

**ALTERNATİF YAKIT-ENERJİ KAYNAKLARININ ULAŞTIRMA  
SİSTEMİNDEKİ YERİ, GELECEKTEKİ DURUM**

**Aytaç YILDIZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
TRAFİK PLANLAMASI VE UYGULAMASI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2009**

**ANKARA**

Aytaç YILDIZ tarafından hazırlanan “Alternatif Yakıt-Enerji Kaynaklarının Ulaştırma Sistemindeki Yeri, Gelecekteki Durum” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof.Dr. Süleyman PAMPAL .....  
Tez Danışmanı, Trafik Planlaması ve  
Uygulaması Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Trafik Planlaması ve Uygulaması Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Süleyman PAMPAL .....  
Tez Danışmanı, Trafik Planlaması ve  
Uygulaması Anabilim Dalı,G.Ü.

Prof.Dr. Mecit SİVRİOĞLU .....  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı,G.Ü,

Doç.Dr. Adnan SÖZEN .....  
Makine Eğitimi Anabilim Dalı,G.Ü.

Tarih: 13/01/2009

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL .....  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Aytaç YILDIZ

**ALTERNATİF YAKIT-ENERJİ KAYNAKLARININ ULAŞTIRMA  
SİSTEMİNDEKİ YERİ, GELECEKTEKİ DURUM**

**(Yüksek Lisans Tezi)**

**Aytaç YILDIZ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2009**

**ÖZET**

Dünyada ulaşım sektöründe yaygın olarak kullanılmakta olan fosil yakıtlar, rezervlerin hızla tükenmesi, çevreye olan etkileri, dünya siyasetinde yarattığı istikrarsızlıklar, hatta savaşlar nedeniyle artık yerlerini alternatiflere bırakmaya mecburdur. Bu bağlamda, dünyada ve ülkemizde fosil yakıtlara alternatif oluşturabilecek yenilenebilir enerji kaynakları araştırmaları önem kazanmıştır. Bu tezde, fosil yakıtlara alternatif olabilecek yakıt sistemleri incelenmiş, bu yönde yapılan çalışmalara yer verilerek, gelecekte fosil yakıtların yerini alacak yakıt sistemleri ortaya konmuştur. Bunu yaparken her bir alternatif yakıt ayrı ayrı ele alınarak incelenmiş, avantajları ve dezavantajları irdelenmiş, yakıtlar kendi aralarında kıyaslanarak bir sonuca ulaşılmaya çalışılmıştır.

**Bilim Kodu : 911.1.038**

**Anahtar Kelimeler: Alternatif yakıtlar, ulaşım sektörü**

**Sayfa Adedi : 197**

**Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Süleyman PAMPAL**

**ALTERNATIVE FUEL-ENERGY SYSTEMS AT TRANSPORT SYSTEM,  
FUTURITY**

**(M.Sc. Thesis)**

**Aytaç YILDIZ**

**GAZİ UNIVERSITY**

**INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**JANUARY 2009**

**ABSTRACT**

**The fossil fuels, which are widespread used in transport sector at world, due to exhaustion of reserves, effects on environment, cause of the un-stability at world politics even wars leave their position to alternative sources inevitably. In this sense at world and our country research of renewable sources which can be alternative for fossil sources gain speed. At this thesis the energy which can be an alternative to fossil fuels examined, by accommodating researches at that direction, its determined alternative to fossil fuels at future. In the act of doing that each alternative examined one by one, advantages and disadvantages scrutinized, by comparing alternative sources in their own it is attempted to achieve a conclusion.**

**Science Code: 911.1.038**

**Key Words: Alternative Fuels, transport sector**

**Page Number: 197**

**Adviser: Prof. Dr. Süleyman PAMPAL**

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Prof. Dr. Süleyman PAMPAL'a, tez ile ilgili her türlü sorunumda desteklerini esirgemeyen Trafik Planlaması ve Uygulaması A.B.D. öğretim görevlileri ve asistanlarına, manevi desteklerinden dolayı aileme, büyük zaman ayırarak bu tezi hazırlamamda emeği geçen kız arkadaşım Őeniz KARAHAN'a teőekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ .....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	x
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xiv
1. GİRİŞ .....	1
2. ALTERNATİF YAKIT KAYNAKLARI .....	12
2.1. Hidrojen Enerji Sistemi, Yakıt Pili ve Bor .....	12
2.1.1. Hidrojen enerji sistemi .....	12
2.1.2. Yakıt pili .....	27
2.1.3. Bor .....	36
2.2. Biyokütle enerjisi ve biyodizel .....	46
2.2.1. Biyokütle enerjisi .....	46
2.2.2. Biyodizel .....	55
2.3. Güneş enerjisi ve güneş pilleri .....	60
2.3.1. Güneş enerjisi .....	60
2.3.2. Güneş pilleri .....	62

**Sayfa**

2.4. Ara değerlendirme .....	69
3. ULAŞTIRMADA ALTERNATİF YAKITLARIN KULLANIMI.....	74
3.1. Ulaőtirmada Hidrojen Enerji Sistemi, Yakıt Pili ve Bor .....	74
3.1.1. Ulaőtirmada hidrojen enerji sisteminin uygulanması .....	74
3.1.2. Ulaőtirmada yakıt pilinin uygulanması .....	92
3.1.3. Ulaőtirmada borun uygulanması .....	102
3.2. Ulaőtirmada Biyodizel .....	109
3.2.1. Biyodizelin motorlarda kullanımı .....	109
3.3. Ulaőtirmada Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri .....	118
3.3.1. Güneş enerjisi ve güneş pillerinin ulaőtirmada kullanımı .....	118
3.3.2. Güneş enerjisinin avantajları ve dezavantajları .....	134
3.4. Alternatif Yakıtların Ulaştırma Sektöründe Kullanımıyla İlgili Dünyada Yapılan Çalışmalar .....	135
3.5. Ara Değerlendirme .....	159
4. TÜRKİYE’DE ALTERNATİF ENERJİ KAYNAKLARININ KULLANIMI ...	164
4.1. Türkiye’de Ulaştırma Sektöründe Alternatif Enerji Kaynaklarının Kullanımı .....	179
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	188
KAYNAKLAR .....	192
ÖZGEÇMİŞ .....	197

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Hidrojen özellikleri .....	18
Çizelge 2.2. Hidrojen üretim maliyetlerinin ve kapasitelerinin karşılaştırılması .....	22
Çizelge 2.3. Hidrojen depolama şekli ve yoğunluğu .....	27
Çizelge 2.4. Bor elementinin fiziksel ve kimyasal özellikleri .....	38
Çizelge 2.5. Ticari önem taşıyan bor minarelerinin bileşimi .....	39
Çizelge 2.6. Sodyum borhidrür'ün fiziksel ve kimyasal özellikleri .....	43
Çizelge 2.7. NaBH <sub>4</sub> 'ün farklı çözücülerdeki çözünürlük değerleri .....	44
Çizelge 2.8. Bitkisel biyokütle kaynakları .....	52
Çizelge 2.9. Çeşitli bitkisel yağ metil esterlerinin yakıt özellikleri .....	59
Çizelge 2.10. Hava kirliliği ve güvenlik etkileri bakımından karşılaştırılması .....	72
Çizelge 3.1. 2010 yılı için yakıt pili sistemi hedefleri .....	95
Çizelge 3.2. Dizel motorlarda kullanılan bitkisel yağların özellikleri .....	110
Çizelge 3.3. Mercedes-Benz hidrojen otomobilinin test sonuçları .....	146
Çizelge 3.4. Alternatif yakıtların karşılaştırılması .....	159
Çizelge 3.5. Alternatif yakıtları kullanan araçların performans karşılaştırması .....	161

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Dünya enerji ihtiyacı arz ve talebi (1980-2040) .....	2
Şekil 1.2. Dünya enerji ihtiyacı arz ve talebi-yıllara göre (1980-2100) .....	3
Şekil 2.1. Suyun elektrolizi .....	24
Şekil 2.2. Yakıt pillerinin genel gösterimi .....	28
Şekil 2.3. William Robert Grove tarafından geliştirilen yakıt hücresi .....	31
Şekil 2.4. Mond ve Langer'in tasarladığı yakıt pili .....	32
Şekil 2.5. Gemini uzay aracında kullanılan proton değişim zarlı yakıt pili .....	33
Şekil 2.6. Yakıt pilinin çalışma prensibi .....	35
Şekil 2.7. Farklı sıcaklıklardaki $\text{NaBH}_4$ 'ün sudaki çözünürlüğü .....	44
Şekil 2.8. Biyokütleden biyokimyasal dönüşüm süreçleri ile biyoyakıtlara geçiş .....	49
Şekil 2.9. Biyokütleden termokimyasal dönüşüm süreçleri ile biyoyakıtlara geçiş .....	50
Şekil 2.10. Fotovoltaik pillerin yapısı .....	67
Şekil 3.1. Hidrojen ve dizel motorun yan kesit görüntüsü .....	75
Şekil 3.2. Hidrojen motorunun detay görüntüsü .....	76
Şekil 3.3. Hidrojen yakıtlı motorlarda performans karşılaştırması .....	85
Şekil 3.4. Azot oksit emisyonlarının hava fazlalık katsayısına göre değişimi .....	87
Şekil 3.5. Şehir içi taşımacılıkta yakıtın üretilmesi ve taşınması ile yakıtın tüketilmesinden meydana gelen $\text{CO}_2$ ve $\text{NO}_x$ emisyon değerleri.....	88
Şekil 3.6. Araçta yakıt pilinin kullanımı (Toyota-FCVH-4) .....	92
Şekil 3.7. Yakıt pilinin araç motoruna uygulanması .....	93

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.8. Araçta yakıt pili sisteminin uygulanması .....	97
Şekil 3.9. CO <sub>2</sub> emisyonu karşılaştırması .....	100
Şekil 3.10. NaBH <sub>4</sub> yolu ile H <sub>2</sub> depolama sisteminin araçlarda kullanım şeması ....	104
Şekil 3.11. Chrysler'in Natrium isimli yakıt pili ile çalışan aracı .....	106
Şekil 3.12. Güneş arabasının çalışma yapısı .....	120
Şekil 3.13. Güneşli bir gün için tipik güneş etkisi değişimi .....	120
Şekil 3.14. Aracın elektrik sisteminin genel hatlarıyla çizimi .....	121
Şekil 3.15. Güneş enerjili arabaların temel elektrik sistemi .....	122
Şekil 3.16. Güneş hücresinin elektrik üretimi .....	124
Şekil 3.17. Chrysler tarafından üretilen Natrium Fuel-Cell Mirliyan .....	151

## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.1. Bor elementi, (a) görünüşü, (b) kristal yapısı .....	40
Resim 2.2. Güneş pili modülü .....	63
Resim 3.1. BMW tarafından geliştirilen 12 silindir 150 kW gücündeki hidrojen motoru .....	77
Resim 3.2. Ticari araç için geliştirilmiş yakıt pili sistemi ve araca uygulanması .....	94
Resim 3.3. Ford firmasının üzerinde çalıştığı yakıt pilli aracı .....	98
Resim 3.4. Yakıt pilinin araç üzerindeki uygulaması (Honda 2005 FCX) .....	99
Resim 3.5. Güneş arabası kasa direksiyon bağlantısı .....	126
Resim 3.6. Gaz pedalı direksiyon arası bağlantı sistemleri .....	126
Resim 3.7. Tekerlek ve motorun bağlantısı .....	128
Resim 3.8. Güneş panelleri .....	132
Resim 3.9. Sharp NE-80EJE güneş paneli .....	132
Resim 3.10. Mercedes-Benz'in hidrojen yakıtlı bir otobüs modeli .....	138
Resim 3.11. Shell tarafından açılan dünyanın ilk hidrojen dolun istasyonu .....	139
Resim 3.12. Lockheed sıvı hidrojen uçağı .....	140
Resim 3.13. Airbus sıvı hidrojen uçağı .....	140
Resim 3.14. Mazda firmasının hidrojen dolun istasyonu .....	142
Resim 3.15. Mazda RX-8 .....	142
Resim 3.16. Hidrojen yakıtlı BMW modeli .....	143
Resim 3.17. Hidrojen yakıtı ile tahrik edilen Mercedes- Benz kamyonet .....	145

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.18. Hem benzin hem hidrojen yakıtı ile tahrik edilen Mercedes-Benz otomobil .....	146
Resim 3.19. Toyota'nın Hybrid Synergy Drive® teknolojisinin kullanıldığı Prius modeli .....	147
Resim 3.20. Daimler Chrysler'in 12 Aralık 2001 tarihinde Detroit Otomobil Fuarı'nda tanıttığı Chrysler Town&Country Natrium aracı .....	152
Resim 3.21. SR-71 "Blackbird"3,2 Mach ve Mig-25 Foxbat .....	153
Resim 3.22. World Solar Challenge yarışları .....	156
Resim 3.23. Nuna II aracı .....	157
Resim 3.24. Tesseract aracı .....	157
Resim 4.1. Türkiye'de biyodizel üreticilerinin dağılımı .....	169
Resim 4.2. Güneş kolektörleri .....	171
Resim 4.3. Güneş pili sistemi .....	172
Resim 4.4. Güneş pili aydınlatma birimleri .....	172
Resim 4.5. Güneş pili su pompaj sistemi .....	173
Resim 4.6. Su pompaj sistemi .....	173
Resim 4.7. Güneş pili trafik ikaz sistemi .....	174
Resim 4.8. Şebeke bağlantılı 4,8 kWp güneş pili sistemi .....	175
Resim 4.9. Şebeke bağlantılı 5,08 kWp güneş pili sistemi .....	176
Resim 4.10. Güneş evi .....	178
Resim 4.11. SAGUAR X5 yarışa hazırlanırken .....	186

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	Karbondioksit
<b>%</b>	Yüzde
<b>NO<sub>x</sub></b>	Azotoksit
<b>HC</b>	Hidrokarbon
<b>atm</b>	Atmosferik basınç
<b>\$</b>	Amerikan para birimi (dolar)
<b>NaBH<sub>4</sub></b>	Sodyum borhidrür
<b>kg</b>	Kilogram
<b>m</b>	Metre
<b>ft</b>	Feet
<b>H</b>	Hidrojen
<b>°C</b>	Santigrad derece
<b>g</b>	gram
<b>cm</b>	Santimetre
<b>mJ</b>	Megajoule
<b>kJ</b>	Kilojoule
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Su
<b>dm</b>	Desimetre
<b>N</b>	Newton
<b>KOH</b>	Potasyum hidroksit
<b>CO</b>	Karbonmonoksit
<b>MgH<sub>2</sub></b>	Magnezyumdihidrit
<b>NaBO<sub>2</sub></b>	Sodyum metaborat
<b>PTFE</b>	Politetrafluoroetilen

**Simgeler****kW****Ppm****B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>****Mg<sub>3</sub>B<sub>2</sub>****TiB<sub>2</sub>****M.S.****CH<sub>4</sub>****H<sub>2</sub>S****NH<sub>3</sub>****N<sub>2</sub>****H<sub>2</sub>****GaAs****CdTe****CuInSe<sub>2</sub>****λ****MPa****Açıklama**

Kilowatt

Milyonda parça

Bor oksit

Magnezyum borit

Titanyum diborit

Milattan sonra

Metan

Hidrojen sülfür

Amonyak

Azot

Hidrojen

Galyum Arsenit

Kadmiyum Tellürid

Bakır İndiyum Diselenid

Geri tutuşma hava fazlalık kat sayısı

Mega paskal

**Kısaltmalar****ROS****SR****POX****ATR****PEMYP****DMYP****AYP****FAYP****EKYP****Açıklama**

Oktan Sayısı

Katalitik Buhar Yapılandırma

Non-katalitik Kısmi Oksidasyon

Katalitik Kısmi Oksidasyon

Proton Geçiren Polimeri Zarlı Yakıt Pili

Direk Metanol Yakıt Pili

Alkali Yakıt Pili

Fosforik Asit Yakıt Pili

Erimiş Karbonatlı Yakıt Pili

**Kısaltmalar****KOYP****RYP****SYP****EGR****GDL****TPAO****Açıklama**

Katı Oksitli Yakıt Pili

Rejeneratif Yakıt Pili

Silindirik Yakıt Pili

Egzoz gazları resirkülasyonu uygulaması

Gaz Difüzyon Tabakası

Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı

## 1. GİRİŞ

Enerji kaynakları; yenilenemeyen ve yenilenebilir enerji kaynakları olmak üzere iki kısımdan incelenebilir [1]:

Yenilenebilir enerji, "doğanın kendi evrimi içinde, bir sonraki gün aynen mevcut olabilen enerji kaynağı" olarak tanımlanabilir [2].

Yenilenemeyen enerji kaynakları arasında; kömür, petrol ve petrol ürünleri, doğalgaz ve nükleer enerji gösterilebilir. Yenilenebilir enerji kaynaklarında ise biyokütle (odun, bitki artıkları vb.), rüzgar, hidrolik, jeotermal ve güneş enerjisi ön sıralarda yer almaktadır.

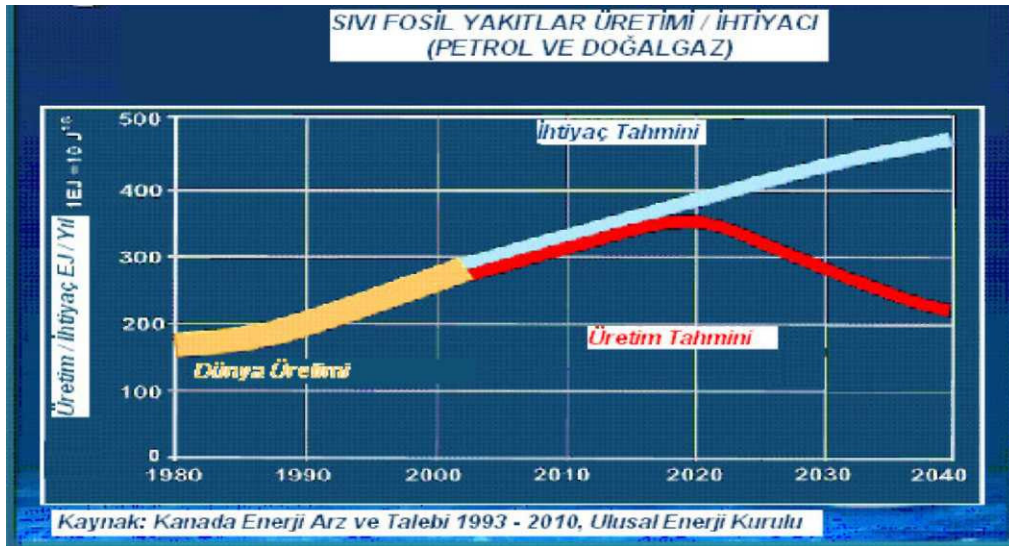
Fosil yakıtların çevre ve insan sağlığı açısından yarattığı olumsuzluklar her geçen gün katlanarak artmaktadır. Fosil yakıtlar yakıldığında karbondioksit ( $CO_2$ ) ve metan gazının açığa çıkmasına neden olur.

Güneş, gün doğumundan gün batımına kadar atmosfere ısı ve ışık vermektedir. Doğal döngünün devam etmesi için bu ısının tekrar uzaya verilmesi gerekmektedir. Oysa fosil yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan  $CO_2$  ve metan gazı bünyelerinde ısı tutma özelliğinden dolayı ısının bir kısmını atmosferde tutmaktadır. Böylece dünya ısınmaya başlamakta ve iklim değişiklikleri meydana gelmektedir.

70'li yıllarda başlayan enerji darboğazları ekonomilerin enerjiye mutlak şekilde bağlı olduğunu göstermiştir. Bu durumdan da en çok, gerek mevcut sanayilerini çalıştırmak, gerek yeni sermaye yatırımlarını gerçekleştirmek için bol ve ucuz enerjiye gereksinim duyan sanayileşme yolundaki gelişmekte olan ülkeler ile birlikte Türkiye de etkilenmiştir. Söz konusu enerji darboğazı, gelişmiş ülkelerde de yaşanan ekonomik durgunluk dönemi ile birlikte 1984 yılına kadar sürmüştür. 1980'li yılların sonuna doğru ise özellikle gelişmiş ülkelerdeki sanayileşme hamleleri ile birlikte

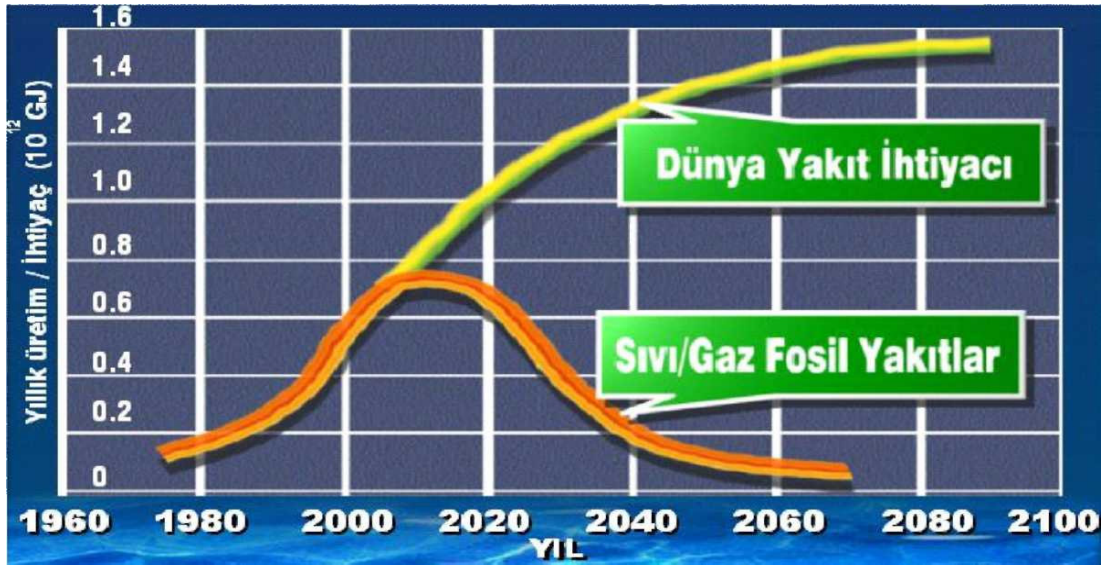
enerji talebi tüm dünyada hızla artarken Türkiye'de de artmıştır. Bu bağlamda yeni enerji kaynaklarına ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır.

Genel olarak enerjiye ve bunun paralelinde fosil yakıtlara olan talep, gelişmeye ve artan nüfusa paralel olarak yükselmektedir. Bu enerjinin yaklaşık % 85 oranında çok büyük bir bölümünün fosil yakıtlardan (petrol, doğal gaz ve kömür) karşılanacağı öngörülmektedir. Enerji arz ve talebini ortaya koyan projeksiyonlarda, arz ve talep arasındaki farkın giderek artması (makasın açılması) ve bu farkın 2020'li yıllardan itibaren, fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması nedeni ile çok daha büyümesi kaçınılmaz görünmektedir.



Şekil 1.1. Dünya enerji ihtiyacı arz ve talebi (1980–2040) [1]

Şekil 1.1. ve Şekil 1.2'de görüldüğü gibi, 2000'li yılların başlarında petrol ve doğalgaz üretim ve ihtiyacı birbirini dengelerken, özellikle 2020'li yıllardan itibaren dünya yakıt ihtiyacının hızla artmaya devam edeceği, ancak fosil kaynaklardan elde edilecek sıvı ve gaz yakıtların arzının ise tam tersine hızla azalmaya başlayacağı tahmin edilmektedir.



Şekil 1.2. Dünya enerji ihtiyacı arz ve talebi-yıllara göre (1980–2100) [1]

Günümüzde fosil yakıtlara alternatif olarak doğal enerji kaynakları (rüzgar, jeotermal, hidroelektrik vb.) ve nükleer enerji ele alınmaktadır. Ancak bu kaynakların hiçbiri fosil yakıtların en kritik olduğu alanda yani taşıtlarda kullanılmaya uygun değildir. Bu amaçla yeni enerji kaynağı arayışları devam etmektedir [3].

Bu tezin amacı; ulaşım sektöründe kullanılacak alternatif yakıtları incelemek, ülkemizde ve dünyada bu yönde yapılan araştırmaları ortaya koymak, alternatif yakıtları kendi aralarında çeşitli kriterlere göre karşılaştırmak ve gelecekte ulaşım sektörünü şekillendirecek yakıt sistemleri hakkında bilgi vermektir.

Tezin ikinci bölümünde, alternatif yakıtların tarihsel gelişimi, fiziksel ve kimyasal özellikleri, üretim, taşıma ve depolama gibi genel bilgiler, her bir alternatif yakıt için ayrı başlıklar halinde incelenmiştir.

Tezin üçüncü bölümü, alternatif yakıtların ulaşım sektöründeki yerine ayrılmıştır. Bu bölümde, ulaşım sektöründe kullanılan alternatif yakıtların teknik özellikleri, emisyonlara etkisi ve her bir yakıtın avantaj ve dezavantajları ortaya konmuştur.

Ayrıca, alternatif yakıtlarla ilgili Dünya’da yapılan çalışmalar, yürütülen ve gelecekte yürütülmesi planlanan projelere yer verilmeye çalışılmıştır.

Ayrıca tezin ikinci ve üçüncü bölümleri sonunda ara değerlendirmeler yapılmıştır.

Tezin dördüncü bölümünde, Türkiye’de ve Türkiye’deki ulaştırma sektöründe alternatif enerji kaynaklarının kullanımı incelenmiş, mevcut durum örneklerle açıklanmaya çalışılmıştır.

Tezin beşinci ve son bölümünde ise sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

#### Literatür taraması

Alternatif yakıtlar konusu farklı alanlarda birçok alternatif yakıt hakkında yapılmış çeşitli araştırmaları kapsar. Dolayısıyla araştırmacılar, tek bir alternatifi ele alıp onu araştırmaya yönelmişlerdir. Bu çalışmada, öncelikli tüm alternatifler ele alınmak suretiyle, bir bütün halinde ve birbirleriyle karşılaştırılarak bir sonuca ulaşılmaya çalışılmıştır. Aşağıda alternatif yakıtlar ile ilgili ele alınan çalışmalar ana hatlarıyla özetlenmektedir.

#### *Tezler*

Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik üretim yöntemlerinden biri olan, yakıt pili ile elektrik enerjisi üretimi anlatıldığı bir tez çalışmasında [1], günümüzde enerjinin büyük bir kısmının üretildiği fosil yakıtlar ve zararları incelenerek neden yakıt piline ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır. Daha sonra yakıt pillerinden elektrik üretmek için yakıt olarak kullanılan ve yenilenebilir bir enerji olan hidrojenin özellikleri konusunda bilgi verilmiştir. Son olarak da yakıt pillinin çalışma prensibi ve yakıt pili türleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Hidrojen yakıtının önemi, içten yanmalı motorlarda alternatif bir yakıt olarak kullanılmasının avantajları ve dezavantajlarının araştırıldığı bir çalışmada [2],

motorlarda kullanılabilmesi için yapılması gereken modifikasyonlar anlatılmıştır. Ayrıca tez çalışması dahilinde bir deney motorunun hidrojenle çalıştırılması amaçlanmıştır.

Hidrojen yakıt pili ve PEM yakıt pili analizinin yapıldığı bir tezde[3], hidrojen enerji sistemi ve bu sistemin ana konusu olan hidrojen elde edilmesi, depolanması, taşınması ve yakıt pilleri konuları irdelenmiş ve proton taşıyıcı zar yakıt pilinin çalışma şekli ortaya konarak elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Biyodizel üzerine hazırlanan bir tezin ilk kısmında [4], enerjinin dünyada ve Türkiye'deki durumundan ve biyokütle enerjisinden bahsedilmiştir. Çalışmanın bir sonraki bölümünde ise biyodizelin özelliklerinden ve nasıl elde edildiğinden bahsedilmiş, diğer yakıtlarla mukayesesi yapılmıştır.

Doktora tezi çalışmasında [5], palmye yağı kökenli atık kızartma yağından elde edilen biyodizel, dört silindirli, doğal emişli, indirekt püskürtmeli (EDP) bir dizel motorda alternatif dizel yakıtı olarak kullanılmıştır. Elde edilen motor test sonuçları, petrol kökenli dizel yakıtı (PKDY) ile yapılan ölçüm değerleri referans alınarak karşılaştırılmıştır. Motor performans, yanma, püskürtme ve egzoz emisyon karakterlerini belirlemek amacıyla, motor tam yük, 60, 40, 20 Nm sabit yük ve değişik devir testlerine tabi tutulmuştur. Deneysel sonucunda, biyodizel ve karışımları özgül yakıt tüketiminde artış gösterirken, motor performansında ise PKDY'ya göre hafif bir düşme olmuştur. Genelde biyodizel ve karışımlarının kullanılması ile silindir gaz basıncının PKDY'ya göre daha yüksek olduğu ve üst ölü noktaya biraz daha yaklaştığı ortaya çıkmıştır. Bütün test şartlarında, test motorunda biyodizel kullanıldığı zaman, tutuşma gecikmesi kısalmış ve püskürtme başlangıcı PKDY'ya göre daha erken olmuştur. Deneysel, her bir yakıt için karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO<sub>2</sub>), yanmamış hidrokarbon (HC), azot oksit (NO<sub>x</sub>) ve duman yoğunluğu değerleri ölçülmüştür. Emisyon testleri sonucunda, biyodizelin oksijen içeriği, HC, CO ve duman yoğunluğu emisyonlarında önemli azalmalar sağladığı

belirlenmiştir. Fakat test motorunda biyodizel ve karışımlarının kullanımı ile  $\text{NO}_x$  emisyonunda artış görülmüştür.

Bir tezde [6], susuz boraksın bor kaynağı olarak kullanıldığı, düşük basınç ve yüksek basınç prosesleri olarak adlandırılan sodyum borhidrür üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, üretilen sodyum borhidrürün oldukça yüksek kapasiteli bir hidrojen depolama ortamı olarak kullanılabilceğini göstermektedir.

Güneş enerjisi ile çalışan otomobil tasarımını anlatan bir tezde ise [7], sırası ile güneş enerjisinden faydalanma yöntem ve teknikleri, güneş enerjili sistemler için çok önemli bir yere sahip doğru akım gerilim çeviricilerinin çalışma prensipleri incelenmiş ve tasarımı yapılan güneş arabasının elektrik sisteminde kullanılan malzemeler incelenerek elektrik sisteminin bağlantıları gösterilmiştir.

Yakıt pillerini inceleyen bir tez çalışmasında [8], yakıt pillerinin tarihsel gelişimi, türleri, avantajları-dezavantajları, ülkemizde bu yönde yapılan çalışmalar incelenmiş ve yakıt pili türleri karşılaştırılmıştır.

Biyodizel üzerine hazırlanan bir tezde [9]; fındık, zeytin, mısır ve soya yağlarından elde edilen biyodizellerin yakıt özellikleri belirlenerek, soya yağından elde edilen biyodizel için optimum reaksiyon şartları incelenmiş ve bu şartlar fındık, mısır ve zeytinyağlarına uygulanarak elde edilen biyodizellerin yakıt özellikleri araştırılmıştır.

Bilim uzmanlığı tezi olarak hazırlanan bir çalışmada [10]; elektrik enerjisinin bulunmadığı yerlerde soğutma yapabilmek için enerji ihtiyacını güneş pilinden karşılayan termoelektrik soğutucu tasarlanmıştır. 29cmx29cmx29cm ebatlarında yapılan kabinin ısı kazancı hesaplarına göre uygun termoelektrik modül ve güneş pili Karabük koşullarına göre belirlenmiştir. Termoelektrik soğutucunun cihaz iç sıcaklığı, dış sıcaklığı, modül sıcak yüzey sıcaklığı, soğuk yüzey sıcaklığı, güneş pilinden çekilen gerilim ve akım değerleri ölçülerek değerlendirilmiştir.

Bir tez çalışmasında [11], güneş arabasının nasıl oluşturulduğuna dair bilgiler yer almaktadır. En uygun güneş arabası modeli oluşturmak için daha önce yapılmış olan

güneş arabası modellerinin özellikleri incelenmiştir. Bu bilgiler ışığında “Enerji - 1” güneş arabasının tasarımı yapılmıştır. Bu tasarıma dayanarak ve TÜBİTAK’ın düzenlediği “Solarcar” yarışının yapılacağı pist göz önünde bulundurularak “Enerji – 1” güneş arabası için senaryo oluşturulmuştur. Daha sonra “Enerji – 1” güneş arabasının enerji yönetimi modellemesi, aerodinamik yapısı, güç sistemleri seçimi yapılmış ve GYTE ve Sabancı Üniversitesi laboratuvarlarında imalatı gerçekleştirilmiştir.

Bir tezde [12], dünyada özellikle ABD’de bitkisel yağ ve biyodizel üretiminde faz geçilemez bir ürün olarak kullanılan fakat Türkiye’de üretimi ve kullanımı yaygınlaşmamış soya yağından elde edilmiş biyodizelin dizel motor performansı ve emisyonlarına etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bir tez çalışmasında [13], biyodizel hammaddesi olarak ham kanola yağı, nötr pamuk yağı ve atık kızartma yağı kullanılmış, biyodizel üretim yöntemi olarak alkali katalizörler ile transesterifikasyon metodu izlenmiştir. Transesterifikasyon reaksiyonunda, alkol olarak metil alkol, katalizör olarak sodyum hidroksit kullanılmıştır. Üretilen biyodizeller, dizel yakıtı içerisine %20 hacimsel oranda karıştırılmıştır. Biyodizel-dizel karışımları, dört zamanlı, dört silindirli, ön yanma odalı turbo-dizel bir motorda, tam yükte, performans ve emisyon değerleri bakımından test edilmiştir. Deney sonuçları, farklı çalışma şartlarında performans ve emisyon değerleri göz önüne alınarak, üretilen biyodizel yakıtların dizel yakıtına kısmi oranda karıştırılması suretiyle dizel motorda herhangi bir değişiklik veya yakıt ön ısıtması gerektirmeden kullanılabilirliğini göstermektedir.

### *Bildiriler*

Bir bildiride [14]; bor minerallerinin dünyadaki potansiyeli ve Türkiye için önemi vurgulanmıştır. Başlıca bor mineralleri, buldukları bölgeler, üretim, ithalat ve ihracat değerleri verilmiş, ülkemiz bor endüstrisinin gelişmesinde etkili olan önemli hususların altı çizilmiştir.

Bir bildiride ise [15], Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanımının getireceği avantajlar ve karşılaşılan problemler incelenmiştir.

Bir bildiride [16], borhidrür yakıt pilleri ve hidrojen depolama problemleri, Patenti Millennium Cell'e ait olan Borhidrür yakıt pili, Hydrogen on Demand ve borhidrür aküleri çerçevesinde açıklanmıştır.

### *Makaleler*

Bir makalede [17], hidrojen teknolojisi ve geleceği ekonomik açıdan ele alınmış ve hidrojen ekonomisine geçişte engeller, dikkat edilmesi gereken hususlar vurgulanarak; hidrojen enerjisine geçiş için üç senaryo öngörülerek açıklanmıştır.

Bir makalede ise [18], hidrojen üretilmesi, iletilmesi ve dağıtımı ele alınmış, hidrojenden enerji üretilmesi için geliştirilen yakıt pilleri ve bunların maliyetleri incelenmiştir.

Bir makalede [19]; bitkisel yağların dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanım olanakları, karşılaşılan sorunlar ve çözüm önerileri, motor performansı, egzoz emisyonları ve motor elemanları üzerindeki etkileri literatür irdelenerek incelenmiştir.

Bir makalede [20], ülkemizdeki yenilenebilir enerji kaynakları incelenmiştir.

Bir makalede ise [21], bor mineralinin geçmişten günümüze önemi ve Türkiye'nin durumu ele alınmış ve enerji hammaddesi bor ve buna dayalı teknolojiler ortaya konmuştur.

Bir makalede [22], hibrid bir araç tasarlanması ve deneysel olarak incelenmesine yer verilmiştir.

Litvanya'da yapılan bir makale çalışmasında ise [23], biyodizelin demiryolu lokomotiflerinde kullanılabilirliği ve dizel yakıtın içine belli oranlarda (%20, 30, 40 vs.) organik dizel yakıtı konunca çevreye salınan zararlı atıklar analiz edilerek bir tablo halinde sonuç kısmında belirtilmiştir.

İran'da yayınlanan bir makalede ise [24], ileride özellikle ulaştırma alanında hidrojen enerjisine geçilince, hidrojenin depolama ve dağıtım ağının nasıl kurulacağı, hidrojen istasyon binalarına varıncaya kadar maliyetleri hesaplanarak, hidrojen teknolojisinin altyapı maliyetleri üzerinde durulmuştur.

Türkiye'de hazırlanan ve uluslararası bir dergide yayınlanan bir makalede ise [25], biyodizelin 2050 yılına kadar biyokütle enerjilerinin gelişmiş ülkelerin enerji ihtiyacının yarısını karşılayacağı öngörülerek, tüm biyodizel bitkileri irdelenerek uluslar arası bir projeksiyon ortaya konmuştur.

Çin'de hazırlanan bir makalede [26], yeni bir hidrojen üretim yöntemi ortaya konarak, ferric kristalleri yardımıyla sodyum bor hidrürden hızlı hidrojen üretimi sağlandığı ve dakikada 1.08 litre hidrojenin elde edildiği belirtilmiştir.

Portekiz'de bir hidrojen rafinerisi üzerinde çalışan bilim adamları hidrojen üretim dağıtım süreçlerini iyileştirerek, verimliliği % 30 oranında arttırmayı başarmış ve bu çalışmalarını bir makale olarak yayınlamıştır [27].

Çin'de yapılan bir makale çalışmasında ise [28], mısır bitkisinden biyodizel üretiminde verimi arttıran bir yöntem geliştirilmiş ve çeşitli katkı ve kimyasal reaksiyonlar tanımlanarak % 90'lara varan üretim verimi elde edilmiştir.

İtalya'da yapılan bir makale çalışmasında [29], 20 kWe'lik PEM yakıt pili hücresi bir araca yerleştirilerek dinamik şartlar test edilmiş ve aracın çekiş gücü ve hızlanmasını arttıracak yeni yöntemler ortaya konmuş, bu sayede çok düşük voltajlarda dahi % 3' lük performans artışları sağlanmıştır.

Hırvatistan'da yapılan bir makale çalışmasında ise [30], biyodizel teknolojilerinin Hırvat ekonomisine doğrudan ve dolaylı etkileri girdi-çıkı analizlerine göre belirlenmeye çalışılmış, Hırvatistan'ın biyodizel üretimi ve gelecekteki talebi belirlenmeye çalışılmıştır. Bununla birlikte kültürel etkilere dikkat edilmesi durumunda, biyodizel üretiminin yaygınlaşmasının, Hırvat ekonomisine net fayda sağlayacağı belirtilmiştir.

Nijerya'da yapılan bir makale araştırmasında ise [31], biyodizelin ısıtılınca ve yavaş hızlarda, daha çok yüklenme boşaltma gibi ağır işlerde kullanılan motorlarda, dizel yakıttan daha verimli olduğu belirtilmiş ve emisyon değerleri tablolar eşliğinde verilmiştir.

Hindistan'da yapılan bir makale araştırmasında [32], biyokütleden, su içinde hassas karışımlar sayesinde hidrojen elde edilmesini ele alarak, dünyanın gelecekte en önemli enerji kaynağı olacağını varsaydığı hidrojenin, bitkisel biyokütleden elde edilebileceğini ortaya koymaktadır. Örneğin fındıktan 23 MPa da % 50,8 hidrojen elde edilebilirken, bu oran pamuk çekirdeğinde % 52,4'e çıkıyor, aynı zamanda basınç 48 MPa olduğunda bu oranlar %70'lere kadar yükselmektedir.

Hidrojen enerjisinin gelecekte birincil enerji kaynağı olacağını varsayan bir [33] makalenin yazarları, Kore için hidrojen dağıtım, depolama ve pazarlama stratejileri ve zincirinin nasıl kurulacağı konusunda bir araştırma yaparak, muhtemel sorunları, optimum verimde çözümleri ortaya koymaya çalışmaktadır. Bu çalışmada, Kore 2004 yılı talep öngörülerine göre 17 bölgeye ayrılarak, her bölgenin talepleri öngörülmüş ve dağıtım ağının bu yönde kurulması önerilmiştir. Hatta bölgeler arasındaki hidrojen taşınması bile belirtilerek bazı bölgelere tankerlerle bazı bölgelere boru hatlarıyla hidrojen taşınması önerilmiştir.

Nepal'da yapılan bir makale çalışmasında [34], Nepal'in hidroelektrik potansiyelinin yüksek olmasına rağmen fiziki olarak baraj yapmanın çoğu yerde mümkün olmadığını altı çizilerek, Nepal'in elektrik ihtiyacını sağlamada hidroliz yöntemiyle hidrojen üreterek gidermesi önerilmiş, bu çalışmaya göre 2020 yılında hidrojen

enerjisi Nepal'in tüm enerji ihtiyacının % 20'sini karşılayabilecek durumda olduğu belirtilmiştir.

Almanya'da yapılan bir makale araştırmasında ise [35], biyodizelin AB politikaları hedefleri doğrultusunda 2010 yılı sonuna kadar toplam yakıtlar içerisinde % 5'lik bir paya sahip olması gerektiği belirtilerek, bu hedefin hem çevresel hem de ekonomik açıdan incelenmesi yapılmış ve gerekli teşvik ve sübvansiyonların belirtilmiştir.

Bir makale çalışmasında [36], mısırdan elde edilen etanolün yakıt olarak kullanılması, hem ekonomik hem de çevre açısından değerlendirilmiş ve günümüzde kullanılan yakıtlarla karşılaştırılmıştır.

## **2. ALTERNATİF YAKIT KAYNAKLARI**

### **2.1. Hidrojen Enerji Sistemi, Yakıt Pili ve Bor**

#### **2.1.1. Hidrojen enerji sistemi**

Bir enerji taşıyıcısı ve yakıt olarak hidrojenin taşıdığı potansiyel, yaklaşık 200 yıldan beri bilinmektedir. 1805 yılında Isaac de Rivaz tarafından icat edilen erken içten yanmalı motor, hidrojenle çalışmaktadır. Bundan yaklaşık 90 yıl sonra Alman mucit Rudolf Diesel, toz haline getirilmiş kömürü (karbon ve hidrojen) kullanan dizel motoru icat etmiş ve mükemmelleştirmiştir. Gelecek bilimci Jules Verne, hidrojenle ilgili görüşünü "Gizemli Ada" adlı romanında ortaya koymuştur. Jules Verne'nin kitabının basımından yüzyıl sonra, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler enerji, ekonomi ve çevre güvenliği sorunlarına potansiyel çözüm olarak, hidrojen ekonomisinin evrimini hızlandırmayı kabul etmişlerdir [17].

Dünyanın enerji gereksiniminin büyük bölümünü karşılayan fosil kaynaklar hem gittikçe azalmakta hem de çok ciddi çevre ve hava kirliliğine sebep olmaktadır. Hidrojen, bir enerji taşıyıcısı olarak bu sorunların çözümü için bir potansiyel oluşturmaktadır. Bu sebeple son yıllarda hidrojen enerjisi üzerinde yoğun araştırma ve geliştirme faaliyeti sürdürülmektedir. Temiz ve yenilenebilir hidrojen enerjisinin dünyanın artan enerji gereksinimini karşılayacağı bir gelecek için, gelişmiş ülkeler çok yoğun bir şekilde büyük ölçekli teknolojik araştırma ve geliştirme programları yürütmektedirler.

Hidrojen dünyada en çok bulunan elemanlardan biridir. Su; hidrojen ve oksijenden oluşur ve akarsu ve denizlerde çok miktarda bulunmaktadır. Hidrojen doğada saf halde bulunmaz. Ancak çeşitli yöntemlerle elde edilebilir. Bu sebeple yenilenebilir bir yakıttır. Bunun yanında yakıtlar içerisinde çevresel açıdan en temizidir. Birincil enerji kaynakları kullanarak, hidrojen üretilip, bunun gereksinim duyulan yerlere

iletilerek çeşitli yöntemlerle enerjiye çevrilmesine “hidrojen enerji sistemi” denir [18].

Hidrojen birincil enerji kaynağı değil, bir enerji taşıyıcısıdır. Elektriğe benzemektedir, fakat ondan daha verimli bir şekilde enerjiyi taşıyabilir. Hidrojen için geleceğin ideal yakıtı denilmektedir. İdeal bir yakıtta bulunması istenen özellikler ise şöyle sıralanabilir; Kolayca ve güvenli olarak her yere taşınabilmeli, taşınırken enerji kaybı hiç veya çok az olmalı, her yerde kullanılabilmeli, depolanabilmeli, tükenmez olmalı, temiz olmalı, birim kütle başına yüksek kalori değerine sahip olmalı, değişik şekillerde, örneğin, doğrudan yakarak veya kimyasal yolla kullanılmalı, güvenli olmalı, ısı, elektrik veya mekanik enerjiye kolaylıkla dönüşebilmeli, çevre üzerinde hiç olumsuz etkisi olmamalı, çok yüksek verimle enerji üretebilmeli, karbon içermemeli, ekonomik ve çok hafif olmalıdır.

Hidrojenin hızla dağılma özelliğinden dolayı herhangi bir tehlike anında hızla yukarı doğru uçtuğundan, diğer gazlar gibi tehlikeli değildir. Bir yangın olayında, hidrojen gazı hemen yanar ve hızla yukarı çıkar. Diğer gaz ve yakıtlar ise yanarken çevrelerinde tahribata yol açarlar. 1 kg sıvı hale getirilmiş hidrojenin ısı değeri 120 milyon joule'dur. 1 kg sıvı uçak yakıtının ısı değeri ise 44 milyon joule'dur. Hidrojenin ısı değeri tüm yakıtlardan fazladır. Hidrojenin bu özelliğinden dolayı, uzay araçlarında sıvı hidrojen kullanılmaktadır.

Hidrojen, yenilenebilir enerji kaynaklarının girişini kolaylaştırmak doğrultusunda kullanılabilir. Çünkü hem bir enerji taşıyıcısı, hem de pek çok yenilenebilir kaynağın aralıklı olma özelliğini dengelemek için bir depolama aracı olarak kullanılabilir. Yenilenebilir kaynakları ve hidrojeni kullanarak, hem elektrik sektörüne, hem de ulaştırma sektörüne hizmet sunulabilir.

Hidrojen bir elektrik santralinde, içten yanmalı motorda veya bir yakıt hücresinde kullanılırsa, tek yan ürün sudur. Fakat bu durum, hidrojenin kirliliğe yol açmayan bir

şekilde üretildiği anlamına gelmemektedir. Hidrojenin çevresel etkileri, hidrojenin üretilmesi sırasında, hidrojen yakıt döngüsünün başında belirlenmektedir.

Su, hidrojen kaynağı olarak kullanıldığında, çevresel problemler daha az ortaya çıkmaktadır. Çünkü suyun içerisindeki hidrojenden sonraki diğer tek element oksijendir. Su dışında bir hidrojen kaynağı kullanıldığında, çevresel kaygılar artabilir. Bütün biyolojik temelli ve fosil kaynaklar, hidrojen üretildiğinde serbest kalan çok sayıda farklı molekül içermektedir. Genellikle bunlar, aynı kirleticileri özellikle de karbondioksiti meydana getirmektedir.

Alternatif olarak, nükleer enerji kullanarak hidrojen üretimine, dünya çapında ilgi uyanmaktadır. Buna karşın, elektrik üretmek için nükleer enerji kullanımının etkileri oldukça iyi bilinirken, nükleer reaktörleri kullanarak hidrojen üretmenin etkileri belirsizlik arz etmektedir [17].

Hidrojen enerjisi konusunda son yıllarda meydana gelen gelişmeler, 2010 yılından itibaren hızlanan bir süreç içinde hidrojenin özellikle ulaşım sektöründe diğer yakıtların yerine geçeceği bir geleceği işaret etmektedir. Bu vizyonda hidrojenin çeşitli üretim yerlerinden kullanım yerlerine ulaşması için gereken dağıtım altyapısı ve hidrojen istasyonları da yer almaktadır [18].

### Hidrojenin tarihsel gelişimi

Havadan çok hafif olan bu gaz ilk kez 1783 yılında Paris'te bir balonun uçurulması amacıyla kullanılmıştır. Hidrojenin yakıt olarak kullanımına ilişkin düşünceler de oldukça eski yıllara kadar uzanmaktadır. Günümüzden yaklaşık 130 yıl kadar önce Jules Verne, Esrarengiz Ada isimli bilim kurgu romanında, hidrojenin geleceğin en önemli enerji vektörü olacağını vurgulamıştır. Gene Jules Verne üç yıl sonra yazdığı Doktor Ox isimli romanında, elektrik enerjisinden yararlanılarak suyun hidrojen ve oksijen moleküllerine ayrılması sonucu yakıt elde edilebileceğini belirtmiştir.

Bu konudaki bilimsel çalışmalar ise 19. yüzyılın başlarından itibaren, iki dönem içerisinde gerçekleşmiştir. Kullanılmakta olan yakıtlara oranla hidrojenin çeşitli avantajlarının bulunduğu ilk olarak İngiltere'de Cecil tarafından 1820 yıllarında vurgulanmıştır. Cecil geliştirmiş olduğu motorda farklı karışım oranlarında hidrojen-hava karışımları kullanmıştır. Sonraki yıllarda İtalya'da Bursanti ve Matteucci tarafından serbest pistonlu bir hidrojen motoru geliştirilmiştir. 20. yüzyılın başlarında, Almanya'da Rudolf Erren hidrojen motoru üzerinde çalışmalara başlamış, savaş nedeniyle çalışmalarına İngiltere'de devam etmiştir. Bu çalışmalarında Erren hidrojen kullanımı sonucunda ısı veriminin artmasını sağlamıştır. Ayrıca hidrojen yakıtlı motorlarda karşılaşılan geri-tutuşma ve erken tutuşma sorunlarına ilişkin çalışmalar da yapmıştır. Daha sonraki yıllarda, Almanya'da Deutsche Erren Studiengesellschaft direktörü Weil tarafından, Erren'in motorlarda kademeli dolgu elde edilerek, vuruntu sorununu önlediği bildirilmiştir.

Gaz hidrojenin motorlarda kullanımına ilişkin çalışmalar Ricardo ve Burstall tarafından da gerçekleştirilmiştir. Ricardo benzin motorlarında karşılaşılan vuruntu sorununun çözümü için hidrojen kullanımını önermiştir. Geliştirmiş olduğu bir gaz karıştırıcı ile sıkıştırma oranı 7,1 olan bir motorda % 43 mertebesinde ısı verim sağlamıştır. Ricardo ayrıca motorun emme kanalında oluşan geri-tutuşma sorununa ilişkin çalışmalar yapmıştır.

1940'lı yıllarda Almanya'da Oehmichen tarafından tek silindirli bir hidrojen motorunda yapılan deneylerde, bu konuda temel oluşturacak bilgiler sağlanmıştır. Bu çalışmalarda yakıt, yanma odasına sıkıştırma zamanı başlarında direkt olarak gönderilmiş, farklı sıkıştırma oranlarında ve hava/yakıt karışım oranlarında motor çalıştırılarak çok sayıda veri toplanmıştır.

Bu dönemde yapılan çalışmalarda binden fazla hidrojen motorunun geliştirilmiş olduğu Hoffmann tarafından belirtilmiştir. Ancak bu çalışmaların çoğu laboratuvar aşamasında kalmıştır. Özellikle 19. yüzyılın başlarında karbüratörlerdeki gelişmeler sonucunda benzinin motorlarda kullanımı yaygınlaşmış ve petrol kökenli yakıtların o

yıllarda geniş kaynaklara sahip olması, ayrıca üretim, depolama ve taşıma bakımından üstün yönlerinin bulunması nedeniyle, hala çeşitli sorunları bulunan hidrojenin motor yakıtı olarak kullanımı yaygınlaşmamıştır.

20. yüzyılın başlarında, hidrojenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesine ilişkin gerçekleştirilen çalışmalarda, motor yakıtı olarak kullanımında temel oluşturacak bilgiler elde edilmiştir. Bu dönemdeki çalışmalar hidrojen yakıtların avantajlarını ve sorunlarını belirlemiş, ayrıca bu sorunların çözümüne ilişkin çok sayıda çalışma da gerçekleştirilmiştir. Özellikle A.B.D.'de NASA kuruluşunun 1958 yılından başlayarak uzay projesinde yakıt olarak sıvı hidrojen kullanımına büyük ağırlık vermesi sonucu hidrojen teknolojisinde önemli aşamalar sağlanmıştır.

Hidrojen konusundaki araştırma çalışmalarının ikinci aşaması, 1970'li yıllarda ortaya çıkan petrol krizi dönemine rastlamaktadır. Enerji krizini takip eden yıllarda mevcut yakıtların oluşturduğu hava kirliliği sorunu alternatif yakıtlar üzerinde bilimsel araştırmaların yoğunlaştırılması gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu dönemde tekrar yoğunlaşan hidrojen çalışmalarında, özellikle Amerika Birleşik Devletleri (A.B.D.), Japonya, Almanya ve eski Sovyetler Birliği'nde hidrojen yakıtlı motorlara ilişkin araştırmalar tekrar ağırlık kazanmıştır. Ayrıca uzay projelerinde hidrojen kullanımının sürdürülmesi nedeniyle, hidrojenin özellikleri ve yanma performansı konusunda veri toplama işlemleri bu dönemde yoğun olarak sürdürülmüştür.

Amerika Birleşik Devletlerinin 1993'deki yıllık hidrojen üretimi yaklaşık 5 Milyar m<sup>3</sup>'tür (178 milyar ft<sup>3</sup>). Ana kullanım alanları amonyak üretimi ve rafinerizasyon işlemi esnasında petrolde sülfürün ayrıştırılmasıdır. Hidrojen daha çok günlük 1,5 milyon m<sup>3</sup> (50 Milyon ft<sup>3</sup>) üretim seviyelerinden daha fazla kullanılacağı yerde üretilir. Hidrojen, kimyasal işlemlerde, gıda hidrojenasyonunda<sup>1</sup>, çelik ve cam imalatında ve elektronik alanlarında küçük miktarda kullanılır ve bu tür uygulamalar için sıkıştırılmış gaz ya da sıvı olarak kamyonlar ile dağıtılır.

---

<sup>1</sup> Hidrojenasyon: Bir kimyasal reaksiyon sınıfıdır ve uygulandığı maddeye hidrojen eklenmesiyle sonuçlanır.

Dünya nüfusundaki ve uygarlık düzeyindeki artışlarla birlikte toplam enerji gereksiniminin artmasına karşın, günümüzde kullanılmakta olan enerji kaynaklarının hızla tükenmekte olması alternatif enerji kaynaklarına olan gereksinimi zorunlu kılmaktadır. Petrol krizinin ve çevre sorunlarının etkisi altında yakın gelecekte içten yanmalı motorlarda kullanılan benzin, mazot gibi petrol kökenli konvansiyonel yakıtlarında yerini alacak alternatif yakıtların bulunması gerekmektedir [2].

### Hidrojenin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Periyodik cetvelin birinci elementi olan hidrojenin sembolü H'tır. Atom ağırlığı 1,00797, yoğunluğu 0,0899 gram/litre, kaynama noktası -252,76 °C ve erime noktası -259,06 °C'dir. Sıvı hidrojenin yoğunluğu 0,070 g/cm<sup>3</sup>, kristal halindeki yoğunluk ise 0,088 g/cm<sup>3</sup>'tür. Periyodik cetvelde 1A, alkali metaller grubunda olmasına rağmen 1A grubu özelliklerini göstermeyen bir ametaldir. Bileşiklerinde +1 ve -1 değerlilik alır. -1 değerlilikli olan hidrojene hidrür denir. Hidrojen nötronu olmayan tek elementtir [18].

Doğada hidrojenin 3 izotopu vardır. Bunlar; protium, dueterium ve trityum'dur. Bilinen standart hidrojen atomu (protium) en basit element olarak bilinir ve bir proton ve elektrondan oluşur. Hidrojen molekülü (H<sub>2</sub>) iki ayrı şekilde bulunur; ortho ve para- hidrojen. Her iki şekilde aynı kimyasal özelliklere sahiptir. Oda sıcaklığında bulunan hidrojenin % 75'i ortho ve % 25'i para hidrojendir. Para hidrojen düşük sıcaklıklarda durağan bir yapıya sahiptir ve sıcaklık düştükçe yoğunluğu artar, sıvı hidrojenin neredeyse tamamı bu şekilde bulunur.

Çizelge 2.1. Hidrojenin özellikleri [3]

Molekül Ağırlığı	Amu (mol/gr)	2,016
Yoğunluk	Kg/m <sup>3</sup>	0,0838
Üst Enerji Değeri	MJ/kg	141,90
	MJ/m <sup>3</sup>	11,89
Alt Enerji Değeri	MJ/kg	119,90
	MJ/m <sup>3</sup>	10,05
Kaynama Sıcaklığı	K	20,3
Sıvı Hal Yoğunluğu	Kg/m <sup>3</sup>	70,8
Kritik Değerler		
Sıcaklık	K	32,94
Basınç	Bar	12,84
Yoğunluk	Kg/m <sup>3</sup>	31,40
Kendi Kendine yanma sıcaklığı	K	858
Havada Yanma Limiti	(vol.%)	4-75
Havadaki Stoichiometric karışım	(vol.%)	29,53
Havada Yanma Sıcaklığı	K	2,318
Difüzyon Katsayısı	cm <sup>2</sup> /s	0,61
Özgül Isı (c <sub>p</sub> )	kJ/(kg-K)	14,89

Kokusuz, renksiz, tatsız ve saydam bir yapıya sahip olan hidrojen doğadaki en hafif elementtir. Bir litresi 0 °C 'de ve 1 atmosfer basınç altında 0,0898 gram gelir. Bu renksiz kokusuz gaz, hava ya da oksijen içinde kolayca parlar, patlayarak yanar ve su oluşturur. Çok kolay tepkimeye girdiğinden başka elementlerle birleşmiş halde bulunur. Su, kaya, petrol gibi ortamların ve bütün bitkisel, hayvansal yaşamın temelini oluşturan birçok organik bileşenin içinde de bulunur. Havanın içinde az miktarda arı halde hidrojen vardır (hacim olarak havanın % 0,00005'i). Güneş dahil bütün yıldızlar da, çok büyük miktarlarda hidrojen içerir [2].

Gaz halindeki hidrojen, aynı hacimdeki havadan yaklaşık 15 kez daha hafiftir. Motorlarda kullanılmakta olan diğer alternatif yakıtlarla karşılaştırıldığında sıvı hidrojenin, sıvı hidrokarbonlara oranla yaklaşık 10 kere daha hafif, gaz halindeki hidrojenin ise, metan gazından 10 kere daha hafif olduğu görülmektedir.

Sıvı hidrojenin hacmi, gaz halindeki hacminin sadece 1/700'ü kadardır. Hidrojen bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahip, 2,016 moleküler ağırlığı ile en hafif kimyasal elementtir. Sıvı hidrojenin birim kütesinin ısı değeri 141,9 MJ/kg olup, petrolden 3,2 kat daha fazla enerji içermektedir. Sıvı hidrojenin birim hacminin ısı değeri ise 10,2 MJ/m<sup>3</sup>'tür ve petrolün % 28'i kadardır.

Gaz hidrojenin birim kütesinin ısı değeri sıvı hidrojenle aynı olup, doğal gazın 2,8 katı kadarken, birim hacminin ısı değeri 0,013 MJ/m<sup>3</sup> ile doğal gazın % 32,5'i olmaktadır. Rakamları daha sade bir şekilde ifade edersek, 1 kg hidrojen 2,8 kg doğal gaz veya 3,2 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahiptir. Hidrojen doğada serbest halde bulunmaz, bileşikler halinde bulunur. En çok bilinen bileşiği sudur. Hidrojenin büyük kısmı oksijenle birleşerek su (H<sub>2</sub>O)'yu oluşturmaktadır. Sudaki üç atomdan ikisi hidrojendir. Okyanuslar, göller ve nehirler birer hidrojen rezervi olarak kullanılabilir [1].

Hidrojen, doğal gazdan buhar reformasyonu yöntemiyle endüstriyel ihtiyaçlar için üretilmektedir. Bu işlemde ısı enerjisi doğal gazın karbon bileşiminden hidrojenin ayrılmasında kullanılır. Hidrojen, petrol rafinerizasyonunun yan ürünü ve kimyasal üretim metotları ile de üretilir. Zamanımızda suyun elektrolizinden sınırlı miktarda üretilmektedir. Bu oldukça pahalı bir işlemdir ve uzay programının da ihtiyaç duyulan saf hidrojenin temini ile sınırlıdır.

Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında yarar sağlayacak en önemli özelliklerinden biri farklı hava/hidrokarbon karışım oranları için hava fazlalık katsayısının 0,3–1,7 değerleri arasında tutuşma sağlanabilmekte iken, hidrojen için bu sınır 0,15–4,35 değerlerine ulaşmaktadır.

Hidrojenin yanması sonucu elde edilen alev hızı oldukça yüksektir. Bu değer stokiyometrik karışımlar<sup>2</sup> için benzin hava karışımlarındaki alev hızının yaklaşık 4 katı düzeyindedir. Hidrojen ayrıca diğer mevcut motor yakıtlarından daha yüksek ısıl değere sahiptir. Ancak volumetrik olarak ele alındığında, hidrojenin ısıl değerinin öteki yakıtlardan çok daha düşük olduğu görülecektir. Bu durum, bazı çözümler sağlanmadığında motorun maksimum gücü açısından, eşdeğer özellikteki benzin motoruna göre bazı kısıtlamalar getirecektir.

Hidrojenin difüzyon katsayısı da öteki yakıtlardan daha fazladır. Ayrıca gaz halindeki hidrojen, kağıt, kumaş, kauçuk gibi malzemelerden, platin, demir, çelik gibi bazı metallere difüzyon yolu ile geçebilmektedir. Hidrojenin bu özelliği ise depolanmasına ilişkin bazı sorunlar yaratmaktadır.

#### Fiziksel özellikler

- Renksizdir.
- Kokusuzdur.
- Doğadaki en basit atom yapısına sahiptir.
- -252,77 °C'da sıvı hale getirilebilir.
- -259 °C'da gaz haline geçer.
- Havadan 14,4 kez daha hafiftir.
- Yoğunluğu havanın 1/14'ü, doğal gazın ise 1/9'u, sıvı haldede benzinin 1/10'udur.
- Sıvı hidrojenin hacmi gaz halindeki hacminin sadece 1/700'ü kadardır.
- Hidrojen bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir.
- Üst ısıl değeri 140,9 MJ/kg, alt ısıl değeri 120,7 MJ/kg'dır.
- 1 kg hidrojen 2,1 kg doğal gaz veya 2,8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahiptir.

---

<sup>2</sup> Stokiyometrik Karışım: Benzinli motorlarda ideal yanma için gerekli olan silindir içi hava- yakıt karışım oranıdır ve değeri 14,7'dir.

- Hidrojen petrol yakıtlarına göre ortalama 1,33 kat daha verimli bir yakıttır.
- Kendi kendine tutuşma sıcaklığı 585 °C'dir.
- Tutuşma sınırları ise, hacimsel olarak % 4,1–74 arasındadır.
- Maksimum laminer alev hızı 291 cm/s'dir.
- Difüzyon katsayısı 0,61 cm<sup>2</sup>/s'dir.
- Evrende % 90'dan fazla hidrojen bulunmaktadır.
- Hidrojen petrol yakıtlarına göre ortalama 1,33 kat daha verimli bir yakıttır.

### Kimyasal özellikler

- Hidrojen doğada serbest halde bulunmaz, bileşikler halinde bulunur.
- Yakıt olarak kullanıldığında atmosfere atılan ürün sadece su ve/veya su buharı olmaktadır.
- Hidrojenin çekirdeğinde bir proton ve çevresinde yalnız bir elektron bulunur.
- 5 000 hidrojen atomunun birinin çekirdeğinde birde nötron bulunur (döteryum).
- Döteryum ile oksijenin birleştirilmesinden, ağır su oluşur.
- Çekirdeğinde iki nötron bulunan izotopu (tridyum), hidrojen bombası yapımında kullanılır.
- Yoğunluğu benzinden 3 300 kat azdır. Benzine göre elde edilen enerji 2,75 kat fazladır.
- Sudan elektroliz yoluyla üretilebilir. Sonsuz enerji kaynağı vardır [2].

### Hidrojen üretim yöntemleri

Bugün hidrojenin üretimi için birçok yöntem mevcuttur. Bunlardan en çok kullanılan yöntem doğal gazın buhar reformasyonudur. Ancak uygulamalarda ihtiyaç duyulan saf hidrojen için, göreceli olarak pahalı bir teknik olan elektroliz kullanılmaktadır. Hidrojenin geleceğin yakıtı olması için ileri teknolojiler kullanılarak, fosil yakıtlar

maliyet bakımından rekabet edebilecek yenilenebilir enerji kaynakları ile hidrojen üretimi geliştirilmektedir. Üzerinde çalışılan teknolojiler genel olarak üç kategoriye ayrılabilir:

- Fotobiyolojik hidrojen üretimi
- Fotoelektro kimyasal hidrojen üretimi
- Termokimyasal hidrojen üretimi

Bunların dışında da daha önceden geliştirilen başka yöntemlerde mevcuttur. Bunlar;

- Elektroliz
- Buhar yapılandırması'dır.

Çizelge 2.2. Hidrojen üretim maliyetlerinin ve kapasitelerinin karşılaştırılması [2]

Üretim teknolojisi	Maliyet oranı	Üretim kapasitesi (Nm <sup>3</sup> /saat)
Suyun elektrolizi	1,0	500
Metanolün bozunumu	0,83	500
Doğal gazın buharla bozunumu	1,17	500
Hidrokarbonların kısmi oksidasyonu	0,58	>500

Çoğu fotobiyolojik sistemde, hidrojen üretimi için kullanılan bakteriler ve yeşil yosunlar, klorofil aracılığı ile güneş ışığını absorbe eder ve enzimler sayesinde hidrojenin ayrılması sağlanır. Fotobiyolojik üretim teknolojisi uzun vadede hidrojen üretimi için oldukça ümit vericidir.

Bu güne kadar H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> üretebilen en verimli fotobiyolojik sistemlerin, yeşil alg ve cyano-bakteria gibi algler olduğu anlaşılmıştır. Yeşil alglerin havasız ortamda hidrojen ürettiği saptanmış ve verim yaklaşık % 10'u bulmuştur.

Fotoelektro kimyasal yöntem, suyu hidrojen ve oksijenlerine ayırıştırmak için, yüksek sıcaklık veya elektriğe gerek olmadan, doğrudan güneş enerjisinin mor ötesi (UV) bölgesini kullanmaktadır.

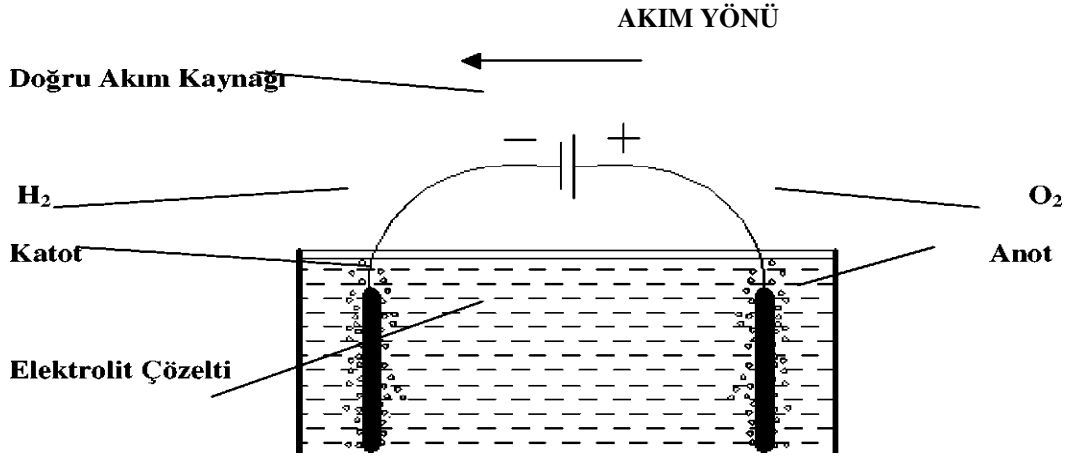
Fotoelektro kimyasal işlemdede, optik enerjinin kimyasal enerjiye dönüştürülebilmesi için bir fotoelektro kimyasal pil ve yarı iletken elektrotlar kullanılır. Fotoelektro kimyasal sistemin başlıca iki tipi vardır; biri yan iletken kullanım, diğeri erimiş metal karışımının kullanımınıdır.

Termokimyasal yöntemde, kömür, şehir katı atıkları ve biyokütlelerin ısısından yararlanarak hidrojen içeren çeşitli gazlar üretilir. Gazların bileşimi depolama tipine, oksijenin mevcudiyetine, reaksiyon sıcaklığına ve diğere parametrelere bağlıdır. Üretilen gazdaki hidrojen, gaz karışımı içinde çok küçük yüzdelerde dolaşmaktadır.

Diğere bir termokimyasal üretim teknolojisi de, suyun doğrudan oksijenle hidrojene ayırıştırılmasını sağlayan kapalı çevrimli termokimyasal yöntemdir. Verimi daha yüksektir. Termokimyasal işlem, kısaca geliştirilen çeşitli bileşiklerin suyla doğrudan reaksiyon sonucu hidrojen ve oksijenin açığa çıkartılmasıdır.

Elektroliz, hidrolik, rüzgar, jeotermal, güneş ya da nükleer enerji ile üretilen elektrik enerjisi sudan hidrojen üretilmesinde kullanılmaktadır. Elektrolizle hidrojen üretebilmek için önce elektrik üretim aşamalarına ihtiyaç vardır. Bu aşamalar sonunda orijinal enerjinin yaklaşık yarısı kaybedilir, buna rağmen bu işlem günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Suyun elektrolizi elektrotlar aracılığı ile sudan doğru akım elektriğinin geçirilmesiyle yapılır. Su gerçekten iletken olmadığı için KOH gibi elektrolitler ilave edilir.

Suyun elektrolizi ile hidrojen elde edilmesi klasik bir yöntemdir. Su oda sıcaklığında durağan olduğundan suyun elektrolizi kayda değer bir enerji gerektirir. Bu yüzden elektroliz maliyeti büyük oranda enerji maliyetine dayanmaktadır. Aşağıda elektroliz düzeneğinin basit bir şematik resmi görülmektedir.



Şekil 2.1. Suyun elektrolizi [2]

Buhar yapılandırması ile hidrojen üretilmesi,

1. Katalitik buhar yapılandırma (SR)
2. Non-katalitik kısmi oksidasyon (POX)
3. Katalitik kısmi oksidasyon (veya ototermal yapılandırma) (ATR) şeklinde gerçekleşmektedir.

Katalitik buhar yapılandırma (SR) için yakıt türleri genelde nafta, doğal gaz ve diğer hafif hidrokarbonlardır. Bu yöntemde, hidrokarbon yakıt katalitik yolla buharla reaksiyona girerek diğer bileşik gazlara ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ) dönüştürülür. İşlem endotermik olduğu için sistem için gerekli ısı yakıtın harici olarak yakılması ile sağlanır. Sanayi uygulamalarında bu işlem  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  'de ve 40–100 Atm basınç altında, nikel esaslı katalizör kullanılarak gerçekleştirilir.

Kısmi oksidasyon katalizörsüz bir işlemdir. Reaksiyon için gerekli ısı yakıtın bir kısmının oksidasyonu ile sağlanır. Oksidasyon miktarı, oksijen ilavesinin kontrolü ile ayarlanır. POX işlemi için hava kullanılırsa çok az miktarda amonyak üretimi de söz konusu olur. POX işlemi genellikle ağır hidrokarbonların (ağır nafta, rafineri artıkları veya kömür gibi) yapılandırılmasında kullanılır. POX, katalizör olmadığı için

avantajlı olsa da katalizörlü yapılandırma işlemlerine nazaran yüksek sıcaklıklarda (1100–1500 °C) çalıştırılmaya ihtiyaç duyulur.

Ototermal yapılandırma teknolojisi, buhar yapılandırma (SR) teknolojisinin katalizör bölümü ile kısmi oksidasyon teknolojisinin (POX) oksidasyon bölümünün bir arada kullanılması sonucu geliştirilmiştir. Oksijen katalizörü kullanılarak bir miktar yakıt kontrollü oksijen ilavesi ile oksidize edilir. Oksidasyon ısısı yakıtın  $H_2$  ve  $CO$  şeklinde yapılması için gerekli ısı ve yüksek sıcaklık ihtiyacını karşılar. ATR işlemindeki sıcaklık POX'e göre düşük, fakat SR'e göre ise yüksek durumdadır. ATR işlemi için iki ayrı tip katalizör kullanılır. Biri platin esaslı katalizör, diğeri ise buhar yapılandırma işleminde olduğu gibi nikel esaslı katalizördür. Buhar yapılandırma işleminde, buhar uygun katalizör yardımı ile hidrokarbonla reaksiyona girerek hidrojen zengin gaz üretimi sağlanır. SR, aynı anda bir ya da birkaç reaksiyonun olabileceği endotermik bir işlemdir. Hidrojen üretiminde buhar yapılandırma tekniği için yüksek sıcaklık ve düşük basınç uygun görülmektedir [2].

### Hidrojen depolama ve taşıma

Hidrojen dağıtımı ve depolanması yakıt pillerinin gelişimi ile birlikte üzerinde en çok düşünülen konulardan biri olmuştur.

Kapalı çevrim sistemlerde saf suyun elektrolizi ile hidrojen elde edilmesi ve uygun bir tank içerisinde depolanarak ihtiyaç duyulduğunda kullanılması öngörülmektedir. Bu durumda bile depolama bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Tankın boyutu, basınç dayanımı, imal edileceği malzeme gibi pek çok etken ön plana çıkmaktadır. Kaldı ki Hidrojen Enerji Sisteminde enerji taşıyıcısı olan hidrojen, taşıtlar (uçak, otomobil vb.), işyerleri, ev ve uzay çalışmaları gibi geniş bir alanda kullanılacaktır.

Hidrojenin ilk çalışmalarda gaz halinde depolanacağı ve taşınacağı düşünülmüştür. Bu durumda yapılacak boru hatlarının, taşıma tankerlerinin ve depolama tanklarının devasa boyutlarda olması gerekmiştir. Bu nedenle basınç altında taşınması gündeme

gelmiş bu da tankların basınç dayanımını ve dolayısı ile ağırlığını arttırmıştır. Bu şekilde kapasite kısıtlamaları da ortaya çıkmıştır.

Hidrojen çelik tüplerde 200–250 atm basınç altında depolanırsa çelik tüpün kütlesi hidrojenden 100 kat daha ağır olmaktadır. Son yıllarda kompozit tüpler de geliştirilmiştir. Bu tüpler hafif ve daha yüksek basınçlarda (500–700 atm) kullanılmaktadır. Çelik tüplerle kıyasladıkta kütlesi 3 defa azalmıştır. Ancak kütlesinin düşürülmesine rağmen halen çok pahalıdır.

Prototip aşamasında olan otomobillerin büyük kısmı, 350 bar basınçlı hidrojen tankları taşımaktadır. A.B.D. Chino-California'da 350 bar basınçlı hidrojen dolumu yapan bir istasyon 2005 yılı içerisinde faaliyete geçmiştir.

Hidrojenin sıvı olarak depolanması da mümkündür. Ancak hidrojen  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$  de buharlaşmaya başlamaktadır. Sıvı halde depolanan hidrojenin büyük tanklarda (10 Milyon  $\text{m}^3$  civarı) günde yaklaşık % 0,1'i küçük ve taşınabilir tanklarda ise günde % 2-3'ü buharlaşma ile kaybedilmektedir.

Hidrojen depolanması için Metal Hidritlerden faydalanılması düşünülmüş (hidrojenin kimyasal tepkime ile ağır metallerle tutturularak depolanması), ancak kütle ağırlığı yüksek olduğu için uygun olmamıştır.  $\text{MgH}_2$ 'nin depolama yoğunluğu  $0,07\text{ kg H}_2/\text{kg}$ 'dır.

Çalışmalarda gelinen aşama hidrojenin daha efektif depolanması ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle çalışmalar bu yönde devam etmektedir.

Günümüzde bor mineralinden metal hidritlerde olduğu gibi hidrojen depolama amacıyla faydalanma yönünde çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu amaçla  $\text{LaNi}_5$  ve  $\text{NaBO}_2$  genel adlarıyla üçüncül Lantan Nikel alaşımı ve Sodyum Borat kullanımı denenmiştir. 2,5 atm ve  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta saf  $\text{LaNi}_5$ , sıvı hidrojenden iki kat, sıkıştırılmış gaz hidrojenden 12 kat fazla hidrojen depolayabilmektedir.

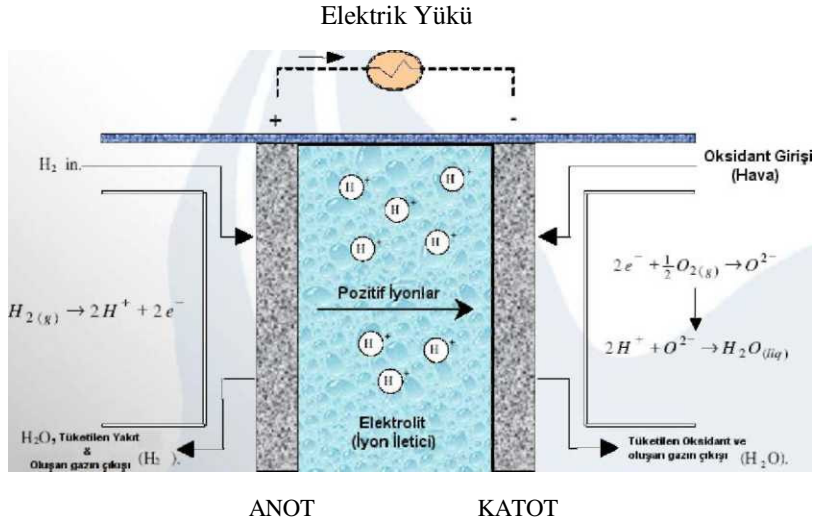
Enerji yoğunluğu olarak ise, sıvı hidrojenden 1,1 kat, sıkıştırılmış gaz hidrojenden 9 kat fazladır.

Çizelge 2.3. Hidrojen depolama şekli ve yoğunluğu [3]

Depolama Aracı	İçerdiği Hidrojen (kg/kg)	Depolama Kapasitesi (hacim için kg/l)	Enerji Yoğunluğu (kJ/kg)	Enerji Yoğunluğu (hacim için kJ/l)
MgH <sub>2</sub>	0,070	0,101	9,933	14,330
Mg <sub>2</sub> NiH <sub>4</sub>	0,0316	0,081	4,484	11,494
VH <sub>2</sub>	0,0207	-	3.831	-
FeTiH <sub>195</sub>	0,0175	0,096	2,483	13,620
TiFe <sub>0.7</sub> Mn <sub>0.2</sub> Ni <sub>0.9</sub>	0,0172	0,090	2,440	12,770
LaNi <sub>5</sub> H <sub>70</sub>	0,0137	0,089	1,944	12,630
R.E.Ni <sub>5</sub> H <sub>6.5</sub>	0,0135	0,090	1,915	12,770
Sıvı H <sub>2</sub>	1,00	0,071	141,900	10,075
Gaz H <sub>2</sub> (100 bar)	1,00	0,0083	141,900	1,170
Gaz H <sub>2</sub> (100 bar)	1,00	0,0166	141,900	2,340
Petrol	-	-	47,300	33,500

### 2.1.2. Yakıt pili

Yakıt pilleri; yanma olmaksızın, kullanılan yakıtın ve oksitleyicinin sahip olduğu kimyasal enerjiyi değişmeyen elektrot-elektrolit sistemi vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştüren bir elektrokimyasal düzendir. Yüksek verimlilik ile bütün standartların belirttiği emisyonların çok altında çalışmaktadırlar. Çalışmaları pil gibidir, fakat sürekli bir yakıtla beslenmeye ihtiyaçları vardır. Genellikle bu yakıt hidrojendir. Yakıt pillerinin diğer adı da hücredir. Yakıt hücreleri, yapılarında hareketli parçalar içermediklerinden dolayı sessiz ve güvenilirlerdir.



Şekil 2.2. Yakıt pillerinin genel gösterimi [8]

#### Elektrolit:

Elektrolit hem çözünmüş reaksiyon gazlarını hem de iyonik yükleri elektrotlar arasında taşımaktadır. Böylece Şekil 2.2'de görüldüğü gibi hücre elektrik devresini de tamamlamaktadır. Ayrıca, elektrolit yakıt ve oksitleyici gaz akımlarının doğrudan taşınmasını önleyecek fiziksel bir engel görevi de görmektedir. Yakıt pillerinde sıvı, nemli katı polimerler ve eriyikler elektrolit olarak kullanılmaktadır. Kullanılan elektrolit özelliğine göre yakıt pili çalışma sıcaklığı da değişmektedir. Sulu ve polimer elektrolitli pillerde 80–200 °C ( düşük ve orta sıcaklıklı yakıt pilleri ), eriyiklerde ise 600–1000 °C ( yüksek sıcaklıklı yakıt pilleri ) arasında olmaktadır.

#### Elektrot:

Yakıt hücrelerinde gözenekli gaz elektrotları kullanılmaktadır. Çünkü reaksiyon hızını sınırlayan kullanılabilir reaksiyon alanıdır. Gözenekli elektrotlar yüksek yüzey alanına sahip olduklarından daha yüksek akım yoğunluğu elde edebilirler. Gözenekli elektrodun yakıt hücresindeki fonksiyonları şunlardır:

1. Gaz/sıvı iyonizasyon veya deiyonizasyon reaksiyonlarının gerçekleşebileceği bir yüzey sağlamak,
2. Bir kez oluştuktan sonra iyonların üç fazlı ara yüzeye/ara yüzeyden uzağa iletmek ( bu nedenle elektrodun yüksek elektrikli iletkenliğe sahip malzemedan yapılması gerekir),
3. Yakıt gaz fazı ile elektroliti ayıracak fiziksel engel görevi yapmaktır. Elektrodun ilk görevi gerçekleştirebilmesi ve reaksiyon hızlarını arttırabilmesi için gözenekli bir yapıya sahip olması ve iletken olduğu kadar katalizör özelliğine de sahip olan bir malzemedan yapılması gerekmektedir. Elektrodun katalitik fonksiyonu düşük sıcaklık yakıt pillerinde daha önemlidir, çünkü iyonizasyon reaksiyonunun hızı sıcaklıkla artmaktadır. Sıcaklığın artırılmadığı durumda reaksiyon hızı katalizör kullanımıyla arttırılmaktadır. Bir başka önemli nokta da gözenekli elektrotların hem elektroliti hem de gazları geçirebilmesi ancak elektrolit taşımaya ya da gazların kurumasına da izin vermemesidir.

İdeal bir gözenekli yakıt hücresi elektrodunda, elektrot yüzeyindeki sıvı elektrolit tabakası yeterince ince olmalıdır. Bu durumda karşıt iyon birikmesi, derişim polarizasyonu kabul edilebilir sınırlar içinde kalmakta ve yüksek akım yoğunlukları elde edilebilmektedir. Çünkü ince olan elektrolit tabakası reaksiyon bileşenlerinin elektro aktif bölgelere taşınmasını engellemeyecek ( direnç oluşturmayacak ) ve kararlı üç faz ( katı-sıvı-gaz ) ara yüzeyi kurulmuş olacaktır. Elektrolit miktarı gözenekli yapıda gerekenden fazla olduğundan elektrot "taşmış" olmakta ve derişim polarizasyonu da çok yükselmektedir.

Otomotiv sanayinde kullanılan düşük sıcaklık yakıt hücrelerindeki gözenekli elektrotlar kompozit bir yapıda oluşmaktadırlar. Bu yapı yüksek yüzey alanına sahip karbon siyahı ve bu yüzeyde tutturulmuş platin elektro katalizör ve bağlayıcı olarak da PTFE ( politetrafluoroetilen ) içermektedir. Bu elektrotlarda, PTFE hidrofobik yapıdadır, ıslanmayı dengeleyici olarak çalışır ve gazı geçiren faz olarak görev alır. Karbon siyahı da malzemenin yüzey özelliklerine bağlı olarak belirli bir miktar

hidrofobik özelliğe sahiptir, elektronları iletir ve elektro katalizörlerin tutunması için yüksek yüzey alanı sağlar. PTFE ve karbon kompozit yapısı gözenekli elektrotun içinde çok geniş üç faz ara yüzey oluşturmaktadır. Platin elektro katalizördür ve belirli bir yüzey alan için elektrokimyasal reaksiyonların ( oksitlenme/indirgenme ) hızını arttırır.

Hücre Modülü:

Pillerde olduğu gibi tek yakıt pili hücreleri arzu edilen voltaj seviyelerine ulaşılacak sayıda birleştirilirler ve daha sonra ara bağlantı yardımıyla tutturulurlar. Düz tabaka hücrelerin konfigürasyonunda ara bağlantı ayırıcı tabaka olarak ve iki görevi bulunmaktadır. Bunlar;

1. Yan yana duran iki hücre arasındaki seri elektrik bağlantısını sağlamak,
2. Ardışık iki hücrenin yakıt ve oksitleyicilerini ayırmaktır.

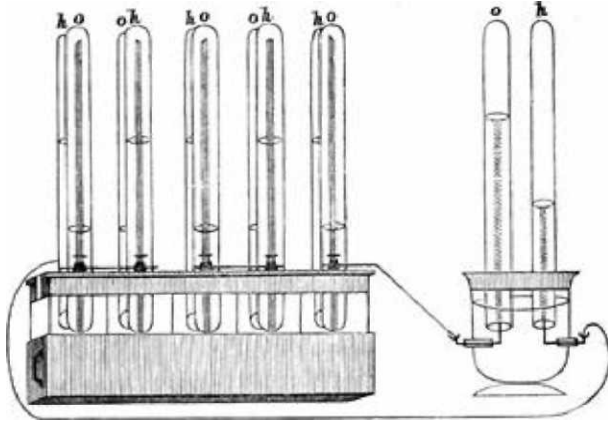
Hücrenin diğer önemli parçaları;

- Reaksiyon gazlarını elektrot yüzeyine dağıtan bir plaka ki bu aynı zamanda hücrenin mekanik dayanımını da sağlamaktadır.
- Sıvı elektrolitli hücreler için elektrolit deposu; kaybolan veya ömrü biten elektroliti yenilemede kullanılır.
- Akım kolektörleri; elektrotlar ve ayırıcılar arasındaki akımın iletilmesini sağlar.

### Yakıt pillerinin tarihçesi

Yakıt pilleri ilk defa 19. yüzyılın sonunda geliştirilmiştir. İlk pratik yakıt pili, Apollo uzay programı için 1960'larda yapılmıştır. Günümüzde de hala uzay projelerinde yakıt pillerinin kullanımı devam etmektedir.

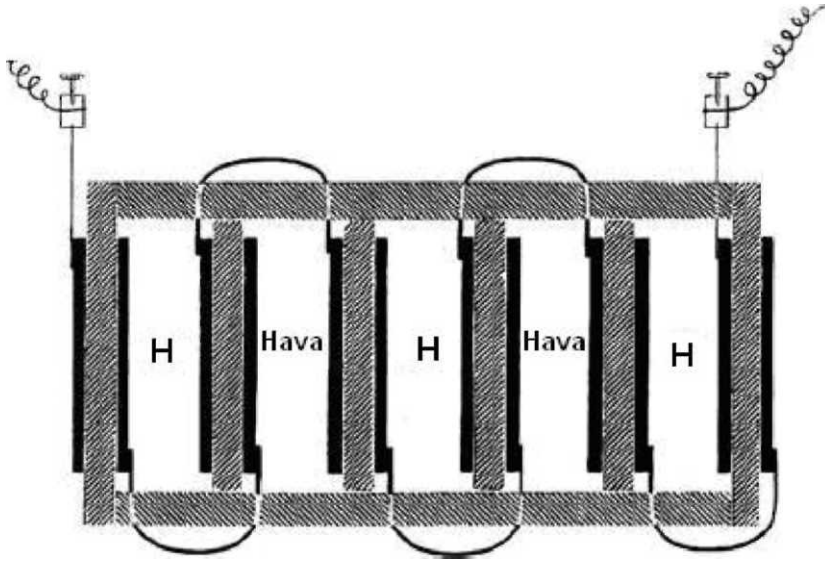
1838 yılında William Robert Grove (yakıt hücrelerinin babası olarak bilinir) yakıt hücrelerinin temel çalışma prensibi olan su elektrolizinin tersine çevrilmesiyle hidrojen ve oksijenden elektrik enerjisi üretmeyi başarmıştır. Grove hücresi olarak adlandırılan hücre, çinko sülfat içerisinde, çinko elektrot ve nitrik asit içerisinde platin elektrot daldırılarak oluşturulmuş ve yaklaşık 1,8 volt civarında gerilim ve 12 amperlik akım üretmiştir. Grove, elektrotlardan birinin sülfürik asit kabına, diğerinin oksijen ve hidrojen kabına daldırılan iki platin elektrotu düzenleyerek, elektrotlar arasında sabit bir akım akacağını keşfetmiştir. Sızdırmazlığı sağlanan kaplar hem suyu hem de gazları tutmuşlardır. Grove, akım aktığı sürece, su seviyesinin her iki tüpte de arttığını belirlemiştir. 1800'de, İngiliz bilim adamları Willam Nicolas ve Anthony Carlisle, elektrik yardımıyla suyun hidrojen ve oksijene ayrılabilceğini ispatlamışlardır. Fakat iki gazın birleştirip su ve elektrik üretilabileceğini çözememişlerdir. Grove, birkaç elektrotu seri devreyle bağlayarak bileşimini ayarlamak suretiyle suyun ayrıştırılmasını etkileyebileceğini keşfetmiştir. Bunu gaz bataryası adını verdiği ve ilk yakıt pili olarak tanımlayabileceğimiz Şekil 2.3'de gösterilen aygıtlarla başarmıştır.



Şekil 2.3. William Robert Grove tarafından geliştirilen yakıt hücresi [8]

Grove'den sonra birçok bilim adamı yakıt pili gelişimi için çaba harcamıştır. 1882 yılında Lord Rayleigh tarafından platin elektrotların verimini arttırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bunun için katı elektrot, gaz ve sıvı arasındaki işlem yüzeyini arttırmış, hidrojenin yanı sıra kömür gazı da kullanmıştır. 1889'da kimyager Ludwig

Mond ve Carl Langer tarafından Grove'un çalışmaları tekrarlanarak; oksijen kaynağı olarak havayı, hidrojen kaynağı olarak da endüstriyel kömür gazını kullanarak 1,5 watt güç üreten ve % 50 verimle çalışan bir yakıt pili geliştirilmiştir. Yakıt pilinden 1,47 volt gerilim elde edilmesi beklenmiş ancak bu değer 0,97 volt olarak ölçülmüştür. Şekil 2.4'de Mond ve Langer'in tasarladığı yakıt pili görülmektedir.

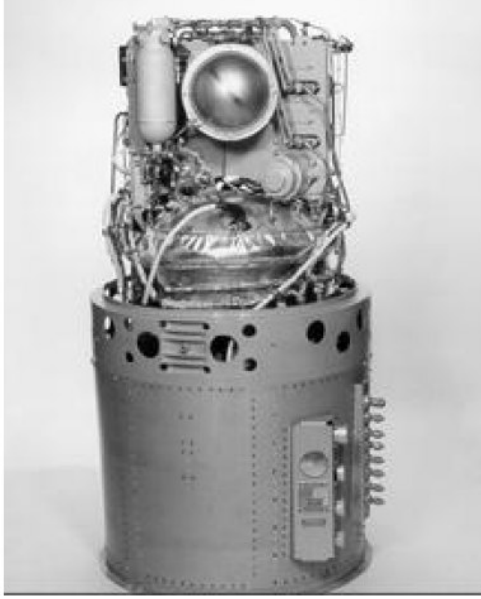


Şekil 2.4. Mond ve Langer'in tasarladığı yakıt pili [8]

1894'de Wilhem Oswald kömür türevli yakıtlar ile çalışan bir elektrokimyasal pil yapmıştır. 1932'de Francis T. Bacon ilk başarılı yakıt pilini geliştirmiştir. Bu yakıt pilinde hidrojen-oksijen hücre ve alkalın elektrolit kullanılmıştır. Bu projenin önemini kavrayan Partt&Whitney şirketi, bu projeye lisans vererek NASA programlarında kullanılmasını sağlamıştır. 1959'da Bacon ve arkadaşları 5 kW'lık güç üreten bir yakıt pili yapmışlardır. Aynı yılın sonunda Harry Karl Ihring 20 beygir (yaklaşık 15 kW) gücünde yakıt piliyle çalışan traktör tasarlamıştır. Bu buluş günümüzdeki modern yakıt piliyle çalışan makinelerin başlangıcı olmuştur.

1950 yılı sonları ve 1960'lı yıllarda NASA yakıt hücresi teknolojisine oldukça ciddi yatırımlar yapmıştır. Yakıt hücreleri hafif olmaları ve yan ürün olarak su üretmelerinden dolayı uzay uygulamaları için düşünülmeye başlanmıştır. Uzay çalışmalarında yakıt hücrelerinin kullanılması; yüksek verim, düşük gürültü ve

titreme, yüksek enerji yoğunluğu gibi avantajlar sağlamaktadır. İlk olarak Gemini uzay aracında General Elektrik tarafından üretilen proton değişim zarlı yakıt hücresi kullanılmıştır. Şekil 2.5' de NASA çalışmalarında kullanılan Gemini uzay aracında kullanılan proton değişim zarlı yakıt hücresi görülmektedir.



Şekil 2.5. Gemini uzay aracında kullanılan proton değişim zarlı yakıt pili [1]

1970 yılında K. Kordesch 4 kişilik hidrojen yakıt hücresi ve piliyle çalışan hibrit bir otomobil üretmiştir. Bu araçla 3 yıl şehir trafiğinde dolaşmıştır. 1970'lere kadar uzay araştırmalarında en üst gelişmişlik düzeyinde olan alkali yakıt pili sistemleri yerini şaşırtıcı bir biçimde, fosforik asitli yakıt pili sistemlerine bırakmıştır. Bu gelişmenin sonucu olarak da hidrokarbonların yeniden yapılandırılması ve geliştirilmesi yoluna gidilmiştir. Japonya'nın bu konulara ilgisi bu dönemde artmıştır ve araştırmalarını hızlandırılmıştır. Bu dönemlerde 50–100 kW'tan başlayıp 10 megawatt'a kadar çıkan yakıt pillerinin prototipleri üretilmiştir.

1890'lı yıllarda yüksek sıcaklıklı ünitelerde gelişmelere önem verilmiş, fakat yüksek verime rağmen ömür süreleri ile ilgili problemlere bir çözüm getirilememiştir.

Bugüne kadar 200'den fazla yakıt hücreleri ile ilgili araştırma NASA tarafından

desteklenmiştir. Apollo ve Space Shuttle projelerinde güvenli bir biçimde yakıt hücrelerinden elektrik ve su elde edilmesinden dolayı uzaydaki rolleri gelecek açısından umut verici olmuştur.

A.B.D. Başkanı G.W. Bush, 28 Ocak 2003 tarihinde yaptığı bir konuşmasında, hidrojen enerjisini hürriyet enerjisi olarak nitelendirmiş ve bu alandaki çalışmaların desteklenmesi amacıyla 1,7 milyar dolarlık bir kaynak ayrıldığını söylemiştir. Bu gelişmeler aşamasında, yakıt hücresi iç pazarı genişlemiştir.

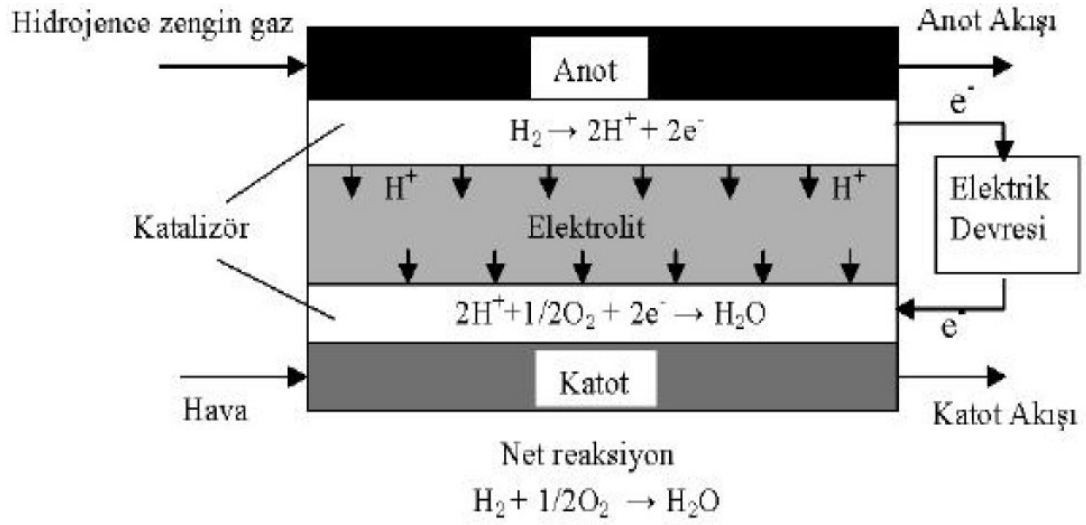
Uçaklarda ilk kullanım 1956 yılında B-57 Canberra deneme uçağında gerçekleştirilmiştir. Sovyetler Birliği'nde 1988 yılında Tupolev-155 deneme uçağında yakıt olarak hidrojeni kullanmıştır. Hidrojenin uçaklarda yaygın yakıt olarak kullanımı konusunda Avrupa Airbus konsorsiyumu ile Almanya-Rusya ortak çalışmaları sürmektedir.

Bu yolda belki de en önemli gelişme 1990'larda olmuştur. Mebran'lı yakıt hücresi sistemleri geliştirilmiştir. Aslında bu tip yakıt hücreleri 1960'larda biliniyordu, fakat uzay araştırmalarında alkali sistemler kadar başarılı olamadıklarından alkali sistemlerin gölgesinde kalmışlardır. Bu sistemler geliştirilerek katalizör araştırmaları ile yüksek güç yoğunluklarına ulaşılmıştır. Buna ek olarak uzun ömür sürelerine sahip olmuşlardır.

#### Yakıt pilinin çalışma prensibi ve çeşitleri

Yakıt pilleri prensip olarak akümülatör veya pile benzemektedir. Her ikisi de kimyasal enerjiyi doğrudan elektriğe çevirir. Aralarındaki en büyük fark; akümülatörde, kimyasal enerji kullanımından önce depolanmış durumdadır, yakıt hücresinde ise dış kaynaklardan enerji sağlandığı sürece elektrik üretebilir. Yakıt pillerinin çalışma prensibi, elektroliz olayının tersi bir kimyasal reaksiyondur. Elektroliz reaksiyonunda suya doğru akım uygulandığında, oransal hacimlerde oksijen ve hidrojene ayrılmaktadır. Elektrik enerjisi uygulandığında su bileşenlerine

ayrıştığına göre, mantıksal olarak işlemin ters yönde düzenlenmesi halinde, yani oksijen ve hidrojenin reaksiyonu sonucunda su ve ısı elde edilirken, elektrik enerjisi alınmaktadır. Yakıt pilinde saf hidrojen yerine, kendisinden hidrojen elde edilen hidrokarbonlar da kullanılabilir. Fakat verimi düşürdüğü için tercih edilmemektedir. Şekil 2.6'da yakıt pili çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 2.6. Yakıt pilinin çalışma prensibi [1]

Genel olarak bir yakıt pili şöyle çalışır;

- Anotta hidrojen molekülü elektron verir ve  $\text{H}^+$  şekline dönüşür,
- Elektronlar dış hat ile katota doğru ilerlerken bizim ihtiyacımız olan elektrik enerjisini üretirler.
- Hidrojen iyonları yakıt hücresinin tipine göre farklılık gösteren elektrolitten geçerek katoda ulaşır.
- Katoda geçen hidrojen iyonu ve havada bulunan oksijen dış hattan gelen elektronlarla birleşerek su oluşturur.

Yakıt pilleri kullandıkları yakıtta, elektrolit cinsine ve çalışma sıcaklığına göre farklı isimler alır.

Yakıt pillerinin kullandıkları yakıta göre:

1. Proton geçiren polimeri zarlı yakıt Pili (PEMYP)
2. Direk metanol yakıt pili (DMYP)
3. Alkali yakıt pili (AYP)
4. Fosforik asit yakıt pili (FAYP)
5. Erimiş karbonatlı yakıt pili (EKYP)
6. Katı oksitli yakıt pili (KOYP)
7. Rejeneratif yakıt pili (RYP)
8. Silindirik yakıt pili (SYP)

Yakıt pillerinin çalışma sıcaklıklarına göre:

1. Düşük sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri ( 0–100 °C )
2. Orta sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri ( 100–500 °C )
3. Yüksek sıcaklıkta çalışan yakıt pilleri ( 500–1000 °C )

Yakıt pillerinin kullandıkları elektrolite göre:

1. Alkali elektrolitli yakıt pilleri
2. Katı polimerili yakıt pilleri
3. Fosforik asit yakıt pilleri
4. Erimiş karbonatlı yakıt pilleri
5. Katı oksitli yakıt pilleri [8]

### 2.1.3. Bor

Element olarak bor, periyodik sistemin üçüncü grubunun başında bulunmaktadır. Atom sayısı 5, atom ağırlığı 10,82, özgül ağırlığı 2,84, ergime noktası 2300 °C'dir. Kütle numaraları 10 ve 11 olan iki kararlı izotopundan oluşur [37].

Kendi grubunun yegâne nonmetalik elementi olan borun üç adet dış elektronu mevcut olup, silisyum ile benzerlik gösterir. Örneğin bor, silisyum gibi gaz halinde hidrojenli bileşikler yapar. Fakat bu bileşikler sebatsız olduklarından hava ile temasta derhal yanarlar.

Bor iki şekilde bulunur. Bunlardan birincisi kristal şekli olup, parlak ve siyah renklidir. Çok sert olan bu şeklin kristal yapısı tespit edilememiştir. Ancak birbirine sıkıca bağlanmış üç boyutlu bor atomlarından meydana gelmiş gibidir. İkincisi, daha az yoğun olan şekilsiz hali olup yeşilimsi, sarı, tatsız, kokusuz bir tozdur.

Elmaktan sonra en sert madendir. Stratejik değere sahip bor mineralleri doğada yaklaşık 230 çeşittir. Bunlardan ticari değere sahip olanları ise boraks (tinkal), kernit (razorit), kolemanit, uleksit, propertit, pandermite ve bor asittir [38].

Bor, yeryüzünde toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan bir elementtir. Toprağın bor içeriği genelde ortalama 10–20 ppm olmakla birlikte A.B.D.'nin batı bölgeleri ve Akdeniz'den Kazakistan'a kadar uzanan yörede yüksek konsantrasyonlarda bulunur. Deniz suyunda 0,5–9,6 ppm, tatlı sularda ise 0,01–1,5 ppm aralığındadır. Yüksek konsantrasyonda ve ekonomik boyutlardaki bor yatakları, borun oksijen ile bağlanmış bileşikleri olarak daha çok Türkiye ve A.B.D.'nin kurak, volkanik ve hidrotermal aktivitesinin yüksek olduğu olan bölgelerde bulunmaktadır.

51. yaygın element olarak yer kabuğunda boratlar ve borasilikatlar halinde bulunan bor elementi, periyodik cetvelde IHA grubunun metal olmayan tek elementidir. 150'den fazla mineralin bileşiminde yer almasına rağmen oksijene karşı ilgisi nedeniyle doğada serbest olarak değil, oksijenle bağlanmış bileşikler halinde bulunur. Borun element olarak kullanılışı daha az yaygın olup, yenidir. Oysa borun en çok kullanılan türü olan boraks binlerce yıldan beri bilinmektedir.

Kimyasal olarak ametal bir element olan kristal bor, normal sıcaklıklarda su, hava ve hidroklorik/hidroflorik asitler ile soy davranış göstermekte, sadece yüksek

konsantrasyonlu nitrik asit ile sıcak ortamda borik asite dönüşebilmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda saf oksijen ile reaksiyona girerek bor oksit ( $B_2O_3$ ), aynı koşullarda azot ile bor nitrit, ayrıca bazı metaller ile magnezyum borit ( $Mg_3B_2$ ) ve titanyum diborit ( $TiB_2$ ) gibi endüstride kullanılan bileşikler oluşabilmektedir.

Kristal bor, önemli ölçüde hafiftir, serttir, çizilmeye karşı mukavemetlidir ve ısıya karşı dayanıklıdır. Bor yanıcıdır ancak tutuşma sıcaklığı yüksektir. Yanma sonucunda kolaylıkla aktarılabilecek katı ürün vermesi ve çevreyi kirletecek emisyon açığa çıkarmaması gibi özelliğe sahip olduğundan dolayı katı yakıt hücresi olarak kullanılmaktadır.

Çizelge 2.4. Bor elementinin fiziksel ve kimyasal özellikleri [14]

Atom Kütle	10,811
Atom Numarası	5
Görünüş	Sarı-kahverengi kristal
Erime Noktası ( $^{\circ}C$ )	2050 $\pm$ 50
Süblimleşme Noktası ( $^{\circ}C$ )	2550
Yoğunluk (20 $^{\circ}C$ , $g/cm^3$ )	2,3 (Amorf) 2,35 (P-rombohidral) 2,46 (a- rombohidral)
Kristal Yapısı	Amorf, P-rombohidral, a- rombohidral, tetragonal
Füzyon Entalpisi (kJ/mol)	50,2
Süblimleşme Entalpisi (kJ/mol)	572,7
Entropi (289K, J.K.mol)	6,548 (Amorf) 5,875 (P-rombohidral)
Isı kapasitesi (300K, J-K.mol)	12,054 (Amorf) 11,166 (P-rombohidral)

Tabiatta yaklaşık 230 çeşit bor minerali mevcuttur fakat ekonomik açıdan önemli olanlar ise kalsiyum, sodyum ve magnezyum elementleri ile hidrat bileşikleri halinde bulunan bor mineralleridir. Bor madenlerinin değeri genellikle içindeki %  $B_2O_3$  ile ölçülmekte ve yüksek oranda  $B_2O_3$  bileşiğine sahip olanlar daha değerli kabul edilmektedir. Çizelge 2.5'de ekonomik açıdan önemli olan bor mineralleri ve %  $B_2O_3$

içerikleri verilmektedir.

Çizelge 2.5. Ticari önem taşıyan bor minarelerinin bileşimi [14]

Mineral	• Formülü	%B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Bulunduğu Yer
Boraks (Tinkal)	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·10H <sub>2</sub> O	36,60	Türkiye, ABD, Arjantin
Kernit (Razorit)	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> ·4H <sub>2</sub> O	51,00	Türkiye, ABD, Arjantin
Üleksit	NaCaB <sub>5</sub> O <sub>9</sub> ·8H <sub>2</sub> O	43,00	Türkiye, ABD, Arjantin, Şili
Probertit	NaCaB <sub>5</sub> O <sub>9</sub> ·5H <sub>2</sub> O	49,60	Türkiye, ABD
Kolemanit	Ca <sub>2</sub> B <sub>6</sub> O <sub>11</sub> ·5H <sub>2</sub> O	50,80	Türkiye, ABD
Pandermit	Ca <sub>4</sub> B <sub>10</sub> O <sub>11</sub> ·7H <sub>2</sub> O	49,80	Türkiye
Borasit	Mg <sub>3</sub> B <sub>7</sub> O <sub>13</sub> Cl	62,20	Almanya
Szaybelit	MgB <sub>2</sub> (OH)	41,40	BDT (Kazakistan), Çin.

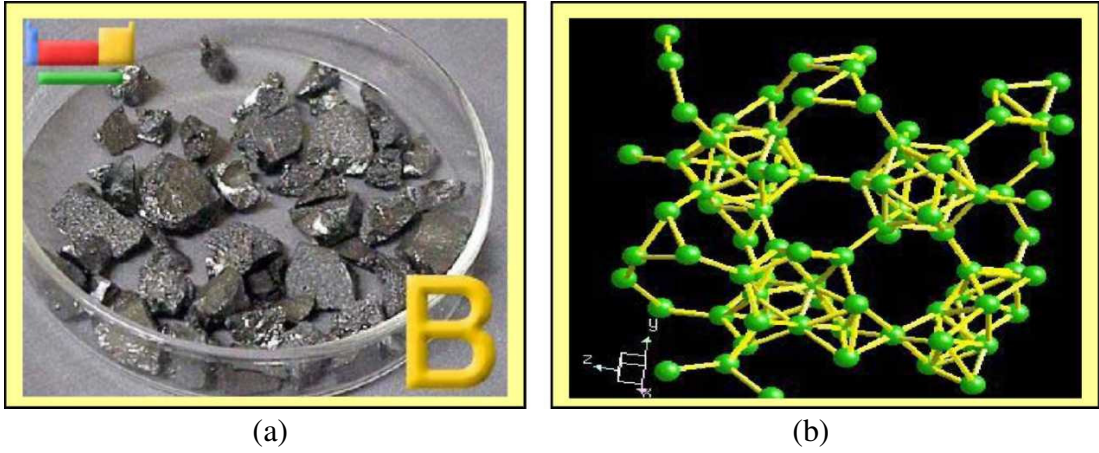
En zengin borat yatakları kimyasal çökeltme sonucu gölsel ortamlarda meydana gelmektedir. Volkanik etkinlik, birikim oluşturabilecekleri bir havza olması ve bölgede kurak, yarı kurak iklim olması önemli koşullardır. Borat oluşumu gölsel ortamlar dışında denizde oluşan tuz yatakları içinde de görülmektedir. Ancak bu tür ortamlarda meydana gelen boratlar genellikle ekonomik değere sahip değildir. Bor mineralleri yeraltındaki magmanın yeryüzüne doğru yükselirken kristalleşmesi sonucu da oluşmaktadır. Bunların dışında bir başka oluşum biçimi ise magmanın yer altından yükselirken sokulum yapması ve yüzeye yaklaşırken soğuma sırasında çevredeki farklı kayaçların yüksek ısı ve basınçtan etkilenmesi ve bu değişimle birlikte bor elementinin oluşmasıdır.

Ülkemizde yer alan borat yatakları; Miyosen yaşlı playa-göl ortamlarında oluşmuştur. Yataklara bor minerallerinin çökeltimi Ca-boratlar ile başlayarak Ca-Na ve Na-boratlar olarak devam etmektedir. Borat yataklarını oluşturan playa göllerindeki tortulların litolojisi, birbirlerinden az çok farklılıklar göstermesine karşın, genellikle çakıl taşı, kumtaşı, tuf, tüfit, kil taşı, marn ve kireçtaşlarından oluşur.

Ekonomik boyutlardaki bor yatakları, borun oksijen ile bağlanmış bileşikleri halinde daha çok Türkiye, A.B.D., Rusya, Arjantin, Kazakistan, Çin, Bolivya, Peru ve

Şili'nin kurak, volkanik ve hidrotermal aktivitesi yoğun olan bazı bölgelerinde bulunmaktadır. Türkiye dünya bor rezervlerinin % 64'lük kısmına sahip olmasının yanı sıra, son ürünlerin karakterlerini olumsuz yönde etkileyen istenmeyen safsızlık oranının çok düşük olması ve yüksek miktarda  $B_2O_3$  içermesi nedeniyle bor minerallerinin işletmeciliğinde daha avantajlıdır. Türkiye rezervlerinin % 37'si Bigadiç, % 34'ü Emet, % 28'i Kırka ve % 1'i Kestelek bölgesinde bulunmaktadır.

% 36,6  $B_2O_3$  içeriğine sahip boraks minerali ülkemizde Eskişehir-Kırka yataklarından bulunmaktadır. Tabiatta genellikle renksiz ve saydam olarak bulunur. Ancak içindeki bazı maddeler nedeniyle pembe, sarımsı, gri renklerde de bulunabilir. Tinkal suyunu kaybederek kolaylıkla tinkalkonite dönüşebilir. İzolasyon cam elyafı, cam seramikleri, emaye ve sır üretimleri tinkalin önemli kullanım alanları arasında yer almaktadır.



Resim 2.1. Bor elementi, (a) görünüşü, (b) kristal yapısı [6]

### Bor minareli kullanımının tarihçesi

Tarihte ilk olarak 4 000 yıl önce Babiller Uzak Doğu'dan boraks ithal etmiş ve bunu altın işletmeciliğinde de kullanmışlardır. Mısırlıların da boru, mumyalamada, tıpta ve metalürji uygulamalarında kullandıkları bilinmektedir. İlk boraks kaynağı Tibet Göllerinden elde edilmiştir. Boraks; koyunlara bağlanan torbalarda Himalayalar'dan

Hindistan'a getirilmiştir. Eski Yunanlılar ve Romalılar boratları temizlik maddesi olarak kullanmıştır. İlaç olarak ilk kez Arap doktorlar tarafından M.S. 875 yılında kullanılmıştır. Borik Asit 1700'lü yılların başında borakstan yapılmış, 1800'lü yılların başında ise elementer bor elde edilmiştir [37].

Elementer bor, ilk defa 1808 yılında Gay-Lussac ve Sir Humphry Davy tarafından keşfedilmiştir. Ancak 1895 yılında ilk defa Henry Moissan, bor oksitin magnezyum ile indirgenmesiyle % 86 saflıkta bor elde etmiştir. Moissan prosesi halen yüksek saflıkta amorf borun ticari olarak üretimine temel oluşturmaktadır. Daha yüksek saflıktaki bor ancak BCl<sub>3</sub>'ün bozunmasıyla elde edilebilir [6].

Modern bor endüstrisi ise 13. yy.da boraksın Marco Polo tarafından Tibet'den Avrupa'ya getirilmesiyle başlamıştır. 1771 yılında, İtalya'nın Tuscani bölgesindeki sıcak su kaynaklarında Sassolit bulunduğu anlaşılmış, 1852'de Şili'de endüstriyel anlamda ilk boraks madenciliği başlamıştır. Nevada, California, Caliko Mountain ve Kramer yöresindeki yatakların bulunarak işletilmeye alınmasıyla ABD Dünya bor gereksinimini karşılayan birinci ülke haline gelmiştir. Türkiye' de ilk işletmenin, 1861 yılında çıkartılan "Maadin Nizannamesi" uyarınca 1865 yılında bir Fransız şirketine işletme imtiyazı verilmesiyle başladığı bilinmektedir.

1950 yılında Bigadiç ve 1952 yılında Mustafa Kemal Paşa yöresindeki kolemanit yatakları bulunmuştur. 1956 yılında Kütahya Emet Kolemanit, 1961 yılında Eskişehir Kırka Boraks yataklarının bulunması ve işletilmeye başlatılmasıyla Türkiye, dünya bor üretimi içinde 1955 yıllarında % 3 olan payını 1962'de % 15, 1977'de % 39 düzeyine yükselmiş ve giderek artan üretimi nedeniyle de günümüzde A.B.D.'nin en önemli rakibi haline gelmiştir.

#### Bor minareleri ve ürünlerinin kullanım alanları

Bor minareli cam sanayi, seramik sanayi, temizleme ve beyazlatma sanayi, yanmayı önleyici maddeler, ilaç ve kimya sanayi, tarım, metalürji, enerji depolama,

arabalarındaki hava yastıkları, atık temizleme işlemleri, pigment ve kurutucu olarak ve nükleer uygulamalar gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

A.B.D., Batı Avrupa ve Japonya'da bor mineralleri ve ürünlerinin kullanım oranları farklıdır. A.B.D.'de en çok tüketim fiberglas izolasyon sanayiinde olmaktadır. Batı Avrupa'da ise sabun ve deterjan sanayii bor tüketiminde öndedir. Japonya'da en büyük bor tüketimi tekstil ve fiberglas sanayiinde gerçekleşmektedir [37].

### Enerji depolamada borun rolü

Günümüzde hidrojen taşıma ortamı olarak büyük bir önem kazanmış olan özellikli bor bileşiklerinden biri sodyum borhidrürdür. Sodyum borhidrür çözeltisinden katalitik olarak elde edilen hidrojen gazı yakıt pilinde kullanılarak enerjiye dönüştürülebilir.

$\text{NaBH}_4$ , ticari önemi en fazla olan tetrahidroboratlar grubunda yer alan alkali metal borhidrürlerin bir üyesidir.  $\text{NaBH}_4$ , birçok organik kimyasal fonksiyonel gruplar ile ilaç üretim proseslerinde kullanılan metal tuzları için önemli bir indirgeyicidir.

Hidrokarbon temelli enerji kaynaklarına alternatif ve çevreyle dost yakıtlar günümüzde enerji elde edilmesi alanında gerçekleştirilen araştırmalarının temelini oluşturmaktadır. Borhidrür tuzları yakıt hücresinde doğrudan anot yakıtı olarak ya da hidrojen depolama ortamı olarak kullanılabilir.  $\text{NaBH}_4$ 'ün su ile reaksiyonuyla hidrojen üretilirken  $\text{NaBO}_2$  yan ürün olarak elde edilmektedir.

### Borun hidrojen taşıyıcısı bileşiği sodyum borhidrür ( $\text{NaBH}_4$ )

Sodyum borhidrür, hidrojen taşıyıcısı olarak önemli bir rol üstlenmektedir. Bu nedenle, sodyum borhidrürün fiziksel özellikleri, çözünürlüğü ve kararlılığı kısaca aşağıda açıklanmıştır.

*Sodyum borhidrür (NaBH<sub>4</sub>)'ün fiziksel ve kimyasal özellikleri*

NaBH<sub>4</sub> en dengeli alkali metal borhidrürlerden olup, nemli havada çok yavaş reaksiyon verirken kuru havada kararlıdır. 400 °C'nin üstündeki sıcaklıklarda ve vakum altında ısıtıldığında yapısında fark edilebilir bir bozunma gözlenmez. Suyla reaksiyonu ile yapısındaki hidrojen serbest kalmaktadır. Su, oda sıcaklığında veya altında ise hidrojenin serbest kalması yavaştır. NaBH<sub>4</sub>'ün bazı kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 2.6'de verilmektedir.

Çizelge 2.6. Sodyum borhidrürün fiziksel ve kimyasal özellikleri [6]

Formülü	NaBH <sub>4</sub>
Molekül ağırlığı, g/mol	37,84
Teorik H <sub>2</sub> içeriği, % (ağırlıkça)	10,6
Kristal yapısı	Yüzey merkezli kübik (a=6,15 Å)
Kaynama noktası, °C	505
Bozunma sıcaklığı, °C	315
Erime noktası, °C (2-6 atm H <sub>2</sub> basıncında)	500
Bozunma sıcaklığı, °C (vakum altında)	400
Oluşum entalpisi (25 °C), kJ.mol <sup>-1</sup>	-188,6
Oluşum Gibbs enerjisi (25 °C), kJ.mol <sup>-1</sup>	-123,9
Entropi, J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	101,3
Isı kapasitesi (25 °C), J.K <sup>-1</sup> .h	86,8

*NaBH<sub>4</sub> 'ün çözünürlüğü*

Genel olarak NaBH<sub>4</sub>, hidroksi veya amin grubu içeren polar bileşiklerde çözünmektedir. Glikol eterli çözücülerdeki çözünürlüğü diğer çözeltilerden farklı olarak sıcaklık artışı ile azalmaktadır. Çizelge 2.7'de NaBH<sub>4</sub>'ün farklı çözücülerdeki

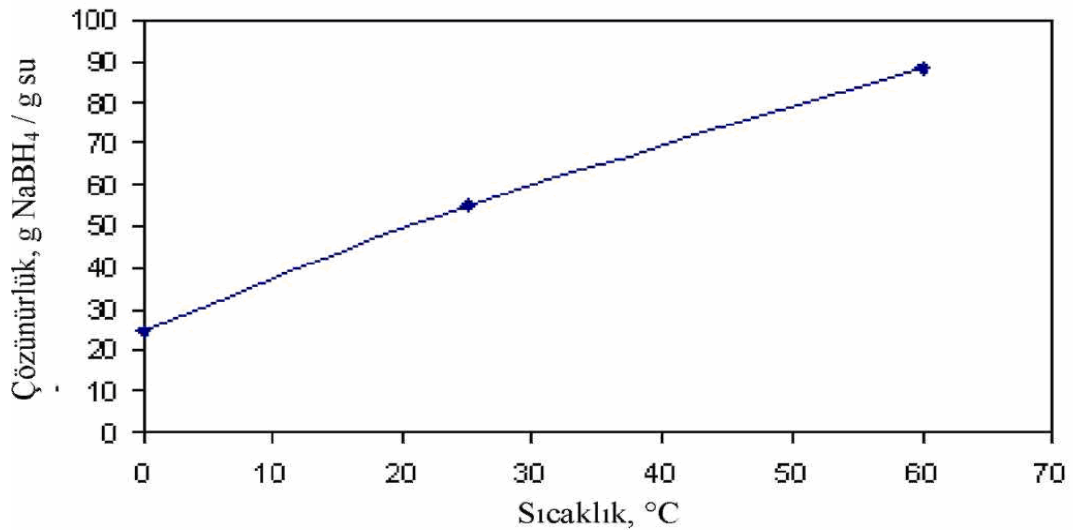
ve farklı sıcaklık değerlerindeki çözünürlük değerleri verilmektedir.

Çizelge 2.7.  $\text{NaBH}_4$ 'ün farklı çözücülerdeki çözünürlük değerleri [6]

Çözücü	Sıcaklık (°C)	Çözünürlük (g $\text{NaBH}_4$ /100 g çözücü)
Sıvı amonyak	-25	104,0
Etanol	20	4,0
Metanol	20	16,4
Metilamin	-20	27,6
Etilamin	17	20,9
N-Propilamin	28	9,7
İzopropilamin	28	6,0
Pridin	75	3,4
Etilendiamin	75	22,0
Asetonitril	28	0,9

$\text{NaBH}_4$ 'ün 25 °C'deki çözünürlüğü için en fazla kullanılan çözücüler sıvı amonyaktır.

$\text{NaBH}_4$ 'ün farklı sıcaklıklarda sudaki çözünürlük değerleri Şekil 2.7'de verilmektedir.



Şekil 2.7. Farklı sıcaklıklardaki  $\text{NaBH}_4$ 'ün sudaki çözünürlüğü [6]

NaBH<sub>4</sub>'ün çözünmediği durumlarda kullanılan organik çözücüye eser miktarda su veya düşük molekül ağırlıklı alkoller ilave edilebilmektedir. Genel olarak NaBH<sub>4</sub>'ün her molü için iki mol su eklenmelidir. Ancak, bazı durumlarda, tetraetilamonyum borhidrit gibi organik bor hidritler oldukça kuvvetli çözünürlüğü nedeniyle daha etkili olmaktadır.

#### *NaBH<sub>4</sub>'ün kararlılığı*

NaBH<sub>4</sub>, termal olarak çok kararlıdır ve ancak vakum altında 400 °C'nin üstündeki sıcaklıklarda yavaş yavaş bozunmaktadır. NaBH<sub>4</sub> havadaki nemi hızlı bir şekilde absorbe edip yavaşça bozunur ve yapısındaki hidrojen serbest hale geçer. Dolayısıyla havadaki bozunma derecesi hem sıcaklığın hem de nemin bir fonksiyonudur.

NaBH<sub>4</sub>'ün sudaki kararlılığı sıcaklığa ve pH'a bağlı olarak değişir. Sıcaklığın artması ve pH'ın azalması aşağıdaki hidroliz reaksiyonunu hızlandırmaktadır.



NaBH<sub>4</sub> bazik özellik gösterdiğinden dolayı yüksek konsantrasyon değerlerindeki çözeltileri daha kararlıdır. NaBH<sub>4</sub>'ün sudaki hidrolizi pH değerini arttırmakta ve bozunma hızını azaltmaktadır.

Soy metaller, bakır, nikel ve kobalt boritler; borhidrür iyonunun hidrolizini katalizlemektedir. Katalizör, çözeltideki uygun metal tuzunun borhidrür tarafından indirgenmesi ile oluşmaktadır.

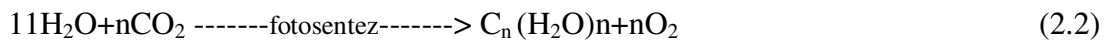
NaBH<sub>4</sub> asidik alkoller ve metanol, etanol gibi düşük molekül ağırlıklı, birincil alkollerde kararlı değildir. Düşük alkollerdeki kararsızlığı, sulu çözeltilerde olduğu gibi baz eklenerek ortadan kaldırılır.

Organik çözeltilerde, NaBH<sub>4</sub> çözeltilerinin kararlılığı oluşabilecek hidroliz miktarına bağlıdır. Örneğin, piridin ve dioksan çözeltilerde NaBH<sub>4</sub> oldukça kararlıdır. Eser miktardaki su ile hidroliz meydana gelmekte ve bu durum kararlılığa etki etmektedir [6].

## 2.2. Biyokütle Enerjisi ve Biyodizel

### 2.2.1. Biyokütle enerjisi

Biyokütle, geniş kullanım potansiyeli, ekonomik oluşu, çeşitli sosyal ve çevresel faydaları sebebiyle geleceğin yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Ana bileşenleri karbo-hidrat bileşikleri olan bitkisel ve hayvansal kökenli tüm doğal maddeler "biyokütle", bu kaynaklardan üretilen enerji ise "biyokütle enerjisi" olarak adlandırılmaktadır. Bitkisel biyokütle, yeşil bitkilerin güneş enerjisini fotosentez yoluyla doğrudan kimyasal enerjiye dönüştürerek depolaması sonucu oluşmaktadır. Hayvansal biyokütle ise bitkisel biyokütleden türemektedir. Yeşil yapraklar güneş ışığı altında, karbondioksit ve su ile fotosentez sonucu aşağıdaki tepkimeye göre fotokimyasal ürünler verirler:



Fotosentez, su ve karbondioksitin bir miktar enerjinin kullanımıyla oksijene ve organik maddelere dönüştürüldüğü kimyasal tepkimeyi içeren doğal bir olaydır.

Güneşin dünyaya verdiği enerjinin yaklaşık  $1,5 \cdot 10^{18}$  kWh/yıl olduğu ve bunun da dünyada tüketilen toplam enerjiden 10 000 kat büyük olduğu bilinmektedir. Dünya yüzeyine gelen bu enerjinin yaklaşık % 0,1'i fotosentez olayıyla biyokütleye dönüştürülerek depolanmaktadır. Bu ise yaklaşık olarak dünyada kullanılan toplam enerjiden 10 kat fazladır.

Biyokütle, oksijenle reaksiyona girdiğinde ısı ortaya çıkar. Bu nedenle "biyoyakıt" olarak da adlandırılabilir. Doğal ekolojide, tüm biyokütle, çürüme ve metabolizma sonucu normal çevre sıcaklıklarında ısı açığa çıkararak temel elementlere bozunur. Biyokütle sonucu ortaya çıkan enerji bu sebeple yenilenebilir bir enerji kaynağıdır ve çevreyi herhangi bir yan ürünle kirletmez. Biyoyakıtlar bu sebeple "Yeşil Enerji" olarak tanımlanabilir. Biyoyakıtların kullanımı yukarıda tanımlanan fotosentez reaksiyonunun enerji ve madde açısından tersidir. Burada, reaksiyonun sağ tarafında görülen ileri reaksiyonun ürünleri biyokütle ve oksijendir. Ters reaksiyon biyoyakıtların havayla yakılması sürecini içerir.

Dünya üzerinde, biyokütle çok geniş bir alana yayılmıştır ve çok seyrekler. Genellikle yığın yoğunluğu da fosil kökenli yakıtlarinkinden 3–4 kat daha düşüktür. Bu yüzden biyokütle tesisleri fosil yakıt tesislerinkinden daha büyüktür ve biyokütlenin taşınması ve işlem yapılması fosil yakıtlara göre daha zor ve masraflıdır. Biyokütlenin ekonomik olarak etkin bir şekilde kullanılması açısından, tüm yenilenebilir enerji süreçlerinde olduğu gibi, doğada enerji döngüsünün kendiliğinden gerçekleştiği yerleri bulup, enerji üretim tesislerini bu bölgelerle ilişkilendirmek gereklidir.

Biyokütleden enerji, aşağıda belirtilen yöntemlerle elde edilebilir:

1. Doğrudan yakma
2. Fiziksel süreçler
3. Çevrim süreçleri

-Termal çevrim süreçleri (gazlaştırma, piroliz)

-Biyokimyasal çevrim süreçleri (fermantasyon, anaerobik sindirim, biyofotoliz)

-Agrokimyasal çevrim süreçleri (transesterifikasyon: biyodizel üretimi)

Fiziksel süreçler ve dönüşüm süreçleri ile, biyokütlenin olumsuz özellikleri ortadan kaldırılabilmektedir. Fiziksel süreçler; boyut küçültme (kırama ve öğütme), kurutma, filtrasyon, ekstraksiyon ve briketleme şeklindedir. Fiziksel süreçler dönüşüm süreçleri için biyokütlenin işlenmesi amacı ile kullanılırsa "biyokütlenin ön hazırlık işlemleri" olarak tanımlanmaktadır. Biyokütlenin fiziksel süreçler sonrasında yakıt kalitesi artar ve doğrudan yakılarak kullanılabilir. Biyokütleden, biyoyakıt üretiminde kullanılan dönüşüm süreçleri iki ana grupta toplanmaktadır.

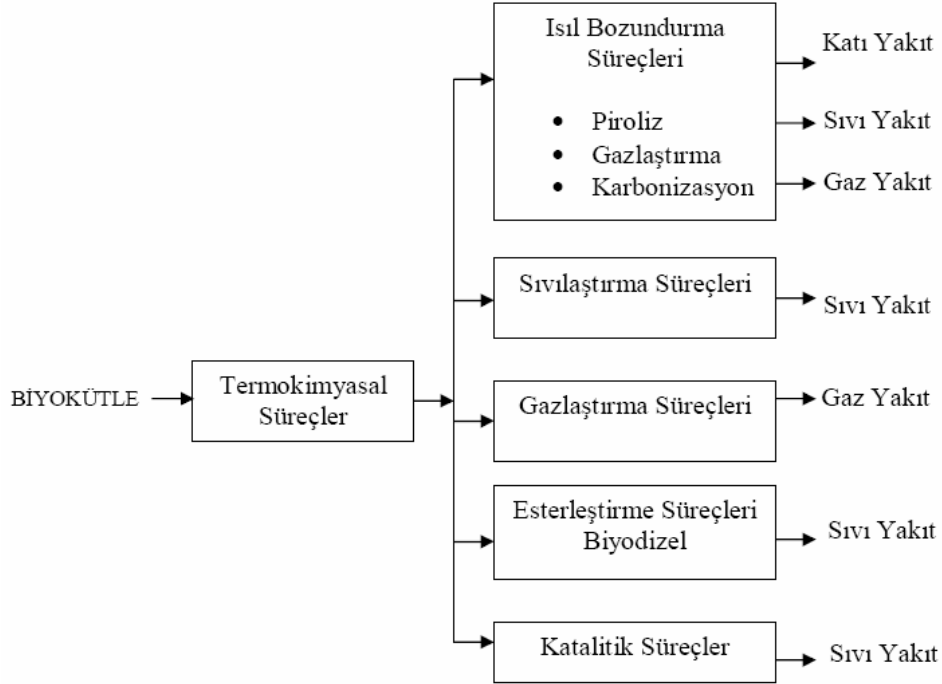
1. Biyokimyasal dönüşüm süreçleri
2. Termokimyasal dönüşüm süreçleri

Dönüşüm süreçleri ile karbon ve hidrojen zengin, yüksek ısı değerli, mevcut yakıtlara alternatif özelliklerde pek çok biyoyakıt elde edilebilmektedir. Bu yakıtlar arasında biyogaz ve etanol uygulaması en yaygın olanlardır.

Biyokütlenin yakma dışında en basit değerlendirilmesi, anaerobik fermantasyonla biyogaz üretimidir. Biyogaz, organik içerikli biyolojik parçalanabilir maddelerin havasız ortamda (anaerobik) bakteriler tarafından parçalanması esnasında oluşan ve bileşimi organik maddeyi oluşturan, bileşiklere göre değişebilen yancıcı bir gaz karışımıdır. Biyogazı oluşturan bileşenler metan ( $\text{CH}_4$ ), karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ), hidrojen sülfür ( $\text{H}_2\text{S}$ ), amonyak ( $\text{NH}_3$ ), azot ( $\text{N}_2$ ), hidrojen ( $\text{H}_2$ ) olabilmektedir. Koşulları iyi ayarlanmış bir biyogaz üretiminde elde edilen gaz, %55–70  $\text{CH}_4$ , % 30–45  $\text{CO}_2$ , az miktarda  $\text{H}_2\text{S}$  ve  $\text{H}_2\text{O}$  şeklinde bir bileşime sahip olmaktadır. Biyogazın ısı değeri, karışımdaki  $\text{CH}_4$  yüzdesine bağlı olarak 19 000 ile 27 500  $\text{kJ/m}^3$  arasında değişmektedir.

Biyokütleden termokimyasal dönüşüm süreçleri ile biyoyakıtlara geçiş Şekil 2.8’de görülmektedir. Termokimyasal dönüşüm süreçlerinin amacı, fosil yakıtlara alternatif, kararlı özelliklere sahip, kolay depolanabilir ve taşınabilir yakıtlara ulaşmaktır. Isıl

işlem sonucunda karbon içeren biyokütle molekülü yükseltgenerek katı, sıvı ve gaz ürünler oluşmaktadır. Yükseltgenme tepkimesinde temel etkenler; sıcaklık, ısıtma hızı, biyokütle ile uygulanan sürecin tipi ve özellikleridir. Biyokütleden biyoyakıt eldesinde, en çok ısıl bozundurma süreçleri kullanılmaktadır.

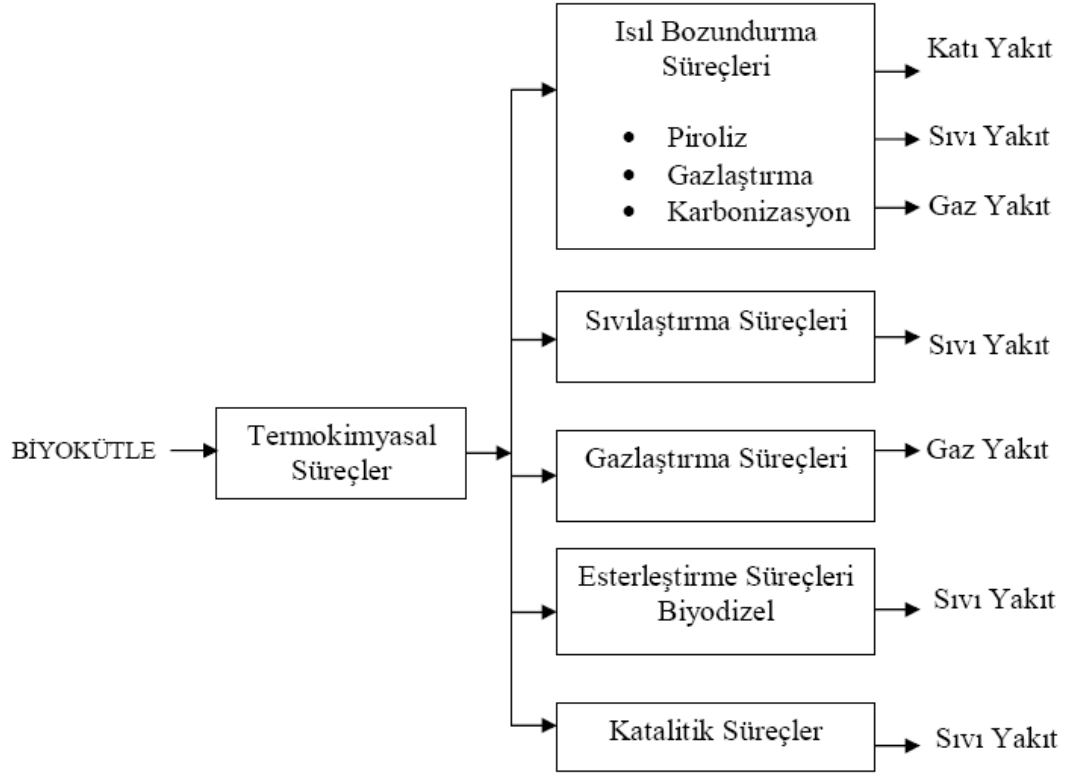


Şekil 2.8. Biyokütleden biyokimyasal dönüşüm süreçleri ile biyoyakıtlara geçiş [4]

Termokimyasal süreçlerden doğrudan elde edilen birincil ürünler ham biyokütleden daha kolay kullanılabilir ve daha değerlidir. Birincil ürünler, daha kullanışlı ve değerli ikincil yakıtlara veya kimyasal ürünlere dönüştürülerek de kullanılabilir.

Termokimyasal dönüşüm süreçlerinden elde edilen birincil ürünler, uygulanan dönüşüm sürecine bağlı olarak katı, sıvı ve gaz olabilir. Bu ürünler doğrudan kullanılacağı gibi daha yüksek kalitede yakıt ve kimyasal ürünler üretmek için kimyasal işlemlere tabi tutulabilirler. İkincil ürünlerin büyük miktarı birincil ürünlerden üretilebilir. İkincil ürünlerden motor yakıtları, hidrojen ve amonyak içeren kimyasallar ve kimyasal açıdan özel maddeler üretilebilir.

Biyokütleden bütün bu dönüşüm süreçleri kullanılarak pek çok biyoyakıt elde edilebilmektedir. Kullanılacak dönüşüm süreçlerinin seçimi elde edilmek istenen yakıt türü, kullanılacak hammadde, yapılacak yatırım gibi şartlara bağlıdır.



Şekil 2.9. Biyokütleden termokimyasal dönüşüm süreçleri ile biyoyakıtlara geçiş [4]

Biyoyakıtlar arasında biyokütle kaynaklı esterleşme ürünü olan biyodizel, günümüzde yaygın olarak üretilmeye ve kullanılmaya başlanmıştır. Biyodizel; biyomotorin, dizel-bi ve yeşil dizel adları ile bilinmektedir.

### Biyokütle kaynakları

Enerji üretiminde kullanılabilecek biyokütle kaynaklarını; bitkisel kaynaklar, hayvansal atıklar, şehir ve endüstri atıkları şeklinde sınıflandırabiliriz.

### *Bitkisel kaynaklar*

Bitkisel kaynaklar olarak; orman ürünlerini, 5–10 yıl arasında büyüyen ağaç türlerini içeren enerji ormanlarını, bazı su otlarını, algleri ve enerji (C<sub>4</sub>) bitkilerini sayabiliriz. Enerji bitkileri olan tatlı sorgum, şeker kamışı, mısır gibi bitkiler; diğer bitkilere göre CO<sub>2</sub> ve suyu daha iyi kullanmakta, kuraklığa karşı daha dayanıklı olmakta ve fotosentetik verimleri daha yüksek olmaktadır. Bu bitkilerden alkol ve değişik yakıtlar üretilmektedir. Türkiye'de; bitki artıkları, fındık ve ceviz kabuğu, prina, ayçiçeği kabuğu, çığit ve mısır gibi artıklar enerji amacıyla değerlendirilmektedir.

Kuru biyokütlenin ısı değeri 3 800–4 300 kcal/kg arasında değişmektedir. Biyokütleden yakma yolu ile enerji elde edilmesinde yanma verimi, orta kaliteli bir kömüre eşittir. Biyokütle, çoğu kömürden daha az miktarda kül ve kükürt içermektedir. Biyokütlenin enerji üretimi amacıyla geniş oranda kullanımını engelleyen bazı problemler vardır. Bunlar, biyokütle kaynağının yoğunluğu nedeniyle nakliye ve depolama maliyeti ve bu mahsullerin hektar başına verimliliğinin düşük olmasıdır.

Odunun (odun ve benzeri selüloz ihtiva eden maddelerin) biyokütle kaynağı olarak değerlendirilmesinde izlenme yollardan birisi oksijensiz ortamda ve yüksek sıcaklıklarda (350–800 °C) piroliz yapmaktır. Piroliz<sup>3</sup> sırasında odun kömürü ile birlikte asetik ve formik asit, metanol, aseton ve formaldehit gibi ürünler elde edilmektedir. Hızlı ve verimli bir piroliz için odunun tamamen kurutulması ve 150–200 °C'a kadar ön ısıtmaya tabi tutulması gerekmektedir. Katı yüzdesi fazla olan atıklardan piroliz ile gaz yakıt ve aktif karbon üretimi yapılmaktadır.

Bitkisel kaynaklı biyokütleden elde edilen etil alkol ve metil alkol, alternatif yakıt çeşitleri olarak özellikle gelişmekte olan ülkelerde, petrol ürünleri yerine kullanılmaya başlamıştır. Metil alkolün üretimi ve kullanılmasında bazı sorunlar

---

<sup>3</sup> Piroliz: Oksijen bulunmayan ortamlarda atığın sıcaklık etkisiyle yanması.

olduğu için etil alkol tercih edilmektedir. Etil alkol; alkollü içkilerde, kimya sanayiinde, fuel-oil yanında kazan yakıtı veya benzin yakıtı olarak kullanılmaktadır.

Etanol üç farklı biyokütleden üretilmektedir:

- Şekerli karbonhidratlardan (şeker kamışı, melas, sorgum)
- Nişastalar (mısır, patates)
- Selülozlu bitkiler (odun, zirai atıklar)

Çizelge 2.8. Bitkisel biyokütle kaynakları [4]

Tarım	Elementer analiz				Kül %	Uçucu madde %	Isıl değer %
	%C	%H	%N	%S			
Atıklar							
Buğday	44,62	5,89	0,39	0,102	7,57	79,57	39,50
Mısır	43,00	5,52	0,62	0,142	9,60	77,54	39,53
Ayçiçeği	43,09	5,41	1,07	0,185	10,67	74,6	34,13
Pamuk çekirdeği	45,66	5,40	0,72	0,135	7,28	76,5	40,80
Şeker pancarı	43,11	5,82	1,18	0,055	4,42	9,4	3,997
Tatlı sorgum (ort)	44,00	6,20	0,15	0,060	1,80	77,0	41,00

Şekerli karbonhidratlardan etanol üretiminde karbonhidratın basit şeker formunda ve fermente edilebilir durumda olması ve elde edilen elyaf ve küspenin tekrar süreç içerisinde enerji hammaddesi olarak kullanılabilmesi gerekmektedir. Nişastalar ise, daha kompleks yapıya sahip olduğundan şekerleşme süreci ile ihtiva ettikleri karbonhidratlar basit şeker formuna dönüşmektedir. Bu ilave bir sürece ihtiyaç duyduğundan yatırım ve işletme masraflarını arttırmaktadır.

Selülozlu bitkilerin ihtiva ettikleri karbonhidratlar gerek moleküler yapı ve gerekse fermente edilebilir şekere dönüşüm süreçleri açısından, önceki gruplara nazaran daha karmaşık yapıya sahip olduğundan, alkol dönüşüm verimleri düşüktür. Etanolün otomobil yakıtı olarak en yaygın kullanıldığı ülke Brezilya'dır. Etanol, şeker

kamışından fermantasyon ve damıtma sonucunda % 94–96 saf alkol alınacak şekilde üretilmektedir. Biyokütle kökenli sentetik akaryakıt kapsamında yer alan alkol karışımı benzin ve bitkisel yağ karışımı motorin dışında, bazı enerji bitkilerinden elde edilen yağlar dizel yakıtı yerine kullanılabilir.

### *Hayvansal atıklar*

Hayvansal gübrenin samanla karıştırılıp kullanılması suretiyle elde edilen tezeğin köylerde yakıt olarak kullanımı oldukça yaygındır. Hayvansal gübrenin oksijensiz ortamda fermantasyonu ile üretilen biyogazın dünyada kullanımı da oldukça yaygındır.

Herhangi bir atıktan metan meydana gelişi, bakteriler tarafından iki kademe gerçekleştirilir. Önce kompleks organikler, asit bakterileri tarafından uçucu yağlı asitlere dönüştürülür. Sonra üreyen asitler metan bakterileri tarafından metan haline getirilir. Elde edilen gaz % 55–70 metan, % 30–45 karbondioksit, az miktarda hidrojen sülfür ve su bileşimine sahiptir. Biyogazın ısı değeri, karışımdaki metan yüzdesine bağlı olarak 1 900 ile 27 500 kJ/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir.

Biyogaz üretiminde genel olarak kesikli beslenme metodunda, fermantasyon tankına taze çiftlik gübresi verilir ve tank hava almayacak şekilde kapatılır. Gübrenin havasız ortamda fermantasyonu sonunda meydana gelen biyogaz, bir boru ile gazometre denilen ikinci bir kaptan toplanır.

Kesikli beslenme yönteminde, tanka ilk gübre beslemenin yapılmasından yaklaşık 15 gün sonra biyogaz üretimi başlamakta ve gazın sürekliliği 60 gün sürmekte, bu sürenin sonunda gaz verimi düşmektedir. Bu durumda fermantasyon tankı boşaltılarak tekrar taze çiftlik gübresi doldurulur.

Biyogaz üretiminden sonra elde edilen fermente gübrenin, fermente olmamış gübreye oranla % 20–25 daha verimli olduğu belirtilmektedir. Ülkemizde biyogaz üretim potansiyeli 2,8–3,9 milyar m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir.

#### *Şehir ve endüstri atıkları*

Çöp depolanan yerlerde ve evsel atık su arıtma tesislerinde oluşan arıtma çamurları eğer önceden stabilize edilmemiş ve biyokimyasal aktiviteleri durdurulmamışsa aerobik organizmalar tarafından ayrıştırılarak metan gazına dönüştürülecektir. Metan gazı aynı zamanda sera etkisinin oluşmasında en az karbondioksit ve su buharı kadar etkili olduğundan oluşumu kontrol altına alınarak değerlendirme yoluna gidilmiştir. Bu amaçla çöp toplanan alanda oluşan gazları toplayacak şekilde sondaj boruları belirli bir düzene göre yerleştirilerek oluşan gazlar toplanmaktadır.

Çıkan gazlar arıtılarak gaz jeneratörüne gönderilmekte ve gaz jeneratöründe elektrik elde edilmektedir.

Diğer uygulama alanları ise, doğal gaz sisteminde ve araçlarda yakıt olarak, kimya sanayinde saf metan haline getirilerek kullanma olarak sıralanabilir. Elde edilen biyogazın doğal gaz dağıtım sisteminde kullanılması, gaz temizleme işleminin pahalı olması nedeniyle fazla uygulanmamaktadır.

Toplanan çöpün bileşimine bağlı olarak oluşan gaz içindeki bileşenler; metan % 35–60, karbondioksit % 35–55, nitrojen % 0–20 arasında değişmektedir. Depolama alanından oluşan 1 metreküp gazın ısı değeri ise yine çöpün bileşenlerine bağlı olarak 18–27 MJ/Nm<sup>3</sup> arasında değişmektedir. Türkiye'nin ilk çöp gaz santrali Aksa Jeneratör tarafından Bursa Demirtaş'ta kurulmuştur. 1,4 MW gücünde ve 2 milyon dolara mal olan santralden yılda 10 milyon kW/h elektrik üretimi planlanmaktadır.

Çöp ve katı maddelerden enerji elde etmenin diğer bir yolu ise piroliz ve yüksek sıcaklıklarda yakılmasıdır. Çöp ve katı atıkların uygun yakma tesislerinde havayla

yakılması ile elde edilen enerji ısı enerjisinde veya elektrik üretiminde değerlendirilmektedir [4].

### 2.2.2. Biyodizel

Biyodizel, biyolojik yağlardan üretilen motorine alternatif bir yakıttır. Hayvansal yağlar ile soya fasulyesi, kolza, ayçiçeği gibi bitkisel ürünlerin yağlarından biyodizel yakıt üretiminde yararlanılır. Kullanılan yağların yeni ya da atık olmasının önemi yoktur. Bu nedenle biyodizel üretimi aynı zamanda atıklardan enerji kazanımı modelidir. Biyodizel saf olarak kullanılabilirdiği gibi, petrolden elde edilen motorinle de karıştırılarak kullanılabilir.

Bitkisel yağların yakıt olarak kullanılabileceğini ilk olarak 1900'lü yılların başında, Rudolph Diesel, yer fıstığı yağıyla dizel motorunu çalıştırarak göstermiştir. Fakat petrol hazır bir sektör olduğu için yaygınlaşması ancak bazı özel olaylar sonucu ve kısıtlı olmuştur. İkinci Dünya Savaşı, 1970'lerdeki petrol darboğazı ve yeni dönemde çevre bilincinin artması yeni enerji kaynaklarına ilgiyi arttırmıştır.

Biyodizel ismi ilk olarak 1992 yılında Amerika Ulusal Soy Diesel Geliştirme Kuruluşu tarafından telaffuz edilmiştir.

Biyodizel orta uzunlukta C16-C18 yağ asidi zincirlerini içeren metil veya etil ester tipi bir yakıttır. Biyodizel ağırlıkça % 11 oksijen içerir. Oksijenli zincir yapısı biyodizeli, petrol kökenli motorinden ayırır. Biyodizel, motorine yakın ısı değerine, motorinden daha yüksek alevlenme noktasına sahiptir. Bu özellik biyodizeli kullanım-taşıma-depolamada daha güvenli bir yakıt yapar.

Aşağıda biyodizelin temel özellikleri açıklanmaktadır:

- Biyolojik olarak bozunabilirlik: Biyodizeli oluşturan C16-C18 metil esterleri doğada kolayca ve hızla parçalanarak bozunur, 10 000 mg/l'ye kadar herhangi

bir olumsuz mikrobiyolojik etki göstermezler. Suya bırakıldığında biyodizelin 28 günde % 95'i, motorinin ise % 40'ı bozunabilmektedir. Biyodizelin doğada bozunabilme özelliği dekstroza (şeker) benzemektedir.

- Toksik etki: Biyodizelin olumsuz bir toksik etkisi bulunmamaktadır. Biyodizel için ağızdan alınmada öldürücü doz 17,4 g biyodizel/kg vücut ağırlığı şeklindedir. Sofra tuzu için bu değer 1,75 g tuz/kg vücut ağırlığı olup, tuz biyodizelden 10 kat daha yüksek öldürücü etkiye sahiptir. İnsanlar üzerinde yapılan elle temas testleri biyodizelin ciltte % 4'lük sabun çözeltisinden daha az toksik etkisi olduğunu göstermiştir. Biyodizelin toksik olmamasına karşın, biyodizel ve biyodizel-motorin karışımlarının kullanımında; motorin için zorunlu olan standart koşulların (göz koruyucular, havalandırma sistemi v.b.) kullanılması önerilmektedir.
- Depolama: Biyodizelin kararlılığı yakıtın depolanması veya su absorblaması halinde hem soğuk hem de sıcak ortam koşulları için mikrobiyal etkilere, polimerizasyona ve oksidasyona dayanımının ölçüsüdür. Biyodizel yakıtlarda bozunmaların ana sebebi, yağ asidi zincirindeki doymamışlıklardır. İki veya tek doymamışlık içeren yapılar dış etkilere oldukça açıktırlar. Depolama esnasında metallerle veya elastomerlerle temas kararlılığı etkileyebilir. Oksitlenme elastomerlerle etkileşmeye veya polimerleşmeyle zamksı yapıların oluşumuna yol açar. Biyodizel temiz, kuru, karanlık bir ortamda depolanmalı, aşırı sıcaktan kaçınılmalıdır. Depo tankı malzemesi olarak yumuşak çelik, paslanmaz çelik, florlanmış polietilen ve florlanmış polipropilen seçilebilir. Depolama, taşıma ve motor malzemelerinde bazı elastomerlerin, doğal ve butil kauçukların kullanımı sakıncalıdır; çünkü biyodizel bu malzemeleri parçalamaktadır. Bu gibi durumlarda biyodizelle uyumlu Viton B tipi elastomerik malzemelerin kullanımı önerilmektedir.
- Viskozite ve akış özellikleri: Viskozite genel olarak sıvıların akmaya karşı göstermiş olduğu dirençtir. Biyodizelin viskozitesi petrol kaynaklı dizelin

viskozitesinden daha yüksektir. Yüksek viskozite yakıt düzgün biçimde püskürtülmesini engeller. Biyodizel ve karışımlarının viskozitesi sıcaklık ve doymamışlık arttıkça azalır. Ayrıca zincir uzunluğu arttıkça biyodizel ve karışımlarının viskozitesi artar. Monogliseritlerin varlığı da metil esterlerinin viskozitesini belirgin şekilde artırır.

- Motor yakıtı özellikleri: Dizel motorlarında yanma odasına püskürtülen yakıtın uygun bir tutuşma gecikmesinden sonra kendi kendine tutuşması istenir. Tutuşma gecikmesi dizel vuruntusunun oluşmasını ve yanma verimliliğini etkileyen en önemli faktördür. Bu nedenle setan sayısı uygun değerde olmalıdır. Genel olarak biyodizelin setan sayısı motorinden daha yüksektir. Bu özellik yüksek viskozite ve düşük ısıl verimden kaynaklanan düşük yanma verimini kısmen telafi etmektedir [4].
- Setan sayısı: Yanma gecikmesi için bir ölçüdür. Setanın yüksek olması yakıtın enjeksiyonu ile yanmaya başlaması arasındaki zamanın kısa olduğunu gösterir ve bu durum dizel motorlar için arzu edilen bir özelliktir. Biyodizelin setan sayısı yağın kaynağına bağlıdır. Setan sayısı zincir uzunluğu arttıkça, çift bağ sayısı azaldıkça, çift bağlar ve karbonil grubu zincirin merkezine yaklaştıkça artar.
- Parlama noktası: Yakıt buharının yakıt üzerindeki hava ile yanıcı bir karışım meydana getirmesi için yakıtın ulaşması gereken sıcaklığın ölçüsüdür. Biyodizelin parlama noktası 90 °C'ın üzerindedir. Biyodizelin içerisinde metanol bulunması halinde daha düşük parlama noktaları gözlemlenebilir.
- Destilasyon sıcaklığı: Hayvansal ve bitkisel yağ esterleri nispeten benzer yapıları bileşikler oldukları için petrol kaynaklı dizel yakıtına göre daha dar bir kaynama aralığına sahiptir ve bu aralık 325–350 °C arasındadır. Bu sıcaklık petrol kaynaklı dizel yakıt için tespit edilen aralığın üst sınırına yakındır.

- Yoğunluk: Petrol kaynaklı dizel yakıtın yoğunluğu genel olarak 0,85 civarındadır. Biyodizel için yoğunluk değeri 0,86–0,90 arasında değişir ve genel olarak bu değer 0,88 civarındadır.
- Düşük sıcaklıkta akış özellikleri: Yakıtların kış şartları için en temel akış özellikleri bulutlanma ve akma noktasıdır. Bulutlanma noktası yakıtın puslanmaya başladığı ve mumsu bir hal aldığı sıcaklıktır. Akma noktası ise yakıtın jelleşme noktasının ölçüsüdür. Akma noktası, donmuş yakıtın ilk pompalanabildiği veya akışkan özelliği gösterdiği sıcaklıktır. Akma noktası bulutlanma noktasından daima daha düşüktür. Bulutlanma noktası genellikle akış iyileştiriciler olarak tanımlanan katkılardan etkilenmez. Akış özelliklerini iyileştirici katkılar yakıtta düşük sıcaklıklarda meydana gelen mumsu kristal yapıların küçülmesini sağlar veya oluşmasını engeller. Akma noktası katkıları yakıtın düşük sıcaklıkta jelleşmesini önler. Bütün biyodizel yakıtların bulutlanma ve akma noktaları geleneksel dizel yakıtı göre 20–25°C daha yüksektir. Bu değerler kış mevsimi sıcaklıkları için oldukça yüksektir. Organik moleküllerin donma sıcaklıkları moleküllerin kimyasal yapısıyla çok yakından ilgilidir. Biyodizelin donma noktasını belirleyen yapısal özellikleri; yapısından bulunan hidrokarbon zincirindeki dallanmalar, zincirin uzunluğu ve doymamışlık derecesidir.
- İyot numarası: Yakıttaki doymamışlığın ölçüsüdür. Soya ve kolza metil esterleri yaklaşık olarak 133 ve 97 iyot değerine sahiptir. İyot sayısının çok yüksek olması yanma sonrasında aşırı karbon tortusu bırakabileceğinden tercih edilmez. Öte yandan doymamışlığın hidrojenlemeyle giderilmesi soğukta akış özelliklerinin kötüleşmesine sebep olur. Bu nedenle araştırmacılar doymamış bağları hidrojenleme yapmaksızın kararlı kılacak katkılar üzerinde çalışmaktadır.

Çizelge 2.9. Çeşitli bitkisel yağ metil esterlerinin yakıt özellikleri [9]

Bitkisel yağ metil Esteri	Kinematik viskozite 40°C mm <sup>2</sup> /s	Setan sayısı (°C)	Isıl değeri (MJ/kg)	Bulutlanma noktası (°C)	Akma noktası (°C)	Parlama noktası (°C)	Yoğunluk (kg/l) 15°C
Yerfıstığı	4,9	54	33,6	5	-	176	0,883
Soya	4,5	45	33,5	1	-7	178	0,885
Hurma	5,7	62	33,5	13	-	164	0,880
Ayçiçek	4,6	49	33,5	1	-	183	0,860
Don yağı	-	-	-	12	9	96	-
TSE 14214	3,5-5	>51	-	-	-	>120	0,86-0,9

### Biyodizelin standartları

Kalite güvencesi açısından, piyasalara yeni girecek ve dizel motorlarda kullanılacak olan bir yakıt çok dikkatli bir şekilde ve belli kriterlere uygun olarak açıkça belirtilmelidir.

Başlangıçta biyodizel için belli bir norm olmaması ve üretimin şimdiki tekniklere göre ilkel sayılabilecek şekilde yapılması sonucunda kaliteli olmayan biyodizel üretilmiştir. Bu da biyodizelin kötü bir yakıt olarak tanınmasına sebep olmuştur.

Biyodizel hakkında ilk standart, Avusturya tarafından kolza yağı kökenli biyodizel için çıkarılmış olan ONC 1190 standardıdır. Bunu atık yağları, saf trigliseridleri, hayvansal ve bitkisel kökenli yağları kapsayan ve daha geniş bir kalite güvencesi oluşturan, Avusturya yağ-asit-metil esterleri standardı ONC 1191 takip etmiştir. Çeşitli ülkeler de biyodizel için standartlar oluşturmuşlardır. A.B.D.' de soya bitkisinden elde edilen biyodizel için ASTM (American Society for Testing and Materials)'nin normları mevcuttur. Son olarak 2002 yılında ASTM ve AB (Avrupa Birliği) standartları oluşturulmuştur.

Biyodizel saf ve dizel-biyodizel karışımları şeklinde yakıt olarak kullanılmaktadır.

B5 : % 5 Biyodizel + % 95 Motorin

B20 : % 20 Biyodizel + % 80 Motorin

B50 : % 50 Biyodizel + % 50 Motorin

B100 : % 100 Biyodizel

### **2.3. Güneş enerjisi ve güneş pilleri**

#### **2.3.1. Güneş enerjisi**

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile açığa çıkan ışıma enerjisidir ve güneşteki hidrojen gazının helyuma dönüşmesi şeklindeki füzyon sürecinden kaynaklanır. Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti, aşağı yukarı sabit ve  $1370 \text{ W/m}^2$  değerindedir, ancak yeryüzünde  $0-100 \text{ W/m}^2$  değerleri arasında değişim gösterir. Bu enerjinin dünyaya gelen küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden kat kat fazladır. Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki çalışmalar özellikle 1970'lerden sonra hız kazanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşme göstermiş, çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir.

Güneşe göre dik açı oluşturmasından dolayı Türkiye'nin de içinde bulunduğu, ekvatora yakın coğrafyaları kapsayan güneş kuşağında, güneş enerjisinden faydalanma daha verimli olabilmektedir. Güneş yılın çoğu zamanında olağanüstü boyutlarda enerji üretmektedir. Örnek vermek gerekirse güneş saniyede  $1 \times 10^{20}$  kilovatsaatlik enerji sağlar ve bir kilovatsaatlik elektrik enerjisinin 1000 Watt'lık bir lambayı bir saat boyunca çalıştırabildiği düşünüldüğünde bu enerjinin büyüklüğü daha iyi anlaşılır. Güneş ışınması sıfır maliyetle dünyada kullanılan enerjinin binlerce kat fazlası enerji sağlar. Bu yüksek enerjiye rağmen bu günkü teknolojimiz ile güneş enerjisinden elektrik üretiminde % 12-% 19 arası verim sağlayan güneş pilleri geliştirilebilmiştir.

Sürdürülebilir enerji kaynaklarının verimini genelde enerji sağlanan kaynak belirler.

Rüzgar çevrim santrallerinde rüzgar gücünün verimi etkilemesi gibi. Güneş enerjisinde bu durum daha farklıdır. Diğer sürdürülebilir enerji kaynaklarına kıyasla güneş enerjisinin verimini belirleyen birçok harici etken vardır. Bu etkenlerin bir kısmını doğal koşullar oluşturur. Doğal koşullardan ilk akla geleni, güneşin mevsimsel durumudur. Bunun yanı sıra havanın bulutlu, yağışlı ya da çok sıcak olması da verimi olumsuz yönde etkiler. Gün içerisinde belirli bir alana düşen güneş enerjisi miktarı, bölgenin yeryüzü üzerindeki enlem değeri, yerel iklim koşulları, yılın hangi mevsiminde bulunduğu ve yerleştirilen güneş panelinin güneşle olan açısı gibi birçok faktöre bağlıdır. Örneğin yatay bir yüzeye düşen yıllık ortalama ısıma miktarı Orta Avrupa, Orta Asya ve Kanada'da ortalama 1 000 kWh/m<sup>2</sup>, Akdeniz civarındaki bölgelerde 1 700 kWh/m<sup>2</sup> ve Afrika'nın Ekvatora yakın bölgeleriyle, Doğu Asya ve Avustralya çöllerinde 2 200 kWh/m<sup>2</sup>'a kadar çıkmaktadır. Kısaca, güneş enerjisi uygulamalarında mevsimsel ve coğrafi faktörlerin hepsi önemli rol oynar.

Türkiye güneş kuşağında bulunan bir ülkedir. Bu coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre şanslı durumdadır. Türkiye'de toplanabilecek güneş enerjisi miktarının ortalama yıllık toplam süresi 2 640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışınım şiddeti 1 311 kWh/m<sup>2</sup>-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m<sup>2</sup>) olduğu tespit edilmiştir.

Günümüz teknolojisinde güneş enerjisinden ısı üretimi ve elektrik üretimi olmak üzere iki şekilde faydalanılmaktadır. Güneş enerjisi yenilenebilir kaynaklar içinde kullanımı dünya ülkelerinde en çok yaygınlaşmış kaynaktır. Bunun sebebi, güneşin enerjisini dünya geneline yayması ve enerji dönüşümü için büyük ve karmaşık yapılar inşaa edilmesini gerektirmemesidir. Güneş enerjisinden bireyler kendi imkânları ile faydalanabilme imkânına sahipken, rüzgar ve jeotermal gibi diğer yenilenebilir temiz enerji kaynaklarından faydalanabilmek için daha çok büyük organizasyonların kurabileceği gelişmiş tesislere ihtiyaç duyulmaktadır.

Ülkemizde hem bölgesel güneşlenme oranlarının hem de enerji maliyetlerinin yüksek

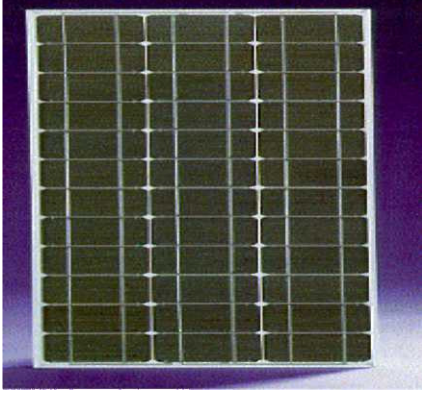
oluşu güneş enerjisinin ilk-yatırım masrafının 2–3 sene gibi çok kısa sürelerde çıkmasını sağlayarak, bu yatırımı çok cazip hale getirmektedir. Kuzey Avrupa gibi güneşlenme oranlarının düşük olduğu coğrafyalarda dahi güneş enerjisi sistemleri tek başına sıcak su ihtiyacının % 50-70'ini karşılayabilmektedir. Güney Avrupa'da ise bu oran % 70–90 arasında olmaktadır [7].

### **2.3.2. Güneş pilleri**

Güneş pilleri (fotovoltaik piller), yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken maddelerdir. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş pillerinin alanları genellikle 100 cm<sup>2</sup> civarında, kalınlıkları ise 0,2–0,4 mm arasındadır. Bu pillerin seri ve paralel bağlanmaları ile yüksek güce sahip Güneş Panelleri elde edilmektedir.

Güneş pilleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar, yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Pilin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Güneş enerjisi, güneş pilinin yapısına bağlı olarak % 5 ile % 20 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir.

Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş pili birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir, bu yapıya güneş pili modülü ya da fotovoltaik modül adı verilir. Güç talebine bağlı olarak modüller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak bir kaç Watt'tan, Mega Watt'lara kadar sistem oluşturulur.



Resim 2.2. Güneş pili modülü [10]

### Güneş pillerinin tarihsel gelişimi

Güneş pillerin geçmişine bakacak olursak, 1839 yılına kadar vardığını görürüz. İlk olarak Becquerel tarafından bir elektrolit içine daldırılmış elektrotlara ışık düştüğünde bir foto voltaj olduğu anlaşılmıştır. Benzer bir etkide selenyum materyal üzerinde 1877’de Adams ve Day tarafından rapor edilmiştir. Buna kısaca değinecek olursak, Selenyum ve bakır oksit led, selenyum güneş pillerinin geliştirilmesinde kullanılıyordu. Bu değer daha sonra pozometre (ışık ölçüm cihazı) içerisinde kullanılmıştır. 1914 yılında Selenyum güneş pillerinde % 1 verimle direkt olarak güneş ışığından taşınım yolu ile doğru akım elde edilmiştir.

Güneş pillerinde, modern yarı iletken devir 1954 yılında başlamıştır. Chaplin (1954) raporuna göre % 6 taşınım verimli bir tek kristal silikon güneş piline ulaşmıştır. Reynards (1954) bakır sülfür/kadmiyum sülfür hücrelerde % 6 verime ulaşmıştır. 1950’lerde başlayan uzay çalışmaları neticesinde, 1958 yılında Amerika Birleşik Devletleri silikon fotoelektrik pil ile çalışan “Vanguard” isimli uyduyu uzaya attılar. Daha sonra 1969 yılında ilk Fransız ve Avrupa uydularının fotovoltaiik piller ile çalışabilmesi sağlandı. Bu gelişmeler sonucunda fotovoltaiik piller enerji kaynağı olarak uzay çalışmaları için vazgeçilmez bir yer kazanmıştır.

1970'li yılların politik krizler Ortadoğu üzerindeki benzin ambargoları sonucu oluşan enerji sorunları neticesi, fosil kökenli enerji kaynakları yerine alternatif kaynakların kullanılması gündeme geldi. Hız kazanan araştırmalar sonucu yeryüzü kullanımı amaçlı, fotovoltaiklerin geliştirilmesi üzerine yoğun programlar ve çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sadece fotovoltaik verimlerin geliştirilmesi için değil, enerji maliyetinin düşürülmesi üzerine de yoğunlaşmıştır.

1980'lerin ortalarında laboratuvarlarda geliştirilen güneş pili verimlerinde iyileşmeler olmuştur. Bu da, aktif tabakalar üzerine düşen ışığın tutulması ve taşınmasının artırılması bunun yanında gelen ışık şiddetinin optiklerle artırılması ile sağlanır. Bu verim iyileştirmeleri maliyetin de düşmesini beraberinde getirmiştir. 1986 yılında 30 yıl ömürlü fotovoltaik tesislerin hedef enerji tutarı 0,06 \$/kwh olmuştur. Avrupa'da tahmini olarak, güç tesisleri 10 MW'dan daha büyük kapasiteli ve 30 yıldan daha uzun ömürlü olarak yapılabilmektedir. 1989 yılından itibaren teknolojisi ve elektronik teknolojideki gelişimlerle fotovoltaiklerin Watt başına birim maliyetleri 500 \$'lardan, 30 ile 10 \$ 'a düşmüştür.

Güneş enerjisi kullanımı için çevresel ve iklimsel etkiye önemli belirleyicilerdir. Bu da büyük bir sınırlayıcılık getirmektedir. Yakın gelecekte enerji tüketiminin en çok % 5-8 fotovoltaik teknolojisi ile sağlanacağı tahmin edilmektedir.

Bir fotovoltaik sistemin tercih edilebilmesi için her şeyden önce maliyetinin düşürülmesi gerekmektedir. Ayrıca kullanılan teknolojilerin iyileştirilip, teknoloji maliyetlerinin düşürülmesi pil verimlerinin artması ve pazar payının da artması gerekmektedir [11].

### Güneş pillerinin yapısı ve çalışması

Fotovoltaik etki silisyum gibi yarıiletken maddelerin içinde oluşur. Fotopil denen fotovoltaik hücreler, bir P-N denklemi, yani iki katmanlı bir yarıiletken bölge içerir. Bunların birindeki ("delik" diye de adlandırılan ve + elektrik yüküyle sonuçlanan)

elektron azlığı ve diğerindeki (- yük sağlayan) fazlalığı, bu bölgenin her iki tarafında bir elektrik alanının oluşmasına yol açar. Yarıiletken tarafından emilen ışık akısının fotonları, yarıiletken parçanın iki tarafında ayrı ayrı toplanan elektron-delik çiftlerini oluşturur. Bunun sonucunda, eklemnin aydınlanan yüzüyle ve buraya düşen ışığın yoğunluğuyla orantılı bir elektrik akımı meydana gelir. Açık, güneşli bir havada 1 desimetre çapında bir ftopil, yaklaşık olarak 1 watt üretir. Verimi (çıkış gücünün gelen ışık gücüne oranı) kullanılan malzemeye göre değişir.

Fotopiller genellikle çok kristalli ya da amorf (biçimsiz) silisyumdan yapılır. Çok kristalli silisyum yüksek güvenilirliğinden ve yüksek veriminden dolayı (% 10–14) ilgi çekmektedir. Buna karşılık amorf silisyumun verimi daha düşüktür (% 7). Bununla birlikte, daha ince katmanlar halinde kullanılabilirdiğinden daha az masraflıdır. Fotopiller, 1950'lerde uyduların elektrik elde etmesi için geliştirilmişti. Günümüzdeyse elektrik elde etmek için bir alternatif enerji kaynağı olarak düşünülmektedir.

Günümüz elektronik ürünlerinde kullanılan transistörler, doğrultucu diyotlar gibi güneş pilleri de, yarıiletken maddelerden yapılmaktadır. Yarı iletken özellik gösteren birçok madde arasında güneş pili yapmak için en elverişli olanlar, silisyum, galyum arsenit, kadmiyum tellür gibi maddelerdir.

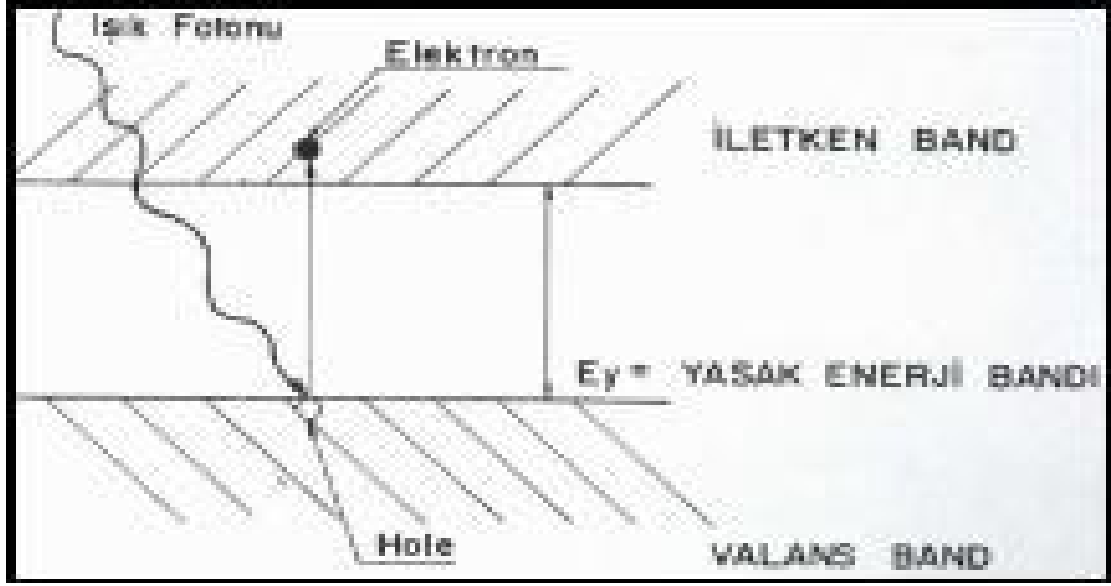
Yarıiletken maddelerin güneş pili olarak kullanılabilmeleri için N ya da P tipi katkılanmaları gereklidir. Katkılama, saf yarıiletken eriyik içerisine istenilen katkı maddelerinin kontrollü olarak eklenmesiyle yapılır. Elde edilen yarıiletkenin N ya da P tipi olması katkı maddesine bağlıdır. En yaygın güneş pili maddesi olarak kullanılan silisyumdan N tipi silisyum elde etmek için, silisyum eriyiğine periyodik cetvelin 5. grubundan bir element, örneğin fosfor eklenir. Silisyumun dış yörüngesinde 4, fosforun dış yörüngesinde 5 elektron olduğu için, fosforun fazla olan tek elektronu kristal yapıya bir elektron verir. Bu nedenle 5. grup elementlerine “verici” ya da “N tipi” katkı maddesi denir.

P tipi silisyum elde etmek içinse, eriyiğe 3. gruptan bir element (alüminyum, indiyum, bor gibi) eklenir. Bu elementlerin son yörüngesinde 3 elektron olduğu için kristalde bir elektron eksikliği oluşur, bu elektron yokluğuna boşluk ya da delik denir ve pozitif yük taşıdığı varsayılır. Bu tür maddelere de “P tipi” ya da “alıcı” katkı maddeleri denir.

P ya da N tipi ana malzemenin içerisine gerekli katkı maddelerinin katılmasıyla yarıiletken eklemeler oluşturulur. N tipi yarıiletkenlerde elektronlar, P tipi yarıiletkenlerde delikler çoğunluk taşıyıcısıdır. P ve N tipi yarıiletkenler bir araya gelmeden önce, her iki madde de elektriksel bakımdan nötrdür. Yani P tipinde negatif enerji seviyeleri ile delik sayıları eşit, N tipinde pozitif enerji seviyeleri ile elektron sayıları eşittir. PN eklem oluştuğunda, N tipindeki çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar, P tipine doğru akım oluştururlar. Bu olay her iki tarafta da yük dengesi oluşana kadar devam eder. PN tipi maddenin ara yüzeyinde, yani eklem bölgesinde, P bölgesi tarafında negatif, N bölgesi tarafında pozitif yük birikir. Bu eklem bölgesine “geçiş bölgesi” ya da “yükten arındırılmış bölge” denir. Bu bölgede oluşan elektrik alan “yapısal elektrik alan” olarak adlandırılır. Yarıiletken eklemine güneş pili olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaj dönüşümünün sağlanması gerekir. Bu dönüşüm iki aşamada olur, ilk olarak, eklem bölgesine ışık düşürülerek elektron-delik çiftleri oluşturulur, ikinci olarak, bunlar bölgedeki elektrik alan yardımıyla birbirlerinden ayrılır.

Yarıiletkenler, bir yasak enerji aralığı tarafından ayrılan iki enerji bandından oluşur. Bu bandlar valans bandı ve iletkenlik bandı adını almaktadırlar. Bu yasak enerji aralığına eşit veya daha büyük enerjili bir foton, yarıiletken tarafından soğurulduğu zaman, enerjisini valans banddaki bir elektrona vererek, elektronun iletkenlik bandına çıkmasını sağlar. Böylece, elektron-delik çifti oluşur. Bu olay, PN eklem güneş pilinin ara yüzeyinde meydana gelmişse elektron-delik çiftleri buradaki elektrik alan tarafından birbirlerinden ayrılır. Bu şekilde güneş pili, elektronları N bölgesine, delikleri de P bölgesine iten bir pompa gibi çalışır. Birbirlerinden ayrılan elektron-delik çiftleri, güneş pilinin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluştururlar. Bu süreç yeniden bir fotonun pil yüzeyine çarpmasıyla aynı şekilde devam eder.

Yarıiletkenin iç kısımlarında da, gelen fotonlar tarafından elektron-delik çiftleri oluşturulur. Fakat gerekli elektrik alan olmadığı için tekrar birleşerek kaybolmaktadırlar.



Şekil 2.10. Fotovoltaik pillerin yapısı [39]

### Güneş pillerinin yapımında kullanılan malzemeler

Güneş pilleri pek çok farklı maddeden yararlanarak üretilebilir. Günümüzde en çok kullanılan maddeler şunlardır:

#### *Kristal Silisyum:*

Önce büyütülüp daha sonra 200 mikron kalınlıkta ince tabakalar halinde dilimlenen Tek kristal Silisyum bloklardan üretilen güneş pillerinde laboratuvar şartlarında % 24, ticari modüllerde ise % 15'in üzerinde verim elde edilmektedir. Dökme silisyum bloklardan dilimlenerek elde edilen Çok kristal Silisyum güneş pilleri ise daha ucuza üretilmekte, ancak verim de daha düşük olmaktadır. Verim, laboratuvar şartlarında % 18, ticari modüllerde ise % 14 civarındadır.

*Galyum Arsenit (GaAs):*

Bu malzemeyle laboratuvar şartlarında % 25 ve % 28 (optik yoğunlaştırıcılı) verim elde edilmektedir. Diğer yarıiletkenlerle birlikte oluşturulan çok eklemlili GaAs pillerde % 30 verim elde edilmiştir. GaAs güneş pilleri uzay uygulamalarında ve optik yoğunlaştırıcılı sistemlerde kullanılmaktadır.

*Amorf Silisyum:*

Kristal yapı özelliği göstermeyen bu pillerden elde edilen verim % 10 dolayında, ticari modüllerde ise % 5–7 mertebesindedir. Günümüzde daha çok küçük elektronik cihazların güç kaynağı olarak kullanılan amorf silisyum güneş pilinin bir başka önemli uygulama sahasının, binalara entegre yarısaydam cam yüzeyler olarak, bina dış koruyucusu ve enerji üretici olarak kullanılabileceği tahmin edilmektedir.

*Kadmiyum Tellürid (CdTe):*

Çok kristal yapıda bir malzeme olan CdTe ile güneş pili maliyetinin çok aşağılara çekileceği tahmin edilmektedir. Laboratuvar tipi küçük hücrelerde % 16, ticari tip modüllerde ise % 7 civarında verim elde edilmektedir.

*Bakır İndiyum Diselenid (CuInSe<sub>2</sub>):*

Bu çok kristal pilde laboratuvar şartlarında % 17,7 ve enerji üretimi amaçlı geliştirilmiş olan prototip bir modülde ise % 10,2 verim elde edilmiştir.

### *Optik Yoğunlaştırıcı Hücreler:*

Gelen ışığı 10–500 kat oranlarda yoğunlaştıran mercekli veya yansıtıcı araçlarla modül verimi % 17'nin, pil verimi ise % 30'un üzerine çıkılabilmektedir. Yoğunlaştırıcılar basit ve ucuz plastik malzemeden yapılmaktadır [11].

### **2.4. Ara Değerlendirme**

Yukarıda yapılan incelemeler ışığında alternatif enerji kaynakları hakkında kısa bir değerlendirme yapmak gerekirse;

Hidrojen dünyada en çok bulunan elementlerden birisidir. Su, hidrojen ve oksijenden oluşur ve akarsu ve denizlerde çok miktarda bulunmaktadır. Bunun yanında yakıtlar içerisinde çevresel açıdan en temizidir. Hidrojenin hızla dağılma özelliğinden dolayı herhangi bir tehlike anında hızla yukarı doğru uçtuğundan, diğer gazlar gibi tehlikeli değildir. Diğer gaz ve yakıtlar ise yanarken çevrelerinde tahribata yol açarlar [18].

Hidrojen renksiz, kokusuz, gaz, hava ya da oksijen içinde kolayca parlayan, patlayarak yanan ve su oluşturan bir elementtir. Çok kolay tepkimeye girmekte, bu nedenle başka elementlerle birleşmiş halde bulunmaktadır.

Gaz halindeki hidrojen aynı hacimdeki havadan yaklaşık 15 kez daha hafiftir. Motorlarda kullanılmakta olan diğer alternatif yakıtlarla karşılaştırıldığında sıvı hidrojenin, sıvı hidrokarbonlara oranla yaklaşık 10 kere daha hafif, gaz halindeki hidrojenin ise metan gazından 10 kere daha hafif olduğu görülmektedir [1].

Hidrojenin yanması sonucu elde edilen alev hızı oldukça yüksektir. Hidrojenin difüzyon katsayısı da öteki yakıtlardan daha fazladır. Hidrojen bilinen tüm yakıtlar içerisinde birim kütle başına en yüksek enerji içeriğine sahiptir ve petrol yakıtlarına göre ortalama 1,33 kat daha verimli bir yakıttır. 1 kg hidrojen, 2,1 kg doğal gaz veya 2,8 kg petrolün sahip olduğu enerjiye sahiptir. Yoğunluğu benzinden 3 300 kat azdır.

Benzine göre elde edilen enerji 2,75 kat fazladır. Sudan elektroliz yoluyla üretilebilir. Sonsuz enerji kaynağı vardır [2].

Yakıt pilleri ise yanma olmaksızın, kullanılan yakıtın ve oksitleyicinin sahip olduğu kimyasal enerjiyi değişmeyen elektrot-elektrolit sistemi vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştüren bir elektrokimyasal düzenektir. Çalışmaları pil gibidir, fakat sürekli bir yakıtla beslenmeye ihtiyaçları vardır. Genellikle bu yakıt hidrojenidir.

Yakıt pilleri prensip olarak akümülatör veya pile benzemektedir. Her ikisi de kimyasal enerjiyi doğrudan elektriğe çevirir. Aralarındaki en büyük fark; akümülatörde, kimyasal enerji kullanımından önce depolanmış durumdadır, yakıt hücresinde ise dış kaynaklardan enerji sağlandığı sürece elektrik üretebilir [1].

Bor, yeryüzünde toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan bir elementtir. 150'den fazla mineralin bileşiminde yer almasına rağmen oksijene karşı ilgisi nedeniyle doğada serbest olarak değil, oksijenle bağlanmış bileşikler halinde bulunur. Borun element olarak kullanılışı daha az yaygın olup, yenidir. Oysa borun en çok kullanılan türü olan boraks binlerce yıldan beri bilinmektedir.

Kristal bor, önemli ölçüde hafiftir, serttir, çizilmeye karşı mukavemetlidir ve ısıya karşı dayanıklıdır. Bor yanıcıdır ancak tutuşma sıcaklığı yüksektir. Yanma sonucunda kolaylıkla aktarılacak katı ürün vermesi ve çevreyi kirletecek emisyon açığa çıkarmaması gibi özelliğe sahip olduğundan dolayı katı yakıt hücresi olarak kullanılmaktadır [14].

Günümüzde hidrojen taşıma ortamı olarak büyük bir önem kazanmış olan özellikli bor bileşiklerinden biri sodyum borhidrürdür. Sodyum borhidrür çözeltisinden katalitik olarak elde edilen hidrojen gazı yakıt pilinde kullanılarak enerjiye dönüştürülebilir [6].

Biyokütle, geniş kullanım potansiyeli, ekonomik oluşu, çeşitli sosyal ve çevresel faydaları sebebiyle geleceğin yenilenebilir enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir.

Biyokütle, oksijenle reaksiyona girdiğinde ısı ortaya çıkar. Bu nedenle "biyoyakıt" olarak da adlandırılabilir. Doğal ekolojide, tüm biyokütle, çürüme ve metabolizma sonucu normal çevre sıcaklıklarında ısı açığa çıkararak temel elementlere bozunur. Biyokütle sonucu ortaya çıkan enerji bu sebeple yenilenebilir bir enerji kaynağıdır ve çevreyi herhangi bir yan ürünle kirletmez. Biyoyakıtlar bu sebeple "Yeşil Enerji" olarak tanımlanabilir.

Dünya üzerinde, biyokütle çok geniş bir alana yayılmıştır ve çok seyrekler. Genellikle yığın yoğunluğu da fosil kökenli yakıtlarinkinden 3–4 kat daha düşüktür. Bu yüzden biyokütle tesisleri fosil yakıt tesislerinkinden daha büyüktür ve biyokütlenin taşınması ve işlem yapılması fosil yakıtlara göre daha zor ve masraflıdır. Biyokütlenin ekonomik olarak etkin bir şekilde kullanılması açısından, tüm yenilenebilir enerji süreçlerinde olduğu gibi, doğada enerji döngüsünün kendiliğinden gerçekleştiği yerleri bulup, enerji üretim tesislerini bu bölgelerle ilişkilendirmek gereklidir.

Biyoyakıtlar arasında biyokütle kaynaklı esterleşme ürünü olan biyodizel, günümüzde yaygın olarak üretilmeye ve kullanılmaya başlanmıştır. Biyodizel; biyomotorin, dizel-bi ve yeşil dizel adları ile bilinmektedir. Enerji üretiminde kullanılacak biyokütle kaynaklarını; bitkisel kaynaklar, hayvansal atıklar, şehir ve endüstri atıkları şeklinde sınıflandırabiliriz [4].

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile açığa çıkan ışıma enerjisidir ve güneşteki hidrojen gazının helyuma dönüşmesi şeklindeki füzyon sürecinden kaynaklanır. Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti, aşağı yukarı sabit ve  $1370 \text{ W/m}^2$  değerindedir, ancak yeryüzünde  $0-1100 \text{ W/m}^2$  değerleri arasında değişim gösterir. Bu enerjinin dünyaya gelen küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden kat kat fazladır.

Diğer sürdürülebilir enerji kaynaklarına kıyasla güneş enerjisinin verimini belirleyen birçok harici etken vardır. Bu etkenlerin bir kısmını doğal koşullar oluşturur. Doğal koşullardan ilk akla geleni güneşin mevsimsel durumudur. Bunun yanı sıra havanın bulutlu, yağışlı ya da çok sıcak olması da verimi olumsuz yönde etkiler. Gün içerisinde belirli bir alana düşen güneş enerjisi miktarı bölgenin yeryüzü üzerindeki enlem değeri, yerel iklim koşulları, yılın hangi mevsiminde bulunduğu ve yerleştirilen güneş panelinin güneşle olan açısı gibi birçok faktöre bağlıdır.

Güneş pilleri (fotovoltaik piller), yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken maddelerdir. Bu pillerin seri ve paralel bağlanmaları ile yüksek güce sahip Güneş Panelleri elde edilmektedir.

Güneş pilleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar, yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Pilin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Güneş enerjisi, güneş pilinin yapısına bağlı olarak % 5 ile % 20 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir [7].

Aşağıdaki çizelgede, alternatif yakıtlar hava kirliliği ve güvenlik etkileri bakımından karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 2.10. Hava kirliliği ve güvenlik etkileri bakımından karşılaştırılması [2]

Yakıt	Hava kirliliğine etkilerdeki değişim	Çevresel ve Güvenlik Etkileri
Doğalgaz	Toplamda önemli düzelme fakat NO <sub>x</sub> de az etki	Doğalgaz için yüksek sıkıştırma gerekli ve doğal kaynakların korunumu
LPG	Toplamda önemli düzelme fakat NO <sub>x</sub> de az etki	Güvenlikli, ve en düşük sıcaklıkta depolama imkanı
Hidrojen	Çok az miktarda NO <sub>x</sub> verir.	Eğer sudan elde edilirse doğal kaynak korunumu vardır. Ancak sıkıştırma veya soğutma gerekli
Metanol	Orta miktarda azalma	Suda çözünümü zehirleyici olabilir.
Etanol	Orta miktarda azalma	Doğal kaynak korunumu vardır.
Bitkisel yağ	CO çıkışı fazladır.	Doğal kaynak korunumu vardır.

Çizelgeyi incelediğimizde; hava kirliliği bakımından hidrojenin diğer alternatif yakıtlara göre daha avantajlı olduğunu, çevresel ve güvenlik etkileri bakımından, depolanma problemi çözüldüğü takdirde, hidrojenin; aksi halde, etanol ve bitkisel yağın doğal korunumu gerçekleştirmekte bir adım öne çıktığı görülmektedir. LPG'nin ise depolama avantajı sebebiyle güvenlik açısından dikkate alınması gereken bir alternatif yakıt olduğu anlaşılmaktadır [2].

### **3. ULAŞTIRMADA ALTERNATİF YAKITLARIN KULLANIMI**

#### **3.1. Ulaştırımda Hidrojen Enerji Sistemi, Yakıt Pili ve Bor**

##### **3.1.1. Ulaştırımda hidrojen enerji sisteminin uygulanması**

###### Hidrojen enerji sisteminin motorlarda yakıt olarak kullanılması

İçten yanmalı motorlarda hidrojenin kullanımı konusundaki araştırmalar, 1900'li yıllarda başlatılmıştır. Enerji kaynaklarının azalması sebebi ile ortaya çıkan enerji krizleri ve çevre sorunlarının önem kazanması, hidrojen üzerinde yapılan çalışmaları arttırmıştır.

Günümüzde yakıt seçiminde ölçüt olarak alınan ulaştırma yakıtı olma özelliği, çok yönlü kullanıma uygunluk, kullanım verimi, çevresel uygunluk, emniyet ve maliyet açısından yapılan değerlendirmeler hidrojen lehine sonuç vermektedir. 1970'lerde hidrojenin alternatif motor yakıtı olarak kullanılması yeniden gündeme gelmiştir. Egzoz emisyon değerlerinin düşük olması, petrole olan bağımlılığı azaltması hidrojenin uzun yıllar önceden tespit edilmiş olan avantajlarıdır.

Hidrojenin kendi kendine tutuşma sıcaklığı yüksek olmasına rağmen, hidrojen-hava karışımlarının tutuşturulabilmesi için gerekli enerji miktarı düşüktür. Tutuşma aralığının geniş olması, hidrojenin daha geniş karışım aralığında düzgün yanmasını sağlar ve yanma sonucunda daha az kirlenici oluşur. Benzin motorları ise stokiyometrik orana daha yakın oranlarda ya da zengin karışım oranlarında çalıştırılmak zorunda olduklarından egzoz gazlarında önemli miktarda azot oksit (NO<sub>x</sub>), karbonmonoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbon (HC)'lar oluşur. Hidrojen motorları maksimum yanma sıcaklığını azaltacak biçimde fakir karışım<sup>4</sup> ile çalıştırılabilirler. Böylece daha az NO<sub>x</sub> oluşurken, HC ve CO emisyonları oluşmaz.

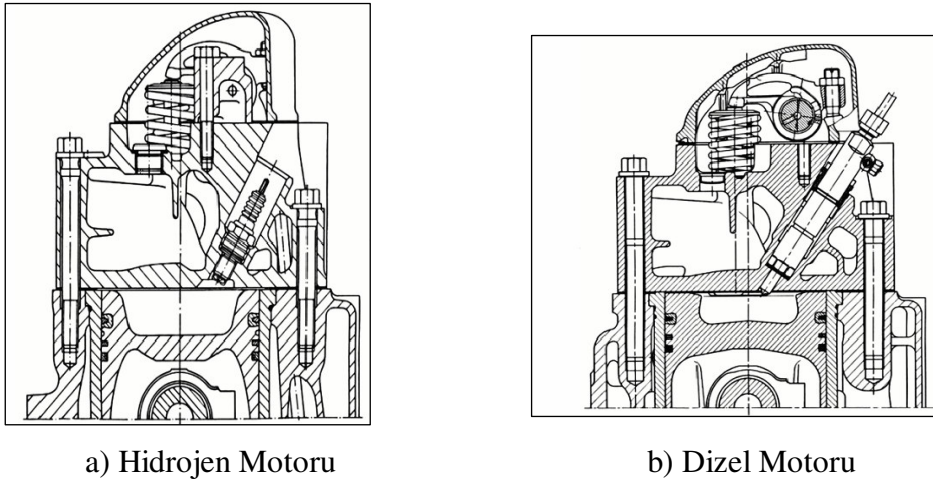
---

<sup>4</sup> Fakir Karışım: Benzinli araçlarda, silindir içinde bulunan hava yakıt oranının 14,7'den büyük olması durumudur.

Alev hızının yüksek olması ise Otto motorlarında ideale yakın bir yanmanın oluşmasını sağlayarak ısı verimi artırır. Geniş tutuşma aralığı sayesinde, gaz keleşine gerek kalmadığından, karışımın silindirlere kısılmadan gönderilmesi sonucu pompalama kayıpları azaltılmış olur.

Motorda hidrojen kullanılması halinde, benzine oranla motora hacimsel olarak daha fazla hidrojen gönderilirken, yakıt ve karışım kütlesi daha az olmaktadır. Bu durum, yanmada daha az basınç artışı olacağı ve aynı enerjiyi üretmek için daha fazla hidrojen gerekeceği anlamına gelmektedir.

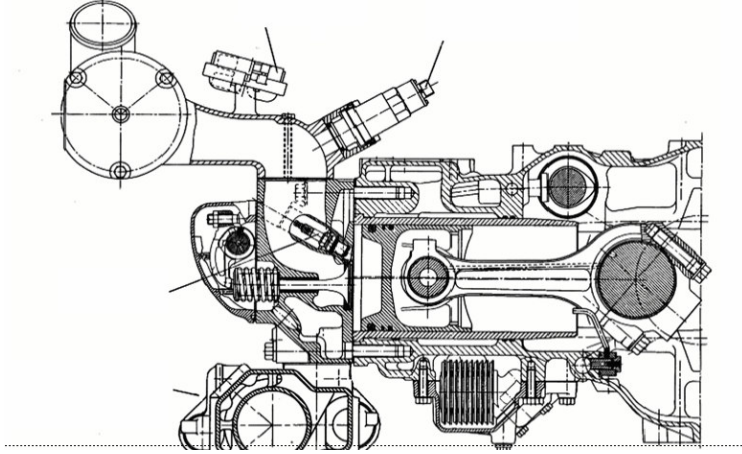
Bu değerlendirmeye göre, hidrojen yakıtın çalışabileceği yegâne motor, havanın silindire normalden daha yüksek basınçla pompalanarak verim ve gücün artırılacağı türbo şarjlı motor gibi gözükmektedir. Bu temelden hareketle mevcut dizel motorlar modifiye edilerek hidrojenin yanacağı uygun bir motor oluşturulmaya çalışılmıştır. Şekil 3.1’de motorların karşılaştırılması ve hidrojen motorun yapısı görülmektedir.



Şekil 3.1. Hidrojen ve dizel motorun yan kesit görüntüsü [15]

Hidrojen motoru da tıpkı Otto-Motor prensibine göre dıştan bir ateşleyici ile çalışır. Dizel motorlarda yakıt hava karışımı belirli bir basınca ulaşıncaya ısı etkisiyle ateşlenir. Hidrojenin ateşlenme sıcaklığı dizele göre daha yüksek olup  $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bu nedenle

dizel motorda ayrıca bir ateşlemeye ihtiyaç vardır. Bütün sıvı yakıt sistemlerinde geçerli olan yanmanın dışta oluşan bir karışım ya da içte oluşan bir karışım sistemine göre olması prensibi hidrojen yakıt içinde geçerlidir.



Şekil 3.2. Hidrojen motorunun detay görüntüsü [15]

#### *Dışta karışım sistemi*

Dışta karışımın olduğu sistemde gaz halindeki hidrojen çok düşük bir basınçla emme manifoldu yardımıyla yanma odasına verilir. Yakıt tankında oldukça soğuk olan hidrojen bulursa bile yanma odacığına dış yolu kullanarak gönderildiğinden dış atmosfer koşullarında hemen gaz formuna geçer.

Bu sistemde gazın yanma odacığına girmeden önce emilen hava ile karışması sağlanır. Yanma odacığına giren gaz bir çek valf sistemi ile kapatılır ve içeride bir tutuşturucu kullanarak yanması sağlanır. İçeriye alınan gazın hava ile karışmış olması yanma sıcaklığını daha düşük değerlere çeker ve alev alma riskini azaltır.

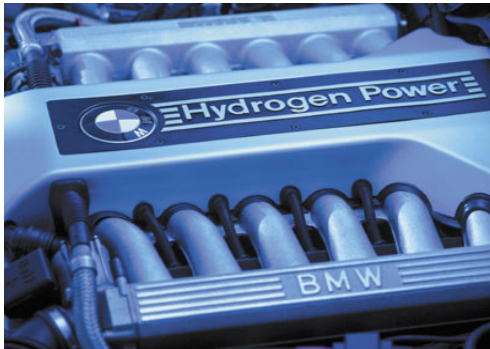
Böylece oluşacak azot oksit miktarı azaltılmış ve ısı kayıpları daha düşük değerlere çekilmiş olur. Yanma sıcaklığında meydana gelen bu düşüş aynı zamanda motorun gücünde de bir düşüğe sebep olur. Motorun gücündeki bu düşüşü telafi etmek için iç

basıncı daha da artırmak gerekir. Bu nedenle benzinli motorlarda azot oksitlerin ortamdan alınması için özel katalizörler kullanılır.

Dışta karışım oluşturan sistemin en büyük avantajı kurulumunu kolaylığı ve hidrojenin sisteme verilmesi için yüksek bir basınca ihtiyaç duyulmamasıdır.

Benzin ve dizel motorlarla karşılaştırıldığında en büyük dezavantajı ise; motor hacmi ile verimi mukayese edildiğinde aynı gücü elde etmek için çok büyük hacimli motor gerektirmesidir.

Hidrojen yanmalı motor üzerinde en ciddi çalışmalarını yürüten BMW firması geliştirdiği motorda, tankta soğuk bir şekilde bulunan hidrojeni, elektriksiz kontrol edilebilen bir supap yardımıyla sisteme vermektedir.



Resim 3.1. BMW tarafından geliştirilen 12 silindir 150 kW gücündeki hidrojen motoru [15]

Supapların açılışı, kapanışı ve geçiş yolundaki tüm sistemler elektrik motoru tarafından düzenlenmektedir.

Şekildeki motor, dizel motor sistemine göre çalışmaktadır. Eğer araç hızlandırılmak istenirse bu kez sıvı yakıt tankından daha fazla yakıt yanma odacığına çekilir. Sürücü gaza basmakla bu mekanizmayı çalıştırır. Motora giden hava miktarı hep sabit kalır. Oluşan bu fakir karışım azot oksit oranı açısından büyük bir avantaj sağlar.

Ayrıca oluşan fakir karışımın parlamaya karşı eğiliminin düşük olması stokiyometrik olarak arta kalan miktarın çok parlayıcı olarak yanmasını önler. Bu avantajı nedeniyle benzinle çalışan partnerine göre düşük olan gücü tolere edilmiş olur. Ancak yinede % 20'lik bir güç kaybı vardır.

### *İçte karışım sistemi*

Bu teknolojiye gaz halindeki hidrojen 80 ile 120 bar arasındaki yüksek bir basınçta doğrudan yanma odasına gönderilir.

Yanma odasında havanın oksijeni ile karıştırılıp, dış kaynaklı bir tutuşturucu ile tutuşturulur. Dizel yakıt sistemine göre büyük farklılıklar ortaya çıkar. Yakıt gaz formunda olduğundan yakıt ile havanın yoğunluğu arasında büyük fark meydana gelir, bu ise hidrojenin alevlenme hızını artırır.

Yakıtın kısa sürede püskürtülmesi için yüksek bir basınca ihtiyacı vardır. Hidrojen ve havadan meydana gelen karışımın stokiyometrik oranı 1 ve daha üstündedir. Her ne kadar meydana gelen hacimsel güç verimi dizel motorlara göre yüksek olsa bile oldukça pahalı bir teknik kurulumu vardır [15].

### Hidrojen giriş sistemleri

İçten yanmalı motorlarda hidrojen kullanımında, hidrojenin motora girişi 2 temel şekilde gerçekleşebilir. Bunlar karıştırma yani karbürasyon yöntemi ve püskürtme yöntemidir.

### *Karıştırma (Karbürasyon)*

Benzin motorlarında kullanılan karbüratörler hidrojen için uygun değildir. Hidrojen motorlarında, gaz yakıt karbüratörleri ya olduğu gibi ya da bazı değişiklikler

yapılarak oldukça sık uygulanır. Bu karbüratörlerde besleme sisteminden gelen hidrojenin basıncı regülatörlerde düşürülür. Karıştırıcı girişinde hidrojen basıncı 304,8 mm su sütunu civarında seçilir. Sabit seviye kabı gibi elemanlar karışıma su ilave etmek için kullanılır. Su ilavesiyle vuruntu, geri tutuşma ve yüksek NO<sub>x</sub> emisyonu gibi durumlar önlenmiş olur. İlave edilen suyun miktarı çok değişik değerlerde olabilir. Mesela Chevrolet'in V-8 bir motorunda yapılan çalışmada su-hidrojen oranı ağırlık olarak 2/1 alınmıştır. Bu değer 5'ten büyük olunca motorun verim ve gücünün düştüğü görülmüştür.

California Üniversitesi'nde (UCLA) geliştirilen bir AMC Jeep hidrojen motorunda hidrojen kriyojenik sıvı<sup>5</sup> olarak depolanmış ve karbüratörden önce bir regülatörden geçirilmiştir. Depodan 0,345–2,41 bar arası basınçta gelen hidrojen, regülatörü 304,8 mm su sütunu basınçta terk eder. Sonra hava ile karışıp karbüratörü besler. Buradaki karbüratör karışıma su püskürtmek için kullanılır. Depodan pompa ile emilerek karbüratöre gelen su hava ile ve hidrojenle beraber paslanmaz çelikten bir süzgeçten geçerek emme manifolduna gelir. Süzgeç, nispeten büyük su zerrelerini tutarak akışın üniform olmasını sağlar.

### *Püskürtme*

Hidrojen motorlarında yakıtın püskürtülmesi 2 şekilde gerçekleştirilir;

1. Emme sübabından önce emme manifolduna veya emme manifolduna düşük basınçta püskürtme,
2. Yüksek basınçla silindire direk püskürtme.

### *Emme manifolduna püskürtme*

Bu yöntemde hidrojen emme manifolduna veya emme kanalına püskürtülerek hava ile karışıp motora girmesi sağlanmaktadır. Böyle bir sistemdeki ana özellikler;

---

<sup>5</sup> Kriyojenik Sıvı: Oda şartlarında gaz olan, düşük sıcaklık ve yüksek basınç altında sıvılaştırılabilir madde.

sistemin emme strokunun başlangıcından belirli bir süre önce yakıt sevkine elverişli olması, yakıt ölçümünün hava akışı veya basınç şartlarından bağımsız olması ve emme manifoldunun yanabilir yakıt hava karışımı ihtiva etmemesidir.

### Silindire direk püskürtme

Hidrojenin özel bir püskürtme enjektörüyle basınçlı olarak silindire direk püskürtülmesidir. Silindire direk hidrojen püskürtülmesinde iki önemli ihtiyaç vardır. Bunlar; yüksek basınçlı hidrojen ile daha fazla zamanlama ve akış kontrol teçhizatıdır. Direk püskürtmenin en önemli avantajı geri tutuşmayı engellemesidir. Ayrıca erken tutuşmanın kontrol edilmesine imkan verir ve normal emmeli sistemlere oranla motorlardan daha yüksek güç elde edilmesini sağlar. Emisyonlara olan katkısı ise NOx emisyonlarını azaltmaya yöneliktir.

Püskürtmenin yapılmasında en önemli rolü şüphesiz enjektör oynamaktadır. Manifold veya direk püskürtme sisteminin kesin dizayn limitleri, enjektörün akış kapasitesine bağlıdır.

Uygulamada enjektör performansına etki eden iki değer; sabit akış katsayısı ve toplam hareket süresidir. Toplam hareket süresine Tact denir. Tact, enjektörün toplam açılış ve kapanış zamanının toplamı olarak ifade edilir.

Hidrojen yakıtının yanması sırasındaki alev hızının yüksek olmasından dolayı, bundan kaynaklanabilecek birçok problemin üstesinden gelebilmek için hava ile yakıt yanma meydana gelinceye dek ayrı tutulur.

Hidrojen yakıtının tutuşturulabilmesi için gerekli olan enerji miktarının çok düşük olmasından dolayı, ön ateşleme veya alev tepmesi gibi motorda istenmeyen durumlar meydana gelebilir. Eğer yakıt hava karışımı emme sübabı kapanmadan alevlenirse, ön ateşleme meydana gelmiş olur. Hidrojenin birim hacim başına sahip olduğu enerji

miktarı düşük olduğundan dolayı, motorda elde edilebilecek gücün düşmesini önlemek amacıyla motorun sahip olduğu sıkıştırma oranı yükseltilebilir.

Hidrojen ve hava karışımı yanma odası dışında meydana geldiğinde, hidrojen yakıtının hafifliğinden dolayı homojen bir karışım meydana gelmez ve bunun sonucunda benzine kıyasla motorda % 20–30 civarında bir güç düşüşü gözlenir.

Yapılan çalışmalar sonucunda yakıt hava karışımının yanma odası dışında gerçekleştiği koşullarda, motordan elde edilen maksimum verimin düştüğü tespit edilmiştir.

Yakıt ile havanın yanma odasında karıştırılması durumunda ise, hidrojenin basınç altında silindirlere püskürtülmesiyle yanma odası içinde hava ile homojen bir şekilde karışacağından dolayı herhangi bir güç düşüşü olmayacaktır. Yakıt ve havanın yanma odasında homojen bir şekilde karıştırılabilmesi için, yakıt 99 atm basınç ile yanma odasına püskürtülür. Hidrojen yakıtı, emme sübabı kapanır kapanmaz ve yanma odasındaki maksimum basınçtan önce yanma odasına püskürtülür.

Yakıt ile havanın yanma odası içinde karıştırılması 2 şekilde meydana gelebilir. Bunlar erken püskürtme ve gecikmeli püskürtmedir.

Ayrıca direk püskürtmede homojen bir yakıt hava karışımı oluşabilmesi için gerekli sürenin kısa olmasından dolayı bazı dezavantajlar meydana gelir. Bu dezavantajlar şöyle sıralanabilir;

- Egzoz emisyonlarındaki azot oksit oluşumu artar.
- Ateşleme zamanında düzensizlikler ve tutuşma gecikmesi meydana gelir.
- Yanma odasına püskürtülen yakıtın tamamının yanamaması sonucunda eksik yanma olur.

### *Egzoz, soğutma ve yağlama sistemleri*

Deneysel olarak hidrojen motorlarında sıkıştırma oranı 4,2 ile 29 arasında gerçekleştirilebilir. Piston segmanlarının yüksekliği yağlama yağının yanma odasına geçmesini önlemek için arttırılmalıdır. Motor içindeki yüksek sıcaklıktan ötürü oluşacak erken tutuşmayı önlemek için soğutma iyi olmalı ve sodyum soğutmalı egzoz sübabı kullanmak uygundur. Hidrojen motorlarında diğer motorlara nazaran daha etkili bir soğutma uygulanmalıdır. Su ile soğutma, hava ile soğutmaya göre daha uygundur.

Hidrojen motoru için ölçülen egzoz sıcaklıkları benzinli motorlardakinden çok yüksek değildir. Egzoz sübabı yakınında gaz sıcaklığı 260 °C–927 °C arasındadır. Metal hidritler şeklinde depolama yapılan sistemlerde artık ısı hidrojeni hidridden ayırmak için kullanılır.

Birçok hidrojen motorunda yağlama yağının yanma odasına geçmesi, egzoz emisyonlarında HC ve CO bulunmasına, ayrıca yanma odasında çökelti oluşmasına neden olur. Bu çökelti sonucunda ise erken tutuşma ortaya çıkar. Dolayısıyla yağlama sisteminde karşılaşılan en önemli problem sızdırmazlıktır. Bunu önlemek için sübap sızdırmazlığının önlenmesi ve segmanların kullanılması ön görülür. Fakat bu şekilde de motorun alıştıırılma zorluğu ortaya çıkar. Bu durumda göze alınmalıdır.

### *Ateşleme sistemi*

Hidrojen motorlarında ateşleme sistemleri diğer konvansiyonel motorlara benzerdir. Bir hidrojen motorundaki optimum ateşleme zamanlaması; motor yükünün, motor hızının ve karışım oranının bir fonksiyonudur. En uygun ateşleme avansı devir sayısı ve eşdeğer orana göre belirlenir.

Hidrojen motorunda standart buji, özel yüksek enerjili çok deşarjlı buji, akkor buji veya sıcak buji kullanılabilir. Ayrıca diesel tipi basınçla ateşleme, çok uygun olmamakla beraber uygulanabilir. Konvansiyonel bujili ateşleme hidrojen motoru içinde uygundur. Ancak zamanla, buji tipi ve tırnak aralığında değişiklik yapmak gerekir. Hidrojenin erken tutuşma eğilimini engellemek için çok defa soğutulmuş buji kullanılır. Buji tırnak arası, benzin motoruna göre üç defa daha küçüktür.

Ateşlemenin sıkıştırma yoluyla, yani diesel tipi çalışma ile sağlanması sıkıştırma oranının 29:1 değerinde bile başarılı olamamıştır. Dolayısıyla bu yol, hidrojen motorunda pratik bir yaklaşım değildir. Bu tip ateşleme, ancak hidrojen-motorin karışımı kullanılan diesel motorlarında olumlu sonuç verir.

#### Hidrojenin motor ve yanma performansına etkisi

Hidrojen yakıtlı motorlarda yanma karakteristiklerini, emisyon miktarını ve dolayısı ile motor performansını etkileyen en önemli etken karışımın hazırlanış yöntemidir. Hidrojen ile hava karışımı, sırasıyla dahili ve harici olarak adlandırabileceğimiz yöntemlerle motorun yanma odası içerisinde veya motorun giriş manifoldunda hazırlanmaktadır. Her iki yöntemde de hidrojenin difüzyon hızının yüksek olması nedeni ile yüksek motor devir sayılarında bile homojen bir karışım sağlamak olasıdır.

Harici karışım hazırlama yönteminde, basit bir gaz karıştırıcı içerisinde, düşük basınçlarda, hidrojenin hava ile karıştırılması veya hidrojenin büyük basınçlarda motorun emme manifolduna sürekli veya aralıklı olarak gönderilmesi söz konusudur. Aralıklı olarak yakıt gönderilme durumunda, dizel ilkesi ile çalışan motorlardaki gibi yüke göre karışım ayarı yapılacaktır. Bu durumda karbüratördeki gaz kelebeği ortadan kalkacağı için motorda kısımla kayıpları da kaldırılacak ve volumetrik verim, dolayısı ile motorun maksimum gücü artacaktır. Benzin motorlarından farklı olarak, karışım oranının böyle değiştirilmesine olanak sağlayan etken, hidrojen hava karışımlarının yeni tutuşma sınırlarına sahip bulunmasıdır.

Harici karışım hazırlama yöntemlerinin sağladığı bazı avantajlar yanında getirdiği önemli sorunlarda bulunmaktadır. Geri tutuşma ve erken tutuşma sorunları bu yöntemde ortaya çıkmaktadır. Geri tutuşma, yanma odasına gönderilen karışımın emme tamamlanmadan çeşitli etkenlerle tutuşması sonucu motorun giriş manifoldunda alevin geriye doğru ilerlemesidir. Emme sistemindeki elemanların tahrip olmasına yol açabilecek ve emniyet açısından sakıncalı bu olayın önlenmesi gerekmektedir. Önlenmesi gereken diğer bir etken de erken tutuşmadır. Erken tutuşma, yanma odası içerisine ulaşmış karışımın bujide ateşleme olmadan önce tutuşmasıdır. Hidrojenin tutuşma enerjisinin düşük olması nedeniyle;

- Yanma odasındaki sıcak noktalar
- Sübap bindirmesi sırasındaki sıcak egzoz gazları
- Çok fakir karışımlarda yanma hızlarının düşük olması nedeniyle yanma süresinin artması sonucu yanan gazlarla yeni karışımın teması
- Motor yağından gelen sıcak partiküller yanmayı istenilenden önce başlatabilmektedir.

Bu amaçla:

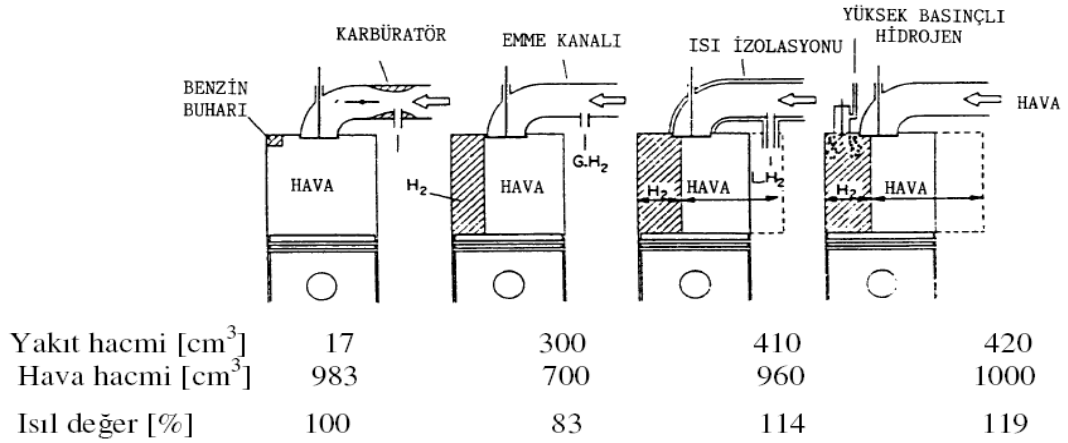
- Karışımın bir miktar fakirleştirilmesi
- Egzoz gazları resirkülasyonu uygulaması (EGR)
- Yanma odasına su püskürtülmesi
- Sübap bindirmesinin azaltılması
- Giriş havasının sıvı hidrojen kullanımı sonucu soğutulması

gibi çeşitli yöntemler uygulanabilir. Ancak karışımın EGR uygulanması veya gönderilen hidrojenin azaltılması sonucu fakirleştirilmesi çevrimden çevrime olan farklılıkları arttıracak ve motorun düzgün çalışmasını engelleyecektir. Ayrıca EGR sonucu ortalama efektif basınç da düşecektir.

Hidrojenin motorlarda kullanımının sağlayacağı yararlarından birisi de yanma hızının öteki yakıtlara oranla yüksek olmasıdır.

Hidrojen hava ile bütün karışım oranları için karışma özelliğine sahiptir. Elde edilen karışımın da hava fazlalık katsayısına ve sıcaklığa bağlı olan yeni tutuşma sınırları vardır. Karışımın sıcaklığının artması ile bu sınırlar da artış gösterecektir, ancak düşük sıcaklıklarda bile motoru karışım oranının değiştirilerek çalıştırmak mümkündür. Sonuç olarak termik verim artmakta ve benzin motoruna göre daha ekonomik koşullarda çalışılmaktadır.

Hidrojen hava karışımlarının tutuşturulması için gerekli ateşleme enerjisi miktarı da petrol kökenli yakıtlara oranla oldukça düşük değerlere sahiptir. Bu özellik erken tutuşma ve geri tutuşma sorunlarını yaratmakla birlikte, çok fakir karışımlar için bile güvenli ateşleme sağlanmaktadır.



Şekil 3.3. Hidrojen yakıtlı motorlarda performans karşılaştırması [2]

### Hidrojenin emisyonlara etkisi

Hidrojenin hava ile yanması sonucunda, yakıtta karbon bulunmaması nedeni ile yanma ürünleri arasında CO, CO<sub>2</sub> ve HC'lar mevcut olmayacak, sadece motorun yağlama yağının yanması nedeni ile çok az miktarda oluşan HC'lar egzoz gazları

arasında bulunacaktır. Diğer yandan bu motorlarda, yüksek yanma sıcaklıkları nedeni ile havanın kimyasal reaksiyonu sonucu azot oksitler,  $\text{NO}_x$ , bol miktarda üretilmektedir. Üretilen azot oksitlerin büyük kısmını oluşturan NO'ler egzoz sistemi içerisinde veya atmosfere çıktıktan sonra  $\text{NO}_2$ 'ye dönüşmektedir.

$\text{NO}_x$  genelde hava fazlalık katsayısının ve karışımın yerel sıcaklığının bir fonksiyonu olarak üretilmektedir. Bu nedenle zengin ( $\lambda < 0,9$ ) ve fakir ( $\lambda > 1,7$ ) karışımlarda  $\text{NO}_x$  emisyonu önemli ölçüde azalacaktır. Şekil 3.4'de azot oksit emisyonlarının hava fazlalık katsayısına göre değişimi görülmektedir. Hidrojen yakıtlı motorların fakir karışımlarda çalışma özelliği bu konuda önemli yararlar sağlamaktadır.

Hidrojen yakıtlı motorlarda egzoz gazları içerisinde hava kirliliğini etkileyecek tek ürün olarak bulunan  $\text{NO}_x$ 'lerin miktarı, yanma odası sıcaklıklarının azaltılması, oksijen konsantrasyonunun azaltılması veya yanma süresinin kısaltılması sonucu düşürülebilmektedir.

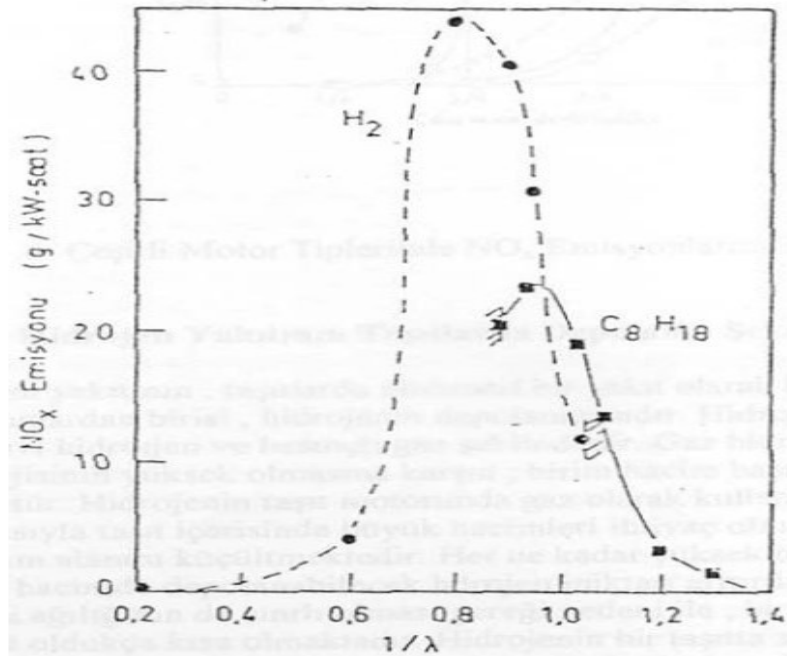
Bu amaçla;

- Egzoz gazları resirkülasyonu
- Emme manifolduna su püskürtülmesi
- Ateşleme zamanının geciktirilmesi
- Hidrojenin direkt olarak yanma odasına püskürtülmesi

gibi yöntemler kullanılmaktadır. İnert egzoz gazlarının resirkülasyonu sonucu, özellikle fakir karışımlarda oksijen konsantrasyonu düşürüldüğü için etkin bir şekilde  $\text{NO}_x$  azalmaktadır. Ancak bu durumda motorun gücü de bir miktar düşecektir. Motorun emme manifolduna su püskürtülmesi sonucunda karışım sıcaklığı düşmekte, yanma hızı azalmakta ve sonuç olarak  $\text{NO}_x$  emisyonu da azalmaktadır. Ateşleme zamanının geciktirilmesi motorun termik verimini bir miktar azaltmasına

rağmen, maksimum sıcaklıkları düşürmekte ve dolayısı ile de NO<sub>x</sub> emisyonunu azaltmaktadır. Hidrojenin direkt olarak yanma odasına püskürtülmesi de NO<sub>x</sub> emisyonunu azaltıcı yönde etki etmektedir. Bu durumda püskürtme zamanının etkileri de önem kazanmaktadır.

Hidrojen yakıtının yanma odası içerisine püskürtülmesi yönteminde, NO<sub>x</sub> emisyonlarının azaltılmasında etkili diğer bir etkende hidrojenin püskürtülme sıcaklığıdır. Ayrıca yanma odası şekli ve motorun sıkıştırma oranı da hava hareketlerinin oluşturulması ve ulaşılan sıcaklıklar açısından NO<sub>x</sub> emisyonu üzerinde etkili olmaktadır.



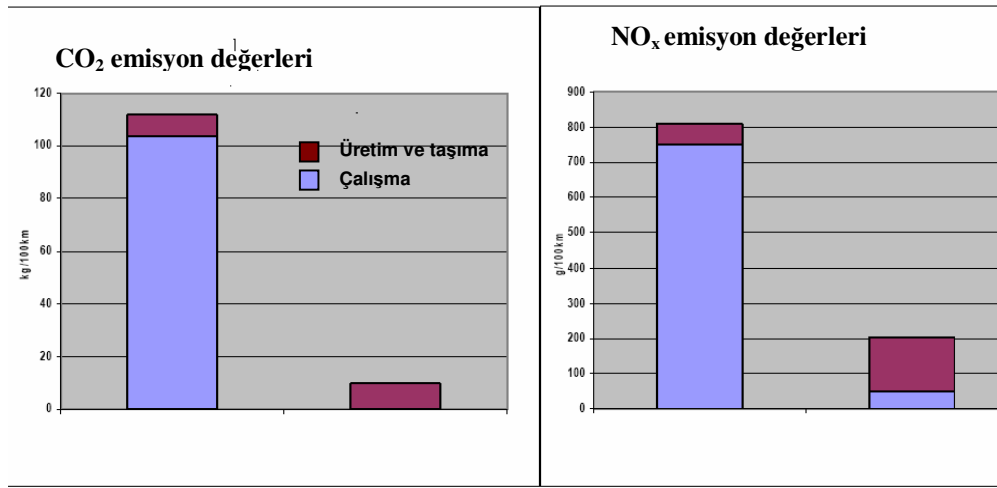
Şekil 3.4. Azot oksit emisyonlarının hava fazlalık katsayısına göre değişimi [2]

#### Hidrojen motorunun avantaj ve dezavantajları

Hidrojen motorunun avantaj ve dezavantajları ayrı ayrı aşağıda açıklanmıştır.

### Avantajları:

- Çevre koruyucu olması: Motorda yanan hidrokarbon olmadığından CO ve CO<sub>2</sub> gibi zararlı hidrokarbon oluşumu engellenmektedir. Yanma havadan gelen oksijenle sağlandığı için azot oksit (NO<sub>x</sub>) emisyon değerlerinde belirgin bir artış meydana gelmektedir. Buna rağmen mevcut sistemlere göre oldukça çevrecidir.



Şekil 3.5. Şehir içi taşımacılıkta yakıtın üretilmesi ve taşınması ile yakıtın tüketilmesinden meydana gelen CO<sub>2</sub> ve NO<sub>x</sub> emisyon değerleri [15]

- Hidrojen ve havanın fakir karışım oluşturması: Bir karışımında hava miktarının yakıt miktarına oranı birden büyükse yani çok hava az yakıt karışımıysa bu karışım fakir karışım olarak adlandırılır. Motorun fakir karışım ile çalışması yakıttan büyük tasarruf sağlar. Hidrojenin çok küçük bir tutuşma enerjisi ve çok geniş bir yanma aralığı vardır. Fakir karışım oranı benzinde 1,4, doğalgazlı motorda 1,8'e ulaşırken bu değer hidrojen motor için 5,5'e kadar çıkmaktadır. Bu oranın büyümesi yanma sıcaklığını da düşürdüğünden NO<sub>x</sub> emisyon değerleri düşmektedir.

- Yüksek yanma verimi: Hidrojenle çalışan motorun çalışma verimi benzinli motora oranla oldukça yüksektir. Ayrıca difüzyon hızının geleneksel diğer yakıtlara göre yüksek olması hidrojenle çalışan motorun veriminin % 40'a kadar çıkmasına neden olmaktadır. Bu değer benzinli motorlarda hareket halindeyken % 23 ve sabit konumdayken % 37'den büyük olamamaktadır. Bu verimi motor gücü ile karıştırmamak gerekir. Zira hidrojen motorun gücü benzinli motorlara oranla düşüktür.
- Kütle maliyet oranı: Sabit düzenekli kullanımlar için geliştirilen gaz motorunun kütlesi yakıt pili sistemlerine göre oldukça küçüktür.

#### *Dezavantajları:*

- Düzensiz yanma (Emme manifoldu geri tutuşması): Pistonlar gazın emilmesi sırasında aşağıya doğru hareket eder. Bu durumda dışarıdan gelen yeni oluşmuş gaz karışımı supapların açılması ile içeride hala sıcak halde bulunan eski gaz ile karışır. Emme manifoldundan yeni gaz gelmeden içeride bulunan eski ve yeni karışan gazın tümünün yanması gerekir. Böylece supapları geri iten gaz gelişini kısmen engelleyen bir patlamalı yanma olur ve buna geri yanma denir (Back Flash). Geri yanma, yanma odasına gönderilen yakıt-hava karışımının emme tamamlanmadan çeşitli etkenlerle tutuşması sonucu motorun emme manifoldundan geriye doğru alevin ilerlemesidir. Bu olay emme sistemi elamanlarını tahrip etmekte ve emniyet açısından sorun oluşturmaktadır. Geri tutuşma hava fazlalık kat sayısının ( $\lambda$ ) 2 ile 3 arasında olduğu durumlarda oluşmaktadır.

Geri tutuşmanın sebeplerinden biri benzin ile kıyaslandığında hidrojenin tutuşturulabilmesi için daha düşük iyonlaşma enerjisine ihtiyaç duymasındır. Dolayısıyla hidrojen yakıtlı motorlarda buji kıvılcımından sonra ateşleme sisteminde kalan artık enerji miktarı daha fazla olur. Egzoz zamanı genişleme periyodundan sonra silindir içi basıncının atmosfer basıncına yakın olduğu durumlarda, sistemdeki

artık enerji bujide kıvılcım oluşmasına sebep olur. Kıvılcımın oluştuğu nokta çevrimden çevrime farklılık gösterir. Eğer buji kıvılcımı emme zamanında oluşursa, diğer bazı etkenlerle birlikte geri tutuşmaya sebep olur. Artık enerji oluşumunu önlemek için ateşleme sistemi modifiye edilmelidir.

- Erken tutuşma (Preignition) sorunu: Önlenmesi gereken diğer olaylardan biri de erken tutuşmadır. Yanma odasına gönderilen karışımın bujide kıvılcım çakmadan önce sıcak odaklar tarafından tutuşturularak yanmayı istenilenden önce başlatması da erken tutuşma olarak tanımlanmaktadır.

Yüksek yük altında, yanma odasındaki sıcak noktalar karışımın erken ateşlenmesine sebep olur. Hidrojenin tutuşma enerjisinin düşük olması nedeniyle; yanma odasındaki sıcak noktalar, supap bindirmesinde sıcak egzoz gazları, çok fakir karışımlarda yanma hızlarının düşük olması nedeni ile yanma süresinin artması sonucu yanan gazlarla yeni karışımın teması, motor yağından gelen sıcak partiküller yanmayı istenilenden önce başlatabilmektedir.

Bu amaçla yanma odası sıcaklığının düşürülmesi gerekmektedir. Bunun için; karışımın bir miktar fakirleştirilmesi, egzoz gazları resirkülasyonu (EGR), yanma odasına su püskürtülmesi, supap bindirmesi süresinin azaltılması, giriş havasının sıvı hidrojen kullanımı sonucu soğutulması gibi çeşitli yöntemler uygulanabilir. Ancak karışıma EGR uygulanması veya gönderilen hidrojenin azaltılması sonucu fakirleştirilmesi çevrimden çevrime olan farklılıkları artıracak ve motorun düzenli çalışmasını önleyecektir. Ayrıca EGR sonucu ortalama efektif basınçta düşecektir. Hidrojen yakıtlı motorlarda hava-yakıt oranı 0,8 olduğunda egzoz gazları içindeki NO<sub>x</sub> miktarı maksimum olur. NO<sub>x</sub> oluşumunu azaltmak için hidrojene saf oksijen ilave edilmelidir. Bu durum ise sisteme daha karmaşık hale getirir ve taşıt ağırlığını arttırır. Bu sorunun çözümü için kullanılan yöntemlerden biri; taşıt üzerinde suyu elektroliz ederek, açığa çıkan hidrojen ve oksijenin basınç altında depo edilmesidir.

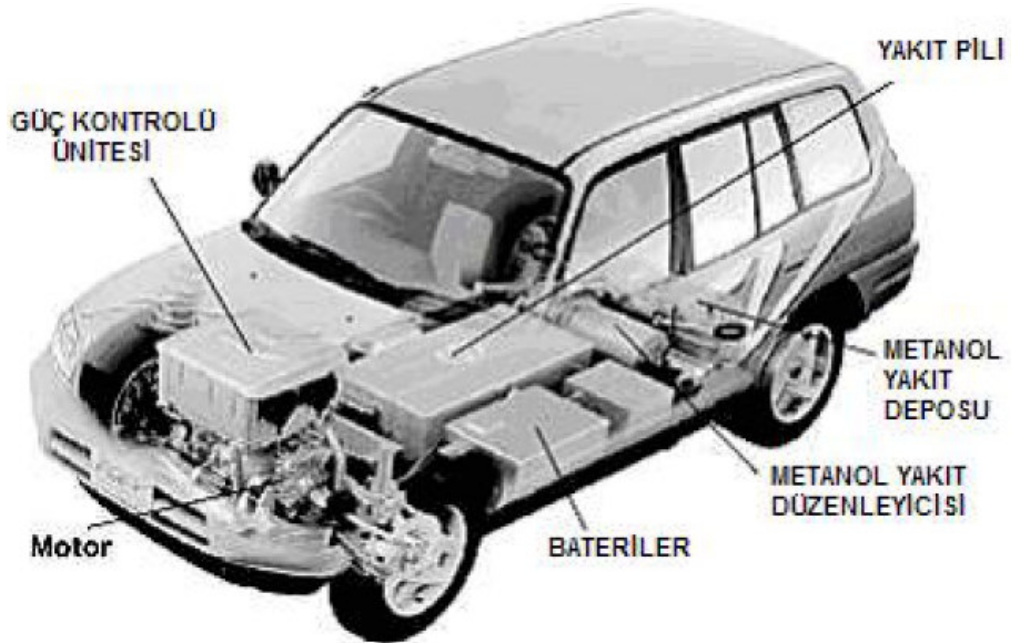
- Taşıma kayıplarından kaynaklanan verim düşüşü: Hidrojenle çalışan yanmalı motorların gücü yüksek verimli yanmaya rağmen geleneksel kullanılan Otto-Motorlardan daha düşüktür. Benzin yakacak şekilde düzenlenmiş bir motor hidrojen yaktığında % 55 ile 75 arasında bir güç kaybı gösterir. Hidrojen/hava karışımı hacimsel olarak oldukça düşük bir yanma verimi gösterir. Bu kayıp taşıma kaybı olarak adlandırılır.
- Hidrojenin yeteri kadar kaygan olmaması: Hidrojen yakıt hidrokarbon içermediğinden yeteri kadar kaygan özelliğe sahip değildir. Motor yağı kendi başına ince bir film tabakası oluşturup sürtünmeden doğan kayıpları en aza indirmektedir. Hidrojenin yakıt olarak kullanılacağı durumlarda piston ve diğer aksamlarda sürtünmeye karşı daha dayanıklı malzemeler kullanılması gerekmektedir. Bu ise maliyeti yükseltmektedir [15].
- Hızlı basınç artışı: Bujide kıvılcım oluşuktan sonra, hidrojen motorunda yanma benzine nazaran çok hızlı yayılır. Bunun sonucu olarak silindir içinde basınç çok hızlı artar.
- Vuruntu sorunu: Hidrojen motorlarında eşdeğer karışım oranı 0,9'dan büyük değerlerde olursa vuruntu veya darbeli yanma rejimi başlar. Buradaki vuruntu benzin motoru vuruntusundan farklı bir olaydır. Bununla beraber, vuruntulu yanmanın düşük güç, fazla ısınma gibi karakteristik sonuçları hidrojen motorunda da ortaya çıkar. Bu vuruntunun önlenmesinde karışıma su püskürtülmesi etkin bir yöntemdir [2].

### 3.1.2. Ulaştırmada yakıt pilinin uygulanması

#### Yakıt pillerinin ulaştırmada kullanımı

Yakıt pillerinin uygulandığı ve gelecekte de daha fazla yer bulacağı alan otomotiv sektörüdür. Yakıt pilleri, otobüs, kamyon, otomobil ve her türlü taşıt için yakıt görevi yapabilecek özelliklere sahiptir.

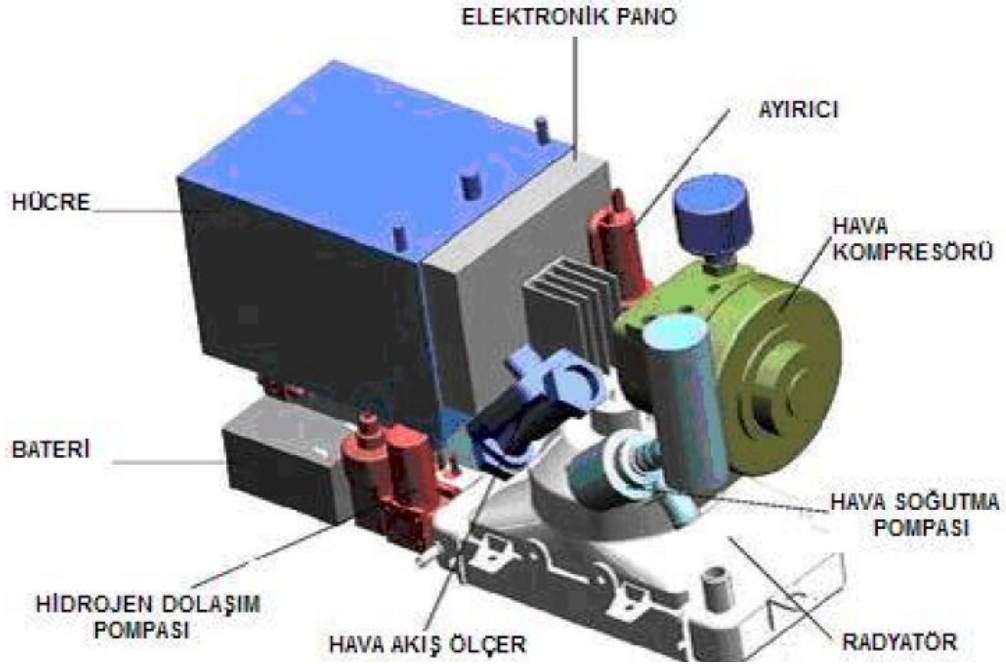
Yakıt pilli araçlar ( YPA=FCV), güncel test ve denemelerde % 40–50 enerji verimi sağlamakta; geniş araştırma ve geliştirme çalışmalarıyla bu sayı her geçen gün artmaktadır. Artmış enerji verimi, yabancı petrole bağımlılığını ortadan kaldıracağı ve enerji güvenliğini arttıracadığından, YPA'ların verimleri % 10–19 arasında olan içten yanmalı motorlara nazaran oldukça çekici kılmaktadır.



Şekil 3.6. Araçta yakıt pilinin kullanımı (Toyota-FCVH-4) [8]

Kesin sonuçlar çalışmadan çalışmaya değişmektedir. Ancak otomotiv üreticilerinin sunduğu bilgiler, yakıt pillerinin içten yanmalı araçlardan çok daha verimli olduğunu göstermektedir. Toyota bir araştırmasında geleneksel benzinli aracının sadece % 16

verimle çalıştığını, hidrojenle çalışan FCVH-4'ünün ise % 48 araç verimiyle çalıştığını yayınladı. Yani 3 kat daha verimlidir.



Şekil 3.7. Yakıt pilinin araç motoruna uygulanması [8]

Bir yakıtın araç emisyonu ve yakıt verimi ile değerlendirilmesi için onun topraktan çıkarıldıktan sonra işlenmesi, rafine edilmesi, üretilmesi, taşınması ve depolanmasından araca güç vermesine kadar olan evredeki bütün işlemler göz önünde tutulmalıdır. Bu yaklaşıma tam bir yakıt çevrimi veya "kaynaktan tekere" (well-to-wheel) incelemesi diye bilinmektedir. Yakıt çevrimi yakıtın üretim (kaynaktan depoya) verimindeki ve aracın verimindeki (tanktan tekere) etkenleri incelemektedir. Bu çerçeveden bakmak daha bütün bir karşılaştırma yapma imkanı sağlayacaktır.

Termodinamik kuralları yanmalı motorları sınırlar. Yanma olmayan yakıt pilleri, ateşleme, tutuşma, gazlara olan ısı transferi ve egzozla ilişkili verim kayıplarından korunmaktadır. Yakıt pilleri kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine çevirir. Bu enerjide bir elektrik motoruyla FCV'nin tekerlerine aktarılır.



Resim 3.2. Ticari araç için geliştirilmiş yakıt pili sistemi ve araca uygulanması [8]

İçten yanmalı motorlara giren benzinin enerjisinin % 85 kadarı motorun içinde oluşan yanma sonucu kayıplara gider, bunların çoğunluğu atık ısıdır. Kalan enerji motorun şaftının ve dişlilerin döndürülmesi için mekanik enerjiye çevrilir; bu mekanik enerjinin bir kısmı transmisyondan tekerlere geçerken sürtünmelere gider. Bundan daha kötüsü araçla durduğumuzda yani rölanti durumunda verim "0"dır. Aracın verimini cebinizden çıkan parayla hesap edelim; Bir SUV'un verimi % 10 kadardır. Eğer bir SUV tabir edilen spor özellikli arazi aracınız varsa Amerika'da yakıt istasyonuna gittiğinizde deposunu 20.00 \$'lık benzin veya kimyasal yakıtla doldurursanız bunun sadece 2 \$'ını aracınızın hareket etmesi için harcamakta, paranızın kalan 18 \$ ise hava kirliliği ve atık ısı olmaktadır.

Pille güçlendirilen araçlar "Kaynaktan Tekere" çerçevesinin bütününe bakmanın önemini, kağıt üzerinde enerji değişimi olmadığı durum için ispatlamıştır. Toyota saf elektrikle çalışan aracının % 80 verimle çalıştığını göstermişti, bu FCV'nin 2 katıdır. Eğer hesaba "kaynaktan depoya" olan verimi de katarsak verim % 26 olur, buna birde pilin doldurulması ile alakalı verimleri de katarsak toplam verim % 21 olur. Günümüzdeki araçlardan daha iyi fakat FCV kadar verimli değildir. Yakıt piliyle güçlendirilmiş bir arabayla, pille güçlendirilmiş herhangi bir araba karşılaştırırsa;

- Yakıt pilli araçlar, pilli araçların avantajlarını sağladığı gibi deposu daha hızlı doldurabilir ve deponun tekrar doldurulması arasında daha uzun yol gidebilir.

- Yakıt olarak hidrojen kullanan yakıt pilli araç sıfır emisyonlu olacaktır. Diğer yakıtları kullanan yakıt pilli araçlar ise nerdeyse sıfır emisyonludur. Bunlar pille güçlendirilmiş araçlardan daha verimlidir. Ayrıca yakıt işlenmesi ve kullanımındaki bütün emisyonlar göz önünde tutulduğunda yakıt pilli araçlar daha az sera gazı salmaktadır.
- Yakıt pilli araçların toplam verimleri daha yüksektir.

### Yakıt pilli araçlarda yakıt pil sisteminin analizi

Çizelge 3.1'de 2010 yılı için yakıt pili ünitesi sistemi hedefleri gösterilmektedir. Otomotiv uygulamaları için bu hedeflerin aşılması, verim, kompaktlık, su ve ısı yönetimi, dayanıklılık ve maliyet alanlarında teknik atılımları sağlayacaktır.

Çizelge 3.1. 2010 yılı için yakıt pili sistemi hedefleri [8]

		Güncel durum	Hedef
Verim	A/cm <sup>2</sup>	Yaklaşık %50 (brüt)	>% 60(brüt)
Güç yoğunluğu	Ünite	0,9–1,5 kW/l	>3 kW/l
Çalışma sıcaklığı	Soğutucu	80 °C	>80 °C
Çalışma basıncı		2 bar çevre	2 bar çevre
Nemlendirme		Zorunlu	Harici nemlendirici yok
Düşük sıcaklıkta çalışma	Soğuk stabilite	>0 °C	-30 °C
	Depolama sıcaklığı	>0 °C	-40 °C
Emniyet		>1,000 h	>5 000 h
Maliyet		Yaklaşık \$4 500/kW	Yaklaşık \$10–15/kW

Yakıt pili ünitesi sisteminin toplam verimini arttırmak için yakıt pilinin kendi veriminin geliştirilmesi şarttır. Bununla birlikte, membran direncinin azaltılması, daha düşük om kayıpları ve parçalar arasındaki direncin azaltılması için zorunludur.

Yakıt pili ünitesi sistemini araca yüklerken kompaktlık çok önemli bir gereksinimdir. Daha fazla kompaktlık sağlayabilmek için yakıt pili ünitesi sisteminin güç

yoğunluğunu arttırmak zorunludur. Yüksek güç yoğunluğuna erişebilmek için bipolar plakaların (bipolar plate) akış alanı tasarımı, membran elektrot montajının (MEA-membrane electrode assembly) performansını arttırmak için optimize edilmelidir.

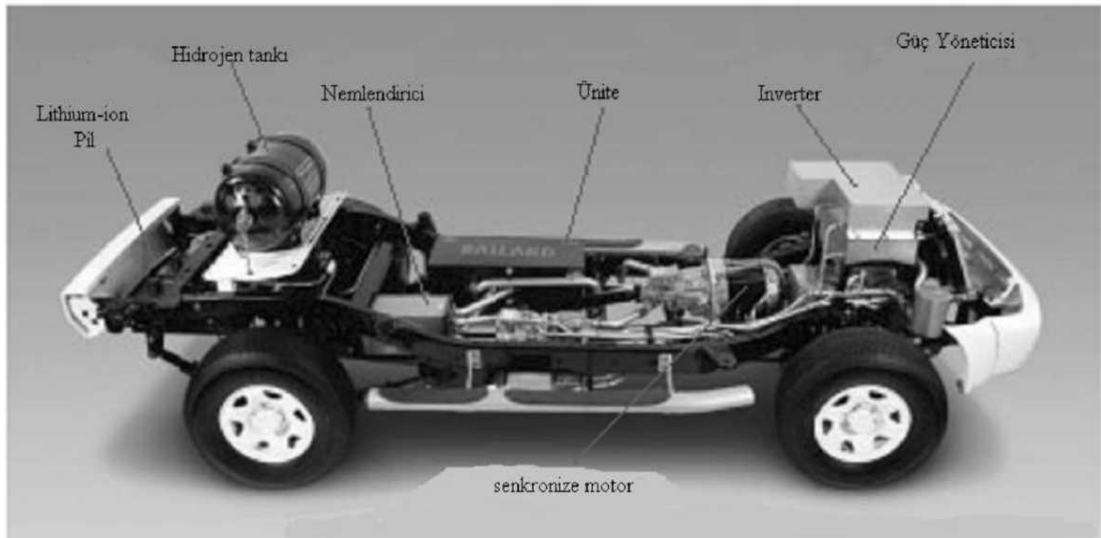
Yakıt pillerinde membranın iyonik iletkenliği onun su muhteviyatıyla orantılıdır. Her ne kadar su sürekli kararlı çalışma için gerekli olsa da 0 °C'nin altında donar ve yakıt pilli araçların (YPA) suyun donma noktasının altındaki sıcaklıklarda da start alabilmesi ve çalışmaya devam edebilmesi gereklidir. Elektrolit membranın içindeki su -20 °C'de donmaz, dolayısıyla ünite bu düşük sıcaklık koşullarında elektrik üretebilir. Bunun yanında gaz difüzyon tabakasındaki (GDL) su ya da katalizör tabaka donar. Ünitenin çalışabilmesi için üretilen ısı enerjisi bu parçaları donma olayından korumak için kullanılabilir. Ünitenin güç çıkışı bu sıcaklık şartlarında sınırlanır. Bununla birlikte donma sorunu yakıt hücreli araçlar piyasaya çıkmadan önce çözülmesi gereken en önemli sorunlardan biridir. Bu problemin çözüm yollarından biri yakıt pili ünitesinin içindeki harici nemlendiriciyi iptal etmektir.

Bir başka kritik problem ise yakıt pili sisteminin termal dengesinin sürekliliğinin her şartta sağlanması gerekliliğidir. Nafion® zarlı yakıt pili ünitesinin ilk çalışma sıcaklığı 80–85 °C civarındadır ki bu sıcaklık içten yanmalı bir motorla kıyaslandığında düşük bir sıcaklıktır. Bu düşük sıcaklık otomobil uygulamaları için istenen bir durum değildir. Radyatör (coolant) ile hava arasındaki sıcaklık farkından dolayı soğutucudaki ısı havaya geçer. Geleneksel içten yanmalı motorlarda radyatörün en yüksek sıcaklığı 110 °C civarındadır. Ortamın hava sıcaklığı 30 °C ise sıcaklık farkı 80 °C'dir. Yakıt pili ünitesinde bu fark yaklaşık 50 °C'dir. Bundan dolayı yakıt pili ünitesinin radyatörü geleneksel içten yanmalı motorun radyatöründen % 60 daha büyük olmalıdır. Bununla birlikte araç içinde bu kadar büyük bir radyatöre yer bulmak çok zordur. Bu sorunun çözülmesi için yüksek sıcaklıklı zar geliştirilmesi şarttır. Yüksek sıcaklıklı zarın 100–120 °C sıcaklıklara dayanıklı olması arzu edilir.

### Yakıt pilli araçların yaygınlaşabilmesi için gerekli koşullar

Yakıt pili sistemleri, CO<sub>2</sub> emisyonları ve hava kirliliği gibi çevresel sorunların son çözümü gibi görülmektedir. Pek çok proje, yakıt pilli araçları geliştirmek ve seri testlerle gerçek sürüş koşullarında değerlendirilmesi amacıyla devam etmektedir. Yakıt pilli otomobillerin müşterilerce tercih edilebilmesi için aşağıdaki şartların gelecekteki içten yanmalı ve hibrit elektrikli araçlarla kıyaslanabilir olması gereklidir:

- Ekonomik yakıt tüketimi
- Yakıt pili sistemlerinde sıfıra yakın emisyon
- İyi güç performansı ve menzil
- Eşit emniyetlilik
- Çevre koşullarına uygunluk
- Maliyet
- Aracın uygun bölümlerine yerleştirilebilme

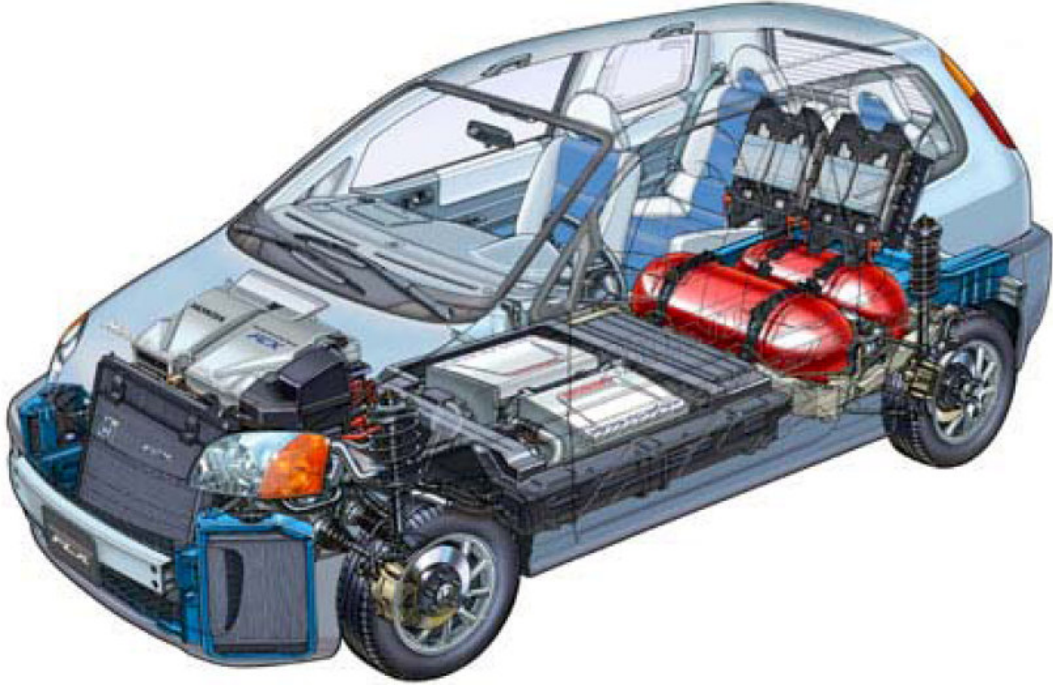


Şekil 3.8. Araçta yakıt pili sisteminin uygulanması [8]

Güncel bir hidrojen yakıt pili sisteminin araca yerleştirilmiş hali Resim 3.3'te verilmiştir. Bu sistemin araca yüklenebilmesi için oldukça fazla hacim gerekmektedir. Bu hacim azaltılmalı ve sistem basitleştirilmelidir.



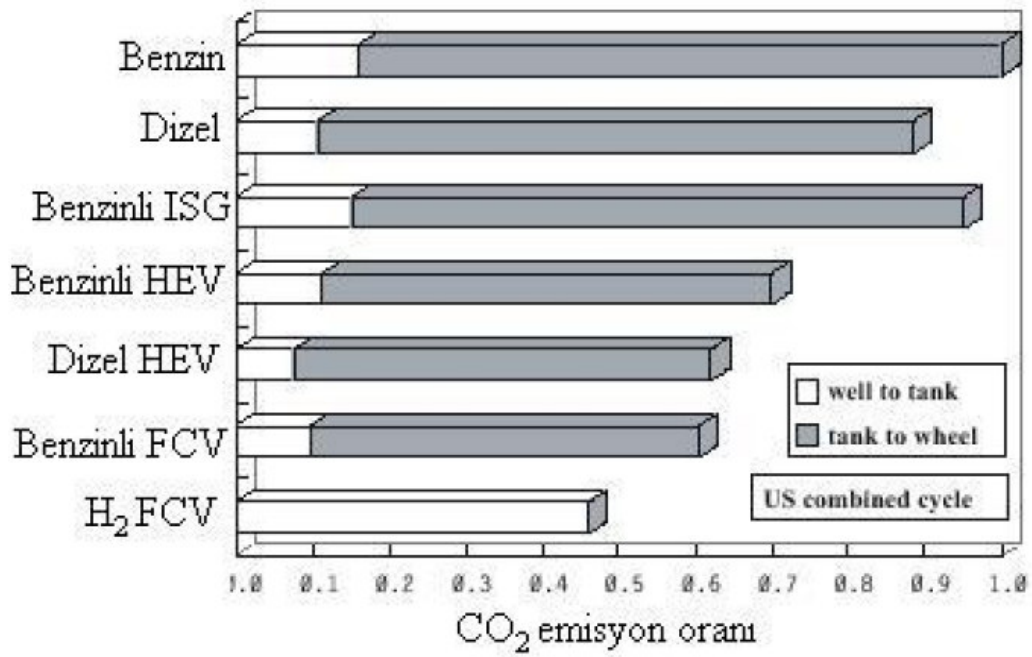
Resim 3.3. Ford firmasının üzerinde çalıştığı yakıt pilli aracı [8]



Resim 3.4. Yakıt pilinin araç üzerindeki uygulaması (Honda 2005 FCX) [8]

Otomobillerde kullanılabilir enerji kaynaklarının CO<sub>2</sub> emisyonlarını değerlendirmek için çok sayıda gösterge vardır. Bunların hepsinin sonucunda dizel ya da sıkıştırılmış doğal gazlı (CNG) hibrit elektrikli araçların (HEV) yakıt piliyle eşit miktarda CO<sub>2</sub> ürettiği rapor edilmiştir.

2010 yılı için, gelişen teknolojiyi hesaba katarak, bütün bu sistemlerin değişik enerji kaynaklarıyla yaydığı CO<sub>2</sub> emisyonları Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. CO<sub>2</sub> emisyonu karşılaştırması [8]

Yakıt pilinin veriminin 1 A/cm<sup>2</sup>'de % 67 olacağı ve gaz dönüşüm sisteminin çalışma kabiliyeti 25 °C 'de % 80–85 ve 30 saniyeden daha az olduğu yapılan kabullerdir. Bu sistemler araca 1200 kg civarında bir ağırlıkla yerleştirilecektir. Hidrojen, doğal gaz kullanan buhar dönüşüm sistemi ile üretilecektir. Çıkış gücünü sağlamak için birleşik starter ve jeneratör (ISG) 10 kW veya daha düşük bir elektrik motoruna adapte edilmiş olarak kullanılmaktadır.

ISG sisteminin en temel özelliği rölanti koşullarında motoru otomatik olarak durdurup tekrar çalıştırabilme yeteneğidir. Tam anlamıyla HEV, Toyota Prius konfigürasyonlu araçlara denir. 40–50 Km gibi düşük hızlarda elektrik motoruyla sürülebilmekte ve rölanti durumlarında istop edip tekrar çalışabilmektedir. Bu araç frenleme esnasında açığa çıkan enerjiyi ikinci bir bataryada depolayabilmektedir. Bu nedenle içten yanmalı motorlar arasında en düşük yakıt tüketimine sahip olmaktadır. Bu sonuçlardan gaz dönüşüm sisteminin bir avantajı da özellikle yoğun trafik koşullarında daha temiz emisyon yaymasıdır [8].

### Yakıt pilinin avantajları ve dezavantajları

Yakıt pilinin avantaj ve dezavantajları aşağıda açıklanmıştır.

#### *Avantajları:*

- Yakıt pili, termal enerji sistemlerine göre daha yüksek verimle çalışır. Termal sistemlerden elektrik elde edilirken, sistemin verimi "Carnot Çevrimi Kriterleri"nden etkilenirken, yakıt pili sistemlerinde bu etkileşim yoktur. Termal sistemlerde elektrik üretimindeki verim % 35-40'ı geçemezken, yakıt pili sistemlerinde % 70'e yakın verimle çalışılmaktadır.
- Yakıt pilinde meydana gelen emisyon miktarı, diğer yakıtlara göre ihmal edilecek kadar azdır. Yan ürün olarak bir tek su oluşmaktadır. Yakıt pillerinde CO, NO<sub>x</sub>, yanmamış hidrokarbonlar ve kirletici diğer maddeler oluşmazken, oksitleyici olarak hava kullanıldığında ihmal edilecek kadar az miktarda azot atıklar ve hidrokarbonlar kullanıldığında ise çok düşük miktarda CO<sub>2</sub> oluşur. Günümüzde çevre kirliliği ve insan sağlığı için birçok yasal kısıtlamaların uygulandığı bu zamanda, diğer teknolojilerde maliyeti çok fazla arttırmaktayken, bu sistemin çevre dostu olması çok değerli bir alternatif yakıt olmasına neden olmaktadır.
- Hareketli aksamın bulunmadığı yakıt pillerinde sistem, gürültü kirliliği oluşturmamaktadır. Yakıt pillerinde kullanılacak yakıt sayısı çok fazla olduğundan, fosil ve alternatif yakıtların kullanımının kolaylığı nedeniyle çok farklı alanlarda kullanılabilir.
- Yakıt pilleri istenilen büyüklükte ve kapasitede üretilebilir. Basit bir yapıya sahiptirler. Büyüklüklerine göre 10 W'tan 4,5 kW'a kadar olan bir güç yelpazesine sahiptirler. Boyutları bir el çantasında taşınabilecek kadar küçük veya buzdolabı kadar büyük olabilirler. Modülerdirler, gerekli görülen her yerde kullanılabilir ve yerleştirilebilirler.
- Yüksek sıcaklıklı yakıt pillerinde elektrik üretiminin yanı sıra yan ürün olarak oluşan atık ısı geri kazanılabilir ve buhar santrallerinde kullanılır.

- Yakıt pilleri dayanıklı ve güvenli sistemlerdir.

*Dezavantajları:*

- Yakıt pili kullanımı, çok fazla bilgi ve ileri teknoloji gerektiren bir sistemdir.
- Diğer sistemlerden daha pahalı bir sistemdir.
- Uygulamalarının tam verimle gerçekleşmesi için uzun zamana ve çok paraya ihtiyaç vardır [1].

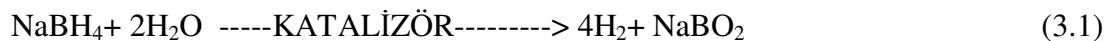
### 3.1.3. Ulaştırma borun uygulanması

#### Borun motorlarda yakıt olarak kullanılması (Hydrogen on Demand)

Hydrogen on Demand; Millennium Cell firması tarafından icat edilmiş, geliştirilmiş ve patenti alınmış, çevreyle dost ham malzemelerden saf hidrojen üreten, güvenli bir hidrojen üretim sistemidir.

Hidrojen, sulu Sodyum Borhidrür ( $\text{NaBH}_4$ ) çözeltisinden elde edilir. Sodyum Borhidrür, borakstan elde edilen yeryüzünde önemli doğal rezervleri bulunan çok reaktif bir kimyasaldır. Bir prosesle, sıkıştırma ve sıvılaştırma işlemlerine ihtiyaç olmaksızın enerji uygulamaları için saf hidrojen temin edilir. Geniş aralıktaki güç ihtiyaçlarına hitap eden bu sistemle üretilen hidrojen, birçok uygulamalarda kullanılabilir.

Hydrogen on Demand sistemi, depolanmış sodyum borhidrür çözeltisinin, tescilli bir metal katalizör içeren bir odadan sıvı olarak geçmesiyle, hidrojen açığa çıkarır. Hidrojen üretimi reaksiyonu;



Sodyum borhidrür+ Su

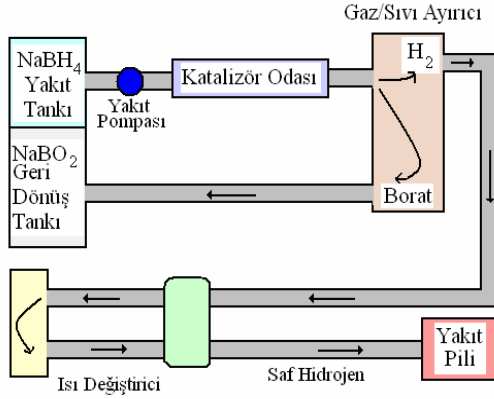
Hidrojen gazı+ Sodyum metaborat

şeklinde yazılabilir. Hidrojen dışındaki diğer reaksiyon ürünü, suda çözünebilen ve çevreye zararsız boraksa yakın sodyum metaborattır. Borat, tekrar sodyum borhidrür elde edilmesinde kullanılabilir. Reaksiyon ekzotermiktir; hidrojen elde edilmesi için dışardan ısı vermeye gerek yoktur. Üretilen ısı, bir miktar suyun buharlaşması için yeterlidir ve sonuç olarak hidrojen % 100 görelî neme sahiptir. H<sub>2</sub> akışında birlikte üretilmiş bu nem, hem yakıt pili hem de içten yanmalı motorlarda fayda sağlayacaktır.

Zararlı emisyon olmaksızın yüksek kalitede enerji kaynağı üreten bu reaksiyon güvenli ve kolayca kontrol edilebilir. Hidrojen sadece, sıvı yakıtın metal katalizörle direkt irtibata geçtiğinde üretilir. Bu suretle herhangi bir vakitte gaz hidrojen miktarı minimize edilebilir. Yakıt çözeltisi alev almaz, patlamaz ve taşınması güvenlidir.

#### *Hydrogen on Demand™ çalışma sistemi*

Tipik bir sistemde, bir yakıt pompası, yakıtı, sodyumborhidrür çözeltisi tankından alarak katalizör odasına gönderir. Yakıtın metal katalizörle teması sonucu çözelti yakıt, hidrojen gazı ve çözelti halinde sodyum metaborat üretir. Hidrojen ve metaborat çözeltisi ikinci odada ayrılır ve borat, toplama tankına döner. Hidrojen gazı opsiyonel olarak belli bir nem seviyesine erişmek için bir ısı değıştiricisinden geçirilerek işleme tabi tutulabilir ve sonra yakıt pili veya içten yanmalı bir motora tüketmek için gönderilir.



Şekil 3.10. NaBH<sub>4</sub> yolu ile H<sub>2</sub> depolama sisteminin araçlarda kullanım şeması [16]

H<sub>2</sub> ihtiyacı olduğunda NaBH<sub>4</sub> çözeltisi katalizöre pompalanır. Hidrojen üretimini durdurmak için ise pompa durdurularak çözeltinin katalizöre girmesi engellenir. Pompa debisinin artması ve azalması da H<sub>2</sub> üretim debisine tesir edecektir. Katalizörsüz ise H<sub>2</sub> oluşmayacaktır. Bu sistem 150 psi üzerindeki bir basınçta dakikada 800–1000 litre % 100 nemde saf hidrojen üretebilir.

Millennium Cell'e ait olan hidrojen üretici, bir taksiyi hareket ettirebilecek kapasiteye sahiptir. Bu üreteç, bagaj ve arka koltuk arasına sığacak şekilde uygun duruma getirilmiştir.

Bu olayın kimyası ile ilgili bazı önemli noktalar şunlardır:

- Borhidrur çözeltisi kolayca alev almaz.
- Reaksiyon, tepkime kabı ve katalizör aracılığı ile kolayca kontrol edilir.
- Hidrojenin yarısı borhidrürden, diğer yarısı da sudan gelir.
- Katalizör, çoğu zaman yeniden kullanılabilir.
- Zehirli değildir.
- Sodyumborattan yeniden sodyum borhidrür elde edilebilir.

Sodyum borhidrür yakıt, günümüzde kullanılan araçlardaki benzin depolarında depolanabilecektir. Depolar, otomobil şasisine uygun olarak plastikten yapılabilecek ve standart gaz depoları ile aynı ölçülerde olabilecektir. Sistemin diğer elemanları ise oldukça az yer kaplarlar.

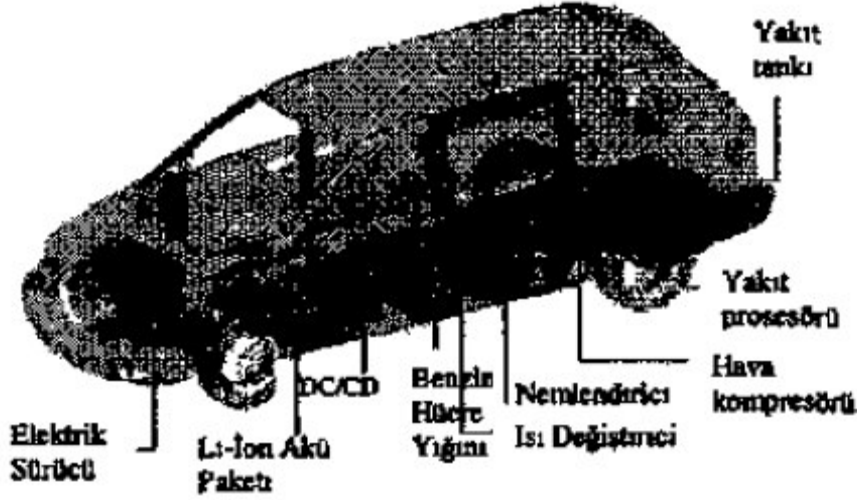
### Borhidrür yakıt pilleri

Patenti Millennium Cell'e ait olan borhidrür yakıt pili, Hydrogen on Demand ve borhidrür akülerin en iyi yönlerini içeren bir aygıttır. Hidrojen üretici kolayca yürütülen sıvıda büyük miktarda enerji depolar. Borhidrür akü, yüksek verimli enerji dönüştüren bir aygıttır. Borhidrür yakıt pili de, kolayca yürütülen sıvı yakıtın, enerji yoğunluğunu kullanan enerji dönüştüren, yüksek verimli bir aygıttır. Borhidrür yakıt pilinin toplam elektrokimyasal reaksiyonu borhidrür akü ile aynı şekilde gerçekleşir.

PEM (proton değişim membran) yakıt pili kimyası ( $H_2+O_2 \rightarrow H_2O$ ) yerine borhidrür akü kimyası kullanmanın avantajı, aynı miktar yakıttan daha çok kullanılabilir enerji elde etmenin mümkün olmasıdır. Başka bir ifadeyle, aynı yakıttan daha çok enerji elde edilir ve borhidrür yakıt pili yeniden doldurulabilir ve tekrar tekrar kullanılabilir.

Uluslararası otomobil üreticisi Daimler Chrysler firması Millennium Cell'in Hydrogen on Demand teknolojisi kullanan hidrojen yakıt pili konsept otomobilini tanıttı.

## Chrysler Natrium Minivan



Şekil 3.11. Chrysler'in Natrium isimli yakıt pili ile çalışan aracı [16]

Natrium isimli bu araç için, başka yakıtlar kullanan diğer yakıt hücresi araçlarından % 50 daha fazla yol alabildiği ifade edilmektedir. Natrium'ın güç sistemi araç zemininin altında yer almaktadır. Sodyum borhidrür tozunun suyla karıştırılması ile kullanılabilir hale gelmiş çözelti yakıt kullanan bu araç, diğer alternatif yakıt kullanan sistemlere benzer şekilde, örneğin metanol ve benzin gibi, çevreyi kirletici maddeler ve karbondioksit üretmez.

Bir yakıt pilinde sodyum borhidritin ağırlıkça % 44'lük çözeltisi kullanırsa, bir litre çözülden 5,11 kW/h enerji elde edilebilir ki, bu değer bir litre benzinden teorik olarak elde edilebilecek enerjinin % 56'sına eşittir. Ancak yakıt pili elektrik motorundaki enerji dönüşüm veriminin, içten yanmalı motora oranla 2,5–3 kat daha fazla olması nedeniyle, mevcut yakıt tanklarıyla kat edilen yol, sodyum borhidrit için de geçerlidir.

Yılda 50 milyon yeni araç üretilmesi ve bu araçların tümünün "hidrojen enerjisi" yakıtını kullanması durumunda, 20 milyon ton bor ihtiyacı vardır. Bu yakıtın geri dönüşüm ve yeniden kullanılabilme özelliği dikkate alındığında 20 milyon tondan daha fazla bor kullanılması gerekmektedir. U.S. Geological Survey'den Phyllis A.

Lyday tarafından hazırlanan 2000 yılına ait bor raporunda, referans gösterilerek "Hydrogen on Demand<sup>TM</sup>" sisteminde % 30 sodyum borhidrit içeren sıvı çözelti, yan ürün olarak hidrojen ve sodyum borat üretmek üzere bir katalistle tepkimeye tabi tutularak üretilen hidrojenin enerjiye dönüştürüldüğü, reaksiyon atığının süt benzeri ve asla çevre kirliliği yaratmadığı, "Hydrogen on Demand<sup>TM</sup>" sisteminin stoklama yoğunluğu açısından, litre başına 63 gram hidrojen üretimiyle, sıvılaştırılmış hidrojenle rekabet edebilecek güçte olduğu ifade edilmektedir.

### Bor yakıtının avantajları ve dezavantajları

Taşımacılıkta otomobil, kamyon, otobüs, elektrikli motosiklet, kaldırma araçları, elektrikli tekerlekli sandalye, golf aracı, binek araçta ve gemilerde kullanılan bu yeni teknolojinin avantajları ve dezavantajları şöyle sıralanabilir:

#### *Avantajları:*

- Benzin için mevcut altyapı sistemi ile uyumludur. Küçük değişikliklerden sonra modern bir araç Hydrogen on Demand sistemi ile hareket edebilir. Hidrojen üretim sistemi tarafından kullanılan sodyum borhidrür, çevredeki mevcut benzin istasyonu ağı aracılığı ile dağıtılabilecektir.
- Sodyum borhidrürde ağırlık/enerji oranı hemen hemen benzininkine eşittir. Bu da şu anlama gelmektedir; sodyum borhidrür, benzinin ürettiği kadar galon başına aynı miktarda enerji üretir.
- Hydrogen on Demand sistemi kullanışlıdır. Sadece içten yanmalı motorlarda direkt kullanım için hidrojen üretmekle kalmaz aynı zamanda yakıt pilleri için de hidrojen üretebilir. Yakıt pilleri, hidrojen ve oksijenin elektrokimyasal reaksiyonu sonucunda gürültüsüz ve verimli enerji üretir. Her büyük araba üreticisi 2010 yılına kadar yakıt pili ile çalışan araçlar yapmayı planlamaktadır [16].

- Hidroliz reaksiyonu çok hızlı gerçekleşir ve kontrol edilebilirliği çok yüksektir. Katalizörün ortamdaki uzaklaştırılması ile reaksiyon durmaktadır. Katalizör pek çok kez kullanılabilir.
- Reaksiyon oda sıcaklığı ve basıncında oluşmakta ve ekzotermik olması nedeniyle hidrojenin serbest hale geçmesi için ek bir enerjiye gereksinim yoktur.
- Küçük miktardaki hidrojen üretimi için diğer yöntemlere göre çok daha basit ve ucuz bir yöntemdir.
- Tepkime ürünleri çevreye zararsızdır. Yan ürün olarak su buharı ve  $\text{NaBO}_2$  oluşmaktadır.
- $\text{NaBO}_2$ , yeniden  $\text{NaBH}_4$  üretiminde kullanılabilir.
- $\text{NaBH}_4$  çözeltisi yanıcı değildir.
- $\text{NaBH}_4$  çözeltisi açık havada bile bozunmadan aylarca bekleyebilir [6].

*Dezavantajları:*

- Millennium Cell'in geliştirdiği katalizör kısmen, çok nadir bulunan ve pahalı bir element olan "rutenyum"dan oluşuyor. Metal şu anda yürütülen test çalışmaları için uygun olmakla birlikte; şirket seri üretime geçtiğinde maliyetlerin makul seviyelerde tutulabilmesi için daha az egzotik olan bir malzemeyi kullanmak zorunda kalabilir.
- Diğer bir sorunda sodyum borhidrür yakıtının kendisidir. Sodyum borhidrürün maliyeti yüksektir ve 1 galon benzinden 50 kat daha pahalıdır. Boraksın hidrojen zengin sodyum borhidrüre dönüştürülmesinin ucuz veya yaygın kullanım için yeterince basit bir şekilde yapılabileceği tam kesinlik kazanmamıştır. Millennium Cell, üretim konularında U.S. Borax, Rohm ve Haas gibi kimyasal üretici olan şirketlerle temas geçmiştir. Yakıt üretim süreci devam ederken, üretim maliyetlerinin de zamanla benzin üretim maliyetleri ile rekabet edecek seviyeye çekileceği, bu

teknolojiyi kullanan araçların ticari olarak uygulamaya geçmesinin bunu takip edeceği bildirilmektedir [16].

### **3.2. Ulaştırımda Biyodizel**

#### **3.2.1. Biyodizelin motorlarda kullanımı**

Biyodizel, saf olarak (% 100) veya belirli oranlarda (% 5, % 20, % 40, % 50 gibi) petrol kökenli dizelle karıştırılarak yakıt olarak dizel motorlarda kullanılabilir. Biyodizel-dizel karışımı ile oluşturulan yakıt, içerdığı biyodizel oranına göre B5, B20, B40, B50, B100 olarak adlandırılır.

Biyodizelin yakıt olarak kullanılması ile ilgili yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu motor üzerinde hiçbir değişiklik yapılmadan gerçekleştirilmiştir. Bitkisel yağlarla dizel yakıtı arasında özgül ağırlık ve ısı değer bakımından fazla bir fark bulunmamasına rağmen kinematik viskoziteleri oldukça farklıdır. Yağların viskoziteleri dizel yakıtından yaklaşık 10–20 kat fazladır. Cazip olan yönü ise motorda minimum değişiklik ile kullanılabilirlerdir.

Motor yakıtı olarak kullanılacak başlıca bitkisel yağlar; fındık, haşhaş, ayçiçeği, susam, yağ keteni, mısır özü, keten tohumu, defne, ceviz, hint yağı, aspir, badem, soya, kolza, yer fıstığı, hurma çekirdeği, pamuk tohumu yağlarıdır.

Çizelge 3.2'de bu yağların kinematik viskozite (KV), setan sayısı (SS), üst ısı değer (Ho), kül (K), kükürt içeriği (S), iyot değeri (ID) ve sabunlaşma değeri (SD) gibi özellikleri görülmektedir.

Çizelge 3.2. Dizel motorlarda kullanılan bitkisel yağların özellikleri [12]

YAĞ	KV[mm <sup>2</sup> /sn] 38 'C	SS	Ho [MJ/kg]	K %Kütlesel	S %Kütlesel	ID [cg./g yağ]	SD [mg.KOH/g yağ]
Pamukyağı	33,70	33,70	39,40	0,02	0,01	113,20	207,71
Haşhaş	42,40	36,70	39,60	0,02	0,01	116,83	196,82
Kolza	37,30	37,50	39,70	0,01	0,01	108,05	197,07
Aspir	31,60	42,00	39,50	0,01	0,01	139,83	190,23
Ayçiçeği	34,40	36,70	39,60	0,01	0,01	132,32	191,70
Susam	36,00	40,40	39,40	0,00	0,01	91,76	210,34
Yağ keteni	28,00	27,60	39,30	0,01	0,01	156,74	188,71
Buğday	23,60	35,20	39,30	0,02	0,02	120,96	205,68
Mısırözü	35,10	37,50	39,60	0,01	0,01	119,41	194,14
Hintyağı	29,70	42,30	37,40	0,01	0,01	88,72	202,71
Soya	33,10	38,10	39,60	0,01	0,01	69,82	220,78
Defne	23,20	33,60	39,30	0,03	0,02	105,15	220,62
Yer fıstığı	40,00	34,60	39,50	0,02	0,01	119,55	119,80
Fındık	24,00	52,90	39,80	0,01	0,02	95,62	197,63
Ceviz	36,80	33,60	39,60	0,02	0,02	135,24	190,82
Badem	34,20	34,50	39,80	0,01	0,01	102,35	197,56
Zeytin	29,40	49,30	39,70	0,01	0,02	100,16	196,83

Bitkisel yağların karbon ve hidrojen değerleri dizel yakıtına yakın, oksijen değerleri ise daha yüksektir. Isıl değerleri ise dizel yakıtından yaklaşık % 10–15 daha düşüktür.

Araştırmalar; kimyasal yapı olarak uzun, dallanmış ve tek çift bağlı [oleik] yağ asitlerini içeren yağların uygun dizel alternatifi olduğunu ve artan doymamışlık

derecesinin setan sayısını olumsuz yönde etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu durum oleik asitçe zengin yağları ön plana çıkartmaktadır [12].

Biyodizellerin viskozite ve yoğunlukları hammadde ve yapılan işlemlere bağlı olmakla birlikte dizel yakıttan bir miktar daha yüksektir. Isıl değerleri ise içerisinde oksijen bulundurdukları için yaklaşık % 10 daha azdır. Setan sayıları hammadde olarak kullanılan yağın kompozisyonuna bağlı olarak değişebilmektedir.

Biyodizel yakıtlar içinde esterleştirme işlemi esnasında kullanılan katalizörlerden gelen ve uzaklaştırılamayan artık metallerin miktarı yakıtın kül miktarını artırır. Yakıt içinde bulunan çözünebilen metaller tortuya neden olurlar ve bu tortular iç parçaları aşındırarak zarar verir. Biyodizel hammaddeleri genel olarak çok düşük miktarda kükürt içerirler ancak biyodizel üretim prosesi esnasında proteinler, katalizör ve/veya nötralizasyon materyalleri kükürt oluşumuna neden olabilir.

Biyodizel yakıtlarda bulutlanma noktası dizel yakıtlara göre daha yüksek olmakta ve bu da soğukta çalışma özelliklerini kötüleştirir. Bulutlanma noktası esterleştirme kompozisyonu içerisindeki doymuş yağ asidi miktarı ile anlaşılabilir. Doymuş yağ asidi miktarı yüksek olan hammaddelerden üretilen biyodizellerin bulutlanma noktası da yüksek olmaktadır. Dolayısı ile bulutlanma noktasının düşürülmesi için ya yakıt içine özel katkı maddeleri karıştırılmalı veya biyodizel üretimi esnasında kullanılacak yüksek doymuş yağ asitliğine sahip yağlar düşük yağ asitliğine sahip yağlarla karıştırılmalıdır. Biyodizel üretiminde yıkama sonunda suyun tamamen uzaklaştırılması ve filtrelenmesi de önemli bir noktadır [13].

Bitkisel yağlar dizel motorlarında yakıt olarak kullanıldıklarında motor momentini ve gücünü fazla etkilemedikleri, buna karşın özgül yakıt tüketimlerinde bir artış olduğu bu konuda yapılan çalışmalarda belirtilmektedir. Bitkisel yağların alt ısıl değeri motorine göre düşüktür. Belirlenmiş bir motorda aynı deney şartlarında elde edilen gücün motorine göre bitkisel yağlarda düşmesi ve tüketilen yakıt miktarının artması, yakıtın alt ısıl değerlerinin farklı oluşundan kaynaklandığı belirtilmektedir.

Ayrıca; motorinin parlama noktasının bitkisel yağlara göre çok düşük olması nedeniyle yanmanın ve yanma hızının daha yüksek olmasına, bitkisel yağların viskozitelerinin yüksek oluşundan kaynaklanan kötü püskürtme karakteristiklerine de bağlanabilir [19].

Biyodizelin yakıt özellikleri, kullanılan yağın yağ asidi zincir yapısına bağlı olarak değişmektedir. Ana yağ kaynağı yakıtın, setan sayısını, soğuk akış özelliklerini ve oksitlenme kararlılığını belirlemektedir. Örneğin; yüksek oranda doymuş bir donyağından üretilen biyodizelin donma noktası yüksek olmakta, bu da yakıtın soğuk akış özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bununla birlikte bir dizel yakıtından istenen yüksek setan sayısı, donyağından üretilen biyodizel ile elde edilebilmektedir.

Biyodizel bir dizel motorunda saf halde ve petrol kökenli dizel yakıtı ile çeşitli oranlarda harmanlanarak kullanılabilir. Karışımdaki biyodizel yüzdesi "BXX" olarak ifade edilmektedir. Buradaki "XX" karışımda kullanılan biyodizel oranını göstermektedir. Örneğin; B20 oranında bir karışım, % 20 biyodizel ile % 80 petrol kökenli dizel yakıtını göstermektedir. B100 ise saf halde biyodizel kullanımını ifade etmektedir.

#### Biyodizelin yakıt olarak kullanılması sonucu karşılaşılan sorunlar

Bitkisel yağların doğrudan dizel yakıt alternatifi olarak kullanımı üzerine yapılan kısa süreli testlerde, yağların iyi bir seçenek olduğu görülmüştür. Ham yağların herhangi bir işlem yapılmadan kullanılması ile çalıştırılan motorların yağlama yağlarında kısa bir süre sonra katı partiküller belirlenmiş ve yağ bozulmuştur. Motor kısa süreli bir çalışma sonucunda durdurulmak zorunda kalmıştır. Yakıtın alçak basınç borularının ısıtılması ile yanma odasındaki karbon birikiminde azalmalara neden olduğu görülmüştür. Doğrudan bitkisel yağların kullanımı ile yapılan çalışmalarda, bitkisel yağları ısıtmanın, püskürtme özelliklerini olumlu etkilediği ve setan sayısında artışa neden olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak kısa süreli testlerde

elde edilen olumlu sonuçlara karşın, uzun süreli motor testlerinde çeşitli sorunlar ile karşılaşmıştır. Bu sorunlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

- Enjektörlerde karbon birikintisi, delik çapında küçülme, püskürtme karakteristiğinde bozulma, atomizasyon sorunu, enjeksiyon başlangıç ve bitiş sürelerinin belirsizliği, yağın yapışkanlaşma oluşturması,
- Yağlama yağının, seyrelmesi, asitlik artışı, viskozite artması, bozunması, yanma artıkları, yanmamış yakıt karışması ile kirlenmesi, katı madde içeriğinin artışı, temas yüzeylerinde birikinti oluşturması,
- Motorda aşınma, yanma odası, supap, piston ve manifoldda karbon birikimi, segman bölgesindeki karbon birikimi nedeni ile hareketliliğin azalması, segmanlarda yapışkanlaşma, vuruntu, ilk hareket zorlukları, yağ filtrelerinde tıkanma,
- Motor karakteristik değerlerinde ve egzoz gazı bileşiminde olumsuz değişikliklerdir.

Bu sorunların önemli bölümünün bitkisel yağların sahip oldukları yüksek viskoziteden ve düşük uçuculuk değerinden kaynaklandığı görülmektedir. Yüksek viskozite özellikle atomizasyonu ve dolayısı ile yanmayı kötüleştirmekte, eksik yanmaya sebep olmaktadır. Yüksek viskozite nedeniyle enjektörlerde ve yakıt filtresinde tıkanmaya, segmanlarda, yanma odası ve enjektör memelerinde karbon birikintilerine sebep olmaktadır. Yağlama yağının bozulmasının da en önemli nedenlerinden birisidir. Uçuculuk değerinin düşük oluşu da bu sorunların oluşumunda önemli bir faktördür. Yanma odasında ve enjektörlerde karbon birikintisine, segmanların yapışmasına ve özellikle ilk harekette soğumaya sebep olmaktadır.

Araştırmalardan çıkan ortak sonuç; yüksek viskozitenin yanma ve malzeme sorunlarına, özellikle karbon birikimlerine ve yağlama yağı özellikleri değişimine neden olduğu (seyrelme, kalınlaşma, asitlik artışı vb.) şeklindedir.

Yüksek viskoziteyi azaltmak için bitkisel yağlar ısıtılabilir. Isıtma işlemi ön ısıtma ve son ısıtma olarak yapılabilmektedir. Ön ısıtmada filtre girişinden önce motorun soğutma suyu (80–95 °C) veya ayrı bir ısıtıcı ile ısıtma yapılır. Bu, filtrelerin tıkanmasını azaltıcı bir etki göstermektedir. Ayrıca akıcılığı da arttırıp viskoziteyi düşürür. Benzer şekilde, filtre çıkışında egzoz gazı (100 °C üzerinde) ile ısıtma yapılabilir.

Bahsedilen bu sorunların giderilmesi için sadece ısıtma tekniği yeterli olmamaktadır. Sorunların giderilmesi amacı ile bitkisel yağlarda çeşitli modifikasyon teknikleri kullanılarak özellikle bitkisel yağların viskozitelerinin düşürülmesi sağlanmıştır. Bu modifikasyon teknikleri ise, seyreltme, piroliz, mikroemülsiyon ve transesterifikasyondur.

#### *Seyreltme yöntemi:*

Genel olarak seyreltme modifikasyon tekniği uygulamasında, bitkisel yağlara belli oranlarda dizel yakıt ve/veya organik bileşikler katılarak, yağın viskozitesi düşürülmektedir. Uygulamada yaygın olarak kullanılan B20 yakıtı, dizel yakıtı içerisine % 20 oranında bitkisel yağ katılarak elde edilmektedir. Bu şekilde elde edilen yakıtın, dizel yakıtına göre maliyetinin daha düşük olduğu ve performans değerlerinin de dizel yakıtına yakın olduğu belirlenmiştir.

Dizel yakıt dışında başka seyreltme maddesi olarak, ayçiçeği yağının viskozitesini azaltmak amacıyla, yağ normal bütanol, aseton ve etanolla çeşitli hacim oranlarında karıştırılmıştır. Motor testleri sonucunda, karışımların dizel yakıt ile benzer motor performansına sahip oldukları görülmüştür.

#### *Mikroemülsiyon yöntemi:*

Bitkisel yağların viskozitesini düşürmek için, metanol veya etanol gibi kısa zincirli alkollerle mikroemülsiyon oluşturulmaktadır. Böylece viskozite değeri düşmektedir.

Mikroemülsiyon, normalde karışmayan iki sıvı ile bir veya daha fazla amfifilin bir araya gelmesiyle oluşur. Bu yöntemle petrolden tamamen bağımsız alternatif dizel yakıtları meydana getirmek mümkün olabilmektedir.

#### *Piroliz yöntemi:*

Piroliz veya kraming kimyasal bağların daha küçük moleküller oluşturmak üzere kırılması işlemidir. Bitkisel yağların piroliz ürünlerini elde etmek için iki yöntem vardır. Bunlardan biri, bitkisel yağın ısı etkisiyle kapalı bir kaptaki parçalamak, diğeri ise standart ASTM distilasyonu ile ısı parçalanma etkisinde tutmaktır. Bu ikinci yöntem ile yapılan çalışmada, soya yağından elde edilen distilatın saf bitkisel yağa göre, dizel yakıtına daha yakın özellikler taşıdığı gözlenmiştir.

#### *Transesterifikasyon Yöntemi:*

Bitkisel yağların dizel yakıt alternatifi olarak uygunlaştırılmasında izlenen en önemli kimyasal yöntem transesterifikasyon veya diğer adıyla alkoliz reaksiyonudur. Transesterifikasyon, bir bitkisel yağın küçük molekül ağırlıklı bir alkol ve katalizörle gliserin ve yağ asidi esteri oluşturmak üzere reaksiyona girmesidir. Karboksilik asitler, asit katalizli bir reaksiyonla alkollerle ester verirler. Ayrıca esterleşme reaksiyonunda yan ürün olarak mono ve di-gliseridler, reaktan fazlası ve serbest yağ asitleri oluşmaktadır. Bu yöntem viskoziteyi azaltmada en etkili yöntemdir.

#### Biyodizelin yakıt olarak kullanılmasının avantajları

- Biyodizel zehirsizdir ve toprakta hızlı bir şekilde indirgenir.
- Biyodizelin dolumu sırasında depodan zehirli gaz açığa çıkmaz.
- Biyodizel iyi bir yağlama kabiliyetine sahiptir ve böylece yüksek derecede motor aşınması oluşmaz.
- Biyodizelin yanması sonucunda çevreye atılan zararlı gazlar, dizel yakıtına göre; % 15 daha az CO, % 27 daha az HC, sadece % 5 daha fazla NOx, % 22

daha az partikül, % 50 daha az is ve % 10 daha düşük ısı değeri iken, buna karşın ortalama yakıt tüketimi yaklaşık olarak dizelden % 3 fazladır.

- Bitkisel yağlar dünyanın her yerinde marketlerden ve sanayiden kolayca temin edilebilir.
- Sülfür oranı çok düşük olduğu için bitkisel yağlar ve metil esterleri çevre dostudur (bitkisel yağlarda: 0,0012, motorinde: 0,2)
- Bitkisel yağların en büyük avantajı yenilenebilir olmasıdır. Bitkisel yağ kullanımı sonucu atmosfere ilave bir CO<sub>2</sub> verilmez ve hızlı bir CO<sub>2</sub> sirkülasyonu sağlanır. Yani fotosentez ile atmosferden bitkiler tarafından alınan CO<sub>2</sub>, yağın yakılması ile tekrar atmosfere verilir.
- Bitkisel yağların metil esterleri performans bakımından motorine iyi bir alternatiftir.
- Duman koyuluğu ve partikül oluşumu motorinden azdır.
- Depolanabilir.
- Her ölçekte enerji verimi için uygundur.
- Sera etkisi oluşturmaz [4].

#### Biyodizelin emisyon özellikleri

Sera gazları içinde büyük bir pay sahibi olan CO<sub>2</sub> dünyanın en önemli çevre sorunu olan küresel ısınmaya neden olmaktadır ve yanma sonucu ortaya çıkan bir emisyonudur. Yine yanma sonucu açığa çıkan ve sera gazları arasında yer alan CO, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> emisyonları insan sağlığına da zararlıdır.

Biyodizel bitkilerden de elde edilmesi nedeniyle, biyolojik karbon döngüsü içinde, fotosentez ile CO<sub>2</sub>'yi dönüştürüp karbon döngüsünü hızlandırdığı için sera etkisini artırıcı yönde etki göstermez. Yani biyodizel CO<sub>2</sub> emisyonları için doğal bir yutak olarak düşünülebilir. Ayrıca CO, SO<sub>x</sub> emisyonlarının, partikül madde ve yanmamış hidrokarbon (HC) salınımının daha az olduğu belirlenmiştir.

Yağ kökenli bir yakıt olarak içeriğinde çok az oranla S içeren (kütleli olarak % 0,001 den daha az) biyodizel yakıtı ile dizel motorlarda kullanımı ile yanma sonucu SO<sub>2</sub> oluşmamaktadır. Fosil yakıtların yanması sonucu oluşan SO<sub>2</sub> emisyonunun oluşturduğu asit yağmurlarının önlenmesinde bu özellik önemli bir katkı olarak değerlendirilebilmektedir [40].

Biyodizelin dizel yakıtı göre az veya fazla NO<sub>x</sub> emisyonu oluşturduğu hakkında literatürde farklı görüşler belirtilmiştir. Ayrıca emisyon miktarı, motorun biyodizel yakıtı uygunluğuna bağlı olarak değişmektedir.

Ozon tabakasına olan olumsuz etkiler, biyodizel kullanımında dizel yakıtı nazaran % 50 daha azdır. Asit yağmurlarına neden olan kükürt bileşenleri, biyodizel yakıtlarda yok denecek kadar azdır.

Biyodizel yakıtlarının yanması sonucu ortaya çıkan CO [zehirli gaz] oranı, dizel yakıtların yanması sonucu oluşan CO oranına göre % 50'ye varan düşüklükte tespit edilmiştir.

Biyodizel, dizel yakıtı kullanımından kaynaklanan ve insan sağlığını tehdit eden birçok çevresel faktörü ortadan kaldırmaktadır. Biyodizel emisyonlarında, potansiyel kanser nedeni olan polisiklik aromatik hidrokarbon (PAH) ve türevlerinden kaynaklanan emisyonlarda % 80–90 oranlarda azalmalar belirlenmiştir. Bu azalma değeri dikkate alınması gereken bir orandır ve biyodizelin çevre dostu özelliğini pekiştirmektedir.

Ayrıca, biyodizelin sudaki canlılara karşı herhangi bir toksik etkisinin olmadığı belirtilmektedir. Buna karşılık 1 litre ham petrolün 1 milyon litre içme suyunun kirlenmesine neden olabildiği bilinmektedir.

Bu emisyonlar yanında yapılan çalışmalarda, yine önemli dizel emisyonları arasında yer alan is emisyonlarında da önemli azalmaların olduğu görülmektedir [12].

### 3.3. Ulaştırmada Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri

#### 3.3.1. Güneş enerjisi ve güneş pillerinin ulaştırmada kullanımı

Tarih boyunca çeşitli şekillerde kullanılan güneş enerjisi, hız kazanan teknolojik gelişmeler sonucu konutlarda, iletişim alanında, tarımda, endüstride, elektrikli güç üretimi merkezlerinde, askeri amaçlı kullanımda, deniz feneri, orman gözetleme kuleleri, otomobil ve çeşitli kara taşıtlarında, deneysel olarak hava ve deniz taşıtlarında ve yoğunluklu olarak uzay çalışmalarında kullanılmaktadır.

Güneş arabası, hafif ağırlıkta orta güçte çalışan, enerjisini güneşten alan arabalardır. Kısıtlı sayıda ( genelde bir bazen iki kişilik ) oturma yeri, çok az taşıma kapasiteleri vardır ve sadece gündüz kullanılabilirler. Ancak gelecek teknolojiler açısından daha pratik uygulamalar için kusursuz fırsatlar sağlayabilirler.

Güneş arabaları güneşten aldığı enerjinin toplanarak elektrik enerjisine dönüştürmeleri sonucu hareket eder. Güneş arabalarının üzerine monte edilen güneş hücreleri toplanılan bu enerjinin elektrik enerjisine çevrilmesi için pillere ya da motora iletilmesini sağlar. Genellikle bu araçlar 700–1500 Watt gücünde çalışırlar. Güneş arabalarının dizaynında aerodinamik sürtünme, ağırlık ve titreşimler çok büyük rol oynar.

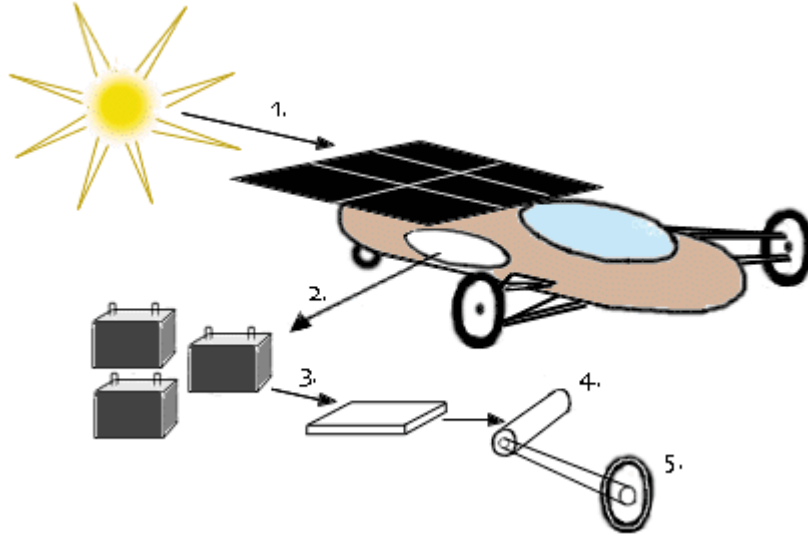
Güneş arabaları, üretimleri aşamasında işlemin kolaylaşması amacıyla sistemlere ayrılmışlardır. Bu sistemler;

- Şasi sistemi
- Süspansiyon sistemi
- Direksiyon sistemi
- Fren sistemi
- Kasa sistemi

- Bağlantı sistemi
- Güneş paneli sistemi
- Pil sistemi
- Mikro sistem
- Motor sistemidir.

#### Güneş arabasının çalışma yapısı

1. Güneş enerjisi arabanın üzerinde yer alan fotovoltaik pillerden oluşan paneller sayesinde elektriğe dönüştürülür.
2. Elektrik enerjisi pillerde depolanır. Araba hareket halindeyken panellerden gelen elektrik direkt olarak motora aktarılır.
3. Motorlarda bulunan modern elektrik motor kontrolörleri bu enerjinin verimli ve düzgün bir şekilde kullanılmasını sağlar. Aracın hız kontrolü gaz pedalıyla sağlanır.
4. Motordan gelen hareketin tekerleğe iletimi sürtünmeyi minimuma indirgeyecek ve verimi en üst seviyede tutacak şekilde oluşturulmalıdır.
5. Gelişmiş teknolojinin kullanıldığı araçlarda vites sistemine ihtiyaç duyulmaz. Vites değişimi direk olarak elektrik motoru sayesinde gerçekleşir.

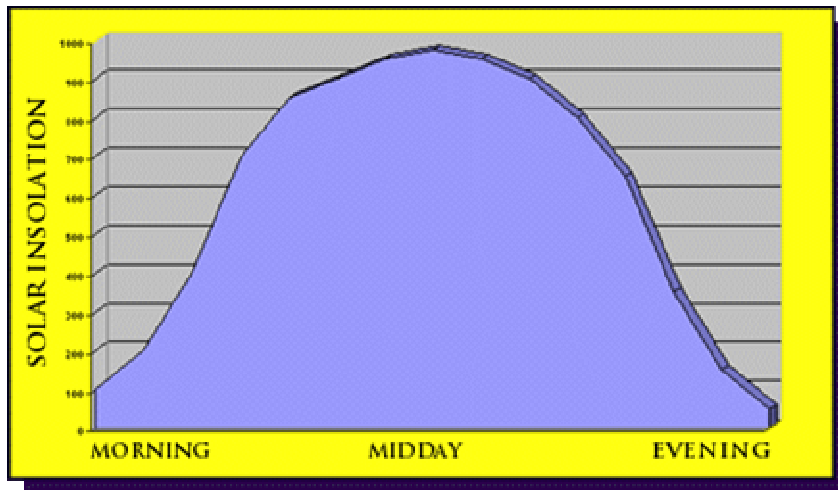


Şekil 3.12. Güneş arabasının çalışma yapısı [11]

### Güneş arabasının temelleri

Güneş arabasının temelleri sekiz ana başlık altında incelenecektir.

### *Güneş arabası için enerji akışı*

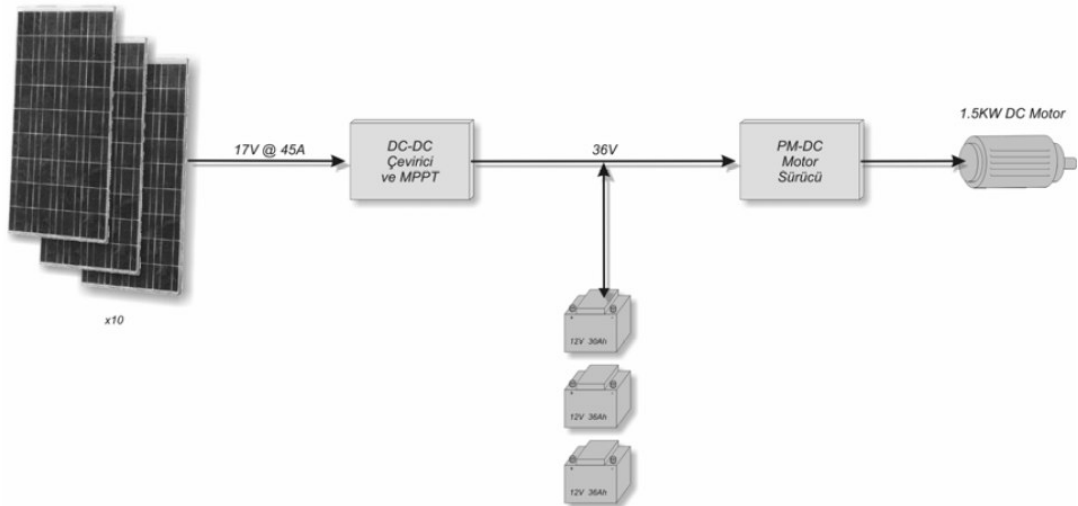


Şekil 3.13. Güneşli bir gün için tipik güneş etkisi değişimi [11] (Solar Insolation: Güneşlenme Süresi, Morning: Sabah, Midday: Gün Ortası, Evening: Akşam)

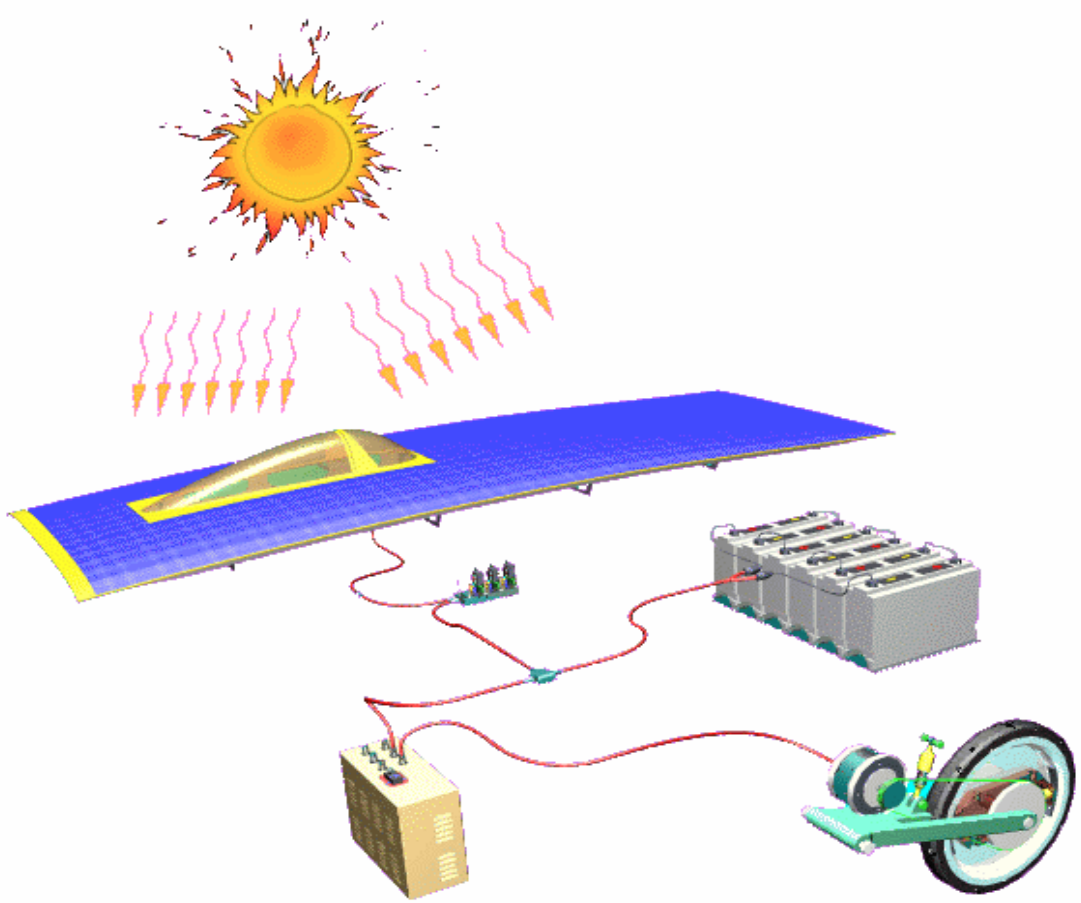
Güneşten gelen enerji yerküreye bütün gün boyunca çarpar. Ancak enerjinin miktarı günün hangi saati olduğuna, hava koşullarına ve coğrafi konuma bağlı olarak değişiklik gösterir. Kullanılabilir güneş enerjisi miktarı güneş ışınımı olarak bilinir ve genellikle metrekare başına düşen güç miktarı ile ölçülür [11].

Elektrik sistemi üreteçler, gerilim çeviricileri, almaçlar ve şalterlerden oluşmaktadır. Elektronik sistem, elektrik sistemi üzerinde bir etkisi olmayacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece sistemlerden birisindeki bir problemin diğerini etkilemesi engellenmiştir. Her aracın elektrik sistemi ve elektrik malzemelerinin seçimi verim ve güvenlik açısından önemlidir. Güneş enerjisi ile çalışan aracın elektrik sisteminde üç ana unsur vardır. Bu unsurlar; akım üretici, enerji depolama elemanları ve yük şeklindedir. Bunlara sigortalar, kablolar ve komütatörler de eklenebilir.

Güneş enerjisiyle çalışan aracın elektrik sisteminin genel bir bakış açısıyla çizilmiş hali Şekil 3.14'de gösterilmiştir. Çizimde oklar akımın dolaşma yönünü göstermektedir.



Şekil 3.14. Aracın elektrik sisteminin genel hatlarıyla çizimi [7]



Şekil 3.15. Güneş enerjili arabaların temel elektrik sistemi [11]

Güneş ışığı, bir elektrik akımı üreten güneş panellerinin her bir hücresi tarafından emilir. Enerji (akımı) depolanmak üzere pillere, araca güç vermek için direkt olarak motor kontrolörüne veya ikisine birden gidebilir.

Genel olarak eğer araba hareket halindeyse elektrik akımına çevrilmiş güneş ışığı direkt olarak motor kontrolörlerine iletilir. Bu durumda artan enerji sonraki kullanımlar için pillerde depolanır.

Güneş panelleri motoru istenilen hızda çalıştırmaya yetecek enerjiyi üretmediğinde panelin enerjisi pillerde depolanan enerjiyle desteklenir. Araba hareket halinde değilken güneş panelinden gelen bütün enerji pillerde depolanır.

Güneş arabasını hareket ettirmek için kullanılan enerjinin bir kısmını yerine koymak için şöyle bir metot vardır. Araba normal mekanik frenleri kullanmak yerine, motor frenlemesi yapıldığında motor jeneratör halini alır ve enerji motor kontrolörü vasıtasıyla pillere geri yollanır. Bu metoda rejenaratif frenleme denir (yeniden üretici frenleme) [11].

Elektrik sisteminde enerji kaynağı olarak her birisi 80 W gücünde elektrik enerjisi üretebilen 10 adet güneş paneli bir birlerine paralel bağlanmıştır. Anlatıldığı üzere, güneş panellerinin ürettikleri akım, coğrafi konum, mevsim ve hava durumuna bağlı olarak değişmektedir. Bunun yanında güneş panellerinin çıkış gerilimleri ise panelden çekilen akıma göre doğrusal olmayan bir şekilde değişmektedir. Bu durum giriş gücünün değişken olmasına sebep olmaktadır. Giriş gücündeki bu değişim MPPT (Maximum Power Point Tracker - Maksimum Güç Noktası İzleyici) devresi yardımıyla en üst noktada tutulur ve çıkış gerilimi, giriş geriliminin düşmesinden dolayı elektrik sisteminin devre dışı kalmasını engelleyebilecek bir seviyeye dönüştürülür. MPPT devresi güneş panellerinin ürettiği 17V'luk gerilimdeki 45A'lık akımı 36V (Pratikte bu gerilim 41.1V'tur) ve 22A'e çevirir. MPPT devresi bu gerilim çevrimini olabilecek en iyi verimle gerçekleştirmeli ve güneş pillerinin elektrik modelinden kaynaklanan verim düşüşünü de engellemek için mikro denetleyici tarafından yürütülen bir algoritmaya da sahip olmalıdır.

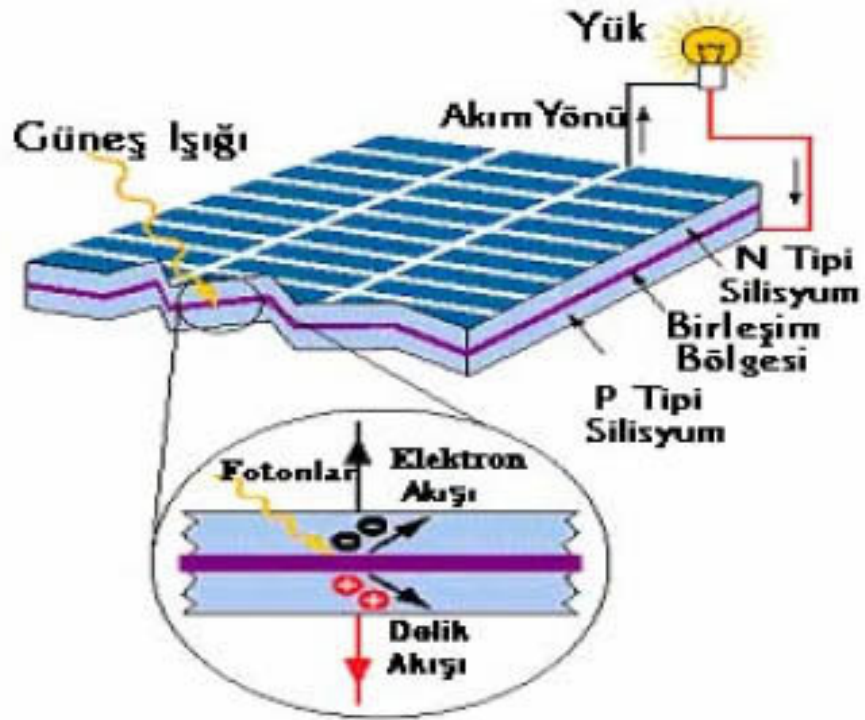
Güneş enerjisi ile çalışan araçlarda enerjini kaynağının temel kullanım amacı sistemdeki batarya ya da akü gurubunun şarj edilmesidir. Çünkü elektrik sistemi üzerindeki alıcı, elektrik sistemine ani yüklenmeler yapacaktır. Bu gibi durumlarda aküler bu yüksek güç ihtiyacını karşılayacaktır [7].

### *Güneş hücreleri*

Güneş hücreleri güneşten gelen enerjiyi elektrik enerjisine çevirirler. Güneş ışığındaki fotonlar, elektronları yarı iletken metalik bir yonga plakasının bir katmanından bir diğer katmanına hareket ettiren enerjiyi sağlar. Elektronların bu

hareketi bir akım yaratır.

İki tür güneş hücresi kullanılmaktadır: silikon ve gallium arsenid. Uydular gallium arsenidi kullanırlarken silikonlar ise genellikle yerküredeki uygulamalarda kullanılmaktadır.



Şekil 3.16. Güneş hücresinin elektrik üretimi [11]

Şekil 3.16'da bir güneş hücresinin nasıl elektrik ürettiğini açıklamaktadır. Pilin üst tabakaları yansımayı önleyici kaplama ve korumalardan oluşur. Güneş hücreleri son derece kırılğan olduklarından böyle bir koruma çatlama ve kırılmaları önlemek açısından gereklidir. Aksi halde pilin çalışması sekteye uğrar ve bu da enerji kaybına sebep olur. Işık bu katmanlara nüfuz ettiğinde silikon veya gallium arsenide çarpar. P ve N tabakaları arasındaki bölümlerin farklılıkları sebebiyle güneşten gelen enerji bunlara çarptığında elektronların P tabakasından N tabakasına akışı sağlanmış olur. P ve N tabakaları arasına tel çekilmek suretiyle güneş hücresi artı ve eksi kutuplara sahip bir pil halini alır ve böylelikle bir araca güç sağlamak için kullanılabilir.

Depolama özelliği gösteren araçlarda piyasada bulunabilen yerküre bazında kullanılan silikon piller kullanılır. Tek tek sayısız piller (bine yakın) “Güneş Panelini” oluşturmak için bir araya getirilir. Kullanılan motora bağlı olarak bu paneller 50 ile 200 Volt arasında işler ve 2000 Watt’a kadar güç sağlayabilirler. Güneş ışığının yoğunluğu, havanın bulutu olması ve hava sıcaklığı güneş panelinin ürettiği gücü etkiler.

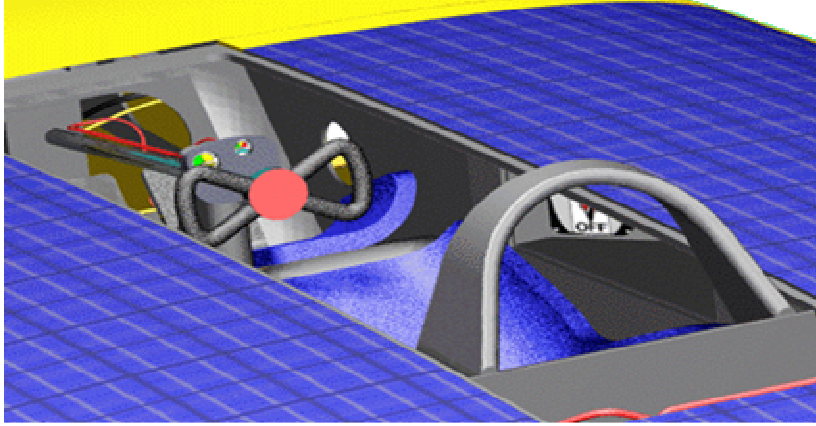
Diğer tip güneş arabalarında ise herhangi bir tip güneş hücresi kullanılabilir. Bu esneklik sebebiyle birçok güneş arabası takımı uzayda kullanılan gallium arsenid güneş hücrelerini kullanırlar. Bu piller geleneksel silikon pillere oranla genellikle daha ufak ve çok daha pahalıdırlar. Ancak bunlardan çok daha verimlidirler. Bu iki pil arasındaki güç farkı 1000 Watt’a kadar çıkabilirken maliyet en az 10 kat daha fazladır.

Fotovoltaik piller ise bunlara göre daha yeni bir teknolojidir. Bu pillerin gelişimi ve kullanımını uzay yolculuğu ve iletişim uyduları sistemlerinin geliştirilmesi için kullanılan teknolojinin bir parçası olarak karşımıza çıkmıştır.

### *Sürücü kontrolleri*

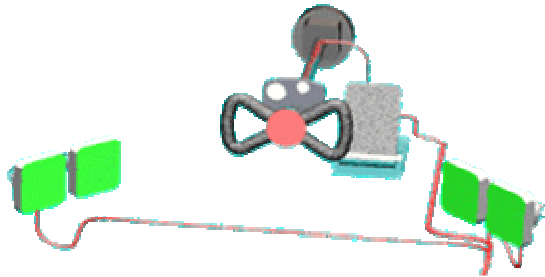
Çoğu güneş arabası tek koltuklu ve sürücüler için çok az konfor sağlayan arabalardır. Çok az araba bir yolcu ya da bir gözlemci taşıyabilir. Sürücüler ve yolcular rahatsız koltuklarda kramplara sebep olan oturma pozisyonları ve yüksek kokpit sıcaklıkları ile karşılaşırırlar.

Güneş arabalarında normal arabalarda karşılaştığımız türden standart özellikler vardır; örneğin, dönüş sinyalleri (ön ve arka) stop lambaları, gaz pedalı, aynalar, havalandırma ve genellikle direksiyon.



Resim 3.5. Güneş arabası kasa direksiyon bağlantısı [11]

Sürücülerin ve yolcuların güvenliğini sağlamak için 5 ya da 6 noktada güvenlik aksamı ve kasklar vardır. Arabayı kullanmanın yanı sıra sürücünün en önemli işlemi, arabanın sistemlerini gözlemlemek ve muhtemel problemleri izlemektir.



Resim 3.6. Gaz pedalı direksiyon arası bağlantı sistemleri [11]

### *Elektrik sistemi*

Güneş arabalarının kalbi piller ve güç sisteminden oluşan elektrik aksamıdır. Sisteme giren ve sistemden çıkan bütün güç bir kontrolör ile denetlenir.

Pil grubu normal bir arabadaki benzin depoları gibidir. Güneş arabasındaki bu pil grubu, enerjinin daha sonraki kullanımlar için saklanması sağlar. Güneş enerjisi hareket etmeye bu dolu pil grubuyla başlar ancak harekete başladıktan sonra güneş panellerinde üretilen enerji pilleri yeniden doldurmak için kullanılır. Pilin kapasitesi

pilin tipine göre değişiklikler gösterir. North Amerikan Solar Challenge (Kuzey Amerika Güneş Arabası Yarışmaları) takımları şu pil tiplerini kullanmaktadırlar.

- Lead - Acid (kurşun-asit)
- Nikel - Metal - Hidrit(NiMH)
- Nikel - Kadmiyum (NiCad)
- Lityum - İyon
- Lityum Polimer
- Nikel – Demir

NiCad, NiMH ve Lityum piller, daha yaygın Kurşun – Asit pillere oranla daha ileri bir güç seviyelerine ulaşmalarına karşın, daha dikkatli kullanım gerektirirler ve daha masraflıdırlar.

Pil grubu birbirinden ayrı ve tellerle bağlı çeşitli modüllerden oluşmuştur. Bunlar gerekli voltajı üretirler. Genelde arabaların elektrik sistemine bağlı olarak 84 ve 108 volt arasında sistem voltajı kullanılır. Kimi arabalar daha düşük voltajda da çalışır.

Güç sistemleri bu araçların en karmaşık ve ayrıntılı bileşenlerini oluştururlar. Bir güç sisteminde, güç bağlantı hatları, motor kontrolörü ve data edinme sistemi bulunur. Güç sisteminin birincil işlevi sistem içerisindeki elektriği izlemek ve denetlemektir. Güneş panelleri pilleri doldururken güç sistemi pilleri aşırı yüklemekten kaynaklanan zararlardan korumaya yardımcı olur.

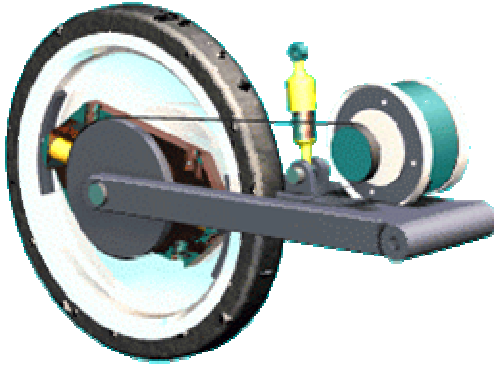
Motor kontrolörü gaz pedalından gelen sinyaller temelinde motora gönderilen elektriği denetler. Motor kontrolörü içerisindeki elektriği idare etme süreçleri bu tartışmanın dışındadır. Üreticiler genelde motor kontrolörünü motorla birlikte sunarlar.

Çoğu güneş arabası bütün elektrik sistemini denetlemek için karmaşık bir data

edinme sistemi kullanırlar. Tekrarlamak gerekirse tam bir elektrik sisteminin şu bileşenleri vardır; güneş panelleri, piller, motor kontrolörü ve motor. En basit haliyle bir arabada, pil voltajının ve akımının sürekli denetlenmesi gereklidir. Data edinme sisteminden elde edilen bilgi aracın karşılaşıacağı problemlerin çözümünde faydalı olacaktır.

### *Sürüş takımı*

Güneş arabasının sürüş takımı normal bir arabaninkinden oldukça farklıdır. Konumuz açısından belirtmek gerekirse sürüş takımı elektrik motoru ve motor gücünün tekerleklere iletilmesini sağlayan ve dolayısıyla arabayı hareket ettiren araçlardan oluşmaktadır. Üretilen düşük enerji miktarı (5 beygir gücünden daha az) sebebiyle güneş arabaları genellikle tek çekişli olur.



Resim 3.7. Tekerlek ve motorun bağlantısı [11]

Güneş arabasında kullanılan motorun tipi açısından bir sınırlama yoktur. Motorlar genellikle 2 ila 5 beygir gücü arasında olurlar. En yaygın motor tipi, çift sargılı fırçasız DC motorlardır. Bu motorlar oldukça hafiftir ve devir gücünde % 98 verim sağlar. Ancak standart bir fırçalı DC motordan daha pahalıdırlar.

Çok vitesli transmisyonlar güneş arabalarında nadiren kullanılır. Çift sargılı motorlar elektronik transmisyon olarak kullanılabilirler. Sargılar arasındaki geçişler motorun

hız oranında değişiklikler yapar. Düşük hızdaki sargılar kalkış ve geçiş için yüksek tork sağlarlarken, yüksek hız sargıları daha yüksek verimliğe sahiptir ve normal sürüş için en uygundur.

Güneş arabalarında 3 çeşit temel transmisyon tipinin farklı varyasyonları kullanılır.

- Tek indirgemeli doğrudan tahrikli sürüş
- Değişken oranlı kayışlı sürüş (Variable ratio belt drive)
- Hub Motor

Geçmişte güneş arabalarında en yaygın motor tipi doğrudan tahrikli transmisyon idi. Bu tipte motor bir zincir ya da volan kayışı vasıtasıyla tekerleğe bağlıdır. Bu güvenilir ve kolayca tamir edilebilir bir transmisyon şeklidir. Tabi ki hızlanma sırasında özel bir önem gösterilirse. Verimlilikleri düzgün tasarlandığında % 75'i bulur.

Çok az arabada gücü tekerleklere iletmek için değişken oranlı kayışlı sürüş kullanılmıştır. Vites aralığı motorun hızı arttıkça değişkenlik gösterir. Bu da düşük hızlarda motora daha fazla kalkış torku kazandırır. Ancak yine de araba yüksek hızda daha verimli bir sürüş kazandırır. Değişken oranlı kayışlı sürüş tam bir hızlanma ve dikkatli bir kurulum sağlandığında verimli bir şekilde çalışır.

1995 yılından itibaren vites kutusuz sürüşün yaygınlığı artmıştır. Hub motor herhangi bir dış transmisyon ihtiyacını ortadan kaldırır çünkü motor shaftı bu geçişi tekerlek üzerinden direkt olarak sağlar. Bu durum sürüş takımının verimliliğini çok büyük oranda artırır ve tekerleği hareket ettirmek için gereken hareketli parçaların sayısını azaltır. Bir hub motoru düşük vites eksikliğini telafi etmek için düşük beygir gücü kullanır. Sonuçta bu durum sürüş takımının verimliliğinde kademeli bir düşüş eğilimine neden olur ancak sürüş takımları hala % 95'e varan bir verimlilik gösterebilmektedir. Ancak yine de bu tür bir motorun kullanılması diğer metotların hepsinden çok daha sade ve çok daha verimlidir.

### *Mekanik sistemler*

Prensipte bir güneş arabasının mekanik sistemleri son derece basittir. Tasarım hedefleri çeşitli yol durumlarıyla başa çıkmak için gerekli gücü sağlarken sürtünmeyi ve ağırlığı en aza indirmektir. Titanyum ve bileşik metaller gibi hafif metaller verimli bir araç için gerekli olan dayanıklılık ve ağırlık oranını maksimize etmek için kullanılır. Mekanik sistemler süspansiyon, frenler, direksiyon, tekerlekler ve lastiklerden oluşur.

Araçlar tipik olarak üç ya da dört tekerleklidir. Genel üç tekerlekli konfigürasyonun iki ön tekerleği ve bir arka tekerleği vardır. Dört tekerlekli araçlar bazen geleneksel araçlar gibi tasarlanırlar.

Çoğu süspansiyon sistemleri güneş arabalarına uygulanabilir. Bunun sebebi arabalar arasındaki kasa ve şasi tasarımları açısından görülen belirgin çeşitliliklerdir. En çok kullanılan ön süspansiyon çeşidi çift çatal süspansiyondur. Çatal süspansiyonu (üç tekerlekli araçlar için) motosikletlerdekine benzemektedir ve arka tekerlekte kullanılır.

Güvenlik son derece önemli bir konudur. Bu nedenle güneş arabaları standart frenleme performansını mutlaka yakalamalıdır ve her güneş arabasında iki bağımsız fren sistemi bulunmalıdır. Disk frenleri ayarlanabilirlikleri ve frenleme güçleri sebebiyle en çok kullanılan frenlerdir. Bazı arabalarda mekanik olarak hareket ettirilen frenler kullanılırken bazılarında hidrolik frenler tercih edilir. Mekanik frenler hidrolik frenlere oranlara genellikle daha küçük ve daha hafiftirler ancak bunlar kadar frenleme kuvveti sağlamazlar ve düzenli ayar gerektirler.

Güneş arabasının direksiyon sistemleri büyük çeşitlilik gösterir. Aracın yönlendirilmesi faktörleri için kritik olan tasarım güvenilirlik ve verimli performanstır. Direksiyon sistemi tam bir sıralama ile tasarlanır. Çünkü en ufak bir sıralama hatası önemli kayıplara ve yüksek lastik aşınmasına sebep olabilir.

Yakın geçmişte araçlarda hafif ve düşük sürtünme sağlayan bisiklet tekerlekleri ve lastikleri kullanılmaktaydı. Bu tekerlek ve lastikler genellikle aracın ağırlığı arttıkça aşırı yüklemeye maruz kalırdı ki bu durum performansı ve güvenliği son derece etkilerdi. Ne var ki güneş arabası yarışlarının popülerleşmesi sebebiyle bir kaç üretici firma sadece güneş arabaları için tasarlanmış lastikler tasarlamaya başladılar. Bu lastikler düşük sürtünme katsayısına sahip hafif lastiklerdir. Hem güvenliği hem de performansı arttırırlar.

### *Güneş Paneli*

Güneş paneli aracın tek güç kaynağıdır. Bu panel birçok ( genellikle yüzlerce) fotovoltaik güneş hücrelerinden oluşur. Bu piller güneş enerjisini elektriğe çevirir.

Her bir hücre tellerle birbirine bağlıdır ve bunlar bir dizi oluştururlar. Birkaç dizi ise nominal pil voltajına yakın bir voltaja sahip bir kesit veya bir panel oluşturmak için tellerle birbirlerine bağlanır. Hücreleri birbirine bağlamanın çeşitli metotları vardır. Ancak ilk hedef mevcut boşluğu mümkün olan en çok güneş hücresiyle doldurmaktır. Güneş hücreleri son derece kırılğandır.

Güneş panelinin ürettiği gücün miktarı havanın durumuna, güneşin ve güneş panelinin konumuna bağlıdır. Açık güneşli bir öğleden sonra tipik bir güneş arabası panelleri 1000 Watt'ın üzerinde (1,3 beygir gücü) güç üretebilir. Panelin ürettiği güç elektrik motoruna güç vermek için kullanılır veya daha sonraki bir kullanım için pil takımında depolanır.



Resim 3.8. Güneş panelleri [46]



Resim 3.9. Sharp NE-80EJE güneş paneli [11]

### *Gövde ve şasi*

Bir güneş arabasının en ayırt edici kısmı gövdesidir. Güneş arabaları çeşitli gövde sınıflarına ayrılabilir ancak her araba kendine özgüdür, zira boyut sınırlamaları dışında hiçbir standart yoktur.

Gövde tasarlanırken temel hedefler aerodinamik sürtünmeyi en aza indirmek ve güneş ışınımına maruz kalmayı en yükseğe çıkarma, ağırlığı en aza indirme ve en yüksek güvenliği sağlamaktır.

Verimli bir güneş arabası şasisi geliştirilirken zorluk çıkartacak ilk şey, en yüksek dayanıklılığı ve güvenliği sağlarken, ağırlığı en aşağıya çekmektir. Her ekstra kilo, üretilmesi gereken daha fazla enerji demektir. Bunun anlamı, tasarımda ağırlığı en aza indirmekle uğraşılmasıdır. Ve burada da odaklanılması gereken şey şasidir. Ancak güvenlik birincil meseledir ve şasi tam dayanıklılık ile güvenlik gerekliliklerini sağlamalıdır.

Güneş arabalarında kullanılan üç tip şasi vardır:

- Uzay Çerçevesi
- Yarı - monokok
- Monokok

Bir uzay çerçevesi şaside, yükleri ve gövdeyi taşımak için birbirine bağlanmış ya da kaynakla eklenmiş tüp yapısı kullanılır. Gövde, şasiye ayrı olarak eklenen hafif, yük taşıyamayan bileşik bir kaplamadır. Yarı - monokok şaside ise yükleri taşımak için bileşik kirişler ve bölmeler kullanılır. Monokok şasi de ise yükleri taşımak için gövde yapısı kullanılır. Her üç tip şasi de dayanıklı hafif araçlar ortaya çıkarır. Birçok güneş arabasında bunların birer kombinasyonu kullanılır [11].

### 13.3.2. Güneş enerjisinin avantajları ve dezavantajları

Güneş enerjisinin avantaj ve dezavantajları aşağıda açıklanmıştır.

#### Avantajları:

- Ekonomik değerlendirmelerde, fosil yakıtların sebep olduğu emisyonlardan kaynaklanan çevre kirliliği ve diğer dış maliyetler göz önüne alındığında, güneş enerjisi, çevre kirliliğine yol açmaz.
- Güneş enerjisi yenilenebilirdir.
- Hemen her yerde bol miktarda bulunabilir.
- Güneş enerjisi çok büyük potansiyele sahip, temiz ve güvenilir bir enerji kaynağıdır.

#### Dezavantajları:

- Kesikli bir enerji kaynağıdır. Sadece güneşin görüldüğü zaman dilimlerinde vardır.
- Değişken ve dağınıktır. En fazla ihtiyaç duyulduğu dönemlerde en az, aksine durumlarda da en fazla miktarda mevcuttur.
- Taşınamaz bir kaynaktır.
- Taşıma amacı ile (elektrik pilleri ve yüksek kapasiteli aküler olmadığında) kullanılamaz.
- Güneş enerjisinden elektrik üretimi için ilk yatırım maliyetleri alışılmış kaynaklara göre oldukça yüksektir.
- Çoğu zaman enerji çevrim teknolojileri yeterince gelişmemiştir [20].

### 3.4. Alternatif Yakıtların Ulaştırma Sektöründe Kullanımıyla İlgili Dünyada Yapılan Çalışmalar

Hidrojen üretimi için kullanılan birçok yöntem arasında üç sistem ayrıntılı olarak incelemeye tabi tutulmuştur:

- Buharla iyileştirme
- Metanol kraking
- Elektroliz

Otobüslerde kullanılacak hidrojeni üretmek için en uygun sistemin Metanın Buharla İyileştirilmesi Yöntemi (SMR) olduğu sonucuna varılmıştır.

Hidrojen depolama sistemi olarak basınçlı ya da sıvı hidrojen depolama ile metal hibrit depolama sistemleri düşünülmektedir. Sıvı hidrojen pahalıdır ancak az yer işgal eder, otomobiller için uygundur. Kent içi otobüsler için Basınçlı Hidrojen Gazı tercih edilir çünkü otobüsün üstünde depolar için yeterli yer vardır. Otobüslerin kesintisiz hizmet vermesi için günlük tüketimin iki katı hidrojen depo edilmelidir, örneğin günlük ihtiyaç 300 kg olursa 600 kg hidrojen alacak depo kullanılmalıdır ve hidrojen basıncı 35 MPa olmalıdır. Bu durumda 25 m<sup>3</sup> depoya ihtiyaç vardır [41].

Otomotiv sektöründe hedef, içten yanmalı motorların yerine 75 kW gücünde yakıt hücre sistemlerini yerleştirmektir. Yakıt hücreli otomobillerin büyük miktarlardaki üretimi 2006 ile 2010 yıllarında gerçekleşmesi beklenmektedir.

Güç kaynağı olarak yakıt pillerinin kullanıldığı taşıtların kısımları temel olarak; yakıt pili, elektrik motoru, elektronik güç kontrolü ve yakıt tankından oluşmaktadır. 1990'lı yılların başında hemen hemen bütün büyük otomobil şirketleri yakıt pilleriyle çalışan otomobillere yönelik araştırma programı başlatmışlardır. Bu şirketlerden Daimler-Benz ve Toyota ürettikleri projelerle diğer şirketlerin önüne geçmişler ve

ortak bir çalışma grubu oluşturmuşlardır. Aynı günlerde yakıt pilleri alanında araştırma çalışmalarını destekleyen Ballard firması Daimler-Benz ortaklığının dörtte bir hissesini satın almıştır.

Ballard Daimler-Benz ortaklığı neticesinde 1994 yılı Mayıs ayında PEM yakıt pilleriyle çalışan ilk otomobil olan NECAR I (New Electric Car) üretilmiştir. NECAR I iki kişi taşıyabilmekte ve bir depo hidrojen yakıtıyla 130 km yol alabilmektedir. İki yıl sonra NECAR II üretilmiştir. NECAR II altı kişi taşıyabilmekte ve bir depo yakıtla 250 km yol kat edebilmektedir. NECAR I'den % 20 daha hafif olan bu minibüsün erişebildiği en yüksek hız 90 km/saat'tir. 1997 başlarında kent içi ulaşımında geleneksel otobüsler gibi rahatlıkla kullanılabilen ve 250 km menzili olan NEBUS adlı otobüs üretilmiştir. NEBUS çatısındaki güneş panelleri sayesinde ek bir elektrik üretimi de gerçekleştirebilmekteydi. Aynı yılın Eylül ayında NECAR III üretime geçmiştir. NECAR III önceki üç taşıttan özellikleri bakımından farklıdır. Bu araçta yakıt olarak hidrojen değil metanol kullanılmıştır. Metanoldeki hidrojen, otomobilin seyri sırasında ayrıştırılıp yakıt pillerine sevk edilmiştir. Taşıtlarda metanol için gerekli yakıt deposu hidrojeninkinden çok daha küçük ve hafiftir. NECAR III bir depo (40 litre) metanolla 400 km yol alabilmektedir. Daha önceki modeller gibi NECAR III'ün de egzoz borusundan yalnızca su buharı çıkmaktadır.

NECAR I ve NECAR II yakıt olarak doğrudan hidrojeni kullanıyorlardı. Yakıt deposunun ve diğer aygıtların büyüklüğü nedeniyle bu taşıtlar minibüs tipindeydi. Ancak NECAR III'te yakıt olarak metanolün kullanılması sayesinde yakıt deposu çok küçültülmüştür. Donanımın geri kalanındaki küçülme sonucunda da günümüz otomobillerinden hiçbir farkı olmayan bir elektrikli otomobil ortaya çıkmıştır.

1999 yılında Hamburg'da düzenlenen Uluslararası Yılın Motor Ödülleri yarışmasında en iyi motor düşüncesi dalındaki ödülü NECAR IV almıştır. Bu taşıttaki yakıt pili teknolojisinin arabalarda geleceğin yakıt sistemi olduğu düşünülmektedir. NECAR IV Mercedes-Benz'in A serisi temel alınarak yapılmış ve yakıt olarak sıvı hidrojen

kullanılmıştır. Bu otomobilde, yakıt pili hidrojen ve oksijeni reaksiyona sokarak aracın gitmesi için gerekli elektriği üretmektedir. NECAR IV sıfır emisiyona sahip ve bir tank yakıtla 280 mil (450 km) gidebilmektedir. Araç 145 km/s hıza ulaşabilmekte ve 5 kişi taşıyabilmektedir [1].

Yakın geçmişte, dünyanın en büyük otomotiv üreticisi General Motors (GM) ile bir başka dev BMW, sıvı hidrojenin araçlarda petrolün yerine yakıt olarak kullanılması amacıyla teknoloji geliştirmek için güçlerini birleştirdi. 2010 yılına kadar hidrojen yakıtı kullanan otomobilleri satışa sunmayı planlayan bu iki firmanın çabalarına ABD Senatosu da, aldığı bir kararla bu alandaki teknolojilerin geliştirilmesi için 3 milyar dolar para ayırarak katılmıştı. Sonunda bu gayretler meyvelerini vermeye başlamış, firmalar ardı ardına hidrojen ile çalışabilen prototip modellerini sergilemeye başlamıştır. Mitsubishi'nin prototip olarak ürettiği, hidrojen ile çalışan "Grandis" bir depo hidrojen ile 400 kilometre yol yapabilmekte ve egzozundan çıkan tek kirlilik su olmaktadır. BMW tarafından yine sıvı hidrojen ile çalışan "750hl" adlı bir aracın tanıtımını yapılmış ve bu aracın saatte 226 kilometre hız yaptığı söylenmiştir.

Fransa'daki Miramas Deneme Pisti'nde BMW, yeni ürettiği H2R adındaki hidrojen yanmalı motora sahip prototipi ile tam 9 alanda hız rekoru kırmıştır. Piste yerleştirilen sektörleri rekor zamanlarda geçen H2R, saatte 302 kilometre hıza ulaşmıştır. Bugün BMW'nin 760i ve 760Lİ Sedan modellerinde kullanılan 6 litrelik ve 12 silindirlik motoru ile 285 beygir güç üreten araç, 0–100 kilometre hızlanma süresini de 6 saniyenin altında tamamlayabilmektedir.

Aracın tasarımı, geliştirilmesi ve ortaya çıkartılması BMW Forchung und Technik GmbH tarafından 10 ay gibi kısa bir sürede tamamlanmıştır. H2R'de çok önemli olan güvenlik unsurları da göz ardı edilmemiştir. Sürücü koltuğunun yanında bulunan ve içerisinde 11 kilo likit hidrojen bulunan tanklar vakumla kaplanmıştır. Herhangi bir çarpışmada zarar görmesini ve dolayısıyla infilak etmesini önlemek için bu tanklar güçlendirilmiş ve 5 bara kadar tanklar güvence altına alınmıştır.

A.B.D. Başkanı G.W. Bush 28 Ocak 2003 tarihinde yaptığı bir konuşmada hidrojen enerjisini hürriyet yakıtı olarak tanımlamış ve bu alandaki çalışmalara destek amacıyla 1,7 milyar dolarlık bir kaynak ayrıldığını söylemiştir. ONSI Corporation adında bir Amerikan firması 200 kW enerji sağlayan fosforik asit tipi (PC25) yakıt pilinin pazarlamasını yapmaktadır.

Almanya'nın ise, Münih havaalanında çalışan otomobil ve otobüslerin hidrojen enerjisi kullanması yönündeki projeleri devam etmektedir.

İzlanda'da hükümet, üniversiteler, taşıma şirketleri, fabrikalar ve çok uluslu otomobil ve petrol şirketleri konsorsiyumu oluşturulmuş ve 2030 yılına kadar İzlanda'nın tamamen hidrojen enerjisine geçmesi planlanmıştır. Dünyanın ilk hidrojen dolun istasyonu Shell tarafından İzlanda'da açılmıştır.



Resim 3.10. Mercedes-Benz'in hidrojen yakıtlı bir otobüs modeli [20]



Resim 3.11. Shell tarafından açılan dünyanın ilk hidrojen dolum istasyonu [20]

Petrol şirketlerinin enerji ortamı olarak hidrojene bakışları kuşku dolu olsa da son yıllarda bu bakış açısı değişmektedir. Bu şirketlerden Londra'da Royal Dutch Shell, Shell Hidrojen adını verdikleri şubelerine hidrojen konusunda araştırma yapmaları için 500 milyon \$ yatırım yapmıştır. BP'de benzer bir girişimde bulunmuştur.

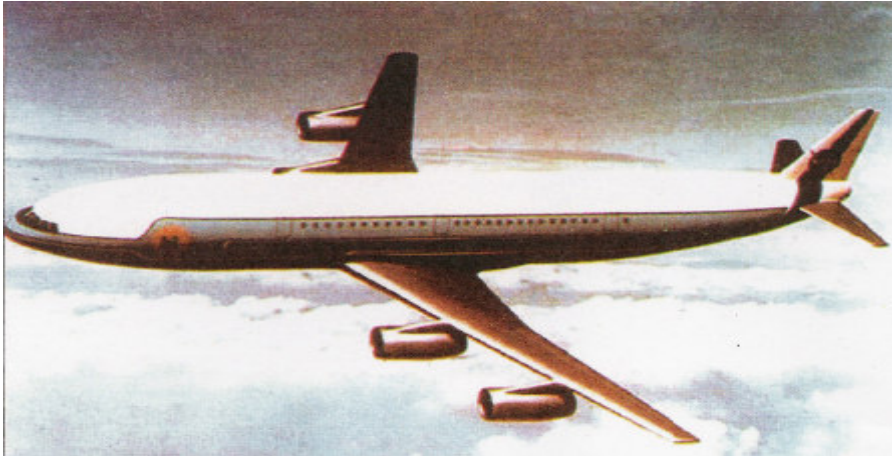
General Motor hidrojen enerji teknolojisinin kullanıldığı, 20 cm kalınlığında, 120 cm eninde, 240 cm boyunda bir platform ile dört tekerden oluşan bir otomobil üretimi projelendirmiştir. Projeye göre bu platforma sahip olan kişi istediği kaportayı takarak otomobilini kullanabilecektir. Bu otomobillerde içten yanmalı motor, piston ve krank bulunmadığından, bunun yerine, her tekerleğin göbeğinde 20 KW'lık müstakil elektrik motorları arabaya gerekli hareketi sağlayıp, yüksek emniyet içinde sistemin süper kompakt bir yapıya kavuşmasına olanak sağlanmaktadır.

Bunların dışında, % 15–20 hidrojen ve % 80–85 doğal gaz karışımından oluşan, Hytane adlı yakıt ile çalışan yeni bir otobüs 1993 yılından beri Montreal'de (Kanada) denenmektedir. Hidrojen, uzun yıllardır uzay mekiği ve diğer tüm roketlerde rakipsiz bir yakıt olarak kullanılmaktadır. Ancak, bunların dışında uçaklarda ilk kullanımı 1956 yılında B-57 Canberra deneme uçağında gerçekleştirilmiştir. Sovyetler Birliği

de 1988 yılında Tupolev-155 deneme uçağında yakıt olarak hidrojen kullanmıştır.

Dünya Enerji Ajansı Hidrojen Programı çerçevesinde yürütülen çalışmalarda, Airbus tipi uçakların yakıt olarak hidrojen kullanması 2007 yılında başlamıştır. Hidrojenin ticari uçaklarda yaygın kullanımı konusunda Avrupa Airbus konsorsiyumu ile Almanya-Rusya ortak çalışmaları sürmektedir.

Sıvı hidrojen doğrudan veya dolaylı olarak motorları ve dış yüzeyi soğutmak için de kullanılabileceği için, yüksek hızlı supersonik uçaklar için ideal bir yakıt olarak görülmektedir.



Resim 3.12. Lockheed sıvı hidrojen uçağı [20]



Resim 3.13. Airbus sıvı hidrojen uçağı [20]

Dünyanın ilk çift yakıt sistemli rotary motorunun çalışmalarına devam eden Mazda Motor, H2RE adını verdiği (Hydrojen Rotary Engine) motoru ile çalışan RX-8 aracını tanıttı. Mazda, 2006 yılı sonuna kadar hidrojen rotary ile çalışan on adet RX-8 model aracını pazara sunmayı hedeflemekteydi. 10 Şubat 2006 tarihinde Japonya'nın Land Infrastructure and Transport Bakanlığı'ndan izin alarak pazara sunulan araç otomotiv dünyasında bir ilki temsil ediyor. Konsept aracın sunumu sonrasında, 29 ay boyunca araç ile ilgili geliştirme çalışmalarına devam eden ve başarılı bir şekilde satışa sunan Mazda Motor, ilk anlaşmalarını Idemitsu Kosan Co. ve Iwatani International Corporation ile yaptı. Mazda H2RE, Mazda'nın birçok ödül almış RENESİS motorunun gelişmiş versiyonu ile çalışıp, aynı zamanda motor yuvasından elektronik olarak kontrol edilebilen hidrojen enjeksiyonu sistemine de sahip. Hidrojen/rotary kombinasyonu olan H2RE; aynı zamanda "0" düzeyinde CO<sub>2</sub> atığı ve "0"a yakın NOx atığı ile çevre dostu olarak da yüksek performans sağlıyor.

Tüm bunlara ilave olarak; bu yenilikçi motor var olan parçaların ve üretim tesislerinin kullanılmasından dolayı uygun bir maliyet ile üretilebiliyor. Daha da önemlisi H2RE motoruna sahip araçlar çift yakıt sistemi sayesinde hidrojen gaz istasyonlarına bağımlı kalmayarak, özgürce yollarda dolaşabilecektir.

Daimler Chrysler firmasının Stuttgart'taki, araştırma ve geliştirme departmanı mühendislerince, hidrojenin taşıtlarda kullanım çalışmaları sürdürülmektedir. Bu çalışmalara 1972 yılında başlandı. Daimler Chrysler firması yetkililerine göre, hidrojen yakıt olarak şehir içi taşımacılıkta rahatlıkla kullanılabilir. Bu çalışmalar doğrultusunda geliştirilen hidrojen yakıtlı otobüste, hidrojeni depolamak için metal hibrit yönteminden faydalanılmıştır. Daimler Chrysler firması metal hibrit kullanan taşıtlar konusunda en dikkat çekici çalışmayı yapan firmalardan birisidir. Benz firması, FeTi ve Mg<sub>2</sub>Ni metal hibritlerini beraber kullanarak, yakıt kaplarının ve kullanılan boruların ağırlığında bir azalma gerçekleştirdi. Taşıt için gerekli hidrojen gazı, düşük yükleme durumlarında, FeTi düşük sıcaklık hibritinden, yüksek yükleme durumlarında hem FeTi düşük sıcaklık hibriti hem de Mg<sub>2</sub>Ni yüksek sıcaklık hibritinden sağlanmaktadır.



Resim 3.14. Mazda firmasının hidrojen dolum istasyonu [2]

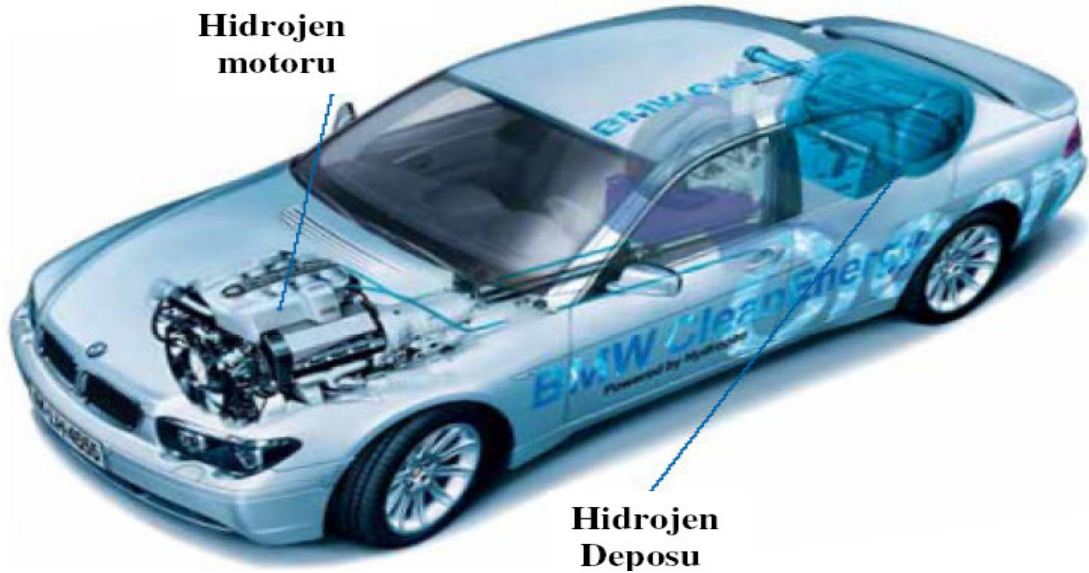


Resim 3.15. Mazda RX-8 [2]

BMW hidrojen yakıtı ile tahrik edilen motorlar üzerindeki çalışmalarına 1970'li yıllarda başlamıştır. 1986 yılında, hidrojen enerjisinin depolanması ve uygulama yöntemleri üzerinde araştırmalar yapan Alman Solar- Wasserstoff- Bayern Firması ile birleşmiştir. 3 yıl sonra BMW, hidrojen yakıtlı motorlar üzerinde performans testlerini gerçekleştiren ilk otomotiv firması olmuştur. Bugün yapılan yoğun çalışmalar sonucunda hidrojen yakıtı ile tahrik edilen taşıtlar kullanılabilir hale gelmiştir.

BMW hidrojen yakıtlı 6 silindirli 735 IL model bir prototip üretti. 211 beygir

gücündeki benzinli modelle karşılaştırıldığında, 140 beygir gücündeki hidrojen yakıtı kullanan motor, taşıta 170 km/h'lik bir hız kazandırıyor. Taşıt istenildiği zaman benzinle de çalışıyor. BMW'nin taşıtında hidrojen, sıvı olarak depolanmaktadır. Hidrojen sıvı halde en yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmaktadır; fakat tüm yakıt sisteminin 253 °C'de tutulması gerekmektedir. Vakum süper yalıtımlı 100 litrelik depoda sıvı halde bulunan hidrojen, ısı değiştiricileri yardımı ile gaz haline getirilir. Sınırlı seyahat mesafesi, doldurma esnasındaki güçlükler ve tehlike riski, deposundaki yakıtın buharlaşma kayıpları gibi dezavantajları olması, BMW'nin daha çok araştırma yapmasını gerektirmektedir.



Resim 3.16. Hidrojen yakıtlı BMW modeli [2]

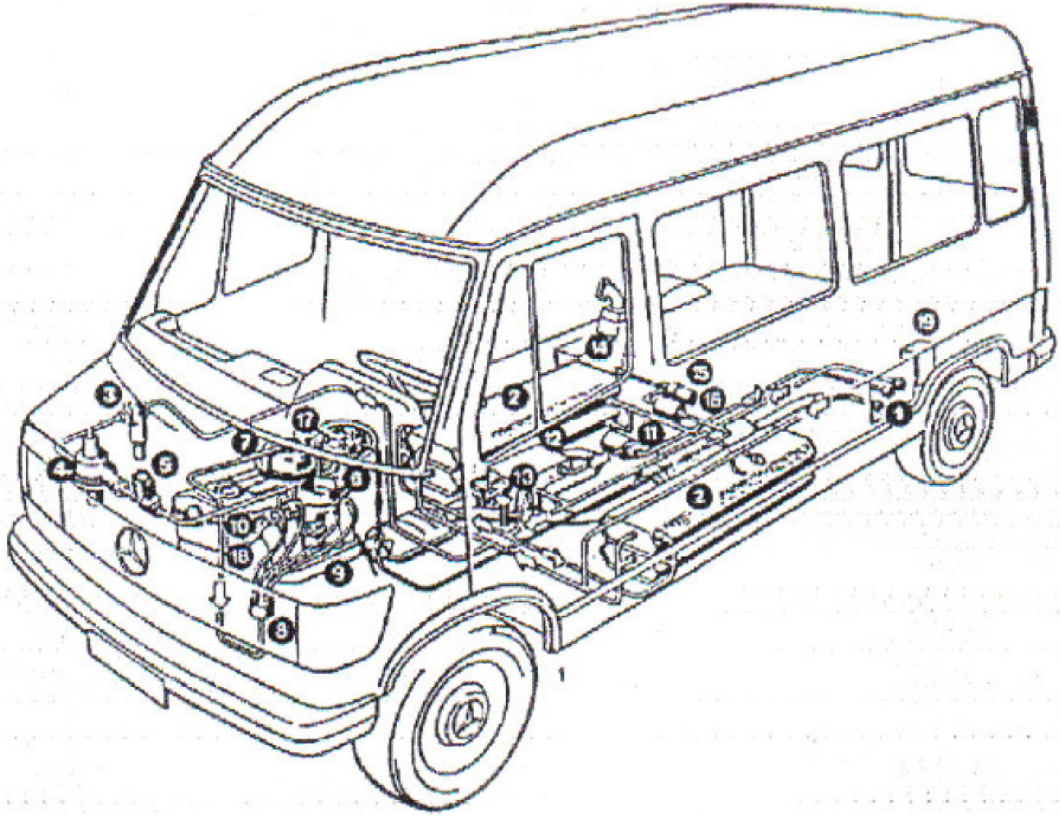
Billings Enerji Şirketi tarafından, 1975 Pontiac'ın, hidrojen yakıtı ile çalıştırılması amaçlanarak motor dönüşüm projesi gerçekleştirilmiştir. Dönüşümü yapılan aracın yakıt deposunun ağırlığı 136 kg, depodaki hidrid yakıtın ağırlığı ise 198 kg'dır. Deponun çapı 25,4 cm, uzunluğu ise 119,4 cm'dir. Bu otomobil 2,4 kg miktarındaki hidrojen yakıtı kullanarak yaklaşık olarak 241 km kadar mesafeyi kat edebilmektedir.

Motor yanma sıcaklığının düşürülmesi amacıyla, yanma odasına su püskürtülmüş ve böylece azot oksit emisyonları azaltılmıştır. Bu olay emme sübapları üzerine

konumlandırılmış 2 püskürme memesi vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Emme pompası ve selenoid valf el ile kontrol edilmektedir. Motor hava soğutmalıdır ve hidrojen miktarını kontrol eden selenoid valf sayesinde motorun sıkıştırma oranı sabittir.

Motorda, bahsedilen değişiklikler yapılarak hidrojen yakıtının kullanımı sağlandığında, motor gücü ve performansında çok az da olsa bir düşüş meydana gelmiştir.

Almanya'nın Daimler Benz firması tarafından geliştirilen Mercedes-Benz Hidrojen Kamyoneti çift hidrid sistemiyle çalışmaktadır. Bu taşıtın imalinde, FeTi ve magnezyum nikel hidridin bütün avantajlarından faydalanılması göz önünde tutulmuştur. Bu taşıt aynı zamanda hidrid havalandırma sistemini kullanmaktadır. Yolcu kabininden sağlanan ısı enerjisi ile hem hidridin sıcaklığı artırılır, hem de kabindeki sıcaklık düşürülerek bu bölümün soğutulması sağlanmış olur.



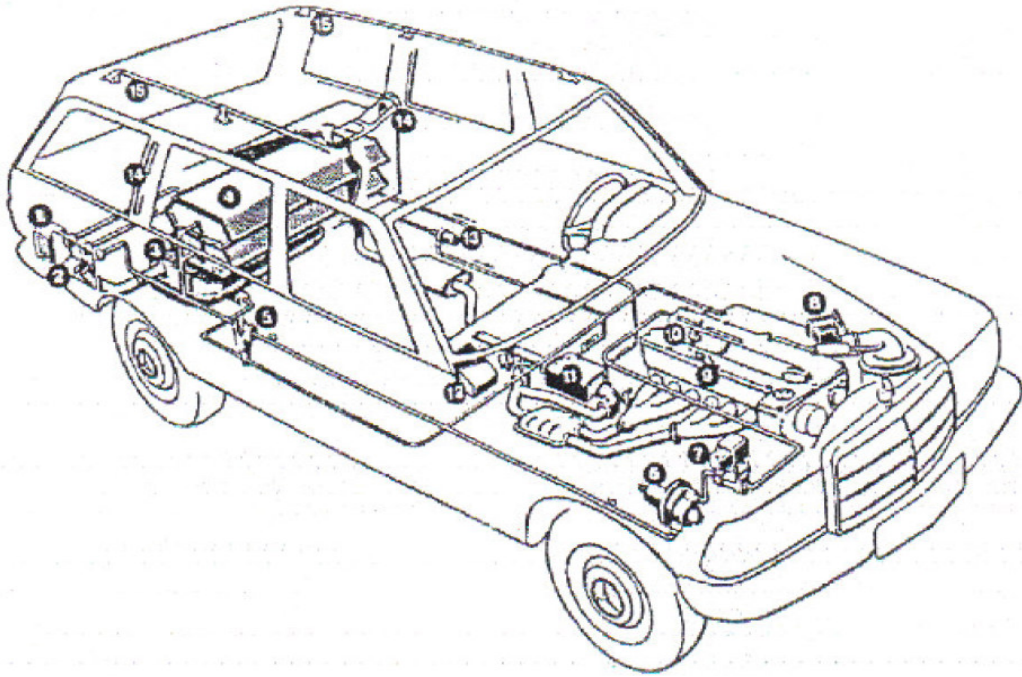
- |                                   |                                      |
|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Yakıt ikmal bağlantıları       | 11. Su pompası                       |
| 2. Hidrid deposu                  | 12. Egzoz gazı / su ısı değiştirgeci |
| 3. Filtre                         | 13. Egzoz kapakları                  |
| 4. Basınç regülatörü              | 14. Su deposu                        |
| 5. Selenoid valf                  | 15. Su basınç pompası                |
| 6. Hidrojen akış regülatörü       | 16. Filtre                           |
| 7. Diferansiyel basınç regülatörü | 17. Su akış distribütörü             |
| 8. Akış distribütörü              | 18. Su püskürtme memeleri            |
| 9. Emme manifoldu                 | 19. Elektronik sistem                |
| 10. Hidrojen püskürtme memeleri   |                                      |

Resim 3.17. Hidrojen yakıtı ile tahrik edilen Mercedes- Benz kamyonet [2]

Mercedes Benz bir yolcu otomobilinin, hem benzin hem de hidrojen yakıtı ile tahrik edilmek suretiyle dönüşümünü gerçekleştirmiştir. Mercedes-Benz Hidrojen Otomobili mevcut koşullara göre benzin veya hidrid yakıt ile tahrik edilmektedir. Araç uzak mesafelerde benzini, daha kısa şehir içi kullanımlarda ise hidrid yakıtını kullanmaktadır. Hidrojen yakıtı ile tahrik edilen taşıtın çeşitli mesafelerde kullanılmasıyla elde edilen test sonuçları Çizelge 3.3'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.3. Mercedes-Benz hidrojen otomobilinin test sonuçları [2]

Test	H <sub>2</sub> Tüketimi (m <sup>3</sup> )	Kat edilen mesafe (km)	Hız (km/h)	Vites
1	32	88	60	4
2	40	86	70	4
3	45	81	80	4
4	48	76	60	3
5	48	79	30	3
6	48	66	30	2
7	48	69	30	4
8	48	130	70	4



Resim 3.18. Hem benzin hem hidrojen yakıtı ile tahrik edilen Mercedes-Benz otomobil [2]

1. Elektronik sistem
2. Yakıt ikmal bağlantıları
3. Benzin deposu
4. Hidrid deposu
5. Filtre
6. Basınç regülatörü
7. Akış kesme vanası
8. Gaz kelebeği hareket motoru
9. Hidrojen yakıtı enjektörleri
10. Benzin enjektörleri ve egzoz gazı değiştirgeci
11. Kontrol kapakları
12. Elektronik kontrol
13. Isı değiştirgeci devridaim pompası
14. Hidrid deposuna giden hat
15. Yolcu kısmı

Örnek olarak, Amerikan Enerji Bakanlığı araştırma laboratuvarlarında yapılmış olan, 9.2:1 sıkıştırma oranlı bir Toyota 2TC motorunun hidrojenle çalıştırılması için yapılan çalışmada, mevcut buji yerine daha küçük 10 mm'lik iki adet buji

kullanılmış, daha iyi soğutma sağlayan iki adet egzoz sübabı, büyük sübabın yerine kullanılmış, pistonların ısınma sorununa karşı kalın etekli pistonlar kullanılmış, segmanlar, ilk segman boşluğu 0.15 mm, diğerleri sırasıyla 0,30–0,32 mm olacak şekilde değiştirilmiş, OW30 kalitesinde yağ seçilmiş, sızdırmazlık sorunu olan orijinal sübap contaları, GM motorlarında kullanılan contalarla değiştirilmiş ve bu değişiklikler için silindir kafası yeniden dizayn edilmiştir. Yakıt kontrolü için emme kanalına Siemens marka enjektör ve kontrol sistemi yerleştirilmiştir. Bu değişiklikler sonrası, motor sorunsuz bir şekilde çalışmıştır. Ancak güçte yaklaşık % 20 kayıp gözlenmiştir [2].

İlk kez Toyota Prius'ta kullanılan yeni hibrid sistem, çığır açan Hybrid Synergy Drive® kavramına göre geliştirilen ilk sistemdir. Mevcut hibridlerle aracın yüksek performansını benzinli motor sağlarken, elektrik motoru yalnızca yardımcı bir işlev üstlenmektedir. Hybrid Synergy Drive®, aracın performansından ödün vermeksizin elektrikli motorun daha önemli bir rol oynamasını sağlamaktadır.

Toyota'nın Hybrid Synergy Drive® teknolojisinin kullanıldığı Prius modeli, yüksek performans, düşük yakıt tüketimi, çevre duyarlılığı ve şık tasarımı bir arada sunmaktadır.



Resim 3.19. Toyota'nın Hybrid Synergy Drive® teknolojisinin kullanıldığı Prius modeli [21]

Orijinal Toyota Hibrid Sistemi'nin (THS) bir adım öteye götürülmesinden ibaret olmayan Hybrid Synergy Drive<sup>®</sup>, sürüş keyfinden vazgeçemeyen, aynı zamanda çevreye duyarlı sürücüler için yepyeni bir anlayışla geliştirilmiş en mükemmel çözümdür.

Kuvvetli 1,5 litre benzinli motor ile birlikte çalışan küçük ama yüksek verimli elektrikli motor, Prius'u D-sınıfının en üst modellerinden biri yapan harika bir performans sağlamaktadır. Yeni elektrikli motor 1,0–1,2 litrelik içten yanmalı motorların çoğundan daha kuvvetli olmakla birlikte, 0–1 200 dd aralığında 400 Nm torka sahip Prius'un torku, V6 dizel motorlarınkinden daha yüksektir. Sonuç olarak, 0'dan 100 km hıza 11 saniyenin altında ulaşabilen Prius, mevcut modelden 3 saniye daha hızlı ve 2,0 litrelik dizel otomobillerle boy ölçüşebilmektedir.

Toyota'nın Hybrid Synergy Drive<sup>®</sup> teknolojisinin kullanıldığı Prius modeli'nin özellikleri şöyle sıralanabilir:

- 0'dan 100 km'ye 10,9 saniyede çıkış ve 4,3l/100km toplam yakıt tüketimine sahiptir.
- Elektrikli motor ağırlığı ve boyuna göre dünyanın en güçlüsüdür.
- Atkinson döngüsü kullanan benzinli motor, dünyanın seri üretilen en verimli benzinli motorudur.
- Akıllı Etkili Frenleme Sistemi, aracın kinetik enerjisini kullanarak yakıt tasarrufu sağlamaktadır.
- Prius trafikte durduğunda, benzinli motor kendiliğinden kapanmaktadır.

Amerika Bileşik Devletleri OPEC petrol ambargosunun hemen ardından, ithalata dayalı enerji teminin yarattığı ekonomik güçlüklerden kurtulmak, sürdürülebilir bir enerji ekonomisine sahip olmak amacıyla ve fosil yakıtların yakın bir gelecekte tükeneceği gerçeğinden hareketle; ulusal enerji ihtiyacının temini ve bunun garanti altına alınması amacıyla 1970'li yıllarda Enerji Bakanlığı kontrolünde alternatif enerji kaynakları ve teknolojileri programını başlatmıştır. Daha sonraki yıllarda,

alternatif enerji kaynakları ve teknolojileri programına ve projelerine düşük ya da sıfır emisyonlu yaklaşımlar hakim olmaya başlamıştır. Bu projelerden biride "The New Jersey Genesis Project"tir. Bu projeye aynı zamanda Amerikan Resmi Kurumları; NJ Department of Transportation's Technology Bureau, NJ Board of Public Utilities, NJ Department of Environmental Protection ve NJ Commerce Commission'un yanı sıra H Power Corporation(fuel cells), MG Industries (Gas Supply), Advanced Power Associates (Power Conversion), Neocon Technologies (system integrator), Fully Independent Residential Solar Technologies (energy systems)şirketleri ile Rutgers University, Mercer County Vocational School, School District, Burlington County College ortaktır.

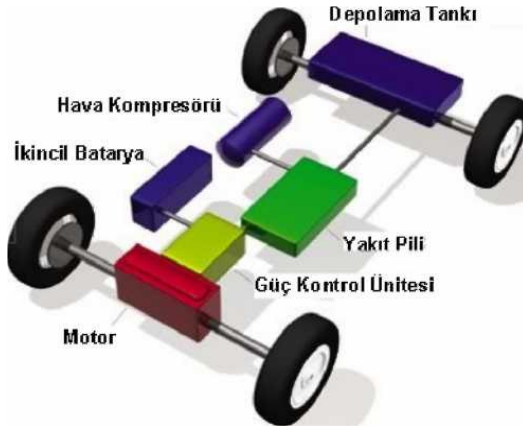
Bu proje kapsamında 1998 yılında "yeni, temiz ve zengin" enerji kaynakları üretmek için New Jersey'de kurulan Millenium Cell, çevre dostu ham maddeler kullanarak hidrojen ve elektrik enerjisi üreten teknolojiler geliştirmektedir. Geliştirilen teknolojilerde enerji elde etmek için kullanılan ham maddeler; saf su ve sodyum borhidrittir.

Sodyum borhidrit; sodyumlu bor tuzunun rafinasyonu sonucu elde edilen ve deterjan sanayiinde kullanılan bir üründür. Geliştirilen bu teknoloji taşımacılığın yanı sıra taşınabilir enerji sağlayıcı piller için de uygulanabilir bir teknoloji olarak ortaya çıkmıştır. Millennium Cell firması Sodyum borhidrit solüsyondan "Hydrogen on Demand <sup>TM</sup>"sistemi kullanarak hidrojen üretmekte ve bu hidrojeni elektrik enerjisine dönüştürmektedir. Yakıt pillerinde Sodyum borhidritin kullanılması, fosil yakıtlardan daha pahalı, eldesi, depolaması nakli zor olan hidrojenin bu dezavantajını ortadan kaldırmıştır. Millenium Cell firması; New York borsasında, NASDAQ teknoloji endeksine dahil bir firma olup, bor bazlı solüsyondan hidrojen enerjisi üretim ve yine bor bazlı uzun ömürlü pil teknolojilerinin patentini almıştır. Bor elementinin elektrokimyası üzerine çalışmakta, elde ettiği ticari uygulanabilir teknolojilerin patentini üzerinde toplamaktadır.

Millenium Cell'in1998 yılında kurulmasının ardından 2000 yılı içinde Daimler-

Chrysler, Rohm&Hass, Avantium, Ballard ve U.S. Borax ile stratejik ortaklık anlaşmaları imzalamıştır. Burada dikkati çeken Daimler Chrysler'in neredeyse dünyanın tüm otomotiv firmaları ile Millenium Cell'in sahip olduğu "Hydrogen on Demand <sup>TM</sup>" sisteminin kullanımı ile ilgili olarak stratejik ortaklığa gitmesidir ki bu firmalar; Nissan, Honda, Volkswagen, Mitsubishi Motors, Toyota, General Motors ve Ford otomotiv firmalarıdır.

Takvimler 12 Aralık 2001'i gösterdiğinde, Daimler Chrysler, Millenium Cell ile yaptığı stratejik ortaklığın ilk meyvesini Detroit Otomobil Fuarında tanıtıyordu. Chrysler, Town& Country Natrium adını verdiği, bir depo sodyum borhidrit sıvıyla 300 mil yol giden minivan aracı ile ilgili olarak yaptığı açıklamada; Natrium'un gerek benzinli ve gerekse bu güne kadar yapılan tüm hücre yakıt sistemli araçlardan çok üstün olduğu, Natrium'a bu üstünlüğü kazandıran hususun yakıtı ve yakıt hücre sistemi olduğunu, yakıt olarak bir bor türeviden oluşan sodyum borhidrit'in kullanıldığı, sodyum borhidrit'in kuru halde kullanılabileceği, sodyum borhidritin pil yakıtlı araçlar için önerilen diğer yakıtların elde edilmesinden daha zahmetsiz olduğu, sodyum borhidritin diğer yakıtlara göre hiçbir dezavantajı bulunmadığı gibi bazı üstünlükleri olduğu, işlem sonucu yakıt atığının kimyasal olarak bora eşdeğer sodyum bor olduğu, atığın tekrar işleme tabi tutularak sodyum borhidrite dönüştürülebildiği, Natrium'un pil yakıt sisteminin Daimler Chrysler'in pil yakıt ortağı Ballard/XCELLSİS tarafından üretildiği, hidrojenin Millennium Cell şirketince geliştirilen "Hydrogen on Demand <sup>TM</sup>" (talep kadar hidrojen-talep üzere hidrojen) mekanizması kullanılarak üretildiği, sodyum borhidrit yakıt deposu ve işletim sisteminin aracın tabanına yerleştirildiği ve aracın kullanılabilirliğini olumsuz etkileyecek, azaltacak yer ve kabin kaybının olmadığını ifade etmekteydi [21].



Şekil 3.17. Chrysler tarafından üretilen Natrium Fuel-Cell Mirivan [4]

Daimler Chrysler'ın 12 Aralık 2001 tarihinde Detroit Otomobil Fuarında tanıttığı Chrysler Town & Country Natrium (latince anlamı sodyumdur) aracı, Millennium Cell Inc.'e ait "İhtiyaç Duyulduğu Anda Hidrojen" yakıt işlemcisine sahiptir, önden çekişlidir ve 35 kW Siemens doğru akım motoru ile çalışmaktadır. Araçta 40 kW kapasiteli Lityum-Ion batarya bulunmaktadır. Yakıt ekonomisi 12,75 km/lt mazota eşdeğerdir. 0'dan 100 km/h hıza ulaşma süresi 16 saniye, maksimum hızı 128 km/h'dir ve şarj edilmeden 483 km yol kat edebilmektedir. Bunların yanında, sahip olduğu teknolojiden dolayı, sıfır emisyonu sahiptir.

ABD'li teknoloji şirketi Millennium Cell, borakstan düşük maliyetli sodyum boroksit üretilene kadar borla çalışan araçların kullanımının ekonomik olmayacağını açıklamaktadır. Düşük maliyetli sodyum üretimi için çalışmalarını sürdürmekte olan firma, bataryaların boyutlarının küçültülmesi ve taşınabilir hale getirilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Firma yetkilileri Türkiye'nin de yakıt hücresi ve "İhtiyaç Duyulduğu Anda Hidrojen" denilen yakıt teknolojisinden faydalanması gerektiği görüşündedir.



Resim 3.20. Daimler Chrysler'in 12 Aralık 2001 tarihinde Detroit Otomobil Fuarı'nda tanıttığı Chrysler Town&Country Natrium aracı [4]

Özellikle uçak ve uzay sanayilerine yönelik ağırlıklı olarak ABD, Avrupa, Rusya ve Japonya'da yapılmakta olan araştırma uygulamaları dikkat çekicidir. Bu araştırmalar daha çok yapı elemanları ve yakıtlara yöneliktir. Ancak büyük bir gizlilik içinde yapılan araştırma ve uygulamalar ile ilgili bilgilere maalesef ulaşılamamaktadır. Yine de çeşitli kaynaklardan sızan bazı gelişmeleri özetlemek yararlı olacaktır.

1960'larda ABD Hava ve Deniz Kuvvetlerince ortaklaşa yürütülen Zip Yakıtları Projesi çerçevesinde geliştirilen yakıtlar, yaklaşık aynı tarihlerde üretilen XB-70 Valkyrie "Boron Bomber" bombardıman uçağı ve SR-71 Blackbird süpersonik stratejik bombardıman uçaklarında pentaboran ve etil boran olarak isimlendirilen bor katkılı yakıt kullanılarak uçakların hem hızları hem de uçuş mesafeleri artırılmıştır. Daha sonra geliştirilen F-117 "Stealth Fighter" Meteor (MRAAM) uçakları ve General Dynamics firması tarafından üretilen BGM-109 Tomahawk, UGM-109 Tomahawk füzelerinde de bor katkılı yakıtlar kullanılmaktadır.

Bugün ABD ordusu tarafından kullanılan ileri teknoloji ürünü savunma ve saldırı silahları ile savaş uçaklarının tamamı Zip ya da Hermes olarak adlandırılan projenin ürünüdürler. Örneğin; U-2, SR-71 Blackbird, F-117 Stealth Fighter, F-22, B-52 savaş uçaklarının tamamı Zip projesi kapsamında üretilen XB-70'in geliştirilmiş tasarımlarıdır.

Uçak ve havacılık endüstrisinde bor kullanımı giderek artan bir seyir izlemektedir. Aerodinamikteki gelişmeler, yüksek hız kanat uygulamaları, yüksek ısıya dayanımlı gövde, düşük ağırlık yüksek kapasite ve benzeri uygulamalar üzerinde yürütülen tasarım ve geliştirme çalışmaları havacılık ve uzay sanayinde kompozit malzeme kullanımını oldukça yaygınlaştırmıştır. Havacılık sanayinde üretilen araçlarda kullanılan malzemenin büyük bir bölümü borlu kompozit malzemeler teşkil eder. Radarlarda görünmezliği sağlamak amacıyla geliştirilen Tomahawk füzeleri, F-15, F-14, B-1, U-2, SR-71 Blackbird, F-117 Stealth Fighter, F-22, B-52 savaş uçakları, Blackhawk serisi helikopterler ve Fransız Mirage uçakları ile Airbus ve Boeing Yolcu uçaklarında yapı elemanları ağırlıklı olarak bor katkılı kompozitlerden yapılmaktadır.



Resim 3.21. SR-71 "Blackbird"3,2 Mach ve Mig-25 Foxbat [4]

Biyodizel konusundaki ilk adımlar, 1981 yılında Güney Afrika'da, daha sonra ise 1982 yılında Avusturya, Almanya ve Yeni Zelanda'da atılmıştır. 1985 yılında, Avusturya'da küçük bir pilot tesis, biyodizelin yeni bir teknolojiyle üretimini test etmiştir. 1990 yılında ilk çiftçi kooperatifi, ticari anlamda biyodizel üretmiştir. Aynı yılda, John Deere, Ford, Massey Ferguson, Mercedes gibi büyük traktör üreticileri, testlerini tamamlayarak motorları için garanti vermişlerdir. Bu, biyodizelin piyasalara girmesinde büyük bir adım olmuştur. Başlıca Avrupa Birliği ülkelerinde ayrıca Doğu Avrupa, Malezya ve Amerika'da biyodizel üretim tesisleri kurulmaya başlanmıştır.

Almanya'da yıllık biyodizel üretimi 450 000 ton civarındadır ve hali hazırda % 100 biyodizel içeren araç yakıtı 900'ü aşkın benzin istasyonunda kullanıcıların hizmetine sunulmuştur.

1996 yılından itibaren piyasaya sürülen VW ve AUDI motorlu araçların hepsinde ve Mercedes kamyonlarında biyodizel kullanımı tamamıyla serbest bırakılmıştır. Taksi amaçlı kullanılan Mercedes otomobillerde kullanım da serbesttir.

Almanya'da yapılan bir çalışmada kolza yağı ve kolza yağı kökenli biyodizel ile 36 ayı uygulama yapılmıştır. Biyodizel bu uygulamaların 27'sinde saf, 8 çalışmada ise motorine katılarak toplam olarak 259 taşıtta kullanılmıştır. Çoğunlukla inşaatlarda kullanılan araçlar ve tarımsal makinelerde çalışılmıştır. Uygulamalar sonucunda belirtilen sorunlar; soğukta start zorluğu ile plastik kauçuk parçalarda korozyon problemleri şeklindedir. Egzoz gazı ölçümleri, HC, CO partikülü emisyonlarında azalma, NO<sub>x</sub>'lerde ise belli bir artış olduğunu göstermektedir.

Avusturya biyodizel uygulamasında önder ülkelerden biridir. 2000 yılında Avusturya'da 30 000 ton /yıl üretim biri pilot ölçekte olan 7 ticari tesiste yapılmıştır. En büyük üretici firma yılda 22 000 ton kapasite ile çalışmaktadır. Biyodizel kolza yağı ve kullanılmış kızartma atık yağlarından elde edilmektedir. Dizel motorunda % 100 oranında biyodizel kullanımı durumunda % 95 vergi indirimi yapılmaktadır.

Çek Cumhuriyeti'nde yıllık olarak biyodizel, üç tane orta boy ve on üç tane küçük işletmelerde toplam 70 000 ton civarında üretim söz konusudur. Benzin istasyonlarında % 30 Biyodizel + % 70 Dizel karışımı Bionafta adı ile daha ucuza satışa sunulmaktadır.

Fransa'daki biyodizel uygulamaları, Sofiproteol, Rouen, Novaol gibi biyodizel üreticiler, Peugeot, Citroen, Renault gibi otomotiv üreticileri ve Elf, Total gibi petrol firmaları genelinde Avrupa Birliği politik desteği ile gerçekleştirilmektedir. Fransa özellikle biyodizelin çevre dostu niteliğini ön plana çıkarmakta, kolza yağından

üretim yapılmakta ve 32 üye şehri olan "Club de Ville" adlı biyodizel şehirlerarası ağı ile toplu taşıma otobüslerinde biyodizel ve biyodizel-dizel karışımları vergi indirimi desteği ile kullanılmaktadır. Rouen firması 1999/2000 sezonunda 180 000 ton biyodizel üretmiştir.

Biyodizel, yapılan bir çalışmada 59 ayrı denemede 1 195 taşıtta kullanılmıştır. Başlıca denemeler şehir içi otobüslerde yapılmıştır. Çalışmalarda biyodizel saf ya da motorine belli oranda katılarak başarılı oranda uygulanmıştır. Yakıtı kullananların ortak fikri; biyodizelin olumlu yakıt özelliklerine sahip olduğu, yakıt tüketiminde ortalama % 8,56 artış görüldüğü ve satış fiyatının yüksek olduğu şeklindedir. Az sayıda kullanıcı ise yakıtın depolama zorlukları olduğunu belirtmiştir. Fransa'da ilk uygulamalarda dizele % 5 oranında biyodizel katılmıştır. 1992 yılında motorin tüketimi 23,3 milyon m<sup>3</sup>, gerekli biyodizel katkı miktarı ise 1 milyon tondur. Bu değer 915 000 hektar ekili alana, bir başka değerle Fransa'nın ekilebilir alanlarının % 5'ine karşılık gelmektedir.

İtalya'da Novamont, Estereco, Olefici, Comlube gibi 10 adet firmada 125 000 ton/yıl biyodizel üretimi ayçiçek ve kolza yağından yapılmaktadır. Biyodizel daha çok otobüslerde vergi indirimi ile kullanılmaktadır.

Bologna şehrinde 250 takside, Turin şehrinde ise 2 traktörde biyodizel deneme amaçlı kullanılmıştır. İtalya geneli incelendiğinde 26 uygulamanın 12'sinde kolza yağı kökenli biyodizelin, 1 tanesinde soya kökenli biyodizelin saf olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu uygulamaların büyük bölümü taksi ve otobüslerde yapılmıştır. Uygulamalar sonucunda enjektörlerde tıkanma, plastik malzemelerde korozyon, egzoz gazında hoş olmayan bir koku oluşumu sorunları, egzoz gazı emülsiyonlarında ise olumlu düşüşler olmasının çevre kirliliği için önemi belirtilmektedir.

Biyodizel endüstrisinin oluşmasını sağlayan Avrupa ülkelerinin yanında son yıllarda ABD'de de büyük gelişmeler olmaktadır.

Amerika Birleşik Devletleri'nde "National Clean Cities" programı kapsamında biyodizel kullanılmaktadır. Biyodizel, kolza, ayçiçeği, soya ve kullanılmış kızartma atık yağlarından Twin Rivers Technology, Procter and Gamble, Pasific Biodiesel, Columbus Foods gibi firmalarca üretilmektedir. Griffin Industries firması tarafından Kentucky'de kurulan dünyanın en modern tesisi, MFS Biyodizel Tesisi bu oluşum içinde önemli bir yere sahiptir. Bu ülkede vergi indirimi uygulaması olmayıp, belirli bazı düzenlemeler getirilmiştir ve şehir içi otobüslerde, deniz taşıtlarında ve askeri taşıtlarda biyodizel ve/veya karışımları kullanılmaktadır.

Amerikan hükümeti, petrole dayalı motor yakıtı kullanımının 2000 yılı itibariyle % 10, 2010 yılı itibariyle % 30 azaltılarak biyodizel kullanım sürecinin hızlandırılıp ve yaygınlaştırılmasını enerji politikaları arasına almıştır [4].

1982 yılında Hans Tholstrup güneş enerjisi ile çalışan ilk araba olan "QUIET ACHIEVER"ı yaptı. Üretilen bu araç, 4052 kilometrelik Sydney ve Perth arasını 20 günde tamamladı. Halbuki petrolle çalışan ilk araba aynı yolu 30 günde tamamlayabilmişti.



Resim 3.22. World Solar Challenge yarışları [42]

Bundan beş yıl sonra, 1987'de, Hans Tholstrup ilk güneş arabası yarışı olan World Solar Challenge'ın öncülüğünü yaptı. Günümüzde de bu tarz yarışlar dünyanın çeşitli yerlerinde yapılmaktadır. Bunların en önemlileri ve en çok ilgi toplayanları arasında

American Solar Challenge, Dream Cup, Canadian Solar Discovery, Phaeton, Sunrayce ve Dream Cup Solar Car Race yer almaktadır.

2001’de düzenlenen “6th World Solar Challenge”da birinci olmakla kalmayıp bir dünya rekoruna imza atan NUON takımının aracı Nuna II, 170km/s hıza ulaşabilmiştir.



Resim 3.23. Nuna II aracı [42]

Aynı yarışta Aurora'nın aracı 91,7km/s'le 2. olurken, Massachusetts Institute of Technology (MIT)'nin şirin oyuncuğu Tesseract 91.2km/s ortalamayla yarışı 3. bitirdi [42].



Resim 3.24. Tesseract aracı [22]

Western Washington Üniversitesi, Hibrid Araç Programı çerçevesinde, iki hibrid araç geliştirdi. İlk araç Viking21, Viking23’ün geliştirilmesi yolunda çeşitli

sistemlerin test edilmesinde kullanıldı. Ön tekerlere birer bağımsız elektrik motor takılırken, arka tekerler için 4 silindirli benzin motoru kullanıldı.

Karbon fiber kaporta sayesinde Nicd bataryası 720 Watt güneş enerjisi ile şarj edilebilmekte ve 900 kg'lık araç 1 galon yakıt ve elektrik motorlarıyla 200 mil'den çok yol yapılabilir.

Tasarım ekibinin güneş enerjisini seçerek geliştirdikleri Viking23 günümüz araçları için mantıklı bir değişim seçeneği olabilir. Şehirlerarası ortalama 100 km menzilde 50 km/saat hızda sıfır emisyonu önemli bir başarı olmuştur. Şehir içi kullanımda ise hedef menzil 500 km, ortalama hız 100 km/saat'dir. Bu sistem diğer hibrid sistemlere göre daha verimli olsada, dezavantajlarından biri tırmanma durumunda maksimum performans için daha güçlü elektrik motora ihtiyaç duymasıdır.

Güneş enerjisi ile hedeflenen amaçlara ulaşmak için, yakıt sarfiyatını azaltarak güneş gören yüzeyi arttırmak gerekiyor, bu nedenle araçta iki kişilik bir aracın sahip olacağı maksimum alan olan 8 m<sup>2</sup>'lik bir yüzey düşünülmüştür. Güneş enerjisinin % 17 verimle kullanılması ile 1 360 Watt'lık bir toplam güç mümkün görülmüş, pencere v.b. boşluklardan dolayı güneş enerjisinden alınan güç 720 Watt olarak belirlenmiştir. Araç yüzeyindeki paneller farklı açılarla yerleştirilerek güneşten olabildiğince verim alınması sağlanmıştır.

Dört paralel diziden oluşan 78 hücreli ve her hücresi 108 volt çıkışlı nikel-cadmium bataryanın seçilmesindeki birincil etken 24/ampere 11,4 kW/saat'lik yüksek güç ihtiyacıdır. İki elektrik motorla birlikte bu sistem 269 kg ağırlığındadır.

Viking23 aracı hedeflenenden % 24 daha iyi performans göstererek proje başlangıcında belirlenen kriterlerin tamamını sağlamıştır. Genel olarak kabul edilebilir bir hibrid araç olan Viking23 elektronik kontrol sistemi ile iki sistemini de, hem şehirlerarası hem şehir içinde verimli olarak kullanabilmiş, gerek motorlar

arasındaki geçişler, sürüş rahatlığı ve güvenlik açısından, gerekse emisyon düzeyi, Viking23 tarzı hibrid araçların 21.yy araçları olacağını göstermiştir [22].

### 3.5. Ara Değerlendirme

Yukarıda yapılan incelemeler ışığında alternatif enerji kaynaklarının ulaştırma sektöründe kullanımıyla ilgili kısa bir değerlendirme yapmak amacıyla, çizelge 3.4'de alternatif yakıtların karşılaştırması yapılmıştır.

Çizelge 3.4. Alternatif yakıtların karşılaştırılması [2]

	Hidrojen	Metan	Metanol	Etanol	Benzin	Dizel
Kimsaysal Denklemi	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub> OH	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	
C/H Oranı	0	0,25	0,25	0,333	0,556	0,520
Moleküler Ağırlığı (mol/kg)	2,02	16,04	32,04	46,07	91,4	170
Isıl Değeri (Mj/kg)	119,93	50,8	20,1	26,9	43,4	43,1
Stokiyometrik karışım için;						
Hava/Yakıt (Kütlesel)	34,32	17,2	6,44	8,96	14,7	14,5
Hava/Yakıt (Hacimsel)	2,38	9,53	7,14	14,3	45,79	
Buharlaştırma ısısı (mj/kg)	0,447	0,509	1,102	0,856	0,272	0,3
Tutuşma sınırları %hacim	4,1-74	5-15,4	6-37	3,5-19	1,3-7,6	
$\lambda$	0,15-4,35	0,59-2,0	0,24-2,22	0,29-1,92	0,29-1,67	0,48-1,35
Laminar alev hızı (m/s)	2,91	0,37	0,52		0,37	
Adyabatik alev sıcaklığı (°C)	2110	1954	1878	1924	1993	
Difüzyon katsayısı (cm <sup>2</sup> /s)	0,61	0,16			0,08	
Kaynama Noktası (°C)	-252,35	-161,3	65,1	78,7	32-221	170-350
Donma Noktası (°C)	-259		-97,6	-114,1	-56	
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı (°C)	574-591	632	470	392	257	
Oktan Sayısı						
ROS	130	130	110	106	91-100	
MOS		105	87	89	82-94	

Tutuşma sınırları bir yakıtın içten yanmalı motorlarda kullanımında önem teşkil etmektedir. Tutuşma sınırları sayesinde bir yakıtın fakir karışımlarda ve zengin karışımlarda motorda kolaylıkla yanıp yanamayacağı sonucuna varılabilir. Yukarıdaki verilere göre hidrojen gazının farklı hava yakıt karışım oranları için tutuşma sınırlarının çok geniş olduğu ve bunun da hidrojenin motorlarda kullanılması durumunda yarar sağlayacak önemli bir özellik olduğu sonucuna varılabilir. Tutuşma sınırları bakımından alternatif yakıtları bir sıralamaya sokarsak;

1. Hidrojen
2. Metanol
3. Etanol
4. Doğalgaz
5. Benzin

Benzin motorlarında iyi bir yanma ve yanma sonu basıncı elde edebilmek için karışımın sıkıştırılması ve sıkıştırıldıktan sonra ateşlenmesi gerekir. Sıkıştırılma anında meydana gelen ısı, yakıt ve havayı daha iyi karıştırarak yanmanın düzgün ve kolay olmasını sağlar. Aynı zamanda silindir içerisinde bulunan karışımdan en fazla yanma sonu basıncı elde edebilmek için karışımın sıkıştırılabildiği kadar sıkıştırılması gerekir. Fakat benzin motorlarında sıkıştırma oranı istenildiği kadar arttırılamaz. Çünkü yükselen sıcaklık nedeni ile yakıt kendi kendine tutuşmaya başlayabilir. Bu bakımdan benzin motorlarında kullanılacak yakıtın kendi kendine tutuşma sıcaklığının ve oktan sayısının yüksek olması motorun sıkıştırma oranının arttırılması bakımında önem teşkil etmektedir. Kendi kendine tutuşma sıcaklığı en yüksek olan yakıt doğalgazdır. Kendi kendine tutuşma sıcaklığı bakımından alternatif yakıtları bir sıralamaya sokarsak;

1. Doğalgaz
2. Hidrojen
3. Metanol
4. Etanol

## 5. Benzin

Laminar alev hızının yüksek olması benzin motorlarında performans açısından güç ve verim değerlerimde bir miktar azalmaya neden olur. Hidrojenin laminar alev hızı diğer alternatif yakıtlara göre daha yüksektir.

Çizelge 3.5. Alternatif yakıtları kullanan araçların performans karşılaştırması [2]

	Benzin	Dizel	Hidrojen	Metanol	Etanol	Lpg	Doğalgaz
Hızlanma 0-100 km/h, saniye	12	14	18	10	10	11	12
Yakıt Tüketimi, litre/100 km	6,9	6,0	21,4	10,7	8,4	7,6	29,4
Menzil, km,57 litre Tank	820	935	275	565	675	755	205
Yakıt Doldurma Süresi, dakika	2	2	2	2	2	5	5

Verilen çizelgede ABD'de kullanılan alternatif yakıtlara sahip örnek taşıtların genel olarak performansları karşılaştırılmıştır. Yukarıdaki değerlere göre yakıt tüketimi bakımından benzin ve dizele alternatif olarak kullanılacak günümüz alternatif yakıtları arasında, LPG, en iyi durumdadır.

Çizelgede belirtilen taşıtlar arasında metanol ve etanol yakıtlı taşıtların hızlanma kabiliyetlerinin diğer taşıtlara göre daha iyi olduğu görülmektedir.

Çizelgede taşıtların menzilleri kriter alınarak da karşılaştırmak mümkündür. Bütün taşıtların 57 litre hacminde yakıt deposu olduğu kabul edilmiş ve 1 depo yakıt ile

taşıtların ne kadar menzile sahip oldukları belirtilmiştir.

Alternatif enerji kaynaklarını egzoz emisyonları açısından karşılaştırsak; hidrojenin hava ile yanması sonucunda, yakıtta karbon bulunmaması nedeni ile çok az miktarda HC oluşacaktır. Diğer yandan bu motorlarda, yüksek yanma sıcaklıkları nedeni ile havanın kimyasal reaksiyonu sonucu azot oksitler ( $NO_x$ ) bol miktarda üretilmektedir. Hidrojen yakıtlı motorlarda egzoz gazları içerisinde hava kirliliğini etkileyecek tek ürün olarak bulunan  $NO_x$ 'lerin miktarı, yanma odası sıcaklıklarının ve oksijen konsantrasyonunun azaltılması ve yanma süresinin kısaltılması sonucu düşürülebilmektedir.

Doğalgazın yakıt olarak motorlu taşıtlarda kullanımı, özellikle şehir trafiğinde seyreden, dizel motorlarında  $NO_x$  ve HC emisyonlarında, benzin motorlarında da CO ve HC emisyonlarında azalmalar temin edecektir. Doğalgazın karbon oranının, diğer petrol yakıtlarına göre, düşük olması egzoz gazlarındaki karbondioksit oranının azalmasına sebep olacaktır. Ayrıca doğalgaz kullanımı, benzinli taşıtların egzoz emisyonlarındaki zehirli kurşun türevlerini tamamen yok edecektir. Benzin motorlarında ve dizel motorlarında doğalgaz kullanılması durumunda yanma sonu sıcaklığında bir düşme olmaktadır. Bu da  $NO_x$  emisyonlarında bir azalma sağlayacaktır. Doğalgaz, alternatif yakıtlar içerisinde egzoz emisyonları en düşük yakıttır.

Metanolün yanması sonucu CO,  $CO_2$  ve  $NO_x$  gazları oluşmaktadır. Ayrıca metanolün benzine göre daha düşük alev sıcaklığının olması, yanmanın iyileşmesini, yanma ürünleri içindeki azot oksitlerin  $NO_x$  ve CO'nin azalmasını sağlamaktadır. Metanol benzinin aksine yanmamış hidrokarbonlar üretmez. Metanolün yanması ile oluşan ısı azdır; dolayısıyla çok fazla miktarda  $NO_x$  meydana gelmesi için gerekli koşul oluşmaz. Diğer taraftan metanol yandığında benzine göre iki kat daha fazla formaldehit üretilir.

LPG benzine nazaran üniform bir hava – yakıt karışımı sağlayabilmesi ile yanmanın

stokiyometrik orana yaklaşması sonucunda temiz egzoz gazı çıktısı vermektedir. Bu sebeple LPG'nin egzoz emisyonları oldukça düşüktür.

Alternatif yakıtların ulaştırma sektöründe kullanımını ekonomiklik yönünden karşılaştırdığımızda; şu anda piyasada bulunan alternatif yakıtlar içerisinde en ucuz birim fiyatı olan LPG ve doğalgazdır. Bu iki yakıt günlük hayatımızda kullandığımız taşıtlarda kullanılmaktadır.

Diğer alternatif yakıtlar ise çok az kullanıldığı için birim fiyatları daha yüksektir. Örnek vermek gerekirse metanol, etanol, hidrojen, bor ve biyodizel günlük hayatımızdaki araçlarda çok az kullandığımız için birim fiyatları çoktur [2].

#### **4. TÜRKİYE'DE ALTERNATİF ENERJİ KAYNAKLARININ KULLANIMI**

Günümüzde Türkiye, enerji ihtiyacının yalnızca dörtte birini kendi kaynaklarından karşılayabilmekte ve petrol, doğalgaz, kömür kullanımı nedeniyle her yıl milyarlarca dolarlık zarara uğramaktadır.

Dünyada kişi başına düşen petrol ve doğalgaz üretiminin 2025 yılında zirveye çıkacağını, ardından düşüşe geçeceğini ifade eden Dünya Hidrojen Birliği Başkanı ve Miami Üniversitesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Nejat Veziroğlu, dünya üzerindeki fosil yakıt kaynaklarının 50 yıl içinde tükeneceği uyarısında bulunmaktadır.

Teknoloji süratle gelişirken petrole duyulan ihtiyaçta önemli bir azalma görülmektedir. Bugün bile yükselen petrol fiyatları dünya ekonomisini tehdit etmekte, Türkiye gibi petrol konusunda dışa bağımlı ülkelerde bu durum daha da sarsıcı olabilmektedir. Bu nedenle, Türkiye gibi enerjide dışa bağımlı ülkeler için alternatif enerji kaynakları büyük önem taşımaktadır.

Milletlerarası Hidrojen Enerjisi Teknolojileri Merkezi(ICHET) Kurucu Başkanı Prof. Dr. Nejat Veziroğlu, petrol kaynaklarının hızla tükendiğini belirterek, hidrojen enerji sistemine gerekli yatırımların yapılmasıyla birlikte Türkiye'nin 30-40 yıl gibi bir sürede, petrol ithal eden ülke konumundan, hidrojen enerjisi ihraç eden bir ülke konumuna geleceğini öne sürmektedir.

2075 yılında dünyanın tamamen hidrojen enerjisine geçeceğini ifade eden Veziroğlu, bu durumun, ucuz petrol, ucuz doğalgaz üretiminin sonu demek olduğunu belirtmektedir. Prof. Dr. Veziroğlu'nun da belirttiği gibi, hidrojen enerjisine oranla pahalı ve tehlikeli olan petrol ve türevi enerji kaynaklarının çevre kirliliği, sera etkisi, asit yağmurları, petrol savaşları gibi pek çok yan etkisi bulunmakta, buna karşılık hidrojen üretiminin ucuz olmasının yanında kullanımı sonucu hiçbir çevre kirliliğine neden olacak atığın oluşmadığı görülmektedir.

Türkiye`de, Uluslararası Hidrojen Merkezi'nin yanı sıra, çeşitli şirket ve bilim kurumları da hidrojenin depolama teknikleri ve yakıt pili uygulamaları konusunda çalışmalarını tüm hızıyla devam ettirmektedir.

Ford Otosan, Arçelik, Tofaş, Aygaz ve Demirdöküm ile Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı(TTGV) ve TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi(MAM) arasında, Yakıt Pili Teknolojisi Projesi'nin ikinci aşaması olan "Polimer Elektrolit Membranlı Yakıt Pili Modül Bileşenlerinin Geliştirilmesi ve Üretimi" anlaşması 2005 yılında imzalanmıştır. Türkiye'nin kendi alanlarında önde gelen 7 şirket ve kurumunun oluşturduğu bu konsorsiyum "Yerlileştirilmiş Yakıt Pili Projesi"nin üretilme aşamasını tamamlamış ve sıra ticarileşme aşamasına gelmiştir.

Zorlu Grubu 10 milyon dolarlık yatırımla evler için yakıt pili geliştirmiş, Vestel ise diz üstü bilgisayarlar, cep telefonları için gerekli şarj aletlerinin prototiplerini üretmiştir.

Akaryakıt firması Aytemiz hidrojen araştırmalarını gündeminde, ABD'li gaz şirketi Praxair ile hidrojen üretimi çalışmaları yürütmekte, Elimsan Topluluğu ise Plug Power şirketi ile birlikte 5 kilovatlık yakıt hücreleri geliştirmiştir.

KOBİ'ler de hidrojenli cihazlara ilgi göstermektedir. Endüstriyel uygulamalar için enerji dağıtım sistemleri üzerine çalışan EAE Elektrik, hidrojenle beslenerek elektrik üretimi yapan 1,5 watt'lık bir yakıt pili geliştirmiştir.

Hidrojenin depolanma sorunu nedeniyle ortaya çıkan yüksek maliyetler, boru gündeme getirmektedir.

Ulusal Bor Enstitüsü'nün (BOREN) yaptığı çalışmalara göre, en yüksek rezervi topraklarından barındıran Türkiye, nükleer santral güvenliği ve hidrojen enerjisi üretimi konusunda eşsiz bir elemente sahiptir. 250'den fazla kullanım alanına sahip olan bor, sanayinin tuzu olarak nitelendirilmektedir.

Erzurum`da Atatürk Üniversitesi`yle yürütülen çalışmalarda, hayvanların temel besin maddesi olan yonca bitkisi veriminin, borlu gübre sayesinde yüzde 30 arttığı belirlendi. Yine Konya`da borlu gübrenin buğday verimini yüzde 35 oranında arttırdığı gözlemlendi.

Türkiye`de tarım alanı olarak kullanılan toprakların yüzde 20`sinde bor eksikliği olduğu belirtilmektedir. Bor eksikliği olan topraklara verilecek borlu gübrenin verimi yüzde 20 arttırdığı düşünüldüğünde, Türkiye`nin tarımsal gelirine çok büyük bir ek gelir sağlayacağı kuşkusuzdur.

Bor tavukçuluk sektöründe de kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar borlu yem in tavukların et ve yumurta kalitesinde olumlu etkisi olduğunu göstermektedir. Bor katkılı yemle beslenen tavukların ağırlıklarında 17 grama kadar artış yaşandığı belirlenmiştir. Türkiye`de yılda 500–550 milyon adet et tavuğunun kesilip piyasaya sürüldüğü tahmin edilmektedir. Kesilen tavuklardan elde edilen et miktarının 900 bin ton civarında olduğu dikkate alındığında, borlu yemle beslenen tavukların etinde ortaya çıkacak 17 gramlık artış tavuk eti üretimimizi 9 bin ton arttıracaktır. Borlu yem ayrıca, tavuk yumurtalarının kabuklarını kalınlaştırarak, yumurtadaki fireyi azaltmakta, yumurtanın bayatlamasını geciktirmekte, kolesterol oranını düşürmektedir.

BOREN`in sanayileşmeye hazır olan projeleri arasında başlıca şu projeler öne çıkmaktadır:

- Çimento Üretiminde Bor Kullanımı: Borlu Çimento, Denizli Çimento ve Göltaş Çimento`da, Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü işbirliğiyle deneme üretimleri yapılmıştır.
- Ahşap Emprenyede Bor Kullanımı: BOREN tarafından üretilen “Emprenye Kimyasallarının Ahşap Endüstrisinde Uygulanabilirliğinin Araştırılması ve Endüstriyel Odunlara Uygulama Şartlarının Belirlenmesi” adlı proje BOREN koordinatörlüğünde başlamış ve tamamlanmıştır.

- Sodyum Borhidrür Sentezi ve Üretimi: Sodyum borhidrür üretimi için know-how oluşturulmuştur. Sodyum borhidrür % 90 verimle üretilmiştir. Sodyum borhidrür pilot tesisi kurulmuştur. Türkiye kendi teknolojisi ile sodyum borhidrür tesisi kurabilecek bilgi birikimine sahip olmuştur.
- Doğrudan Sodyum Borhidrürlü Yakıt Pili ve Entegrasyonu: Son kullanıcı için, farklı uygulamalarda kullanılacak 70–100 W gücünde fonksiyonel cihaz oluşturulmuş ve performans testleri yapılmıştır.
- Dalga Enerjisinden Elektrik Üretimi: Tasarlanması planlanan şamandıranın içindeki piston bor mıknatıslarıyla çevrilecektir. Çalışmaya ilk olarak tek bir prototiple başlanacak olup, sonrasında belirlenen güç seviyesine çıkmak için çoklu şamandıra sistemine geçilecektir.

BOREN'in diğer sanayileşmeye hazır olan projeleri arasında; Mikroblesleyici Olarak Tarımbor, Bor İçerikli Selülozik İzolasyon Malzemesi Üretimi ve Uygulamaları, Çinko Borat ve Çinko Borat Üretimi ve Porselen Karo Bünyelerine Borik Asit İlavesinin Etkileri başlıklı projeleri gelmektedir. Yine BOREN'in başta enerji sektörü olmak üzere çeşitli alanlarda devam eden 61 adet, tamamlanan 20 adet projesi vardır [43].

Türkiye biyodizelle ilgili ilk çalışmasını, AB'den önce, 1934 yılında "Bitkisel Yağların Tarım Traktörlerinde Kullanımı" adı altında Atatürk Orman Çiftliğinde yapmıştır.

Türkiye'de biyodizel, dünyadaki gelişmelerin etkisinde, 2000'li yılların başında gündeme geldi. Üniversitelerdeki çalışmalar hızla gelişti. 2001 yılında Sanayi ve Ticaret Bakanlığında "Biyodizel Çalışma Grubu" oluşturuldu. İlk kez biyodizel ve ismi 4.12.2003 tarihinde 5015 Sayılı Petrol Piyasası Kanunu'nda harmanlanan ürünler arasında yer aldı. Amacı; "Bu Kanunun amacı; yurt içi ve yurt dışı kaynaklardan temin olunan petrolün doğrudan veya işlenerek güvenli ve ekonomik olarak rekabet ortamı içerisinde kullanıcılara sunumuna ilişkin piyasa faaliyetlerinin şeffaf, eşitlikçi ve istikrarlı biçimde sürdürülmesi için yönlendirme, gözetim ve

denetim faaliyetlerinin düzenlenmesini sağlamaktır” diyen bir kanun içinde ve “Ürün: Fiziksel veya kimyasal işlem, rafinaj veya diğer yöntemlerle ham petrol ve/veya ürünlerinden elde edilen ürün veya ara ürün herhangi bir hidrokarbonu, ifade eder.” şeklinde tanımlanan ürün içinde değerlendirildi. Kanunda, biyodizelin, ÖTV dışında tutulması nedeniyle yatırımlar dünyaya paralel biçimde hızla arttı. 10.09.2004 tarihli ve 25579 sayılı Resmi Gazetede “Petrol Piyasasında Uygulanacak Teknik Kriterler Hakkında Yönetmelik ve 17.06.2004 tarihli Petrol Piyasası Lisans Yönetmeliği ile “biyodizel” akaryakıt olarak kabul edilmiş ve ithalatı, dağıtımını, taşınması ve son kullanıcıya satışı lisans kapsamına alınmıştır.

Elektrik İşleri Etüd İdaresi Genel Müdürlüğü tarafından 2003 yılında teklif edilen Biyodizel Standartları (TSEN 14214 ve TSEN 14213) 2005 Eylül ve Ekim ayında TSE tarafından AB standartlarının aynı olarak TSE Standardı olarak yayınlandı. EPDK 29.12.2005 tarih ve 623/1 nolu Kurul Kararı ile 3824.90.99.90.54 GTİP’li madde, Otobiodizel, 3824.90.99.90.58 GTİP’li madde, Yakıtbiyodizel isimleriyle piyasaya sunulabileceğini belirtmiştir.

Bugün ülkemizde 1,5 milyon ton kurulu kapasite bulunmaktadır. Şu anda Türkiye, kurulu biyodizel üretim kapasitesi itibarı ile Almanya’dan sonra Dünya ikincisidir.

Bu tesisler ülkemizin dört bir yanına dağılmıştır. Bölgesel yaygınlığı “Enerjinin Verimliliği” açısından son derece yararlı olduğu düşünülebilecek biyodizel yatırımı yapan firmalarımızın % 65’i tarımdan gelmiş ve bunların % 50’si yağ sıkma fabrikalarıdır. Bu dönüşümün ana sebebi, atıl kapasitelerinin değerlendirilerek, sürekli istihdam sağlayabilmektir. Tarımsal Üretici Birlikleri’de biyodizele ilgi duymakta ve girmektedirler. Çukobirlik tesisini kurmuş, Antbirlik de tesisini kurmak için kapasite raporunu almıştır.

Biyodizel üreticileri özellikle ülkemizde gıdada kullanılmayan, bu nedenle tarımda yaratacağı etkileri biyodizele bağlı etkileri görülebilecek Kanola ve Aspiri seçmiş, ülkemizin dört bir yanında sözleşmeli tarıma yönelmişlerdir.



Resim 4.1. Türkiye’de biyodizel üreticilerinin dağılımı [44]

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile açığa çıkan ışımaya enerjisidir, güneşteki hidrojen gazının helyuma dönüşmesi şeklindeki füzyon sürecinden kaynaklanır. Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti, aşağı yukarı sabit ve  $1\ 370\ \text{W/m}^2$  değerindedir, ancak yeryüzünde  $0-1\ 100\ \text{W/m}^2$  değerleri arasında değişim gösterir. Bu enerjinin dünyaya gelen küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden kat kat fazladır. Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki çalışmalar özellikle 1970’lerden sonra hız kazanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşme göstermiş, çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir.

Ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre şanslı durumdadır. Türkiye'nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesi Güney Doğu Anadolu Bölgesi olup, bunu Akdeniz Bölgesi izlemektedir.

Ülkemizde güneş kolektörleri, en çok Akdeniz ve Ege Bölgelerinde kullanılmaktadır. Güneş kolektörleri, güneş enerjisini ısı enerjisine dönüştüren sıcak su üretme sistemleridir. Halen ülkemizde kurulu olan güneş kolektörü miktarı yaklaşık 12 milyon  $\text{m}^2$  olup, yıllık üretim hacmi 750 bin  $\text{m}^2$ 'dir ve bu üretimin bir miktarı da

ihraç edilmektedir. Güneş enerjisinden ısı enerjisi yıllık üretimi 420 bin TEP (Ton Eşdeğer Petrol) civarındadır. Bu haliyle ülkemiz dünyada kayda değer bir güneş kolektörü üreticisi ve kullanıcısı durumundadır.

Güneş kolektörlerinin ürettiği ısı enerjinin birincil enerji tüketimimize katkısı; 1998 yılında 210 bin TEP, 1999 yılında 236 bin TEP, 2000 yılında 262 bin TEP, 2001 yılında 290 bin TEP, 2004 yılında 375 bin TEP ve 2007 yılında 420 bin TEP'dir.

Güneş pilleri, halen ancak elektrik şebekesinin olmadığı, yerleşim yerlerinden uzak yerlerde ekonomik yönden uygun olarak kullanılabilir. Bu ve istenen güçte kurulabilmeleri nedeniyle genellikle sinyalizasyon, kırsal elektrik ihtiyacının karşılanması vb. gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Ülkemizde çoğunluğu Orman Bakanlığı Orman Gözetleme Kuleleri, Türk Telekom, deniz fenerleri ve otoyol aydınlatmasında, Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, Muğla Üniversitesi, Ege Üniversitesi gibi kamu kuruluşlarında olmak üzere küçük güçlerin karşılanması ve araştırma amaçlı kullanılan güneş pili kurulu gücü 1 MW' a ulaşmıştır.

Güneş enerjisi araştırma ve geliştirme konularında Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE)'nin yanında Tübitak Marmara Araştırma Merkezi ve üniversiteler (Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Araştırma Enstitüsü, Muğla Üniversitesi, ODTÜ, Kocaeli Üniversitesi, Fırat Üniversitesi) çalışmalar yapmaktadır.

Güneş enerjisi verilerinin ölçülmesi konusunda Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü faaliyet göstermektedir. EİE de 1991 yılından bu yana, kendi güneş enerjisi gözlem istasyonlarını kurmaktadır.

Güneş enerjisi ile ilgili standartlar hazırlanması konusunda Türk Standartları Enstitüsü;

- TS 3680 -Güneş Enerjisi Toplayıcıları-Düz

- TS 3817 - Güneş Enerjisi - Su Isıtma Sistemlerinin Yapım, Tesis ve İşletme Kuralları

konulu standartları hazırlamıştır. EİE bu standartların hazırlanmasında görev aldığı gibi, ısıl performans testlerini de gerçekleştirmektedir.

EİE, Enerji Kaynakları Etüt Dairesi Başkanlığı, Güneş Enerjisi Şubesi, 1982 yılından bu yana güneş enerjisi konusunda araştırma, geliştirme, bilgilendirme ve demonstrasyon çalışmalarını yürütmektedir. Çalışmaları arasında; teknoloji takibi, değerlendirilmesi, kaynak ve potansiyel belirlenmesi, kullanım alanlarının araştırılması, araştırma-geliştirme ve demonstrasyon projeleri gerçekleştirilmesi yer almaktadır.

Ülkemizde kolektör üretimini arttırmak ve standart bilincinin oluşmasına yardımcı olmak için EİE Yenilenebilir Enerji Kaynakları Araştırma Parkına bilgisayar destekli bir güneş kolektörü test standı tesis edilmiştir. Türk Standartları Enstitüsü ile yapılan protokol çerçevesinde TS - 3680 standardının ısıl performans deneyleri bu standda gerçekleştirilmektedir. Üreticilerin geliştirdikleri ürünler de yine bu standda test edilmektedir.



Resim 4.2. Güneş kolektörleri [44]

1.6 kWp gücünde tek kristalli Güneş Pili Sistemi işletilerek, yapısal özellikleri incelenerek, verimi ve enerji üretimini etkileyen başlıca parametreler araştırılmış ve bir bilgi birikimi sağlanmıştır.



Resim 4.3. Güneş pili sistemi [44]

Güneş Pili Aydınlatma Birimleri çalışmaları çerçevesinde, gün boyunca güneş enerjisinden üretilen elektrik ile akü şarj edilerek, geceleri lamba çalıştırılmaktadır. Bu birimlerden 2 tanesi Ankara Atatürk Orman Çiftliği Atatürk Evi önünde, 2 tanesi Didim Güneş ve Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi'nde, 1 adeti EİE Genel Müdürlük Binası girişinde kurulmuş ve işletilmiştir. Ayrıca, Didim'de 160 Wp gücünde kurulan bir sistem ile daha sonra 1 kWp gücünde çatıya monte edilen diğer PV sistemi ile çevre aydınlatması yapılmıştır.



Resim 4.4. Güneş pili aydınlatma birimleri [44]

Küçük ölçekli zirai sulamada kullanılabilecek olan Güneş Pili Su Pompaj Sistemi'nde; 616 Wp gücünde güneş pili, invertör ve dalgıç pompa bulunmaktadır. Atatürk Orman Çiftliğinde kurularak 2 yıl işletilmiş olan bu sistem bir kuyudan 7 m derinliğe daldırılan dalgıç pompa yardımıyla yılda yaklaşık 11 000 m<sup>3</sup> su pompalamıştır. Bu sistem şebekeden uzak yerlerde, dizel motor pompalarıyla ekonomik olarak kullanılabilir.



Resim 4.5. Güneş pili su pompaj sistemi [44]

756 Wp gücünde diğer bir su pompaj sistemi ise EİE Yenilenebilir Enerji Parkı'nda kurularak, yüzey pompaları ve akülü su pompaj sistemi hakkında bilgi edinilmiştir.



Resim 4.6. Su pompaj sistemi [44]

EİE Yerleşkesinde bulunan Örnek Bina bahçesine 2 kWp gücünde su pompaj sistemi tanıtım ve bilinçlendirme amacıyla kurulmuştur.

Güneş Pili Trafik İkaz Sistemi çalışmaları doğrultusunda, karayollarında, trafik ikaz amacıyla kullanılan uyarı lambalarının güneş pilleri aracılığıyla çalıştırılmasını amaçlayan projede 48 Wp gücünde modül, 78 Ah akü kullanılmıştır.



Resim 4.7. Güneş pili trafik ikaz sistemi [44]

EİE tarafından yürütülen bir diğer çalışma ise, Güneşi Takip Eden Sistem'dir. Diğer projelerde kurulan güneş pili sistemleri güneşe belli bir açıda yönlendirilmiş sabit sistemlerdi. Güneşi takip eden bu sistem ile yapılan çalışmada ise, 16 ay boyunca alınan ölçümler sonucunda gelen güneş enerjisinden faydalanma oranı % 23 civarında olmuştur. Güneşi tam takip eden bir sistemde bu oranın % 25'in üzerine çıkacağı öngörülmektedir.

Güneş pilleri şebekeden bağımsız sistemler olarak kullanılabilirdi gibi mevcut elektrik şebekesine bağlı olarak da kullanılabilirler. Enerji maliyetinin pahalı olması nedeniyle güneş pilleri genellikle dünyada şebekeden uzak yerlerde küçük güçlerdeki enerji talebinin karşılanmasında kullanılmıştır. Son yıllarda ise özellikle gelişmiş ülkelerde şebekeye bağlı güneş pili uygulamaları yaygınlaşmaktadır. Bu kapsamda EİE Didim Güneş ve Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi'ne 4,8 kWp gücünde

Şebeke Bağlantılı Güneş Pili Sistemi kurulmuş ve 2 yıl işletilmiştir. Sistemin günlük ortalama enerji üretimi 20 kWh olmuştur.



Resim 4.8. Şebeke bağlantılı 4,8 kWp güneş pili sistemi [44]

Şebeke bağlantılı sistemlerin demonstrasyonu amacıyla 1,2 kWp gücünde bir şebekeye bağlı güneş pili sistemi de EİE Yenilenebilir Enerji Kaynakları Parkı'na tesis edilmiş ve işletilmiştir.

Şebekeye bağlı güneş pili uygulamaları kapsamında EİE Yerleşkesinde inşa edilen ve enerjisini yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlayan (pasif güneş mimarisi, ısı pompası ile ısıtma, güneş pillerinden elektrik üretme, güneş kolektörlerinden sıcak su eldesi) örnek binanın çatısında 5,08 kWp gücünde Şebeke Bağlantılı Güneş Pili Sistemi kurulmuş ve işletilmektedir. Sistemin günlük enerji üretimi 16 kWh civarındadır [44].



Resim 4.9. Şebeke bağlantılı 5,08 kWp güneş pili sistemi [44]

Güneş enerjisi kullanımı ile ilgili bir diğer proje ise; Diyarbakır Güneş Evi Projesi'dir.

Güneş Evi, güneş enerjisinden daha fazla yararlanmak ve enerji tasarrufu sağlamak üzere, güneş-mimari-teknoloji ilişkisi gözetilerek inşa edilmiştir. Pratik uygulamaları bire bir görme imkanı sunarak, bilinçlendirme faaliyetlerinin etkisini arttıran bir eğitim materyali taşıyacak olan Güneş Evi ve Parkı, temiz-tükenmez enerji üzerine çalışmaların yapıldığı bir “araştırma merkezi” olacaktır.

Diyarbakır, Sümerpark içerisinde yapılan Güneş Evi, 20 Haziran 2008'de tamamlandı. Güneş Evi'nde güneş enerjisinin farklı kullanım alanlarını halka tanıtmak amacıyla, tüm enerji güneşten elde edilmiştir. 91 bin 677 Avro bütçeli Güneş Evi Projesi'nin, 78 bin 705 Avro'su AB'ye Katılım Öncesi Mali Yardım Programı çerçevesinde Sürdürülebilir Kalkınmanın Sektörel Politikalara Entegrasyonu Projesi kapsamında hibe ile sağlanmıştır.

Güneş Evi'nde havadan havaya enerji transferinden yararlanmak için, toprak altına 30 cm çapında 88 metre boru döşenmiş, hava borularından terleme sonucu su yoğunlaşmasına karşılık başta ve sonda tahliye noktaları oluşturulmuştur. Dışarıdaki ve içerideki ısı farkının yaratmış olduğu vakum etkisiyle dış taraftaki borudan giren

40–50 derece sıcaklıktaki hava, yerin altında 88 metre dolaşarak 15 derece toprak sıcaklığı nedeni ile soğutulmakta, doğal vakum ve gerektiğinde devreye giren aspiratörle serinlik sağlanmaktadır.

Doğayla uyumlu bütün koşullarının oluşturulduğu Güneş Evi'nde aynı zamanda, yörenin enlemine eşit olarak 40 derece eğimli olan güney çatısında yine güneye bakan 17 derece eğimli mutfak çatısında her biri 162 watt'lık toplam 3,88 kw kurulu güce ulaşan 24 adet PV güneş paneli bulunmaktadır. Bu düzenek, invertör, regülatör ve depolama amaçlı 16 adet 12 volt 100 amper özel aküler aracılığı ile elektrik ihtiyacı sürekli olarak karşılanmaktadır. Hidrojen teknolojisi yaygınlaşana kadar enerji depolamak için şimdilik akü kullanılmaktadır. Evin sıcak su ihtiyacını karşılamak için çatıda ayrıca iki adet güneş kolektörü ve zemin katta özel sıcak su deposu bulunmaktadır.

Güneş Evi'nde evsel atık sular, Biyolojik Arıtmaya da tabi tutulmakta, Dönen Biyolojik Disk yöntemiyle plastik dairesel levhalar üzerinde üreyen bakteriler sayesinde çok düşük bir enerji ile % 90–95 oranında arıtılabilmektedir. Disklerin yüzeyindeki bakteriler tamamen doğal olarak oluşmakta ve ani değişkenlik gösteren organik yüke diğer sistemlere göre çok daha hızlı uyum sağlamaktadır.

Camın faz değiştirici özelliğinden yararlanarak altı ve çevresi basit ısı izolasyonlu, iç yüzeyi yansıtıcı olan bir kutunun üst kısmına cam yerleştirildiğinde uygun bir güneşte sera etkisi ile yemek pişirecek kadar ısı sağlanabilmektedir. Diyarbakır Güneş Evi'nde ters şemsiyeye benzer bir yöntemle ısı oluşturan bir güneş ocağı bulunmaktadır. İç bükey parlak metal levhalar güneşi odaklamakta ve odak noktasında bulunan tel platforma yerleştirilen kabın içindeki suyu kaynatmakta ya da yemeği pişirebilmektedir.

Güneş Evi'nde Enerji, Ekoloji ve Ahşaba ilişkin “Enerji Mimarlığı” ilkelerini ve örneklerini içeren bir araştırma kitaplığı kurulmakta, kütüphane bu konuda ilgisi ve bilgisi olan her yaş grubundan çocukların ve büyüklerin, üniversitelerde eğitim gören

öğrenciler ile öğretim görevlilerin güneş evine gelerek yayınlardan yararlanmasını hedeflemektedir.

Güneş Evi'nde kullanılan tüm iklimlendirme elemanlarının merkezi koordinasyon ile çalışmalarını sağlamak üzere bir otomasyon sistemi kurulması planlanmaktadır. Bu sistem, ölçüm, değerlendirme ve kontrol kumanda sistemlerinden oluşacaktır. Sistem ise, iç ve dış sıcaklıkları ölçen sensörlerden, venturi bacası ile güneş duvarları menfezlerini açma kapama ünitelerini kontrol eden motorlardan ve iklimlendirme sistemini kontrol eden elemanlardan oluşacaktır. Otomasyon sisteminin kurulması ile; Ar-Ge çalışmalarına kapı aralamak ve kendi enerjisini üreten bir evin uzaktan kumanda ya da programlama ile yönetebileceğini kanıtlamak hedeflenmektedir.



Resim 4.10. Güneş evi

#### **4.1. Türkiye’de Ulaştırma Sektöründe Alternatif Enerji Kaynaklarının Kullanımı**

1990'lı yıllarda, başta Orta Doğu Teknik Üniversitesi olmak üzere üniversitelerde hidrojen enerjisi konularında yapılan bilimsel araştırmaların yanı sıra, Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü (EİE) tarafından 1998'de yayınlanan "Yakıt Hücreleri Tarihsel Gelişimi Teknolojisi Çeşitleri ve Dünyadaki Uygulamaları" adlı EİE Bülteni ile hidrojen konusu kamu kurumlarında da telaffuz edilir olmuştur.

TÜBİTAK-TTGV Bilim Teknoloji-Sanayi Tartışmaları Platformu tarafından yapılan çalışma ile 1998 yılında tamamlanan Enerji Teknolojileri Politikası Çalışma Grubu Raporunda, hidrojen enerjisinin önemi ve yapılması gerekenler sıralanmış ve hidrojen enerjisi ile ilgili çalışmaların Ar-Ge alanları arasında yer alması gerektiği belirtilmiştir. Bu raporda ayrıca, hidrojen programlarının esas itibariyle uzun vadeli olduğu vurgulanmakla birlikte, mevcut enerji altyapısıyla kısa dönemli uygulamalar üzerinde durulması, ICHET (International Centre For Hydrogen Energy Technologies) 'in kurulması için başlatılmış olan çalışmaların hızla olumlu sonuca götürülmesi istenmiştir. Rapor Bilim ve Teknoloji Yüksek Kurulu tarafından uygun bulunarak, Başbakanlık kanalıyla Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'na sunulmuştur.

2000'li yıllarda Türkiye'de hemen her üniversitenin malzeme, kimya, makine ve diğer ilgili bölümlerinde hidrojen enerjisiyle ilgili projeler yürütülüp, tezler hazırlanırken, sanayinin de konuya ilgisi artmaya başlamıştır. Koç Grubu şirketlerinden Ford Otosan, Arçelik, Tofaş, Aygaz, Demirdöküm ile Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı (TTGV) ve TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM) tarafından Yakıt Pillerinin Yerli İmkanlarla Üretilmesi Projesi'ne 2004'ün Kasım ayında başlanmıştır. TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi (MAM)'deki hidrojen araştırmaları Gebze'deki TÜBİTAK-MAM bünyesinde 2004'te kurulan Enerji Enstitüsü'nde yakıt pili teknolojileri, hidrojen teknolojileri ve araç teknolojileriyle ilgili birçok ileri araştırma yürütülmektedir.

Atatürk Havalimanı Otobüs Projesi'nde, TPAO ve TEMSA işbirliği ile TEMSA'nın ürettiği hidrojenli otobüsler, havalimanı içinde ve dışında çalışacak ve TPAO tarafından işletilecek, ayrıca TPAO, havalimanı içine bir istasyon kurarak hidrojen yakıtını sağlayacaktır.

Türk Traktör ve Petrol Ofisi işbirliği ile Türk Traktör'ün ürettiği bir traktör hidrojene çevrilecek, Petrol Ofisi ise aracın hidrojenini sağlayacaktır.

Çukurova Holding ve BOS Şirketleri'nin işbirliği ile gerçekleşecek proje de, Çukurova hidrojenle çalışan forklift yapacak, hidrojeni de BOS sağlayacaktır. Proje Nisan 2008'de tamamlanması öngörülmüştür.

Deniz Taksi Projesi'nde, T-Design, Okted ve BOS tarafından oluşturulan konsorsiyum ile denizde giden ve hidrojenle işleyen iki taksi yapılacaktır. Birisinde hidrojen deposu olacak, diğerinin üstüne güneş pili konulacaktır. Proje Ekim 2008'de başlayacaktır.

İzmit Belediyesi Otobüs Projesi'nde, İzmit'te 10 otobüsün hidrojenle çalışması sağlanacaktır. Otobüsleri TEMSA üretecek, hidrojeni ise BOS veya TPAO sağlayacaktır [20].

İstanbul Büyük Şehir Belediyesi tarafından, hidrojen yakıtı ile çalışan bir otobüs filosu ve buna bağlı dolun istasyonu yapılacaktır. Projenin amaçları, taşımacılık konusunda zamanımızın gelişmiş teknolojisini anlatmak, zehirli gazlardan oluşan araç egzozlarını azaltmak, hava kirliliğini ve petrole olan bağımlılığımızı önlemektir. 2050 yılında 10 milyar olacağı tahmin edilen dünya nüfusunun ihtiyaçlarına çare bulmak gerekmektedir. Bugün hayat standartlarımızı korumak için hidrojen enerjisi en iyi çaredir.

Hidrojen yakıtı kullanan on iki kent otobüsünden oluşan bir filo, İstanbul Belediyesinin otobüs İdaresi İETT tarafından işletilecektir. Proje çalışmasının toplam

maliyeti 28 796 milyon dolardır. Bu filodaki on iki otobüsten sekiz adedi yakıt hücresi ile çalışacak, dört adedi ise içten yanmalı motor ile hareket edecektir. Otobüslerin fiziksel nitelikleri şöyledir; uzunluk 12m, en 3m, yükseklik 3m, boş ağırlığı 18 ton ve asgari yolcu adedi 90'dır.

İçten yanmalı motorlar, uzun süreden beri kullanıldığı halde dizel yakıtın enerjisinin en fazla % 38 kadarını yararlı enerjiye dönüştürmektedir. Bunun yanında, yakıt hücresi kullanan araçlar % 45, hatta bazen bundan da yüksek verimler sağlamaktadır. Yakıt hücrelerinin çok değişik cinsleri vardır. Bunlar arasında ticari güç sistemleri içinde otobüsler açısından en uygun olanı Proton Değiştirme Membranı (PEM) olmaktadır.

İstanbul Hidrojen Otobüsleri projesinde elektrikle çalışan sekiz otobüs, alçak tabanlı kent otobüsleridir. Bu araçların içinde 120 kW kapasitesinde PEM tipi yakıt hücresi bulunur. Kent otobüsleri ile aynı seviyeye gelmesi için elektrik motorlarının 180 kW gücünde olması gerekir. Projede kullanılacak olan dört adet içten yanmalı motorun performansı sekiz adet yakıt hücresinin çalışma şartları ile kıyaslanacaktır. İçten yanmalı motorlarda hidrojen - hava karışımı kullanılacaktır. Maksimum motor gücü 200 kW olacaktır. Motorların enjeksiyon sisteminde, ateşleme sisteminde ve krank kartelinde bazı değişiklikler yapılacaktır. Otobüsün her gün en fazla bir kez dolunması gerekmektedir. Bu nedenle 200 km yol alması için otobüsün her gün bir kez dolunması zorunluluğu vardır. İçten yanmalı motorda 200 km uzunluğundaki yolda 40 kg hidrojen tüketilir. Avustralya'da Perth kentinde edinilen deneyime göre yakıt hücreleri için bu tüketim miktarı 24 kg hidrojen olmaktadır. Hidrojen depoları silindir şeklindedir ve iki tarafında yan küresel başlıklar vardır. Deponun iç hacmi minimum 200 litredir. Deponun çapı minimum 360 mm ve uzunluğu 1 850 mm olur. Plastik ya da alüminyum kaplama deponun çevresini sarar. Azami kullanma sıcaklığı 85 °C olacaktır. Deponun ömrü 20 yıldır.

Otobüsün yakıt deposunun dolunması süresi azami 10 ile 15 dakikadır. Bu süreye otobüsün yanaşması, dolun hortumun takılması, geri alınması ve temizlik dahildir.

Garaj inşaatının patlamalara karşı dayanıklı yapılması gerekir. Hidrojen kaçaklarını tespit etmek için algılayıcı kullanmak ve bunlar sayesinde havalandırma ve egzoz sistemlerini otomatik olarak harekete geçirmek zorunluluğu vardır. Ayrıca garajda hidrojen kaçaklarına karşı alarm sistemi bulunmalıdır.

Türkiye’de enerji üretimine yönelik olarak, modern biyokütle çevrim teknolojilerinin de kullanıldığı çalışmalar küçük ölçekli olarak 1993 yıllarından sonra başlamıştır. Bunlara örnek olarak mischantus ve tatlı sorgum bitkileri üzerinde yapılan çalışmalar gösterilebilir. Etanolu, Brezilya örneğinde olduğu gibi Türkiye’de de taşıtlarda benzine seçenek olarak rahatlıkla kullanmak olanaklıdır. Ayrıca, hava kirliliğinden büyük ölçüde etkilenen birçok şehirde, biyokütle ve bunlardan türetilen yakıtların kullanılması ile kükürt dioksit ve benzeri zararlı gazların büyük ölçüde azalacağı da açıktır.

Türkiye’de, 2000 yılından beri biyodizel ticari girişimcilerce, medyada ve devlet kurumlarında artan bir ilgi mevcuttur; böylece biyodizel popüler bir konuma ulaşmıştır. T.C. 59. Hükümet döneminde Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı biyodizel ile ilgili hukuki düzenlemeleri öncelikli icraatlar arasına koymuştur. Bu kapsamda, Elektrik İşleri Etüt İdaresi bünyesinde "Biyoenjerji Proje Grubu" oluşturulmuş, bu grup, konuya ilişkin olarak "Türkiye’de - Biyodizel Kullanımı" konusunda senaryo çalışmaları yapmış ve pilot ölçekte biyodizel üretim sistemi ve laboratuvarı Ekim 2003’te hizmete alınarak, aspir-kanola enerji tarımı deneme üretimi de başlatılmıştır.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığındaki gelişmelerin yanı sıra, Tarım ve Köy İşleri Bakanlığında "Yağlı Tohum Bitkileri İçin Sözleşmeli Tarım Modeli Uygulaması" ve kanola ekiminin arttırılması çalışmaları, Sanayi ve Ticaret Bakanlığında da "Yağlı Tohum Bitkilerinin Alternatif Alanlarda Değerlendirilmesi" çalışmaları da sürdürülmüştür.

Biyodizele ilişkin yasal çalışmalar Petrol İşletmeleri Genel Müdürlüğü koordinasyonundaki bir kurul bünyesinde geliştirilerek Bakanlar Kuruluna arz edilmiş ve biyodizel 5015 Sayılı "Petrol Piyasası Kanunu" kapsamında tanımlanmıştır. Bu kanun, 20 Aralık 2003 tarihli 25322 Sayılı T.C. Resmi Gazetesi'nde yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Biyodizel, kanunda Madde 2-7'de tanımlanmaktadır. Bu madde " Akaryakıtla Harmanlanan Ürünler: Metil tersiyer bütül eter (MTBE), Etanol v.b. (yerli tarım ürünlerinden denatüre üretilenler ile biyodizel hariç) akaryakıt ile eşdeğer vergiye tabi olan ve olacak ürünleri" ifade etmektedir. Kanunun yürürlüğe girmesi sonrasında Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu-EPDK çalışmalarına başlamış ve 17 Haziran 2004 tarihli, 25495 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan "Petrol Piyasası Lisans Yönetmeliği" yürürlüğe girmiştir [9].

Türkiye'de biyodizel ilk kez TTGV/AR-GE projesi kapsamında 2001 yılı sonunda üretilmiştir. Bursa'da AYT firmasınca oldukça basit düzeyde üretim yapılmaktadır, projenin ilerleyen aşamalarında yeni bir tesisin devreye girmesi beklenmektedir. Firmanın ürettiği ürün Nisan 2002'den beri Trakya, Adapazarı ve İzmit'te ürün-dizel yakıtı karışımı şeklinde dizel yakıtından % 20 daha ucuza satılmaktadır.

Şubat 2003'te ilk EN 14214 özelliklerine sahip soya yağı çıkışlı biyodizeli, PROKEM Kimya San. Tic. Ltd. Şti. üretmiştir. Firma, ilgili bakanlıklar ve T.C. Petrol İşleri Genel Müdürlüğü'ne Nisan 2003'te B20 (% 20 Biyodizel+% 80 Dizel Yakıtı) satış ve uygulama izni için başvurmuştur.

Biyodizel üretim tesisi kurmak üzere Alman, Avusturya ve İtalyan firmaları Türkiye'de pazar çalışmaları yapmaktadır. Bu gibi firmalar, bu konuyu önemli bir potansiyel olarak görmektedir.

Türkiye'de borun ulaştırma sektöründe kullanımıyla ilgili yapılan en önemli çalışmalardan biri, Ordu- Ulubey arasına döşenen Bor Madenli Asfalt çalışmasıdır. BOREN tarafından geliştirilen bor katkılı çimento ile Karadeniz Bölgesi'ne yapılan

2 km beton yol uygulaması tamamlanmıştır. Karayolları 7. Bölge Müdürlüğü ile düzenlenen protokol kapsamında yapılan yolun beton plak tasarımı Karayolları Genel Müdürlüğü, beton tasarımı ise DSİ TAKK dairesi tarafından yapılmıştır.

Enstitü koordinasyonunda yapılan beton yol, Ordu-Sivas karayolunun 6. km'sinde iki taraflı olarak yapılmıştır. Toplam 1 800 ton çimento kullanılan yolun 1 850 m'si bor katkılı çimento, 150 m'si ise portlant çimento ile yapılmıştır. Yolun ilk 5 km'sinin aynı tarihlerde beton asfalt ile kaplanmış olması sayesinde, asfalt ile beton yol arasındaki performans farkı ölçüleceği gibi, portlant çimento ile bor katkılı çimento arasındaki performans farkı da ölçülmüş olacaktır.

20 Eylül 2007 tarihinde yapımına başlanan birinci etap, 28 Eylül 2007 tarihinde bitirilmiştir. İkinci etap ise, 10–17 Kasım tarihleri arasında yapılmıştır.

Bor katkılı beton yol uygulamasının ikincisi ise, Isparta- Burdur arasındaki mesafeyi 23 kilometreye indiren Gelincik Yolu'nda uygulanmaya başlanmıştır. Burdur ve Isparta Valiliği ile BOREN tarafından ortaklaşa yürütülen çalışmada Gelincik Yolu'nun 12 metre genişliğindeki 1 200 metrelik bölümü bor içerikli beton yol ile kaplanacaktır [43].

BOREN'e veri sağlayacak deneme amaçlı yolun bir bölümünde ise elyaf malzeme kullanılması da amaçlanmaktadır. 6 metre aralıklar halinde üzerine bor katkılı beton dökülen hareketli sistem sayesinde ağırlık yolun bütününe dağıtılacaktır. Atmosfere sera gazı salınımı yapmayan bor içerikli beton yol, bu yönüyle küresel iklim değişikliğiyle de mücadele etmektedir. Ayrıca bor içerikli yol gaz ve suyu daha az geçirdiği için asfalt yola göre daha dayanıklı olmaktadır.

1970'lerde yaşanan petrol ve enerji krizi sonucu, Türkiye'de önem kazanan güneş enerjisi ne yazık ki petrol fiyatlarının zaman içinde düşmesi sonucu önemini yitirmiş bir görünümde dir.

Fotovoltaik sistemlerde ise ciddi bir uygulamadan söz etmek mümkün değildir. Bu nedenle de, talep oluşmadığı için, Türkiye'de güneş pili fiyatları çok pahalıdır.

Türkiye'de güneş arabaları çalışmaları konusunda çeşitli üniversitelerin yaptıkları araştırmalar söz konusudur.

Alternatif enerji kaynakların tanıtılması ve bu enerjiler üzerindeki araştırma geliştirme çalışmalarını teşvik etmek amacıyla bu enerjileri kullanan sistemler arasında yarışmalar düzenlenmektedir. Bu proje yarışmaları sayesinde öğrenciler ve bilim insanları, bahsedilen alternatif kaynaklar üzerinde daha yoğun bir çalışma ve araştırma imkanı kazanmaktadırlar. Bu yarışmalardan bir tanesi de 2005 yılında Tübitak Bilim ve Teknik Dergisi tarafından organize edilen Formula-G Güneş Arabaları yarışmasıdır. Bu yarışmaya Türkiye genelinden 16 takım katılmıştır. Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Bölümü de bu yarışmaya "Gayret" isimli bir güneş arabasıyla iştirak etmiştir [7].

SAGUAR (Sakarya Üniversitesi Güneş Arabası), Sakarya Üniversitesi öğrencileri tarafından tasarlanan ve üretilen güneş arabasıdır.

TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisinin çağrısına uyan mühendislik fakültesi öğrencileri, Sakarya Üniversitesi Güneş Arabası Ekibi'ni kurdu. 2004'ün Şubat ayında ekip olarak resmi katılım başvurularını yaptılar.

2004'ün sonunda proje raporundan olumlu sonuç alan ekip X4 tasarımını üretmek için çalışmaya başladı. X4 tasarımı, Kocaeli'nin Körfez ilçesinde hizmet veren ve projenin ana sponsorlarından biri olan Gülünce Otomotiv'in atölyelerinde ekip tarafından hayata geçirildi. 2005'in Ağustos ayı başında tamamlanan aracın halka tanıtımı 24 Ağustos 2005 tarihinde Sakarya'da gerçekleştirildi. 2005 Ağustos ayında yeni modelin tamamlanmasının ardından ekip Formula-G 2005'e katıldı.

Yarışın ardından bir sonraki yarış için projeye daha geniş çaplı katılım sağlamak ve daha iyi bir araç üretmek için fakültenin muhtelif yerlerine afişler asılarak öğrenciler

projeye davet edildi ve SAGUAR X5'i üretmek için birinci ve ikinci sınıf öğrencilerinin de yer aldığı yeni bir ekip kuruldu.

Finansman ve sponsorluk ile oldukça uzun zaman harcayan ekip yeni aracın tasarım aşamasını bitirmesine karşın üretim aşamasına ancak 2006'nın başlarında geçebildi. Bu arada ekip çalışma alanını genişletmek ve genel olarak alternatif enerjiler alanında çalışmak için Sakarya Üniversitesi İleri Teknolojiler Uygulama Topluluğu (SAITEM) adını aldı.

2006 Haziran ayında X5'in tamamlanmasının ardından ekip Formula-G 2006'ya katıldı.



Resim 4.11. SAGUAR X5 yarışa hazırlanırken [45]

SAGUAR'ın tasarım süreci 2003'ün sonlarında başlamıştır. İlk tasarım olan SAGUAR X1 modelinin bilgisayar ortamında analizleri tamamlanmış ve ortalama maliyeti çıkarılmıştı. Fakat sponsorluk çalışmaları sonuç vermeyince bu tasarım modeli SAGUAR X2 adlı yeni bir tasarımla, ardından bu maliyet de fazla olunca X3 ve son olarak sadece 17 Bin YTL'ye mal olacak X4 tasarımıyla değiştirilmişti.

Formula G 2005 Güneş Arabası yarışına katılan SAGUAR X4 kalkış sırasında yaşadığı rejeneratif frenleme ile ilgili bir sorun nedeniyle istediği performansı sergileyememesine karşın yarışı 16 ekip arasında 4. olarak tamamlamayı başardı.

Formula-G 2005'in ardından araçta ciddi iyileştirmeler planlayan ekip SAGUAR X5'i tasarladı ve SAGUAR X4 aracının şasisini kullanarak SAGUAR X5'i üretti. SAGUAR X5 modeli optimal hız kontrolü, aracın tüm bilgilerini her an pit bilgisayarına yollayan telemetri sistemi ve rüzgara karşı daha kararlı davranış sergileyen yeni aerodinamik yapısı ile X4 modelinden çok daha iyi olduğunu ilk yarışta iki kupa alarak gösterdi.

ARIBA, İstanbul Teknik Üniversitesi'nin Formula-G ekibinin ürettiği ilk güneş enerjili yarış aracının adıdır. Ekip, 2003 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) GAE (Güneş Arabası Ekibi) adı altında kurulmuştur. Üyelerini akademisyenler ve çoğunlukla İTÜ mühendislik bölümlerinin lisans öğrencileri oluşturmaktadır. Proje genel itibari ile elektrik mühendisliği, makina mühendisliği ve uçak ve uzay mühendisliği araştırma konusuna girmektedir. Ayrıca ARIBA aracı en son 2006'da yarışlara katılmıştır. Ekip, 2007 yarışlarında ARIBA II ve İTÜRA araçlarını kullanmıştır [45].

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dünyadaki fosil kökenli yakıt rezervlerinin giderek azalması ve bu tür kaynakların kullanımıyla oluşan hava ve çevre kirliliği nedeniyle, son yıllarda enerji üretimi alanındaki araştırmalar, yenilenebilir ve temiz enerji üreten kaynaklar üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Petrol kökenli yakıtlara alternatif olarak, hidrojenin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılabilirliği yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır. Motor yakıtı olarak hidrojen kullanımı 1920'li yıllarda başlamış ve günümüze kadar yapılan çalışmalarla kullanım aşamasına gelinmiştir. Elektroliz ile sudan elde edilmesi, fiziksel ve kimyasal özellikleri ve çevre kirliliğini azaltıcı yönde olumlu etkileri hidrojeni önemli bir alternatif durumuna getirmiştir.

Uygulamanın yaygınlaştırılmasının önündeki engeller; hidrojen üretiminin henüz pahalı olması, erken tutuşma ve emme manifoldu geri tutuşması gibi bazı problemleri, araç üzerinde depolanma zorlukları, güvenlik sistemleri gibi konulardaki bilgi ve becerilerin teorik düzeyde kalmasıdır.

Hidrojenin üretim maliyetleri, şuan için benzin ve motorine göre oldukça yüksektir. Ayrıca, sıvı halde depolanması söz konusu ise, hidrojeni sıvı hale getirmek için gerekli olan maliyet hidrojenin depoladığı enerjinin % 25-% 30'u kadar enerjiye mal olur ki bu da azımsanamayacak bir maliyettir. Ancak fosil yakıtlar tükenmekte iken, dünya enerji ihtiyacı da artmaktadır ve bu nedenle fosil yakıtların fiyatları hızla yükselmektedir. Bununla beraber hidrojen üretim yöntemleri için yeterli araştırma geliştirme çalışması yapıldığında üretim maliyetleri, ileride şuan ki duruma nazaran oldukça düşecektir. Ayrıca Türkiye'nin hidrojen üretimi açısından bir şansı, uzun bir kıyı şeridi olan Karadeniz 'in tabanında kimyasal biçimde depolanmış hidrojen bulunmasıdır [2].

Günümüz dünyasında temiz ve sürekli enerji kaynaklarına ihtiyaç her geçen gün

artmaktadır. Yakıt pilleri için gelecekte kullanım alanları tahminleri de göz önüne alındığında uzun yıllar gündemde ve kullanımda kalacağı ve pek çok gelişmelere açık olduğu açıktır.

Önemi her geçen gün artan yakıt pilleri üzerine çalışmaların artarak devam etmesi ve pratik uygulamalar yapılarak üretim teknolojisinin ülkemize kazandırılması önemli bir hedef olarak ortaya çıkmaktadır [3].

Bitkisel yağlara, petrol türevleri olarak elde edilen motor yakıtı ve yağına alternatif olabilecek kaynaklar gözü ile bakılmaktadır. Dolayısıyla, bitkisel yağlardan elde edilen biyodizel, dizel yakıtına alternatif olabilecek niteliktedir. Biyodizel, petrol ithalatının, petrol bağımlısı ülkelere getirdiği ekonomik yükü azaltmaktadır. Bitkisel yağ endüstrisinin ve tarım ekonomisinin gelişmesine katkıda bulunacaktır. Özellikle tarım ekonomisine dayalı ülkelerde bu katkı fazla olacaktır.

Biyodizel, Türkiye'de mevcut olanaklarla uygulamaya alınabilecek önemli alternatif yakıt seçeneklerinden birisidir. Biyodizel üretmek ve kullanmak için Türkiye yeterli ve uygun alt yapıya sahiptir. Türkiye'de kolza (kanola), ayçiçek, soya, aspir gibi yağlı tohum bitkilerinin enerji amaçlı tarımı mümkündür. Hükümet tarafından da kanola ve soya ekimi desteklenmektedir. Fakat ülkemizde üretilen bitkisel ve hayvansal yağlar, tüketimi karşılayacak düzeyde değildir. Ülkemizde, yılda 1,3 milyon ton bitkisel yağ ithal edilmektedir. Dolayısıyla, biyodizel üretiminde hammadde olan yağlı tohum bitkilerinin fiyatı yüksek olması ve üretim maliyetinin artması yatırımları engellemektedir. Çünkü pahalıya mal olan ürün pazarda rekabet şansı bulamamaktadır. Bu sorunu aşmak için çeşitli kapasitelerde biyodizel üretim tesisleri öncelikle kırsal kesimde konuşlandırılarak, tarım makinelerinin ve kamyonların bu yakıtı kullanmaları özendirilebilir. Tarım Bakanlığı tarafından, çiftçi, enerji amaçlı tarım için teşvik edilmelidir. Çiftçi öncelikle yağlı tohum bitkileri üreterek, bu üretimden elde edilen yağdan araç yakıtını, küsbe ve bitki artıklarından beslediği hayvanların yemini karşılayabilir. Hayvansal atık olarak görülen gübrenin biyogaz amaçlı olarak değerlendirilmesi ile biyodizel işletmesinin ihtiyaç duyduğu

enerji (gerek ısıtma, gerekse elektrik) üretilebilir. Böylece, Türkiye tarımsal potansiyelini daha doğru ve faal olarak kullanıp, yeni iş olanakları sağlayacaktır [4].

Dünyada en çok bulunan element olan hidrojen enerji kaynağı olarak çok büyük bir potansiyele sahiptir ancak verimli bir şekilde depolanması sorunlar oluşturmaktadır. Özellikle, mobil uygulamalarda, kullanılan hidrojen taşıyıcının hafifliği ve güvenliği oldukça önemli parametrelerdir.  $\text{NaBH}_4$ 'ün benzer amaçlı diğer bileşiklere oranla daha fazla hidrojen depolayabilmesi, yanıcı ve patlayıcı olmaması, kolay kontrol edilebilir bir reaksiyon ile hidrojenini verebilmesi gibi özellikleri nedeniyle, yakıt hücreleri için güvenli ve uygun bir hidrojen kaynağı olarak kabul edilmektedir.

Bugün üzerinde çalışılmakta olan yeni ve temiz enerji kaynakları arasında güneş enerjisi, sınırsız bir potansiyele sahip olması, tükenmez niteliği, çevre kirliliğine yol açmaması, iletim ve dağıtım sorununun bulunmaması gibi sebeplerle büyük önem kazanmış bulunmaktadır.

Ülkemiz alternatif yakıt sistemleri araştırmalarında geri kalmamalı, dünya rezervinin çok önemli bir kısmını barındırdığımız bor madenini de düşünerek, yakıt pili araştırmalarına hız vererek, bu alanda teknoloji öncüsü olmalıdır. Hidrojen elementinin rezerv sorununun olmaması ve temiz enerji kaynağı olması en önemli alternatif olarak göze çarpmaktadır.

Bunun yanı sıra ülkemizin coğrafi yapısı ve ekilebilir alanlarının çeşitliliği biyodizel alanında da bize avantaj sağlamaktadır Burada dikkat edilmesi gereken husus, biyodizel üretiminde kullanılan bitkilerin gelirinin yüksek olması, üreticinin bu yöne kayması ile esas görevi olan ülkenin kendi kendine yetmesi açısından önem arz eden besin ürünlerinin ekim alanlarının azalmasıdır.

Güneş enerjisi açısından üniversitelerimizin geliştirdiği güneş arabaları düşünüldüğünde ise oldukça umut vaat eden bir konumda olduğumuz düşünülmektedir.

Ülkemizin fosil yakıtlarının yakın gelecekte tükenecek olması gerçeği karşısında dışa bağımlılığı en aza indirecek her türlü alternatif teknolojiler üzerinde yoğunlaşması gerektiği düşünölmektedir.

Çalışmamızda yakıt pilleri, hidrojen ve bor teknolojileri bir başlık altında ayrı ayrı olmak üzere, biyodizel, güneş enerjisi konuları ele alınmış, her alternatif hakkında temel özellikleri ve teorik bilgiler yanında, pratik uygulamalarda verilerek alternatif enerji sistemleri çok boyutlu olarak ortaya konmuştur.

## KAYNAKLAR

1. Yıldızbilir, F., “Yakıt pili ile elektrik enerjisi üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 1, 9, 19-22, 34-35, 37 (2006).
2. Gül, K. E., “Hidrojenin içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılması ve performansa etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 1-23, 27-36, 51-71, 74-86, 95 (2006).
3. Oğuz, A. E., “Hidrojen yakıt pilleri ve PEM yakıt pilinin analizi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-2, 6, 11-14, 60 (2006).
4. Ölçüm, T., “Biyodizel teknoloji”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 1-2, 15-23, 31-32, 55-64, 68-69 (2006).
5. Özsezen, A. N., “Atık palmiye yağından üretilen biyodizelin motor performans ve emisyon karakterleri üzerine etkisinin incelenmesi”, Doktora Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, 1, 3-4 (2007).
6. Kantürk, A., “Borakstan sodyum borhidrür üretimi ve üretimi etkileyen parametrelerin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 1, 3-7, 22-27, 86 (2006).
7. Sunan, M., “Güneş enerjisi ile çalışan aracın elektrik ve elektronik sisteminin mikrodenetleyiciler ile tasarımı ve uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, 1, 3-6, 14, 49-50, (2006).
8. Çavuşoğlu, A., “Yakıt pilleri ve kullanım alanları”, Yüksek Lisans Tezi, **Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Bursa, 15-21, 81-90 (2006).
9. Akçay, H. T., “Bazı bitkisel yağlardan biyodizel üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, 10-16 (2006).
10. Çakır, H., “Güneş piliyle elde edilen elektrik enerjisinin termoelektrik soğutmada kullanılması”, Bilim Uzmanlığı Tezi, **Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 33 (2006).

11. Menderes, B., “Güneş enerjisi ile çalışan araba (Solar Car) dizaynı ve imalatı”, Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gebze, 1-17, 20-21 (2005).
12. Akdere, Y., “Soya yağı metil esterinin dizel motorlarda yakıt olarak kullanımının deneysel olarak araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 56-60, 71-73 (2006).
13. Tillem, İ., “Dizel motorlar için alternatif yakıt olarak biyodizel üretimi ve kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 24 (2005).
14. Kılınç, E., Mordoğan, H., Tanrıverdi, M., “Bor minarelerinin önemi, potansiyeli, üretimi ve ekonomisi”, *4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 227 (2001).
15. Şahin, M., “Hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanımının getireceği avantajlar ve karşılaşılan problemler”, *III. Ulusal Hidrojen Enerjisi Kongresi*, İstanbul, 2-5 (2006).
16. Erarslan, K., Karakoç, F., “Bor’lu yakıt sistemleri-1: Hidrojen motorları ve entegre sistemleri”, *1. Uluslararası Bor Sempozyumu*, Kütahya, 150-154 (2002).
17. Aslan, Ö., “Hidrojen ekonomisine doğru”, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 285-286 (2007).
18. İder, S. K., “Hidrojen enerji sistemi”, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi*, 134: 101 (2003).
19. Altun, Ş., “Bitkisel yağların alternatif yakıt olarak dizel motorlarında kullanılması”, *Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 9 (3): 35-42 (2005).
20. Türkiye Çevre Vakfı Yayını, “Türkiye’nin Yenilenebilir Enerji Kaynakları”, Engin Ural, *Ankara*, 56-65, 178-180 (2006).
21. Çınk1, M. M., “Petrolden Bor’a”, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi*, 130: 25-34 (2002).

22. Cambell, G. , Seal, M. R., “The Ground-up Hybrid Vehicle Program at the Vehicle Research Institute”, *Electric and Hybrid Vehicles, SAE International*, Warrendale PA, 59-65 (1995).
23. Lingaitis, L. P. , Pukalskas, S., “Ecological Aspects of Using Biological Diesel Oil in Railway Transport” , *Transport*, 23 (2): 138-143 (2008).
24. Qudrdan, M. , Shayegan, J., “Economic Assessment of Hydrogen Fueling Station, A Case Study of Iran” , *Renewable Energy*, 33, 2525-2531 (2008).
25. Demirbaş, A., “Biofuels Sources, Biofuel Policy, Biofuel Economy and Global Biofuel Projections” , *Energy Conversion and Management*, 49, 2106-2116 (2008).
26. Wu, C., Bai, Y. , Wu, F., “Fast Hydrogen Generation from NaBH<sub>4</sub> Solution Accelerated by Ferric Catalysts” , *Materials Letters*, 62, 4242-4244 (2008).
27. Fonseca, A., Sa, V., Bento, H., Tavares, M., Pinto, G. , Gomes, L., “Hydrogen Distribution Network Optimization: A Refinery Case Study”, *Journal of Cleaner Production*, 16, 1755-1763 (2008).
28. Wang, Y., Wu, H., Zong, M. H., “Improvement of Biodiesel Production by Lipozyme TL IM-Catalyzed Methanolysis Using Response Surface Methodology and Acyl Migration Enhancer” , *Bioresource Technology*, 99, 7232-7237 (2008).
29. Corbo, P., Migliardini, F., Veneri, O., “Experimental Analysis of A 20 kW<sub>e</sub> PEM Fuel Cell System in Dynamic Conditions Representative of Automotive Applications” , *Energy Conversion and Management*, 49, 2688-2697 (2008).
30. Kulisic, B., Loizou, E., Rozakis, S., Segon, V., “Impacts of Biodiesel Production on Croatian Economy” , *Energy Policy*, 35, 6036-6045 (2007).
31. Nwafor, O. M. I., “Emission Characteristics of Diesel Engine Running on Vegetable Oil with Elevated Fuel Inlet Temperature” , *Biomass & Bioenergy*, 27, 507-511 (2004).
32. Saxena, R. C., Seal, D., Kumar, S., Goyal, H. B., “Thermo-Chemical Routes for Hydrogen Rich Gas from Biomass: A Review” , *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 1909-1927 (2008).

33. Kim, J., Lee, Y., Moon, I., “Optimization of A Hydrogen Supply Chain Under Demand Uncertainty” , *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 1-15 (2008).
34. Ale, B. B., Shrestha, B., “Hydrogen Energy Potential of Nepal” , *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 1-10 (2008).
35. Frondel, M. , Peters, J., “Biodiesel: A New Oildorado?” , *Energy Policy*, 35, 1675-1684 (2007).
36. Kim, S. , Dale, B. E., “Enviromental Aspects of Ethanol Derived from No-Tilled Corn Grain: Nonrenewable Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions” , *Biomass & Bioenergy*, 28, 475-489 (2005).
37. Devlet Planlama Teşkilatı, “ 8. Beş yıllık kalkınma planı madencilik özel ihtisas komisyonu raporu, endüstriyel hammaddeler alt komisyonu, kimya sanayi hammaddeleri çalışma grubu raporu”, *DPT 2608, Ankara*, 8-15 (2001).
38. İnternet: Gazi Üniversitesi Otomotiv Bilim ve Teknoloji topluluğu “Bor Nedir” [http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/alternatif\\_enerji/Bor.pdf](http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/alternatif_enerji/Bor.pdf) (2008)
39. Akbaba, Gülgün, Gürdilek, Raşit, Tozar, Zeynep, Temmuz, *Tübitak Bilim ve Teknik*, 39 (464): 41 (2006).
40. Ergen, G., “Ön ısıtma uygulanarak kullanılan biyodizel yakıtının motor performans ve emisyonlarına etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 41 (2006).
41. Deriş, N., “Geleceğin Yakıtı Hidrojen”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 10-16 (2006).
42. İnternet: Orta Doğu Teknik Üniversitesi “Neden Güneş” <http://www.robot.metu.edu.tr/odtutek/mese/nedengunes.htm> (2008).
43. İnternet: Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü “Proje Bilgileri” <http://www.boren.gov.tr/proje.htm> (2008).
44. İnternet: Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü “Güneş Enerjisi Çalışmaları” [http://www.eie.gov.tr/turkce/gunes/gunes\\_index.html](http://www.eie.gov.tr/turkce/gunes/gunes_index.html) (2008).

45. İnternet: Sakarya Üniversitesi “Saitem/ Saguar”  
<http://www.solarcar.sakarya.edu.tr/> (2008).
46. İnternet: Gazi Üniversitesi “G-Mobil” <http://websitem.gazi.edu.tr/atilgan/Galeri>  
(2008)

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YILDIZ, Aytaç  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 10.03.1981, Artvin  
 Medeni hali : Bekar  
 Telefon : 0 (312) 309 05 15/4992  
 0 (555) 339 13 63  
 Faks :  
 e-mail : aytac.yildiz@gmail.com ; aytacyildiz@tcdd.gov.tr

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü	2005
Lise	Artvin Anadolu Lisesi	1999

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2006- 2008	TCDD Genel Müdürlüğü İnşaat Dairesi	İnşaat Mühendisi
2008-	TCDD Genel Müdürlüğü Taşınmaz Mallar Dairesi,	İnşaat Mühendisi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, Futbol, Tarih ve Edebiyat