

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HİDROJENİN ULAŞIMDA YAKIT OLARAK  
KULLANILMASI: HİBRİT ELEKTRİKLİ ŞEHİR İÇİ  
KİŞİSEL ULAŞIM ARACI KONSEPTİ**

Makina ve Kimya Mühendisi Emrah KINAV

**FBE Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı Kimya Mühendisliği Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sema Z. BAYKARA**

**İSTANBUL, 2007**

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ .....	iv
ŞEKİL LİSTESİ .....	v
ÇİZELGE LİSTESİ .....	vi
ÖNSÖZ.....	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT .....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. HİDROJEN YAKITININ ÖZELLİKLERİ ve DİĞER YAKITLARLA KARŞILAŞTIRILMASI .....	4
3. HİDROJEN ÜRETİMİ ve YAKIT PİLLERİ İÇİN YAKIT HAZIRLAMA .....	13
3.1 Hidrokarbonlardan hidrojen üretimi .....	13
3.1.1 İlk İşlem : Desülfürizasyon .....	14
3.1.2 Buhar Metan Reformingi.....	15
3.1.3 CO <sub>2</sub> Reformingi (Kuru Reforming).....	17
3.1.4 Karbon Oluşumu ve Önlenmesi .....	17
3.1.5 İç Reforming.....	18
3.1.6 Metan Kısmi Oksidasyonu (Yanma) ve Ototermlal Reforming.....	18
3.1.7 Isıl Bozunma (Thermal Kraking-Pyrolysis) .....	19
3.1.8 Karbonmonoksitin (CO) Ayrıştırılması.....	19
3.1.9 Araçlarda Uygulamalar .....	20
3.2 Suyun Elektrolizi .....	25
3.2.1 Uygulamalı PV - Elektroliz - Yakıt pili Projesi .....	28
4 HİDROJEN DEPOLAMA YÖNTEMLERİ .....	30
4.1 Sıkıştırılmış Gaz Olarak H <sub>2</sub> Depolama .....	30
4.2 Sıvı Hidrojen Depolama .....	32
4.3 Hidrojenin Metal Hidridlerde Depolanması .....	33
5 YAKIT PİLLERİ ve FARKLI TİP YAKIT PİLLERİNİN İNCELENMESİ.....	34
5.1 Genel Bilgiler .....	34
5.1.1 Çalışma prensipleri .....	34
5.1.2 Elektrik üretimini sınırlayan sebepler .....	35
5.1.3 Verim ve Potansiyel.....	36

5.1.4	Gerçek Yakıt Pili Potansiyelleri .....	41
5.1.5	Yakıt Pillerindeki Tersinmezlikler ve Voltaj Düşüş Sebepleri .....	43
5.1.5.1	Aktivasyon Enerjisinden Dolayı Voltaj Düşüşü.....	43
5.1.5.2	Yakıt Taşınım ve İç Akım Kayıpları .....	44
5.1.5.3	Ohmik Kayıplar (Dirençler) .....	44
5.1.5.4	Kütle Transferi ve Konsantrasyon Kayıpları.....	45
5.2	Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili (PEM YP).....	45
5.2.	Polimer Elektrolit .....	46
5.2.2	Elektrotlar .....	49
5.2.3	Yakıt Pillerinde Su Sorunu.....	50
5.2.4	Nemlendirici Kullanılmama Durumu.....	51
5.2.5	Harici Nemlendiriciler ile Yakıt Pili İşletimi .....	53
5.2.6	PEM Yakıt Pili Soğutulması ve Hava Besleme .....	55
5.2.6.1	Katoda beslenen hava ile soğutma.....	55
5.2.6.2	Reaktan ve Soğutma Havaasının Ayrı Olması.....	55
5.2.7	PEM Y.P Yapılandırma Metotları.....	57
5.2.7.1	Bipolar Plaka Üretim Metotları .....	57
5.3	Alkali Elektrolit Yakıt Pili ( A.E.Y.P ) .....	58
5.3.1	Hareketli Elektrolitli Alkali Elektrolit Yakıt Pilleri .....	59
5.3.2	Durağan Elektrolitli Alkali Elektrolit Yakıt Pili .....	61
5.3.3	Çözünmüş Yakıt Alkali Elektrolit Yakıt Pilleri .....	64
5.3.4	Alkali Elektrolit Yakıt Pilleri İçin Elektrotlar .....	64
5.3.5	Problemler ve Gelişmeler .....	66
5.4	Orta ve Yüksek Sıcaklık Yakıt Pilleri .....	67
5.5	Fosforik Asit Yakıt Pili ( F.A.Y.P ).....	67
5.5.1	Elektrolitler .....	68
5.5.2	Elektrot ve Katalizörler .....	68
5.5.3	Yığın .....	69
5.5.4	Son Zamanlardaki Gelişmeler ve Çalışmalar .....	70
5.6	Erimiş Karbonat Yakıt Pili ( E.K.Y.P ).....	71
5.6.1	Çalışma Prensipleri .....	71
5.6.2	Elektrolit .....	73
5.6.3	Elektrotlar .....	74
5.6.4	Gözeneksiz Elemanlar .....	76
6	BATARYALAR.....	77
6.1	Bataryaların Çevreye Etkileri .....	78
6.2	Batarya Tipleri Hakkında Kısa Bilgiler.....	79
6.3	Bataryaların Genel Yapısı .....	80
6.4	En Yaygın ve Gelecek Vaad Eden Batarya Tipleri .....	81
6.4.1	Kurşun Asit Batarya (SLA-VRLA).....	81
6.4.2	Nikel Kadmiyum Batarya (NiCd).....	81
6.4.3	Nikel Metal Hidrür Batarya (NiMH).....	82
6.4.4	Lityum İyon (Li-ion) .....	82
6.4.5	Lityum Polimer Batarya (Li-polimer) .....	83
6.4.6	Sodyum Sülfür Batarya (NaS).....	84

7	ARAÇ UYGULAMALARINA GİRİŞ .....	85
8	DÜNYADAKİ ARAÇ UYGULAMALARINDAN SEÇİLENLER .....	90
8.1	Tesla Motors .....	91
8.2	Elektrikli SMART Fortwo .....	91
8.3	General Motors Firmasının Çalışmaları Elektrikli Araç Çalışmaları .....	92
8.4	Tayvan’da Elektrikli Araçların Kullanımı .....	94
8.5	FIAT-Panda H2 Projesi .....	95
8.6	REVA Elektrikli Araçları .....	96
8.7	Bajaj Auto .....	96
9.	YAKIT PİLLİ ve BATARYA TAHRİKLİ ŞEHİR İÇİ KİŞİSEL ULAŞIM..... ARACI KONSEPTİ	97
9.1	İzlenen Yöntem .....	97
9.2	Tasarım Kriterleri .....	99
9.3	Güç - Enerji Paketinin Tasarımı .....	99
9.4	Komponentlerin Seçilmesi .....	100
9.4.1	Yakıt Pillinin Seçilmesi .....	101
9.4.2	Hidrojen deposunun seçilmesi .....	102
9.4.3	Bataryanın seçilmesi .....	102
9.4.4	Motorların seçilmesi .....	105
9.4.5	Şehiriçi kişisel ulaşım aracı genel tasarımı .....	105
9.5	Kullanılan formüller ve yapılan hesaplamalar .....	106
10	SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....	115
	KAYNAKLAR .....	118
	ÖZGEÇMİŞ .....	120

## SİMGE LİSTESİ

A	: amper
Ah	: amper saat
A <sub>ARAÇ</sub>	: Araç ön kesit alanı
C <sub>D</sub>	: Aerodinamik direnç katsayısı
Ç	: Çevre
F	: Faraday sabiti, bir mol elektronun yükü, 96485 Coulomb
f	: Yuvarlanma direnç katsayısı
G	: Ağırlık
g	: Yerçekimi ivmesi
h	: saat
M	: Kütle
M <sub>teker</sub>	: Tekerin yere uygulayacağı moment
M <sub>motor</sub>	: Motor torku
N	: Newton
Nm	: Newton metre
N <sub>e</sub>	: Motor gücü
N <sub>tr</sub>	: Traksiyon, çekme gücü (motordan tekerlere iletilen güç)
P <sub>e</sub>	: Elektrik gücü
V	: Volt
V <sub>c</sub>	: Yakıt pili yığımında tek hücrenin gerilimi
V <sub>ruzgar</sub>	: Rüzgar hızı
V <sub>taşıt</sub>	: Araç hızı
W	: watt
W <sub>b</sub>	: İvmelenme direnci
W <sub>egim</sub>	: Eğim direnci
W <sub>hava</sub>	: Hava direnci
W <sub>top</sub>	: Toplam direnç
W <sub>yuvarlanma</sub>	: Yuvarlanma direnci
α	: Çıkılacak en dik eğim
η <sub>top</sub>	: Toplam verim (motor verimi ve iletim, traksiyon verimi)
η <sub>iletim</sub>	: İletim verimi
η <sub>motor</sub>	: Motor verimi
ρ <sub>hava</sub>	: Havanın yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )

## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1	Buhar reforminginde, sıcaklığa bağlı olarak, reaktanların denge konsantrasyonları .....	16
Şekil 3.2	Elektroliz olayı .....	25
Şekil 3.3	PEM tipi elektrolizör sistemi.....	26
Şekil 3.4	Uygulamalı PV - Elektroliz - Yakıt pili Projesi-1 .....	29
Şekil 3.4	Uygulamalı PV - Elektroliz - Yakıt pili Projesi-2 .....	29
Şekil 4.1	Yüksek basınç altında, çelik tüplerde hidrojen depolanması .....	31
Şekil 4.2	Yüksek basınç altında depolanan hidrojenin, depo çıkışında basıncının düşürülmesi için kullanılan basınç regülatörü.....	32
Şekil 5.1	Yakıt pilinin şematik gösterimi .....	34
Şekil 5.2	Ekzotermik kimyasal bir reaksiyonun enerji diyagramı.....	35
Şekil 5.3	Carnot sınırı ile yakıt pilini karşılaştıran Verim-Sıcaklık grafiği.....	41
Şekil 5.4	Düşük sıcaklık yakıt pili voltaj akım yoğunluğu grafiği.....	41
Şekil 5.5	800 °C de çalışan, yüksek sıcaklık yakıt pili.....	42
Şekil 5.6	Hücre gerilimi – Akım yoğunluğu grafiği.....	43
Şekil 5.7	Polietilen yapısı .....	46
Şekil 5.8	PTFE yapısı .....	47
Şekil 5.9	Perflorosülfonik asit (PTFE kopolimer) olarak da bilinen sülfonlanmış floroetilen.....	47
Şekil 5.10	Nafion tipi membran yapısı.....	48
Şekil 5.11	Nemlendirmeyi arttırmak için kullanılan ters akımlı reaktan gaz geçişi.....	52
Şekil 5.12	Çıkış havası kullanılarak nemlendirilen reaktan giriş havası.....	53
Şekil 5.13	Çıkış havası kullanılarak nemlendirilen reaktan giriş havası uygulaması .....	54
Şekil 5.14	Reaktan ve soğutma havasının ayrı olarak beslenmesi .....	56
Şekil 5.15	Hareketli elektrolitli alkali elektrolit yakıt pilleri grafiği.....	61
Şekil 5.16	Durağan Elektrolitli Alkali Elektrolit Yakıt Pili .....	63
Şekil 5.17	Haddelenmiş ( Rolled ) Elektrotlar .....	65
Şekil 5.18	Erimiş karbonat yakıt pili ( E.K.Y.P ) çalışma prensibi.....	71
Şekil 5.19	İç dönüşümün olduğu erimiş karbonat yakıt pili ( E.K.Y.P ) çalışma prensibi .....	72
Şekil 9.1	Hibrit Elektrikli Şehir içi Ulaşım Aracı 1 .....	112
Şekil 9.2	Hibrit Elektrikli Şehir içi Ulaşım Aracı 2 .....	113
Şekil 9.3	Hibrit Elektrikli Şehir içi Ulaşım Aracı 3 .....	114

## ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Yakıtların genel özelliklerinin karşılaştırılması .....	5
Çizelge 2.2	Hidrojenin özellikleri .....	6
Çizelge 2.3	Hidrojen, metan ve benzinin güvenlik açısından özelliklerinin karşılaştırılması .....	8
Çizelge 2.4	Hidrojen, metan ve benzinin güvenlik açısından karşılaştırmaları .....	9
Çizelge 2.5	Farklı cins yakıtların yanma süreleri .....	10
Çizelge 2.6	Farklı yakıtlar için devitim faktörü .....	11
Çizelge 2.7	Hidrojenin ve fosil yakıtların çok yönlü kullanımları .....	12
Çizelge 3.1	Farklı bölgelerden üretilen doğalgaz bileşimleri .....	13
Çizelge 3.2	Hidrojen Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Çizelgesi .....	22
Çizelge 3.3	Hidrokarbon kökenli hidrojen maliyetlerinin yenilenebilir enerjiyle sudan elektroliz kaynaklı hidrojen maliyetleriyle karşılaştırılması .....	25
Çizelge 3.4	Farklı ticari elektrolizör firmalarının elektrolizör verimleri ve kapasiteleri .....	27
Çizelge 5.1	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$ reaksiyonu için farklı sıcaklıklarda $\Delta g_f$ değerleri .....	37
Çizelge 5.2	Yakıt pilleri için $\Delta g_f$ , en yüksek EMK ve verim sınırı .....	40
Çizelge 5.3	Farklı sıcaklık ve stokiometrilere çıkış havası bağıl nem değerleri .....	52
Çizelge 6.1	Bazı enerji kaynaklarının özgül enerji değerleri .....	78
Çizelge 6.2	Elektrikli araç bataryalarının malzemeleri .....	83
Çizelge 8.1	GM-Impact elektrikli aracının güç ihtiyaçları .....	91
Çizelge 9.1	Elektrikli araç uygulama örnekleri .....	104

## ÖNSÖZ

Ülkemiz sanayisinin can damarlarını oluşturan iki sektörü, otomotiv ve enerji sektörlerini ilgilendiren bir konu olan, hidrojenin ulaşımında yakıt olarak kullanılması üzerine, bir şehiriçi kişisel ulaşım aracı konsepti önererek hazırlamış olduğum tezim süresince bana desteklerini esirgemeyen herkese teşekkür ederim.

Tez danışmanım sayın Prof. Dr. Sema Z. Baykara'ya, beni çalışmamda tamamen kendi inisiyatifimle hareket etmek üzere serbest bıraktığı için,

Uzun zaman önce geliştirmeye başlamış olduğum şehir içi kişisel ulaşım aracı konsepti konusunda ilk desteği veren Meltem Karabıyık'a,

Hidrojen ve yakıt pilleri ile ilgili bilgi birikimi oluşturmama ve dünyadaki gelişmelerin takibi konusunda bana yardımcı olan UNIDO-ICHET'e,

Şehir içi kişisel ulaşım aracının tasarımı ve üretilmesi konusunda büyük maddi ve manevi destek veren AKA Otomotiv ve çalışanlarına,

Tüm hayatım boyunca sevgilerini ve anlayışlarını benden esirgemeyen, çok sevdiğim aileme,

ayrıca sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Emrah KINAV

## ÖZET

Özellikle son yıllarda, küresel ısınma ve iklim değışikliği dünyanın gündemine oturmuştur ve günümüzde CO<sub>2</sub>' in sera etkisine katkısının %50 olduğu tahmin edilmektedir. 80'li yıllarda hızlı bir şekilde ekolojik dengenin bozulmaya başlaması ve çevre sorunlarının ortaya çıkmasıyla birlikte, toplam CO<sub>2</sub> emisyonlarının %60'ından sorumlu olan motorlu taşıtların egzoz emisyonlarında sınırlamalar, önlemler arasında ilk sırayı almıştır.

Hidrojen yakıtının kullanıldığı yakıt pilleri de, birçok farklı alternatifle beraber, motorlu taşıtlar için daha temiz ve sürdürülebilir bir enerji sistemi oluşturulması amacıyla araştırılmaktadır. Doğaya zararlı emisyon yaymayan bir enerji sistemi oluşturmak amacıyla yapılan çalışmalarda geline nokta halen hangi teknolojinin ve/veya teknolojilerin motorlu taşıtların ve otomotiv endüstrisinin geleceğini şekillendireceği netlik kazanmamıştır.

Bu çalışmada ayrıca, kişisel ulaşım araçlarının dezavantajları göz önünde bulundurularak, yeni bir yakıt pili - batarya hibrit elektrikli şehiriçi kişisel ulaşım aracı konsepti önerilmiştir. Bu aracın üretilip testlerinin gerçekleştirilmesi ise çalışmanın bir sonraki adımını oluşturacaktır.

**Anahtar kelimeler:** Hidrojen, yakıt pilleri, otomotiv

## **ABSTRACT**

Especially over the last years, global warming and climate change has become a major issue of concern. CO<sub>2</sub> contribution to the global warming is estimated to be %50. Precautions were taken to limit the emissions of the motor vehicles which are responsible for %60 of the total CO<sub>2</sub> emissions.

Fuel cells that use hydrogen as a fuel, among other alternatives, are being investigated to build clean and sustainable energy system. It is still not certain which technology and/or technologies will shape the future of motor vehicle and the automotive industry.

A fuel cell – battery hybrid electric personal city transport vehicle concept is suggested by bearing in mind the disadvantages of the personal transport vehicles. Manufacturing and testing this vehicle will be the next phase of my study.

**Key words:** Hydrogen, fuel cells, automotive

## 1. GİRİŞ

Enerji kullanımının insanlara ve insanlığa sağladığı faydaların yanısıra, özellikle doğal yaşama zarar veren bir olgu haline gelmiş olduğu bir gerçektir. Bu zararlardan sadece bir tanesi olan ve küresel ısınma olarak da bilinen sera etkisi, yoğun enerji kullanımının yol açtığı ve geleceğimizi büyük oranda etkileme potansiyeli olan bir çevre olayıdır. Günümüzde CO<sub>2</sub>' in sera etkisine katkısının %50 olduğu tahmin edilmektedir. Pekçok bilimadamına göre sera gazlarının atmosferde konsantrasyonlarının artmasıyla küresel ısınma arasında bir sebep-sonuç ilişkisi vardır. Tahminlere göre de gelecek yüzyılda dünya sıcaklığının 2-4 °C artmasıyla birlikte buzullar erimeye başlayacak ve denizlerin seviyesi 30-60cm artacaktır. (IPCC, 2001)

Bir toplum, kalkınmak için enerji ihtiyaçlarını karşılayabilmelidir. Fakat sürdürülebilir kalkınma için sürdürülebilir enerji politikaları gereklidir. Oluşturulan politikalar sürdürülebilirliğin tanımı gereği, uzun vadeli bir bakış açısıyla ekonomik, teknik ve sosyal sorunlar yaratmadan tüm toplumun her türlü enerji ihtiyacını karşılayabilmek üzerine kurulmalıdır.

Yenilenebilir enerji teknolojileri, dünyada doğal olarak var olan enerjiyi kullanılabilir enerji formuna dönüştürmemizi sağlarlar. Güneş ışınlarının taşıdığı enerji, rüzgarın enerjisi, yeryüzünün ve dünyanın çekirdeğinin ısısı, bitkilerin kendi enerjileri ve daha bilinen veya bilinmeyen birçok enerji formu, insanların hayatlarını kolaylaştıracak, aradıkları daha yüksek konforlu ve her anlamda daha yüksek standartlarda yaşam kalitesine ulaşmaları için kullanılabilir enerji formlarına dönüştürülebilir. Görüldüğü gibi enerji miktarı ve yeterliliği açısından bakıldığında günümüzde kullandığımız geleneksel enerji kaynaklarından çok daha ideal ve bol olan doğal enerji kaynaklarının halen yaygın olarak kullanılamamalarının bazı sebepleri vardır. Bu sebepler her bir kaynak için aynı olmamakla beraber genellikle kaynakların süreksizliği, emre amade olmamaları, farklı bölgesel değişiklikler, dağınık olmaları gibi bazı önemli sorunlardır. Ancak tüm bu sorunlardan daha da önemli ve yenilenebilir enerjilerin dünya ölçeğinde bugüne kadar yaygınlaşamamalarına sebep olan temel sorun, tüm bu enerji kaynaklarının halen fosil yakıtlara göre ekonomik olamamalarıdır.

Bu tezin konusu kapsamında, bir yenilenebilir yakıt olarak tanımlanabilecek hidrojenin başta kara araçları olmak üzere, ulaşım araçlarında kullanımı irdelenecektir. Özellikle kara araçlarının öncelikle konu edilmesinin sebebi, tüm dünyada hızla artan sayıları ve teknolojik ilerlemelere

rağmen doğaya ve insan sağlığına verdikleri zararların da hızla artmasıdır. Her enerji ve çevre politikası, ulaşım sektörüyle bir şekilde ilişkisi olmaktadır çünkü tüm dünyada arabalarda, kamyonlarda, otobüslerde, uçaklarda vb. halen %97 oranında petrol türevleri kullanılmaktadır. (Romm, 2006)

Seksenli yıllarda hızlı bir şekilde ekolojik dengenin bozulması ve çevre sorunlarının ortaya çıkmasıyla birlikte, toplam CO<sub>2</sub> emisyonlarının %60'ından sorumlu olan araçların egzoz emisyonlarında sınırlamalar önlemler arasında ilk sırayı almıştır. (Şahin, 2006)

Bu dönemde büyük şehirlerde çoğunluğu kara araçlarından kaynaklanan kirlilik yaşanması, toplumların bu konuda daha hassas olmasına sebep olmuş ve kirliliği azaltıcı bazı önlemler alınmaya başlanmıştır. (McNicol vd., 2001) Örneğin ABD'nin Kalifornia eyaletinde yerel yönetimin aldığı bir karar sonucu 1998-2000 senelerinde üretilecek ve satılacak tüm yeni araçların %2'sinin sıfır emisyonlu araç (SEA) olması benimsenmiştir. Teknik ve teknolojik sınırlamalardan dolayı SEA sınıfında olabilecek araçlar sadece akü tahrikli elektrikli araçlar olabilmekteydiler. Hükümet de araçlardan kaynaklanan hava kirliliğinin azaltılması için içten yanmalı motorların emisyon değerlerinin ve yakıt kalitelerinin iyileştirilmesi yönünde çalışmalar yapmış ve yeni yasalar çıkartmıştır. (Tzeng vd.2005)

Bu ve benzeri girişimler, ve tüketicilerin de talepleri firmaları harekete geçirmektedir. Firmaların çalışmaları da kendi aralarında rekabete ve sonuçta daha iyi ürünlerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Mesela, Amerika'da Toyota'nın (Lexus) hibrid SUV segmentindeki araçlarında yakaladığı başarı BMW ve Daimler-Chrysler firmalarının daha sıkı işbirliği içine girmesine sebep olmuştur. Burada önemli olan, bu işbirliğinin muhtemel sebepleridir. Her iki büyük, başarılı ve öncü Alman otomotiv firmasının, hibrid araçların daha gözle görülür başarılar sağlayacağı SUV segmentinde Amerika'da gördükleri büyük potansiyelinin yanısıra muhtemelen kendi ülkelerinde de hibrid araçlara ve çevreci teknolojilere karşı tüketicilerin ilgisinin artmış olması sonucu çalışmalarına hız vermiş olmalıdır. Bir başka Alman otomotiv firması olan Continental'in araç sahipleri arasında yaptığı anket sonuçlarına göre her 4 Alman'dan biri hibrit araç satın almak istemekte. Elbette benzer sonuçların, otomotiv ana sanayi firmalarının anketlerinde de görülüyor olduğunu düşünmemiz doğaldır. (European Automotive Design, Mart 2007)

Elektrikli araçlar, hem sıfır emisyon yaymaları hem de kullanıcılarına kat edilen mesafe başına içten yanmalı motorlu araçlardan daha düşük maliyet getirmeleri sebebiyle büyük avantajlara sahiptirler. Fakat ilk maliyetleri, düşük menzilleri ve şarj sürelerinin uzunluğu, onların ana otomotiv firmaları tarafından pazarlanmalarını büyük oranda engellemektedir. Elektrikli araçların kullanım süresince ekonomikliği, yani kilometre başına enerji maliyetleri, elektrikli aracın, fişli hibrit araçlar gibi şehir hattından şarj edilmesi durumunda, kullanıldıkları ülkenin veya bölgenin elektrik fiyatlarıyla doğrudan bağlantılıdır. (Romm, 2006) Ayrıca mukayese olarak içten yanmalı motorlu araçlar kullanıldığı için ülkedeki akaryakıt fiyatları da bir o kadar önemlidir. Bu noktada ülkemiz için bir değerlendirme yaparken ülkemizde kullanılan akaryakıtın pahalılığı mutlaka gözönünde bulundurulmalıdır.

Hidrojen yakıt pili teknolojisinin ulaşım araçlarında uygulanması, temelde kendisi de bir elektrikli araç olan yakıt pilli araçların önündeki engellerin aşılmasına ve halk arasında yaygınlaşmasına olanak sağlayacaktır. Elektrikli araçların ortak avantajlarına sahip olan ve aynı zamanda da temiz, çevreci bir yakıt olan hidrojen yakıtını kullanarak elektrik üreten yakıt pilli araçlar, akülerinde depolayabildikleri kısıtlı enerji miktarına bağımlı değildirler. Üzerlerinde taşıdıkları yakıt pili sayesinde ihtiyaç olduğu zaman elektrik üretmekte ve bu elektrik sayesinde araca hareket kabiliyeti veren elektrik motorlarını çalıştırmaktadırlar. Bu sayede, elektrikli araçların yaygınlaşmasının önündeki en büyük engellerden biri olan kısıtlı menzil sorunu aşılmış olacaktır. Yakıt pillerinin otomotivde kullanılması önündeki sorunlardan birisi ve belki en büyüğü, yakıt pillerinin yüksek maliyetlerinin olmasıdır. Bu engelin kısmen aşılması ile ilgili bir önerim, tezimin 9.ncu bölümü olan, şehiriçi kişisel taşıma aracı konseptinin tanıtıldığı bölümde bulunmaktadır.

Sanayileşmiş ülkelerde, karbon emisyonlarının artmasının en temel sebebi daha fazla rahatlık, daha fazla lüks ve daha fazla hareket kuvvetine duyulan arzudur. Benzer sebepler, şehir hayatında sıkça karşımıza çıkmaktadır. İnsanlar daha yüksek hayat standartları için çalıştıkları sürece, enerjiye duyulan ihtiyaç da hızla artacaktır. Bu artışın insanlığa ve dünyamıza olumsuz etkilerinin olmaması için yenilenebilir enerji teknolojilerine olan ilginin ve yenilenebilir enerji kullanımının hızla artarak devam etmesi gerekecektir.

## 2. HİDROJENİN ÖZELLİKLERİ ve DİĞER YAKITLARLA KARŞILAŞTIRMA

Hidrojenin doğada protiyum, döteryum ve trityum olmak üzere 3 izotopu bulunur. Bu izotoplardan protiyum, standart hidrojen atomu olup bir proton ve bir elektronuyla doğadaki bilinen en basit elementtir. Hidrojen doğadaki en hafif gazdır ve bu özelliği ile helyum gibi kaldırıcı bir gaz olarak kullanılabilir. 1 m<sup>3</sup> hidrojenin 1.21 kg kaldırma gücü vardır (273 K ve 760 mmHg). Aynı hacimdeki havadan yaklaşık 14-15 kat daha hafiftir.

Hidrojen renksiz, kokusuz, tatsız ve korozif olmayan bir gazdır; 294 K sıcaklıktaki suda çözünürlüğü 1.62 mg/lt dolayındadır.

Bilinen bir zehir etkisi yoktur. Gözle temas halinde de bir zehirli etkisi yoktur ancak sıvı hidrojen çok düşük sıcaklıklarda bulunmasından dolayı ciltle teması lokal donmaya ve ciddi yanıklara yol açabilir.

Kaynama noktası 20.23 K, erime noktası 13.8 K'dir (54 mmHg basıncında). Buradan da anlaşılacağı gibi, hidrojen çok düşük sıcaklıklarda (yaklaşık 20.3 K) gaz fazına geçen ve oda sıcaklığında sıvılaştırılması için çok enerji harcanması gereken bir elementtir. Mutlak sıfır sıcaklığı olarak bilinen ve teorik olarak inilebilecek en düşük sıcaklık olan 0 K sıcaklığa çok yakın sıcaklıklarda hidrojen ancak sıvı ve katı hale geçmektedir (atmosfer basıncında). Buharlaştırma ısı 20.23 K'de 0.9 kJ/mol'dür.

Hidrojenin düşük yoğunluğu ve düşük viskozitesi, içinde bulunduğu ortamın çeperlerindeki çok küçük çatlak veya açıklıklardan dışarı sızabilmesine olanak sağlar. Bu özelliğiyle metandan 2.8 kez, havadan 3.3 kez daha hızlı sızar. Hidrojenin kullanıldığı yerlerde sızma riski en düşük tutulmalı ve sızma ihtimaline karşı ortama hidrojen dedektörleri yerleştirilmelidir.

Hidrojen yanıcı ve patlayıcı bir gazdır. Hava ile hacmen %4-75 oranında karışması halinde yanabilir (Çizelge 2.1). Bu kadar geniş bir yanma aralığı olması ise bazı avantajlar ve dezavantajlar oluşturur. Yanarken çıkan soluk mavi alev gözle görülmeyebilir.

Çizelge 2.1 Yakıtların genel özelliklerinin karşılaştırılması [2]

<b>Özellikler</b>	<b><i>Benzin</i></b>	<b><i>Diesel No2</i></b>	<b><i>Metanol</i></b>	<b><i>Etanol</i></b>	<b><i>Propan</i></b>	<b><i>CNG</i></b>	<b><i>Hidrojen</i></b>
Kimyasal formülü	C <sub>4</sub> -C <sub>12</sub>	C <sub>3</sub> -C <sub>25</sub>	CH <sub>3</sub> OH	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>
Molekül ağırlığı	100-105	~200	32.04	88.15	44.1	16.04	2.02
Karbon oranı (ağırlıkca %)	85-88	84-87	37.5	52.2	82	75	0
Hidrojen oranı (ağırlıkca %)	12-15	33-16	12.6	13.1	18	25	100
Oksijen oranı (ağırlıkca %)	0	0	49.9	34.7	0	0	0
Otomatik ateşleme sıcaklığı ( ° C)	257	~315	464	423	454-510	540	565-582
Tutuşma aralığı (havada hacmen %)	1.4-7.6	1-6	7.3 -36	4.3-19	2.2-9.5	5.3-15	4.1-74
Üst ısıl değer (kJ/kg)	43725– 47450	44650– 46515	22675	36750	50240	54890	141870
Alt ısıl değer (kJ/kg)	41865– 44190	41865– 44190	19930	26745	46050	49540	119855

Hidrojen, bilinen tüm yakıtlar içinde birim kütle başına en yüksek enerjiye sahip yakıttır (Çizelge2.2). Örneğin üst ısıl değeri, 141.9 MJ/kg , benzininkinin üç katıdır ancak hacimsel olarak bakıldığında hidrojenin çok düşük yoğunluğundan dolayı 11.89 MJ/m<sup>3</sup> olmaktadır. Yani birim hacimde bulunan gazın üst ısıl değeri düşük olmaktadır. Bu özelliği hidrojenin taşıt araçlarında yakıt olarak kullanılmasını en çok güçleştiren özelliğidir ve küçük hacimlerde fazla miktarlarda hidrojenin depolanması için tüm dünyada çok yönlü araştırma geliştirme faaliyetleri sürdürülmektedir. [1]

Çizelge 2.2 Hidrojenin özellikleri (Veziroğlu, Barbir, 1998)

<b>Hidrojenin Özellikleri</b>	
Yoğunluk	0.0838 kg/m <sup>3</sup>
Üst ısıl değer	141.90 MJ/kg 11.89 MJ/m <sup>3</sup>
Alt ısıl değer	119.90 MJ/kg 10.05 MJ/m <sup>3</sup>
Kaynama noktası	20.3 K
Sıvı haldeki yoğunluk	70.8 kg/m <sup>3</sup>
Kritik nokta sıcaklığı	32.94 K
Kritik nokta basıncı	12.84 bar
Kritik nokta yoğunluğu	31.40 kg/m <sup>3</sup>
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı	858 K
Yanma aralığı	%4 – 75 ( hacimsel )
Havada stokiyometrik karışımı	%29.53 ( hacimsel )
Difüzyon katsayısı	0.000061 m <sup>2</sup> /sn
Özgül ısısı	14.89 kJ/(kg K)
Alev sıcaklığı	2318 K

Hidrojenin bir yakıt veya daha farklı bir bakış açısına göre bir enerji taşıyıcı olarak kullanılmasında en çok dikkat edilmesi gereken yönü, hidrojenin sağlayabileceği güvenlik kriterleridir. Bu açıdan baktığımızda mevcut enerji sistemiyle, yani benzin, kömür, doğalgaz gibi yakıtlarla karşılaştırılması gereklidir. Çizelge 2.3’de, hidrojenin bazı özellikleri güvenlik açısından benzin ve metan, yani doğal gaz, ile karşılaştırılmış ve daha sonra da bu özelliklere ek olarak çevreye olan etkileriyle de birlikte 'Fayda Analizi (Merit Analysis) çizelgesi çıkarılmıştır. Çizelge 2.4’de hidrojenin, metanın ve benzinin toplam güvenlik katsayıları bulunmuştur.

Hidrojen, yanma karakteristikleri bakımından diğer yakıtlara göre bazı farklılıklar gösterir ;

1) Havada yanmaya başlaması için gerekli enerji doğal gaz ve diğer hidrokarbonlara oranla çok düşüktür. Çizelgedan da görüldüğü gibi hidrojen doğal gazdan yaklaşık 10 kat daha az bir enerji ile tutuşabilir. Fakat burada önemli olan yanma için gereken enerjinin miktarıdır çünkü gerçek hayatta bir kıvılcım bile hem benzinin , hem doğalgazın , hem de hidrojenin yanmaya başlamasına yeterli miktarda enerjiyi sağlar.

2) Hidrojenin alev hızı doğal gazın alev hızından yaklaşık 10 kat daha fazladır.

3) Hidrojenin yanmaya başlaması için gerekli olan ateşleme enerjisi hidrokarbonlara göre düşüktür ve dolayısıyla düşük sıcaklıklarda katalitik yanma başlatılıp sürdürülebilir.

4) Özellikle hidrojenin motorlarda kullanımında önem taşıyacak bir diğer özelliği, geniş bir karışım oranında yanabilmesidir. Doğal gazda ancak %5 ile %15 arasında doğal gaz / hava karışımı oluşturulması gerekirken bu oran hidrojen için %4 ile %74 arasında olabilir.

5) Yanma ürünü olarak su oluşur. Dolayısıyla esasen hidrojen tamamen temiz ve çevreye zarar vermeyen bir yakıttır ancak yine diğer yanma olaylarında da olduğu gibi hidrojen de yüksek sıcaklıkta yandığı zaman ( yakıt pillerinde bu tip bir yanma yoktur ) havadaki azot ve oksijenin ısınması sonucu azotoksitler (  $NO_x$  ) oluşur. Hidrojenin alev sıcaklığı, Çizelge 2.3 'de görüldüğü gibi, doğalgazınkinden yüksek ve benzininkinden alçaktır.

Çizelge 2.3 Hidrojen, metan ve benzinin güvenlik açısından özelliklerinin karşılaştırılması  
(Sarıca, 1988; Veziroğlu, 2003)

<b>Özellikler</b>	<b><i>Benzin</i></b>	<b><i>Metan</i></b>	<b><i>Hidrojen</i></b>
Yoğunluk(kg/m <sup>3</sup> )	4.40	0.65	0.084 (70.8 sıvı H <sub>2</sub> )
Özgül ısı (kJ/kg ° K)	1.20	2.22	14.89
Havada difüzyon kat. (m <sup>2</sup> /sn)	0.000005	0.000016	0.000061
Havada tutuşma aralığı (hacmen %)	1.0-7.6	5.3-15.0	4.0-75.0
Tutuşma enerjisi (mj)	0.24	0.29	0.02
Tutuşma sıcaklığı (K)	501-744	813	833
Alev sıcaklığı (K)	2470	2148	2318
Patlama aralığı (havada hacmen %)	1.1-3.3	6.3-14	18-59
Alev hızı (m/s)	0.34	0.3048	2.7
Alevden ısı yayılımı (%)	34-43	25-33	17-25
Patlama enerjisi (kgTNT/kj)	0.00025	0.00019	0.00017

Çizelge 2.4 Hidrojen, metan ve benzinin güvenlik açısından karşılaştırılmaları (Veziroğlu, Barbir, 1998)

<b>Özellikler</b>	<b><i>Benzin</i></b>	<b><i>Metan</i></b>	<b><i>Hidrojen</i></b>
Yakıtın zehirliliği	3	2	1
Yanma ürünlerinin zehirliliği	3	2	1
Yoğunluk(kg/m <sup>3</sup> )	3	2	1
Sabit basınçta özgül ısı (kJ/kg ° K)	3	2	1
Havada difüzyon kat. (cm <sup>2</sup> /sn)	3	2	1
Havada tutuşma aralığı (hacmen %)	1	2	3
Tutuşma enerjisi (mj)	2	1	3
Tutuşma sıcaklığı ( ° C)	3	2	1
Alev sıcaklığı ( ° C)	3	1	2
Havada patlama aralığı (hacmen %)	3	2	1
Alevden ısı yayılımı (%)	3	2	1
Patlama enerjisi (gTNT/kj)	3	2	1
<b>Toplam</b>	<b>33</b>	<b>22</b>	<b>17</b>
<b>Güvenlik Katsayısı</b>	<b>0.51</b>	<b>0.77</b>	<b>1.00</b>

Not: 1, en güvenli; 3, en az güvenli

Patlama : Hidrojenin havada patlama aralığı %18-59 arasındır. Yani hidrojenin patlaması için havada hacmen en az %18 oranında birikmesi gereklidir. Bu miktar benzinde %1.1 , propanda %1.1, doğalgazda %6.3 gibi çok daha düşük seviyelerdedir. Yani hidrojen , yoğun olarak evlerimizde kullanmakta sakınca görmediğimiz doğalgazdan ve propandan ancak çok daha fazla miktarlarda sızması durumunda havayla patlayıcı karışım oluşturabilmektedir.

1958 yılında Arthur D. Little şirketinin 5 ile 20000 litre hidrojen ile yaptığı patlama testlerinde hidrojenin hiçbir çarpışma etkisiyle ve hatta hidrojen tüpüne silahla ateş edildiğinde bile patlamadığı görülmüştür. Benzer sonuçlar Lockheed Aerospace şirketi tarafından 1950'lerde yapılan testlerde de elde edilmiştir ve hidrojenin patlatılması zor bir yakıt olduğu ispatlanmıştır. Ayrıca bu iki şirket 1980 yılında NASA Lewis Research Center için paralel olarak hidrojenin uçaklarda güvenlik durumunu araştırmak için yaptıkları testler vardır. Bu testlerde de 400 koltuklu bir yolcu uçağının düşmesi veya zorunlu iniş durumlarında yolcuların hayatta kalabilme ihtimalleri araştırılmıştır. Sonuç olarak sıvı hidrojen jet yakıtından daha hızlı buharlaştığı , daha çabuk yandığı ve yanarken daha az ısı yaydığı (radyasyon ile ısı transferi hidrokarbon alevine göre çok daha az) için, hidrojen yakıtlı uçakda da daha az hasar olması beklenebilir.

Araba kazalarında içi benzin dolu bir arabanın yanması 20-30 dakika sürerken aynı şartlarda hidrojen ile dolu bir arabanın yanması 1-2 dakika sürer çünkü hidrojen çok kısa bir sürede havaya dağılır. Ayrıca hidrojen diğer yakıtlardan daha kısa sürede yanıp bitmektedir. Havadan çok hafif bir gaz olması nedeniyle hidrojen, kaza anında yukarı doğru yükselir ancak hepimizin bildiği gibi benzin ve diğer petrol türevleri yere saçılır ve aracın altında yanmaya devam eder (Çizelge 2.5).

Çizelge 2.5 Farklı cins yakıtların yanma süreleri (Kruse vd., 2002)

<i>Yakıt</i>	<i>0.121 m<sup>3</sup> yakıtın yanma süresi</i>
Sıvı Hidrojen	27 saniye
Propan	4 dakika
Benzin	5 dakika
Jet yakıtı (JP-4)	7 dakika

"Devitim (Motivity) Faktörü" ;

Bir aracın özelliklerine , türüne ve kullanılacağı yere göre yakıtının da taşınması istenen ideal özellikleri vardır. Bir araç içinde taşıdığı yakıt ile belli bir süre ve mesafe, tekrar yakıt ikmaline ihtiyaç duymadan, yol alabilmelidir. Bu aracın bir uzay aracı , hava aracı , kara aracı veya deniz aracı olması , yakıtın da bazı özelliklerinin farklı olmasını gerektirir ancak yakıtın olabildiğince hafif ve az yer kaplayan bir yakıt olması tüm uygulamalar için idealdir. Yakıtların bu özelliklerin boyutsuz bir büyüklükle karşılaştırılabilmeleri için bir "devitim faktörü" kullanılmaktadır

(Çizelge 2.6). Bu faktörü aşağıdaki formül ile hesaplanabilir. Formülde ;

E = yakıttan üretilen enerji

M = yakıtın kütlesi

V = yakıtın hacmi

h = Hidrojen indisi

Çizelge 2.6 Farklı yakıtlar için devitim faktörü (Veziroğlu, Barbir, 1998)

<i>Yakıt cinsi</i>	<i>Kütlesel enerji (E/M)</i> <i>J/kg</i>	<i>Hacimsel enerji (E/V)</i> <i>J/m<sup>3</sup></i>	<i>Devitim faktörü</i>
<i>Sıvı Yakıtlar</i>			
Fuel Oil	45.5	38.65	0.78
Benzin	47.4	34.85	0.76
Jet yakıtı	46.5	35.30	0.75
LPG	48.8	24.40	0.62
LNG	50.0	23.00	0.61
Metanol	22.3	18.10	0.23
Etanol	29.9	23.60	0.37
Sıvı hidrojen (LH <sub>2</sub> )	141.9	10.10	1.00
<i>Gaz Yakıtlar</i>			
Doğalgaz	50.0	0.040	0.75
Gaz hidrojen (GH <sub>2</sub> )	141.9	0.013	1.00

### Çok Yönlü Kullanım ;

Tüm yakıtlar , bir dizi proses sonucunda ısı enerjisi , mekanik enerji veya elektrik gibi kullanılabilir bir enerji türüne dönüştürülmek zorundadırlar. Bir yakıt ne kadar fazla yöntemle ve ne kadar fazla kullanılabilir enerji türüne dönüştürülebilirse, o kadar esnek ve ideale yakındır. Hidrojen yakıtı Çizelge 2.7’de görüldüğü gibi birçok yöntem ile birçok enerji türüne dönüştürülebilir yani çok yönlü kullanıma yatkındır. Diğer yakıt türlerinde ise bu özellik yoktur ve sadece yakma prosesinde kullanılabilirler.

Çizelge 2.7 Hidrojenin ve fosil yakıtların çok yönlü kullanımları (Veziroğlu, Barbir, 1998)

<i><b>Dönüşüm Prosesi</b></i>	<i><b>Hidrojen</b></i>	<i><b>Fosil Yakıtlar</b></i>
Alevli yanma	Evet	Evet
Doğrudan buhar üretimi	Evet	Hayır
Katalitik yanma	Evet	Hayır*
Kimyasal dönüşüm (Hidratlama)	Evet	Hayır
Elektrokimyasal dönüşüm (yakıt pilleri)	Evet	Hayır*

\*Bir fosil yakıt olan doğalgaz, katalitik yanma prosesinde ve bazı yakıt pili tiplerinde yakıt olarak da kullanılabilir.

### 3. HİDROJEN ÜRETİMİ ve YAKIT PİLLERİ İÇİN YAKIT HAZIRLAMA

En bol hidrojen kaynağı su olmakla beraber, fosil yakıtlardan hidrojen üretim yöntemleri en eski ve halen en ucuz hidrojen üretim yöntemleridir. Fakat fosil yakıtlar hidrojen kaynağı olarak kullanıldıkları sürece elbette hidrojen ekonomisiyle amaçlanan karbon emisyonlarının tamamen yok edilmesi hedefi tam olarak gerçekleştirilemeyecektir.

#### 3.1 Hidrokarbonlardan hidrojen üretimi

Yakıt pilleri için yakıt hazırlama işlemleri, birincil ham yakıtın yakıt pilinde kullanılabilir bir yakıtla dönüşümü olarak da düşünülebilir. Elbette yakıt hazırlama işlemleri, her tip yakıt pilinin aynı özelliklerde yakıtla ihtiyaç duymamasından dolayı tek bir şekilde olmamakta, ihtiyaca göre belirlenen farklı proseslerle yapılmaktadır. Burada kullanılacak yakıt pilinin tipi ve çalışma sıcaklığı büyük önem taşır çünkü çalışma sıcaklığı düştükçe, hazırlanması gereken nihai yakıttan beklenen özellikler de artar. Ayrıca işleme tabi tutulmamış yakıtın kimyasal bileşimi de uygulanacak işlemlerin tasarımında önem taşır. Örneğin doğalgazdan hidrojen veya hidrojen zengin bir yakıt üretmek istediğimizde, doğalgazın menşei de, aynı petrolün olduğu gibi, bileşimine etki etmektedir (Çizelge 3.1).

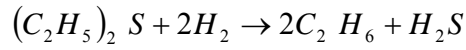
Çizelge 3.1 Farklı bölgelerden üretilen doğalgaz bileşimleri (Dicks, 1996)

Bileşen	Kuzey Denizi	Katar	Hollanda	Pakistan	Ekofisk	Endonezya
CH <sub>4</sub>	94.86	76.6	81.4	93.48	85.5	84.88
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3.90	12.59	2.9	0.24	8.36	7.54
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>		2.38	0.4	0.24	2.85	1.60
i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.15	0.11		0.04	0.86	0.03
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>		0.21	0.1	0.06		0.12
C <sub>5+</sub>		0.02		0.41	0.22	1.82
N <sub>2</sub>	0.79	0.24	14.2	4.02	0.43	4.0
S	4 ppm	1.02	1 ppm	N/A	30 ppm	2 ppm

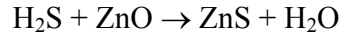
Not: Değerler aksi belirtilmedikçe hacimsel % oranlardır.

### 3.1.1 İlk İşlem : Desülfürizasyon

Doğal gaz ve petrol ürünlerinde bulunan organik sülfür bileşikleri, işlenmiş yakıt, herhangi bir hazırlama işlemine girmeden önce ayrıştırılmalıdır. Petrol ürünlerinde doğal olarak bulunabilen bu bileşikler, doğal gazda ise doğal gaz şirketlerinin bilinçli olarak (doğal gaza sarımsak kokusu vererek herhangi bir sızıntı anında kullanıcıların sızıntının farkına varmasını sağlayarak güvenliği artırır) doğal gaza kattığı bileşiklerdir. Reformere veya yakıt pillerine beslenecek yakıtta çok düşük sülfür miktarına izin verilebilmesi, desülfürizasyon sisteminin de çok dikkatli tasarlanmasını gerektirir. Uygulamalarda genellikle yakıt piline gönderilecek hidrojen zengin yakıtın (reformer çıkışından alınan) bir kısmı hidrosülfürizasyon (HDS) reaktörüne geri döndürülür. Bu reaktörde organik sülfür bileşikleri, nikel-molibden oksit veya kobalt-molibden oksit katalizörlüğünde, aşağıdaki reaksiyonla hidrojen sülfite dönüştürülür.



Bu reaksiyon 300-400°C gibi yüksek sıcaklıklarda ve fazlalık hidrojen varlığında tamamlanır. Hafif sülfür bileşikleri, daha karmaşık bileşiklere göre daha kolay reaksiyona girerler. Burada oluşan H<sub>2</sub>S ise çinko oksit yatakta emilir ve çinkosülfür oluşturur. (Larminie ve Dicks, 2000)

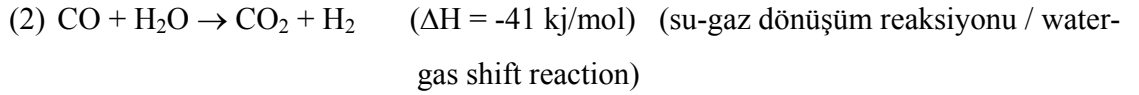
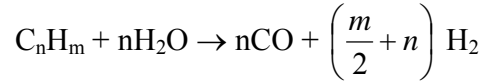
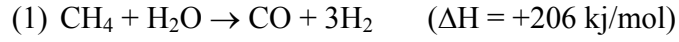


HDS, endüstride sıkça kullanıldığı için nisbeten kolay bulunabilen katalizörler ve absorberler vardır. Nikel veya kobalt katalizör, işletme koşulları ve besleme gazı bileşimine bağlı olarak seçilir.

HDS reaksiyonunda beslenmesi gereken hidrojen zengin gazın varlığı, bu reaksiyonun proton geçirgen membranlı ve fosforik asit yakıt pilleri için uygun fakat katı oksit ve erimiş karbonat yakıt pilleri için uygun olmayan bir yöntem olmasına yol açar. Bu sebeple katı oksit ve erimiş karbonat yakıt pillerinde genellikle sülfürü uzaklaştırmak için aktif karbon gibi absorberler kullanılır fakat büyük sistemlerde aktif karbonun belirli periyotlarda değiştirilme zorunluluğu ekonomikliğini azaltır.

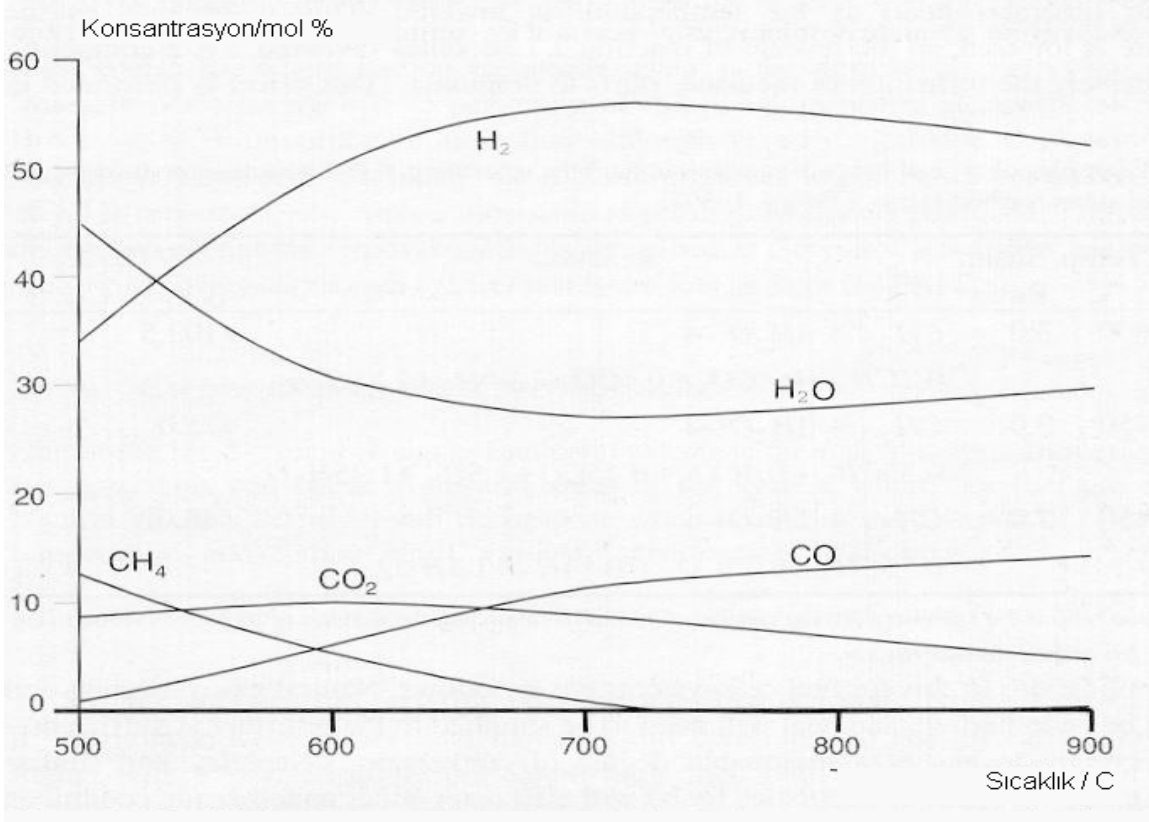
### 3.1.2 Buhar Metan Reformingi

Buhar metan reformingi, doğal gaz fiyatlarına bağlı olarak, halen kimya ve petrokimya endüstrisinde hidrojen üretimi için en çok kullanılan yöntemdir. Doğal gaz altyapısından faydalanılabilmesi en büyük avantajıdır ve özellikle merkezi üretim için uygundur. Buhar metan reforminginin en büyük dezavantajı ise CO<sub>2</sub> açığa çıkartması ve dolayısıyla ileride büyük miktarlarda üretim yapılması durumunda fazladan temizleme masrafı oluşturmasıdır. Oluşan CO<sub>2</sub>'in mümkün olduğunca ucuza tutulması ve depolanması için de birçok çalışma sürdürülmektedir. (McHugh, 2005)



Entalpinin pozitif olması, reaksiyonun endotermik olduğunu, negatif olması ise ekzotermik olduğunu gösterir. (1) reaksiyonunda gerekli olan ısı reaksiyona giren buhar tarafından sağlanır. Reforming reaksiyonu 500-900<sup>0</sup>C sıcaklıkta, nikel katalizör içeren bir reaktörde 30 atm. basınçta gerçekleştirilir. Su-gaz dönüşüm reaksiyonu ise daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşir ve ekzotermik bir reaksiyondur. Demir esaslı bir katalizör ile 350<sup>0</sup>C sıcaklıklarda gerçekleşirken bakır esaslı katalizör ile sıcaklık 205<sup>0</sup>C olmaktadır. (Simbeck ve Chang, 2002; IAEA, 1999)

(1) reaksiyonunun gerçekleştiği bir katalizörde (2) reaksiyonu da genelde gerçekleşir. Böylece ortamda bulunan gaz karışımında CO + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>, dönüşmemiş metan ve buhar bulunur. Bu gazların sıcaklığa bağlı konsantrasyonları Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1 Buhar reforminginde, sıcaklığa bağlı olarak, reaktanların denge konsantrasyonları (Larminie ve Dicks, 2000)

İlk reaksiyonda her bir metan molekülüne karşı 1 molekül karbonmonoksit ve 3 molekül hidrojen üretilmesi, Le Chatelier prensibine göre basıncın düşük tutulmasıyla dengenin sağa (ürünler tarafına) kayacağını gösterir. Basıncın artırılması metan oluşumuna sebep olur. Su-gaz dönüşüm reaksiyonu ise basınçtan çok etkilenmez.

İlk reaksiyonunda dikkat edilecek bir başka nokta reaksiyonun endotermik oluşu ve bundan dolayı yüksek sıcaklıkların (700 °C) hidrojen oluşumunu arttırdığıdır. Fakat bu yüksek sıcaklıklar ikinci reaksiyonun denge noktasının sol tarafta olmasına sebep olduğu için CO'nin tamamı hiçbir zaman CO<sub>2</sub>'e dönüşmez. Yakıt bileşiminde ancak çok çok düşük CO'ye izin verilen yakıt pilleri için ayrıca başka CO ayırma sistemleri de kullanılmak zorundadır.

Bu reaksiyonda metan haricinde, alkoller de yakıt olarak kullanılabilirler. Metanol gibi alkoller de buhar reformingi reaksiyonuna girebilirler.

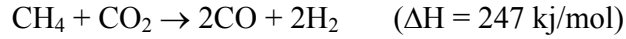


Metanolün buhar reformingi için düşük ısı ihtiyacı duyması, araçlarda kullanımı için tercih sebebi olabilir. 250<sup>0</sup>C sıcaklıklarda az bir ısı ile bakır destekli çinko oksit katalizörde reaksiyon gerçekleşir.

Buradaki en önemli avantaj ise CO'in oluşmamasıdır. Bu avantaj, özellikle CO'in platin katalizöre (farklı elementlerden katalizör üretilmesi için çalışmalar sürdürülmekte) çok fazla zehir etkisi yaptığı PEM yakıt pili için önemlidir fakat üretilen H<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> su-gaz reaksiyonunun çift yönlü olmasından dolayı bir miktar CO oluşmasına sebep olur. Oluşan CO, daha sonra anlatılacak yöntemlerden biriyle ayrıştırılmalıdır ve böylece hazırlanmış yakıt gerekli miktarda saflaştırılabilir.

### 3.1.3 CO<sub>2</sub> Reformingi (Kuru Reforming)

Hidrojen zengin bir gazın bulunmadığı ve özellikle MCFC gibi sistemlerde egzost gazı olarak CO<sub>2</sub> ve suyun atıldığı sistemlerde bu egzost gazı yakıt pili girişine geri beslenir. Bu tür yakıt pillerinde iç dönüşüm olur. Bu metotta birazdan anlatılacak karbon oluşum sorunu olsa bile çalışmalar oldukça umut vericidir ve gelecekte yaygın bir metot olma ihtimali vardır



### 3.1.4 Karbon Oluşumu ve Önlenmesi

Yakıt pili sistemlerinde en büyük risklerden biri yakıt gazından karbon oluşumdur. Bu, yakıt pilinin sıcak yakıtın bulunduğu bölgelerinde olabilir. Örneğin doğal gazdan, yani metandan, hava veya buharın ortamda olmadığı ve 650 <sup>0</sup>C sıcaklıkta piroliz reaksiyonuyla karbon oluşur. (Larminie ve Dicks, 2000)



Petrol ürünleri ise doğal gazdan da çok karbon oluşturmaya yatkınlardır. Ayrıca CO'in Boudouard reaksiyonuyla C'a ayrılması da tehlikelidir.



Boudouard reaksiyonu nikel gibi metallerle katalizlenir. Dolayısıyla buhar reforminginde katalizör olarak kullanılan nikel ve nikel içeren paslanmaz çelik reaktörler, bu reaksiyonu

hızlandırırlar. Fakat bu tehlikeli karbon oluşumu sorununun yakıt akımına buhar eklemek gibi basit bir çözümü de vardır. Böylece su-gaz dönüşüm reaksiyonu oluşması sağlanırken CO'in kısmi basıncı azaltılır. Uygulamalar buhar/karbon oranı 2 ile 3 arası tutulursa güvenli bir bölgede çalışılmış olunduğunu gösteriyor.

Metal tozlanması (metal dusting) olarak bilinen bir fenomene sebep olan bir tür karbon oluşumu, metal yüzeylerde oluşan ve karbürizasyon olarak da bilinen bir olaydır. Bazı üreticiler önlem olarak bakır kaplı paslanmaz çelik yakıt gazı ön ısıtıcıları üretmişlerdir.

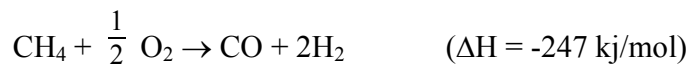
Karbon oluşumuyla ilgili yapılan araştırmalarda elektron mikroskobu ile tespit edilen en tehlikeli oluşum şekli, karbonun nikel kristallerine (katalizörlerde) birleşik olarak üremesidir. Bu tip oluşumlarda gerekli olan buhar reformere saniyeler mertebesinde bile beslenemez ise, çok hızlı bir karbon oluşumu gerçekleşir ve katalizörün işlememesine ve yakıt pilinin durmasına sebep olur. Bu yüzden yakıt pili sistemlerinin kontrolü çok önemlidir. Bir önlem olarak ticari buhar reforming katalizörleri potasyum ve molibdenyum gibi elementler içerir ve böylece karbon oluşum riski azaltılır.

### 3.1.5 İç Reforming

Yakıt pillerinde, reforming reaksiyonları haricindeki reaksiyonlar ekzotermiktir ve yakıt pilinden ısı atılır. Atık ısı, reforming reaksiyonunda kullanılırsa hem ayrı bir ısıtıcı kaynağa gerek kalmaz, hem de yakıt pilinin soğutulmasında kullanılan sistemler daha küçük yapılabilir. Böylece verim yükselirken elektrik harcaması azalır ve maliyet düşer. Üreticiler iki tip iç reforming sistemi üretmiştir; direkt ve endirekt iç reforming sistemleri.

### 3.1.6 Metan Kısmi Oksidasyonu (Yanma) ve Ototermal Reforming

Buhar reformingine bir alternatif olarak ortaya çıkan yöntemlerden biri kısmi oksidasyon ile hidrojen üretimidir.



Bu yöntemde, diesel yakıt gibi ağır yakıtlar da kullanılabilir. Ayrıca, her ne kadar daha sonradan ayrıştırılmaları gerekse bile, sülfür bileşenlerinin ayrıştırılması gerekmez. Kısmi oksidasyon, buhar kullanmayan ve 1200-1500 °C'lerde gerçekleşen bir reaksiyondur. Buhar kullanılmaması,

sistemin daha basit olmasını ve daha küçük uygulamalara (mikro-kojenerasyon gibi) uygun olmasına olanak tanımaktadır. Fakat her 1 mol metan için 2 mol hidrojen üretimi, buhar reformingine göre bir dezavantajdır. Ayrıca yakıt pilinde üretilen ısı, burada kullanılamaz ve toplam verimin daha düşük olmasına da bu iki olay sebep olmaktadır.

Ototermal reforming ise buhar reformingi ile kısmi oksidasyonu birleştiren bir yöntemdir. Buhar ve hava yakıt ile birlikte katalitik bir reaktöre beslenir. Buhar reformingine göre daha az buhara ihtiyaç duyulurken gereken ısının tamamı kısmi oksidasyon ile sağlanır. Böylece özellikle mobil uygulamalar için uygun, basit bir sistem ortaya çıkar.

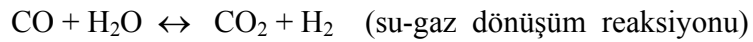
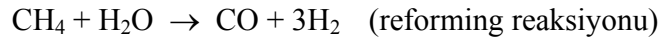
### 3.1.7 Isıl Bozunma (Thermal K cracking-Pyrolysis)

Çok saf hidrojen gazı üretmenin bir yolu ise ısıl bozunma (thermal k cracking- pyrolysis) ile basit hidrokarbonlardan ısı etkisiyle katı karbon ve hidrojen eldesidir. Bu metod gelecek için ümit verici olsa bile çözülmesi gereken ciddi sorunları vardır. Reaktörde biriken karbon, yakıtın kesilip reaktöre hava gönderilmesiyle yakılır. Isıl bozunma reaksiyonunun kontrolü çok dikkatli yapılmalı, yoksa çok fazla miktarda karbon birikerek katalizörde geri dönüşü olmayan hasarlara yol açabilir.

### 3.1.8 Karbonmonoksitin (CO) Ayrıştırılması

Buhar reformerinden çıkan gazı yakıt piline besleyebilmemiz için içindeki CO miktarını çok çok düşük seviyelere çekmemiz gerekmektedir.

Reforming reaksiyonunu ve su-gaz dönüşüm reaksiyonunu tekrar hatırlarsak;



İkinci reaksiyon olan su-gaz dönüşüm reaksiyonunda sıcaklığın artmasıyla CO oluşumu artar, yani denge sola doğru kayar. Bu sebepten dolayı ilk yaklaşım, buhar reformerinden alınan gazı soğutmak ve katalizör içeren bir reaktörde su-gaz dönüşüm reaksiyonunun olmasını sağlamaktır. Böylece CO, CO<sub>2</sub>'e dönüşür. Konsantrasyonlara bağlı olarak birden çok dönüşüm reaktörü gerekebilir. Eğer böyle bir durum söz konusu ise 400-500<sup>0</sup>C gibi yüksek sıcaklık dönüşüm reaktöründe, demir-krom katalizörlüğünde ilk dönüşümün ardından 200-250 <sup>0</sup>C sıcaklıkta bakır

katalizörlüğünde düşük sıcaklık dönüşüm reaktöründe dönüşüm tamamlanır. Artık %0,25-0,5 (250-5000 ppm) arasına düşürülmüş CO, PAFC için uygun görünmekte fakat PEM yakıt pili için hala maksimum sınırdan 100 kat kadar yüksektir. (Larminie ve Dicks, 2000)

PEM yakıt pili için daha fazla CO ayrıştırma genellikle 3 yoldan biriyle yapılır;

- Seçici oksidasyon reaktöründe CO ayrıştırma metodunda, yakıt akımına yaklaşık %2 oranında hava beslenir ve bir metal katalizör üzerinden geçirilir. Katalizör, CO'ü üzerinde tutar ve CO hava ile burada reaksiyona girer. Bu metot çok dikkatlice kontrol altında tutulmalıdır çünkü bir patlama için gereken her şey, hava (oksijen), hidrojen, sıcaklık ve metal katalizör aynı ortamda bulunmaktadır. Pahalı bir metot olan bu yöntem, özellikle PEM yakıt pili sistemleri gibi araçlarda kullanılması planlanan değişken debili sistemler için uygun değildir.

- Metanlaştırma prosesiyle CO ayrıştırmada ise patlayıcı bir gaz oluşmaz. Daha önceden gerçekleştirilen reforming reaksiyonunu, bu kez tersten uygulanır.



Bu reaksiyonda kullanılan H<sub>2</sub>, elbette yakıtta oluşan bir kayıp demektir fakat bu oran çok çok küçük olduğu için sistemde ciddi bir yakıt kaybı sorunu yaratmaz, verimsizliğe yol açmaz. Oluşan metanın zehirleyici bir etkisi yoktur. Katalizörlerle gerçekleştirilen bu reaksiyon ile 200 °C sıcaklıkta CO seviyesi 10 ppm'in altına düşürülebilir. (Larminie ve Dicks, 2000)

- Palladyum / platin membranlarla hidrojen saflaştırma, uzun zamandır uygulanan bir yöntemdir fakat çok pahalı olmasından dolayı kullanımında sorunlar vardır.

### 3.1.9 Araçlarda Uygulamalar

Genel olarak yakıt pillerinin araçlarda kullanım amaçları iki şekilde olmaktadır. Bunlardan birincisi, aracın hareketi için elektrik sağlayan ve elektrik motorunu/motorlarını tahrik eden yakıt pilleridir. Bu tip görevler için genellikle PEM tipi yakıt pilleri tercih edilmektedir (sebepleri yakıt pillerinin karşılaştırıldığı bölümde anlatılacak). İkincisi ise aracın hareketinin dışında kalan, ısıtma,soğutma, havalandırma, aydınlatma, camların hareketi, ses sistemleri, görüntü sistemleri vs. gibi elektriğe ihtiyaç duyan cihazların çalışmasını sağlamak üzere elektrik üreten yakıt pillerdir.

Araçlarda kullanılacak bu yakıt pillerinin ihtiyaç duydukları hidrojen zengin yakıtı sağlayacak yakıt hazırlama sistemi, sabit uygulamalardan farklı olarak;

- az yer kaplayan
- hafif
- hızlı devreye girebilen
- ihtiyaca ve ihtiyaçtaki değişimlere hızlı cevap veren
- kirletici emisyon yaymayan

sistemler olmaları önemlidir.

Saf hidrojenin kullanılmadığı araç uygulamalarında özellikle buhar reforming, katalitik kısmi oksidasyon ve ototermal reforming yöntemleriyle gerekli yakıt, aracın içinde üretilmektedir.

Metanolü ve benzini, yakıt pilinde kullanılacak yakıtı dönüştüren sistemler, bu alanda üzerinde en çok çalışılan konular olmaktadır ve kısa-orta vadede kullanılmaları planlanmaktadır. Özellikle mevcut yakıt ikmal sistemlerinin, tesislerinin ve yakıt depolarının kullanılabilmesi bunda en büyük itici güç olmaktadır. (Larminie ve Dicks, 2000)

Metanol reforming ve benzin reforming için birçok firmanın gerçekleştirdiği projeler mevcut olup bunlardan ilk ve en önemlilerinden olan DaimlerChrysler'ın ürünüdür. DaimlerChrysler dünyanın ilk metanol yakıtlı yakıt pilli aracını 1997 yılında dünyaya tanıtmıştır. Projede NeCar3 yakıt pilli deney aracı için geliştirilmiş bir metanol işlemcisi kullanmış ve Ballard marka, 50kW gücünde yakıt piline uygun yakıt üretmiştir. Daha sonra firma araçlarda hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında geçiş dönemi olacağı öngörüsü ile metanol işlemcisini geliştirmeye devam etmiş ancak çalışmalar gizli olduğu için fazla bilgi açıklanmamaktadır.

NeCar3 aracında kullanılan metanol işlemcisinin bazı özellikleri;

Max güç : 50kW<sub>e</sub>

Güç yoğunluğu : 1.1 kW<sub>e</sub>/lt ( reformer=20lt, yakıcı=5lt, seçici oksitleyici=20lt)

: 0.44kW<sub>e</sub>/kg ( reformer=34kg, yakıcı=20kg, seçici oksitleyici=40kg)

Metanol dönüşüm oranı : %98-100

Çizelge 3.2: Hidrojen Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Çizelgesi (McHugh, 2005)

Yöntem	Enerji Verimi	Tahmini H <sub>2</sub> Satış Fiyatı	Boyut/Güncel Durum	Avantajları	Dezavantajları
Buhar Metan Reforming	%83	\$0.75/ kg	-Büyük ölçek -Uygulamaya hazır	Kanıtlanmış,Eko nomik,Merkezi uygulamaya ideal,mevcut doğalgaz boru hatları kullanılabilir	CO <sub>2</sub> ürettiyor, doğalgazın tükenme ihtimali ve fiyat belirsizliği
Metan Kısmi Oksidasyonu	%70-80	\$0.98-1.39/kg	-Büyük ölçek -Diğer hidrokarbonlar için de uygulanabilir, katalizör araştırmaları sürüyor	Kanıtlanmış,Eko nomik, yerel üretim için de uygun olabilir, mevcut doğalgaz boru hatları kullanılabilir	CO <sub>2</sub> ürettiyor, doğalgazın tükenme ihtimali ve fiyat belirsizliği, reformingden daha düşük verim, katalizör araştırmaları hala sürüyor
Metan Ototermal Reforming	%71-74	\$1.93 / kg	-Büyük ölçek -Uygulamaya hazır	Kanıtlanmış, reforminge göre düşük reaktör fiyatı ve basit reaktör tasarımı,mevcut doğalgaz boru hatları kullanılabilir	CO <sub>2</sub> ürettiyor, doğalgazın tükenme ihtimali ve fiyat belirsizliği, reformingden daha düşük verim
Kömür	%63	\$0.92 / kg	-Büyük ölçek	Kanıtlanmış,Eko	CO <sub>2</sub> ürettiyor,

Yöntem	Enerji Verimi	Tahmini H <sub>2</sub> Satış Fiyatı	Boyut/Güncel Durum	Avantajları	Dezavantajları
Gazlaştırma			-Uygulamaya hazır	nomik, Merkezi uygulamaya ideal, kömürün dünyada doğalgaz ve petrolden daha dengeli coğrafik dağılımı var	kömürün tükenme ihtimali ve fiyat belirsizliği, doğalgazdan daha az H <sub>2</sub> bulunduruyor
Doğrudan Biyokütle Gazifikasyonu	%40-50	\$1.21 – 2.42 / kg	-Orta ölçek -Uygulamaya hazır	Yenilenebilir ve fosil yakıtlara bağımlı olmadığı için çıkan CO <sub>2</sub> doğal döngü içinde	Biyokütle kaynağına bağlı olarak fiyat ve üretim miktarı çok değişiyor, biyokütle miktarı ile sınırlı, biyokütlenin taşınma zorluğu
Biyokütle Piroliz	%56	\$1.26-2.19 / kg	-Orta ölçek -Uygulamaya hazır	Yenilenebilir ve fosil yakıtlara bağımlı olmadığı için çıkan CO <sub>2</sub> doğal döngü içinde, sıvı biyoyağ biyokütleden daha kolay taşınabiliyor	Biyokütle kaynağına bağlı olarak fiyat ve üretim miktarı çok değişiyor, biyokütle miktarı ile sınırlı

Yöntem	Enerji Verimi	Tahmini H <sub>2</sub> Satış Fiyatı	Boyut/Güncel Durum	Avantajları	Dezavantajları
Elektroliz	25%  45-55% nükleer ısıyla (elektriğin üretim verimi de dahil)	\$ 2.56–2.97 /kg  (Elektrik 4 cent / kWh) Diğer enerji kaynaklarıyla; Nükleer ısı: \$ 1.95 /kg Güneş: \$3.5-5.66/kg Rüzgar: \$ 2.83/ kg	-Küçük ölçek -Uygulamaya hazır	Kanıtlanmış, yenilenebilir enerji kaynakları kullanıldığında emisyon üretmiyor, küçük ölçekli üretime çok uygun	Düşük verim, kullanılan enerji klaynağı kadar temiz, elektrik fiyatlarına çok bağımlı, henüz büyük miktarlarda üretim için yeterli değil
Fotokatalitik Su Parçalama	%10-14 (teorik %24)	hedeflenen fiyat \$ 4.98 / kg	-Halen araştırmalar sürüyor	Yenilenebilir kaynakları kullanıyor ve fosil yakıtlara bağımlı değil, emisyon üretmiyor	Zor ve pahalı katalizör sentezi, düşük verim ve düşük üretim miktarı

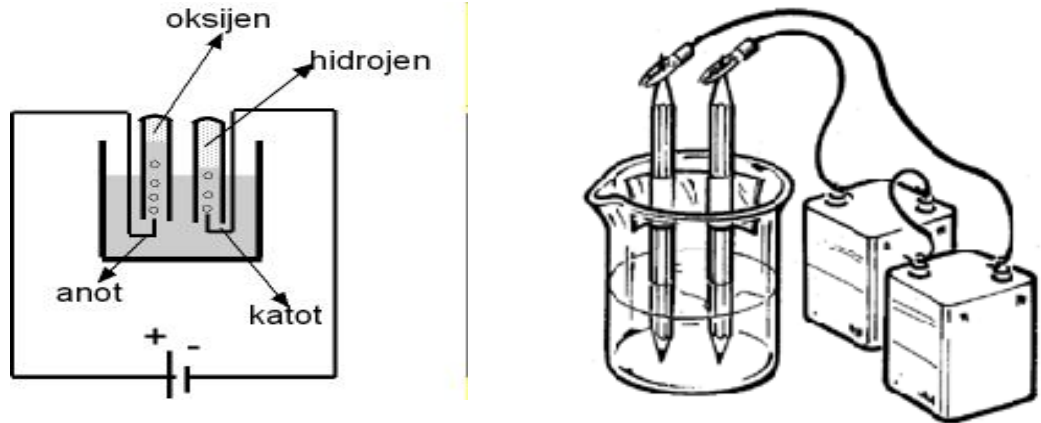
Çizelge 3.2’den de anlaşılacağı gibi hidrojenin bir enerji taşıyıcısı olarak dünyada yaygın olarak kullanılması için ilk önce doğalgazın reformingi ve kömür gazlaştırmasının kullanılması, daha sonrasında ise özellikle yenilenebilir kaynaklı (güneş ve rüzgar başta olmak üzere) elektrolizin kullanılması ile hidrojen üretilebilir. Böylece tamamen temiz ve tükenmez kaynaklar olan güneş-rüzgar enerjileri ve su ham maddesi sayesinde insanlık için her yerde ve her zaman kullanılabilir enerji sağlanmış olacaktır. Yapılan bazı başka çalışmalarda yenilenebilir kaynakların kullanılmasıyla üretilecek hidrojen ile, fosil yakıtlardan elde edilen hidrojen arasındaki maliyet farkının sanıldığından daha az olduğu görülmektedir. (Çizelge3.3)

Çizelge 3.3 Hidrokarbon kökenli hidrojen maliyetlerinin yenilenebilir enerjiyle sudan elektroliz kaynaklı hidrojen maliyetleriyle karşılaştırılması (Baykara, 2002)

Üretim Teknolojisi	Maliyet Oranı	Üretim Kapasitesi
Suyun elektrolizi	1.0	500 (Nm <sup>3</sup> /saat)
Metanolün reformingi	0.83	500 (Nm <sup>3</sup> /saat)
Metan buhar reformingi	1.17	500 (Nm <sup>3</sup> /saat)
Hidrokarbonların kısmi oksidasyonu	0.58	500 (Nm <sup>3</sup> /saat)

### 3.2 Suyun Elektrolizi

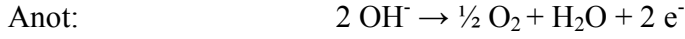
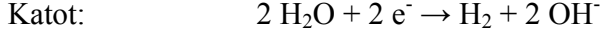
Elektroliz işlemi, genel olarak elektrik akımı sayesinde suyun bileşenleri olan hidrojene ve oksijene ayrıştırılmasıdır. Bunun için kullanılan elektrolizörlerde genellikle suyun içine bir asit damlatılır ve iletkenliği çok düşük olan saf suyun iletkenliği artırılır (her elektroliz yönteminde yapılmaz).



Şekil 3.2 Elektroliz olayı

Günümüzde kullanılan elektrolizörlerin birkaç bin m<sup>3</sup>/h kapasiteye kadar alkalin (KOH) elektrolitli elektrolizörlerdir (Şekil 3.2). Bu elektrolizörlerde inert iki kutba elektrik akımı uygulanır ve hidrojen katotta oluşurken oksijen de anotta oluşur. Suyun parçalanması için teorik olarak iki kutup arasında 1.23 volt (V) potansiyel farkı uygulanması yeterlidir fakat pratikte daha yüksek potansiyel farkı uygulamak suretiyle reaksiyonlar hızlandırılır. Uygun katalizör kullanımı

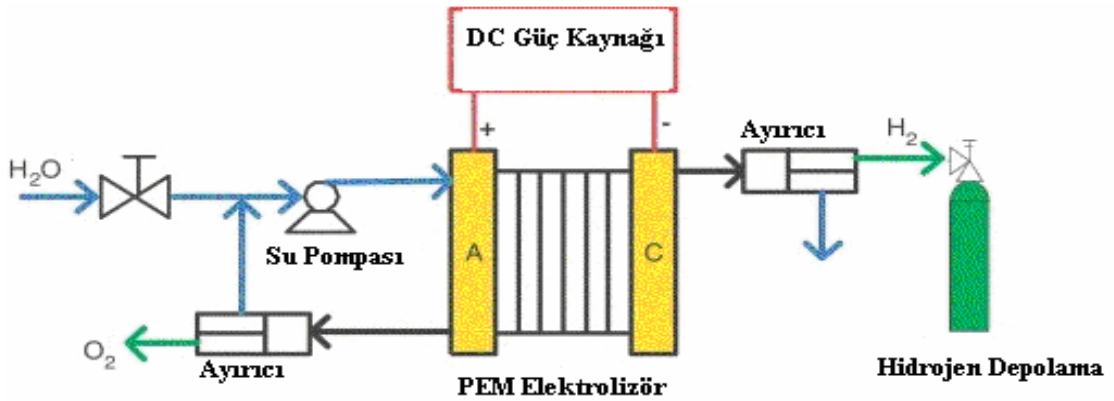
ve elektrot reaksiyon yüzey alanının artırılması reaksiyonların gerçekleşmesini kolaylaştırır ve uygulanan potansiyel farkının düşük tutulabilmesine olanak sağlar. Ayrıca sıcaklığın ve basıncın artırılması da her ne kadar daha yüksek kalitede malzeme kullanmayı gerektirseler (yüksek basınca ve korozyona dayanıklı) bile verimi artırır.



Bir başka elektrolizör tipi ise PEM tipi elektrolizörlerdir. PEM tipi elektrolizörler, alkalın elektrolitli elektrolizörlere göre çok basit ve kompaktlardır. PEM elektrolizörler yüksek akım yoğunluğunda yüksek verim ve saflıkta hidrojen gazı üretebilirler. PEM tipi elektrolizörlerde hidrojen ve oksijen gazları aynen PEM tipi yakıt pillerinde olduğu gibi bir membran aracılığıyla birbirlerinden ayrılırlar. Sıvı elektrolitli olan alkalın elektrolitli elektrolizörler gibi kompleks değildirler.  $\text{H}^+$  iyonları, protonlar, membrandan geçerek katotta tekrar elektronlarıyla birleşir ve hidrojen gazı oluşur. Alkalın elektrolitli elektrolizörlerden farklı yarı reaksiyonları olmasına rağmen toplam reaksiyon aynıdır.



PEM elektrolizör, elbette sadece yığından oluşmaz, DC güç sağlayıcı, su pompası ve su-gaz ayırıcıları da bulunmalıdır.



Şekil 3.3 PEM tipi elektrolizör sistemi (Görgün, 2006)

PEM elektrolizörler PEM yakıt pillerinden polimer membran, akım toplayıcılar, bipolar plaka, platin katalizör ve katalizörün sentezi ve uygulaması bakımından farklılık göstermez. Bu özelliklerinden dolayı PEM yakıt pillerinin günlük hayatımızda kullanıma başlanmasıyla seri üretim şansı bulacak ve halen yüksek olan fiyatları düşecektir. Ayrıca suyun elektrolizinde maliyetin çok büyük bir bölümü kullanılan elektriğin maliyeti olduğu için PEM elektrolizörlerin elektrik sarfiyatını düşürmesi, ilk yatırım ve diğer işletme giderlerinin yüksekliğini telafi edebilir. Yapılan bazı çalışmalara göre PEM elektrolizörler ile hidrojen üretme, alkalın elektrolizörlerde üretmekten toplam maliyetler açısından daha ucuz olabilmektedir.

Endüstriyel elektrolizörler özellikle 5 ana firma tarafından ticari olarak satılmakta. Bu firmalardan Stuart, Teledyne, Avalance ve Norsk Hydro alkalın elektrolitli elektrolizörleri pazarlarken Proton firması PEM tipi elektrolizörlerini pazarlamakta (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4 Farklı ticari elektrolizör firmalarının elektrolizör verimleri ve kapasiteleri (McHugh, 2005)

<b>Firma</b>	<b>Elektrolizör verimi (%)<sup>1</sup></b>	<b>Toplam verim (%)<sup>2</sup></b>	<b>Kapasite (kg/saat H<sub>2</sub>)</b>
Stuart: IMET 1000	73	24	5.4
Teledyne: EC 750	63	21	3.8
Proton: HOGEN 380	56	18	0.9
Norsk Hydro: Atmospheric Type No.5040	73	24	434
Avalance: Hydrofiller 175	64	21	0.45

1. Üst ısıl değere göre hesaplanmıştır.

2. Elektrik üretiminin verimi %33 olarak alınmıştır. Elektrik üretimi verimi ve elektrolizör verimi birlikte değerlendirilmiştir.

Elektroliz işleminin çok esnek oluşu, onu özellikle sürdürülebilir ve temiz kaynaklar ile elektriğin sağlanabileceği durumlarda hidrojen üretimi için ideal konuma getirmektedir. Fosil yakıtlar ve nükleer enerji ile elektrik üretimi ortalama %33 verim ile gerçekleşmektedir. Elektroliz işlemi

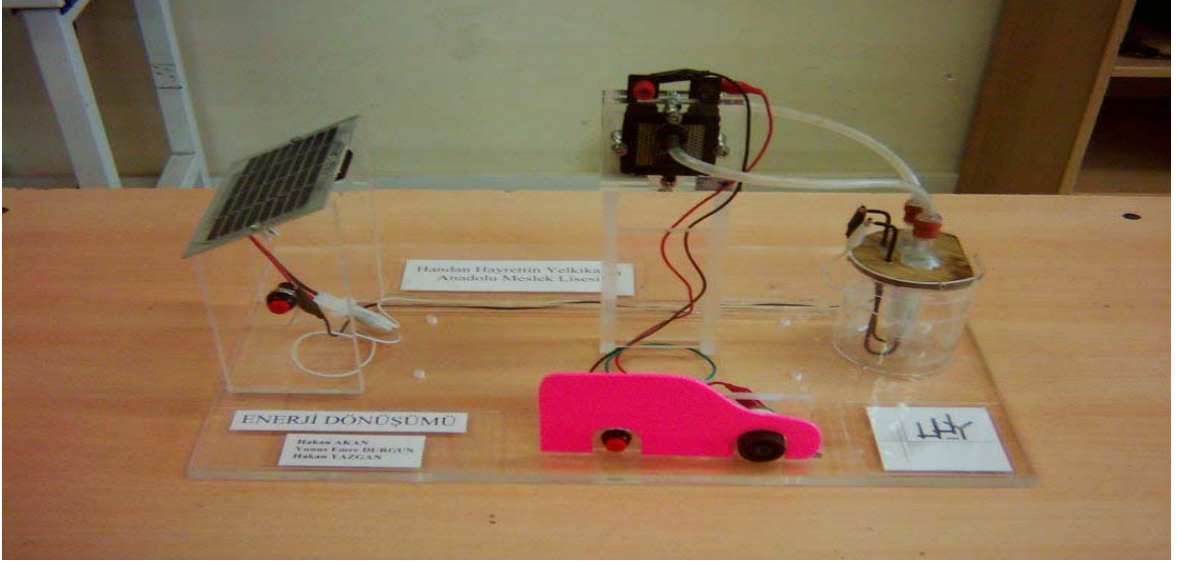
teorik olarak her ne kadar %100 verim ile gerçekleşebilse dahi kullanılan yüksek potansiyel farkı ve diğer yan ekipmanlar sebebiyle elektrolizörlerin toplam verimleri daha düşük olmaktadır. Görüldüğü gibi elektrik enerjisi ile elektroliz yöntemiyle hidrojen üretmenin toplam verimi bugün ancak %25 olabilmekte fakat bunun sebebi kullanılan elektriğin düşük üretim veriminden kaynaklanmaktadır. İleride rüzgar ve güneş enerjisi santralleri, elektrolizörler ile eş olarak çalıştırıldığında tamamen temiz, sürdürülebilir ve rekabet edebilir hidrojen üretimi sağlanabilir.

### **3.2.1 Uygulamalı PV - Elektroliz - Yakıt pili Projesi**

Fotovoltaik güneş enerji paneli - Alkalin elektrolitli tip elektrolizör - PEM tipi yakıt pili bütünleşik enerji üretim ve depolama sisteminin gelecekte yaygın olarak kullanıma en büyük aday olarak görmemizden dolayı Handan Hayrettin Yelkikanat Anadolu Meslek Lisesi öğrencileri ve UNIDO-ICHET olarak Tübitak'ın liseler arasında düzenlediği Proje Tabanlı Beceri Yarışmasına sunulacak bir deney seti tasarlanıp üretilmiştir. Projenin amacı öğrencilerin deney seti olarak da kullanabilecekleri bir sistemin kurulmasıdır. Bu deney seti sayesinde üniversite öncesinde öğrencilerin yenilenebilir enerjiler ve özellikler güneş – hidrojen enerjileri ile tanışmaları sağlanacak, öğrendikleri temel düzeydeki bilgilerini daha yaratıcı projeler ile ileriye taşıyabileceklerdir. Projede 80x80x48mm boyutlarında, 180g ağırlığında ve 300mW gücünde bir PEM tipi yakıt pili, % 14 verimli bir PV hücre, alkalin elektrolitli bir elektrolizör (KOH kullanılmıştır) ve bir oyuncak arabanın tekerine monteli bir DC elektrik motoru kullanılmıştır.

Öncelikle yeryüzüne gelen fotonların enerjilerinden yararlanılarak PV panelde elektrik üretilmektedir. Üretilen elektrik akımı ile alkali elektrolizörde sudan hidrojen ve oksijen üretilmektedir. Yakıt pilimizin saf oksijen ve hidrojen ile çalışmasından dolayı hem üretilen oksijen hem de hidrojen borularla yakıt pilinin anot ve katot kutuplarına beslenmektedir. Yakıt pilinde gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda, bu reaksiyonlar ileride açıklanacaktır, elektrik üretilmekte ve oyuncak araba modelinin ön tekerleğinin içine yerleştirdiğimiz elektrik motoru, eklenen bir açma kapama düğmesi aracılığıyla çalıştırılmaktadır.

Proje, yarışma sonunda kendi kategorisindeki 80 proje içinde 3.ncü olmuştur. Burada tasarlanan sistemin bir benzerinin, bir oyuncak uzaktan kumandalı deniz aracının ana veya yardımcı güç ünitesi olarak çalıştırılması projesi gerçekleştirilecektir. Ayrıca tüm sistemin istenen şartlarda çalışmasını sağlayacak bir kontrol devresinin de tasarlanıp üretilmesi ve sisteme entegre edilmesini planlanmaktadır.



Şekil 3.4 Uygulamalı PV - Elektroliz - Yakıt pili Projesi-1



Şekil 3.5 Uygulamalı PV - Elektroliz - Yakıt pili Projesi-2

## 4. HİDROJEN DEPOLAMA YÖNTEMLERİ

Hidrojen, sanayi kuruluşlarında, üniversitelerde ve araştırma kurumlarında bir kimyasal gaz olarak yaygın kullanıma sahiptir ve genellikle çelik depolarda, yüksek basınç altında depolanmaktadır. Ancak hidrojenin bir yakıt olarak ulaşım araçlarında kullanılması durumu, konuya bir çok farklılıklar getirmektedir. Esasen bu farklılıklar, işin doğası gereği, farklı ulaşım modlarının kendi aralarında bile bulunmaktadır. Örneğin deniz ulaşımında karşılaşılabilecek sorunlar ve ideal depolama teknik ve teknolojilerinden beklentiler, hava ulaşımında veya kara ulaşımında olduğundan çok farklı olmaktadır. Bu sebepten dolayı alınan tedbirler ve uygulanan standartlar da çok farklı olmak zorundadır. Bu tez kapsamında, özellikle kara araçlarında hidrojen yakıtının ve yakıt pillerinin kullanılması incelenecektir. Dolayısı ile hidrojen depolama ile ilgili anlatılacak bilgiler de özellikle kara ulaşımı dikkate alınarak yazılmıştır.

### 4.1 Sıkıştırılmış Gaz Olarak H<sub>2</sub> Depolama

Endüstride ve laboratuvar ortamlarında kullanılan hidrojenin en genel depolama yöntemi sıkıştırılmış gaz olarak, alaşımli çelik depolarda, 20000 kPa basınçta depolamadır. Fakat hidrojen bir enerji kaynağı olarak düşünüldüğünde özel olarak üretilmiş 6 mm alüminyum iç tabakalı kompozit tanklar üretilmiştir. Kullanılan en yüksek basınç 30000 kPa olmasına rağmen bu tankların delinme basıncı 120000 kPa'dır. Bu sistemler büyüdükçe depolama verimi (kg malzeme başına depolanan hidrojen miktarı) artacak gibi düşünülse de Zieger tarafından bir otobüse takılan 13 adet tankın getirdiği ek ağırlık yaklaşık 2600 kg olmuş, yani tank başına 200 kg gibi bir ağırlık gerekmiştir ( $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  tanklar). Bunun sebebi hidrojenin düşük yoğunluğudur ve bu sistemin ağırlıkça sadece %2'si hidrojendir.

Bu tip basınçlı tankların malzemeleri hidrojenin nüfuz edemeyeceği malzemeler olmalıdır aksi takdirde özellikle karbonlu çeliklerde olduğu gibi (C ile H<sub>2</sub> reaksiyona girer ve CH<sub>4</sub> kabarcıkları malzemenin içinde oluşur ve basınçla birlikte çatlamalara sebep olur) deponun fiziksel dayanımı düşebilir. Tankalarda, Cr-Mo alaşımları veya kompozit destekli plastik malzemeler kullanılabilir.

Basınçlı tankların güvenliklerinin sağlanması da dikkatlice yapılmalıdır. Olacak bir yakıt kaçağının sonucu, büyük hasarlar oluşabilir. Fakat standartları ve prosedürleri uygulayarak bu sorunlar çözülebilmektedir. Örneğin araçlarda basınç düşürme regülatörü , patlama diskleri ve alev kapanları kullanılmaktadır.

Basınçlı hidrojen gazı depolamanın 3 önemli avantajı vardır:

- Basitlik
- Kısa sürede dolum
- Hidrojenin saf olabilmesi.



Şekil 4.1: Yüksek basınç altında, çelik tüplerde hidrojen depolanması



Şekil 4.2 Yüksek basınç altında depolanan hidrojenin, depo çıkışında basıncının düşürülmesi için kullanılan basınç regülatörü

#### 4.2 Sıvı Hidrojen Depolama

Büyük miktarlarda hidrojen depolamada kullanılan en yaygın metot sıvılaştırarak depolamaktır. Bu yöntemde hidrojen gazı 22K sıcaklığa kadar soğutulur ve büyük tanklarda depolanır. Önemli olan hidrojenin hava ile temas etmemesidir ve bu yüzden öncelikle nitrojen ile tankın havası süpürülür ve sonra hidrojen basılır. Genellikle 3 bar gibi düşük basınçlarda tutulan tank, güvenlik için yaylı emniyet vanası ve patlama diski ile teçhiz edilir. Tankın içindeki sıvı hidrojen yavaşça buharlaşır ve eğer ihtiyaçtan fazlası buharlaşmış ise dışarı atılır.

Bu metodun en zahmetli tarafı hidrojenin sıvılaştırılmasıdır. Hidrojen önce sıkıştırılır, 78K'e kadar soğutulur. Daha sonra bir türbine sokularak sıcaklığı daha da düşürülür. Ayrıca atomik seviyede de bazı değişiklikler yapılır.

Sıvılaştırılmış hidrojen ile çalışılırken hatırlanması gereken bir nokta da frozbite sebep olmasıdır,

yani vücudumuzun hidrojene temas eden yeri donabilir.

### **4.3 Hidrojenin Metal Hidritlerde Depolanması**

Metaller ile hidrojenin birleşerek metal hidrit oluşturması ve gerektiğinde hidrojenin ısıtılmak suretiyle ayrıştırılarak kullanılması esasına dayanan bir metottur. Bu yöntem sayesinde saf sıvı hidrojenden daha çok hidrojen birim hacimde depolanabilir. Bunun sebebi metal moleküllerinin, hidrojen moleküllerinden çok daha yakın olmaları ve aralarına hidrojen moleküllerini almalarıdır.

Bu sistemde ilk önce içinde reaksiyona girecek metali bulunduran tanka hidrojen verilmeye başlanır. Reaksiyonun egzotermik olmasından dolayı sıcaklığın yükselmemesi için bir miktar hava ile soğutma yapılabilir veya doğal soğutma yeterli olabilir. Reaksiyon bitince, yani metalin tamamı hidrojenle bileşik yapınca basınç artmaya başlar. Basıncın artması bize hidrojen beslemesinin kesilmesi gerektiğini gösterir. Daha sonra yakıt piline bağlanan tank, içindeki bileşiğin ısıtılmasıyla hidrojenini verir. Tank tamamen boşaldığında tüm işlemler tekrarlanır ve böylece yüzlerce kez doldurma-boşaltma yapabilen bir sistem elde edilmiş olur. Ayrıca bu metot, sağladığı güvenlik açısından başarılıdır. Düşük basınç ve sadece istendiği zaman hidrojen akışı vardır. Kaçak olduğunda tankın sıcaklığı düşmekte ve bu da hidrojenin reaksiyonunu yavaşlatarak serbest kalmasını zorlaştırmaktadır. En büyük dezavantajı tankın tekrar doldurulmasında çok zamana ihtiyaç olmasıdır (5 kg tank için 1 saat). Ayrıca kullanılacak  $H_2$  çok saf olmazsa metaller yabancı maddeler tarafından kullanılamaz hale gelebilirler. Fakat yakın gelecekte oldukça başarılı olabilecek bir sistem geliştirilebilir ve özellikle ağırlığın sorun olmadığı fakat alanın sorun olduğu, örneğin deniz araçları için, iyi bir çözüm olabilirler.

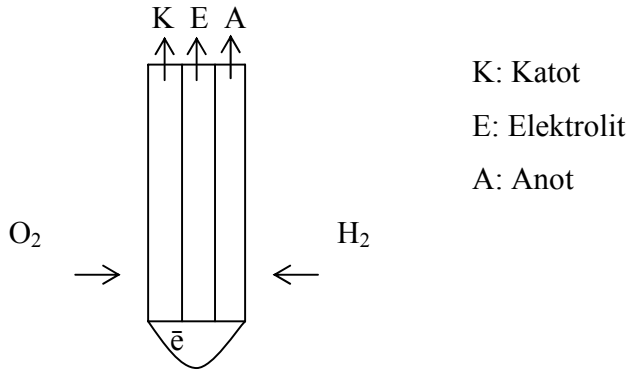
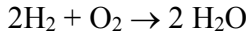
Depolama yöntemlerinde bu yöntemlere ek olarak alkali hidritler ve karbon nanofiberler de geliştirilmekte ve gelecekte çalışmaların artacağı düşünülmektedir ancak bu tezin kapsamına girmemektedirler.

## 5. YAKIT PİLLERİ ve FARKLI TİP YAKIT PİLLERİNİN İNCELENMESİ

### 5.1 Genel Bilgiler

#### 5.1.1 Çalışma prensipleri

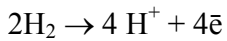
Çalışma prensibi gayet basit olan yakıt pilleri, ilk olarak 1839'da William Grove tarafından bulundu. Esasen hepimizin bildiği, suya elektrik akımı vererek yapılan elektrolizin tam tersidir. Yani H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> birleşirken aradaki elektron akışından faydalanırız. Bir başka bakış açısına göre ise, hidrojen oksijenle yakılmakta, fakat ısı enerjisi yerine elektrik enerjisi üretilmektedir.



Şekil 5.1 Yakıt pilinin şematik gösterimi.

Katot tarafına gelen O<sub>2</sub> ile anoda gelen H<sub>2</sub> arasında gerçekleşen bu reaksiyonda elektronlar bir harici devreden geçerken iyonlar elektrolitin içinden geçerler. Böylece oluşan elektron akımı sayesinde istediğimiz bir yerde kullanabileceğimiz bir elektrik akımı elde edilir.

Süreci iyi anlamak için her iki kutupta da gerçekleşen reaksiyonlar teker teker incelenebilir. Bir asit elektrolit yakıt pilinde anot kutbunda hidrojen gazı iyonize olur, elektronlar ve H<sup>+</sup> iyonları (proton) oluşturur.



Bu reaksiyon enerji açığa çıkarır. Katot kutbundaysa oksijenle bu elektronlar ve H<sup>+</sup> iyonları reaksiyona girer ve su oluşur.

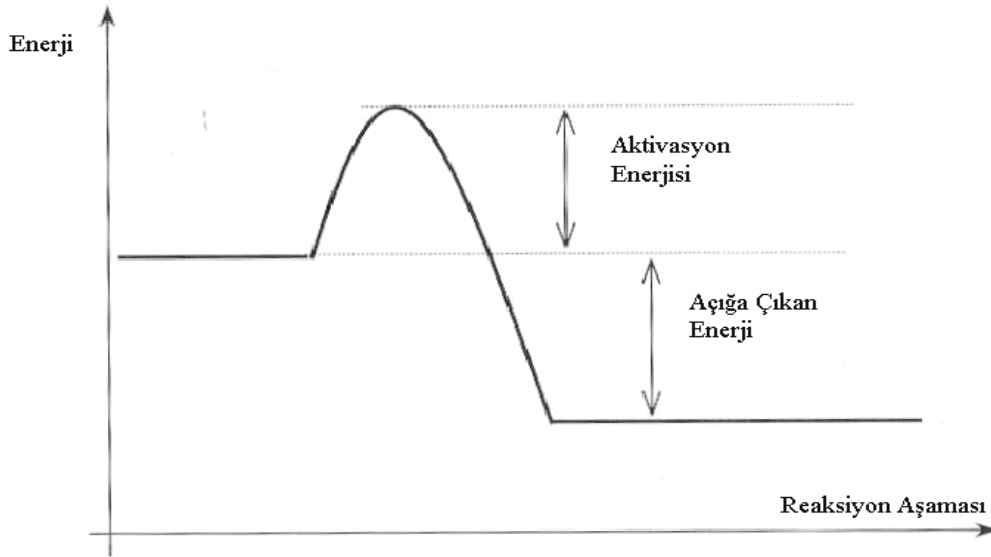


Her iki reaksiyonun da sürekliliği için anot kutbunda açığa çıkan elektronlar bir elektrik devresiyle katoda ulaşmalı ve  $\text{H}^+$  iyonları da elektrolitten geçebilmelidir. Asidin serbest  $\text{H}^+$  iyonları içeren bir sıvı olması bu amaca iyi bir şekilde hizmet etmesini sağlar. Bazı polimerler de hareketli  $\text{H}^+$  iyonları içerirler ve aynı amaçla kullanılabilirler. Bu tip malzemelere proton değişim zarları (proton exchange membrane) denir. Çünkü  $\text{H}^+$  iyonu da zaten bir protonudur.

Reaksiyonlardan da görebildiğimiz gibi her bir  $\text{O}_2$  molekülü için iki  $\text{H}_2$  molekülü kullanılmalıdır. Ayrıca elektrolit, sadece  $\text{H}^+$  iyonlarının geçişine izin verirken elektronların geçişine kesinlikle izin vermemelidir. Eğer elektronlar dış devreden değil de elektrolitten katoda geçerse, kullanılacak bir elektrik akımı elde edemeyiz. Bahsettiğim reaksiyonlar, farklı tip yakıt pilleri için bazı değişiklikler gösterirler ama genel prensip değişmez.

### 5.1.2 Elektrik üretimini sınırlayan sebepler

Bir yakıt pilinin anot kutbunda gerçekleşen reaksiyonun enerji açığa çıkarması, tamamen sınırsız hızda oluşacağını göstermez. Enerji açığa çıksa bile, aktivasyon enerjisinin sağlanabilmesi gereklidir. Şekilden de görülebileceği gibi, ancak bu aktivasyon enerjisi sağlandığında enerji tepe noktası aşılabılır.



Şekil 5.2 Ekzotermik kimyasal bir reaksiyonun enerji diyagramı (Larminie ve Dicks, 2000)

Düşük reaksiyon hızlarıyla baş etmenin 3 temel yolu vardır:

- katalizör kullanımı
- sıcaklığı yükseltmek
- elektrot alanını arttırmak ( reaksiyonun gerçekleşme yüzeyi arttırmak )

Özellikle üçüncü yol, yakıt pilleri için çok önemlidir çünkü tüm reaksiyonun gerçekleştiği yer elektrotların dış yüzeyidir. Hidrojen ve oksijen burada birleşirler, reaksiyonlar burada gerçekleşirler. Bu sebepten dolayıdır ki bir yakıt pilinin performansı da birim alandan yani  $\text{cm}^2$ 'den veya  $\text{mm}^2$ 'den alınan akım olarak hesaplanır. Fakat burada bahsedilen elektrot alanı 'uzunluk x genişlik' olarak bulunacak alan değildir. Bu alanın defalarca kez artırılması gereklidir. Bundan dolayı elektrotlar çok yüksek oranda gözenekli yapılarıdır. Böylece etkili alan, düz alana göre yüzlerce hatta binlerce kez artırılmış olur. Elektrot yüzeylerinin mikro yapıları, yakıt pili üretiminde büyük rol oynar. Ayrıca malzemeleri de katalizör içerir ve sıcaklıklara ve korozyon etkilerine dayanıklıdır.

### 5.1.3 Verim ve Potansiyel

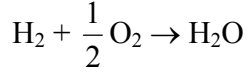
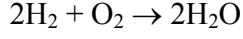
Elektrik üreten cihazların çoğunda, hangi tür enerjinin elektriğe dönüştüğü ve verim ifadesinin anlamı kolayca anlaşılabilir. Fakat yakıt pillerinde bu biraz zordur. Yakıt piline  $\text{O}_2$  ve  $\text{H}_2$  girerken,  $\text{H}_2\text{O}$ , ısı ve elektrik çıkar. Burada “ $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  ve  $\text{H}_2\text{O}$  nasıl bir enerji kaynağı olabilir?” sorusunun cevabı biraz karışıktır. Reaksiyona girenlerin ve çıkanların kimyasal enerjisinin bizim için önemli olduğunu söyleyebiliriz. Fakat kimyasal enerjinin tanımlanması da çok kolay olmayabilir. Bunun için Gibbs serbest enerji, entalpi, Helmholtz fonksiyonu ve kalorifik değer gibi terimleri kullanılır.

Yakıt pillerinde “Gibbs serbest enerjisi” çok önemlidir. Buna iş yapmaya uygun enerji olarak da bakılabilir. Yakıt pillerinde yapılan iş ise elektronların bir dış devreden kutuplar arasında aktarılmasıdır.

Kimyasal enerji, iki yönden bilinen mekanik potansiyel enerjiye benzer. Birincisi, sıfır enerji düzeyinin olması ve saf elementlerin de standart basınç ve sıcaklıkta sıfır enerjiye sahip olmalarıdır. İkincisi ise bizi sadece “Gibbs serbest enerji” değişiminin ilgilendirmesidir. Sadece ürünlerle reaktanlar arasındaki fark önemlidir.

$$\Delta G_f = G_{f \text{ ürün}} - G_{f \text{ reaktan}} \quad (\text{açığa çıkan Gibbs serbest enerjisi})$$

Eğer 1 mol suyu baz olarak denklemlerimizi incelenirse



$$\Delta \bar{g}_f = \bar{g}_{f \text{ H}_2\text{O}} - \bar{g}_{f \text{ H}_2} - \frac{1}{2} \bar{g}_{f \text{ O}_2}$$

Burada yakıt pilleri açısından önemli olan bir başka nokta da “oluşum Gibbs serbest enerjilerinin” sıcaklıkla değişmesidir.

Çizelge 5.1  $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$  reaksiyonu için farklı sıcaklıklarda  $\Delta g_f$  değerleri (Larminie ve Dicks, 2000)

Faz	Sıcaklık (°C)	$\Delta g_f$ (kJ/mole)
Sıvı	25	-237.2
Sıvı	80	-228.2
Gaz	80	-226.1
Gaz	100	-225.2
Gaz	200	-220.4
Gaz	400	-210.3
Gaz	600	-199.6
Gaz	800	-188.6
Gaz	1000	-177.4

Değerlerin (-) olması, enerjinin açığa çıktığını gösterir.

Eğer hiçbir kayıp olmasaydı, yani reaksiyon tersinir olsaydı bu “Gibbs serbest enerjisinin” tamamı elektrik enerjisine (bir miktar da ısıya ) dönüşürdü.

Daha önceden de ifade edildiği gibi her bir molekül su oluşması için 2 elektron dış devreden akar. Yani her mol su için 2N adet elektron akışı olur. (N=Avogadro sayısı). Bir elektronun yüküne  $-e$

denirse, toplam akımdaki yük aşağıdaki gibi gösterilebilir;

$$-2Ne = -2F \text{ Coulomb}$$

(F = Faraday sabiti veya 1 mol elektronun yükü)

E= yakıt pilinin potansiyeli veya voltajı

Yapılan elektriksel iş = Yük x voltaj =  $-2FE$  Joule

Sistem tersinir olsaydı bu değer “Gibbs serbest enerjisi”ne eşit olurdu.

$$\Delta \bar{g}f = -2FE$$

$$E = \frac{-\Delta \bar{g}f}{2F}$$

Örneğin 200 °C’de çalışan bir yakıt pilinde  $\Delta \bar{g}f = 220 \text{ kJ}$

$$E = \frac{220000}{2.96485} = 1,14 \text{ volt}$$

Fakat bu potansiyel farkı tersinir olan bir sistemde geçerlidir ve gerçekte yakıt pillerinin potansiyelleri bundan daha küçüktür. Ayrıca potansiyel, kullanılan H<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub>’nin saflık değeriyle de değişir.

“Gibbs serbest enerjisi”nden bu kadar söz ettikten sonra verim ifadesini daha kolay anlayabiliriz. Esasen yakıt pillerinde de verim ifadesi, mantıksal olarak yaklaşıldığında mekanik sistemlerdekiyle aynı temellere dayanır.

Bir rüzgar gülünün verimini düşünürsek, pervanenin önündeki rüzgarın kinetik enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğünü görürüz fakat hiçbir zaman rüzgar hızı pervanenin arkasında sıfır olmayacağı için verimin bir maksimum değere göre bulunması gerekir. Aynı durum motorlar için de geçerlidir.

Her ne kadar ilk bakışta verimin üretilen elektrik enerjisinin, “Gibbs serbest enerjisine” oranı olacağı düşünülse bile daha dikkatli bakarsak bunun böyle olmayacağı açıktır. “Gibbs serbest enerjisi”nin tamamının kullanılması, ancak tersinir bir sistem için geçerlidir ve böyle bir sistem yoktur. Bunun yerine hidrojenle oksijenin birleşmesini bir yanma reaksiyonu olarak düşünülürse,

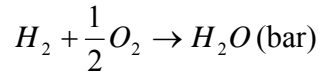
buradan elde edilebilecek maksimum ısı göz önüne alınabilir. Burada oluşum entalpisi  $\Delta \bar{h}_f$  önemlidir.

$$\text{Verim} = \frac{1 \text{ mol yakıt ile elde edilen elektrik enerjisi}}{-\Delta \bar{h}_f}$$

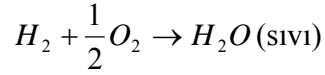
Bu ifadeye göre de max verim;

$$\text{Verim}_{\max} = \frac{\Delta \bar{g}_f}{\Delta \bar{h}_f} \cdot 100\% \text{ (mümkün olan max. verim)}$$

Bilindiği gibi iki farklı  $\Delta \bar{h}_f$  değeri vardır.



$$\Delta \bar{h}_f = -241,83 \text{ kJ / mol} \quad (\text{düşük ısı değer DID})$$



$$\Delta \bar{h}_f = -285,84 \text{ kJ / mol} \quad (\text{yüksek ısı değer YID})$$

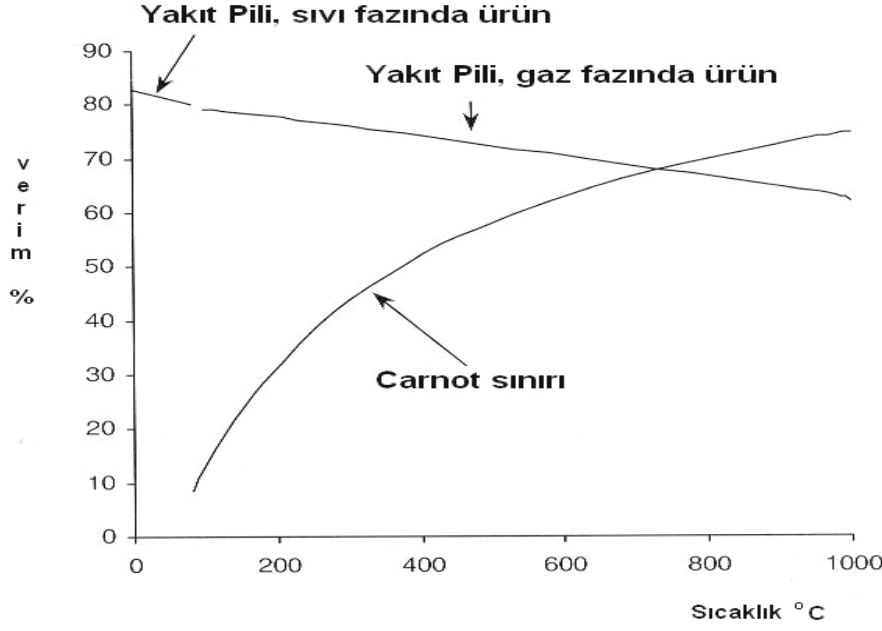
Aradaki 44,01 kJ/mol kadar fark buharlaşma molar entalpisidir. Burada özellikle belirtilmediği sürece verim ifadelerinde DID kullanılır.

Çizelge 5.2 Yakıt pilleri için  $\Delta g_f$ , en yüksek EMK ve verim sınırı (Larminie ve Dicks, 2000)

FAZ	Sıcaklık °C	$\Delta \bar{g}_f$ , kJ/mole	Max EMF	Verim Sınır
Sıvı	25	-237.2	1.23V	83%
Sıvı	80	-228.2	1.18V	80%
Gaz	100	-225.3	1.17V	79%
Gaz	200	-220.4	1.14V	77%
Gaz	400	-210.3	1.09V	74%
Gaz	600	-199.6	1.04V	70%
Gaz	800	-188.6	0.98V	66%
Gaz	1000	-177.4	0.92V	62%

Şekil 5.3'de , verim sınırı – sıcaklık grafiğinde yakıt pilleri ile Carnot çevrimi verimleri karşılaştırıldığında 3 nokta dikkat çeker.

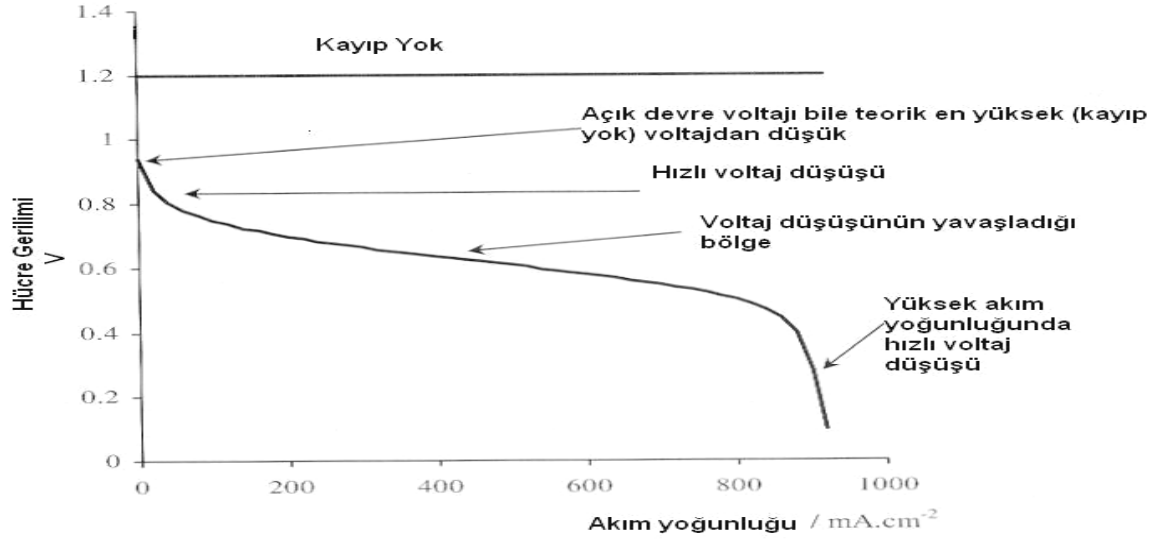
- Düşük sıcaklıklar için max verim sınırı, yüksek sıcaklıklara göre daha yüksek görünse bile gerçekte yüksek sıcaklık yakıt pillerinin daha az kayıpları olduğu için daha yüksek potansiyel farkı ile çalışabilirler.
- Yüksek sıcaklık yakıt pillerinde atık ısıdan daha fazla faydalanılabilir.
- Yakıt pillerinin max verimleri, Carnot döngüsüne göre çalışan makinelerinkinden her zaman daha yüksek değildir.



Şekil 5.3 Carnot sınırı ile yakıt pilini karşılaştıran Verim-Sıcaklık grafiği (Larminie ve Dicks, 2000)

#### 5.1.4 Gerçek Yakıt Pili Potansiyelleri

Daha önce de belirtildiği gibi yakıt pillerinin teorik olarak ulaşılabilen en yüksek potansiyellerine gerçekte ulaşamaz çünkü sistemde tersinmezlikler, kayıplar vardır.



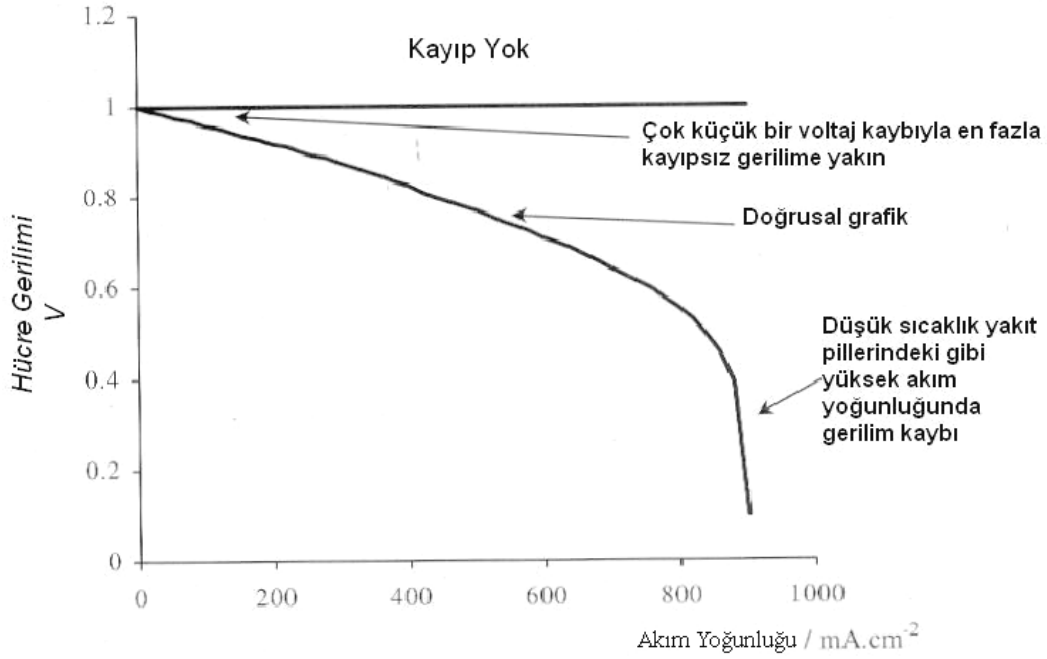
Şekil 5.4 Düşük sıcaklık yakıt pili voltaj akım yoğunluğu grafiği (Larminie ve Dicks, 2000)

Örneğin 100 °C'de çalışan ve teorik olarak 1,2 volt max potansiyel farkı oluşturması gereken yakıt pilinin çalışma diyagramı Şekil 5.4 deki gibidir.

Burada bazı noktalara dikkat edelim.

- Başlangıç değeri bile teorik değerden düşüktür
- Ani bir voltaj düşüşü vardır
- Ani düşüş sonrası voltaj daha dengelidir
- Bazen yüksek akımlarda da voltaj hızla düşebilir.

Eğer yakıt pili yüksek sıcaklıklarda çalıştırılıyorsa diyagram değişir. Daha önce de belirtildiği gibi, teorik max voltaj düşse bile gerçekte bulunan potansiyel düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pillerine göre daha yüksektir.



Şekil 5.5 800 °C de çalışan, yüksek sıcaklık yakıt pili (Larminie ve Dicks, 2000)

- Açık devre voltajı, teorik değere çok yakındır
- Ani voltaj düşüşü fazla değildir
- Düşük sıcaklık yakıt pillerindeki gibi, yüksek akımlarda da ani voltaj düşüşü olabiliyor.
- Çalışma voltajları, düşük sıcaklık yakıt pillerinden yüksektir çünkü kayıplar veya tersinmezlikler daha azdır.

## 5.1.5 Yakıt Pillerindeki Tersinmezlikler ve Voltaj Düşüş Sebepleri

### 5.1.5.1 Aktivasyon Enerjisinden Dolayı Voltaj Düşüşü

Bu tür kayıplar, reaksiyonun yavaş olmasından kaynaklanmakta ve üretilen voltajın bir kısmı reaksiyonun devamlılığını sağlamak için harcanmaktadır. Bu tür kayıplarda Tafel formülü ve Tafel grafiklerinden yararlanılır .

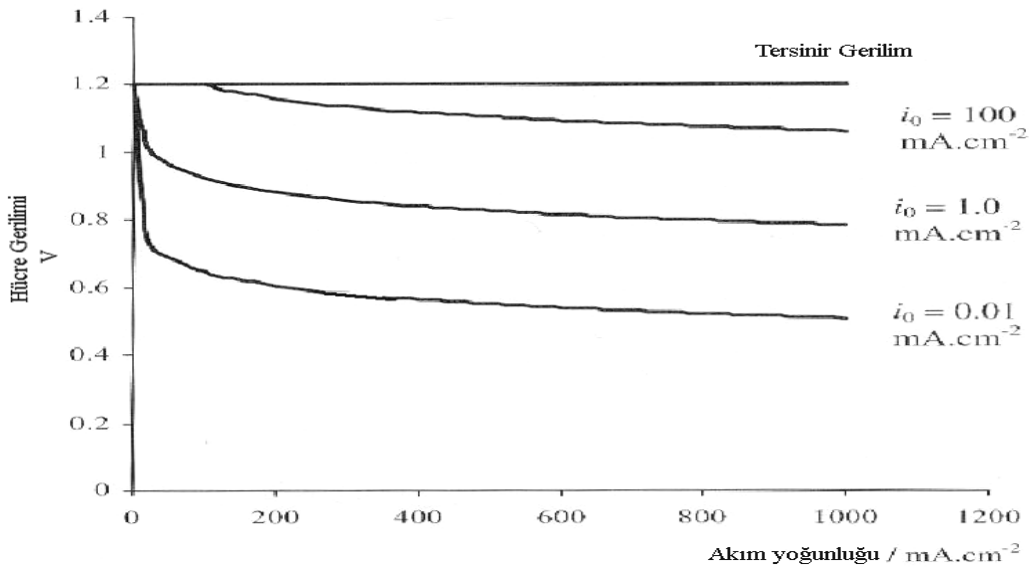
$$V = A \cdot \ln \left( \frac{i}{i_0} \right) \text{ formülü ile bu kayıp potansiyel bulunur.}$$

A = sabit, elektrot malzemesine ve reaksiyon özellikleriyle değişir (0,5 değeri uygun olabilir)

$i_0$  = denge akım yoğunluğu

Bir oksijen elektrotunda gerçekleşen reaksiyon  $O_2 + 4e^- + 4H^+ \leftrightarrow 2H_2O$  şeklindedir ve akımın sıfır olduğu anda reaksiyon esasen dengededir. Reaksiyonun gerçekleşmesi bir yöne doğru kaymasıyla olur, durağan durumdan harekete geçmez.

Denge anındaki akıma  $i_0$  denir.  $i_0$  kontrolü, tüm yakıt pilinin genel karakteristiğini etkiler. Bunun ne kadar etkili olduğunu görmek için yakıt pilinde sadece aktivasyon kayıplarının olduğunu düşünülebilir. Bu durumda hücre gerilimi – akım yoğunluğu Şekil 5.6 görülür.



Şekil 5.6 Hücre gerilimi – Akım yoğunluğu grafiği (Larminie ve Dicks, 2000)

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

Burada da görüldüğü gibi  $i_0$  arttıkça kayıplar azalmakta ve ideal hale yaklaşılmaktadır.

Önlemler;

- Sıcaklığın yükseltilmesi
- Katalizör etkisinin artırılması
- Elektrotun pürüzlülüğünün artırılması
- Reaktan konsantrasyonunun artırılması, örneğin saf  $O_2$  kullanılması
- Basıncın artırılması

### 5.1.5.2 Yakıt Taşınım ve İç Akım Kayıpları

Yakıt pilinde beslenen hidrojenin bir kısmı anottan katoda doğrudan geçerler ve hiçbir akım oluşturmayacağı için bir kayıp oluşturur. Ayrıca sadece iyon geçişine izin vermesi gereken elektrolit, çok az da olsa elektronların da geçişine izin verir ve kullanılabilir bir akım oluşmaz. Bu iki kayıp sebebi, esasen düşük sıcaklıkta çalışan (PEM yakıt pilleri gibi) yakıt pillerinin başlangıç voltajlarında düşüşe sebep olur.

### 5.1.5.3 Ohmik Kayıplar (Dirençler)

Adından da anlaşılacağı gibi bu kayıplar malzemelerin kendi dirençleridir. Elektrotların dirençleri ve iyonların transferinde elektrolitin oluşturduğu dirençlerdir. Yakıt pili hücrelerinin birbirlerine bağlanmasını sağlayan ara bağlantı elemanları ve 'bipolar tabakaların' da oluşturduğu kayıplardır.

Önlemler

- Elektrolit mümkün olduğu kadar ince tasarlanmalı
- 'Bipolar tabakalar' ve ara bağlantılar en doğru şekilde tasarlanmalı ve malzemeleri doğru seçilmeli.
- İletkenliği en yüksek elektrot malzemeleri kullanılmalı.

#### 5.1.5.4 Kütle Transferi ve Konsantrasyon Kayıpları

Yakıt pillerine beslenen oksijenin saflığı (hava beslenme durumunda), elektrotun etkili yüzeyinde oksijen moleküllerinin reaksiyona girmesi olasılığını değiştirir. Eğer elektrot etrafında oksijen harici maddeler de bulunuyorsa, bu yüzeylere oksijen moleküllerinin temasını azaltacaklardır. Ayrıca oksijen ve hidrojenin elektrotların etrafına ne kadar hızlı beslenebileceği önemlidir ve buradaki dolaşımın hızı düşükse reaksiyonları yavaşlatabilir. Özellikle reformerden sağlanan hidrojenin besleme hızı sınırlı olabilir. Reformer tasarımında dikkat edilmesi gereken ve tüm sistemin uyum içinde çalışması için bu konuda da dikkatli olunması gerekmektedir.

## 5.2 Proton Değişim Membranlı Yakıt Pili (PEM YP)

PEM yakıt pilleri ilk olarak 1960'larda General Electric firması tarafından NASA'nın ilk insanlı uzay aracında kullanılmak üzere geliştirildi. PEM yakıt pillerine aynı zamanda "katı polimer yakıt pili" de denir. Çünkü elektrolit, iyonları ileten polimerdir. Polimerin iki tarafında ise katalizörlü, pürüzlü elektrotlar bulunur. Esasen anot-elektrolit-katot çok ince tek bir birim olarak bulunur ve "membran elektrod assembly" olarak adlandırılır (MEA).

PEM YP'nin çalışması daha önce belirtildiği gibidir. Diğer bazı yakıt pili tiplerine avantajları olarak düşük sıcaklıkta çalışmaları için hemen devreye alınabilmeleri ve MEA'nın kompakt yapısı sayesinde yakıt pilinin boyutlarının küçülmesini sağlanması sayılabilir. Ayrıca korozif bir akışkan olmadığı için düz bir satıhta çalışması gerekmez ve özellikle mobil uygulamalar için uygundur.

PEM YP, geliştirilmeye başlandığında kullanılan platin elektrot malzemesinin  $28\text{mg/cm}^2$  gibi yüksek bir değerde oluşu gelişimini çok yavaşlamış fakat bugün bu değer  $0,2\text{mg/cm}^2$  gibi değerlere indirilmiş ve aynı zamanda verim de arttırılmıştır. Genel olarak bütün PEM YP'lerinde iki özellik benzerdir ve uygulamadan uygulamaya çok değişmez.

Bunlar:

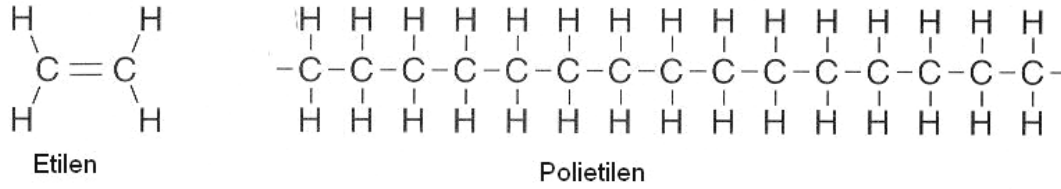
- kullanılan elektrolit
- elektrot yapısı ve katalizör dür.

Fakat mühendisliğin esas gösterildiği çok önemli alanlar da vardır:

- Su idaresi, ki PEM YP için çok önemlidir
- Soğutma
- Yakıt pili yığınlarının oluşturulma şekilleri
- Reaktanların saflıkları

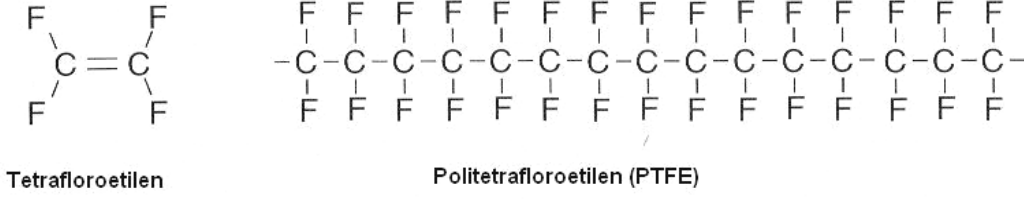
### 5.2.1 Polimer Elektrolit

Farklı firmalar farklı elektrolitler kullanmakla birlikte genelde sülfonlanmış floropolimerler, özellikle floretilen kullanılır. En bilineni ise Dupont firmasının Nafion’udur. Nafion, 1960’dan beri geliştirilmektedir ve artık bir nevi endüstriyel standart haline gelmiştir. Üretimi ise Şekil 5.7 de gösterildiği gibidir ve en basit etilenden başlar.



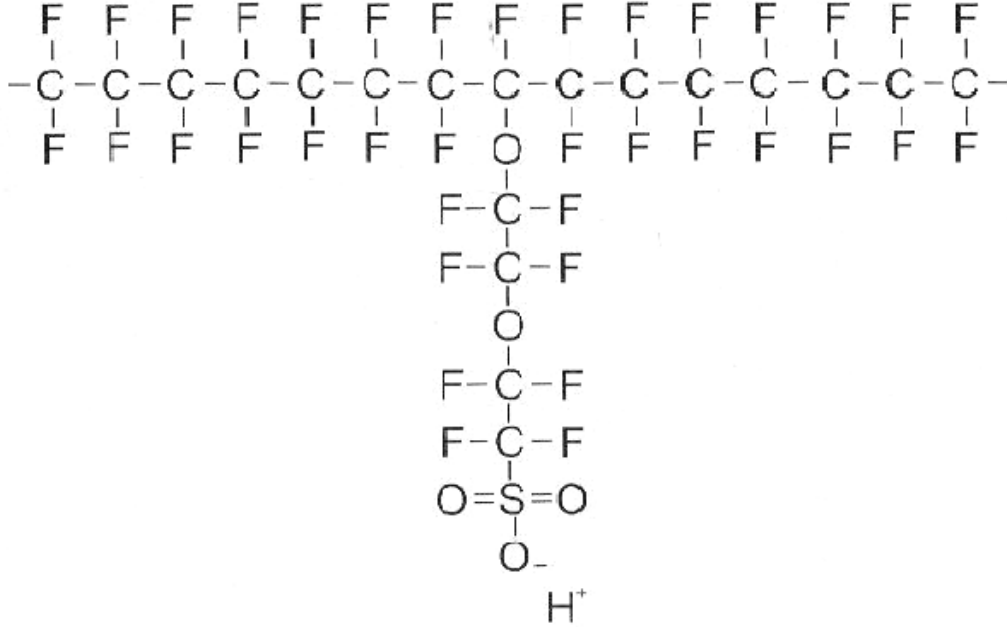
Şekil 5.7 Polietilen yapısı (Larminie ve Dicks, 2000)

Temel polimer molekül yapısındaki hidrojenler fluorin ile yer değiştirirler ve bu işleme “perfluorinasyon” denir. Bu hale tetrafloretilen denir ve Şekil 5.8 de görüldüğü gibi polytetrafloretilen haline getirilir. Sanayide ICI firmasının Teflon markası olarak da bilinir. Bu etkileyici malzeme sayesinde yakıt pillerinde önemli gelişmeler olmuştur. Karbonla flor arasındaki sağlam bağlar sayesinde kimyasal etkilere karşı dayanıklı bir yapı elde edilir. Diğer bir özelliği ise hidrofobik yapısı sayesinde elektrottan suyun uzaklaştırılmasında ve su birikiminin engellenmesinde kullanılır. Bu özelliği doğa sporları için üretilen giysilerde de kullanılır.



Şekil 5.8 PTFE yapısı (Larminie ve Dicks, 2000)

Fakat elektrolit üretimi için başka aşamalara da ihtiyaç vardır. PTFE, sülfonlanmış hale getirilir, bir “yan zincir” eklenerek sonu HSO<sub>3</sub> sulfonik asit ile biter. Şekil 5.9 de görüldüğü gibi bir molekül yapısı oluşur fakat detaylar değişebilir.



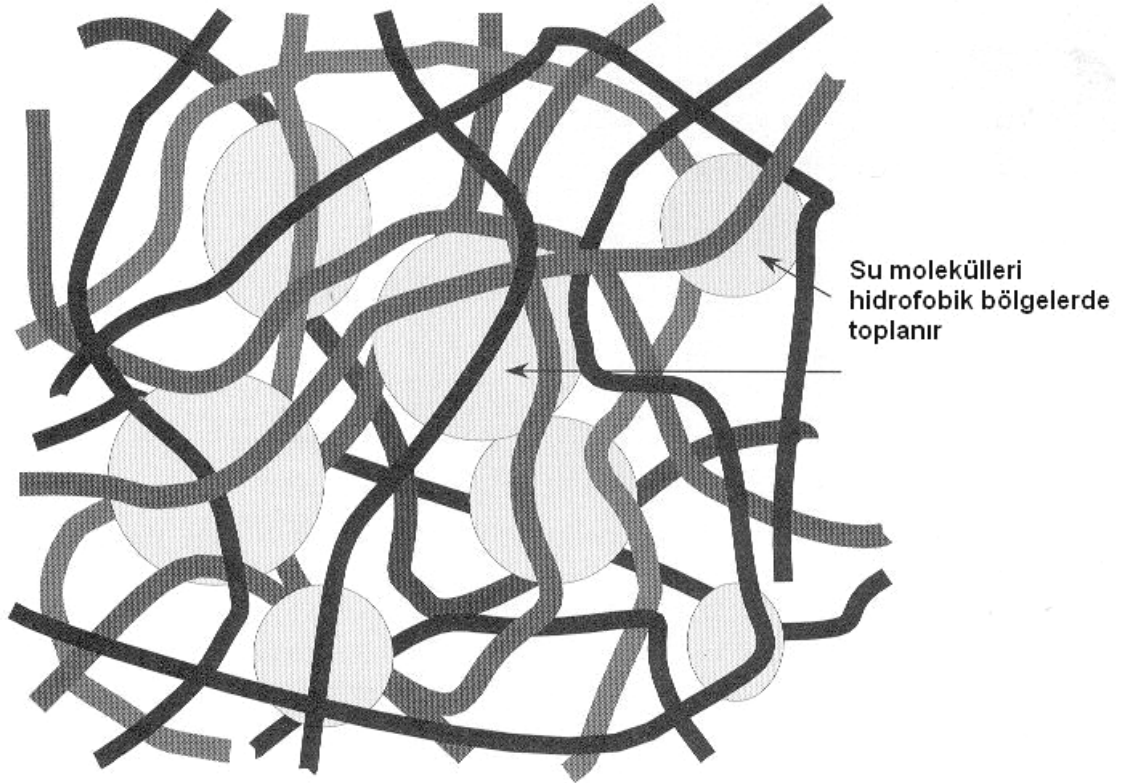
Şekil 5.9 Perflorosülfonik asit (PTFE kopolimer) olarak da bilinen sülfonlanmış floretoilen (Larminie ve Dicks, 2000)

Burada da gösterilen yapıyı oluştururken HSO<sub>3</sub> grubu iyonik bağla bağlanır. Böylece H<sup>+</sup> ve SO<sub>3</sub> iyonlarından faydalanılır. Bu, “hidrofilik” bir özellik oluşturur ve suyu tutar. (Zaten bu sebepten dolayı deterjanlarda kullanılır ve bir uç suyla bağ yaparken diğer uç kirle bağ yapar) Nafion için de böyle özellikte bir bölge oluşturulduğunda genel olarak suyu uzaklaştıran bir yapı içinde suyu tutan bölgeler meydana gelir. Bu bölgeler büyük miktarda su tutarlar ve H<sup>+</sup> iyonları zayıf bir şekilde tutunurlar. Su tutan bölgeler Şekil 5.10 da görüldüğü gibi birbirlerinden ayrık da olsalar

gene de  $H^+$  iyonları uzun destek molekülleri üzerinde hareket edebilirler. Fakat 'hidrofilik' bölgelerin büyük olmasının önemi açıktır.

Yakıt pillerinde kullanım açısından Nafion ve benzerlerinin şu özellikleri önemlidir:

- Kimyasal etkilere dayanıklılık
- Mekanik olarak güçlü oldukları için ince yapılabilmeleri (50  $\mu m$ )
- Asit özellikte olmaları
- Büyük miktar su tutabilmeleri
- İyi su tutabildikleri takdirde,  $H^+$  iyonları serbestçe dolaşabileceğinden, iyi proton ileticisi olmaları.



Şekil 5.10 Nafion tipi membran yapısı (Larminie ve Dicks, 2000)

### 5.2.2 Elektrotlar

Anot ve katot elektrotlar için en uygun katalizör platindir. PEM YP geliştirilmeye başlandığı zamanlarda  $28\text{mg/cm}^2$  gibi yüksek bir oranda platin kullanılmakla birlikte bugün güç artırılırken platin kullanımı da  $0,2\text{mg/cm}^2$ 'ye kadar düşmüş ve artık fiyatta önemli bir yer tutmamaya başlamıştır.

Farklı üreticilerin tasarımlarında ufak tefek değişiklikler olsa da genel olarak elektrotlar benzer yapıya sahiptir. Platin katalizör çok küçük tanecikler halinde daha büyük ebattaki karbon tozu üzerine yapışmaktadır. Bu sayede platin katalizör geniş bir temas yüzeyi sağlayarak reaktanlarla teması arttırmaktadır.

Bu aşamadan sonra iki farklı yol izlenebilir. Her ne kadar çoğu teknik şirket sırrı olsa bile bu yollar genel hatlarıyla anlatılabilir.

İlk olarak “ayrı elektrot” metodu incelenebilir. Karbon destekli katalizör, “gözenekli” ve iletken bir malzeme olan karbon kağıdına veya karbon bezine tutturulur. PTFE’de genellikle hidrofobik özelliğinden dolayı ayrıca eklenir ve böylece oluşan suyu yüzeye doğru uzaklaştırır ve buharlaştırmak kolaylaşır. Karbon kağıt veya bez elektrot için mekanik destek sağlarken aynı zamanda gazların elektroda geçmesini de sağlar ve bu özelliğinden dolayı “gaz geçirme yüzeyi” de denir. Daha sonra elektrotlar polimer elektrolit membranın iki tarafına bazı yöntemlerle birleştirilirler. En basit yöntemlerden biri; elektrolit membran ve %3 hidrojen peroksitli kaynayan suya daldırılarak bir saat temizlenir. Daha sonra aynı süre için kaynayan sülfürik asit içine daldırılır ve en fazla sülfon grubunun birleşmesi sağlanır. Deiyonize suda 1 saat durulama ile tüm asit temizlenir ve elektrotlar  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcak preste 3 dakika elektrolitin iki tarafından preslenir. Böylece membran elektrot bileşimi (membran elektrot assembly), elde edilir.

Bir başka yol ise elektrotları doğrudan elektrolitin üzerine kurmaktır . Karbon destekli platin katalizör doğrudan elektrolite bağlanır. Genellikle hidrofobik PTFE de elektrolit membrana püskürtme veya haddeleme ile eklenir.

Katalizör membrana birleştirenince, “gaz geçirme yüzeyi” eklenmelidir. Bu yüzey diğer metotta olduğu gibi karbon bez veya karbon kağıttır. Esasen buradaki tabakaya “gaz geçirme yüzeyi” demek pek görevlerinin hepsini tanımlamaz. Bu yüzey ayrıca karbon destekli katalizör

ile “bipolar plaka” veya başka akım ileticiler ile aradaki elektriksel bağı kurar. Ayrıca elektrolit yüzeyinden oluşan suyu uzaklaştırır ve çok ince bir katman olan katalizörü korur.

Hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın sonuçta karbon destekli elektrot bir tarafından elektrolite diğer tarafından “gaz geçirme yüzeyine” (akım iletici, su uzaklaştırıcı, mekanik destek) birleştirilir.

MEA üretiminde iki konu daha vardır . Birincisi , katalizörlü elektrotun bir kısmının elektrolitin içine girmesi ve böylece verimi arttırmasıdır. Böylece katalizör hem elektrolitle hem de gazlarla etkileşir .

Elektrotun çözülmüş halde elektrolit malzemesiyle fırçalanmasıyla sorun çözülür. Eğer birinci yol kullanılıyorsa sıcak preslemeden önce bu yapılır. İkinci yol kullanılıyorsa “gaz geçirme yüzeyi” eklenmeden önce yapılır.

İkinci konu ise kullanılan gaz geçirme yüzeyi seçimidir. Burada karbon kağıt veya bez kullanılır . Eğer yakıt pili çok küçük ise karbon kağıt (ki Toray kağıt en çok kullanılanlardandır ) kullanılır. Karbon bez daha kalındır ve biraz daha çok su tutar ve montaj aşamasında kolaylık sağlayabilir fakat küçük boşlukları doldurduğu için “bipolar plate” üzerindeki gaz kanallarını da doldurabilir. Bu olay derin yapılmamış kanallardaki gaz akışını olumsuz etkiler.

Buraya kadar anlatılanlar, daha çok tüm firmalar için hemen hemen aynı olsa bile bundan sonraki konular farklı mühendislik yaklaşımları içerir.

### **5.2.3 Yakıt Pillerinde Su Sorunu**

Daha önce de bahsedildiği gibi polimer elektrolitin içinde iletkenliği sağlamak üzere yeterince su olmalı fakat elektrotun gözeneklerini veya “gaz geçirme yüzeyini” tıkayacak kadar olmamalı . Bu arada bir denge kurulmalıdır.

PEM YP’nde su , katotta oluşur . En ideal halde bu oluşan su elektroliti gereken ıslaklıkta tutar . Katottan verilen hava , reaksiyon için gereken oksijeni karşılamaya ve oluşan fazla suyu uzaklaştırmaya yeter. Membran elektrolitin ince oluşu katottan anoda suyun difüzyonuna ve elektrolitin her yerinin istenilen ıslaklıkta olmasını sağlar. Mühendisler bu ideal halin oluşması

için doğru tasarımlar yapmaya çalışmalıdırlar. Fakat bunu engelleyici bazı durumlar olabilir .

Bu engellerden biri,  $H^+$  iyonlarının anottan katoda giderken bazı su moleküllerini de beraberlerinde sürüklemeleridir. Normalde 1 ile 2,5 su molekülü, her bir protonla birlikte sürüklenebilir. Bu durum özellikle yüksek akımlarda katot iyi derecede ıslak olsa da anot kuruyabilir.

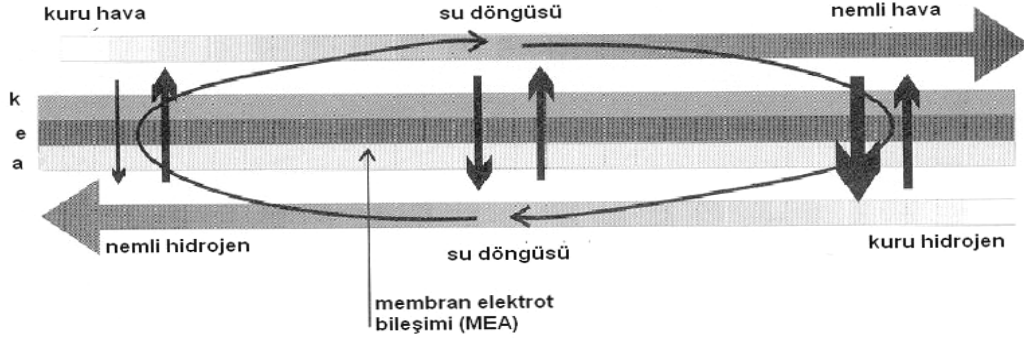
Bir başka engel ise havanın yüksek sıcaklıklarda çok fazla kurutucu etkisidir. Havanın sıcaklığı arttıkça taşıyabileceği su miktarı daha da hızlı artar, yani bağıl nem düşer. Bu durumda örneğin  $20^{\circ}C$ 'de %70 bağıl nemli bir hava, yakıt pili içinde  $60^{\circ}C$ 'ye ısıtılırsa bağıl nem %8 olur. Bu değer ise çöllerde bile %30 civarındadır. Sonuç olarak polimer elektrolit membran üzerinde çok olumsuz bir etki yapar. Çünkü elektrolit hem çok incedir hem de tuttuğu su miktarı çok önemlidir. Kısaca söylemek gerekirse  $60^{\circ}C$ 'nin üzerinde çalışılması gerektiğinde elektrotlar, üretilen sudan çok daha fazlasını havaya transfer ederler. Bu sebepten dolayı nemlendiriciler (klimalarda da kullanılan tipte nemlendiricilerdir) ile yakıt piline giren hava , girmeden önce nemlendirilir . Bu esasen reaksiyonu yavaşlatacak bir etken olarak görülse bile performansı çok artırır.

Ayrıca girişteki hava yeterli kurulukta olsa bile yakıt pilinde ilerledikçe aldığı su ile doyma noktasına gelir ve artık su alamaz olur . Bu , özellikle büyük yakıt pillerinde görülen bir sorundur.

#### **5.2.4 Nemlendirici Kullanılmama Durumu**

Nemlendirici kullanmak, maliyeti, boyutu ve karmaşıklığı arttırdığı için mümkünse kullanılması istenmez . Küçük yakıt pillerinde nemlendirici kullanılmadığı için düşük akımlarda voltaj düşer fakat bu çok önemli görülmediği için tolere edilir.

Yakıt pilinde nemlendirici kullanmamak için , havanın stokiometrik oranını öyle ayarlanmalıdır ki, çıkış havası yaklaşık %100 bağıl nemde olsun. Bunu yapmak için de ıslaklığın , yakıt pilinin her yerinde dengede olması gerekir. Büchi ve Srinivasan, (1997) böyle bir yöntem açıklamaktadır. (Şekil 5.11)



Şekil 5.11 Nemlendirmeyi arttırmak için kullanılan ters akımlı reaktan gaz geçişi (Larminie ve Dicks, 2000)

Hava ve hidrojen ters yönde akar. Anottan katoda doğru “elektro-osmotik taşıma”dan dolayı olan su taşınması, pilin her yerinde aynı miktar olurken, katottan anoda olan geri difüzyon değişkendir fakat gaz sirkülasyonu bunu telafi eder. Ayrıca dar elektrotlar ve geniş gaz difüzyon tabakaları (çok su tutması için) olumlu etki yaparlar.

Çizelge 5.3 Farklı sıcaklık ve stokiyometrilere çıkış havası bağıl nem değerleri (Larminie ve Dicks, 2000)

Sıcaklık, °C	$\lambda = 1.5$	$\lambda = 2$	$\lambda = 3$	$\lambda = 6$	$\lambda = 12$	$\lambda = 24$
20					218	145
30				199	120	79
40		282	201	114	69	46
50	215	169	120	68	41	27
60	133	104	74	42		
70	85	67	48			
80	56	44	31			
90	38	30				

Çizelge 5.3 de görüldüğü gibi sıcaklık 60°C'nin altında ise hemen hemen her zaman çıkış havasının bağıl neminin %100'e yakın olması sağlanabilmektedir. Bunun için stokiyometri değiştirilir. Örneğin düşük sıcaklıklarda  $\lambda=24$  olduğunda bile aslında bunu sağlamak için oldukça az bir fan gücü yeterli olur. Üretilenin %1'i kadar fan gücü yetebilir.

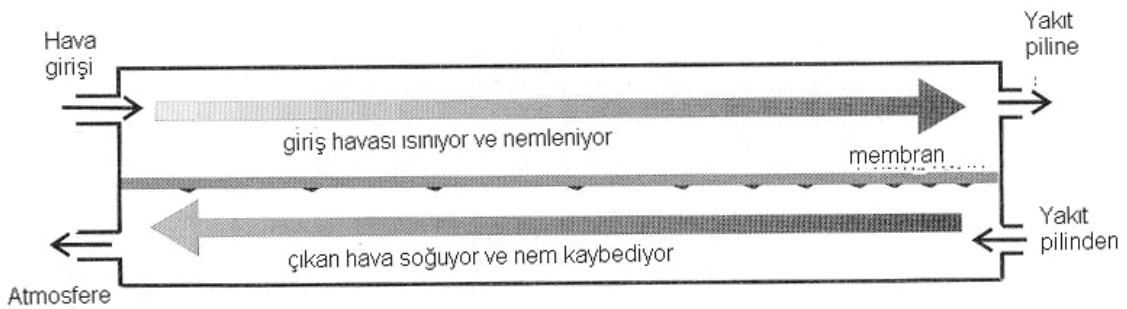
### 5.2.5 Harici Nemlendiriciler ile Yakıt Pili İşletimi

Küçük yakıt pillerinde nemlendiricilerin çok kullanılmamasının sebeplerini açıklanmakla birlikte, büyük yakıt pillerinde sadece bir fan ile hava stokiometrik oranının değiştirilmesi yeterli değildir. Büyük yakıt pillerinde sıcaklık genelde 60C'ın üzerinde tutulur, çünkü böylece kayıplar, özellikle aktivasyon voltajı azalır. Nemlendiricilerin getireceği fazladan ağırlığa, maliyete ve karmaşıklığa katlanmak gerekir.

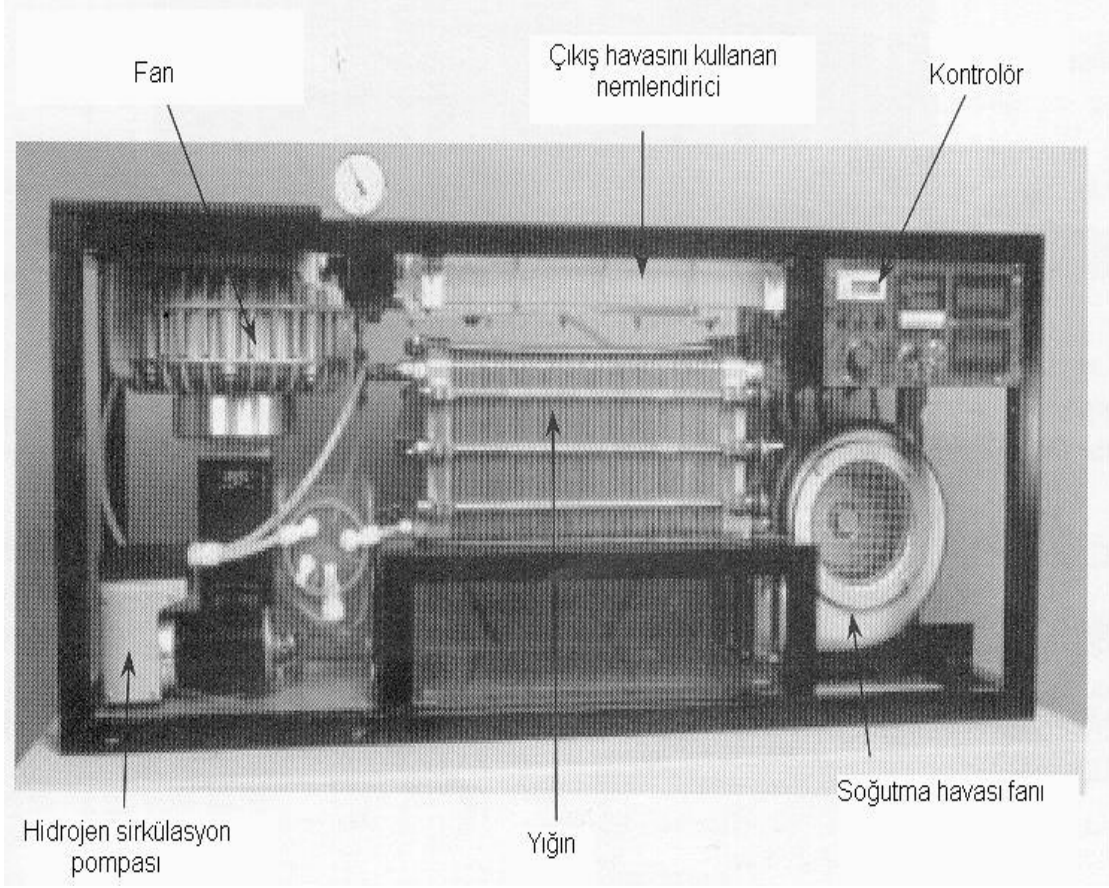
Yakıt pillerinde nemlendirmenin bir yolu , gazın içine doğrudan su püskürtmektir . Böylece reformerden gelmiş veya sıkıştırılmış gazların sıcaklıkları da düşürülebilmektedir . Bu noktada önemli olan kullanılan suyun saflığıdır . Çünkü saf olmayan su , yakıt pilinin performansını etkiler . Çözüm olarak yakıt pilini terk eden havayı yoğuşturulan saf suyun kullanılması olabilir .

Günümüzde yaygın olarak klimalarda kullanılan nemlendirme sistemleri haricinde özel olarak yakıt pilleri için tasarlanan sistemler de vardır .

- Basit bir harici nemlendirici sistemi, Paul Scherrer Enstitüsü (İsviçre) tarafından geliştirilmiştir . Isınmış , nemli hava yakıt pilinden çıkar ve nemlendiriciye girer . Aynı zamanda dışarıdan alınan ve yakıt piline girecek hava da ters akım prensibiyle diğer uçtan girer . Yakıt pilinden çıkan havanın içindeki suyun bir kısmı membran üzerinde yoğunlaşır . Oluşan su membrandan geçer ve ters akım ile buharlaşarak yakıt piline girecek havayı nemlendirir . Bu yöntemde H<sub>2</sub> nemlendirilmez , anot kutbunun “geri difüzyon” ile nemlenmesi beklenir .



Şekil 5.12 Çıkış havası kullanılarak nemlendirilen reaktan giriş havası (Larminie ve Dicks, 2000)



Şekil 5.13 Çıkış havası kullanılarak nemlendirilen reaktan giriş havası uygulaması (Larminie ve Dicks, 2000)

- Bir başka yöntemde ise yakıt pilinin içine doğrudan su püskürtülür . Normalde bunun , elektrotların çok ıslanmasına ve reaksiyonun durmasına sebep olması beklenir fakat özel olarak verilmiş labirent şekilli “bipolar plaka” sayesinde su her yere gaz akımıyla birlikte taşınır . Fakat bu yöntemin her ne kadar iyi sonuçlar verdiği söylene bile gazların ne kadar basınçlandırılmaları gerektiği ve uzun vadede elektrotların dayanıklılıklarının nasıl olduğu belli değildir.

- İlginç bir nemlendirme yöntemi ise “kendi kendini nemlendirmedir”. Bu yöntemde elektrolit su üretecek şekilde modifiye edilmiştir. Platin nanokristalleri eklenen elektrolit çok incedir. Elektrotlardan geçen  $H_2$  ve  $O_2$ , platinin katalizörlüğü sayesinde reaksiyona girerler ve su oluşur. Bu yakıtın kaybı anlamına gelse bile artırılmış elektrolit performansı ile üstesinden gelinmektedir.(Su, elektrotta değil elektrolitte oluşur)

## 5.2.6 PEM Yakıt Pili Soğutulması ve Hava Besleme

### 5.2.6.1 Katoda beslenen hava ile soğutma

Yakıt pilleri, diğer tüm cihazlar gibi, %100 verimle çalışamazlar. Normal olarak H<sub>2</sub>'nin dönüşümünde yaklaşık olarak enerjinin yarısı ısıya dönüşür. Yani, yakıt pilinin gücü kadar da bir ısı enerjisi açığa çıkacaktır.

Oluşan bu ısının uzaklaştırılmasında farklı yollar izlenir ve büyük oranda yakıt pilinin büyüklüğüne bağlı olarak bu yollardan biri seçilir. 100 watt'tan düşük yakıt pillerinde, pilin açıklıklarının biraz geniş yapılması sayesinde, reaksiyon için kullanılacak hava ile soğutma yapılabilir. Daha kompakt bir tasarım için ise küçük bir fan kullanılabilir ve daha bu fanın çekeceği elektrik akımı önemli değildir.

### 5.2.6.2 Reaktan ve Soğutma Havaasının Ayrı Olması

Yakıt pilleri büyüdükçe daha fazla ısı oluşur ve bu oluşan ısıyı uzaklaştırmak için ayrıca, tek görevi soğutma olan soğutma havası kullanılır.

Örneğin 50 °C'de çalışan, her bir hücresinin 0,6 V gerilimi olan bir yakıt pilinde 20 °C'de girip 50 °C'de çıkan hava ile oluşan ısının %40'ının uzaklaştırılması için hesap yapılırsa:

$$\text{oluşan ısı} = P_e \cdot \left( \frac{1,25}{V_c} - 1 \right) \text{ watt}$$

$$\text{uzaklaştırılacak ısı} = 0,4 \cdot P_e \cdot \left( \frac{1,25}{V_c} - 1 \right) \dot{m} c_p \Delta T$$

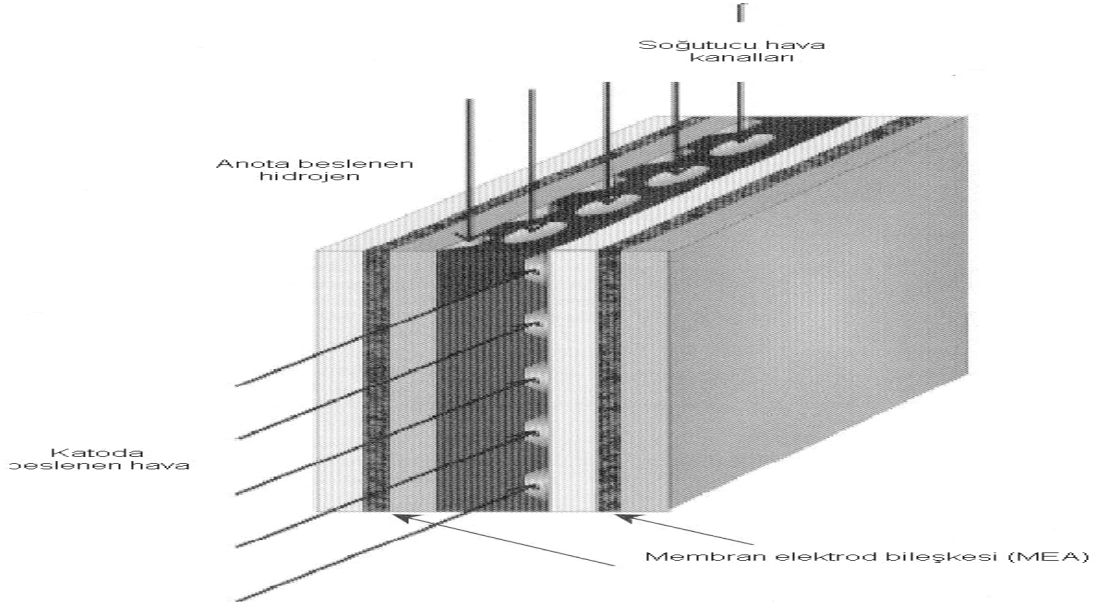
$$c_p = 1004 \text{ j/kg K}, \Delta T = 30 \text{ K}, V_c = 0,6 \text{ volt}$$

Buradan soğutucu hava debisi  $\dot{m} = 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot P_e$  kg/s bulunur.

$$\text{Reaktan hava debisi ise } \dot{m} = 3,57 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda \cdot \frac{P_e}{V_c} \text{ kg/s (kabul)}$$

İki denklemi eşitlenerek  $\lambda \cong 24$  bulunur.

Çizelge 5.3 den  $\lambda=24$  ve  $50^{\circ}\text{C}$  için %27 bağıl nem (çıkış havası) bulunur. Bu değer ise bir çöl ortamından bile daha kurudur. Giriş havası bağıl nemi %70 kabul edildiğinde, bağıl nemin hızla düştüğü ve membranı hızla kurutucu bir etki gösterdiği anlaşılır. Kurumayı durdurmak için  $50^{\circ}\text{C}$ 'de  $\lambda=3$  ile 6 arasında olmalı, yani daha az hava elektrotların üzerinden geçmeli ve ayrı bir soğutma sistemi olmalıdır. Bu genelde atılması gereken ısıнын %25'inden fazlasının soğutucu akışkan ile atılması durumu için geçerlidir. Bu durumda iki pompa veya fan kullanılması gerekir. 250-2500 watt gücünde yakıt pillerinin soğutulmasında “bipolar plaka” üzerine fazladan kanallar yapılır ve soğutucu hava buradan üflenir. Bir başka yöntem ise ayrı soğutma plakaları eklenmesi olabilir. Birkaç kW'dan büyük yakıt pillerinde soğutma su ile olmaktadır.



Şekil 5.14 Reaktan ve soğutma havasının ayrı olarak beslenmesi (Larminie ve Dicks, 2000)

İçten yanmalı motorlarda da olduğu gibi bir noktadan sonra (fazla belirgin bir nokta olmayabilir), hava soğutması yerini su soğutmalı sistemlere bırakır. Hava soğutmalı sistemler daha basit olsa da ısı yükü arttıkça iş zorlaşır. Hava kanalları yakıt pilinin kompakt yapısını bozar çünkü 1 kg suyun geçeceği kanal, 1 kg havanınkinden dar yapılabilir ve ayrıca suyun soğutma etkisi daha fazladır.

Genellikle 2kW'ın altındaki yakıt pillerinde hava soğutmalı, 10kW'ın üzerindeki yakıt pillerinde su soğutmalı, arada ise mühendislerin seçimine bağlı olarak her iki sistem de kullanılmaktadır .

Hava-su ayrımını yaparken çok önemli olan bir faktör de atık ısının ne olacağıdır. Eğer ısı sadece atmosfere atılacaksa hava soğutması daha mantıklı iken, başka yerde kullanılacak ise su soğutması daha çok tercih edilebilir . Bunun haricinde yapısal olarak su soğutmalı sistemler de hava soğutmalı sistemlere benzer ve “bipolar plakalara” su gönderilir. Ancak her bir “bipolar plakaya” su kanalları yapılmaya da bilir .

### **5.2.7 PEM Y.P Yapılandırma Metotları**

Genellikle yakıt pilleri bipolar plakalar ile seri olarak bağlanmış hücrelerden oluşurlar. Bipolar plaka tasarımları ve üretim malzemeleri büyük farklılıklar gösterir. Buradaki mühendislik, yakıt pilinin tasarımı için çok önemlidir çünkü bipolar plaka, akımı bir hücrenin anodundan toplayıp diğer hücrenin katoduna iletir, yakıt gazını ve oksijen/havayı elektrotlara taşır, soğutucu akışkanın dolaşımını birbirlerine karışmamasını da sağlamak zorundadır.

#### **5.2.7.1 “Bipolar Plaka” Üretim Metotları**

- En çok kullanılan üretim metotlarından biri grafit levhaların talaşlı işlenmesidir. Grafitin seçilmesindeki en önemli iki sebep elektriği iletmesi ve diğer metallere nazaran çok düşük yoğunluğa sahip olmasıdır . Ayrıca grafitin işlenmesi de kolaydır . Gerekli olan soğutma kanallarının işlenmesi için “bipolar plaka” iki parçadan üretilir . Her bir parçanın ön yüzünde reaktanların geçeceği kanallar , arka yüzünde ise soğutucu akışkanın akacağı kanalların yarısı işlenir ve iki parça birbirine birleştirilerek bütün bir “bipolar plaka” oluşturulur. Bu yöntemin genel olarak 3 dezavantajı vardır;

- 1) Grafitin işlenmesi otomatik olarak yapılsa bile işlemler pahalı makinelerde, uzun zamanda yapılır.
- 2) Grafit, kırılğan bir yapıdadır ve hücrelerin taşınmasında ve montajında çok dikkatli olmak gerekmektedir.
- 3) Grafit , oldukça gözenekli bir yapıya sahip olduğundan dolayı reaktanları ve soğutucu akışkan birbirlerinden ayrı tutabilmek için kanalların çeperleri birkaç mm kalınlığında yapılmalıdır ve bu da “bipolar plakanın” toplam ağırlığının , düşük yoğunluğuna rağmen , çok da hafif olmamasına sebep olur.

- Metallerden bipolar plaka üretiminde aynı grafitte olduğu gibi talaşlı imalat kullanılır.

Grafitin aksine gözenekli bir yapısı olmadıkları için daha ince kanallar , yani daha kompakt “bipolar plaka” tasarım için uygundur ama yüksek yoğunlukları ve korozyona karşı hassasiyetleri dezavantajlarıdır . Özellikle yakıt pilinin içindeki su buharı , oksijen , sıcaklık ve MEA’dan sulfonasyon prosesinden gelen fazlalık sulfonik asidin akma tehlikesi metaller için uygun olmayan bir ortam yaratır. Ayrıca talaşlı imalatta harcanan zaman , enerji ve makine masrafları daha da artabilir.

- Metallerin kullanıldığı bir başka metot ise delikli veya köpüklü metaller ile akış kanallarını yapmaktır. Kanallar süngerimsi yapıdaki “foamed” metalden yapılır. Böylece içinde birçok küçük delik vardır ve bu delikler toplam hacmin %50’sini kaplar. Daha sonra 1-2 mm kalınlığında ince tabakalar halinde kesilirler veya alternatif bir yol ise düz bir metal plakaya yarılma ve gerilme ile delikler açılmasıdır. Kullanılacak metal, bu durumda iken yeterince sağlam ve hafif olmalıdır. Seçimde titanyum kullanılmıştır . Her ne kadar diğer metaller kadar iyi iletken olmasa da üzerine kaplanan titanyum nitrat kaplama sayesinde hem elektriği ileten , hem korozyona dayanıklı hem de ucuza kaplanan bir yapı elde edilmiştir.Daha sonra , anlattığım gibi üretilen iki yapıyı ince bir metal levhanın iki yüzüne birleştirerek bir bipolar plaka elde edilmiş olur. Boşluklardan reaktan gazlar elektrotlara geçerken, metallerin üzerinden de akım geçer . Böylece bu yapıların arka arkaya sıralanmasıyla yığın (stack) oluşturulur ; metal levha, metal köpük, MEA, metal köpük, metal levha, MEA, metal köpük gibi.

Ayrıca aynı yapı kullanılarak yanlara eklenen soğutucu kanallardan da soğutucu akışkan geçirilerek yakıt pili soğutulur.

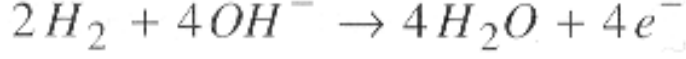
Bu tarzda üretimin büyük avantajları vardır . Mesela köpüklü metal ile ince, hafif, iletken ve gazları iyi ayıran bir yapı oluşturulurken ucuza imal edilmiş olur.

“Bipolar plaka” kullanılmadan da üretilen yakıt pilleri vardır ancak bunlar daha azınlıktadırlar ve daha küçük güçlerde üretilmişlerdir.

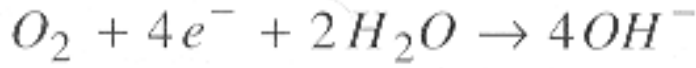
### **5.3 Alkali Elektrolit Yakıt Pili ( A.E.Y.P )**

Alkali elektrolit yakıt pilinin genel reaksiyon denklemleri aşağıdaki gibidir;

Anot reaksiyonu



Katot reaksiyonu



Anotta oluşan elektronlar dış devreden geçer ve katoda giderek hidroksil iyonlarının oluşmasını sağlarlar. Proton değişim membranlı yakıt pillerinin aksine, üretilen su, anot kutbunda oluşur ve buradan dışarıya atılır.

Alkali elektrolit yakıt pillerinin genel avantajları katottaki aktivasyon gerilimi, asit elektrolitli yakıt pillerinden düşüktür. Ayrıca elektrotlar çok değerli metaller kullanılarak üretilmeyebilirler. Bir alkali çözeltiden oluşan elektrolit için NaOH veya KOH kullanılır. Bu iki çözelti de düşük maliyetli, yüksek çözünürlüklü ve korozif olmayan çözeltilerdir. Fakat potasyum karbonat ( $K_2CO_3$ ), sodyum karbonattan daha yüksek çözünürlüğe sahip olduğundan dolayı tercih edilir ( $K_2CO_3$ 'ün önemini daha sonra açıklayacağım). Bu saydığım genel ortak özelliklerin dışında alkali elektrolit yakıt pillerinin birbirlerinden farklı birçok özellikleri vardır. Örneğin Apollo uzay aracında 533 K'de çalışan bir A.E.Y.P kullanılmışken Orbiter' de 363K'de çalışan bir A.E.Y.P kullanılmıştır. Ayrıca basınç, katalizörler, elektrotlar da birbirlerinin aynı değildir.

### 5.3.1 Hareketli Elektrolitli Alkali Elektrolit Yakıt Pilleri

Bu yakıt pillerinde hidrojen anot kutbuna beslenir fakat o da dolaştırılmalıdır çünkü ürün su anotta oluşur ve bu suyun uzaklaştırılması görevi hidrojenindir. Sıkıştırılmış gaz silindirinden bir ejektör yardımı ile hidrojen dolaşımı sağlanır.

Bu tip alkali yakıt pillerinde KOH elektrolit çözeltisi yakıt pili içinde pompalanır. Saf oksijen

yerine havanın kullanıldığı sistemlerde havadaki CO<sub>2</sub>, KOH ile tepkimeye girerek yakıt pilinin performansını olumsuz etkiler.



Bu sebeple en azından havadaki CO<sub>2</sub> 'in yakıt piline girmeden evvel ayrıştırılarak uzaklaştırılması gereklidir. Aksi takdirde potasyumhidroksit potasyumkarbonata dönüşür ve elektrolitteki hidroksil iyonları konsantrasyonu azalırken karbonat iyonları konsantrasyonu artar.

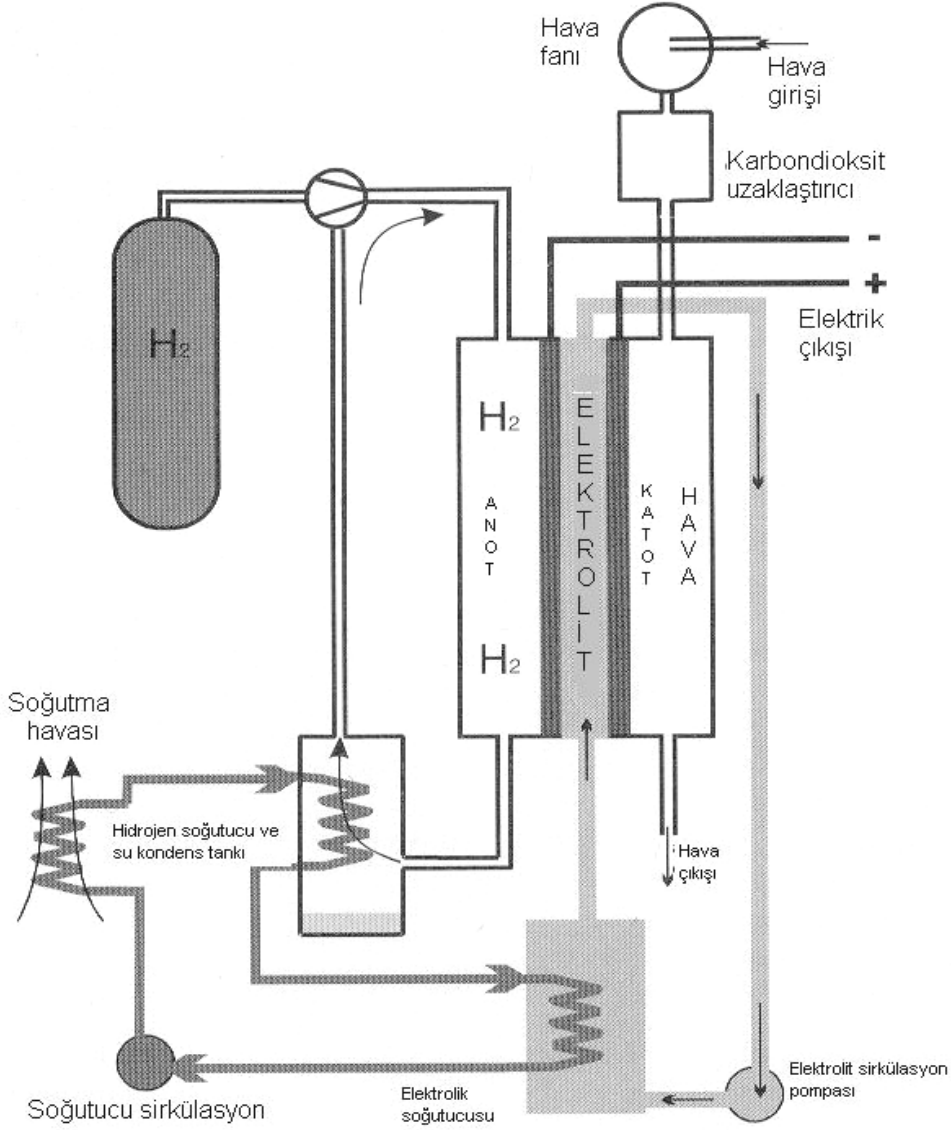
Hareketli elektrolitli alkali elektrolit yakıt pillerinin avantajlarının yanısıra dezavantajları da vardır.

Dezavantajlar ;

- \_ Korozif bir akışkan pompalanmak zorundadır. Bu da fazladan pompa ve boru maliyeti ve fazladan işçilik maliyeti demektir.
- \_ Borulardan sızabilecek KOH risk oluşturur.
- \_ Her konumda çalışabilecek bir sistem oluşturmak zordur.
- \_ En önemlisi, her bir yakıt pilinin elektroliti, yığın (stack) içindeki diğerlerininkilerle karışmamalı ve kısa devre olmamalıdır. Bunun tasarımı da oldukça ciddi bir mühendislik problemidir.

Avantajlar ;

- \_ Dolaştırılan elektrolit aynı zamanda soğutucu görevi üstlenebilir.
- \_ Sürekli karıştırılan elektrolit, katotta harcanan ve anotta bunun iki misli hızla üretilen suyun dengeli dağılmasına yardımcı olur. Katodun kuruması engellenir.
- \_ Eğer üretilen su hidrojen tarafından buharlaştırılmaz ise ve elektrolite geçerse, bir buharlaştırıcı ile buradan uzaklaştırılır .
- \_ Eğer bir şekilde elektrolitin CO<sub>2</sub> ile reaksiyonu sonucu veya bir başka sebepten dolayı elektrolit bozulursa, tamamen boşaltılıp yenilenebilir.



Şekil 5.15 Hareketli elektrolitli alkali elektrolit yakıt pilleri grafiği (Larminie ve Dicks, 2000)

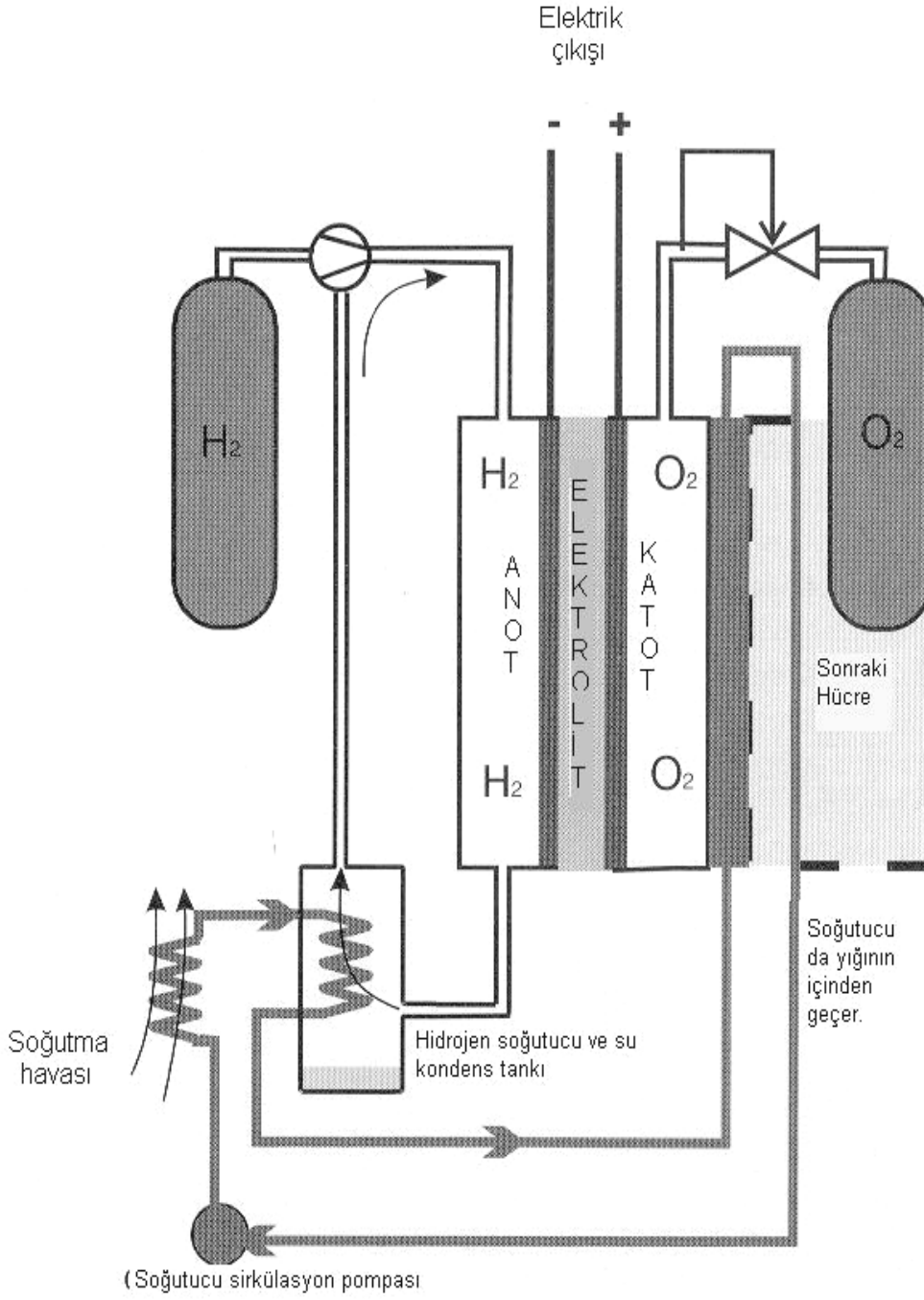
### 5.3.2 Durağan Elektrolitli Alkali Elektrolit Yakıt Pili

Yukarıda anlatılan alkali elektrolit yakıt pilinin bir alternatifi de elektrolitin sabit olduğu, bir matris malzemesinin içinde tutulduğu tiptir. Genellikle KOH elektrolit, asbestten oluşan bir yapının içinde tutulur. Asbest çok iyi poroziteye (gözeneklilik) sahip, yüksek mekanik direnç ve yüksek korozyon direnci olan bir malzemedir. Ancak asbestin kanserojen bir madde olması ve bazı ülkelerde kullanımının yasaklanmış olması bir dezavantaj oluşturur. Bu sebepten halkın kullanabileceği bir sistem değildir.

Bu tip A.E.Y.P'lerinde de hidrojen gazı ürün suyu uzaklaştırabilmek için dolaştırılır. Uzay araçlarında, üretilen su içme suyu olarak kullanılmıştır. Ayrıca soğutma sistemi için su veya başka bir akışkan kullanılır. Örneğin Apollo'da glikol / su karışımı (arabalardaki gibi) kullanılmıştır.

Matrisin içinde tutulan elektrolit aynı proton değişim membranlı yakıt pilindeki gibi, katı haldedir ve her konumda çalışabilir. Elektrolitin pompalanmıyor olması hem daha basit bir tasarıma izin verir hem de kısa devre riski azalır. Fakat elektrolitin sabit olması, aynı P.E.M.Y.P'lerindeki gibi su idaresinde sorunlar çıkarır.

Bu özelliklerinden dolayı uzay araçlarında kullanım için ideal ancak asbestin kanserojen etkilerinden dolayı halkın kullanımı için tehlikelidir.



Şekil 5.16 Durağan Elektrolitli Alkali Elektrolit Yakıt Pili (Larminie ve Dicks, 2000)

### 5.3.3 Çözünmüş Yakıt Alkali Elektrolit Yakıt Pilleri

Bu tip A.E.Y.P'leri günlük kullanım için uygun değildir ve demonstrasyonlar ve okul çalışmaları için kullanılmaktadırlar.

### 5.3.4 Alkali Elektrolit Yakıt Pilleri İçin Elektrotlar

Alkali elektrolit yakıt pillerinin farklı kullanım amaçları, işletme sıcaklıkları, basınçları, maliyet sınırları ve beklenen performansa göre farklı elektrotlar kullanılabilir. Örneğin birazdan anlatılacak farklı elektrot yapılarının herhangi birinde platin katalizör kullanılabilir.

#### \_ Sinterlenmiş Nikel Tozu

Nikelin çok pahalı bir malzeme olmayışı, bu metalin F. T. Bacon tarafından 1940'larda kullanılmasına yol açmıştır. Poroz ( gözenekli ) bir yapı elde edebilmek için nikel tozunun sinterlenerek sertleştirilmesi metodu kullanılmıştır. Reaktan gazlar, elektrolit ve elektrodun aynı anda teması için elektrot iki tabakalı bir yapıda imal edilmiştir. Bu reaktanlar iki farklı boyutta nikel tozu kullanılarak üretilmiş, elektrolit tarafında ıslak bir yapı oluşturacak kadar geniş olan aralıklar ve gaz tarafında daha açık boşluklar bırakılmıştır. Belirtildiği gibi istenirse katalizör de kullanılabilir.

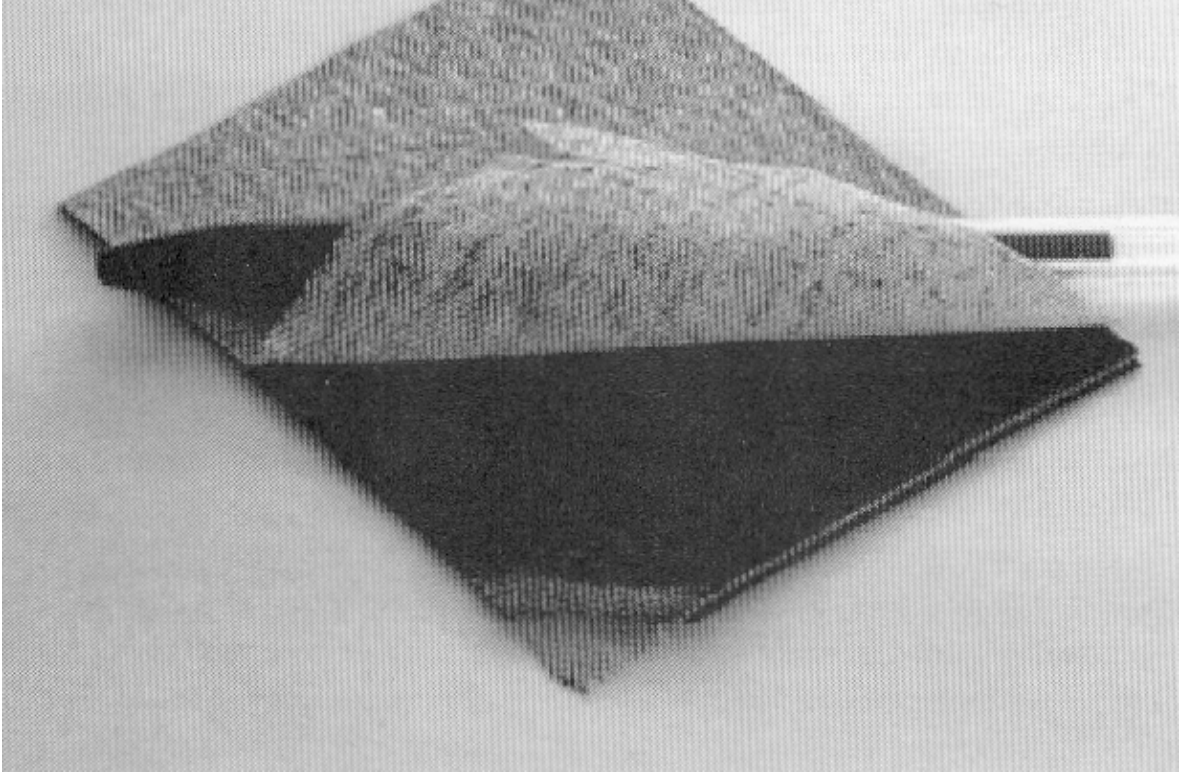
#### \_ Raney Metalleri

1960 'lardan beri oldukça gözenekli ve aktif bir metal olan Raney metalleri kullanılmaktadır. Bu metaller, aktif metalin ( örneğin nikelin ) aktif olmayan (örneğin alüminyum) bir metalle tam bir alaşım oluşturmayacak şekilde karıştırılır. Daha sonra karışım güçlü bir alkali ile reaksiyona sokularak alüminyumun çözünmesi, geriye oldukça gözenekli ve büyük yüzey alanına sahip bir malzeme bırakır. Bu şekilde üretilen birçok elektrot, yakıt pillerinde kullanılmıştır ancak genelde anot için Raney metali katot için ise gümüş elektrot kullanılmıştır.

#### \_ Haddelenmiş ( Rolled ) Elektrotlar

Günümüzde modern elektrotlar PTFE ve karbon destekli katalizör nikel ağ örgü (mesh)

üzerine seriliyor. PTFE, birleştirici olarak kullanılmasının yanı sıra hidrofobik özelliklerinden dolayı elektrotun gereğinden fazla ıslanmasını engeller. Genellikle ince bir PTFE filmi elektrotun yüzeyine eklenir ve elektrolitin elektrottan geçmesi reaktan gazların basınçlandırılmaları gerekmeden, gözenekli metal elektrottaki gibi , önlenbilir. Karbonfiberi de bazen mekanik direnci ve iletkenliği arttırmak için karışıma katılır.



Şekil 5.17 Haddelenmiş ( Rolled ) Elektrotlar (Larminie ve Dicks, 2000)

Katalizör her zaman platin olmak zorunda değildir, örneğin manganez kullanılabilir.

Bu tip elektrotların üretiminde, üzerlerinde bazı değişiklikler yapılmış kağıt üretim makineleri kullanılabilirdiği söylenmektedir. Böylece nispeten ucuz elektrotlar üretilebiliyor. Platin kullanılmaz ise \$ 0.01/cm<sup>2</sup> gibi düşük bir maliyetle üretim yapılabilirken platin eklenir ise bu maliyetin 3 katı kadar bir maliyetle karşılaşılabılır, ki tüm yakıt pili sistemini düşünüldüğünde bu bile oldukça düşük bir maliyettir.

Karşılaşılan problemlerden birisi, PTFE kaplı yüzeyin iletken olmaması ve çift kutuplu plakanın ( bipolar plate ) da kullanılamamasıdır. Bu sebepten dolayı her bir yakıt pili

hücresi birbirlerine kenarlarından bağlanmakta fakat nikel ağ örgü oldukça iletken olduğu için yüzeyden elektronların toplanarak iletilmesini çok büyük kayıplar oluşmadan gerçekleştirebilir. Esas büyük problem CO<sub>2</sub> 'in elektrotta olan etkileridir. CO<sub>2</sub>'in elektrolite olan etkilerine ek olarak belki oluşan karbonat elektrotta zehir etkisi yapıyor olabilir. Bu konuda 1995 yılında Hirschhofer 'ın araştırmaları bulunmaktadır. Araştırmalarında, karbon destekli elektrotların 65 C ve 100 mA/cm<sup>2</sup> için 1600 - 3400 saatlik ömürleri olduğunu fakat aynı çalışma şartlarında sadece havadaki CO<sub>2</sub> uzaklaştırıldığında elektrot ömürleri 4000 saat olmuştur. Bu yüksek bir akım yoğunlu değildir ve ömür, yüksek akım yoğunluklarında daha düşmektedir. Daha düşük sıcaklıklar için ise de, muhtemelen karbonatın çözünürlüğü azaldığı için, ömür azalmaktadır.

Karbon destekli elektrotlar kullanılırken havadaki CO<sub>2</sub>'in beslemeden önce ayrıştırılması gerektiğine kesin gözüyle bakılırken, bir başka yaklaşım olarak da karbon destek kullanmayan bir elektrot üretimi üzerinde durulmaktadır. 1996 yılında Gulzaw , Raney nikelin PTFE ile karışımının metal bir ağ üzerine aynı yöntemle serilmesiyle anot kutbu yapmıştır. Bu yeni elektrotların CO<sub>2</sub>'den etkilenmediği iddia edilmiştir.

### 5.3.5 Problemler ve Gelişmeler

Alkali Yakıt Pillerinde CO<sub>2</sub> 'in yol açtığı sorunlar, bu tip yakıt pillerinin günlük hayatta kullanılabilmelerini büyük ölçüde sınırlamaktadır. Havada ve yakıtın içinde bulunan CO<sub>2</sub>, hidroksitlerle reaksiyona girerek karbonat oluşmaktadır.

- a) OH<sup>-</sup> iyonlarının konsantrasyonlarının azalmasıyla, reaksiyon olasılığı da azalır.
- b) Karbonat tuzunun çok daha zor çözünmesinden dolayı elektrotların gözenekleri tıkanır. (Bu sorun KOH için NaOH için olduğundan daha az olduğu için tercih sebebidir)
- c) Elektrolit iletkenliğinin düşüşü ohmik kayıpları arttırır.
- d) Viskozitenin artması difüzyon olayını azaltır.

Özel uygulamalar için kullanılabilen alkali yakıt pilleri için en ideal reaktanlar elbette saf hidrojen ve oksijendir.

Ahuja ve Green ( 1998 ), kryojenik olarak depolanan hidrojenin ısıtılması ve yakıt pilinin soğutulması için kullanılan ısı değiştirici sistemine havadaki CO<sub>2</sub>'i donduracak bir ekleme yapmışlardır.

Bacon'ın ise bu yakıt pilini yaparken aklında, bugün üzerinde çokça düşünölen, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrikle, gün içinde elektrik arzının düştüğü saatlerde elektroliz yaparak saf hidrojen ve oksijen üreterek alkali yakıt pilinde istenildiği zaman tekrar elektrik üretimi vardı. Böyle bir durumda alkali yakıt pilinin en büyük sorunları çözümlenirken basit tasarımı, ucuz malzemeleri, yüksek performansı, geniş basınç ve sıcaklık çalışma aralığı, onu gündeme taşıyabilir.

#### **5.4 Orta ve Yüksek Sıcaklık Yakıt Pilleri**

Her ne kadar yakıt pillerinin teorik maksimum gerilimleri ve teorik maksimum verimleri sıcaklıkla düşse bile yüksek sıcaklığın getirdiği avantajlar genellikle baskın çıkar.

Avantajlar ;

- \_ Elektrokimyasal reaksiyonların hızlanır, aktivasyon enerjisini azaltır. Değerli metal katalizörlerin kullanımına ihtiyaç kalmayabilir.
- \_ Yüksek sıcaklıkta atılan atık gazlar, farklı birincil yakıtlardan dönüşüm (reformasyon ) yapılarak hidrojen üretilmesinde kullanılabilir.
- \_ Yüksek sıcaklıkta atılan atık gazlar, birleşik ısı-güç sistemlerinde kullanılabilirler. Eğer istenirse atık gazlar türbinlere gönderilebilir ve türbinler de jeneratörü çalıştırarak fazladan elektrik üretirler.

#### **5.5 Fosforik Asit Yakıt Pili ( F.A.Y.P )**

Fosforik asit yakıt pilleri, daha önce anlatılan proton değişim membranlı yakıt pillerine benzer şekilde çalışırlar. Elektrokimyasal reaksiyonlar karbon üzerine yayılmış katalizörlerde gerçekleşir. Aynı proton değişim membranlı yakıt pillerinde olduğu gibi iki elektrotada platin veya platin alaşımları katalizör olarak katılır . Elektrolit olarak %100

fosforik asit kullanılır ve proton değişim membranlı yakıt pillerindeki gibi protonlar iletilir.

### 5.5.1 Elektrolitler

Fosforik asit ( $H_3PO_4$ ), elektrolit olarak kullanılabilen kadar ısı, kimyasal ve elektrokimyasal dengeye sahip tek ticari inorganik asittir. En önemli özelliği ve avantajı ise yakıtın ve havanın içindeki  $CO_2$ 'e karşı toleranslıdır. Bu sebepten dolayı United Technologies şirketi tarafından 1970'lerde enerji santralleri için kullanılacak yakıt pillerine elektrolit olarak seçilmiştir. Fosforik asit, renksiz, viskoz, higroskopik bir sıvıdır. Fosforik asit yakıt pili elektrolitinde bir miktar PTFE ( politetra floretilen ) ile bir arada tutulan silikon karbür taneciklerinden oluşan bir matrisin gözeneklerinde kılcallık etkisiyle tutulurlar. %100 fosforik asidin donma noktası  $42^\circ C$ 'dir ve bu sebepten dolayı bir kez devreye alınan bir fosforik asit yakıt pili, çalıştığı müddetçe bu sıcaklığın üzerinde tutulmalıdır . Yakıt pilinin ömrü boyunca bir miktar fosforik asit buharlaşır. Bu kayıp miktarı , gaz akış hızlarına, çekilen gerilim miktarına ve sıcaklığa bağlıdır. Dolaysı ile çalışma sırasında bir miktar fosforik asit eklemesi yapmak veya elektrik üretimi esnasında kaybolacak fosforik asit miktarı hesaplanarak uygun bir fazlalık ile üretilmelidirler. SiC matris, sadece 1 mikron (0.1 - 0.2 mm) kalınlığa sahip olmasına rağmen yüksek mekanik mukavemete ve reaktan gazların birbirlerine karışmasını engelleme kabiliyetine sahiptir.

### 5.5.2 Elektrot ve Katalizörler

Fosforik asit yakıt pilinin elektrotları da proton değişim membranlı yakıt pillerinde olduğu gibi gazların geçişini sağlar. 1960'larda üretilen elektrotlar PTFE 'e tutturulan platin tanecikleri içeriyordu ve  $9 \text{ mgPt/cm}^2$  gibi yüksek bir miktarda platin kullanılıyordu. Oysa daha sonra üretilen elektrotlar PTFE ile tutturulmuş karbonun üzerine platin tanecikleri dağıtılarak üretilmektedirler. Böylece kullanılan platin miktarı anot için  $0.1 \text{ mgPt/cm}^2$  , katot için ise  $0.5 \text{ mgPt/cm}^2$  değerlerine düşmüş ve aynı zamanda performansları da arttırılmıştır. Bu sistemlerde katalizörün etkileri cinsine, tane boyutlarına ve yüzey alanına bağlıdır. Bugün platin kullanımının bu derece azalmasındaki temel sebep, 2 nm kadar küçük tane boyutlarına ulaşılmış olmasıdır. Böylece platinin en yüksek verimde

kullanılması sağlanmış, elektrotta oluşturulan mikro gözenekler ile iyi bir gaz difüzyonu sağlanmış ve böylece elektrolit - elektrot ara yüzeyinde artmıştır.

PTFE, karbon tanecikleri gözenekli bir yapı oluşturacak şekilde bir arada tutar ve karbon kağıdı da mekanik destek sağlar. Normalde %90 oranında gözenekli bir yapıya sahip olan karbon kağıdı, ağırlıkça %40 PTFE eklenmesiyle %60 oranında gözenekli bir yapıya kavuşur. Suyu dayanıklı karbon kağıdı 3 - 50 mikron büyüklüğünde makro gözenekler ve 3 - 4 nm büyüklüğünde mikro gözenekler içerir ve gaz geçişine izin verir. Bu 3 katmanlı, karbon / PTFE karbon kağıdı yapı elektrolit ve reaktan gaz arasında bir katman oluşturur.

Karbon üzerine platin taneciklerinin dağıtılması işlemleri ve kullanılan teknolojiler büyük oranda şirketlerin sırları olarak açıklanmamaktadırlar ama 1000 - 2000 C gibi yüksek sıcaklıklarda yapılan ısıl işlemler ile karbonun korozyona karşı mukavemeti arttırılmakta olduğu bilinmektedir.

### **5.5.3 Yığın ( Stack )**

Fosforik asit yakıt pilinde yığın ( stack ) çift kutuplu levha ( bipolar plate), anot, elektrolit ve katot sıralamasıyla birleştirilmesiyle ve tekrarlanmalarıyla oluşur. Çift kutuplu levha her bir hücreyi birbirinden ayırırken elektriksel bağlantıyı da sağlar. Ayrıca anoda ve katoda gaz iletimini de sağlar. Kullanılan fosforik asit yakıt pillerinde ortalama 50 veya daha fazla hücre birbirlerine seri olarak bağlanır ve istenilen gerilim değerine ulaşılabilir. Eskiden çift kutuplu levhalar bir grafitin her iki yüzüne de gaz kanallarının açılmasıyla üretilmekteydi. Grafit kanalları talaşlı imal etmek pahalı ama fizibil bir yoldu. Yeni üretilen levhalar ise daha farklı yaklaşımlar ile üretiliyorlar. Ortada ince geçirimsiz karbon levha, reaktan gazları ayırmakta, karbonun iki tarafında ise kanallı gözenekli levhalar bulunmaktadır.

#### 5.5.4 Son Zamanlardaki Gelişmeler ve Çalışmalar

Bugün dünya çapında toplamı 65 MW ' tan daha fazla uygulama veya test aşamasında olan fosforik asit yakıt pili bulunmakta ve bunların birçoğu senelerdir çalıştırıldıkları için yeterli tecrübe ve bilgi edinilmiştir.

Genellikle 50 - 200 kW kapasite aralığında olan sistemler , 1 - 5 MW 'a kadar da olabilmektedir . Hatta Tokyo - Japonya ' da 11 MW 'lık bir santral çalışmaktadır. International FuelCell ve Toshiba tarafından kurulmuş olan bu santral en son kurulan ve en büyük güçtekilerden birisidir.

Fosforik asit elektrot / elektrolit teknolojisi her ne kadar belirli bir olgunluğa erişmiş olsa bile hala alternatif enerji üretim sistemlerine kıyasla pahalıdır . Güç yoğunluğu arttırılmalı ve fiyatlar da düşürülmelidir .

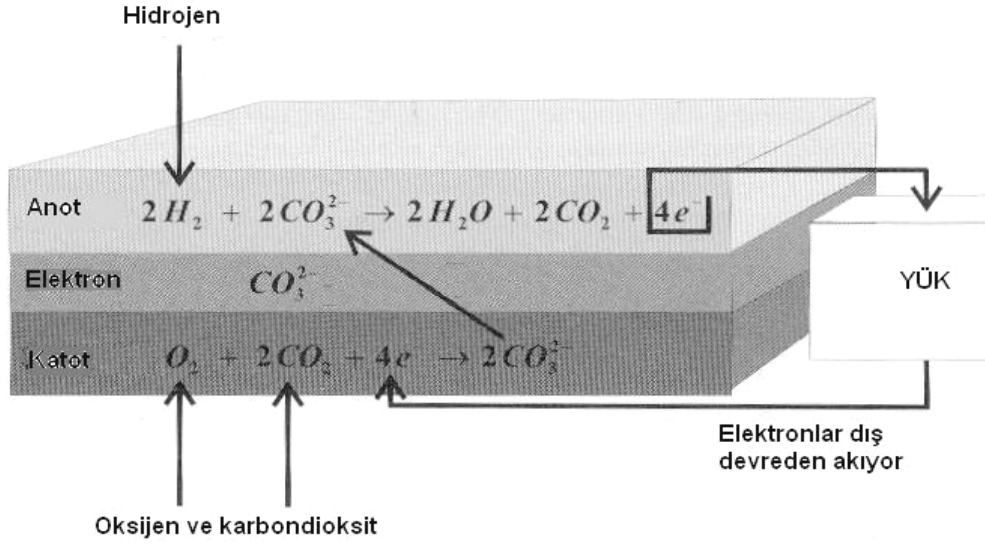
1990 ' ların başında IFC şirketi  $0.188 \text{ W/cm}^2$  güç yoğunluğunda 40000 çalışma saati ömrü olan ve  $400 \text{ \$ /kW}$  maliyetli bir fosforik asit yakıt pili üretmeyi hedeflemiştir . Hedefler aşılmış,  $0.307 \text{ W/cm}^2$  güç yoğunluğu ,  $0.71 \text{ volt / hücre}$  ve  $431 \text{ mA / cm}^2$  akım yoğunluğunda elde edilmiştir. 1991 'de Tokyo Electric Power Company 'nin 11 MW 'lık santralindeyse  $0.75 \text{ volt / hücre}$   $190 \text{ mA / cm}^2$  akım yoğunluğuna ulaşılmıştır. Bu arada da 4500 saat testte  $4 \text{ Mv / 1000 saat}$  performans düşüşü olmuştur .Mitsubishi Electric Corp. ise  $300 \text{ mA / cm}^2$  ' de  $0.65 \text{ mV}$  elde etmiş ve  $2 \text{ mV / 1000saat}$  'lik performans düşüşü olmuştur (10000 saat test sonucu).

Katalizör araştırmalarında da birçok şirket CO 'e dayanıklı malzemeler araştırmaktalar . Diğer önemli araştırma konuları ise daha iyi gaz difüzyon elektrotu tasarımı ve karbon korozyonuna daha dayanıklı malzeme üretimidir .

## 5.6 Erimiş Karbonat Yakıt Pili (E.K.Y.P)

### 5.6.1 Çalışma Prensibi

Erimiş karbonat yakıt pilinin elektroliti erimiş alkali metal karbonatlarından oluşur . Genellikle lityum - potasyum karbonatları kullanılır. Elektrolit,  $\text{LiAlO}_2$  'nin seramik bir matrisinde tutulur . Yüksek sıcaklıklarda (600 - 700 C) alkali karbonatlar , yüksek iletkenlikte erimiş tuz oluştururlar ve karbonat iyonları iyon iletimini sağlar.

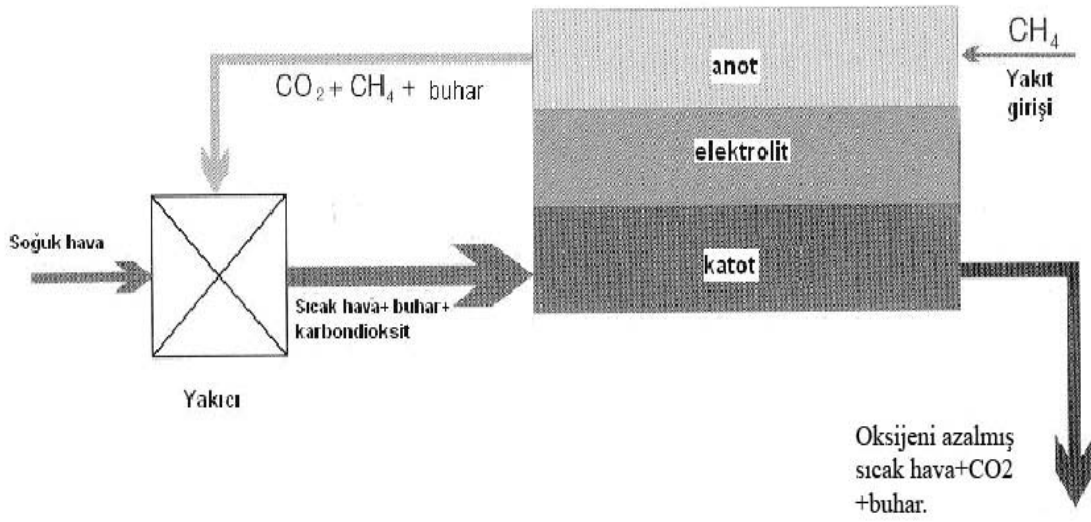


Şekil 5.18 Erimiş karbonat yakıt pili ( E.K.Y.P ) çalışma prensibi (Larminie ve Dicks, 2000)

Şekil 5.18 'de görüldüğü gibi diğer tip yakıt pillerinin tersine, katoda oksijen ile birlikte karbondioksit de beslenmelidir ki karbonat iyonları oluşsun ve anot ile katot arasındaki iletim sağlanabilsin. Anotta karbonat iyonları tekrar karbondioksite dönüştürülür. Böylece katottan anoda doğru karbondioksit döngüsü olduğu çok açıktır, 2 Faraday yüke ( 2mol elektron ) karşı 1 mol karbondioksit iletilir. Genellikle anotta üretilmiş olan karbondioksit, katoda gönderilir. Her ne kadar bu olay sistemi karmaşıklaştıran bir dezavantaj gibi görünse de daha büyük faydaları vardır. Öncelikle anot egzoz gazı bir yakıcıya gönderilir ve

kullanılmamış hidrojeni yakar veya genel olarak dönüşmemiş yakıtı karbondioksite çeviririz.

Yakıcıdan alınan gaz temiz havayla birleştirilip katoda verilir . Böylece hem temiz havanın ısıtılması sağlanırken hem de yakıt pilinde dönüştürülemeyen ve doğrudan elektrik enerjisi üretilmeyen yakıtın yakılması sağlanır .



Şekil 5.19 İç dönüşümün olduğu erimiş karbonat yakıt pili ( E.K.Y.P ) çalışma prensibi (Larminie ve Dicks, 2000)

Bir başka yöntemde ise membranlı bir ayırıcı ile anot egzoz gazından karbondioksit ayrıştırılır ve katoda gönderilir . Bu yöntemin avantajı ise kullanılmamış yakıtın anoda veya bir başka kullanım alanına götürülerek kullanılmasıdır .

Erimiş karbonatlı yakıt pillerinin yüksek sıcaklıkta çalışıyor olmasından dolayı fosforik asit yakıt pilinde ve proton değişim membranlı yakıt pilinde olduğu gibi çok değerli metal katalizörlere gerek kalmaz. Anot elektrotunda nikel, katotta ise nikel oksit katalizörler kullanılır. Erimiş karbonat yakıt pilinin bir diğer avantajı ise karbon monoksitin elektrokimyasal olarak dönüştürülebilmesi ve hidrokarbon yakıtlara iç dönüşüm ( internal reforming ) yapılabilmesidir. İç dönüşüm, katı oksit yakıt pilleri ve erimiş karbonat yakıt pilleri için diğerlerine göre avantajdır. İç dönüşümde, yakıt yakıt piline girmeden

önce buhar eklenir. Yakıt pilinin içinde yakıt ve buhar, uygun katalizör etkisiyle reaksiyona girerler. Endotermik reaksiyon için gerekli ısı ise yakıt pilinden sağlanır. (Şekil 5.19)

Erimiş karbonat yakıt pilinin yüksek çalışma sıcaklığı daha yüksek toplam verim ve kullanılan yakıt cinsinin sınırlamalarının az olması gibi avantajlar getirirken korozyona dayanıklı malzeme ve yakıt pilinin ömrünün uzatılması gibi bazı zorlukları da beraberinde getirir.

### 5.6.2 Elektrolit

Günümüzde ileri teknoloji ürünü erimiş karbonat yakıt pili elektrolitleri ağırlıkça %60 karbonatın %40 LiOAlO<sub>2</sub> matris içine hapsedilmesiyle üretilirler. LiOAlO<sub>2</sub> , çapı 1 mikrondan küçük liflerden oluşmaktadır. Başka malzemeler de eklenebilir fakat bunların çoğu şirketlerin sırları olduğu için açıklanmamaktadır . 1990 'lara kadar matris, sıcak pres yöntemiyle karo (tile) içine üretilirdi ve bu hala elektrolit karosu olarak anılır. Günümüzde ise matris , elektronik ve seramik endüstrilerinde de kullanılan döküm (tape casting) metodu ile üretilmektedir . Bu işlem seramik malzemenin bir çözücü içine dağıtılmasıyla yapılır . Daha sonra bu malzeme , hareketli , yumuşak bir yüzeye ince bir film tabakası olarak dökülür . Gerekli kalınlık , ayarlanabilir bir makas düzeneği ile ayarlanır . Kuruduktan sonra hava ortamında ısıtılır ve organik bağlayıcılar 250 - 300 C 'da yanar . Yarı sert yeşil yapı , daha sonra yığının içine yerleştirilir .

Bu metot ile büyük yüzey alanlı malzemeler üretilebilir. Yöntem, katot ve anot malzemeleri için de uygulanabilir ve 1 m<sup>2</sup> 'lik elektrotlardan yığınlar üretilebilir .

Elektrolitin, özellikle de seramik matrisin, ohmik direnci, diğer yakıt pili tipleriyle karşılaştırıldığında, işletme voltajına önemli etkileri bulunur. Normal işletme şartlarında erimiş karbonat yakıt pillerinde elektrolit, ohmik kayıpların % 70 'inden sorumludur. Ayrıca kayıplar elektrolitin kalınlığına da bağlıdır. (  $V_f = 0.533 * (d_1 - d_2)$  ) formülünde  $V_f$  , potansiyel farkını simgelerken  $d_1$  ve  $d_2$  ise cm cinsinden farklı elektrolit kalınlıklarını simgeler . Bu formülden hareketle elektrolit kalınlığı 0.025 cm olan bir yakıt pili, benzer özelliklerde fakat elektrolit kalınlığı 0.18 cm olan bir yakıt pilinden yaklaşık 82 mV daha yüksek işletme potansiyeliyle çalışır. Döküm (Tape casting) metodu kullanılarak elektrolit matrislerini 0.25 - 0.5 mm

kalınlıkta bile üretilebilir ve bu da büyük bir fayda sağlamaktadır. Fakat ince malzemenin düşük dirençlerine karşın dayanım süreleri ve stabiliteyi düşük olabilmektedir.

Erimiş karbonat yakıt pili elektrolitlerinde bilinmesi gereken önemli bir nokta da diğer bütün yakıt pili tiplerinden farklı olarak. E.K.Y.P 'nde son hazırlık aşaması, bütün yığın (stack) elemanları yerlerine monte edildikten sonra başlar . Elektrotlar, elektrolitler ve gözeneksiz akım toplayıcılar ve çift kutuplu levhalar ( bipolar plate) yerlerine yerleştirilmiştir. Tüm yapı yavaşça karbonatın ergime sıcaklığına ( 450 C 'nin üstüne ) ısıtılır ve böylece karbonat seramik matris içine absorblanır . Absorbsiyon işlemi sonucunda yığın elemanları önemli bir miktar büzülür. Bu olay için önceden yığının mekanik tasarımında önlemler alınmalıdır. Ayrıca anoda, yakıt pili işletme sıcaklığına ısıtıldıkça, indirgeyici gaz beslenmelidir . Böylece nikel anot indirgenmiş halde kalır.

### 5.6.3 Elektrotlar

\_ Anot

Erimiş karbonat yakıt pillerinde anot elektrotları genellikle gözenekli , sinterlenmiş Ni / Cr - Ni /Al alaşımlarından yapılır. 0.4 - 0.8 mm kalınlıkta ve % 55 - 75 gözeneklilikte olurlar. Toz halindeki malzemenin sıcak preslenmesiyle veya döküm (tape casting) metoduyla üretilir ve sonra sinterlenir. Nikelin yakıt pili çalışırken sinterlenmesini azaltmak için % 10 - 20 krom eklenir. Bu olay erimiş karbonatlı yakıt pili anodunda karşılaşılabilecek önemli bir sorun olabilir. Gözenek çapları büyür , temas yüzeyi azalır ve mekanik deformasyonlar olur. Ancak eklenen krom da zamanla elektrolitteki lityum ile reaksiyona girip elektrolit kaybına sebep olur . Bu yeni sorun ise bir noktaya kadar alüminyum eklenerek giderilir. Alüminyum eklenmesiyle anodun sürünme (creep) mukavemeti artırılır ve elektrolit kaybı engellenir. Elektrolit kaybının engellenmesinin sebebinin nikel parçacıklar arasında  $LiAlO_2$  oluşması olduğu düşünülmektedir. Her ne kadar Ni / Cr - Ni /Al alaşımının anot için ticari olarak uygunluğu kabul edilse bile yüksek maliyeti sebebiyle araştırmacılar yeni malzemeler üzerinde çalışmaktalar. Bir miktar nikelin bakır ile değiştirilmesi , fiyatı düşürücü bir etki yapabilir ancak bütün nikelin bakırla değiştirilmesi fizibil olmayan bir işlem olur çünkü bakırın nikelden daha fazla sürünme (creep) sorunu vardır. Yakıtın içindeki sülfüre karşı

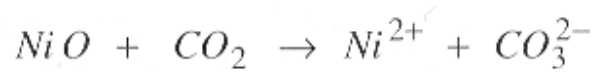
toleransın artırılması doğrultusunda da bazı seramik anotlar araştırılmaktadır. LiFeO<sub>2</sub> ( Mn ve Nb içeren ve içermeyen ) malzeme 1992 yılında Kucerca tarafından denenmiştir. (Larminie ve Dicks, 2000)

Erimiş karbonatlı yakıt pillerinin anot elektrotu sadece elektrokatalitik bir işlem yapmaz. E.K.Y.P ' lerinde anot reaksiyonu, yüksek sıcaklıktan dolayı, nispeten hızlı olduğu için büyük yüzey alanı gerekmez. Bu yüzden anotta biraz fazla miktarda erimiş karbonatın bulunması kötü etki yapmaz ve uzun süreli kullanımlarda yakıt pili için gerekli karbonat takviyesini sağlar.

Önceleri üretilen E.K.Y.P ' lerinde anot ile elektrolit arasında kabarcık bariyeri (bubble barrier) adında bir katman eklenmekteydi. Bu ince bir Ni veya LiAlO<sub>2</sub> tabakası içerir ve eş büyüklükte, küçük gözenekler içerirdi. Böylece elektrolitin anoda geçmesini ve aynı zamanda da gaz geçişini (gas cross-over) engellerdi. Zaten gaz geçişi tüm sıvı yakıt pillerinde karşılaşılan bir sorundur. Günümüzde elektrolite yakın bölgede küçük gözenekler, yakıt gazı kanallarına yakın bölgede ise daha büyük gözenekler bulunan yakıt pilleri üretilmektedir. Fakat uzun sürelerde elektrolit kaybının önüne hala geçilememiş olup araştırmalar devam etmektedir.

#### \_ Katot

Erimiş karbonatlı yakıt pilinin önemli sorunlarında birisi de nikel oksit katot malzemesinin erimiş karbonat içinde çözünebilir olmasıdır. Çözünmeyle birlikte elektrolitte nikel iyonlar oluşur. Daha sonra bu iyonlar anoda doğru yayınırlar. Nikel, elektrolitte çökeler ve kısa devreler oluşturarak yakıt pilinde güç kaybına yol açar. Hatta çökelmiş nikel, daha fazla nikelin katottan ayrılıp çözünmesini tetikleyebilir. Nikel çözünmesi, yüksek CO<sub>2</sub> kısmi basınçlarında daha da ciddi bir sorun yaratır çünkü ;



reaksiyonuna yol açar. Bu sorunun azaltılması için yapılan çalışmalarda elektrolitte kullanılan karbonatların asidik olmaması, daha temel alkali metal karbonatlar olmasının çözünmeyi azalttığı görülmüştür.

$\text{Li}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$  ( asitlik sağa doğru artar )

En düşük çözünme ise karışımlarda olmaktadır ( %62  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  + %38  $\text{KCO}_3$  veya % 52  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  + %48  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) Ayrıca CaO, SrO ve BaO eklemesinin de yararlı olduğu görülmüştür.

Böylece nikel oksit katotlarda nikel çözünmesi ;

- temel karbonatların kullanımıyla
- atmosfer basıncında çalışılarak ve katotta  $\text{CO}_2$  kısmi basıncını düşük tutarak
- kalın bir elektrolit matris ile  $\text{Ni}^{+2}$  iyonları difüzyon yolunu uzatarak

minimum düzeyde tutulur.

#### 5.6.4 Gözeneksiz Elemanlar

Erimiş karbonatlı yakıt pillerinin çift kutuplu levhaları ( bipolar plate ) genellikle ince bir paslanmaz çelik levhadan üretilirler. Levhanın anot tarafı nikel ile kaplanır. Böylece anodun indirgeyici yapısına karşın kararlı bir yapı oluşturulur ve akım iletimini sağlar. Yakıt pilinin gaz sızdırmaması için matrisin içindeki elektrolitin çift kutuplu levhaya, her bir hücrenin elektrokimyasal aktivite bölgesinin sınırları dışından temas etmesi sağlanır. Böylece ıslak conta mantığı ile gaz sızdırmazlığı sağlanır. Bu ıslak contanın paslanmaz çelikte korozyona yol açmaması için çift kutuplu levha ince bir alüminyum tabakayla kaplanır. Bu koruyucu bir  $\text{LiAlO}_2$  tabakası oluşturur. (Al ile  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  reaksiyona girer) Çift kutuplu levha tasarımları kendi aralarında birçok farklılıklar içerirler ve tam bir mühendislik problemi oluştururlar.

## 6. BATARYALAR

Yenilenebilir enerji kaynaklarından doğrudan veya dolaylı olarak elektrik enerjisi üretilebilmesi, bunların otomotiv gibi mobil, sabit olmayan uygulamalarda kullanılabilmesi açısından bir çözüm olabilir. Esasen her türlü birincil enerji kaynağından üretilebilen elektrik enerjisinin en büyük dezavantajı olan depolanamamak (en azından henüz istenen miktarlarda ve şartlarda) sorununun çözümü otomotiv uygulamaları için çok hayati bir konudur. Elektrik enerjisini depolanabilmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının en büyük dezavantajlarının ortadan kaldırılması yönünde yardımcı olma potansiyeline sahiptir. Elektrik enerjisinin depolanabilirliği üzerine tüm dünyada yoğun çalışmalar sürdürülmektedir. Bu tezin konusu kapsamına giren, ulaşım araçlarının hareketi ve üzerlerinde taşıdıkları enerji harcayan cihazların çalıştırılması için gerekli enerji de ancak bir şekilde araç üzerinde depolanabildiği sürece uygun ve günlük hayatta uygulanabilir olabilecektir.

Günümüzde ulaşım araçlarının çok büyük bir kısmı ihtiyaç duydukları enerjiyi, enerjinin depolandığı petrol türevleri ile sağlamaktadırlar. Eğer gelecekte yakıt pilli araçlar da yollara çıkabilirlerse, ihtiyaç duyacakları enerji, sıvı veya gaz fazında bir yakıtta depolanacaktır. Ancak içten yanmalı motorlu araçlardan yakıt pilli araçlara geçişte, hatta yakıt pilli araçlara hiçbir zaman geçilemese bile, çok büyük bir potansiyele sahip oldukları düşünülen elektrikli ve / veya hibrit elektrikli araç teknolojileri bulunmaktadır. Elektriğin yenilenebilir kaynaklardan, daha doğrusu her türlü birincil enerji kaynağından üretilebilir olması, kaynaktan bağımsız bir enerji sistemi kurulmasına olanak verecektir. Ancak bu noktadaki kilit teknoloji akü-batarya teknolojisidir ve günümüzde halen elektrikli araçların fosil yakıtlarla çalışan içten yanmalı motorlu araçların yerlerini alabilmelerine yetmemektedir.

Elektrik ihtiyaçlarını bataryalarından karşılayan elektrikli araçlar genel olarak iki çok önemli sorunla karşılaşmaktadırlar. Birincisi bataryaların sahip oldukları düşük enerji yoğunlukları (Çizelge 6.1) ve ikincisi ise bataryaların, akaryakıtlı araçların dolun sürelerine nazaran uzun şarj süreleridir. Şarj süresinin kısaltılması için hızlı şarjların yapılabilmesi için altyapı kurulması da altyapı maliyetlerini arttırmakta ve bazen de batarya ömrünü kısaltabilmektedir. Hem yakıt pilli hem de bataryalı elektrikli araçlar (BEA) bu dezavantajların yanı sıra birçok avantajı da beraberlerinde getirirler. Bu avantajların da en öncelikli olanları sıfır emisyonla sahip olmaları,

fosil kaynaklardan bağımsız olabilmeleri ve basit sistemler oluşturulabilmesi gelmektedir. Ayrıca ister yakıt pilli ister batarya elektrikli araçlar olsun, elektrik motoru sayesinde sessiz ve rahat sürüş avantajları sağlamaktadırlar. (Dönitz vd., 1997)

Çizelge 6.1 Bazı enerji kaynaklarının özgül enerji değerleri (Karahana, 2004)

Enerji Kaynağı	Nominal Özgül Enerji (Wh/kg)
Benzin	12500
Doğal gaz	9350
Metanol	6050
Hidrojen	33000
Kömür	8200
Kurşun asit batarya	35
Lityum polimer batarya	200

### 6.1 Bataryaların Çevreye Etkileri

Elektrikli araçlarda kullanılacak bataryaların ve komponentlerinin üretimleri ve geri dönüşüm süreçlerinde hem enerji harcanmakta hem de atık üretimine yol açmaktadır. Fakat bataryalı elektrikli bir aracın çevreye etkileri en fazla kullanımı süresince oluşmaktadır. Genellikle araçların bataryaları kullanımları süresince şebeke hattından şarj edilirler. Bu işlemin çevreye etkileri, şebeke elektriğinin nasıl üretildiğiyle, yani ülkenin enerji açılımları ve enerji politikalarının nasıl biçimlendirildiği ile doğrudan alakalıdır. Ülkelerin fosil yakıtlara bağımlılıkları ve kullanılan enerji dönüşüm teknik ve teknolojileri üretilen karbondioksit eşdeğeri emisyonların miktarını belirler. Toplam elektrik üretiminde fosil yakıtların oranı İsviçre’de neredeyse sıfırken, Fransa’da %11, Almanya’da %59 olabilmektedir. Görüldüğü gibi aynı bataryalı elektrikli aracın çevreye etkileri, bulunduğu ülkeden ülkeye değişim gösterebilmektedir.

Yapılan bir çalışmada bataryalı elektrikli bir aracın üretimi, geri dönüşümü ve 10 yıllık kullanımı boyunca karbondioksit eşdeğeri emisyonları hesaplanmıştır. 1000 kg ağırlığında sodyum nikel klorid bataryalı bir elektrikli aracın senede 12000 km yol kat etmesi düşünülmüştür. Örneğin Fransa’da olduğu varsayılan bu araç, üretim ve geri dönüşüm sürecinde 871 kg karbondioksit

eşdeğeri emisyon üretilmiştir. 10 yıl boyunca kullanım süresinde 2357 kg emisyon üretilmiştir. Yani benzer bir içten yanmalı motorlu aracın %25'i kadar emisyon üretilmiştir. Burada kullanımın gerçekleştiği ülke çok önemlidir.

Aynı çalışmada araç Almanya'da kullanılsaydı, 10 yıllık kullanım süresince 11411 kg karbondioksit eşdeğeri emisyon üretilirdi. (Keil ve Steiner, 1996)

## 6.2 Batarya Tipleri Hakkında Kısa Bilgiler

Son 10 yıldır tüketim sektöründe elektrik enerjisine duyulan ihtiyaç hızla artmamaktadır. Çok geniş bir ürün yelpazesine hitap eden bu sektörde uzun ömürlü, düşük güçlü sağlık gereçlerinden, 10'larca ve 100'lerce watt gücünde taşınabilir elektronik cihazlara ve hatta 100'lerce kilowatt gücünde elektrikli araçlara kadar geniş güç ve enerji ihtiyacı aralığında ürünler için enerji depolamak gerekmektedir. Ancak bu tezin konusu sadece ulaşım araçlarını kapsadığı için bu konu odaklanılacaktır.

Günümüzde kullanılan ve yararlanılan birçok teknik ve teknolojik gelişme, ürün ilk önce askeri amaçlar düşünülerek tasarlanmış, yıllar içinde değişerek ve/veya gelişerek sivil uygulamalarda hayat bulabilmiştir. Bunun sebeplerine fazla değinmeden birinden bahsedilebilir. Normal şartlarda, sivil uygulamalarda geliştirilen - geliştirilecek tüm ürünler ticari olarak bir kazanç sağlamak zorundadır ancak bu durum savunma ve savaş sanayisi için her zaman geçerli değildir. Esasen sonuçta askeri teknolojiler de onları geliştiren firmalara olduğu gibi, ülkelere de büyük kazançlar sağlamaktalar. Ancak bu bir ilk öncelik değildir veya en azından birçok zaman olmayabilir. Elektrikli (yakıt pili, batarya elektrikli ve/veya farklı yapılaraya sahip hibrit elektrikli) araçların günümüzde yaygın olarak kullanılan içten yanmalı araçlara göre ilk maliyetlerinin daha yüksek olması bu açıdan önemlidir.

Tamamıyla elektrikli askeri araç konsepti ilk olarak 1980'lerde Amerika Birleşik Devletlerinde, United Defense firması tarafından yönlendirilmiştir ve diğer tüm firmalardan daha fazla çalışma bu şirket tarafından gerçekleştirilmiştir. Tekerlekli ve paletli olarak prototip araçlar yapılmıştır. Ülkemizde de Türk Silahlı Kuvvetleri tarafından uzun yıllardan beri kullanılan M113 zırhlı personel taşıyıcı (ZPT) için, Amerikan Deniz Piyadelerinin AA7V Amfibik çıkarma aracı için ve

M2 Bradley zırhlı muharebe aracı için elektrikli transmisyon uygulamaları yapılmıştır. 1999 – 2002 arasında United Defence, Lancer aracını ve daha sonrasında da 3 hibrit elektrikli araç daha geliştirmiştir. (U.S Department of Defense, Militarily Critical Technologies List, Section 7: Energy Systems Technology)

Bu konuda ülkemizde de bazı çalışmaların yapıldığı, detaylı olmasa da, bilinmektedir. Tübitak-MAM ve FNSS kurumlarının çalışmaları bulunmaktadır.

### 6.3 Bataryaların Genel Yapısı

Bataryalar kimyasal enerjiden elektrik enerjisi üreten cihazlardır. Bir hücre, temel olarak pozitif ve negatif elektrotlardan, elektrolitten ve elektrotları birbirlerinden ayıran bir ayırıcıdan oluşmaktadır. Bataryanın çalışması esnasında elektronlar, yani elektrik akımı, dış devre yoluyla bir elektrottan diğerine hareket ederler.

Genel olarak bir bataryayı oluşturan elemanları kısaca açıklamak faydalı olacaktır.

**Pozitif elektrot:** Pozitif elektrot bataryanın deşarjı esnasında dış devre üzerinden gelen elektronu alarak indirgenir. Kurşun oksit ( $PbO_2$ ), nikel oksihidroksit gibi malzemeler pozitif elektrotlarda kullanılan malzemelere örnek olabilir. Pozitif elektrot malzemeleri katı fazda olmaktadır.

**Negatif elektrot:** Negatif elektrot bataryanın deşarjı esnasında dış devreye elektron vererek yükseltgenen metal yada alaşımdır. Kurşun (Pb), kadmiyum (Cd) gibi bataryanın içinde katı fazda olan malzemeler kullanılır.

**Elektrolit:** Elektrolit, pozitif ve negatif elektrotlar arasında iyon iletimini sağlayan ortamdır. Elektrolit iyi bir iyon iletimi sağlarken elektronların geçişine izin vermemelidir. Aksi takdirde batarya kendi kendine deşarj olabilir. Elektrolit, batarya tipine göre sıvı, jel veya katı fazda, asidik veya alkali olabilmektedir. Örneğin kurşun asit ve nikel kadmiyum bataryalar sıvı elektrolite sahipken lityum polimer bataryalar katı, nikel metal hidrür ve lityum iyon bataryalar ise jel elektrolit içerirler.

**Ayırıcı:** Ayırıcı, elektrotları birbirlerinden ayıran bir yapıdır. Ayırıcı, elektrolitteki iyon hareketine izin vermelidir.

Bataryalar farklı sınıflamalara tabi tutulabilmektedir. Günlük kullanımda son kullanıcılar açısından bakıldığında bataryanın yapısı veya kullanılan malzemelerden çok, bataryayı ne kadar

süre kullanabileceği önemli bir özelliktir. Bu sebepten dolayı batarya sınıflamalarından en yaygın olarak kullanılan sınıflama şekli, şarj edilebilir ve tek kullanımlık, yani şarj edilemeyen bataryalar olmak üzeredir. Şarj edilemeyen bataryalar ulaşım araçlarında pek kullanılabilir değildir ve dolayısıyla bu tezin kapsamına girmemektedirler. Konu kapsamına giren yakıt pilli, hibrit elektrikli ve/veya elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların hepsi şarj edilebilir özelliktedir.

#### **6.4 En Yaygın ve Gelecek Vaad Eden Batarya Tipleri**

- Kurşun asit ( klasik kurşun asit ve VRLA-valf ayarlı kurşun asit bataryalar olarak ikiye ayrılabilir)
- Nikel kadmiyum
- Nikel metal hidrür
- Lityum iyon
- Lityum polimer
- Sodyum sülfür vb.

##### **6.4.1 Kurşun Asit Batarya (SLA-VRLA)**

1800'lü yıllarda keşfedilen kurşun asit bataryalar, ticari olarak kullanılan ilk şarj edilebilir bataryalardır. Kurşun asit batarya, günümüze kadar elektrikli araç uygulamalarında en sık kullanılan batarya tipi olmuştur. Şarj edilebilir bataryalar arasında en düşük enerji yoğunluğuna sahiptirler ve düşük ortam sıcaklıklarında performans kayıpları fazladır.

Kurşun asit bataryalar üzerine yapılan çalışmalar sonucu bazı avantajlar sağlayan valf ayarlı tip kurşun asit (VRLA) bataryalar geliştirilmiştir. Esasında telekom, askeri tesisler vb. stasyonier uygulamalarda kullanılan VRLA bataryalar, ulaşım taşıtlarında kullanılabilirler.

##### **6.4.2 Nikel Kadmiyum Batarya (NiCd)**

1899 yılında Waldmar Junger tarafından keşfedilen NiCd bataryalar üzerine gelişmeler 1900'lerin ikinci yarısında gerçekleşmeye başlamıştır. Nikel kadmiyum bataryalar, günümüzde çevrim ömrü ve güvenilirlik açısından en iyi bataryalar olarak kabul edilmektedirler. Bu sebeple

ülkümüzde ve tüm dünyada askeri kullanıma sahip birçok cihazda ve uçak, helikopter gibi araçlarda tercih edilmektedirler. Ülkemizde, Kayseri’de bulunan Aspilsan tarafından askeri cihazlar ve uçaklarımız için üretilmektedir. Otomotiv uygulamalarında, elektrikli araçlarda da kullanılan bir bataryadır ancak kadmiyumun çevreye zararlı bir materyal olması da dezavantajdır.

#### **6.4.3 Nikel Metal Hidrür Batarya (NiMH)**

Çevreye zarar veren bir materyal içermeyen NiMH bataryalar, NiCd bataryalara göre yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Ancak NiCd bataryaların iki katı kadar fazla kendi kendine deşarj olurlar.

#### **6.4.4 Lityum İyon (Li-ion)**

1970 yıllarında ilk şarj edilemeyen lityum iyon bataryalar geliştirilmiştir. 1980’lerde ise şarj edilebilir lityum iyon bataryalar geliştirilmesine başlanmıştır. İlk olarak Japonlar tarafından kamera ve dizüstü bilgisayarlar için geliştirilmişlerdir. Li-Ion bataryalar, daha ağır olan NiMH bataryalara karşın yüksek fiyatlarına rağmen pazara girmişler ve bugün hafif olmaları ve uzun ömürleri sayesinde satış adetlerinde ilk tercih olabilmişlerdir. 2000 yılında üretim adetlerinde yakalanan performans ile NiMH bataryalar ile fiyat bazında da rekabet etmeye başlamışlardır. Halen Japonya’nın pazar hakimiyeti sürse de pazardaki talebi ve kar fırsatlarını gören bazı ülkeler, özellikle Çin ve Güney Kore olmak üzere, daha ucuz üretici ülkeler olarak belirlemekteler. Fransa, havacılık sektöründe kullanılabilecek büyük, silindirik Li-Ion hücreler üzerine yoğunlaşırken ABD, savunma sanayi için 300Ah’dan yüksek kapasiteli sistemler geliştirmektedir. Günümüzde dizüstü bilgisayarlar gibi birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır ancak, bu tip bataryaların kullanıldığı otomotiv uygulamaları bulunsa da halen otomotivde güvenle kullanılabilecek duruma gelinebilmiştir. (U.S Department of Defense, Militarily Critical Technologies List, Section 7: Energy Systems Technology)

Lityum, tüm materyaller arasında hemen hemen en hafif olanıdır ve elektrokimyasal potansiyeli yüksektir. Lityum iyon piller hem yüksek enerji yoğunluğuna hem de yüksek gerilime sahiptir. Çizelge 6.2’de görüldüğü gibi, lityum iyon pillerin hücre gerilimi yüksek olduğu için tek bir hücre ile cihaz çalıştırabilmektedirler. Örneğin cep telefonlarımızda tek hücre lityum iyon pil yeterli olabilmektedir. Ayrıca kendi kendine deşarj hızı da NiCd ve NiMH bataryalara göre düşüktür.

Çizelge 6.2 Elektrikli araç bataryalarının malzemeleri (Westbrook, 2001)

Batarya tipi	Açık devre gerilimi (V)	Anot malzemesi	Katot malzemesi	Elektrolit
Kurşun asit	2.1	PbO <sub>2</sub>	Pb	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Nikel demir	1.2	Ni	Fe	KOH
Nikel çinko	1.7	Ni	ZnO <sub>2</sub>	KOH
Nikel kadmiyum	1.2	Ni	Cd	KOH
Nikel metal hidrür	1.23	Ni	Metal hidrür	KOH
Sodyum sülfür	2.1	S	Na	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Sodyum nikel klorür	2.1-2.2	NiCl	Na	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Lityum demir sülfat	1.75-2.1	FeS <sub>2</sub>	LiAl veya LiSi	LiCl/KCl
Lityum polimer	2.0-2.5	Li	V <sub>6</sub> O <sub>13</sub> + asetilen	(POE) <sub>12</sub> LiClO <sub>4</sub>
Lityum iyon	3.6		O <sub>2</sub>	Organik

#### 6.4.5 Lityum Polimer Batarya (Li-polimer)

Lityum polimer bataryalar, elektrolit olarak katı polimer kullanmaları bakımından diğer bataryalardan farklıdır. Bu polimer elektrik akımını iletmemekte ancak iyonların geçişine izin vermektedir.

Hem lityum iyon hem de lityum polimer bataryalar, yüksek enerji yoğunlukları sayesinde elektrikli araçlar için en uygun adaylar olma potansiyelindedirler. Ancak bunun gerçekleşmesi için daha yüksek güvenlik standartlarını yakalamaları ve daha ucuza satılabilmeleri gerekmektedir.

#### **6.4.6 Sodyum Sülfür Batarya (NaS)**

Sodyum sülfür batarya ilk olarak Ford Araştırma Laboratuvarında 1960'lı yıllarda elektrikli araçlarda gerekli enerji ve güç yoğunluğunu sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Elektrikli araç uygulamalarında yavaş yavaş kullanılmaya başlanmış ve birçok Avrupalı, Amerikan ve Japon firmaları tarafından prototip araçlarında kullanılmaktadır.

Batarya genel olarak negatif sodyum elektrodundan ve pozitif sülfür elektrodundan oluşmaktadır. Her iki elektrot bileşeni de sıvı ve 350 C sıcaklıkta çalışır. Optimum çalışma sıcaklığı 350 C olan NaS bataryalar, sodyum elektrolitin donmasından dolayı 200C sıcaklığın altında çalıştırılmamaktadır.

## 7. ARAÇ UYGULAMALARINA GİRİŞ

19.ncu yüzyılın sonlarına doğru New York'ta 150000 ile 200000 arası at, şehrin tüm ulaşım ihtiyacını karşılamaktaydı. Tüm yük ve insan taşımacılığı atların çektiği arabalar ile sağlanmaktaydı. Aynı durum, özellikle endüstriyel devrimin yarattığı dinamizm sayesinde tüm ABD ve Avrupa'da görülebiliyordu. Bu günlerde atlardan kaynaklanan sıvı ve katı pislikler sebebiyle her yerde farelerin, böceklerin üremesine, hastalıkların yayılmasına müsait bir ortam oluşmuştu. Sadece New York'ta günde 2000 ton at pisliği yollardan kaldırılmak zorundaydı. Kendinden tahrikli otomobiller tüm bu şartlar altında keşfedildi.

Henüz 1813 yılında Francois İsaac de Rivaz, 1807'de yaptığı içten yanmalı motor ile çalışan ilk arabayı üretmişti. Manuel olarak ateşleme yapan bir mekanizma ile dünyada ilk kez içten yanmalı motor ile hareket eden ve saf hidrojeni yakıt olarak kullanan arabayı kullandı. Bu denemede bir balon içindeki hidrojen yakıtıyla 25 kez ard arda ateşlemeler yaparak birkaç yüz metre ilerlemişti. Seri üretime geçilebilmesi içinse daha epey yol alınması gerekecekti. 1860 yılında Etienne Lenoir, patentine de sahip olduğu 2 zamanlı içten yanmalı, 3 tekerlekli arabasını üretti. Arabanın yakıtı elektroliz yöntemiyle üretilen hidrojen gazıydı. Adını Hippomobile koyduğu arabasından yaklaşık 400 adet üretilip sattı.

Elektrikli arabalar 1900'lerin başından 1920'lere kadar tüm arabaların üçte birini oluşturmaktaydılar. Aralarında, bugün dünyanın en büyük otomotiv firmaları olan firmalar, o zamanlar elektrik tahrikli arabalar üretilip satılmaktaydılar. Bu arabaların en büyük dezavantajları, esasen aynı zamanda en büyük avantajlarının da kaynağı olan elektrik depolama sistemleriydi. Elektrik motorlarının tahriki ve arabanın tüm diğer elektrikli aletlerinin çalıştırılması için elektrik, akü/batarya grupları içinde depolanıyordu.

Aküler/bataryalar elektrikli arabaların menzillerini çok sınırlamaktaydılar. Ortalama bir benzinli arabanın çok rahatlıkla sürücüsüne sağladığı 400-500 km menzile yaklaşmaları bile mümkün olmamaktaydı. En ideal elektrikli arabalarda bile menzil 80-150 km arası olabilmekteydi.

Aküler boşaldığı zaman tekrar şarj edilmeleri gerekiyordu. Fakat bu işlem de benzinli arabalarda arabanın benzini tamamen bittiğinde herhangi bir benzincide birkaç dakika süren doldurma

işleminin çok üzerinde sürelerde yapılabilmekteydi. Hızlı şarj veya kısmi şarj işlemleri de bazen yeterli olsa bile ortalama bir elektrikli araba aküsünün tamamen doldurulması 4-8 saat sürmekteydi.

Elektrikli arabaların menzillerini arttırmak için elektriğin depolandığı akü/batarya grubunun büyütülmesi, herşeyin çok modüler olmasından dolayı oldukça mantıklı görünmektedir. Ancak ne yazıkki ilk üretilen akülerden günümüzdeki akülere kadar incelediğimizde halen birim akü ağırlığına göre depolanabilen elektrik enerjisi miktarı çok azdır. Bu sebepten dolayı arabaların akü/batarya gruplarının boyutlarını büyütme, sadece arabanın menzilin arttırmamızı sağlayamamakta, aynı zamanda arabanın ağırlaşmasına ve tüm sistemlerinin de daha ağır bir arabaya göre yeniden tasarlanması ihtiyacını doğurmaktadır. Tüm bu sebepler, ve belki başka sebeplerle birleşince, otomotiv endüstrisinin içten yanmalı araçlarla yoluna devam edip günümüze kadar gelmesine sebep olmuştur.

Elektrikli arabaların belkide yeniden doğuşu olarak sayılabilecek 1990 senesi ve ABD-Kaliforniya'da 'California Air Resource Board-CARB' tarafından Kaliforniya'da yılda 35000 adetten fazla araç satan firmaların, havanın temizlenmesine katkıda bulunmaları amacıyla, sıfır emisyonlu araçlar satmalarını zorunlu kılmasıydı. Tüm sattılan araçların %2 ile %5 arasında araç sıfır emisyonlu olmalıydı. Büyük otomotiv firmaları halen sıfır emisyon sağlayabilecek, seri üretilebilir tek teknolojinin tamamen elektrikli arabalar olmasından yola çıkarak tekrardan elektrikli araba projelerine ağırlık vermeye başladılar. Bu şekilde doğayı koruma yönünde iyi niyetlerini !!! gösterebileceklerdi.

Bu iyi niyetin ilk ürünü General Motors firmasının EV1 kod adlı Impact elektrikli arabasıydı. 145 km menzili kurşun asit bataryaları ile sağlayan Impact, 1996-2000 seneleri arasında yaklaşık 900 adet satılmış veya kiralanmıştır. Maalesef bu dönemden sonra, firmanın verdiği karar doğrultusunda üretimleri durduruldu. Aynı dönemde Ford'da Ecostar adındaki van modeliyle benzer bir ürün çıkartmıştır. Bataryalar ile 160 km menzile sahip olan bu van tipi araçlardan 103 tanesi 1993 yılından itibaren demonstrasyon programlarında kullanılmak üzere üretildi. Halen bu araçlardan bazıları ABD, Kanada ve Avrupa'da çalıştırılmaktadır.

Tüm elektrikli araçların ortak ve en büyük sorunu olan bataryalar ve dolayısıyla enerji depolama

kapasiteleri, onların bugün dünyanın her yerinde kullanılan milyonlarca içten yanmalı motorlu arabalara yerlerini kaptırmalarına sebep olmuştur. Tam bu noktada devreye giren yakıt pilleri ve hidrojen depolama teknolojileri, enerjinin depolanmasında ve elektrik üretilmesinde çok büyük avantajlar getirebilmektedirler. Elektrik gibi sadece elektron akımı değil, hacmi ve kütlesi olan bir madde olan hidrojeni depolamak için birçok farklı yöntem, teknoloji mevcuttur ve hala yoğun geliştirme çalışmaları da sürmektedir. Akü/batarya gruplarında, mevcut teknoloji ile, ulaşılamayan enerji depolama hızına ve kapasitesine hidrojen depolama teknolojileri ile ulaşılabilmektedir. En yaygın olarak kullanılan ve özellikle sanayi kuruluşlarının tercih ettiği yöntem, yüksek basınçta (175-200 bar ve özel tasarımlarda daha da yüksek) tüplerde depolama yöntemidir. Bu yöntem ile dakikalar mertebesindeki sürelerde araba yakıt depoları büyüklüğünde hidrojen tüpleri doldurulabilmektedir. Bataryaların 4-8 saat şarj süreleri göz önüne alındığında gündelik araba kullanımında çok daha uygun olabilmektedir.

Akü/batarya teknolojisinin gelişmesi ve yakıtpilleri/hidrojen depolama teknolojileri ile uyumlu olarak birlikte arabalarda kullanımları, otomotiv sanayisini tepeden tırnağa değiştirebilecek potansiyelde görünmektedir. En azından akü/bataryaların tek başlarına kullanımlarında karşılaşılan büyük sorunların çözümlenmesi mümkün olabilecektir. Her ne kadar bazı kaynaklarda batarya ve yakıtpili teknolojilerinden birbirlerine rakip ve/veya birbirlerinin yerine kullanılacak teknolojiler olarak bahsedilsede, iki teknolojinin de yaygın olarak arabalarda kullanılabilmesi için ortak çalışma yapılması gerektiği çok açıktır. Sonuç olarak enerji yoğunlukları açısından incelendiğinde halen kurşun asit bataryaların 35-50 Wh/kg, NiCd bataryaların 50 Wh/kg, NiMH bataryaların 70 Wh/kg, Li-ion bataryaların 120-150 Wh/kg olmasının yanısıra benzin için bu değer 2000Wh/kg'm üzerindedir ve bugünkü gerçeklerdir. Bu sebeple birçok üniversite, araştırma kuruluşu ve şirket, ortak araştırma laboratuvarlarında, eş güdüm içinde çalışmalarını sürdürmektedirler. Georgia Institute of Technology-Center for Innovative Fuelcell and Battery Technologies, Tübitak-MAM ve General Electric bunlardan yalnızca bazılarıdır.

Otomotivde kullanılabilir farklı tip bataryalar/aküler üzerine yoğun çalışmalar halen sürmekte ve hiçbir tip diğerine kesin üstünlük henüz sağlayamamıştır. Kurşun asit, valf ayarlı kurşun asit, NiMH, NiCd, Li-ion, Li-polimer, NiNaCl, NiZn, vs. Batarya tiplerine ek olarak süperkapasitörler de araştırma ve uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Özellikle Toyota'nın ve Honda'nın hibrit elektrikli araçlarını pazarlamaya başlaması ve farklı araba tiplerinin de önümüzdeki yıllarda

satışa sunma planları sayesinde Japon otomotiv batarya firmaları Amerikalı ve Avrupalı rakiplerinden daha ileri düzeyde Ar-Ge ve pazarlama faaliyetlerini yürütmektedirler. Bunlar arasında Matsushita (Panasonic), Sanyo, Shin Kobe, JSB (Japanese Storage Batteries) ve Yuasa gibi firmalar bulunmaktadır.

Hidrojen depolama ve yakıt pili teknolojilerinin otomotiv uygulamaları üzerine 1990'lı yılların başından başlayarak günümüze kadar tüm otomotiv ana sanayi firmaları tek başlarına veya birbirleriyle rekabet öncesi ortaklıklar kurarak Ar-Ge ve prototip çalışmaları gerçekleştirdiler. Devletler de bu çalışmaları hem politikaları ile hem de somut mali yardımları ile desteklemektedirler. Avrupa Birliği, Çerçeve Programları vasıtasıyla desteklediği bu projelerde, ABD ve Japonya'nın Ar-Ge çalışmalarına yetişebilmeyi amaçlamaktadır. Kurmuş oldukları ve genellikle firmalardan oluşan Hidrojen Teknoloji Platformunun yönlendirmeleri de yakıt pili ve hidrojen teknolojileri alanında yapılacak Ar-Ge çalışmalarının yönünü belirlemektedir. Bunlar haricinde birçok ABD, Japonya, Avrupa ve Çin üniversitelerinde birçok farklı bölümde ortak ve çok yönlü araştırmalar sürdürülmektedir. Bu çalışmalar sonucu birçok patente bu üniversiteler tarafından alınmaktadır.

Son 10-15 yılda yakıtpili ve özellikle PEM tipi (proton değişim membranlı) yakıtpili teknolojilerinde yaşanan gelişmeler, otomotiv uygulamalarında yaygın kullanılabilirliklerinin tekrardan incelenmesine yol açmıştır. Üretilen birçok prototip ve demonstrasyon aracının hepsi birbirlerinden az yada çok farklar içermektedir. Bazıları sıvı, basınçlı gaz veya hidritlerde bileşik oluşturma yöntemiyle doğrudan depolanan hidrojeni, bazıları araba üzerinde bulunan bir yakıt dönüştürücü aracılığıyla üretilen hidrojen zengin yakıtı yakıt pilinde kullanmak suretiyle elektrik üretmektedir. Bazıları kurşun asit, bazıları NiCd, bazıları NiMH, bazıları Li-ion tip bataryalar kullanırken bazıları hiç batarya kullanmamışlardır. Arabaların seri hibrit veya paralel hibrit konfigürasyonda olması da bir başka önemli temel parametredir. Tüm bu ve benzeri değişiklikler ile, uygulama şartına göre optimum çalışan sistemler tasarlanıp üretilmeye çalışılmaktadır. Ancak otomotiv devrimini kaçırmış olan ve sadece otomotiv üreticiliği ile yetinmeğe mecbur kalmış ülkemiz açısından çok önemli olan gerçek, tüm bu çalışmalar sonucunda halen hiçbir sistemin diğerlerine göre kesin üstünlüğü ispatlanamamış olmasıdır. Dolayısıyla otomotivde yeni bir devrim olacaksa, ülkemizin bunu gerçekleştirenler arasında olması için henüz geç olmayabilir.

Dünyaya doğanın kendi kendini tamir etme hızından yüksek hızla verilen zararlar ve bunların sonuçlarından biri olan küresel ısınma, önümüzdeki 20 yıl içinde çok daha çevreci araçların kullanılmasını zorunlu kılmaktadır.

Amerika’da Center for Energy and Climate Solutions, adındaki enerji ve iklimler üzerine çalışan bir merkezde Joseph Romm tarafından geleceğin yakıtı ve arabasının nasıl olması gerektiği üzerine hazırlanmış görüşlere göre, benzin-elektrik hibrit araçlar yakın gelecekte en ideal araçlar olacaklar. Mevcut altyapının hemen hemen hiç değiştirilmesine gerek kalmadan benzin-elektrikli hibrit araçlar 2020 yılında pazarda en çok satılan araçlar olacaklar. Uzun vadede sıfır emisyonlu araçlara geçilmesi gerekeceğini düşünen Romm, mevcut akaryakıt altyapımızın tamamen değişmesinin güçlüğü göz önünde bulundurarak, hidrojen yakıtlı araçların ortaya çıkmasının diğer alternatif yakıtlı araçlardan çok daha zor olacağına inanmakta. En çok gelecek vaad eden teknolojinin şehir elektrik şebekesine doğrudan bir prizle bağlanabilen hibrit ‘plug-in hybrid, e-hybrid’ araçlar olduğunu düşünmektedir. Fişli hibrit olarak adlandıracağım bu hibrit araçların, hidrojen yakıtlı yakıt pilli araçlardan harcanan birim enerji başına 3-4 kat fazla yol alabilecekleri ve günümüz hibrit araçlarının onda biri kadar emisyon yayacaklarını düşünmektedir. (Romm, 2006)

Konunun uzmanlarının da kesin bir sonuçta uzlaşamadıkları, sadece tahmin yapabildikleri bir gerçektir. Fakat önümüzdeki senelerde doğru tahminleri yapan ve bu tahminlere göre planlarını gerçekleştirip tasarım çalışmalarını yöneten şirketlerin ve ülkelerin büyük kazançlar elde etmeleri de muhtemeldir.

## 8. DÜNYADAKİ ARAÇ UYGULAMALARINDAN SEÇMELER

Tüm dünyada tasarlanan binlerce araç ve üretilen yüzlerce olmasada onlarca araç içinden bir yönü ile diğerlerinden farklı olanların seçilip anlatılmasına çalışılmıştır. Bütün bu araçlar için aynı yöntemi uygulamak ve hepsi için özet yapmak hem tezin bu bölümünün gereğinden uzun olmasına, hem de esas anlatılmak istenen, dikkat çekilmesi gereken noktaların atlanmasına sebep olabilirdi. Sonuç olarak unutulmaması gereken gerçek, halen dünyada seri olarak üretmeye uygun hiçbir yakıt pilli ve hidrojen yakıtlı araç bulunmadığı gibi içten yanmalı motorlu araçların yerlerini tamamen doldurabilen elektrikli bir araç da bulunmamaktadır. Bunun farklı sebepleri olmakla birlikte herbir araç için, aracın bazı özellikleri bu sorunlardan bazılarının aşılmasını sağlarken bazıları da yeni sorunların ortaya çıkarmasına sebep olmaktadır. İhtiyaç duyulan mühendislik çalışması ve izlenmesi gereken yol, tüm olumlu yönleri birleştiren ve aynı zamanda olumsuz yönleri tamamen veya mümkün olduğunca oradan kaldıran uygulamalar gerçekleştirmek şeklinde olmalıdır.

İlk önce elektrikli ve/veya hibrit elektrikli araç uygulamalarına değinmek istiyorum. Daha sonra yakıtpilinin ve hidrojen yakıtının kullanıldığı uygulamalara değinilecektir.

Başta halen satışta birer araçları olan Honda, Toyota ve Ford olmak üzere birçok otomotiv firmasının hibrit elektrikli bir araç projesi bulunmaktadır. Hepsi büyük oranda mevcut batarya teknolojisinden kaynaklanan sınırlamalardan ve sorunlardan kaynaklanan yaygınlaşma problemi yaşamaktadırlar. Tesla gibi tamamen elektrikli araçlar için ise bu problemler daha da büyümektedir. General Motors firmasının bu sene tanıtımını gerçekleştirdiği Chevy Volt konsept aracında da bataryadan kaynaklı sınırlamaların kısmen de olsa çözümlenmesi için 1,0 litre, 3 silindirli benzin motoru kullanılmaktadır. İçten yanmalı motor sadece, halen geliştirme çalışmaları süren ve en az 2010 yılına kadar da sürecek olan, lityum iyon bataryayı şarj etmek için kullanılacaktır. 120 kW (160hp) gücünde bir elektrik motorunu besleyen lityum iyon batarya, istendiğinde şehir şebekesinden çekilecek elektrikle de şarj edilebilecektir. Sadece bataryalarında depolanan elektrik enerjisi ile çalıştırıldığında, Amerikalıların %78'inin ihtiyaç duyduğu menzile, 40 mil menzile sahip olabilen Volt, kömür santrallerinde üretilen elektrikle bile şarj edilse, oluşturacağı toplam emisyon miktarı, yeni bir aracın yarısından az olmaktadır.

İlk seri üretim fişli (plug-in) hibrit araçların 2011'den önce piyasaya çıkmayacağı öngörüsünün yanısıra 2027'de %30 pazar payına sahip olması beklenen elektrikli araçların içinde kendilerine iyi bir yer bulacaklardır.

Not: 2027 için belirtilen pazar payı, teknolojik ilerlemeler, enerji politikaları, uluslararası politikalar ve kullanıcı talepleri gözönüne alınarak yapılmış ve bunun sonucunda tüm araçların %35'inin benzinli olacağı düşünülmüştür. (Ulrich, 2007)

### **8.1 Tesla Motors**

Tesla'nın arkasındaki mühendis olan J B Straubel'de 6831 adet 18650 kodu ile tanımlanan, 18mm çapında ve 65 mm uzunluğunda olan lityum iyon kalem pilin bir elektrikli aracı tahrik etmek için tam doğru seçim olmadığını farkındadır. Ancak bu konuda yapılan eleştirilere ve sorulara verdiği cevap da çok basittir; 'Mükemmel batarya nerede? Biz onu kullanmaya karşı değiliz, sadece piyasada mükemmel bataryayı göremiyoruz.' General Motors'da bu konuda aynı fikirdedir ve mevcut batarya teknolojisinin, kendilerinin yeni elektrikli araba modeli olan Volt'u üretmelerine henüz yetecek düzeyde olmadığını söylemektedirler. Bu iki firma arasındaki temel fark, ortak olan sorunu aşmak için uygulamakta oldukları yöntemle ilgilidir. General Motors, seri üretime geçmek için önce bir firmanın bataryalarla ilgili sorunları çözmesini beklemeyi tercih ederken, Straubel'in, yani Tesla Motors'un hiç beklemeye niyetleri yoktur. Mevcut teknolojinin izin verdiği ölçüde, mühendisliklerini teknolojik açıkları kapatacak şekilde kullanarak ilerlemek istemektedirler. Bu yaklaşımın sonucu olarak ilk Tesla'ların Hethel-İngiltere'deki Lotus Car montaj hattından bu yaz (2007) çıkmaya başlayacaktır. İlk sene üretilecek olan 100 adet şimdiden satılmış ve bir sonraki sene için üretilmesi planlanan 1000-2000 arabanın 300 tanesine siparişler verilmiş durumdadır. Halen satış fiyatı \$100.000 olan Tesla'nın batarya değişim fiyatı da yaklaşık \$20.000 civarında olacağı tahmin edilmektedir. Straubel, bataryaların 5 sene ve 50000 mil kullanım sonunda %70 şarj tutama kapasitesinin olacağını düşünüyor. (Lerner, 2007)

### **8.2 Elektrikli SMART Fortwo**

Avrupa'da alternatif enerji sistemlerinin gelişmesinde ve günlük kullanıma girmesinde öncülük yapan ülkelerden biri de İngiltere'dir. Elektrikli Reva araçlarında kullanılmaya başlandığı bu ülkede, küçük-mini araç segmenti olan A segmentinde, orijinalinde üç silindirli içten yanmalı bir motora sahip olan ve gün geçtikçe yaygınlaşan Smart'ın elektrikli versiyonu Zytec firmasınınca piyasaya sürülmektedir. Zytec firmasının motorsuz olarak İngiltere'ye ithal edip, aynı dişli

kutusunu ve transmisyonu kullanarak elektrik motoruyla tadil etmesiyle ortaya çıkan elektrikli Smart Fortwo, aylık £375 bedelle kiralanmaya başlanmıştır. Başlangıçta 100 araçlık bir çalışma yapılmasına rağmen bu adetlerin artacağı belirtilmektedir.

Standart 3 silindirli benzin motoru yerine Zytec tarafından geliştirilen 55 kW güç ve 125Nm tork üreten bir elektrik motoru kullanılmaktadır. Standart dişli kutusu aynen kullanılmakta ancak araç sürekli sabit ikinci viteste tutulmaktadır. Aracın enerji deposu olan MES-DEA Zebra bataryaları, benzinli modelde benzin deposunun yerine yerleştirilmişlerdir. Aracın kalbi niteliğinde olan sıvı nikel klorid bataryaların ortasında 300C sıcaklık oluşmakta ve soğutma yükünün karşılanması için araçta standart olarak mevcut olan soğutma sistemi kullanılmaktadır. Bataryaların %30 doluluk oranından %80 doluluk oranına şarj edilmesi 4 saat sürmektedir. Benzinli aracın elektrikliye dönüştürülmesi sonucunda ek olarak 100 kg ağırlık da beraberinde gelmekte fakat Zytec firması yetkilileri bu ek ağırlık aracın tabanına yakın olduğu için aracın ağırlık merkezini yere yaklaştırdığını ve araç sürüşünü geliştirdiğini iddia etmektedirler. (European Automotive Design, Ağustos 2006)

### **8.3 General Motors Firmasının Çalışmaları Elektrikli Araç Çalışmaları**

Kurşun asit bataryalı GM Impact elektrikli araç prototipi, Amerikan standartlarına uygun olarak üretilmiştir. Bu araç, ısıtma ve havalandırma sistemi ile üretilen ilk batarya tahrikli elektrikli araçtır. 0-96 km/h hıza 8 saniyede ulaşan, hızı devir sınırlayıcısıyla sınırlandırıldığı için en fazla 120 km/h hıza ulaşabilen ancak teknik olarak sınırlama yapılmadığında 160 km/h hıza ulaşabilen bir elektrikli araçtır. Seyir menzili 89 km/h hızda 193 km dir.

GM-Impact, ön tekerlerine bağlanmış planet dişli sistemine ve iki alternatif akım motoruna sahiptir. Planet dişli sisteminin verimi 96 km/h düz yolda seyir hızında %94 tür ve en fazla %96 olmaktadır. 96 km/h hızda motorların her ikisinde, 9500 d/dak 'da kullanılabilir max. gücün (85 kw) 10'da birini yani 8.5 kw harcarlar. Araç, tüm araçlarda olduğu gibi, en fazla güce ivmelenme ve eğim tırmanma sırasında ihtiyaç duymaktadır. Normal seyir hızında motor ve akü soğutması doğal hava akışı ile sağlanırken, yüksek güç ihtiyacı olduğu zamanlar cebri soğutma yapılmaktadır.

Batarya sistemi 32 adet 10 V'luk Delco-Remy bataryanın seri bağlanmasıyla oluşturulmuştur. 320 V açık devre voltajında, 13.6 Kwh kapasitede olan bataryalar 395 kg ağırlık oluşturmaktadırlar.

Standart hava yoğunluğu olan  $1.17 \text{ kg/cm}^3$  hava yoğunluğunda aerodinamik sürüklenme katsayısı  $C_d=0.0048$  , araç test kütlesi 1159 kg, araç ön yüzey alanı  $1.779 \text{ m}^2$  iken araç hızına göre lastik kayıpları, aerodinamik kayıplar ve ihtiyaç duyulan motor gücü değerleri Çizelge 8.1 verilmiştir.

Çizelge 8.1: GM-Impact elektrikli aracının güç ihtiyaçları (Kılıçaslan, 1995)

Hız (km/h)	Lastikler (Watt)	Aerodinamik (Watt)	Motor gücü (kW)
40.0	631	274	0.91
60.0	947	926	1.87
96.6	1524	3863	5.39
160.0	2524	17555	20.10

Lastiğin 0,0048gibi düşük bir yuvarlanma direncine sahip olması, aracın aynı miktar enerjiyi harcayarak daha uzun yol gidebilmesine olanak sağlamaktadır.

General Motors firmasının bir başka elektrikli araç çalışması ise GM 512 elektrikli araçtır. İki kişilik, küçük bir araba olan GM 512 , ağırlığının yaklaşık 4'te 1'ini oluşturan çinko nikel oksit (Zn/NiO) bataryalara sahiptir ve 100-200 km menzile ulaşabilmektedir. Yaklaşık 1000 kg ağırlığındaki araba 222 kg ağırlığında batarya grubuna sahiptir.

Önden çekişli olarak tasarlanan GM 512, arka tekerler arasının kullanılabilir boş alan olarak kalmasından dolayı yolcu kabini oldukça geniştir ve alt zemin tamamen düzdür. Aynı zamanda arkada da bir bagaj bölmesi bırakılabilmektedir.

GM 512 elektrikli aracında kullanılan elektrik motoru 120 V bir doğru akım motorudur. Orjinalde 84 V olan gerilime sahip motor, eşdeğer güç çekilmesi durumunda daha düşük akım çekebilmeyle olanak sağlamaktadır.(Kılıçaslan, 1995)

#### 8.4 Tayvan'da Elektrikli Araçların Kullanımı

Tayvan, hem küçük bir ada olması (yüzölçümü 36000 km<sup>2</sup>) hem de yüksek nüfus yoğunluğu (450 kişi/km<sup>2</sup>) sebebiyle elektrikli araçların uygulamaları açısından özel bir konuma sahiptir. Elektrikli araçların günlük hayatımıza girmelerinin önündeki en büyük engellerden biri olan seyahat menzilleri, Tayvan'da ortalama seyahat mesafesinin ABD veya diğer sanayileşmiş ülkelerin çoğuna göre çok kısa olması bakımından çok ciddi bir sorun yaratmamaktadır. Ayrıca havaların sıcak olması, soğuk havalarda düşük performans gösteren bataryalardan yüksek verim alınması açısından avantaj sağlamaktadır.

Tayvan'da kullanılan elektrik enerjisinin yaklaşık yarısı nükleer santrallerde üretilmektedir. Bu açıdan bakıldığında elektrikli araçların içten yanmalı araçların yerlerini almaları, ülkenin petrol bağımlılığından kurtulmasına büyük etki edebilecektir. Ayrıca yapılan çalışmalarda Taipei şehrinde hava kirliliğinin çok büyük bölümünün kaynağı olan benzin ve diesel yakıt yakan araçlar olduğu bulunmuştur. Artan araç sayısı bunu daha da kötü etkileme potansiyeline sahiptir. Elektrik motorlu araçların kullanılması hava kirliliğinin azalmasında doğrudan etkili olabilecektir.

Tüm bu sebeplerden dolayı Ulusal Tsing Hua Üniversitesi 1973 yılından beri elektrikli araç programıyla ilgilenmektedir. Bu programın amacı ,Tayvan'da elektrikli araçların kullanılabilirliğinin ekonomik ve teknik açıdan belirlenmesi ve tasarlanıp üretilen elektrikli araçları ve komponentlerini Tayvan ve Güneydoğu Asya'da pazarlamaktır.

Tsing Hua Üniversitesinin elektrikli araç programı temel olarak iki faz içermektedir. Tayvan Elektrik Kurumu tarafından desteklenen birinci fazında yüksek performanslı kurşun asit batarya üretim tekniği ve yüksek hızlı DC motor üretimi ile ilgili çalışmalar, yerel endüstri firmalarıyla beraber yürütüldü. Dört yolcu kapasiteli bir araç tasarlanmış ve üretilmiştir. THEV-1 adı verilen bu araçta bataryalar için Tayvan Yuasa akü şirketiyle, DC motor için ise Tongyuan Elektrik ve Makina şirketiyle çalışılmıştır.

THEV-1 aracında değerli sonuçlar elde edildikten sonra THEV-2 aracının üretimine başlanmıştır. Dört yolcu kapasiteli THEV-2 aracı, 1200 kg ağırlığında fiberglas (Fiber Reinforced Plastic) bir gövdeye sahiptir. Kullanılan elektrik motoru 80 kg ağırlığında, 20kW gücünde bir DC motordur

ve 6000d/d (max. 7000d/d) hıza sahiptir. 192 V gerilimde ve toplam 500 kg ağırlığa sahip bataryaların güç yoğunluğu 48 W\*saat/kg'dır. İki yolcusuyla beraber 45 km/saat sabit hızda 160 km menzile sahiptir ve en yüksek hızı 90 km/saat 'tir. Batarya grubu, seri bağlı 12 V'luk 16 adet bataryadan oluşmuştur. Bataryaların boyutları 275 x 295 x 175 mm dir. 150 derin çevrim ömrüne sahip olan bataryalarda 150 derin çevrim sonunda enerji yoğunluğunda %25 düşüş görülmüştür. Şehir içi yol testlerinde elde edilen sonuçlara göre 120-130 km menzile sahip olan THEV-2, 0.25 kW\*saat/km elektrik harcamaktadır. Tayvan'daki hız sınırının 60 km/saat olduğu ve Taipei şehrinde araçların günde ortalama 50-60 km yol aldıkları dikkate alındığında potansiyelin büyüklüğü daha belirgin olmaktadır. (Kılıçaslan, 1995)

### **8.5 FIAT-Panda H2 Projesi**

Proje, İtalya Araştırma ve Çevre Bakanlığı desteği ile Fiat Auto, Fiat Research Centre ve Fiat Powertrain Research and Technology ve çoğu İtalyan tedarikçiler tarafından gerçekleştirilmektedir. Yakıt pilli ve hidrojen yakıtlı Panda projesini diğerlerinden ayıran, enerji sisteminde tahrik amaçlı bir batarya bulunmamasıdır. Araç tamamen sistemin yüksek verimliliği üzerine tasarlanmış ve her sürüş şartı için yetecek kadar elektrik enerjisi yakıt pili tarafından sağlanmaktadır.

Sistem, Nuvera firmasının(İtalyan-Amerikan ortaklı yakıt pili üreticisi) 3 adet yakıt pilini barındırmaktadır. Yakıt pilleri 1.5 bar basınçta beslenen hidrojen ve havadan alınan oksijen ile çalıştırılmaktadır. Hidrojen yakıtı, aracın arka alt tabanının altına yerleştirilmiş kompozit tankta 350 bar basınçta depolanmaktadır. Aracın hareketini sağlayan 3 fazlı AC asenkron elektrik motoru araca 60 kW güç sağlayabilmekte ve 130 km/h hıza çıkarmaktadır. İvmelenme hızı 0 – 50 km/h için 5 saniyedir. (European Automotive Design, March 2006)

2003 senesinde tanıtımı yapıldıktan sonra uzun süre bir bilgi alınamayan projede araçlar, Nuvera'nın ilk kez bir arabada Andromeda 2 yakıt pili yığını kullanılarak, 2006 Turin Kış Olimpiyatlarında oluşturulan Hypark etkinliklerinde hidrojen ve yakıt pillerinin potansiyelini göstermek amacıyla kullanıldılar. Hidrojenli Panda'nın 200 km menzile ve 5 dakikanın altında bir dolun süresine sahip olduğu söylenmektedir. (Crawley, Adamson, 2006)

## 8.6 REVA Elektrikli Araçları

Bir Hint firması olan REVA, tamamen şehir içi ulaşımı gözönünde bulundurarak elektrikli, küçük arabalar üretmektedir. REVA, kişi başına gelirin düşük olduğu Hindistan'da da, yüksek olduğu İngiltere'de de insanların trafik, yoğun hava kirliliği, küresel ısınma, gürültü kirliliği gibi ortak sorunlarını çözmek için tasarlayıp ürettiği araçlarını tüm dünyada satmak için yoğun çalışmalar yapan bir firmadır. Alternatif yakıtlı arabalar üzerine çalışan firma, bugüne kadar 2000'in üzerinde elektrikli arabasını Hindistan'da ve Avrupa'da satmıştır. [3]

REVA'nın, Hindistan Savunma Ar-Ge Organizasyonunun desteği ve işbirliği ile, 2005 yılında geliştirdiği bir yakıt pilli araç projesi bulunmaktadır. Diğer tüm yakıt pilli araçlardan farklı olarak bu projede Hindistan Savunma Ar-Ge Organizasyonunun tasarladığı ve Hint Ordusunda kullanılması da düşünülen, fosforik asit yakıt pili kullanılmıştır. Diğer tüm projelerde proton değişim membranlı yakıt pilleri kullanılmaktadır. REVA, bir başka projesinde de Kanadalı Hydrogenics Corporation firmasının ürettiği PEM yakıt pilleriyle çalışan 2 araba üretmektedir. Bu projede REVA ile ortak çalışan Indian Oil Corporation (IOC), gerekli hidrojen dolum altyapısını ve test istasyonlarını kuracaktır. İlk iki arabadan sonra da, edinilen bilgi ve deneyim ile 10-20 araba daha üretilecektir. (Crawley, Adamson, 2006)

## 8.7 Bajaj Auto

Bir başka Hint firması olan Bajaj Auto, Hindistan'da yaygın olarak kullanılan üç tekerlekli araçları Energy Conversion Devices firması ile birlikte hidrojen yakıtı ile çalıştırmış ve Michigan-ABD'nde yollarda kullanmaktadır. (Crawley, Adamson, 2006) Bu proje, Hindistan gibi yoğun insan nüfusuna sahip ülkeler için iyi bir örnek olabilir. Dünyada Yenilenebilir Enerji Bakanlığı bulunan tek ülke olan Hindistan'ın, hava kirliliğine karşı ciddi önlemler alması gerektiğini de hatırlamakta fayda var.

## 9.YAKIT PİLLİ ve BATARYA TAHRİKLİ ŞEHİR İÇİ KİŞİSEL ULAŞIM ARACI KONSEPTİ

### 9.1 İzlenen Yöntem

Hayatımıza büyük kolaylıklar getiren, ulaşım imkan ve kabiliyetlerimizi daha önceden tahmin bile edemeyeceğimiz kadar arttıran motorlu taşıtlar ve oluşan otomotiv sanayisi birçok teknik ve teknolojik gelişmenin öncülüğünü yaparak büyük insan kitlelerine iş imkanı sağlar hale gelmişlerdir. Aynı zamanda ana otomotiv firmalarının destekleriyle düzenlenen etkinlikler aracılığıyla birçok insanın motorlu taşıtları sadece ulaşım ihtiyacını karşılayan birer makine olarak değil, aynı zamanda bir eğlence aracı olarak görmesi, bir spor ve hobi olarak bu araçlar ile ilgilenmeleri sağlanmıştır. İster ihtiyaçtan olsun, ister kişisel zevk için olsun, motorlu taşıtlara olan bu büyük ilgi sayesinde birçok otomotiv firması her sene milyonlarca araç üretmekte ve dünyanın dört bir tarafında satmaktadırlar. Ancak tüm bu olumlu gelişmelerin elbette ki bazı olumsuz etkileri de olmaktadır ve bu tezin diğer bölümlerde bunlardan bahsedilmiştir. Sonuç olarak gelinen nokta, arabaların ve kişisel ulaşım için kullanılan diğer motorlu taşıtların dünyamıza verdikleri zararları ve şehirlerde geçen günlük yaşantılarımızda bizlere yaptıkları olumsuz etkileri fark etmemiz için artık çok yönlü bilimsel çalışmalara ihtiyaç bile kalmamıştır.

Modern arabaların hemen hepsi, yüksek hızları, yüksek tork değerleri, yüksek güvenlik standartları, yüksek konfor standartları, geniş iç hacimleri ve yük taşıma kapasiteleri sayesinde 1 tonun üzerinde ağırlıklarda üretilmektedirler. Aracın bir noktadan diğerine gitmek için harcadığı enerjinin çok büyük bir kısmı, aracın kendi ağırlığının taşınmasında kullanılmakta, esas amaç olan yolcu ya da yolcuların taşınması için harcanan enerji, toplamın çok küçük bir oranı olmaktadır. Tamamıyla gerçek rakamları yansıtmasa dahi, fikir vermesi açısından basit bir hesap yapılabilir. Ortalama bir aile arabası için tipik bir ağırlık değeri olan, yaklaşık 1300 kg ağırlığındaki bir arabada sabah işine giden yaklaşık 80 kg ağırlığında bir insan için 1380 kg ağırlığında bir cismi hareket ettirmek gerekecektir. Bu da kendi ağırlığının 17.25 katı kadardır. Araba da yürüyüş hızına yakın bir hızla, örneğin yoğun trafikte, 5-10km / saat hızla ilerleseydi, teorik olarak bir insanın ihtiyaç duyacağı enerjinin 17.25 katı bir enerji harcamış olurdu. Yani harcanan enerjinin %6'sı bile, aynı işi yapmaya yeterdi. Aracın içinde 5 kişinin olması, durumu biraz daha düzelmekte ve toplam 1700 kg'ın 400 kg'ını yolcular oluşturmaktadır. Görüldüğü gibi harcanan enerjinin çok küçük bir kısmı ile esas istenen iş yapılmaktadır.

Araçların hafifletilmesi üzerine yapılan birçok çalışma vardır. Bu konu, üzerinde en çok durulması gereken ve en kısa sürede, en yüksek miktarda enerji tasarrufu sağlanabilecek konudur. Bunun için küçük araçların (genel olarak A ve B segmenti) kullanılmasının teşvik edilmesi sağlanmalıdır. Kullanıcıların, nispeten düşük yakıt tüketimine sahip, sıkışık şehir trafiğine ve dar park alanlarına nispeten daha uygun olan bu segmentteki araçları tercih etmesi gereklidir.

Araç ağırlıklarının azaltılması amacıyla sadece araç boyutlarının küçültülmesi ile sınırlı kalınmamakta, daha hafif malzemelerin de kullanılması sağlanmaktadır. Bu sebeple plastikler, kompozitler, alüminyum ve magnezyum gibi düşük yoğunlukta malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelerin motorlu taşıtlarda kullanım oranları gün geçtikçe artmaktadır. Ayrıca toz metal-sinter metal teknolojisi gibi üretim teknolojileri kullanılmaktadır. Bu sayede üretilen parçaların dolu bir metal malzemeden üretilmesi yerine metal tozlarının bir araya gelmesi yöntemiyle üretilmesi mümkün olmakta ve başka faydalarının yanı sıra, parça ağırlığında da azalma sağlanmaktadır. Bu ve benzeri üretim teknik ve teknolojilerinin geliştirilmesi için daha fazla çalışmaların yapılması ve kullanımlarını yaygınlaştırmak için desteklenmelidirler.

Motorların ve aktarma organlarının da sahip oldukları bir verim değeri vardır ve hiç kayıpsız değillerdir. Bu durum da harcanan yakıt miktarını arttırmaktadır. Hem benzinli, hem de diesel yakıtlı motorların verimleri Carnot verimi ile sınırlıdır ve içten yanmalı motorlarda bilindiği kadarıyla bu sınır aşılamaz, ancak mümkün olduğunca yaklaşılabilir. Bu durum, uzun zamandır geliştirilen ve bundan sonra da mutlaka gelişmelerin süreceği içten yanmalı motorların verimlerinin arttırılmasında, artık ancak küçük gelişmelerin olmasına sebep olmaktadır.

Bir aracın yakıt tüketimini düşürmek için kayıpları azaltmak yolu da kullanılır. Bu sebeple otomotiv firmaları araç tasarımlarında aerodinamik kayıpların en aza indirilmesi için çalışmakta ve bu işlem için de, tüm safhalarda olduğu gibi, bilgisayar programlarından yararlanmaktadırlar. Hava ile araç gövdesi arasındaki sürtünme ve yol ile araç lastikleri arasındaki sürtünme değerleri de en aza indirilmeye çalışılmaktadır. Fakat elbette bu değer, teknik olarak güvenli sürüş açısından aracın yola dokunan tek yüzeyi olan lastikler ile yol arasında bulunması gereken sürtünme miktarından daha az olmamalıdır.

Tüm verim arttırma ve yakıt tüketimini azaltma amacını taşıyan çalışmalara rağmen, özellikle Çin ve Hindistan gibi büyük nüfusa sahip ve motorlu taşıtların kişisel ulaşımda henüz pek kullanılmadığı ülkelerde halkın satın alma gücü yükseldikçe ve motorlu taşıt kullanımını arttırdıkça, tüketilecek toplam yakıtın tüketimini azaltmaya yetmeyecekleri, aksine toplam tüketimin artacağı beklenmektedir. Bu durum çevre kirliliği ve küresel ısınma gibi sorunların da artmasına sebep olacaktır.

## 9.2 Tasarım Kriterleri

Tasarım kriterleri belirlenirken mümkün olduğunca geniş, sınır koymadan ve günlük hayatta karşılaşılan sorunları çözmeye yönelik olarak düşünülmüştür. Elbette bir projenin gerçekleşebilmesi için gerekli olan en önemli iki şart unutulmamıştır. Bu şartlardan birincisi tasarımın teknik olarak üretilebilir olmasıydı. Yani yapılacak tasarım, her şeyden önce tamamen bir hayal ürünü olarak kalmaya mahkum olmamalıydı. İkinci şart ise, tüm tasarım bittiğinde aracın üretilmesi için gerekli olacak mali kaynak çok yüksek olmamalıydı. Herbir komponentin seçiminde ve projenin her safhasında bu iki şarta bağlı kalınmaya özellikle dikkat edilmiştir.

Sayısal kriterler;

Taşıma kapasitesi : 1 sürücü + 1 yolcu

Menzil (en fazla) : 75 km(yalnız akülerde tek şarj-deşarj sırasında depolanmış enerjiyle)

Hız (en fazla) : 50 km/h

Eğim çıkabilme : 4°

Ağırlık (en fazla) : 400 kg (tam yüklü)

Genişlik (en fazla): 1000 mm

Uzunluk (en fazla): 3000 mm

yukarıdaki gibi seçilerek, sıfır emisyonlu bir şehir içi kişisel ulaşım aracı tasarlanmıştır.

## 9.3 Güç - Enerji Paketinin Tasarımı

Tasarımı yapılan şehir içi kişisel ulaşım aracının elektrikli bir araç olması, diğer elektrikli araçların sahip oldukları avantajlara sahip olmasını sağlarken, özellikle enerjinin depolanması ve

yönetimiyle ilgili dezavantajlarını da beraberinde getirmektedir. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak veya en azından asgari düzeye indirmek için hibrit bir enerji sistemi tasarlanmıştır. Yakıt pilinin de sisteme entegre edilmesi ile oluşturulan hibrit yapı, sadece bataryalarda depolanan enerjiye bağımlı kalınmamasına olanak sağlamıştır. Ancak yakıt pilinin yüksek maliyeti ve elektrikli araç tahrikine uygun olarak üretilmemesi sebebiyle seri hibrit bir yapı tasarlanmıştır. Bu sayede küçük güçlü bir yakıt pili kullanılabilecektir. Ayrıca bataryaların şarj edilmesi sırasında sürekli ve ani olarak artıp azalan bir enerji ihtiyacı olmayacağı için yakıt pilinin kontrolöründen kaynaklanabilecek hatalar yaşanmayacaktır. Yakıt pili çoğu zaman tasarlanmış olduğu optimum düzeyde, yüksek verimle çalışabilecektir.

#### **9.4 Komponentlerin Seçilmesi**

Sıfır emisyon: İlk hareket noktası olarak, şehirde sıfır emisyon yayan bir aracın daha yararlı olacağı düşüncesi ile güç-enerji paketi hazırlanması gerekmektedir. Güneş enerjisi veya başka bir temiz enerji kaynağından üretilen enerji, araçların tahrikinde, elektrikli araç bataryalarının araç park halindeyken şarj edilmesi sırasında kullanılmasında uygun olabilir. Bunun sebebi halen PV hücrelerin güneşten gelen fotonlardan elektrik üretme verimlerinin düşüklüğü ve dolayısıyla kayda değer miktarlarda enerji üretmek için çok büyük yüzey alanına ihtiyaç duyulmasının yanı sıra, PV hücrelerinin her türlü dış etkenlere açık bir aracın üzerine monte edilmesi durumunda, çok kolaylıkla zarar görebilecek olmasıdır. Ayrıca binaların ve birçok yer şekillerinin aralarında dolaşan bir aracın üzerine güneş ışınlarının ulaşması hatta, halen çok düşük değerlerde olan en yüksek verim değerinin yakalanabileceği açılarda ulaşması pek mümkün görünmemektedir.

İçten yanmalı motorlarda birçok farklı yakıtın kullanılabilmesine rağmen, sıfır emisyon kriterinin sağlanamayacağından dolayı, bu seçenek üzerinde durulmamıştır. Ancak elbette içten yanmalı motorların herkes tarafında çok iyi bilinmesi ve seri üretimleri olması ve çok uygun fiyatlara bulunabilmeleri, her zaman bir alternatif olarak kalmalarına olanak vermektedir.

Sıfır emisyon kriterini sağlayabilecek ve mevcut teknolojiler arasında, otomotiv sanayisinde araçların tahrikinde uygulanabilir olarak görünen teknolojiler sadece bataryalar ve yakıt pilleridir. Dolayısıyla her iki teknolojinin, hidrojenle çalışan yakıt pillerinin ve bataryaların, araç tahrikinde zayıf kaldıkları alanları belirlemek gerekmektedir. Yapılacak tasarım, bu zayıf yanları tamamen

veya mümkün olduğunca örtmeliydi. Yakıt pilleri ve batarya teknolojileri ile ilgili bölümlerde anlatılan bu zayıf alanlara burada tekrar değinmeye gerek olmamakla birlikte ancak seçim yaparken özellikle belirtilen noktalara dikkat edilmesi yararlı olacaktır.

#### **9.4.1 Yakıt pilinin seçilmesi**

Yakıt pilleri, çoğunlukla içten yanmalı motorlarla karşılaştırıldığında sahip oldukları yüksek verim değerlerine rağmen, çok pahalıdırlar. Ayrıca büyük güçlerde ve otomotiv endüstrisinde araçların tahriki için özel olarak geliştirilmiş yakıt pillerini üretebilen şirket sayısı da azdır. Hidrojen yakıtı ve yakıt pili teknolojilerini geliştiren şirketler genellikle devletin ve hitap ettikleri sektörün büyük firmaları tarafından desteklenmektedirler. Örneğin otomotiv sektörü için özel olarak yakıt pili geliştiren firmaların en önemlileri, dünyanın en büyük otomotiv ana sanayi firmalarının maddi destekleriyle çalışmalarını sürdürmektedirler. Unutulmamalıdır ki büyük Ar-Ge faaliyetleri için kalifiye eleman ve büyük maddi kaynaklar gerekmektedir. Ancak yakıt pillerinin halen hiçbir sektörde satılmaması, bu firmaların sadece kendi geliştirdikleri ürünlerin satışı ile ayakta kalmalarının mümkün olamamasına yol açmaktadır. Ayrıca geliştirdikleri ürünlerini de her isteyen kuruma satamamaktadırlar. Bu durum, taşıt için geliştirilmiş bir yakıt pilinin kullanılması halinde belirli üretici firmalara bağımlılığı da beraberinde getirmektedir. Bu sorunun çözülmesi amacıyla tez çalışmasında yakıt pili mümkün olduğunca düşük güçlü seçilerek özel olarak otomotiv sanayisi için geliştirilmemiş olması tercih edilmiştir. Böylece hem daha ucuza temin edilebilecek, hem de küçük güçlü yakıt pili üreten firmaların çok olması sayesinde tek kaynağa bağımlı olunmayacaktır.

Yakıt pillerinin farklı tiplerinin bulunduğu ve her birinin farklı uygulamalar için daha ideal olduğu ilgili bölümde anlatılmıştı. Tez çalışmasındaki uygulama için en ideal yakıt pili tipi olarak, proton değişim membranlı (PEM) seçilmiştir. PEM tipi yakıt pillerinin düşük sıcaklıklarda çalışabilmeleri gibi teknik sebeplerin yanı sıra, en fazla üreticinin bulunduğu ve en fazla sayıda araç uygulamasında tercih edilmiş yakıt pili tipi olması da seçim için önemli sebeplerdi. Ayrıca bazı firmaların, küçük kapasitelerde, hazır olarak sattıkları ürünleri de bulunmaktadır. Bir yakıt pili ve yakıt pili sistemi tasarlanması ve üretilmesi, bu tezin kapsamına girmemesinden dolayı, hazır bir yakıt pili sisteminin tedarik edilebilmesi önemli olmuştur.

Bazı yakıt pili üreticileriyle görüşüldükten sonra maliyet ön planda tutularak Ballard firmasının 1.2 kW gücündeki Nexa yakıt pilinin kullanılmasına karar verilmiştir. Esasen doğru mühendislik

çalışması, önce tasarımın şekillenmesi, sonra uygun yakıt pilinin seçimi şeklinde olmalıdır ancak yakıt pili konusunda seçeneklerin kısıtlı olması, hangi yol izlenirse izlensin sonucu fazla etkilememektedir.

#### **9.4.2 Hidrojen deposunun seçilmesi**

Hidrojen depolama teknolojileri içinde en yaygın olarak kullanılan ve ülkemizde de kolaylıkla tedarik edilebilecek basınçlı gaz olarak çelik tüplerde depolama yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu kararın verilmesinde, ülkemizde Linde Gaz, BOS, Habaş gibi endüstriyel gaz firmalarından kolayca tedarik edilebilmesi ve otomotiv için belirleyici bir kriter olan hızlı dolun özellikleri etkili olmuştur.

#### **9.4.3 Bataryanın seçilmesi**

Batarya tipinin seçimi için ise öncelikle üretilmiş elektrikli ve hibrit elektrikli araçlarda kullanılan batarya tipleri ve özellikleri incelenmiş, her yönüyle diğerlerine üstünlük sağlayabilen bir bataryanın olmadığı ve farklı uygulamalar için farklı tip bir bataryanın avantajlı olabileceği görülmüştür. (Çizelge 9.1) İlk olarak belirlenen iki şarttan biri olan maliyetlerin düşük tutulması ve ayrıca ülkemizde çok yaygın olarak üretilmekte olduğu için kurşun asit tip akü-batarya tercih edilmiştir. Yerli üretici firmalardan istenen kapasitede ve uygun fiyatlı akü-batarya tedarik edilebilmektedir. Kurşun asit bataryaların otomotivde ve özellikle elektrikli forklift vb. elektrikli araçlarda da yaygın olarak kullanılıyor olması da bu kararın alınmasını etkilemiştir. Birçok yerli ve yabancı firmanın elektrikli forkliftleri vb. elektrikli araçları ülkemizde de fabrikalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca kurşun asit akü-batarya için uygun şarj cihazı- redresör bulunması açısından da büyük bir kolaylık sağlayacağı göz önüne alınmıştır.

1992'den beri ALABC (Advanced Lead Acid Battery Consortium) tarafından, üretilmekte olan kurşun asit bataryalarda halen gelişmeler olduğu öngörüsüyle yapılan çalışmalar sonucunda ülkemizde de Mutlu Akü tarafından üretilmeye başlanan valf ayarlı kurşun asit (VRLA) tipi kurşun asit bataryaların kullanılması en uygun seçenek olarak değerlendirilmiştir. Enerji yoğunluğu kurşun asit bataryalardan daha yüksek olan, 50Wh/kg, VRLA tipi bataryalarda akışkan halde bir elektrolit bulunmadığı için her şekilde yerleştirilebilmektedirler. (Westbrook, 2001) Araç içinde sıvı elektrolitin dökülme ihtimali de bulunmamaktadır. Ayrıca starter tip kurşun asit bataryalarda üretici firmalar tarafından ancak %30- 40 deşarj tavsiye edilmesi yanı sıra VRLA bataryalarda bu değer %70-80 olabilmektedir.

Kapasiteleri, ihtiyaç olan enerji miktarı hesaplanarak bulunan bataryaların gerilimi, her biri 12 V olan iki bataryayı seri bağlayarak 24 V elde edilecek Şekilde belirlenmiştir. Gerek görülmesi halinde, 24 V gerilime sahip ek batarya grupları da paralel bağlanarak enerji depolama kapasitesi arttırılabilmektedir.

Çizelge 9.1 Elektrikli araç uygulama örnekleri (Ünlü vd., 2003)

Üretici	Citroen	Daihatsu	Ford	GM	GM	Honda	Nissan	Nissan	Peugeot	Renault
<b>Model İsmi</b>	AX/Saxo Electrique	Hijet EV	Think City	EV1	EV1	EV Plus	Hypermini	Altra EV	106 Electric	Clio Electric
<b>Tahrik Tipi</b>	DC motor	SM senkron	3 fazlı indüksiyon	3 fazlı indüksiyon	3 fazlı indüksiyon	SM senkron	SM senkron	SM senkron	DC motor	AC indüksiyon
<b>Batarya tipi</b>	NiCd		NiCd	Pb-asit	NiMH	NiMH	Li-iyon	Li-iyon	NiCd	NiCd
<b>Güç (kW)</b>	20		27	102	102	49	24	62	20	22
<b>Gerilim (V)</b>	120		114	312	343	288		345	120	114
<b>Batarya enerji Kapasitesi (kWh)</b>	12		11.5	16.2	26.4		15	32	12	11.4
<b>Şarj konnektörü</b>			iletken	endüktif	endüktif	iletken	iletken	iletken		iletken
<b>Hız (km/h)</b>	91	100	90	129	129	129	100	120	90	95
<b>Menzil</b>	80	100	85	95	130	190	115	190	150	80
<b>Şarj süresi (saat)</b>	7	7	5-8	6	6	6-8	4	5	7-8	
<b>Satış fiyatı (\$)</b>		23 990 \$					36 000 \$		27 000 \$	27 400 \$

#### 9.4.4 Motorların seçilmesi

Araç, hidrojen yakıtlı, yakıt pilli ve bataryalı bir araç olacağından üretilecek elektrik enerjisi doğru akım (DC) olacaktır. Bu durum göz önüne alındığında, motorun da DC akım motoru olması tercih edilmiştir. Bu sayede yakıt pilinden veya bataryalardan çıkan doğru akımın alternatif akıma (AC) çevrilmesine, dolayısıyla DC-AC çevirici kullanılmasına ve verim kaybı yaşanmasına gerek kalmamaktadır. Ancak AC motorlarının seri üretimde olması ve DC motorların nispeten az sayıda üretilmesi, AC motor fiyatlarının daha ucuz olmasını mümkün kılmaktadır. Motor gerilimi belirlenirken batarya gerilimine eşit olacak şekilde, 24V olarak belirlenmiş, akım değerlerinin biraz yüksek olmasına yol açsa da bu durum, DC-DC inverter kullanılmasına gerek bırakmamıştır. İlk olarak araç jantının içine monte edilecek tip motorların (hub motor) kullanılması üzerinde durulmuştur. Bu sayede hiçbir aktarma organı kullanılmayacak, verim kaybı yaşanmayacak ve ayrıca nispeten kolay bir konstrüksiyon tasarlanabilecekti. Ancak ülkemizde bu tip motorların üretilmemesi, motoru özel olarak sardırmak gerekecekti. Bu işlem hem zaman alacağı, hem de maliyeti yüksek olacağı için bu seçenekten vazgeçilmiştir.

Esasen fırçasız tip bir DC motor kullanımı, verimin çok önemli olduğu elektrikli araç uygulamalarında istenen bir seçimdir. Ancak fırçasız tip motorun üretim tarihinin geç olması, ancak araç üretildikten sonra yapılacak geliştirme ve iyileştirme çalışmaları sırasında araç üzerindeki fırçalı tip motorlarla değiştirilmesine izin vermekteydi. Dolayısıyla istenen özelliklerde fırçalı tip DC motorun, Femsan DC Motor firmasında özel olarak üretilmesi seçimine gidilmiştir. Motorunun hareketi, kayış kasnak mekanizması ile tekerlere iletilmektedir.

#### 9.4.5 Şehir içi kişisel ulaşım aracı genel tasarımı

Kullanıcıların her türlü hava ve yol şartında rahat ve güvenli bir şekilde, şehir içinde kişisel ulaşımını sağlamayı amaçlayan bir tasarım yapılmıştır. Bu aracın otoyollara veya şehirler arası yollara çıkmayacağı, sadece şehir içinde, büyük şehirlerden küçük yazlık köy ve kasabalara kadar geniş bir coğrafyada, kullanılacakları düşünülmüştür. Her mevsimde kullanıma uygun olacak ve rüzgara, güneş ışınlarına, yağmura, kara, toza ve çamura karşı korunaklı bir kabin içerisinde seyahat edilebilmelidir. Birçok farklı kesimden, farklı hayat tarzına sahip insanın kullanacağı bir araç olmalıdır çünkü ulaşım, temel bir ihtiyaçtır ve artık motorsuz vasıtalarla veya yayan olarak karşılanamamaktadır. Aynı zamanda diğer motorlu taşıtların tehlikeler yarattığı durumlarda

kullanıcısını koruyabilecek bir yapıda olmalıdır. Özellikle ülkemizin her yerinde sık sık meydana gelen trafik kazaları, bu konuda çok dikkatli davranılmasını gerektirmektedir. Ayrıca yayalarla çarpışılması durumunda, arabaların yayalara verdiği ağır yaralanmalara ve üzücü sonuçlara sebep olmamasına gayret edilmelidir. Bu yönüyle sadece kullanıcıyı değil, etkileşimde olduğu herkezi korumayı amaçlayan bir şehir içi kişisel ulaşım aracı tasarlanmalıdır.

Çoğu zaman arabalarda tek veya iki kişinin seyahat ettiği ve gereğinden çok fazla enerji tüketildiği, yol üzerinde gereğinden çok fazla yer işgal edildiği ve özellikle büyük şehirlerde çok değerli olan şehir arazisinin araba park alanı olarak kullanıldığı göz önünde tutularak tasarım yapılmıştır. Buna göre, en fazla iki kişinin binebileceği ve yolda en az yeri kaplayacak olan tasarım, iki kişinin arka arkaya oturdukları, dar ve kısa bir araç tasarımıdır. Bu sayede arabaların paralel park ettikleri yerlere istenildiğinde dik olarak bile park edilebilecektir. Tek şerit içinde iki araç yan yana ilerleyebilmelidir. Bu sebepten dolayı şehir içi kişisel ulaşım aracının alabileceği genişlik en fazla 1 metre olmaktadır. Tek kişinin ortada oturacak olmasından dolayı yandan çarpmalara karşı kenarlarda, arabalarda olduğundan da fazla boşluk ve tampon bölge kalacaktır ve kullanıcılar için yüksek güvenli bir yolcu kabini oluşturulabilecektir.

Aracın hareketi için gerekli enerji ve güç üretimi yakıt pili ve bataryalardan karşılandığı ve her ikisinin de sınırlı miktarda enerjiyi ve gücü sağlayabilmesi sebebiyle, tasarımın hafif olmasına özen gösterilmelidir. Bu sebepten dolayı aracın şasi malzemesinin alüminyum, gövdesinin ise hafif ama darbelere ve her türlü hava şartına karşı dayanıklı kompozit malzemelerden üretilmesine karar verilmiştir.

## 9.5 Kullanılan formüller ve yapılan hesaplamalar

Araç güç-enerji ihtiyacı ile ilgili formüller ve hesaplamalar;

$$W_{top} = W_{yuvarlanma} + W_{hava} + W_{egim} + W_b$$

$$W_{yuvarlanma} = f \times G = f \times m \times g$$

$$W_{hava} = 0.5 \times A_{ARAÇ} \times C_D \times \rho_{hava} \times (V_{taşıt} \pm V_{ruzgar})^2$$

$$W_{egim} = m \times g \times \sin\alpha = G \times \sin\alpha$$

Araç tasarım hedefleri ve yapılan kabuller;

$$m = 400 \text{ kg (araç tam yüklü halde)}$$

$$V_{\max} = 50 \text{ km/h (hız sınırı)}$$

$$\eta_{\text{iletim}} = 0.98$$

$$\eta_{\text{motor}} = 0.90$$

$$\eta_{\text{top}} = 0.98 \times 0.90 \approx 0.90$$

$$A_{\text{ARAÇ}} = 1.4 \text{ m}^2 \text{ (araç ön kesiti)}$$

$$C_D = 0.3$$

$$f = 0.013$$

$$\rho_{\text{hava}} = 1/28 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Çıkılacak en dik eğim} = \%8 \rightarrow \alpha \approx 4^\circ$$

$$\text{Karşıdan esen en büyük rüzgar hızı, } V_{\text{rüzgar}} = 20 \text{ km/h}$$

Aracın hiçbir zaman otoyola veya şehirler arası yola çıkmayacağı düşünülerek, kendi sağlayacağı güç ile, düz yolda ulaşabileceği en yüksek hızı 50 km/h olarak belirlenmiştir. Hız sınırının mümkün olduğunca düşük olması, motorların da küçük seçilebilmesine olanak tanımaktadır.

Farklı durumlar göz önünde tutularak, gerekli motor gücü hesabının yapılması;

$$1- \text{ Rüzgar yok, eğim yok (} V_{\text{rüzgar}} = 0 \text{ km/h, } \alpha = 0^\circ \text{)}$$

$$W_{\text{yuvarlanma}} = f \times m \times g = 0.013 \times 400 \times 9.81 = 51 \text{ N}$$

$$W_{\text{hava}} = 0.5 \times A_{\text{ARAÇ}} \times C_D \times \rho_{\text{hava}} \times (V_{\text{taşıt}} \pm V_{\text{rüzgar}})^2 = 0.5 \times 1.4 \times 0.3 \times 1.28 (50 / 3.6)^2 = 52 \text{ N}$$

$$W_{\text{egim}} = m \times g \times \sin \alpha = G \times \sin \alpha = 0$$

$$W_{\text{toplam}} = 51 + 52 = 103 \text{ N}$$

$$N_{\text{tr}} = W_{\text{toplam}} \times V / 3.6 = 103 \times 50 / 3.6 = 1430 \text{ W}$$

$$2- \text{ Rüzgar hızı } +20 \text{ km/h, eğim yok (} V_{\text{rüzgar}} = +20 \text{ km/h, } \alpha = 0^\circ \text{)}$$

$$W_{\text{yuvarlanma}} = f \times m \times g = 0.013 \times 400 \times 9.81 = 51 \text{ N}$$

$$W_{\text{hava}} = 0.5 \times A_{\text{ARAÇ}} \times C_D \times \rho_{\text{hava}} \times (V_{\text{taşıt}} \pm V_{\text{rüzgar}})^2 = 0.5 \times 1.4 \times 0.3 \times 1.28 (70/3.6)^2 = 102 \text{ N}$$

$$W_{\text{egim}} = m \times g \times \sin \alpha = G \times \sin \alpha = 0$$

$$W_{\text{toplam}} = 51 + 102 = 153 \text{ N}$$

$$N_{\text{tr}} = W_{\text{toplam}} \times V / 3.6 = 153 \times 50 / 3.6 = 2125 \text{ W}$$

3- Rüzgar hızı +20 km/h, eğim  $4^\circ$  ( $V_{\text{rüzgar}} = 20 \text{ km/h}$ ,  $\alpha = 4^\circ$ )

$$W_{\text{yüvarlanma}} = f \times m \times g = 0.013 \times 400 \times 9.81 = 51 \text{ N}$$

$$W_{\text{hava}} = 0.5 \times A_{\text{ARAÇ}} \times C_D \times \rho_{\text{hava}} \times (V_{\text{taşıt}} \pm V_{\text{rüzgar}})^2 = 0.5 \times 1.4 \times 0.3 \times 1.28 (70/3.6)^2 = 102 \text{ N}$$

$$W_{\text{egim}} = m \times g \times \sin\alpha = G \times \sin\alpha = 400 \times 9.81 \times \sin 4 = 274 \text{ N}$$

$$W_{\text{toplam}} = 51 + 102 + 274 = 427 \text{ N}$$

$$N_{\text{tr}} = W_{\text{toplam}} \times V / 3.6 = 427 \times 50 / 3.6 = 5930 \text{ W}$$

Rüzgarın ve eğimin olmadığı ( $V_{\text{rüzgar}} = 0 \text{ km/h}$ ,  $\alpha = 0^\circ$ ) durum için yapılan hesapta 1430N olarak bulunan güç ihtiyacı, motor verimine de bölünür ve motorun sahip olması gereken güç bulunur;

$$1430 / 0.90 = 1590 \text{ W motor gücü}$$

Tasarımı yaparken herbiri aracı tek başına hareket ettirebilecek iki adet motor kullanmaya karar verilmiştir. Bu karar ayrıca, ileride araç üzerine eklenmesi gereken, öngörülemeyen ağırlıklar olması durumunda da, sorunsuz çalışmayı sağlayacaktır. İki tane 1500 W gücünde DC motor kullanmayı tercih edilmiştir. Motorlar, herbiri birbirinden tamamen bağımsız olarak ve istenildiğinde herhangi bir tanesi çalıştırılabilecek şekilde araca monte edileceklerdir.

1500 W gücünde motorlardan (2 adet) tekerlere iletilebilecek olan güç miktarı ve bu güç ile aracın hesaplanan her farklı durumundaki en yüksek hız değerleri bulunmuştur. Ayrıca hızın çok yüksek kalacağı, yani belirlenen 50 km/h değerini geçmesi durumunda motorlar tam güçte çalıştırılmayacaktır. Bulunan değerlerin hepsi şehir içinde sürüş için uygundur.

$$1500 \times 2 \times 0.90 \times 3.6 / 103 = 94 \text{ km / h} \quad (V_{\text{rüzgar}} = 0 \text{ km/h}, \alpha = 0^\circ)$$

$$1500 \times 2 \times 0.90 \times 3.6 / 153 = 63.5 \text{ km / h} \quad (V_{\text{rüzgar}} = +20 \text{ km/h}, \alpha = 0^\circ)$$

$$1500 \times 2 \times 0.90 \times 3.6 / 427 = 23 \text{ km / h} \quad (V_{\text{rüzgar}} = +20 \text{ km/h}, \alpha = 4^\circ)$$

Aracın motor tasarımı için gereken bir başka değer de ihtiyaç duyulacak moment, yani motorun tork değeridir. Gerekli olan en büyük tork değerini doğru bulmak için, aracın en dik eğimde

harekete başlama durumu incelenmelidir. Çünkü bu durumda tekerlerden yere iletilen tork eğer aracı hareketsiz konumdan harekete geçirebiliyorsa, karşılaşılabilecek diğer durumlar için de yeterli olacaktır.

400 kg ağırlığındaki bir aracı, 4° eğim altında harekete geçirmek için eğim aşağı aracı çeken kuvvet bulunmalıdır.

$$G \times \sin\alpha = m \times g \times \sin\alpha \rightarrow 400 \times 9.81 \times \sin 4 = 274 \text{ N}$$

Bu kuvveti her iki arka tekerde de itme sağlayan motorlar olduğundan dolayı her bir motorun uygulaması gereken kuvvet ;

$$274 / 2 = 137 \text{ N ' dir.}$$

Herbir tekerin yere uygulayacağı moment (lastik yarıçapı  $r = 0.25\text{m}$ )

$$M_{\text{teker}} = 137 \times 0.25 = 34.25 \text{ Nm ' dir. ( güvenli çalışma için \%10 arttırılır ve 38 Nm olur)}$$

Bulunan güç ve tork değerlerine ek olarak, aracın belirlenen hıza ulaşabilmesi için tekerlerin ve onlara bağlı olan motorların hızlarını bulmak gerekmektedir. Lastikte olacak deformasyonlar göz ardı edilerek lastik çevresi bulunur;

$$\Ç = 2 \times \Pi \times r = 2 \times \Pi \times 0.25 = 1.57 \text{ m}$$

En yüksek hız olan 50 km/h değerini m/dak cinsinden yazar ve tekerin çevresine bölerek dakikada kaç devir yapılması gerektiğini buluruz.

$$50.000 / 60 / 1.57 = 530 \text{ devir / dak}$$

Motordan istenen güç, tork ve hız değerlerini sağlamak için 1500 devir / dak. hızla dönen ve yaklaşık motora 3 : 1 oranında devrini düşürerek 500 devir / dak olması istenen teker hızı yakalanmış olur. Ayrıca 3 : 1 oranında devrin düşürülmesi, gerekli moment değerini de aynı

oranda arttıracaktır. Bu sebepten dolayı motorun tork değeri ;

$$M_{\text{motor}} , 38 / 3 = 12.7 \text{ Nm olmalıdır.}$$

Akü-batarya kapasitesinin bulunması için ilk önce bataryalar ile aracın ne kadar bir menzili kat edebilmesinin istendiğini belirlemek gereklidir. Bu değer araç tasarımını tamamen değiştirebilmekte ve her uygulama için tasarım kriterlerine göre farklı olarak belirlenmektedir.

Aracın düz yolda ve rüzgarsız havada 50 km/h hızla 75 km yolu bataryaların bir şarj-deşarj ile (tek çevrim) kat edebilmesi için gerekli kapasite bulunacaktır. Unutulmaması gereken konulardan birisi de, bir çevrim sırasında batarya kapasitesinin en fazla %80'i kullanılarak %20 şarj durumuna kadar enerji çekilebilmesidir. Aksi takdirde bataryaların ömrü kısaltmakta ve değiştirilmeleri gerekmektedir. 24 V gerilimde 1430 W güç ile araç, istenilen hızda 1.5 saat yol almalıdır. Toplam verim 0.90 olduğuna göre, bataryalardan çekilmesi gereken enerji miktarı;

$$1430 \text{ W} / 24\text{V} / 0.90 \approx 66 \text{ A}$$

$$66 \text{ A} \times 1.5 \text{ h} = 99 \text{ Ah kapasiteli, 24 V'luk bir akü-batarya grubu gerekmektedir.}$$

Hidrojen yakıtı ve yakıt pilleri ile ilgili formüller ve hesaplamalar;

Yakıt pili için gerekli hidrojen gazı debisi hesaplanabilmektedir ancak kullanılan yakıt pilini firma kataloğu da gerekli debiyi vermektedir. Karşılaştırma yapılabilmesi açısından ilk önce literatürde bulunabilen formüller ile hesaplama yapılacaktır. Bu şekilde hesaplamaların hata oranları da bulunabilecektir.

$$V_c \quad : 0.7 \text{ V kabul edilmiştir.}$$

$$F \quad : 96485 \text{ Coulomb}$$

$$P_e \quad : \text{Seçilen yakıt pili 1200 W gücündedir}$$

$$H_2 \text{ mol ağırlığı} \quad : 2.02 \times 10^{-3} \text{ kg / mol}$$

$$H_2 \text{ mol yoğunluğu} \quad : 0.08376 \text{ kg / m}^3 = 0.08376 \times 10^{-3} \text{ kg/lt (20}^\circ\text{C, 1 atm)}$$

$$H_2 \text{ debisi} = P_e / (2 \times V_c \times F) = 1200 / (2 \times 0.6 \times 96485) = 0.01 \text{ mol/s}$$

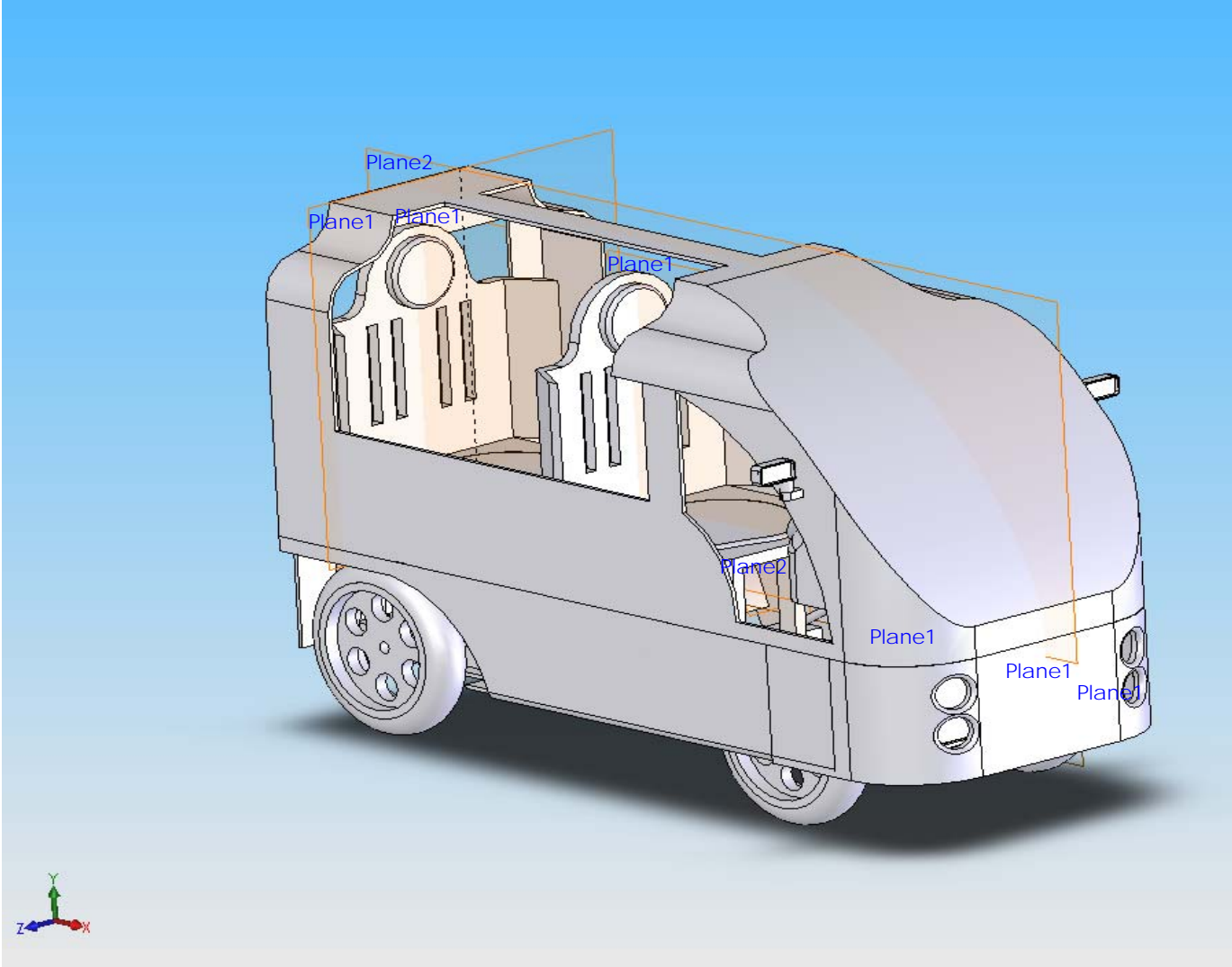
$$H_2 \text{ debisi} = 2.02 \times 10^{-3} \times 0.01 = 0.000021 \text{ kg/s} = 0.0756 \text{ kg/h}$$

$$H_2 \text{ debisi} = 0.0756 / 0.08376 \times 10^{-3} = 902.5 \text{ lt/h}$$

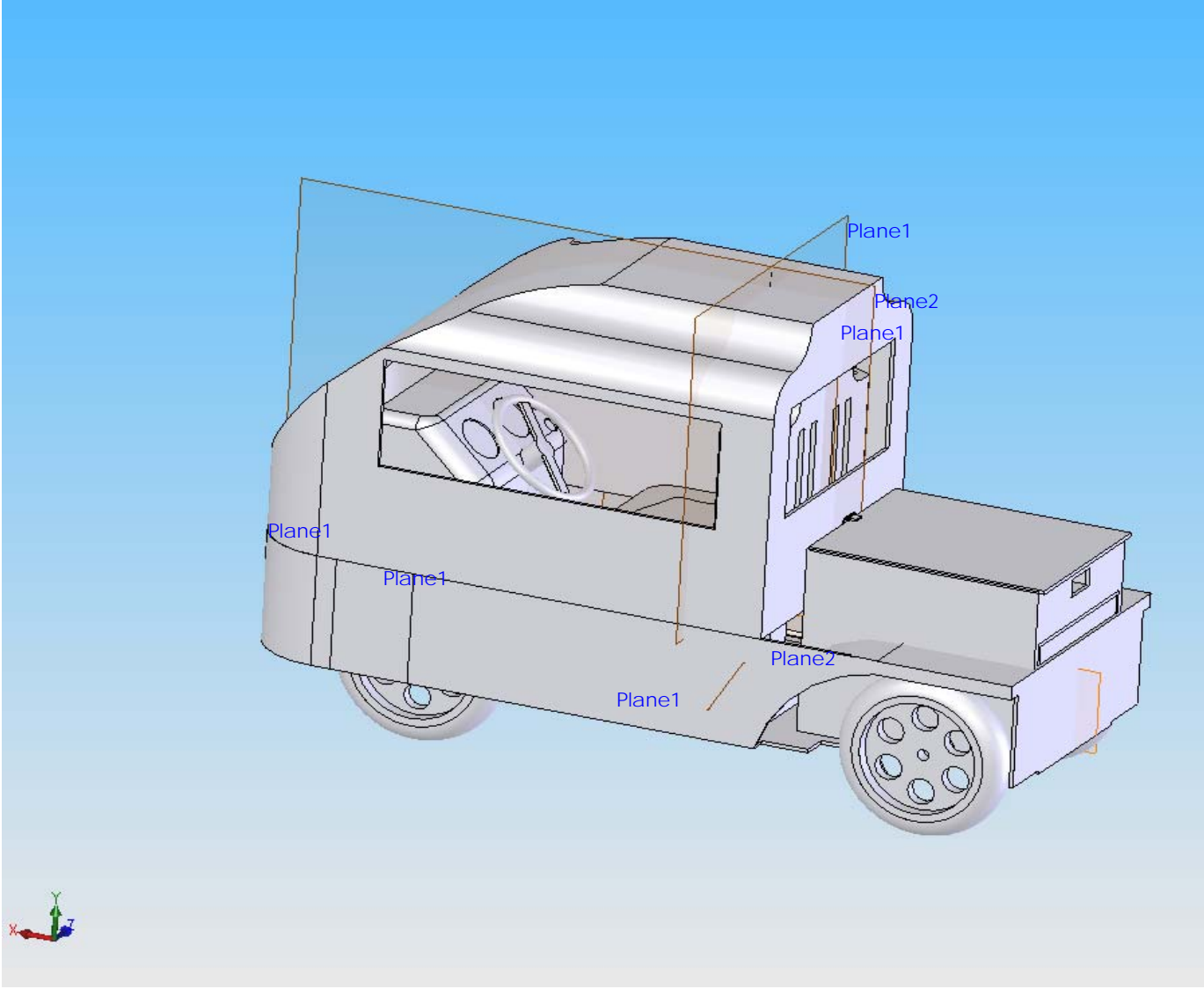
Ballard firmasının 1.2kW Nexa yakıt pili kataloğundan gerekli hidrojen debisi  
18.5 lt/dak = 1110 lt/h olarak alınır.

$(1110 - 902.5) / 1110 \times 100 = 18.7\%$  hata payı bulunmuştur ancak bu çok normaldir çünkü sadece genel hesaplamalar için kullanılabilen formüller, her firmanın ürünlerinin aynı performansı vermemesinden dolayı tam doğru sonuç vermeyecektir.





Şekil 9.2 Hibrit Elektrikli Şehir içi Ulaşım Aracı 2



Şekil 9.3 Hibrit Elektrikli Şehir içi Ulaşım Aracı 3

## 10. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Dünyadaki motorlu taşıt sayısının hızla artmaya devam ettiği bilinen bir gerçektir. Özellikle Çin ve Hindistan gibi ülkelerde halkın son senelerde hızla motorlu araç sahibi olmaya başlaması, bu artışın devam edeceğini göstermektedir. Türkiye’de de kişi başına düşen motorlu araç sayısının artarak, Avrupa ve Amerika ortalamalarına yaklaşması beklenmektedir.

Dünyada artacak motorlu taşıt sayısı, son zamanlarda dünyanın gündemine girmiş olan, başta küresel ısınma olmak üzere tüm çevre problemlerinin, gün geçtikçe artmasına yol açacaktır. Topyekün bir çalışma ile, halen geri dönüş umudu taşıyan bu sorunun çözümü mümkün görünmektedir. Ancak herkesin kendi üzerine düşen görevi zamanında ve eksiksiz yerine getirmesi halinde başarı sağlanabilecektir. Bu çalışmada elbette devletlere görevler düşmektedir ancak unutulmamalıdır ki firmalara, sivil toplum kuruluşlarına ve tüm bireylere de aynı ölçüde sorumluluk düşmektedir.

Motorlu ulaşım taşıtlarının doğaya zararlı emisyon çıkartmayan teknolojiler ile donatılması kaçınılmazdır. Temiz enerji uygulamalarının hem devletler tarafından hem de tüketiciler tarafından motorlu taşıt üreticilerinden talep edilmesi ve bu talepleri karşılayan firmaların da desteklenmesi gerekmektedir. İlk üretilecek ve hatta bazı firmalarca üretilmeye başlanmış bile olan, kullanımları sırasında doğaya az emisyon salınımı yapan, ya da hiç yapmayan taşıtların satışına kolaylıklar getirilmelidir. Kullanıcılar ve üretici firmalar onore edilmeli, kendilerine doğrudan ve/veya dolaylı olarak teşvikler verilmeli, vergi indirimlerinden yararlanmaları sağlanmalıdır.

Türkiye ilk olarak 1960’larda efsanevi Devrim otomobilinin tasarlanıp üretilmesi ile modern anlamda otomotiv endüstrisine ilk adımı atmıştır. Bu ilk yerli üretim araba, ne yazık ki tanıtımı sırasında yapılan basit bir hata yüzünden, medya tarafından, adeta ülkemize zarar verecek bir çalışmaymış gibi gösterilmiş, alay konusu haline getirilmiştir. Büyük özverilerle gerçekleştirilmiş olan bu proje, bir sonraki aşamasına geçmeden, tozlu raflara kaldırılmıştır.

Devrim'den sonra, gene çok büyük özveri ve ileri görüşlülükle Anadol projesi ülkemiz için bir atılım sağlamıştır. Ortaya çıkan araba, günümüzde üretimi devam etmemekle birlikte, bugün bile kullanılmaya devam edilen, adına hayran kulüpleri kurulan ve klasik arabalar arasında yerini almayı başarmış bir markadır. Devrim'den farklı olarak, bir sanayi kuruluşunun seri üretim yaptığı bir araba olmuş ve halk arasında büyük beğeni toplamıştır. Kullanılan gövde malzemeleri, günümüzde her alanda geniş kullanım sahası bulan kompozit malzemelerin otomotiv endüstrisinde ilk kullanımlarındandır ve o gün için ülkemizde büyük fırsatlar yaratabilecektir. Elbette medyanın, bugün bile sorunsuz olarak kullanılan bu gövde ve malzemeleri ile ilgili alaycı haberleri eksik kalmamıştır. Maalesef, bilinmeyen (!) bir sebepten dolayı, uzun ve başarılı sayılması gereken Anadol girişimi de yerini, tamamıyla yurt dışında tasarlanan ve ülkemizde montaj ve üretim olarak gerçekleştirilecek motorlu taşıtlara bırakmıştır.

Bugün ülkemizde birçok insanımızın iş sahibi olmasına olanak sağlayan bir otomotiv endüstrisi mevcuttur. Ancak bu büyük sanayi kuruluşlarımızın hemen hemen hepsi, yabancı firmalarla ortak veya doğrudan yabancı firmaların kendilerindedir. Seneler boyunca yapılmış hataların düzeltilememesi durumunda da, bugün olduğu gibi, hiçbir yerli kuruluş, kullanılan arabalar gibi kişisel ulaşım araçlarının tasarımı ve üretiminde başarılı olamayacaktır. Doğru girişimler doğru zamanda yapılamadığı için, Türkiye'nin otomotiv devrimini ve onu şekillendirme şansını kaçırmış olduğu düşünülebilir.

Elektrikli araç teknolojilerinin, daha önce de içten yanmalı motorlarla mücadele ettiği ve belirtilen sebeplerden dolayı başarılı olamadıkları bir gerçektir. Ancak içten yanmalı motorların sağladıkları avantajların yanı sıra artık göz ardı edilemeyen çevresel, ekonomik ve politik sorunlar da oluşturdukları bilinmektedir. Hidrojen üretim ve depolama teknolojilerinin ve yakıt pillerinin otomotivde kullanılabilir hale gelmesi durumunda, elektrikli araçların önündeki en büyük teknik sorunlar çözülebilecektir. Henüz, başta ABD, Japonya ve Avrupa olmak üzere tüm dünyada yoğun Ar-Ge çalışmalarının sürdüğü ulaşım araçlarında yakıt pilleri ve farklı tip batarya kullanımı, farklı konfigürasyonlarda sistem tasarımı gibi konular üzerinde kesinleşmiş doğrular bulunmamaktadır. Ancak batarya elektrikli ve / veya hibrit elektrikli araçların gelecekte ticari olarak büyük bir potansiyele sahip oldukları herkes tarafından kabul edilmektedir. Bu durum, otomotiv endüstrisini, hatta enerji sektörünü tamamen değiştirebilecektir. Henüz ticarileşme noktasına gelinmemiş ve birçok konuda belirsizlikler olsa da, Türkiye'nin daha önce kaçırdığı

şansı bu kez elektrikli araba sektöründe yakalaması mümkün olabilir.

Tez çalışmasının konusu olan şehir içi kişisel ulaşım aracının üretim çalışmaları halen devam etmekte olduğundan, araç ile ilgili testler ve bu testlerden elde edilecek veriler henüz tamamlanmamış bulunmaktadır. Bu veriler ışığında, tasarımı ve üretimi tamamen yurtiçinde yapılmış olan bu aracın, performansında beklenen hedeflere ulaşıp ulaşılamadığı görülecektir. Projenin, ülkemizde daha önce yapılmış olan çalışmalardan birçok açıdan farklı olması ve alınacak sonuçlara bağlı olarak da birçok yönden geliştirilecek olması dolayısıyla projenin devamı büyük önem taşımaktadır.

GELECEĞİ TAHMİN ETMENİN EN İYİ YOLU, ONU YARATMAKTIR Peter F. Drucker

**KAYNAKLAR**

Baykara, S.Z.,(2002), “Sudan Hidrojen Üretimi ve Enerji Sektöründe Hidrojen”.

Crawley, G., Adamson, K., (2006), Fuel Cell Today Market Survey: Light Duty Vehicles, www.fuelcelltoday.com

Çetin, E.,(2002), “Çevre ve Sürdürülebilir Kalkınma”, Lisans Tezi, YTÜ.

Dicks, A.L., (1996) “Hydrogen Generation From Natural Gas For the Fuel Cell Systems of Tomorrow”, Journal of Power Sources, 61:113-124.

Dönitz W., Gutmann G., Urban P.,(1997),”Fuel cells and batteries for future propulsion systems”, “Proceedings of the Second International Symposium on New Materials for Fuel-Cell and Modern Battery Systems”, Montreal.

European Automotive Design, (August 2006), 5

European Automotive Design, (March 2006), 18

European Automotive Design, (March 2007), 3

Geiger, S., (2004), “Fuel Cell Market Survey: Automotive Hydrogen Infrastructure”, Fuel Cell Today.

Görgün, H. (2006), “Dynamic modelling of a proton Exchange membrane electrolyzer” Int. Journal of Hydrogen Energy, 31,(1):29-38

Karahan, Ş. (2004), Hibrit Elektrikli Araçlar, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ.

Keil, R.G. ve Steiner H.J. (1996) , Paper presented at the ‘4.Elektrochemische Tage’, Universitätsverlag Ulm GmbH.

Kılıçaslan, T. (1995), “Elektrik Enerjisi İle Taşıt Tahriki”, YTÜ, Makina Mühendisliği.

Kruse, B., Grinna, S., Buch, C., (2002) “Hydrogen- Status and Possibilities” Bellona Foundation Report.

Larminie, J., Dick, A., (2000) Fuel Cell Systems Explained, Wiley, New York.

Lerner, P. (May 2007), Popular Science, 68-73,104-107.

McNicol, B.D., Rand, D.A.J., Williams, K.R., (2001), “Fuel cells for road transportation purposes or no?”, Journal of Power Sources, 100(1): 47-59.

McHugh, K., (2005), “Hydrogen Production Methods”, MPR Associates Inc Report.

Romm, J., (2006), “The Car and Fuel of the Future”, Energy Policy,34(17): 2609-2614.

Sarıca, T., (1988), “Hidrojenin Motorlarda Yakıt Olarak Kullanılmasında Sağlanan Avantajlar, Uygulama Teknikleri, Karşılaşılan Problemler ve Geleceğe Yönelik Değerlendirme”, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ.

Şahin, M., (2006), Hidrojen Enerjisi Teknolojileri, Anıl Matbaacılık, Ankara.

Ulrich, L. (May 2007), Future of the Car: Power, Green-Fuel Guide, Popular Science, 76-81

Uluslararası Atom Enerjisi Ajansı-IAEA, (1999), “Hydrogen as an Energy Carrier and its Production by Nuclear Heat”.

U.S.Dep. of Energy. Office of Fossil Energy-Hydrogen Program Plan: Hydrogen from Natural Gas and Coal: the Road to a Sustainable Energy Future. Hydrogen Coordination Group, (2003)

U.S Department of Defense, Militarily Critical Technologies List, Section 7: Energy Systems Technology.

Simbeck, D., Chang, E., (2002) “Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways – Scoping Analysis”.

Tzeng, G., Lin, C., Opricovic, S., (2005), “Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation”, Energy Policy 33: 1373-1383.

Veziroğlu, N.T., Barbir, F., (1998), Hydrogen Energy Technologies.

Veziroğlu, N.T., “Hydrogen Energy System: A Permanent Solution to Global Problems”, University of Miami

Westbrook, M.H. (2001), The Electric and Hybrid Electric Car, TJ International Ltd, Padstow.

#### **INTERNET KAYNAKLARI**

[1] [www.frankmckinnon.com/hydrogen.htm](http://www.frankmckinnon.com/hydrogen.htm)

[2] [www.eere.energy.gov/afdc/pdfs/fueltable.pdf](http://www.eere.energy.gov/afdc/pdfs/fueltable.pdf)

[3] [www.revaindia.com](http://www.revaindia.com)

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	09.04.1981	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1995-1998	Gölcük Anadolu Lisesi
Lisans	1999-2003	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Müh. Anabilim Dalı, Isı Proses Programı
Yüksek Lisans	2003-	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı

**Çalıştığı kurumlar**

2003-2004	Pharma Vision İlaç San. ve Tic. A.Ş
2005-Devam ediyor	UNIDO-ICHET (Birleşmiş Milletler Hidrojen Enerji Teknolojileri Merkezi)
2006- Devam ediyor	AKA Otomotiv San. ve Tic. A.Ş