

## HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

Mak.Müh Şeyma KARAHAN

FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Makinaları Programında  
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Orhan DENİZ



Doç. Dr. Haluk KALELİ



Doç. Dr. Uğur KESGİN



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	v
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ÖNSÖZ .....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
2. ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN TARİHÇESİ .....	6
2.1 İlk Dönemler .....	6
2.2 İlk Yol Araçları .....	6
2.3 Elektrikli Araçlar Buharlı ve Benzinli Araçlarla Yarışıyor .....	7
2.4 Altın Dönem.....	8
2.5 Karanlık Devirler (1925-1960).....	9
2.6 Modern Çağ.....	9
2.6.1 1960'lar .....	9
2.6.2 1970'ler .....	11
2.6.3 1980'ler .....	12
2.6.4 1990 ve 2000'ler.....	13
2.6.4.1 General Motors EV1 .....	13
2.6.4.2 Ford Think City.....	14
2.6.4.3 Nissan Hypermini.....	15
2.6.4.4 Toyota RAV 4 EV .....	15
2.6.4.5 Honda Insight .....	18
2.6.4.6 Honda Civic.....	19
2.6.4.7 Toyota Prius .....	19
3. ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİLERİ.....	23
3.1 Tümü-Elektrikli Araçların Değerlendirilmesi.....	23
3.2 Hibrid Elektrikli Araçların Değerlendirilmesi .....	25
3.2.1 Elektrikli Araçların Sınıflandırılması.....	27
3.2.1.1 Seri Hibrid Sistem .....	27
3.2.1.2 Paralel Hibrid Sistem .....	30
3.2.2 Hibrid Elektrikli Araçların Avantajları ve Dezavantajları .....	33
3.3 Yakıt Pili Elektrikli Araçların Değerlendirilmesi .....	34
3.3.1 Yakıt Pili Araçların Avantajları ve Dezavantajları .....	36
4. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN ALT SİSTEMLER .....	39
4.1 Güç Üretim Sistemleri.....	39

4.1.1	Yakıt Pilleri .....	39
4.1.1.1	Yakıt Piliinde Kullanılan Yakıtlar.....	40
4.1.1.1.1	Hidrojen.....	40
4.1.1.1.2	Metanol.....	43
4.1.1.2	Yakıt Piliinin Yapısı.....	44
4.1.1.2.1	Yakıt İşleme Ünitesi.....	44
4.1.1.2.2	Güç Üretim Sistemi.....	44
4.1.1.2.3	Güç Dönüştürücü.....	45
4.1.1.3	Yakıt Pili Çeşitleri ve Sınıflandırılması .....	46
4.1.1.3.1	Alkali Yakıt Pili .....	46
4.1.1.3.2	Proton Elektrolit Membranlı Yakıt Pili.....	46
4.1.1.3.3	Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili .....	48
4.1.1.3.4	Fosforik Asit Yakıt Pili .....	49
4.1.1.3.5	Ergimiş Karbonat yakıt Pili.....	49
4.1.1.3.6	Katı Oksit Yakıt Pili.....	49
4.1.1.4	Yakıt Pili Uygulama Alanları.....	50
4.1.1.4.1	Uzay Çalışmaları/Askeri Uygulamalar .....	51
4.1.1.4.2	Evsel Uygulamalar .....	51
4.1.1.4.3	Sabit Güç Üretim Sistemi/Yüksek Güç Üretim Sistemi Uygulamaları .....	51
4.1.1.4.4	Taşınabilir Güç Kaynağı Uygulamaları .....	52
4.1.1.4.5	Atık/Atık Su Uygulamaları .....	52
4.1.1.4.6	Araç Uygulamaları .....	52
4.1.2	Dizel ve Otto Motorları .....	55
4.1.2.1	Dizel ve Otto Motorlarına Uygulanan İdeal Çevrimler .....	55
4.1.2.1.1	Sabit Hacimde Isı Girişli İdeal Çevrim (Otto Çevrimi) .....	55
4.1.2.1.2	Sabit Basınçta Isı Girişli İdeal Çevrim (Dizel Çevrimi) .....	56
4.1.2.1.3	Karma İdeal Çevrim (Seilinger Çevrimi).....	57
4.1.2.2	Dizel ve Otto Motorlarında Yük Ayarı .....	57
4.1.2.3	Dört Stroklü Dizel ve Otto Motorları .....	58
4.1.2.3.1	Emme Stroku.....	59
4.1.2.3.2	Sıkıştırma Stroku.....	59
4.1.2.3.3	Genişleme Stroku .....	59
4.1.2.3.4	Egzost Stroku .....	59
4.1.2.4	İki Stroklü Dizel ve Otto Motorları .....	60
4.1.2.4.1	Genişleme-Egzost-Süpürme Stroku .....	61
4.1.2.4.2	Süpürme-Egzost-Sıkıştırma Stroku.....	61
4.1.3	Jeneratörler .....	63
4.2	Enerji Depolama Sistemleri .....	64
4.2.1	Bataryalar .....	64
4.2.1.1	Bataryanın Yapısı .....	65
4.2.1.2	Batarya Parametreleri .....	67
4.2.1.2.1	Batarya Kapasitesi.....	67
4.2.1.2.2	Batarya Deşarj Oranı .....	68
4.2.1.2.3	Batarya Deşarj Durumu.....	69
4.2.1.2.4	Batarya Deşarj Derinliği.....	69
4.2.1.2.5	Batarya Pratik Kapasitesi .....	69
4.2.1.2.6	Batarya Enerjisi ve Özgül Enerji.....	69
4.2.1.2.7	Batarya Gücü ve Özgül Gücü.....	70

4.2.1.3	Şarj Edilebilen Batarya Türleri .....	71
4.2.1.3.1	Kurşun-Asit Batarya.....	71
4.2.1.3.2	Nikel Kadmiyum Batarya.....	72
4.2.1.3.3	Nikel-Metal Hidrür Batarya .....	73
4.2.1.3.4	Sodyum-Sülfür Batarya.....	74
4.2.1.3.5	Lityum-Katı Polimer Batarya.....	75
4.2.1.3.6	Lityum-iyon Batarya .....	75
4.2.2	Volan .....	77
4.2.3	Süperkapasitörler ve Ultrakapasitörler.....	79
5.	HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇ DİZAYNI VE TAŞIT MEKANİĞİ .....	82
5.1	Taşıta Etki Eden Hareket Dirençleri .....	82
5.1.1	Yuvarlanma Direnci .....	83
5.1.2	Yokuş Direnci .....	85
5.1.3	Aerodinamik Direnç.....	86
5.1.4	İvme Direnci.....	87
5.1.5	Çeki Direnci .....	88
5.1.6	Toplam Direnç.....	88
5.2	M2000 Konvansiyonel Aracın Seri Hibrid Elektrikli Araca Dönüştürülmesi .....	89
5.2.1	M2000 Hibrid Elektrikli Aracın Alt Sistem Özellikleri.....	91
5.2.1.1	Tahrik Sistemi .....	91
5.2.1.2	Enerji depolama Sistemi.....	92
5.2.1.3	Güç Üretim Sistemi.....	93
5.2.2	M2000 Seri Hibrid Elektrikli Aracının Yük Hesapları .....	95
5.2.3	Aracın Performansı .....	101
5.2.3.1	Hibrid Sistemle Düz Yolda İvmelenme .....	101
5.2.3.2	Bataryalarla (Tümü-Elektrikli) Düz Yolda İvmelenme .....	104
5.2.3.3	Bataryalarla Sağlanan Güçle Düz yolda Sabit Hız.....	108
5.2.3.4	%20 Eğimli Yokuşta Hibrid Sistemle İvmelenme .....	110
5.2.3.5	Hibrid Sistemle %20 Eğimli Yokuşta Maksimum Sabit Hız.....	113
5.2.4	M2000 Aracının Advisor programı ile Simülasyon Sonuçları.....	116
5.2.4.1	Advisor Simülasyon Programı .....	116
5.2.4.2	Düz Yolda Hibrid Sistemle 80 km/h'e İvmelenme.....	117
5.2.4.3	Aracın Düz yolda Değişken Hızlarda İvmelenmesi.....	120
5.2.4.4	Aracın Düz yolda Sadece Bataryalarla Sağlanan Güçle 55 km/h'e İvmelenmesi (Sessiz Sürüş ) .....	124
6.	SONUÇ .....	128
	KAYNAKLAR .....	130
	ÖZGEÇMİŞ .....	131

## SİMGE LİSTESİ

A	Hareket doğrultusuna dik izdüşüm alanı
$A_v$	Bir moldeki atom veya molekül sayısı, Avagadro sayısı
a	Aracın ivme değeri
$a_{dbi}$	Düz yolda sadece bataryalarla ivmelenme değeri
$a_{dhi}$	Düz yolda hibrid sistemle ivmelenme değeri
$a_{yi}$	Yokuşta hibrid sistemle ivmelenme değeri
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
b	İz genişliği
$C_D$	Aerodinamik direnç katsayısı
c	İletken boyu
E	Endüksiyon Gerilimi
$E_P$	Bataryada pratik olarak depolanan enerji
$E_T$	Bataryada teorik olarak depolanan enerji
e	Teker düşey eksenini ile teker tepki merkezi arasındaki dik uzaklık
$e_0$	Elektron yükü
F	Faraday sabiti
$F_t$	Tekere etki eden itme kuvveti
f	Frekans
$f_{ro}$	Teker yuvarlanma direnç katsayısı
G	Dingil yükü
$G_{a,\delta}$	Ön ve arka dingil yükü
g:	Yer çekimi ivmesi
$I_{dbi}$	Düz yolda sadece bataryalarla ivmelenme için gerekli akım
$I_{dhi}$	Düz yolda hibrid sistemle ivmelenmek için gerekli akım
$I_{dhs}$	Düz yolda hibrid sistemle sabit hız için gerekli akım
$I_{yi}$	Yokuşta hibrid sistemle ivmelenme için gerekli akım
$I_{ys}$	Yokuşta hibrid sistemle sabit hız için gerekli akım
i	Batarya akımı
J	Atalet momenti
$K_G$	Jeneratöre ait sabit
k	Volanlarda geometriye bağlı sabit sayı
L	İz boyu
M	Aracın kütlesi
$M_B$	Batarya kütlesi
$M_m$	Sınırlayıcı reaktanın molar kütlesi
$Me_{dbi}$	Düz yolda sadece bataryalarla ivmelenme için gerekli motor momenti
$Me_{dhi}$	Düz yolda hibrid sistemle ivmelenme için gerekli motor momenti
$Me_{dhs}$	Düz yolda hibrid sistemle sabit hız için gerekli motor momenti
$Me_{yi}$	Yokuşta hibrid sistemle ivmelenme için gerekli motor momenti
$Me_{yiv}$	Yokuşta hibrid sistemle ivmelenme için vites göre gerekli motor momenti
$Me_{ys}$	Yokuşta hibrid sistemle sabit hız için toplam motor momenti
$Me_{ysv}$	Yokuşta hibrid sistemle sabit hız için vites göre gerekli motor momenti
$m_R$	Sınırlayıcı reaktanın kütlesi
N	Zeminin tepki kuvveti
$Ne_{dbi}$	Düz yolda sadece bataryalarla ivmelenme için toplam motor gücü
$Ne_{dhi}$	Düz yolda hibrid sistemle ivmelenme için toplam motor gücü
$Ne_{dhs}$	Düz yolda hibrid sistemle sabit hız için gerekli motor gücü
$Ne_{yi}$	Yokuşta hibrid sistemle ivmelenme için toplam motor gücü
$Ne_{ys}$	Yokuşta hibrid sistemle sabit hız için toplam motor gücü

$n$	Devir
$n_m$	Motor devri
$n_{mv}$	Vites redüksiyonuna göre motor devri
$n_t$	Teker devri
$P$	Batarya gücü
$P_{da}$	Düz yolda aerodinamik güç
$P_{dbi}$	Düz yolda sadece bataryalarla ivmelenme için teker gücü
$P_{dhi}$	Düz yolda hibrid sistemle ivmelenme için teker gücü (kW)
$P_{dr}$	Düz yolda teker yuvarlanma gücü
$P_s$	Yokuş (%20) tırmanmak için gerekli teker gücü
$P_{ya}$	Yokuşta (%20) aerodinamik güç
$P_{yi}$	Yokuşta hibrid sistemle ivmelenme için teker gücü
$P_{yr}$	Yokuşta (%20) yuvarlanma gücü
$p$	Yüzey basıncı
$p_k$	Kutup Sayısı
$Q_T$	Batarya teorik kapasitesi
$Q_P$	Batarya pratik kapasitesi
$q$	Devre yoluyla hareket eden yük miktarı
$R$	Batarya iç direnci
$S_E$	Batarya özgül enerjisi
$S_P$	Batarya özgül gücü
$t_{cut:}$	Batarya terminal geriliminin sınır değerine ulaştığı zaman
$t_{dbi}$	Düz yolda sadece bataryalarla ivmelenme süresi
$t_{dhi}$	Düz yolda hibrid sistemle ivmelenme süresi
$t_0$	Batarya tam şarjlı olduğundaki zaman
$t_{yi}$	Yokuşta hibrid sistemle ivmelenme süresi
$U$	Volanda depolanan enerji
$V$	Rüzgarın hızına ve yönüne göre m/sn olarak taşıt hızı
$V_{bat:}$	Nominal yüksüz terminal gerilim
$V_K$	Taşıtın km/h olarak seyir hızı
$V_R$	Rüzgarın m/sn olarak hızı
$V_T$	Taşıtın m/sn olarak seyir hızı
$v_h$	Hareket hızı
$V_t:$	Batarya terminal gerilimi
$W_a$	Hava direnci
$W_i$	Aracın ivme direnci
$W_C$	Çeki direnci
$W_s$	Yokuş direnci
$W_R$	Yuvarlanma direnci
$w$	Açısal hız
$w_v$	Vitesse göre açısal hız
$z$	Bataryanın deşarjı esnasında negatif elektrot tarafından üretilen elektron sayısı
$x$	Sınırlayıcı reaktanın mol sayısı
$\Sigma W$	Araca etki eden toplam direnç
$\mu$	Lastikle yol arasındaki kuvvet bağlantı katsayısı.
$\sigma$	Gerilme direnci
$\Phi$	Manyetik akı
$\rho$	Malzeme yoğunluğu
$\rho_r:$	Etkili teker yarıçapı
$\rho_h$	Havanın özgül kütlesi

## KISALTMA LİSTESİ

CO	Karbon monoksit
CO <sub>2</sub>	Karbon dioksit
DoD	Batarya deşarj derinliği
DC	Doğru akım
NO <sub>x</sub>	Azot oksit
DC	Doğru akım
DMFC	Doğrudan metanol yakıt pili
Flywheel	Volan
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sülfirik asit
KOH	Potasyum hidroksit
Li	Lityum
LiFeS	Lityum demir sülfat
Li-iyon	Lityum-iyon
Li-polimer	Lityum polimer
LPG	Sıvılaştırılmış petrol gazı
MCFC	Ergimiş karbonat yakıt pili
NaS	Sodyum sülfür
NaNiCl	Sodyum nikel klorid
Ni	Nikel
NiCd	Nikel kadmiyum
NiFe	Nikel demir
NiMH	Nikel-metal hidrür
NiOOH	Nikel oksihidroksit
NiZn	Nikel çinko
PAFC	Fosforik asit yakıt pili
Pb-asit	Kurşun asit
PbO <sub>2</sub>	Kurşun oksit
PM	Sürekli manyetik
PEMFC	Proton elektrolit membranlı yakıt pili
SoC	Bataryanın şarj durumu
SoD	Bataryanın deşarj durumu
SLA	İzolasyonlu kurşun asit bataryası
SOFC	Katı oksit yakıt pili
ÜÖN	Üst ölü nokta
VRLA	Sübab ayarlı kurşun asit batarya
VVT	Değişken sübab zamanlanması
Zn-hava	Çinko hava

## ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Morris ve Salomon'un Electrobats elektrikli aracı .....	7
Şekil 2.2 Ford Comuta elektrikli araç .....	11
Şekil 2.3. General Motors EV1 elektrikli araç .....	14
Şekil 2.4. Ford Think City elektrikli araç .....	15
Şekil 2.5. Nissan Hypermini elektrikli araç .....	15
Şekil 2.6. Toyota RAV4 elektrikli araç .....	16
Şekil 2.7 Honda Insight elektrikli araç .....	19
Şekil 2.8 Honda Civic hibrid araç .....	19
Şekil 2.9 Toyota Prius hibrid elektrikli araç .....	20
Şekil 3.1 Tümü-elektrikli aracın şematik resmi .....	24
Şekil 3.2 Hibrid elektrikli araç .....	26
Şekil 3.3 Hibrid elektrikli araçların sınıflandırılması .....	27
Şekil 3.4a Seri hibrid sistem .....	29
Şekil 3.4b Seri hibrid sistem .....	29
Şekil 3.5 Seri hibrid elektrikli aracın çalışma durumları .....	30
Şekil 3.6a Paralel hibrid sistem .....	31
Şekil 3.6b Paralel hibrid sistem .....	31
Şekil 3.7 Paralel hibrid elektrikli araç çalışma durumları .....	32
Şekil 3.8 Yakıt pilli araç .....	35
Şekil 4.1 Yakıt pili .....	45
Şekil 4.2 PEM yakıt pili temel yapısı .....	47
Şekil 4.3 Doğrudan metanol yakıt pili temel yapısı .....	48
Şekil 4.4 Sabit hacimde ısı girişli ideal otto çevrimi . .....	56
Şekil 4.5 Sabit basınçta ısı girişli ideal dizel çevrimi . .....	56
Şekil 4.6 Karma ideal çevrim .....	57
Şekil 4.7 Dört stroklu benzin motorunun çalışması .....	60
Şekil 4.8 Krank mili açısına bağlı olarak silindir içi basıncının değişimi . .....	60
Şekil 4.12 İki kutuplu 3 fazlı senkron AC jeneratör . .....	64
Şekil 4.13 Batarya yapısı .....	66
Şekil 5.1 Tekerleğe etki eden kuvvet .....	84
Şekil 5.2 Yuvarlanan pnömatik tekerleğin temas yüzeyindeki basınç dağılımı .....	85
Şekil 5.3 Yokuş direnci .....	86
Şekil 5.4 Dış akış basınç ve sürtünme hatları .....	86
Şekil 5.5 İç akış .....	86
Şekil 5.6 Araca etki eden toplam yol dirençleri .....	88
Şekil 5.7 M2000 araç resimleri .....	89
Şekil 5.8 Siemens elektrik motorunun anlık ve sürekli güç ve moment değerleri.....	92
Şekil 5.9 Cummins dizel motorun güç değerleri .....	93
Şekil 5.10 Dizel motorun moment değerleri .....	94
Şekil 5.11 Siemens jeneratörün anlık ve sürekli güç ve moment eğrileri.....	95
Şekil 5.12 Düz yolda hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için gücün hıza göre değişimi	101
Şekil 5.13 Düz yolda hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için momentin hıza göre değişimi .....	101
Şekil 5.14 Düz yolda hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için akımın hıza göre değişimi .....	102
Şekil 5.15 Düz yolda hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için elektrik motorunun verebileceği güç değerleri .....	102

Şekil 5.16 Düz yolda hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için elektrik motorunun verebileceği moment değerleri .....	103
Şekil 5.17 Düz yolda aracın hibrid sistemle ivmelenme süresine göre maksimum ivmelenme hızı .....	103
Şekil 5.18 Düz yolda sadece bataryalarla ivmelenme gücü .....	104
Şekil 5.19 Düz yolda sadece bataryalarla sağlanan güçle ivmelenme momenti .....	105
Şekil 5.20 Düz yolda sadece bataryalarla sağlanan güçle ivmelenme akımı .....	105
Şekil 5.21 Düz yolda aracın sadece bataryalarla sağlanan güçle ivmelenme süresine göre maksimum ivmelenme hızı .....	106
Şekil 5.22 %20 eğimli yokuşta hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için gücün hıza göre değişimi .....	110
Şekil 5.23 %20 eğimli yokuşta hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için momentin hıza göre değişimi .....	110
Şekil 5.24 %20 eğimli yokuşta hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için akımın hıza göre değişimi .....	111
Şekil 5.25 %20 eğimli yokuşta hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için elektrik motorunun verebileceği güç değerleri .....	111
Şekil 5.26 %20 eğimli yokuşta hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için elektrik motorunun verebileceği moment değerleri .....	112
Şekil 5.27 %20 eğimli yokuşta aracın hibrid sistemle ivmelenme süresine göre maksimum ivmelenme hızı .....	112
Şekil 5.28 Düz yolda aracın hibrid sistemle 80 km/h'e ivmelendirme çevrimi .....	117
Şekil 5.29 Düz yolda araç 80 km/h'e ivmelenme esnasında elektrik motorunun çektiği güç ve bataryalardan sağlanan akım değerleri ile bataryaların şarj durumu .....	118
Şekil 5.30 Düz yolda araç 80 km/h'e ivmelenme esnasında elektrik motorunun çektiği güç, bataryalardan sağlanan akım ve jeneratörün ürettiği güç değerleri .....	119
Şekil 5.31 Aracın değişik hızlara ivmelendiği çevrim .....	121
Şekil 5.32 Düz yolda aracın değişik hızlara ivmelenmesi esnasında elektrik motorunun çektiği güç, bataryalardan sağlanan akım değeri ve bataryaların şarj durumu .....	122
Şekil 5.33 Düz yolda aracın değişik hızlara ivmelenmesi esnasında elektrik motorunun çektiği ve jeneratörün ürettiği güç değerleri ve bataryaların şarj durumu .....	123
Şekil 5.34 Düz yolda aracın sadece bataryalarla sağlanan güçle 55 km/h'e ivmelendirme çevrimi .....	124
Şekil 5.35 Düz yolda araç 55 km/h'e ivmelenme esnasında elektrik motorunun çektiği güç ve bataryalardan sağlanan akım değeri ile bataryaların şarj durumu .....	125
Şekil 5.36 Düz yolda araç 55 km/h'e ivmelenme esnasında elektrik motorunun çektiği güç, bataryalardan sağlanan akım ve jeneratörün ürettiği güç değerleri .....	126

## ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 Yıllara göre atmosferik CO <sub>2</sub> derişimi .....	2
Çizelge 1.2 Yıllara göre ortalama CO <sub>2</sub> emisyonu .....	2
Çizelge 2.1 Elektrikli araçların geçmişten günümüze kadarki gelişme aşamaları.....	13
Çizelge 2.2 Üretilmiş tümü-elektrikli araçlar .....	17
Çizelge 2.3 Üretilmiş hibrid elektrikli araçlar .....	18
Çizelge 2.4 Prototip ve deneysel amaçlı geliştirilmiş yakıt pilli elektrikli araçlar .....	21
Çizelge 2.4 devamı Prototip ve deneysel amaçlı geliştirilmiş yakıt pilli elektrikli araçlar .....	22
Çizelge 3.1 Yakıt pilli araçların avantajları ve dezavantajları .....	37
Çizelge 3.2 Tümü-elektrikli/hibrid elektrikli ve yakıt pilli araç tipleri .....	38
Çizelge 4.1 Hidrojenin özellikleri .....	42
Çizelge 4.2 Hidrojenin kullanım alanları .....	42
Çizelge 4.3 Hidrojen depolama yöntemlerinin karşılaştırılması.....	43
Çizelge 4.4 Metanolün özellikleri .....	43
Çizelge 4.5 Çalışma sıcaklığı ve elektrolite göre sınıflandırma .....	50
Çizelge 4.6 Elde edilen güce ve kullanım alanlarına göre sınıflandırma.....	50
Çizelge 4.7 Düşük sıcaklık yakıt pilleri .....	53
Çizelge 4.8 Orta ve yüksek sıcaklık yakıt pilleri .....	54
Çizelge 4.9 Bazı enerji kaynaklarının özgül enerji değerleri .....	65
Çizelge 4.10 Bataryaların özgül enerjileri .....	67
Çizelge 4.11 Pb-asit bataryalarının avantajları ve dezavantajları .....	72
Çizelge 4.12 NiCd bataryalarının avantajları ve dezavantajları .....	73
Çizelge 4.13 NiMH bataryalarının avantajları ve dezavantajları .....	74
Çizelge 4.14 Li-polimer bataryalarının avantajları ve dezavantajları .....	75
Çizelge 4.15 Li-iyon bataryalarının avantajları ve dezavantajları .....	76
Çizelge 4.16a Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların özellikleri .....	76
Çizelge 4.16b Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların özellikleri .....	77
Çizelge 4.17 Pb-asit, volan ve ultrakapasitörlerin değerlendirilmesi .....	81
Çizelge 5.1 Değişik yok yüzeylei için yuvarlanma direnci katsayıları .....	85
Çizelge 5.2 Hava direncini oluşturan etkenlerin etki yüzdeleri .....	87
Çizelge 5.3 M2000 aracının teknik özellikleri .....	90
Çizelge 5.4 Tasarlanan aracın toplam ağırlığı.....	90
Çizelge 5.5 Siemens elektrik motorunun teknik özellikleri .....	91
Çizelge 5.6 Optima Pb-asit bataryanın teknik özellikleri .....	93
Çizelge 5.7 Siemens jeneratörünün teknik özellikleri .....	94
Çizelge 5.8a Düz yolda araç yük hesapları .....	97
Çizelge 5.8a devamı Düz yolda araç yük hesapları .....	98
Çizelge 5.8b%20 eğimli yokuşta araç yük hesapları .....	99
Çizelge 5.8b devamı %20 eğimli yokuşta araç yük hesapları.....	100
Çizelge 5.9 Düz yolda sadece bataryalardan sağlanan güçle aracın maksimum ivmelenebileceği hız.....	107
Çizelge 5.10 Düz yolda hibrid sistemle (bataryalardan ve jeneratörden ) sağlanan güçle aracın performanslı bir şekilde maksimum ivmelenebileceği hız.....	108
Çizelge 5.11 Düz yolda aracın hibrid sistemle ivmelendikten sonra bataryalarla sağlanan güçle sabit hızla gidebileceği maksimum hızı .....	109
Çizelge 5.12 %20 eğimli yokuşta aracın hibrid sistemle maksimum ivmelenebileceği hız..	114
Çizelge 5.13 %20 eğimli yokuşta aracın hibrid sistemle sabit hızla gidebileceği maksimum hız .....	115

## ÖNSÖZ

Tezimin hazırlanmasında bana her türlü konuda destek olan, anlayış gösteren ve üniversite eğitimim boyunca üzerimde büyük emeği olan Sayın hocam Prof.Dr Orhan DENİZ'e, Otomotiv Anabilim Dalı Başkanı değerli hocam Sayın Prof. İrfan YAVAŞLIOL'a, Otomotiv Anabilim Dalı Öğretim Üyelerinden Sayın Doç. Dr. Hakan KALELİ'ye, Sayın Yrd. Doç.Dr. Muammer ÖZKAN'a, Sayın Dr.Mustafa BENLİDAYI'ya, TÜBİTAK-MAM Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü kaynaklarından yararlanmamı sağlayan değerli yöneticilerimizden Sayın Doç. Dr. Mustafa TIRIS'a, Sayın Doç.Dr. Fehmi AKGÜN'e, hibrid elektrikli araç tasarımında yardımlarını esirgemeyen Sayın Uzman Araştırmacı Azmi YAZAR'a, tüm Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü personeline ve beni büyüten, yetiştiren sevgili anneme ve ablam Dr. Ayşegül ZOR'a katkılarından dolayı teşekkürlerimi bildiririm.

Şeyma KARAHAN



## ÖZET

İçinde bulunduğumuz yüzyılda konvansiyonel araçlar, çevre kirliliğine neden olan karbon monoksit, karbon dioksit, azot-oksit, partiküller ve uçucu hidrokarbonlar gibi zararlı emisyonların açığa çıkmasında önemli rol oynamaktadır. Ayrıca dünyamız, 1970 yılından beri fosil yakıt rezervlerinin azalmasından dolayı açığa çıkan enerji krizi problemiyle de karşı karşıya kalmıştır. Bu çevresel ekonomik problemler, temiz ve verimli şehir içi ulaştırmanın geliştirilmesinde hızlandırıcı etki olmuştur. Böylece otomobil üreticileri bu ihtiyaçları karşılayacak yeni alternatif araçların arayışına girmişlerdir. Bu nedenle çevreye dost şehir içi ulaştırmanın sağlanmasında elektrikli ve hibrid elektrikli araçlar daha fazla önem kazanmıştır. Bunlara ek olarak, bir çok araç üreticileri elektrikli ve hibrid elektrikli araçlarını otomotiv piyasasına sunmuşlardır.

Bu çalışma kapsamında, dünyadaki elektrikli ve hibrid elektrikli araçların bugünkü durumu anlatılmıştır. Bunun yanında bu araçların gelişmesine etki eden faktörler ve ticarileşmesindeki problemler detaylı olarak ifade edilmiştir. Enerji depolama sistemleri, güç üretim sistemleri ve araç tahrik sistemleri gibi alt sistem teknolojileri de tanıtılmıştır. Ek olarak, M2000 konvansiyonel aracının seri hibrid sistemle tahrik edilebilmesi amacıyla, excel hesaplama programı ve MATLAB tabanlı ADVISOR Araç Simülasyon Programı ile düz ve %20 eğimli yokuş için yol yükü hesapları yapılmıştır. Ayrıca istenilen araç performansı için alt sistemler de belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hava kirliliği, elektrikli araçlar, hibrid elektrikli araçlar, araç tahrik sistemleri, M2000 hibrid elektrikli araç

## **ABSTRACT**

In our century, conventional vehicles have an important role in the production of hazardous emissions such as carbon monoxide, carbon dioxide, nitrogen oxide, particules and evaporative hydrocarbons, which cause air pollution. Because of the reduction in the fossil fuel reserves, our world has also faced with the problem of energy crisis since 1970. These environmental and economical problems cause an accelerating impetus to promote clean and efficient urban transportation. By this way automobile manufacturers have started to search new alternative vehicles in order to provide these requirements. Therefore, the development of electric vehicles and hybrid electric vehicles became more important to provide environmentally friendly transportation. Moreover, many automobile manufacturers have presented their electric and hybrid electric vehicles to the automotive market.

In the scope of this study, it is aimed to express the present status of the electric vehicles and hybrid electric vehicles. Besides, the factors that affect the development of these vehicles and the challenges in commercialization are discussed detaily. Subsystem technologies such as energy storage systems, power generation systems and vehicle propulsion systems are also introduced. In addition, straight and 20 slope road load calculations have done with excel calculation program and MATLAB based ADVISOR Vehicle Simulation Programme in order to provide series hybrid propulsion of M2000 conventional vehicle. Also, appropriate vehicle subsystems are chosen for the desired vehicle performance.

**Keywords:** Air pollution, Electric vehicles, hybrid electric vehicles, vehicle propulsion systems, M2000 hybrid electric vehicle

## 1. GİRİŞ

Dünya enerji tüketimi, nüfus artışına, sanayileşmeye ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak hızla artmaktadır. Artan enerji talebinin yanı sıra fosil enerji kaynaklarının rezervleri de hızla azalmaktadır. Fosil yakıtların yakılması ile meydana gelen karbon dioksit (CO<sub>2</sub>), karbon monoksit (CO), azot oksitler (NO<sub>x</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>) gibi gazların sürekli salgılanmasından dolayı meydana gelen küresel ısınma, iklim değişikliği ve sera etkisi gibi çevre sorunları oluşmaktadır. Günümüzde rezervleri azalan, çevreyi kirleten fosil enerji kaynaklarının yerine doğa ile dost alternatif ve yenilenebilir kaynakların kullanımı gündeme gelmiştir. Bu kaynaklar sırasıyla; güneş,rüzgar, su gücü, biyokütle, hidrojen ve elektrik enerjisi kaynaklarıdır. Bu kaynaklar ile ilgili, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde araştırma, geliştirme, uygulama ve teknolojik çalışmalar hızlı bir şekilde devam etmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarını gündeme taşıyan çevre sorunlarının başında sera etkisi gelmektedir. Sera etkisine neden olan gazların başında CO<sub>2</sub> olarak sıralanabilir. 1997 yılında imzalanan Kyoto Protokolü gereği protokole dahil olan ülkelerde 2008-2012 dönemine kadar toplam sera gazı emisyonlarında 1990 yılı değerlerine ulaşılması hedeflenmektedir. 1990-2000 yılı ilk yarısında, AB'de CO<sub>2</sub> emisyon değerleri 1990 değerlerinin %0.6 aşağısında olup, ikinci yarısında değerler sabitlenmiştir. Sera gazı emisyon kaynağı olarak gösterilen enerji üretimi, tarım, sanayi, atık yönetimi ve konut sektörlerinde azalmalar gerçekleştirilmesine ve 1995-2000 yılları arasında otomobillerde üretilen CO<sub>2</sub> emisyon miktarları % 7.5 azaltılmasına rağmen ulaşım sektöründe kullanılan araç sayısındaki hızla artış nedeniyle emisyonlarda %18'e varan bir artış gerçekleşmiştir. İleriye dönük projeksiyonlar sonucunda teknolojiye gelişme ve taşıt sayısındaki artışa paralel olarak 2010 yılında bu artışın %28 olacağı düşünülmektedir. Otomobillerden kaynaklanan CO<sub>2</sub> emisyonlarının 1995-2008 döneminde % 25 azaltılması ACEA( Assoc. Des Constructeurs Europeens D'Automobiles), JAMA (Japan Automobile Manufacturers Association) ve KAMA (Korea Automobile Manufacturers Association) tarafından onaylanmıştır. Avrupa'da hedeflenen CO<sub>2</sub> emisyon oranı ortalama 140 g-CO<sub>2</sub>/km'dir. Yıllara göre atmosferik CO<sub>2</sub> derişimi ve yıllara göre ortalama CO<sub>2</sub> emisyonu Çizelge 1.1 ve Çizelge 1.2'de verilmiştir.

Çizelge 1.1 Yıllara göre atmosferik CO<sub>2</sub> derişimi (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2003)

Sanayileşme süreci öncesinde (1000-1750)	~2280 ppm
2000 yılı	~368 ppm
2100 yılı	~540-970 ppm

Çizelge 1.2 Yıllara göre ortalama CO<sub>2</sub> emisyonu (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2003)

1996	184 (g/km)
1997	182
1998	179
1999	174
2000	170
2001	166
2008	140 ACAE hedefi

Günümüzde ulaşım sektöründe emisyonların azaltılması için yakıt tüketiminin azaltılması, alternatif yakıtların kullanılması gibi önlemler alınmaktadır. Kısa vade önlemleri içinde, yanma veriminin artırılması üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Alternatif yakıtların kullanımı (elektrikli araçlar, alkoller, eterler, biyodizel vb) ve hibrid sistemler gibi teknikler üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Orta ve uzun vadede etkili olacak çözümün olarak ise, yakıt olarak hidrojen veya kolaylıkla hidrojene dönüşebilen yakıtların kullanımı ve bu yakıtların yüksek verimde kullanılmasına olanak tanıyacak yakıt pili gibi sistemlerin devreye sokulması öngörülmektedir.

Alternatif enerjiye karşı duyulan istek, düşük emisyon, sera etkisine neden olan karbon dioksit gazının azalması, enerji verimi nedeniyle tümü-elektrikli ve hibrid elektrikli araçların ticarileşmesi ve gelişmesi artmaktadır (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2003).

Elektrikli araçlar kavramı üç farklı grup altında incelenecektir. Bunlar sırası ile tümü-elektrikli araçlar, hibrid elektrikli araçlar ve yakıt pilli araçlardır. Elektrikli araçlarda fosil kökenli yakıt kullanımının ve çevreye zarar veren kirleticilerin oluşumun az olması nedeniyle bu araçlar daha önce de bahsedildiği gibi geleceğin araçları olarak düşünülmektedir. Bu araçların kullanımıyla global ısınmaya neden olan karbon dioksit gazının oluşumu da azaldığı için sera etkisi azalmaktadır. Elektrikli araçlar aynı zamanda sessiz bir şekilde çalıştığından gürültü kirliliğini de azalmaktadır.

Tümü elektrikli araç, modern elektrikli tahrik teknolojisi kullanılarak geliştirilmiş elektrik motoru, güç konvertörü ve enerji kaynağını içermektedir. Tümü-elektrikli araçlarda elektrik enerjisi üretilmemekte, çeşitli enerji depolanma teknikleri ile depolanmaktadır. Tümü-elektrikli araçlar aynı zamanda sıfır emisyonlu araçlar olarak da ifade edilir. Tümü-elektrikli araçların ticarileşmesini önleyen iki önemli tehdit vardır. Bunlar öncelikle kısa sürüş menzili ve yüksek maliyettir. Tümü-elektrikli araçların bu problemleri halen uygun enerji kaynaklarının bulunması ve kullanılmasıyla çözülememiştir. Tümü-elektrikli araçlar çevreye karşı ne kadar temiz araçlar olurlarsa olsunlar sürüş menzili 100-200 km olduğundan araç üreticileri tarafından alternatif çözüm yöntemleri aranmaya başlanmıştır ve hibrid elektrikli araç konsepti gelişmeye başlamıştır.

Hibrid elektrikli araç , enerjinin iki yada daha fazla enerji deposundan sağlandığı ve bu enerji depolarından en az bir tanesinin elektrik enerjisi verdiği bir araç olarak ifade edilmiştir. Bu genel ifadeye bağlı olarak, batarya-yakıt pili , batarya-kapasitör yada batarya - batarya gibi bir çok çeşit hibrid elektrikli araç versiyonları vardır. Başlangıçta konvansiyonel araçlarda bulunan birçok ekipmanı da bünyesinde bulunduran Hibrid elektrikli araçlar bir çok kesimde üreticilerin beğenisine sunulmaktadır. Bu arada uzun yıllardır özel kullanımlar için geliştirilmiş bataryalı araçlar, batarya ve güç elektroniği teknolojilerinin gelişimine paralel, kullanıcılarına daha yüksek menzil ve kullanım rahatlığı sağlamaktadır. Hibrid elektrikli araçların pazarda mevcudiyetini hızlandıran en önemli özellikleri, kullanım zorluğu oluşturan sabit şarj sistemlerinden bağımsız, konvansiyonel araçlara benzer şekilde menzile sahip olmalarıdır.

Başta Japon ve Amerikan şirketleri olmak üzere bir çok firma tarafından deneysel ve prototip amaçlı hibrid elektrikli araçlar geliştirilmiş hatta pazara da sunulmuştur. Bu araçların kullanım ve tüketim avantajları fazla olmasına rağmen satış maliyeti çok yüksek olduğundan bu araçların halen çok fazla seri üretime geçememiştir.

Bu konuların her biri için tüm önemli otomotiv sektörü çeşitli uzmanlıklar ve büyük mali kaynak kullanarak nihai ürüne ulaşmayı hedefleyen çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bunun yanında bir çok ülke araştırma programlarını yönlendirerek çalışmalarını hızlandırmaktadır. Başta Japonya olmak üzere Güney Kore ve İsveç gibi ülkeler, elektrikli araçlara olan ilgiyi arttırabilmek için belirli bir yüzdesine mali katkıya kadar varan teşvik uygulamaktadır.

Bir çok program ve hedefler konularak bunlara finansman, altyapı ve insan kaynakları ile desteklenmektedir. En önemli programlar arasında,

- Amerika Freedom Car Programı, ileri batarya teknolojileri programı gibi projelerde milyar dolara varan yıllık destekler oluşturmaktadır.

- Japonya’da tüketiciye direkt mali teşvikler, Zero Emission Vehicle Programı ve diğer ilgi projelerde büyük çaplı destekler yaratmaktadır.
- Çin hükümeti bir çok firmayı alt sistemlerin üretilmesi için doğrudan desteklenmektedir. Bilhassa güç elektroniği ve batarya teknolojilerinde batılı firmaların oldukça altın fiyatlarda ürünleri teslim etmektedirler. Çin yeniden oluşacak otomotiv sektöründe kendine önde bir yer almayı hedeflemiştir.
- Avrupa topluluğu nispeten nihai ürünlere doğru olan bu yarışta daha geriden takip etmekle birlikte çerçeve programlarında ciddi finansmanlar ayırmakta ve bilhassa üretici şirketlere yaptıkları çalışmalarda doğrudan destek sağlamaktadır.
- Güney Kore’de farklı şirketler devletin araştırma kurumları ile koordine edilerek ve sağlanan mali destek ile birlikte elektrikli araçlara ait alt sistemler ve aracın kendisi üzerinde uzmanlaştırılmaktadırlar.

Yakıt pili teknolojisinin araçlarda uygulanması, gelecekte birincil enerji kaynaklarının fosil yakıtlardan alternatif yakıtlara doğru bir değişimi ile hızlanacaktır. Ancak mevcut altyapı ve alışkanlıklar çerçevesinde yakıt pili araçlara geçiş 2010’lu yıllara değin düşük bir ivme ile seyredecektir. Üreticilerin beklentileri üç nokta üzerinde birleşmektedir:

- Yakıt
  - 2010’a kadar sıkıştırılmış hidrojen
  - 2010–2020 Alternatif yakıtlar/Bor hidrürler
  - 2020 ve devamı depolanmış hidrojen
- Yakıt Pili Tipi
  - 2020’ye kadar proton elektrolitli membranlı yakıt pili
  - 2020 sonrası belki katı oksitli yakıt pili
- Araç yapısı ve kullanıcılar
  - 2015 değin ikincil enerji kaynağı olarak taksi gibi yakıtı kolay ulaşabilecek filolarda
  - 2015 ve sonrası tüm sınıflarda birincil enerji kaynağı

Konvansiyonel araçlar ile elektrikli araç tipleri arasında aynı menzil ve şartlarda verim ve emisyonlar açısından farkları incelendiğinde özetle şu sonuçlara ulaşılmaktadır:

- Benzinli konvansiyonel araç: 100 km menzil 8.4 litre ortalama yakıt tüketimi
  - Verim: %28
  - Sera gazı ve çeşitli kitleciler
- Tümü elektrikli araç: Aynı şartlarda
  - Verim: %32

- Sera gazları ve kirleticiler elektrik santralleri tarafından üretilmekte, menzile sınırlı/düşük ve şarj sistemlerine bağımlılık
- Hibrid elektrikli araç:
  - Verim: % 41
  - Konvansiyonel araca göre sera gazları ve kirleticiler %55 ve yakıt tüketimi %30 oranında daha düşük ve menzile aynı
- Yakıt pilli araç
  - Verim: %43 (On yıl içerisinde %48)

Konvansiyonel araca göre sera gazları ve kirleticiler %90 ve yakıt tüketimi %40 oranında daha düşük ve menzile aynı (Ünlü vd., 2003).

Yukarıda ifade edilen açıklamalar dikkate alınarak yapılmış olan bu çalışmada, elektrikli ve hibrid elektrikli araçların geçmişten günümüze kadar ki tarihçesi, gelişmesini hızlandıran faktörler ve dezavantajları anlatılmıştır. Elektrikli araçlarda uygulanan alt sistem teknolojileri tanıtılmıştır. Bunlara ek olarak, M2000 konvansiyonel aracının seri hibrid sistemle tahrik edilebilmesi amacıyla excel hesaplama programı ve MATLAB tabanlı ADVISOR Araç Simülasyon Programı ile düz ve %20 eğimli yokuş için yol yükü hesapları yapılmıştır. Ayrıca istenilen araç performansı için alt sistemler de belirlenmiştir.

## 2. ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN TARİHÇESİ

### 2.1 İlk Dönemler

Elektrikli araçların tarihçesi ilk olarak 1800 yılında İtalya'da Alessandro Volta tarafından elektrik enerjisinin depolanması girişimiyle başlamıştır. Volta ilk olarak bakır/çinko bataryasını keşfetmiştir. Bu bakır/çinko bataryalarının seri olarak bağlanmasıyla daha fazla elektriksel potansiyelin elde edildiğini , paralel bağlanmasıyla ise aynı potansiyelde daha fazla akımın elde edildiğini görmüştür. Böylelikle ilk primer batarya bulunmuştur.

Bu dönemlerdeki diğer bir önemli gelişme ise Michael Faraday'ın 1821 yılında elektrik akımı taşıyan bir tel çubuğun sabit manyetik alanın etrafında dönebileceğini kanıtlaması ve yaptığı diğer çalışmalarla da elektrik motorunun çalışma felsefesi bulmasıdır. Faraday 1831 yılında elektromanyetik indüksiyon olayının üzerine gitmiş ve magnetizmayla elektrik akımının ilişkisini araştırmaya başlamıştır. Böylelikle elektrikli araçlar için gerekli elektrik motoru ve jeneratörlerin temel çalışma felsefeleri açığa çıkmaya başlamıştır.

1832 yılında Paris'de bir elektrik motorunun demonstrasyonu yapılmış ve 1835 yılında Francis Watkins tarafından Londra'da küçük bir çalışan elektrik motoru yapılmıştır.

Bataryalar ve elektrik motorlarındaki tüm bu gelişmeler araştırmacıları hafif ağırlıktaki aracın elektrik motoruyla tahrik edilebileceği düşüncesinin açığa çıkmasını sağlamıştır. Elektrik motoruna gereken enerji bataryalardan sağlanacaktır. 1835 yılında Profesör Stratingh tarafından Hollanda'da model elektrikli araç geliştirilmiştir. 1834-1836 yılları arasında ise Thomas Davenport tarafından A.B.D'de elektrikli yol aracının geliştirildiği ve demonstrasyonunun yapıldığı raporlanmıştır. Bunlarla birlikte Moritz Jacobi isimli Alman fizikçi tarafından 1838 yılında St Petersburg'daki Neva adlı nehirde Volta pili ile çalışan tekne yapılmıştır. Bu dönemlerde tüm bu geliştirilmiş demonstrasyonlar elektrikli tahrikin mümkün olabileceğini ancak uygulamada sınırlı olduğunu göstermiştir. 1859 yılına kadar bu gibi gelişmeler yaşanmıştır. Fakat bu yıldan sonra yeni batarya arayışları içine girilmiş özellikle kurşun-asit bataryaları keşfedilmiştir.

### 2.2 İlk Yol Araçları

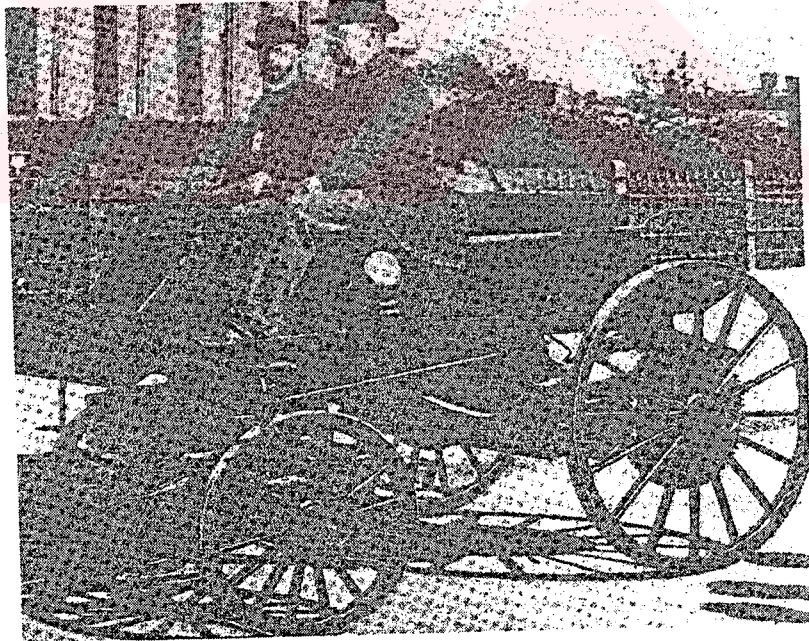
1873 yılında Edinburgh'da R.Davis tarafından elektrikli yol aracının olabileceği düşüncesi oluşmuş ve bu amaçla 4 tekerlekli kurşun/çinko primer bataryalı yük arabası yapılmıştır. 1881 yılında G.Trouve Fransa'da sekonder plante batarya ile tahrik edilen 3 tekerlekli 160 kg kütleinde elektrikli aracı geliştirmiştir. Bu araç 2 tane 1/10 beygir gücünde (BG) gücünde Siemens motoru ile tahrik edilmektedir.

1882 ise yılında İngiltere’de Prof. William Ayrton ve John Perry 3 tekerlekli elektrik tahrikli aracın demonstrasyonu yapılmıştır. Bu araçta 10 tane kurşun-asit (Pb-asit) bataryası kullanılmıştır Bataryaların kapasitesi  $1 \frac{1}{2}$  kWh olmakla birlikte  $\frac{1}{2}$  BG’ deki doğru akım (DC) motora 20 V gerilim vermektedir. Aracın menzili yol şartlarına bağlı olarak 16-20 km arasında değişmekte ve maksimum hız 14 km/h olduğu söylenmektedir.

Thomas Davenport ‘un 1834-6 yılında geliştiği ilk elektrikli araçtan sonra Amerika’da 1888 yılında Boston’da Philip W.Pratt tarafından elektrikli araç geliştirilmiştir. Bundan sonra 1895 yılında Riker 4 tekerlekli 140 kg kütleinde elektrikli araç geliştirmiştir. Bu araçta 2 tane  $\frac{1}{2}$  BG gücünde motor kullanılmıştır olup arkadan tahriklidir. 60 kg’lık bataryasıyla bu araç 19 km/h’lik sabit hızla 4 saat boyunca bir kişiyi taşıma kapasitesine sahiptir.

Bu yıllarda Amerika’da en önemli ortaklar olan Morris ve Salomon ise 1895 yılında 2 oturma koltuğu olan (Şekil 2.1) Electrobats isimli elektrikli aracı geliştirmişlerdir.

Bu dönemlerde otomotiv alanında bazı tanımlamalar getirilmiştir örneğin E.P Ingersoll tarafından 1895 Kasım ayında USA de yayınlanan “Atsız Dönem” yayınında “Atsız Taşıyıcı” ve 1895 Ekim ayında Londra’da “Pall Mall Gazette” de ilk olarak otomobil terimi kullanılmaya başlanmıştır.



Şekil 2.1. Morris ve Salomon’un Electrobats elektrikli aracı (Ünlü vd., 2003)

### 2.3 Elektrikli Araçlar Buharlı ve Benzinli Araçlarla Yarışıyor

Bu dönemlerde özellikle sessiz çalışması ve ilk harekete kolay geçmesi nedeniyle elektrikli araçlara karşı istek oldukça fazlaydı. Elektrikli araçlarla ilgili bu gelişmeler olurken benzinli motorlarda hızla gelişmeye başlamıştır; hatta 1900’lü yılların başında pazardaki otomobiller

hemen hemen buharlı benzinli ve elektrikli olmak üzere üçe ayrılmaktaydı. Bu yılda Amerika'da üretilen araçların 1684 tanesi buhar tahrikli, 1575 tanesinin elektrik tahrikli ve 963 tanesinin de benzinli motorla tahrikli olduğu belirtilmektedir. Amerika'da bu gelişmeler devam ederken, 1897 yılında İngiltere'de "Londra Elektrikli Taksi Şirketi" (London Electrical Cab Company) tarafından 15 tane taksi geliştirilmiştir.

Bu arada 1899 yılında Fransa'da Camille Jenatzy tarafından yarış için özel dizayn edilmiş olan bir elektrikli aracın dünya hız rekorunu kırmasıyla bu araçlara verilen önem artmaya başlamıştır. 1899 yılının yazında Jenatzy 98 km/h'lik hızla Paris halkının önünde rekor kırmıştır. Bu rekor benzin motorlu aracın bu rekor değerini geçmesiyle 3 yıl boyunca geçerli olmuştur.

#### **2.4 Altın Dönem**

1900 ve 1912 yılları arasındaki dönemde benzinli araçlar hızla gelişmekte olmasına rağmen elektrikli araçlar altın devrini yaşamıştır. 1903 yılında Londra'da içten yanmalı motorlu araçlardan çok elektrikli araçlar görülmüştür. 1906 yılında Ford Model K elektrikli araçlara karşı ilk meydan okumayı gerçekleştirmiştir. 1909 yılında Model T geliştirildiğinde özel ulaştırma için pazardaki yarış içten yanmalı motor ile kazanılmıştır. Fakat bu Amerika'da kullanılan elektrikli araç sayısını azaltmamış hatta 1912 yılında 30 000 gibi maksimum sayıya ulaşılmıştır. Bununla birlikte Amerika'da gene aynı yılda 900 000 kadar benzinli araçlar kullanılmıştır. Özellikle motor gürültüsünü azaltmak amacıyla susturucuların da gelişimiyle benzinli araçlar önem kazanmıştır.

1900-1912 arası dönemde menzil ve performansı artırma yolunda çalışmalar başlamış olup bu amaçla 1900 yılında French Electroautomobile ve 1903 yılında Krieger elektrikli-benzinli araçları geliştirmiştir yani burada hem elektrik motoru hem de benzinli motor kullanılmaya başlanmış ve hibrid konseptine geçilmiştir.

Ferdinand Porsche gibi yaratıcı üreticiler de elektrikli araçlara karşı ilgi duymuşlardır. 1900 yılında Porsche No.1 Lohner-Wagen isimli araçta tekerlek göbeklerinde 2 tane elektrik motoru kullanmıştır. Bununla birlikte aynı zamanda 1902 yılında uzun menzil sağlamak amacıyla 1800 kg kütledeki bataryaları taşıyan Lohner Porsche Rennwagen elektrikli yarış aracı geliştirilmiştir. Aşırı ağırlıklı bataryaları ve 1.5 kW'lık 4 tane elektrik motoru ile bu aracı hem tahrik etmek hem de durdurmak çok güç olmuştur. Bu dönemlerde Ferdinand Porsche ilk deneysel elektrikli/içten yanmalı motorlu hibrid aracın tasarımı üzerinde çalışmaya başlamıştır. Mixt Wagen olarak adlandırılan bu araçta yardımcı bir benzinli motor kullanılmıştır. Burada içten yanmalı motor bataryaları şarj eden jeneratörü sürmektedir.

1912 yılında üretilen elektrikli araçların en tipik örneği Electric Roadster aracıdır. Bu araç hem elektrikli hem de içten yanmalı motoruyla tahrikiyle geçmiş 10 yılda üretilen araçlara göre avantajlar göstermektedir. Fakat bu dönemlerde hibrid elektrikli araçların maliyeti konvansiyonel araçların maliyetine göre daha maliyeti daha yüksekti. Century Electric Roadstar 1912 yılında 1750\$ olarak satılmakta iken Model T sadece 550 \$'a satılmaktaydı.

Elektrikli araçların en fazla üretildiği bu dönemde hibrid elektrikli aracın geliştirilmesi üzerine çalışmalar başlamıştır. 1916 yılında Woods benzinli-elektrikli araç geliştirmiştir. Bu araçta 4 silindir küçük benzinli motor direkt olarak elektrik motoru-jeneratör gurubuna bağlanmıştır ve daha sonra konvansiyonel itici şaftıyla ön tahrik aksına bağlanmıştır. Bu düzenleme ile paralel hibrid araç geliştirilmiştir.

## **2.5 Karanlık Devirler (1925-1960)**

1920'lerin ortasında benzinli araçlar hemen hemen tüm dünyada üstünlük kurmuş olup Amerika'da yılda 20 milyon kadar Avrupa'da ise bunun yarısı kadar benzinli araç üretilmiştir. Böylece 1920'lerin başında Cleveland Baker Electric Firması hariç hemen hemen tüm elektrikli araç üreticileri benzinli araç üretimine geçmişlerdir. Fakat bu firma da o da 1921 yılında elektrikli araç üretimini durdurmuştur

1930'larda özel sipariş üzerine az sayıda elektrik aracın üretimine de devam edilmemekle birlikte 1935'lerde bu bile durmuştur. Elektrikli araçla ilgili tüm öneriler ve teklifler durdurulmuştur. Bu karanlık dönemde Japonya gibi çok az sayıda istisnalar vardır. Japonya'da savaş zamanında benzin üzerinde bazı kısıtlamalara gidildiği için 1937-1954 yılları arasında elektrikli araç üretimine devam edilmiştir. 1949 yılında kullanılan 3299 tane elektrikli araç bulunmaktaydı. Bu da Japonya'da kullanılan tüm araçların yaklaşık % 3'üne denk gelmekteydi. 1940'ların sonu 1950'lerin başlarında İngiltere'de süt dağıtımı için elektrikli araçlar kullanılmakla birlikte araçlardan 20 000 tanesi günümüzde de hala kullanılmaktadır.

## **2.6 Modern Çağ**

### **2.6.1 1960'lar**

1960'lı yıllarda benzinli motorlardan kaynaklanan hava kirliliği, elektrikli araçlara duyulan ilgiyi yeniden arttırmış ve bu araçların üretimine geçiş düşüncesini açığa çıkarmıştır. Üretilen çoğu araçlar konvansiyonel araçların elektrikli hale dönüştürülmüş şeklindedir. Örneğin 1960'da Illinois'deki Eureka Williams Corporation şirketi 4 kapılı Renault Dauphine'i elektrikli hale dönüştürmüştür. 1960'ların ortalarında Scottish Aviation Ltd 3 tane özel tasarlanmış edilmiş

Scamp elektrikli aracı geliştirmekle birlikte GM ve Ford gibi bazı büyük araç üreticileri benzinli araçları deneysel olarak elektrikli hale dönüştürmüşlerdir.

1966 yılında Enfield Firması tarafından şehir içi kullanım amacıyla 8000 Enfield elektrikli aracı üreterek bu konuda çok ciddi girişimler yapılmıştır. En önemlisi bu araçlar benzinli araçların elektrikli hale dönüşümü olmamakla birlikte tamamen elektrikli araç olarak tasarlanmıştır. Bu araçlarda tahrik için gerekli enerji 8 tane Pb-asit ve 1 tane yardımcı bataryadan sağlanmaktadır. 6 kW'lık DC elektrik motoru tahrik tekerlerine güç iletmektedir. Aracın kütlesi 975 kg olup maksimum hızı 64 km/h'dir. Aracın menzili ise sürüş şartlarına bağlı olarak 40-90 arasında değişmektedir. Aracın performansı elektrik konseyi tarafından önerilen şehir içi kullanım test programına göre yeterli bulunmuştur.

Benzinli araçları elektrikli versiyona dönüştüren Ford Motor gibi bazı büyük araç üreticileri, bu dönemlerde elektrikli aracı baştan sona tasarlamak istemişlerdir. 1966 yılında Ford Motor'dan aşağıdaki gereksinimleri yerine getirebilecek bir elektrikli aracın tasarlanması istenmiştir.

- Minimum kirlilik
- Çalışması kolay
- İlk satın alma ve çalışma maliyeti düşük
- Minimum yol ve park alanı kaplayacak kadar küçük

1967 yılında Comuta adı verilen (Şekil 2.2) prototip yapılmış geliştirilmiştir. 4 kişilik olan bu araç 2 m uzunluğunda ve 1.4 m yüksekliğindeydi. 3 tane Comuta aracı aynı yere yan yana park edildiğinde 1 büyük konvansiyonel araç kadar yer kaplamaktaydı. Comuta her biri ön tekeri tahrik eden 2 tane DC motoruna sahipti. Her motor 18 kg ve 14 cm çapındadır. Aracın tahriki için gerekli enerji toplam kütlesi 170 kg olan 4 tane Pb-asit bataryadan sağlanmaktadır. 40 km/h' de 64 km menzili sahip olup maksimum hızı 64 km/h'dir.

Bu araç 1967 yılında prototip olarak ilk olarak gösterildiğinde menzil, ivmelenme, kullanım ve gürültü performansı ile ilgili testler yapılmıştır. Aynı zamanda 2. prototip de yapılmış ve Amerika'da Ford personeli tarafından test edilmiştir. Bu prototiplerden biri hala durmak ve Londra'daki Science müzesinde sergilenmektedir.

Bu dönemlerde Amerika'da da elektrikli araç teknolojisi konusunda gelişmeler devam etmekteydi. 1960'ların ortalarında General Motors Electrovan ve Electrovair isimli prototiplerin geliştirileceği olacağı 15 milyon \$'lık bir program başlatmıştır. Bu araçlarda yeni gelişmiş 3 fazlı alternatif akım (AC) tahrik sistemi kullanılmıştır. GM aynı zamanda bir Opel Kadette aracını hem Pb-asit hem de çinko-hava (Zn-hava) bataryalarının kullanılmasıyla DC

tahrikli hale dönüştürmüştür. 2. bahsedilen batarya ile 48 km/h' de araca 240 km menzil verildiği iddia edilmektedir.

1968 yılında General Electric nikel-demir (NiFe) bataryalarının kullanıldığı GE Delta elektrikli aracının demonstrasyonunu yapmıştır. Bu aracın menzili 64 km olup maksimum hızı 89 km/h'dir. Aynı yılda Ford, nikel-kadmiyum (NiCd) bataryaları kullanarak deneysel E-car aracının demonstrasyonunu yapmıştır. Bu dönemde AC tahrikindeki çok önemli gelişmeler dışında kabul edilebilir menzil ve performansın olduğu elektrikli araçların üretiminin zor olduğu görülmüştür.



Şekil 2.2 Ford Comuta elektrikli araç (Ünlü vd., 2003)

### 2.6.2 1970'ler

1972 yılında Florida'da Sebring-Vanguard Firması tarafından düşük maliyetli 2 kişilik Citicar isimli araç geliştirilmiştir. Bu aracın menzili 40 km ve maksimum hızı 72 km/h olup 3000 \$ gibi çok düşük maliyete satılmaktaydı. Maliyetin düşük tutulması sayesinde 1976 yılında üretim durmadan önce bu düşük performanslı araçlardan 2500 tane satılmıştır. Bu araç, 1990'ların sonuna doğru Peugeot Citroen'in yeni bir araç geliştirmesine kadar modern çağda üretilen en fazla elektrikli araçtır.

1970'lerin ortalarına doğru Amerika'daki bazı küçük firmalar konvansiyonel araçları elektrikli hale dönüştürme çabalarına girmiştir. Örneğin Jet Endüstrileri (Jet Industries), McKee Mühendislik (McKee Engineering) ve Elektrikli Araç Ortakları (Electric Vehicle Associates EVA). Bu son firma Lancia'nın elektrikli versiyona dönüşümünü önermiştir .

Menzili 90 km hızı 96 km/h'e kadar çıkabilmektedir. 7 yıllık periyod boyunca 185 araç satılmış ancak 1982 yılında firma üretimi durdurmuş ve kapanmıştır.

1970'li yıllarda Avrupa kıtasında da elektrikli araç bakımından çok aktif bir dönem yaşanmıştır. 1973'de Electricite de France 80 tane konvansiyonel aracı elektrik tahrikli hale dönüştürmüştür. Almanya'da Daimler, Benz ve Volkswagen ise deneysel elektrikli araçlar geliştirmişlerdir. 1975 yılında İtalya'da Fiat, X1/23 B adlı deneysel bir prototip geliştirmiştir. Bu araç 2 kişilik olup enerji depolama sistemi olarak kurşun-asit bataryaları kullanılmış ve DC elektrik motoru ile tahrikli edilmiştir. Aracın menzili 48 km olup maksimum hızı 64 km/h'nin altındadır.

Japonya'da ise gene bu yıllarda Daihatsu, Toyoto, Mazda ve Mitsubishi firmaları hepsi birlikte prototip elektrikli araçlar üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada için Japonya hükümeti 1971 yılında 5 yıl boyunca 20 milyon dolarlık destek vermiştir. İlk araçlarda kurşun-asit bataryalarıyla birlikte DC tahriki kullanmış ve 1980'lere kadar AC tahrikinin kullanıldığı görülmemiştir.

### 2.6.3 1980'ler

1980'li yıllarda elektrikli araçların çevresel yönden avantajlarının anlaşılması nedeniyle hükümetler bu araçlara karşı ilgi duymaya başlamışlar elektrikli araç programı için resmi parasal kaynak oluşturmaya başlamışlardır. Böylelikle 1980'lerin ortalarında ABD Enerji Departmanının sponsorluğu ile Ford/GE tarafından ETX-1 aracının geliştirilmesi sağlanmıştır. Bu araçta ileri AC tahrik sistemi kullanılmıştır.

İngiltere hükümetinin küçük elektrikli araçlardan alınan vergiyi muaf tutması ile Clive Sinclair, düşük maliyetli elektrikli araçlar üzerine çalışmaya başlamıştır. 1985 yılında tek kişilik olan 3 tekerlekli bir elektrik aracı geliştirilmiştir. 250 W'lık motor ve düşük ağırlıklı kurşun-asit bataryaları bulunmakta olup maksimum hızı 24 km/h dir.

Fransa'da 1988 yılında 500 kadar elektrikli araç deneysel olarak kullanılmıştır. Bu araçların çoğu Peugeot 205 yada Citroen C15 dönüşümleridir. Almanya'da 1970'lerin sonlarındaki deneysel araçlar daha da geliştirilmiş ve 1988 yılında GES City Stromer isimli VW dönüşümünü gerçekleştirmiştir. Araç o dönemin Avrupa Güvenlik Standartlarını karşılayacak şekilde tasarlanmıştır.

Aynı dönemde Fiat, Panda Elettra dönüşümü olan elektrikli aracı geliştirmiştir. 1988'de Japonya'da DC tahriki AC'nin yerini almış hem kurşun-asit hem de nikel-demir bataryaları ile senkron ve indüksiyon tahrik motorları kullanılmıştır.

Japonya elektrikli araçların uzun tarihçesi ve yakıt kaynaklarının yokluğu nedeniyle, gelecekte elektrikli araçların önemli bir distribütörü olarak görülmektedir (Westbrook, 2001). Elektrikli araçların 1990'a kadar olan gelişme aşamaları Çizelge 2.1'de görülmektedir.

Çizelge 2.1 Elektrikli araçların geçmişten günümüze kadarki gelişme aşamaları (Ünlü vd., 2003).

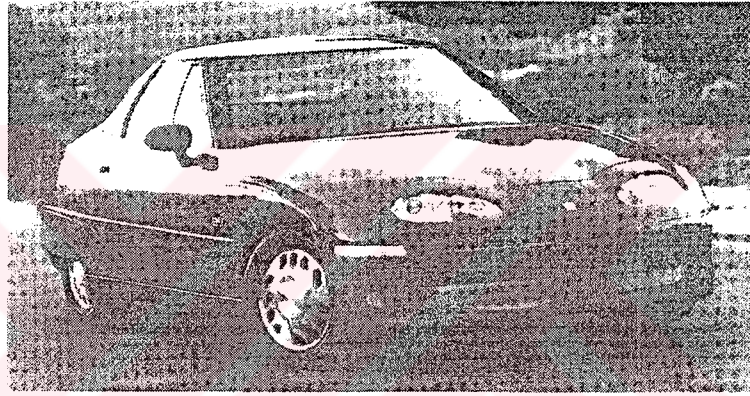
Elektrikli araçların geçmişten günümüze kadar ki gelişme aşamaları	
1800	Volta primer hücre ve bataryayı geliştirdi.
1821	Faraday elektrik motorunun temel prensibini ortaya koydu.
1834	Davenport primer bataryalı ilk elektrikli yol aracının uygulamasını yaptı.
1859	Plante sekonder hücre ve bataryayı geliştirdi.
1869	Gramme 1 BG' den daha fazla ilk DC elektrik motorunu yaptı.
1881	Trouve sekonder bataryalı ilk elektrikli aracı yaptı.
1885	Benz ilk içten yanmalı motorlu aracın uygulamasını gerçekleştirdi.
1887-98	Avrupa'da ve Amerika'da kullanılan elektrikli araçların menzili geliştirildi.
1899	Jenatzy 105.9 km/saat ile dünya hız rekorunu kırmış ve bu rekoru 3 yıl elinde tutmuştur.
1900	Eşit sayıdaki buharlı, elektrikli ve benzinli araçlar birbirleriyle yarıştı.
1900-12	Elektrikli araçların altın dönemi yaşandı.
1921-60	Benzin motorlu araçlar tamamen yaygınlaşmaya elektrikli araçlar ise yok olmaya başladı.
1960-90.	Elektrikli araçlar çok az sayıda da olsa tekrar görünmeye başladı.
1990	Yeni batarya teknolojileri ile artan sayıda elektrikli araç görülmeye başladı

#### 2.6.4 1990 ve 2000'ler

##### 2.6.4.1 General Motors EV1

EV1 (Şekil 2.3), ilk olarak 1990 yılında Ocak ayında Los Angeles Auto Show Otomobil Fuar'ında sergilenmiştir ve ABD'de ilk defa 1996 yılında pazara sunulmuştur. Araç görüldüğü gibi şehir içi kullanımı için tasarlanmış 2 kişilik bir araçtır ve çift hava yastığı, CD çalar, anti-lock frenleme sistemine sahiptir. GM EV1, 530 kg ağırlığında ve 16.2 kWh depolama özelliğine sahip sübap ayarlı kurşun-asit (VRLA) bataryalarına sahiptir. Bataryaların araca toplam 145 km menzil verebildiği ve 450 derin deşarj çevrimine sahip olduğu ifade edilmektedir. 1998 yılında GM bir başka opsiyon olarak nikel-metal hidrür (NiMH) bataryaları kullanmıştır. Bu ileri batarya sisteminin aynı ağırlık ve boyuttaki VRLA

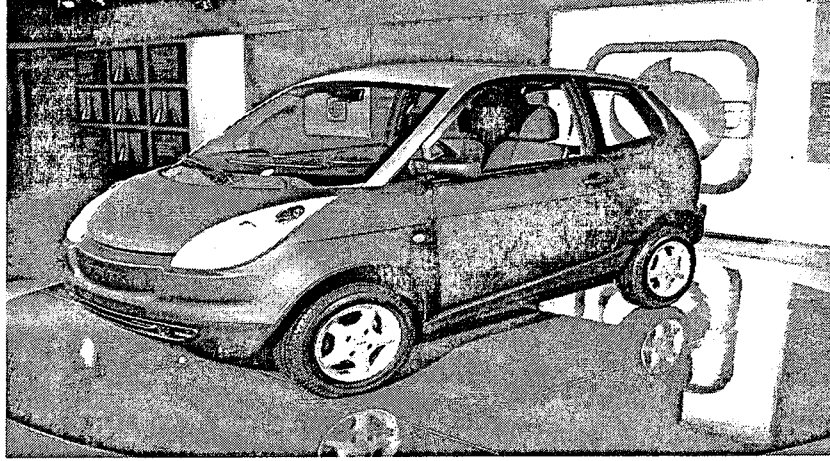
bataryalarına kıyasla hemen hemen 2 kat daha fazla enerji depo ettiği ifade edilmektedir. Geliştirme testleri ve deneyler boyunca EV1'in 600 km menzile kadar çıkabildiği ifade edilmektedir. NiMH bataryaları VRLA bataryalarından 4 kat daha pahalı olmasına rağmen 4 kat daha uzun ömre sahiptirler. Tahrik sistemi için 3 fazlı AC asenkron motor kullanılmıştır ve tekerleklere 102 kW güç verebilmektedir. Motor aynı zamanda frenleme esnasında bataryaların rejeneratif olarak şarjı için jeneratör gibi görev yapmaktadır. Batarya ve motor sistemi aynı zamanda batarya şarjını kontrol eden elektronik modül ile kontrol edilebilmektedir. Bataryalar 312-V civarındadır. EV1 konvansiyonel araçlara göre üretim amaçlı geliştirilmiş ilk elektrikli araç olması yanında aynı zamanda elektrikli araçlarda normal üretim yöntemlerine göre üretildiğini göstermektedir. 2000 yılı Nisan ayında bu aracın üretimi durdurulmuştur.



Şekil 2.3. General Motors EV1 elektrikli araç (Ünlü vd., 2003)

#### 2.6.4.2 Ford Think City

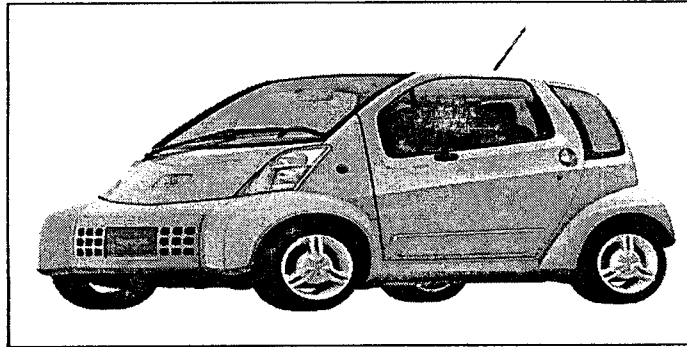
Ford Think City (Şekil 2.4), Pivco Industries isimli bir Norveç'li şirket tarafından geliştirilen ve şehir içinde kullanıma uygun 2 kişilik küçük bir elektrikli araçtır. Bu firma 1998 yılında Ford Motor şirketinin yönetimine geçmiştir. Think City elektrikli aracı 1999 yılı Kasım ayından beri üretimdedir. 1999 yılı Aralık ayında da 120 araç siparişi olmuştur. Think City aracının ABD versiyonu hala geliştirilme aşamasındadır. Bu araçta 3 fazlı AC asenkron motor kullanılmıştır ve gücü 27 kW civarındadır. 0'dan 50 km/h'e toplam 7 sn'de ulaşabilmektedir ve maksimum hızı 90 km/h'tir. Güç 114 V NiCd bataryalardan elde edilebilmektedir.



Şekil 2.4. Ford Think City elektrikli araç (Ünlü vd., 2003)

#### 2.6.4.3 Nissan Hypermini

Nissan Hypermini (Şekil 2.5), birçok yönden Think City'ye benzemektedir. Bu araç yine 2 kişilik kompakt bir şehir içi ulaşım aracıdır. Bu araç 24 kW güç üreten maksimum momenti 130 Nm ve maksimum hızı 6700 dev/dak olan sürekli manyetik (PM) senkron motor kullanmakta ve bu motor arka tekerlekleri tahrik etmekte ve düşük titreşim ve gürültüde iyi ivmelenme kabiliyetine sahip olduğu ifade edilmektedir. Motor, 90 Wh/kg enerji yoğunluğuna ve 15 kWh güç depolama kapasitesine sahip lityum-iyon (Li-iyon) bataryalarından güç almaktadır. Bu batarya normal Pb-asit bataryalarına göre enerji depolamada 3 kat daha verimli ve nikel-kadmiyum bataryalarına göre de 2 kat daha verimli olduğu için aynı sürüş menzili için daha az ağırlıkta batarya kullanılabilir.



Şekil 2.5. Nissan Hypermini elektrikli araç (Ünlü vd., 2003)

#### 2.6.4.4 Toyota RAV 4 EV

Toyota RAV 4 EV (Şekil 2.6), yukarıdaki araçlar arasında hem görüntü hem de konfor açısından konvansiyonel araçlara en yakın olan araçtır. RAV 4 EV Japonya'da 1996 yılının Eylül ayında 45 000 \$ civarında bir fiyatla otomotiv pazarında yerini almıştır. Eğer elektrikli araçlar otomotiv piyasasında da önemli yer tutacaksa, fiyatın yaklaşık bu rakamın yarısı

olabilmesi gerekmektedir. Bu araçta tahrik PM motordan sağlanmaktadır ve 2 kademeli dişli kutusu bulunmaktadır. Bu motorun maksimum gücünün 50 kW, maksimum momentinin 190 Nm ve maksimum hızının 125 km/h olduğu ifade edilmektedir. Araçta 450 kg ağırlığında ve 27 kWh güç depolama kapasitesine sahip NiMH bataryaları kullanılmıştır. Aracın ABD kombine test çevrimine göre şarj edildiği zaman 200 km menzile ulaştığı ifade edilmektedir.



Şekil 2.6. Toyota RAV4 elektrikli araç (Ünlü vd., 2003)

Üretilmiş tümü-elektrikli araçlar (Çizelge 2.2) ve üretilmiş hibrid elektrikli araçlarda (Çizelge 2.3) birçok çeşit batarya teknolojisi kullanılmıştır. Pb-asit bataryaların maliyeti düşük olmasına rağmen sadece bir araçta yer aldığı görülmektedir. Diğer batarya tiplerinden NiCd bataryalar 5 araçta, NiMH bataryalar 3 araçta ve Li-iyon bataryalar ise bir araçta yer aldığı görülmektedir. Beş araçta ise (GM,BMW ve DaimlerChrysler'in ürettiği) sodyum-nikel klorür (NaNiCl) teknolojisi kullanılmıştır (Ünlü vd., 2003).

Çizelge 2.2 Üretilmiş tümü-elektrikli araçlar (Ünlü vd., 2003)

Üretici	Citroen	Daihatsu	Ford	GM	GM	Honda	Nissan	Nissan	Nissan	Peugeot	Renault
Model İsmi	AX/Saxo Electrique	Hijet EV	Thik City	EV1	EV1	EV Plus	Hypermini	Altra EV	106 Electric	Clio Electric	
Tahrik Tipi	DC motor	PM senkron	3 fazlı indüksiyon	3 fazlı indüksiyon	3 fazlı indüksiyon	PM senkron	PM senkron	PM senkron	DC motor	AC indüksiyon	
Batarya tipi	NiCd		NiCd	Pb-asit	NiMH	NiMH	Li-iyon	Li-iyon	NiCd	NiCd	
Max Güç (kW)	20		27	102	102	49	24	62	20	22	
Gerilim (V)	120		114	312	343	288		345	120	114	
Batarya enerji Kapasitesi (kWh)	12		11.5	16.2	26.4		15	32	12	11.4	
Max hız (km/h)	91	100	90	129	129	129	100	120	90	95	
İddia edilen menzil	80	100	85	95	130	190	115	190	150	80	
Şarj süresi (saat)	7	7	5-8	6	6	6-8	4	5	7-8		

Çizelge 2.3 Üretilmiş hibrid elektrikli araçlar (Ünlü vd., 2003)

Üretici	Honda	Toyota	Nissan
Model ismi	Insight	Prius	Tino
Hibrid tipi	Paralel	Paralel	
İçten yanmalı motor	Fakir karışımli benzinli motor	Atkinson çevrimli benzinli motor	4 silindirli benzinli motor
Kapasite(cc)	995	1500	1800
Maksimum güç (kW) (içten yanmalı motor)	50	43	
Elektrikli Tahrik	PM fırçasız DC	PM senkron AC	PM senkron AC
Maksimum güç (kW) (elektrikli tahrik )	10	30	17
Batarya tipi	NiMH	NiMH	Li-Iyon
Sistem voltajı (V)	144	288	
Batarya enerji kapasitesi (kWh)	0.94	1.9	
Max hız (km/h)	180	160	
Ort yakıt tüketimi (litre/100km)	3.4	3.45	
Satış fiyatı (\$)	18 000	18 000	28 500
Üretim maliyeti (\$)	28 000	35 000	31 000

#### 2.6.4.5 Honda Insight

Honda Insight (Şekil 2.7), 2 kişilik bir hibrid araç olup; araçta yüksek verimli benzinli motor, elektrik motoru ve 5 kademeli dişli kutusu kullanılmıştır. Bu aracın 0'dan 100 km/h hıza toplam 12sn'de ulaştığı maksimum hızının 180 km/h ve AB kombine test çevrimine göre yakıt tüketiminin 28 km/lt olduğu ifade edilmektedir. Üç silindirli 995 ml benzinli motora sahiptir. Bu motor hafif malzemeden yapılmıştır ve dünyanın en hafif motoru olduğu ifade edilmektedir. Elektrik motoru olarak ince (60 mm) DC fırçasız motor kullanılmıştır. Direkt krank miline bağlıdır ve gücünü 20 kg ağırlığında ve 0,94 kWh güç yoğunluğuna sahip 144 V NiMH bataryalarından almaktadır. Bu batarya sadece rejeneratif frenleme ile şarj olmaktadır ve elektrik motoru ivmelenme ve yokuş çıkma esnasında benzinli motorun performansını 1.5 motor performansına çıkartmak amacıyla kullanılmaktadır. Benzinli motorun gücü elektrik

motorunun da desteği ile 50kW'dan 56 kW'a çıkmakta ve 4800 dev/dak'da 91 Nm'den 113 Nm'ye çıkmaktadır.



Şekil 2.7 Honda Insight elektrikli araç (Ünlü vd., 2003)

#### 2.6.4.6 Honda Civic

Honda Civic Hibrid 2003 modelinde (Şekil 2.8), 4 silindirli 1339 ml 8 sübaplı enjeksiyonlu benzinli motor kullanılmıştır. Benzinli motorun gücü 5700 dev/dak'da 85 BG'dir. Yardımcı güç ünitesi olarak sürekli manyetik elektrik motoru kullanılır. Bu motorun gücü 4000 dev/dak'da 13.4 BG'dir. Enerji depolama sistemi olarak NiMH bataryaları kullanılmaktadır. Toplam 144 hücreden oluşmuş ve 144 V gerilime sahiptir.



Şekil 2.8 Honda Civic hibrid araç (Ünlü vd., 2003)

#### 2.6.4.7 Toyota Prius

5 kişilik Toyota Prius (Şekil 2.9), hibrid elektrikli aracında benzinli motor ve elektrik motoru arasındaki güç paylaşımı Honda Insight'e göre daha eşit şekilde olmaktadır. Bu hibrid transmisyon sistemi ile sağlanabilmektedir. Planet dişli sistemi kullanan güç paylaştıran bir sistem vardır. Benzinli motorun mili planet dişli taşıyıcısına bağlıdır. Jeneratör tarafından

üretilem elektrik enerjisi ya elektrik motoruna verilir ya da bataryanın şarj olabilmesi için direkt akımın üretilemesi için eviriciye verilir.

Prius aracında 1.9 kWh kapasitesinde yüksek performanslı NiMH bataryaları kullanılmıştır. Toyota özel hibrid sistemde kullanılması amacıyla 1.5 l benzinli motor geliştirmiştir. Bu motor Atkinson çevrimine göre çalışmaktadır. Bu motorda yüksek sıkıştırma oranının sağlanabilmesi ve bu sayede yüksek yanma enerjisinin sağlanabilmesi amacıyla çok küçük bir yanma odası kullanılmıştır. Bu motor düşük devirli olduğu için (maksimum 4 000 dev/dak) hareketli parçalar daha hafif yapılabilmektedir. Örneğin krank çapı daha küçük olabilir, daha hafif segmanlar kullanılır, daha hafif sübap yayı yükleri oluşur ve içten sürtünme dolayısıyla oluşan kayıplar azalır. Burada aynı zamanda motorun çalışma şartlarına göre değişken sübap zamanlanması (VVT sistem) sistemi kullanılmaktadır. Burada motorun çalışma şartlarına göre sübap açılma kapanma zamanları değişmektedir. Böylelikle bu sistemin kullanılmasıyla yakıt ekonomisinde de iyileşmeler gözlemlenmektedir (Ünlü vd., 2003).



Şekil 2.9 Toyota Prius hibrid elektrikli araç (Ünlü vd., 2003)

Tüm büyük araç üreticileri yakıt pilli elektrikli araçlar üzerine çalışmaktadır. Prototip ve deneysel amaçlı geliştirilmiş yakıt pilli araçların bilgileri Çizelge 2.4'de verilmiştir.

Çizelge 2.4 Prototip ve deneysel amaçlı geliştirilmiş yakıt pili elektrikli araçlar (Ünlü vd., 2003)

Üretici	Daimler Chrysler	Daimler Chrysler	Ford	Ford	GM	GM
Model İsmi	NECAR5	Commander	P2000	Think Focus	Opel Zafira	Opel Zafira
Tahrik Tipi	3 fazlı İndüksiyon	3 fazlı İndüksiyon	3 fazlı İndüksiyon	3 fazlı İndüksiyon		
Güç Kaynağı	Yakıt pili+Metanol yakıt dönüştürücü ve H <sub>2</sub> depolama	Yakıt pili+ Metanol yakıt dönüştürücü +batarya	Yakıt pili+ H <sub>2</sub> depolama	Yakıt pili+ H <sub>2</sub> depolama	Yakıt pili+ Metanol yakıt dönüştürücü +H <sub>2</sub> depolama	Yakıt pili+ H <sub>2</sub> depolama
Max Güç (kW)	55	70	67	67	80	89
Gerilim (V)	330		255	315		
Max hız (km/h)	145		128	128	120	145
İddia edilen	450		160	160	640	400
Üretim tarihi	2004	2004?	2004	2004	2004	

Çizelge 2.4 devamı Prototip ve deneysel amaçlı geliştirilmiş yakıt pili elektrikli araçlar (Ünlü vd., 2003)

Üretici	Honda	Mazda	Mitsubishi	Nissan	Peugeot/Citroen	Renault/Volvo	Toyota
Model İsmi	FCX-V3	Demio-FCEV	Fuel-Cell EV	FCV	Partner	Fever	FCEV
Tahrik Tipi	PM senkron	3 fazlı indüksiyon		PM senkron	senkron	PM senkron	
Güç Kaynağı	Yakıt Pili + H <sub>2</sub> depolama+Süp erkapasitör	Yakıt Pili + H <sub>2</sub> depolama + Süperkapasitör	Yakıt Pili + Yakıt dönüştürücü	Yakıt dönüştürücü	Yakıt Pili + Yakıt dönüştürücü ve H <sub>2</sub> depolama	Yakıt Pili + H <sub>2</sub> depolama+ NiMH batarya	Yakıt Pili + metanol yakıt dönüştürücü
Max Güç (kW)	60	65				30	50
Gerilim (V)						FC90 sistem	
Max hız (km/h)	145	90				120	125
İddia edilen menzil	400	170				400	500
Üretim tarihi	2003		2005	2004/5	2003/4	2003+	

### 3. ELEKTRİKLİ ARAÇ TEKNOLOJİLERİ

#### 3.1 Tümü-Elektrikli Araçların Değerlendirilmesi

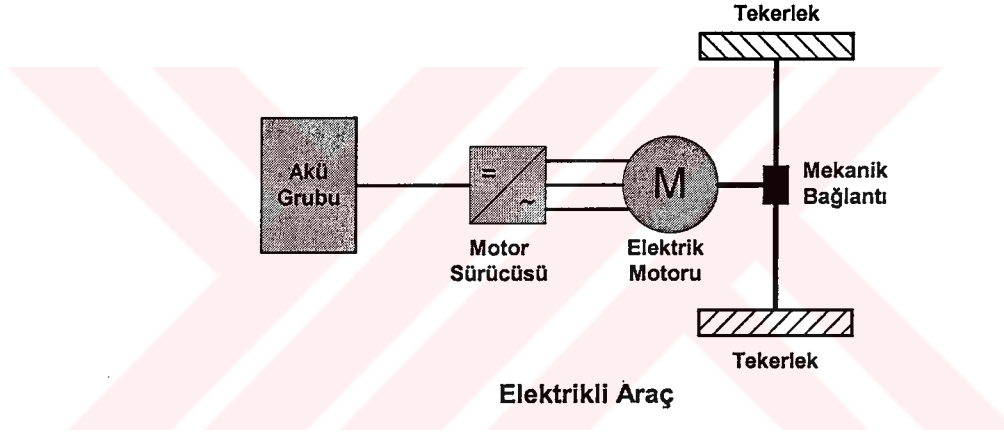
Tümü-elektrikli araçlar (Şekil 3.1), depolanan ya da üretilen tüm itici gücün elektriksel olarak elde edildiği araçlardır. Bunun yanında bu araçlarda ana güç kaynağına ek olarak yardımcı güç kaynakları da bulunmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi elektrik motorunun dönmesi için gerekli olan elektriksel enerji bataryalardan elde edilebilmektedir. Burada gücün elde edilebilmesi için gerekli olan enerji yakıtın yanmasıyla değil batarya gibi enerji depolama sistemlerinden elde edildiğinden tümü-elektrikli araçlarda benzin, dizel ya da yanabilen diğer yakıtlar kullanılmamaktadır. Bu nedenle elektrikli araçlarda hiç yakıt tüketilmediği için emisyon açığa çıkmaz ve bu araçlar “sıfır emisyonlu araçlar” olarak adlandırılmıştır. Bunun yanında tümü-elektrikli araçlarda ana bataryaya ek olarak yardımcı güç kaynağı için ikinci bir batarya veya süperkapasitör kullanılabilir. Bu yardımcı güç kaynakları pik çalışma şartları altında örneğin bir yokuşu tırmanırken veya ivmelenirken kısa periyotlarda yüksek güç sağlayabilmektedir. Yüksek enerji yoğunluğu genelde uzun sürüş menzili, yüksek güç yoğunluğu ise genelde ivmelenme ya da yokuş tırmanmak için istenmektedir. Bu çok önemlidir çünkü bazı bataryalar yüksek enerji fakat düşük güç yoğunluğuna sahiptir. Örneğin alüminyum-hava bataryaları 220Wh/kg gibi yüksek enerji yoğunluğuna fakat 30W/kg gibi düşük güç yoğunluğuna sahiptir. İyi bir ivmelenme veya yokuş çıkmak için en azından 150 W/kg gibi yüksek güç yoğunluğuna ihtiyaç duyulduğundan yüksek güç yoğunluğuna sahip yardımcı güç kaynağına gereksinim duyulmaktadır. Bu güç yoğunluğu Pb-asit bataryalarından kolayca elde edilebilmektedir ve bu nedenle tümü-elektrikli araçlarda alüminyum-hava (Al-hava) bataryalarına ek olarak yardımcı batarya kullanılmaktadır.

Bununla birlikte eğer gerçekten çok yüksek bir ivmelenmeye ihtiyaç duyulacak olursa yardımcı güç kaynağı olarak süperkapasitörler de kullanılabilir. Mevcut süperkapasitörlerin enerji yoğunluğu yaklaşık 15 Wh/kg civarında olmasına rağmen güç yoğunluğu 1 kW/kg'dır ve önümüzdeki 3 yıl içerisinde bu değer 4 kW/kg değerine yükseltilmesi hedeflenmektedir. Süperkapasitörler şu an için gelişme aşamasındadır. Bu nedenle çok pahalıdırlar ve önümüzdeki birkaç yıl içerisinde elektrikli araçlarda kullanılabileceği düşünülmemektedir.

Tümü-elektrikli araçlar birçok bakımdan konvansiyonel araçlara benzemektedir. Bugünkü elektrikli araçların çoğunun şasi ve gövdesi diğer konvansiyonel araçlar gibidir. Birçok elektrikli araçların içi dahi konvansiyonel araçlar gibidir. Konvansiyonel araçlarda bulunan aynı aksesuarlar elektrikli araçlarda da bulunmaktadır.

Elektrikli araçların şarj edilebilir bataryalarında depolanmış bulunan elektrik enerjisi motor kontrolörüne güç sağlamaktadır. Motor kontrolörü gaz pedalının pozisyonuna bağlı olarak elektrik motoruna gidecek gücün miktarını ayarlamaktadır. Elektrik motoruna sağlanan elektrikselsel güç elektrik motorunun milini döndürmek için gerekli elektromotiv kuvvetini sağlamaktadır. Bu mil taşıtın tekerleklerine bağlıdır ve bu sayede de milin dönme yönüne göre taşıtın ileri ya da geri gitmesi sağlanır.

Elektrikli araçlar konvansiyonel araçlara göre daha verimlidir. Bir bataryalı elektrikli araç yaklaşık % 46 verimle çalışmasına karşın, konvansiyonel araçlar yaklaşık %18-25 arasında çalışmaktadırlar. Bir başka deyişle elektrikli araç bataryalarının şarjı için prizden çekilen enerjinin % 46'sı tekerleklerde kullanılabilir işe dönüştürülmektedir. Bunun tersi, konvansiyonel araçlarda yakıt tankında bulunan sıvı yakıtın %18-25 kadarı tahrik tekerlerinde işe dönüştürülebilmektedir.



Şekil 3.1 Tümü-elektrikli aracın şematik resmi (Ünlü vd., 2003)

Tümü-elektrikli araçlarda içten yanmalı motor olmadığı ve elektrik motoru olduğu için bu araçlar sesiz çalışmaktadır. Rejeneratif frenleme sayesinde daha uzun fren ömrü vardır ve kinetik enerji geri kazanılarak elektrik motoru jeneratör gibi kullanılarak kinetik enerji elektrik enerjisine dönüştürülmekte ve bataryaları besleyerek şarj etmektedir.

Elektrikli araçların seri üretimine geçilmesinde bazı dezavantajları vardır. Bu dezavantajlardan en önemlilerinden biri aracın yüksek maliyetidir. Aracın maliyeti çok yüksek olduğundan bu araçların piyasada seri üretime geçilmesinde sıkıntılar yaşanmaktadır. Ancak elektrikli araçların yakıt maliyeti konvansiyonel araçların yakıt maliyeti ile karşılaştırıldığında bu değer çok düşük kalmaktadır. Elektrikli araçların yakıt maliyet düşük olduğundan petrol fiyatlarının artmasıyla bu araçların ön plana çıkması beklenmektedir. Yakıt maliyetine ek olarak bakım maliyeti de konvansiyonel araçlara göre düşüktür. Çünkü bu araçlarda hareketli eleman sayısı çok azdır. İçten yanmalı motorlu araçlar kadar yüksek bakım

ve onarım maliyeti yoktur. Yakıt ve bakım onarım maliyeti de düşünülduğünde ilk satın alma maliyetinin yüksek olması çok da fazla problem değildir. Önümüzdeki yıllarda bu araçların pazarda yaygınlaşacağı düşünülmektedir. Elektrikli araçların yaygınlaşabilmesi için satış maliyetinin azaltılması gerekmektedir. Satış maliyetini arttıran en büyük unsurlar batarya ve elektrik motoru teknolojileridir. Özellikle batarya teknolojisi üzerine tüm dünya çalışmalarına başlamıştır. Aracın menzilini sağlayan bataryaların güç yoğunluğu yüksek olmalıdır. Batarya teknolojisi pahalı bir teknolojidir. Elektrik motorları ise birim hacim başına yüksek güç vermesi gerektiğinden önemlidir. Bu teknolojiler geliştikçe elektrik araç satışlarının artacağı düşünülmektedir.

Elektrikli araçların seri üretime geçmesindeki bir diğer engel ise konvansiyonel araçlarda menzil problemi olmazken bu araçlarda performans ve menzil sıkıntısı yaşanmasıdır. Elektrikli araçların menzilini bataryaların enerji yoğunlu belirlemektedir. Bataryalar enerji depolama sistemleri olduğundan bu sistemlerde ne kadar fazla enerji depolanırsa aracın menzili o kadar artacaktır. Ancak yüksek enerji yoğunluğuna sahip bataryalar ağırdır, fazla yer kaplar ve aracın ağırlığını arttırdığından buna paralel olarak aracın performansını da azaltır. Yukarıda da bahsedildiği gibi batarya teknolojisinin muhakkak ki gelişmesi gerekmektedir. Bu amaçla İleri Kurşun-Asit Batarya Konsorsiyumu ve Amerikan İleri Batarya Konsorsiyumu bu konu üzerinde geniş çalışmalar başlatmıştır.

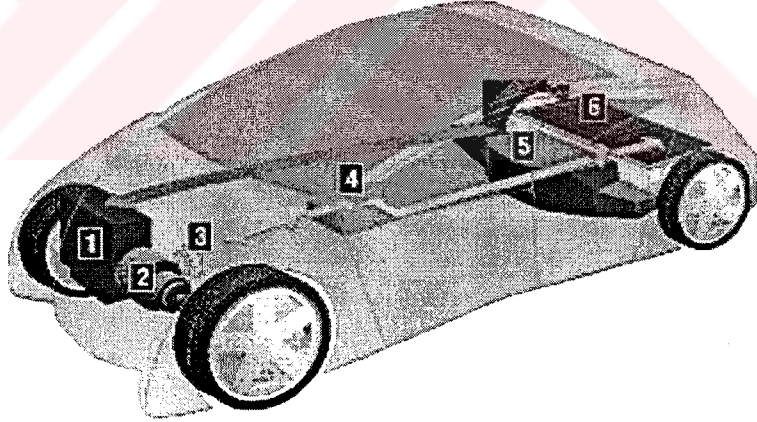
Yukarıda bahsedilen problemlere ek olarak bir önemli sorun ise aracın şarj problemidir. Konvansiyonel araçlarda böyle bir sınırlama yoktur. İçten yanmalı motora yakıt sağlandığı sürece araçtan istenilen seviyede güç üretimi sağlanır. Ancak elektrikli araçlarda güç bataryalarda depolanan enerjiden sağlandığından, bataryalar deşarj olduğu zaman güç üretimi sağlanamaz ve bataryaların şarj olması için belirli bir süre geçmektedir. Bataryaların şarj süresi batarya tipine göre değişmekle beraber yaklaşık 8-12 saat arasında değişir. Elektrikli araçlar otellerde müşterileri odalarına götürmek, hava alanından şehir içine götürmek, adalarda dolaşmak gibi kısa mesafeler için uygundur.

### **3.2 Hibrid Elektrikli Araçların Değerlendirilmesi**

Hibrid elektrikli araç (Şekil 3.2), tahrik enerjisinin iki ya da daha fazla tipteki enerji kaynağından sağlandığı ve en azından bunlardan birisinin elektriksiz enerji iletebildiği bir araçtır. Uluslar arası Elektroteknik Komisyonunun Teknik Komitesi (Elektrikli yol araçları) tarafından verilen tanıma göre hibrid elektrikli araç, enerjinin iki ya da daha fazla enerji deposundan sağlandığı ve bu enerji depolarından en az bir tanesinin elektrik enerjisi verdiği bir araç olarak ifade edilmiştir. Bu tanıma bağlı kalarak, içten yanmalı motor ve batarya,

batarya ve yakıt pili, batarya ve kapasitör gibi birçok çeşit hibrid elektrikli araç mevcuttur. Bu hibrid tanımın yanı sıra, hibrid elektrikli araç basit anlamda, bir içten yanmalı motor ve de bir elektrik motoru bulunan bir araçtır. Bu genel ifadeye bağlı olarak, batarya-yakıt pili, batarya-kapasitör ya da batarya - batarya gibi bir çok çeşit hibrid elektrikli araç versiyonları vardır. Bununla beraber yukarıdaki ifade tam olarak geniş çevrelerce kabul görmemiştir.

Bir diğer tanımlamada ise hibrid elektrikli araç daha çok hem içten yanmalı motorun hem de elektrikli motorun kullanıldığı araç olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle karışıklık olmaması açısından bu kitapta batarya ve yakıt pilli elektrikli araçlar ayrı bir bölümde incelenmiştir. Bir hibrid elektrikli araç enerji depolama sistemi, güç ünitesi ve taşıtı itici sistemden oluşmaktadır. Enerji depolama için başlıca seçenekler bataryalar, ultrakapasitörler ve volanlardır. Bataryalar bugüne kadar en yaygın enerji depolama sistemi olmasına rağmen , diğer enerji depolama alanlarında da araştırmalar devam etmektedir. Hibrid güç ünitesi olarak da otto motorlar , dizel motorlar , gaz türbinleri ve yakıt pilleri kullanılmaktadır. İtici kuvvet ise seri hibrid sisteminde olduğu gibi elektrik motorundan sağlanmaktadır, ya da paralel hibride olduğu gibi elektrik motoruna ek olarak içten yanmalı motordan sağlanabilmektedir. Çünkü paralel hibrid sistemde içten yanmalı motor itici gücü mekaniksel olarak tekerlere vermektedir.

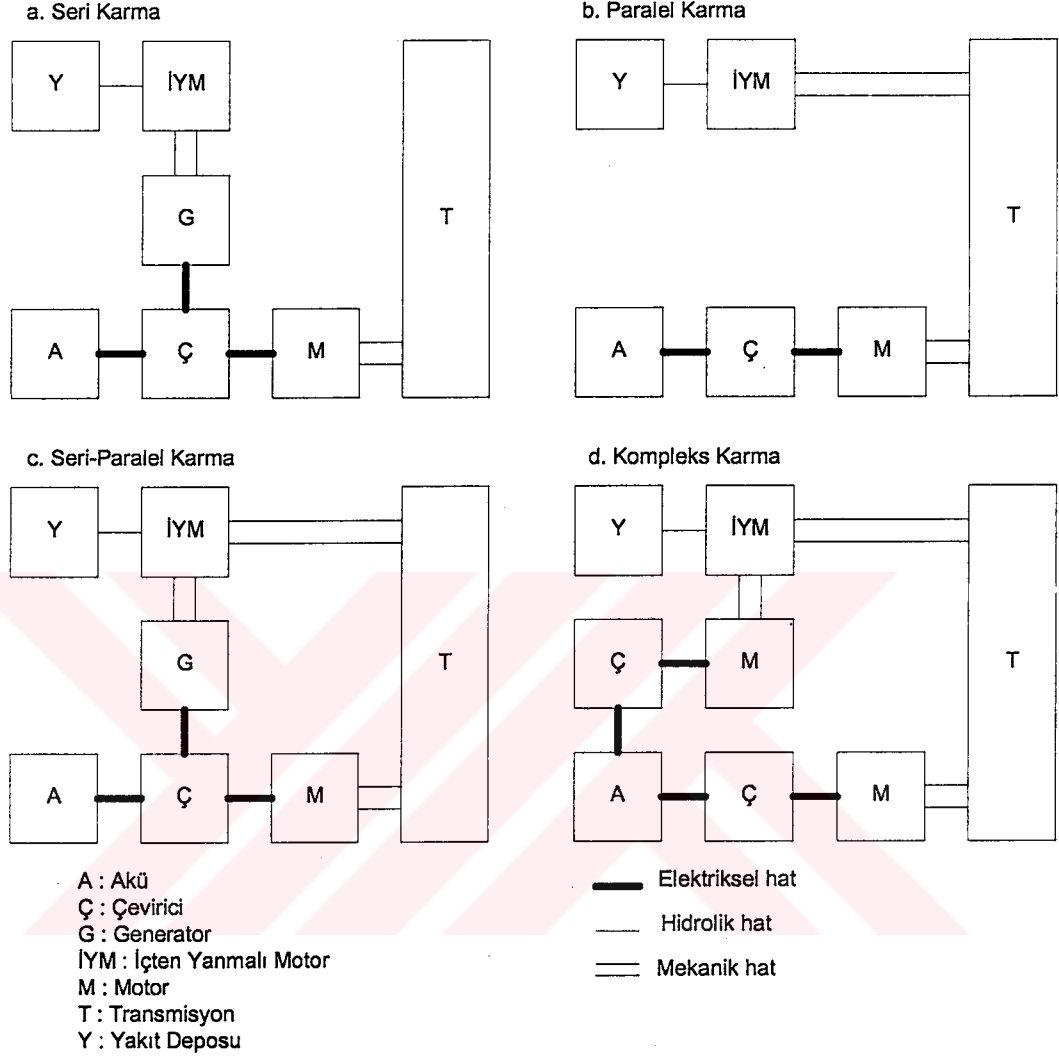


Şekil 3.2 Hibrid elektrikli araç (Ünlü vd., 2003)

- 1) İçten yanmalı motor
- 2) Transmisyon
- 3) Elektrik motoru
- 4) Güç elektroniği
- 5) Yakıt tankı
- 6) Bataryalar

### 3.2.1 Elektrikli Araçların Sınıflandırılması

Hibrid elektrikli araçlar, geleneksel olarak seri, paralel, seri-paralel ve karma (Şekil 3.3) olarak dörde ayrılırlar.



Şekil 3.3 Hibrid elektrikli araçların sınıflandırılması (Ünlü vd., 2003)

#### 3.2.1.1 Seri Hibrid Sistem

Bir seri hibrid araçta (Şekil 3.4a ve Şekil 3.4b), tekerleklere iletilen tahrik gücü elektrik motorundan sağlanmaktadır. Burada elektrik motoru, tahrik amacıyla elektriksel gücü mekanik güce dönüştürmektedir. Motor için gerekli elektriksel güç elektrik enerjisini depolama aygıtlarından ya da hibrid güç ünitesinden sağlanmaktadır. Hibrid güç ünitesi içten yanmalı motor ve jeneratörden oluşmaktadır.

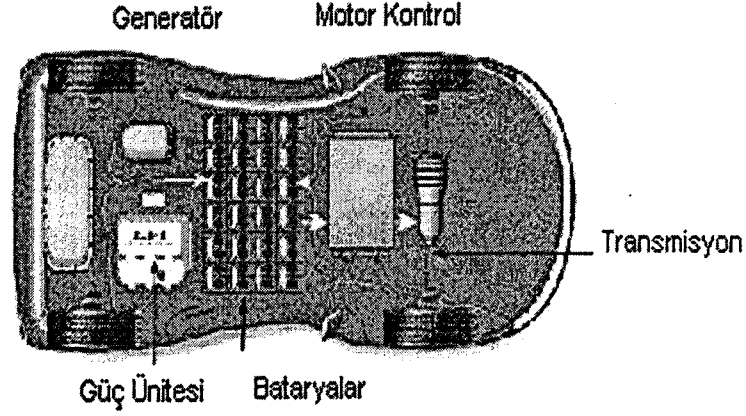
İçten yanmalı motor yakıtın kimyasal enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmekte ve mekanik enerji jeneratörde elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Mekaniksel üretilen elektrik gücü bataryadan gelen güçle beraber elektronik kontrolörde birleşir. Bu kontrolör daha sonra sürücü isteğini tekerlek hızı ve ana tahrik motorundan elde edilen moment ile karşılaştırır ve

her enerji kaynağından ne kadar güç kullanacağını sürücünün isteğine göre belirler. Kontrolör aynı zamanda güç elektroniğini içten yanmalı motor -jeneratörü sürücü fren yapmak istediğinde rejeneratif mod için açar kapatır ve gücü bataryaları şarj edecek şekilde yönlendirir. Böylelikle jeneratörde üretilmiş olan elektrik enerjisi aynı zamanda bataryaları şarj etmek için de kullanılmış olur. Yani araç çalışırken bataryalar hem içten yanmalı motor - jeneratör grubu tarafından hem de rejeneratif frenleme ile şarj edilir. Aynı zamanda şarj cihazları ile özellikle geceleri yaklaşık 5-8 saat içinde şarj edilir. Şekil 3.3'de bataryalı seri hibrid sistem görülmektedir.

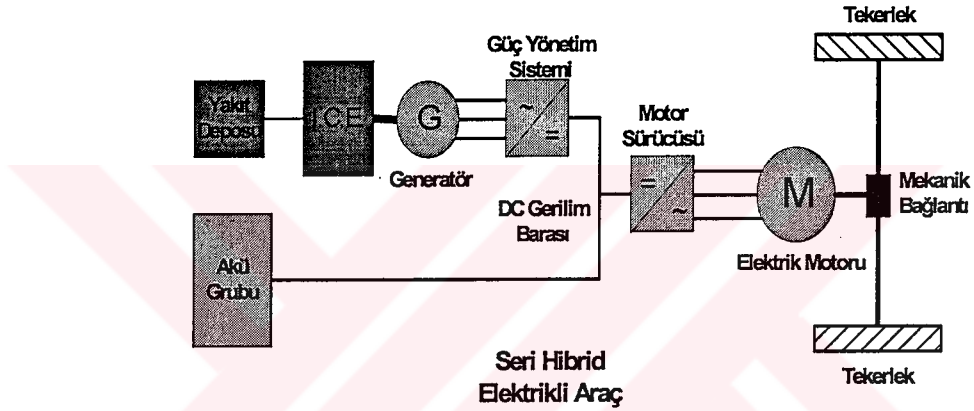
Genellikle içten yanmalı motor/jeneratör grubu bataryaları %60-80 oranında şarjlı tutar. Batarya şarj oranı bu limitin altına düşerse,içten yanmalı motor çalışmaya başlar. Benzer şekilde batarya şarjı bu limitin üstüne çıkarsa, içten yanmalı motor çalışmaz. Bununla birlikte bazı seri araçlarda, motora sağlanan elektriksel güç hem bataryalardan hem de içten yanmalı motor/jeneratör grubundan sağlanmaktadır. Tekerleklerle sadece elektrik motorları bağlı olduğu için, içten yanmalı motor emisyonu azaltacak şekilde optimum performansta çalışmaktadır.

Seri hibrid sistem yakıt pilli araca en yakın elektrikli araç konfigürasyonudur. Araç bu sayede sadece bataryalarını kullanarak hareket edebilmektedir. Ayrıca elektrik motorunun kendisi tekerlekleri tahrik edebilmektedir; burada kavrama ya da çok kademeli transmisyonuna gerek yoktur. Özellikle elektrik motorunun düşük devirlerde momenti yüksek olduğu için düşük devirlerde vites redüksiyonuna pek gerek kalmaz. Aynı zamanda içten yanmalı motor tekerleklerle bağlı olmadığı için hemen hemen optimum verimde çalışabilir. Böylelikle konvansiyonel olmayan motor tipleri de kullanılabilir. Örneğin gaz türbinleri, Atkinson ya da Stirling motorları.

Seri tahrik sisteminin bir dezavantajı paralel tahrikte olmayan elektrik enerjisi üretmek amacıyla kullanılan jeneratördür. Jeneratör hem taşıta ağırlık hem de sisteme ek maliyet getirmektedir. Aynı zamanda toplam sistemin verimi mekanik gücün elektriksel güce çift dönüşümü olduğundan, bu gücün bir kısmının bataryalarda depolanması ve elektriksel güçten mekanik güce tekrar çevrildiği için verim düşmektedir. Seri hibrid elektrikli aracın çalışma durumlarının şematik resmi Şekil 3.5'de görülmektedir.

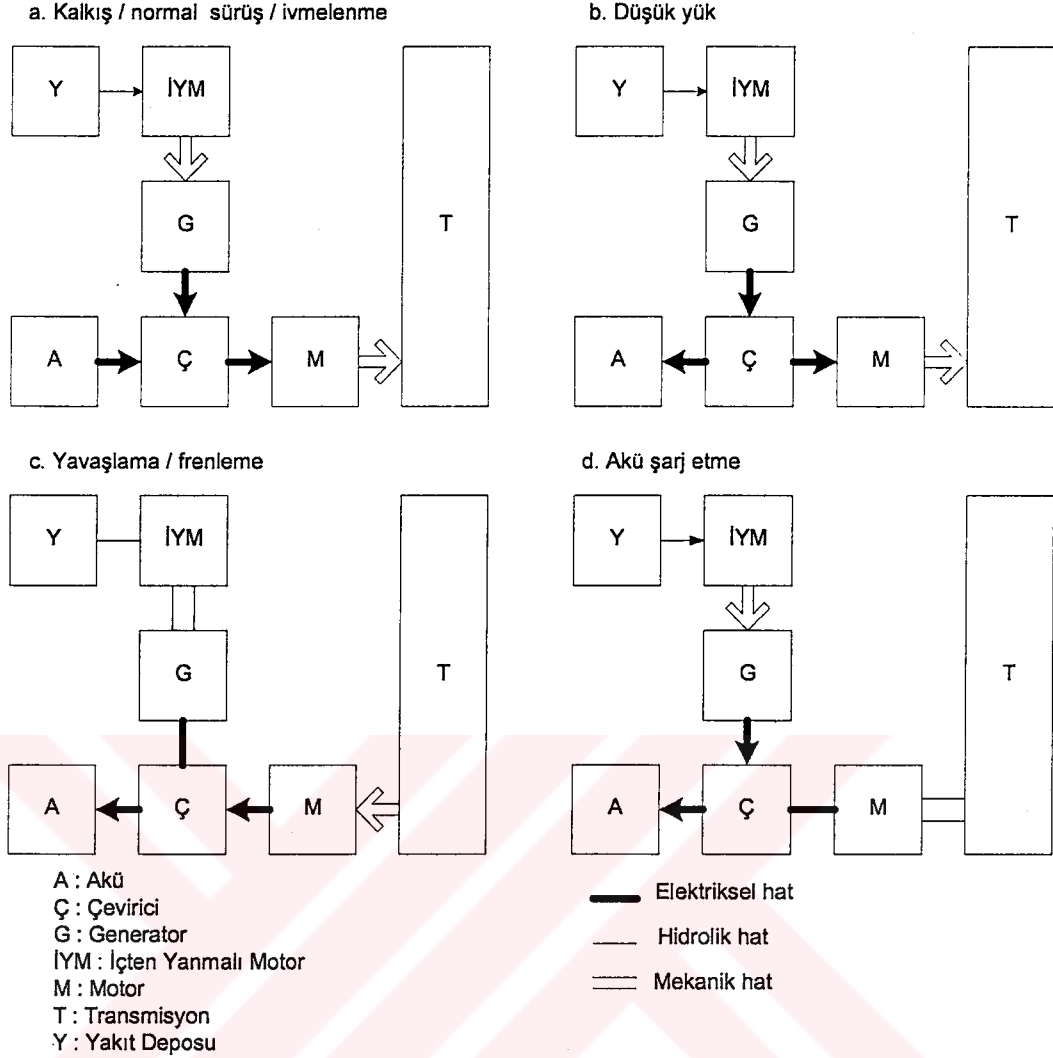


Şekil 3.4a Seri hibrid sistem (Ünlü vd., 2003)



Şekil 3.4b Seri hibrid sistem (Ünlü vd., 2003)

Seri hibrid sistemde güç akış kontrolü değişik çalışma durumlarında açıklanabilir. İlk hareket, normal sürüş ve ivmelenme esnasında hem içten yanmalı motor (jeneratör yardımıyla) hem de bataryalar güç konvertörüne elektrik enerjisini verir daha sonra elektrik motoru ve transmisyon yoluyla tekerlekler tahrik edilir. Düşük yüklerde içten yanmalı motorun gücü tekerleri tahrik için gerekenden daha fazla olacağından üretilen elektrik enerjisi, bataryayı uygun seviyeye kadar şarj eder. Frenleme ve yavaşlama esnasında elektrik motoru terse dönerek bir jeneratör gibi davranır ve tekerleklerdeki kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek ve güç konvertörü yoluyla bataryayı şarj eder.



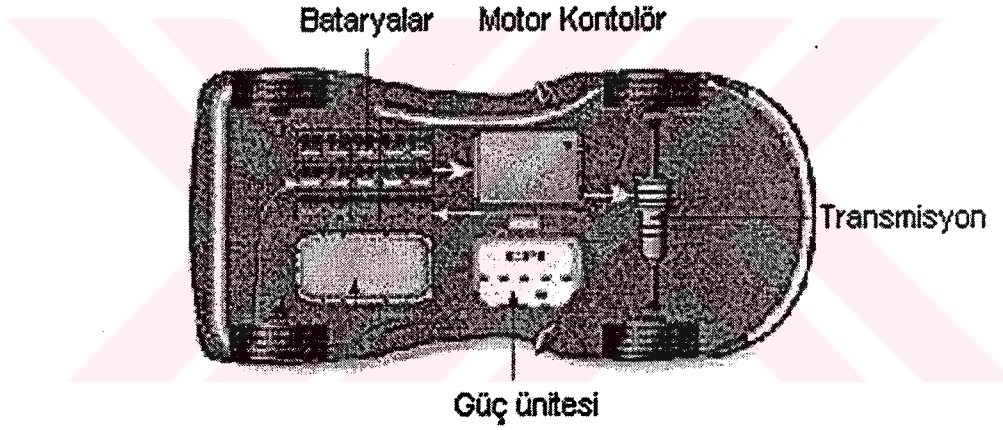
Şekil 3.5 Seri hibrid elektrikli aracın çalışma durumları (Ünlü vd., 2003)

### 3.2.1.2 Paralel Hibrid Sistem

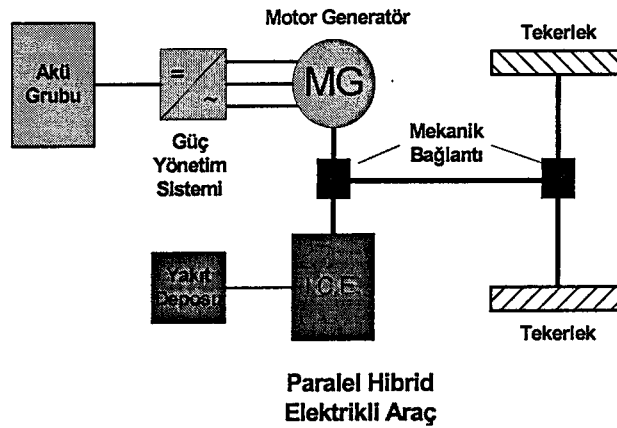
Paralel hibrid elektrikli araçta (Şekil 3.6a ve Şekil 3.6b), içten yanmalı motorun ve elektrik motorunun her ikisinde tekerleklere direkt bağlı olduğundan mekanik bağlantı sağlayarak tahrik vermektedir. Paralel hibrid araçlara örnek olarak, Honda Insight ve Honda Civic verilebilir. Paralel tahrik sistemleri mekaniksel olarak seri hibrid sistemlere göre daha karmaşıktır. Örneğin içten yanmalı motorun tekerleklere tahrik verebilmesi için bir transmisyona ihtiyaç vardır. Tüm bu elemanların birlikte düzgün bir şekilde çalışabilmesi için kontrolör seri hibride göre daha karışıktır. Paralel tahrikli taşıtlarda konvansiyonel taşıtlara göre daha küçük içten yanmalı motor kullanılmaktadır. İçten yanmalı motor hidrokarbonların kimyasal enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmektedir. İçten yanmalı motor gücü ve elektrik motoru gücü tekerleklerde birleştirilmektedir. Toplam güç ihtiyacına, çalışma verimine bağlı

olarak kontrolör hangi aygıttan ne kadar güç çekeceğini belirler. Kontrolör; yakıt ekonomisi, performans, emisyon ve menzil için optimize edilmiştir.

Seri hibrid sistemde olduğu gibi paralel hibrid sistemde de rejeneratif frenleme ile bataryalar şarj edilebilmektedir. Paralel tahrik sisteminde daha küçük bataryalar kullanıldığı için şarj çoğunlukla bu şekilde yapılır. Buna ek olarak sürüş esnasında da elektrik motoru jeneratör gibi davranarak bataryaları şarj edebilmektedir. Konvansiyonel araçlarda da alternatör bu görevi yapmaktadır. Daha küçük elektrik motoru ve bataryaların kullanılması paralel hibrid sistemin fiyatını seri hibrid sisteme göre daha düşük kılar. Fakat transmisyon gerekliliği bu maliyetin düşük olmasını engeller. Burada içten yanmalı direkt olarak tekerleklere bağlı olduğu için seri hibrid sistemde olduğu gibi mekanik verim problemi ile karşılaşmaz. Sistemde daha az enerji dönüşümü olduğundan mekanik kayıplar daha az olmaktadır. Ayrıca hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru aynı anda güç sağladığı için taşıtın gücü daha fazladır.

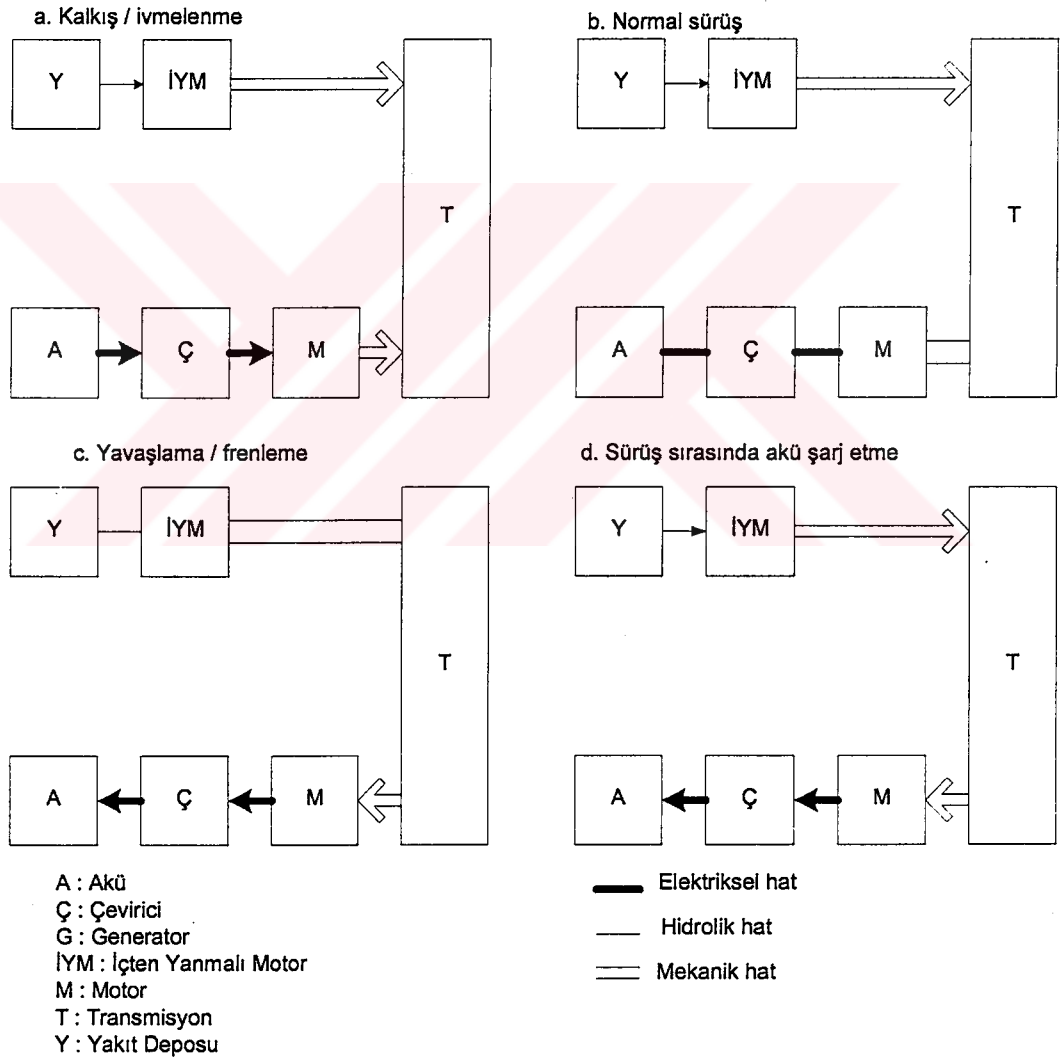


Şekil 3.6a Paralel hibrid sistem (Ünlü vd., 2003) .



Şekil 3.6b Paralel hibrid sistem (Ünlü vd., 2003)

Paralel hibrid elektrikli aracın değişik çalışma durumları Şekil 3.7’de gösterilmiştir. İlk hareket yada tam gaz durumunda (gaz pedalına %100 basılı) hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru araca istenilen tahrik gücünü sağlamak amacıyla orantılı olarak gerekli gücü sağlarlar. Genellikle, içten yanmalı motor ve elektrikli motoru arasındaki gücü dağılımını %80-%20’dir. Normal sürüş esnasında içten yanmalı motor araca gerekli olan tahrik gücünü sağlayabilir ve bu esnada elektrik motoru kapalıdır. Frenleme ve yavaşlama esnasında ise elektrik motoru bataryayı şarj etmek amacıyla jeneratör gibi davranmaktadır. Ayrıca, hem içten yanmalı motor hem de elektrik motoru aynı mile bağlı olduğu için araç düşük yükte iken batarya elektrik motoru yoluyla içten yanmalı motor tarafından şarj edilir. Son zamanlarda, Honda Insight bu enerji akış kontrolünü kullanmaktadır.



Şekil 3.7 Paralel hibrid elektrikli araç çalışma durumları (nl vd., 2003)

### 3.2.2 Hibrid Elektrikli Araçların Avantajları ve Dezavantajları

Elektrikli araçların bazı dezavantajlarını gidermek amacıyla hibrid elektrikli araçlar geliştirilmiştir. Hibrid elektrikli araçlar daha çok tümü-elektrikli araçların modifiye edilmiş şekli olup, içten yanmalı motor eklenerek aracın menzili ve gücü artırılmak istenmektedir. Hibrid elektrikli araçlar doğru bir tasarım yapıldığında hem hava kirliliğine neden olan emisyonları azaltmakta ve hem de taşıtın verimini arttırmaktadır. Hibrid elektrikli araçlar birden fazla güç kaynağına sahip araçlar olarak da adlandırılır. Hibrid elektrikli araçlar iki ya da daha fazla enerji dönüşüm teknolojilerini (ısı motorları, yakıt pilleri, jeneratörler ya da elektrik motorları) bir veya daha fazla enerji depolama teknolojileri (batarya, ultrakapasitörler ya da flywheel (volan) ) ile birleştirmektedir. Konvansiyonel ve elektrikli tahrik sistemlerinin birleştirilmesi ile emisyon seviyelerinde ve yakıt tüketiminde önemli ölçüde azalma gözlenir. Hibrid elektrikli araçların geliştirilmesinin temel nedenlerinden biri de tümü-elektrikli araçların şarj problemi ve sınırlı menzile sahip oluşlarıdır. Daha önce de ifade edildiği üzere tümü-elektrikli araçlarda enerji kaynağı olarak daha çok batarya vardır ve menzili sınırlıdır. Çoğu hibrid elektrikli araçlar enerji kaynağı olarak içten yanmalı motor (2 yada 4 stroklu otto ya da dizel motorları) Stirling Motoru, gaz türbini ya da elektrokimyasal batarya kullanmaktadır. Bu motorlar fosil yakıt tüketimini azaltmak ve de minimum emisyon seviyesini sağlamak amacıyla maksimum verimde çalıştırılmaktadırlar. Bu nedenle, güç üreten elemanlar elektrik enerjisini depolayan elemanlarla değişik şekillerde birleştirilir ve bu sayede birçok çeşit hibrid elektrikli araç tasarımları geliştirilir. Bu şekilde tasarlanan hibrid elektrikli aracın verimi ve emisyonu özellikle alt sistemlerin kombinasyonuna ve bu alt sistemlerin tüm sisteme nasıl kombine olduğuna bağlıdır.

Hibrid elektrikli araçların konvansiyonel araçlara göre bazı üstünlükleri vardır;

- Rejeneratif frenleme yeteneği enerji kaybını minimuma indirir ve taşıt durduğunda ya da yavaşladığında kullanılan enerjiyi geri kazandırarak bataryaları besler.
- İçten yanmalı motorlar pik yükü değil ortalama yükü karşılayacak şekilde boyutlandırıldığından motorun ağırlığı azalmaktadır.
- Yakıt verimi büyük ölçüde artmaktadır (Hibrid elektrikli araçlar benzinli araçlara göre önemli denebilecek ölçüde daha az yakıt tüketirler ).
- Emisyonlar önemli oranda azalmaktadır.
- Hibrid elektrikli araçlar alternatif yakıtlarla da çalıştığı için fosil yakıtlara çok fazla bağımlı değildirler.

Hibrid elektrikli araçların yukarıdaki avantajlara ek olarak bazı avantajları daha vardır. Araç durduğunda park halinde iken içten yanmalı motor çalışmaz ve titreşim veya motor gürültüsü oluşmaz. Elektrik motorları devamlı güç üretirken içten yanmalı motorlar devamlı güç üretmezler. Hibrid elektrikli araçların dezavantajları ise aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

Seri sistemin dezavantajları :

- Bu sistemde 3 tahrik elemanına ihtiyaç duyulur : İçten yanmalı motor, jeneratör ve elektrik motoru.
- Elektrik motoru gerekli olan maksimum gücü karşılayacak şekilde özellikle yüksek eğimlerdeki yokuşları çıkacak şekilde tasarlanır. Fakat araç çoğunlukla maksimum gücün altında çalışır.
- Tüm 3 eleman uzun mesafe ve yüksek hızlar için maksimum gücü karşılayacak şekilde boyutlandırılır.

Paralel hibrid sistemin dezavantajları:

- Gerekli olan güç iki farklı kaynaktan sağlandığı için burada enerji yönetimi önem arz eder. Enerji yönetimi karışıktır ve çok iyi ayarlanmalıdır.
- İçten yanmalı motordan gelen gücün tahrik tekerlerine düzgün olarak iletilebilmesi için karmaşık mekanik elemanlara ihtiyaç duyulur (Ünlü vd., 2003).

### 3.3 Yakıt Pili Elektrikli Araçların Değerlendirilmesi

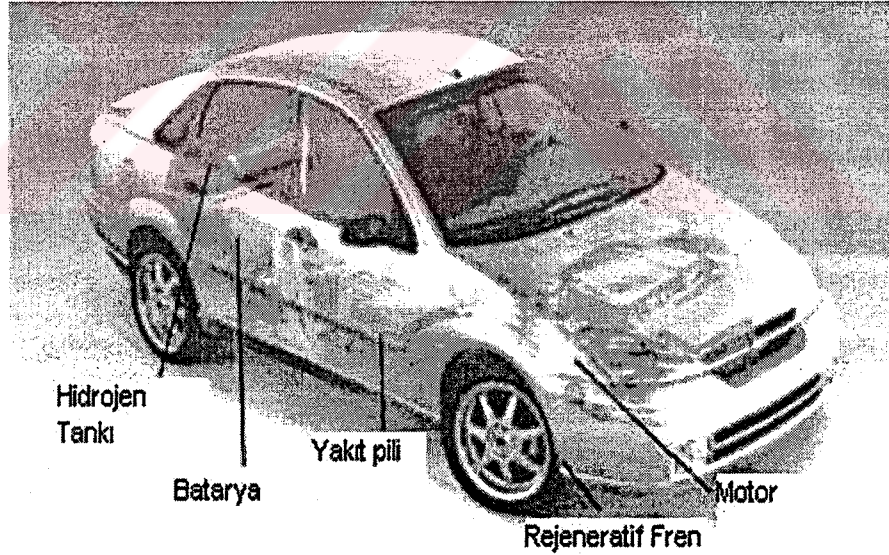
Yakıt pilleri bir reaksiyonun kimyasal enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine döndüren cihazlardır. Hidrojen yakıtı havadan gelen oksijen ile birleştiği zaman kimyasal enerji direkt olarak elektrik enerjisine ve ısıya dönüştürülür. Yan ürün olarak sadece su açığa çıkmaktadır. Eğer yakıt olarak saf hidrojen kullanılırsa çevreye kirletici emisyon açığa çıkmaz. Konvansiyonel teknolojilere göre daha yüksek verime ve önemli miktarda daha az emisyonla sahiptirler ayrıca daha sessiz çalışırlar ve modüler bir yapıya sahiptirler. Bu özellikleri ile yakıt pilleri önümüzdeki 10-20 yıl içerisinde özellikle otomotiv sektöründe geniş uygulama alanlarına sahip olacaklardır.

Yakıt pili elektrikli araçlar (Şekil 3.8), temelde yakıt depolama ünitesi, eğer yakıt yeniden işlenecekse yakıt işleme ünitesi, yakıt pilin ve tahrik sistemlerinden oluşmaktadır. Eğer yakıt depolama ünitesinde hidrojen varsa direkt olarak yakıt piline, şayet fosil kökenli yakıt varsa önce yakıt işleme ünitesine sonra yakıt piline beslenir. Bir yakıt pili hücresinden yaklaşık 0.7 değerinde gerilim elde edilir. Bu değer düşük olduğu için istenilen gerilim ve gücün elde edilebilmesi için birçok yakıt hücresi seri veya paralel bağlanmaktadır.

Yakıt piline hidrojen gazı sağlandığı sürece güç elde edilmesi devam etmektedir. İstenilen güç yakıt piline beslenen hidrojen miktarına bağlıdır. Bu da yakıt pili kontrolörü tarafından sağlanır.

Yakıt pilleri araç uygulamalarında gelecekte çok önemli kullanım alanına ve sektörde büyük bir paya sahip olacaktır. Dünyada önde gelen otomotiv şirketleri ve devletler, yakıt pillerinin geliştirilmesi ve araştırılması için çok yüksek miktarlarda para ve zaman harcamaktadır. Çevre faktörünün önem kazandığı bu zamanda çevre dostu olmasının yanında yüksek verime de sahip olan yakıt pilleri gelecekte uygun fiyat uygulamalarıyla öne çıkacak ve alternatif yakıtlar içerisinde ilk sırayı alacak yakıtlardan biri olacaktır.

Daimler-Chrysler-Ballard-Ford konsorsiyumu (XCELLSIS) Kanada, Amerika ve Avrupa'da 2005 yılından itibaren PEM ile çalışan otobüsleri piyasaya sürecektir. Araçlarda saf hidrojen gazı kullanılması hedeflenirken, kısa ve orta vadede bu tercih incelenmelidir. Hidrojen gazının depolanması üzerinde çalışmalar son hızla devam etmekte olup, hidrojen depolanması yüksek basınçlı, hafif silindirler, kriyojenik sıvı sistemler, ve katı metal depolama gerektirmektedir. Basınçlı hidrojen en iyi sistem olmakla birlikte hafif araçlarda gerekli olan hacim ve ağırlık kriterlerini karşılamamaktadır (Ünlü vd., 2003).



Şekil 3.8 Yakıt pilli araç (Ünlü vd., 2003)

### 3.3.1 Yakıt Pili Araçların Avantajları ve Dezavantajları

Yakıt pillerinin diğer enerji sistemlerine göre avantajları sırasıyla;

- Yakıt pili elektrikli araçlar konvansiyonel araçlara göre daha yüksek verimle çalışır.
  - Konvansiyonel araçlar termal sistemler olduğundan güç üretiminde sistemin verimi “Carnot Çevrimi Kriterleri”nden etkilenirken, yakıt pilli araçlarda bu etkileşim yoktur. Konvansiyonel araçlarda verim yaklaşık %18-30’u geçemezken yakıt pilli araçlarda %70’e yakın verim elde edilir.
- Yakıt pilinde meydana gelen emisyon miktarları, diğer yakıtlara göre ihmal edilebilecek 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 edilebilecek kadar az miktarda azot oksitler, hidrokarbonlar kullanıldığında ise çok düşük miktarda CO<sub>2</sub> oluşur. Günümüzde çevre kirliliği ve insan sağlığı için bir çok yasal kısıtlamaların uygulandığı bu zamanda, diğer teknolojiler de maliyeti çok fazla arttırmaktayken, yakıt pilli elektrikli araçların çevre dostu olması çok değerli bir alternatif yakıt olmasına neden olmaktadır.
- Hareketli aksamın bulunmadığı yakıt pilli elektrikli araçlarda gürültü kirliliği oluşturmamaktadır.
- Yakıt pillerinde kullanılacak yakıt sayısı çok fazla olduğundan, fosil ve alternatif yakıtların kullanımının kolaylığı nedeniyle çok farklı alanlarda kullanılabilir.
- Yakıt pilleri dayanıklı ve güvenli sistemlerdir, küçük hacimlerde yüksek miktarda güç üretilirler. Araçlarda fazla yer kaplamazlar.
- Yakıt pilleri istenilen büyüklükte ve kapasitede üretilebilir. Geniş güç yelpazesine sahiptirler.

Tümü-elektrikli / hibrid elektrikli ve yakıt pilli araç tiplerinin karşılaştırılması Çizelge 3.1’de verilmiştir. Yakıt pilli araçların dezavantajları ise aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir.

- Yakıt pili kullanımı, çok fazla bilgi ve ileri teknoloji gerektiren bir sistemdir.
- Diğer sistemlerden çok daha pahalı bir sistemdir.
- Uygulamalarında tam verimle gerçekleşebilmesi için uzun zamana ve paraya ihtiyaç vardır (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu, 2003).

Yakıt pilli araçların avantajları ve dezavantajları Çizelge 3.1’de ve Tümü-elektrikli/hibrid elektrikli ve yakıt pilli araç tiplerinin karşılaştırılması ise Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Yakıt pilli araçların avantajları ve dezavantajları

Yakıt Pili Araçlar	<p>Daimler-Chrysler ve Toyota prototip araçlarını geliştirmişlerdir. 2005 yılından sonra seri üretime geçileceği düşünülmektedir. Daimler-Chrysler'in 2004 yılında 4000 tane araç tasarlayacağı düşünülmektedir. Birkaç yıl içinde ise yakıt pilli otobüslerin gelişeceği tahmin edilmektedir.</p> <p>Alternatif yakıtlar konusundaki çalışmalar ise halen devam etmektedir.</p>	<p>Emisyon seviyelerinde önemli miktarda düşüş saplanmaktadır.</p> <p>Enerjiden daha iyi faydalanılması sebebiyle emisyon seviyeleri iyileşmektedir. Örneğin elektrikli araçlarda rejeneratif frenleme sayesinde kayıp kinetik enerji geri kazanılır. Aynı zamanda daha iyi elektronik kontrol ile enerjiden yararlanma optimize olmaktadır ve bu yüzden CO<sub>2</sub> emisyonu minimum seviyeye düşmektedir.</p>	<p>En önemli problem maliyettir. Otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılıp ticarileşebilmesi için maliyetin oldukça düşmesi gerekmektedir. Eğer hidrojen gazı kullanılırsa, daha küçük ve hafif depolama sistemleri kullanılmaktadır. Hidrojen, doğal gaz ve metanolün bulunamama gibi bir ihtimali vardır fakat benzin ve motorin her yerde bulunmaktadır. Fakat bu yakıtlar özellikle yakıt pili kullanımına uygun hale getirilmelidir.</p>
--------------------	--	--	--

Çizelge 3.2 Tümü-elektrikli/hibrid elektrikli ve yakıt pilli araç tipleri (Ünlü vd., 2003)

Elektrikli araç çeşitleri	Tümü-elektrikli araçlar	Hibrid elektrikli araçlar	Yakıt pilli elektrikli araçlar
Tahrik	Elektrik motorlu tahrik	Elektrik motorlu İçten yanmalı motorlu tahrik	Elektrik motorlu tahrik
Enerji Sistemi	Batarya Ultrakapasitör	Batarya Ultrakapasitör İçten yanmalı motor güç üretim birimi	Yakıt pilleri
Enerji Kaynağı ve Altyapı	Elektrik şarjı	Benzin Elektrik şarjı Alternatif Yakıtlar	Benzin Elektrik Şarjı Alternatif Yakıtlar
Karakteristikler	0 emisyon 100-200 km kısa menzil Pazarda mevcut	Çok düşük emisyon Normal menzil Pazarda sınırlı	Çok düşük emisyon H depolama
Ana sorunlar	Batarya teknolojisi Şarj özellikleri	Batarya teknolojisi Enerji yönetimi	Yakıt pili teknolojisi H Teknolojisi

## 4. ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN ALT SİSTEMLER

### 4.1 Güç Üretim Sistemleri

Elektrikli araçların teknolojilerinde çeşitli enerji kaynakları kullanılmaktadır. Sistem mimarisinde kullanılan topoloji ne olursa olsun (hibrid/doğrudan), neticede elektrikli bir araçta elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülecektir. Bu açıdan incelendiğinde, elektrikli tahrik motoru ve söz konusu motoru besleyecek elektrik şebekesi elektrik üretim modülüne doğrudan bağlı sistemlerdir.

Elektrikli araç teknolojisinde güç üretim modülü ana hareketlendirici ve jeneratör ile birleşik bir modül olarak düşünülmelidir. Güç üretim sistemi aracın elektrik şebekesine AC ya da DC elektrik enerjisi sağlamaktadır. Bu yaklaşımla güç üretim sisteminde kullanılan alt sistemler, sabit olan şebeke gerilimini sağlayacak şekilde farklılıklar gösterebilir.

Enerji üretim modülü kullanılan enerji kaynakları açısından da serbestliğe sahip bir modüldür. Bir başka deyişle elektrik enerjisi direk ya da indirekt enerji kaynaklarından üretilebilir. Birincil enerji kaynağından tekerleklerle aktarılan kadarki enerji dönüşüm adımları toplam sistem verimliliği açısından önemlidir. Bu nedenle verimlilik ve güvenilirlik açısından hibrid araçlar ön plana çıkmaktadır (Ünlü vd., 2003).

#### 4.1.1 Yakıt Pilleri

Yakıt pili, sisteme dışardan sağlanan elektrokimyasal reaksiyonun gerçekleşmesi için gerekli olan oksitleyicinin kimyasal enerjisini doğrudan elektrik ve ısı formunda kullanılabilir enerjiye çeviren güç üretim elemanıdır.

Yakıt pili, tarihi çok eski tariklere dayanmasına rağmen ilk kullanımı 1958 yılında NASA'nın uzay programında Apollo, Gemini, ve Space Shuttle uzay gemilerinde yakıt olarak kullanılmasına dayanmaktadır.

1838- İlk yakıt pili çalışmaları Sir William Grove tarafından  $H_2-O_2$  pili üzerinde yapılmıştır. Yaptığı çalışmalar sırasında suyun elektrolizinin ters reaksiyonu sonucunda akım sabit ve gücün üretildiğini fark eden Grove, böylece tesadüfen çok büyük bir buluş gerçekleştirmiştir.

- 1893- Friedrich Wilhelm Ostwald, yakıt pili içindeki her elemanın yakıt pili çalışmasındaki görevini ve etkisini araştırmıştır.
- 1896- William W. Jacques, eriyik elektrolitli yakıt pillerinin temelini atmıştır. Kömürün elektrokimyasal enerjisinde doğrudan elektrik üretmeyi amaçlamıştır.
- 1937- Emil Baur, 1900 yılında, ünlü bilim adamı Nerst'in başlattığı katı oksit elektrolit ile çalışan yakıt hücresi projesinin başarıya ulaşmasını sağlamıştır.

- 1939- Belki de yakıt pilinin günümüzdeki yere gelmesini sağlayan en önemli çalışma Thomas Bacon tarafından alkalın yakıt pilleri üzerinde yapılan çalışmalar olmuştur. Bu çalışmanın önemini anlayan Pratt&Whitney şirketi bu projeye lisans vererek NASA programlarında kullanılmasını sağlamıştır.
- 1950- Uzay çalışmaları yarışı ile yakıt pillerine ilgi artı.
- 1958- NASA H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> pilini uzay araçlarında kullanmaya başladı.
- 1980- Petrol krizleri sonrası Hidrojen ve hidrojenli Yakıt pilleri önem kazandı.
- 2000'li yıllar- Kullanım seçeneklerinin artırılması, maliyetlerinin düşürülmesi, yaygın kullanıma seçilmesi, teknoloji geliştirme çabaları yoğun olarak sürüyor.

#### 4.1.1.1 Yakıt Pilinde Kullanılan Yakıtlar

Yakıt pilinde çok çeşitli yakıtlar kullanılabilir; ancak yakıtın fiyatı, kullanılabilirliği, enerji içeriği, çevresel etkileri, depolama taşınım kullanım kolaylığı göz önüne alınarak seçimin yapılması gerekmektedir. Yakıt pillerinde yakıt beslemesi doğrudan ve dolaylı olarak gerçekleştirilmektedir. Hidrojen, metan, doğal gaz, hava gazı, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) yakıt piline doğrudan beslenerek kullanılabilir. Yakıtın dolaylı olarak beslenmesinde, bir ön işlem uygulanmaktadır. Yakıtın dolaylı olarak beslenmesine örnek olarak, kömür, metanol, etanol, amonyak ve hidrokarbonlar kullanan yakıt pilleri verilebilir. Ön işlemler;

- Reformlama
- Katalitik reformlama
- Isıl kraking
- Kısmi oksidasyon olarak sınıflandırılabilir.

Bu işlemlerden en verimli, maliyeti az olanı reformlama yöntemidir. Metanol, amonyak ve çeşitli hidrürlerden değişik ön işlemlerle hidrojen elde edilerek kullanılmaktadır. Günümüzde, yakıt pillerinin temelini oluşturan hidrojen ve ileride uygulamalarda önemli bir yere sahip olacak metanol üzerinde araştırma, geliştirme ve uygulama çalışmaları yoğun olarak sürmektedir.

##### 4.1.1.1.1 Hidrojen

Yıldız ve gezegenlerde serbest halde en çok bulunan element olan hidrojen, Dünya'da da fazla miktarda bulunmasına rağmen, serbest halde bulunmamaktadır. Hidrojen kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtlardan, güneş enerjisi ve nükleer enerjiden, su gibi sonsuz bir kaynaktan elde edilebilir. Sınırsız kaynağa sahip olan ve havayı kirletme açısından içten yanmalı motorlarda kullanılan diğer alternatif yakıtlara göre pek çok avantaja sahip olan

hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanım çalışmalarına 1900'lü yılların başında başlanmıştır ve günümüzde de çalışmalar çok yoğun bir şekilde devam etmektedir.

Gaz haldeki hidrojen, renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır. Gaz haldeki hidrojen aynı hacimdeki havadan 15 kat daha hafiftir. Gaz halindeki hidrojenin özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Hidrojenin kullanım alanları Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Hidrojen araçlarda sıvı veya gaz formda depolanabilmektedir. Günümüzde, hidrojenli yakıtlarda hidrojen sıvı ve yüksek basınç altında gaz halde depolanabilmektedir. Çizelge 4.3'den görüleceği gibi, metal hidrür kullanımı ağırlık sorununa neden olmakta, sıvılaştırmada harcanan enerji kaybı da dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır.

Araçlarda hidrojenin kullanımı için aşırı soğutulmuş sıvı olarak depolanması en uygun depolama yöntemi olarak belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda;

- Aşırı soğutulmuş sıvı ile – 1 kg sıvı hidrojen ile 43-46 km
- Sıkıştırılmış gaz ile – 1 kg gaz hidrojen ile 35 km
- Hidrürler ile – 1 kg hidrojen ile ortalama 43 km mesafeye ulaşılabilmiştir.

Yakıt özellikleri incelendiğinde, hidrojenin motorlarda yakıt olarak kullanılması durumunda petrol kökenli motor yakıtlara oranla birçok avantajlara sahip olduğu görülmektedir. Hidrojenin yakıt olarak kullanılmasında, yanma ürünü olarak su buharı açığa çıkarmasının çevreye karşı hiçbir zararı yoktur. Yüksek alev hızı ve tutuşma yeteneği, düşük ateşleme enerjisi gerektirmesi, geniş tutuşturma ve yanma sınırları, yüksek ısıl değer ve termik verim, kirletici egzost gazı emisyonlarının azlığı ve sahip olduğu yüksek oktan sayısı ile vurunmaya karşı dirençli olması hidrojeni çekici kılmaktadır.

Çizelge 4.1 Hidrojenin özellikleri (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu., 2003)

Özellikler	Hidrojen
Formül	H <sub>2</sub>
C/H oranı	0
Mol Ağırlığı, (g/mol)	2.02
Özgül Kütle:	
Sıvı: (kg/L)	0.07
Gaz: (kg/L)	0.84*10 <sup>-4</sup>
Isıl Değer:	
Alt: (MJ/kg)	119.93
Üst: (MJ/kg)	141.86
Stokiyometrik karışım için:	
Hava/Yakıt: (kütlese) (kJ/L)	34.32
Hava/Yakıt: (hacimsel) (kJ/L)	2.38
Buharlaştırma Isısı (MJ/kg)	0.447
Laminar Alev Hızı (m/s)	2.91
Adyabatik alev Sıcaklığı (°C)	2110
Difüzyon katsayısı (m <sup>2</sup> /s)	0.61
Kaynama Noktası (°C)	-252.35
Donma Noktası (°C)	-259
Kendi Kendine Tutuşma Sıcaklığı (°C)	574-591
Araştırma Oktan Sayısı	130

Çizelge 4.2 Hidrojenin kullanım alanları (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu., 2003)

Dönüştürme Prosesi	Hidrojen	Fosil Yakıtlar
Alevli yanma	Evet	Evet
Doğrudan Buhar Üretimi	Evet	Hayır
Katalitik yanma	Evet	Hayır
Kimyasal Dönüştürme	Evet	Hayır
Elektrokimyasal Dönüştürme	Evet	Hayır

Çizelge 4.3 Hidrojen depolama yöntemlerinin karşılaştırılması  
(Çetinkaya ve Karaosmanoğlu., 2003)

Depolama Tankı	Ağırlık (kg)	Hacim (litre)	Basınç (bar)
Metal Hidrür	320	170	50
Kriyojenik Sıvı	20	140	4
Yüksek Basıncılı Gaz	120	250	300

#### 4.1.1.1.2 Metanol

Metanol; kömür, odun ve doğalgazdan üretilmektedir. Son yıllarda biyoteknolojik olarak biyometanol araştırmaları da yapılmaktadır. Metanolün özellikleri Çizelge 4.4'de verilmektedir. Metanol içten yanmalı motorlarda doğrudan ve/veya benzin veya dizel yakıtına katkı yapılarak alternatif yakıt olarak değerlendirilmektedir. Metanol için yakıt pillerinde kullanım diğer bir değerlendirme alanıdır

Çizelge 4.4 Metanolün özellikleri (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu., 2003)

Özellikler	Metanol
Formül	CH <sub>3</sub> OH
C/H oranı	0.25
Mol Ağırlığı, (g/mol)	32.04
Özgül Kütle (kg/L)	0.79
Isıl Değer:	
Alt: (MJ/kg)	20.1
Üst: (MJ/kg)	15.9
Stokiyometrik karışım için:	
Hava/Yakıt: (kütlesele) (kJ/L)	6.44
Hava/Yakıt: (hacimsel) (kJ/L)	7.14
Buharlaşma Isısı (MJ/kg)	1.10
Laminar Alev Hızı (m/s)	0.52
Adyabatik alev Sıcaklığı (°C)	1878
Kaynama Noktası (°C)	65.1
Donma Noktası (°C)	-97.6
Kendi Kendine Tutuşma Sıcaklığı (°C)	470
Araştırma Oktan Sayısı	110
Motor Oktan Sayısı	87

#### 4.1.1.2 Yakıt Pili Yapısı

Yakıt pili üç ana bölümden oluşmaktadır.

##### 4.1.1.2.1 Yakıt İşleme Ünitesi

Yakıt beslemesinin olduğu, dolaylı beslemede ön işlemin gerçekleştirildiği ünedir.

##### 4.1.1.2.2 Güç Üretim Sistemi

Bir yakıt pili (Şekil 4.1), anot (negatif, hidrojen elektrot), katot (pozitif, oksijen elektrot) ve elektrolit çözeltisinden oluşur. Hava katot yüzeyi üzerinden geçerken, hidrojen veya oksijence zengin gaz da anot yüzeyinden geçer. Elektronlar katota doğru bir dış devre yoluyla taşınırlarken, hidrojen iyonları da elektrolit yoluyla oksijen elektrota göç ederler. Katota oksijen ve hidrojen iyonları ile elektronların reaksiyona girmesiyle su elde edilir. Elektronların dış devre yoluyla akışı elektrik üretir. Yakıt kullanımındaki yüksek verim nedeniyle, bu elektrokimyasal işlemde çıkan yan ürün sadece su ve ısıdır. Yakıt pili sistemi bir yanma reaksiyonu vermediği için çok daha fazla elektrik üretmektedir. Bu sistemi, bataryadan ayıran en büyük özellik güç üretimi için şarja gereksinin olmaması ve yakıt sağlandıkça güç üretiminin devam edecek olmasıdır. Tüm yakıt pillerinde su, batarya çalışma sıcaklığına göre sıvı veya buhar şeklinde ürün olarak açığa çıkar. Oksitleyici olarak oksijen kullanılıyorsa su, hava kullanılıyorsa azot ve su, bileşiminde karbon bulunan yakıt kullanılması durumunda ise CO<sub>2</sub> oluşur. Su bataryayı terk eder ve böylece batarya kendini soğutmuş olur. Ancak çok yüksek sıcaklıklarda çalışma bataryalarda soğutma ekipmanı kullanılması gerekir.

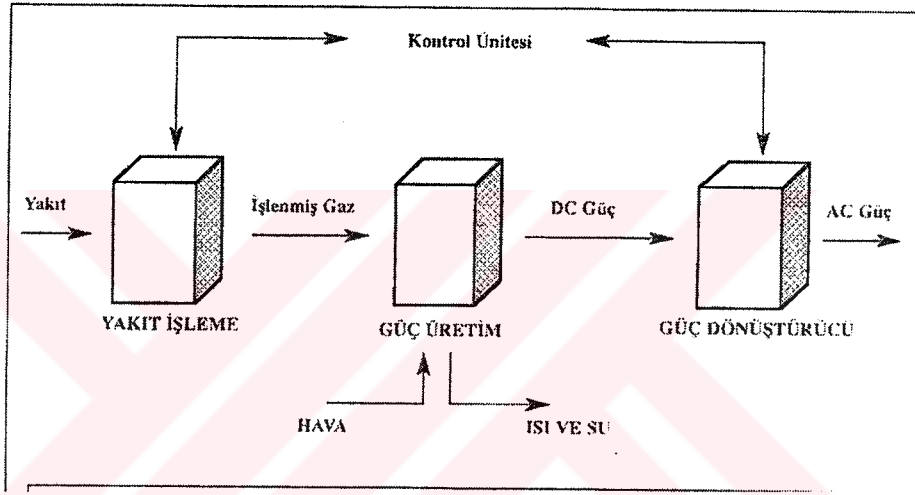
Yakıt pili temel bileşenlerinin seçiminde kısıtlamalara neden olan en önemli nokta, seçilen malzemenin sisteme uyumluluğudur. Seçilmiş malzeme çok uzun süre stabil kalacak şekilde olmalıdır. Performans belirleyici polarizasyon grafikleri yardımıyla yakıt pillerindeki enerji kaybının malzeme seçimiyle ilişkisi belirlenir. Yapılan çalışmalar sonucunda, pratikte bir yakıt pilinin polarizasyonlardan kaynaklanan enerji kayıpları sonucunda ürettiği doğru akım, 0.5-0.9 V kadar olduğu belirlenmiştir. Performans yakıt pili sıcaklığı ve maddelerin kısmı basınçlarının artırılmasıyla gerçekleştirilir.

- Yakıt pillerinde;
- Fosforik asitli
- Ergimiş karbonatlı
- Katı oksitli
- Proton geçirgen zarlı elektrolitler kullanılabilir.

Elektrolitler batarya çalışma sıcaklığı, basıncı, reaktanların cinsi ve safsızlıklarının niteliğine göre seçilir. Yakıt pillerinde gözenekli, gözeneksiz ve hidrofob elektrotlar kullanılabilir. Kıymetli katalizörlerle aktifleştirilmiş karbon yapılı elektrotlar ekonomik olup, az yer kaplarlar. Tek bir hücre gerilimi 1 V'tan daha az olduğundan, gerekli elektrik enerjisini üretmek için birden fazla yakıt pilini seri ve paralel bağlayarak kullanmak gereklidir. Bütün bir yakıt pili güç üretim sistemi, bir yakıt kaynağı, bir hava kaynağı, bir soğutma ünitesi ve bir de kontrol ünitesi içeren bir otomobil motoruna benzetilebilir.

#### 4.1.1.2.3 Güç Dönüştürücü

Hücrede üretilen doğru akımı ticari kullanım için alternatif akıma çeviren ünedir.

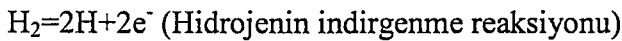


Şekil 4.1 Yakıt pili (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu., 2003)

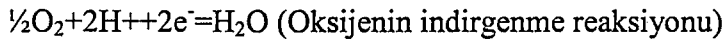
Hidrojen-Oksijen yakıt pili tepkimeleri asidik ve bazik elektrolitler için aşağıda açıklanmıştır:

Asidik Elektrolit

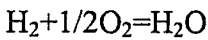
Anot reaksiyonu (Hidrojen)



Katot Reaksiyonu (Oksijen)



Toplam reaksiyonu:

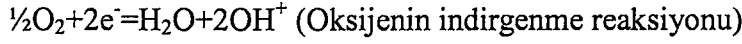


Bazik Elektrolit

Anot reaksiyonu (Hidrojen)



Katot Reaksiyonu (Oksijen)



Toplam reaksiyonu:



#### 4.1.1.3 Yakıt Pili Çeşitleri ve Sınıflandırılması

Yakıt pilleri, yakıt ve oksitleyicinin bileşimine, yakıtın dolaylı ve doğrudan beslenmesine, kullanılan elektrot ve elektrolit cinsine, operasyon sıcaklığına bağlı olarak çeşitli kombinasyonlarda oluşturulabilir. Çizelge 4.5’de yakıt pillerinin içerdikleri elektrolit ve çalışma sıcaklıklarına göre sınıflandırılması verilmektedir. Çizelge 4.6’da ise elektrolit ve çalışma sıcaklıklarına göre sınıflandırılan yakıt pillerinin sahip oldukları güç ve uygulama alanlarına göre sınıflandırılması verilmiştir.

##### 4.1.1.3.1 Alkali Yakıt Pili

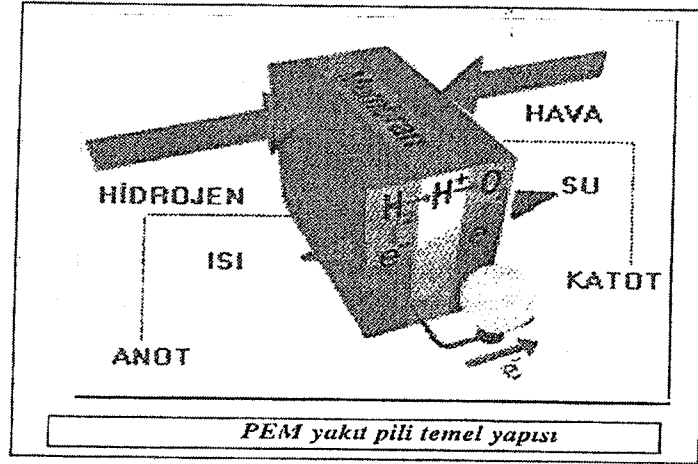
Alkali yakıt pili (AFC) ilk olarak uzay gemilerinde kullanılmıştır. ZETEC isimli bir firma tarafından ticarileştirilmeye çalışılmaktadır. Üretim ve kullanımlarında bir takım güçlükler bulunmaktadır. Bu güçlükler;

Potasyum hidroksit (KOH) elektrolit sirkülasyonu ve CO<sub>2</sub> absorpsiyonu nedeniyle mobil uygulamalarında pratik değildir.

Anot olarak nikel (Ni) ve katot olarak kurşun (Pb) kullanılmakta olup, bu katalizörler ile güç üretimi düşüktür.

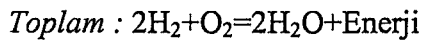
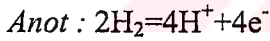
##### 4.1.1.3.2 Proton Elektrolit Membranlı Yakıt Pili

1950’li yıllarda General Electric tarafından bulunan proton elektrolit membranlı (PEM) yakıt pili teknolojisi (Şekil 4.2), o yıllarda ilk defa NASA tarafından Gemini uzay aracında güç ünitesi olarak kullanılmıştır. Günümüzde PEM yakıt pilleri otomotiv sektöründe içten yanmalı motorlara alternatif olarak geliştirilmekte ve kullanılmaktadır. Polimer elektrolit membranlı, katı polimer elektrolit, ve polimer elektrolit yakıt pilleri olarak da adlandırılan



Şekil 4.2 PEM yakıt pili temel yapısı (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu., 2003)

PEM yakıt pillerinde elektrotlar karbon yapılı olup, kullanılan elektrolit ise ince bir polimer membrandır. Bu membran, poli asit veya Nafion™'dur. Bu ince polimer tabakadan elektronlar kolayca diğer tarafa geçebilirken, elektronların geçişi mümkün değildir. Hidrojen anot üzerine akarken, elektrot yüzeyinde hidrojen iyonlarına (proton) ve elektronlarına ayrılır. Oluşan hidrojen iyonları ince membrandan katota doğru ilerlerken, geçişi engellenen elektrotlar dış devreden geçerek güç oluştururlar. Havadan sağlanan oksijen katot üzerinde hidrojen iyonları ve dış devreden gelen elektronlar ile birleşerek suyun oluşmasını sağlar. PEM yakıt pili elektrotları üzerinde gerçekleşen reaksiyonlar aşağıdaki gibidir;



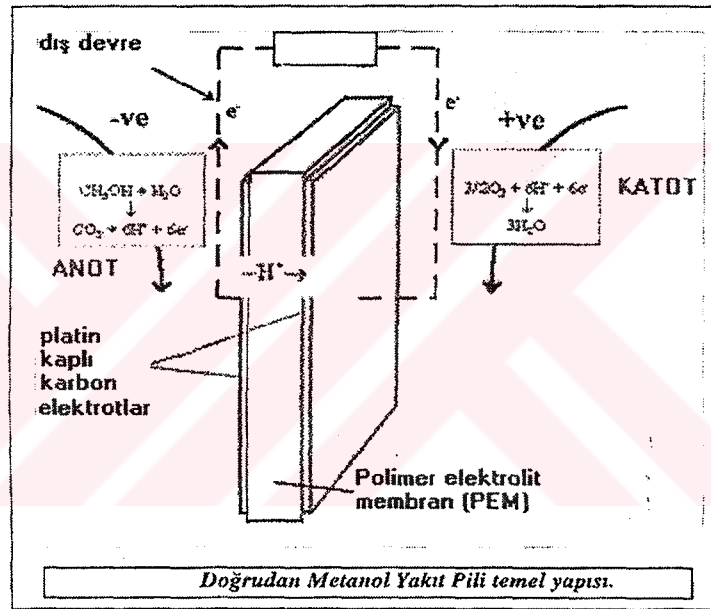
PEM yakıt pilleri 80°C sıcaklıkta çalıştılarından ve bu sıcaklık, gerçekleşen elektrokimyasal reaksiyonlar için düşük olduğundan elektrotlar ince platin tabakaları ile desteklenmektedirler. PEM yakıt pillerinin otomotiv sektöründe kullanımını önemli avantajlar vardır. Bu avantajlar; küçük boyutta uygulanabilirlikleri, düşük sıcaklıklarda çalışmalarına rağmen bu sıcaklıklardan kolayca güç üretimine geçebilmeleridir. Bunların yanında, yüksek verimde çalışmaları, % 40-45 seviyesinde maksimum teorik gerilim üretebilmeleri ve güç ihtiyaçlarındaki değişikliklere hızlı cevap verebilmeleri de PEM yakıt pillerini tercih edilir konuma getirmektedir.

Günümüzde 50 kW'lık güç üreten PEM yakıt pilleri piyasada satılmakta olup, 250 kW'a kadar güç üretimi yapan yakıt pilleri üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Bu teknolojinin geniş bir kullanım alanına sahip olabilmesi için, birkaç engelleyici özelliği üzerinde

çalışmalar da sürmektedir. Bu özelliklerin başında katalizör ve membran malzemelerinin pahalılığından dolayı meydana gelen yüksek fiyata ve düşük sıcaklıklarda çalışmalarından dolayı CO ve diğer safsızlıkların etkisiyle zehirleyici özelliği bulunan saf hidrojen kullanımını zorunlu kılmıştır. Bu önemli iki problem üzerinde çalışmalar son hızıyla devam etmektedir.

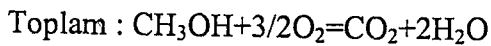
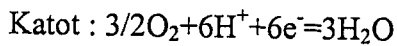
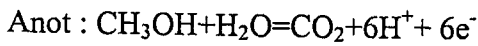
#### 4.1.1.3.3 Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili

Doğrudan Metanol Kullanılan Yakıt Pili (DMFC) (Şekil 4.3), PEM yakıt pillerinin bir çeşidi olmakla beraber, bir ön reformlamaya ihtiyaç duyulmadan metanolün doğrudan kullanımına imkan tanıyan bir yapıya sahiptir. Metanol, anotta  $\text{CO}_2$  ve  $\text{H}^+$  iyonlarına dönüştürülür. Bu aşamadan sonra hidrojen iyonları standart PEM yakıt pillerinde izledikleri yoldan oksijen ile reaksiyona girer.



Şekil 4.3 Doğrudan metanol yakıt pili temel yapısı (Çetinkaya ve Karaosmanoğlu., 2003)

DMFC tipi yakıt pillerinde anot ve katoda gerçekleşen reaksiyonlar aşağıda verilmiştir:



Bu hücreler, PEM yakıt pillerinden daha yüksek bir çalışma sıcaklığına sahip olup,  $120^\circ\text{C}$  civarında çalışabilmektedirler. Verimleri ise % 40 civarındadır. Metanolün düşük sıcaklıkta  $\text{CO}_2$  ve hidrojene dönüşümünü, PEM yakıt pillerinden farklı olarak daha yüksek miktarda platin katalizörüne ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır. Platin katalizörün miktarındaki artış, fiyatta artışa neden olmakta ve bu özellik DMFC için önemli bir dezavantaj

oluşturmaktadır. Sıvı yakıt kullanımına imkan sağlaması ve reformlama ünitesi olmadan çalışabilir olması ise önemli avantajlardır.

Gelişme aşamasında olan DMFC teknolojisi, gelecek cep telefonu, diz üstü bilgisayarlar ve taşınabilir güç kaynakları için potansiyel bir güç kaynağı olarak görülmekte ve bu tip yakıt pilleri üzerinde çalışmalar son hızıyla devam etmektedir.

#### 4.1.1.3.4 Fosforik Asit Yakıt Pili

Fosforik asit yakıt pili (PAFC) 1900'lü yıllarda oldukça ekonomik bir sistem olmakla beraber günümüzde güç santrali uygulamalarında kullanımı hedeflenmektedir. ONSI Corporation PC25 Şirketi 200 kW'lık üniteleri ticarileştirmeyi hedeflemektedir. Şirket bu sistem ile eş zamanlı elektrik ve ısı temini ile absorpsiyonlu çiller ile soğutma sağlayabilmektedir. Tokyo Electric Power tarafında geliştirilmiş olan 11 MW'lık bir sistem söz konusu olup, fizibilite ve ucuzlatma çalışmaları devam etmektedir. 200 MW'lık sisteme günümüzde hala ulaşamamaktadır.

#### 4.1.1.3.5 Ergimiş Karbonat yakıt Pili

Ergimiş karbonatlı yakıt pilleri (MCFC) PEM ve PAFC yakıt pilleri sınırlı olan çalışma sıcaklıklarını alternatif olarak geliştirilmiş sistemlerdendir. Fuel cell Inc. Tarafından doğalgaz ile çalışan 1.93 MW'lık bir sistem üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Sistem 4100 saat % 44'e yakın bir verim ile çalıştırılmıştır. Harrison Mining Corporation ise kömür ile çalışan 250 kW'lık bir sistem üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Bu sistemlerde meydana gelen sorunların temelinde termal yalıtkanlığa sahip olan malzemelerin yüksek sıcaklıkta bozunarak karbonlaşmaları ve yakıt pili yığınları arasında kısa devre oluşturmalarıdır.

#### 4.1.1.3.6 Katı Oksit Yakıt Pili

600-800°C'de çalışabilen katı oksit yakıt pili (SOFC) küçük ve büyük ölçekte enerji üretimi için geliştirilmiştir. BMW hidrojen/benzin yakıtı ile beslenen katı oksit yakıt pili aracı prototip olarak üretmiş olup, Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir. Siemens Westinghouse tarafından 100 kW kapasiteli bir ünite 5 yıldan beri kullanılmaktadır. Bu sistemlerde ulaşılan verim % 46 mertebesindedir.

Günümüzde yeni tip yakıt pilleri üzerinde çalışılmaktadır. Buna örnek olarak; proton iletkenliğe sahip Seramik elektrolitli yakıt pilleri veya Zn-hava karışımının yakıt olarak kullanıldığı yakıt pilleridir. Yakıt pili teknolojisinde yakıt pilinin güç yoğunluğunu,

gazlardaki safsızlıklara karşı direncini ve ömrünü uzatmak ve optimize etmek amacıyla elektrot malzemesinin iyileştirilmesi; yığınlar oluşturarak 250 kW'a kadar elektrik üretiminin tek bir modülden sağlanması; katalizör olarak kullanılan değerli metallerin miktarındaki azalmalar gerçekleştirilerek gerek veriminde gerekse maliyette düşüşün sağlanması; hidrojen depolama sistemlerinin geliştirilmesi; hidrojen dışında başka yakıtların kullanımına olanak tanıyacak dönüşüm sistemlerinin geliştirilmesi üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

Çizelge 4.5 Çalışma sıcaklığı ve elektrolite göre sınıflandırma  
(Çetinkaya ve Karaosmanoğlu., 2003)

Yakıt Pili Çeşidi	Elektrolit	Çalışma Sıcaklığı (°C)
AFC	KOH	50-90
PEMFC	Polimer	0-125
DMFC	Sülfürik Asit veya Polimer	50-120
PAFC	Orto Fosforik Asit	190-210
MCFC	Li/K Karbonat Karışımı	630-650
SOFC	Stabilize Zirkonyum	900-1000

Çizelge 4.6 Elde edilen güce ve kullanım alanlarına göre sınıflandırma  
(Çetinkaya ve Karaosmanoğlu., 2003)

Düşük Güçlü	~5 kW	Mikro uygulama veya Konut	PEM SOFC
	5-10 kW	Konut veya Site	
Orta Güçlü	10-100 kW	Site	AFC, PEM
	50-300 kW	Ticari	SOFC, PAFC, MCFC
Büyük Güçlü	250 kW-10 MW	Güç Santralleri	PAFC, MCFC, SOFC

#### 4.1.1.4 Yakıt Pili Uygulama Alanları

- Uzay Çalışmaları/Askeri Uygulamalar
- Sabit Güç Üretim Sistemi/Yüksek Güç Üretim Sistemi Uygulamaları
- Taşınabilir Güç Kaynağı Uygulamaları
- Atık/Atık Su Uygulamaları
- Araç Uygulamaları

#### 4.1.1.4.1 Uzay Çalışmaları/Askeri Uygulamalar

Yakıt pillerinin ilk uygulanma alanı, uzay çalışmalarıdır. ABD’de NASA’nın çalışmaları kapsamında Apollo, Gemini ve Space Shuttle uzay gemilerinde H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> yakıt pili birbirine bağlı 3 ünite olarak kullanılmıştır. Toplamda 93 adet olmak üzere her üniteye 31 adet yakıt pili kullanılmıştır. Toplam üretilen güç 1.4 kW ve voltaj 27-31 Volt’tur. Pillerin ağırlığı 111 kg’dır. 1995 saatlik uçuş süresince 450 kg su ve 325 kW/h’lik enerji üretilmiştir. Gemini gemisinde ise, farklı olarak PEM tipi yakıt pili kullanılmıştır. Her üniteye 32 adet pil bulunmakta ve 1 kW güç sağlanmaktadır. Bu üç gemide de 2 ünite ihtiyacı karşılamak için yapılırken, 3. ünite acil ve özel görev için hazırda tutulmuştur. Bugün uzay mekiği elektriği 12 kW’lık yakıt pilleri ile üretmektedir. Amerikan UTC Fuel Cell firması NASA ihtiyacını karşılamaktadır.

#### 4.1.1.4.2 Eysel Uygulamalar

Sessiz çalışan yakıt pilleri, evde veya apartmanlarda ısıtma ve elektrik ihtiyacını sağlamak için kullanılabilir bir alternatiftir. Bu tipte kullanılabilir yakıt pilleri, propan ve doğalgazdan üretimi sağlayarak elektrik üretmekte ve oluşan ısı geri kazanılarak ısıtma sistemlerinde kullanılmaktadır. 3-5 kW’lık yakıt pilleri evsel tüketim için uygundur. Amerikan hükümeti hidrojenli yakıt pili uygulamaları için konutlarda 1000 \$/kW vergi indirimi uygulamaktadır.

#### 4.1.1.4.3 Sabit Güç Üretim Sistemi/Yüksek Güç Üretim Sistemi Uygulamaları

Dünyada şu anda yüzlerce güç kaynağı olarak kurulmuş yakıt pili istasyonu bulunmaktadır. Bu enerji üreteçleri; hastanelerde, otellerde, iş yerlerinde, okullarda, güç istasyonlarında, hava alanlarında gerek elektrik gerek ısıtma sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu sistemleri kullanan şirketlerin enerji harcamalarında %20-40 arasında bir düşüş görülmektedir.

PEM yakıt pili santrallerinde verim %55 civarındadır. Üretimde açığa çıkan CO<sub>2</sub> ve su buharı ek bir elektrik üretiminde değerlendirilirse verimi %80’e çıkmaktadır.

Yakıt pili güç üretim sistemleri az yer kaplamaktadır. 2 MW’lık bir santral 20 m<sup>2</sup>’den az bir alana kurulabilmektedir. Minibüs büyüklüğündeki bir santral ile 20 kW güç üretilmektedir. Bu santrallerin önemli uygulamalarına örnek olarak Amerikan ONSI firmasının Kaliforniya’daki 2 MW’lık, UTC Fuel Cell firmasının Alaska’daki 200 kW’lık, Westinghouse-Kanada’nın Hollanda’daki 100 kW’lık sistemleri verilebilir.

#### 4.1.1.4.4 Taşınabilir Güç Kaynağı Uygulamaları

Telekomünikasyon alanında, bilgisayar dünyasında, görüntü teknolojisinde, alarm sistemlerinde yakıt pili taşınabilir güç kaynağı uygulamaları söz konusudur. Bu tip uygulamalar üzerinde çalışmalar sürmektedir. Minyatür yakıt pilleri pazara çıktıkları zaman, cep telefonu sahipleri cep telefonlarını 1 ay şarj etmeden kullanabileceklerdir. Bu tip yakıt pilleri metanol ile çalışabilen, çok küçük boyutta üretilen pillerdir.

#### 4.1.1.4.5 Atık/Atık Su Uygulamaları

Atık su ve atıkların işlenmesi sırasında yanma reaksiyonları sonucunda oluşan emisyonları azaltmak ve oluşan metan gazından güç elde etmek için yakıt pilleri kullanılmaktadır.

#### 4.1.1.4.6 Araç Uygulamaları

Elektrikli araçlar 2000'li yılların yeni-temiz alternatif uygulamaları arasında ön sırada yer almaktadır. Elektrikli araçlar:

- Enerjiyi doğrudan hattan alarak (tren, trolleybüs, tramvay, metro gibi)
- Enerjiyi depolanmış bir sistemden kullanarak (bataryalı araçlar, ultrakapasitörlü araçlar)
- Taşınabilir bir sistem anında enerjiyi üreterek (yakıt pilli araçlar, güneş pilli-fotovoltaik pilli araçlar)

Hibrid elektrikli araçlar (benzin-yakıt pilli, motorin-yakıt pilli araçları) şeklinde uygulamadadır. Bu uygulamalar içersinde yakıt pilli elektrikli araçlar pek çok avantaj ile öndedir ve geleceğin otomotiv teknolojisi içersinde hidrojen kullanan yakıt pilli elektrikli araç uygulaması çok büyük alan kaplayacaktır.

Yakıt pilleri otobüs, kamyon, otomobil ve her türlü araç için yakıt görevi yapabilecek özelliklere sahiptir. Yakıt pilli araçlar, benzin ve motorinle çalışan araçlara göre daha temiz ve enerji bakımından daha verimli bir uygulamadır. Günümüzde araç emisyonlarının çevre kirliliği açısından etkileri düşünüldüğünde, yakıt pilli çalışan araçlar çevre dostu ve karlı bir seçimdir. Elektrikli araçlar içten yanmalı motorlara göre daha verimlidir. Kullanılan yakıtın enerji içeriğine bağlı olarak yakıt pili ile çalışan araçlarda güç üretimi %40-70 arasındadır. Hareketli parçası olmayan yakıt pilleri kullanımında aracın gürültü kirliliği de görülür düzeyde azalmaktadır. Bir diğer avantaj ise, yakıt olarak hidrojen kullanıldığında araçlarda emisyon olarak sadece su açığa çıkmaktadır (Çetinkaya ve Karosmanoğlu, 2003).

Çizelge 4.7 Düşük sıcaklık yakıt pilleri (Larminie ve Dicks, 2002)

	AFC	PEMFC	DMFC
Membrana taşınan iyon	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>
Elektrolit	Konsantre KOH solüsyonu (35-40% ağırlıksal)	Katı polimer membran	Katı polimer membran
Sıcaklık (°C)	70-90	70-90	70-90
Anot reaksiyonu	H <sub>2</sub> +2OH <sup>-</sup> =2H <sub>2</sub> O+2e <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> =2H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup>	CH <sub>3</sub> OH+H <sub>2</sub> O=CO <sub>a</sub> +6H <sup>+</sup> +6e <sup>-</sup>
Katod reaksiyonu	1/2O <sub>2</sub> +2H <sub>2</sub> O+2e <sup>-</sup> =2OH <sup>-</sup>	1/2O <sub>2</sub> +2H <sup>+</sup> +2e <sup>-</sup> =H <sub>2</sub> O	6H <sup>+</sup> +6e <sup>-</sup> +3/2O <sub>2</sub> =3H <sub>2</sub> O
Tüm reaksiyon	H <sub>2</sub> +1/2O <sub>2</sub> =H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> +½O <sub>2</sub> =H <sub>2</sub> O	CH <sub>3</sub> OH+3/2O <sub>2</sub> =CO <sub>a</sub> +2H <sub>2</sub> O
G (kJ mol <sup>-1</sup> )	-273	-273.3	-702.5
H (kJ mol <sup>-1</sup> )	-286.0	-286.0	-726.6
Sistem verimi	55-60	32-44	35-40
Güç seviyeleri	50-100	0.1-250	<1(laboratuar prototipleri )
Maliyet ( \$/kW )	2,000-3,000	500-1000	?
Uygulama alanları	Uzay (NASA) kara ulaştırması (İngiliz taksileri , )	Hareketli güç ortamı(askeri ve sivil araçlar) otel, hastane orta ve yüksek güç santralleri	PEM ile aynı
Durumu	PEM ile rekabet halde	Ticari , mobil ve taşınabilir uygulama alanlarında kullanılıyor.	Laboratuar prototipleri
Avantajları	Düşük maliyetli, CO ya karşı toleranslı , hızlı katod kinetiği var	Yüksek güç yoğunluğu vardır. Büyük otomotiv üreticileri tarafından kabul edilmiştir.	Sistem daha basittir , (Yakıt prosesi elimine edilmiştir)
Dezavantajları	Korozif sıvı elektrolit , CO <sub>2</sub> ye toleransı yok.	CO'ya toleransı yok.Pahalı katalizör gereklidir.	Karmaşık modüler yapısı vardır ,soy metal katalizörleri gereklidir.

Çizelge 4.8 Orta ve yüksek sıcaklık yakıt pilleri (Larminie ve Dicks, 2002)

	PAFC	MCFC	SOFC
Membrana taşınan iyon	$H^+$	$CO_3^{2-}$ seramik matris( $LiAlO_2$ )	Hareketli $O^{2-}$ iyonları
Elektrolit	Konsantre $H_3PO_4$ solüsyonu (95-98 )	Ergimiş tuz ( $Li_2CO_3/Na_2CO_3$ )	Katı polimer membran
Sıcaklık ( $^{\circ}C$ )	150-210	550-650 (uygulamada ), 800-900 (en iyisi).	800-1100
Anot reaksiyonu	$H_2=2H^+ + 2e^-$	$H_2+CO_3^{2-}=$ $CO_2+H_2O+2e^-$	$H_2+O^{2-}=H_2O+2e^-$
Katot reaksiyonu	$1/2O_2+2H+2e^- = H_2O$	$2e^-+CO_2+1/2O_2 = CO_3^{2-}$	$1/2O_2+2e^-=O^{2-}$
Tüm reaksiyon	$H_2+1/2O_2=H_2O$	$H_2+CO_2+1/2O_2=$ $CO_2+H_2O$	$H_2+1/2O_2=H_2O$
G (kJ mol <sup>-1</sup> )	-237.3		-237.3
H (kJ mol <sup>-1</sup> )	-286.0		-286.0
Sistem verimi	36-45	50-60	50-55(kombine çevrimlerde 70-80)
Güç seviyeleri	10-107	102-105	102-105
Maliyet (\$/kW )		?	?
Uygulama alanları	Orta ve büyük ölçekli kojenerasyon sistemlerinde	Büyük ölçekli elektrik üretiminde, kojenerasyonda	Orta ve büyük ölçekli işletmelerde, kombine türbin çevrimlerinde
Durumu	Diğer yakıt pilleriyle rekabet halinde	İyi tasarlanmış yarı ticari	Diğer teknolojiler gibi iyi tasarlanmıştır.
Avantajları	Ticari anlamda uygun, pazarı uygun, kabul edilebilir uzun işletme ömürü vardır.	Yüksek verim, dahili yakıt prosesi, yüksek miktarda atık ısı	Yüksek verim, dahili yakıt prosesi, yüksek miktarda atık ısı
Dezavantajları	Nispeten düşük verim, pahalı katalizör	Dayanıksız elektrolit, belirsiz ömür	Yüksek proses sıcaklığı, yüksek maliyet, düşük özgül güç

#### 4.1.2 Dizel ve Otto Motorları

Dizel ve diğer adıyla otto motorları olan benzinli motorlar termal ısıl makineler olup, yakıtın kimyasal enerjisi yanma sonucu mekanik enerjiye dönüştürülür. Günümüzde konvansiyonel araçlarda bu iki motor kullanılmakla birlikte seri hibrid elektrikli araçlarda bu motorlar jeneratörleri sürmek amacıyla, paralel hibrid araçlarda ise bataryaya ek güç sağlamak için kullanılır. Dizel ve benzinli motorlar temelde emme, sıkıştırma, genişleme ve egzost olmak üzere dört olaydan oluşmaktadır. Ayrıca iki ve dört stroklu olarak değişmektedir.

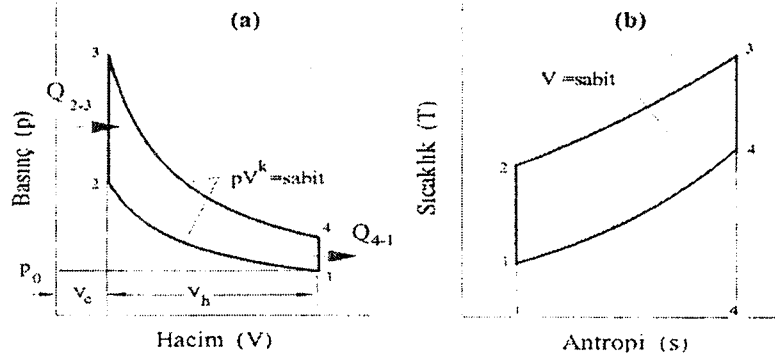
Dizel motorları genelde daha büyük bir sıkıştırma oranına sahiptir. Bu sebeple sıkıştırma strokunun sonunda silindirdeki iş gazının sıcaklığı Otto motorlarındakinden çok daha yüksektir. Böylece dizel motorlarında silindir içersine püskürtülen yakıt hemen tutuşabilir. Otto motorlarında ister sıvı ister gaz şeklinde yakıt kullanılsın dolgunun yanabilmesi için dışardan bir ateşlemeye gerek vardır. Otto motorlarında sıkıştırma esnasındaki iş gazı benzin ve havadan oluşan bir karışımdır. Dizel motorlarında ister iki stroklu ister dört stroklu olsun, silindir içersine sadece hava emilir. Yakıt silindir içersine sıkıştırma strokunun sonlarına doğru püskürtülür. Dizel motorlarında sıkıştırma oranı büyük olduğundan sıkıştırma strokunun sonlarına doğru silindir içersindeki havanın sıcaklığı yakıtın tutuşma sıcaklığından daha büyük bir değere erişir. Böylece silindir içersine gönderilen yakıt hemen tutuşur. Böylece Otto ve Dizel motorları arasındaki fark karışım teşkili ve yanmada kendisini göstermektedir. Otto motorlarında sıkıştırmanın dizel motora göre daha küçük bir değer alması ateşlemenin dışardan bir vasıta ile olmasını gerektirmiştir. Sıkıştırma esnasında silindirdeki iş gazı sıcaklığının düşük olması, iyi bir karışım sağlamak için gerekli olan karışım emmeyi mümkün kılmaktadır.

##### 4.1.2.1 Dizel ve Otto Motorlarına Uygulanan İdeal Çevrimler

Pistonlu motorlarda üç tip ideal çevrim uygulanmaktadır. Bunlar sabit hacimde ısı girişli (otto) çevrim, sabit basınçta ısı girişli (dizel) ve bu ikisinin birleşmesinden oluşan karma çevrimdir.

###### 4.1.2.1.1 Sabit Hacimde Isı Girişli İdeal Çevrim (Otto Çevrimi)

Bu çevrim (Şekil 4.4), gerek 4-stroklu gerekse 2-stroklu motorlarda uygulanmaktadır. Isı çevrime sabit hacimde girer ve işin elde edilmesinden sonra kalan ısı çevrimden gene sabit hacimde atılır.



Şekil 4.4 Sabit hacimde ısı giriqli ideal otto çevrimi (Safgönül vd., 1999).

(a) p-V diyagramı (b) T-s diyagramı

1-2 adyabatik sıkıştırma 2-3 sabit hacimde ısı girişi

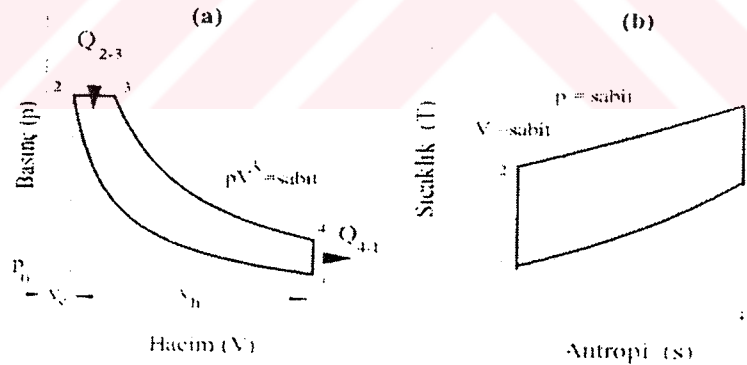
3-4 adyabatik sıkıştırma 4-1 sabit hacimde ısı çıkışı

$p_a$  atmosfer basıncı  $p_0$ : referans basıncı

#### 4.1.2.1.2 Sabit Basıncıta Isı Girişli İdeal Çevrim (Dizel Çevrimi)

Bu çevrim (Şekil 4.5), gerek 4-strokluk gerekse 2-strokluk dizel motorlarının ideal çevrimidir.

Isı çevrimde sabit basınçta girer ve işin elde edilmesinden sonra kalan ısı çevrimden gene sabit hacimde atılır.



Şekil 4.5 Sabit basınçta ısı giriqli ideal dizel çevrimi (Safgönül vd., 1999).

(a) p-V diyagramı (b) T-s diyagramı

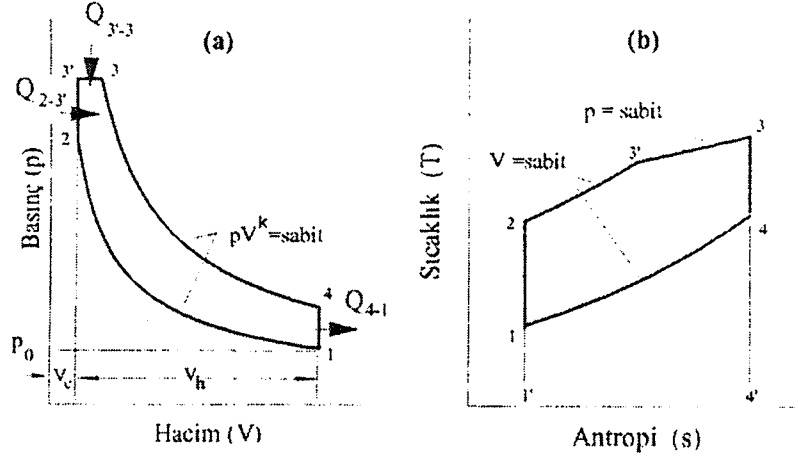
1-2 adyabatik sıkıştırma 2-3 sabit basınçta ısı girişi

3-4 adyabatik sıkıştırma 4-1 sabit hacimde ısı çıkışı

$p_0$ : referans basıncı  $p_a$  atmosfer basıncı

#### 4.1.2.1.3 Karma İdeal Çevrim (Seilinger Çevrimi)

Bugünkü modern 4 ve 2 stroklu dizel motorlarına uygulanmakta olan bu çevrim (Şekil 4.6) daha önce görülen iki çevrimin karmasından oluşmaktadır. Isı, çevrime 2-3' arasında sabit hacimde girer ve 3'-3 arasında da sabit basınçta girer ve işin elde edilmesinden sonra çevrimden sabit hacimde çıkar.



Şekil 4.6 Karma ideal çevrim (Safgönül vd., 1999).  
(a) p-V diyagramı (b) T-s diyagramı

- 1-2 adyabatik sıkıştırma
- 2-3' sabit hacimde ısı girişi
- 3'-3 sabit basınçta ısı girişi
- 3-4 adyabatik sıkıştırma
- 4-1 sabit hacimde ısı çıkışı

#### 4.1.2.2 Dizel ve Otto Motorlarında Yük Ayarı

Bir motorun verdiği iş ile iş mili üzerindeki yük birbirini dengede tutar. Bunun için motorlarda yük ayarı dendiği zaman motorun verdiği işin ayarlanması demektir. Enerjinin kaynağı yakıt olduğu için, her çevrimde silindire giren yakıtın miktarı değiştirilerek motorun verdiği iş ayarlanır.

Otto motorlarında ateşleme dışarıdan kumanda edilen bir ateşleme sistemi ile yapılır. Ateşleme sisteminin silindir içerisindeki elemanı olan bujinin turnakları arasında oluşan kıvılcım rastladığı yerdeki yakıt moleküllerini oksijenle reaksiyona girme sıcaklığına kadar ısıtır. Eğer benzinle hava karışımı, kıvılcımın müsait oranda yakıt hava zerrisine rastlayamayacağı kadar fakir, veya ısı civarındaki yakıt moleküllerini ısıtıp buharlaştıracak ve bir yanma oluşturacak kadar fazla değilse ki bu durum zengin karışımlarda olur motor çalışmaz. Görülüyor ki buji ile ateşleme yapılan motorlarda karışım içerisinde belirli bir oranda yakıt bulunması gerekir. Buradan anlaşılacağı gibi benzin motorlarında yük ayarlanması için karışım içerisindeki yakıtın miktarını değiştirmek uygun değildir. Benzin

motorlarında yük ayarını sağlamak için uygulanan yöntem, benzin-hava oranı belirli sınırlar arasında sabit tutulan karışım miktarını ayarlamaktır. Bu sebepten bu ayarlama şekline dolgu ayarı adı verilir ve motorun gaz keleşi vasıtasıyla silindire giren dolgunun kısılması suretiyle sağlanır. Kısılma emme kanalındaki karışımın basıncını düşürür. Sabit emme sıcaklığında basıncın düşmesi silindir içersine giren dolgunun yoğunluğunu dolayısıyla ağırlığını azaltır. Buna göre benzin motorlarında kısmi yüklerde emme kanalındaki kısılma sebebiyle bir miktar iş kaybı meydana gelir. Kısmi yükte negatif alan, yani emme ve egzost basıncı çizgileri tarafından meydana getirilen alan tam yüke nazaran çok daha büyüktür. Dolgu değişimi işi veya pompalama kaybı adı verilen bu negatif alan benzin motorlarında kısmi yüklerde verimin çok fazla düşmesine veya aynı şey demek olan özgül yakıt sarfiyatının artmasına sebep olur.

Dizel motorlarında emme strokunda silindir içersine saf hava emilir. Sıkıştırma strokunun sonlarına kadar silindir içersinde saf hava ve bir evvelki iş çevriminden arta kalan az bir miktar egzost gazı bulunur. Enerji kaynağı olan yakıt, sıkıştırma strokunun sonlarına doğru silindir içersine püskürtülür. Bu esnada silindir içersindeki havanın sıcaklığı 450-600°C arasındadır. Bu sıcaklıklar dizel motorlarında kullanılan yakıtın kendi kendine tutuşma sıcaklığının üzerindedir. Bu sıcaklıktaki hava içersine püskürtülen yakıt hangi miktarda olursa olsun püskürtüldüğü anda yanar. Bu sebepten dizel motorlarında yük ayarı, dolgu içersindeki yanan yakıtın miktarı bakımından herhangi bir şekilde sınırlanmış değildir. Silindir içersine motordan alınması istenen işe uyacak miktarda yakıt püskürtülebilir ve emilen havanın miktarı her yük durumunda sabit tutulabilir. Normal çalışma durumunda silindir içersindeki yakıtın havaya oranı ağırlık bakımından 1/20-1/25 civarındadır. Dizel motorlarında her yük durumunda silindir içersine emilen dolgunun miktarı sabittir; yükün ayarlanması hava içersine püskürtülen yakıtın miktarını veya başka bir deyimle karışım oranını değiştirmekle yapılır. Buna karışım ayarı adı verilir. Her yük durumunda silindir içersine aynı miktarda dolgu emilmesi sebebiyle kısmi yüklerde dolgunun kısılmasına gerek yoktur. Bu sebepten dizel motorlarında dolgu değişimi kayıpları yük durumuna bağlı olmayıp her durumda aynı değerdedir. Bu özellik dizel motorlarının kısmi yüklerde benzin motorlarından çok daha yüksek bir verimle çalışmasını sağlar.

#### 4.1.2.3 Dört Stroklu Dizel ve Otto Motorları

Dört stroklu motorlar bir iş çevrimini dört piston strokunda tamamlar; yani dört stroklu motorlarda bir iş çevrimi krank milinin 2 tur atmasıyla tamamlanır.

#### 4.1.2.3.1 Emme Stroku

Motor bu strokta silindir içersine iş yapacak gazı yani iş gazını emer. Benzin motorlarında iş gazı, benzin ile havanın yaklaşık 1/15 oranındaki bir karışımıdır. Dizel motorlarında ise emme strokunda silindir içersine emilen iş gazı saf havadan oluşmaktadır. Bu strok boyunca piston üst ölü noktadan (ÜÖN) alt ölü noktaya (AÖN) doğru hareket ederek silindir hacmini artırır ve böylece silindir içindeki basıncı azaltarak iş gazının açık olan emme sübabı yoluyla silindir içersine dolmasını sağlar.

#### 4.1.2.3.2 Sıkıştırma Stroku

Emme strokunun sonunda, silindire havayı veya karışımı emebilmek için açık bulunan emme sübabı kapanır. Bu strokta egzost stroku da kapalıdır. Emme strokunun sonunda AÖN'ya gelmiş bulunan piston bu strokta ÜÖN'ya doğru hareket etmeye başlar. Böylece silindir içersinde bulunan iş havasının hacmi azalmaya başlar ve basıncı artar. İş gazının hacmi piston üst ölü noktaya gelinceye kadar küçülmeye devam eder. Bunun için bu stroka sıkıştırma stroku adı verilir. Sıkıştırma strokunun sonlarına doğru yani termodinamik bakımdan en elverişli olan bir zamanda Otto motorlarında ateşleme, dizel motorlarında ise yanma başlatılır. Otto motorlarında ateşleme silindir içersinde sıkıştırılmış bulunan benzin hava karışımının buji ile tutuşturulması ile olur. Dizel motorlarında ise yanma, sıkıştırma suretiyle sıcaklığı yükselmiş bulunan hava içersine yakıtın püskürtülmesi ile kendi kendine başlar.

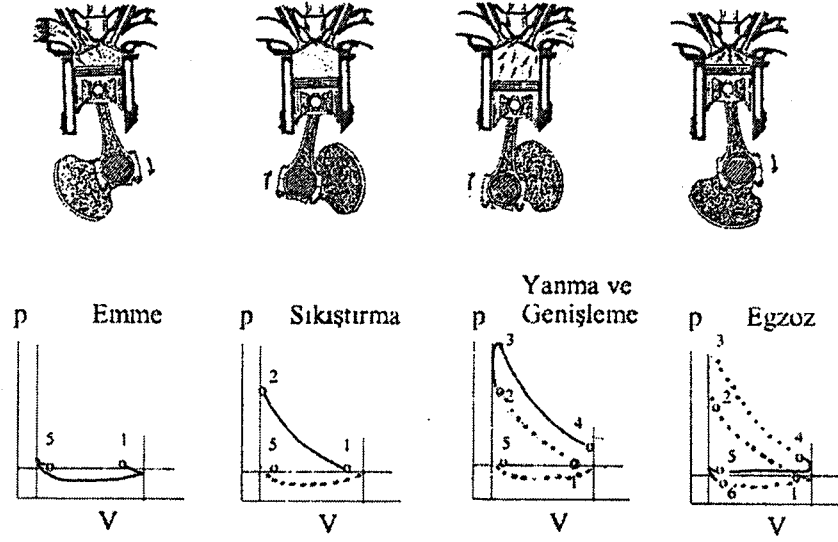
#### 4.1.2.3.3 Genişleme Stroku

Otto motorlarında iş gazının bir buji ile ateşlenmesi, Dizel motorlarında ise silindirdeki kızgın hava içersine püskürtülen yakıtın kendi kendine tutuşması sonucu serbest kalan kimyasal enerji iş gazının basıncını yükselterek pistonun ÜÖN'dan AÖN'ta doğru itilmesini sağlar. Bu sürede silindir içersindeki gazın hacmi genişlediğinden bu stroka genişleme stroku adı verilir. Bu strok esnasında iş gazının enerjisi piston üzerinden krank miline ve buradan da iş miline mekanik iş olarak aktarıldığından bu stroka iş stroku adı verilir.

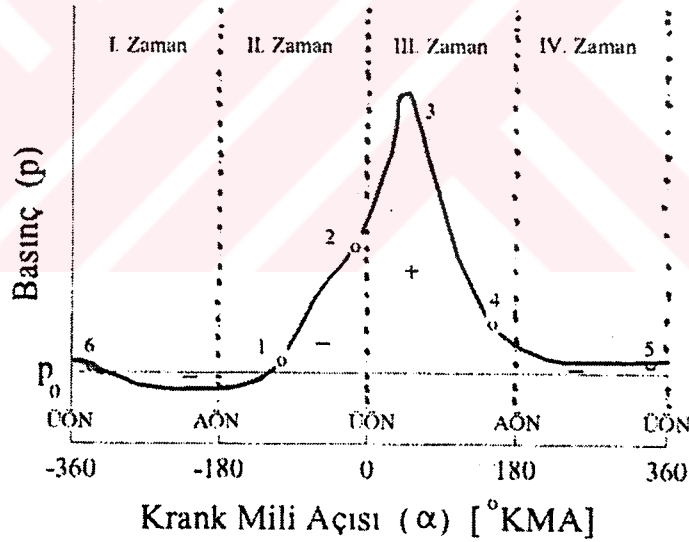
#### 4.1.2.3.4 Egzost Stroku

Genişleme strokunun sonunda iş gazının enerjisi hacmin artmasıyla minimum seviyeye düşer. Bunu takip eden emme strokunda taze iş gazının alınabilmesi için silindir içersinin boşaltılması gerekmektedir. Bu durumda piston AÖN'ya gelmiştir. Piston ÜÖN'ya doğru hareket ederken, enerjisi minimum seviyeye gelmiş bulunan egzost gazı olarak nitelendirilen yanmış gazlar egzost sübabından dışarı verilir. Egzost gazlarının dışarıya verildiği bu stroka

egzost stroku adı verilir. Dört stroklu benzin motorunun çalışması şematik resmi Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de krank açısına bağlı olarak silindir içi basınç değişimi görülmektedir.



Şekil 4.7 Dört stroklu benzin motorunun çalışması (Safgönül vd., 1999).



Şekil 4.8 Krank mili açısına bağlı olarak silindir içi basınçının değişimi (Safgönül vd., 1999).

#### 4.1.2.4 İki Stroklu Dizel ve Otto Motorları

Yukarıda ifade edildiği gibi dört stroklu motorlarda bir çevrim dört piston strokundan oluşmaktadır. Dört piston strokunda krank mili 720° dönerek iki devir yapmaktadır. İki stroklu motorlarda bir iş çevrimi iki piston strokundan oluşmak ve krank milinin bir devrinden oluşmaktadır.

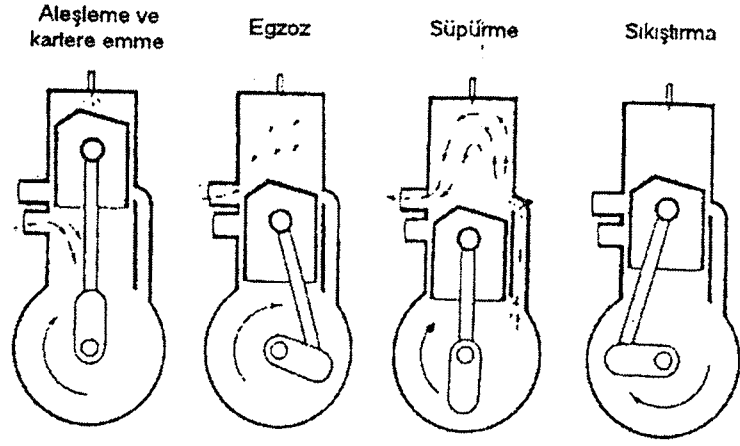
İki stroklu bir motorda sıkıştırma ve genişleme olayları bir birini takip eden iki strokun ÜÖN tarafında kalan kısımlarını işgal eder. Emme ve egzost olayları ise aynı strokların AÖN tarafında kalan kısımlarında yer alır. İki stroklu motorlarda emme ve egzost olayları kısmen iç içe girmiş durumdadır.

#### 4.1.2.4.1 Genişleme-Egzost-Süpürme Stroku

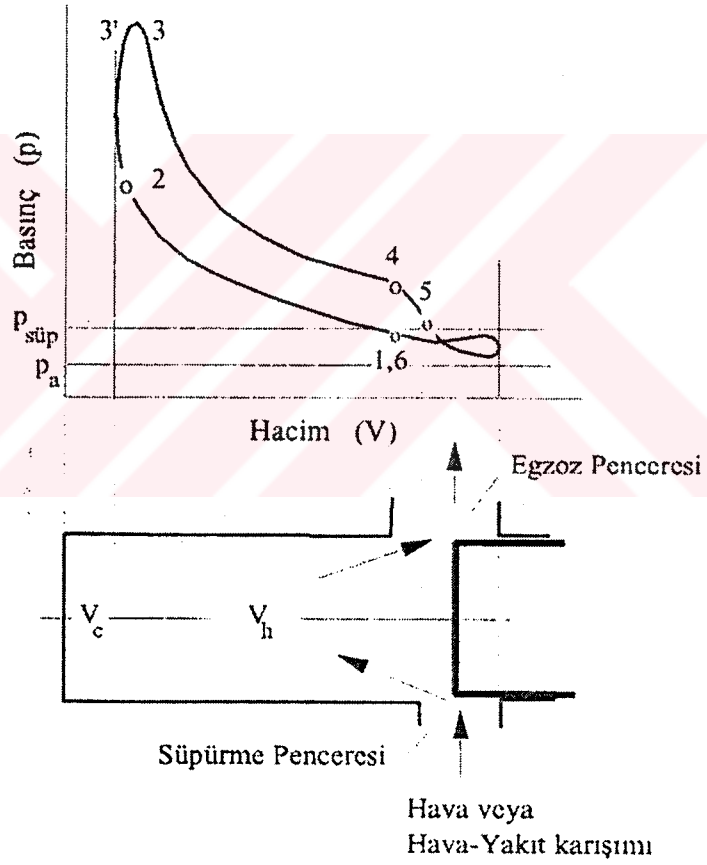
Piston ÜÖN'dan AÖN'ya doğru hareket ederken silindir içersinde, yüksek basınçlı egzost gazlarının bulunduğunu düşünelim. Bu gazlar genişleyecek ve genişleme esnasında pistonu AÖN'ya doğru itmeye devam edecektir. Pistonun taban yüzeyi, egzost kanalının hizasına geldiği zaman silindirdeki gazlar egzost kanalına doğru çıkmaya başlayacaktır. Piston AÖN'ya doğru gitmeye devam ederken taban yüzeyi süpürme kanalının kenarını açmaya başlayacaktır. Bu zamana kadar silindir içersindeki gazların basıncı süpürme kanalı tarafında bulunan taze gazların basıncının altına düşmüş olacaktır. Dolayısı ile süpürme kanalından gelen taze gazlar, egzost gazını önüne katıp egzost kanalından dışarı atacak ve silindiri bir evvelki çevrimde iş yaparak enerjisini kaybetmiş bulunan egzost gazlarından temizleyip dolduracaktır. Silindirin süpürülmesi ve aynı zamanda dört stoktaki emme olayının benzeri olan taze gazlarla doldurulması taban yüzeyinin kenarı kapatmasına kadar devam eder. Pistonun taban yüzeyi süpürme kanalının kenarını kapattıktan sonra silindir içersine taze gaz akımı duracaktır. Bu durumda egzost kanalı henüz açık durumdadır ve pistonun ÜÖN'ya doğru hareketi sırasında meydana gelen hacim daralması sebebiyle bir miktar taze dolgu dışarıya kaçacaktır.

#### 4.1.2.4.2 Süpürme-Egzost-Sıkıştırma Stroku

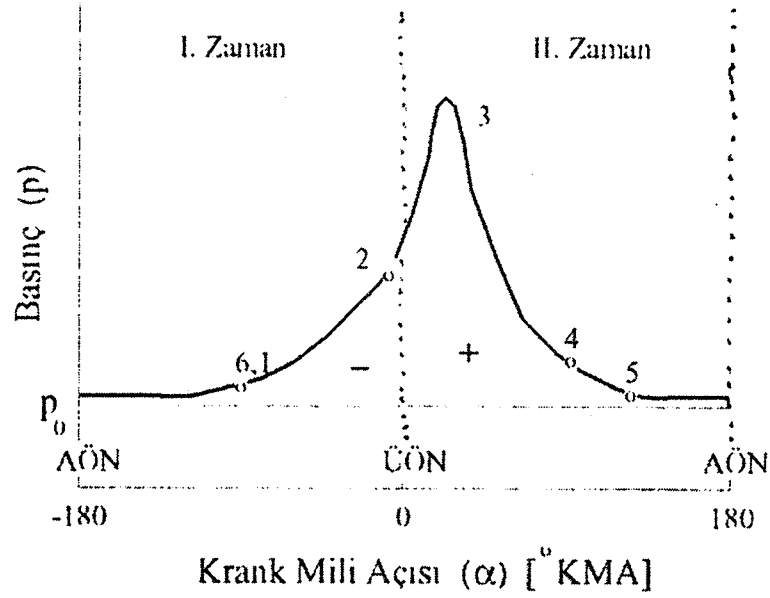
Piston AÖN'dan ÜÖN'ya doğru giderken, yani ikinci strokunda, taban yüzeyi egzost kanallarının kenarını kapattığı zaman silindir ile dışarısının bağlantısı kesilir. Süpürme maddesi olarak silindire giren taze dolgu bu andan itibaren sıkıştırılmaya başlar. Sıkıştırma piston ÜÖN'ya gelinceye kadar devam eder. Piston ÜÖN'ya yaklaşırken karışım tıpkı dört stroklu motorlarda olduğu gibi ateşlenir veya yakıt püskürtülür ve yanma başlatılır. Yanma sonucu serbest kalan ısı enerjisi sebebiyle gazların sıcaklık ve basıncı yükselir. Görülüyor ki, iki stroklu motorlarda silindir içersine taze dolgunun alınması, sıkıştırılması, tutuşturulması genişleyerek iş yapması ve egzost gibi olaylardan oluşan çevrim pistonun iki strokuna yani krank milinin bir devrine sıkıştırılmıştır. karterden süpürmeli iki stroklu motorun şematik resmi Şekil 4.9'da, iki stroklu motorun çalışması Şekil 4.10'da ve krank mili açısına bağlı olarak silindir içi basıncının değişimi ise Şekil 4.11 gösterilmektedir (Öz, 1976).



Şekil 4.9 Karterden süpürmeli iki stroklu motoru (Safgönül vd., 1999).



Şekil 4.10 İki stroklu motorun çalışma çevrimi (Safgönül vd., 1999).



Şekil 4.11 Krank açısına bağlı olarak silindir içi basıncının değişimi (Safgönül vd., 1999).

#### 4.1.3 Jeneratörler

Dizel ya da gaz türbini olmak üzere ısı motorları tarafından tahrik edilen jeneratörlerde mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Faraday prensibine göre gerçekleşen bu enerji dönüşümünde bir manyetik alan içerisinde yer alan iletken tel üzerinde, akı değişimi neticesinde bir endüksiyon gerilimi (4.1) oluşmaktadır.

$$E = -B \times c \times v_h = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} = K_G \times \Phi \times n \quad (4.1)$$

E : Endüksiyon Gerilimi (V) (Elektromotor Kuvveti)

B : Manyetik Akı Yoğunluğu (T)

c : İletken boyu (m)

$v_h$  : Hareket hızı (m/san)

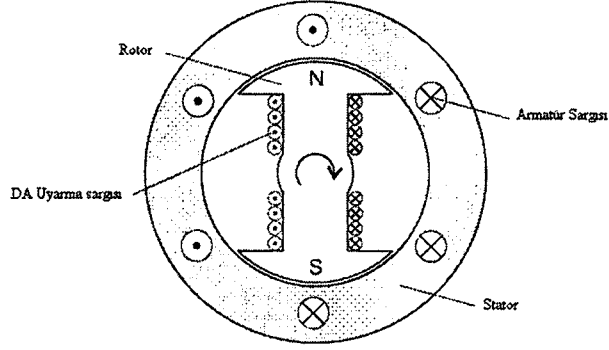
n : devir (1/san)

$\Phi$  : Manyetik akı (Wb)

$K_G$  : Jeneratöre ait sabit

Bir jeneratörde iletken tellerden oluşan bobinler armatür üzerine sarılmıştır. Doğal mıknatıslar kullanılarak veya ayrı bir uyarma sargısı tarafından oluşturulan manyetik alan içerisinde sarılmış iletken bobinler hareket etmekte ve endüksiyon gerilimi oluşmaktadır. Benzer şekilde armatür üzerine sarılmış bobinler sabitken manyetik alan da döndürülebilmektedir. Her iki şekilde de rotor ve stator arasındaki hareket, sürekli manyetik akı değişimi yaratarak rotor ve stator arasında bir gerilim indüklenmesine neden olmaktadır. Alternatif akım jeneratörlerinde

genellikle armatür sabittir ve manyetik alan dönmektedir. Doğru akım uyarmalı iki kutuplu 3 fazlı bir AC jeneratörü şematik olarak Şekil 4.12’de gösterilmektedir.



Şekil 4.12 İki kutuplu 3 fazlı senkron AC jeneratör (Ünlü vd., 2003).

Bir manyetik alan içerisinde sabit hızla dönen rotor üzerinde oluşan gerilim sinüs dalgası şeklindedir. Bir başka ifade ile indüklenen gerilimin frekansı rotorun dönme hızına bağlıdır ve hız ve frekans arasında senkron bir zaman ilişkisi vardır. O halde örnek olarak iki kutuplu bir jeneratörde 60 Hertz bir gerilim frekansı (4.2) elde etmek için 3600 devir/dak hızında mekanik tahrik gerekmektedir. Devir ve frekans arasındaki ilişki aşağıdaki bağıntı ile ifade edilmektedir (Ünlü vd., 2003).

$$f = \frac{P_k}{2} \times n \quad (4.2)$$

f : Frekans (Hertz)

$p_k$  : Kutup Sayısı

n : Devir Sayısı (/san)

## 4.2 Enerji Depolama Sistemleri

### 4.2.1 Bataryalar

Elektrikli araçlarda elektrik motoru tarafından mekanik enerjiye dönüştürülen elektrik enerjisi genellikle bataryalardan yada yakıt pillerinden kimyasal dönüşüm yoluyla elde edilir. Elektrikli araç çalışmaları başladığından bu yana bataryalar en uygun enerji kaynağı olarak düşünülmektedir. Bu nedenle ticari olarak uygun görülen elektrikli araç ve hibrid elektrikli araçlarda elektrik enerji kaynağı olarak bataryalar kullanılmaktadır. Seri hibrid elektrikli araçlarda ortalama yükleri güç üretim sistemi ve tepe yüklerini özellikle ivmelenme veya yokuş çıkma esnasında bataryalar karşılayacak şekilde enerji yönetim sisteminin kurulması (power assist) durumunda, kullanılan bataryanın spesifik gücünün yüksek olması istenir.

Aracın menzilinin yüksek olması için ise bataryaların özgül enerjisi yüksek olması gerekmektedir. Özgül enerji yoğunluğu enerji kaynağının birim kütlesinin verdiği enerji olarak ifade edilmektedir. Özgül güç ise yine enerji kaynağının birim kütlesinin verdiği güç olarak ifade edilmektedir. Tahrik sisteminin ihtiyaç duyduğu gücün tamamen bataryalar tarafından sağlanacağı ve güç üretim sisteminin bataryaları şarj etmek için kullanılacağı durumlarda ise spesifik enerjisi yüksek batarya kullanılması tercih edilir. Bunların dışında bataryaların maliyeti elektrikli araç ve hibrid elektrikli araç uygulamaları için uygun olmalıdır. 30 yıldan bu yana batarya teknolojisi için geniş araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bununla birlikte yukarıda belirtilen tüm özellikler aynı bataryada görülmemiştir. Bazı enerji kaynaklarının özgül enerjisi Çizelge 4.9'da verilmektedir.

Çizelge 4.9 Bazı enerji kaynaklarının özgül enerji değerleri (Husain., 2003)

Enerji Kaynağı	Nominal Özgül enerji (Wh/kg)
Benzin	12,500
Doğal gaz	9350
Metanol	6050
Hidrojen	33,000
Kömür (bituminous)	8200
Pb-asit batarya	35
Lityum-polimer (Li-polimer) batarya	200
Flywheel	200

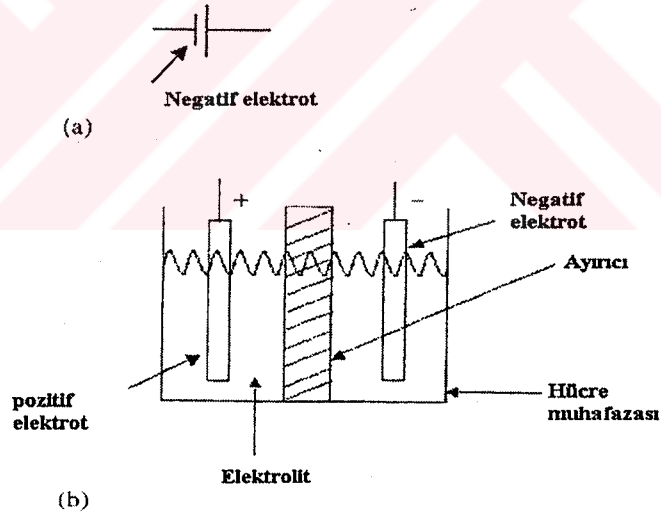
#### 4.2.1.1 Bataryanın Yapısı

Bataryalar (Şekil 4.13) kimyasal enerji içeren birim hücrelerden oluşmaktadır. Bu hücreler istenilen gerilim değerini sağlamak için seri şekilde bağlanırlar. Bir batarya grubu ayrı olarak bu bataryaların istenilen gerilim seviyesinin sağlanması amacıyla seri ya da paralel bağlanmasıyla elde edilmektedir. Böylece güç elektroniğine ihtiyaç duyulan enerji iletilir. Bir hücre temel olarak pozitif ve negatif elektrotlardan, elektrolitten ve ayırıcıdan oluşmaktadır. Elektrotlar bu ayırıcı ile ayrılmaktadır. Bataryanın çalışması esnasında kimyasal reaksiyonlar sonucunda açığa çıkan elektronlar dış devre yoluyla bir elektrottan diğerine hareket ederler. Batarya elemanları aşağıda açıklanmaktadır.

- **Pozitif Elektrot:** Pozitif elektrot bataryanın deşarjı esnasında dış devre yoluyla gelen elektronu alarak indirgenmektedir. Pozitif elektrotlara örnek olarak kurşun oksit (PbO<sub>2</sub>),

ve nikel oksihidroksit (NiOOH) verilebilir. Pozitif elektrot malzemeleri ise katı fazda olmaktadır.

- **Negatif Elektrot:** Negatif elektrot bataryanın deşarjı esnasında dış devreye elektron vererek yükseltgenen metal yada alaşımdır. Negatif elektrotlara örnek olarak Pb veya Cd verilebilir. Negatif elektrot malzemeleri de katı fazda bulunmaktadır.
- **Elektrolit :** Elektrolit pozitif ve negatif elektrotlar arasında iyon iletimine izin veren ortam olarak kabul edilir. Elektrolit yüksek iyon iletimine sahip olmalı ancak bataryanın kendi kendine deşarjını engellemek için elektron iletimine izin vermemelidir. Elektrolit sıvı, jel veya katı fazda olabilir. Ayrıca elektrolit batarya türüne göre asidik yada alkali olabilir. Pb-asit veya NiCd gibi bataryalar sıvı elektrolit kullanmaktadır. Pb-asit bataryada elektrolit sülfürik asit ( $H_2SO_4$ ) solüsyonu, elektrikli araç uygulamaları için gelişme aşamasında olan NiMH veya Li-iyon bataryaları ise jel türü elektrolit içermektedir. Li-polimer bataryalar ise katı elektrolit içermektedir.
- **Ayırıcı:** Ayırıcı elektrotları fiziksel ve elektriksel olarak ayırmaktadır. Ayırıcı elektrolitteki iyonların hareketine izin vermelidir. Günümüz ayırıcıları sentetik polimerlerden oluşmaktadır. Bir bataryanın yapısı Şekil 4.23'de görülmektedir.



Şekil 4.13 Batarya yapısı (Husain., 2003)

Bataryalar şarj edilebilme özelliklerine göre primer ve sekonder batarya olarak iki gruba ayrılmaktadır. Şarj edilemeyen, tek bir deşarjdan sonra kullanılamayan bataryalar *primer* bataryalar grubundandır. Örneğin saatlerde, hesap makinalarında, kameralarda kullanılan lityum bataryalar veya oyuncaklarda ve radyolarda kullanılan mangan dioksit bataryaları primer bataryalardır. Elektronların ters akışına izin verilerek şarj edilebilen bataryalar ise *sekonder* bataryalar grubundandır. Batarya şarj olurken oluşan kimyasal prosesler deşarj

esnasında olan proseslerin tersidir. Elektrikli ve hibrid elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar şarj edilebilir özellikte olup sekonder batarya grubundandır. Bu nedenle bu bölümde anlatılacak tüm bataryalar sekonder bataryalardır. Elektrikli araç uygulamalarında kullanılan en önemli sekonder bataryalar; Bazı bataryaların özgül enerjileri Çizelge 4.10'da verilmektedir.

- Kurşun-asit
- Nikel-kadmiyum
- Nikel-metal hidrür
- Lityum-iyon
- Lityum-polimer
- Sodyum-sülfür (NaS)
- Çinko-hava bataryalarıdır.

Çizelge 4.10 Bataryaların özgül enerjileri (Husain., 2003)

Batarya	Özgül Enerji (Wh/kg)	
	Teorik	Pratik
Pb-asit	108	50
NiCd		20-30
NiZn		90
NiFe		60
NiCl		90
AgZn	500	100
NaS	770	150-300

#### 4.2.1.2 Batarya Parametreleri

##### 4.2.1.2.1 Batarya Kapasitesi

Negatif elektrot tarafından üretilen ve pozitif elektrot tarafından alınan serbest yük miktarına batarya kapasitesi (4.3) adı verilmektedir. Kapasite Amper-saat (1 Ah=3600C, Coulomb, olup 1C, 1 amper tarafından 1 saniyede transfer edilen yük miktarıdır.) olarak ölçülmektedir.

C olarak teorik kapasite;

$$Q_T = x \cdot z \cdot F \quad (4.3)$$

x: Sınırlayıcı reaktanın mol sayısı

z: Bataryanın deşarjı esnasında negatif elektrot tarafından üretilen elektron sayısı

F: Faraday sabiti ( $F = A_v \cdot e_0$ )  $F = 96412.2$  C/mol

$A_v$ : Bir moldeki atom veya molekül sayısı, Avagadro sayısı,  $A_v = 6.022 \cdot 10^{23}$

$e_0$ : Elektron yükü,  $1.601 \cdot 10^{-19}$  C

Ah olarak teorik kapasite (4.4) ise;

$$Q_T = 0.278 \cdot F \cdot \frac{m_R \cdot n}{M_m} \quad (4.4)$$

$m_R$ : Sınırlayıcı reaktanın kütlesi (kg)

$M_m$ : Sınırlayıcı reaktanın molar kütlesi (g/mol)

#### 4.2.1.2.2 Batarya Deşarj Oranı

Batarya deşarj oranı (4.5 ve 4.6), bataryanın deşarj olduğu akımdır. Deşarj oranı genellikle Q/h olarak ifade edilir. Burada Q nominal batarya kapasitesi, h ise saat olarak deşarj süresidir. Örneğin batarya kapasitesi Ah olarak  $Q_T$  olan bir batarya  $\Delta t$  sürede deşarj olursa bataryanın deşarj oranı  $Q_T / \Delta t$  olur.

Örneğin,  $1Q = 100Ah$  olan bir batarya düşünelim;

$$Q/5 \text{ oranı } \frac{100Ah}{5h} = 20A \text{ ve} \quad (4.5)$$

$$2Q \text{ oranı } Q/0.5 \text{ 'dir ve } \frac{100Ah}{0.5h} = 200A \text{ 'dir.} \quad (4.6)$$

Batarya şarj durumu (SoC) bataryanın anlık kapasitesidir. Batarya tamamen şarjlı durumdan sonra deşarj olduğundaki kalan kapasite miktarıdır. Zaman bağlı yük değişimi akım (i) olarak ifade edilirse (4.7), akımın matematiksel formülü,

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \text{ şeklinde olmaktadır.} \quad (4.7)$$

q: Devre yoluyla hareket eden yük miktarı

$t_0$  başlangıç anında yük durumu  $Q_T$  ise  $SoC_T(t_0) = 0$  olur.

(4.8) eşitliği yardımıyla dt zaman aralığında,

$$dSoC_T = -dq = -i(t)dt \quad (4.8)$$

(4.9) eşitliği yardımıyla  $SoC_T(t)$  hesaplanabilir.

$$SoC_T(t) = Q_T - \int_0^t i(t) dt \quad (4.9)$$

olur.

#### 4.2.1.2.3 Batarya Deşarj Durumu

Batarya deşarj durumu (SoD) bataryadan çekilen yükün ölçümüdür. Matematiksel olarak (4.10) yardımıyla  $SoD(t)$  hesaplanabilir.

$$SoD(t) = \Delta q = \int_0^t i(t) dt \quad (4.10)$$

(4.11) eşitliği yardımıyla  $SoC_T(t)$  hesaplanabilir.

$$SoC_T(t) = Q_T - SoD_T(t) \text{ olarak ifade edilir.} \quad (4.11)$$

#### 4.2.1.2.4 Batarya Deşarj Derinliği

Batarya deşarj derinliği (DoD), batarya deşarj durumunun batarya kapasitesine oranıdır. Deşarj derinliği (4.12) yardımıyla hesaplanabilir.

$$DoD(t) = \frac{Q_T - SoC_T(t)}{Q(t)} * 100\% = \frac{\int_0^t i(t) dt}{Q_T} * 100 \text{ şeklinde ifade edilir.} \quad (4.12)$$

#### 4.2.1.2.5 Batarya Pratik Kapasitesi

Bataryanın pratik kapasitesi,  $Q_P$ , (4.13) pratik sınırlamalardan dolayı teorik kapasiteden,  $Q_T$ , daha düşüktür.

$$Q_P = \int_{t_0}^{t_{cut}} i(t) dt \quad (4.13)$$

$t_0$ : batarya tam şarjlı olduğundaki zaman ( $SoD(t_0)=0$ )

$t_{cut}$ : Batarya terminal geriliminin  $V_{cut}$ 'a eşit olduğundaki zaman, bu nedenle  $V_t(t_{cut})=V_{cut}$

#### 4.2.1.2.6 Batarya Enerjisi ve Özgül Enerji

Bataryanın enerjisi kapasite ve deşarj gerilimi ile ölçülür. Enerjinin belirlenebilmesi için kapasite coulomb cinsinden ifade edilmelidir. Burada  $1Ah=3600 C$  olmakta ve  $1V$  gerilim değeri  $1C$  yükü negatif elektrottan pozitif elektrota transfer edebilmek için gerekli işi belirtir.

Yani joule eşittir. Bu nedenle, 12 V geriliminde, 100A kapasitesinde olan bir bataryada depolanan enerji  $(12) \cdot (3.6 \cdot 10^5) J = 4.32 \text{ MJ}$  olmaktadır. Genel olarak teorik depolanan enerji ;

$E_T = V_{bat} Q_T$  olmaktadır. Burada (4.14) eşitliği yardımıyla depolanan enerji hesaplanabilir.

$V_{bat}$ : Nominal yüksüz batarya terminal gerilimi

$Q_T$ : C olarak teorik kapasite

$$E_T = \left[ \frac{1000 \cdot F \cdot z}{M_m} \right] V_{bat} = 9.65 \cdot 10^7 \frac{n \cdot m_R}{M_M} V_{bat} \quad (4.14)$$

Pratikte depolanan enerji (4.15) eşitliği yardımıyla hesaplanabilir.

$$E_P = \int_{t_0}^{t_{cut}} V_t \cdot i \cdot dt \text{ olmaktadır. Burada} \quad (4.15)$$

$t_0$ : batarya tam dolu olduğundaki zaman

$t_{cut}$ : Batarya terminal geriliminin  $V_{cut}$ 'a eşit olduğundaki zaman

$V_t$  Batarya terminal gerilimi

$i$ : batarya deşarj akımı

Bataryanın özgül enerjisi ise (4.16) eşitliği yardımıyla hesaplanabilir.

$$S_E = \frac{E}{M_B} \text{ (Wh/kg)} \quad M_B = \text{Batarya kütlesi} \quad (4.16)$$

#### 4.2.1.2.7 Batarya Gücü ve Özgül Gücü

Bataryanın gücü (4.17) eşitliği yardımıyla hesaplanabilir.

$$p(t) = V_t \cdot i \text{ şeklinde ifade edilir. Burada} \quad (4.17)$$

$V_t$ : Batarya terminal gerilimi

$i$ : Batarya deşarj akımı

Kirchoff kuralına göre (4.18) eşitliği yardımıyla batarya terminal gerilimi hesaplanabilir.

$$V_t = E_V - R_i \cdot i \text{ olduğundan,} \quad (4.18)$$

Bataryanın gücü (4.19) eşitliği yardımıyla hesaplanabilir.

$$p(t) = E_V \cdot i - R_i \cdot i^2 \quad (4.19)$$

Batarya özgül gücü ise yine (4.20) eşitliği yardımıyla hesaplanabilir.

$$S_P = \frac{P}{M_B} \text{ (W/kg)} \text{ (Husain, 2003)} \quad (4.20)$$

### 4.2.1.3 Şarj Edilebilen Batarya Türleri

#### 4.2.1.3.1 Kurşun-Asit Batarya

Fransız fizikçi Gaston Plante tarafından 1859 yılında keşfedilen kurşun-asit batarya ticari anlamda kullanılan ilk şarj edilebilen bataryadır. Günümüzde 120 yıl sonra bile elektrikli araç uygulamalarında daha çok bu batarya kullanılmaktadır.

Pb-asit izolasyonlu kurşun-asit (SLA) ve sübap ayarlı kurşun-asit (VRLA) bataryaları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Ancak teknik anlamda her iki batarya da aynıdır.

SLA bataryaları 0.2Ah-30Ah arasında kapasiteye sahiptir ve portatif ve tekerlekli araç uygulamalarında kullanılmaktadır. Maliyeti düşük, bakım gereksiniminin az olması SLA bataryalarının çok geniş alanlarda özellikle UPS uygulamalarında kullanılmasına neden olmaktadır.

VRLA bataryaları ise genellikle banka, hastane, havaalanı ve askeri gibi stasyonel uygulamalarda kullanılmaktadır. Kapasiteleri 30 Ah ve birkaç bin Ah aralığında olup daha yüksek UPS sistemlerinde kullanılmaktadır.

Şarj edilebilir bataryalar arasında özellikle SLA bataryaları diğer şarj edilebilir bataryalar göre düşük enerji yoğunluğuna sahiptir ve düşük sıcaklıklarda performansı azalmaktadır.

NiCd bataryaları üç ay içerisinde kendi kendine deşarjla depolanan enerjisinin %40'ını kaybetmesine karşın SLA bataryası aynı miktarda enerjiyi bir yılda kaybetmektedir.

SLA bataryaları hızlı şarja izin vermez tahmini şarj süresi 8-16 saat arasındadır ve deşarj derinliğine ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak SLA bataryaları 200-300 çevrim sayısına sahiptir..

SLA bataryaları NiCd bataryalarına göre daha az zararlıdır fakat yüksek kurşun içeriği bu bataryaları çevreye karşı zararlı kılar. Pb-asit bataryalarının avantajları ve dezavantajları Çizelge 4.11'de verilmektedir.

Çizelge 4.11 Pb-asit bataryalarının avantajları ve dezavantajları (Buchmann., 2003)

Pb-asit Bataryaların Avantajları ve Dezavantajları	
Avantajları	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ucuz ve üretimi kolaydır Wh başına maliyeti en uzuz batarya SLA bataryalarıdır.</li> <li>• Güvenilir ve teknolojisi anlaşılabilir.</li> <li>• Kendi kendine deşarjı düşük, tüm bataryalar içersinde kendi kendine deşarj olanı en düşük bataryadır.</li> <li>• Bakım gereksinimi azdır.</li> <li>• Yüksek deşarj oranlarına sahiptir.</li> </ul>
Dezavantajları	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enerji yoğunluğu düşüktür.</li> <li>• Deşarj durumunda depolanamaz. Hücre gerilimi 2.1 V'nin altına düşmemelidir.</li> <li>• Çevreye karşı duyarlı değil, elektrolit ve kurşun içeriği çevresel zarara neden olur.</li> </ul>

#### 4.2.1.3.2 Nikel Kadmiyum Batarya

Alkali nikel batarya teknolojisi 1899 yılında Waldmar Junger NiCd bataryayı keşfettiğinde ortaya çıkmıştır. Malzemeler o döneme göre diğer bataryalara göre daha pahalı olduğu için sadece özel uygulamalarda kullanılmıştır. 1947 yılından sonra bu bataryalar üzerine gelişmeler başlamış ve izolasyonlu NiCd bataryaları gelişmiştir ve son yıllarda NiCd bataryalar çevrim ömrü ve güvenilirlik bakımından en iyi dengeyi sağlayan bataryalar olarak kabul edilmektedir.

NiCd bataryaları hızlı şarja izin vermektedir. NiCd bataryaları küçük üretimlerde kullanıma uygundur. Özellikle Peugeot-Citroen. Peugeot 106 nın elektrikli versiyonunda geniş kullanmıştır. Bunun yanında GM ve Renault da kullanmaya başlamıştır.

Cd toksik ve çevreye zararlı olmasından dolayı, NiCd bataryaların geri kazanım olayı çok karışıktır ve bu nedenlerle kullanımından kaçınılmaktadır ve sonuç olarak diğer bataryalar daha fazla ilgi görmektedir. NiCd bataryalarının avantajları ve dezavantajları Çizelge 4.12'de verilmektedir.

Çizelge 4.12 NiCd bataryalarının avantajları ve dezavantajları (Buchmann., 2003)

NiCd Bataryaların Avantajları ve Dezavantajları	
Avantajları	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hızlı ve basit şarj edilebilir.</li> <li>• Şarj/deşarj çevrim oranı yüksektir, eğer bakımı düzenli olursa 1000 çevrim sayısına sahiptir.</li> <li>• Düşük sıcaklıklarda şarj edilebilir.</li> <li>• Düşük sıcaklıkta iyi bir çalışma performansına sahiptir.</li> <li>• Maliyeti uygun, çevrim oranına göre en düşük maliyetli batarya olarak kabul edilir.</li> <li>• Geniş performans aralıklarında kullanılabilir.</li> </ul>
Dezavantajları	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diğer bataryalara göre enerji yoğunluğu düşüktür.</li> <li>• Çevreye karşı duyarlı değil, NiCd bataryaları toksik maddeler içermektedir. Bazı ülkelerde NiCd bataryaların kullanımı sınırlandırılmıştır.</li> <li>• Kendi kendinedeşarjı yüksektir.</li> <li>• Üretimi pahalı, NiCd bataryalarından %40 daha pahalı, Maliyetin azaltılması için daha iyi üretim teknikleri geliştirilmelidir.</li> </ul>

#### 4.2.1.3.3 Nikel-Metal Hidrür Batarya

NiMH bataryaları üzerine araştırmalar 1970 yılında nikel-hidrojen bataryaları üzerinde çalışmalar esnasında başlamıştır. Bugünlerde nikel-hidrojen bataryaları satellite uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır.

NiMH bataryaları yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve çevreye karşı duyarlı malzemelerden oluşmaktadır. Günümüzün NiMH bataryaları NiCd bataryalarına göre %40 daha fazla enerji yoğunluğuna sahiptir. Hem NiCd hem de NiMH bataryalarının kendi kendinedeşarjı yüksektir. Özellikle NiCd bataryaları ilk 24 saatte kapasitesinin yaklaşık %10 kadarını kaybetmektedir. NiMH bataryaların kendi kendinedeşarjı ise NiCd bataryalarının iki katı kadardır. NiMH bataryalarının avantajları ve dezavantajları Çizelge 4.13'de verilmektedir.

Çizelge 4.13 NiMH bataryalarının avantajları ve dezavantajları (Buchmann., 2003)

NiMH Bataryaların Avantajları ve Dezavantajları	
Avantajları	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Standart NiCd bataryalarına göre %40 daha fazla enerji yoğunluğuna sahiptir.</li> <li>• Çevreye karşı duyarlıdır, NiCd bataryalarında çıkan kadmiyum gibi toksik maddeler içermemektedir.</li> </ul>
Dezavantajları	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Servis ömrü sınırlıdır, 200-300 çevrimden sonra performansı düşmeye başlamaktadır.</li> <li>• Deşarj akımı sınırlıdır, NiMH bataryaları yüksek deşarj akımı verebilmesine rağmen yüksek yük akımlarıyla tekrarlanan çevrim bataryanın çevrim ömrünü azaltmaktadır. En iyi deşarj akımı yaklaşık 0.2C-0.5C arasındadır.</li> <li>• Kendi kendine deşarjı yüksektir. NiMH bataryaları NiCd bataryalarına göre %50 daha fazla kendi kendine deşarja sahiptir. . Bu nedenle bazı katkı maddeleri konulmaktadır ancak bu da bataryanın enerji yoğunluğunu azaltmaktadır.</li> <li>• NiCd bataryalarına göre %20 daha pahalıdır. Yüksek akım çekimlerine izin verebilen NiMH bataryaları normal NiMH bataryalarına göre daha pahalıdır.</li> </ul>

#### 4.2.1.3.4 Sodyum-Sülfür Batarya

NaS batarya ilk olarak Ford Araştırma laboratuvarında 1960'li yıllarda elektrikli taşıtlar için gerekli enerji ve güç yoğunluğunu sağlamak için geliştirilmiştir. Elektrikli araç uygulamalarında yavaş yavaş yer almaya başlamıştır. Birçok Avrupa, Amerika ve Japon şirketinde ticari prototiplerde kullanılmaktadır. Batarya negatif sodyum elektrotundan ve pozitif sülfür elektrotundan oluşmaktadır. Batarya yüksek sıcaklıklarda (350°C) çalışmaktadır ve her iki elektrot bileşenleri de sıvı durumdadır.

NaS 110Wh/kg gibi yüksek enerji yoğunluğu ile 150W/kg gibi yüksek güç yoğunluğu ve bu arada 1000 derin deşarj çevrimi vardır. Bataryanın optimum çalışma sıcaklığı 350°C'dir ve bataryanın 200°C'nin altında pek çalışılmasına izin verilmez. Çünkü bu sıcaklığın altında sodyum elektrolit donmaktadır. Reaktivasyon yavaşlar ve de sodyumun donması mekanik gerilmelere yol açması nedeniyle bataryaya zarar vermektedir.

#### 4.2.1.3.5 Lityum-Katı Polimer Batarya

Li-polimer bataryaları kullanılan elektrolite göre diğer bataryalardan farklıdır. Bu bataryalar kuru katı polimer elektrolit kullanmaktadır. Bu polimer elektriği iletmekte ancak iyonların geçişine izin vermektedir. Polimer elektrolit porous ayırıcının yerini almıştır. Sıvı ya da jel elektrolit kullanılmadığından yanma riski yoktur.

Kuru Li-polimer bataryanın iletimi düşük ve iç direnci yüksektir. Batarya 60°C'ye ısıtıldığında iletim artmaktadır ama yinede ticari uygulamalarda uygun değildir. 2005 yılında bu bataryaların Li-iyon bataryalara göre daha yüksek enerji yoğunluğuna sahip olacağı düşünülmekte ve 1000 çevrim sayısına sahip olacağı ve ticarileşebileceği düşünülmektedir. Li-polimer bataryaların iletimini arttırmak için bataryalara jel elektrolit eklenmektedir. Bu bataryalar bu şekilde daha çok Li-iyon-polimer batarya olarak adlandırılmaktadır. Li-polimer bataryalarının avantajları ve dezavantajları Çizelge 4.14'de verilmektedir.

Çizelge 4.14 Li-polimer bataryalarının avantajları ve dezavantajları (Buchmann., 2003)

Li-Polimer Bataryaların Avantajları ve Dezavantajları	
Avantajları	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ağırlığı düşük</li> <li>• Güvenilir, elektrolit sızıntı olma ihtimali düşük</li> </ul>
Dezavantajları	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enerji yoğunluğu düşük ve Li-iyon bataryaya göre çevrim oranı daha</li> <li>• Üretimi pahalı</li> </ul>

#### 4.2.1.3.6 Lityum-iyon Batarya

1970 yıllarında ilk şarj edilemeyen Li-iyon bataryaları geliştirilmiş ve ticari anlamda satılmaya başlanmıştır. 1980'li yıllarda ise şarj edilebilen Li-iyon bataryaları üzerine çalışmalar başlanmıştır ancak güvenilirlik problemleri nedeniyle günümüzde hala tam anlamıyla uygulamaya geçmemiştir.

Li, tüm malzemeler arasında hemen hemen en hafif olanıdır ve elektrokimyasal potansiyeli yüksektir. Bununla birlikte ağırlık başına düşen enerji yoğunluğu yüksektir. Li anotları kullanan şarj edilebilen bataryalar hem yüksek gerilim hem de yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir.

Li-iyon bataryaların enerji yoğunluğu standart NiCd bataryaları göre hemen hemen iki katıdır. Elektrot malzemelerindeki iyileştirmeler enerji yoğunluğunu daha da arttırmakta ve NiCd bataryaların üç katı kadar yüksek bir seviyeye getirmektedir. Li-iyon bataryaların kendi kendine deşarj oranı da NiCd ve NiMH bataryalarına göre düşüktür.

Li-iyon bataryalarının tek bir hücre gerilimi yüksek olduğundan batarya grubu hemen hemen tek bir hücreden oluşabilmektedir. Günümüzün mobil telefonları tek bir hücreyle

çalışabilmektedir. Hem Li-polimer bataryalar hem de Li-iyon bataryalar yüksek enerji yoğunlukları nedeniyle, elektrikli araç uygulamaları için potansiyel olarak en uygun bataryalar olarak değerlendirilmektedir. Gelecek 15-20 yıl içinde Li-iyon bataryanın henüz yüksek olan maliyetlerinin düşerek elektrikli araçlarda kullanılabilir ekonomik seviyeye inebileceği öngörülmektedir. Li-iyon bataryalarının avantajları ve dezavantajları Çizelge 4.15’de verilmektedir (Buchmann, 2003).

Çizelge 4.15 Li-iyon bataryalarının avantajları ve dezavantajları (Buchmann., 2003)

Li-iyon Bataryaların Avantajları ve Dezavantajları	
Avantajları	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek enerji yoğunluğuna sahip</li> <li>• Kendi kendine deşarjı NiCd ve NiMH bataryalarının yarısından az</li> <li>• Bakımı kolay ve düşük, periyodik deşarja gerek yok</li> </ul>
Dezavantajları	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Koruma devresine ihtiyaç duyulmakta</li> <li>• Üretimi pahalı, NiCd bataryalarından %40 daha pahalı, Maliyetin azaltılması için daha iyi üretim teknikleri geliştirilmeli</li> </ul>

Elektrikli araç uygulamalarında kullanılan bataryaların özellikleri Çizelge 4.16a ve Çizelge 4.16b’de verilmiştir.

Çizelge 4.16a Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların özellikleri (Buchmann., 2003)

Batarya Tipi	Özgül Enerji (Wh/kg)	Özgül Güç (W/kg)	Enerji verimi %	Çevrim Ömrü	Tahmin edilen Maliyet \$/kWh
Pb-asit	35-50	150-400	80	500-1000	100-150
NiCd	30-50	100-150	75	1000-2000	250-350
NiMH	60-80	200-300	70	1000-2000	200-350
Al-hava	200-300	100	<50	Bilinmiyor.	Bilinmiyor.
Zn-hava	100-220	30-80	60	500	90-120
NaS	150-240	230	85	1000	200-350
NaNiCl	90-120	130-160	80	1000	250-350
Li-polimer	150-200	350	Bilinmiyor	1000	150
Li-iyon	80-130	200-300	>95	1000	200

Çizelge 4.16b Elektrikli araçlarda kullanılan bataryaların özellikleri (Buchmann., 2003)

	NiCd	NiMH	Kurşun-asit	Li-iyon	Li-iyon polimer
Enerji yoğunluğu (Wh/kg)	45-80	60-120	30-50	110-160	100-130
Çevrim ömrü (başlangıç kapasitenin%80 azalması)	1500	300-500	200-300	500-1000	300-500
Kendi kendine deşarj/ay (oda sıcaklığında)	%20/4	%30/4	%5	%10/5	~%10/5
Hücre gerilimi (nominal)	1.25V	1.25V	2V	3.6V	3.6V
Yükleme akımı Pik En iyi durum	20C 1C	5C 0.5C yada daha düşük	5C 0.2C	>2C 1C yada daha düşük	>2C 1C yada daha düşük
Çalışma sıcaklığı (sadece deşarj)	-40- 60°C	-20-60°C	-20-60°C	-20-60°C	0-60°C
Bakım gereksinimi	30-60 gün	60-90 gün	3-6 ay	Gerek yok.	Gerek yok.
Batarya maliyeti (\$)	50	60	25	100	100
Çevrim başına maliyet (\$)	0.04	0.12	0.10	0.14	0.29
Ticari olarak kullanımı	1950	1990	1970	1991	1999

#### 4.2.2 Volan

Volan (flywheel) veya yeni kullanılan adıyla magneto-dinamik enerji depolama (MDS) sistemi, mekanik enerjiyi depo eden bir kinetik enerji depolama ünitesidir. Volanlar, döner teker ya da disk sayesinde kinetik enerjiyi depo eder. Volanların otomobillerde kullanımı geçmişten günümüze kadar devam etmektedir. Özellikle günümüzün konvansiyonel enerjinin depolanabilmesi için kullanılmaktadır. Konvansiyonel araçlarda kullanılan volanlarda depolanan enerji miktarı azdır . Volanlar özellikle hibrid elektrikli araçlarda içten yanmalı

motorla birlikte yardımcı güç ünitesi olarak kullanılır. Alternatif olarak, volanlar elektrikli araçlarda primer enerji kaynağı olarak kimyasal bataryaların yerine veya bataryalarla birlikte de kullanılabilir. Volanların elektrikli/hibrid elektrikli araçlarda enerji kaynağı olarak kullanılabilmesi için özgül enerjisinin yüksek olması gerekmektedir. Bugünün volanları karmaşık, büyük ve ağır bir yapıya sahiptirler. Bu nedenle daha ziyade günümüzde büyük hibrid yolcu transit araçları tasarımında kullanılmaya başlanmıştır. Çünkü volanların bataryalara göre çevrim ömrü, güç yoğunluğu, enerji depolama verimi daha yüksektir. Enerji yoğunluğu özellikle dönme hızına bağlıdır. Dönme hızı arttıkça özgül enerji artar fakat yüksek dönme hızı özel yataklar ve yüksek mukavemetli malzemeler gerektirdiğinden aracın maliyeti artar .

Volan tasarımında enerji yoğunluğu çok önemlidir. Volanlarda depolanan enerji  $U$  (4.21) eşitliği yardımıyla hesaplanır.

$$U = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (4.21)$$

Burada  $J$  atalet momenti ,  $\omega$  ise açısal hızdır.

Formülden görüleceği üzere, depolanan enerji atalet momenti ile direk, açısal hızın ise karesiyle doğru orantılı olarak artar. Atalet veya açısal hız artırılarak depolanan enerji artırılmış olur. Ancak ataletin artırılması demek dönen kütlenin artması demek olup, bu da karşı konulamaz atalet kuvvetleri ve sistem ağırlığının artması anlamına geleceğinden, volanın dönüş açısal hızını artırmak daha mantıklıdır.

Birim kütle başına depolanan enerji (4.22) eşitliği yardımıyla hesaplanır.

$$\frac{U}{m} = k \frac{\sigma}{\rho} \quad (4.22)$$

Burada  $k$ , geometriye bağlı sabit sayıdır.  $\sigma$  gerilme direnci  $\rho$  ise malzeme yoğunluğudur. Volanlarda kullanılan malzeme hafif yoğunluklu ve yüksek mukavemetli olmalıdır ve bu nedenle modern volanlar enerji yoğunluğunun artması için karbon fiber gibi kompozit malzemelerden yapılmaktadır.

Volanların enerji kaynağı olarak bataryalara göre çeşitli avantajları bulunmaktadır. Volan sistemlerinin en önemli avantajları yüksek çevrim ömrü, yüksek güç yoğunluğu, iyi depolama verimi ve tekrar şarj zamanının kısa olmasıdır. Teorik olarak volanların özgül gücü 5-10 kW/kg kadardır. Volanları önemli kılan diğer bir performans özelliği ise volanların mekanik doğasıdır. Volanlar sıcaklıktan etkilenmezler. Bir volanın enerji depolama verimi %90'ın üstünde olmasına rağmen konvansiyonel bataryaların %60-%70 civarındadır. Ayrıca

volanların elektrikli araç uygulamalarında kullanılması, düşük tekrar şarj hızları sayesinde frenlemede kısmi enerji geri kazanımını sağlamaya yarar. Volanlarda kimyasal prosesler olmadığı için toksik emisyonlar ve atık malzemeler açığa çıkmaz. Bu nedenle volanlar kimyasal bataryalara göre çevreye karşı daha duyarlıdır. Volanların servis ihtiyacı bataryalar göre çok daha azdır ve daha az bakım gerektirir.

Volanların avantajları yanında bazı dezavantajları da vardır. Volan enerji depolama sisteminin uygulanmasındaki en büyük zorluk sistemin çalışması için gerekli ekstra donanıma ihtiyaç duyulmasıdır. Ekstra donanımlar araca ek ağırlık getirmektedir.

Bir volan batarya gibi enerjiyi depolamak ve açığa çıkarmak için şarj ve deşarj proseslerine sahiptir ve bu nedenle elektromekanik batarya olarak da adlandırılır. Rotor mili motor ve jeneratöre bağlıdır, şarj esnasında rotor döner ve kinetik enerji depolanır, deşarj esnasında ise depolanmış enerji elektrik enerjisine dönüşür.

Birkaç firma, özellikle Almanya'da Magnet Motor ve Hollanda'da CCM hibrid elektrikli araçlarda kullanılmak üzere volan enerji depolama sistemini geliştirmiş olup özellikle Magnet-Motor firmasının çıkardığı volanlar (MDS adıyla anılmaktadır) 1988'den beri Avrupa'nın çeşitli başkentlerinde 10-12 dizel elektrikli trolleybüs vb. araçlarda güvenle kullanılmaktadır.

CCM volanları kompozit malzemelerden üretilmiştir ve 15 000 dev/dak'da dönecek şekilde tasarlanmıştır. Volan bir vakum korumasında dönmekte ve motor/generatör içermektedir. Enerji depolama verimi yaklaşık %93'dür. Motor volan ile birlikte dönmektedir.

Orijinal CCM volan 10 yıldan beri tasarlanmaktadır ve test edilip trolleybüs de kullanılmıştır. Şehir içi sürüş şartlarına uygun tasarlanmış standart dizel otobüsüne göre volanın enerji depolama verimi %93'dür ve %35 yakıtın geri kazanımı vardır.

Dönme hızının artmasıyla daha iyi özgül güç üretilmesi sağlanır. Magnet Motor MDS K3 volan ünitesi 12 000 dev/dak'da 18 kJ/kg özgül enerji sağlarken MDS K6 21 000 dev/dak'da 55 kJ/kg özgül enerji sağlar. Volanda depolanan enerji dönme hızının karesiyle arttığından daha yüksek özgül enerji değerleri özel tasarımlarla sağlanır. 1994 yılında AFS (American Flywheel Systems) tarafından 200 000 dev/dak'da dönen 970 kJ/kg özgül enerjisi olan bir volan geliştirilmiştir.

#### 4.2.3 Süperkapasitörler ve Ultrakapasitörler

Kapasitörler enerjiyi eşit pozitif ve negatif elektrostatik yüklerin ayrışmasıyla depo eden cihazlardır. Kapasitör iki tane basit plaka olarak adlandırılan iletkenle bunları ayıran ve di elektrik olarak adlandırılan yalıtkandan oluşmaktadır. Konvansiyonel kapasitörlerin güç

yoğunlukları çok yüksektir ( $\sim 10^{12} \text{W/m}^3$ ) fakat enerji yoğunlukları çok düşüktür ( $\sim 50 \text{Wh/m}^3$ ). Bu konvansiyonel kapasitörler genellikle elektrolitik kapasitörler olarak adlandırılırlar. Kapasitörler yalıtkan malzemenin dielektrik katsayısı ile orantılı ve iki iletken arasındaki boşlukla ters orantılı olan kapasitans açısından ifade edilirler. Depolanan yük miktarı yani enerji miktarı plakaların alanına ve aralarındaki mesafeye bağlıdır. Yüksek kapasite için alan büyük ve plakaların arasındaki boşluk az olmalıdır.

Süperkapasitörler ve Ultrakapasitörler konvansiyonel kapasitörlerin türevleridir. Süperkapasitörlerin ve ultrakapasitörlerin güç ve enerji yoğunlukları sırayla yaklaşık olarak  $10^6 \text{W/m}^3$  ve  $10^4 \text{Wh/m}^3$  kadardır. Enerji yoğunlukları bataryalara göre daha azdır; fakat deşarj süreleri daha hızlıdır ve çevrim ömrü daha fazladır.

Bir ultrakapasitörde plakaların arasındaki boşluk katı polimerden oluşan elektrolitle doludur. Burada plakalar bataryada olduğu gibi elektrottur; fakat kimyasal reaksiyonlar olmaz, sadece elektrot yüzeylerinde iyonlaşma olur. Elektrotlar çok yüksek yüzey alanına sahip delikli malzemedden yapılmıştır ( $>2000 \text{m}^2/\text{g}$ ).

Süperkapasitörler elektrostatik yüklerin iyonlar şeklinde depolanmasını sağlayan elektrolite sahiptir. Bir süperkapasitördeki iç fonksiyonlar elektrokimyasal reaksiyonlar içermez. Süperkapasitörlerdeki elektrotlar yüksek iç yüzey alanına sahip delikli karbondan yapılmıştır. Böylelikle iyonlar absorplanır ve konvansiyonel kapasitörlere göre daha fazla yük sağlanır.

Devam eden araştırma ve geliştirme çalışmaları  $4000 \text{W/kg}$  ve  $15 \text{Wh/kg}$  civarında kapasiteye sahip kapasitörlerin geliştirilmesini amaçlar. Süperkapasitörlerin ve ultrakapasitörlerin primer enerji kaynağı olarak hibrid elektrikli araçlarda kullanılması şimdilik biraz uzak gibi görünmektedir. Bunun yanında ivmelenme ve yokuş çıkma gibi ani güç gereksinmelerinde elektrikli ve hibrid elektrikli araçlarda bataryalara yada yakıt piline yardımcı enerji kaynağı olarak kullanılır. Pb-asit batarya, volanın ve ultrakapasitör'ün performansları Çizelge 4.17'de gösterilmiştir (Ünlü vd., 2003).

Çizelge 4.17 Pb-asit, volan ve ultrakapazitörlerin değerlendirilmesi (Ünlü vd., 2003)

	Pb-asit	Volan	Ultrakapazitör
Özgül enerji (Wh/kg)	50	5-15	3-5
(kJ/kg)	180	18-55	11-18
Özgül güç (W/kg)	150	500	300-500
Depolama verimi (%)	77	93	80-90
Normal şarj zamanı (saat)	8	sınırlanmamış	sınırlanmamış
Çevrim ömrü	600-1200	>1 000 000	>100 000

## 5. HİBRİD ELEKTRİKLİ ARAÇ DİZAYNI VE TAŞIT MEKANİĞİ

Bir taşıt fiziğın temel kurallarına göre hareket eder ve tasarlanır. Özellikle Newton'un 2. kuralı araç tasarımında önemli rol oynar. *Newton'un 2. kuralına göre bir cisim üzerine etki eden net kuvvetle doğru orantılı olarak ivme kazanır.* Net kuvvet 0'dan farklı ise cisim ivme kazanmaya başlar. Burada net kuvvet cisme etki eden toplam kuvvetlerin bileşkesidir. Bir taşıta birden fazla direnç kuvveti etki etmektedir. Buna bağılı olarak taşıt bu kuvvetlerin net bileşkesine bağılı olarak harekete geçer. Taşıttın hareketine karşı koyan bu direnç kuvvetleri özellikle *yuvarlanma direnci*, yolun eğiminden kaynaklanan *yokuş direnci*, taşıttın aerodinamiğine bağılı *hava direnci* ve *ivmelenme direncidir*. Taşıttın harekete geçebilmesi ve ivmelenebilmesi için aracın güç üretim sisteminden üretilen gücün bu kuvvetleri yenmesi gerekmektedir. Taşıttın ivmelenmesi ve hızı direnç kuvvetlerine ve güç üretim sisteminden sağlanan itme kuvvetine bağılıdır.

Bir taşıt istenilen performans değerlerini karşılayacak şekilde tasarlanır. Bununla beraber elektrikli ve hibrid elektrikli aracın tasarımı daha karışıkır. Burada güç dağılımı önemli bir parametredir. Tahrik gücünü sağlayan sistemden ne kadar güç ve enerjinin sağlanması gerektiğı belirlenmelidir. Tahrik gücünü gücü sağlayan sistem, enerji depolama sistemleri ve yardımcı sistemlerin özellikleri iyi tasarlanmalıdır. Bunun için elektrikli araç uygun tahrik gücünü sağlayacak bataryalar ve elektrik motoru tasarlanmalıdır ve hibrid elektrikli araçta ise bunun yanında içten yanmalı motor da tasarlanmalıdır. Bu alt sistemlerin güçleri belirlenmelidir. Bataryalardan sağlanan DC gerilimi eğer AC elektrik motoru kullanılıyorsa DC/AC konvertörü yardımıyla AC gerilimine dönüştürülmelidir. Tüm bu tasarımlar araçtan istenilen performans değerlerine ve araca etki eden direnç kuvvetlerine bağılıdır. Burada itme kuvveti elektrik motorundan veya içten yanmalı motordan yada her iki sistemden de sağlanabilmektedir (Husain, 2003).

### 5.1 Taşıta Etki Eden Hareket Dirençleri

Taşıttın hareketine ters yönde etki eden kuvvetlerin, taşıttın eksenini doğrultusundaki bileşenlerinin toplamına hareket dirençleri adı verilir. Taşıttın hareket edebilmesi için, taşıta etki eden hareket dirençlerinin toplamı kadar bir itme kuvvetinin, tahrik tekerlerinde oluşturulması gerekmektedir. Tahrik tekerlerinde oluşturulan itme kuvvetinin zemine iletilebilecek sınır değeri, tahrik tekerlerinin dingil yükü ile, lastikle yol arasındaki sürtünme katsayısının çarpımına eşittir. Bu değerin üzerinde uygulanacak itme kuvveti, lastikle yol arasında kaymaya (patinaj) neden olacaktır. Benzer şekilde, lastikten yola iletilecek kuvvetin sınır değerinin, toplam dirençlerden küçük olması durumunda ise hareket halindeki taşıttın

yavaşlayacak duran taşıt ise hareket edemeyecektir.(5.1) eşitliği yardımıyla hareket şartı tanımlanır.

$$\mu \cdot G_{a,\delta} \geq \Sigma W \text{ ifadesi hareket şartı olarak tanımlanır.} \quad (5.1)$$

$\mu$  : Lastikle yol arasındaki kuvvet bağlantı katsayısı.

$G_{a,\delta}$  : Dingil yükü

$\Sigma W$  : Toplam direnç

Taşıta etki eden hareket dirençleri:

- Yuvarlanma direnci ( $W_R$ )
- Yokuş direnci ( $W_s$ )
- Hava direnci ( $W_a$ )
- İvme direnci ( $W_i$ )
- Çeki direnci ( $W_c$ )

### 5.1.1 Yuvarlanma Direnci

Tekerleklerin yuvarlanması esnasında, lastiğin ve zeminin şekil değiştirmesi, yatak sürtünmelerinden, tekerleklerin yol yüzeyindeki suyu ötelemesinden ve tekerleklerin, ön düzene bağlanmasında verilen toe-in mesafesi nedeni ile içe kapalı olmalarından dolayı oluşan dirençlerin toplamına teker dirençleri adı verilir. Ancak, tekerleğin yuvarlanması esnasında; lastiğin ve zeminin deformasyonu sonucu oluşan yuvarlanma direnci yanında diğer dirençlerin ihmal edilebilir düzeyde kalması nedeniyle, uygulamada tekerlek dirençleri yerine yuvarlanma direnci kullanılmaktadır.

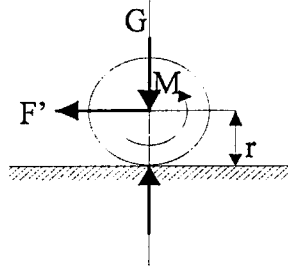
Rijit yol ve rijit teker şartında yolda ve tekerlerde herhangi bir deformasyon meydana gelmez. Tekerleğin ve yolun rijit olması durumunda tekerleğe uygulanan moment, rijit teker yarıçapına bağlı olarak bir itme kuvveti (5.2) oluşturur.

$$F_t = \frac{M_d}{r} \quad (5.2)$$

Teker ile yol arasındaki sürtünme katsayısı  $\mu$  olmak koşulu ile yararlanılabilir itme kuvveti değeri (5.3) eşitliği yardımıyla hesaplanır.

$$F_t \leq \mu \cdot N \text{ koşulu ile belirlidir.} \quad (5.3)$$

Tekerleğe etki eden kuvvetler Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Tekerleğe etki eden kuvvet (Yavaşlıol., 2003)

Gerçekte ise, gerek pnömatik tekerlerde gerekse yolda deformasyon meydana gelir. Rijit yol, rijit teker şartında, yol ile teker arasındaki çizgisel temas, deformasyonlar sonucu yüzeysel temasa dönüşür. Hareketsiz teker şartında, teker düşey eksenine göre simetrik dağılım gösteren yüzey basınçları, pnömatik tekerleğin elastik şekil değiştirmesine bağlı değer alır. Dönen tekerlekte, lastiğin elastikiyetine ve iç direncine bağlı olarak düşey eksene göre hareket doğrultusundaki temas yüzeyinde şekil değiştirmeye karşı oluşan direnç nedeniyle yüzey basıncı artış gösterirken, düşey eksenin hareket doğrultusuna aksi yönündeki temas yüzeyinde, deforme olmuş tekerleğin tekrara eski konumuna hızla dönüşmemesi etkisi nedeniyle yüzey basıncında azalma meydana gelir. Oluşan bu asimetric yüzey basıncı değişimi nedeniyle tekerlek tepkisi, teker düşey ekseninden “e” mesafesi kadar, hareket yönünde kayar. Bu durum, tekerleğin dönmesini engelleyecek şekilde, değeri “e” mesafesi ile dingil yükünün çarpımına eşit, yönü tahrik momentine zıt olan bir moment doğurur. Bu momentin, teker merkezinde, tahrik yönüne zıt yönde yarattığı kuvvet “yuvarlanma direnci” olarak tanımlanır. Tekerleğin basınç dağılımı Şekil 5.2’de gösterilmiştir.

$$G = N \quad (5.4)$$

$$N = \int_0^L p \cdot b \cdot dL \quad (5.5)$$

$$W_R = G \cdot \frac{e}{\rho_R} \quad (5.6)$$

$W_R$ : Yuvarlanma direnci (N)

$\rho_r$ : Etkili teker yarıçapı(m)

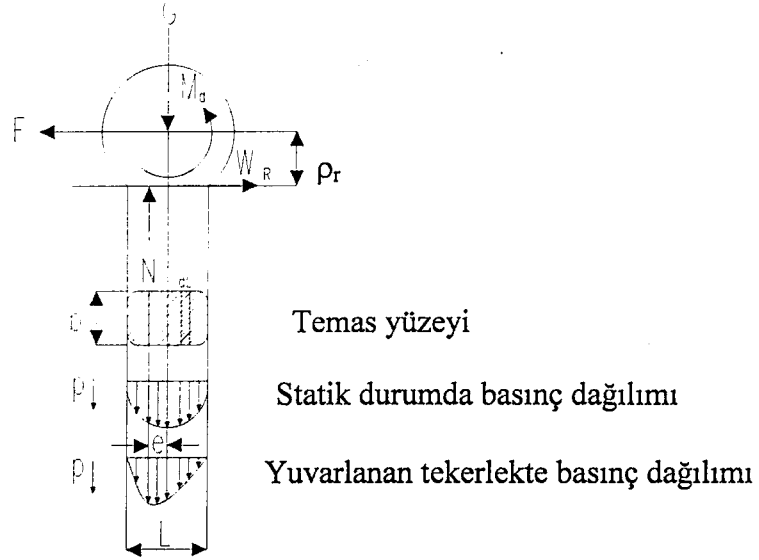
e: Teker düşey eksenini ile teker tepki merkezi arasındaki dik uzaklık (m)

$F_t$ : İtme kuvveti(N)

p: Yüzey basıncı ( $N/m^2$ )

b: İz genişliği (m)

L: İz boy (m)



$$W_R = G \cdot f_{ro} \quad (5.7)$$

Şekil 5.2 Yuvarlanan pnömatik tekerleğin temas yüzeyindeki basınç dağılımı  
(Yavaşlıol., 2003)

Yuvarlanma direncini veren ifadedeki “ $e/R_R$ ” oranı, yuvarlanma direnç katsayısı “ $f$ ” olarak tanımlanır. Yuvarlanma direnç katsayısının değeri seyir hızına bağlı olarak hesaplanır ve amprik formüllerle veya doğrudan nümerik değerle ifade edilir. Bu formüllerden bir kısmı ve pnömatik lastiklerin, yol kaplamasına bağlı olarak deneysel çalışmalarla elde edilmiş yuvarlanma direnç katsayısı değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

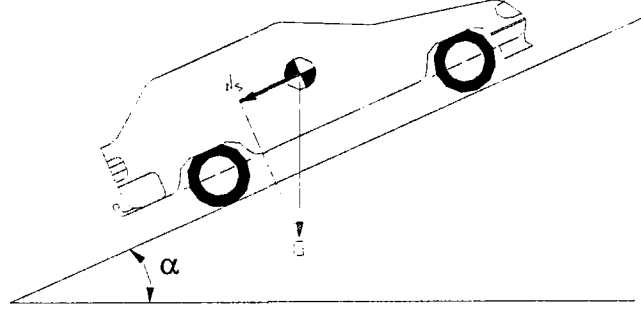
Çizelge 5.1 Değişik yok yüzeyleri için yuvarlanma direnci katsayıları (Yavaşlıol., 2003)

Yolun durumu	$f_{ro}$
Düzgün asfalt , beton	0,0015
Küçük taş döşenmiş	0,0015
İri taş döşenmiş	0,0015
Şose	0,02
Çamurlu yol	0,05
Gevşek toprak , kum	0,1.....0,35

### 5.1.2 Yokuş Direnci

Bir taşıtın herhangi bir sabit hızda (ivmesiz) tırmanabileceği maksimum yokuş; o taşıtın tırmanma yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Tırmanabileceği maksimum eğim ise, maksimum tırmanma yeteneğini belirlemektedir. Bu yetenek, özellikle ağır vasıtalar ve

karayolu dışı taşıtlar için önem kazanmaktadır. Yolun eğimi, genellikle eğim açısı ( $\alpha$ ) veya bu açının tanjantı ( $\tan \alpha = s/b$ ) ile tanımlanmaktadır. Yokuş direnci Şekil 5.3'de gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Yokuş direnci (Yavaşlıol., 2003)

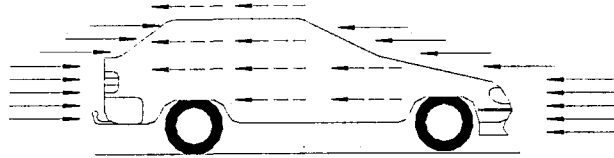
Herhangi bir eğimdeki yolda ve sabit hızda seyretmekte olan bir taşıtın karşılaştığı dirençler; yokuş, yuvarlanma ve hava dirençleridir. Yokuş direncini oluşturan kuvvet (5.8), taşıtın ağırlığının yola paralel bileşenidir.

$$W_s = \pm G \cdot \sin \alpha \text{ olacaktır.} \quad (5.8)$$

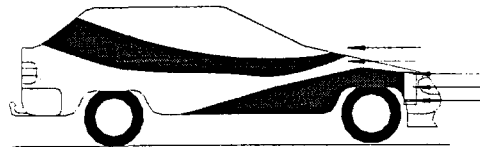
Burada (+) değerler yokuş tırmanışı, (-) değerler de yokuş yokuş inişi ifade etmektedir.

### 5.1.3 Aerodinamik Direnç

Taşıt hareketi esnasında, çevrelendiği hava tabakası akışa maruz kalır. Havanın bir kısmının dış yüzeyinden geçmesi (Şekil 5.4) dış kayıpları, taşıtın radyatör ve havalandırma kanallarından geçmesi, iç akış kayıplarını (Şekil 5.5) oluşturur. Dış akış nedeni ile oluşan kayıplar, taşıtın ön ve arka yüzeyleri arasında oluşan basınç farkından ve taşıt yüzeyinin hava tabakası ile sürtünmesinden ortaya çıkar. Hava direncini oluşturan etkilerin yüzde oranları Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Dış akış basınç ve sürtünme hatları (Yavaşlıol., 2003)



Şekil 5.5 İç akış (Yavaşlıol., 2003)

Çizelge 5.2 Hava direncini oluşturan etkenlerin etki yüzdeleri (Yavaşlıol., 2003)

Hava direnci oluşturan etkiler	Yüzdesi
Taşıtı ön ve arka yüzeyleri arasındaki basınç farkı	55 ÷ 60
Taşıttın yüzeyinin hava ile sürtünmesi	8 ÷ 10
Aksesuarlar (Ayna, tampon, silecek, vs.)	12 ÷ 18
İç akım (Radyatör, hava kanalları, kaput altı boşluklardan geçen hava)	10 ÷ 15
Taşıttın üst ve alt yüzeyleri arasındaki basınç farkı	5 ÷ 8

Taşıttın şekillendirilmesi, hava direncine etki eden temel faktördür. Bir taşıt üzerindeki hava akışının karmaşık olması sebebiyle deneysel modellerin geliştirilmesi ihtiyaç halini almış ve aerodinamik kuvvet (5.9) ampirik bir ifade ile belirlenmiştir.

$$W_a = \frac{1}{2} \cdot \rho_h \cdot C_D \cdot A \cdot V^2 \quad (5.9)$$

$V(m/s)$  Rüzgarın hızına ve yönüne göre taşıt hızı , seyir hızı ve rüzgar hızına bağlı olarak (5.10 ve 5.11) eşitliğindeki değerleri alır.

$$V = (V_T - V_R) \text{ Taşıt ile rüzgar aynı yönde hareket ediyor ise ;} \quad (5.10)$$

$$V = (V_T + V_R) \text{ Taşıt ile rüzgar ters yönde hareket ediyor ise ;} \quad (5.11)$$

$V < 50$  (km/h) koşullarında hava direnci değeri düşük olduğundan hesaplamalarda ihmal edilebilir.

$W_a$ : Hava direnci(N)

$\rho_h$ : Havanın özgül kütlesi ( $kg/m^3$ )

$V$ : Rüzgarın hızına ve yönüne göre taşıt hızı (m/s)

$V_T$ : Taşıttın seyir hızı (m/s)

$V_R$ : Rüzgar hızı (m/s)

$C_D$ : Aerodinamik direnç katsayısı

$A$  : Hareket doğrultusuna dik izdüşüm alanı ( $m^2$ )

Hava direncinin az olması için, taşıttın hareket doğrultusundaki iz düşüm alanı, aerodinamik direnç katsayısı ve seyir hızı düşük olmalıdır.

#### 5.1.4 İvme Direnci

Newton'un II. Hareket yasasına göre; bir taşıttın hızlanması veya yavaşlaması sırasında , bu hareketlere ters yönde atalet kuvvetleri oluşmaktadır.

Newton'a göre bu kuvvet (5.12) eşitliği yardımıyla hesaplanır.

$$F = m \cdot a \text{ (N)} \quad (5.12)$$

Taşıtın hareketi sırasında karşılaşılan bu kuvvet, ivme ile ters yönlü olduğundan, ivme direnci ( $W_i$ ) olarak tanımlanacaktır. İvme direnci doğrusal hareket halindeki kütlelerin atalet kuvvetleri ile; dönme hareketi yapan tekerlekler, aktarma organları ve motorun dönel atalet kuvvetlerinden oluşmaktadır. Taşıt hızındaki bir değişim, dönen bu elemanların hızlarının değişmesi ile sağlanmaktadır.

### 5.1.5 Çeki Direnci

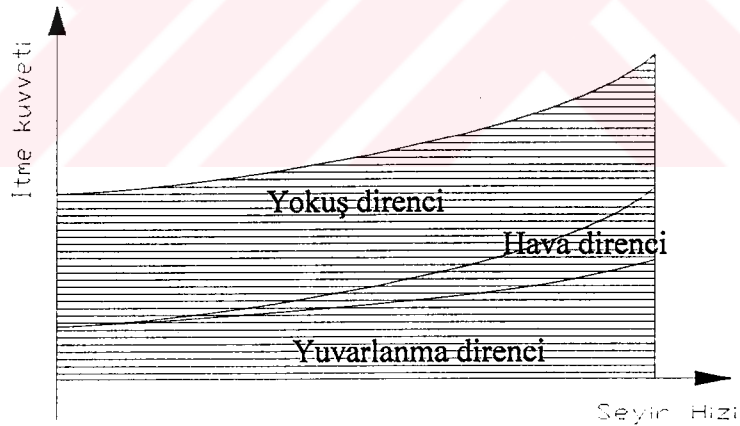
Bir taşıta yedeğinde çektiği araç nedeniyle etki eden direnç kuvvetidir. Bu kuvvet çekilen araca etki eden hareket dirençlerinin (5.13) toplamına eşittir.

$$W_C = W_{R_c} + W_{a_c} + W_{i_c} + W_{S_c} \quad (5.13)$$

### 5.1.6 Toplam Direnç

Toplam direnç kuvveti (5.14) eşitliği yardımıyla hesaplanır.

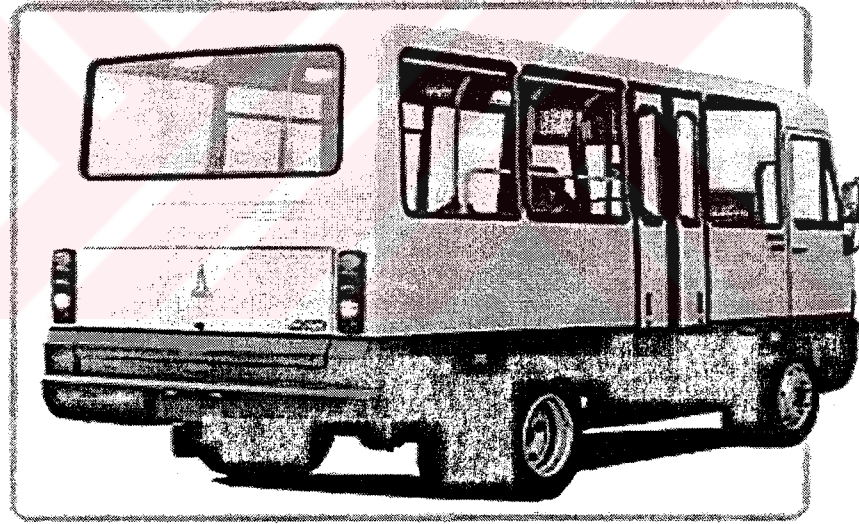
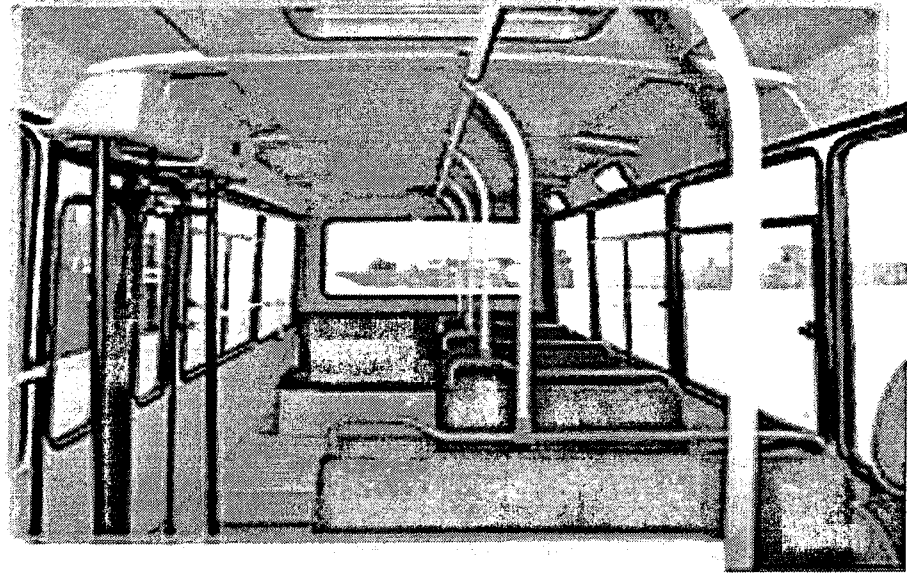
$$\Sigma W = W_R + W_a + W_S + W_i + W_C \text{ (Şekil 5.6) (Yavaşlıol, 2003)} \quad (5.14)$$



Şekil 5.6 Araca etki eden toplam yol dirençleri (Yavaşlıol, 2003)

## 5.2 M2000 Konvansiyonel Aracın Seri Hibrid Elektrikli Araca Dönüştürülmesi

OTOKAR'a ait M2000 adlı minibüs tarzı 14 kişi oturarak ve 2 kişi de ayakta olmak üzere toplam 16 kişilik toplu taşıma aracının resimleri Şekil 5.7'de görülmektedir.



Şekil 5.7 M2000 araç resimleri (<http://www.otokar.com.tr>)

OTOKAR'dan sağlanan M2000 konvansiyonel araç teknik özellikleri Çizelge 5.3'de, M2000 seri hibrid elektrikli araç tasarımında kullanılan alt sistemlerin özellikleri ise Çizelge 5.4'de ise verilmiştir.

Çizelge 5.3 M2000 aracının teknik özellikleri (Otokar araç üreticisi)

M2000 boş araç ağırlığı (m,kg)	3600
İçten yanmalı motor ağırlığı (kg)	350
Ön yüz alanı (A, m <sup>2</sup> )	4,28
Yuvarlanma katsayısı (f)	0,007
Aerodinamik direnç katsayısı (Cd)	0,7
Hava yoğunluğu (q, kg/m <sup>3</sup> )	1,2
Diferansiyel oranı	3,9
1. Vites dişli oranı	6,364
2. Vites dişli oranı	3,322
3. Vites dişli oranı	2,135
4. Vites dişli oranı	1,407
5. Vites dişli oranı	1
Tekerlek çapı (d,m)	0,37
Transmisyon kaybı	Bilinmiyor.
Aracın gücü (Ne,kW)	73BG/2800 dev/dak
Maksimum momenti (Me,Nm)	230Nm/1500 devir/dak
Maksimum hızı (V,km/h)	105
Aracın boyu (L,mm)	5642
Aracın eni (e,mm)	2040
Aracın yüksekliği (h,mm)	2670

Çizelge 5.4 Tasarlanan aracın toplam ağırlığı

Aracın İlk Ağırlığı (kg)	3600	Generatör için içten yanmalı motor ağırlığı (kg)	371
İçten yanmalı motor ağırlığı (çıkarılan)(kg)	350	Generatör ve kontrolör ağırlığı (kg)	180
Transmisyon ağırlığı (çıkarılan)(kg)	150	Batarya sayısı	25
Elektrik motoru ağırlığı (kg)	120	Batarya ağırlığı	19,5
İnvertör ağırlığı (kg)	65	Bataryaların toplam ağırlığı	487,5
Konvertör ağırlığı (kg)	20	Transmisyon ağırlığı	50
Kablo ve diğer ağırlıklar (kg)	30	Şöför ve yolcu (14+2) ağırlığı	1580
		Tasarlanan aracın toplam ağırlığı (kg)	6000

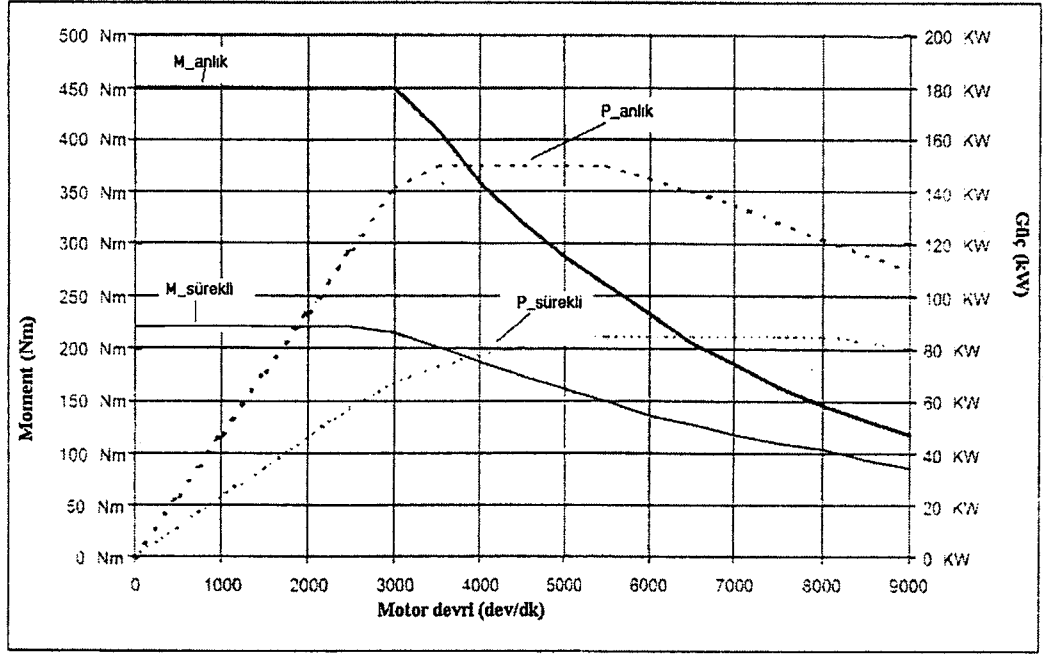
## 5.2.1 M2000 Hibrid Elektrikli Aracın Alt Sistem Özellikleri

### 5.2.1.1 Tahrik Sistemi

M2000 seri hibrid elektrikli aracının tasarımında tahrik sistemini olarak nominal gücü yaklaşık 5000-7500 dev/dak aralığında 85 kW olan Siemens elektrik motoru kullanılmaktadır (Şekil 5.8). Bu motor bataryalardan ve dizel-jeneratör setinden aldığı elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek tahrik tekerlerinde mekanik güç sağlar. Bu sistemde toplam 75 kW gücünde 25 adet Pb-asit batarya grubu ve 2500 dev/dak'da 85 kW nominal gücü olan dizel-jeneratör seti kullanılmıştır. Sistemden toplam 160 kW güç sağlanmaktadır. Kullanılan elektrik motorunun anlık maksimum güç değeri 3500-5500 dev/dak aralığında 150 kW'dır. Dolayısıyla elektrik motorunun üreteceği maksimum güç 150 kW olacaktır. Burada 108 kW gücünde dizel motoru 2500 dev/dak'da 85 kW nominal gücünde jeneratörü sürmektedir. Sistemdeki enerji yönetimi önce bataryalardan sağlanan güçle ivmelenme sağlanacak, bataryaların gücü yetmediği durumda jeneratör devreye girerek enerji eksikliğini kapatacak, fazla enerji ise araç sabit hızda giderken bataryaları besleyecek şekilde tasarlanmıştır. Kullanılan elektrik motorunun teknik özellikleri Çizelge 5.5'de, sürekli ve anlık moment ve güç değerleri ise Şekil 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.5 Siemens elektrik motorunun teknik özellikleri (Siemens elektrik motoru üreticisi)

Tip	AC İndüksiyon motor
Soğutma türü	Su-glikol
Nominal voltaj DC	650 V
Nominal güç	85 kW
Nominal moment	220 Nm
Nominal akım	42 A
Max hız	9.000 dev/dak
Ağırlık	120 kg
Boyutlar (u-g-y)	510*245*245 mm
Çalışma sıcaklığı	-30oC-70oC



Şekil 5.8 Siemens elektrik motorunun anlık ve sürekli güç ve moment değerleri (Siemens elektrik motoru üreticisi)

### 5.2.1.2 Enerji depolama Sistemi

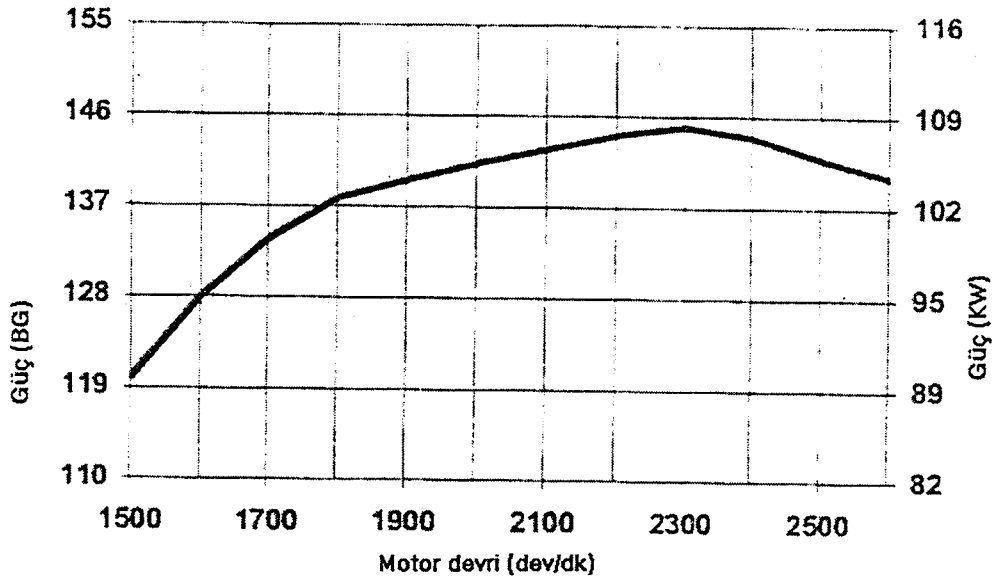
Elektrik motoru kendi invertörü ile kontrol edilmektedir. Siemens elektrik motorunun invertörü 150-650 V değerleri arasında çalışmaktadır. Burada sistemin bara gerilimi inverterin çalışma gerilim değerleri arasında olmaktadır. Yani bara gerilimi 650 V'un yukarısında ve 150 V'un aşağısında olmamalıdır. Sistemin bara gerilimi toplam batarya sayısını belirlemektedir. M2000 aracı için seçiler Pb-asit bataryalar tam dolu iken 12.6 V, boşken 11.8 V yüklü durumda 9.5 V arasında değişim göstermektedir.. Bataryaların şarj gerilimi 15 V olduğundan 25 bataryanın toplam şarj gerilimi (375 V) maksimum bara gerilimini, dolu durumda 25 bataryanın toplam gerilimi ortalama bara gerilimini (315 V), yük durumunda toplam gerilimi ise minimum bara gerilimini (237.5V) oluşturmaktadır. İnverter bu değerlerin altına ve üstüne çıkılmasına müsaade etmeyecektir. Dolayısıyla bizim çalışma gerilimimiz 237.5-375 V arasında değişecektir. Hesaplarda ortalama bara gerilimi olan 315 V kullanılmıştır. Bara gerilimi 650 V'a kadar bu değerden yukarı olabilir ancak bu batarya sayısını artırır. Batarya sayısının artması ağırlığı arttıracığından sistemin performansı düşer. Ancak batarya sayısının artması sistemde depolanan enerji miktarını arttıracığından aracın sessiz sürüş menzilini arttırmaktadır. Kullanılan bataryanın teknik özellikleri Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6 Optima Pb-asit bataryanın teknik özellikleri (Optima batarya üreticisi)

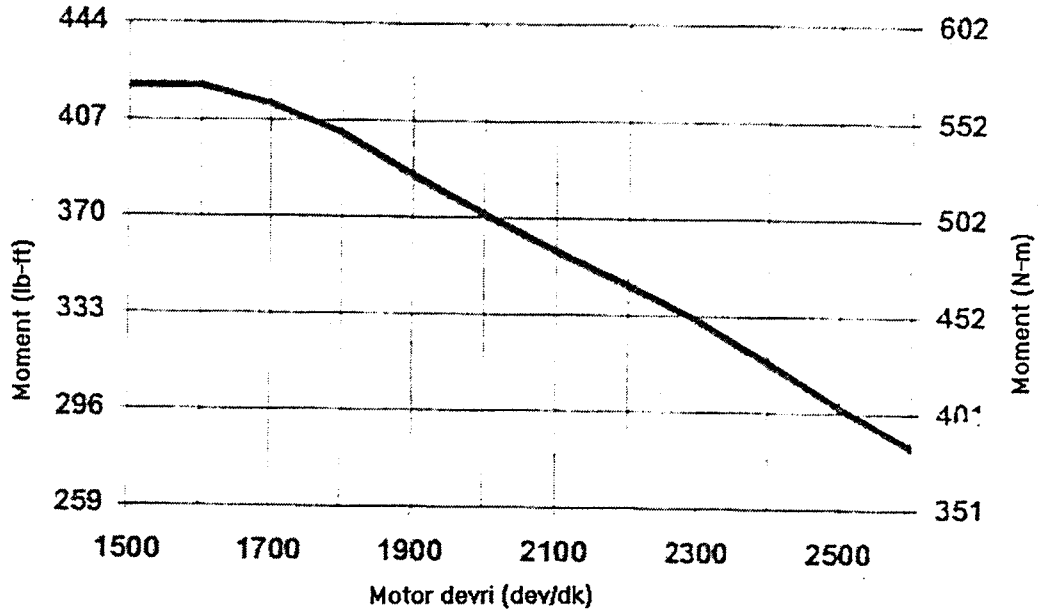
Üretici	Optima Batarya
Batarya modeli	D34
Nominal Gerilim	12 V
Batarya türü, Elektrolit	Pb-asit, Sülfürik asit
Boy, Eni, Yüksekliği	254, 172, 198 mm
Açık devre gerilimi (Tam şarjlı)	13.2 V
İç direnç	0.0028 ohm
Kapasite	55 Ah (C/20)
Batarya şarjı	13.8-15 V
Minimum ağırlık	19.49

### 5.2.1.3 Güç Üretim Sistemi

Güç üretim sistemi 85 kW nominal gücünde dizel-jeneratör setinden ve anlık 75 kW gücünde 25 adet Pb-asit bataryadan oluşmaktadır. Burada Cummins dizel motoru 2300 dev/dak'da 108 kW ve jeneratör 2500 dev/dak'da 85 kW nominal güç üretmektedir. Dizel-jeneratör seti sistemde sadece bataryalardan sağlanan gücün yetmediği durumlarda güç sağlayarak, fazla güçle araç sabit hızda giderken bataryaları şarj edecektir. Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da sırayla dizel motorun güç ve moment değerleri, Çizelge 5.7 ve Şekil 5.11'de sırayla Siemens jeneratörün teknik özellikleri ve anlık ve sürekli güç ve moment değerleri verilmiştir.



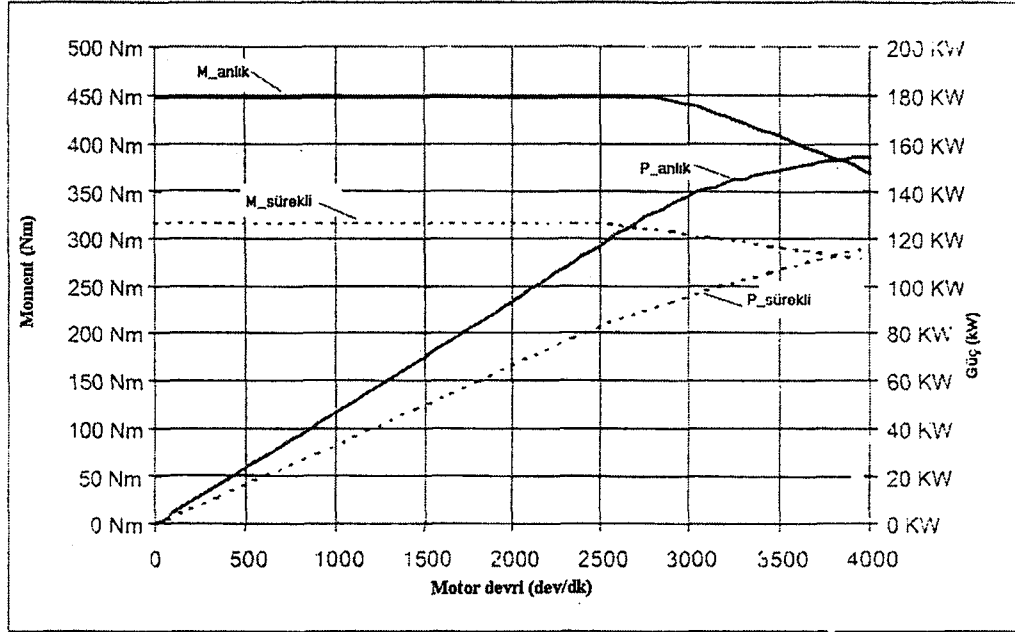
Şekil 5.9 Cummins dizel motorun güç değerleri (Cummins dizel motoru üreticisi)



Şekil 5.10 Dizel motorun moment değerleri (Cummins dizel motoru üreticisi)

Çizelge 5.7 Siemens jeneratörünün teknik özellikleri (Siemens jeneratör üreticisi)

Tip	PM Senkron jeneratör
Soğutma türü	Su-glikol
Nominal voltaj DC	650 V
Nominal güç	85-2500dev/dak
Nominal moment	320 Nm
Maksimum moment	450 Nm
Nominal akım	170 A
Max hız	4.000 dev/dak
Ağırlık	120 kg
Boyutlar (u-g-y)	550*245*245 mm
Çalışma sıcaklığı	-30°C-70°C



Şekil 5.11 Siemens jeneratörünün anlık ve sürekli güç ve moment eğrileri (Siemens jeneratör üreticisi)

### 5.2.2 M2000 Seri Hibrid Elektrikli Aracının Yük Hesapları

Aracın performansının belirlenebilmesi için her 10 km/h hız değişimlerine göre düz yol ve %20 eğimli yokuş için yol yükü hesapları yapılmıştır. M2000 aracının teknik özellikleri OTOKAR'dan sağlanmış olup aracın her 10 km/h hıza karşılık gelen ;

- Tekerlek ve motor devri ,
  - Düz yolda ve %20 eğimli yokuşta ivmelenmek için toplam motor gücü, momenti ve akımı,
  - Düz yolda ve %20 eğimli yokuşta sabit hız için toplam motor gücü, momenti ve akımı,
- hesaplanmış ve çizelge şeklinde belirlenmiştir.

Düz yolda ivmelenme ve sabit hızda elektrik motorunun momenti istenen moment değerini karşıladığı için transmisyon kullanılmamıştır (Çizelge 5.8a). Elektrik motorların en büyük özellikleri kalkış momentlerin yüksek olmasıdır. İçten yanmalı motorlarda düşük devirlerde momenti düşük olduğundan transmisyona ihtiyaç varken elektrik motorlarında yoktur. Sadece yokuşta ivmelenme ve yokuşta sabit hız için 2.75:1 oranında tek kademeli bir hız düşürücü kullanılmıştır. Bu nedenle aracın kendi transmisyonu da çıkarılmıştır.

Excel tablosunda her 10 km/h için düz yol ve %20 eğimli yokuşta gerekli motor yük hesapları yapılmış olup, bu değerlere göre aracın ivmelenmesi ve sabit hızı için kullanılan Siemens motorun anlık ve sürekli güç ve moment değerlerine göre değişken ivme, motor gücü ve moment değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlere göre aracın performansı belirlenmiştir.

Yapılan hesapların sonuçları ve üreticiden elde edilen elektrikli motorunun her devre karşı gelen anlık ve sürekli güç-moment değerleri Çizelge 5.8a ve Çizelge 5.8b’de verilmiştir.

Burada kabul edilen bazı değerler;

M: Aracın kütlesi (6000,kg)

g: Yer çekimi ivmesi (9,81,m/s<sup>2</sup>)

V<sub>K</sub>: Aracın km/h olarak hızı

V<sub>T</sub>: Aracın m/sn olarak hızı

Bara gerilimi 315 V

$\rho$ : Havanın özgül kütlesi (1,2,kg/m<sup>3</sup>)

C<sub>D</sub>: Aerodinamik direnç katsayısı (0.7)

A: Aracın ön izdüşüm alanı (4,28,m<sup>2</sup>)

f<sub>ro</sub>: Yuvarlanma direnç katsayısı (0,007)

r: Tekerlek yarıçapı (0,37/2,m)





## Çizelge 5.8a devamı Düz yolda araç yük hesapları

Düz yolda sabit hız için gerekli, motor gücü, momenti ve akımı															
	0,0	1,2	2,7	4,7	7,4	11,1	13,3	15,9	22,3	30,3	40,3	52,5	67,1	84,3	104,5
Düz yolda hibrid sistemle sabit hız için gerekli motor gücü (Nedhs,kW)	0,0	21,2	23,3	26,7	31,6	37,8	41,4	45,4	54,4	64,7	76,5	89,6	104,1	120,0	137,3
Düz yolda hibrid sistemle sabit hız için gerekli motor momenti (Medhs,Nm)	0,0	3,9	8,7	14,9	23,5	35,1	42,3	50,6	70,8	96,3	128,0	166,6	212,9	267,7	331,8
Düz yolda hibrid sistemle sabit hız için gerekli akım (Idhs,Amper)															
<b>Siemens elektrik motorunun özellikleri</b>															
Siemens motor güç (anlık)	0,0	25	50	75	100	125	138	150	150	150	150	150	145	135	125
Siemens motor güç (sürekli)	0,0	15	30	45	55	65	70	75	80	85	85	85	85	85	85
Siemens motor moment (anlık)	450	450	450	450	450	450	450	425	360	310	280	250	225	200	175
Siemens motor moment (sürekli)	220	220	220	220	220	220	215	205	190	175	155	140	130	125	115

Çizelge 5.8b%20 eğimli yokuşta araç yük hesapları

Motor güç ve moment yük hesapları için gerekli değerler										
Hız ( $V_k$ , km/h)	0	10	20	30	40	50	55	60		
Araçın kütlesi (M, kg)	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000
Hız ( $V_r$ , m/sn)	0,0	2,8	5,6	8,3	11,1	13,9	15,3	16,7		
Teker devri ( $n_b$ , dev/dk)	0,0	143,5	286,9	430,4	573,8	717,3	789,0	860,7		
Diferansiyel redüksiyonu	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9		
Motor devri ( $n_m$ , dev/dk)	0,0	559,5	1119,0	1678,4	2237,9	2797,4	3077,1	3356,9		
Açıl hız ( $w$ , dev/dk)	0,0	58,6	117,1	175,7	234,2	292,8	322,1	351,4		
Yokuş için gerekli vites redüksiyonu	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75	2,75		
<b>%20 eğimli yokuşta yük hesapları</b>										
Yokuş (%20) tırmanmak için gerekli teker gücü ( $P_s$ , kW)	0,0	32,7	65,4	98,1	130,8	163,5	179,9	196,2		
Yokuşta (%20) yuvarlanma gücü ( $P_{yr}$ , kW)	0,0	1,1	2,2	3,4	4,5	5,6	6,2	6,7		
Yokuşta (%20) aerodinamik güç ( $P_{ya}$ , kW)	0,0	0,0	0,3	1,0	2,5	4,8	6,4	8,3		
<b>%20 eğimli yokuşta hibrid sistemle ivmelenme için gerekli ivmelenme değeri, motor gücü, momenti ve akımı</b>										
Yokuşta hibrid sistemle ivmelenme için toplam motor gücü (Neyi, kW)	0	70	125	150	150	135	125	115		
Yokuşta hibrid sistemle ivmelenme için gerekli motor momenti (Meyi, Nm)	0,0	1195,4	1067,3	853,8	640,4	461,1	388,1	327,3		
Vites redüksiyonuna göre motor devri (nmv, dev/dk)	0,0	1538,6	3077,1	4615,7	6154,2	7692,8	8462,1	9231,4		
Vites göre açıl hız (wv, dev/dk)	0,0	161,0	322,1	483,1	644,1	805,2	885,7	966,2		
Yokuşta hibrid sistemle ivmelenme için vites göre gerekli motor momenti Meyiv, Nm)	451,1	1434,7	388,1	310,5	232,9	167,7	141,1	119,0		

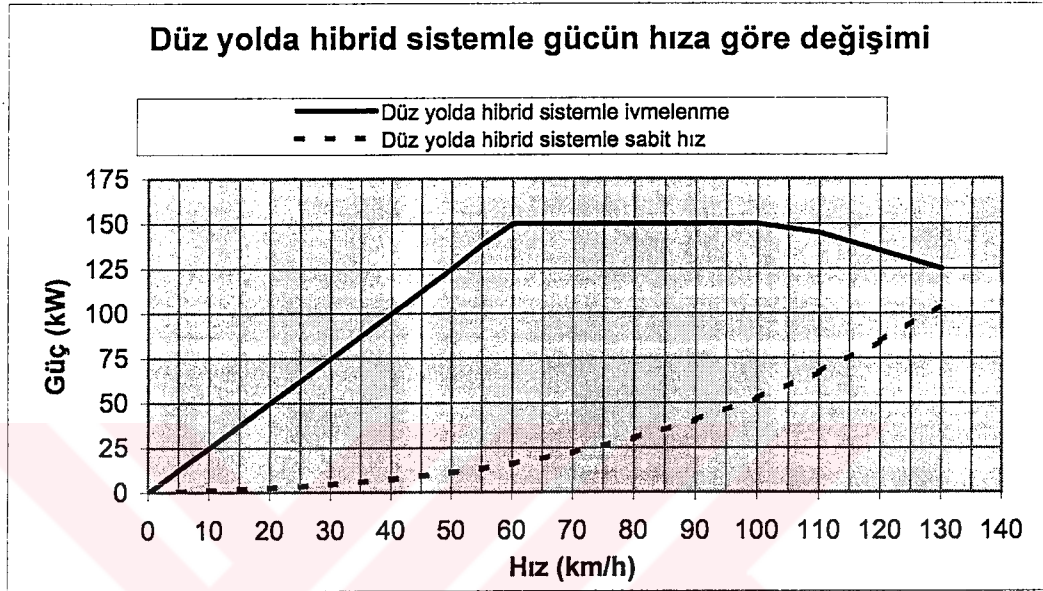
Çizelge 5.8b devamı %20 eğimli yokuşta araç yük hesapları

Yokuşta hibrid sistemle ivmelenme için teker gücü (P <sub>yi</sub> ,kW)	0,0	36,1	57,0	47,5	12,2	0,0	0,0	0,0
Yokuşta hibrid sistemle ivmelenme değeri (a <sub>yi</sub> ,m/sn <sup>2</sup> )	0,0	2,2	1,7	0,9	0,2	0,0	0,0	0,0
Yokuşta hibrid sistemle ivmelenme süresi (a <sub>yi</sub> ,sn)	0,0	1,3	3,2	8,8	60,5	0,0	0,0	0,0
Yokuşta hibrid sistemle ivmelenme için gerekli akım (I <sub>yi</sub> , Amper)	0,0	222,2	396,8	476,2	476,2	428,6	396,8	365,1
<b>%20 eğimli yokuşta hibrid sistemle sabit hız için gerekli motor gücü, momenti ve akımı</b>								
Yokuşta hibrid sistemle sabit hız için toplam motor gücü ( Neys ,kW)	0,0	35,6	71,3	107,6	144,6	182,6	202,1	221,8
Yokuşta hibrid sistemle sabit hız için toplam motor momenti (Meys,Nm)								
Yokuşta hibrid sistemle sabit hız için vitese göre gerekli motor momenti (Meysv,Nm)	455,5607,1	609,2	612,7	617,5	623,7	627,3	631,3	
Yokuşta hibrid sistemle sabit hız için gerekli akım (I <sub>ys</sub> , Amper)	0,0	112,9	226,5	341,7	459,2	579,7	641,4	704,2
<b>Siemens elektrik motorunun özellikleri</b>								
Siemens motor güç (anlık)	0	70	125	150	135	125	115	
Siemens motor güç (sürekli)	0	35	65	85	85	85	85	
Siemens motor moment (anlık)	450	450	450	340	250	180	150	140
Siemens motor moment (sürekli)	220	220	220	175	140	120	110	95

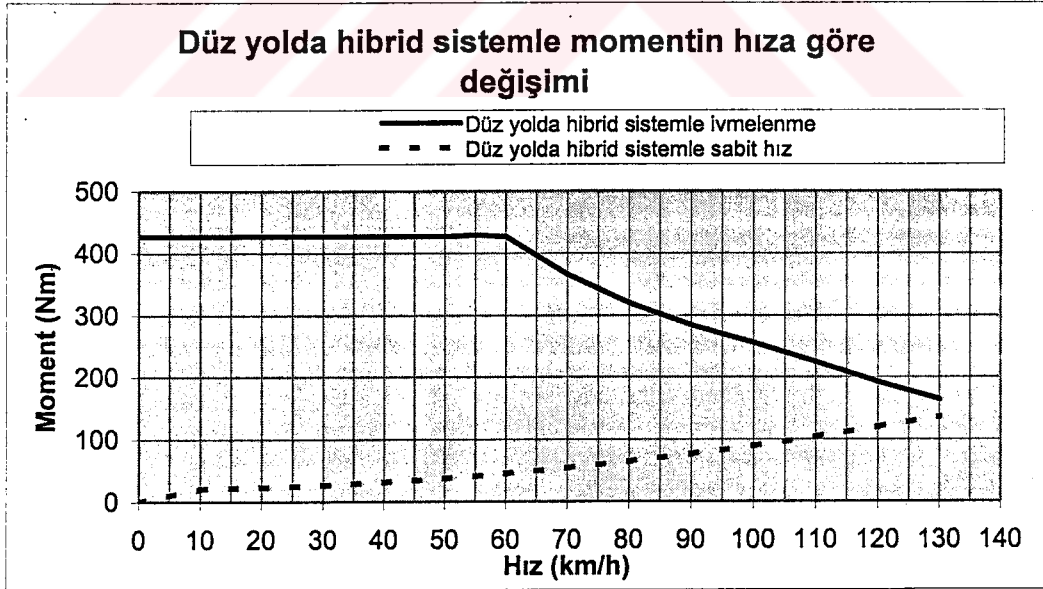
### 5.2.3 Aracın Performansı

#### 5.2.3.1 Hibrid Sistemle Düz Yolda İvmelenme

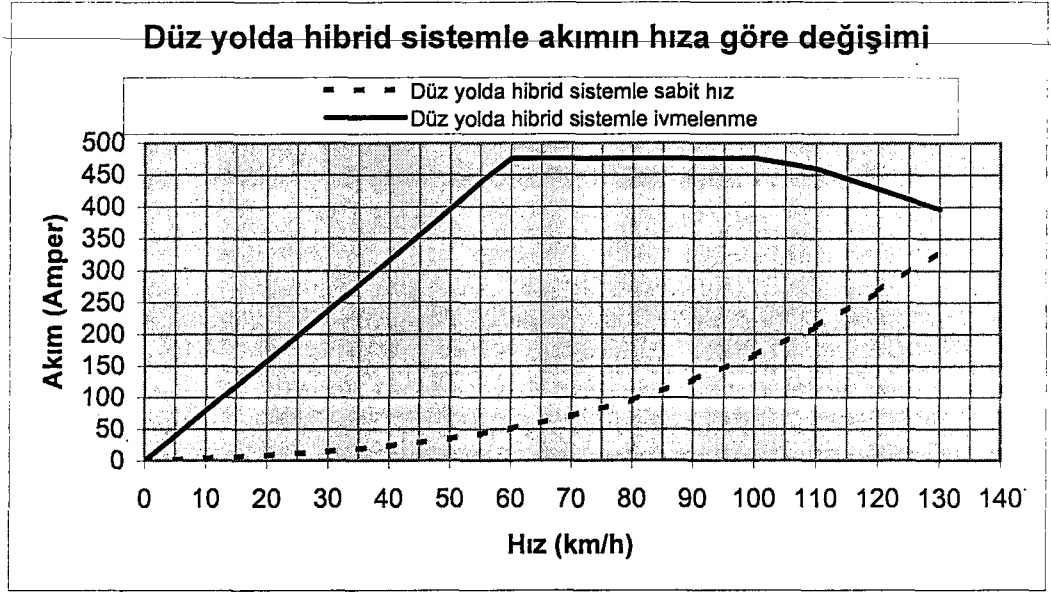
Düz yolda hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hızda gitmek için çektiği motor gücü, momentini ve akım değerleri Çizelge 5.8a sonuçlarına göre hazırlanan Şekil 5.12 Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'deki grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 5.12 Düz yolda hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için gücün hıza göre değişimi

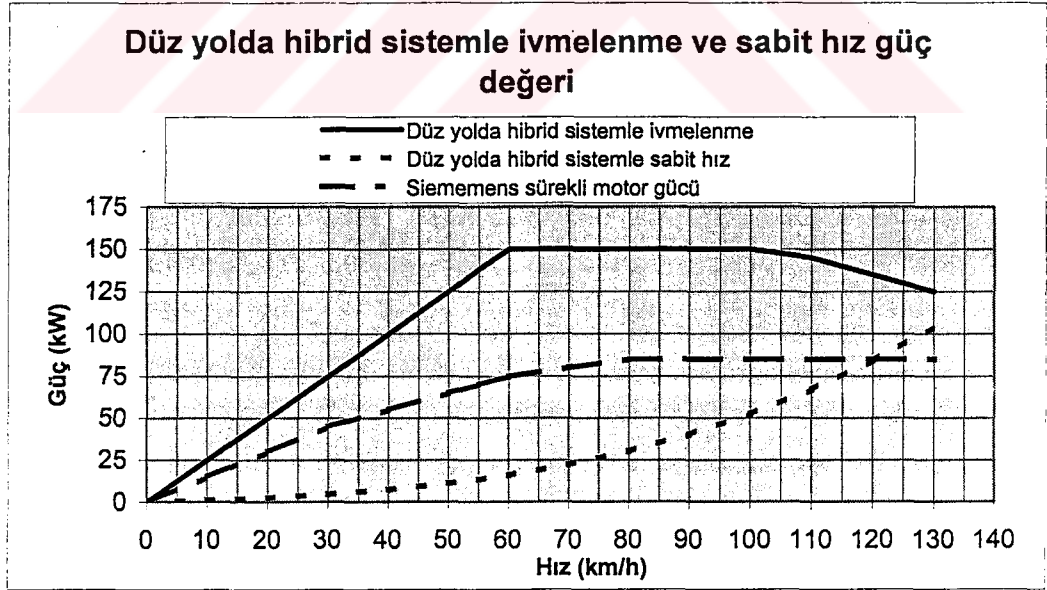


Şekil 5.13 Düz yolda hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için momentin hıza göre değişimi

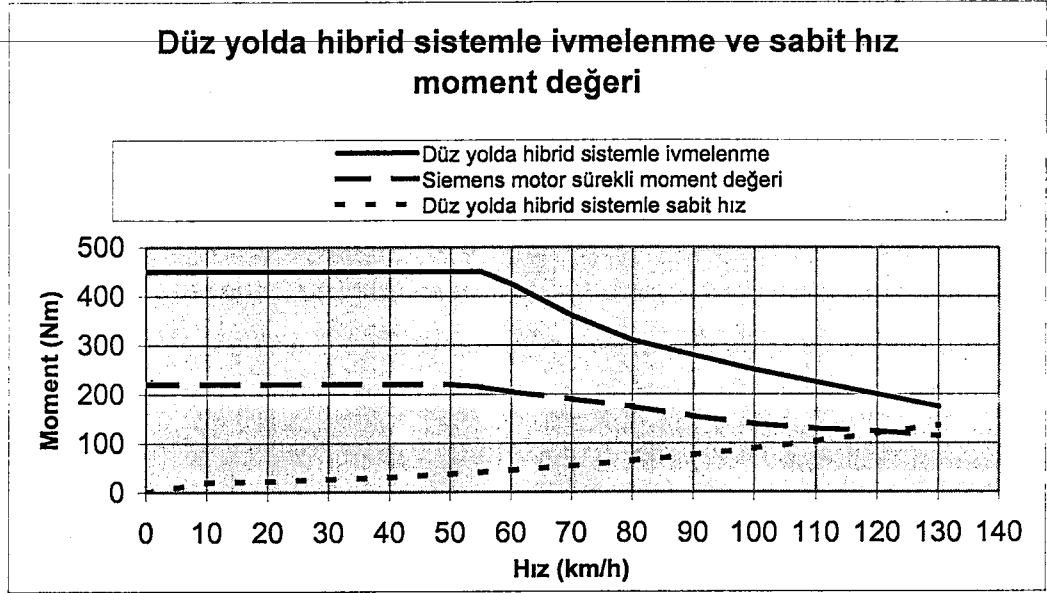


Şekil 5.14 Düz yolda hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için akımın hıza göre değişimi

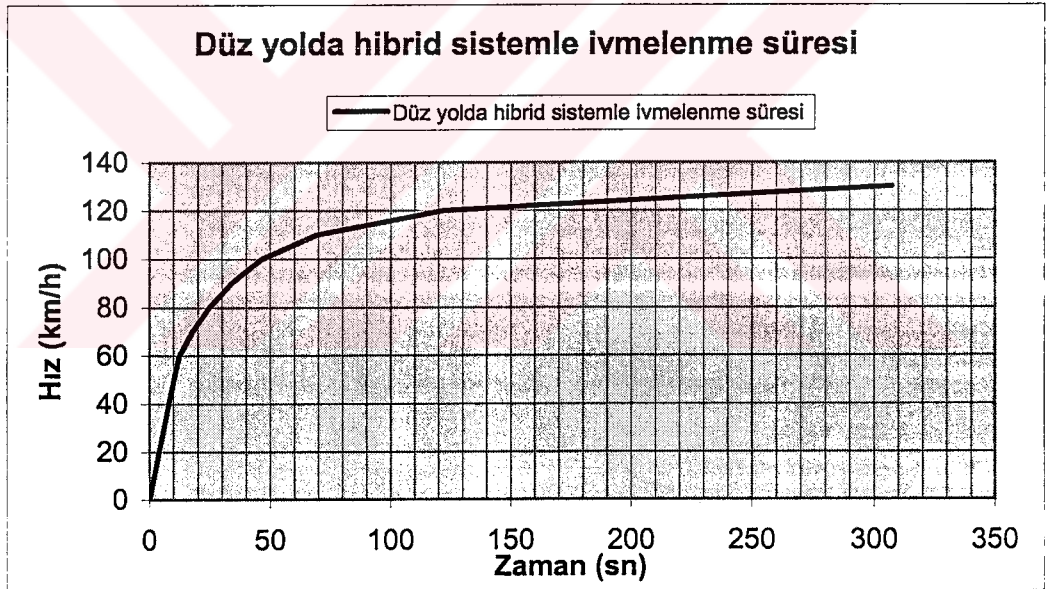
Aracın hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için ihtiyaç duyduğu güç ve moment değerleriyle Siemens elektrik motorunun verebileceği güç ve moment değerlerinin kesişimi Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da ve hibrid sistemle aracın düz yolda ivmelenme süresine göre performanslı bir şekilde ivmelenebileceği maksimum hız değeri ise Şekil 5.17'de görülmektedir.



Şekil 5.15 Düz yolda hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için elektrik motorunun verebileceği güç değerleri



Şekil 5.16 Düz yolda hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için elektrik motorunun verebileceği moment değerleri



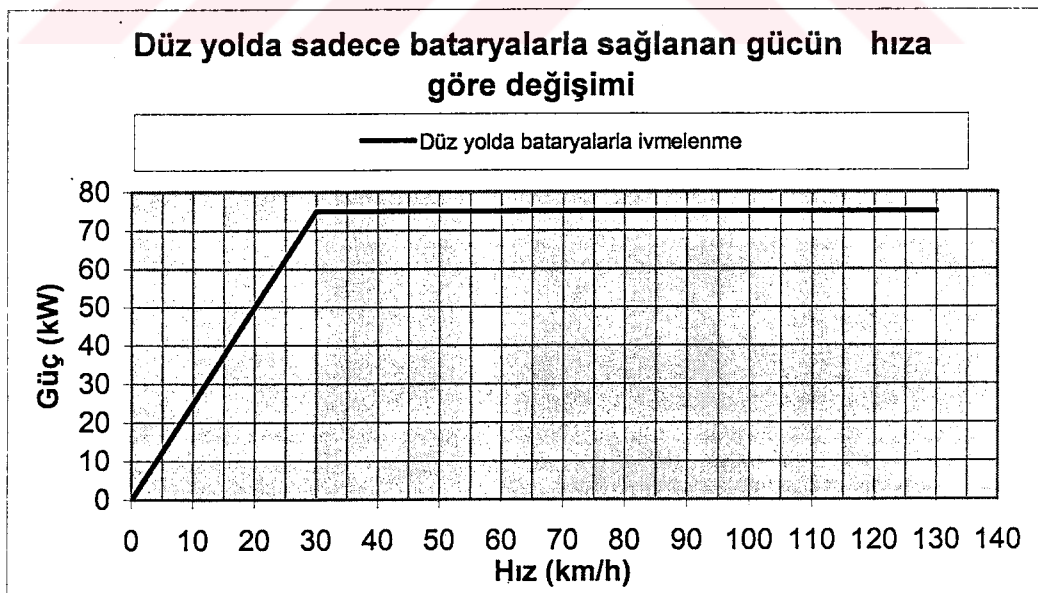
Şekil 5.17 Düz yolda aracın hibrid sistemle ivmelenme süresine göre maksimum ivmelenme hızı

Bu aracın güç üretim sistemi olarak 55 Ah kapasitesinde, anlık 75 kW güç verebilen toplam 25 adet batarya grubu ve 85 kW nominal gücü olan dizel-jeneratör seti seçilmiştir. Dolayısıyla bu araçta toplam 160 kW değerinde güç kaynağı bulunmaktadır. Ancak kullanılan Siemens elektrik motorunun 3500-5500 dev/dak'da ivmelenme esnasında anlık olarak verebileceği maksimum güç 150 kW'dır. Dolayısıyla bu araçta maksimum 150 kW güç üretilecektir. İvmelenmek için gerekli olan güç hem batarya hem de jeneratörden yani hibrid sistemden

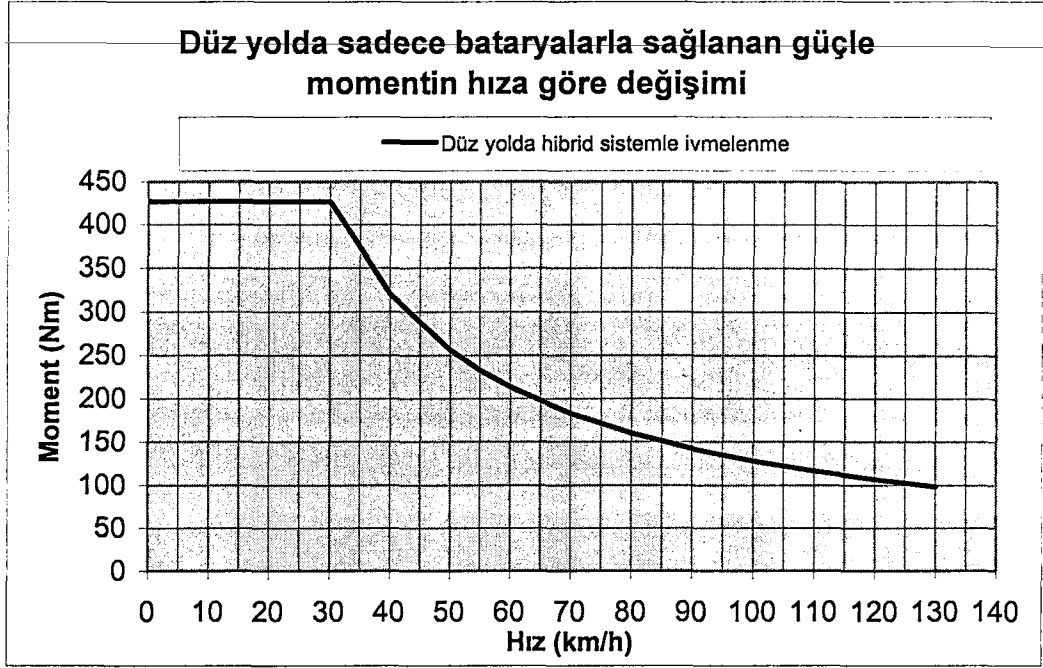
sağlanırsa araç yaklaşık olarak 80 km/h'e kadar performanslı bir şekilde 24,5 sn'de ivmelenmektedir. Bu hız değerlerinden sonra aracın ivmelenme değeri 0.7'lere düşmekte ve 130 km/h için ivme değeri 0.1 olmaktadır (Çizelge 5.8a) ki bu da neredeyse aracın artık hiç hızlanmaması demektir. Bu nedenle ivmelenme süresi artarak aracın hızlanma performansı düşmektedir. Araç ivmelenme esnasında her hıza karşı gelen devirde elektrik motorunun anlık verebileceği maksimum güç değerinin hepsini kullanmaktadır. Dolayısıyla aracın düz yolda ivmelenme için gerekli güç grafiği ile elektrik motorunun anlık maksimum güç grafiği çakışmaktadır. Aracın düz yolda 80 km/h'e ivmelenmesi için sırayla 150 kW motor gücüne, 320 Nm momente ve 476 A akım değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu hız değerinde 4475 dev/dak'da dönen elektrik motorunun verebileceği değerler 150 kW motor gücü ve 310 Nm motor momentidir. Dolayısıyla aracın 80 km/h'e yaklaşık 24,5 sn'de ivmelenmesi için gerekli olan değerler hemen hemen elektrikli motoru tarafından karşılanabilmektedir. 55 Ah kapasitesinde olan bir bataryadan emniyet açısından anlık çekilebilecek maksimum akım 250A olduğundan 80 km/h için anlık çekilmesi gereken 476 A akım değeri hem bataryadan hem de jeneratörden sağlanabilmektedir.

### 5.2.3.2 Bataryalarla (Tümü-Elektrikli) Düz Yolda İvmelenme

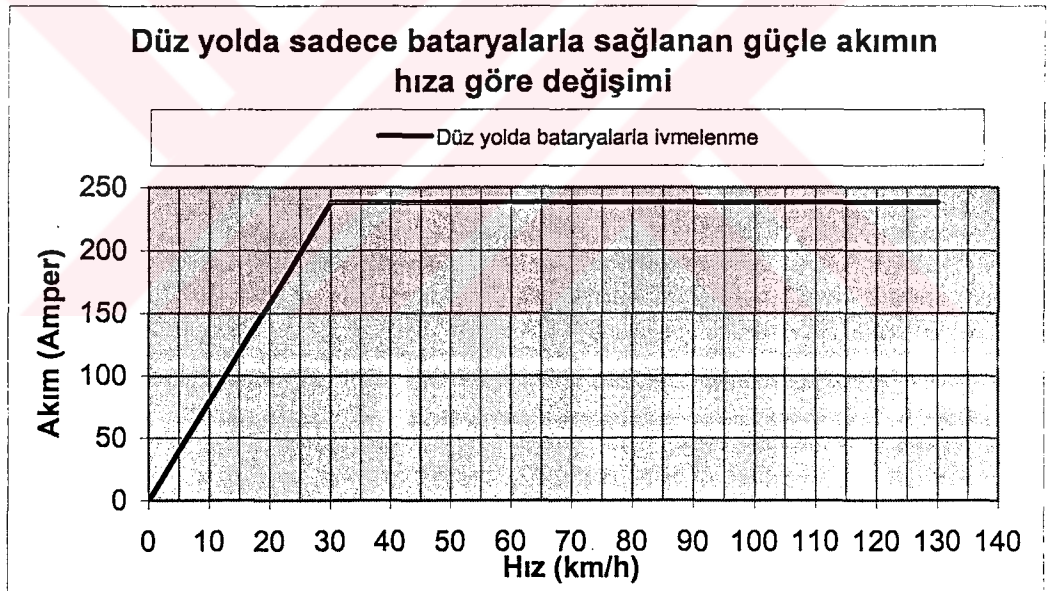
Sadece bataryalarla ivmelenme gücü, momentisi ve akımı Çizelge 5.8a sonuçlarına göre hazırlanan Şekil 5.18, Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de sırayla gösterilmektedir. Sadece bataryalardan sağlanan güçle ivmelenme süreleri ise Şekil 5.21'de gösterilmektedir.



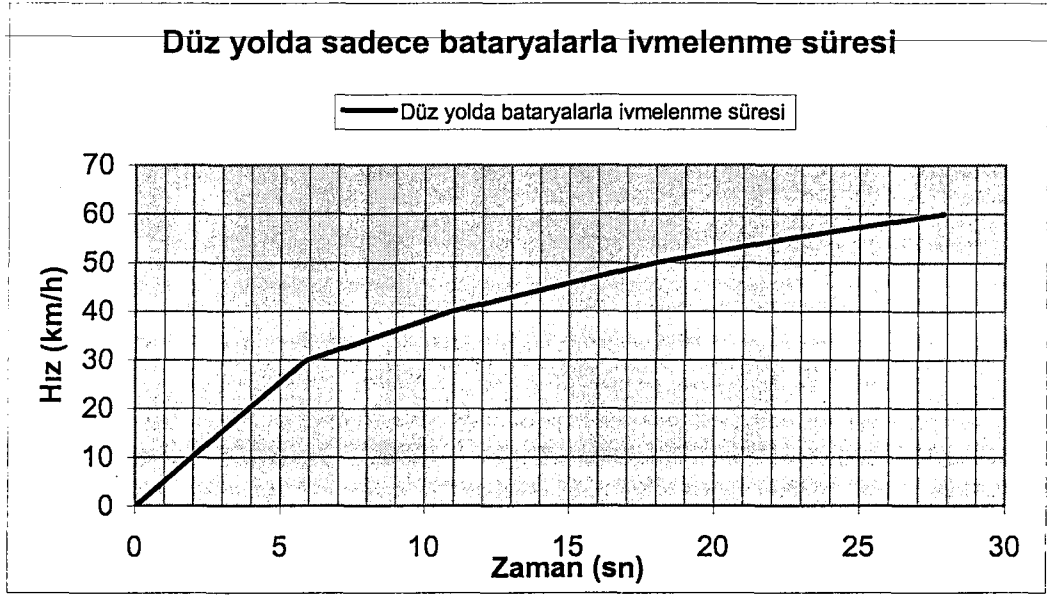
Şekil 5.18 Düz yolda sadece bataryalarla ivmelenme gücü



Şekil 5.19 Düz yolda sadece bataryalarla sağlanan güçle ivmelenme momenti



Şekil 5.20 Düz yolda sadece bataryalarla sağlanan güçle ivmelenme akımı



Şekil 5.21 Düz yolda aracın sadece bataryalarla sağlanan güçle ivmelenme süresine göre maksimum ivmelenme hızı

Araç sadece bataryalarla anlık maksimum 75 kW (bara gerilimi 315 V ve anlık çekilebilen maksimum akım 250 A) sağlanan güçle ivmelenmek istediğinde araç 55 km/h'e yaklaşık 22,5 sn'de ivmelenerek bu hız değerinin üzerinde ivmelenme süresi artacak ve ivmelenme performansı azalacaktır ve aracın ivmelenme değeri 55 km/h'den sonra 0.6'ya düşecektir (Çizelge 5.8a). Düz yolda sadece bataryalardan sağlanan güçle 55 km/h'e ivmelenmek için gerekli olan 75 kW güç, 232 Nm moment ve 238 A amper değerleri bu hıza karşı gelen 3077 dev/dak'daki elektrik motoru tarafından sağlanmaktadır. Elektrik motoru bu devirde anlık maksimum 138 kW güç ve 450 Nm moment üretmektedir. Gerekli olan 238 A amper ise ivmelenme esnasında anlık maksimum 250 amper akım veren bataryalardan sağlanabilmektedir. 55 km/h'in üzerindeki hızlarda ivmelenme değeri azalmaktadır.

Yukarıda da ifade edildiği gibi araç düz yolda maksimum 55 km/h'e kadar tümü-elektrikli şeklinde sessiz sürüş modunda sadece bataryalardan ivmelenirken, bu hızların üzerinde ivmelenme değeri düşecek ve ivmelenme performansı azalacaktır ve jeneratör devreye girerek maksimum 80 km/h'e kadar performanslı bir şekilde hibrid sistemle ivmelenecektir.

Düz yolda ivmelenirken gerekli moment değerleri elektrik motorunun ürettiği moment değerleriyle karşılanabildiğinden düz yolda transmisyon kullanılmamıştır.

Yapılan hesapların özet tablosu Çizelge 5.9 ve Çizelge 5.10'de verilmiştir.

Çizelge 5.9 Düz yolda sadece bataryalardan sağlanan güçle aracın maksimum ivmelenebileceği hız

	Maksimum 55 km/h sessiz sürüş için gereksinimler	30776dev/dak'da motor gücü ve momenti	Sonuç
İvmelenme için gerekli motor gücü (kW)	Araç ivmelenme esnasında bataryalardan anlık maksimum 75 kW güç çekecektir.	Elektrik motorundan normalde bu devirde anlık maksimum 138 kW sağlanabiliyor. Ancak bataryalardan maksimum 75 kW değerinde enerji çekilmektedir.	Bataryalardan sağlanan anlık maksimum 75 kW güç değeri elektrik motorunun bu devirde verdiği anlık maksimum 138 kW değerinin altındadır.
İvmelenme için gerekli motor momenti (Nm)	232Nm	Elektrik motorundan anlık maksimum 450 Nm moment değeri sağlanabiliyor.	Elektrik motorunun bu devirde verdiği anlık maksimum 450 Nm moment değeri istenilen 232Nm moment değerinin üzerindedir.
İvmelenme için gerekli motor akımı (A)	238 A	Bataryalardan ivmelenme esnasında anlık maksimum 250 A çekilebiliyor.	Bataryalardan çekilen anlık maksimum 250 A değeri istenilen 238 akım değerinin üzerindedir.

Araç düz yolda yaklaşık 22,5 sn'de sadece bataryalarla 55 km/h'e kadar performanslı bir şekilde ivmelenebilmektedir.

Çizelge 5.10 Düz yolda hibrid sistemle (bataryalardan ve jeneratörden ) sağlanan güçle aracın performanslı bir şekilde maksimum ivmelenebileceği hız

	Maksimum 80 km/h hız için gereksinimler	4475dev/dak'da motor gücü ve momenti	Sonuç
İvmelenme için gerekli motor gücü (kW)	Araç ivmelenme esnasında bataryalardan ve jeneratörden anlık maksimum 150 kW güç çekecektir.	Elektrik motorundan bu devirde anlık maksimum 150 kW sağlanabiliyor.	80 km/h'e ivmelenmek için gerekli 150 kW güç değeri elektrik motorunun bu devirde verdiği anlık maksimum 150 kW değeri ile aynıdır.
İvmelenme için gerekli motor momenti (Nm)	320 Nm	Elektrik motorundan bu devirde anlık maksimum 310 Nm sağlanabiliyor.	Elektrik motorunun bu devirde verdiği anlık maksimum 310 Nm moment değeri istenilen 320 moment değerini hemen hemen karşılamaktadır.
İvmelenme için gerekli motor akımı (A)	476 A	Bataryalardan anlık maksimum 250 ve jeneratörden 270 A olmak üzere toplam 520 A çekilebilir.	Bataryalardan ve jeneratörden çekilen anlık maksimum 520 A değeri istenilen 476 akım değerinin üzerindedir.

Araç düz yolda yaklaşık 24,5 sn'de hibrid sistemle 80 km/h'e kadar performanslı bir şekilde ivmelenebilmektedir.

### 5.2.3.3 Bataryalarla Sağlanan Güçle Düz yolda Sabit Hız

Yukarıda da ifade edildiği gibi araç düz yolda hibrid sistemle performanslı bir şekilde maksimum 80 km/h'e kadar ivmelenebilmektedir. Aracın 100 km/h sabit hız için istenilen güç ve moment değerleri hibrid sistemle birlikte elektrik motoru tarafından karşılanmakta (Şekil

.5.15 ve Şekil 5.16) ancak 120 km/h'den sonra karşılanamamaktadır. 100 km/h sabit için sürekli 52,5 kW güç, 86 Nm moment ve 166 Amper akım değerlerine gereksinim vardır. Bu hıza karşı gelen 5594 dev/dak'daki elektrik motoru ise sürekli 85 kW ve sürekli 140 Nm moment üretmektedir. Dolayısıyla istenilen değerler motor tarafından karşılanabilmektedir. Aracın hibrid sistemle performanslı bir şekilde ivmeleneceği hız değeri 80/km/h olduğundan araç bu hıza ivmelendikten sonra gene maksimum bu hızla sabit bir şekilde gidecektir. 80 km/h için gerekli olan sürekli 30 kW güç, 64 Nm moment ve 96 A amper değerleri ise sadece bataryalardan sağlanabildiği için M2000 seri hibrid elektrikli aracı hibrid sistemle birlikte 80 km/h'e ivmelendikten sonra sadece bataryalardan sağlanan güçle bu sabit hızla gidebilmektedir. Yapılan hesapların özet tablosu Çizelge 5.11 verilmiştir.

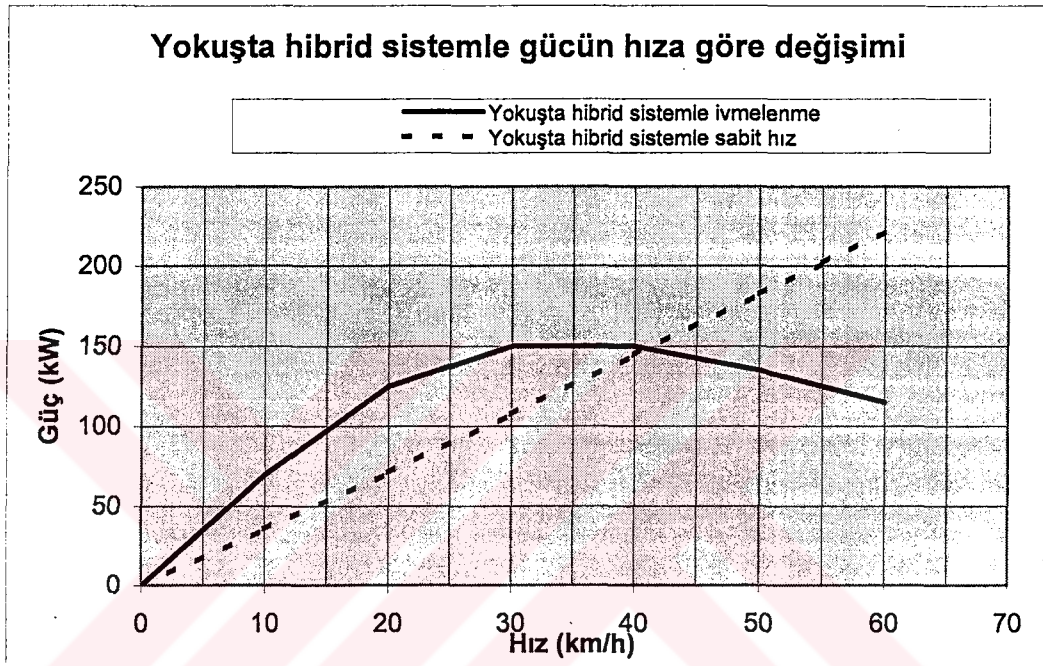
Çizelge 5.11 Düz yolda aracın hibrid sistemle ivmelendikten sonra bataryalarla sağlanan güçle sabit hızla gidebileceği maksimum hızı

	Maksimum 80 km/h sabit hız için gereksinimler	4475 dev/dak'da motor ve elektriksel denge	Sonuç
Sabit hız için gerekli motor gücü (kW)	30 kW	Elektrik motorundan bu devirde sürekli maksimum 85 kW sağlanabiliyor.	80 km/h sabit hız için gerekli 30 kW sürekli güç değeri elektrik motorunun bu devirde verdiği sürekli maksimum 85 kW değerinin altındadır.
Sabit hız için gerekli motor momenti (Nm)	64 Nm	Elektrik motorundan bu devirde sürekli 175 Nm moment sağlanabiliyor.	Elektrik motorunun bu devirde verdiği sürekli 175 Nm moment değeri istenilen 64 moment değerinin üzerindedir.
Sabit hız için gerekli motor akımı (A)	96 A	Bataryalardan anlık maksimum 250 A çekilebiliyor.	Bataryalardan istenilen 64 A akım değeri maksimum 250 A değerinin altındadır.

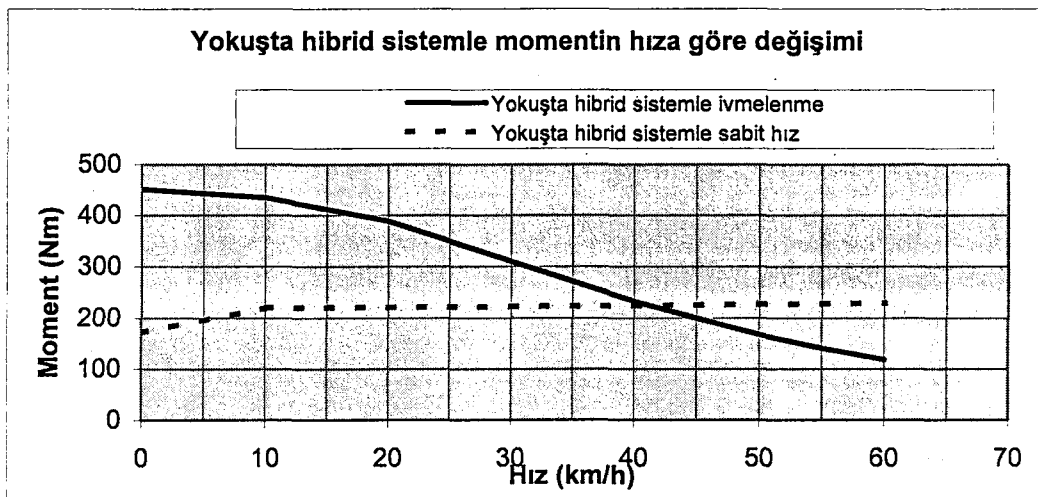
Aracın düz yolda bataryalardan sağlanan güçle gidebileceği maksimum sabit hız 100 km/h'dir. Ancak araç performanslı bir şekilde 80 km/h'e kadar ivmelenebildiği için maksimum sabit hız 80 km/h olarak kabul edilmiştir.

#### 5.2.3.4 %20 Eğimli Yokuşta Hibrid Sistemle İvmelenme

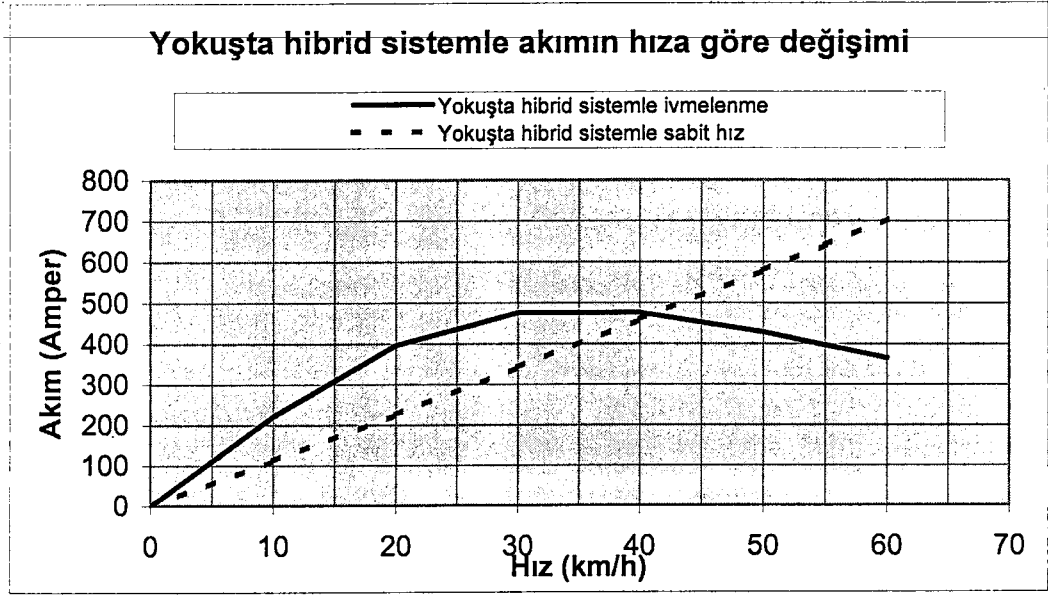
Aracın %20 eğimli yokuşta hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hızda gitmek için çektiği motor gücü, momentini ve akım değerleri Çizelge 5.8b sonuçlarına göre hazırlanan Şekil 5.22, Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'deki grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 5.22 %20 eğimli yokuşta hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için gücün hıza göre değişimi

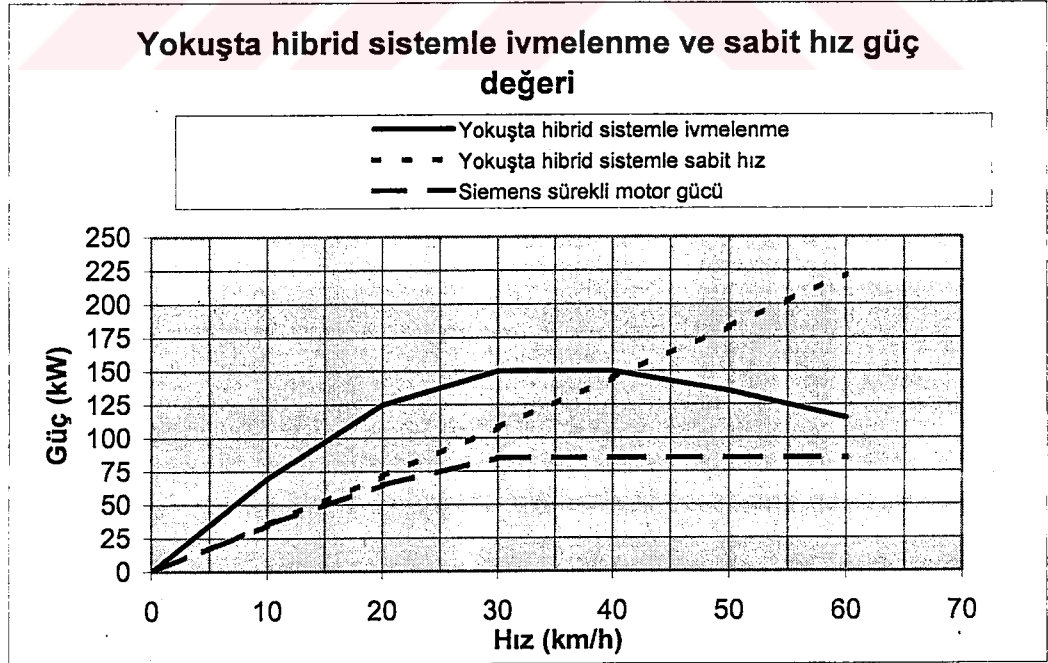


Şekil 5.23 %20 eğimli yokuşta hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için momentin hıza göre değişimi

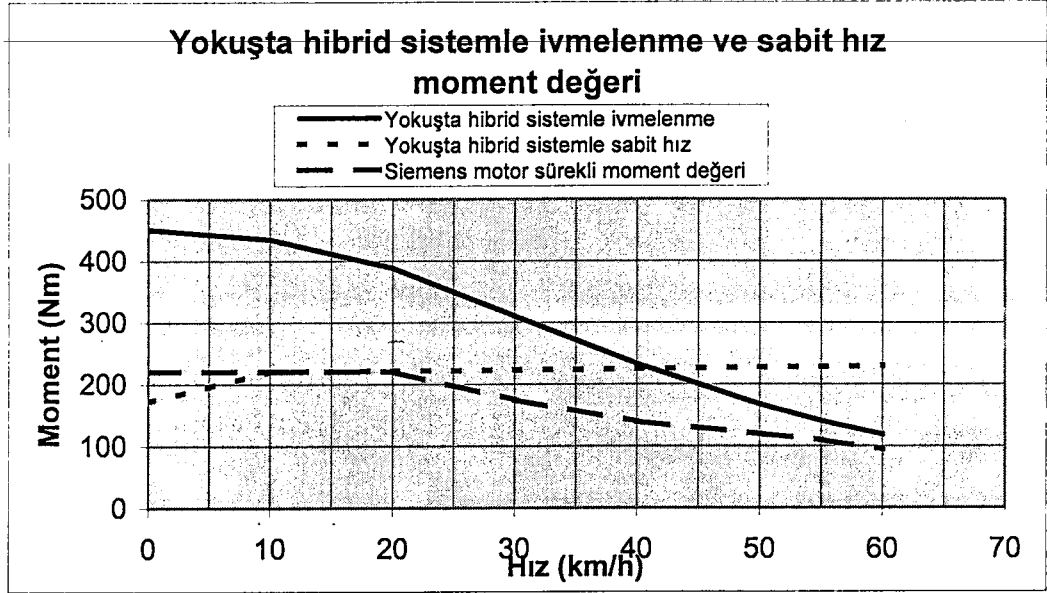


Şekil 5.24 %20 eğimli yokušta hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için akımın hıza göre değişimi

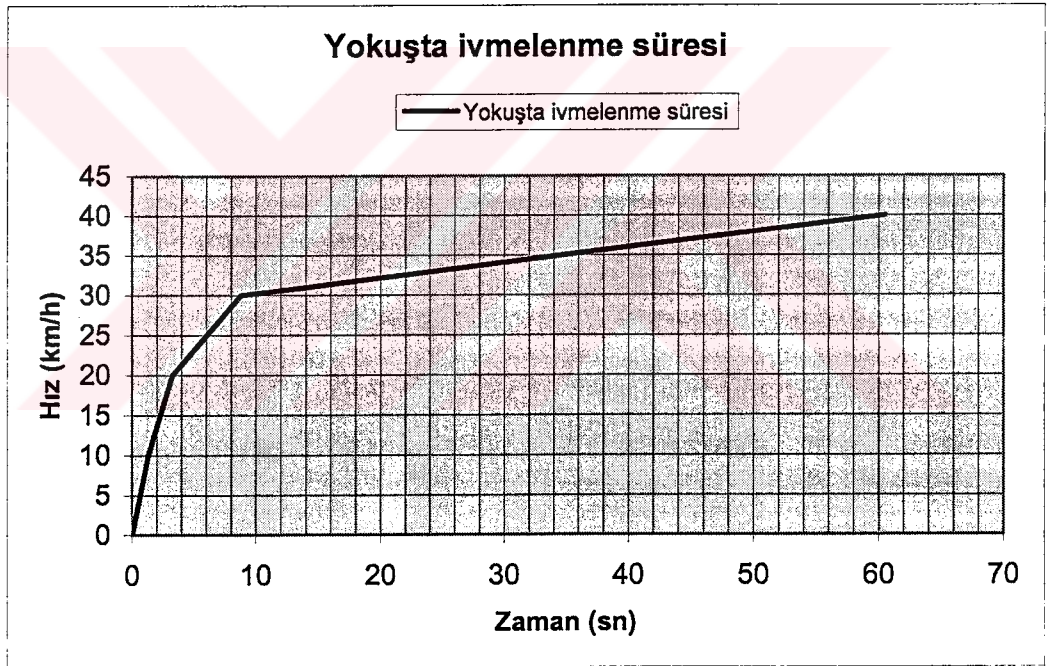
Aracın hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için ihtiyaç duyduğu güç ve moment değerleriyle Siemens elektrik motorunun verebileceği güç ve moment değerlerinin kesişimi Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'da ve hibrid sistemle aracın %20 eğimli yokušta ivmelenme süresine göre performanslı bir şekilde ivmelenebileceği maksimum hız değeri Şekil 5.27'de görölmektedir.



Şekil 5.25 %20 eğimli yokušta hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için elektrik motorunun verebileceęi güç deęerleri



Şekil 5.26 %20 eğimli yokušta hibrid sistemle ivmelenmek ve sabit hız için elektrik motorunun verebileceği moment değerleri



Şekil 5.27 %20 eğimli yokušta aracın hibrid sistemle ivmelenme süresine göre maksimum ivmelenme hızı

İvmelenmek için gerekli olan güç hem batarya hem de jeneratörden yani hibrid sistemden sağlanırsa araç yaklaşık olarak 30 km/h'e kadar performanslı bir şekilde 8,8 sn'de ivmelenebilmektedir. Bu hız değerlerinden sonra aracın ivmelenme değeri gibi 0.2'ye düşmektedir ki (Çizelge 5.8b) bu da neredeyse aracın artık hiç hızlanmaması demektir. Bu nedenle ivmelenme süresi artarak aracın hızlanma performansı düşmektedir. Araç ivmelenme esnasında her hıza karşı gelen devirde elektrik motorunun anlık verebileceği maksimum güç

değerinin hepsini kullanmaktadır. Dolayısıyla aracın %20 eğimli yokuşta ivmelenme için gerekli güç grafiği ile elektrik motorunun anlık maksimum güç grafiği çakışmaktadır. Aracın %20 eğimli yokuşta hibrid sistemle 30 km/h'e ivmelenmesi için sırayla 150 kW motor gücüne, 310 Nm momente ve 476 A akım değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu hız değerinde 4615 dev/dak'da dönen elektrik motorunun verebileceği anlık değerler 150 kW motor gücü ve 340 Nm motor momentidir. Dolayısıyla aracın 30 km/h'e yaklaşık 8,8 sn'de ivmelenmesi için gerekli olan değerler hemen hemen elektrikli motoru tarafından karşılanabilmektedir. 55 Ah kapasitesinde olan bir bataryadan emniyet açısından anlık çekilebilecek maksimum akım 250A olduğundan 30 km/h için anlık çekilmesi gereken 476 A akım değeri hem bataryadan hem de jeneratörden sağlanabilmektedir.

#### **5.2.3.5 Hibrid Sistemle %20 Eğimli Yokuşta Maksimum Sabit Hız**

Yukarıda da ifade edildiği gibi araç %20 eğimli yokuşta hibrid sistemle performanslı bir şekilde maksimum 30 km/h'e kadar ivmelenebilmektedir. Aracın 30 km/h sabit hız için istenilen güç ve moment değerleri hibrid sistemle birlikte elektrik motoru tarafından karşılanmakta ancak bu hızdan sonra karşılanamamaktadır. 10 km/h sabit için 35 kW güç, 220 Nm moment ve 112 A akım değerlerine gereksinim vardır. Bu hıza karşı gelen 1538 dev/dak'daki elektrik motoru ise sürekli 35 kW ve sürekli 220 Nm moment üretmektedir. Dolayısıyla istenilen değerler motor tarafından karşılanabilmektedir. Sürekli 112 A akım değeri ise güvenlik açısından hem batarya hem de jeneratörden sağlanmaktadır. Yapılan hesapların özet tablosu Çizelge 5.12 ve Çizelge 5.13'de verilmiştir.

Çizelge 5.12 %20 eğimli yokuşta aracın hibrid sistemle maksimum ivmelenebileceği hız

	Maksimum 30 km/h hız için gereksinimler	4615 dev/dak'da motor ve elektriksel denge	Sonuç
İvmelenme için gerekli motor gücü (kW)	Araç hibrid sistemle ivmelenme esnasında elektrik motorunun anlık maksimum 150 kW güç değerini kullanacaktır.	Elektrik motorundan bu devirde anlık maksimum 150 kW sağlanabiliyor.	Araç ivmelenme esnasında 150 kW güç kullanacak ve bu değerde elektrik motoru tarafından karşılanacak.
İvmelenme için gerekli motor momenti (Nm)	310 Nm	Elektrik motorundan bu devirde anlık maksimum 340 Nm sağlanabiliyor.	Elektrik motorunun bu devirde verdiği anlık maksimum 340 Nm moment değeri istenilen 310 moment değerinin altındadır.
İvmelenme için gerekli motor akımı (A)	476 A	Sistemden toplam 520 A çekilebilir.	Sistemden çekilen maksimum 520 A 476 akım değerinin üzerindedir.

Aracın %20 eğimli yokuşta hibrid sistemle ivmelenebileceği maksimum hız 30 km/h'dir.

Çizelge 5.13 %20 eğimli yokuşta aracın hibrid sistemle sabit hızla gidebileceği maksimum hız

	Maksimum 10 km/h sabit hız için gereksinimler	1538 dev/dak'da motor ve elektriksel denge	Sonuç
Sabit hız için gerekli motor gücü (kW)	35 kW	Elektrik motorundan bu devirde sürekli maksimum 35 kW sağlanabiliyor.	Bataryalardan maksimum 75 kW güç sağlanır.10 km/h sabit hız için gerekli 35 kW güç değeri elektrik motorunun bu devirde verdiği sürekli maksimum 35 kW değeri ile karşılanabilmektedir.
Sabit hız için gerekli motor momenti (Nm)	220 Nm	Elektrik motorundan bu devirde sürekli maksimum 220 Nm sağlanabiliyor.	Elektrik motorunun bu devirde verdiği sürekli maksimum 220 Nm moment değeri ile istenilen 221Nm moment değeri çakışmaktadır.
Sabit hız için gerekli motor akımı (A)	112 A	Bataryalardan anlık maksimum 250 A çekilebiliyor. Toplam 520 A çekilebilir.	Emniyet açısından jeneratör de akım sağlayacaktır.

Aracın %20 eğimli yokuşta hibrid sistemden sağlanan güçle gidebileceği maksimum sabit hız yaklaşık 10 km/h'dir.

## 5.2.4 M2000 Aracının Advisor programı ile Simülasyon Sonuçları

### 5.2.4.1 Advisor Simülasyon Programı

ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator), 1994 yılında NREL (National Renewable Energy Laboratory) tarafından geliştirilmeye başlanmıştır. Bu program, A.B.D. Enerji Bölümünün (DOE) hibrid elektrikli araçlar içinin teknoloji geliştirmek üzere Ford, General Motors ve Daimler Chrysler ile olan Hibrid Elektrikli Araç Tahrik Sistemleri anlaşması çerçevesine destek olmak üzere bir analiz programı olarak tasarlanmıştır. Birincil görevi, hibrid elektrikli ve elektrikli araç elemanlarının sistem düzeyinde etkileşimlerini ve onların araç performansı ile yakıt tüketimine olan etkilerini aydınlatmaktır. ADVISOR, ilk olarak 1998 yılında internet üzerinden halka sunulmuş ve birçok yenilenme geçirmiştir. ADVISOR, MATLAB/Simulink ortamında yaratılmıştır. MATLAB, hesapları gerçekleştirmek için matris tabanlı programlamada kolaylık sağlarken, Simulink karmaşık sistemleri, grafiksel blok diyagramlar kullanarak ifade etmek için kullanılabilir.

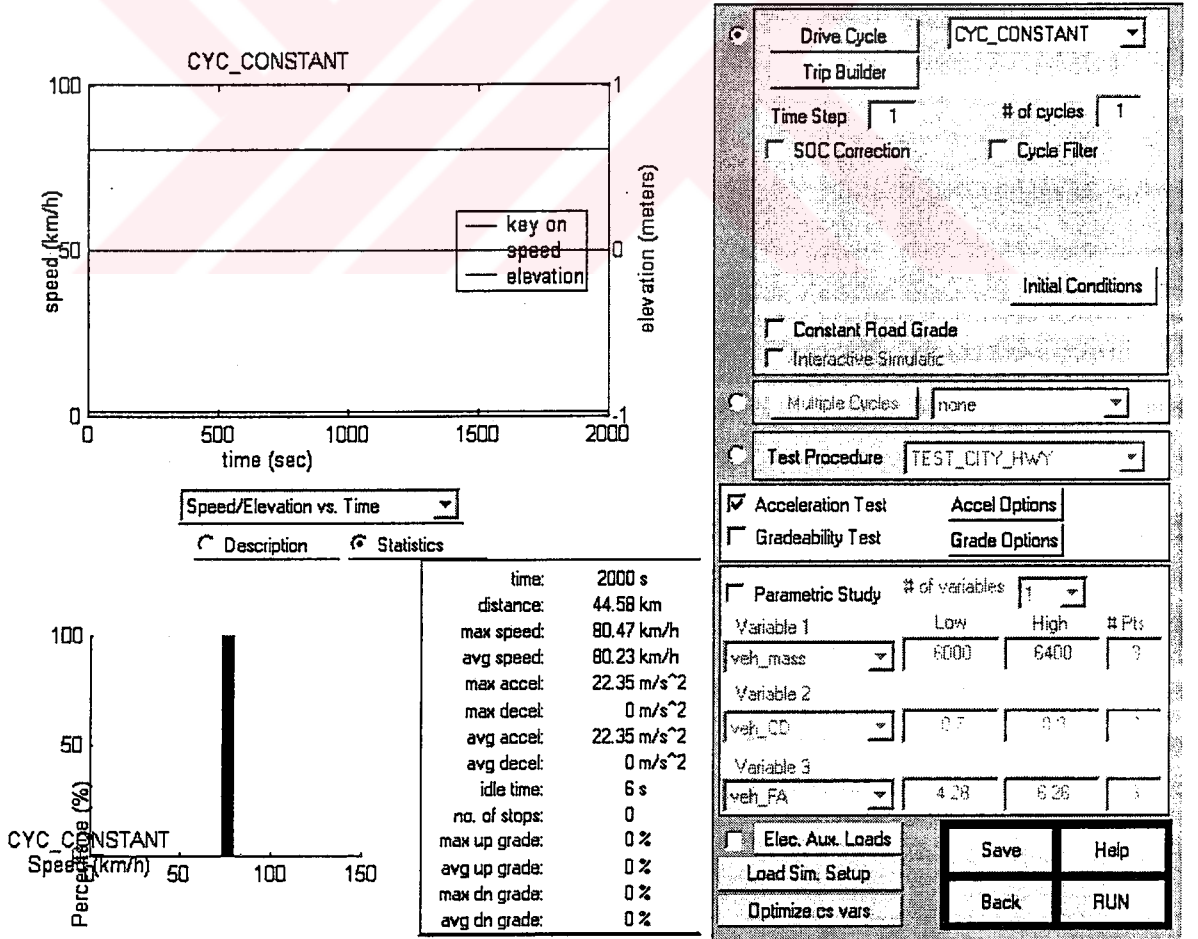
ADVISOR, kullanıcıya simülasyon işlemleri boyunca yol göstermek için üç adet ana grafiksel arayüz (GUI-graphical user interface) ekranı kullanır. Bu arayüzlerle, kullanıcı, araç parametrelerinin ve sürüş çevrimi gereksinimlerinin, araç performansı, yakıt ekonomisi ve emisyonlar üzerindeki etkilerini iteratif olarak değerlendirebilir. Bu arayüzler, MATLAB çalışma alanında bulunan işlenmemiş giriş ve çıkış verileri ile etkileşimi kolaylaştırırlar. Araç modeli, alt sistemler arasındaki bağlantıyı ifade etmek için, Simulink blok diyagramları kullanılarak grafiksel olarak resmedilir. Böylece, model yazılım sırasında, MATLAB çalışma ortamından giriş verilerini okuyarak, çıkışları sonuç çalışma bölgesine gönderip sonuç ekranında görüntülendirir. Araç giriş ekranında menülerden aracın düzeni (örneğin; seri, paralel, konvansiyonel) ve sürüş sistemini oluşturacak elemanlar seçilir. Kullanıcı, araç parametrelerinin giriş ayarlarını tamamladıktan sonra devam tuşuyla simülasyon penceresine gelir. ADVISOR'da kullanılan modeller sürüş sistemi elemanlarının giriş/çıkış ilişkilerinin laboratuarda yapılan ölçümler sonucu ampirik olarak ortaya konmasına dayanır. Bununla birlikte sürekli hal testlerinde (örneğin sabit moment, hız) toplanan datalar kullanılarak, bunların geçici hal etkileri düzeltilmiştir. Çok sayıda özel ve standart sürüş çevrimlerini (drive cycle) kullanmaktadır. Daha sonra simülasyon ekranında, kullanıcı aracın hangi olaylar içerisinde simule edileceğini tanımlar. Bu tek bir sürüş çevrimi olabileceği gibi, birden çok çevrim veya özel test prosedürlerini (ivmelenme testi, eğim testi) içerebilir.

Sonuç ekranında ise, araç performansını sürüş çevrimi boyunca ve de çevrimin herhangi bir noktasında anlık olarak görme olanağı mevcuttur. Sonuç ekranının sağ tarafında, yakıt tüketimi ve emisyonlar gibi özet sonuçlar bulunmaktadır. Sol tarafta ise, zamana bağlı olarak

detaylı sonuçlar (örneğin; motor hızı, motor momenti, akü gerilimi, vb.) çizilmiştir. Şubat 2002'de ADVISOR Ansoft'un SIMPLORER programıyla birleşmiştir. Bu yeni araç sistem tasarım çözüm programı, SIMPLORER'in elektriksel sistem karakteristiklerini doğru tahmin etmedeki kuvveti ile ADVISOR'ın bütün aracın sistem analizini gerçekleştirmedeki gücünü bir araya getirmiştir. Bu birleşmiş çözüm programı, mühendislere ileri tahrik sistemleri ve elektrik sistemleri teknolojilerinin analiz ve değerlendirme olanağını sağlamaktadır.

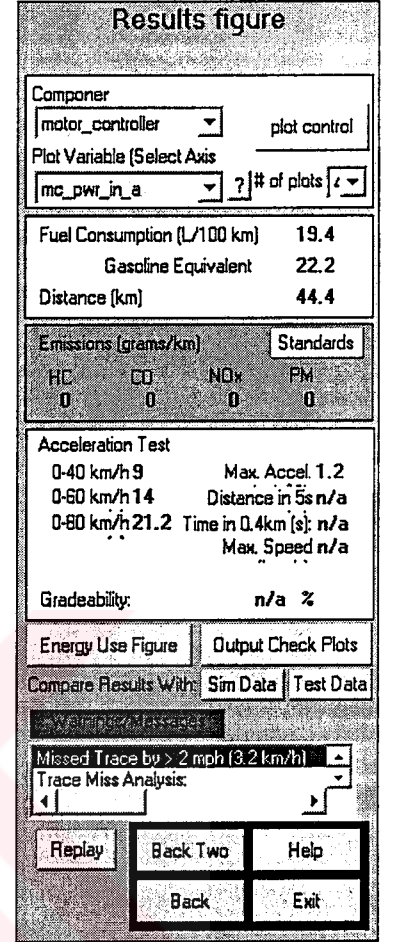
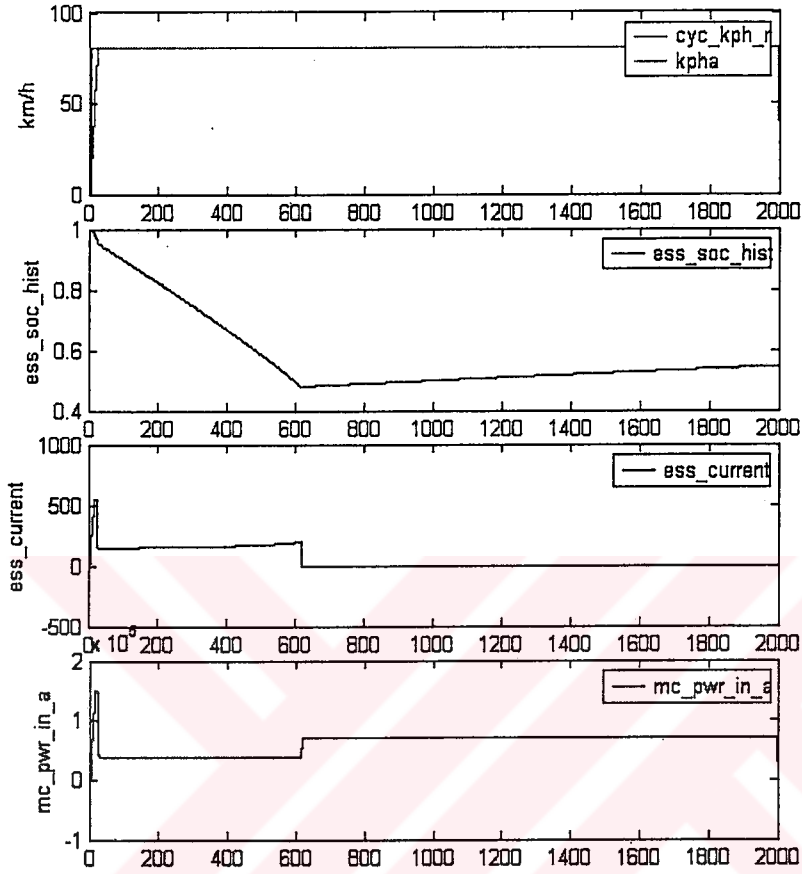
#### 5.2.4.2 Düz Yolda Hibrid Sistemle 80 km/h'e İvmelenme

Araçta kullanılan tüm alt sistemlerin teknik özellikleri programda yer alan Matlab tabanlı M-dosyasına yazıldıktan sonra aracın simülasyonu için programın kendi içinde yer alan sürüş çevrimlerinden uygun olanları seçilmiştir. Bunlardan uygulanacak ilk çevrimde (Şekil 5.28) hibrid sistemle önce 80 km/h'e ivmelendirilmiş daha sonra bu hızla sabit gitmiştir. Bu çevrimin süresi yaklaşık 2000 sn kadardır. Bataryalar başlangıçta tam doludur yani SoC (bataryaların şarj durumu) ilk hareket esnasında 1 (%100) kabul edilmiştir. Aracın hibrid sistemle ivmelenme sonuçlarını görmek için ayrıca 40 km/h, 60 km/h ve 80 km/h için ivmelendirme testi de yapılmıştır.

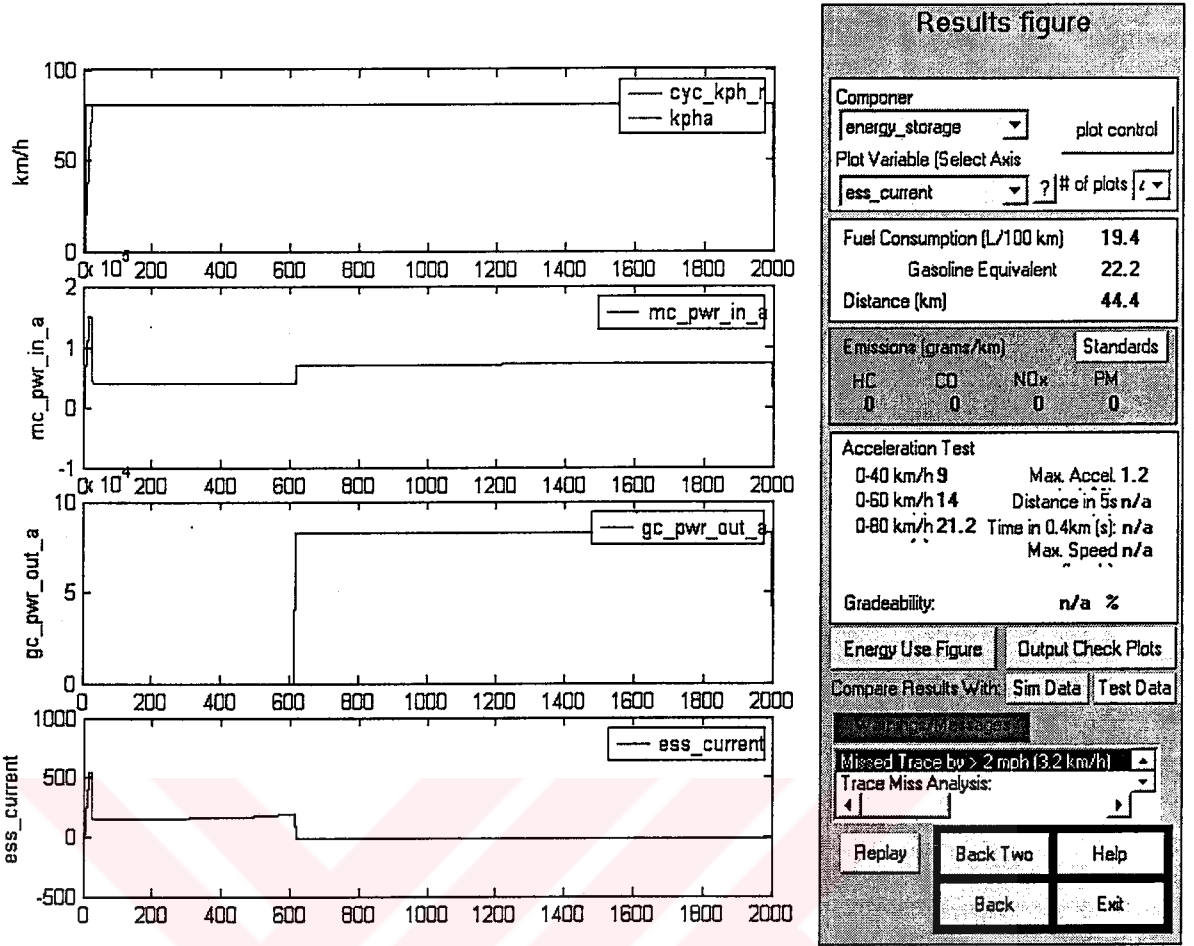


Şekil 5.28 Düz yolda aracın hibrid sistemle 80 km/h'e ivmelendirme çevrimi

Aracın bu çalışma şartlarında elektrik motorunun çektiği güç, bataryalardan çekilen akım, bataryaların şarj durumu, ve jeneratörün ürettiği güç Şekil 5.29 ve Şekil 5.30'da görülmektedir.



Şekil 5.29 Düz yolda araç 80 km/h'e ivmelenme esnasında elektrik motorunun çektiği güç ve bataryalardan sağlanan akım değerleri ile bataryaların şarj durumu



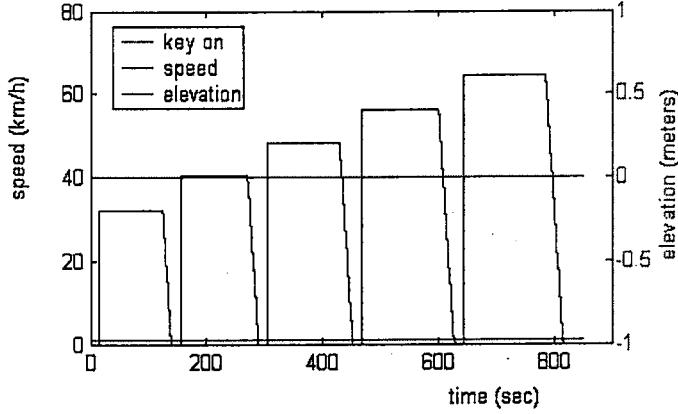
Şekil 5.30 Düz yolda araç 80 km/h'e ivmelenme esnasında elektrik motorunun çektiği güç, bataryalardan sağlanan akım ve jeneratörün ürettiği güç değerleri

Araç düz yolda 80 km/h'e ivmelenirken Siemens elektrik motoru 4475 dev/dak'da dönmekte ve anlık maksimum 150 kW güç üretebilmektedir (Çizelge 5.8a). Bu güç için hem bataryalardan hem de jeneratörden toplam 476 A akım çekilmektedir. Bu programda yapılan simülasyon sonucunda ivmelenme esnasında elektrik motoru 150 kW güç üretmekte ve çekilmesi gereken akım değeri yaklaşık 500 A civarı çıkmıştır. Bunun sebebi excel tablosunda akım değeri hesaplanırken bara gerilimi sabit 315 kabul edilmiştir. Gerçekte ise bataryalardan akım çekildikçe bara gerilimi düştüğünden istenilen miktarda gücün elde edilebilmesi için daha fazla akım çekilmesi gerekmektedir. Bu nedenle akım değeri biraz daha fazla çıkmaktadır. Fakat görüldüğü gibi bu akım hibrid sistemden yani hem bataryalardan hem de jeneratörden çekilmesi gerekirken burada tüm akım sadece bataryalardan çekilmiştir. 55 Ah kapasitesinde bir Pb-asit bataryadan emniyetli olarak çekilen akım miktarı anlık maksimum 250 A'dır. Bu programda bataryalar modellenirken, bataryadan çekilmesi gereken akım değerine sınır konulamamaktadır. Dolayısıyla ivmelenme için gerekli gücü sağlayacak tüm akım değeri hem batarya hem de jeneratörden çekilmesi gerekirken sadece bataryalardan

çekilmiştir. Bu tamamen programdan ve programdaki enerji yönetim sisteminden kaynaklanmaktadır. Araç 80 km/h'e ivmelendikten sonra yaklaşık 600 sn, ve bataryaların şarj durumu 0.5 olana kadar sabit bu hızla gitmiştir. Bataryaların şarj durumu 0.5 olduğunda enerji yönetim sistemine göre jeneratör devreye girmiş ve nominal 85 kW güç üretmeye başlayarak bu gücün bir kısmıyla bataryaları şarj etmeye başlamış bir kısmıyla da 80 km/h sabit hız için kullanmıştır. 80 km/h sabit hız esnasında elektrik motoru yaklaşık 45 kW güç üretmiştir. Bu değer 30 kW olarak hesaplanmıştır (Çizelge 5.8a). Excel tablosunda bu değer hesaplanırken transmisyon kaybı %5 olarak kabul edilmiştir. Ancak bu program bu değeri otomatik olarak kendisi kabul ettiğinden bu programda yapılan simülasyon sonucunda sabit hızda çekilen güç değerleri biraz daha yüksek çıkmıştır. Jeneratör ürettiği yaklaşık 85 kW'lık gücün 45 kW kadarını sabit hız için geri kalanını ise bataryaları şarj etmek için kullanılmıştır. Aracın sırayla 40 km/h, 60 km/h ve 80 km/h'e ivmelenmesi için 8, 12.4 ve 24,5 sn gerekmektedir (Çizelge 5.8a). Bu programla yapılan simülasyon sonucunda ise bu değerler sırayla 9, 14 ve 21.2 olarak bulunmuştur ve maksimum ivmelenme değerinin 1.2 olduğu görülmüştür.

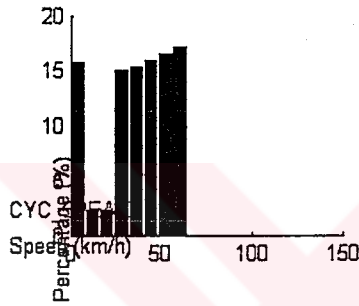
#### **5.2.4.3 Aracın Düz yolda Değişken Hızlarda İvmelenmesi**

Bu programda kullanılan bir diğer çevrim ise (Şekil 5.31) aracın önce 35 km/h'e sonra sırayla 40 km/h'e, 50 km/h'e, 55 km/h'e ve 60 km/h'e ivmelendiği ve ivmelendikten sonra sırayla bu hızlarda sabit gittiği çevrimdir.



Speed/Elevation vs. Time

Description Statistics



time:	850 s
distance:	9.34 km
max speed:	64.37 km/h
avg speed:	39.51 km/h
max accel:	17.88 m/s <sup>2</sup>
max decel:	-0.63 m/s <sup>2</sup>
avg accel:	13.41 m/s <sup>2</sup>
avg decel:	-0.57 m/s <sup>2</sup>
idle time:	115 s
no. of stops:	5
max up grade:	0 %
avg up grade:	0 %
max dn grade:	0 %
avg dn grade:	0 %

Drive Cycle: CYC\_SPEAK

Trip Builder

Time Step: 1 # of cycles: 1

SOC Correction  Cycle Filter

Initial Conditions

Constant Road Grade  Interactive Simulation

Multiple Cycles: none

Test Procedure: TEST\_CITY\_HWY

Acceleration Test  Gradeability Test

Accel Options Grade Options

Parametric Study # of variables: 1

Variable	Low	High	# Pts
veh_mass	6000	6400	2
veh_CD	0.7	0.9	3
veh_FA	4.28	6.28	3

Elec. Aux. Loads

Load Sim. Setup

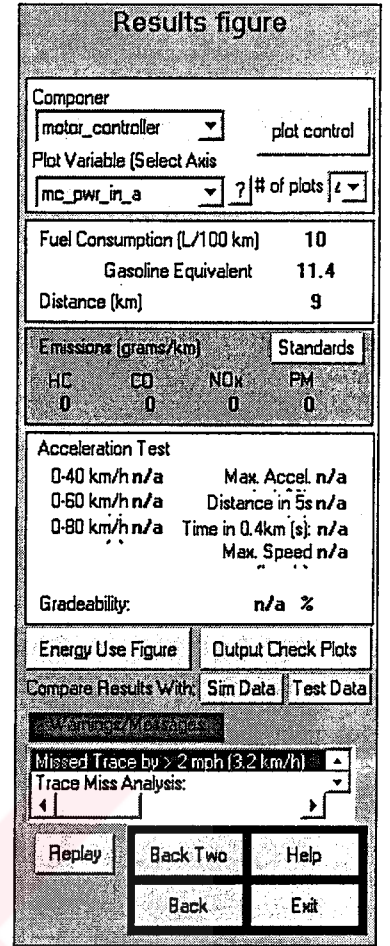
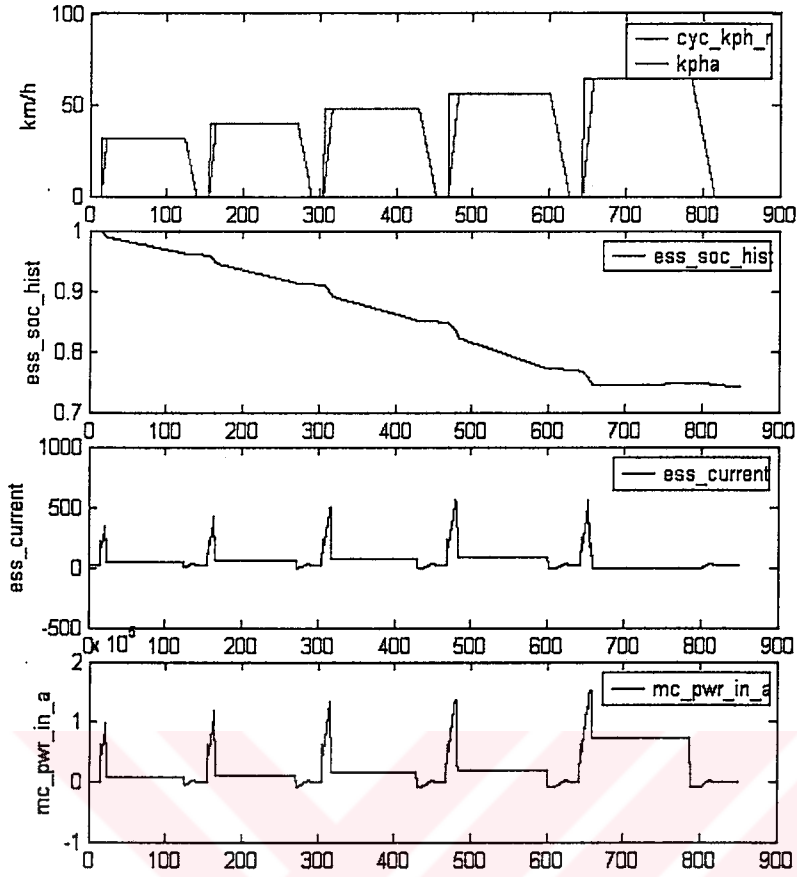
Optimize cs vars

Save Help

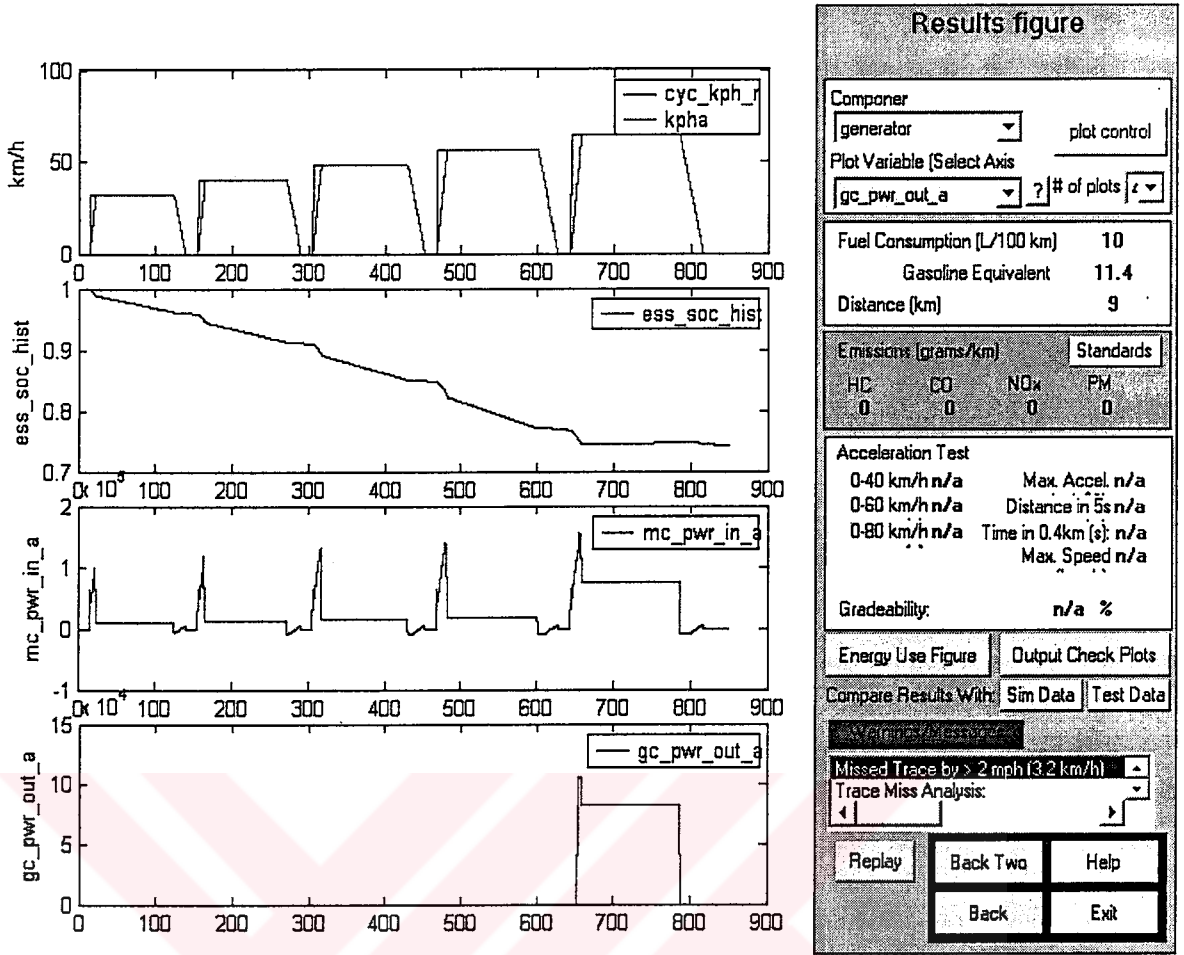
Back RUN

Şekil 5.31 Aracın değişik hızlara ivmelendiği çevrim

Yukarıdaki hızlarda ivmelenme ve sabit gitme esnasında motorun çektiği güç, bataryalardan çekilen akım, jeneratörün ürettiği güç gibi bazı değerler Şekil 5.32 ve Şekil 5.33'de gösterilmiştir.



Şekil 5.32 Düz yolda aracın değişik hızlara ivmelenmesi esnasında elektrik motorunun çektiği güç, batyalardan sağlanan akım değeri ve bataryaların şarj durumu



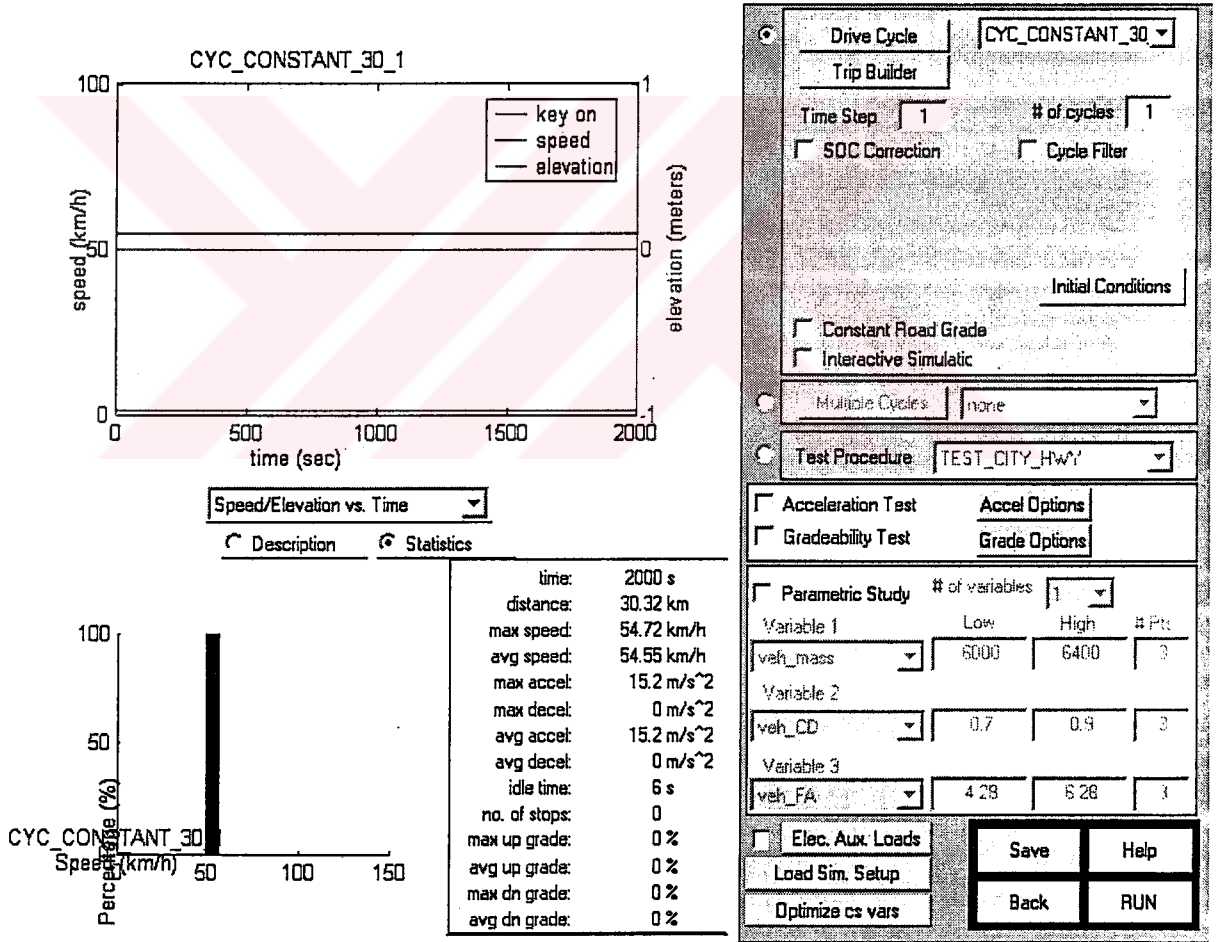
Şekil 5.33 Düz yolda aracın değişik hızlara ivmelenmesi esnasında elektrik motorunun çektiği ve jeneratörün ürettiği güç değerleri ve bataryaların şarj durumu

Araç düz yolda sırayla 35 km/h'e, 40 km/h'e, 50 km/h'e, 55 km/h'e ve 60 km/h'e ivmelenirken Siemens elektrik motoru bu hızlardaki devirlerde sırayla anlık maksimum 80 kW, 100 kW, 125 kW, 138 kW ve 150 kW güç üretilmektedir ve çekilen akım değerleri sıraya 280 A, 317 A, 396 A, 439 A ve 476 A olmaktadır (Çizelge 5.8a). Advisor ile yapılmış simülasyon sonucunda bu değerler yaklaşık olarak 90 kW, 100 kW, 125 kW, 140 kW ve 150 kW güç ve bataryalardan çekilen akım değerleri 280 A, 350 A, 450 A, 500 A ve 450 A olmuştur. Bu programda daha önce bahsedildiği gibi bataryaların modellenmesinde çekilmesi gereken akım değerine sınır konulmadığı için tüm akımı 60 km/h hariç bataryalardan çekmiştir. Programda görüldüğü gibi 60 km/h'e ivmelenme esnasında araç devamlı durup kalktığı için bara gerilimi düşmüş ve çekilen akım değerleri artmış ve sonuçta bataryaların şarjı azalmış ve gerekli olan akım değerini tek başına sağlayamayarak jeneratörde devreye girmiştir. Burada jeneratör yaklaşık 100 kW güç üretmiş ve bataryanın ürettiği güçle birlikte 60 km/h'e ivmelenme esnasında elektrikli motoruna 150 kW güç sağlamışlardır. İvmelendikten sonra 60 km/h sabit için jeneratör artık yaklaşık 85 kW nominal güç üretmeye

başlayarak hem bataryaları şarj etmekte hem de 60 km/h sabit hız için gerekli gücü sağlamaktadır. Ayrıca Advisor ile yapılan simülasyon sonucunda Şekil 5.32’de görüldüğü gibi elektrik motoru 35 km/h, 40 km/h, 50 km/h, 55 km/h ve 60 km/h sabit hızlar için sırayla 10 kW, 15 kW, 20 kW, 25kW ve 85 kW güç üretmiştir. Burada 60 km/h sabit hız için 85 kW güç üretmesinin sebebi jeneratörün bataryaları şarj etmek ve sabit hız için gerekli gücü sağlaması amacıyla 85 kW güç üretmesidir

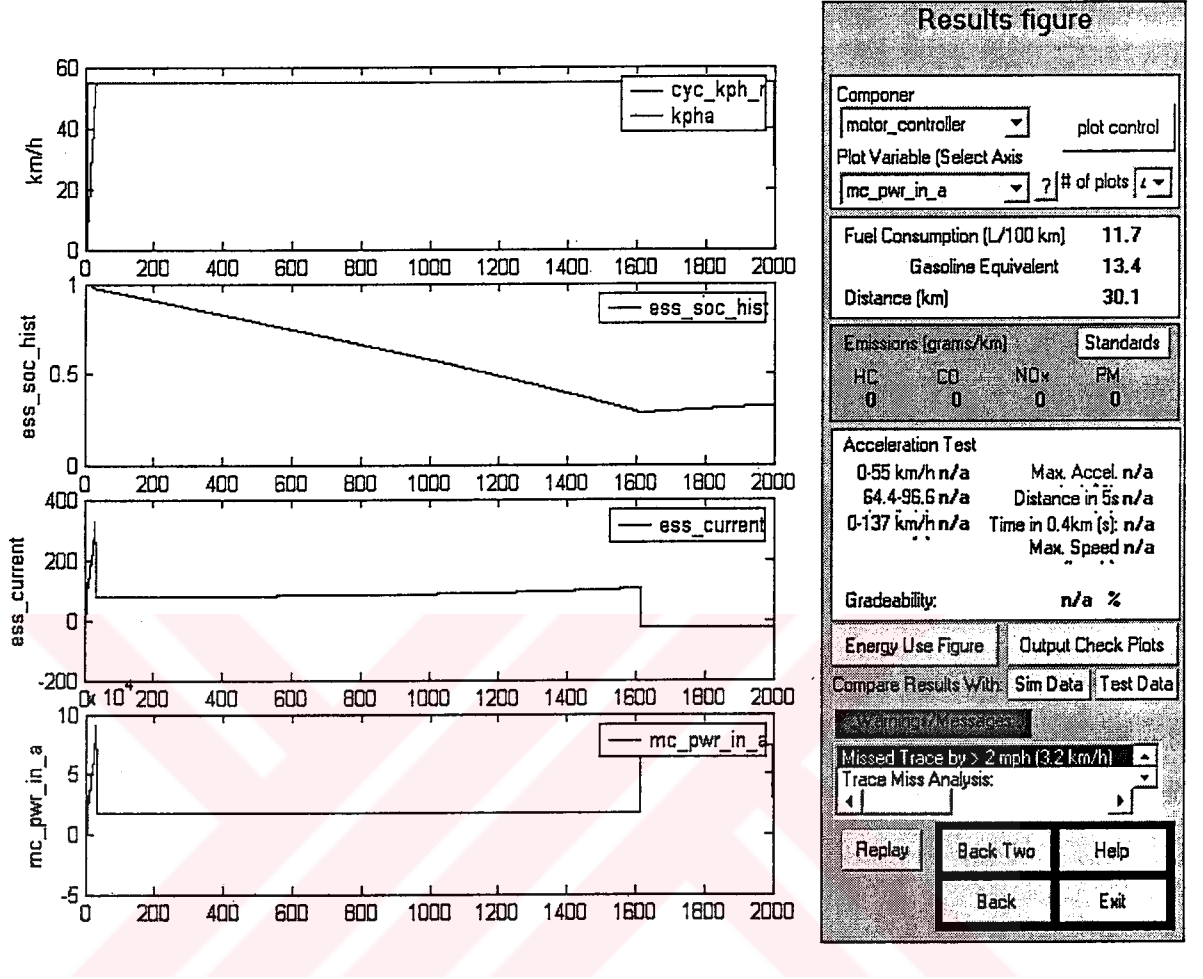
#### 5.2.4.4 Aracın Düz yolda Sadece Bataryalarla Sağlanan Güçle 55 km/h’ e İvmelenmesi (Sessiz Sürüş )

Bu programda kullanılan bir diğer çevrim ise (Şekil 5.34) aracın sadece bataryalarla sağlanan güçle önce 55 km/h’ e ivmelendikten sonra bu hızda sabit gittiği çevrimdir. Bu çevrimin süresi yaklaşık 2000 sn kadardır. Bataryalar başlangıçta tam doludur yani SoC (bataryaların şarj durumu) ilk hareket esnasında 1 (%100) kabul edilmiştir.

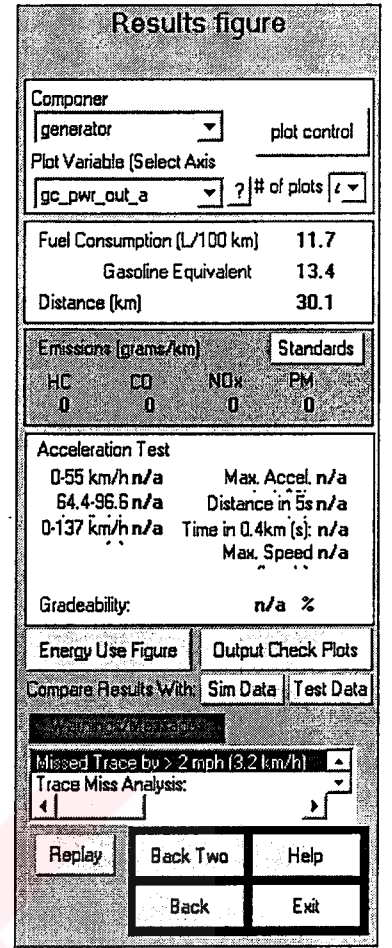
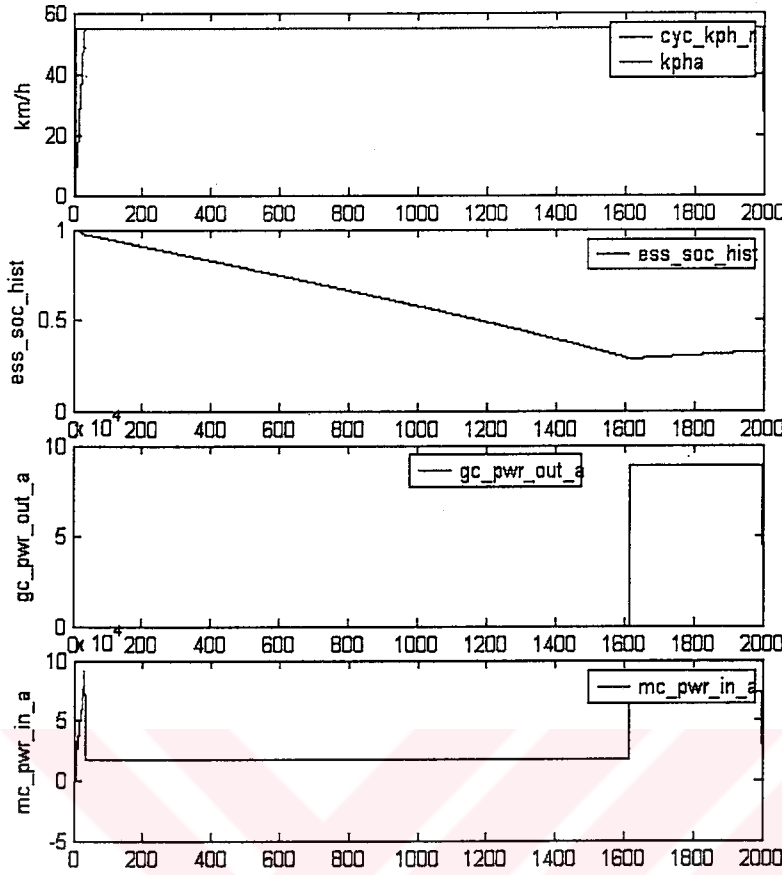


Şekil 5.34 Düz yolda aracın sadece bataryalarla sağlanan güçle 55 km/h’ e ivmelendirme çevrimi

Aracın bu çalışma şartlarında elektrik motorunun çektiği güç, bataryalardan çekilen akım, bataryaların şarj durumu, ve jeneratörün ürettiği güç Şekil 5.35 ve Şekil 5.36'da görülmektedir.



Şekil 5.35 Düz yolda araç 55 km/h'e ivmelenme esnasında elektrik motorunun çektiği güç ve bataryalardan sağlanan akım değerleri ile bataryaların şarj durumu



Şekil 5.36 Düz yolda araç 55 km/h'e ivmelenme esnasında elektrik motorunun çektiği güç, bataryalardan sağlanan akım ve jeneratörün ürettiği güç değerleri

Araç düz yolda 55 km/h'e ivmelenirken Siemens elektrik motoru 3077 dev/dak'da dönmekte ve anlık maksimum 138 kW güç üretebilmektedir (Çizelge 5.8a). Ancak gerekli olan güç sadece bataryalardan sağlandığı için elektrik motoru bu devirde yaklaşık 75-80 kW güç üretebilmektedir. Çekilen akım değeri ise 238 A olarak hesaplanmıştır. (Çizelge 5.8a). Advisor ile yapılan simülasyon sonucunda çekilen güç yaklaşık 75 kW ve akım değeri ise yaklaşık 300 A olarak bulunmuştur. Bunun sebebi bataryalardan akım çekildikçe bara geriliminin düşmesi ve istenilen miktarda gücün elde edilebilmesi için daha fazla akım çekilmesi gerekliliği olarak yorumlanabilmektedir. Bu nedenle akım değeri biraz daha fazla çıkmaktadır. 55 Ah kapasitesinde bir Pb-asit bataryadan emniyetli olarak çekilen akım miktarı anlık maksimum 250 A'dır. Bu programda bataryalar modellenirken, bataryadan çekilmesi gereken akım değerine sınır konulamamaktadır. Dolayısıyla ivmelenme için gerekli gücü sağlayacak tüm akım değeri hem batarya hem de jeneratörden çekilmesi gerekirken sadece bataryalardan çekilmiştir. Bu tamamen programdan ve programdaki enerji yönetim

sisteminden kaynaklanmaktadır. Araç 55 km/h'e ivmelendikten sonra yaklaşık 1600 sn (yaklaşık yarım saat), ve bataryaların şarj durumu 0.3 olana kadar sabit bu hızla gitmiştir. Bataryaların şarj durumu 0.3 olduğunda enerji yönetim sistemine göre jeneratör devreye girmiş ve nominal 85 kW güç üretmeye başlayarak bu gücün bir kısmıyla bataryaları şarj etmeye başlamış bir kısmıyla da 55 km/h sabit hız için kullanmıştır. Jeneratör ürettiği yaklaşık 85 kW'lık gücün 20 kW kadarını sabit hız için geri kalanını ise bataryaları şarj etmek için kullanılmıştır.



## 6. SONUÇ

Bu çalışmada, mevcut konvansiyonel 14 kişi oturma kapasitesine sahip M2000 toplu taşıma aracının seri hibrid sistemle tahrik edilebilmesi için gerekli düz yol ve %20 eğimli yokuş için gerekli yol yükü hesaplamaları yapılmıştır. Matlab tabanlı ADVİSOR simülasyon programı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda boş ağırlığı 3600 kg olan ve 2800 dev/dk'da 72 BG ve 1500 dev/dk'da 230 Nm moment üreten M2000 konvansiyonel toplu taşıma aracında aşağıda ifade edilen performans değerleri elde edilmiştir.

- Aracın toplam ağırlığı 1500 kg yolcu ağırlığı da göz önüne alınarak 6000 kg olmuştur.
- M2000 aracı düz yolda hibrid sistemle yaklaşık 24.5 sn'de 80 km/h'e kadar performanslı bir şekilde ivmelenecek ve sadece bataryalardan sağlanan güçle bu sabit hızla gidecektir.
- M2000 aracı düz yolda sadece bataryalardan sağlanan güçle yaklaşık 22.5 sn'de 55 km/h'e kadar ivmelenecektir. Aracın düz yolda ivmelenmesi ve sabit hız için gerekli olan moment değeri elektrik motoruyla sağlanabildiği için transmisyona gerek duyulmamıştır.
- M2000 aracı %20 eğimli yokuşta hibrid sistemle 8.8 sn'de 30 km/h'e kadar performanslı bir şekilde ivmelenecektir.
- M2000 aracı %20 eğimli yokuşta hibrid sistemle maksimum 10 km/h sabit hızla hareket edebilmektedir. Aracın %20 eğimli yokuşu tırmanması durumunda gerekli olan moment değeri elektrik motoru tarafından karşılanamadığından 2.75:1 redüksiyon oranlı bir hız düşürücü kullanılmıştır.

Yukarıda bahsedilen aracın performans değerlerine ve tasarlanan enerji yönetimi sistemine göre, seri hibrid elektrikli araç sadece bataryalardan sağlanan güçle tahrik edildiğinde ve sabit hızla hareket ettiğinde içten yanmalı motor sadece bataryaları şarj etmek amaçlı kullanılacaktır. Böylece yakıt tüketiminde ve emisyon değerlerinde önemli bir düşüş sağlanacaktır. Özellikle bu aracın toplu taşıma aracı olduğu ve yüksek performansın gerekli olmadığı düşünüldüğünde, araç şehir içinde düşük hızlarda sessiz sürüş modunda çalışacaktır. Yakıt tüketiminde ve emisyon iyileştirilmesinin yanında gürültü kirliliği de önemli ölçüde düşecektir.

Ancak ülkemiz ve diğer ülkemiz açısından bakıldığında bu araçların seri üretime geçmesinde aşağıda ifade edilen bazı sorunların çözülmesi gerekmektedir. Bu unsurların gerçekleşmesi durumunda, önümüzdeki 15-20 içerisinde konvansiyonel içten yanmalı motorlu araçlar yerini otomotiv piyasasında elektrikli ve hibrid elektrikli araçlara bırakacağı düşünülmektedir.

- Enerji depolama sistemlerinden yaygın olarak kullanılan bataryaların özgül enerjilerinin elektrikli araçlarının menzilin arttırmak için yüksek, ivmelenme ve yüksek hızlarda istenilen gücün karşılanabilmesi için yüksek güç yoğunluğuna sahip olmasıyla beraber maliyetin azaltılması gerekmektedir.
- Yakıt pillerinde kullanılan hidrojenin üretilmesi ve depolama tekniklerinin geliştirilmesi, ayrıca fosil kökenli yakıtlar kullanıldığı durumda yakıt işleme ünitesinin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Hibrid elektrikli araçlarda kullanılan içten yanmalı motorların boyutlarının ve ağırlığının düşük bunun yanında yüksek güç sağlaması gerekmektedir.
- Özellikle hibrid elektrikli araçlarda çok önemli olan enerji yönetim sisteminin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Elektrikli araç uygulamalarında kullanılacak olan elektrik motorlarının ve generatörlerin ağırlığının azaltılması, boyutlarının küçültülmesi, güvenilir olması ve özellikle bu araçların seri üretime geçmesi , için maliyetin azaltılması gerekmektedir.

Bu çalışma ile birlikte literatürde devam eden çalışmalar kapsamında elde edilen bilgiler ile imzalanan Kyoto protokolüne göre çevre açısından ele alındığında, çevreye dost şehir içi ulaşım sağlanacak, global ısınma azalacak ve istenilen EURO emisyon seviyelerini elde edilmesi yönünde önemli gelişmeler elde edilecektir. Enerji açısından bakıldığında ise otomotiv sektöründe önemli ölçüde yakıt tasarrufu imkanları açığa çıkacaktır.

Petrol bakımından dışa bağımlı olan ve ulaşımın daha çok karayoluyla sağlanması sebebiyle yoğun gürültü ve çevre kirliliği yaşayan ülkemiz açısından ele alındığında, elektrikli araçların bu sorunlara uzun dönemde çözüm sağlayacağı düşünülmektedir. Böylece gelecek nesiller için daha iyi bir yaşam standardı elde edilecektir.

**KAYNAKLAR**

Buchmann, I., (2003), "Batteries in a Portable World", Cadex Electronics Inc, Canada

Çetinkaya, M. ve Kraosmanoğlu, F., (2003), "Yakıt Pilleri", Tesisat Mühendisliği Dergisi, 75:18-32

Husain, I., (2003), "Electric and Hybrid Electric Vehicles", CRC Press, Florida

Larminie, J ve Dicks, A., (2002) "Fuel Cell Systems Explained", John Wiley&Sons, Ltd, England

Öz, İ.H., (1976), "Motorlar Cilt 1", Apraz Matbaacılık, İstanbul

Safgönül, B., Ergeneman, M., Arslan; H.E. ve Soruşbay, C., (1999), "İçten Yanmalı Motorlar", Birsen Yayınevi, İstanbul

Ünlü, N., Karahan, Ş., Tür, O. ve Özsü. E., (2003) "Hibrid Elektrikli Araçlar", Tübitak Matbaası, Gebze

Yavaşlıol, İ., (2003), "Taşt Tekniği 1 Ders Notları", Yıldız Teknik Üniversitesi

Westbrook, M.H., (2001), "The electric and Hibrid Electric Car.", SAE, London.

**İnternet Kaynakları**

[1] [www.otokar.com.tr](http://www.otokar.com.tr)

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	18.08.1979	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1990-1997	Kadıköy Anadolu Lisesi
Lisans	1991-2001	Yıldız Üniversitesi Makine Mühendisliği Fak. Makine Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2001-2003	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Müh. Anabilim Dalı, Enerji Makinaları Programı

**Çalıştığı kurum(lar)**

2001-2002 YTÜ Makine Mühendisliği Fak, Araştırma Görevlisi  
2002-Devam ediyor TÜBİTAK-MAM-Enerji Sistemleri ve Çevre  
Araştırma Enstitüsü, Araştırmacı

