıt pillerinin avantaj ve dezavantajları	32
Tablo 4.8. Proton değişim zarlı yakıt pili reaksiyonları	33
Tablo 4.9. Proton değişim zarlı yakıt pillerinin avantajları ve dezavantajları	33
Tablo 5.1. Yakıt pili ile çalışan bazı modellerin özellikleri	50

ÖZET

TAŞITLARDA YAKIT PİLİ UYGULAMALARI

Dünyadaki enerji üretimi; sanayileşme, nüfus artışı ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak sürekli artış göstermektedir. Artan enerji ihtiyacını karşılama ile birlikte fosil enerji kaynaklarının rezervleri de azalmaktadır. Fosil yakıtların yakılmasıyla ortaya çıkan, karbondioksit, karbonmonoksit ve metan gibi gazlarda küresel ısınma, sera etkisi gibi sorunları ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenlerden dolayı günümüzde bu fosil yakıtların yerine doğa dostu yenilenebilir kaynaklar kullanılmaya başlanmıştır. Bu tezde taşıtlarda yakıt pili kullanımı detaylı olarak incelenmiştir. Bu bağlamda, hidrojen üretimi, depolama, yakıt pilleri ve elektrikli taşıtlar irdelenmiş ve bir bütün olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen, yakıt, taşıt, yakıt pili, elektrikli taşıtlar

ABSTRACT

FUEL CELL APPLICATIONS IN VEHICLES

Energy production in the world is constantly increasing due to industrialization, population growth and technological developments. As a result of meeting the increasing energy need, the reserves of fossil energy resources are also decreasing. Problems such as global warming and greenhouse effect occur in gases such as carbon dioxide, carbon monoxide and methane, which are caused by the burning of fossil fuels. For these reasons, environmentally friendly renewable resources have started to be used instead of these fossil fuels. In this thesis, the use of fuel cells in vehicles has been examined in detail. In this context, hydrogen production, storage, fuel cells and electric vehicles were examined and presented as a whole.

Keywords: Hydrogen, fuel, vehicle, fuel cell, electric vehicles

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın başlangıcından bitimine kadar olan süreçte bilgi, birikim ve tecrübeleri ile her aşamayı yönlendiren saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Kemal BALKİ'ye sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca her zaman yanımda olan aileme de sonsuz teşekkür ederim.

Ahmet Erman ÇİNKİLİÇ

1. GİRİŞ

Yakıt pilleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabilir enerjiye dönüşümünü sağlayan sistemlerdir. Sisteme nakledilen uygun bir yakıt ve oksitleyicinin indirgenme ve yükseltgenme tepkimesi (redoks) ile elektrik enerjisi üretilir. Yakıt ile havanın redoks tepkimesi sonucu kimyasal enerji elektrik enerjisine dönüşür. Bu reaksiyonun sonucunda su ve ısı açığa çıkar. Yakıt pili denilen sistem bir elektrolitten ve bunun her bir yüzeyi ile temas halinde olan gözenekli anot, katot ve elektrotlar olmak üzere üç kısımdan oluşur. Bu anot kısmından yakıt, katot kısmından ise hava gönderilir. Bu yakıt ve havanın elektrokimyasal reaksiyonu sonucu elektriksel gerilim meydana gelir.

Yakıt pilinin kullanım tarihi çok eskilere dayanmaktadır. İlk olarak 1958 yılında NASA'nın uzay programında Apollo, Gemini ve Space Shuttle uzay gemilerinde kullanıldığı bilinmektedir. İlk yakıt pili çalışmaları 1838 yılında Sir William Grove tarafından H_2-O_2 pili üzerinde yapılmıştır (Gök ve ark., 2020). Son 15 yıl içinde hidrojenle çalışan değişik motorlar üretilmiştir. Otobüs ve otomobillere uygulanmıştır. 1994 yılından sonra yapılan bir uygulamada Macchi Ansaldo'nun şehir otobüsü dizel-elektrik sistemi içeren yapı ve yakıt pili bulunduran hidrojen kullanan otobüs şeklindedir. Bu taşıtta elektrik yakıt pili sisteminden elde edilmektedir. Yakıt olarak hidrojen kullanan yakıt pili teknolojisiyle enerji üreten denizaltılar; Avustralya, Almanya ve Kanada donanmalarında kullanılmaktadır. Kanada demir yolu gerekli olan elektrik enerjisini 15 ile 30 yıl arasında hidrojen kullanan yakıt pili teknolojisinden sağlamayı planlamıştır. Japonya'da 4,5-11 MW'lık elektrik üretimi için hidrojen kullanan ve yakıt pili ile elektrik üreten elektrik santrali kurulmuştur (Şenaktaş, 2005).

Alternatif enerji kaynakları, enerji ihtiyacının günden güne artması sebebiyle bilim insanlarının çalışmalarında yer almaktadır. Bir sistemde enerji üretiliyor ise ister istemez çevreye zararı olacak sonuçlar doğurmaktadır. Bu sebeple çevreye verilecek zararın minimum olması, yenilenebilir özellikte ve maliyetinin düşük tutulması alternatif enerji kaynağının sahip olması gereken temel niteliklerdir. Bu bağlamda günümüze kadar; rüzgar, hidrolik, hidrojen, jeotermal, biyokütle ve termal enerji vb. gibi alternatif enerji arayışları olmuştur. Alternatif olarak nitelendirilmiş adı geçen kaynakların kullanımı belirli şartları sağlaması neticesinde uygun bulunmaktadır. Yani; verimlilik, maliyetin uygun olması, amaca hizmet etmesi gibi maddelerin en uyumlu noktasını sağlayan çözüm, bu şartları oluşturmaktadır. Bu bağlamda hidrojen kullanılan yakıt pilleri; yani hidrojen kaynaklı enerji

Üretim yöntemleri bu alternatif kaynaklar içerisinde önem arz etmektedir (enakta, 2005).

Taıtlarda belli bir çevrim sonucu sarf edilen enerjinin kaynağı büyük bir ölçekte fosil yakıtlar karşılamaktadır. Yaşadığımız zaman dilimi içerisinde bu fosil yakıt rezervlerinin azalmasından ve enerji ihtiyaını karşılayabileceği srenin sınırlı olmasından dolayı alternatif enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla fosil yakıt ile çalışan taşıtların elektrik ile çalışmasına önem verilmekte ve bu elektrik enerjisinin üretimi için güneş ve hidrojen kullanımına yönelik çalışmalar bilim insanları tarafında araştırılıp geliştirilmektedir. Dünya genelinde yer alan otomotiv firmaları da bu araştırma ve geliştirme çalışmalarına yoğunluk vermektedir. Hibrit modeller ile geii yumuatmaya yönelik önemli tasarımlar ve modeller günümüzde son kullanıcıya sunulmaktadır. Prototip üretimleri ile bir üst seviyeyi hedefleyerek teknolojik değişimleri dünya insanlarına göstermektedir. Elektrokimyasal tepkime gerçekleşmesi adına yakıt olarak hidrojen kullanan yakıt pilleri de bu çalışmalar arasında yer almaktadır. Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasındaki en önemli avantajı, diğer enerji üretim yöntemlerine göre sınırsız ve daha temiz olmasıdır (Gregory, 1972). Karayolunda kullanılan taıtlardan salınan sera gazı, dünya çapındaki toplam salınımın %17'sini oluşturmaktadır. Bu oran küresel ısınmaya yol açan en büyük üçüncü sebep olmaktadır (Anonim, 2019).

1973 yılında yaşanan petrol krizi, otomotiv sektörüne getirilen yasal düzenlemeler silsilesinin sonucu olarak bazı ülkelerde 2030 yılından itibaren yasaklanacağı bilinmektedir. Alternatif enerji kaynakları ile çalışan çevreye zararı minimum olan otomobil üretme konusuna ağırlık verilmiştir. Otomotiv sektöründe büyük yatırımların yapıldığı adeta bilim yarıı sektörü ortaya çıkmaktadır (enol ve gl, 2006). Bu veriler doğrultusunda elektrikli taşıtların kullanımı gerek çevresel fakrler gerekse de enerji alternatifi açısından önem arz etmektedir.

1.1. Tez alımasının Amacı

Yapılan bu tez çalışmasında yakıt pili olarak adlandırılan enerji üretim teknolojisinin taşıtlarda uygulamaları detaylı olarak incelenerek araştırmacılara bir bütün olarak sunulması amaçlanmıştır. Bu kapsamda yakıt pili tarihçesi, yakıt pillerinin çalışma prensibi, yakıt pili eitleri, taşıtlarda kullanılan yakıt pillerinin verimliliği, yakıt pillerinin optimum koşullarda çalışması için gereken şartlar, taşıtlarda kullanılan yakıt pillerinde karşılaşılan sorunlar ve çözümleri, yakıt pilli araçlarda hidrojen depolama yöntemleri ve kullanılan tankların

güvenliği, taşıt üzerindeki motorun yeri, hibrit araçlara yakıt pili sisteminin entegre edilmesi analizi, sistemde oluşan atık ısının yararlı hale çevrilmesi, yakıt pili teknolojisinin dünya pazarındaki yeri gibi konular incelenmiştir.



2. HİDROJENİN ÖZELLİKLERİ

16. yüzyılda İsviçreli Paracelsus isimli kimyacı, asitlerin bazı metaller üzerindeki etkisini araştırırken hidrojeni keşfetmiştir. Cavendish 1776 yılında hidrojeni ayrı bir madde olarak tanımlamıştır ancak daha öncesinde hidrojen çeşitli yollarla da elde edilmiştir. Lavoisier tarafından 1781 yılında adlandırılmıştır. Hidrojen evrende en çok bulunan element olmasına rağmen dünyada serbest halde bulunmaz, gerekli üretim yöntemlerinin birinin uygulanmasıyla elde edilir. Hidrojen renksiz, kokusuz, tatsız ve yanıcı bir gazdır (Bentor, 2003).

Kokusuz, renksiz, tatsız ve saydam özellikte bulunan hidrojen, doğada bulunan en hafif kimyasal element olma özelliğine sahiptir. Periyodik tablo üzerinde "H" sembolü kullanılarak gösterilir. Atom ağırlığı 1,00797 kg/kmol değerindedir, atom sayısı 1 olarak belirtilmiştir. 0 °C ve atmosfer şartlarında 1 litre (l) hidrojen 0,0898 gram (g) kütleyle sahiptir. Yeryüzünde serbest şekilde nadiren bulunmaktadır. Hidrojeni sıvılaştırma işlemi oldukça enerji sarfiyatına neden olmaktadır. Takribî -253 °C sıcaklık ve 2 bar basınç altında sıvı halde olur (Aydemir, 1998). Isı iletkenliği fazladır. Tablo 2.1’de hidrojenin genel özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.1. Hidrojenin genel özellikleri (Veziroğlu ve Barbir, 1998)

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

Gaz haldeki hidrojen; metaller arasından difüze olma özelliğini kullanarak geçebilmektedir. Hidrojenin sahip olduğu bu özellikten ötürü hidrojenin depolanmasında bazı sorunlar oluşmaktadır.

2.1. Hidrojenin Depolanması

Hidrojen, öteki gazlarla kıyaslandığında düşük olan yoğunluğu sebebiyle özel olarak tasarlanmış hafif, küçük ve silindir tanklarda sıkıştırılmış halde depolanmaktadır. Hidrojen gazını yüksek basınçta depolamak için yüksek maliyet ve altyapıya ihtiyaç vardır. Bu belirtilen gaz silindirleri, hacim, ağırlık ve maliyete sebep olmaktadır. Bu depolama işlemi için teknolojik geliştirmeler yapılmış ancak fosil yakıt depolama sistemleri ile kıyaslandığı zaman geride kaldığı görülmektedir ve depolama işlemleri için geliştirme çalışmalarının yapılmasına devam edilmelidir (Hidrojen Enerjisi ve Yakıt Hücreleri Teknolojisi, 2019).

Hidrojenin sıvılaştırılması işlemi kriyojenik (düşük sıcaklıklarda yapılan işlem) olarak yapılabilmektedir ancak bu yöntemde de sıkıntılar çıkmaktadır. Bu işlemin masrafı ve enerji sarfıyatı çok fazla olduğu bilinmektedir. Kriyojenik tankların güvenlik seviyesi istenilen düzeye çıkamamıştır ve üretim maliyetleri de yaşadığımız zaman içerisinde çok fazla olduğu görülmektedir. Kriyojenik hidrojen kullanan motorların tasarım, sistematik, güvenlik ve bakım şartlarının iyileştirilmesi gerekmektedir (Anonim, 2019). Hidrojen depolama; hidrojeni sıkıştırılmış gaz olarak depolama, sıvı hidrojen olarak depolama, jel hidrojen depolama, metal hidrür olarak hidrojen depolama, alanatlarda hidrojen depolama, karbon nanotüplerde hidrojen depolama, cam mikro küreler ile hidrojen depolama, taşıtlarda NaBH_4 kullanarak hidrojen depolama olmak üzere sekiz çeşit yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar aşağıda anlatılmıştır.

2.1.1. Hidrojeni Sıkıştırılmış Gaz Olarak Depolama

Kullanılan yöntem oda sıcaklığı seviyesinde yapılmakta ve yüksek basınç dayanımı olan tanklar kullanılmaktadır. Tankın ağırlık parametresine bağlı olarak depolama değişkenliği gösterir, tank ağırlığının %1'i ile %7'si arasında hidrojen depolama işlemi yapılabilmektedir. Hafif malzemeden yapılmış, dayanımı daha yüksek olan tanklar da mevcuttur. Bu şartlar altında daha fazla hidrojen depolama kapasitesine sahip olmalarına binaen maliyeti daha pahalıdır. Bu yöntem kullanılırken, hidrojenin tanka depolanması için

depolanacak yakıtın enerji kapasitesinin %20'si kadarı depolanmaya harcanmaktadır (Ar ve ark., 2010).

2.1.2. Sıvı Hidrojen Olarak Depolama

Yüksek basınçlı gaz depolamada tank kütlesi ve hacmini azaltmak için kriyojenik hidrojen depolamada kullanılabilir. Hidrojenin sıvı halde depolanması ile yüksek basınçta gaz haline göre yoğunluğun önemli ölçüde artmasını ve daha düşük basınçlarda çalışılmasını sağlayarak tank kütlesinin azalmasını mümkün kılar. Sıvı hidrojen -253 °C civarında bir sıcaklıktadır ve 71 kg/m³ yoğunluğa sahiptir. Sıvı hidrojenin yoğunluğunda daha fazla bir artış elde etmek için katı ve sıvı hidrojenin bir karışımı üretilebilir. Bu karışım slush (yarı ergimiş) hidrojen olarak adlandırılır. %50 katı, %50 sıvı karışımı için hidrojen yoğunluğu 80,9 kg/m³'tür (Anonim, 2009a).

2.1.3. Jel Hidrojen Depolama

Jel hidrojen adı verilen depolama yöntemi, gellant (jelimsi madde) adı verilen maddenin sıvı hidrojene dönüşmesiyle gerçekleşmektedir. Bu maddede metan (CH₄), etan (C₂H₆) gibi kriyojenik malzemeler ve silis parçacıklar da olabilir. Diğer hidrokarbon türlerinden etil alkoloksit ve hegzil alkoloksit gibi maddelerden jel hale getirme yöntemleri de gelişme sürecindedir. Jel hidrojen üretiminin avantajları; hacmin azalmasını sağlayıp, yoğunluğun artmasına sebebiyet vermesidir. Bu yoğunluktaki artış miktarı %10 civarındadır. Sıvı hidrojen ile jel hidrojen kıyaslandığında; jel hidrojenin kaynama oranı 2-3 kat daha düşüktür. Bu düşük seviye, hidrojenin depolama anındaki güvenilirlik seviyesini yükseltmektedir. Jel hidrojenin vizkozitesi sıvı hidrojenden daha düşüktür ve bu durum daha düşük dökülme çapına sahip olmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla jel hidrojenin dökülme ihtimalini azaltır, hidrojen geçiş direncini artırır, sızıntı potansiyelini azaltır, hareketten kaynaklı kararsızlıkları azaltır, depolama tankındaki çalkalanma seviyesini azaltır (Anonim, 2009a).

2.1.4. Metal Hidrür Olarak Hidrojen Depolama

Hidrojeni hidrür olarak depolama yolu da kullanılan yöntemler arasındadır. Bu reaksiyon kullanım itibarıyla;



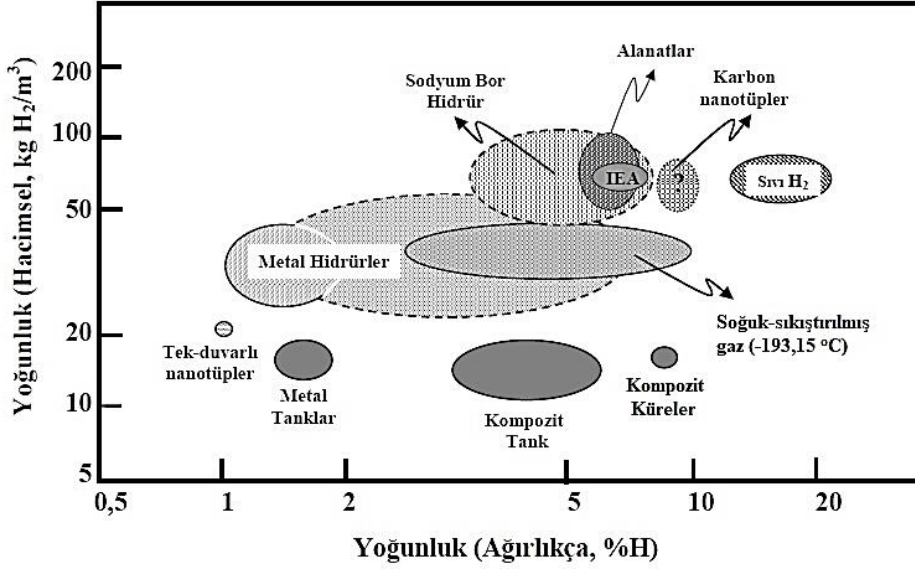
olarak gösterilmektedir. Bu reaksiyon, endotermik ya da ekzotermik olmakla birlikte sıcaklık ve basınca bağılı olarak yön değiştirmektedir (Kaplan ve Veziroğlu, 2003).

Uygulamalarda, hidrojen depolama sırasında istenilen nitelikler; geri dönüşümlü depolama kapasitesinin yüksek olması, geri bırakım sıcaklığının düşük olması, zehirlenme olayına karşı direnç ve bağılı olarak tekrarlanabilir dolum sayısı özelliklerinin olabildiğince istenen seviyede olmasıdır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve Amerika Birleşik Devletleri Enerji Bakanlığının hedeflenen kapasite değerinin %5-6'dan büyük olması, hedeflenen geri bırakım sıcaklığının ise 150 °C'den küçük olması ve hedeflenen kullanım ömrünün 1000 dolumdan fazla olması tespit edilmiştir (Schulz ve ark., 1999).

Douglas ve Derek'in yapmış olduğu incelemede depolama ve geri bırakım kolaylığı olan bir hidrürün fazla kararlı olmaması temel bir nitelik olduğunu belirtmişlerdir. Metal hidrür depolama yönteminde temel olarak magnezyum (Mg) esaslı alaşımlar ve bazı arametaller bulunmaktadır (Douglas ve Northwood, 1983).

Birkaç barlık basınçta ve oda sıcaklığında hidrojen depolayabilen AB₅ ve AB arametallerine örnek olarak lantan pentanikel (LaNi₅) ve ferrotitanyum (FeTi)'dur. AB₅ zehirlenme olayına karşı fazla direnç göstermektedir, arametallerin sahip oldukları hidrojen depolama oranı %1 veya %2'yi geçmemektedir. Hidrojen depolama özelliğine sahip materyaller gaz içersinde oksijen (O₂), su (H₂O), karbonmonoksit (CO) veya karbondioksit (CO₂) olması ihtimalinde gaz emici özelliklerini tamamen yitirmektedirler. Zehirlenme adı verilen bu olaydan ötürü hidrojen depolayan malzemeleri bu gazları içeren ortamlardan uzak tutmak sistem çalışmasının sağlığı açısından önemlidir.

Hidrojen depolama yöntemlerindeki kapasite Şekil 2.1'de verilmektedir.



Şekil 2.1. Hidrojen depolanma şekilleri ve elde edilebilen hacimsel ve gravimetrik yoğunluk değerleri (Ewald, 1998)

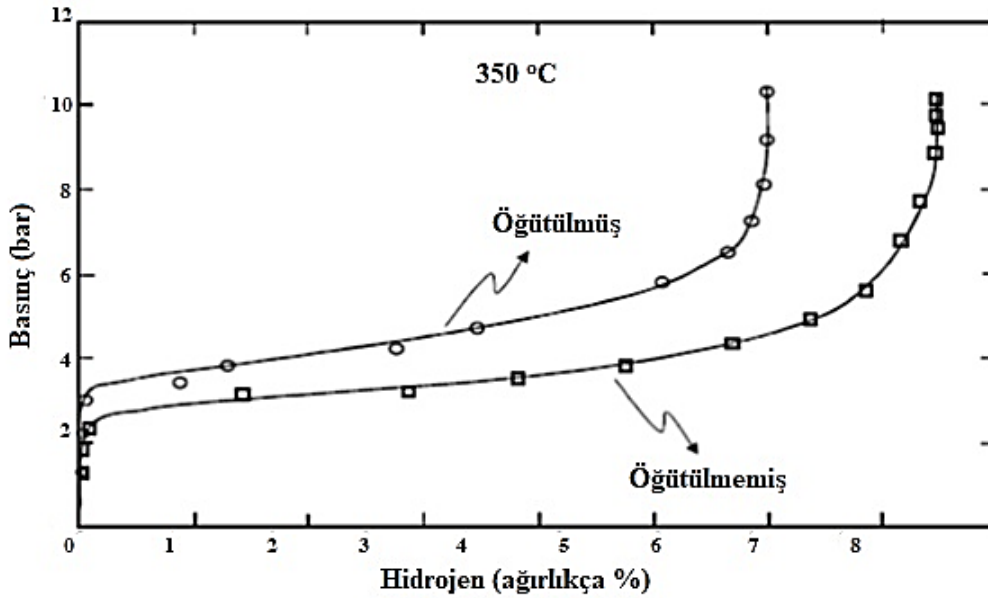
Şekil 2.1’de gösterilen metal hidrürden oluşan sistemler içerisinde özellikle magnezyumun (Mg) hidrojen depolayabilme kapasitesi yüksek (ağ. %7,6) ve yoğunluğu az ($1,74 \text{ g/cm}^3$, hidrür durumunda $1,45 \text{ g/cm}^3$) olması sebebiyle öne çıkmaktadır. Ancak magnezyumun hidrür olarak kullanımındaki dezavantajlar; reaksiyonun $400-450 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de gerçekleşmesi, reaksiyonun yavaş olması ve aktivasyon zorluğudur. Bundan ötürü ilk yüklemelerde 30 bar’dan fazla basınç ortamına ihtiyaç duymaktadır. Hidrojeni depolama işleminin bağlılık gösterdiği özelliklerden biri de hidrojen depolanacak malzemenin yüzey durumudur ve bu sebeple çoğu kez aktivasyon işlemi gerekmektedir. Bu sözü edilen işlemde, vakumlanmış ortam ve yüksek basınç altında birkaç hidrojen yükleme ve ardından hidrojen boşaltma işlemi yapılır.

Magnezyumun tüm bu olumsuz özelliklerine rağmen son zamanlarda hidrojen depolama alanında geliştirme faaliyetlerine önem verilmiştir. Bu önemin verilmesinin sebebi yüksek kapasiteli olmasıdır. Mekanik öğütme; kinetiği iyileştirmeyi sağlamak amacıyla uygulanan en yaygın yöntemdir. Bu öğütme işlemi saf olarak yapılabilir ya da metal [Vanadyum (V), Titanyum (Ti), Nikel (Ni), Bakır (Cu), Demir (Fe) gibi], metal oksit [Bakır oksit (CuO), Alüminyum oksit (Al_2O_3), Vanadyum oksit (V_2O_5) gibi], arametal (LaNi_5 , FeTi gibi) ilaveler ile yapılmakta ve katkılı öğütme işlemi daha iyi sonuçlanmaktadır. (Güvendiren ve ark., 2003).

Magnezyum için katkı maddeleri ile yapılan öğütme işleminde, magnezyumda elde edilen basınç kompozisyon izotermi Şekil 2.2’de gösterilmektedir. Aynı sistemde farklı katkı

maddelerinin reaksiyon kinetiğinde oluşturduğu emilim özelliğinin iyileşmesi Şekil 2.3'te gösterilmektedir. %5'lik grafit ilavesinin öğütülen magnezyumdaki geri dönüşümlü depolama kapasitesi %6 olmaktadır ve pratik uygulamalar için istenilen hızda kinetik elde edilmiştir. Tüm bu iyileştirmelere karşın sıcaklık seviyesi 350-400 °C olmakta ve sıcaklık değeri belirlenen hedefin üzerinde sonuçlanmaktadır. 260 °C sıcaklıkta ise magnezyumun kapasitesinin azaldığı ve hızlı bir kinetiğin olabileceği görülmüştür.

1980'li yıllardan beri yapılan çalışmalardan biri de ince film esaslı çalışmalardır. Bu çalışmalarda depolayıcı malzemenin ince film olarak üretilmesi şartıyla sıcaklık ve basınç şartlarının daha düşük olabildiği gözlemlenmiştir (Jain ve ark., 1988).



Şekil 2.2. Magnezyumda basınç kompozisyon eşsıcaklık diyagramı ve öğütmenin diyagrama etkisi (Güvendiren ve ark., 2003)

2.1.5. Alanatlarda Hidrojen Depolama

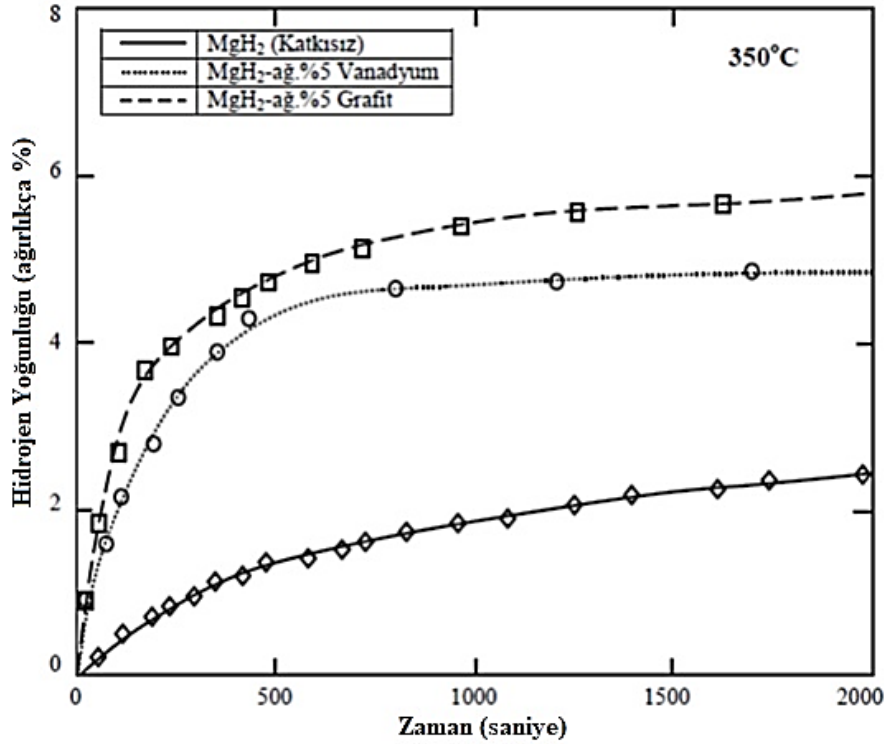
Hidrojeni depolanma yöntemleri üzerine son zamanlarda yapılan çalışmalardan biri de alüminyum (Al) ve bor (B) içeren kompleks hidrür yapıların kullanılması üzerinedir. Bor içeren kompleks hidrürler sıvı koşullarda kullanılmaktadır.

Metal hidrürlerde toz esaslı yapılan depolamada olduğu gibi alanatlarda hidrojen depolama da bu esasta olacaktır. Yapılan çalışmalarda alüminyum hidrür üzerine daha çok durulmuştur, sodyum alanat ($\text{Na}_2\text{LiAlH}_6$) gibi kompleks alanat çalışmaları da bulunmaktadır. Ağırlıkça %7,4 hidrojen depolama özelliğine sahip olan sodyum alanattan hidrojenin alınması birkaç kademede gerçekleştirilmektedir ve Tablo 2.2'de gösterilmektedir.

Reaksiyon, düşük sıcaklık standardında olan 185 °C’de gerçekleşmektedir ve bu sıcaklıkta geri dönüşüm kapasitesi %3,7 seviyesinde kalmaktadır. Son aşamada sodyum hidrür bileşiği ayrılmaktadır, reaksiyon yüksek sıcaklık bölgesinde işlem görmektedir ve kullanım pratikliğinde kullanım dışı olarak nitelendirilmektedir. Bu gerçekleşecek olan reaksiyon sonucunda sodyum alanatlarda kapasite ağırlıkça %5,55 seviyesinde kalmaktadır.

Tablo 2.2. NaAlH₄’ün hidrojen geri bırakım reaksiyonları (Meisner ve ark., 2002)

No	Reaksiyon	Kapasite(ağ.%)	Sıcaklık(°C)
1	$3\text{NaAlH}_4 \rightarrow \text{Na}_3\text{AlH}_6 + 2\text{Al} + 3\text{H}_2$	3,7	185
2	$\text{Na}_3\text{AlH}_6 \rightarrow 3\text{NaH} + \text{Al} + 3/2\text{H}_2$	1,85	260
3	$\text{NaH} \rightarrow \text{Na} + 1/2\text{H}_2$	1,85	>425

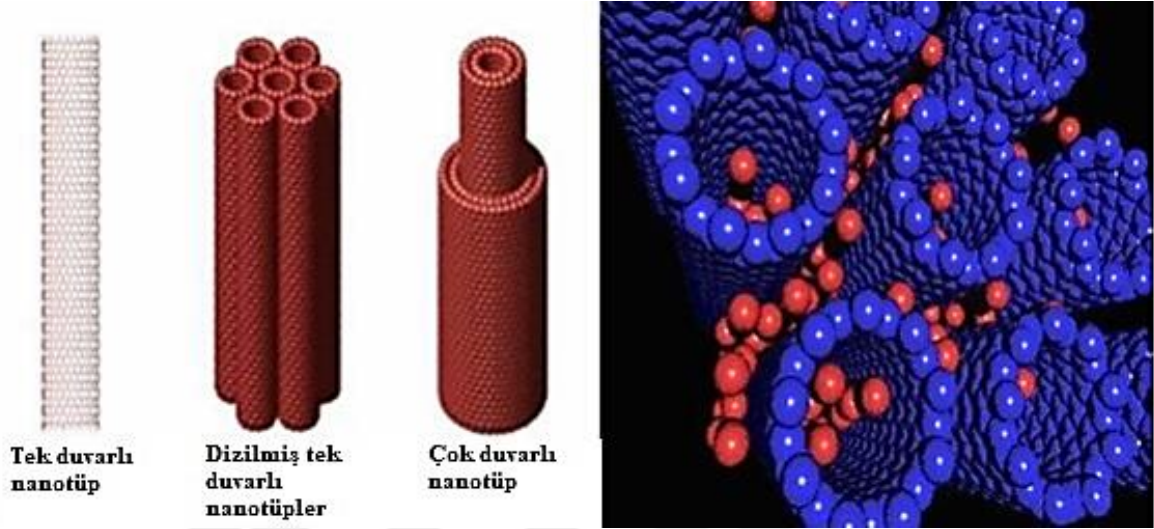


Şekil 2.3. Magnezyum, magnezyum-vanadyum ve magnezyum-grafit sistemind hidrojen emilim hızları (Güvendiren ve ark., 2002)

2.1.6. Karbon Nanotüplerde Hidrojen Depolama

İki nanometre (nm) boyutunda boru şeklindeki düzgün karbon yapılara karbon nanotüp adı verilmektedir. Şekil 2.4’te yapıları gösterilmiştir. Tüplerin kendi içerisinde hidrojen depolama özellikleri mevcuttur. Hidrojen depolama oranı fazladır ve depolama sistematığı metal hidrürlere benzemektedir. Teorik olarak ağırlıklarının %4’ü ile %65’i arasında

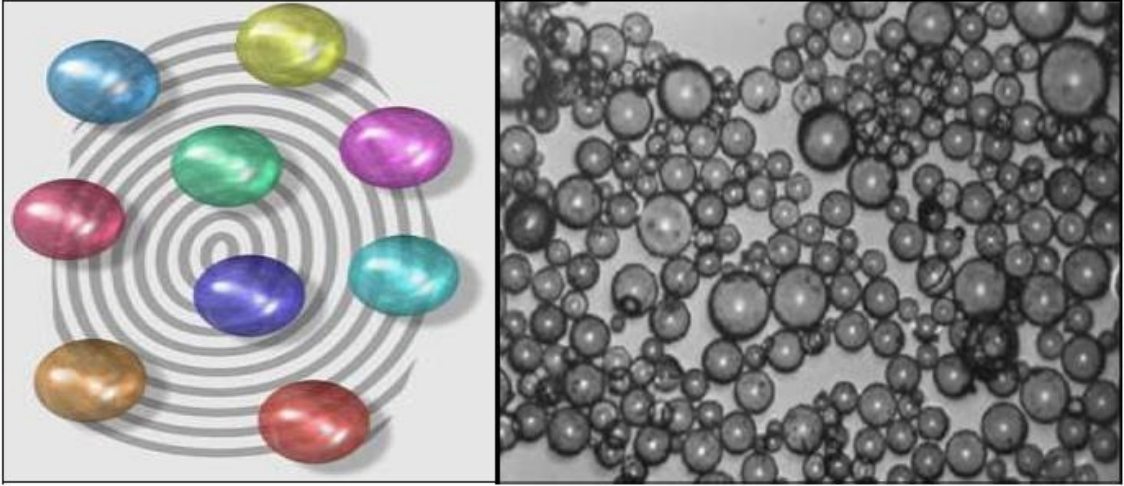
hidrojen depolama kapasitesine sahiptirler. Çok yeni olan bu teknolojinin gelişim süreci devam etmektedir. Bu teknolojik gelişmeler sonucunda istenilen gelişmeler elde edilirse hidrojen depolama yöntemlerinin en hafif ve en kullanışlı yolu olacağına dair öngörüler mevcuttur (Anonim, 2009a).



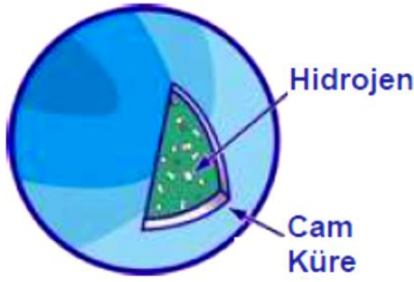
Şekil 2.4. Karbon nanotüpleri (İder, 2005)

2.1.7. Cam Mikro Küreler ile Hidrojen Depolama

Bu depolama yönteminde hidrojeni içi boş cam küreler kullanılır. Isıtılmış küreler, yüksek basınçlı hidrojen ortamına dahil edilmesi yoluyla depolama işlemi yapılır. Şekil 2.5'te mikro cam küre ve yapısı gösterilmektedir. Cam küreler yaklaşık olarak 300 °C sıcaklıktadır ve 350-700 bar basınçta doldurulmaktadır. Şekil 2.6'da doldurulmuş bir mikro cam küre örneği gösterilmektedir. Kürelerin soğuması ile hidrojen küreler içerisinde hapsedilir. Hidrojeni serbest bırakmak için küre sıcaklığında artış yapılır. Bu depolama yönteminde güvenlik daha ön plandadır, bozulmaya karşı direnç fazladır ancak düşük hacimsel yoğunluk mevcuttur, doldurulması için yüksek basınca ihtiyaç vardır, oda sıcaklığındaki kürelerden çok yavaş şekilde sızıntı olmaktadır, yeniden dolum sırasında kırılma ihtimali vardır ve taşıtlarda kullanılan ve ilerideki konularda anlatılacak olan PEM yakıt pilinin çalışma sıcaklığının üzerinde çalışmaktadır (Hoogers, 2003; Anonim, 2009a).



Şekil 2.5. Cam mikro küreler (Veziroğlu, 2008)



Şekil 2.6. Hidrojen doldurulmuş mikro cam küre (Veziroğlu, 2008)

2.1.8. Taşıtlarda NaBH_4 Kullanarak Hidrojen Depolama

Taşıtlarda kullanılan yakıt pillerine gönderilecek hidrojenin bor esaslı depolama yöntemi hem güvenilir olması hem de dünya üzerindeki bor rezervinin %73'ünün ülkemiz topraklarında bulunmasından dolayı önem arz etmektedir. Bor esaslı depolama yönteminde sodyum bor hidrür kullanılmakta ve 500 °C'ye kadar kararlılığını muhafaza edebilme özelliğine sahiptir. Sodyum bor hidrürün taşıtlarda kullanım fazı sıvı olarak yapılmaktadır ve aşağıdaki denkleme göre sodyum metaborat (NaBO_2)'a dönüşerek içindeki hidrojeni açığa çıkarmaktadır. Ekzotermik olan bu reaksiyon sonucu yaklaşık olarak 300 kJ ısı açığa çıkmaktadır.

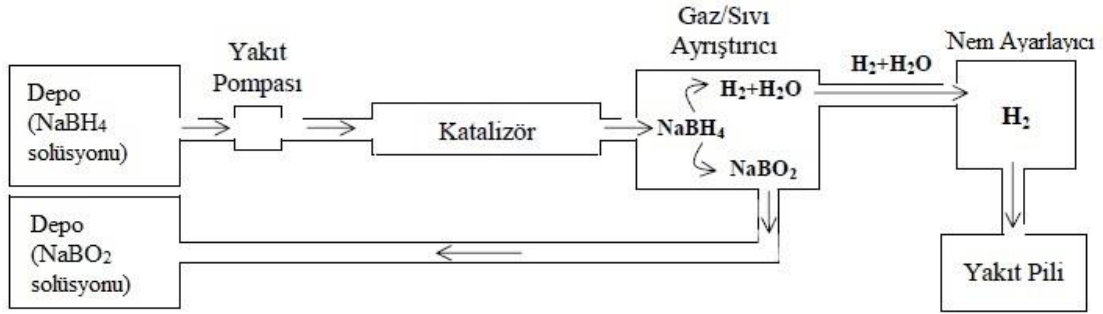


NaBH_4 molekülünün reaksiyon hızının fazla olmasından dolayı hidrojen gazı kontrol ve

aktivasyonu için uygun bir katalizör kullanılması gerekmektedir (Güvendiren ve ark., 2003).

Depolama işlemi için NaBH_4 kullanımının en önemli avantajı, hidrojeni açığa çıkarabilmek için gerekli olan sıcaklığın oda sıcaklığı olması ve seçilen katalizörün uygun olması durumunda reaksiyon kontrolünün kolaylıkla sağlanabilmesidir. Çözelti halindeki NaBH_4 depolama konusunda oldukça güvenli bir sistemdir. Direkt olarak aleve maruz bırakıldığında tehlike arz etmemektedir. Ancak, çözelti içerisine uygun katalizör ihtiva edilmesi durumunda H_2 açığa çıkarmaktadır (Sharp-Goldman ve ark., 2000).

Hidrürün üretimi, uygun katalizör seçimi ve reaksiyon sonucu oluşan NaBO_2 'nin NaBH_4 'e dönüştürülmesi, bor ile depolama yöntemi üzerine yapılan çalışmalarda öncelik verilen konulardır. Şekil 5.27'de taşıtlarda kullanılan NaBH_4 ile depolama çalışma prensibi gösterilmektedir.

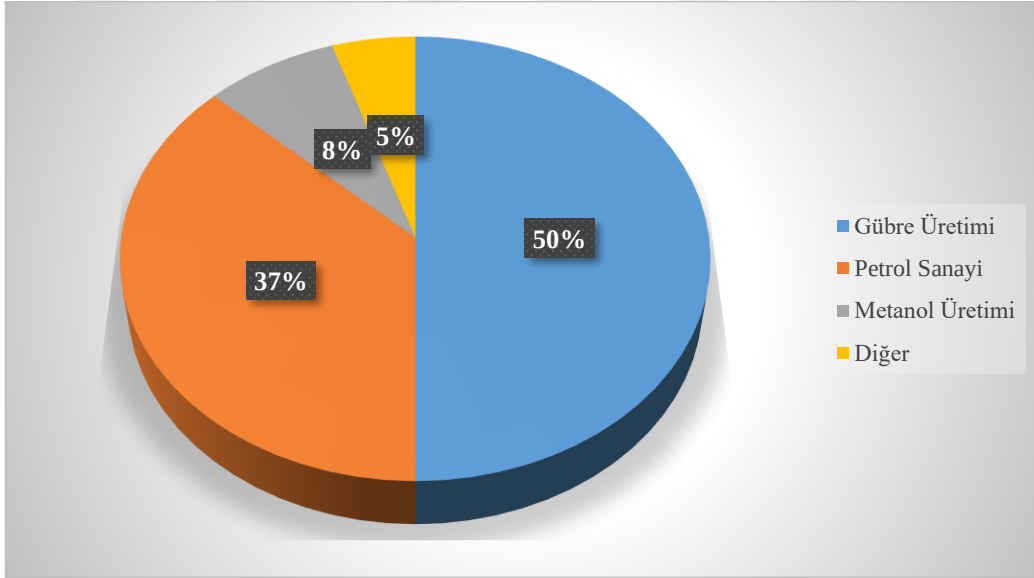


Şekil 2.7. Taşıtlarda kullanılan NaBH_4 ile depolama yöntemi (Sharp-Goldman ve ark., 2000).

3. HİDROJEN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Hidrojen, doğal yakıt değildir. Birincil enerji kaynağı olarak nitelendirilen hammadelerin dönüştürülmesi ile oluşan sentetik bir yakıttır. Su, fosil yakıtlar ve biyokütle materyalleri hidrojen üretiminde kullanılabilir. Dünyada her yıl 500 milyar metreküp (m^3) hidrojen üretilmektedir (Ültanır, 2004).

Hidrojenin pazardaki kullanım oranına baktığımızda %5'lik bir parçasının ticari boyutlu enerji üretiminde kullanıldığı tahmin edilmektedir. Kimya sanayisi ve petrokimya sanayisinde kullanım oranı fazladır. Gübre nitelikli, amonyak üretimi, petrol ürünlerinin yanıcılık oranının artırılması ve metanol üretiminde kullanılmaktadır (Mchugh, 2005). Hidrojen pazarındaki kullanım alanları Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Hidrojenin tüketim alanları (Mchugh, 2005)

Hidrojen piyasada var olan yakıtlardan üretilmediği gibi, suyun elektrolizi ile de elde edilebilmektedir. Hidrojenin bu özelliği en önemli avantajıdır. Suyu elektroliz etmek için yenilenebilir enerji kaynaklarından (güneş, rüzgar, su) faydalanılabilmektedir. Yenilenemeyen enerji kaynaklarından kömürün gazlaştırılması yöntemi vardır, bu yöntemde kükürt kolaylıkla elimine edilebildiğinden cazip hale gelmektedir. 1 kilogram (kg) hidrojen üretimi için yaklaşık 6 kg kömür kullanılır ve bu 3,785 l benzin ile eşdeğer enerji niteliğindedir. Ülkemizin Zonguldak şehrinde birinci jeolojik kuşaktan kalan taşkömürü rezervleri bu dönüşüm için önem arz etmektedir. Dünya genelinde ise kömür rezervlerin tahmini kullanım süresinin 200 yıl kadar olduğu öngörülse de 400 yıla kadar

kullanılabileceği söylenmektedir. Hidrojen üretimi için katı atık ve kanalizasyon materyalleri de kullanılabilmektedir. Bu üretim yönteminde gazlaştırma uygulamasına bağlı olarak, sentez gazının hava (oksijen) ile etkileşimi hidrojen açığa çıkarmaktadır. Termokimyasal çevrim adı verilen yöntemde su, fotokimyasal yöntemde ise arganometalik bileşikler veya enzim-su karışımı kullanılmaktadır. Bu üretim yöntemlerinin dışında fotoelektrokimyasal, biyokimyasal ve biyolojik üretim yöntemleri de mevcuttur. Biyolojik üretim yönteminde, siyanobakteriler ve mikroalgler kullanılmaktadır (Ültanır, 2004).

3.1. Termokimyasal Yöntemle Hidrojen Üretimi

Doğal gaz, petrol rafine işlemi sonucu çıkan ortaya çıkan ürünler veya kömür gibi katı yakıtlar ile sanayide kullanılan hidrojenin büyük bir çoğunluğu üretilmektedir. Doğal gazın katalitik buhar ıslahı, petrolün kısmi oksidasyonu, buhar demir işlemi, ve kömürün gazlaştırılması metotları en çok kullanılan yöntemlerdir. Klor-alkali kullanılarak karışık klor üretmek, ham petrolün damıtılması sırasında uçucu gazların açığa çıkması, kok kömürü üretiminde ve margarin sanayisinde kimyasal hidrojenerasyon yöntemleri ile yan ürün olarak hidrojen elde edilebilmektedir (Anonim, 2004).

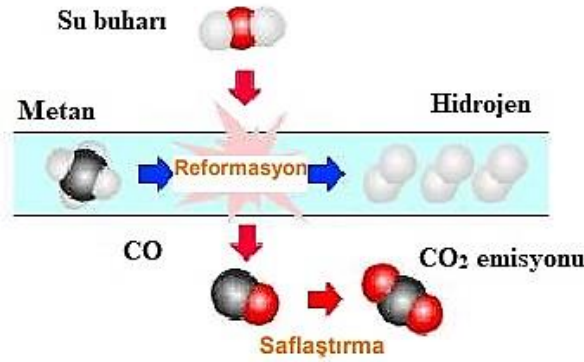
Fosil yakıtlara kimyasal işlem uygulayarak hidrojen üretimi sağlamak bilinen en eski ve en az maliyetli yöntemdir. Termokimyasal yöntemle hidrojen üretimi; metan buhar reformasyonu, kısmi oksidasyon ve ototermal reformasyon, katalitik olmayan kısmi oksidasyon alternatifi, kömürün gazlaştırılması, biyokütle dönüşümü ve gazlaştırılması olmak üzere beş çeşit yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.1.1. Metan Buhar Reformasyonu

Dünya üzerindeki üretilen hidrojenin yarısı bu yöntem ile üretilmektedir, en ekonomik yöntem budur. 700 °C ile 1100 °C arasındaki su buharıyla metan gazının katalizör ortamında yüksek basınçlı karışmasıyla aşağıdaki denklemler neticesinde meydana gelmektedir (Mchugh, 2005).

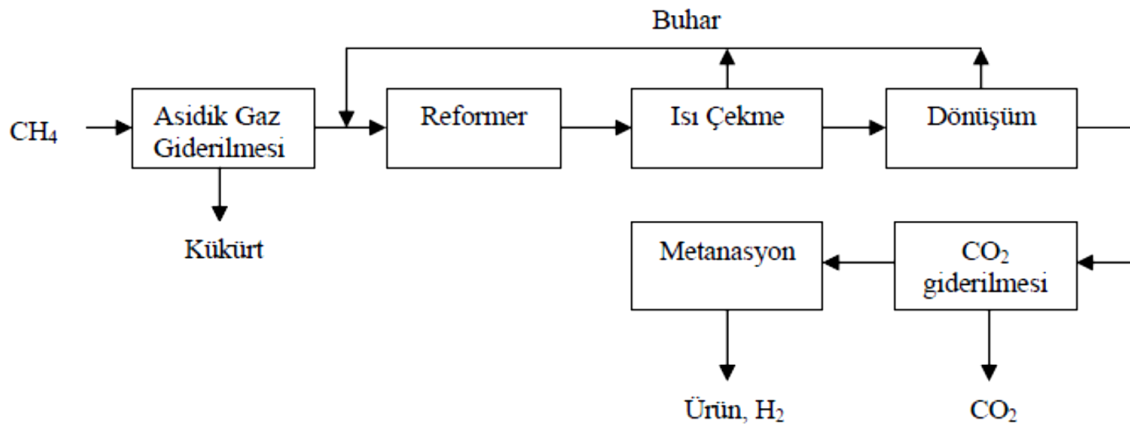


Bu denklem sonrasında CO'nun CO₂'ye dönüşmesi için dönüşüm reaksiyonu gerçekleşmektedir, Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Metan buhar reformasyonu (Mchugh, 2005)

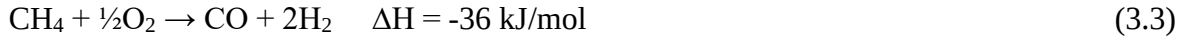
Bu reformasyon sırasında yapılan işlemler görüleceği üzere sırasıyla; gazın kükürdünün giderilmesi, sentez gazının üretilmesi (H₂/CO), CO'nun CO₂'ye dönüştürülmesi ve gazın saflaştırılması olarak adlandırılmaktadır. Bu belirtilen işlemler Şekil 3.3'te daha belirtici şekliyle yer almaktadır.



Şekil 3.3. Metan gazının buhar reformasyonu ile hidrojen üretimi (Ayvaz, 1998)

3.1.2. Kısmi Oksidasyon ve Ototermal Reformasyon

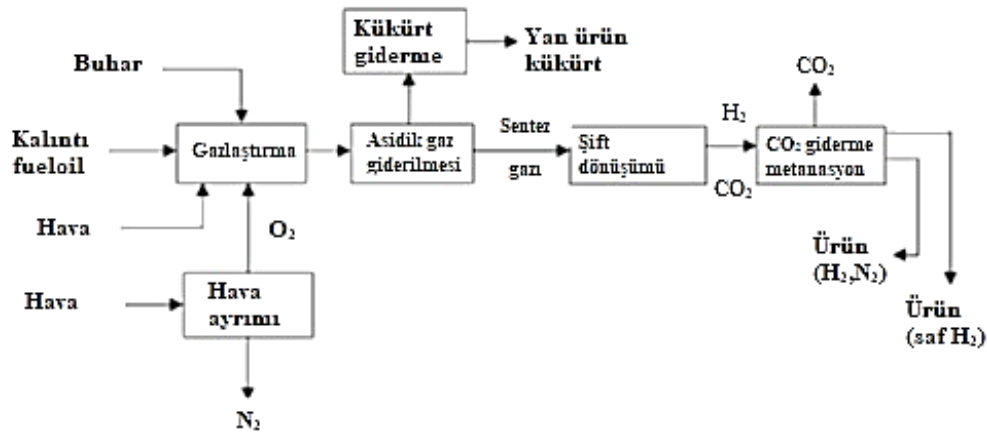
Bu yöntem metan buhar reformasyona benzer bir alternatif uygulamadır. Kısmi oksidasyon yönteminde metan gazı tek aşamadan oluşan reaksiyonla oksitlenirken bu işlem ototermal reformasyonda kısmi reformasyon reaksiyonlarının bileşiminden meydana gelmektedir. Metana uygulanacak kısmi oksidasyon işleminde ürün olarak CO ve H₂ oluşmaktadır ve 3.3 numaralı denklemde gösterilmektedir (Mchugh, 2005).



Kısmi oksidasyon işleminde özel bir reaksiyon dizaynına gerek duyulmaktadır ve bir katalizör gerekmektedir. Bu katalizörün kullanılmasındaki amaç düşük aktivasyon sıcaklığı sağlamak ve daha fazla hidrojen elde etmektir. Yapılan işlemde saf oksijen yerine hava da kullanılabilir. Ancak havanın içinde azot bulunmaktadır ve bu azotun ısıtılması ve sıkıştırılması için fazladan enerji sarf edilecektir. Endotermik buhar reformasyonu için gereken ısının bir bölümünü, ototermal reformasyonda oksidasyon tepkimesi sonucu ortaya çıkan ısı karşılamaktadır. Bu sebeple ısının bir kısmı reaktör içinde karşılanır ve metan buhar reformasyonu ile hidrojen üretim yöntemine göre daha az bir ısı akışı, daha basit ve ekonomik bir reaktör dizaynı sağlanmış olur (Mchugh, 2005).

3.1.3. Katalitik Olmayan Kısmi Oksidasyon Alternatifi

Buhar reformasyonunda kaynama noktaları yüksek, kükürt ve metal içeriği fazla olduğundan ötürü ağır yağlar, petrol kalıntıları ve asfalt kullanılmaz. Bu ağır hidrokarbonların katalitik olmayan kısmi oksidasyonları için Shell ve Texaco prosesleri uygulanır. Bu proseslerde; beslemenin oksijenle kısmi oksidasyonu neticesinde sentez gazı üretimi, CO'nun CO₂'ye dönüşümü ve gazın saflaştırılması işlemleri gerçekleştirilir. Bu proses Şekil 3.3 ile belirtilmektedir.



Şekil 3.4. Katalitik olmayan kısmi oksidasyonla ağır petrol kalıntılarından hidrojen üretim yöntemi (Ayvaz, 1998)

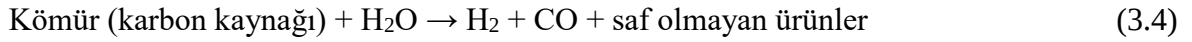
Besleme kısmındaki kükürt, hidrojen sülfür (H₂S)’e dönüşür. Metan buhar reformasyonu ve katalitik olmayan kısmi oksidasyonda açığa çıkan gazların oranı Tablo 3.1’de belirtilmektedir.

Tablo 3.1. Metan buhar reformasyonu ve katalitik olmayan kısmi oksidasyonda açığa çıkan gaz oranları (Ayvaz, 1998)

Bileşen	Metan-Buhar reformingi (%)	Kısmi oksidasyon (%)
H ₂	74	46
CO	18	46
CO ₂	6	6
CH ₄	2	1
N ₂ ve Ar	-	1

3.1.4. Kömürün Gazlaştırılması

Kömürün gazlaştırılmasıyla hidrojen üretim yönteminde de üç aşamadan meydana gelen bir yöntem söz konusudur. 1330 °C sıcaklıktaki kömürden H₂ ve CO elde edilir ve katalitik geçiş dönüşümünden sonra hidrojen saflaştırılır. Denklem 3.4’te gösterildiği üzere yüksek sıcaklık ve yüksek basınçta bulunan su buharı sayesinde kömür kimyasal bağları ayrılmaktadır (Ayvaz, 1998).



Reaksiyon ısısı kontrollü oksijen ilavesi ile sağlanır diğer aşamada CO ve H₂’den oluşan karışım, değişim reaktöründen geçerek CO’nun bir kısmı CO₂’ye dönüştürülür.

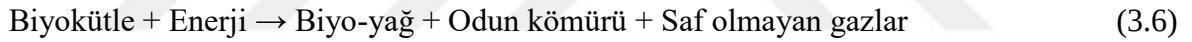


Bir sonraki adımda ise CH₄, O₂, N₂, ve H₂S bulunduran ürünler saflaştırılır, fiziksel absorbasyon ile H₂S’nin %99’u reaksiyon ortamından uzaklaştırılır. Basınçlı absorbasyon bölümünde %85 oranındaki H₂ gazının saflık derecesi % 99,999 seviyesine yükseltilmelidir (Ayvaz, 1998).

3.1.5. Biyokütle Dönüşümü ve Gazlaştırılması

Bitkisel, hayvansal ve evsel tüm organik atıkların kullanılması ile hidrojen üretimi yapılmaktadır. Direkt gazlaştırma ve yağ eldesi yapıldıktan sonra reformasyon işlemleri olmak üzere iki şekilde uygulanır (Anonim, 2001).

Direkt gazlaştırma işlemi uygulama olarak kömür ile benzerlik göstermektedir ve üç aşamalı bir uygulama yapılmaktadır. İlk olarak atık materyaller yüksek sıcaklık ve oksijene maruz bırakılır ve hidrokarbon gazları, hidrojen, CO, CO₂, katran ve su buharı karışımı elde edilir. Geriye kalan malzemenin bir bölümü oksijen, su buharı ve hidrojen vasıtasıyla gazlaşır, bir bölümü de ortama ısı sağlamak amacıyla yakılır. Bundan sonra gerçekleşecek olaylar kömürün gazlaştırılmasında olduğu gibi değişim ve saflaştırma işlemleridir. Biyokütle dönüşümü işleminde ise uygulama yapılacak materyal 450-550 °C’de termal ayrıştırma işlemi adı verilen uygulama ile sıvı biyo-yığa dönüştürülür, bu olaya piroliz adı verilir. Oksijenli organik maddeler ve sudan oluşan biyo-yığ nikel tabanlı katalizör ortamda 750-850 °C’deki buhar reformasyonu sonucunda CO ve H₂’ye dönüştürülür. Son olarak değişim reaksiyonu ile sonuçlanır (Ayvaz, 1998).



3.2. Nükleer Enerji ve Alternatif Enerji Kaynaklarından Hidrojen Üretimi

Nükleer enerji ve alternatif enerji kaynaklarının hidrojen üretim yöntemlerinde enerji kaynağı olarak kullanılması avantaj sağlamaktadır. Doğaya, CO₂ gibi çevreye zararlı salınımları azaltmakta ve yenilenemez enerji kaynaklarının tükenmemesini sağlamaktadır. Elektroliz işlemindeki enerji için fosil yakıtlar yerine nükleer, rüzgar, güneş ya da su enerjisi gibi kaynakların kullanımı ile hidrojen üretimi sağlanmaktadır.

3.2.1. Elektroliz ile Hidrojen Üretimi

Fazla miktarda hidrojen üretimi istendiğinde en çok tercih edilen yollardan birisi de elektroliz yöntemidir. Teknolojisi geliştirilmiş elektroliz cihazları %90 oranında hidrojen üretme potansiyeline sahiptirler. Elektroliz cihazlarında elektrotta kullanılan malzeme seçimi ve dizaynı hidrojen üretim potansiyelini etkileyen temel unsurlardır. Elektroliz işleminde sağlanacak elektrik enerjisi yenilenebilir kaynaklardan (su, rüzgar, dalga, akıntı, gelgit) üretilen elektrik ile de yapılabilmektedir (Ayvaz, 1998).

Elektroliz yönteminde doğru akım kullanılarak su ayrıştırılır. Ayrıştırma sonucunda hidrojen ve oksijen ortaya çıkar. Elektrot olarak düzlem bir levha ya da karbon plakalar kullanılır. Elektrolit adı verilen sıvı içerisine daldırılır ve doğru akım kaynağı bu elektrotlara bağlanmak suretiyle pozitif elektrottan negatif elektrotta doğru bir akım gerçekleşir. Bu gerçekleşen silsile sonucunda anotta oksijen, katotta ise hidrojen birikimi olur. Suyun iletkenliğinin artması için potasyum hidroksit gibi maddeler eklenmektedir.

Normal basınç ve sıcaklıkta gerçekleşen su elektrolizi işlemi için ideal kabul edilen 1,23 V kâfidir. Teorik olarak 1 m³ hidrojen elde etmek amacıyla 2,8 kWh elektrik harcanmaktadır. Ancak pratikteki uygulamalarda bu gereken elektrik enerji 1 m³ hidrojen için 3,9 kWh ile 4,6 kWh arasında olmaktadır. Bu şartlar altında elektroliz işleminin verimi %70 seviyesindedir ancak gelişen teknoloji sayesinde bu verim %90 seviyesine çıkabilmektedir (Anonim, 2004). Suyun elektrolizi denklem 3.9, 3.10 ve 3.11’de gösterilmektedir.



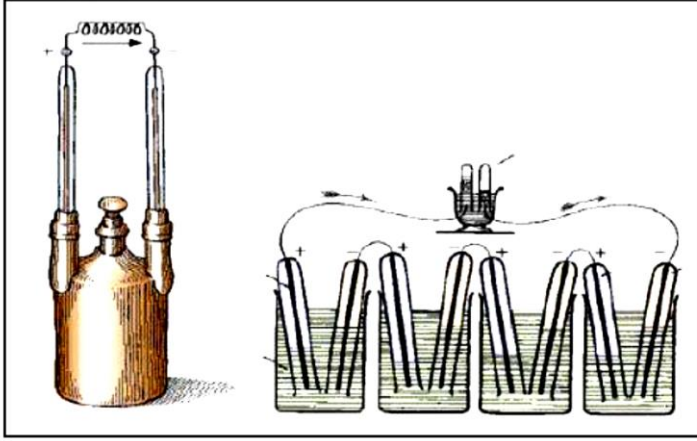
4. YAKIT PİLLERİ

Elektrokimyasal bir tepkime sonucu hidrojeni yakıt olarak kullanarak doğrudan elektrik enerjisi üretme özelliğine sahip sistemlerdir. İçten yanmalı motorlu taşıtların yerini alması öngörülen bu teknoloji, içten yanmalı motorlar gibi çevreye zararlı emisyonları yoktur, temiz enerji kaynağı olarak nitelendirilirler.

Yakıt pili sistemlerinde hidrojen ve havanın içindeki oksijen kullanılmaktadır. Hidrojen ve oksijen, yakıt pili içerisinde redoks tepkimesi neticesinde sisteme elektrik sağlar. Tepkime sonucu su ve ısı açığa çıkar. Isının fazla olmadığı yakıt pili sistemlerinde oluşan ısı, tepkime sonucu açığa çıkan su ile dışarıya atılır. Isının fazla olduğu yakıt pili sistemlerinde ise sistemi soğutmak için ayrı bir soğutma sistemine ihtiyaç duyulabilmektedir.

Detaylı anlatıma geçmeden önce bir yakıt pili sisteminin çalışmasını özetleyecek olursak; anotta hidrojen molekülü bir elektron vererek yükseltgenir ve H^+ şekline dönüşür, serbest kalan elektron dışarıdaki hat ile katot tarafına doğru ilerlerken sistemin var olma amacı olan elektrik enerjisi üretme ihtiyacı gerçekleştirilir. İyon haline geçen hidrojenler, yakıt hücresinin çeşidine göre farklılık gösteren elektrolitten geçerek katot tarafına ulaşır. Katot tarafında hava yoluyla alınan oksijen ve dış hattan giren elektron birleşimiyle H_2O molekülünü oluşturur.

Yakıt pili sistemi, yakıt hücrelerinin babası olarak tanınan William Robert Grove tarafından 1838 yılında bulunmuştur. Elektrolizin tersine çevrilmesiyle hidrojen ve oksijenden elektrik üretmeyi başarmıştır. Çinko sülfat içerisine çinko elektrot ve nitrik asit içerisine platin elektrot daldırarak oluşturduğu sistemde yaklaşık olarak 1,8 V gerilim ve 12 A akım elde etmiştir. Daha sonraki zamanda, elektrotlardan birini sülfürik asit kabına, diğeri hidrojen ve oksijen kabına daldırılan iki platin (Pt) elektrodu düzenleyerek, elektrotlar arasında sabit bir akım olacağını keşfetmiştir. Kurduğu bu düzenekte, birkaç elektrodu seri devre oluşturacak halde düzenleyerek ve bileşimi ayarlayarak suyun ayrıştırılmasını etkileyebileceğini keşfetmiştir. Grove'un buna gaz bataryası adını verdiği ve ilk yakıt pili olarak değerlendirebileceğimiz sistemi Şekil 4.1'de gösterilen cihazla hayata geçirmiştir (Bıyıkoglu, 2003).



Şekil 4.1. Sir William Robert Grove'un ürettiği yakıt pili (Anonim, 2006a)

4.1. Yakıt Pillerinin Anavtajları ve Dezavantajları

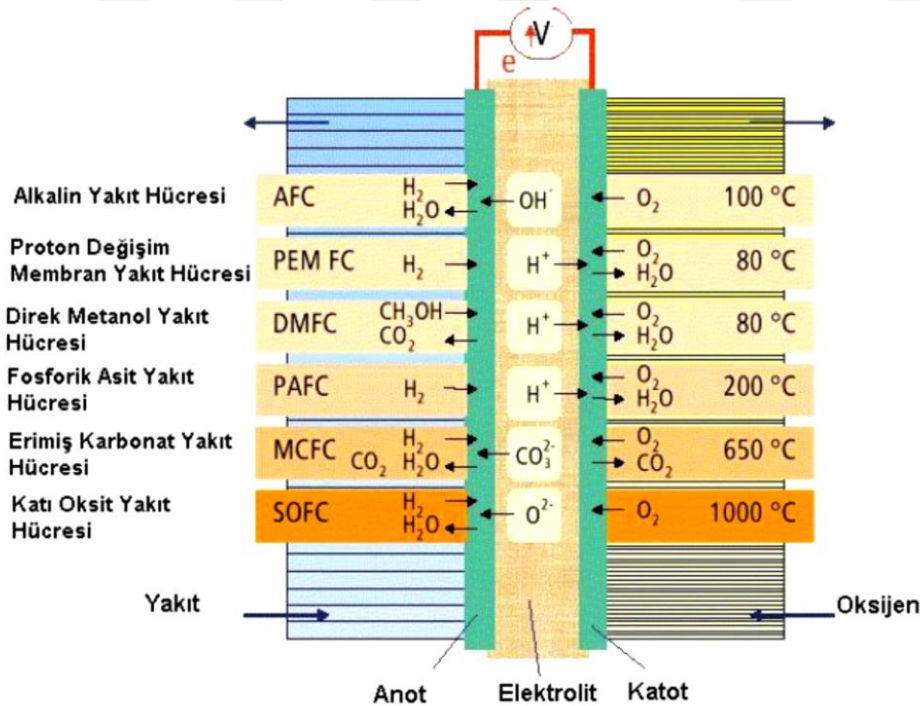
Yakıt pili verimlerini, pistonlu ya da türbinli bir motor ile kıyasladığımız zaman yakıt pillerinin daha verimli olduğunu fark etmekteyiz. Yakıt pilleri küçük sistemler olmasına binaen büyük sistemlerin elde ettiği verimi elde edebilmektedirler. Hareketli parçalar içerse de bu hareketli parçaların az olması nedeniyle uzun süreli kullanıma elverişli ve güvenilirliği artırır özellik kazandırmaktadır. Bu kazandırdığı özellik basit bir sistem olmasına sebebiyet vermektedir. Yakıt olarak hidrojen kullanan yakıt pillerini atık olarak sadece su atımı ve sıcaklık salınımı yapmaktadır. İnsan sağlığına zararlı olan salınımları büyük ölçüde azaltacak sistemlerdir. İçten yanmalı motorlar ile kıyaslandığında; bünyesine entegre edilen yardımcı sistemler de dahil olmak üzere oldukça sessiz çalışmaktadır. Bu da gürültü kirliliğinin önüne geçmektedir.

Maliyet ve hidrojen elde edilmesindeki güçlükler neticesinde sistemin uygulanabilir olmasına, gelişmelerin istenilen seviyede yapılmasına ve son kullanıcıya sunulmasına olumsuz etki etmektedir. Tüm bu olumlu ve olumsuz özellikler göz önüne alındığında kombine güç ve ısı sistemlerinde, otomobillerde, taşınabilir bilgisayarlarda, askeri teçhizatlarda kullanıldığını görmekteyiz. Yakıt pilleri istenilen güç skalasında enerji üretimi yapabilmeye uygun cihazlardır ve enerji üretimi için avantajlı durumlar yaratmaktadır (Dicks ve Larminie, 2000).

4.2. Yakıt Pillerinin Çeşitleri

Yakıt pilleri; düşük sıcaklık yakıt pilleri ve yüksek sıcaklık yakıt pilleri olmak üzere kendi içlerinde kullanım özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Düşük sıcaklık yakıt pilleri hidrojen niteliğinde bir yakıtta, Pt niteliğinde maliyeti yüksek bir katalizöre ihtiyaç duymaktadır. Yüksek sıcaklık yakıt pillerinde hidrokarbon yakıtı kullanır ve tepkime gerçekleşmesi için gerekli olan katalizörün üretim maliyeti daha düşük olması açısından avantaj yaratmaktadır. Yakıt hücresi sistemlerinin çalışma prensipleri benzerdir ancak kullanıldığı uygulama alanları ve çalışma koşulları açısından farklılık göstermektedirler (Anonim, 2009b).

Yakıt pilleri bünyesinde mevcut olan elektrolit sistemine göre altı kısımda incelenmektedir; alkali yakıt pilleri (Alkaline Fuel Cells, AFC), fosforik asit yakıt pilleri (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC), erimiş karbonat yakıt pilleri (Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC), katı oksit yakıt pilleri (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC), doğrudan metanol kullanan yakıt pilleri (Direct Methanol Fuel Cells, DMFC), proton değişim zarlı yakıt pilleri (Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC) olmak üzere Şekil 4.2’de özetlenmiştir.



Şekil 4.2. Yakıt hücresi çeşitleri (Hirschenhofer ve ark., 1998; Anonim, 2009b)

Yakıt pillerinin çalışma sıcaklığı ve çalışma ömürlerini belirleyen temel faktörler malzemelerin fiziksel, kimyasal, termodinamik ve mekanik özellikleriyle bağlantılıdır.

Çalışma sıcaklığı, yakıt pilinden enerji üretmek için kullanılacak yakıt çeşidinin belirlenmesinde de etkilidir. Düşük sıcaklıkta çalışan bir yakıt pilini ele aldığımızda, içerisinde gerçekleşen reaksiyon hızının çok düşük olduğunu, reaksiyonu hızını arttırmak ve dolayısıyla pil verimini arttırmak amacıyla kullanılacak katalizör platindir ve bu kullanılan katalizör, maliyeti arttırmaktadır. Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinde maliyeti daha uygun olan katalizör kullanılır ve pil sıcaklığı reaksiyonu hızlandırmak için yeterli gelmektedir. Tablo 4.1’de yakıt pillerinin özellikleri verilmiştir (EG&E Services Parsons, 2000; Ekmekçi ve Ermiş, 2003; Anonim, 2009b).

Tablo 4.1. Yakıt pilleri ve özellikleri (EG&E Services Parsons, 2000; Ekmekçi ve Ermiş, 2003; Anonim, 2009b)

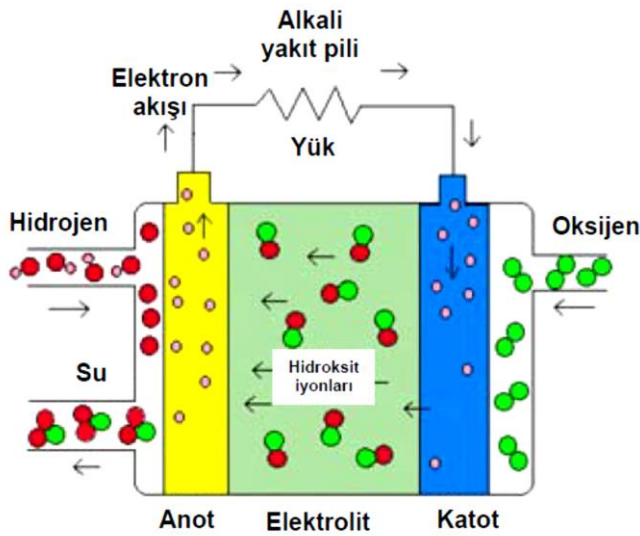
Yakıt Pili Özellikler	Proton Değişim Zarlı Yakıt Pili	Alkali Yakıt Pili	Fosforik Asit Yakıt Pili	Erimiş Karbon Yakıt Pili	Katı Oksit Yakıt Pili
Kullanılan Elektrolit	Polimer iyon değişim zarı	Potasyum hidroksit (KOH)	Fosforik Asit	Li / K Karbonat	Stabilize Zirkonyum
Elektrolitteki Taşıyıcı	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ⁻²	O ₂ ⁻²
Sıcaklık	80–100 °C	80 °C	200 °C	600–700 °C	1000 °C
Verimleri	%45	%40–80	%37–42	%45–60	%60–70
Güç Yoğunluğu (W/kg)	350–1500 (W/kg)	35–105 (W/kg)	120–180 (W/kg)	30–40(W/kg)	15–20(W/kg)
Yakıt Türü	Hidrojen (H ₂), Hidrokarbonlar	H ₂	H ₂ , Hidrokarbonlar, Fosil yakıtlar	H ₂ , Hidrokarbonlar	H ₂ , Hidrokarbonlar
Hücre Materyali	Karbon Tabanlı	Karbon Tabanlı	Grafit Tabanlı	Nikel, Paslanmaz çelik	Seramik
Kullanılan Katalizör	Platin	Platin	Platin	Nikel	Perovskites
Uygulama Alanları	Ulaşım araçları, Askeri Sistemleri	Uzay Çalışmaları	Ticari Uygulamalar (Oteller, Hastaneler)	Elektrik Santralleri	Ticari ve Sanayi alanda Elektrik Santralleri

Doğrudan metanol kullanan yakıt pillerinin özellikleri ile polimer elektrolit yakıt pillerinin özellikleri aynıdır.

4.2.1. Alkali Yakıt Pilleri (Alkaline Fuel Cells, AFC)

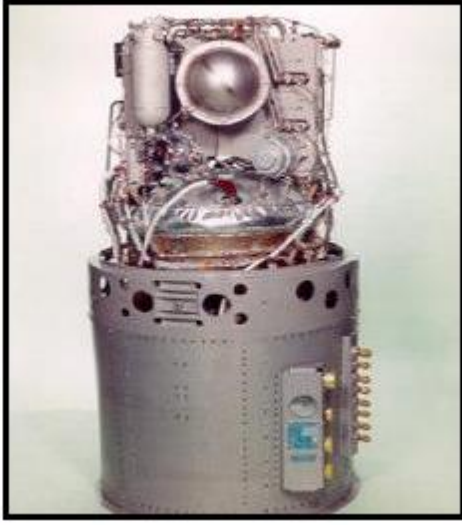
Francis Thomas Bacon (1904-1992) asit elektrolitler yerine potasyum hidroksit kullanmıştır. Potasyum hidroksitin performansı asit elektrolitler kadar iyidir ve asit elektrolitlerden daha az aşındırıcı özellik göstermektedir (Gregor, 2003).

Alkali yakıt pillerinde çalışma sıcaklığı genel olarak düşüktür, 20 °C ile 250 °C arasında çalışma imkânına sahiptirler. Sulandırılmış sodyum hidroksit ya da potasyum hidroksit elektrolit olarak kullanılır. Alkali yakıt pillerinin çalışması sırasında hidroksit iyonu (OH^-) katot tarafından anot tarafına doğru gider. Anot bölgesinde hidrojen gazı OH^- iyonlarıyla tepkimeye girer ve H_2O molekülünü oluşturur, elektronlar açığa çıkar. Elektronlar, farklı bir devreye girip elektrik enerjisi ürettikten sonra katot kısmına dönerler. Katot bölgesine gelen elektronlar oksijen ve su ile tepkime gösterir ve elektrolit içinde çözünen daha çok OH^- oluşur. OH^- , elektroliti kullanarak difüzyon ile tekrar anot bölgesine gelir ve tepkime sürer. Şekil 4.3'te alkali yakıt pilinin çalışma prensibi gösterilmiştir (Hoogers, 2003; Ekmekçi ve Ermiş, 2003).

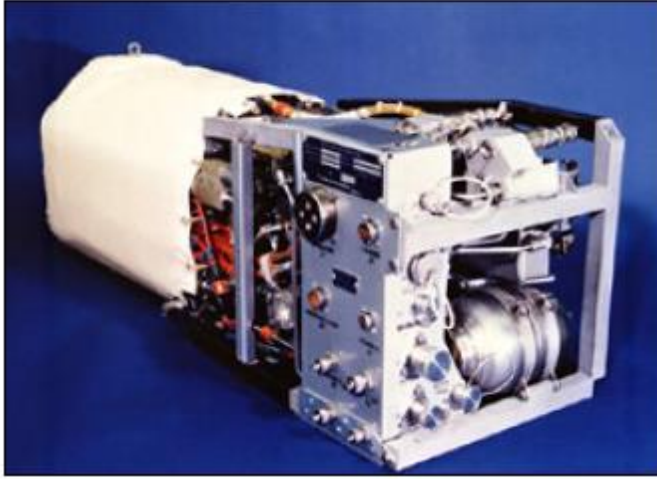


Şekil 4.3. Alkali yakıt pili (Appleby ve Foulkes, 1989)

Yakıt olarak hidrojen, oksitleme işlemini yapması için oksijen veya hava kullanılan sistemde çalışma basıncı normal atmosfer basıncına tekabül etmektedir. Nikel ve karbon gibi elektrotlar kullanılmaktadır. Apollo uzay mekiğinin de yer aldığı uzay çalışmalarında kullanılmıştır ancak bu mekikte çalışma sıcaklığı 250 °C'dir. Apollo uzay mekiğinde kullanılan 1,5 kilowatt (kW) güce sahip yakıt pili Şekil 4.4'te, 12 kW güce sahip yakıt pili Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Apollo uzay mekiğinde kullanılan 1,5 kW gücündeki yakıt pili (Hoogers, 2003)



Şekil 4.5. Apollo uzay mekiğinde kullanılan 12 kW gücündeki yakıt pili (Hoogers, 2003)

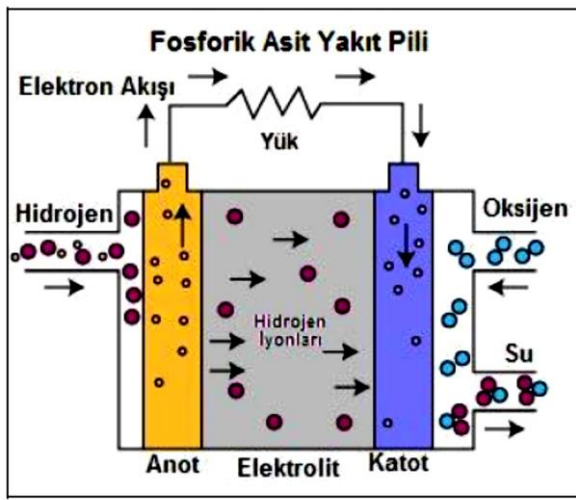
Alkali yakıt pilleri kirleticilere karşı duyarlı olduklarından ötürü saf hidrojen kullanılır. Elektrolit CO_2 ile reaksiyona girerek potasyum karbonat oluşturur ve elektrolitin azalmasına sebebiyet verir. Alkali yakıt pilinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar Tablo 4.2’de gösterilmektedir (Ekmekçi ve Ermiş, 2003).

Tablo 4.2. Alkali yakıt pili reaksiyonları (Ekmekçi & Ermiş, 2003)

Anot reaksiyonu	$\text{H}_2 + 2(\text{OH})^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$
Katot reaksiyonu	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2(\text{OH})^-$
Toplam reaksiyon	$\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

4.2.2. Fosforik Asit Yakıt Pilleri (Phosphoric Acid Fuel Cells, PAFC)

Bu yakıt pilinde elektrolit olarak kullanılan fosforik asit (H_3PO_4) yakıt piline adını vermiştir. 160 °C ile 220 °C arasında çalışma sıcaklığına sahiptir. Anot elektroduna yakıt olarak verilen hidrojen, proton ve elektronlarına ayrıldıktan sonra pozitif yüklü hidrojen iyonları elektrolitten geçer ve katot tarafına doğru gider. Anotta açığa çıkan elektronlar, dış yoldan giderek enerji üretme görevini tamamlar ve katot tarafına giderler. Sonuç olarak su meydana gelir. Şekil 4.6’da fosforik asit yakıt pili çalışma prensibi gösterilmiştir (Ekmekçi ve Ermiş, 2003; Anonim, 2009c).



Şekil 4.6. Fosforik asit yakıt pilinin çalışma prensibi (Anonim, 2009c)

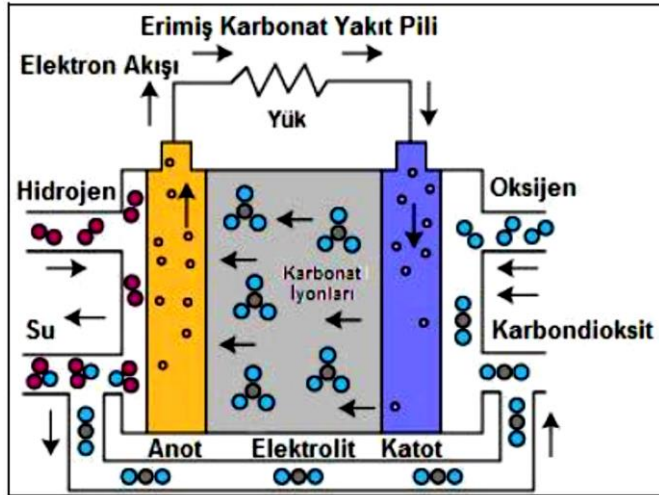
Fosforik asit yakıt pillerinde elektrolit görevini yerine getiren madde fosforik asittir. Kararlı bir asit olduğundan ötürü metallerle çok çabuk reaksiyona girme özelliğine sahiptir. Bundan kaynaklı kullanılacak katalizör sadece platin veya platin alaşımları olmalıdır. Fosforik asit yakıt pillerinde; yakıt olarak kullanılan doğal gaz veya kömür gazı türevli yakıtlar, elektroliti zehirlemeden reaksiyonu devam ettirebilmektedirler. Aynı zamanda karbondioksit içeren hava ile de kullanılabilirler ancak platin zehirlenmesini önlemek adına karbonmonoksit dönüştürülmeli ya da tamamen yok edilmelidir. Fosforik asit yakıt pilleri 200 °C gibi yüksek bir sıcaklıkta çalıştığında, bu yüksek sıcaklıktan ötürü katalizörlerin karbonmonoksit sebebiyle zehirlenmesini azaltmakta ve %1,5 karbonmonoksit derişimine müsaade etmektedir. Fosforik asit yakıt pilinde oluşan kimyasal tepkimeler Tablo 4.3’te gösterilmektedir (Bıykoğlu, 2003; Ekmekçi ve Ermiş, 2003; Anonim, 2009b).

Tablo 4.3. Fosforik asit yakıt pili reaksiyonları (Bıyıkoglu, 2003; Ekmekçi ve Ermiş, 2003; Anonim, 2009b)

Anot reaksiyonu	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
Katot reaksiyonu	$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
Toplam reaksiyon	$2H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$

4.2.3. Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC)

Bu yakıt pillerinde elektrolit olarak poroz lityum-alüminyum matris içinde tutulan erimiş alkali potasyum lityum karbonat kullanılır. Karbonat iyonları iletimi sağlar ve elektrolitin çalışma sıcaklığı 650 °C'dir. Erimiş karbonat yakıt pilleri, katot kısmından O₂ ve CO₂ gazıyla beslendikten sonra iyonların iletimini sağlayan karbonat iyonu [(CO₃)⁻²] üretimi gerçekleşir. Elektrolit içinden anot tarafına geçen (CO₃)⁻² hidrojenle reaksiyona girerek su ve karbondioksit oluşturur, elektronları açığa çıkarır. Elektronlar ise harici devre üzerindeki yolu giderek amaçlanan enerji üretme işini tamamlar ve katot tarafına dönüş yapar. Katot tarafından sisteme giren oksijen ve anotta oluşan karbondioksitin elektronlarla reaksiyona girmesi sonucu karbonat iyonları meydana gelir ve daha önce boşalan elektrolitin dolmasını sağlar. Erimiş karbonat yakıt pilinin çalışma prensibi Şekil 4.7'de gösterilmiştir (Kadırgan, 2003) (Ekmekçi ve Ermiş, 2003).



Şekil 4.7. Erimiş karbonat yakıt pilinin çalışma prensibi (Kadırgan, 2003)

Anotta oluşan karbondioksit, sistem içindeki bir yolla tekrardan katot tarafına gönderilir ve sisteme tekrar dahil edilirse iç dönüşümlü yakıt pili adını almaktadır. Karbondioksit direkt olarak atmosfere salınırsa dış dönüşümlü yakıt pili adını almaktadır (Bıyıkoglu, 2003).

Erimiş karbonat yakıt pilinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar Tablo 4.4'te gösterilmektedir.

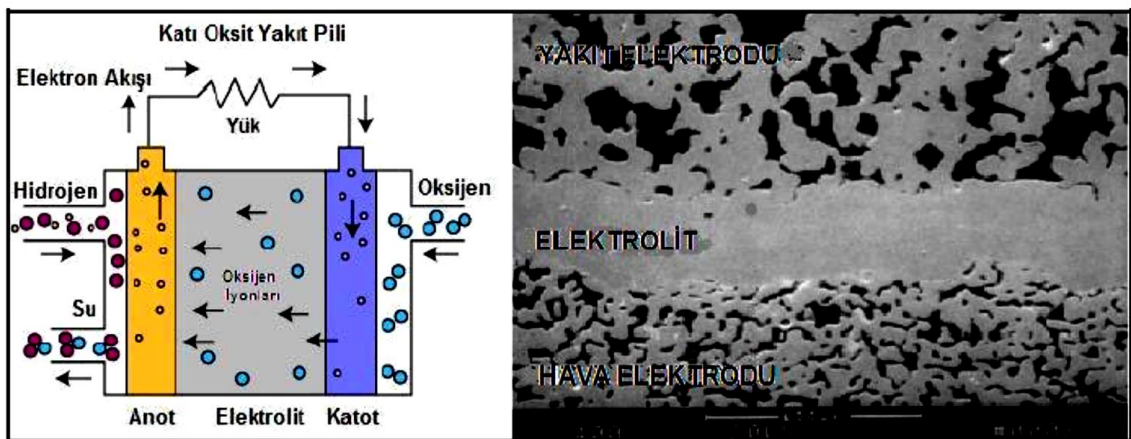
Tablo 4.4. Erimiş karbonat yakıt pili reaksiyonları (Bıykoğlu, 2003)

Anot reaksiyonu	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow CO_2 + H_2O + 2e^-$
Katot reaksiyonu	$\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
Pil reaksiyonu	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 + CO_2 \text{ (katot)} \rightarrow H_2O + CO_2$

4.2.4. Katı Oksit Yakıt Pilleri (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC)

Tamamen katı halde bulunan bir yakıt pili çeşididir. Yüksek sıcaklıkta oksijen iyonlarını katot tarafından anot tarafına aktarmak için gözeneksiz bir katı metal oksit olan zirkonyum materyal kullanılmaktadır. Katı oksit yakıt pillerinin içeriği katı ve gaz fazından ibarettir. %60-70 verime sahip katı oksit yakıt pili çalışma sıcaklığı 1000 °C'dir.

Katı oksit yakıt pilinde kullanılacak yakıt anot tarafına verildikten sonra katot tarafındaki oksijen iyonları elektrolit içinden geçerek anot tarafında hidrojen ile reaksiyona girer. Ayrılan elektronlar dıştaki iletken devre üzerinde yol bularak elektrik enerjisi üretir ve katot tarafına dönüş yapar. Bu reaksiyona girenler; hidrojen, oksijen ve karbonmonoksittir. Bu reaksiyondan çıkanlar ise su ve karbondioksittir. Şekil 4.8'de katı oksit yakıt pilinin işleyiş şekli ile iç yapısı gösterilmektedir (Honsberg, 2003; Ekmekçi ve Ermiş, 2003).



Şekil 4.8. Katı oksit yakıt pilinin çalışma prensibi ve iç yapısı (Honsberg, 2003)

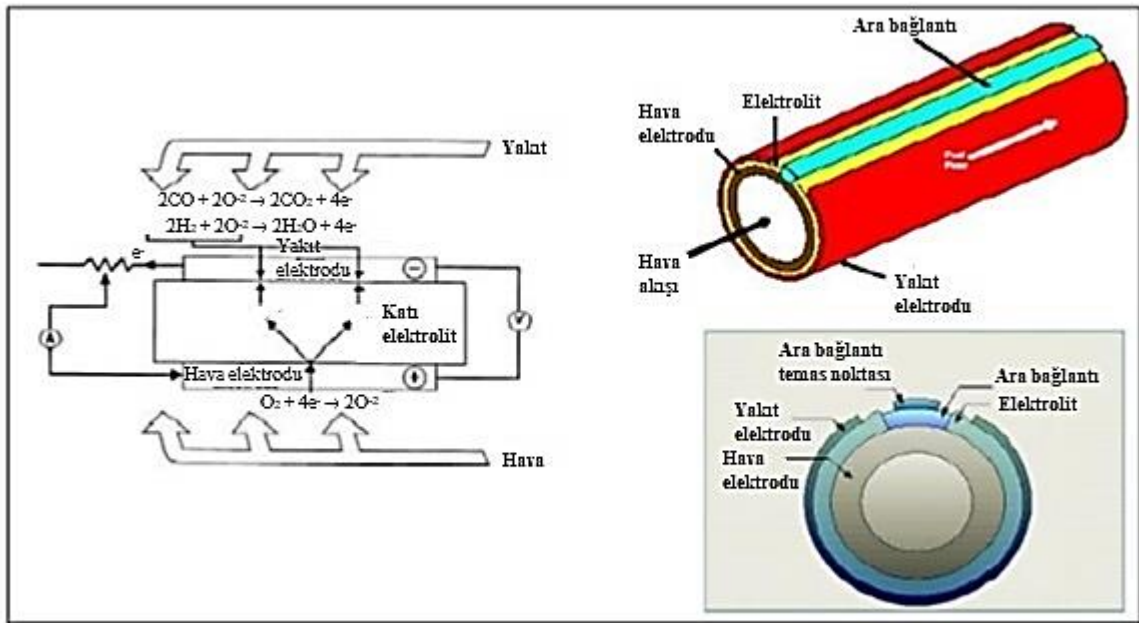
Katı oksit yakıt pili çok yüksek sıcaklıkta çalıştığından ötürü doğal gazı hidrojene çevirebilecek niteliğe sahiptir, yani yakıt olarak hidrojen yerine doğal gaz

kullanılabilmektedir. Ancak saf hidrojen dışında kullanılan yakıtlarda kükürt kirliliğine sebep olmaktadır (Boyacı San ve ark., 2001; Anonim, 2009f). Katı oksit yakıt pilinde meydana gelen reaksiyonlar Tablo 4.5’te gösterilmektedir.

Tablo 4.5. Katı oksit yakıt pili reaksiyonları (Honsberg, 2003)

Anot reaksiyonu	$H_2 + O_2 \rightarrow H_2O + 2e^-$
Katot reaksiyonu	$\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$
Pil reaksiyonu	$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$

Katı oksit yakıt pilleri yüksek sıcaklıkta çalıştıklarından ötürü büyük çaptaki sabit santrallerde kullanılmaktadırlar. Bu yüksek sıcaklıkların sebep olduğu atık ısı, buhar türbin sistemi çevrimleri neticesinde faydalı enerjiye dönüştürülebilmektedir. Borusal, planer ve monolitik dizaynlarda da bulunan katı oksit yakıt pilleri de bulunmaktadır. Şekil 4.9’da borusal dizayn gösterilmektedir (Ekmekçi ve Ermiş, 2003; Türker ve ark., 2004).

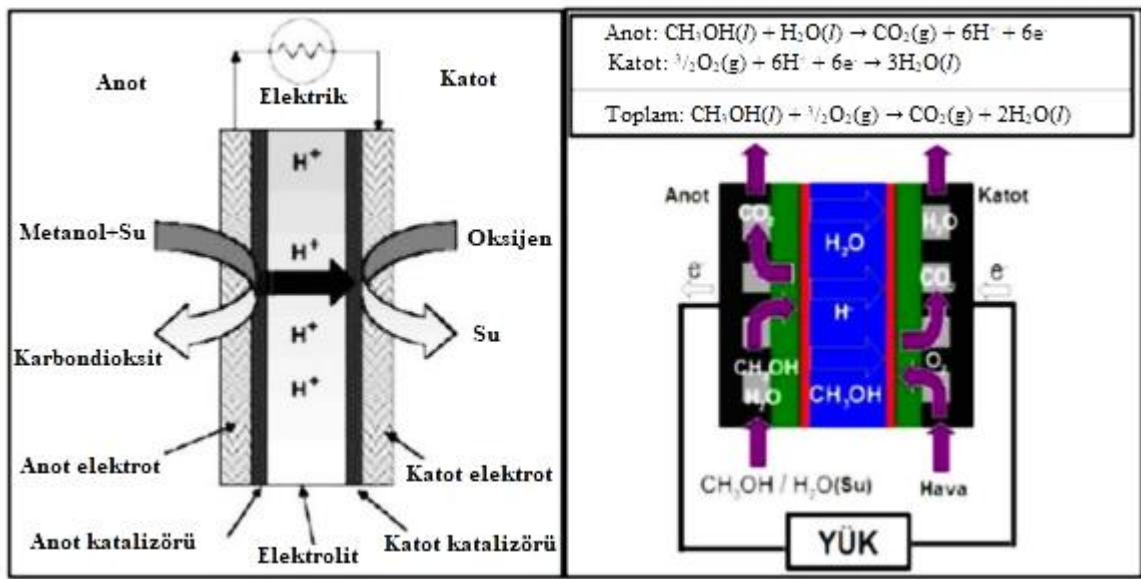


Şekil 4.9. Katı oksit yakıt pilinin borusal dizaynı (EG&E Services Parsons, 2000)

4.2.5. Doğrudan Metanol Kullanan Yakıt Pilleri (Direct Methanol Fuel Cells, DMFC)

Çalışma sistemi açısından polimer elektrolit yakıt pillerine benzemekle beraber kullanılan yakıt saf hidrojen yerine, içeriğinden hidrojen elde edilen metanol (CH_3OH) kullanılmaktadır. Elektrolit olarak polimer zar adı verilen materyali bulundurmaktadır. Hidrojen doğrudan sıvı metanolden elde edildiği için hidrojen elde etme ünitesine ihtiyaç

duyulmamaktadır. Katot tarafında oluşan su ile yakıt pili sistemine doğrudan besleme yapılabilir. Metanol ile su karışımı anot tarafında elektrokimyasal bir reaksiyon oluşturur ve metanol parçalanır. Parçalanmış metanol sonucu proton, elektron ve karbondioksit elde edilir. Protonlar, seçici niteliğe sahip polimer elektrolit zar yolundan ilerleyerek katot tarafına doğru gider ve katot tarafından gelen havanın içindeki oksijen ile reaksiyona girerek su molekülünü oluşturur. Elektronlar dış devre bağlantısı ile gerilim oluşturur. Şekil 4.10'da doğrudan metanol kullanan yakıt pilinin çalışma prensibi gösterilmektedir. Tablo 4.6'da doğrudan metanol kullanan yakıt pilinde gerçekleşen reaksiyonlar gösterilmektedir (Türker ve ark., 2004; Anonim, 2009b).



Şekil 4.10. Doğrudan metanol kullanan yakıt pilinin çalışma prensibi (Anonim, 2009b)

Tablo 4.6. Doğrudan metanol kullanan yakıt pili reaksiyonları (Anonim, 2009b)

Anot reaksiyonu	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$
Katot reaksiyonu	$\frac{3}{2}\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$
Pil reaksiyonu	$\text{CH}_3\text{OH} + \frac{3}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

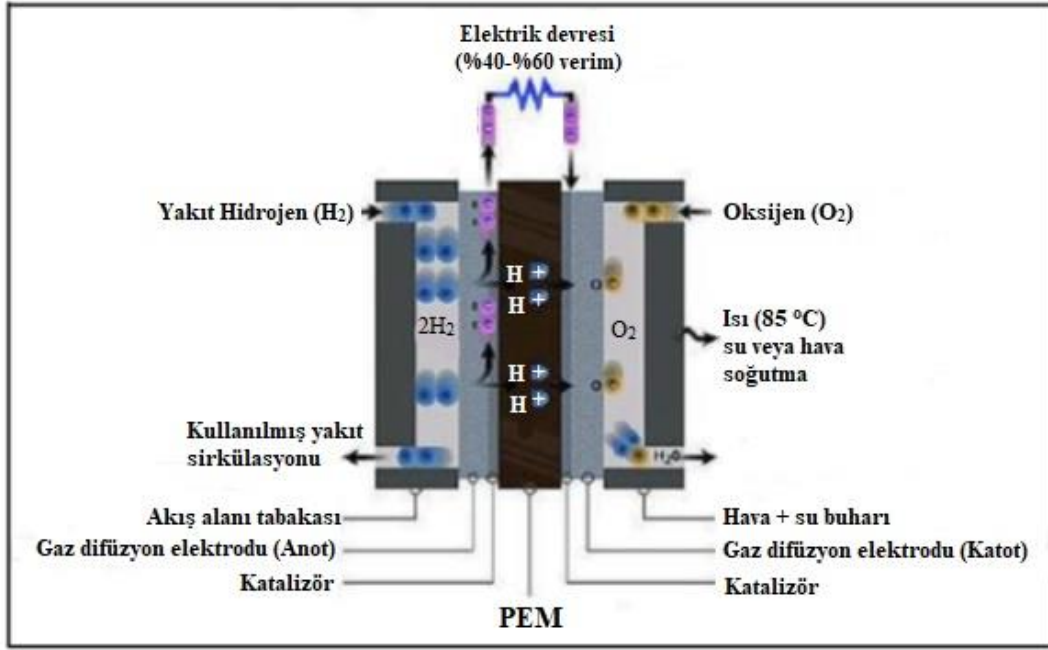
%40 seviyesinde verime sahip olan bu yakıt pillerinin çalışma sıcaklıkları 50 °C ile 100 °C arasındadır. Reaksiyon sonucunda karbondioksit ve su atımı olmaktadır. Metanolün düşük sıcaklıklarda karbondioksit ve hidrojen dönüşümü, proton değişim zarlı yakıt pillerinden farklılık göstermektedir. Daha yüksek miktarda platin katalizörüne ihtiyaç duymasına sebep olmaktadır ve maliyetini artırmaktadır. Doğrudan metanol kullanan yakıt pillerinin avantaj ve dezavantajları Tablo 4.7'de gösterilmektedir (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2002; Anonim, 2009b).

Tablo 4.7. Doğrudan metanol kullanan yakıt pillerinin avantaj ve dezavantajları (Kellegöz ve Özkan, 2004)

DMFC'nin diğer yakıt pillerine göre avantajları	DMFC'nin diğer yakıt pillerine göre sınırlılıkları
Yakıt buharlaştırıcısının ve buna bağlı olarak ısıtma ve kontrol sistemlerinin olmaması.	Karbon oluşumu yüzünden asit elektrolitler kullanılmak zorunda bu da zamanla korozyona ve katotta bozulmaya yol açmaktadır.
Kompleks nemlendirme ve termik kontrol sistemlerinin olmaması.	Anot ve katot için elektro katalizörler kullanılmaktadır; bu da verimin düşmesine sebep olmaktadır.
Sıvı metanol/su karışımının hem yakıt hem de soğutucu görevini aynı anda yapabilmesi.	Şu anda kullanılan katalizörlerde yüksek oranda platin vardır. Bu katalizörler kolaylıkla yabancı maddelerden ve özellikle kimyasal reaksiyon ürünlerinden zehirli duruma geçmektedir.
Diğer yakıt pilleri sistemlerine göre sisteminin boyutunun küçük; ağırlık ve sıcaklığının düşük olması.	DMFC'de, PEMFC'ye kıyasla daha yüksek oranda platin katalizör kullanılmaktadır. Bu da maliyeti arttırmaktadır.

4.2.6. Proton Değişim Zarlı Yakıt Pilleri (Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC)

Elektrolit olarak polimer madde kullanılmaktadır ve bundan dolayı polimer elektrolit yakıt pili olarak da adlandırılmaktadır. Yakıt olarak hidrojen kullanır ve oksitleyici madde ihtiyacını havadaki oksijenden çeker. Elektrotları karbon yapıda olan bu sistemin içindeki polimer elektrolit zar yapısında olduğu için hafiftir. Geçirgen zar olarak da nitelendirilir. Çalışma sıcaklığı 80 °C'dir. Anot tarafından verilen hidrojen bu kısımda iyonize olur ve pozitif yüklü protonlar zardan geçerek katot tarafına doğru yönelirler. Bu sırada açığa çıkan elektrotlar harici yoldan ilerleyerek elektrik enerjisini üretir. Katot tarafında; devre üzerinden gelen elektronlar, pozitif yüklü hidrojen ve havadan elde edilen oksijen birleşerek su molekülünü oluşturur. Buradaki polimer zarın vazifesi, hidrojen protonlarının geçmesine müsaade etmek, elektron ve ağır gazların geçişini engellemektir. Pil yaklaşık olarak 80°C'de çalıştığından ötürü kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için yeterli sıcaklığa sahip değildir. Bu yüzden anot ve katot elektrotlarının bir kenarı ince platin tabakayla kaplanmıştır. Bu platin tabakalar katalizör etkisiyle reaksiyonu yeterli seviyeye yükseltirler. Bu pillerde verim %40 ile %60 civarındadır. Şekil 4.11'de proton değişim zarlı yakıt pilinin çalışma prensibi gösterilmektedir (Kellegöz ve Özkan, 2004; Anonim, 2009d).



Şekil 4.11. Proton değişim zarlı yakıt pilinin çalışma prensibi (Auburn Üniversitesi, 2004; Anonim, 2009d)

Proton değişim zarlı yakıt pillerinde gerçekleşen reaksiyon Tablo 4.8’de, proton değişim zarlı yakıt pillerinin avantaj ve dezavantajları Tablo 4.9’da gösterilmektedir.

Tablo 4.8. Proton değişim zarlı yakıt pili reaksiyonları (Auburn Üniversitesi, 2004)

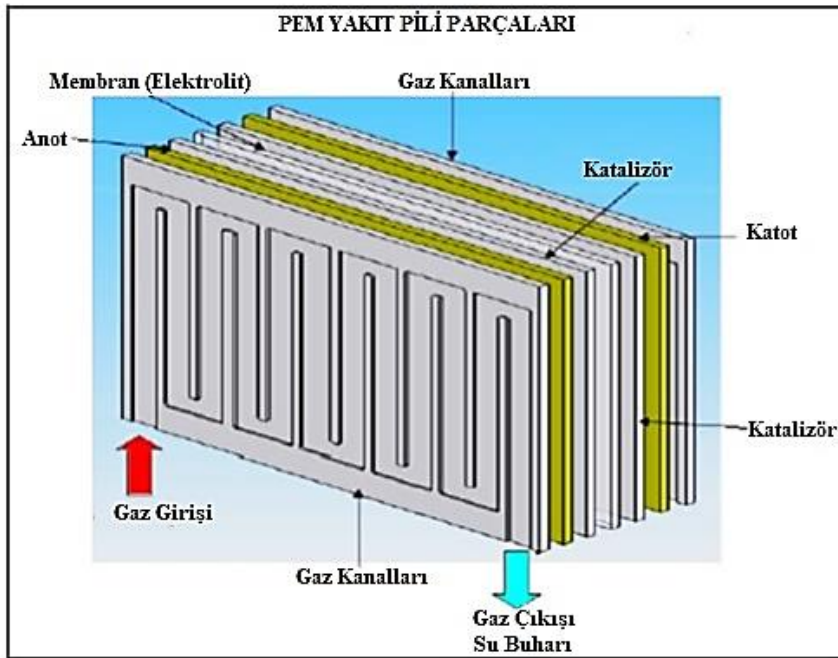
Anot reaksiyonu	$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$
Katot reaksiyonu	$4e^- + 4H^+ + O_2 \rightarrow 2H_2O$
Pil reaksiyonu	$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

Tablo 4.9. Proton değişim zarlı yakıt pillerinin avantajları ve dezavantajları (Özdemir, 2002)

PEMFC’lerin avantajları	PEMFC’lerin dezavantajları.
Yüksek güç yoğunluğu.	Florürlenmiş polimer elektrot pahalıdır ve hücre üretim maliyeti yüksektir.
Hücre içinde serbest korozyif sıvının olmayışı.	Verimli bir çalışma için membrandaki su kontrolü fazlasıyla kritiktir.
Hücre imali basittir.	CO toleransı düşüktür.
Büyük basınç değişikliklerine dayanabilirler.	Elektrotlarda düşük katalizör yüklemeli uzun dönemli, yüksek performans çalışmalarının yapılması gerekir.
Malzeme korozyonu problemi minimumdur.	Düzenleyici ile tamamlanması sırasındaki termal zorluk vardır.
Uzun bir çalışma süreleri vardır.	

Proton değişim zarlı yakıt pilleri diğer yakıt pilleri arasında en çok gelecek vaat eden yakıt pili çeşididir ancak üretim maliyeti fazladır. Yüksek akım ve g yğunluğu göstermektedir. Bu önem arz eden teknoloji seri üretime uygundur (zdemir, 2002).

Proton değişim zarlı yakıt pillerinden sürekli gerilim ve g çıkışı elde edebilmek için seri bağlama yolu kullanılır. Farklı boyut ve sayıda tasarımlar yapılabilir. Her yakıt hresi bir membran elektrot biriminden (MEA) ve akış alanı plakalarından oluşmaktadır. MEA; anot, katot ve elektrolitten oluşan yapıdır. İçerik malzemesi grafit olan iki akış alanının ara kısmına membran elektrot birimi getirilir. Grafit plakalar üzerinden yakıt ve hava geçişi sağlanır. şekil 4.12’de proton değişim zarlı yakıt pilinin parçaları gösterilmektedir (Denizli, 2005).



şekil 4.12. Proton değişim zarlı yakıt pili parçaları (Altınbaş ve Donatan, 2003)

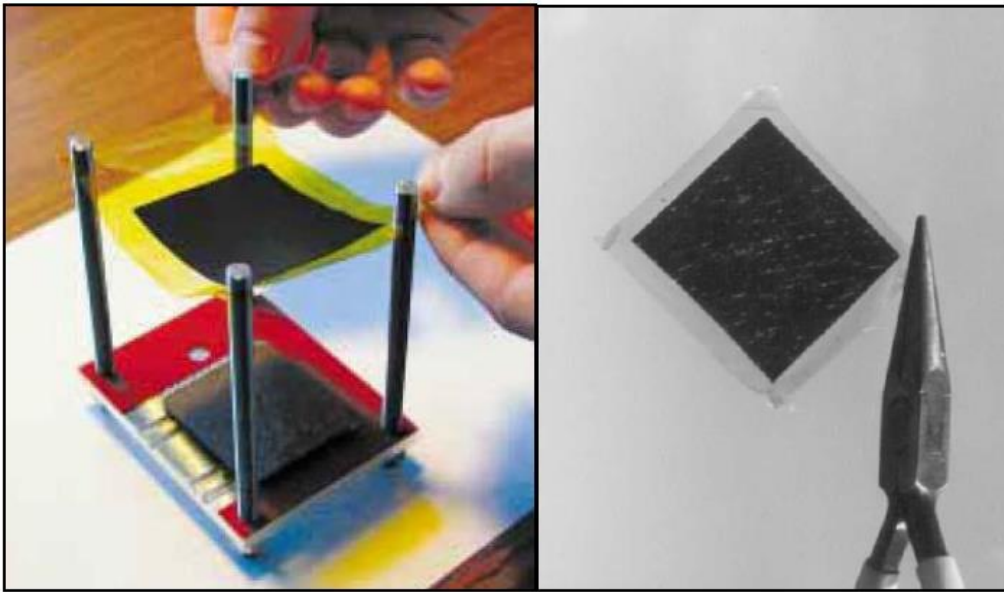
Proton değişim zarlı yakıt pillerinde kullanılan elektrotların gaz difüzyon özelliği bulunmaktadır. Bu elektrotlar, reaksiyona giren gazlar ile elektrolit arasında bulunur ve nemli gazların geçişine müsaade ederek gazların elektrolit ile temasının olduğu yerde reaksiyon yüzeyini sağlar. Gaz ve su geçişinin st seviyede olabilmesi için elektrodu oluşturan katalizör ve karbon destekleyici madde çok ince yapıdadır (Larminie ve Dicks, 2000; Lanz, 2001).

Membranın iki tarafındaki elektrotlarda katalizör olarak platin ve alaşımları kullanılmakla birlikte bu katalizör tabakası yaklaşık olarak 5 mikrometre (μm) ile 50 μm kalınlığı

arasındadır ve içerik olarak bulunan platin mikro kristallerin çapı 2 μm ile 4 μm arasındadır (Denizli, 2005).

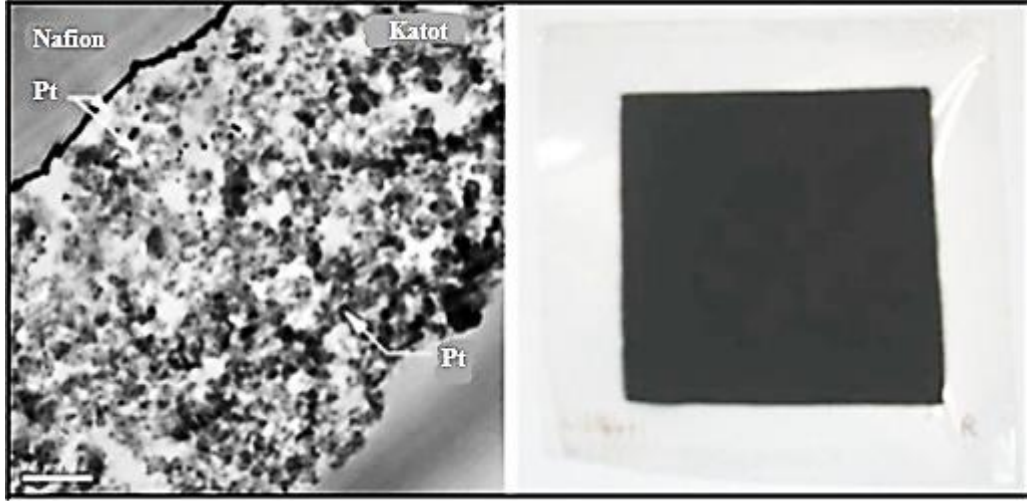
Proton değişim zarlı yakıt pillerindeki proton iletimini sağlayan polimer zar en önemli parçadır. Bu teknolojinin geliştirilmesi sırasında gelişimi için araştırma ve uygulama çalışmalarının en çok yapıldığı parça bu zardır. Ticari kullanımdaki proton değişim zarlarının çeşitliliği az ve maliyeti yüksek olduğu için bu araştırma ve uygulama çalışmaları ivme kazanmıştır. Bu zar su ile tamamen doyurulduğu zaman yüksek verimlilikte çalıştığı tespit edilmiş ve tam doygun olması durumunda iyonik iletkenliğinin yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Bir proton değişim zarı proton geçirgen özellikte olmalıdır. Mekanik dayanımı yüksek olmalıdır. Uzun süre kullanımda ısıya dayanıklılığının ve kimyasal direncinin fazla olması beklenir. Son kullanıcıya daha çok ulaşması için emniyet seviyesi yüksek olmalı ve maliyeti düşük olmalıdır. Şekil 4.13'te proton değişim zarı gösterilmektedir (Thampan ve ark., 2001; Altınbaş ve Donatan, 2003).



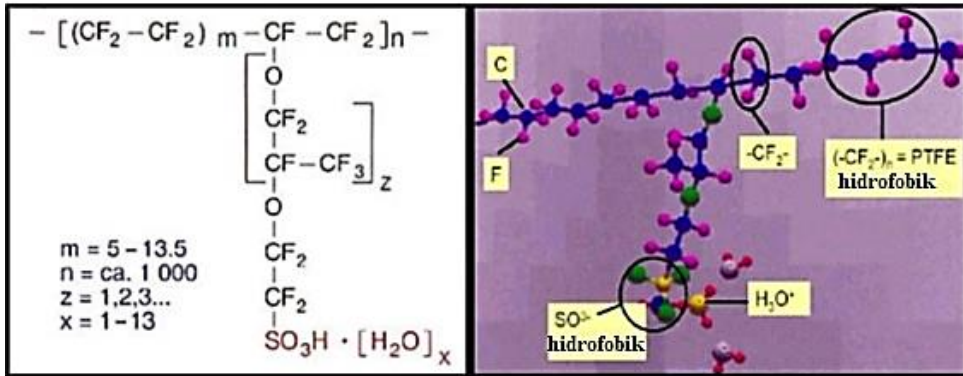
Şekil 4.13. Proton değişim zarı (US Fuel Cell Council, 2009)

Polimer elektrolit membran, proton değişim zarlı yakıt hücrelerinin ayırt edici özelliği olarak değerlendirilir. Şekil 4.14'te membran elektrot biriminin elektron mikroskobu altındaki görüntüsü verilmektedir (Larminie & Dicks, 2000). Ticari ürünlerdeki polimer elektrolit membranın kalınlığı 12 μm ile 250 μm arasında değişmektedir (Barbir, 2005).



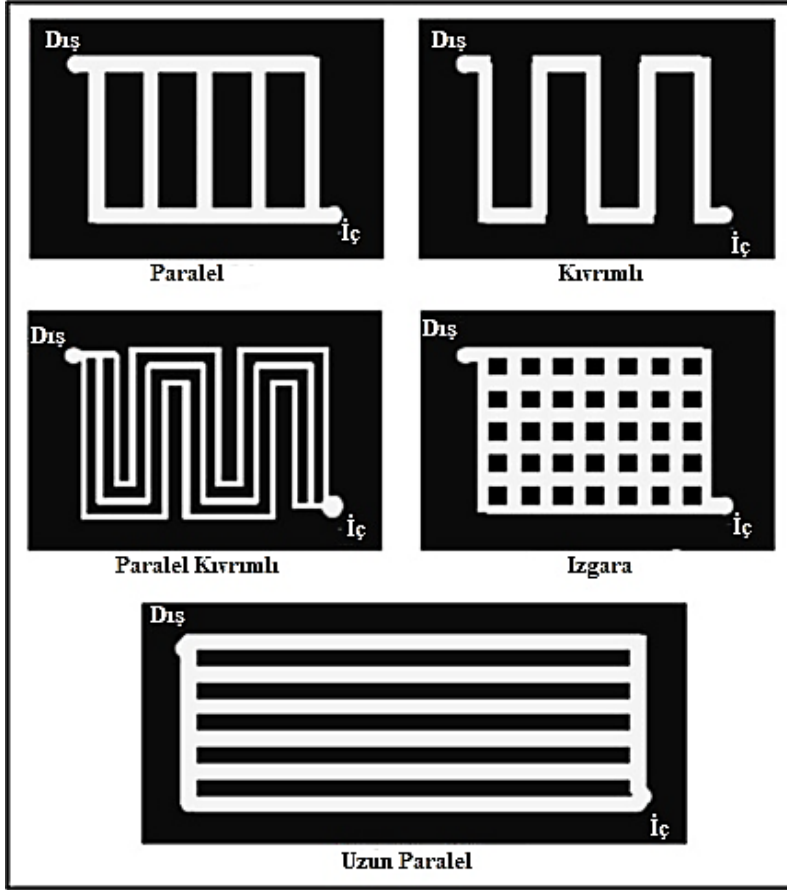
Şekil 4.14. Membran elektrot biriminin elektron mikroskobu altındaki görüntüsü (Ziegler, 2005)

Florotilen öncelikli olmak üzere sülfolanmış floropolimerlerin yapısını oluşturduğu membranlar kullanılmaktadır. 1960 yılından beri çok çeşitte geliştirilen Nafion membran çeşitleri arasında en bilinenidir. Nafion çok yüksek kimyasal ve ısı kararlılığına sahiptir. Kuvvetli oksitleyicilere, kuvvetli indirgeyicilere ve kuvvetli bazlara karşı 125 °C sıcaklığa kadar kimyasal olarak dayanmaktadır. Teflon benzer bir yapısı olan Nafion, floropolimer bir iskelet üzerine kimyasal bağlarla sülfonik asit grubu bağlanmıştır. Şekil 4.15'te Nafion'un kimyasal ve atomik yapısı gösterilmektedir (Anonim, 2006b).



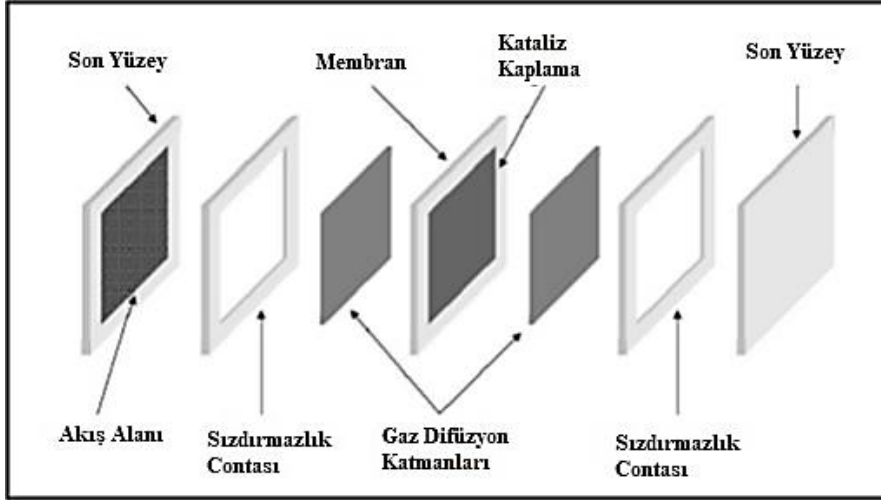
Şekil 4.15. Nafion'un kimyasal ve atomik yapısı (Anonim, 2006b; Anonim, 2009e).

Membran elektrot biriminin karşıt taraflarında olan akış alanı plakaları, yakıt ve oksitleyici geçişini sağlar ve gaz ile temasın maksimum seviyede olması için kıvrımlı kanal şekline sahiptir. Bu plakalar, düzenli güç üretimi, daimi performans ve reaksiyon sonucu oluşan suyun kontrolü açısından önem arz etmektedir. Farklı tasarımlarda olan akış alanı plakaları Şekil 4.16'da gösterilmektedir (Proton Exchange Membran Fuel Cells, 2009).



Şekil 4.16. Proton değişim zarlı yakıt pilinde kullanılan akış alanı tasarımları (Proton Exchange Membran Fuel Cells, 2009)

Proton değişim zarlı yakıt pillerinde kullanılan plakalar, elektrokimyasal reaksiyon sonucu oluşan akımın bir sonraki hücreye geçebilmesi ve son olarak da yakıt hücresi akımının alındığı arka levhalara ulaşması için elektrik iletkenliğine sahip olmalıdır. Bu plakalar, içine akış kanallarının işlendiği grafitlerden imal edilir. Grafitin tercih edilme sebepleri; yüksek iletkenliğe sahip olması, düşük kirliliği ve az oranda düşük maliyetidir. Her bir yakıt hücresi arasına soğutucu plakalar yerleştirilir ve tasarımı gaz akış alanı plakalarına benzetilir. Etkerif bir ısı kontrolü olması sağlanır. Sisteme giren ve çıkan yakıtı, oksitleyici ve soğutucuyu uygun bir şekilde dağıtmak için gaz ve su çıkışları; akış alanı ve soğutucu plakalar tarafından birleştirilir. Bu düzenek parçaları Şekil 4.17’de gösterilmektedir (Larminie ve Dicks, 2000; Lanz, 2001).



Şekil 4.17. Proton değişim zarlı yakıt pili hücresi parçaları(Larminie ve Dicks, 2000; Lanz, 2001)

İyon iletiminin olması ve hücrelerin hasar görmemesi için reaksiyona giren gazların nemlendirilmesi önemlidir. Yakıt hücre demetinin içine konan ve ayrı olarak dışarıdan çalışan nemlendiriciler mevcuttur. Dahili nemlendiricili yakıt hücreleri, yakıt hücresi yığını içerisine yerleştirilmiş grafit plakalardan oluşur. Aktif bölüm yakıt hücrelerinden oluşur, pasif bölümde nemlendiriciler plaka şeklinde bulunur ve membranın her iki tarafına hidrojen ve su iletimi yaparlar. Membrandan geçen su temas halindeki gazları doyurma işlemini yapar. Harici nemlendiriciler yakıt hücresi dışında bulunur ve suyu sprey şeklinde sıcak bir yüzeye ya da reaksiyona giren gazın geçiş yoluna püskürtülür, buharlaşan su gazın doymasını sağlar. Kullanılacak su soğutma kanalından ya da ayrı bulunan bir su devresinden temin edilir. Harici nemlendiriciler daha sağlam ve işlevseldir (Larminie ve Dicks, 2000; Lanz, 2001).

5. ELEKTRİKLİ TAŞITLAR

Yaşadığımız zaman dilimi içerisinde fosil yakıt tüketerek güç üreten taşıtlarda kullanılan yakıt rezerv ömürlerinin sınırlıdır. Aynı zamanda çevreye zararlı gaz salınımı da yapmaktadır. Bundan dolayı elektrik enerjisi ile çalışan ve üzerinde bulunan elektrik motorları ile tahrik gücü oluşturan taşıtlara yönelim artmaktadır. Bu teknolojinin gelişmesi ve daha verimli hale gelebilmesi için zamana ihtiyaç olduğundan dolayı fosil yakıt ile çalışan araçlardan, elektrik ile çalışan araçlara geçiş süreci hızlı olamamaktadır. Hibrit adı verilen hem fosil yakıttan enerji üreten hem de elektrik enerjisi ile çalışan taşıt modelleri firmalar tarafından geliştirilmiş ve son kullanıcılara sunulmuştur.

Elektrik enerjisi üretmek için taşıtlarda kullanılan bir diğer sistem de bu tez çalışmasının konusunu oluşturan yakıt pilleridir. Geleceğin enerji üretim yöntemi olarak öngörülen bu sistemin taşıtlarda yaygın kullanımı için bilimsel araştırmalar büyük bir hız kazanmış ve dünya piyasasında önemli yer tutan firmalar da bu teknolojiye yönelmiştir.

5.1. Hibrit Elektrikli Taşıtlar

Birden fazla enerji kaynağının kullanılması neticesinde tahrik sağlanan taşıtlar olarak nitelendirilir. Tamamen elektrik ile çalışan taşıtlardan farkı ise tahrik sistemine ek olarak içten yanmalı motor, yakıt hücresi, güneş enerjisi veya alternatif başka bir enerji sistemi ile desteklenebilir nitelikte olmasıdır (European Commission, 2001).

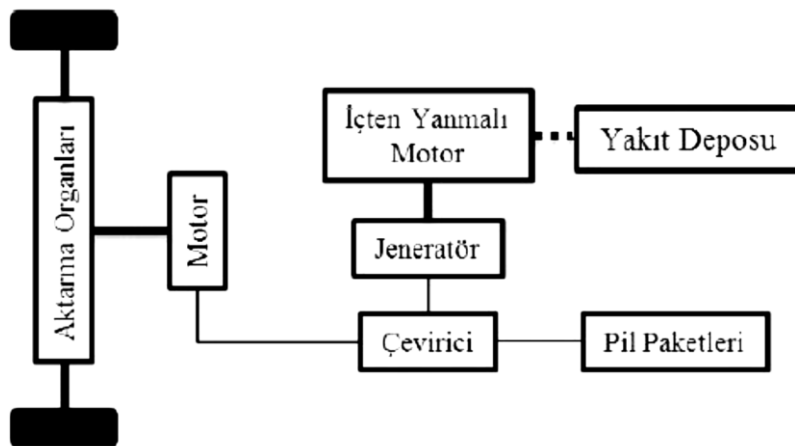
Karayollarında kullanılan araçlarda tahrik için harcanan enerjinin azaltılması amacıyla taşıt kütlelerinin azaltılması, güç aktarma organlarının şartlara daha uygun hale getirilmesi, karadan ve havadan gelen sürtünme kuvveti etkisinin azaltılması gibi üzerine çalışılabilecek geliştirme faaliyetleri mevcuttur. İçten yanmalı motor kullanan taşıtlar çevreye kirlenici gaz salınımı yapmaktadır ve bu sebepten ötürü elektrikli ya da hibrit elektrikli taşıt kullanımına olan ilgi artmaktadır. Ancak içten yanmalı motorların ağırlık güç oranının düşük seviyede olması ve yakıt olarak kullanılan petrol ürünleri enerji yoğunluğunun fazla olmasından dolayı 1970 yıllarına kadar elektrikli taşıtlar, içten yanmalı taşıtların gerisinde kalmıştır (Paganelli ve ark., 2001).

1997 yılında Japonya’da Toyota firmasının ilk hibrit elektrikli modeli olan Prius’u son kullanıcılara sunmuştur ve iki yıl sonra Amerika’da Honda markası Insight modelini

üretmiştir. Honda, Civic modeli hibrit elektrikli aracı ile bu üretime devam eden diğer bir firma olmuştur (Altas ve Sharaf, 2007).

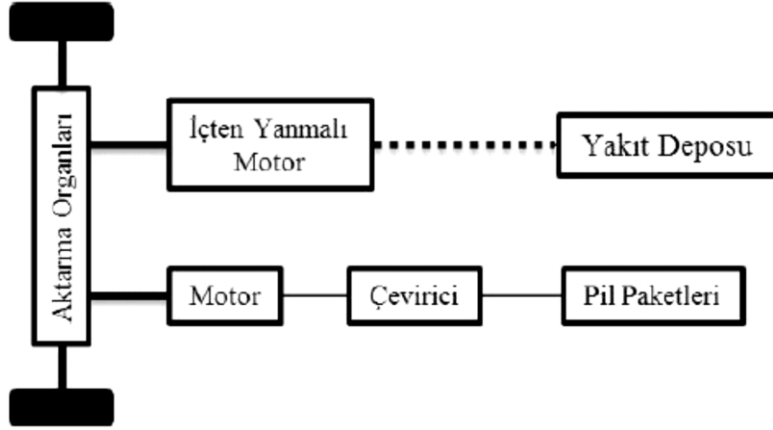
Yakıt pilli araçlara geçişi hızlandıracak bir teknoloji olduğu için hibrit araçlar bu konuda önem arz etmektedir. Bu doğrultuda hibrit araçların avantajları ve geliştirilmesi gereken özellikleri mevcuttur. İçten yanmalı motor elektrik motoruyla desteklenebilmekte ya da sadece elektrik motoru ile güç üretimi yapılabilmektedir. İçten yanmalı motorun hacmi küçültülerek turbo ya da süperşarj adı verilen yanma verimini arttıran sistemler kullanılabilir. İhtiyaç halinde yokuş çıkma kapasitesinin artması ya da ivme ihtiyacını iki motoru birden kullanarak sağlaması da önemli bir faktördür. Regeneratif sistem adı verilen sistem, frenleme esnasında açığa çıkan enerjiyi depolayabilmektedir. Elektrik motorları güç aktarım organları olmadan doğrudan iletimi sağlayabilmektedir. Tüm bu iyi özelliklerine rağmen batarya teknolojisi yetersiz kalmaktadır ve bu durumda kullanım sistematiği gereği yakıt pilli araçlar daha avantajlı konuma geçmektedir.

Yakıt pili kullanan taşıtlarda doğrudan elektrik enerjisi elde edilebilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalara göre proton değişim zarlı yakıt pillerinin yüksek güç yoğunluğuna ve düşük çalışma sıcaklığına sahip olmasından ötürü bu teknolojinin üzerine yoğunlaşmıştır (Shen ve ark., 2008). Hibrit otomobillerde kullanılan parçalar, otomobil üzerindeki konumlarına göre çeşitlilik sağlamaktadır. Seri hibrit elektrikli taşıtlarda içten yanmalı motordan alınan çıkışa bağlanan jeneratör vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülür ve bu elde edilen enerji bataryaların şarjı ve elektrik motorunun çalışması için kullanılmaktadır. Şekil 5.1’de seri hibrit elektrikli araç dizaynı gösterilmektedir (Li ve Sheldon, 2007; Agarwal ve Mayank, 2013).



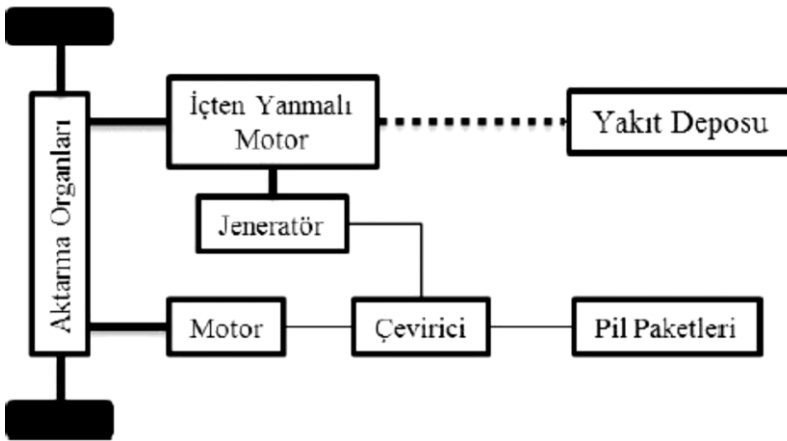
Şekil 5.1. Seri hibrit elektrikli araç dizaynı (Muratoğlu ve Alkaya, 2016)

Paralel hibrit elektrikli taşıtlarda içten yanmalı motor ve elektrik motoru ile aktarma organları üzerinden hareketi gerçekleştirmektedir. Şekil 5.2’de paralel hibrit elektrikli araç dizaynı gösterilmektedir (Li ve Sheldon, 2007; Agarwal ve Mayank, 2013).

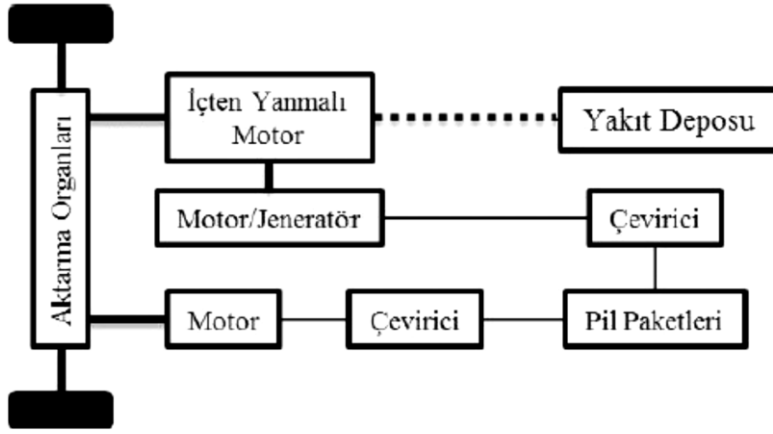


Şekil 5.2. Paralel hibrit elektrikli araç dizaynı (Muratoğlu ve Alkaya, 2016)

Daha ekonomik yakıt tüketimi sağlayan seri-paralel hibrit elektrikli araçlar ve kompleks hibrit elektrikli araçlar aynı zamanda güç performansını da arttırmaktadır. Şekil 5.3’te seri-paralel hibrit elektrikli araç dizaynı, Şekil 5.4’te ise kompleks hibrit elektrikli araç dizaynı gösterilmektedir (Li ve Sheldon, 2007; Agarwal ve Mayank, 2013).



Şekil 5.3. Seri-paralel hibrit elektrikli araç dizaynı (Muratoğlu ve Alkaya, 2016)



Şekil 5.4. Kompleks hibrit elektrikli araç dizaynı (Muratoğlu ve Alkaya, 2016)

5.2. Yakıt Pili Kullanan Elektrikli Taşıtlar

Yakıt pilli taşıtlar olarak nitelendirilen teknoloji, hidrojenin ya da hidrokarbon yakıtlarının tüketildiği, yakıt pili sistemleriye üretilen doğru akımın alternatif akıma dönüştürülerek alternatif akım motorları ile taşıtı tahrik eden sistemler bütünüdür. İçten yanmalı motoru olan taşıtlardaki yanma sonucu pistonlarda oluşan doğrusal hareketin dairesel harekete çevrilmesi ve aktarma organları ile aktarılması yerine kullanılan yakıt sayesinde kimyasal enerjinin mekanik enerjiye dönüşü sağlanır. Böylelikle doğrudan dairesel hareket üretebilmemize olanak sunar. Bu teknoloji sayesinde, çok yüksek sıcaklık ve basınçta çalışan, yüksek gürültü seviyelerinde gerçekleşen, kompleks parçaların bulunduğu, fazla seviyede atalet kuvvetlerinin ve titreşimlerin olduğu sisteme gerek duyulmamaktadır. Daha düşük sıcaklıklarda çalışan, düşük ses seviyesinde, düşük titreşimli ve kompleks parçalar içermeyen şekilde tahrik işlemi yakıt pili sayesinde gerçekleşmektedir (Oral ve Çelik, 2005).

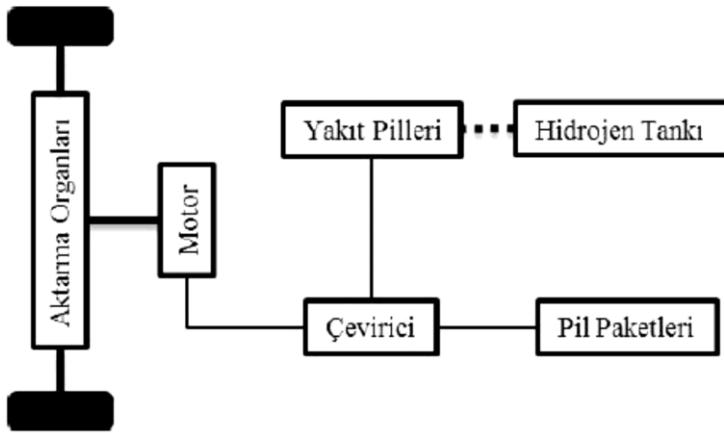
Yakıt pili ile çalışan taşıtlarda genel olarak yakıt tankı, yakıt pili sistemi, AC/DC akım dönüştürücüsü ve elektrik motoru sistemleri mevcuttur. Genel kontrol ünitesi, akü, soğutma sistemi ve çeşitli aktarma organları da tamamlayıcı donanım parçalarıdır. Metanol ve doğal gaz gibi yakıtlar kullanan sistemler doğrudan hidrojen kullanmayan sistemlerdir. Bu sistemlerde hidrojenin yakıt piline hazır hale gelmesi için şekillendirici adı verilen bir parça mevcuttur. Geleneksel motorlar ile yakıt pilli motorların verimi karşılaştırıldığında, yakıt pili kullanan sistemlerin veriminin yaklaşık iki katı düzeye çıktığı görülmektedir.

Yakıt pili konusunda başta otomobil üreticisi büyük firmalar araştırma amacıyla ortaklıklar oluşturmaktadırlar. Büyük bütçeler ayırdıkları araştırma ve geliştirme departmanından prototip çıkarma evresini geride bırakmışlar ve ürünlerini son kullanıcılara sunmaktadırlar.

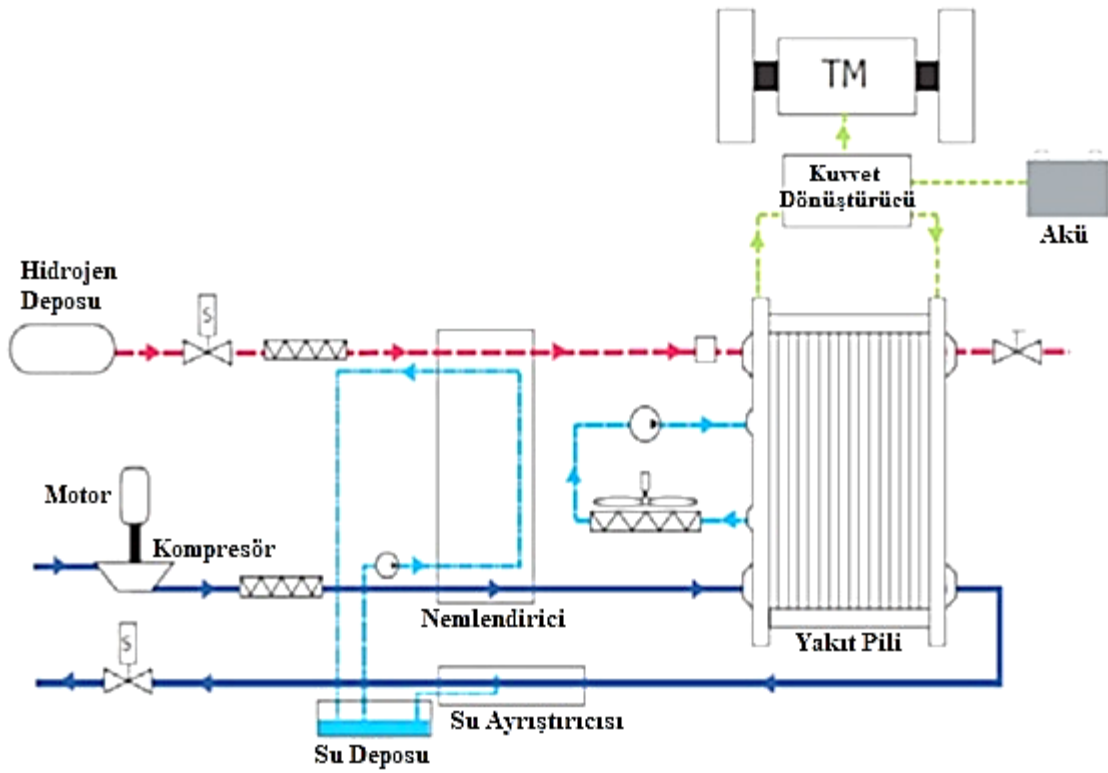
Bazı şirketler hidrojenin depolanması amacıyla büyük petrol firmaları, depolama teknolojisi alanında geliştirme yapan firmalar ve yakıt pili üreticileri ile ortaklaşa projeler gerçekleştirmektedir (Oral ve Çelik, 2005).

Standart bir otomobilin 0 km/h'den 85 km/h hıza çıkabilmesi için ihtiyaç duyduğu enerjinin yaklaşık olarak 500 kW olduğu bilinmektedir. Yakıt pilleri bu gücü kolaylıkla karşılayabilmektedir (Pischinger ve ark., 2005). Hidrojen, tüm yakıtlar içinde birim kütle başına en yüksek enerjiye sahiptir (Kınav, 2007). Benzinin üç katı üst ısı değere sahiptir ve hidrojenin üst ısı değeri 141,9 MJ/kg değerindedir. Hacimsel olarak bakıldığında, hidrojenin çok düşük yoğunlukta olmasından ötürü 11,89 MJ/m³ değerini alınabilmektedir. Bu nedenle birim hacmin ısı değeri düşüktür (Kınav, 2007).

Yakıt olarak kullanılacak hidrojen güçlendirilmiş özel bir tankta depolanmaktadır. Hidrojen bu tanktan sisteme doğru gönderilirken verimin artması amacıyla nemlendirici tarafından nemlendirme işlemi uygulanır. Aynı anda kompresör tarafından yakıt piline hava gönderilir ve böylece yakıt pilinde elektrokimyasal bir reaksiyon oluşur ve elektrik üretimi gerçekleşir. Üretilen elektrik duruma göre doğrudan elektrik motoruna ya da bataryayı şarj etmeye gönderilir. Bu tepkimeler sonucu saf su oluşur. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da yakıt pilli elektrikli araç dizaynı gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Yakıt pilli elektrikli araç dizaynı (Muratoğlu ve Alkaya, 2016)

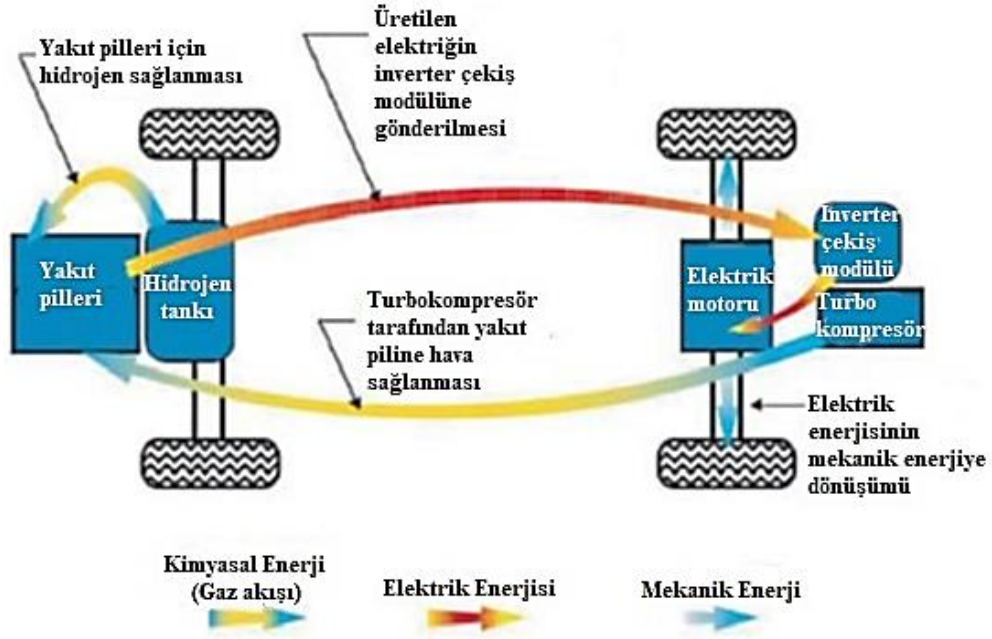


Şekil 5.6. Yakıt pilli elektrikli araç dizaynı (Jay, 2003)

Otomobil üretici firmalarının çalışmaları sonucunda yakıt pilli otomobil sistematğinde gelişmeler gözlenmektedir. General Motors tarafından 1966 yılında üretilen, 115 km/h hıza çıkabilen ve 240 km menzile sahip aracı Şekil 5.7’de, Ford Motor Şirketinin proton değişim zarlı yakıt pili kullanan P2000 modelinin dizaynı Şekil 5.8’de gösterilmektedir.

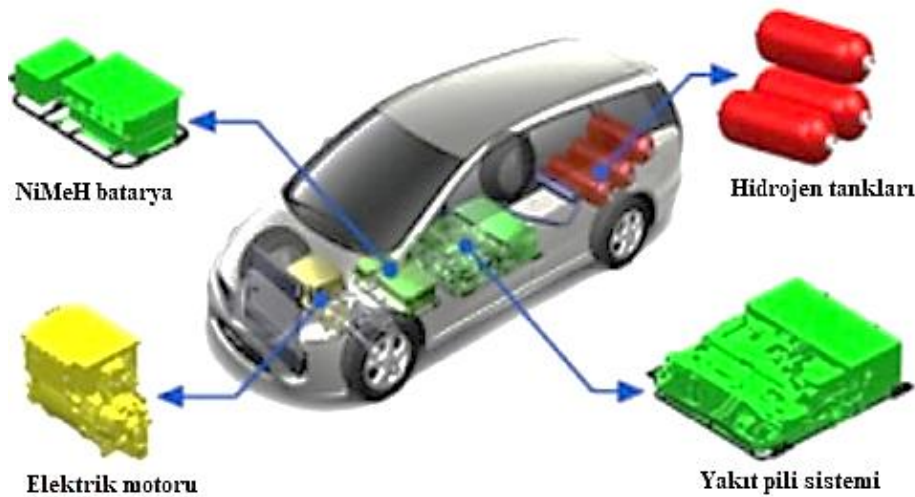


Şekil 5.7. General Motors firmasının yakıt pilli ilk aracı (Anonim, 2016)



Şekil 5.8. Proton değişim zarlı yakıt pili kullanan Ford P2000 dizaynı (Anonim, 2016)

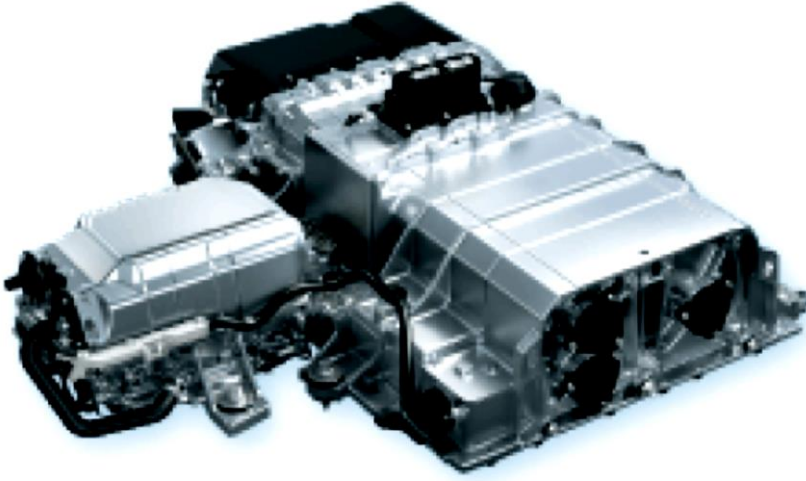
Yakıt pilli araç üreten firmalar, yakıt pilinde kullanılan parça ve yardımcı parçaları genel olarak aynı yere konumlandırmaktadırlar. Hidrojen tankı arka tarafta, batarya ve yakıt pili orta tarafta, elektrik motoru ön tarafta bulunmaktadır. Şekil 5.9’da Mitsubishi markasının FCV modeli üzerinde gösterimi bulunmaktadır.



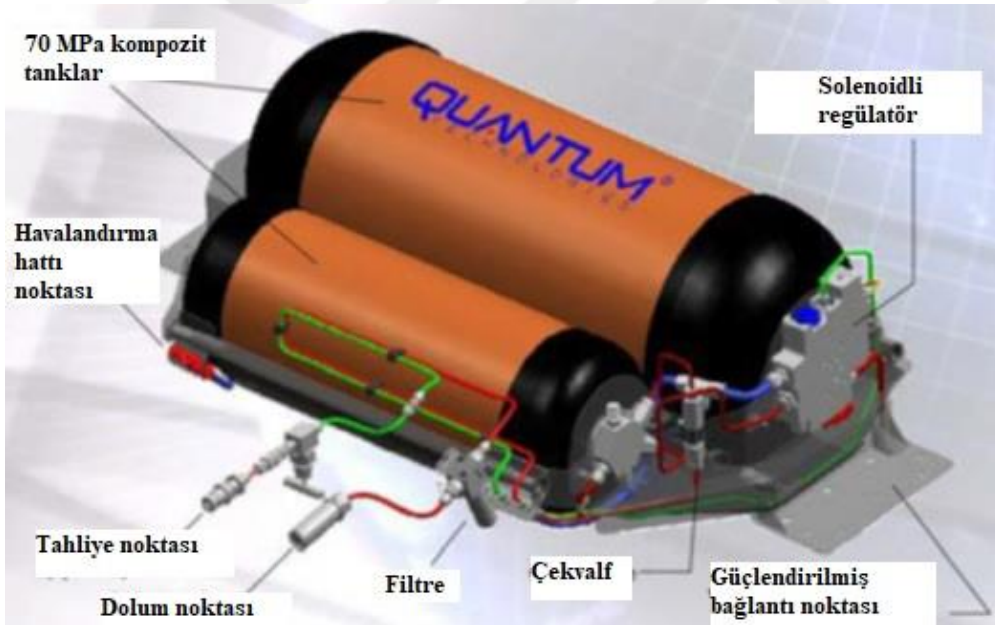
Şekil 5.9. Mitsubishi FCV yakıt pili uygulaması (Anonim, 2016)

Orta kısımda yer alan ve aracın hareketi için gerekli enerjiyi sağlayan yakıt pili gösterimi Şekil 5.10’da bulunmaktadır. Yakıt pilli otomobillerde hidrojen depolamak adına kompozit malzemelerden üretilen ve 700 bar basınca dayanan yakıt tankları mevcuttur. Hidrojeni sıvı

halde depolar ve tank ağırlığı yaklaşık olarak 5 kg kadardır. Şekil 5.11’de hidrojen tankı gösterilmektedir (Yılmaz ve ark., 2017).



Şekil 5.10. Toyota Mirai yakıt pili (Anonim, 2017a)



Şekil 5.11. Hidrojen tankı (Okumuş, 2017)

Yakıt pilinde elde edilen enerjinin depolanması ve gerektiğinde kullanılması adına yakıt pilli araçlarda lityum-iyon ya da nikel-kadmiyum batarya kullanılmaktadır. Şekil 5.12’de bu batarya gösterilmektedir (Yılmaz ve ark., 2017).

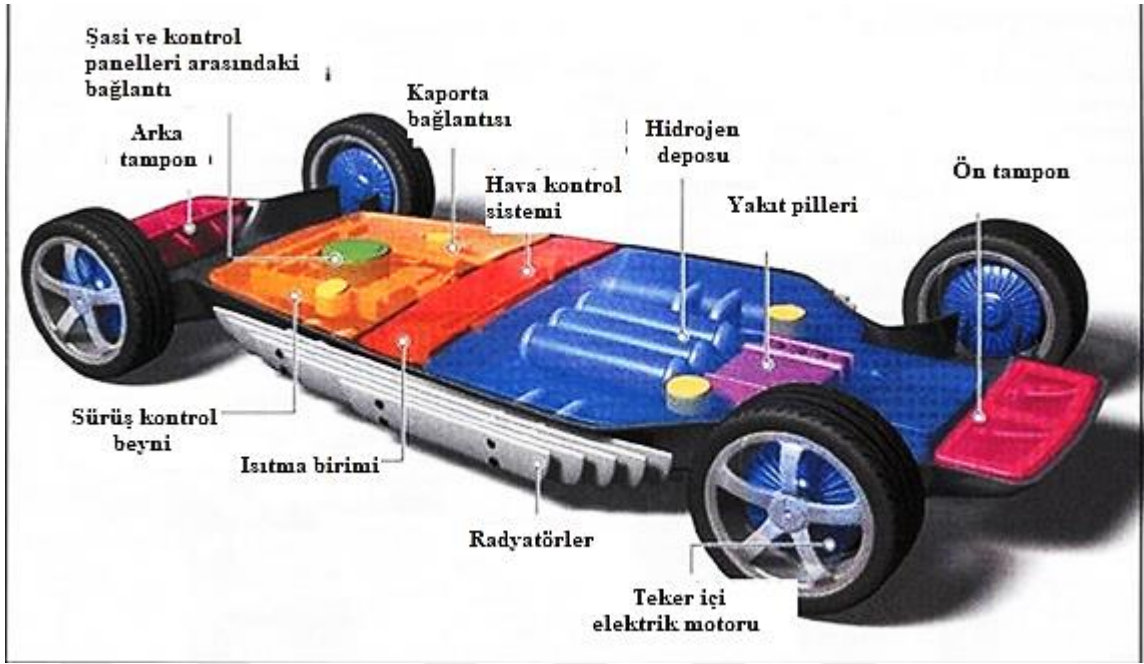


Şekil 5.12. Yakıt pillerinde kullanılan batarya (Yılmaz ve ark., 2017)

Yakıt pilinden üretilen elektriğin aracı hareket ettirmesi için elektrik motoruna ihtiyacı vardır. Bu motorlar ön tarafa merkezi konumlandırılmış ya da araç tekerlerinin üzerine ayrı ayrı konumlandırılmış halde bulunabilmektedirler. Elektrik enerjisi bu motorlarda mekanik enerjiye çevrilir ve içten yanmalı motor ile kıyaslandıklarında çok sessizdirler. Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’te yakıt pilli otomobillerde kullanılan motorlar gösterilmektedir (Yılmaz, ve ark., 2017).

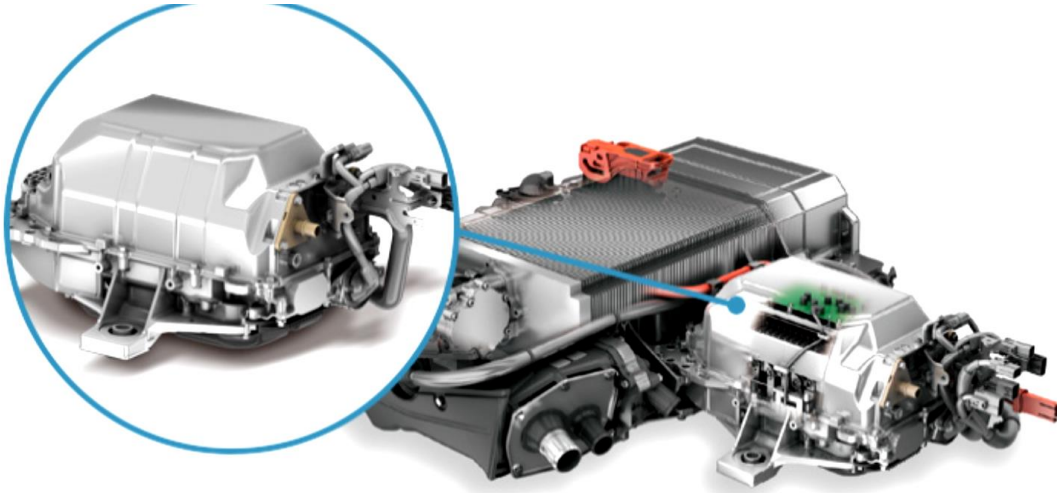


Şekil 5.13. Yakıt pilli otomobillerde kullanılan motorlar (Yılmaz ve ark., 2017)



Şekil 5.14. Yakıt pilli otomobillerde kullanılan motorlar (Anonim, 2016)

Yakıt pillerinde doğru akım üretilir ve bu doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için AC/DC çeviricisi kullanılır. Şekil 5.15'te AC/DC çeviricisi gösterilmektedir (Yılmaz ve ark., 2017).



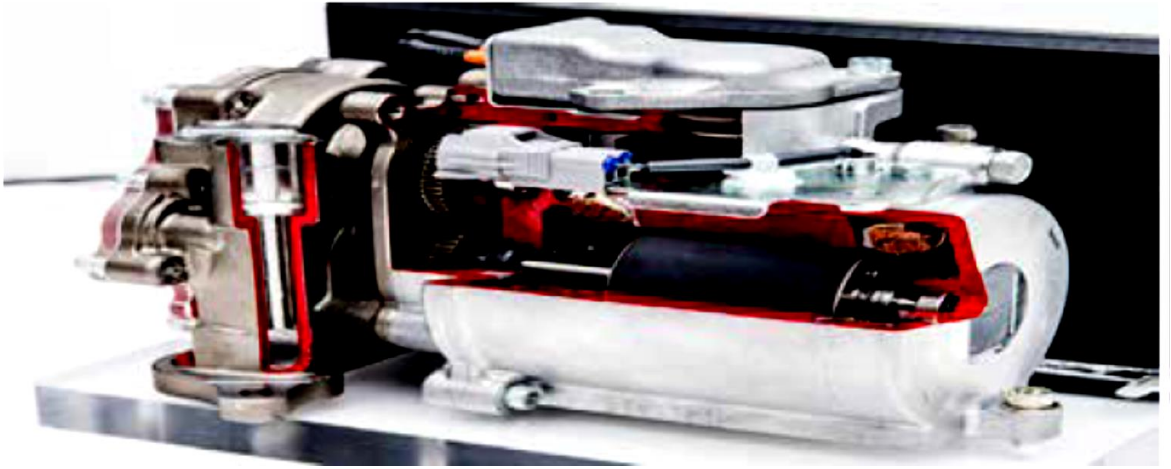
Şekil 5.15. AC/DC çeviricisi (Anonim, 2017a)

İçten yanmalı motorlarda ECU (elektronik kontrol ünitesi) olarak bilinen ve aracın elektronik sistemini denetleyen parça, yakıt pilli araçlarda elektronik faaliyetin daha fazla olmasından kaynaklı olarak daha kapsamlı ve hemen hemen aracın her yerinde etkilidir. Şekil 5.16'da kontrol ünitesi gösterilmektedir (Yılmaz ve ark., 2017).



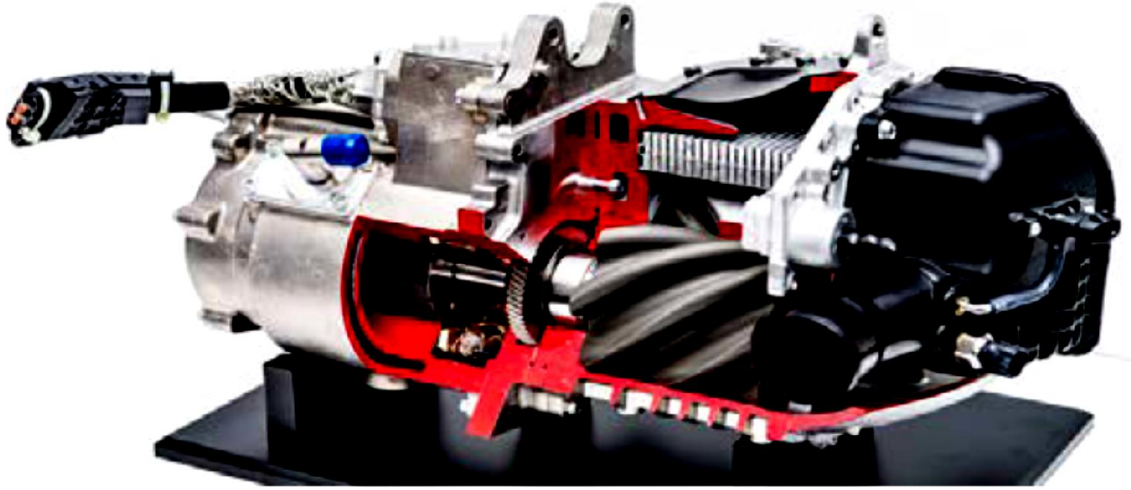
Şekil 5.16. Kontrol ünitesi (Anonim, 2017a)

Depolanan tanktaki hidrojen herhangi bir sisteme ihtiyaç duymadan yakıt piline gidebilir ancak sistem içinde kullanılamamış hidrojenin kullanılmasının istenildiği durumda devridaim pompasına ihtiyaç duyulur. Şekil 5.17’de hidrojen devridaim pompası gösterilmektedir (Yılmaz ve ark., 2017).



Şekil 5.17. Hidrojen devridaim pompası (Anonim, 2017a)

Yakıt pilinin ihtiyacı olan oksijeni sağlamak için gerekli havayı basınçlı olarak gönderen kompresör Şekil 5.18’de gösterilmektedir (Yılmaz ve ark., 2017).



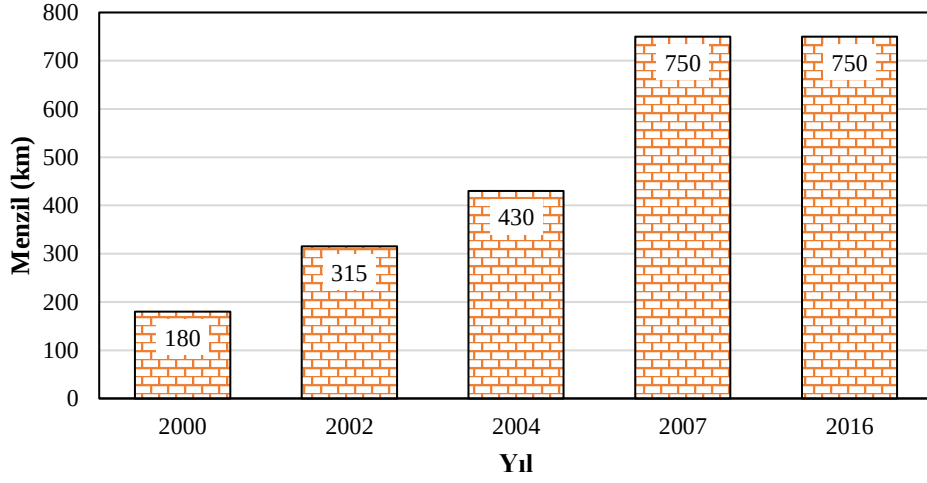
Şekil 5.18. Yakıt pilinin ihtiyaç duyduğu oksijeni sağlamak için basınçlı hava gönderen kompresör (Anonim, 2017a)

Otomobil üretici firmalar yakıt pilini geleceğin teknolojisi olarak görmektedirler ve kendi içlerinde rekabet halindedirler. Birçok firma yakıt piliyle çalışan model geliştirmiştir ve geliştirmeye devam etmektedir. Tablo 5.1’de bazı otomobil firmalarının geliştirdiği modellerin özellikleri yer almaktadır (Yılmaz ve ark., 2017).

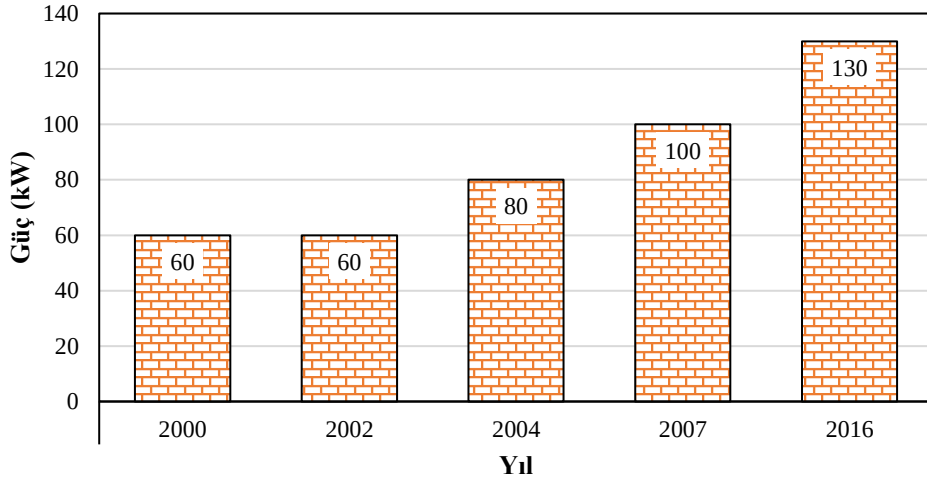
Tablo 5.1. Yakıt pili ile çalışan bazı modellerin özellikleri (Yılmaz ve ark., 2017)

MARKA	MODEL	TEK DOLUM İLE MENZİL (km)	MAKSİMUM HIZ (km/h)	GÜÇ (hp)	TORK (Nm)	AKÜ (kW)
HYUNDAI	İX35	594 (5,94 kg tank ve 700 bar)	160	136	300	24
BMW	İ8	500 (350 bar)	250	131	245	5
AUDI	A7	500	180	115	170	9
TOYOTA	MIRAI	550 (122 l tank ve 700 bar)	178	154	335	
FIAT	PANDA	200	120			
FORD	FLEXIBLE	430	140	176	230	
FORD	FOCUS	320 (350 bar)	128	87	230	24
MERCEDES	GLC	440 (9 kg)	120	200	350	14
MITSUBISHI	FCV	400 (117 l tank ve 350 bar)	140	110	210	14
HONDA	CLARITY	750 (700 bar)	165	130	300	13
GM&OPEL	HydroGen3	(700 bar)	160	82	215	
GM&OPEL	HydroGen4	320 (4,2 kg tank ve 700 bar)	160	94	320	

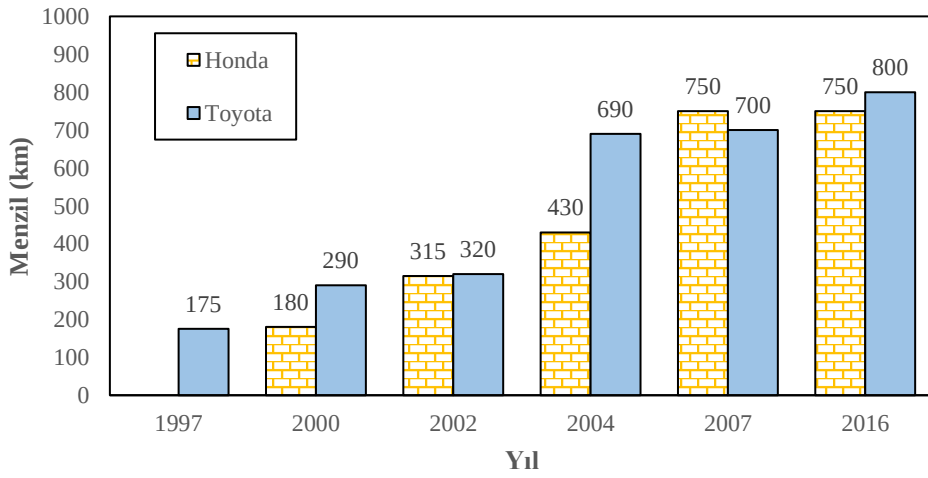
Firmaların yakıt pili teknolojisine çok önem vermektedir. Honda markasının ürettiği yakıt pilli otomobilin yıllara göre menzilindeki değişimi Şekil 5.19’da, güç değişimi Şekil 5.20’de verilmiştir. Honda ve Toyota markasının yıllara göre menzil değişimi karşılaştırması Şekil 5.21’de, güç değişimi kıyaslaması Şekil 5.22’de verilmiştir.



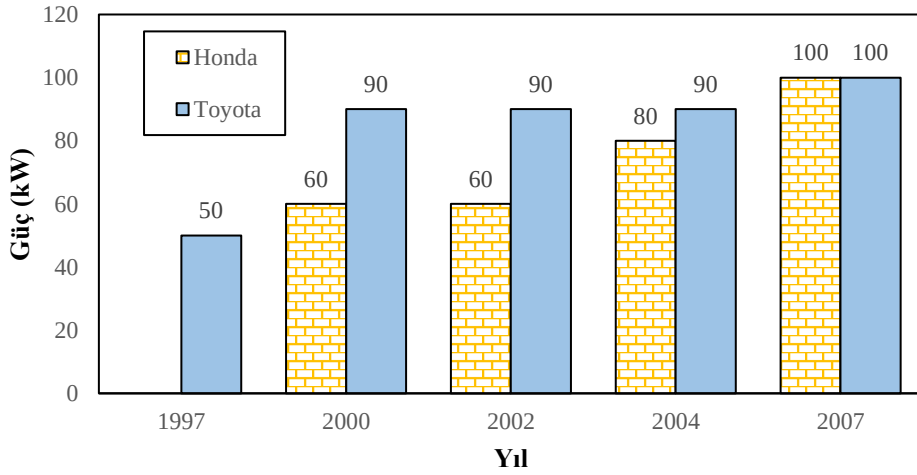
Şekil 5.19. Honda markasının yıllara göre menzil değişimi (Yılmaz ve ark., 2017)



Şekil 5.20. Honda markasının yıllara göre güç değişimi (Yılmaz ark., 2017)



Şekil 5.21. Honda ve Toyota markasının yıllara göre menzil değişimi karşılaştırması (Yılmaz ve ark., 2017)



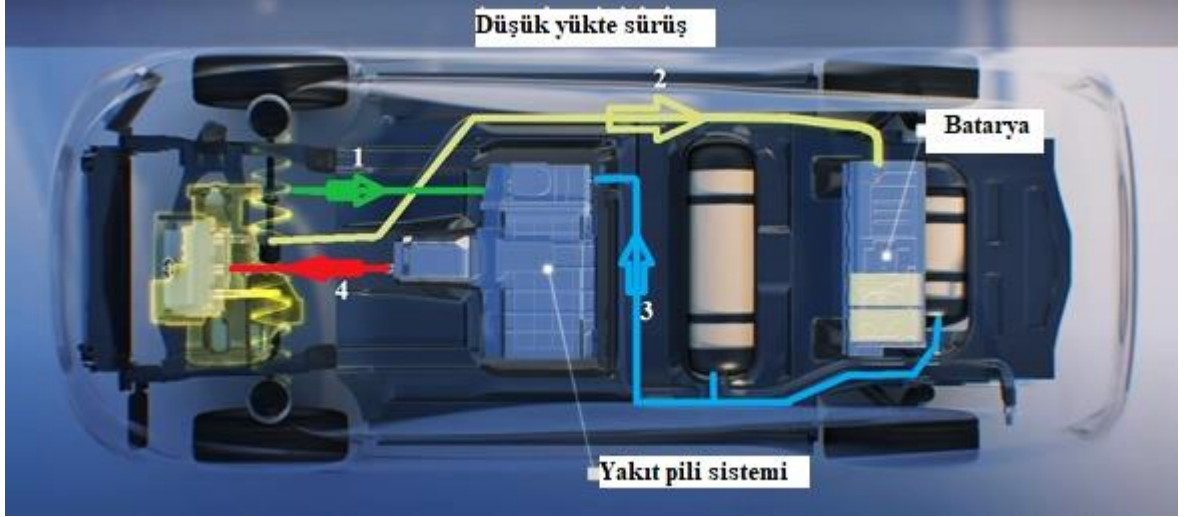
Şekil 5.22. Honda ve Toyota markasının yıllara göre güç değişimi karşılaştırması (Yılmaz ve ark., 2017)

Yakıt pili kullanan taşıtlarda güç sağlayan pedala uygulanan etki çok az ise ve araç düzlükte ise aracın üzerinde bulunan bataryalar ile elektrik motoruna besleme yapılır. Hem ekonomik açıdan daha uygun bir yakıt sarfıyatı olur hem de kullanılan parçaların ömrünü uzatır. Şekil 5.23'te 1 numara ile işaretlenen hat üzerinde bataryadan elektrik motoruna doğru elektrik akışı gösterilmektedir.



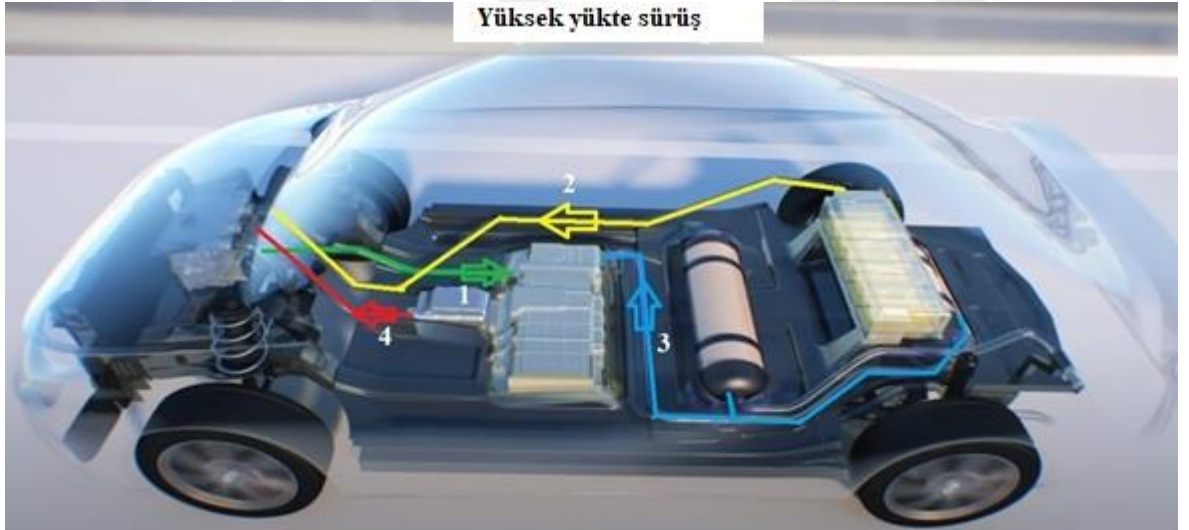
Şekil 5.23. Bataryadan elektrik motoruna doğru besleme hattı (Anonim, 2020)

Güç sağlayan pedala bir miktar daha basıldığında yakıt pili sistemi devreye girer ve yakıt pili elektrik motoru için enerji üretmeye başlar. Şartların uygun olması durumunda elektrik motoruna enerji üretirken aynı zamanda bataryayı da şarj eder. Transfer hattının gösterildiği Şekil 5.24'te yakıt piline giren hava hattı 1 numara ile, hidrojen tanklarından yakıt piline giren hidrojen hattı 3 numara ile, yakıt pilinden elektrik motoruna giden enerji hattı 4 numara ile, bataryanın şarj olma hattı 2 numara ile gösterilmektedir.



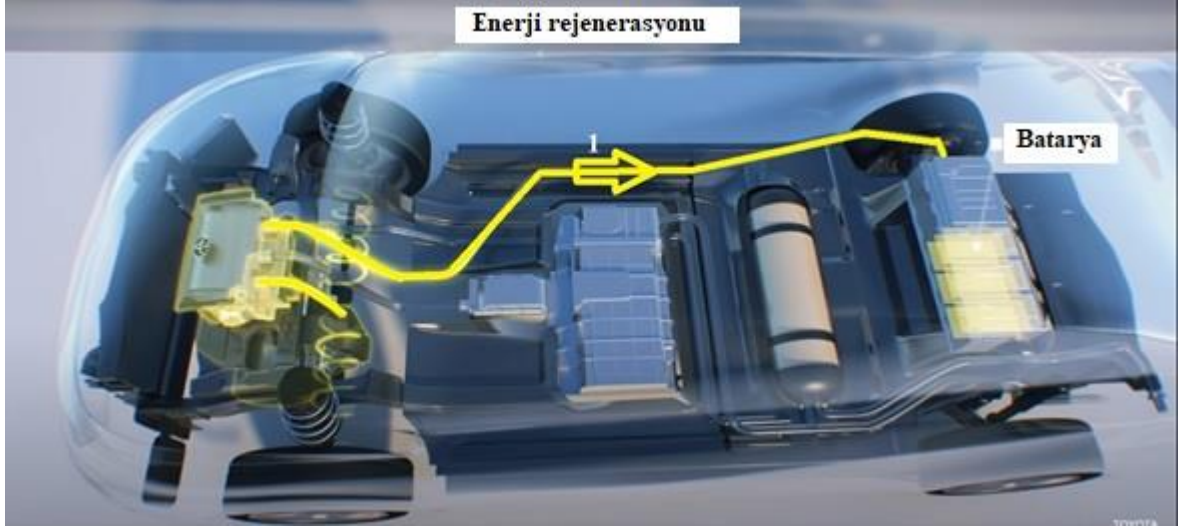
Şekil 5.24. Transfer hattı (Anonim, 2020)

Güç sağlayan pedala fazla etki uygulanması ya da aracın yokuş yukarı seyahat durumlarında elektrik motoruna, hem yakıt pili hem de araçta bulunan batarya enerji sağlar. Şekil 5.25'te yakıt piline giren hava hattı 1 numara ile, hidrojen tanklarından yakıt piline giren hidrojen hattı 3 numara ile, yakıt pilinden elektrik motoruna giden enerji hattı 4 numara ile, bataryadan elektrik motoruna giden enerji hattı 2 numara ile gösterilmektedir.



Şekil 5.25. Transfer hattı (Anonim, 2020)

Araç yokuş aşağı giderken ya da frene basıldığında rejeneratif etki ile bataryanın şarj edilebilecek özellikte olması yakıt tasarrufu ve sistemde kullanılan parçaların uzun ömürlü olması açısından önemlidir. Şekil 5.26'da rejeneratif hat gösterilmektedir.



Şekil 5.26. Rejeneratif hat (Anonim, 2020)

Yakıt pili kullanan taşıtlarda depolama yöntemi olarak kullanılan yüksek basınçlı tanklar yerine bor içeren maddeler kullanılarak hidrojen depolanması daha güvenli bir yol olarak gösterilmektedir.

6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

İnsanoğlu dünya üzerinde yaşamını sürdürmeye başladığı tarihten itibaren kendisini sürekli hareket halinde olan bir yaşamın içinde bulmuştur. Gerek temel besin ihtiyacını karşılamak için avlanmak, gerekse de içinde bulunduğu zorlu şartlardan uzaklaşıp hayatının refah seviyesini yükseltmek adına farklı coğrafyalara seyahat etmiş ve bu coğrafyalarda keşif hareketlerinde bulunmuştur. Bu keşif hareketleri, tekerleğin icadından sonra bir hayli hız kazanmış ve insanlık tarihinde yeni buluşların ortaya çıkması ve yeni teknolojilerin gelişmesine sebep olmuştur. Taşıtların kullanılması insanlık tarihi açısından önem arz etmektedir. Denizlerde rüzgâr ve kürek hareketiyle güç sağlayan gemiler, ateşin etkisiyle buhar makinelerinden aldığı güç ile hareketi sağlayan teknolojilere kavuşmuşlardır. Sonraları ise içten yanmalı motor kullanılmasıyla elde edilen verim artmış ve ulaşım daha kolay seviyelere ilerlemiştir. Aynı şekilde bu durum, kara yolu ulaşımında hayvan gücünden faydalanan zamanlardan içten yanmalı motor bulunduran taşıtların kullanıldığı çağa evrilmiştir. Başlarda büyük hacimlerden daha fazla güç elde edilen bu motor teknolojisinde sıkıştırma oranları değiştirilerek daha fazla güç üretilmiştir. Sonraları ise düşük hacimli motorlara eklenen turbo ve süpersarj güncellemeleri ile üretilen bu güç arttırılmıştır. İçten yanmalı motorlarda yapılan verim arttırma çalışmalarıyla birim yakıttan alınan enerji miktarında önemli artışlar elde edilmiştir ancak içten yanmalı motorların pistonlarında oluşan doğrusal hareketi çeşitli aktarma yöntemleriyle dairesel harekete çevirmek ve bu çevrilen hareketi tekerleklerle aktararak tahrik oluşturma silsilesinde kayıplar yaşanmaktadır. Bu kayıpları azaltmanın en etkili yollarından birisi de farklı motor teknolojileri kullanmak, yani; üretilen gücü direkt olarak tahrikte kullanmaya olanak sağlayan elektrik motorlarına yönelmektir. Bu motorlar tasarıma göre tekerlek üzerinde olabilir ya da merkezi motor kullanılarak aktarma olmak suretiyle kullanıma olanak sağlayabilmektedirler.

Elektrik motorlarında kullanılacak olan elektrik enerjisini sağlamak için üretilen enerjiyi depolamak adına batarya teknolojisi kullanılmaktadır. Bu teknoloji son yıllarda kayda değer gelişim sağlamıştır ancak gerek uzun sürede şarj olması gerekse de uzun menzilli seyahatlerde yetersiz kalması vesilesiyle içten yanmalı motor ve elektrik motorlarının bir arada kullanıldığı hibrit araç teknolojisinin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Günümüz şartlarında bir hibrit otomobili ele alacak olursak temel olarak; düşük hızlarda bataryasında depoladığı enerjiyi elektrik motorlarında kullanarak, yüksek hızlarda ise üzerinde mevcut olan içten yanmalı motoru kullanarak tahrik sağlamaktadır. Bu hibrit teknolojisi sayesinde

elektrikli motor teknolojisinin son kullanıcıyla buluşması sağlanmış, elektrikli motor teknolojisi üzerine yapılan araştırma ve geliştirme atılımlarına hız kazandırmıştır.

Son zamanlarda dünya üzerindeki petrol rezervinin önemli ölçüde azalması, biçilen ömrün 50 yıl civarında olması ve içten yanmalı motorlarda petrolden elde edilen rafine ürünlerin kullanılması sebebiyle taşıtlarda içten yanmalı motorların yerini elektrik motorlarının alacağı öngörülmektedir. Taşıtlarda kullanılan elektrik motorlarına enerji sağlamak adına depolanmış elektrik enerjisinin yetersiz kalması ya da hibrit olarak kullanılan motor sistemlerinde zararlı emisyonların olmasından ötürü daha farklı bir enerji üretim teknolojisinin kullanılması gerekmektedir. Bu noktada yakıt pili adı verilen sistemler devreye girmektedir. İçten yanmalı motor teknolojisi ile kıyaslandığı zaman gelişime ihtiyacı olduğu ve uygulanabilirliğinin artması gerektiğinin görüldüğü yakıt pili teknolojileri geleceğin enerji kaynağı olma yönünde önemli ilerlemeler kaydetmektedir.

İcat edildiği günden bu yana gelişimi süren, otomotiv sektöründeki firmaların adeta bilim yarışına girdiği içten yanmalı motor teknolojisine uygulanan özveri aynı şekilde yakıt pili teknolojisine uygulandığında taşıtlarda kullanılan güç üretim sistemlerinin köklü bir değişim geçirmesi sağlanacaktır. Ancak yakıt pilinin ve kullanacağı yakıtın üretim maliyetlerinin şu an kullanılan sistemden fazla olması, yakıt pili teknolojisinin gelişim ivmesini azaltan dezavantajdır.

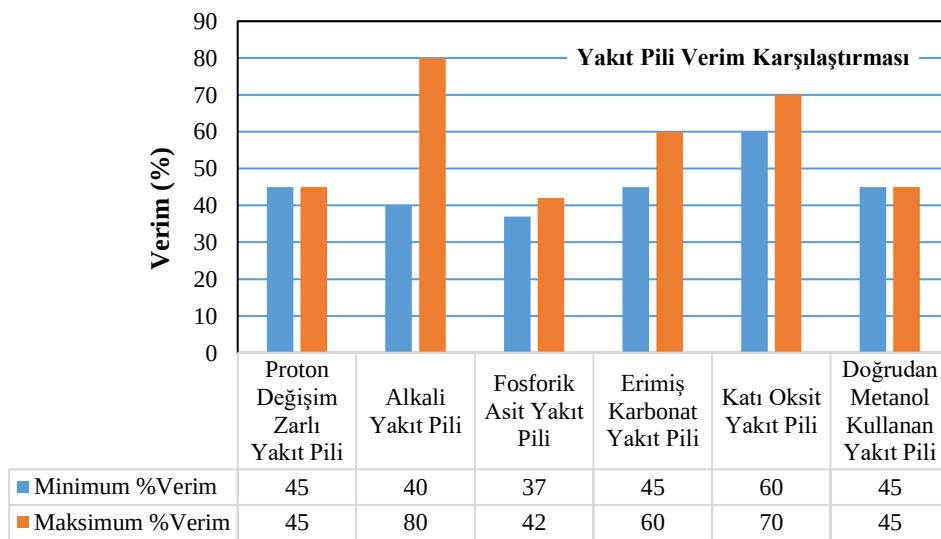
Otomotiv firmalarının yıllar boyunca yaptığı yatırım ve seri üretim sonucu son kullanıcı ile buluşturduğu taşıtlarda kullanılan sistemi değiştirmeden önce gerekli fizibilite çalışmasını yapmaları gerekmektedir. Yakıt pilinin yaygınlaştığını ve öncelikli enerji üretim aracı olarak kullanıldığını farz ettiğimizde, içinde bulunduğumuz teknoloji sayesinde içten yanmalı motor teknolojisinin gelişim sürecinden daha kısa bir sürede olgun teknoloji haline geleceği kaçınılmaz bir gerçektir. Bu da analiz, test ve simülasyon işlemlerinin içten yanmalı motor icat edildiği yıllara göre daha hızlı ve başarılı sonuçlar verdiği günümüz teknolojisi şartlarında yakıt pili teknolojisinin gelişme aşaması kendinden önceki teknolojik araçlara göre daha hızlı olması demektir.

Yakıt pili teknolojisinin ilerlemesini olumlu yönde ekileyecek diğer unsur, yakıt pillerinde kullanılacak olan hidrojen üretim tesislerinin yaygınlaşması ve hidrojen üretim yöntemlerinin kolaylaşmasıdır. Şu an piyasada bulunan petrol rafine eden ve bunları insanların kullanımına sunan firmaların hidrojen üretimi için yatırım yaptığını ve akaryakıt istasyonlarında petrol ürünleri sunumu yerine hidrojen sunumu yapıldığını

düşündüğümüzde, piyasada hidrojen üreten firmaların çok olmasından ötürü hidrojen maliyeti ve satışının daha uygun fiyatlarda gerçekleşeceği gerçeği beklenmektedir. Yakıt pili kullanan araçların artmasıyla hidrojen ihtiyacı artacak ve hidrojen üreten firmaların sürümden kazanç sağlamasına olanak sunduğu için son kullanıcı daha uygun fiyatlarda ürün temin edebileceklerdir.

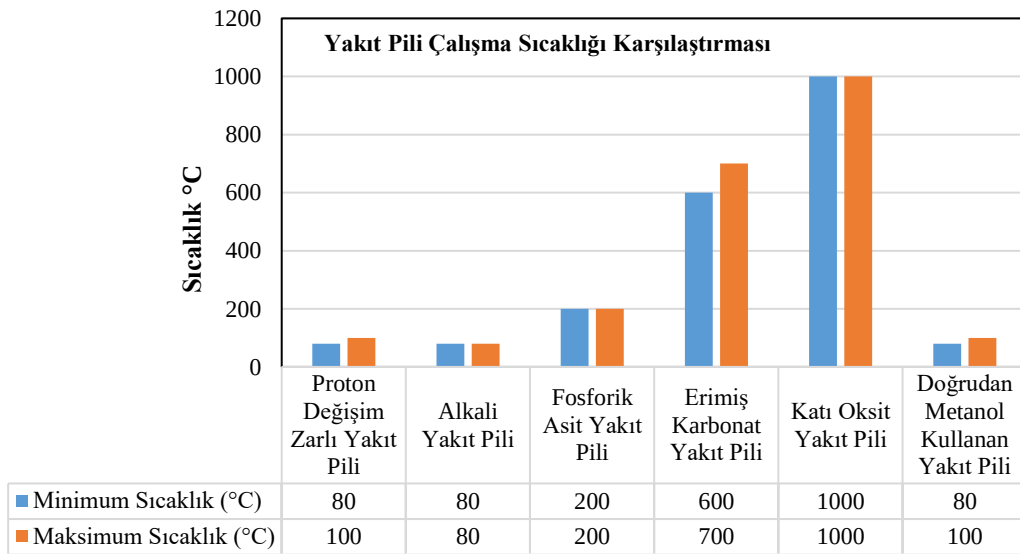
Dünya üzerindeki bor rezervinin yaklaşık olarak %73'ü ülkemizde bulunmaktadır. Bor, hidrojen depolama açısından önemli bir materyaldir. Katı halde bulunan sodyum bor hidrür (NaBH_4)'ün ağırlıkça %10,5'i hidrojendir, uygun katalizör ve H_2O ile tepkimeye girerek içindeki hidrojeni açığa çıkarmaktadır, bu da hidrojen depolama açısından önemli kılmaktadır. Hidrojen tanklarda depolamak için gereken enerji, hidrojenin mevcut potansiyel enerjisinin %25'ine denk gelmektedir. Depolama işlemi yaklaşık olarak 700 bar basınçta yapılmaktadır. Bu durum depolama işlemi için alternatif yöntem arayışına sebep olmaktadır. Ülkemizin sahip olduğu bu rezervi akılcıca kullanıp teknolojiye ilerleme sağlayacak şekilde kendi sanayimizi geliştirdiğimiz takdirde başta ülke vatandaşlarımız olmak üzere dünya insanlığına faydalı sonuçlar doğuracağı düşünülmektedir.

Herhangi bir taşıta yakıt pili entegrasyonu yapmadan önce taşıtın nerede ve hangi koşullarda çalışacağı analizi yapılmalıdır. Bu analiz doğrultusunda malzemenin ne kadar süre dayanması gerektiği, verimliliği, güç yoğunluğu, kullandığı yakıt gibi veriler ortaya çıkmaktadır. Yakıt pili verim karşılaştırma grafiği Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



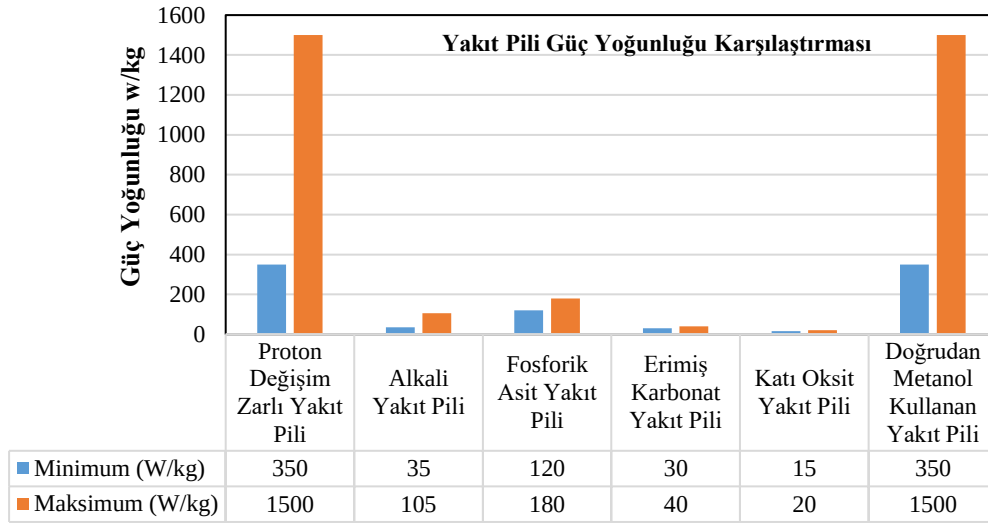
Şekil 6.1. Yakıt pili verim karşılaştırma grafiği (EG&E Services Parsons, 2000; Ekmekçi ve Ermiş, 2003; Anonim, 2009b)

Yakıt pilli verimlerinin gösterildiği grafiğe bakacak olursak sabit, minimum ve maksimum değerler görmekteyiz. Herhangi bir araca ya da tesise yakıt pili seçimi yapmak için sadece verim açısından değerlendirmek doğru olmaz ancak gündelik hayatta binek otomobil olarak kullandığımız taşıtlarda proton değişim zarlı yakıt pili kullanıldığını bilerek analiz edecek olursak, %45’lik sabit bir verim değeri okumaktayız. Bu verimden daha üst seviyede olan yakıt pilleri de mevcuttur fakat diğer veriler doğrultusunda optimum seçimi yapmalıyız. Bu verilerden diğeri de çalışma sıcaklığıdır. Çalışma sıcaklıklarının karşılaştırıldığı grafik Şekil 6.2.’de gösterilmektedir.



Şekil 6.2. Yakıt pili çalışma sıcaklığı karşılaştırması (EG&E Services Parsons, 2000; Ekmekçi ve Ermiş, 2003; Anonim, 2009b)

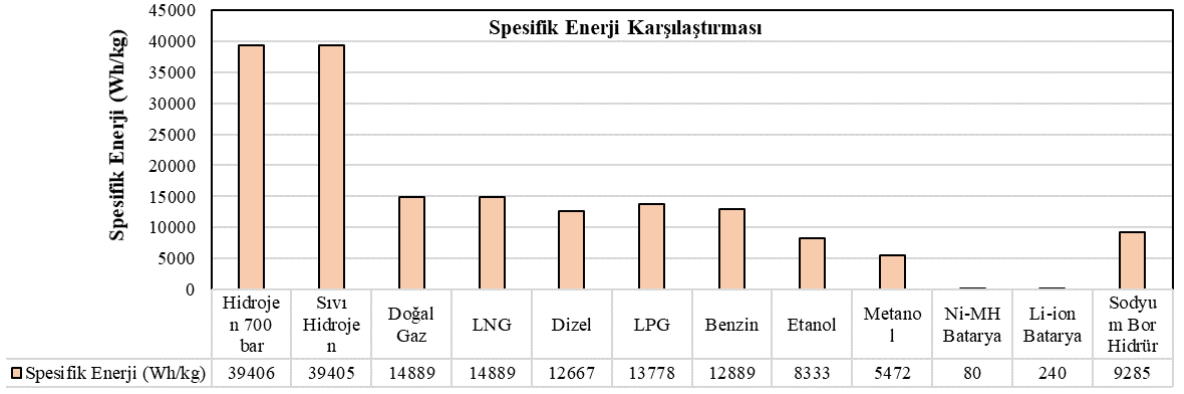
Yakıt pillerinde seçiminde verim ve sıcaklığın yanında dikkat edilmesi gereken bir diğer husus da güç yoğunluğudur. Kilogram başına düşen watt olarak değerlendirilen güç yoğunluğu karşılaştırması Şekil 6.3’te gösterilmektedir.



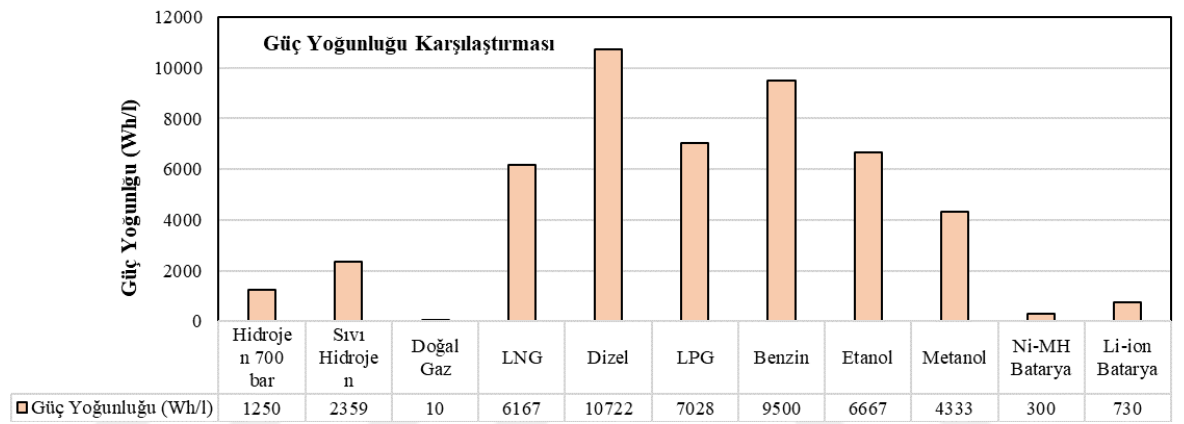
Şekil 6.3. Yakıt pili güç yoğunluğu karşılaştırması (EG&E Services Parsons, 2000; Ekmekçi ve Ermiş, 2003; Anonim, 2009b)

Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinde reaksiyon çok yavaş olmaktadır ve bu reaksiyonu hızlandırmak için platin katalizör kullanılır. Kullanılan katalizör maliyeti arttırmaktadır ve bu istenilen bir durum değildir. Günümüzde platin değerli metal olarak nitelendirilmektedir ve 1 g platinin değeri \$32 civarındadır. Bu yüzden platin kullanımını ekarte etmek için şartlar uygunsa yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pili kullanmak maliyet açısından daha avantajlı olmaktadır. Ortama salınan ısı, gerekli çeviricilerle tekrardan faydalı enerjiye dönüştürülebilir potansiyelindedir. Tez konusu olan ve taşıtlarda kullanım için seçilecek bir yakıt pilinin yüksek sıcaklıkta çalışması insan sağlığına ve güvenliğine uygun değildir. Ayrıca yüksek sıcaklığı ortamdan uzaklaştırmak için kurulacak soğutma sistemi için gerekli olan yüksek kapasiteli soğutucu cihazın hareket eden bir taşıt üzerine entegre olması optimum koşulları sağlamak açısından uygun değildir.

Yakıt pillerinde kullanılan hidrojen enerjisini günümüz koşullarında kullanılan diğer enerji kaynaklarına göre kıyasladığımız zaman ne kadar önemli ölçüde spesifik enerji (Wh/kg)'ye sahip olduğunu görebilmekteyiz. Şekil 6.4'te spesifik enerji karşılaştırması, Şekil 6.5'te güç yoğunluğu karşılaştırılması (Wh/l) gösterilmektedir.



Şekil 6.4. Spesifik enerji karşılaştırması (Anonim, 2017b)



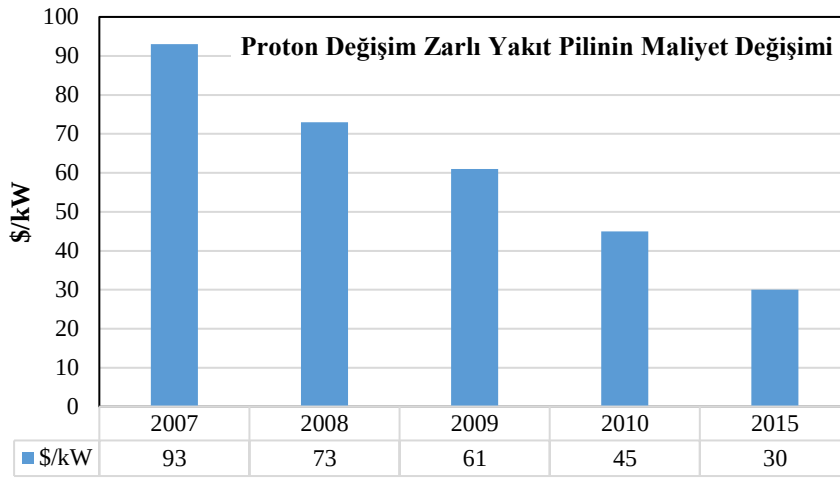
Şekil 6.5. Güç yoğunluğu karşılaştırması (Anonim, 2017b)

Günümüz şartlarında hidrojen spesifik enerjisini kıyaslayabilmek için cep telefonlarımızda kullanılan bataryayı ele alalım; 1 kg'lık Li-ion bataryadan 250 Wh elde edilebilmekteyken, 700 bar ile sıkıştırılmış 1 kg H₂'den 39406 Wh elde edilebilmektedir. Bu karşılaştırma hidrojenin spesifik enerji bakımından ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Kompozit tanklara yaklaşık 700 bar basınç ile yapılan hidrojen dolumu işleminde ciddi bir basınç değeri mevcuttur. Bu dolum yönteminin yerine daha güvenli olan ve bünyesinde H₂ depolama özelliği olan metal hidrür tanklar kullanılabilmektedir. 1 kW gücündeki yakıt pili bir dakikada yaklaşık olarak 15 l yakıt harcamaktadır. 600 litre kapasiteli metal hidrür tank bu yakıt pilini 40 dakika boyunca besleyebilmektedir, tank kapasitesi arttırıldığında doğru orantılı olarak bu seviye yükselecektir.

Taşıtlarda tercih edilen proton değişim zarlı yakıt pili için belli bir maliyet söz konusudur. Üzerinde mevcut bulunan materyaller yüzünden yüksek maliyete sebep olan bu yakıt pilinin

fiyatlandırılması 1 kW üzerinden yapılmaktadır. Şekil 6.6’da proton değişim zarlı yakıt pilinin geçmiş yıllarda değişen maliyeti gösterilmektedir.



Şekil 6.6. Proton değişim zarlı yakıt pilinin maliyet değişimi (Anonim, 2017b)

Grafiği incelediğimizde, 2007 yılından 2015 yılına kadar olan maliyetin önemli ölçüde azaltıldığı gözlemlenmektedir. Bu maliyetin azalmasında etkili olan faktörler ise kullanılan platin elektrolitin ve membran elektrot birim maliyetinin azaltılmasıyla sağlanmıştır. 2007 yılında 1 kW gücündeki bir yakıt pilinin maliyeti \$93 iken bu değer 2015 yılında \$30 olmaktadır. Tez konusu için konuşacak olursak; 100 kW güç üretebilen bir yakıt pili imal etmek istediğimizde bu yakıt pilinin maliyeti \$3000 olmaktadır ve yakıt pili teknolojisine yapılacak yatırımlar ile bu maliyet her geçen sene daha da azalacağı tahmin edilmektedir.

Diğer yakıt pillerinden bahsedecek olursak; alkali yakıt pili uzay çalışmalarında, fosforik asit yakıt pili büyük ölçekli ticari tesislerde, erimiş karbon yakıt pili elektrik santrallerinde, katı oksit yakıt pili ise sanayi alanda ve elektrik santrallerinde kullanılmaktadır.

7. SONUÇLAR

Yakıt pili uygulamaları, teknolojinin ilerlemesi ve yeni materyallerin kullanılması ile önemli bir gelişme kaydetmiştir. Gelişen bu teknoloji sayesinde geleceğin enerji üretim yöntemleri arasında üst sıralarda yer alacağı öngörülmektedir. Ancak, gerek hidrojenin üretim yöntemlerinin ve depolanmasının maliyetli olması, gerekse de bu teknolojinin dünya pazarında yaygın olarak kullanılmamasından kaynaklı olarak fosil yakıtların yerini almak yolunda oldukça yavaş ama sağlam şekilde ilerlemektedir. İnsan sağlığı ve çevre kalitesini daha elverişli hale getirebilecek olan bu teknoloji, günümüzde otomobillerde, toplu taşımada ve şehir elektrik şebekesinde de kullanılabilir. Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pillerinin etrafına yerleştirilecek termoelektrik jeneratörler vasıtasıyla atık ısıнын enerjiye dönüştürülmesini sağlayacak çalışmalar yapılabilir.

Yakıt pillerinin geleceği konusunda örnek olması açısından Honda markasının yıllara göre güç ve menzil değişim değerleri incelendiğinde; Honda'nın üzerinde çalıştığı FCX-V3 modeli 2000 yılındaki güç 60 kW değerindeyken menzil değeri 180 km'dir. 2002 yılında geliştirdiği FCX-V4 modelinin güç seviyesi 60 kW değerini korurken menzili 315 km'ye çıkmıştır. 2004 yılında ise FCX modelinin gücü 80 kW değerine yükselmiş ve menzili 430 km'ye çıkararak içten yanmalı motor bulunduran otomobillerle kıyaslandığında kullanılabilir bir seviyeye çıktığı gözlenmiştir. Honda markası Clarity modeliyle 2007 yılında gücünü 100 kW değerine yükseltmiş ve standart bir içten yanmalı motor seviyesine ulaşmıştır. Gücünün yanında menzilin de yükselterek 750 km gibi önemli bir kapasiteye sahip olmuştur. 2016 yılında Honda, Clarity modelinin menzilin 750 km'de tutarak gücünü 130 kW seviyesine yükseltmiştir. Honda markasının yanı sıra Toyota markası da yakıt pillerinin geleceği şekillendireceğini öngörerek adının anlamı "gelecek" olan Mirai modeliyle atılımlar yapmaktadır. Yakıt pili teknolojiyle birlikte hidrojen üretim sektörünün de aynı oranda gelişmelidir. Hidrojenin kolay üretim yollarından biri olan elektroliz yöntemini kullanmak en kabul görülen yöntemdir ancak bu noktada elektroliz işlemi için harcanacak enerji çeşidi devreye girmektedir. Bir termik santralde üretilen elektrik ile hidrojen üretmek doğaya yine zararlı gaz salınmasına sebep olmaktadır. Bu noktada önemli olan ise doğaya en az zararı olacak şekilde hidrojen üretebilmektir. Nükleer santraller ile elektroliz edilmiş sudan üretilen hidrojen, hidrojen üretme yöntemleri arasında en az zararlısı olarak değerlendirilmektedir. Taşıtlarda yakıt pili olarak tercih edilen proton değişim zarfı yakıt pillerine ve hidrojen üretim yöntemlerine araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Agarwal, V. ve Mayank, D. 2013. Introduction To Hybrid Electric Vehicles: State Of Art. Engineering and Systems Students Conference On. IEEE.
- Altas, I. H. ve Sharaf, A. M. 2007. A Photovoltaic Array Simulation Model for Matlab-Simulink GUI Environment. Ischia: IEEE, Clean Electrical Power, International Conference on Clean Electrical Power.
- Altınbaş, B. ve Donatan, S. 2003. Membran Teknolojisi ve Katkılı Membranlar (2). Kimya Teknolojileri Dergisi. Sayı:29.
- Anonim, 2000. Fuel Cell Hand Book 5. Basım. EG&G Services Parsons, Inc.
- Anonim, 2001. Global Status of Hydrogen Research. Defance Evaluation and Resarch
- Anonim, 2004. www.youthforhub.com.
- Anonim, 2004. <http://www.eng.auburn.edu/department/te/ntc/2004/F04AE01.pdf>
- Anonim, 2006a. <http://www.fuelcell.org>
- Anonim, 2006b. <http://www.dodfuelcell.com>
- Anonim, 2009a. http://www.fueleconomy.gov/feg/fc_pics/fuel_cell_still
- Anonim, 2009b. <http://people.clarkson.edu/~pillayp/fuel-cells.html>
- Anonim, 2009c. <http://www.ip3.unipg.it/FuelCell>
- Anonim, 2009d. http://www.comsol.com/shared/images/stories/guvelioglu_fuel_cell/html/
- Anonim, 2009e. <http://www.chromservis.cz/vzorec>
- Anonim, 2009f. <http://www.ip3.unipg.it/FuelCells/en/ltfc.asp>
- Anonim, 2016. <http://media.gm.com/media/us/en/gm/home.detail.html/content/Pages/news/us/en/2016/oct/1005-hydrogen.htm>
- Anonim, 2017a. http://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/fuelcell_vehicle/
- Anonim, 2017b. <https://challenge.tubitak.gov.tr/assets/yakit-pili-ve-kontrol-sistemi.pdf>
- Anonim, 2019. <https://www.tebcetelem.com.tr/media/1352/observatory2019.pdf>
- Anonim, 2020. <http://www.toyota-europe.com/>
- Appleby, A. J. ve Foulkes, F. R. 1989. Fuel Cell Handbook. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Ar, İ., Erşan, K., Tükek, S. ve Sarıdemir, S. 2010. Laboratuvar Şartlarında Geliştirilen ve Denemesi Yapılan Elektrolit, Elektrot Çiftinin Yakıt Piliinde Kullanılarak Paket Haline Getirilmesi ve İçten Yanmalı Motorlarla Kıyaslanması. Electronic Journal of Vehicle Technologies.
- Aydemir, S. 1998. Enerji Kaynağı Olarak Hidrojen Üretim Yöntemlerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Ayvaz, Z. 1998. Hidrojen Enerjisine Giriş. Kaynak Yayınları, İzmir.
- Barbir, F. 2005. PEM Fuel Cells: Theory and Practise. Elsevier Academic Press, California.
- Bentor, Y. 2003. Hydrogen at Chemical Elements. International Journal Hydrogen Energy.
- Bıyıkoglu, A. 2003. Yakıt Hücrelerinin Tarihsel Gelişimi, Çalışma Prensipleri ve Bugünkü Durumu. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Ankara. Sayı 16.
- Boyacı San, F. G., Özdemir, S., Örs, N., Kalafatoğlu, E. ve Bahar, T. 2001. Hidrojen Yakıt Pilleri: Otomotiv Endüstrisindeki Uygulamalar ve Geleceği. 2. Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi, Malzeme ve Kimya Teknolojileri Araştırma Enstitüsü.
- Çetinkaya, M. ve Karaosmanoğlu, F. 2002. Yakıt Pilleri ve Uygulamaları. 3e Electrotech Dergisi. Sayı:100.
- Denizli, İ. 2005. Yakıt Pilleri ve Taşıtlardaki Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dicks, A. ve Larminie, J. 2000. Fuel Cell Systems Explained. John Wiley & Sons Ltd., West Sussex.

- Douglas, I. G. ve Northwood, D. O. 1983. Storing Energy in Metal Hydrides: a Review of the Physical Metallurgy. Journal of Materials Science.
- Ekmekçi, İ. ve Ermiş, K. 2003. Yakıt Hücrelerinin Önemi ve Uygulama Alanları. 3e Electrotech Dergisi. Sayı:105.
- Ewald, R. 1998. Requirements for Advanced Mobile Storage Systems. International Journal Hydrogen Energy. 803-814.
- Technology, U.K.
- Gök, B. N., Özdemir, B., Çiçek, Z. Z., Toksoy, M. ve Akman, H. E. 2020. <https://www.tespam.org/yakit-pili/>.
- European Commission, 2001. Green Cars Initiative. Research and Innovation Transport. http://ec.europa.eu/research/transport/info/green_cars_initiative_en.html.
- Gregor, H. 2003. Fuel Cell Technology Handbook CRC Press Boca Raton.
- Gregory, D. P. 1972. A Hydrogen Energy System. Institute of Gas Technology, ABD.
- Güvendiren, M., Baybörü, E. ve Öztürk, T. 2002. Taşınabilir Enerji Kaynağı Olarak Hidrojenin Metal Tozlarda Depolanması. Savunma Teknolojileri Kongresi Bildiriler Kitabı, Ankara.
- Güvendiren, M., Baybörü, E. ve Öztürk, T. 2003. Effects of Additives on Mechanical Milling and Hydrogenation of Magnesium Powders. International Journal Hydrogen Energy.
- Güvendiren, M., Baybörü, E. ve Öztürk, T. 2003. Hidrojen Depolama Amacıyla Magnezyum Tozlarının Öğütülmesinde Katkı Maddelerinin Etkisi. 3.Toz Metalurjisi Konferansı.
- Güvendiren, M., Akdeniz, V., & Öztürk, T. 2003. A Study on Hydrogen Sorption Kinetics of NaBH₄ Powders Mechanically Milled With Additives.
- Hidrojen Enerjisi ve Yakıt Hücreleri Teknolojisi. 2019. Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Hirschenhofer, J. H., Stauffer, D. B., Engleman, R. R. ve Klett, M. G. 1998. Fuel Cell Handbook 4th Edition. National Energy Technology Laboratory, West Virginia.
- Honsberg, C. 2003. Renewable Energy, Spring. Georgia Institute of Technology ECE4833: <http://www.ip3.unipg.it/FuelCells>
- Hoogers, G. 2003. The Fueling Problem and Fuel Cell Systems. The University of Applied Sciences. Umwelt-Campus Birkenfeld. Birkenfeld.
- İder, K. S. 2005. Hidrojen Enerji Sistemleri. ODTÜ Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara.
- Jain, I. P., Vijay, Y. K., Malhotra, R. K. ve Uppadhyay, K. S. 1988. Hydrogen Storage in Thin Film Metal Hydride-a Review. International Hydrogen Energy.
- Jay, T. P. 2003. Modeling and Control of Fuel Cell Systems and fuel Processors. The University of Michigan. Michigan.
- Kadırgan, F. 2003. Hidrojenli Yakıt Hücreleri Teknolojisinde Son Gelişmeler. 3e Electrotech Dergisi. Sayı:104.
- Kaplan, Y. ve Veziroğlu, T. N. 2003. Mathematical Modelling of Hydrogen Storage in a LaNi₅ Hydride Bed. International Journal of Hydrogen Energy, Vienne.
- Kellegöz, M. ve Özkan, İ. 2004. PEM Yakıt Hücrelerinin; Üretim Aşamaları, Performansa Etkileri ve Karşılaşılabilecek Zorluklar İle Diğer Yakıt Hücrelerine Nazaran Avantajları ve Dezavantajları. V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu Bildiri Kitabı. Cilt:2. Su Vakfı Yayınları. İstanbul.
- Kınav, E. 2007. Hidrojenin Ulaşımında Yakıt Olarak Kullanılması: Hibrit Elektrikli Şehir İçi Kişisel Ulaşım Aracı Konsepti. İstanbul.
- Lanz, A. 2001. Hydrogen Fuel Cell Engines. College of Desert, Palm Desert.
- Larminie, J. E. ve Dicks, A. 2000. Fuel Cell Systems Explained. John Wiley & Sons. Chichester.
- Li, X. ve Sheldon, S. W. 2007. Assessment of Efficiency Improvement Techniques for Future Power Electronics Intensive Hybrid Electric Vehicle Drive Trains. Electrical Power Conference. EPC IEE. Canada.
- Mchugh, K. 2005. Hydrogen Production Methods. MPR Associates.

- Meisner, G. P., Tibbets, G. G., Pinkerton, F. E., Olk, C. H., Balogh, M. P. ve Alloy, J. 2002. Comps.
- Muratoğlu, Y. ve Alkaya, A. 2016. Elektrikli Araç Teknolojisi ve Pil Yönetim Sistemi-İnceleme. Mersin Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü. Makale, Mersin.
- Okumuş, E. 2017. Yakıt Pili ve Kontrol Sistemi. Tübitak, Kocaeli.
- Oral, E. ve Çelik, V. 2005. Hidrojen Yakıtlı Motor Teknolojisi. Mühendis ve Makine. 540.
- Özdemir, E. 2002. Yakıt Pili İle Elektrik Üretimi. 3e Electrotech Dergisi Sayı:94.
- Paganelli, G., Ercole, G., Brahma, A., Guezennec, Y. ve Rizzoni, G. 2001. General Supervisory Control Policy for the Energy Optimization of Charge Sustaining Hybrid Electric Vehicles. JSAE Review 22.
- Pischinger, S., Schönfelder, C. Ogrzewalla, J. 2005. Analysis of Dynamic Requirements for Fuel Cell Systems for Vehicle Applications. Journal of Power Sources.
- Proton Exchange Membran Fuel Cells. (2009).
- Schulz, R., Huot, J., Liang, G., Boily, S., Lalande, G., Denis, M. C. ve Dodolet, J. P. 1999. Recent Developments in the Application of Nanocrystalline Materials to Hydrogen Technologies. Materials Science and Engineering.
- Sharp-Goldman, S. C., Janjua, S. L., Kelly, M. S., Petillo, M. T., & Binder, M. 2000. An Ultrasafe Hydrogen Generator: Aqueous, Alkaline Borohydride Solutions and Ru Catalyst. Journal of Power Sources.
- Shen, C., He, Y., Liu, Y. ve Tao, W. 2008. Modelling and simulation of solar radiation data processing with Simulink. Simulation Modelling Practice and Theory 16.
- Şenaktaş, B. 2005. Hidrojen Enerjisi, Üretimi ve Uygulamaları. 110.
- Şenaktaş, B. 2005. Hidrojen Enerjisi, Üretimi ve Uygulamaları. 17.
- Şenol, R. ve Üçgül, İ. 2006. Yakıt Pili Teknolojisindeki Gelişmeler ve Taşıtlara Uygulanabilirliğinin İncelenmesi. Mühendis ve Makina, Isparta.
- Thampan, T., Malhotra, S., Zhang, J. ve Datta, R. 2001. PEM Fuel Cell as a Membrane Reactor. Catalysis Today 67(1-3).
- Türker, B., İnan, A. ve Trablus, S. 2004. Yakıt Pili Çeşitleri. 3e Electrotech Dergisi Sayı:126.
- US Fuel Cell Council. (2009). <http://www.usfcc.com>
- Ültanır, M. 2004. 21. Yüzyıla Girerken Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi. <http://tusiad.org.tr>.
- Veziroğlu, T. N. 2008. Hydrogen Energy System: A Permanent Solution To Global Problems.
- Veziroğlu, T. N., ve Barbir, F. 1998. Hydrogen Energy Technologies. UNIDO, Vienne.
- Yılmaz, A., Özlük, M. ve Ünvar, S. 2017. Otomobillerde Kullanılan Yakıt Pillerinin Özellikleri. Makale.
- Ziegler, C. 2005. Modeling and Simulation of the Dynamic Behavior of Portable Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PhD Thesis. Konstanz University, Konstanz.

ÖZGEÇMİŞ

1. Kişisel Bilgiler

Ad Soyad Ahmet Erman ÇİNKİLİÇ
Doğum Tarihi 02.03.1988
Doğum Yeri Gaziantep
E-posta Adresi ermancinkilic@gmail.com

2. Eğitim Bilgileri

Lisans Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği (2010-2015)
Yüksek Lisans Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Disiplinlerarası Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri
Anabilim Dalı (2018-Halen)

3. İş Deneyimi

05.2016-08.2016 Makine Mühendisi, Navi Enerji (Samsun)
12.2016-10.2017 Makine Mühendisi, MSB Erzurum İnşaat Emlak Bölge
Başkanlığı (Erzurum)
11.2017-07.2018 Makine Mühendisi, SK Mühendislik (Samsun)